



این کتاب ترجمه‌ای است از:

Systems Engineering and Analysis

Fifth Edition

2011

Benjamin S. Blanchard

*Professor Emeritus of Engineering
and Industrial and Systems Engineering
Virginia Polytechnic Institute and State University*

Wolter J. Fabrycky

*Lawrence Professor Emeritus of Industrial and Systems Engineering
Virginia Polytechnic Institute and State University and
Chairman, Academic Applications International*

مهندسی و تحلیل سیستم‌ها

جلد اول

مولفان: بنجامین.اس. بلانچارد، والتر.جی. فابریکی
مترجمان: دکتر علی اسدی، مهندس علیرضا نیاورانی



سازمان صنایع دفاع
معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری

کلیه حقوق محفوظ و متعلق به سازمان صنایع دفاع است.
هر نوع تکثیر یا نشر تمام یا بخش‌های مستقلی از این کتاب، منوط به اجازه‌ی کتبی ناشر است.

سرشناسه	: بلانچارد، بنجامین اس، ۱۹۲۹ - Blanchard, Benjamin S.
عنوان و نام پدیدآور	: مهندسی و تحلیل سیستم‌ها
مشخصات نشر	: تهران: شرکت پیشرو فناوری قائد، ۱۳۹۴-
مشخصات ظاهری	: ج۲: مصور، جدول، نمودار
شابک	: دوره ۱: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۴۹-۰۸-۱؛ ج ۱: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۴۹-۰۶-۷
یادداشت	: فهرست‌نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است
عنوان اصلی	: Systems Engineering and Analysis
یادداشت	: واژه‌نامه.
شناسه افزوده	: فابریکی، والتر، ۱۹۳۲- م.
شناسه افزوده	: Fabrycky, Walter J.
شناسه افزوده	: اسدی، علی، ۱۳۵۲-، مترجم
شناسه افزوده	: نیاورانی، علیرضا، ۱۳۴۴-، مترجم
شناسه افزوده	: حاجی‌خانین، محمدرضا، ۱۳۴۸-، مترجم
شناسه افزوده	: سازمان صنایع دفاع. معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری

عنوان: مهندسی و تحلیل سیستم (جلد اول)

مولفان: بنجامین اس. بلانچارد، والتر جی. فابریکی

مترجمان: دکتر علی اسدی، مهندس علیرضا نیاورانی

صاحب امتیاز و پدیدآورنده: معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری سازمان صنایع دفاع

نظارت: موسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی - مرکز آینده‌پژوهی علوم و فناوری دفاعی

ناشر: انتشارات شرکت پیشرو فناوری قائد

نوبت چاپ: اول - بهار ۱۳۹۴

شابک جلد اول: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۴۹-۰۶-۷

شابک دوره‌ی دو جلدی: ۹۷۸-۶۰۰-۷۷۴۹-۰۸-۱

تیراژ: ۱۰۰ جلد

قیمت: ۴۵۰۰۰ تومان

مرکز توزیع و پخش:

تهران، بالاتر از چهارراه پاسداران، سه‌راه اختیاریه، سازمان صنایع دفاع، معاونت علوم، تحقیقات و

توسعه فناوری www.idea-sasad.ir ۲۲۷۷۱۲۲۳ - ۰۲۱

تهران، نارمک، بالاتر از میدان نبوت (هفت حوض)، خیابان کیانی ثابت، مجتمع تجاری کیش، طبقه ششم،

واحد ۱۱، انتشارات شرکت پیشرو فناوری قائد ۷۷۲۴۱۰۱۴ - ۰۲۱

سخن مدیرعامل سازمان صنایع دفاع

مطلع کلام را با نام بلند او- تبارک و تعالی- زینت می‌دهیم که خود عین زیبایی است و جز زیبایی را خریدار نیست و هرکه سودای قرب او دارد و یاری عزت‌بخش او را می‌جوید، باید که در خور تقدیم به آستان والای آن عزیز متعالی کار کند و این نیست مگر کاری زیبا، استوار و متقن، که جز با توفیقات و عنایات او فراهم نیاید.

خداوند متعال را شاکرم که در سالی که به فرموده‌ی رهبر معظم انقلاب، سال همدلی و هم‌زبانی است، ترجمه و انتشار کتاب "مهندسی و تحلیل سیستم‌ها" توسط سازمان صنایع دفاع مهیا گردیده است. امروزه، بیش‌تر سازمان‌ها علاقمند به تولید کالا و خدمات به شیوه‌ای بهتر، کارا تر و ارزان‌تر هستند. در عین حال، در فضای فناوری‌های پیچیده با عدم قطعیت‌های زیاد و محیط پویای قرن بیست و یکم، سازمان‌هایی موفق خواهند بود که توانایی مدیریت و کنترل اثربخش این فرایند پیچیده را داشته باشند. این سازمان‌ها نیاز به راهکارهایی با رویکرد جامع و یکپارچه برای کل سازمان دارند و مدیریت اثربخش فرایندهای سازمانی برای موفقیت سازمان امری حیاتی به‌شمار می‌آید. بهبود فرایندها به‌منظور ارتقای کارایی و اثربخشی، مهم‌ترین نکته‌ای است که مهندسی سیستم‌ها به‌دنبال آن است. مهندسی سیستم‌ها به‌دنبال یکپارچگی اجزا بوده و به تعامل میان اجزای و عناصر وابسته به هم می‌پردازد. به بیان دیگر، مهندسی سیستم‌ها، دانش در کنار هم قراردادن اجزا و عناصر مرتبط به هم و برقراری تعامل هدفمند در میان آن‌ها است تا در نهایت به ایجاد هم‌افزایی در یک مجموعه با قابلیت‌ها و توانمندی‌های مشخص، به منظور نیل به اهداف موردنظر منجر گردد.

مهندسی سیستم‌ها به دنبال تبیین شیوه‌ها و الگوهای مدیریتی و راهبری سیستم‌های پیچیده‌ی مهندسی است و در این خصوص ابزارها، رویکردها و فلسفه‌های مهندسی خاصی را توسعه داده است. شاید بتوان گفت طراحی یک سیستم پیچیده‌ی دفاعی بدون توجه به مفاهیم مهندسی سیستم‌ها و بدون استفاده از ابزارهای آن علاوه بر تحمیل هزینه‌های هنگفت در فرایند طراحی، به دلیل بروز خطاهای سیستمی باعث پدید آمدن مسایل و مشکلات عدیده‌ای در حین تست، ساخت نمونه مهندسی و عملیاتی، تولید و بهره‌برداری از سیستم شده و برگشت به عقب‌های زیادی را در طراحی ایجاد خواهد کرد.

هدف سازمان صنایع دفاع این است که با استمداد از عنایات خداوند و توسل به حضرت فاطمه زهرا (س) و نیز همت همکاران، نخبگان و خبرگان اندیشمند، متعهد و دلسوز سازمان، به تالیف، تدوین و ترجمه‌ی منابع دست اول موردنیاز محققان و پژوهشگران اقدام نماید. در کتاب حاضر نیز سعی شده تا با تشریح رویکردها و مدل‌های مهم یک سازمان و روابط و تعاملات آن‌ها، به سازمان‌ها در غلبه بر مشکلات و روان‌سازی عملکرد، یاری رساند. در همین راستا لازم است تا مدیران و پژوهشگران فرهیخته‌ی سازمان صنایع دفاع با شناخت کامل از رویکرد و مدل‌های مهندسی سیستم و به‌کارگیری این مدل‌ها در پروژه‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای سازمان، اقدام به اتخاذ رویکردی جامع برای استفاده از مزایای بی‌شمار مهندسی سیستم‌ها نمایند.

در پایان از زحمات تمامی مدیران و کارشناسان معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری سازمان صنایع دفاع که برای ترجمه‌ی این اثر ارزشمند تلاش نموده‌اند، بی‌نهایت سپاسگزارم و توفیق آن‌ها را از خداوند متعال مسئلت دارم. امید است این کتاب زمینه‌ی استفاده از فنون مهندسی سیستم در سازمان‌های دفاعی کشور را نیز فراهم نماید.

مدیرعامل سازمان صنایع دفاع

دکتر قاسم تقی‌زاده

بهار ۱۳۹۴

پیش‌گفتار

مسئله‌ی پیشرفت علمی و ارتباط علم با فناوری را در کشور
جَدّی بگیرید؛ یعنی نسبت به این مسئله واقعاً هیچ کوتاهی
صورت نگیرد. این مسئله، مسئله‌ی اساسی ما است؛ یکی از
اصلی‌ترین، اساسی‌ترین و فوری‌ترین مسائل ما است.
از بیانات مقام معظم رهبری (مدظله العالی) (۹۳/۴/۱۱)

توجه به ظرفیت‌های تولید درون‌زای علم و دانش بر پایه تحقیق و توسعه موجب نوآوری و
خلق محصولات و فناوری‌های توانمندساز به‌عنوان عامل پیشران حرکت صنایع دانش‌بنیان
خواهد شد.

محققان به‌عنوان سرمایه‌های انسانی دانش‌مدار، رکن اساسی تحقیق و توسعه و کانون
تولید دانش و فناوری محسوب شده و نقش اساسی را در شکستن مرزهای دانش و نوآوری و
کشف راه‌های میان‌بر توسعه علم و فناوری و در نهایت خلق شایستگی و کسب اقتدار بر
عهده دارند و بدون وجود زیرساخت‌های لازم برای مدیریت اثربخش محققان و نخبگان،
حرکت در مسیر چشم‌انداز صنایع بسیار کند خواهد بود.

از این رو معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری ضمن ارج نهادن به محققین دانش با
حمایت از آثار مولفین و مترجمین و انتشار دستاوردهای با ارزش آنان گامی موثر در ترویج و
توسعه دانش برداشته است. بدون تردید رهیافت‌های این عمل پسندیده، آموزه‌های گرانقدری

را برای غنا بخشیدن به اندوخته‌های نظری و بهبود رویکردهای علمی در اختیار محققین و بهره‌برداران قرار خواهد داد.

شاید مهم‌ترین نوآوری انسان، سازمان باشد که بر خلق اجزا تمرکز دارد، اما مهندسی سیستم، راهبردی بهتر ارائه می‌کند. مهندسی سیستم بر آن چه اجزا قرار است انجام دهند، تمرکز دارد. یک سیستم، اجتماع یا ترکیبی از عناصر یا اجزای مرتبط به هم است که تشکیل یک کل واحد را می‌دهند. اما این‌طور نیست که هر مجموعه‌ای از آیتم‌ها، حقایق، روش‌ها یا دستورالعمل‌ها، یک سیستم را به وجود آورد. بلکه یک گروه، هنگامی تبدیل به یک سیستم می‌شود که دارای روابط وظیفه‌ای باشند و هدف مشترکی را دنبال نمایند. این کتاب نیز با سیستم‌هایی سروکار دارد که دارای عناصر فیزیکی و یک هدف مفید هستند، سیستم‌هایی که مربوط به انواع محصولات، سازه‌ها یا خدمات بوده و همچنین آن‌هایی که از مجموعه‌ای از روش‌ها، رویه‌ها، طرح‌ها یا برنامه‌های پیچیده تشکیل شده باشند. کاربرد اصلی این کتاب برای تدریس در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد است. همچنین این کتاب می‌تواند به عنوان یک مرجع برای آموزش‌های شخصی برای عملیاتی نمودن مباحث مهندسی سیستم‌ها در صنایع به کار رود. امید است که مورد توجه محققان و پژوهشگران عزیز قرار گیرد.

در پایان، معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری بر خود لازم می‌داند تا از همه‌ی پژوهشگران و محققانی که با رهنمودها و توصیه‌های ارزشمند خود بر غنای کتاب افزوده‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر نماید.

معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری

پیش‌گفتار مترجمان

مهندسی سیستم فعالیتی برای تعیین خصوصیات، پیاده‌سازی، اعتبارسنجی، مستقرکردن و نگهداری کل سیستم است. مهندسین سیستم با نرم‌افزار، سخت‌افزار، محیط عملیاتی و تعامل با کاربران سیستم سروکار دارند. به‌طور کلی سیستم را به این صورت تعریف می‌کنند: "سیستم مجموعه‌ای نظام‌مند از مولفه‌های مرتبط با یکدیگر است که با هم در تعامل هستند و هدف واحدی را دنبال می‌کنند". این تعریف، دامنه‌ی وسیعی از سیستم‌ها را در بر می‌گیرد. یکی از خواص سیستم این است که ویژگی‌ها و رفتارهای مولفه‌های سیستم، طوری با هم ترکیب می‌شوند که تفکیک‌ناپذیر خواهند بود. عملکرد موفق هر مولفه، بستگی به عملکرد سایر مولفه‌های سیستم خواهد داشت و روابط پیچیده‌ی بین مولفه‌های موجود در سیستم به گونه‌ای است که تنها آن‌ها را باید به صورت یک کل در نظر گرفت.

این کتاب به موضوع مهندسی سیستم‌ها می‌پردازد و بر مهندسی سیستم‌های مصنوعی و تحلیل آن‌ها متمرکز است. فرایند مهندسی سیستم‌ها با شناسایی یک مساله یا نیاز آغاز می‌شود و در ادامه به تعیین نیازمندی‌ها، تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای، ارزیابی و هماهنگ‌سازی طراحی، تصدیق و اعتبار طرح، عملیات و پشتیبانی، حفظ و نگهداری، و بهره‌برداری سیستم توسط

مصرف‌کننده می‌پردازد. هم‌چنین مهندسی سیستم‌ها بر بهبود سیستم‌های موجود تمرکز دارد و برای این منظور از مدل‌ها و روش‌های تحلیل سیستم‌ها به‌عنوان بخشی از فرایند مهندسی سیستم‌ها استفاده می‌کند.

تجربه دهه‌های اخیر نشان داده است که برای این که یک سیستم فنی و عملیاتی طوری تنظیم شود که اثرات جانبی ناخواسته حداقل شود، نیازمند آن است که از یک رویکرد سیستمی ادغامی استفاده گردد که همان چرخه‌ی عمرگرا می‌باشد. بر این اساس، هدف اصلی این کتاب فراهم آوردن ضروریات تفکر سیستمی، مفاهیم، روش‌شناسی، مدل‌ها و ابزار موردنیاز برای درک و اجرای مهندسی سیستم‌ها است که موضوعات مورد استفاده‌ی مهندسان طراحی، تحلیل‌گران سیستم و مدیران فنی خواهد بود.

در پایان مترجمان برخود لازم می‌دانند از حمایت‌های بی‌دریغ مدیرعامل محترم سازمان صنایع دفاع جناب آقای دکتر قاسم تقی‌زاده و هم‌چنین جناب آقای مهندس بابک ملکی شجاع کمال تشکر و قدردانی را نمایند که بدون حمایت‌های ایشان، انجام این کار ممکن نمی‌شد.

امید است ترجمه‌ی این اثر گرانقدر مورد استفاده‌ی سازمان‌های دفاعی کشور و هم‌چنین فرماندهان، مدیران و پژوهشگران قرار گیرد.

مترجمان

بهار ۱۳۹۴

فهرست مطالب

مقدمه.....	۱
بخش اول - معرفی سیستم‌ها.....	۵
فصل ۱ - مهندسی و علم سیستم‌ها.....	۷
۱-۱ تعاریف و عناصر سیستم‌ها.....	۸
۱-۱-۱ عناصر یک سیستم.....	۹
۲-۱ دسته‌بندی سیستم‌ها.....	۱۲
۱-۲-۱ سیستم‌های طبیعی و مصنوعی.....	۱۲
۲-۲-۱ سیستم‌های فیزیکی و مفهومی.....	۱۴
۳-۲-۱ سیستم‌های ایستا و پویا.....	۱۵
۴-۲-۱ سیستم‌های بسته و باز.....	۱۶
۳-۱ علم و علم سیستم‌ها.....	۱۸
۱-۳-۱ سیرنیتیک.....	۱۸
۲-۳-۱ تئوری عمومی سیستم‌ها.....	۲۰

۲۲.....	۳-۳-۱ سیستمولوژی و ترکیب
۲۴.....	۴-۱ فناوری و سیستم‌های فنی
۲۴.....	۱-۴-۱ فناوری و جامعه
۲۵.....	۲-۴-۱ سیستم‌های فنی
۲۷.....	۳-۴-۱ تغییر و رشد فناوریانه
۲۸.....	۵-۱ گذار به عصر سیستم‌ها
۲۸.....	۱-۵-۱ عصر ماشین
۳۰.....	۲-۵-۱ عصر سیستم‌ها
۳۲.....	۳-۵-۱ مهندسی در عصر سیستم‌ها
۳۴.....	۴-۵-۱ آموزش مهندسی برای عصر سیستم‌ها
۳۵.....	۶-۱ مهندسی سیستم‌ها
۳۸.....	۷-۱ خلاصه فصل
۴۷.....	فصل ۲ - خلق سیستم‌ها
۴۹.....	۱-۲ سیستم مهندسی شده
۴۹.....	۱-۱-۲ ویژگی‌های سیستم مهندسی شده
۵۱.....	۲-۱-۲ دسته‌بندی‌های سیستم و محصول
۵۴.....	۳-۱-۲ مهندسی محصول و سیستم
۵۷.....	۴-۱-۲ مهندسی محصول رقابتی
۵۸.....	۲-۲. مهندسی چرخه‌ی عمر سیستم
۵۸.....	۱-۲-۲ چرخه‌های عمر محصول و سیستم
۶۱.....	۲-۲-۲ طراحی برای چرخه‌ی عمر

۳-۲ فرایند مهندسی سیستم‌ها.....	۶۴
۱-۳-۲ گام‌ها و فازهای فرایند چرخه‌ی عمر.....	۶۶
۲-۳-۲ دیگر مدل‌های فرایند مهندسی سیستم‌ها.....	۶۹
۴-۲. ملاحظات طراحی سیستم.....	۶۹
۱-۴-۲ توسعه‌ی معیارهای طراحی.....	۷۶
۲-۴-۲ در نظر گرفتن چند معیار.....	۷۹
۵-۲ ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم.....	۸۲
۱-۵-۲ مورفولوژی ترکیب، تحلیل و ارزیابی.....	۸۲
۲-۵-۲ بحث و بررسی مورفولوژی ۱۰ بلوکی.....	۸۵
۶-۲ استقرار مهندسی سیستم‌ها.....	۸۹
۱-۶-۲ حوزه‌ی کاربرد مهندسی سیستم‌ها.....	۹۰
۲-۶-۲ شناسایی و مدیریت اثرات چرخه‌ی عمر.....	۹۲
۳-۶-۲ منافع بالقوه مهندسی سیستم‌ها.....	۹۵
۷-۲ خلاصه فصل.....	۹۷
بخش دوم - فرایند طراحی سیستم.....	۱۰۳
فصل ۳ - طراحی مفهومی سیستم.....	۱۰۵
۱-۳ تعریف مساله و شناسایی نیاز.....	۱۰۷
۲-۳ برنامه‌ریزی و معماری پیشرفته سیستم.....	۱۰۹
۳-۳ تحلیل امکان‌سنجی و طراحی سیستم.....	۱۱۳
۴-۳ نیازمندی‌های عملیاتی سیستم.....	۱۱۵
۱-۴-۳ تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم.....	۱۱۵

۱۱۷	۲-۴-۳ نمایش نیازمندی‌های عملیاتی سیستم.....
۱۴۰	۵-۳ پشتیبانی و نگهداری و تعمیر سیستم.....
۱۵۰	۶-۳ شاخص‌های عملکرد فنی.....
۱۵۱	۱-۶-۳ شناسایی و ارزیابی TPM.....
۱۵۲	۲-۶-۳ گسترش عملکرد کیفیت.....
۱۵۶	۷-۳ تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای.....
۱۵۷	۱-۷-۳ نمودار بلوکی جریان وظیفه‌ای.....
۱۶۵	۲-۷-۳ تخصیص وظیفه‌ای.....
۱۶۹	۳-۷-۳ معماری سیستم.....
۱۶۹	۸-۳ تحلیل موازنه‌ی سیستم.....
۱۷۲	۹-۳ مشخصات فنی سیستم.....
۱۷۲	۱۰-۳ بازبینی طراحی مفهومی.....
۱۷۵	۱۱-۳ خلاصه فصل.....
۱۸۱	فصل ۴ - طراحی اولیه سیستم.....
۱۸۳	۱-۴ نیازمندی‌های طراحی اولیه.....
۱۸۵	۲-۴ مشخصات فنی توسعه، محصول، فرایند و مواد.....
۱۸۹	۳-۴ تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای (زیرسیستم).....
۱۸۹	۱-۳-۴ فرایند تحلیل وظیفه‌ای.....
۱۹۲	۲-۳-۴ تخصیص نیازمندی‌ها.....
۲۰۲	۳-۳-۴ کاربردهای تحلیل فنی.....
۲۰۳	۴-۴ معیارهای طراحی اولیه.....

۲۱۱	۵-۴ فعالیت طراحی مهندسی
۲۱۴	۶-۴ فناوری‌ها و ابزارهای طراحی مهندسی
۲۱۴	۴-۶-۱ کاربرد ابزارهای رایانه‌ای
۲۱۷	۴-۶-۲ مدل‌های تحلیلی و مدل‌سازی
۲۲۱	۴-۷ مطالعات موازنه و تعریف طراحی
۲۲۵	۴-۸ بازیابی، ارزیابی و بازخورد طراحی
۲۲۹	۴-۹ خلاصه فصل
۲۳۵	فصل ۵ - طراحی و توسعه تفصیلی
۲۳۶	۵-۱ نیازمندی‌های طراحی تفصیلی
۲۳۹	۵-۲ تکامل طراحی تفصیلی
۲۴۴	۵-۳ ادغام عناصر و فعالیت‌های سیستم
۲۴۸	۵-۴ ابزارهای کمکی طراحی
۲۵۰	۵-۵ داده، اطلاعات و ادغام طراحی
۲۵۴	۵-۶ توسعه‌ی مدل‌های مهندسی
۲۵۹	۵-۷ توسعه‌ی نمونه سیستم
۲۵۹	۵-۸ بازیابی، ارزیابی و بازخورد طراحی
۲۶۰	۵-۸-۱ رهگیری و کنترل TPM ها
۲۶۵	۵-۸-۲ رهگیری دیگر ملاحظات طراحی
۲۶۶	۵-۸-۳ انجام بازیابی‌های طراحی
۲۶۷	۵-۹ تلفیق تغییرات طراحی
۲۷۰	۵-۱۰ خلاصه فصل

فصل ۶ - آزمایش، ارزیابی، و اعتبارسنجی سیستم.....	۲۷۵
۱-۶ فرایند آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم.....	۲۷۷
۲-۶ دسته‌بندی‌های آزمایش و ارزیابی سیستم.....	۲۷۹
۱-۲-۶ ارزیابی تحلیلی و شبیه‌سازی.....	۲۸۲
۲-۲-۶ آزمایش نوع ۱.....	۲۸۴
۳-۲-۶ آزمایش نوع ۲.....	۲۸۳
۴-۲-۶ آزمایش نوع ۳.....	۲۸۷
۵-۲-۶ آزمایش نوع ۴.....	۲۸۸
۳-۶ برنامه‌ریزی برای آزمایش و ارزیابی سیستم.....	۲۸۹
۴-۶ آماده‌سازی آزمایش و ارزیابی سیستم.....	۲۹۲
۱-۴-۶ انتخاب آیت‌م(های) آزمایش.....	۲۹۴
۲-۴-۶ دستورالعمل‌های آزمایش و ارزیابی.....	۲۹۴
۳-۴-۶ انتخاب محل آزمایش.....	۲۹۵
۴-۴-۶ کارکنان آزمایش و آموزش.....	۲۹۵
۵-۴-۶ تسهیلات و منابع آزمایش.....	۲۹۵
۶-۴-۶ تجهیزات آزمایش و پشتیبانی.....	۲۹۶
۷-۴-۶ پشتیبانی تامین آزمایش.....	۲۹۶
۵-۶ آزمایش، جمع‌آوری، گزارش‌دهی و بازخورد آزمایش.....	۲۹۸
۱-۵-۶ رسمی کردن جمع‌آوری و رسیدگی به داده‌ها.....	۲۹۸
۲-۵-۶ بازخورد و اصلاح طراحی سیستم.....	۳۰۰
۶-۶ خلاصه فصل.....	۳۰۳

بخش سوم- تحلیل سیستم و ارزیابی طراحی.....	۳۰۹
فصل ۷ - گزینه‌ها و مدل‌ها در تصمیم‌گیری.....	۳۱۱
۱-۷ گزینه‌ها در تصمیم‌گیری.....	۳۱۳
۱-۱-۷ فاکتورهای محدود کننده و راهبردی.....	۳۱۳
۲-۱-۷ مقایسه یکسان گزینه‌ها.....	۳۱۴
۲-۷ مدل‌های تصمیم‌گیری.....	۳۱۵
۱-۲-۷ کلاس‌بندی مدل‌ها.....	۳۱۶
۲-۲-۷ مدل‌ها و آزمایش غیرمستقیم.....	۳۲۰
۳-۲-۷ فرمول‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌های تصمیم.....	۳۲۲
۳-۷ تئوری ارزیابی تصمیم.....	۳۲۳
۱-۳-۷ ارزیابی توسط مدل‌سازی جریان پول.....	۳۲۴
۲-۳-۷ ارزیابی توسط مدل‌سازی بهینه‌سازی اقتصادی.....	۳۲۶
۳-۳-۷ مدل‌ها در طراحی و عملیات.....	۳۳۰
۴-۷ تصمیم‌گیری چند معیاره.....	۳۳۲
۱-۴-۷ ملاحظات چند معیارگی.....	۳۳۳
۲-۴-۷ روش‌های رتبه‌بندی مستقیم.....	۳۳۵
۳-۴-۷ روش‌های حذف نظام‌مند.....	۳۳۷
۴-۴-۷ روش‌های ارزیابی وزنی.....	۳۴۱
۵-۷ نمایش ارزیابی تصمیم.....	۳۴۴
۶-۷ تصمیم‌گیری تحت ریسک و عدم قطعیت.....	۳۴۶
۱-۶-۷ ماتریس ارزیابی تصمیم.....	۳۴۷

۳۴۹	۲-۶-۷ تصمیم‌گیری در قطعیت.....
۳۵۱	۳-۶-۷ تصمیم‌گیری تحت ریسک.....
۳۵۷	۴-۶-۷ تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت.....
۳۶۰	۵-۶-۷ معیار Hurwicz.....
۳۶۴	۷-۷ خلاصه فصل.....
۳۷۵	فصل ۸ - مدل‌های ارزیابی اقتصادی.....
۳۷۷	۱-۸ نرخ بهره و فرمول‌های آن.....
۳۷۸	۱-۱-۸ فرمول مقدار ترکیبی تک‌پرداخت.....
۳۷۹	۲-۱-۸ فرمول تک‌پرداخت مقدار کنونی.....
۳۷۹	۳-۱-۸ فرمول مقدار ترکیبی پرداخت یکسان.....
۳۸۰	۴-۱-۸ فرمول وجه استهلاکی سری پرداخت.....
۳۸۱	۵-۱-۸ فرمول وصول سرمایه سری پرداخت یکسان.....
۳۸۲	۶-۱-۸ فرمول مقدار کنونی سری پرداخت یکسان.....
۳۸۲	۶-۱-۸ خلاصه فرمول‌های بهره.....
۳۸۴	۷-۱-۸ فرمول سری هندسی شیب‌دار.....
۳۸۶	۲-۸ تعیین معادل اقتصادی.....
۳۸۶	۱-۲-۸ محاسبات تعادل فرمول بهره.....
۳۸۹	۲-۲-۸ محاسبات معادل سری هندسی شیب‌دار.....
۳۸۹	۳-۲-۸ نمودارهای تابع معادل.....
۳۹۱	۳-۸ ارزیابی یک گزینه.....
۳۹۴	۱-۳-۸ ارزیابی معادل کنونی.....

۳۹۵	۲-۳-۸ ارزیابی معادل سالانه
۳۹۶	۳-۳-۸ ارزیابی معادل آینده
۳۹۷	۴-۳-۸ ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه
۳۹۹	۵-۳-۸ ارزیابی پرداخت
۴۰۱	۶-۳-۸ هزینه معادل سالانه یک دارایی
۴۰۵	۴-۸ ارزیابی چند گزینه
۴۰۵	۱-۴-۸ ارزیابی معادل کنونی
۴۰۶	۲-۴-۸ ارزیابی معادل سالانه
۴۰۷	۳-۴-۸ ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه
۴۰۸	۴-۴-۸ ارزیابی پرداخت
۴۰۹	۵-۸ ارزیابی در حالت وجود چند معیار
۴۱۲	۶-۸ چند گزینه با چند آینده
۴۱۷	۷-۸ ارزیابی اقتصادی نقطه سر به سر
۴۱۷	۱-۷-۸ ارزیابی ساخت یا خرید
۴۱۹	۲-۷-۸ ارزیابی خرید یا اجاره
۴۲۱	۳-۷-۸ ارزیابی انتخاب تجهیز
۴۲۳	۴-۷-۸ ارزیابی قابلیت سوددهی
۴۲۶	۸-۸ ارزیابی نقطه‌ی سر به سر در شرایط ریسک
۴۲۸	۹-۸ خلاصه فصل
۴۳۹	فصل ۹ - بهینه سازی در طراحی و عملیات
۴۴۱	۱-۹ تئوری بهینه سازی کلاسیک

- ۴۴۱ ۱-۱-۹ شیب یک تابع
- ۴۴۲ ۲-۱-۹ اصول حساب دیفرانسیل
- ۴۴۷ ۳-۱-۹ مشتق گیری نسبی
- ۴۴۸ ۴-۱-۹ بهینه سازی بدون محدودیت
- ۴۵۲ ۲-۹ بهینه سازی کلاسیک غیر محدود
- ۴۵۲ ۱-۲-۹ بهینه سازی سرمایه گذاری یا هزینه اولیه
- ۴۵۹ ۲-۲-۹ بهینه سازی هزینه چرخه ی عمر
- ۴۶۲ ۳-۲-۹ عمر بهینه تجهیز
- ۴۷۲ ۴-۲-۹ بهینه سازی تدارکات و عملیات موجودی
- ۴۸۶ ۳-۹ بهینه سازی کلاسیک با محدودیت
- ۴۸۷ ۱-۳-۹ طراحی پل با عرض محدود
- ۴۸۸ ۲-۳-۹ عملیات موجودی با محدودیت فضا
- ۴۹۴ ۴-۹ بهینه سازی چند معیاره
- ۴۹۵ ۱-۴-۹ ارجحیت طراحی روبنا
- ۴۹۶ ۲-۴-۹ ارجحیت منبع خرید
- ۴۹۸ ۵-۹ بهینه سازی با محدودیت توسط برنامه ریزی خطی
- ۴۹۸ ۱-۵-۹ روش های بهینه سازی گرافیکی
- ۵۰۶ ۲-۵-۹ الگوریتم بهینه سازی سیمپلکس
- ۵۱۲ ۳-۵-۹ عملیات بهینه سازی و طراحی توسط LP
- ۵۱۳ ۶-۹ خلاصه فصل

فصل ۱۰ - تئوری و تحلیل صف.....	۵۲۷
۱-۱۰ سیستم صف.....	۵۲۹
۱-۱-۱۰ مکانیسم ورود.....	۵۲۹
۱-۱-۱۰ خط انتظار.....	۵۳۱
۱-۱-۳۰ مکانیسم خدمت‌دهی.....	۵۳۳
۱-۱-۴۰ ارزیابی سیستم صف.....	۵۳۴
۲-۱۰ تحلیل مونت کارلو برای صف.....	۵۳۵
۱-۲-۱۰ توزیع‌های ورود و زمان خدمت‌دهی.....	۵۳۶
۲-۲-۱۰ تحلیل مونت کارلو.....	۵۳۷
۱-۲-۳۰ ارزیابی اقتصادی نتایج.....	۵۴۰
۳-۱۰ مدل‌های صف تک کاناله.....	۵۴۰
۱-۳-۱۰ احتمال وجود n واحد در سیستم.....	۵۴۱
۲-۳-۱۰ میانگین تعداد واحدهای در سیستم.....	۵۴۷
۳-۳-۱۰ میانگین طول صف.....	۵۴۹
۴-۳-۱۰ توزیع زمان انتظار.....	۵۵۰
۵-۳-۱۰ نرخ خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه.....	۵۵۴
۴-۱۰ مدل‌های صف با چند کانال.....	۵۵۶
۱-۴-۱۰ میانگین طول صف.....	۵۵۸
۲-۴-۱۰ میانگین تعداد واحدهای در سیستم.....	۵۵۹
۳-۴-۱۰ میانگین زمان انتظار.....	۵۵۹
۴-۴-۱۰ میانگین تاخیر.....	۵۵۹

۵۶۰	۵-۱۰ صف با خدمت‌دهی غیرنمایی.....
۵۶۱	۱-۵-۱۰ ورود پواسون با زمان خدمت ثابت
۵۶۳	۲-۵-۱۰ ورود پواسون و هر توزیع از زمان خدمت‌دهی
۵۶۵	۶-۱۰ مدل‌های صف با جمعیت محدود.....
۵۶۵	۱-۶-۱۰ تئوری صف محدود
۵۷۰	۲-۶-۱۰ جداول صف محدود
۵۷۲	۳-۶-۱۰ تعداد کانال‌های سرویس تحت کنترل
۵۷۴	۴-۶-۱۰ میانگین زمان خدمت تحت کنترل.....
۵۷۶	۵-۶-۱۰ فاکتور خدمت‌دهی تحت کنترل
۵۷۹	۷-۱۰ خلاصه فصل.....
۵۸۷	فصل ۱۱ - مفاهیم و روش‌های کنترل
۵۸۹	۱-۱۱ برخی مفاهیم پایه کنترل
۵۹۰	۱-۱-۱۱ عناصر یک سیستم کنترل.....
۵۹۲	۲-۱-۱۱ انواع سیستم‌های کنترل
۵۹۳	۳-۱-۱۱ کنترل بازخورد و پاسخ.....
۵۹۳	۴-۱-۱۱ اطلاعات به‌عنوان واسطه کنترل
۵۹۵	۲-۱۱ کنترل فرایند آماری
۵۹۸	۳-۱۱ چارت‌های کنترل آماری
۵۹۸	۱-۳-۱۱ چارت‌های کنترل برای متغیرها.....
۶۰۷	۲-۳-۱۱ چارت‌های کنترل برای صفات
۶۱۵	۴-۱۱ سیاست کنترل بهینه

۱۱-۵ کنترل پروژه با PERT و CMP	۶۲۰
۱۱-۵-۱ روش‌های مسیر بحرانی	۶۲۱
۱۱-۵-۲ تکنیک ارزیابی و بازبینی دستور کار	۶۳۲
۱۱-۶ کنترل کیفیت جامع	۶۴۰
۱۱-۶-۱ طراحی آزمایش	۶۴۰
۱۱-۶-۲ طراحی پارامتر	۶۴۱
۱۱-۶-۳ مهندسی کیفیت	۶۴۳
۱۱-۷ خلاصه فصل	۶۴۶
پیوست الف: تحلیل وظیفه‌ای	۶۵۷
پیوست ب: چک لیست‌های طراحی و مدیریت	۶۶۵
اختصارات	۶۷۵
واژه‌نامه	۶۸۳
منابع و کتاب‌شناسی	۶۹۵



مقدمه

این کتاب به موضوع سیستم‌ها می‌پردازد و بر مهندسی سیستم‌های مصنوعی و تحلیل آن‌ها متمرکز است. مورد اول، بر فرایند ایجاد یک سیستم تأکید دارد که با شناسایی یک مساله یا نیاز آغاز شده و در ادامه به تعیین نیازمندی‌ها، تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای، ارزیابی و هماهنگ‌سازی طراحی، تصدیق و اعتبار طرح، عملیات و پشتیبانی، حفظ و نگهداری، و بهره‌برداری سیستم توسط مصرف‌کننده می‌پردازد. مورد دوم بر بهبود سیستم‌های موجود تمرکز دارد. مدل‌ها و روش‌های تحلیل سیستم‌ها، بخشی از فرایند مهندسی سیستم‌ها هستند که در واقع این کتاب در حوزه‌ی این مبحث کلی‌تر جای می‌گیرد.

سیستم‌ها را می‌توان به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی کرد. سیستم‌های طبیعی توسط فرایندهای طبیعی پدیدار می‌شوند. سیستم‌های ساخت انسان یا همان سیستم‌های فنی از طریق دخالت انسان در نظام طبیعت و با استفاده از فناوری به عنوان اجزا، صفات و روابط سیستم ظهور پیدا می‌کنند. انواع و گوناگونی سیستم‌های فنی بی‌شمار بوده و در حوزه‌ی فعالیت‌های

انسانی قرار می‌گیرند که شامل ارتباطات، دفاع، آموزش، سلامت، تولید، حمل و نقل و غیره می‌شود.

از طریق گام‌های تکرار شونده تحلیل، ارزیابی، اصلاح، و بازخورد، بیش‌تر سیستم‌های موجود را می‌توان در زمینه اثربخشی عملیاتی، کیفیت محصول، حفظ و نگهداری و رضایت سهام‌داران بهبود داد.

تجربه‌ی دهه‌های اخیر اذعان دارد برای این که یک سیستم فنی عملیاتی طوری تنظیم شود که اثرات جانبی ناخواسته حداقل باشد، نیازمند استفاده از یک رویکرد سیستمی ادغامی است که چرخه‌عمرگرا^۱ باشد. بر این اساس، هدف اصلی این کتاب فراهم آوردن ضروریات تفکر سیستمی، مفاهیم، متدولوژی‌ها، مدل‌ها و ابزار موردنیاز برای درک و اجرای مهندسی سیستم‌ها در اکثر سیستم‌های مصنوعی است. این موضوعات مورد استفاده مهندسان طراحی، تحلیل‌گران سیستم و مدیران فنی خواهد بود.

موضوعات ارائه شده در این کتاب در ۶ بخش سازماندهی شده است که شامل ۱۹ فصل و ۲ پیوست می‌شود. بخش اول به معرفی سیستم‌ها و مهندسی سیستم‌ها در حوزه‌ی علم سیستم می‌پردازد و مسیر عملی و مهندسی ایجاد یک سیستم را بیان می‌دارد. بخش دوم فرایند طراحی سیستم را مورد بررسی قرار داده است که این فرایند به‌صورت گام‌هایی تکاملی از شناسایی یک نیاز تا طراحی مفهومی، طرح اولیه، طراحی تفصیلی و توسعه مدل تا آزمایش و ارزیابی را شامل می‌شود. بخش سوم، روش‌ها و مدل‌های متعدد و مفید ریاضی برای تحلیل سیستم‌ها را تشریح می‌کند و بر ادغام مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌ها به‌عنوان بخشی از فرایند مهندسی سیستم‌ها تاکید دارد. بخش چهارم، طراحی برای امکان‌سنجی عملیاتی از طریق آزمایش خصوصیتی از طراحی که برای سیستم عملیاتی و رضایت کاربر بیش‌ترین اهمیت را دارد، مورد بحث و بررسی

1. Life cycle-oriented

قرار می‌دهد. فصل‌های تدوین شده در بخش چهارم، بر قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، قابلیت بهره‌برداری (فاکتورهای انسانی)، پشتیبانی، قابلیت تولید، قابلیت تحویل به کاربر نهایی، قابلیت حفاظت و مقرون به صرفه بودن (هزینه چرخه‌ی عمر) تکیه دارد. بخش پنجم به‌صورت کلی به مدیریت مهندسی سیستم‌ها می‌پردازد که در یک فصل بر برنامه‌ریزی و سازماندهی تمرکز داشته و در فصل دیگر کنترل و مدیریت برنامه‌ها را تشریح می‌کند. بخش ششم نیز شامل یک سری پیوست تکمیلی و مفصل است که موضوعات خاص و چک لیست‌ها را فراهم می‌کند.

کاربرد اصلی این کتاب برای تدریس در کلاس در سطح کارشناسی و کارشناسی ارشد خواهد بود. هم‌چنین می‌تواند به‌عنوان یک استاندارد پس از آموزش و مرجع شخصی برای عملیاتی کردن حرفه‌ای در صنعت و تجارت به کار رود. کتاب بیش از ۳۰۰ مثال، در حدود ۴۵۰ تمرین و ۲۰۰ منبع و فهرست دسته بندی شده برای فرایند مهندسی سیستم‌ها را فراهم آورده است. بسیاری از مثال‌ها و کاربردهای مطرح شده از تجارب صنعتی و تحقیقاتی مولفان مختلف در زمینه‌ی مهندسی و تحلیل سیستم‌ها در چندین دهه اقتباس شده و توسعه داده شده است.

کتاب‌های دیگر Prentice Hall مولفان این کتاب، پیش‌زمینه و برخی موارد اولیه را که این کتاب بر پایه آن‌ها نوشته شده است، فراهم می‌کند. این کتاب‌ها حوزه‌های تحقیق در عملیات کاربردی و علم مدیریت، تحلیل تصمیم اقتصادی، اقتصاد مهندسی، مدیریت و سازماندهی مهندسی، هزینه چرخه‌ی عمر و تحلیل‌های اقتصادی، مدیریت و مهندسی لجستیک، و تحلیل سیستم‌های انبارداری و تدارکات را پوشش می‌دهند. اما آن‌چه در تدریس و تالیف ما اهمیت دارد ایجاد انگیزه، راهنمایی و انتقادات باارزش صدها دانشجو و افراد حاضر در صنعت طی سالیان متمادی است. ما از تک تک این افراد که ما را در این راستا تشویق کردند، سپاس‌گزاری کرده و هم‌چنین مسئولیت کامل غیرمفید بودن کتاب‌های چاپ شده را می‌پذیریم.

Pearson محصولات بسیار متنوعی برای تسهیل یادگیری در سراسر دنیا فراهم آورده است. در کشورهای خارج از ایالات متحده، برخی محصولات و خدمات مرتبط با این کتاب ممکن است به علت قوانین کپی رایت و محدودیت‌های انتشار در دسترس نباشد.

اگر سوالی برای شما مطرح است، می‌توانید با دفتر محلی خود از طریق سایت www.pearsonhighered.com/international ارتباط برقرار کرده یا با نمایندگی Pearson محل زندگی خود تماس حاصل فرمایید.

بنجامین.اس. بلانچارد

بخش اول - معرفی سیستم‌ها

دو فصل، بخش اول این کتاب را تشکیل می‌دهد. فصل اول، با تکیه بر علم و مهندسی سیستم‌ها، پیش‌نیازهای ضروری برای بررسی کلی فرایند ایجاد سیستم‌های ساخت مصنوعی، یا همان سیستم‌های مهندسی شده (که در فصل ۲ بحث می‌شود) را فراهم می‌کند. این فصول سیستم‌ها را از دو دیدگاه مهندسی و علمی معرفی می‌کند. این دو دیدگاه همراه با هم یک پایه و اساس مفهومی را برای تلفیق، تحلیل و ارزیابی سیستم‌های مهندسی شده فراهم می‌آورد. سیستم‌های مهندسی شده در مرکز توجه این کتاب قرار دارد.

موضوعات مورد بحث در فصل ۱ با تعاریف کلی سیستم آغاز شده و با تعریف امروزی مهندسی سیستم‌ها پایان می‌یابد. بین این دو دسته تعریف شده یک بحث مفهومی از عناصر سیستم، دسته‌بندی سطح بالای سیستم‌ها، خلاصه‌ای از علم و علم سیستم‌ها، دیدگاهی از فناوری به‌عنوان سرمنشا سیستم‌های فنی، و یک دید کلی در مورد گذار به عصر سیستم‌ها وجود دارد. سپس نیازمندی‌های پایه برای مهندسی موفق در عصر سیستم‌ها به‌عنوان پیش‌نیازهای معرفی، تفسیر و تعریف مهندسی سیستم‌ها ارائه شده است.

فصل ۲ با تعریف و توصیف سیستم‌های مهندسی شده و تمایز آن‌ها از سیستم‌های طبیعی آغاز می‌شود. در این توضیحات به اهمیت روابط بین محصول و سیستم، دسته‌بندی محصول و سیستم، و درک اهمیت اقتصادی محصول رقابتی پرداخته می‌شود. سپس مهندسی چرخه‌ی عمر محصول به‌عنوان پایه‌ی اساسی برای ایجاد سیستم‌های مهندسی، استقرار سیستم توسط طراحی چرخه‌ی عمر، و خطوط راهنمای فرایند مهندسی سیستم‌ها پیشنهاد می‌شود. برای تکمیل مباحث، برخی دیگر از مدل‌های فرایند مهندسی سیستم‌ها معرفی شده است. پس از آن یک ادبیات یکپارچه‌کننده برای ترکیب، تحلیل و ارزیابی و ایجاد نظم و فهم در درک سیستم تشریح می‌شود. در نهایت، اهمیت و سودمندی سرمایه‌گذاری و استقرار تفکر سیستمی و مهندسی سیستم‌ها در ابتدای چرخه‌ی عمر سیستم مورد تاکید قرار گرفته است.

بخش اول این کتاب به تنهایی می‌تواند یک بخش آموزشی باشد. این بخش، یک معرفی سطح بالا از سیستم‌ها، علم سیستم‌ها، مهندسی، و مهندسی سیستم‌ها که برای بحث مدیریت فنی و مهندسی مناسب می‌باشد، فراهم کرده است. فصول بعدی کتاب تنها هنگامی باید مورد مطالعه قرار گیرد که اصول تشریح شده در فصول ۱ و ۲ به‌خوبی درک شده باشد. مطالعه و تحقیق ورای این اصول برای افرادی که تنها نیاز به مطالعه کلی مهندسی سیستم‌ها و اصول علم سیستم‌ها دارند، اختیاری است.

مهندسی و علم سیستم‌ها

گسترده‌ی سیستم‌ها به اندازه‌ی دنیایی است که در آن قرار دارند. آن‌ها به بزرگی کل هستی بوده یا می‌توانند به کوچکی یک اتم باشند. سیستم‌ها در ابتدا به صورت طبیعی ظاهر شدند، اما با ظهور انسان، سیستم‌های مصنوعی گوناگونی پا به عرصه ظهور گذاشتند. در دهه‌های اخیر، ما به صورت علمی شروع به فهم ساختار پایه و خصوصیات سیستم‌های طبیعی و مصنوعی کرده‌ایم.

در این فصل، برخی تعاریف سیستم و مفاهیم علم سیستم‌ها ارائه شده است تا به عنوان یک پایه و اساس برای مطالعه بر روی مهندسی و تحلیل سیستم‌ها به کار رود که شامل تعاریف و خصوصیات سیستم، طبقه‌بندی سیستم‌ها به انواع مختلف، وضعیت فعلی علم سیستم‌ها و بحث در مورد گذار به عصر سیستم‌ها می‌شود. در آخر این فصل، فناوری را معرفی کرده و به طبیعت و نقش مهندسی در عصر سیستم‌ها پرداخته می‌شود.

پس از اتمام این فصل، خواننده دید موردنیاز را در مورد سیستم‌ها و تفکر سیستمی با گرایش به مهندسی و تحلیل سیستم‌ها، کسب می‌نماید. تعاریف سیستم، دسته‌بندی‌ها و مفاهیمی که در این بخش ارائه شده است، به‌منظور فراهم ساختن فهم عمومی موارد زیر تالیف شده است:

- دسته‌بندی سیستم‌ها، تشابه و تفاوت‌های آن‌ها؛
 - تمایز بنیادین سیستم‌های طبیعی و مصنوعی؛
 - عناصر یک سیستم و جایگاه سیستم در سلسله مراتب سیستم‌ها؛
 - حوزه‌ی علم سیستم‌ها با مدنظر قرار دادن علم سیبرنتیک، تئوری عمومی سیستم‌ها و سیستمولوژی؛
 - فناوری به‌عنوان پدر خلق سیستم‌های فنی و شناسایی اثر آن بر طبیعت؛
 - گذار از عصر ماشین یا همان عصر صنعتی به عصر سیستم‌ها همراه با شناسایی آثار آن بر مردم و جامعه؛
 - پیچیدگی و چشم‌انداز سیستم و نیازمندی‌های ایجاد شده در مهندسی و عصر سیستم‌ها؛
 - گستره‌ی تعاریف امروزی مهندسی سیستم‌ها که در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- آخرین قسمت این فصل، خلاصه‌ای از مفاهیم و ایده‌های کلیدی متعلق به علم و مهندسی سیستم‌ها را ارائه می‌نماید که با منابع منتخب برای بررسی و مطالعه‌ی بیش‌تر تکمیل شده است.

۱-۱- تعاریف و عناصر سیستم‌ها

یک سیستم، اجتماع یا ترکیبی از عناصر یا اجزای مرتبط با هم بوده و تابعی است که تشکیل یک کل واحد می‌دهد، مانند سیستم یک رودخانه یا یک سیستم حمل و نقل. این‌طور نیست که هر مجموعه‌ای از آیتم‌ها، حقایق، روش‌ها یا دستورالعمل‌ها، یک سیستم را به‌وجود آورد. یک گروه تصادفی از آیتم‌ها در یک اتاق، تشکیل مجموعه‌ای با روابط محدود بین آیتم‌ها را می‌دهند، اما

صلاحیت تشکیل یک سیستم را ندارند، زیرا فاقد روابط وظیفه‌ای^۱ هستند. این کتاب، اساسا با سیستم‌هایی سر و کار دارد که دارای عناصر فیزیکی با یک هدف مفید هستند، سیستم‌هایی که مربوط به انواع محصولات، سازه‌ها یا خدمات بوده و همچنین آن‌هایی که از مجموعه‌ای از روش‌ها، رویه‌ها، طرح‌ها یا برنامه‌های پیچیده تشکیل شده باشند.

۱-۱-۱- عناصر یک سیستم

سیستم‌ها از اجزاء، صفات و روابط تشکیل شده‌اند. این موارد به صورت زیر تشریح می‌شوند:

۱. /جزء/ بخش‌های مختلف یک سیستم را شامل می‌شوند.
 ۲. صفات، ویژگی‌های (خصوصیات، ساختار، کیفیت‌ها، محدودیت‌ها و وضعیت) اجزای سیستم و خود سیستم به عنوان یک کل است.
 ۳. روابط بین زوج اجزای متصل شده، که در نتیجه‌ی مهندسی، دارای صفات هر دو جزء می‌باشند، به صورتی که هر زوج با یکدیگر عملیات خود را برای رسیدن به هدف سیستم و به صورت اثربخش انجام دهند.
- حالت، وضعیت (شرایط یا محل) یک سیستم یا یک جزء سیستم در یک نقطه‌ی زمانی مربوط به خصوصیات و روابط آن سیستم است. وضعیت یک سیستم طی زمان تنها از مسیرهای خاصی تغییر می‌کند، مانند حالت روشن یا خاموش در یک کلید الکتریکی. یک سری متصل به هم از تغییرات در حالت سیستم، یک رفتار را می‌سازد. مجموعه‌ی همه‌ی رفتارها همراه با توالی و زمان‌بندی نسبی آن‌ها، فرایند را تشکیل می‌دهد. فرایند یک جزء ممکن است از طریق فرایند یک جزء دیگر کنترل شود.
- یک سیستم در حقیقت یک مجموعه از اجزای کارکردی مرتبط به هم می‌باشد که هدف مشترکی را دنبال می‌کند.

1. Functional relationships

مجموعه‌ی اجزاء، نیازمندی‌های زیر را برآورده می‌کند:

۱. ویژگی‌ها و رفتار هر جزء از مجموعه، اثری بر ویژگی‌ها و رفتار مجموعه به‌عنوان یک کل خواهد داشت.
 ۲. ویژگی‌ها و رفتار هر جزء از مجموعه، به ویژگی‌ها و رفتار حداقل یکی از اجزای دیگر در مجموعه بستگی دارد.
 ۳. هر زیرمجموعه‌ی ممکن از تجهیزات، باید دو نیازمندی بالا را داشته باشد؛ اجزا را نمی‌توان به زیرمجموعه‌های مستقل تقسیم کرد.
- نیازمندی‌های ذکر شده تضمین می‌کند که مجموعه اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک سیستم، همیشه دارای خصوصیات یا الگوی رفتاری باشند که هیچ یک از زیرمجموعه‌های آن به تنهایی از خود نشان ندهند. یک سیستم، فراتر از مجموعه اجزای آن است. با این حال، اجزای یک سیستم می‌توانند خود یک سیستم باشند و هر سیستم ممکن است بخشی از یک سیستم بزرگ‌تر در یک ساختار سلسله‌مراتبی باشد.
- هنگام طراحی یک سیستم، هدف آن باید به روشنی تعریف و درک شود تا اجزای سیستم برای فراهم کردن وظایف مطلوب مانند یک خروجی مطلوب برای هر مجموعه‌ای از ورودی‌ها، مهندسی شود. به‌محض تعریف هدف، استخراج شاخص‌های اثربخشی که چگونگی کارکرد سیستم را مشخص می‌کنند، ممکن می‌شود. دستیابی به‌هدف یک سیستم مصنوعی و تعریف شاخص‌های اثربخشی اغلب چالش برانگیز است.
- فعالیت هدفمند که توسط یک سیستم انجام می‌شود، وظیفه‌ی آن سیستم است. یک وظیفه‌ی متداول سیستم، تغییر مواد، انرژی یا اطلاعات است. سیستم، تغییر ورودی را دریافت کرده، پردازش می‌کند و خروجی را فراهم می‌آورد. برخی مثال‌ها از این موضوع عبارتست از پردازش

مواد در یک سیستم تولید یا در یک سیستم هاضمه، تبدیل زغال سنگ به برق در یک نیروگاه و پردازش اطلاعات در یک سیستم رایانه‌ای یا یک سیستم خدمات مشتری.

سیستم‌هایی که مواد، انرژی یا اطلاعات را تغییر می‌دهند، از اجزای ساختاری، اجزای عملیاتی و اجزای جریانی تشکیل شده‌اند. *اجزای ساختاری*، بخش‌های ایستا هستند؛ *اجزای عملیاتی*، بخش‌هایی هستند که پردازش را انجام می‌دهند؛ *اجزای جریانی*، مواد، انرژی یا اطلاعاتی هستند که تغییر می‌کنند.

اجزای سیستم، دارای صفاتی هستند که تعیین می‌کنند نقش و وظیفه‌ی هر جزء در سیستم چیست. مثال‌هایی از صفات اجزا عبارت‌اند از رنگ یک اتومبیل (یک خصوصیت)، مقاومت یک تیر فولادی (یک کیفیت)، تعداد و چیدمان ستون‌های پل (یک پیکربندی)، ظرفیت یک مدار الکتریکی (نیرو)، حداکثر سرعت مجاز در یک توربین (یک محدودیت) و این که آیا یک فرد روی خط تلفن در حال صحبت است یا نه (یک وضعیت). مثالی از یک صفت سطح سیستم، طول باند موردنیاز برای فرود و خروج یک هواپیما در یک فرودگاه است. نیازمندی طول باند توسط صفات و روابط هواپیما به‌عنوان یک جزء و توسط صفات ساختاری سیستم حمل و نقل هوایی معین می‌شود.

تنها یک رابطه بین دو و تنها دو جزء بر پایه صفات آن‌ها وجود دارد. دو جزء به‌طورمستقیم به‌هم متصل هستند، اگرچه به‌صورت فیزیکی کنار هم نباشند. در یک سیستم با دو یا چند جزء، حداقل یکی از اجزای در ارتباط باهم، دارای یک رابطه با جزء دیگر است. در یک رابطه، هر جزء چیزهایی را فراهم می‌کند که دیگر اجزا به آن نیاز دارند، به‌صورتی که نقش خود را در وظیفه‌ی سیستم ایفا کند. برای تشکیل یک رابطه با حداکثر اثربخشی، صفات هر جزء باید مهندسی شود تا عملکرد تعاملی دو جزء بهینه شود.

روابطی که از نظر وظیفه‌ای برای هر دو جزء ضروری هستند، به عنوان روابط درجه اول شناخته می‌شوند. همزیستی مثالی از این دست است که دو ارگانیسم نامشابه را برای بهره‌مندی از یکدیگر به هم مرتبط می‌کند. روابط درجه دوم که سینرژیستیک نامیده می‌شود، آن‌هایی هستند که تکمیلی بوده و به عملکرد سیستم اضافه می‌شوند. افزونگی در یک سیستم هنگامی به وجود می‌آید که اجزای اضافی برای ایجاد اطمینان از پیوستگی کارکرد سیستم هنگام خرابی جزء مطرح می‌شود.

۱-۲- دسته‌بندی سیستم‌ها

سیستم‌ها برای ایجاد سادگی دسته‌بندی می‌شوند تا بتوان نسبت به وسعت آن‌ها دید مناسبی داشت. در این قسمت، دسته‌بندی از طریق تعداد زیادی از دوگانگی‌ها انجام می‌شود تا به صورت مفهومی، مشابهت‌ها و تضادهای سیستم را در مقابل هم قرار دهد. توضیح‌های ارائه شده در مورد سیستم‌های طبیعی و مصنوعی، سیستم‌های فیزیکی و مفهومی، سیستم‌های ایستا و پویا و سیستم‌های باز و بسته در ادامه آورده شده است.

۱-۲-۱- سیستم‌های طبیعی و مصنوعی

منشا سیستم‌ها، مهم‌ترین فرصت برای دسته‌بندی سیستم‌ها را در اختیار قرار می‌دهد. سیستم‌های طبیعی، آن‌هایی هستند که در اثر فرایندهای طبیعی شکل گرفته‌اند. سیستم‌های مصنوعی، آن‌هایی هستند که با دخالت انسان و توسط اجزاء، صفات و روابط به وجود آمده‌اند. یک سیستم اصلاح شده توسط انسان، یک سیستم طبیعی است که در آن یک سیستم مصنوعی در یک سیستم طبیعی ادغام شده است.

همه‌ی سیستم‌های مصنوعی، هنگامی که تشکیل می‌شوند، در طبیعت قرار خواهند گرفت. اغلب بین سیستم‌های طبیعی و مصنوعی واسطه‌ای وجود دارد. هر کدام از این سیستم‌ها بر

دیگری به نحوی اثرگذار است. اثر سیستم‌های مصنوعی بر طبیعت تنها اخیراً مورد مطالعه و توجه قرار گرفته است، مخصوصاً در مواردی که این آثار زیانبار باشد در برخی از موارد، این مطالعات با در نظر گرفتن سیستم طبیعی به عنوان سیستم اصلاح شده توسط انسان، آن را مورد تحلیل قرار داده‌اند تا روند بررسی آن آسان‌تر گردد.

هنگامی که یک سیستم مصنوعی طراحی می‌شود، آثار زیانبار آن را می‌توان حداقل کرد و برخی اوقات می‌توان سیستم طبیعی را بهبود بخشید - که این کار توسط مهندسی سیستم‌های اصلاح شده‌ی بزرگ‌تر و به جای مهندسی سیستم‌های مصنوعی انجام می‌گیرد. اگر تحلیل، ارزیابی و تصدیق اعتبار سیستم اصلاح شده مناسب باشد، آن‌گاه مرز سیستم محیط، باید مرز سیستم اصلاح شده را نیز شامل شود.

سیستم‌های طبیعی، درجه بالایی از نظم و تعادل را از خود نشان می‌دهند. فصل‌ها، زنجیره‌ی غذایی، چرخه‌ی آب و غیره گواه این مطلب است. هر رخدادی در طبیعت همراه با یک انطباق مناسب با دیگر اجزای طبیعت است و یکی از مهم‌ترین خاصیت سیستم‌های طبیعی در این است که جریان مواد در یک چرخه قرار دارد. در طبیعت هیچ بن‌بستی نیست، ضایعات تولید نمی‌شود و تنها گردش پیوسته اجزای سیستم و تولید دوباره‌ی اجزا در جریان است.

سیستم‌های مصنوعی اخیراً ظهور پیدا کرده‌اند. این سیستم‌ها، دنیای ساخت انسان را به وجود می‌آورد که مهندس ارشد آن انسان است. تکامل سریع انسان به صراحت مشخص نشده است، اما حضور آن‌ها، طبیعت را به شدت تحت تاثیر قرار داده و اغلب نتایج آن زیانبار می‌باشد. از آنجایی که موجودات اولیه، فناوری‌های قوی و فراگیر را توسعه نداده بودند، اثر ناچیزی بر طبیعت داشتند.

یک مثال از اثر سیستم‌های مصنوعی بر سیستم‌های طبیعی، مشکلات حاصل شده از ساخت سد اسوان در رودخانه نیل است. نتیجه‌ی ساخت چنین سد عظیمی، اطمینان از آن است که نیل

هرگز دوباره طغیان نکنند، یعنی حل مشکلی که از دیرباز وجود داشته است. با این حال، مشکلات متعددی پدیدار شد. زنجیره‌ی غذایی در شرق مناطق مدیترانه‌ای از هم گسسته شد و در نتیجه، صنعت شیلات دچار رکود شد. دلتای نیل دچار فرسایش سریع گردید و خاک شور به سمت شمال مصر به حرکت درآمد. دیگر رشد جمعیت بیلهارزیا (یک انگل حلزونی آبی) توسط خشکی دوره‌ای محدود نبود و باعث ایجاد بیماری اپیدمیک در اطراف رودخانه‌ی نیل گردید. این آثار جانبی توسط افرادی که مسئول پروژه بودند، به خوبی پیش‌بینی نشده بود. یک نگاه سیستمی که شامل عناصر طبیعی و مصنوعی به‌عنوان یک سیستم اصلاح شده باشد می‌توانست راه‌حل بهتری برای مشکل طغیان رودخانه نیل ارائه دهد.

۱-۲-۲- سیستم‌های فیزیکی و مفهومی

سیستم‌های فیزیکی، آن‌هایی هستند که به فرم فیزیکی ظهور پیدا می‌کنند. این سیستم‌ها از اجزای واقعی تشکیل شده‌اند و می‌توان آن‌ها را در مقابل سیستم‌های مفهومی قرار داد که در آن‌ها، علائمی است که خواص اجزای سیستم را نمایش می‌دهند. ایده‌ها، برنامه‌ها، مفاهیم و فرضیه‌ها، مثال‌هایی از سیستم‌های مفهومی هستند.

یک سیستم فیزیکی، فضای فیزیکی نیاز دارد، درحالی‌که سیستم‌های مفهومی یک سازماندهی از ایده‌ها هستند. یک نوع از سیستم‌های مفهومی، مجموعه‌ای از برنامه‌ها و مشخصات برای یک سیستم فیزیکی پیش از ایجاد سیستم موردنظر می‌باشد. یک سیستم فیزیکی پیشنهادی، ممکن است به‌صورت چکیده توسط مدل‌های ریاضی یا مفهومی شبیه‌سازی شود. سیستم‌های مفهومی اغلب نقشی اساسی در عملیاتی کردن سیستم‌های فیزیکی در دنیای واقعی دارند.

کلیت عناصر در همه‌ی اجزاء، صفات و روابط به‌صورتی گرفته‌اند که تمرکز بر یک فرایند تعیین‌کننده برای تغییر حالت (رفتار) یک سیستم داشته باشند. یک فرایند می‌تواند ذهنی (تفکر،

برنامه‌ریزی، یادگیری)، متحرک-ذهنی (نوشتن، رسم کردن و آزمایش کردن)، یا مکانیکی (انجام عملیات، وظایف و تولید) باشد. فرایندها در هر دوی سیستم‌های مفهومی و فیزیکی وجود دارند.

فرایند در سطوح مختلف یک سیستم اتفاق می‌افتد. فرایند تابعی که برای عملکرد سیستم کل ضروری است، توسط زیرسیستم‌ها فراهم می‌شود. یک زیرسیستم خود می‌تواند وابسته به زیرسیستم‌های دیگری باشد. پیچیدگی سیستم، ویژگی است که مشخص‌کننده‌ی تعداد زیرسیستم‌های موجود و در نتیجه تعداد فرایندهای شامل شده خواهد بود. یک سیستم می‌تواند محدود به اهداف مطالعاتی در هر یک از سطوح فرایندها یا زیرسیستم‌ها باشد. همچنین، سیستم‌های مربوطه که جداگانه تحلیل می‌شوند؛ می‌توانند به‌عنوان یک گروه مورد مطالعه قرار گیرد و این گروه اغلب یک سیستم از سیستم‌ها (SOS) نامیده می‌شود.

۱-۲-۳- سیستم‌های ایستا و پویا

نوع دیگری از دسته‌بندی سیستم‌ها به‌صورت سیستم‌های ایستا و پویا می‌باشد. یک سیستم ایستا، سیستمی است که حالت‌های آن تغییر نمی‌کند، زیرا دارای اجزای ساختاری است ولی اجزای عملیاتی یا جریانی ندارد که مثال بارز آن یک پل است. یک سیستم پویا از خود رفتار نشان می‌دهد، زیرا اجزای ساختاری آن با اجزای عملیاتی یا جریانی ترکیب شده است. به‌عنوان مثال یک مدرسه از ترکیب ساختمان، دانش‌آموزان، مدرسان، کتاب‌ها، برنامه‌های درسی و دانش ساخته شده است.

درک پویایی هستی به‌صورت یک ضرورت درآمده است. اما هنوز تعریفی جامع از یک سیستم به‌عنوان یک فرایند در جریان وجود ندارد. بسیاری از سیستم‌ها تحت این تعریف جامع قرار نمی‌گیرند زیرا فاقد اجزای عملیاتی و جریانی هستند. سیستم یک بزرگراه ایستا است، اما شامل عناصر سیستم یعنی اجزا، صفات و روابط کارکردی می‌شود.

یک سیستم تنها در یک چارچوب مرجع محدود، ایستا در نظر گرفته می‌شود. سیستم یک پل ساخته شده، نگهداری می‌شود و در یک دوره‌ی زمانی تغییر می‌کند. این یک فرایند پویا است که توسط یک زیرسیستم در حال عملیات از جریان مصالح ساختمانی صورت می‌گیرد. یک مهندس سازه باید اعضای یک پل را به‌صورت اجزای عملیاتی ببیند که با تغییر دما دچار انبساط و انقباض می‌شود.

یک سیستم ایستا تنها به‌عنوان یک جزء یا زیرسیستم از یک سیستم پویا می‌تواند خدمت مفید و هدف‌داری ارائه دهد. برای مثال، یک پل ایستا بخشی از یک سیستم پویا با اجزای عملیاتی است که فرایند جریان ترافیک روی پل و جریان آب یا ترافیک زیر آن را هدایت می‌کند. سیستم‌ها ممکن است به‌عنوان سیستم‌هایی با مشخصات تصادفی شناخته شوند. تقریباً در همه سیستم‌های طبیعی و مصنوعی، ورودی، فرایند و خروجی تنها می‌توانند توسط عبارات آماری بیان شوند. عدم قطعیت اغلب هم در تعداد ورودی‌ها و هم در توزیع این ورودی‌ها در طول زمان اتفاق می‌افتد. برای مثال، مشکل است تعداد دقیق مسافرانی را که برای یک پرواز مراجعه می‌کنند، تخمین زد یا زمان دقیق ورود هر یک به فرودگاه را مشخص کرد. با این حال، از آنجا که بسیاری از این فاکتورها را می‌توان به‌صورت توابع توزیع احتمالی توصیف کرد، سیستم عملیاتی را می‌توان به‌عنوان یک سیستم با رفتار احتمالی نگاه کرد.

برای قرن‌ها، انسان، دنیای پدیده‌ها را به‌عنوان یک دنیای غیرقابل تغییر می‌دید. افراد از روی عادت به‌صورت قطعی و ثابت فکر می‌کردند. جایگزینی تفسیری فرایندگرا از هستی به جای تفسیر ایستا و این ایده که هرچیزی را می‌توان بهبود بخشید، علوم مدرن و مهندسی را از طرز تفکرات قدیمی متمایز کرده است.

۱-۲-۴- سیستم‌های بسته و باز

یک سیستم بسته، سیستمی است که تعامل قابل توجهی با محیط خود نداشته باشد. محیط تنها یک زمینه برای این سیستم فراهم می‌آورد. به‌طورعموم، سیستم‌های بسته نشان‌دهنده‌ی خصوصیت تعادل است که ناشی از یک استحکام درونی است که سیستم را از آثار محیط محفوظ می‌کند. مثال آن یک تعادل شیمیایی است که در یک محفظه بسته حاصل می‌شود. واکنش‌های داخل محفظه بسته طوری است که فشار ایجاد شده باعث انفجار محفظه نشود. واکنش و فشار را می‌توان با استفاده از شرایط اولیه پیش‌بینی کرد. سیستم‌های بسته شامل تعاملات محدود، به‌صورت ارتباطات یک به یک، از حالت ابتدایی به حالت انتهایی است. تعداد محدودی سیستم بسته در طبیعت و سیستم‌های مصنوعی وجود دارد.

یک سیستم باز اجازه می‌دهد اطلاعات، انرژی و هر چیز دیگری از مرزهای سیستم عبور کند. سیستم‌های باز با محیط تعامل دارند و مثال‌هایی از آن شامل گیاهان، سیستم‌های اکولوژیکی و سازمان‌های تجاری است. این سیستم‌ها، خصوصیات حالت پایدار را از خود نشان می‌دهند که در آن یک تعامل پویا بین عناصر سیستم و برای تغییر محیط صورت می‌گیرد. به خاطر وجود این حالت پایدار، سیستم‌های باز خود را تنظیم می‌کنند و اغلب دارای خاصیت خود تطبیقی هستند.

همیشه آسان نیست که یک سیستم را به‌صورت باز یا بسته تعریف کنیم. سیستم‌های باز در فرایندهای طبیعی متداول هستند. سیستم‌های مصنوعی هر دو خصوصیت سیستم‌های باز و بسته را دارند. آن‌ها می‌توانند شرایط طبیعی را که در طبیعت قابل مدیریت هستند، دوباره ایجاد کنند. آن‌ها هنگامی که برای ورودی‌های ثابت و خروجی‌هایی که از نقطه‌نظر آماری قابل پیش‌بینی باشند، بسته خواهند بود، مانند یک سفینه فضایی در پرواز.

هردوی سیستم‌های باز و بسته، خصوصیت آنتروپی از خود نمایش می‌دهند. آنتروپی در این‌جا به‌صورت درجه‌ی عدم سازماندهی در یک سیستم تعریف می‌شود و قابل قیاس با مفهوم آن در

ترمودینامیک است. در ترمودینامیک آنتروپی، انرژی خارج از دسترس برای انجام کار است که در نتیجه تبدیل انرژی از یک نوع به نوع دیگر ایجاد می‌شود.

در سیستم‌ها، افزایش آنتروپی به معنای افزایش عدم سازماندهی است. کاهش آنتروپی در اثر نظم اتفاق می‌افتد. حیات، نمایانگر گذار از بی‌نظمی به نظم است. اتم‌های کربن، هیدروژن، اکسیژن و دیگر عناصر به طریقی منظم و پیچیده آرایش پیدا می‌کنند تا ارگانیسم‌های حیاتی را تشکیل دهند. یک کاهش آنتروپی آگاهانه باید در یک سیستم مصنوعی اتفاق بیافتد. همه سیستم‌های مصنوعی از ابتدایی‌ترین تا پیچیده‌ترین آن‌ها، آنتروپی مصرف می‌کنند، زیرا آن‌ها شامل خلق حالت‌های منظم‌تر از حالت‌هایی با نظم کم‌تر هستند.

۱-۳- علم و علم سیستم‌ها

انباشتگی قابل توجه دانش علمی که از قرن هجدهم میلادی آغاز شد و به‌شدت در قرن بیستم گسترش یافت، این نیاز را به‌وجود آورد که آنچه کشف شده به صورت اصول علمی دسته‌بندی شود. علم، جدایی خود از فلسفه را تقریباً از ۲ قرن پیش آغاز کرد. سپس علم به ۱۰۰ علم مختلف گسترش پیدا کرد. یک توسعه یکپارچه کننده که اخیراً انجام گرفته است، ایده‌ای را پرورش داده است که در آن سیستم‌ها بدون توجه به وابستگی آن‌ها به علمی خاص، دارای خصوصیات عمومی مشترکی هستند. در این قسمت، تکامل علم سیستم‌ها از طریق کاوش در سیرنیتیک (فرمان‌شناسی)، تئوری عمومی سیستم‌ها و سیستمولوژی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۳-۱ - سیبرنتیک

کلمه سیبرنتیک اولین بار در سال ۱۹۴۷ توسط نوربرت وینر^۱ مورد استفاده قرار گرفته، اما در کتابش به صورت واضح تعریف نشد. سیبرنتیک از یک کلمه یونانی به معنی "سکاندار" نشأت گرفته است و هم ریشه "حاکم" است. در نگاهی دقیق‌تر، سیبرنتیک معادل تئوری فرمان‌یار در مهندسی است. در یک نگاه جامع‌تر، می‌تواند شامل بخش زیادی از علوم طبیعی باشد. سیبرنتیک با خودتنظیمی^۲ سروکار دارد، چه سیستم مکانیکی باشد، یا الکترومکانیکی یا الکتریکی یا بیولوژیکی.

مفهوم بازخورد در تئوری سیبرنتیک، یک مفهوم کلیدی است. همه رفتارهای هدف‌جویانه، تحت کنترل بازخورد اصلاحی است و اطلاعاتی در مورد انحراف از وضعیت مطلوب فراهم می‌کند. شناخته شده‌ترین و ساده‌ترین مثال، بازخورد عملکرد ترموستات است. جزء ترمومتر در یک ترموستات دما را پایش می‌کند. هنگامی که دمای واقعی از آن‌چه برای ترموستات تعیین شده است، پایین‌تر می‌آید، یک تماس داخلی اتفاق می‌افتد و سیستم گرمایشی را فعال می‌کند. هنگامی که دما به دمایی بالاتر از مقدار تعیین شده افزایش پیدا می‌کند، اتصال قطع می‌شود و سیستم گرمایشی خاموش می‌شود.

ارگانیسم‌های بیولوژیکی دارای ظرفیت خودتنظیمی هستند که هوموستاسیس نامیده می‌شوند. ارگانیسم بیولوژیکی و دنیای فیزیکی هر دو بسیار پیچیده هستند و قیاسی بین آن‌ها و سیستم‌های مصنوعی برقرار است. از طریق این قیاس‌ها، بشر چیزهایی در مورد ویژگی‌های آن یاد گرفته است که تنها از طریق مطالعه سیستم‌های طبیعی قابل یادگیری نبوده است. هم‌چنان که افراد

1. Norbert Wiener

2. Self-Regulation

سیستم‌های پیچیده‌تر را توسعه می‌دهند، ما درک بهتری نسبت به چگونگی کنترل سیستم‌ها و محیط اطراف خود کسب می‌کنیم.

علم سبیرنتیک، سه مفهوم مهم در حوزه‌ی تنظیم و کنترل ایجاد کرده است. اولاً، این علم بر مفهوم جریان اطلاعات به‌عنوان یک جزء سیستمی مشخص تاکید می‌کند و تمایز بین فعال کردن نیرو و سیگنال اطلاعاتی را تصریح می‌کند. دوم، مشخص می‌کند که مشابهت‌ها در مکانیسم‌های کنترلی شامل قواعدی است که به‌طور اساسی یکسان هستند. سوم، اصول پایه کنترل بازخورد، تابع رفتارهای ریاضی است.

یکی از کاربردهای سبیرنتیک، توسعه‌ی چشم‌گیر تجهیزات و فرایندهای خودکار است که اغلب تحت کنترل ریزپردازنده‌ها هستند. با این حال، اهمیت آن بیش‌تر از این پیشرفت‌های فناورانه است. علم سبیرنتیک نه‌تنها در مهندسی کنترل بلکه در علوم محض نیز مهم است. سبیرنتیک، علمی هدف‌دار و کنترل بهینه است که در فرایندهای طبیعی پیچیده یافت شده و علاوه‌بر شرکت‌های تجاری در جامعه نیز کاربرد دارد.

۱-۳-۲- تئوری عمومی سیستم‌ها

یک مفهوم یکپارچه‌کننده که از سبیرنتیک جامع‌تر است، در اواخر دهه‌ی چهل میلادی رشد پیدا کرد. این مفهوم، ایده‌ای بود که قواعد مشترکی را پوشش می‌داد که در همه‌ی سیستم‌ها قابل یافت بود و فراتر از مفهوم کنترل و خودتنظیمی بود. یک اصل یکپارچه‌کننده برای علم و یک زمینه مشترک برای روابط بین علوم مختلف در زمینه‌ی مطالعه‌ی سیستم‌های پیچیده موردنیاز بود. لودویگ ون برتالانفی^۱ عبارت تئوری عمومی سیستم‌ها را حدود سال ۱۹۵۰ میلادی تشریح کرد. مطالعاتی مرتبط با این موضوع توسط کنث بولدینگ^۲ انجام گردید.

1. Ludwig von Bertalanffy

2. Kenneth Boulding

تئوری عمومی سیستم‌ها، توسعه‌ی نظام‌مند یک چارچوب برای توصیف روابط عمومی در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی را مورد توجه قرار می‌دهد. نیاز به یک تئوری عمومی از سیستم‌ها، مسأله‌ی ایجاد ارتباط بین علوم مختلف را ایجاد می‌کند. اگرچه روش‌های علمی بین روش‌های مختلف شباهت‌هایی را فراهم می‌آورد، اما اغلب مرزی بین علوم مختلف نمی‌توان ایجاد کرد. مفاهیم و فرضیات فرمول شده در یک حوزه به‌ندرت به دیگری قابل انتقال است و اگر چنین کاری انجام شود، می‌توان به پیشرفت قابل ملاحظه‌ای دست یافت.

یک رویکرد برای رسیدن به چارچوبی منظم آن است که یک ساختار سلسله‌مراتبی از سطوح مختلف پیچیدگی برای هر سیستم مورد مطالعه در حوزه‌های مختلف بنا شود. یک سلسله‌مراتب از سطوح می‌تواند به یک رویکرد نظام‌مند در مورد سیستم‌ها ختم شود که کاربرد جامعی خواهد داشت. بولدینگ چنین سلسله‌مراتبی را پیشنهاد می‌دهد. این موضوع با ساده‌ترین سطح آغاز شده و تا پیچیده‌ترین سطح که معمولاً شامل همه قابلیت‌های سطوح قبلی می‌شود، پیشروی می‌کند و به‌صورت زیر می‌توان آن را خلاصه کرد.

۱. سطح ساختار ایستا یا چارچوب‌ها که از الگوی یک اتم تا آناتومی یک حیوان و تا نقشه‌ی زمین و جغرافیای هستی گسترده می‌شود.

۲. سطح سیستم پویایی ساده یا خودکار که در آن حرکت‌های ضروری و از پیش تعیین شده اضافه می‌شود مانند موتور بخار و منظومه شمسی.

۳. سطح ترموستات یا سیستم سیبرنتیک که انتقال و ترجمه اطلاعات اضافه می‌شود.

۴. سطح سلول یا سیستم باز که در آن حیات شروع به پدیدار شدن می‌کند و حفاظت خودکار در این سطح اضافه می‌گردد.

۵. سطح گیاه که ساختار ژنتیکی- اجتماعی همراه با اشتقاق و اجزای وابسته به جفت، طرح رشد، و گیرنده‌های اطلاعاتی ابتدایی به آن اضافه می‌گردد.

۶. سطح حیوان که حرکت، رفتار فناورانه و خودآگاهی با استفاده از گیرنده‌های مخصوص اطلاعات، یک سیستم عصبی و مغزی دارای ساختار دانش اضافه می‌شود.

۷. سطح انسان که خودآگاهی، توانایی تولید، درک و ترجمه نشانه‌ها و درک زمان و تاریخ اضافه می‌گردد.

۸. سطح سازماندهی اجتماعی نقش‌ها، کانال‌های ارتباطی، محتوا و معنای پیام‌ها، سیستم‌های ارزش، برداشت تصاویر و ثبت آن به صورت داده‌های تاریخی، هنر، موسیقی، شعر و احساسات پیچیده انسانی به آن اضافه می‌شود.

۹. سطح سیستم غیرجبری که غایت‌ها، مطلق‌ها و غیرقابل فهم‌ها اضافه می‌گردد. اولین سطح در سلسله مراتب بولدینگ، فراگیرترین آن‌هاست. سیستم‌های ایستا همه جا وجود دارند و این دسته پایه و اساسی برای تحلیل و ترکیب سیستم‌ها در سطوح بالاتر ایجاد می‌کند. سیستم‌های پویا با خروجی‌های از پیش تعیین شده، بر علوم طبیعی حاکم هستند. در سطوح بالاتر، مدل‌های سیرنتیک هستند که غالباً به صورت حلقه‌های بسته می‌باشند. سیستم‌های باز در حال حاضر مورد توجه علم هستند، اما مشکلات مدل کردن آن‌ها به علت وجود ویژگی‌های خودتنظیمی، پدیدار می‌شوند. فراتر از این سطح، دانش نظام‌مند اندکی در دسترس است. با این حال، تئوری عمومی سیستم‌ها یک علم همراه با یک چارچوب مفید فراهم می‌کند که در هر کدام از علوم می‌تواند مشارکت داشته باشد. این چارچوب به دانشمندان اجازه می‌دهد تا مفاهیم و یافته‌های مشابه را مقایسه کنند و بزرگ‌ترین مزیت آن ایجاد ارتباط بین علوم مختلف خواهد بود.

۱-۳-۳ - سیستمولوژی و ترکیب

علم سیستم‌ها یا ساختار آن‌ها، سیستمولوژی نامیده می‌شود. مسائل و پیچیدگی‌های مسائلی که انسان با آن مواجه است، با خطوط علمی سازماندهی نشده است. یک سازماندهی جدید از تلاش‌های علمی و حرفه‌ای بر پایه صفات و خصوصیات مشترک مسائل به احتمال زیاد باعث

تسریع در پیشرفت کار می‌شود. هنگامی که علم سیستم‌ها با تشکیل علوم بین رشته‌ای ترویج یابد، انسان از سیستمولوژی و تفکر سیستمی سودمند خواهد شد.

علوم تجربی و انسانی غالباً توسط آنچه جامعه به دانشمندان و بشردوستان اجازه می‌دهد، توسعه می‌یابد. حوزه‌هایی که کم‌ترین چالش را برای فرهنگ، جامعه و باورهای اخلاقی ایجاد کند در اولویت قرار داشت. بقای علم نیز در پیشرفت در علوم مشخصی است که مورد توجه قرار گرفته بود. با این حال، پیشرفت‌های اخیر این موضوع را مورد مقبولیت قرار داد که در اکثر حوزه‌ها، رویکردی علمی مورد نیاز است. این اتفاق بیش‌تر از همه مدیون دستاوردهای اخیر علوم بین رشته‌ای است. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای سیستمولوژی این است که یک فرهنگ واژگان واحد پیشنهاد می‌دهد و مجموعه‌ای از مفاهیم کاربردی یکپارچه شده که در اکثر سیستم‌ها کاربرد دارد، فراهم کرده است.

در طی دهه‌ی ۴۰ میلادی، دانشمندانی که در یک حوزی علمی مشهور بودند، این چالش را پذیرفتند که در درک تعدادی از فرایندهای مشترک در عملیات نظامی تلاش کنند. تلاش‌های تیمی آن‌ها تحقیق در عملیات نام گرفت و تمرکز آن‌ها بر بهینه‌سازی سیستم‌های نظامی قرار گرفت. پس از جنگ، این حوزه‌های علوم بین رشته‌ای تبدیل به یک علم و حرفه گردید. امروزه بدنه‌ای از دانش نظام‌مند در عملیات تجاری و نظامی وجود دارد. اما تحقیق در عملیات، تنها علم سیستم‌ها در عصر حاضر نیست. سیرتیک، تئوری عمومی سیستم‌ها، علوم سیاسی و سازمانی، علم مدیریت و علوم اطلاعات دیگر موارد هستند.

تشکیل علوم بین رشته‌ای در اواسط قرن اخیر آغاز شد و یک تکامل در ترکیب دانش به وجود آورد. این موضوع نه تنها در علم بلکه بین علم و فناوری و بین علم و علوم انسانی اتفاق افتاد. پیشرفت رو به جلوی سیستمولوژی در مطالعه‌ی سیستم‌های پیچیده در ابعاد بزرگ نیازمند ترکیبی از علم و علوم انسانی و همچنین ترکیب علم و فناوری می‌باشد. این ترکیب که برخی اوقات یک

علم بین رشته‌ای تلقی می‌شود، مرکز فعالیت افرادی است که اغلب سنتزست^۱ (ترکیب‌گر) در نظر گرفته می‌شوند.

۱-۴- فناوری و سیستم‌های فنی

فناوری به صورت جامع به عنوان شاخه‌ای از علم تعریف شده است که با فنون صنعتی و مکانیکی، علوم کاربردی و مهندسی سر و کار دارد یا حاصل جمع روش‌هایی است که در آن گروه‌های اجتماعی برای خود مقاصد مادی تعریف کرده و در خدمت تمدن خود هستند. مشخصه‌ی کلیدی یک تمدن، توانمندی ذاتی و دانش نگهداری فناوری به دست آمده است. تمدن‌های مدرن دارای فناوری قدرتمند و فراگیر هستند و این امکان را ایجاد می‌کنند که سیستم‌های مورد نیاز در قالب محصولات و دارایی ساختار و سرویس هستند، ظهور پیدا کنند.

۱-۴-۱ - فناوری و جامعه

جامعه‌ی بشری توسط فرهنگ آن شناخته می‌شود. هر فرهنگ بشری خود را از طریق فناوری رسانه‌ای به منصفه ظهور می‌رساند. به نوبه‌ی خود، نمایش فرهنگ، یک شاخص مهم است که نشان می‌دهد یک جامعه از نقطه نظر فناوری تا چه حد پیشرفت کرده است.

تاریخ بشر تا حد زیادی به پیشرفت فناوری مرتبط بوده است. اما پیشرفت فناوری اغلب برای افراد و فرهنگشان ایجاد استرس کرده است. چالش اصلی، پیدا کردن راهکارهایی برای انسان است تا با توانمندی‌های جدید فناوری و ساختار سازمانی جامعه، سطح بهتری از زندگی را فراهم آورد.

به طور کلی، پیچیدگی سیستم‌های مورد رضایت جوامع در حال افزایش است. در حالی که فناوری‌های جدید در دسترس قرار می‌گیرند، کشش "نیاز" توسط یک رانش برای تلفیق این

1. Synthesists

توانمندی‌های جدید در سیستم‌های موجود و جدید افزایش می‌یابد. میل به سیستم‌های بهتر باعث ایجاد مجموعه‌ای از نیازمندی‌هایی می‌شود که همیشه در حال تغییر هستند. شناسایی نیاز واقعی جواب به یک مساله است و استخراج نیازمندی‌های واقعی به‌نوبه‌ی خود چالشی برای فناوری است.

گذار از وضعیت فناورانه گذشته، به حال و آینده‌ی آن، فرایندی یک مرحله‌ای نیست. پیشرفت‌های پیوسته فنی با گذشت زمان در اختیار جامعه قرار می‌گیرد. پاسخ جامعه در ابتدا اغلب برای ایجاد یک گذار است و سپس یک الگوی رفتاری ایستا را اقتباس می‌کند. پاسخ بهتر را می‌توان در پیدا کردن فرصت‌های جدید و متفکرانه برای پیشرفت مستمر یافت.

برای بهبود در دانش فناورانه باید جمعیت افرادی که قابلیت همکاری در این فعالیت رضایت‌بخش را دارند، افزایش یابد. یک راه کلیدی برای بهره‌مند ساختن این دانش، فناوری‌های ارتباطات است که امروزه به‌سرعت در حال رشد است. بنابراین، فناوری در این قلمرو می‌تواند به‌خوبی در درک جامعه از فناوری، کمک کننده باشد.

۱-۴-۲- سیستم‌های فنی

علم و فناوری عبارتی است که زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. با ترجمه تک تک قسمت‌های آن، این عبارت باعث جلب توجه به ارتباط بین علم سیستم‌ها و سیستم‌های فنی می‌شود. سیستم‌های فنی یا مهندسی شده در علوم سیستم‌ها و علوم طبیعی بنا نهاده شده‌اند. آن‌ها بخش‌های برجسته و فراگیر سیستم‌های مصنوعی هستند.

عبارت سیستم فنی می‌تواند برای نمایش همه انواع محصولات مصنوعی، شامل محصولات و فرایندهای فنی، مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، سیستم فنی تابع مجموعه‌ای از فعالیت‌ها خواهد بود که توسط مهندسان در فرایندهای طراحی مهندسی اجرا می‌شود. این فرایندها شامل

تولید، بازیابی، پردازش و انتقال اطلاعات محصول است. همچنین سیستم فنی تابع بسیاری از موضوعات اقتصادی مربوط به سازمان و جامعه است.

در موزه‌ها، هزاران شی فنی در معرض نمایش قرار داده شده است که به‌عنوان محصولات فناوری شناخته می‌شود. تنوع کارکرد، شکل، اندازه و دیگر خصوصیات آن‌ها، به تیره و تار کردن خصوصیات و ویژگی‌های مشترک آن‌ها تمایل دارد. اما گوناگونی و تنوع زیادی در طبیعت وجود دارد و در آن شرایط قلمروهایی از طبیعت به‌صورت واضح تعریف شده‌اند تا در علوم طبیعی مورد مطالعه قرار گیرند. به همین صورت، تلاش‌هایی برای تعریف واژگانی که به‌صورت مفهومی دسته‌های مختلف اشیاء فنی را توصیف کند، انجام گرفته است. اشیاء فنی را می‌توان برای سادگی به چیزها، ماشین‌ها، محصولات، اسناد یا کارهای فنی نام‌گذاری نمود. نتایج یک فعالیت تولیدی، به‌عنوان محتوای مفهومی فناوری، می‌تواند به صورت واژه محصول مصنوعی یا ابزارآلات تعبیر گردد. چنین تعاریفی بدین منظور ایجاد شده‌اند که ماشین‌ها، آلات، اثاث، سازه‌ها، جنگ‌افزارها و کشتی‌ها را شامل شود که معرف روش‌های فنی است و انسان برای رسیدن به اهدافش مورد استفاده قرار می‌دهد. اما این تعریف برای آن که کامل باشد، باید سیستم‌های طبیعی سلسله مراتبی را شناسایی کرده و تعاملاتی را که بین سطوح مختلف در این سلسله مراتب وجود دارد، بررسی کند. برای مثال سیستم مورد نظر ممکن است سیستم حمل و نقل، سیستم خطوط هوایی موجود در سیستم حمل و نقل کلی، سیستم یک هواپیما در سیستم خطوط هوایی و غیره باشد. مشکلات کمی در دسته‌بندی سیستم‌ها به‌صورت طبیعی، فنی (مصنوعی) یا اصلاح شده وجود داشت. اما دسته‌بندی سیستم‌های فنی به‌صورت دقیق، کار مشکلی است. یک رویکرد موجود، دسته‌بندی براساس صنعت است. به‌طور مثال سیستم‌های فنی را می‌توان به دسته‌های مهندسی عمران، مهندسی برق و مهندسی مکانیک تقسیم بندی کرد. با این حال، از نقطه‌نظر کاربردی و سازمانی،

این دسته‌بندی تعریف دقیقی از سیستم مکانیکی یا الکتریکی فراهم نمی‌آورد زیرا با توصیف این سیستم‌ها به عنوان خروجی مهندسی برق یا مکانیک نمی‌توان مرز استواری برای آن‌ها فراهم آورد.

توسعه‌ی مدرن سیستم‌های فنی، عموماً دارای مرزهای غیرشفافی هستند. محصولات الکترونیکی و رایانه‌ای، مخصوصاً نرم‌افزارها، به صورت فزاینده‌ای همراه با واسطه‌های مکانیکی و انسانی هستند. هر کدام از آن‌ها به عنوان یک زیرسیستم در یک سیستم با پیچیدگی و اهداف بزرگ‌تر عمل می‌کنند. بسیاری از سیستم‌های در حال استفاده، ترکیبی از سیستم‌های ساده در گذشته هستند.

۱-۴-۳- تغییر و رشد فناورانه

رشد و تغییر فناورانه به صورت پیوسته اتفاق می‌افتد و برای پاسخ به نواقص انجام می‌شود و با تلاش برای انجام فعالیت‌های کنونی با کارایی و اثربخشی بیش‌تر، آغاز به کار می‌کند. علاوه بر این، تغییرات بر پایه اهداف سیاسی، فاکتورهای اجتماعی و موضوعات اکولوژیکی، شبیه‌سازی می‌گردد.

به طور کلی، افراد با آثار سیستم‌های مصنوعی و فنی بر طبیعت و انسان میانه خوبی ندارند. زیرا مهندسی و علوم کاربردی مسئول ایجاد سیستم‌های فنی هستند و تعجب برانگیز نیست که عدم رضایت در دستاوردهای این رشته‌ها وجود داشته باشد. بر این اساس، امکان‌سنجی اقتصادی و فنی نمی‌تواند تنها موضوعات اساسی در مهندسی یک سیستم باشد. آثار اکولوژیکی، سیاسی، اجتماعی، فرهنگی و حتی روان‌شناسی به همان اندازه مهم هستند. تعداد فاکتورها در هر پروژه مهندسی چندین برابر شده است. به خاطر تغییر گرایش‌های اجتماعی در مورد اخلاق مسئولیت‌پذیری، اخلاق کاری در ارتباط با تصمیم‌های افراد به یک موضوع حرفه‌ای مهم تبدیل شده است.

به‌عنوان مثال، اخیراً موضوعات زیست محیطی باعث ایجاد قوانین و مقرراتی شده است که نیازمند روش‌های جدید برای محافظت از گندم در برابر حشرات، روش‌های جدید برای امحای ضایعات پزشکی و روش‌های جدید برای تصفیه ضایعات می‌باشد. توجه به کمبود منابع سوخت فسیلی و آثار اکولوژیکی آن‌ها منجر به تمرکز بر حفظ انرژی و منابع جایگزین سوخت شده است.

دنیای ما به خاطر دخالت‌های انسان به‌صورت فزاینده‌ای در حال پیچیده شدن است. با ظهور فناوری‌های پیشرفته، زمان سفر به مقدار بسیار زیادی کاهش یافته است و روش‌های ارتباطی موثر و گسترده‌ای معرفی گردیده‌اند. جنبه‌های وجودی انسان، تعاملی‌تر و صمیمانه‌تر شده است. نیاز به ادغام ایده‌ها و حل مناقشه‌ها بسیار با اهمیت‌تر شده است. در همین زمان، افزایش جمعیت و طلب سیستم‌های بزرگ‌تر و بهتر منجر به استخراج بیش‌تر منابع و آثار جانبی بیش‌تر زیست‌محیطی گردیده است. دانشمندان زیادی از علوم مختلف فنی، اگر به‌درستی سازماندهی شده و مشوق‌های مناسبی برای آن‌ها فراهم شود، می‌توانند اکثر نیازهایی را که بر اثر پیشرفت و تغییرات فناوری ایجاد می‌شوند، رفع کنند.

۱-۵- گذار به عصر سیستم‌ها

کشورهای پیشرفته دنیا در حال گذار از یک عصر فناورانه و ورود به عصری دیگر است. به نظر می‌آید که این گذار تغییری در مفهوم دنیایی که در آن زندگی می‌کنیم، ایجاد خواهد کرد. این مفهوم، هم درکی از پیچیدگی سیستم‌های مصنوعی و طبیعی و هم پایه‌ای برای بهبود مدیریت انسان بر این سیستم‌ها ایجاد خواهد نمود. تحمل‌پذیری بلندمدت سیستم‌های مصنوعی و طبیعی در حال تبدیل به یک نیاز و خواست عمومی است.

۱-۵-۱ - عصر ماشین

دو ایده بر چگونگی فهم انسان از دنیایی که در آن زندگی می‌کنیم، حاکم است. اولی تقلیل‌گرایی^۱ است که شامل این باور است که هر چیزی می‌تواند کاسته شده، تجزیه شود یا به بخش‌های ساده نامرئی تقسیم شود. برای مثال این مورد در فیزیک اتم‌ها، در شیمی مواد ساده، در بیولوژی سلول‌ها و در روان‌شناسی شعور، محرک، انگیزه و نیاز است.

تقلیل‌گرایی باعث ارتقای تفکر تحلیلی در مورد دنیای ما می‌شود، روشی که به دنبال توضیح و درک رویدادهاست. در گام اول، تحلیل شامل پرداختن به موضوعی می‌شود که نیاز به توضیح دارد و چنانچه ممکن باشد، آن را به اجزای تشکیل دهنده‌اش تجزیه می‌کند. گام دوم، توضیح رفتار این اجزاست و در نهایت با ادغام توضیحاتی هر بخش در یک تفسیر در مورد کل رویداد، این توضیح به دست می‌آید. برای مثال، تحلیل یک مساله شامل تجزیه آن به چند مساله ساده تا حد ممکن، حل هر یک از آن‌ها و در نهایت یافتن راه حل برای مساله موردنظر از طریق حل هر کدام از مسائل کوچک‌تر می‌باشد. اگر تحلیل‌گر موفق شود مساله را به مسائل ساده‌تری تجزیه کند که از یکدیگر مستقل هستند، نیازی به ادغام راه‌حل‌ها وجود نخواهد داشت، زیرا جواب به مساله اصلی به سادگی با جمع راه‌حل‌های اجزای مستقل حاصل می‌شود. در عصر صنعتی یا همان عصر ماشین، فهم دنیا به منزله‌ی فهم اجزای آن است که از نقطه نظر مفهومی از یکدیگر مستقل فرض می‌شدند.

ایده‌ی اصلی دوم، مکانیسم است. باور بر آن بود که همه‌ی پدیده‌ها، تنها با یک رابطه‌ی ساده و فراگیر قابل توضیح هستند، یعنی علت و اثر. یک چیز یا رویداد به عنوان علت دیگری (اثر آن) در نظر گرفته می‌شد، اگر برای دیگری ضروری و کافی باشد. از آنجا که یک علت برای اثرش کافی است، هیچ چیز دیگری جز علت یک اثر، برای توضیح آن موردنیاز نیست. در نتیجه،

1.Reductionism

جستجو برای علل، نیاز به محیط نداشت. این ایده، چیزی را که امروزه تفکر در سیستم‌های بسته نامیده می‌شود به خدمت گرفته بود.

قوانین بر پایه روابط علی و معلولی، هیچ استثنائی را قائل نیستند. این آثار کاملاً بر اساس علل مشخص شده‌اند. بنابراین، دید عمومی به دنیا قطعی بود. همچنین این دید به صورت مکانیکی بود، زیرا علم هیچ نیازی به مفاهیم مربوط به علم غایت‌شناسی^۱ (مانند توابع، اهداف، گزینه و اختیار) برای توضیح پدیده‌های طبیعی پیدا نکرد. الزام به تفکر علی و معلولی به مفهوم دنیا در غالب یک ماشین منجر شد. دنیا به صورت سحرآمیزی مانند یک ساعت - یک مکانیسم برون بی‌نیاز^۲ که رفتارشان تنها توسط ساختار خود مشخص می‌شود، در نظر گرفته شد.

انقلاب صنعتی، مکانیزاسیون را به همراه آورد که در آن ماشین جانشین انسان در انجام کارهای فیزیکی شد. این فرایند طبیعت کاری را که برای افراد باقی می‌ماند، تحت تاثیر قرار داد. آن‌ها دیگر همه کارهای موردنیاز برای تولید یک محصول را انجام نمی‌دادند، بلکه یک عملیات ساده در فرایند تولید را به صورت مکرر انجام می‌دادند. در نتیجه، هر چه ماشین بیش تری به عنوان جانشین انسان در انجام کار مورد استفاده قرار گرفت، تعداد بیش تری از کارگران مجبور بودند مانند ماشین‌ها رفتار کنند.

۱-۵-۲- عصر سیستم‌ها

اگرچه یک عصر شروع و انتهای دقیقی ندارد، اما دهه‌ی ۱۹۴۰ را می‌توان شروعی بر خاتمه یافتن عصر ماشین و آغاز عصر سیستم‌ها دانست. این عصر جدید نتیجه یک چارچوب جدید ذهنی است که در آن دکترین تقلیل‌گرایی و مکانیسم و طرز تفکر تحلیلی با دکترین گسترش‌گرایی، فناوری، و طرز تفکر ترکیبی (یا سیستمی) تکمیل می‌شود. گسترش‌گرایی یک دکترین است که

1. Teleological Concepts

2. Self-Contained

در آن همه اشیا و رخدادها و همه‌ی تجربیات آن‌ها، به‌عنوان بخش‌هایی از یک کل بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود. این دکترین، وجود اجزا را نفی نمی‌کند، اما بر کل تمرکز دارد که همه‌ی این اجزا را در بر دارد. این دکترین یک نگاه متفاوت ولی قابل مقایسه با تقلیل‌گرایی را فراهم می‌کند و توجه را از عناصر نهایی به یک کل با اجزای در ارتباط با هم (به سیستم‌ها) منتقل می‌کند.

سروکار داشتن با سیستم‌ها، تفکر ترکیبی را موجب می‌شود. در مد تحلیلی، یک تفسیر از کل توسط تفاسیر اجزای آن اقتباس می‌شود. در تفکر ترکیبی، برخی چیزهایی که باید تفسیر شود به‌عنوان بخشی از یک سیستم بزرگ‌تر دیده می‌شود و به‌صورت نقش آن‌ها در سیستم بزرگ‌تر تشریح می‌شوند. عصر سیستم‌ها علاقه بیش‌تری به قرار دادن چیزها در کنار هم دارد تا این‌که آن‌ها را جدا از هم بررسی کند.

تفکر تحلیل، یک تفکر از بیرون به درون است و تفکر ترکیبی یک تفکر از درون به بیرون است. هیچ‌کدام ارزش دیگری را نفی نمی‌کند، اما تفکر ترکیبی است که می‌تواند درکی را کسب کند که توسط تحلیل به‌دست نمی‌آید، مخصوصاً در پدیده‌های جمعی.

مد ترکیبی تفکر هنگامی که در مسائل سیستمی اعمال می‌شود، تفکر سیستمی یا رویکرد سیستمی نامیده می‌شود. این رویکرد، بر پایه‌ی مشاهده است که در آن هنگامی که هر جزء یک سیستم به بهترین نحو ممکن کار می‌کند، ممکن است کل سیستم به‌درستی کار نکند. این موضوع پیرو این حقیقت است که مجموع عملکرد اجزای یک سیستم به‌ندرت با کارکرد کل سیستم برابری می‌کند. بر این اساس، مد ترکیبی به‌دنبال فائق آمدن بر تمایلی است که اغلب مشاهده می‌شود و می‌خواهد به تحلیل تفصیلی و با جزئیات پردازد و سیستم را مدنظر قرار ندهد. از آن‌جا که عصر سیستم‌ها، فناوری‌گراست، به سیستم‌های هدف‌جو می‌پردازد؛ سیستم‌هایی که دارای روش‌ها و مقاصد یا هر دو است. این عصر تا حدی متمایل به سیستم‌های مکانیکی محض است که بتوانند به‌عنوان یک توانمندساز در خدمت سیستم‌های هدف‌جو باشد. علاوه‌بر این، عصر

سیستم‌ها تا حد زیادی به سیستم‌های هدف‌جو می‌پردازد که برخی از اجزای آن نیز هدف‌جو هستند: در حوزه‌ی انسانی، این سیستم‌ها گروه‌های اجتماعی نامیده می‌شوند. مهم‌ترین دسته گروه‌های اجتماعی آن دسته است که شامل سیستم‌هایی می‌شود که وظایف متفاوتی را انجام می‌دهند و این وظایف بر عهده‌ی نیروی انسانی است؛ این سیستم‌ها سازمان نام دارند.

در عصر سیستم‌ها، توجه بر گروه‌ها و سازمان‌ها به‌عنوان بخشی از سیستم‌های اجتماعی هدف‌جو بزرگ‌تر می‌باشد. مدیریت مشارکتی، همکاری، تصمیم‌گیری گروهی، و مدیریت کیفیت جامع^۱، تشکیلات کاری جدیدی در سازمان هستند. امروزه توجه زیادی به فاکتورهای اجتماعی و محیطی در سازمان‌ها پدیدار شده که این امر همراه با رقابت اقتصادی تا سطوح جهانی پیش رفته است.

۱-۵-۳- مهندسی در عصر سیستم‌ها

در فعالیت‌های مهندسی تحلیل و طراحی در همین حد باقی نمی‌ماند، بلکه آن‌ها روش‌هایی برای ارضای نیازهای انسان هستند. بنابراین مهندسی نوین دو جنبه دارد. یک جنبه بر خود مواد و نیروهای طبیعت تمرکز داشته و دیگری بر نیازهای افراد متمرکز است.

در عصر سیستم‌ها، دستیابی موفقیت‌آمیز به اهداف مهندسی اغلب نیازمند ترکیبی از کارشناسان و متخصصان فنی است. مهندسی در عصر سیستم‌ها باید یک فعالیت گروهی باشد که در آن افراد گوناگون از اهمیت روابط بین تخصص‌ها و روابط بین فاکتورهای اقتصادی، اکولوژیکی، سیاسی و اجتماعی آگاه باشند. تصمیم‌های مهندسی امروزی نیازمند در نظر گرفتن این فاکتورها در مراحل اولیه‌ی طراحی و توسعه‌ی سیستم هستند و نتایج چنین تصمیم‌هایی اثری قطعی بر این فاکتورها دارد. این فاکتورها اغلب محدودیت‌هایی برای فرایند طراحی ایجاد می‌کنند.

1. Total Quality Management

بنابراین متخصصان فنی نه تنها باید دانشی ابتدایی از رشته‌های تخصصی مهندسی داشته باشند، بلکه باید در مورد زمینه‌ی ایجاد سیستم آگاه باشند.

اگرچه محصولات نسبتاً کوچک مانند یک وسیله‌ی ارتباطی بی‌سیم یا حتی یک خودرو تعداد محدودی کارکنان مهندسی و منابع به‌صورت مستقیم به‌کار می‌گیرند، اما سیستم‌هایی با ابعاد بزرگ است که نیازمند ترکیبی از متخصصان است که هر کدام نماینده‌ی مهندسی‌های گوناگون و علوم مرتبط باشند. مثالی از این موضوع، سیستم حمل و نقل زمینی است.

مهندسان عمران برای طراحی و چیدمان خطوط آهن، تونل‌ها، پل‌ها و تجهیزات موردنیاز هستند. مهندسان برق درگیر طراحی و تدارک کنترل خودکار، قدرت کشش لوکوموتیو، ایستگاه‌های توزیع برق، جمع‌آوری خودکار کرایه، سیستم‌های اطلاعاتی دیجیتال و غیره هستند. مهندسان مکانیک برای طراحی وسایل نقلیه مخصوص مسافر و تجهیزات مکانیکی مرتبط ضروری هستند. مهندسان معمار، طراحی موردنیاز برای ساخت پایانه‌های مسافری را فراهم می‌کنند. مهندسان قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیرات درگیر طراحی برای در دسترس بودن سیستم و الحاق ویژگی‌های قابلیت پشتیبانی هستند. مهندسان صنایع با جنبه‌های تولید و کاربرد وسایل نقلیه و اجزای انسانی درگیر هستند. مهندسان آزمایش، سیستم را مورد ارزیابی قرار می‌دهند تا اطمینان حاصل کنند که همه‌ی نیازمندی‌های فنی، اثربخشی و پشتیبانی سیستم برآورده شده است. مهندسان در حوزه‌های برنامه‌ریزی و بازاریابی برای آگاه نگه داشتن عموم موردنیاز هستند. مهندسان سیستم‌ها برای ایجاد اطمینان از آن‌که همه‌ی جنبه‌های سیستم به‌درستی ادغام شده و با هم به‌عنوان یک عنصر وجودی کار می‌کنند، موردنیاز هستند. اگرچه این مثال، شمولیت ندارد، اما گواهی است بر نیاز به علوم گوناگون و متعدد. در حقیقت، پروژه‌های بزرگی مانند توسعه سفینه‌های فضایی وجود دارند که تعداد مهندسان موردنیاز برای انجام وظایف مهندسی به هزاران نفر می‌رسد. علاوه بر این، تفاوت مهندسان به صدها نوع می‌رسد. این

مهندسان که بخشی از یک سازمان بزرگ را تشکیل می‌دهند نه تنها باید بتوانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند، بلکه باید در مورد حوزه‌های خرید، حسابداری، قانونی و نیروی انسانی آگاهی داشته باشند.

فاکتور دیگر که جزئی از پروژه‌های بزرگ است توسعه، تولید، ارزیابی و پشتیبانی سیستم توسط تجهیزات یک تامین‌کننده (یا پیمانکار) در سراسر دنیا است. اغلب یک تولیدکننده یا پیمانکار اصلی وجود دارد که مسئول توسعه و تولید یک سیستم است و تعداد زیادی تامین‌کننده هستند که اجزای مختلف سیستم را فراهم می‌کنند. بنابراین بیش‌تر کار پروژه و بسیاری از وظایف مهندسی ممکن است در مکان‌های پراکنده انجام گیرد که اغلب در سطحی جهانی گسترده شده‌اند.

۱-۵-۴- آموزش مهندسی برای عصر سیستم‌ها

آموزش مهندسی در هر دهه به‌صورت عمیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد که اولین آن‌ها در سال ۱۹۱۸ با گزارش من^۱ ارائه گردید. آخرین مطالعه توسط آکادمی ملی مهندسان (NAE) انجام گرفت و در سال ۲۰۰۵ تحت عنوان آموزش مهندسی ۲۰۲۰ منتشر شد.

اگرچه اقرار می‌شود که اصول مشخصی از مهندسی تغییر نکرده است، اما گزارش NAE بدین صورت جمع‌بندی می‌شود که انفجار دانش، اقتصاد جهانی و نحوه‌ی کار مهندسان، تکاملی مداوم را شامل می‌شود که با کسب اینرسی در اواخر قرن بیستم آغاز شد. این گزارش، سه گرایش فراگیر را که توسط مدرسان مهندسی باید مدنظر قرار گیرد، با تعامل رهبران مهندسی در دولت و صنعت، ارائه داده است:

۱. اقتصادی که در آن کار می‌کنیم به شدت تحت تاثیر بازار جهانی برای خدمات مهندسی است و مشاغل مهندسی در برون‌سپاری، رشد نیاز برای علوم بین رشته‌ای و

1. Mann Report

رویکردهای بر پایه سیستم، تقاضا برای نمونه‌های سفارشی شده، و دسته‌های در حال رشد افراد زبده و با استعداد بین المللی گواهی بر این موضوع هستند.

۲. ادغام پایدار فناوری در زندگی و فراسازه‌های عمومی نیاز به درگیر شدن بیش‌تر

مهندسان در تنظیم سیاست‌های عمومی و برای همکاری در حوزه‌های شهری دارد.

۳. نیروهای خارجی در اجتماع، اقتصاد و محیط، ثبات نیروی کار مهندسی را به چالش

کشیده و توانمندی ما را در جذب افراد با بیش‌ترین استعداد در حرفه مهندسی را تحت

تاثیر قرار می‌دهد.

پیشرفت پیوسته فناوری، نیاز روزافزون به مهندسی را در بیش‌تر زمینه‌ها ایجاد کرده است. اما برخی تخصص‌های مهندسی و فنی، ادغام شده یا در گذر زمان منسوخ می‌شود. همیشه نیاز به مهندسان که بتوانند تغییرات را اقتباس کرده و با آن‌ها آمیخته شوند، وجود دارد. یک مهندس زیرک باید بتواند روندها را پیش‌بینی کرده و با استفاده از دانش خود برای جامع کردن توانمندی‌هایش، برای گذار در طول زمان برنامه‌ریزی کند. در کسب دانش موردنیاز برای اقتباس این تغییرات، مهندسی سیستم‌ها که در این کتاب ارائه شده یک کمک مناسب است.

۱-۶- مهندسی سیستم‌ها

تا امروز، در ادبیات موضوع، تعریف مقبولی برای مهندسی سیستم‌ها ارائه نشده است. تقریباً نیم قرن پیش، هندریک بود^۱ در "رویکرد سیستم‌ها" در پیشرفت علمی- فناوری کاربردی^۲ نوشته است که "به نظر طبیعی می‌رسد که باید شروع به بحث در مورد تعریف رسمی مهندسی سیستم‌ها کنیم. با این حال، مهندسی سیستم‌ها یک موضوع بی‌نظم و بی‌ثبات است که نسبت به چنین رفتار رسمی و ادبی مقاومت می‌کند. یک تعریف جامع‌تر با رویکردی سست مناسب‌تر است.

1. Hendrick W. Bode

2. Applied Science-Technological Progress

در حقیقت برخی نویسندگان از کنار موضوع به کلی گذشته‌اند و می‌گویند مهندسی سیستم کاری است که مهندسان سیستم انجام می‌دهند."

تعریف مهندسی سیستم‌ها و رویکرد سیستم‌ها اغلب بر پایه‌ی زمینه و تجربه فرد یا سازمان اجرا کننده است. بی‌ثباتی و تغییر در پنج تعریف چاپ شده زیر گواهی بر این مطلب است.

۱. رویکردی است بین رشته‌ای، که قابلیت شناخت موفقیت‌آمیز سیستم را فراهم می‌کند.
۲. رویکردی است چند رشته‌ای، که در تمامی تلاش‌های فنی برای تکامل و تایید اعتبار یک مجموعه متوازن در چرخه‌ی عمر و ادغام شده از راه‌حل‌هایی برای افراد، محصول و فرایند که نیاز مشتریان را ارضا می‌کند، وجود دارد. مهندسی سیستم‌ها شامل این موارد می‌شود: (الف) تلاش‌های فنی مربوط به توسعه، تولید، تصدیق اعتبار، استقرار، عملیات، پشتیبانی، امحا و آموزش کاربر برای فرایندها و محصولات سیستم؛ (ب) تعریف و مدیریت ساختار سیستم؛ (پ) ترجمه تعریف سیستم به ساختارهای تقسیم کار؛ و (ت) توسعه اطلاعات برای تصمیم‌گیری مدیریتی.

۳. کاربرد تلاش‌های مهندسی و علمی در زمینه‌های: (الف) تبدیل یک نیاز عملیاتی به توصیفی از پارامترهای عملکردی سیستم و یک ساختار سیستم از طریق استفاده از فرایند تکراری تعریف، ترکیب، تحلیل، طراحی، آزمایش و ارزیابی؛ (ب) ادغام پارامترهای فنی و حصول اطمینان از تطبیق همه بخش‌های فیزیکی، کارکردی و خطوط اتصال برنامه به طریقی که تعریف و طراحی سیستم بهینه می‌شود؛ و (ث) ادغام قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری، ایمنی، قابلیت بقا، مهندسی انسانی و دیگر فاکتورهای مهندسی کل برای رسیدن به اهداف عملکرد فنی، هزینه، زمان‌بندی و قابلیت پشتیبانی.

۴. یک رویکرد شراکتی بین رشته‌ای است برای اقتباس، تکامل و تصدیق یک راه‌حل متوازن در چرخه‌ی عمر سیستم که انتظارات مشتری را ارضا کرده و مقبولیت عمومی به‌وجود آورد.

۵. یک رویکرد که نیازهای عملیاتی را به بلوک‌های عملیاتی مناسب از سیستم‌ها ترجمه می‌کند. این رویکرد باید شامل یک فرایند تکرارشونده و از بالا به پایین، تحلیل نیازمندی‌ها، تحلیل و تخصیص فنی، ترکیب و تصدیق طراحی و تحلیل و کنترل سیستم باشد. مهندسی سیستم‌ها باید در طراحی، تولید، آزمایش، ارزیابی و پشتیبانی محصول حضور موثر یابد. قوانین مهندسی سیستم‌ها باید بر توازن بین عملکرد، ریسک، هزینه و زمان‌بندی تاثیرگذار باشد.

اگرچه تعاریف متفاوت هستند، اما رگه‌هایی از اشتراک وجود دارد. برخی از این اشتراکات در زیر ذکر شده‌اند:

۱. یک رویکرد بالا به پایین وجود دارد که سیستم را به‌صورت یک کل می‌بیند. اگرچه فعالیت‌های مهندسی در گذشته در حد کفایت طراحی، اجزای سیستم‌های زیادی را پوشش می‌داد (که نمایانگر یک رویکرد پایین به بالا است) اما نیاز به بازبینی و فهم آن که اجزا در کنار هم چگونه عملکرد اثربخشی دارند، از نگاه نافذ به دور بوده است.
۲. گرایش به چرخه‌ی عمر در همه‌ی فازها، موردنظر بوده تا طراحی و توسعه، تولید و/یا ساخت، توزیع، عملیات، نگهداری و پشتیبانی، از کاراندازی، از چرخه‌ی تولید خارج کردن و امحا را شامل شود. در گذشته تاکید بر طراحی اولیه و فعالیت‌های اکتسابی سیستم بوده و توجه اندکی به آثار آن‌ها بر تولید، عملیات، نگهداری و تعمیر، پشتیبانی و امحا می‌شد. اگر یکی از آن‌ها به میزان کافی ریسک‌های همراه با فرایند تصمیم‌گیری را شناسایی کند، آن‌گاه چنین تصمیم‌هایی باید با در نظر گرفتن چرخه‌ی عمر حاصل شود.

۳. یک تلاش کامل‌تر و بهتر در مورد تعریف اولیه نیازمندی‌های سیستم که مربوط به نیازمندی‌های معیارهای مشخص طراحی هستند، نیاز است و تحلیل‌ها در ادامه برای حصول اطمینان از اثربخشی تصمیم‌های اولیه در فرایند طراحی خواهد بود. نیازمندی‌های واقعی باید به‌درستی تعریف شده و مشخص گردند و این نیازمندی‌ها در نیازهای سطوح پایین سیستم باید به‌وضوح قابل ردیابی باشد. در گذشته، تحلیل front end که در بسیاری از سیستم‌های جدید اعمال شده است، به‌ندرت استفاده می‌شد. فقدان تعریف خط مبنا در ابتدا باعث ایجاد زحمات بیش‌تر در طراحی در سطوح پایین‌تر می‌شد.

۴. یک رویکرد بین رشته‌ای یا تیمی در سرتاسر طراحی و توسعه‌ی سیستم برای ایجاد اطمینان از در نظر گرفتن همه‌ی اهداف طراحی به نحو اثربخش و کارا. این موضوع نیازمند یک فهم کامل از علوم مختلف طراحی و روابط آن‌ها، همراه با روش‌ها، تکنیک‌ها و ابزارهایی می‌باشد که بتوانند استقرار فرایند مهندسی سیستم را تسهیل کنند.

۵. مهندسی سیستم یک علم مهندسی سنتی مانند مهندسی عمران، برق، صنایع، مکانیک، قابلیت اطمینان یا هر مهندسی دیگر نیست. نه به روش مشابه سازماندهی شود و نه نیازمند منابع زیاد در استقرار مهندسی سیستم است. با این حال، یک رویکرد کاملاً منظم و برنامه‌ریزی شده باید دنبال شود. فرایند مهندسی سیستم شامل استفاده از فناوری‌ها و قواعد مدیریت مناسب به روشی مشارکتی می‌شود. کاربری آن نیازمند ترکیب بوده و بر فرایند در کنار یک تفکر جدید که مطابق با نیازهای عصر سیستم‌هاست، تمرکز دارد.

۱-۷- خلاصه فصل

اگرچه این کتاب بر مهندسی سیستم‌ها و تحلیل سیستم‌ها تمرکز دارد، اما عاقلانه نیست که از همین سطح وارد بحث شد. برپایه‌ی مشاهده‌ها، بدیهی است که هر دو جنبه مهندسی و تحلیل، به‌طورمستقیم بر سیستم‌ها تمرکز دارند. بر این اساس، این فصل خواننده را کمک می‌کند تا دید ضروری در مورد مفاهیم عمومی سیستم‌ها و به‌خصوص تفکر سیستمی را با گرایش به مهندسی و تحلیل سیستم‌های فنی، کسب کند. تعاریف سیستم‌ها، بحثی بر عناصر سیستم و یک دسته‌بندی سطح بالا از سیستم‌ها در چشم انداز آغازین فصل مطرح شد. در این قسمت با در نظر گرفتن منشا سیستم‌ها، حوزه‌های سیستم‌های طبیعی و مصنوعی به‌عنوان یک تقسیم کامل فراهم شد. اهمیت تقسیم نمی‌تواند بیش از حد مورد تاکید این مطالعه و کاربرد مهندسی و تحلیل سیستم‌ها باشد. این یک چارچوب مرجع پیشنهادی برای در نظر گرفتن و فهم مرز ارتباط و آثار دنیای مصنوعی بر دنیای طبیعت و اسنان است.

افراد علاقه‌مند به کسب اطلاعات عمیق‌تر و درک آثار زیست محیطی می‌توانند به مطالعه T.E. Graedel and B.R. Allenby, *Industrial Ecology*, 2nd ed., Prentice Hall, 2003 بپردازند. همچنین توجه کنونی بر موضوع حفاظت محیط که به‌عنوان بخشی از رویکرد ادغامی در مهندسی محیط زیست با آن برخورد می‌شود توسط P. Stasinopoulos, M.H. Smith, K. Hargroves, and C. Desha, *Whole System Design*, Earthscan Publishing, 2009 بررسی شده است. این کتاب‌ها برای مطالعات بیش‌تر در زمینه‌ی مباحث این فصل (و همچنین فصل ۱۶) توصیه می‌شود، زیرا این کتاب‌ها مرز حساس اتصال بین دنیای طبیعت و دنیای مصنوعی را روشن کرده و مورد بحث قرار می‌دهند.

همچنین این فصل بر پایه‌ی حوزه‌های علم سیستم‌ها و مهندسی سیستم‌ها قرار گرفته است که با اولی آغاز و با دومی پایان می‌یابد. بر این اساس، شناسایی این موضوع که حداقل یک

سازمان حرفه‌ای در هر حوزه‌ای وجود دارد، مهم است. برای علم سیستم‌ها، مجمع بین‌المللی برای علوم سیستم (ISSS) وجود دارد که در اصل مجمع تحقیق بر سیستم‌های عمومی نام دارد. ISSS در گردهمایی سال ۱۹۵۶ انجمن آمریکایی برای پیشرفت علم تحت رهبری لودوینگ ون برتالانی بیولوژیست، کنث بولدینگ اقتصاددان، آناتول رپوپورت^۱ ریاضی‌دان-بیولوژیست، رالف جرارد^۲ نوروفیزیولوژیست، جیمز میلر^۳ روانشناس و مارگارت مید^۴ انسان شناس تشکیل شد. بنیان‌گذاران ISSS احساس می‌کردند که جنبه‌ی نظام‌مند واقعیت توسط علوم زمانه که بر رویکردهای تخصصی کردن و تقلیل‌گرایی در علم تمرکز داشتند، مورد بی‌توجهی قرار گرفته بود. آن‌ها بر نیاز به قوانین و تئوری‌های عمومی‌تر تاکید کردند و به دنبال خلق یک سازمان حرفه‌ای بودند که بر گرایش به سمت جزیره‌ای بودن در مراکز علمی، برتری داشته باشد. خواننده‌ی علاقه‌مند به رشته علم سیستم‌ها و یادگیری بیش‌تر در مورد کار ISSS می‌تواند به وب‌سایت ISSS به نشانی <http://www.issss.org> مراجعه کند.

فناوری، سیستم‌های مصنوعی و سیستم‌های اصلاح شده، هسته‌ی این فصل را تشکیل می‌دهند که بر پایه‌ی علم و علم سیستم‌ها بنا نهاده شده است. این سیستم‌های مهندسی شده است که توجیه تقریباً همه‌ی سیستم‌ها، فرایندها، روش‌ها و مدل‌های ارائه شده در این کتاب است. در نتیجه، فهم عمیق سیستم مهندسی شده (از طریق یک تعریف و تشریح متمرکز) بخشی از این فصل نیست. این موضوع به فصل ۲ که نمونه‌ای از خلق یک سیستم در یک سطح بالاست، منتقل شده است. هدف، روشن کردن تمایز بین سیستم‌های مهندسی شده و طبیعی است.

1. Anatol Rapoport

2. Ralph Gerard

3. James Miller

4. Margaret Mead

گذار به عصر سیستم‌ها که در علوم سیستم‌ها متولد شده و توسط فناوری‌های قدرتمند استخراج شده است، یک نیاز اجباری برای مهندسی سیستم‌ها را به وجود آورده است. در نتیجه، تعاریف منتخب مهندسی سیستم‌ها در انتهای این فصل ارائه شده است. تعاریف بسیار دیگری موجود است که در این کتاب مورد بحث نیست. با این حال، با انطباق بر زمینه این کتاب، مهندسی سیستم‌ها را می‌توان به عنوان یک فرایند بین رشته‌ای بر پایه‌ی فناوری برای خلق سیستم‌ها توصیف کرد. مهندسی سیستم‌ها با اتکا به خود، یک مهندسی بین رشته‌ای بوده و ظهور یک حوزه‌ی مهندسی مهم را منجر شده است.

مشهورترین سازمان در حوزه‌ی مهندسی سیستم‌ها انجمن بین المللی مهندسی سیستم‌ها (INCOSE)^۱ است. INCOSE در سال ۱۹۹۱ در ایالات متحده شروع به فعالیت نمود و اکنون به صورتی جهانی گسترده شده و انجمن رهبر در زمینه توسعه، رشد و ارتقای رویکرد و روش‌های بین رشته‌ای برای ایجاد توانایی در درک سیستم‌های موفق می‌باشد. INCOSE با صنعت، دانشگاه و دولت گره خورده تا به اهداف زیر برسد: (۱) فراهم کردن یک نقطه کانونی برای انتشار دانش مهندسی سیستم‌ها؛ (۲) ارتقای همکاری در آموزش و تحقیق مهندسی سیستم‌ها؛ (۳) حصول اطمینان از استقرار استانداردهای حرفه‌ای برای مهندسی سیستم‌ها در عمل؛ (۴) بهبود وضعیت حرفه‌ای افرادی که با مهندسی سیستم‌ها در عمل درگیر هستند؛ و (۵) تشویق حمایت دولتی و صنعتی برای برنامه‌های تحقیق و آموزشی که فرایند و اجرای مهندسی سیستم‌ها را بهبود بخشد. یک نگاه گسترده به مهندسی سیستم که توسط INCOSE انتشار یافته و همچنین پنجره‌ای به گنجینه‌ای از اطلاعات درباره این علم بین رشته‌ای مهندسی و نسبتاً جدید در وبسایت <http://www.incose.org> قابل دسترسی است. اکثر انجمن‌های حرفه‌ای و علمی آگاه ایالات متحده، تعاملی هستند اما انجمن‌های افتخاری مستقل هستند. انجمن افتخاری آگاه از

1. International Council on Systems Engineering

مهندسی سیستم‌ها انجمن آلفا امگا است^۱ (OAA) که با شعار "قبل از شروع به پایان فکر کن" پدیدار گشت. در سال ۲۰۰۶ به عنوان یک انجمن افتخاری بین المللی، هدف OAA پیشرفت فرایند مهندسی سیستم‌ها و اجرای حرفه‌ای آن در خدمت به بشریت است. در میان اهداف فرعی فرصت‌هایی برای (۱) ایجاد مقبولیت بیش‌تر این موضوع در حرفه مهندسی که هر تصمیم انسان در طراحی، دنیای مصنوعی را ساخته و مشخص کننده اثر آن بر طبیعت و مردم خواهد بود؛ (۲) طراحی سیستم پیشرفته و توسعه مورفولوژی^۲ از طریق یک درک بهتر و اقتباس از فلسفه داوینچی یعنی تفکر در مورد پایان کار قبل از شروع آن، یعنی مشخص کردن این که اجزای طراحی شده، قرار است چه کاری بکنند، پیش از آن که مشخص شود این اجزا چه چیزی هستند، و تمرکز بر نحوه‌ی عملکرد، قابلیت، یا راه‌حل پیش از طراحی جزء؛ و (۳) تشویق به آموزش و تحقیق در مهندسی سیستم‌ها از طریق همکاری با موسسات آکادمیک و انجمن‌های حرفه‌ای به منظور رشد سیاست‌ها و دستورالعمل‌های پایدار برای شناخت برنامه‌ها و اهداف عالی آکادمیک و همچنین چشم‌انداز OAA برای شناخت و پیشرفت در مهندسی سیستم‌ها مخصوصاً در آکادمی.

1.Omega Alpha Association

2.Morphology

سوالات و مسائل

۱. یک سیستم را که با آن آشنا هستید، انتخاب کرده و مشخص کنید که با استفاده از تعریف سیستم در ابتدای قسمت ۱-۱ واقعا یک سیستم است.
۲. اجزاء، صفات و روابط را در سیستم انتخاب شده در سوال ۱ را شناسایی و نامگذاری کنید.
۳. یک سیستم را انتخاب کنید که مواد را تغییر می‌دهد. اجزای سازه‌ای، اجزای عملیاتی و اجزای جریانی را شناسایی کنید.
۴. یک سیستم پیچیده را انتخاب کرده و در مورد سلسله مراتب سیستم بحث کنید.
۵. یک سیستم پیچیده انتخاب کرده و برخی روش‌های مشخص کردن مرزهای آن را شناسایی کنید.
۶. یک سیستم فیزیکی و یک سیستم مفهومی را مشخص کرده و با هم مقایسه کنید.
۷. یک سیستم ایستا و یک سیستم پویا را مشخص کرده و با هم مقایسه کنید.
۸. یک سیستم بسته و یک سیستم باز را مشخص کرده و با هم مقایسه کنید.
۹. یک سیستم طبیعی را انتخاب کرده و اجزاء، صفات و روابط آن را تشریح کنید. همین کار را برای یک سیستم مصنوعی و یک سیستم اصلاح شده انجام دهید.
۱۰. اهداف سیستم مصنوعی بالا را شناسایی کرده و برخی شاخص‌های آن را نام ببرید.
۱۱. برای سیستم مصنوعی بالا حالت سیستم را در برخی نقاط زمانی مشخص کرده و رفتار آن را بررسی کنید و فرایند آن را به صورت خلاصه توضیح دهید.
۱۲. برای سیستم مصنوعی بالا دو جزء را نام برده و تشریح کنید که صفات این دو جزء چگونه باید مهندسی شود تا در کنار یکدیگر به صورتی اثربخش کار کرده و در هدف سیستم نقش خود را ایفا کنند.

۱۳. یک مثال از رابطه درجه اول و درجه دوم ذکر کنید. برای یک سیستم اصلاح شده، برخی روش‌هایی که در آن سیستم طبیعی می‌تواند تنزل پیدا کرده یا بهبود یابد را بررسی کنید.
۱۴. برای یک سیستم اصلاح شده، برخی روش‌های ممکن برای تنزل یک سیستم اصلاح شده یا بهبود آن را شناسایی کنید.
۱۵. یک مثال درست از سیستم پویای تصادفی و یک مثال درست از سیستم دینامیک در حالت ایستا ارائه دهید.
۱۶. یک مثال از یک سیستم که با گذشت زمان به تعادل می‌رسد و یک سیستم که با گذشت زمان تجزیه می‌شود بیاورید.
۱۷. آیا یک دولت دارای قوای اجرایی، قانون گذاری و قضایی، یک سیستم را تشکیل می‌دهند یا سه سیستم؟ چرا؟
۱۸. یک سیستم از سیستم‌ها را معرفی کنید که با تحلیل اجزای آن به صورت مجزا نتوان تحلیلی از سیستم کل ارائه داد.
۱۹. سیرنیتیک را با استفاده از یک مثال دلخواه توضیح دهید.
۲۰. یک مثال از یک سیستم بزنید که دارای همه ۵ سطح سلسله مراتب بولدینگ باشد.
۲۱. یک سیستم در سطوح بالایی سلسله مراتب بولدینگ انتخاب کرده و نشان دهید که آیا شامل سطوح پایین تر می‌شود یا خیر.
۲۲. یک نیاز اجتماعی را مشخص کنید و نیازمندی‌های سیستم برای رفع این نیاز و هدف آن سیستم را تشریح کنید.
۲۳. شباهت‌های بین سیستمولوژی و ترکیب چیست؟
۲۴. چه مشکلی در دسته‌بندی سیستم‌های فنی وجود دارد؟

۲۵. نام برخی از فاکتورهای محرک در پیشرفت و تغییر فناوری را بنویسید.
۲۶. چه سودی از بهبود تفکر سیستمی در جامعه ایجاد می‌شود؟
۲۷. صفات عصر ماشین یا عصر صنعتی و عصر سیستم‌ها را شناسایی کنید.
۲۸. توضیح دهید تفاوت بین تفکر تحلیل و ترکیبی چیست.
۲۹. نیازمندی‌های مهندسی و چالش‌های آن در عصر سیستم‌ها چیست؟
۳۰. چه تفاوت (یا شباهت)‌هایی بین مهندسی سیستم‌ها و دیگر مهندسی‌های سنتی وجود دارد؟
۳۱. با توجه به توصیه‌های موجود در Education the Engineer of 2020، چه چیزی باید به برنامه درسی که با آن آشنا هستید اضافه شود؟
۳۲. یک مثال از یک مساله بیاورید که نیاز به رویکرد بین رشته ای دارد و علوم موردنیاز را مشخص کنید.
۳۳. یک میان رشته را نام برده و علوم درون آن را شناسایی کنید.
۳۴. تعریف خود را از مهندسی سیستم‌ها بنویسید.
۳۵. به وبسایت ISSS رفته و اهداف انجمن را خلاصه کنید.
۳۶. به وبسایت INCOSE رفته و اهداف آن را خلاصه کنید.
۳۷. اهداف ISSS و INCOSE را با هم مقایسه کنید.
۳۸. به وبسایت OAA رفته و این انجمن افتخاری را با یک انجمن افتخاری که با آن آشنایی دارید مقایسه کنید.

خلق سیستم‌ها

دنیایی که در آن زندگی می‌کنیم به طبیعت و دنیای مصنوعی تقسیم‌بندی می‌شود. اولی شامل همه‌ی عناصر دنیای ما می‌شود که از طریق فرایندهای طبیعی خلق می‌شود. دنیای مصنوعی توسط سیستم‌ها با منشای انسانی، زیرسیستم‌های محصول (شامل ساختارها و خدمات) و دیگر زیرسیستم‌ها (مانند تولید و پشتیبانی) به‌وجود آمده است.

مهندسی و تحلیل سیستم‌ها، روش‌های غیرمنتظره‌ای از استفاده از فناوری را آشکار می‌کند تا سیستم‌ها و محصولات جدیدی را خلق کند که در دنیای اقتصادی رقابتی‌تر باشند. فناوری‌های جدید و در حال ظهور، گزینه‌های طراحی قابل فهم و فیزیکی را گسترش می‌دهند و توانمندی‌های توسعه‌ی سیستم‌های اثربخش - هزینه را ارتقا می‌دهند و فرصت‌های بهبود بی‌سابقه‌ای در نتیجه‌ی اجرای درست مفاهیم و قوانین مهندسی و تحلیل سیستم‌ها را فراهم می‌کنند.

این فصل یک فرایند بین رشته‌ای بر پایه‌ی فناوری را معرفی می‌کند که شامل توسعه‌ی مهندسی از طریق فازهای چرخه‌ی عمر سیستم می‌شود؛ شامل طراحی، توسعه، تولید یا ساخت، استفاده و پشتیبانی، از دور خارج کردن و امحا. این فرایند از مفاهیم سیستم‌ها و تفکر عمومی

سیستم‌ها که در فصل ۱ ارائه شد، اقتباس شده است. فصل ۲ درک عمیقی از موارد زیر را برای خواننده فراهم می‌آورد:

- تعریف و توصیف دقیق‌تر از سیستم‌های مصنوعی در مقابل تعاریف کلی سیستم‌ها که در فصل اول ارائه گردید؛
 - محصول به‌عنوان بخشی از سیستم مهندسی شده اما قابل تمیز از آن همراه با تاکید بر سیستم به‌عنوان یک جزء کامل که باید خلق شود؛
 - دسته‌بندی سیستم و محصول با استفاده از مهندسی و طراحی چرخه‌ی عمر به‌عنوان یک نمونه قابل تعمیم برای درک محصولات و سیستم‌های رقابتی؛
 - مهندسی روابط میان سیستم‌ها برای دستیابی به پایداری در محصول و حفاظت محیط، هم‌نیروایی در میان سیستم‌های مصنوعی و بهبود مستمر؛
 - ارزیابی طراحی سیستم و چند معیارگی که در آن بهترین گزینه جستجو می‌شود؛
 - ادغام و تکرار در طراحی سیستم که نیازمند فعالیت‌های اصلی ترکیب، تحلیل و ارزیابی است؛
 - مورفولوژی ترکیب، تحلیل و ارزیابی و استفاده موثر در فرایند مهندسی سیستم؛
 - اهمیت سرمایه‌گذاری در تفکر سیستمی و مهندسی در ابتدای چرخه‌ی عمر و اهمیت مدیریت مهندسی سیستم‌ها؛
 - منافع بالقوه در استقرار درست و به‌موقع مهندسی و تحلیل سیستم‌ها.
- بخش انتهایی این فصل خلاصه‌ای از مفاهیم و ایده‌های وابسته به فرایند خلق سیستم را فراهم آورده است.

۲-۱- سیستم مهندسی شده

خروجی محسوس مهندسی و تحلیل سیستم، یک سیستم مهندسی شده یا فنی است، چه سیستم مصنوعی باشد یا سیستم اصلاح شده. مفاهیم سیستم‌ها، تئوری عمومی سیستم‌ها و تفکر سیستم معرفی شده در فصل اول، یک بنیان علمی برای مهندسی فراگیر دنیای مصنوعی را فراهم می‌آورد. این قسمت وابسته به فعالیت‌های فناورانه‌ی سازمان‌یافته برای ایجاد سیستم‌های مهندسی شده است. برای شروع با گامی محکم، لازم است که سیستم مهندسی شده در قالب ویژگی‌های آن تعریف شود.

۲-۱-۱- ویژگی‌های سیستم مهندسی شده

یک سیستم فنی یا مهندسی شده، یک سیستم مصنوعی یا اصلاح شده است که برای دستیابی به اهداف کارکردی طراحی شده است. سیستم‌ها را می‌توان درست یا ضعیف مهندسی کرد. عبارت سیستم مهندسی شده در این کتاب، متضمن یک سیستم است که درست مهندسی شده است. یک سیستم درست مهندسی شده ویژگی‌های زیر را داراست:

۱. سیستم‌های مهندسی شده دارای اهداف کارکردی در پاسخ به نیازهای شناسایی شده هستند و دارای قابلیت دستیابی به اهداف عملیاتی هستند.
۲. سیستم‌های مهندسی شده، خلق می‌شوند و در یک چرخه‌ی عمر کار می‌کنند، که با شناسایی نیازها آغاز شده و با از دور خارج شدن و امحا پایان می‌یابند.
۳. سیستم‌های مهندسی شده دارای ممتوم طراحی هستند که به‌صورت پایدار در طول طراحی، تولید و توسعه افزایش پیدا می‌کنند و در هنگام از دور خارج شدن و امحا کاهش می‌یابند.
۴. سیستم‌های مهندسی شده از یک ترکیب هماهنگ از منابع تشکیل شده‌اند، مانند تجهیزات، ماشین آلات، مواد، افراد، اطلاعات، نرم‌افزار و پول.

۵. سیستم‌های مهندسی شده از زیرسیستم‌ها و اجزای مرتبط تشکیل شده‌اند که با یکدیگر در تعامل بوده و پاسخ یا رفتار دلخواه سیستم را تولید می‌کنند.

۶. سیستم‌های مهندسی شده بخشی از یک سلسله مراتب می‌باشند و تحت‌تاثیر فاکتورهای خارجی سیستم‌های بزرگ‌تری که بخشی از آن هستند، قرار دارند و با سیستم‌های همسطح خود، سیستم بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند.

۷. سیستم‌های مهندسی شده در دنیای واقعی قرار داشته و با محیط به‌صورت رضایت‌بخش یا غیر رضایت‌بخش در تعامل هستند.

سیستم‌های مهندسی شده به روش‌های مختلفی در بخش ۱-۶ تعریف شدند. به‌طور اساسی مهندسی سیستم‌ها، کارکردگرا بوده و دارای فرایند بین رشته‌ای بر پایه‌ی فناوری برای خلق سیستم و محصولات و بهبود دهنده‌ی سیستم‌های موجود است. خروجی مهندسی سیستم‌ها، سیستم‌های مهندسی شده است که پیش از این معرفی شد. هدف آن ایجاد یک دنیای بهتر برای افراد است. در نتیجه، اجزای مصنوعی باید برای ارضای نیازهای انسان و/یا رسیدن به اهداف به‌صورتی اثربخش ایجاد شود، در حالی که هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سیستم و هزینه‌ی غیرملموس اجتماعی و اکولوژیکی حداقل گردد.

سازمان، مهم‌ترین نوآوری انسان، روشی برای خلق اجزای مصنوعی است. در حالی که تمرکز اصلی بر خود اجزاست، مهندسی سیستم یک راهبرد بهتر را اتخاذ می‌کند. مهندسی سیستم بر آن‌چه اجزا قرار است انجام دهند پیش از آن‌که اجزا از چه چیزی تشکیل شده‌اند تمرکز دارد. همان‌طور که در حرفه‌ی معماری به‌سادگی بیان شد، شکل پیرو کارکرد است. بنابراین، به جای پیشنهاد سیستم‌ها یا عناصر سیستم و محصول، تمرکز سازمان به طراحی، تحویل و عملکرد پایدار یک توانمندی یا یک راه‌حل منتقل می‌شود.

۲-۱-۲- دسته‌بندی‌های سیستم و محصول

جالب و مفید است که اشاره شود سیستم‌ها اغلب توسط محصولاتشان شناخته می‌شوند. آن‌ها از طریق محصولاتی که پیشنهاد می‌دهند، تولید می‌کنند، تحویل می‌دهند یا به هر طریق دیگری خلق می‌کنند، شناخته می‌شوند. مثال‌هایی در این موضوع شامل این موارد است: سیستم‌های تولیدی که محصولات را تولید می‌کنند، سیستم‌های ساخت که سازه‌ها را برپا می‌کنند، سیستم‌های حمل و نقل که افراد یا کالا را جابه‌جا می‌کنند، سیستم‌های کنترل ترافیک که جریان وسایل نقلیه را مدیریت می‌کنند، سیستم‌های نگهداری و تعمیر که کار تعمیر و بازگردانی به حالت اولیه را انجام می‌دهند و سیستم‌های خدمات که نیازهای مصرف‌کننده یا بیمار را رفع می‌کنند. آنچه که سیستم انجام می‌دهد از طریق محصولی که فراهم می‌شود، ظهور پیدا می‌کند. محصول و سیستم همراه آن کاملاً با هم پیوند دارند.

به‌عنوان چارچوب یا خطوط مبنا برای مطالعه، دو دسته عمومی سیستم/محصول در این بخش مشخص شده و ارائه می‌شود. در نظر گرفتن این دسته‌بندی‌ها در خدمت دو هدف است. اول، این دسته‌بندی کمک می‌کند تا موضوع‌ها و گام‌های فرایند ایجاد سیستم‌های فنی یا مهندسی شده را تعریف و روشن کرد. سپس، در فصل‌های بعدی، این دسته‌بندی‌ها و مثال‌ها فرصت‌هایی برای ایجاد مرجعی برای راه‌حل‌های تعمیم یافته فراهم می‌آورد. اگرچه مثال‌های دیگری که کمتر قابل تعمیم هستند، در آن فصل‌ها وجود دارد، اما درک بهتر آن‌ها می‌تواند سهمی در دسته‌بندی ساخته شده در این بخش داشته باشد.

سیستم‌های با محصول یک واحدی. یک سیستم با محصول یک واحدی، برای مثال می‌تواند به‌صورت یک پل، یک مرکز سرگرمی خانگی با طراحی سفارشی، یک سیستم نرم‌افزار سفارشی، یا یک جلسه مشاوره خاص باشد. محصول می‌تواند به‌صورت قابل مصرف (یک ضیافت یا یک جلسه مشاوره) یا قابل تعمیر (یک بزرگراه یا یک فرارایانه) باشد. دسته‌بندی مفید دیگر، شناسایی

کالاهای مصرف‌کننده از کالاهای تولیدکننده است. دومی برای تولید اولی به کار گرفته می‌شود. یک محصول، همان‌طور که در این کتاب مدنظر است، هر چقدر هم که پیچیده باشد، یک سیستم مهندسی نخواهد بود.

یک محصول به‌تنهایی یک سیستم مهندسی شده نیست. فرض کنید یک پل ساخته شده تا نیاز برای عبور از یک مانع (رودخانه یا یک جاده دیگر) برطرف شود. سیستم مهندسی شده شامل سازه پل به‌علاوه یک زیرسیستم ساخت، یک زیرسیستم نگهداری و تعمیر، یک سیستم عملیات و پشتیبانی و یک فرایند از دور خارج شدن و تخریب است. به‌طور مشابه، یک آیتم از تجهیزات برای استفاده تولیدکننده یا مصرف‌کننده در حوزه‌ی تعریف و تفسیر سیستم مهندسی شده که در قسمت ۱-۲ معرفی شده یک سیستم نخواهد بود. کارخانه‌های تولیدی که محصولات قابل تعمیر یا مصرفی تولید می‌کنند، انبارها یا مراکز فروش که محصولات را توزیع می‌کنند، تسهیلات بیمارستان که خدمات حفظ سلامت فراهم می‌آورند و سیستم‌های کنترل ترافیک هوایی که جریان ترافیک منظم تولید می‌کنند، هنگامی که کارخانه، مرکز فروش، بیمارستان یک محصول است که باید خلق شود، یک سیستم تک واحدی شناخته می‌شود. این واحدها، در ترکیب با اضافه شدن و همراه شدن زیرسیستم‌ها می‌توانند به‌عنوان سیستم‌های مهندسی شده در نظر گرفته شوند.

آنچه در بالا اشاره شد سیستم‌های مهندسی شده را چیزی فراتر از یک محصول قابل تعمیر یا مصرفی می‌داند که می‌تواند تک واحدی، جمعیتی از واحدهای یکسان، یا جریانی از واحدهای مختلف باشد. محصول باید به‌عنوان بخشی از یک سیستم تلقی شود که باید مهندسی شده، استقرار یافته و عملیاتی شود. اگرچه زیرسیستم محصول (شامل ساختار یا خدمات) به‌طورمستقیم نیاز مشتری را برآورده می‌کند، این موضوع باید به‌صورت کارکردی تجزیه شده و به زیرسیستم‌ها و اجزای تشکیل دهنده‌ی سیستم کل تخصیص داده شود.

سیستم‌های جمعیتی چند واحدی. جمعیت‌های چند واحدی، که اغلب در طبیعت هموژن هستند، کاملاً معمول می‌باشند. با تفکر در مورد این جمعیت‌ها به عنوان محصولات عمومی، به آن‌ها اجازه داده می‌شود که به صورت احتمالی مورد مطالعه قرار گیرند. با این حال، سیستم‌های مهندسی شده چیزی فراتر از یک تک واحدی یا چندین واحد در یک جمعیت هستند. این سیستم‌ها از جمعیتی در کنار هم شامل زیرسیستم‌های تولید، نگهداری و پشتیبانی، بازتولید، از دور خارج شدن و امحا تشکیل می‌شوند.

مجموعه‌ی نیازها، توجیه خلق جمعیت است. این مجموعه از نیازها، محرک فازهای چرخه‌ی عمر شامل اکتساب و بهره‌برداری هستند که از طراحی، ساخت یا تولید، نگهداری و پشتیبانی، نوسازی و به تدریج پایان یافتن آن از طریق از دور خارج کردن و امحا تشکیل شده‌اند. مانند سیستم‌های محصول تک‌واحدی، خروجی آن‌ها، زیرسیستمی خواهد بود که به طور مستقیم نیاز مشتری را رفع می‌کند.

مثال‌هایی از جمعیت‌ها با واحدهای قابل تعمیر به صورت زیر است: خطوط حمل و نقل هوایی و دستیابی، عملیات و نگهداری هواپیما در محیط نظامی همراه با ویژگی‌های جمعیتی. در حمل و نقل زمینی، وسایل نقلیه (مانند تاکسی، خودروهای کرایه‌ای، کامیون‌های تبلیغاتی) از جمعیت تجهیزات قابل تعمیر تشکیل شده است. انواع تجهیزات تولید (مانند ابزارآلات ماشینی، دستگاه‌های نساجی، و دیگ‌های زودپز) جمعیتی از تجهیزات هستند که به عنوان تولیدکننده کالا دسته‌بندی می‌شود.

همچنین جمعیتی از سازه‌های قابل تعمیر (نوسازی شدن) را که اغلب در طبیعت هموژن هستند، در نظر بگیرید. یک جمعیت از سازه‌ها از واحدهای ساکن ساخته شده برای رفع نیاز یتیم‌خانه در یک مکان مشخص تشکیل شده است. در یک ساختمان اداری اجاره‌ای، جمعیت هر یک از دفاتر از یک جمعیت با واحدهای قابل نوسازی تشکیل شده است و در حوزه‌های شهری و اطراف

آن، کلینیک‌های عمومی شامل جمعیت پراکنده شده سازه‌هایی است که سلامت را برای افراد فراهم می‌آورد.

ساده‌ترین جمعیت‌های چند واحدی، انبار موجودی‌هاست. این انبارها ممکن است شامل محصولات مصرفی یا قابل تعمیر باشند. مثال‌هایی از محصولات مصرفی شامل اسباب‌آلات کوچک، باتری، خواربار، لوازم آرایش، نشریات و بسیاری از چیزهای دیگر می‌شوند که بخشی از زندگی روزمره هستند. انبار موجودی واحدهای قابل تعمیر، اغلب زیرسیستم‌ها یا اجزای یک تجهیز اصلی هستند. برای مثال، پمپ هیدرولیک هواپیما، استارت‌ر خودرو، و کنترل‌کننده‌های خودکار واحدهای تعمیر کننده هستند که خود اجزای یک سیستم سطح بالاتر هستند.

جمعیت‌های هموژن مناسب طراحی‌هایی هستند که هدف آن‌ها محصول نهایی یا تجهیز اصلی و همچنین هدف آن جمعیت به‌عنوان یک کل خواهد بود. آموزش تولید و نگهداری، اخلاق، تحلیل عملیاتی بر پایه آمار و احتمالات و غیره همگی بیش‌تر یا کم‌تر در جمعیت‌ها با واحد قابل تعمیر اعمال می‌شوند. اما اگر نتیجه نهایی باید برای تولیدکننده و مصرف‌کننده رضایت بخش باشد، سیستمی که قرار است خلق شود باید بزرگ‌تر از جمعیت خود باشد.

۲-۱-۳- مهندسی محصول و سیستم

افراد اغلب محصولات مختلفی را برای رفع نیازهایشان تهیه می‌کنند، بدون این‌که همراه با سیستم‌هایی باشند که بتوانند اطمینان ایجاد کنند که بهترین نتایج به‌دست خواهد آمد و بدون این‌که به مقدار کافی آثار محصول بر طبیعت، انسان و دیگر سیستم‌های مصنوعی را در نظر گرفته باشند. استفاده درست از مهندسی و تحلیل سیستم‌ها اطمینان حاصل می‌کند که همه‌ی مسایل به‌درستی ارزیابی شده و نتیجه‌ی سرمایه‌گذاری انسان به‌حداقل رساندن مشکلات و حداکثر شدن رضایت ختم شود.

مهندسی همیشه با استفاده اقتصادی منابع برای رسیدن به این اهداف درگیر بوده است. هدف فعالیت‌های طراحی و تحلیل مهندسی مشخص کردن این موضوع است که چگونه می‌توان با ایجاد تغییر در فاکتورهای فیزیکی و مفهومی به خلق بیش‌ترین مطلوبیت در کم‌ترین هزینه (هزینه تولید، هزینه خدمات تولید، هزینه اجتماعی، و هزینه محیطی) دست یافت. با این نگاه، مهندسی باید به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته و همراه با مهندسی سیستم، در راس توجه برای اجزای محصول وابسته به سیستم باشد.

مهندسی کلاسیک بر فاکتورهای فیزیکی مانند انتخاب و طراحی اجزای فیزیکی و رفتار آن‌ها تمرکز دارد. دستیابی به بهترین نتایج در ابتدا نیازمند تمرکز بر فاکتورهای مفهومی مانند نیازها، نیازمندی‌ها، و کارکردهاست. با این حال، سیستم نهایی به‌صورت فیزیکی ظاهر می‌شود که اغلب در آن هدف اصلی عملکرد سیستم است تا طراحی و توسعه سیستمی که محصول جزئی از آن است. یک محصول نمی‌تواند بدون قابلیت تولید یا ساخت، بدون پشتیبانی یا نگهداری و غیره خلق شود. مهندسی سیستم و محصول اغلب نیازمند رویکردی بین رشته‌ای است که هم محصول و هم قابلیت‌های تولید و ساخت، نگهداری محصول و سیستم تولید، پشتیبانی و بازتولید، تدارکات، روابط سیستم‌های به هم متصل و از دور خارج کردن و امحا را در بردارد.

یک محصول می‌تواند به‌صورت خدمات باشد مانند حفظ سلامت، آموزش، سرگرمی، خدمات مالی و جریان منظم ترافیک. در این خدمات، سیستم مهندسی شده یک سیستم حفظ سلامت، یک سیستم آموزشی، یک سیستم سرگرمی، یک سیستم مالی و یک سیستم کنترل ترافیک است.

سیستم‌ها و محصولات مربوطه براساس فرایندهایی که به‌خوبی درک نشده است، طراحی شده، توسعه یافته، استقرار داده شده، بازسازی شده و از دور خارج می‌شود. اثربخشی - هزینه حاصل شده از واحدهای فنی را می‌توان با تاکید بر موارد زیر ارتقا داد:

۱. بهبود روش‌های مشخص کردن نیازهایی که باید توسط سیستم رفع شود. همه جنبه‌های پروژه مهندسی سیستم‌ها عمیقاً تحت‌تاثیر نیازهاست و در نتیجه مشخص کردن آن‌ها باید در ابتدا انجام گیرد. در نظر گرفتن مجموعه‌ی جامعی از نیازها در ابتدای کار اغلب به یک راه‌حل محکم و استوار ختم می‌شود که شامل پاسخ‌گویی به چندین نیاز با هزینه‌ای اثربخش خواهد بود نه این‌که برای هر نیاز یک راه‌حل به‌دست آید.
 ۲. بهبود روش‌های تعریف محصول و نیازمندی‌های سیستم به‌صورتی که مرتبط با نیازهای تایید شده مشتری و عوامل خارجی باشد. این کار باید در ابتدای فاز طراحی همراه با مشخص کردن عملکرد، اثربخشی و تبیین ویژگی‌های ضروری سیستم انجام گیرد.
 ۳. مدنظر قرار دادن کل سیستم با استفاده از عناصر آن از منظر چرخه‌ی عمر و از محصول تا عناصر پشتیبانی و بازسازی. این روش‌های سیستمی و کارکردی پیش از شناسایی سخت افزار، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، اطلاعات و یا ترکیبی از آن‌ها تعریف می‌شود.
 ۴. در نظر گرفتن تعامل در سلسله مراتب سیستم. این مورد عبارت است از روابط بین هر زوج از اجزای سیستم، بین سطوح بالاتر و پایین‌تر در سلسله مراتب سیستم و در سیستم‌ها یا زیرسیستم‌های هم سطح.
 ۵. سازماندهی و ادغام مهندسی و علوم مرتبط در یک تلاش هماهنگ و هم‌زمان برای مهندسی از بالا به پایین سیستم‌ها.
 ۶. استقرار یک رویکرد علمی همراه با بازبینی، ارزیابی و بازخورد مناسب برای حصول اطمینان از پیشرفت منظم و کارا از شناخت نیازمندی‌ها تا امحا.
- هر سیستم مفید باید به نیازهای شناسایی شده، پاسخ دهد. در نتیجه، عناصر یک سیستم نه تنها باید شامل آیتم‌هایی باشد که به‌طورمستقیم سناریوی عملیاتی یا مأموریت موردنظر را اجرا

نماید، بلکه باید همه عناصر تدارکات و نگهداری را شامل شود تا در زمان خرابی یک عنصر اصلی بتواند پشتیبانی لازم را فراهم آورد. برای حصول اطمینان از اجرای کامل و موفقیت‌آمیز یک مأموریت، همه‌ی عناصر پشتیبانی لازم باید در دسترس، در محل درست و آماده‌ی پاسخ‌گویی باشند. پایداری سیستم می‌تواند اطمینان ایجاد کند که سیستم به‌صورت پیوسته نیازهای عملکردی را به‌صورتی رقابتی همراه با تکامل رقابت و نیازها برآورده می‌کند. پایداری سیستم در حفاظت محیطی مساعدت دارد.

۲-۱-۴- مهندسی محصول رقابتی

محصول رقابتی نیاز تولیدکنندگان تجاری و بخش عمومی در سرتاسر دنیاست. بنابراین چالش مهندسی سیستم‌ها، فراهم آوردن سیستم‌ها و محصولات است که انتظارات مشتری را از منظر اثربخشی- هزینه برآورده سازد.

به‌علت تشدید رقابت در سطح بین‌المللی، تولیدکنندگان به‌دنبال راه‌هایی هستند که مزیت رقابتی پایدار در بازار به‌دست آورند. به‌نظر می‌آید که اکتساب‌ها، ادغام شدن‌ها و کمپین‌های تبلیغاتی در ایجاد ثروت ذاتی که برای سلامتی بلندمدت سازمان موردنیاز است، ناتوان بوده‌اند. اقتصاد رقابتی یک ضرورت است. مهندسی با تاکید بر اقتصاد رقابتی باید هم‌تراز با موضوع‌های تبلیغات، توزیع محصول، مسائل مالی و دیگر موارد مشابه باشد. منابع فیزیکی و انسانی در دسترس در حال کاهش هستند. صنعت در سطح جهانی در حال رشد می‌باشد و رقابت جهانی به سرعت در حال پیشرفت است. بسیاری از سازمان‌ها در حال کوچک شدن بوده و به‌دنبال بهبود عملیات خود و در نظر گرفتن شرکای بین‌المللی هستند. این رقابت باعث کاهش تامین‌کنندگان و پیمانکارانی شده است که بتوانند پاسخ‌گو باشند. از طرفی تعداد اعضای با صلاحیت برای توسعه سیستم‌های پیچیده در حال افزایش است. در نتیجه، ایجاد سیستم‌های جدید موردنیاز به تعویق می‌افتد و به جای آن سیستم‌های موجود توسعه می‌یابند.

با در نظر گرفتن اهمیت یکسان برای همه‌ی فاکتورهای دیگر، افراد نیازهای خود را با خرید محصولات و خدماتی که نسبت ارزش به هزینه بیش‌تری دارند، برطرف می‌کنند. این نسبت را می‌توان با توجه بیش‌تر به محدودیت منابعی که مهندسی در آن کار خود را انجام می‌دهد، افزایش داد. برای حصول اطمینان از این‌که محصول دارای اقتصاد رقابتی بوده و از نظر اقتصادی امکان‌پذیر خواهد بود، مهندسان باید با اقتصاددانان همکاری نزدیکی داشته باشند. این کار به بهترین نحو از طریق رویکرد مهندسی چرخه‌ی عمر سیستم فراهم می‌شود.

۲-۲- مهندسی چرخه‌ی عمر سیستم

تجربه‌ی دهه‌های گذشته دلالت بر آن دارد که سیستمی که درست کار می‌کند، اثربخش است و از لحاظ اقتصادی، رقابتی است، نمی‌تواند توسط تلاش‌هایی که بعد از ساخت محصول انجام می‌شود، به‌دست آید. در نتیجه، ضروری است که خروجی‌ها که در طی استفاده از سیستم و پس از استفاده‌ی آن به‌دست می‌آید، در مراحل ابتدایی طراحی و توسعه پیش‌بینی شود. مهندسی چرخه‌ی عمر که در گذشته اکثراً مورد مسامحه قرار گرفته است، باید مرکز تمرکز مهندسی باشد.

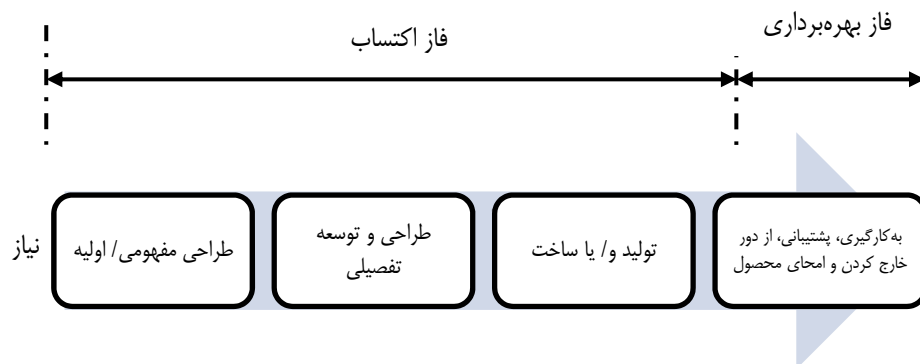
۲-۱- چرخه‌های عمر محصول و سیستم

اساس اجرای مهندسی سیستم‌ها، فهم فرایند چرخه‌ی عمر است که در شکل ۱-۲ آورده شده است. چرخه‌ی عمر محصول با شناسایی یک نیاز و توسعه آن از طریق طراحی مفهومی و اولیه، طراحی و توسعه تفصیلی، تولید یا ساخت، توزیع، بهره‌برداری، پشتیبانی، از دور خارج کردن و احیا گسترش می‌یابد. فازهای چرخه‌ی عمر به‌صورت اکتساب و بهره‌برداری دسته‌بندی می‌شود تا فعالیت‌های تولیدکننده و مشتری را شناسایی کند.

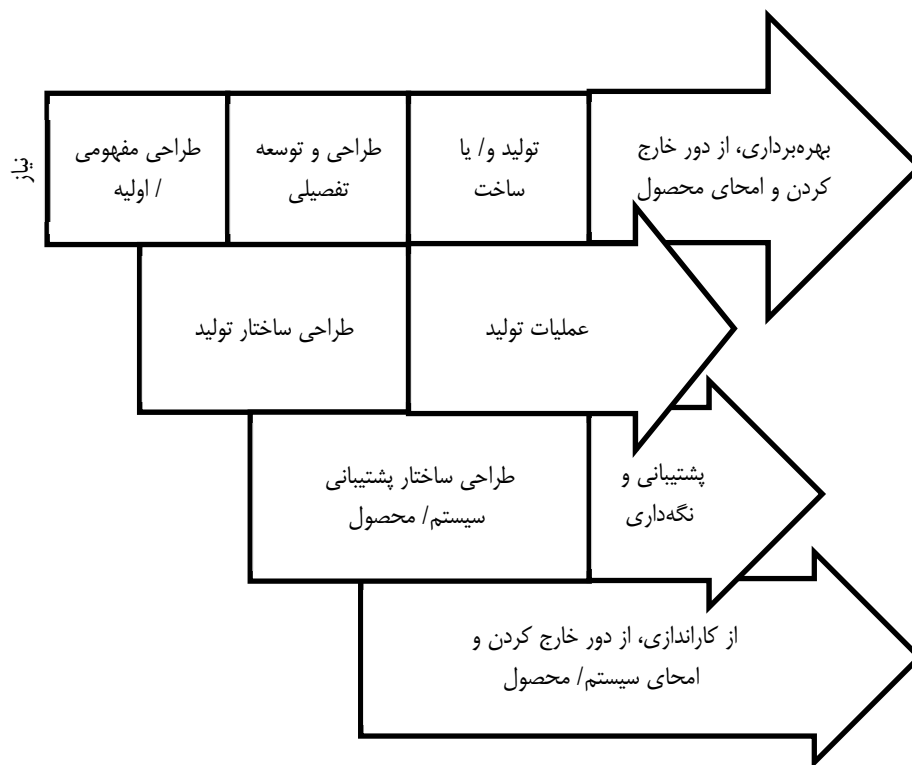
مهندسی چرخه‌ی عمر سیستم فراتر از چرخه‌ی عمر محصول است که به‌صورت مجزا به آن نگاه می‌شد. این مهندسی باید به‌طور هم‌زمان چرخه‌ی عمر زیرسیستم‌های تولید یا ساخت،

چرخه‌ی عمر زیرسیستم‌های پشتیبانی و نگهداری و تعمیرات، چرخه‌ی عمر از کاراندازی، از دور خارج کردن، باز به کارگیری و امحا را در برداشته باشد. سیستم کل از چهار چرخه‌ی عمر که به صورت هم‌زمان پیشرفت می‌کنند، ساخته می‌شود که در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است. این تصور و ادراک، پایه مهندسی هم‌زمان است.

نیاز به محصول، اول از همه موردتوجه قرار می‌گیرد. این شناخت، بنیاد طراحی مفهومی برای رفع نیاز را ایجاد می‌کند. در ادامه، در طی طراحی مفهومی محصول، باید به صورت هم‌زمان به تولید آن توجه کرد. این موضوع یک چرخه‌ی عمر موازی برای توانمندی تولید و/یا ساخت را موجب می‌شود. بسیاری از فعالیت‌های مرتبط با تولید، برای فراهم کردن تولید یک محصول موردنیاز است، چه این توانمندی تولید یک کارخانه تولیدی باشد، چه یک پیمانکار ساخت باشد و چه یک فعالیت خدماتی باشد.



شکل ۲-۱- چرخه‌ی عمر محصول



شکل ۲-۲- چرخه‌های عمر سیستم

شکل ۲-۲ نشان دهنده چرخه‌ی عمری است که اهمیت بالایی داشته و اغلب تا بعد از طراحی محصول و تولید مورد بی‌توجهی قرار می‌گیرد. این چرخه‌ی عمر فراهم آورنده‌ی فعالیت‌هایی شامل نگهداری، تعمیرات، تدارکات و مهارت‌های فنی موردنیاز در طول بهره‌برداری از محصول می‌باشد که برای پشتیبانی از قابلیت‌های تولیدی و سر پا نگه داشتن کل سیستم موردنیاز است. تدارکات، نگهداری، پشتیبانی فنی و برنامه‌ریزی و نیازمندی‌های بازسازی باید طی فرایند طراحی مفهومی به روشی مدون انجام گیرد.

هنگامی که چرخه‌های عمر در نظر گرفته می‌شود، ویژگی‌های طراحی باید برای تسهیل از دور خارج کردن، بازتولید یا از کاراندازی با حداقل آثار بین سیستمی، ادغام شوند. برای مثال،

مباحثی مانند قابلیت بازیافت، استفاده مجدد و امحا در قابلیت حفاظت محیطی مشارکت خواهند داشت. همچنین، برای سیستم باید قابلیت آمادگی برای بازتولید ایجاد شود و این کار توسط شناسایی و پیش‌بینی تغییرات در نیازمندی‌ها مانند افزایش پیچیدگی، الحاق فناوری‌های جدید براساس برنامه، قوانین احتمالی جدید، توسعه بازار و دیگر موارد صورت می‌گیرد.

علاوه بر این، تعامل بین سیستم و محصول و هر سیستم مرتبط دیگر، باید از نقطه نظر انطباق طی فرایند طراحی مفهومی مورد توجه قرار گیرد تا نیاز برای طراحی دوباره سیستم و محصول به حداقل برسد. چه سیستم یک محصول فروخته شده توسط یک شرکت باشد، چه یک سیستم محیطی که ممکن است دچار تنزل شود، یا یک سیستم رایانه‌ای که در آن یک نرم‌افزار اجرا می‌شود. رابطه‌ی محصول و سیستم تحت توسعه باید به صورت هم‌زمان مهندسی شود.

۲-۲-۲- طراحی برای چرخه‌ی عمر

طراحی در زمینه‌ی چرخه‌ی عمر محصول با طراحی عادی متفاوت است. طراحی هدایت شده توسط چرخه‌ی عمر به طور هم‌زمان به نیازهای مشتری (یعنی نیازهای تعریف شده از طریق عبارات وظیفه‌ای) و خروجی‌های چرخه‌ی عمر پاسخ‌گو است. طراحی نه تنها باید یک نیاز را به یک ساختار سیستمی تبدیل کند، بلکه باید اطمینان ایجاد کند که طراحی با نیازمندی‌های وظیفه‌ای و فیزیکی مرتبط، دارای انطباق است. علاوه بر آن، این طراحی باید خروجی‌های عملیاتی را در قالب بهره‌وری، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، قابلیت بهره‌برداری، قابلیت حفاظت، قابلیت ارائه‌ی خدمات، قابلیت امحا، قابلیت پشتیبانی و غیره را علاوه بر عملکرد، اثربخشی و قابلیت حصول تشریح نماید. یک نمایش تفصیلی از فعالیت‌ها و تعامل‌های فناورانه که باید طی فرایند چرخه‌ی عمر سیستم ادغام شوند در شکل ۲-۳ ارائه شده است. پیشروی این فرایند، از چپ به راست تکرار شونده بوده و طبیعت آن برخلاف ظاهر به صورت سریالی نیست.

اگرچه سطح فعالیت و جزئیات ممکن است متفاوت باشد، وظایف چرخه‌ی عمر به‌صورت عمومی توصیف شده و نمایش داده شده است. این وظایف هرجایی که یک نیاز جدید ایجاد شود یا نیازمندی‌ها تغییر کنند، قابل استفاده است چه سیستم کوچک باشد چه بسیار بزرگ. اجرای کامل این فرایند- در یک سطح تفصیلی مناسب - نه تنها در مهندسی یک سیستم جدید، بلکه در مهندسی مجدد یک سیستم موجود ضروری است.

فعالیت‌های فنی عمده طی فازهای طراحی، تولید یا ساخت، بهره‌برداری، پشتیبانی و از دور خارج کردن در چرخه‌ی عمر در شکل ۲-۳ برجسته شده است.

آن‌ها هنگامی که یک نیاز جدید شناسایی شود، شروع به کار می‌کنند. تولید یا ساخت سیستم، وظیفه‌ای است که در فاز اکتساب تکمیل می‌شود. وظایف عملیات و پشتیبانی در طی فاز بهره‌برداری چرخه‌ی عمر انجام می‌گیرد. از دور خارج کردن و امحا، وظایف نهایی مهم در فاز بهره‌برداری هستند که باید به‌عنوان بخشی از طراحی برای چرخه‌ی عمر مدنظر باشد.

بلوک‌های شماره‌گذاری شده در شکل ۲-۳، فازهای نمایش داده شده در شکل ۲-۲ را به‌صورت زیر ترسیم می‌کند:

۱. فاز اکتساب - شکل ۲-۳، بلوک ۱ تا ۴.
۲. فاز بهره‌برداری - شکل ۲-۳، بلوک ۵ تا ۶.
۳. فاز طراحی - شکل ۲-۳، بلوک ۱ تا ۳.
۴. فاز راه‌اندازی - شکل ۲-۳، بلوک ۴.
۵. فاز عملیات - شکل ۲-۳، بلوک ۵.
۶. فاز از کاراندازی - شکل ۲-۳، بلوک ۶.

ارتباط و هماهنگی موردنیاز برای طراحی و توسعه محصول، توانمندی تولید، قابلیت پشتیبانی سیستم و روابط داخلی سیستم – که در نتیجه آن چرخه‌ی عمر را به سلامت طی کنند – کار آسانی نیست. پیشرفت در این زمینه توسط فناوری‌هایی تسهیل می‌شود که اکتساب و استفاده از اطلاعات طراحی (که فرایندهایی زمان‌بر هستند) را ممکن می‌سازند. فناوری طراحی به کمک رایانه^۱ (CAD) همراه با اتصال اینترنتی و اینترنتی، تیم‌های چند رشته‌ای استقرار یافته در مکان‌های جغرافیایی متفاوت را قادر می‌سازد که به‌صورت اثربخش در طراحی‌های فیزیکی پیچیده همکاری داشته باشند. برای برخی محصولات، اضافه کردن نرم‌افزارهای تولید به کمک رایانه^۲ (CAM) می‌تواند به‌طور خودکار طرح‌های سه بعدی تایید شده در CAD را تبدیل به دستورالعمل‌های تولیدی برای تجهیزات کنترل شده عددی کند. نرم‌افزار عمومی یا سفارشی شده CAD می‌تواند جستجو برای گزینه‌های ممکن طراحی را فراهم آورد. هنگامی که یک طرح توسط CAD/CAM ایجاد شد، بهبودهای مستمر طراحی کار ساده‌ای می‌شود. طرح‌های CAD هم‌چنین نگهداری، پشتیبانی فنی، بازتولید (مهندسی مجدد) و امحا را تسهیل می‌کنند. بازه‌ی وسیعی از دیگر ابزارهای ارتباطی الکترونیکی وجود دارد که می‌تواند در ادغام طراحی‌هایی که در مکان‌های جغرافیایی مختلف ایجاد شده است، ادغام کرده و فعالیت‌های توسعه‌ای را طی چرخه‌ی عمر سیستم یکپارچه کند.

در وزارت دفاع آمریکا (DOD) و همکاران غیرآمریکایی توجه ویژه‌ای به چرخه‌ی عمر وجود دارد. این موضوع می‌تواند مربوط به این حقیقت باشد که سیستم‌های دفاعی که توسط DOD ساخته شده و عملیاتی می‌شوند، فعالیت‌های نگهداری آن انجام می‌پذیرد. این موضوع کم‌تر در بخش‌های خصوصی که در آن مشتری یا کاربر معمولاً تولیدکننده نیست، اتفاق می‌افتد. این شرکت‌های خصوصی به‌عنوان پیمانکاران وزارت دفاع به طراحی و توسعه برپایه مدیریت،

1.Computer-Aided Design

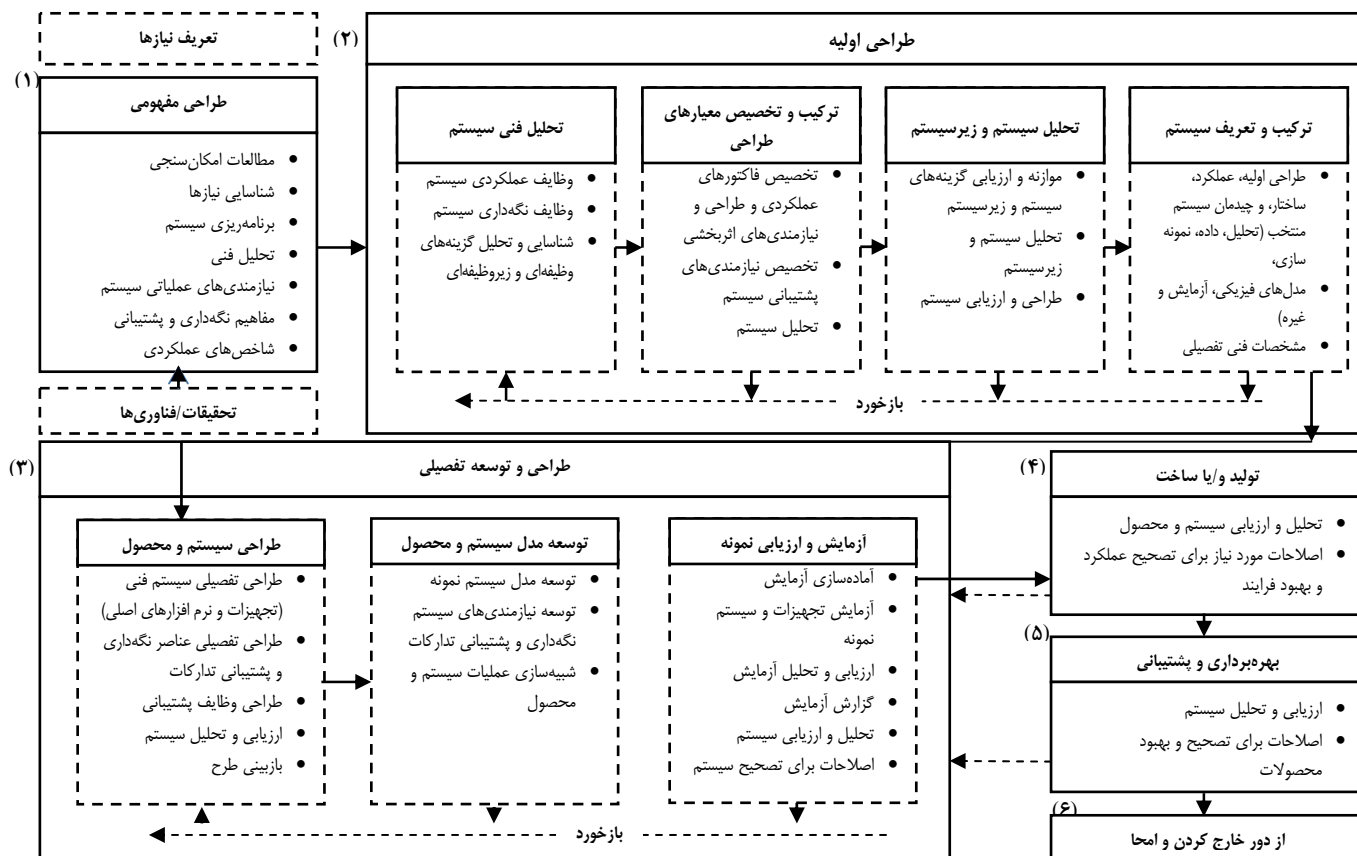
2.Computer-Aided Manufacturing

مشخصات فنی و استانداردهای DOD کار می‌کنند. از آن‌جا که DOD مشتری و کاربر سیستم‌های حاصل است، DOD در فرایند اکتساب به‌طور مکرر دخالت می‌کند.

بسیاری از شرکت‌ها که برای بازارهای بخش خصوصی کار تولید انجام می‌دهند، ترجیح داده‌اند که کار طراحی در چرخه‌ی عمر را به‌صورت ذهنی انجام دهند. برای مثال، امروزه طراحی اثربخشی انرژی در وسایل خانگی مانند آبگرمکن یا تهویه مطبوع معمول است. برخی از تولیدکنندگان خودروهای سنگین، هزینه‌های نگهداری چرخه‌ی عمر را در محدوده‌ی اعلام شده پشتیبانی می‌کنند (گارانتی). این پیشرفت‌ها خوب است اما کافی نیست. هنگامی که تولیدکننده، مصرف‌کننده محصول نباشد، احتمال کمی وجود دارد که مسائل بالقوه‌ی مربوط به دوره‌ی عملیاتی محصول، در توسعه محصول مورد توجه قرار گیرد. خروجی‌های ناخواسته اغلب به‌عنوان مسائلی نمود پیدا می‌کنند که کاربر متوجه آن‌هاست تا تولیدکننده.

۳-۲- فرایند مهندسی سیستم‌ها

اگرچه توافقی عمومی در مورد قواعد و اهداف مهندسی سیستم‌ها وجود ندارد، اجرای واقعی آن از یک سیستم و تیم مهندسی به دیگری متفاوت است. رویکرد فرایندی و گام‌های مورد استفاده بستگی به کاربرد سیستم و زمینه‌ی تجربه افراد تیم دارد. برای برپا کردن یک چارچوب مشترک و مرجع برای بهبود درک و روابط، مهم است که خطوط مبنایی تعریف شود که فرایند مهندسی سیستم‌ها را همراه با فازها و گام‌های ضروری در آن فرایند، توصیف کند. این چارچوب مشترک با رویکردهای بالا به پایین و پایین به بالا تقویت می‌شود. هر یک از این مباحث در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲-۳- فعالیت‌ها و تعاملات فنی در فرایند چرخه عمر سیستم

۲-۳-۱- گام‌ها و فازهای فرایند چرخه‌ی عمر

شکل ۲-۴ فازها و مراحل منتخب فرایند چرخه‌ی عمر برای یک سیستم عمومی را ترسیم کرده است. این مدلی است که به عنوان یک چارچوب مرجع بوده و محتوا برای بحث و بررسی در فصل‌های بعدی را فراهم می‌کند. این قسمت شامل گام‌های پایه برای فرایند مهندسی سیستم‌ها (یعنی نیازمندی‌های تحلیل، تخصیص و تحلیل وظیفه‌ای، ترکیب، مطالعات موازنه، ارزیابی طرح و غیره) می‌شود. یک نیاز تازه شناسایی شده و یک نیاز در حال تکامل، یک نیازمندی برای یک سیستم جدید را آشکار می‌کند. اگر تصمیمی برای یافتن راه‌حل برای این نیاز گرفته شود، آنگاه تصمیمی باید گرفته شود تا بررسی شود که آیا نیازهای دیگری برای طراحی راه‌حل موردنظر وجود دارد یا خیر. برپایه تعیین اولیه‌ی نیازها، فازهای اصلی طراحی مفهومی و در نهایت از کاراندازی و از دور خارج کردن سیستم قابل اجرا خواهد بود که در پاراگراف‌های بعدی به آن پرداخته می‌شود. قلمرو نیازها می‌تواند منقبض یا منبسط شود، اما این قلمرو باید در اسرع وقت به ثبات برسد و بر پایه یک ارزیابی ارزش و هزینه از مشتری باشد.

فازهای برنامه که در شکل ۲-۴ توصیف شده است، برای وظایفی خاص، دوره‌ی زمانی مشخص، سطح جذب سرمایه، یا تعداد تکرارها تبیین نشده است. نیازمندی‌های هر برنامه در هر کاربرد متفاوت است. این شکل نشان‌دهنده‌ی فرایند کلی است که نیازها را طی اکتساب و استقرار سیستم دنبال می‌کند. بدون توجه به نوع، اندازه، یا پیچیدگی سیستم، یک نیازمندی به طراحی مفهومی (شامل تحلیل نیازمندی‌ها)، یک نیازمندی برای طراحی اولیه و غیره وجود دارد.

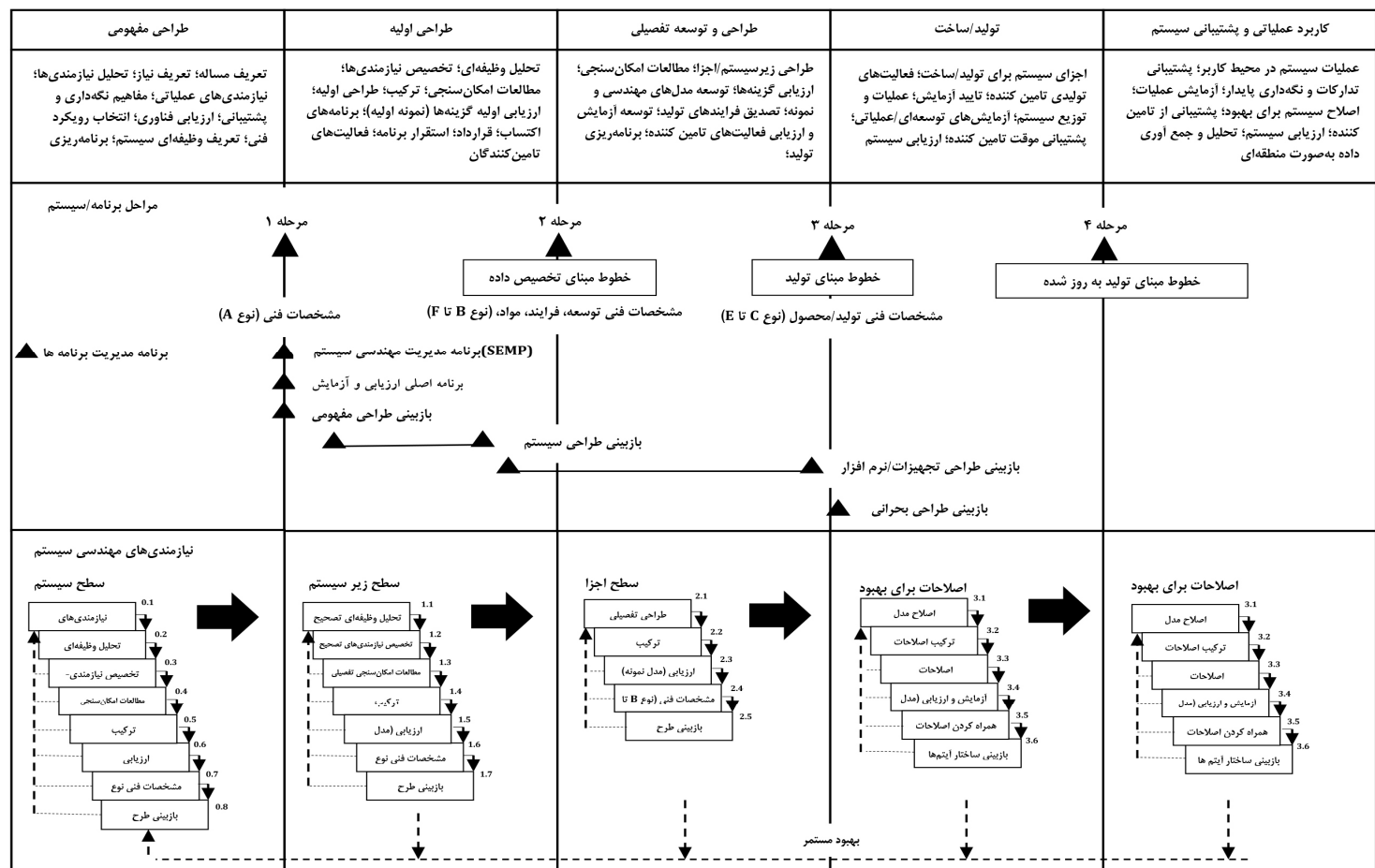
همچنین، برای حصول اطمینان از حداکثر شدن اثربخشی، مفاهیم نمایش داده شده در شکل ۲-۴ باید به درستی مرزبندی شود تا برای اجرا در یک سیستم خاص مدنظر قرار گیرد.

شکل ۲-۴ (بلوک‌های 0.1 تا 0.8، بلوک‌های 1.1 تا 1.7، و بلوک‌های 2.1 تا 2.5) نشان می‌دهد که گام‌های اصلی در فرایند مهندسی سیستم‌ها باید طبیعتی تکرار شونده داشته و تعریفی

از بالا به پایین برای سیستم فراهم کند و در ادامه به سطوح پایین‌تر از زیرسیستم‌ها بپردازد (و اگر نیاز بود به سطوح پایین‌تر نیز پرداخته شود). با تمرکز بر نیازها و در ابتدای طراحی مفهومی، اتمام بلوک 0.2 سیستم را در عبارات وظیفه‌ای تعریف می‌کند (همراه با شناسایی "چه‌ها" از نقطه نظر نیازمندی‌ها). این "چه‌ها" از طریق فرایند تکرار شونده‌ی تخصیص نیازمندی‌ها و تقسیم‌بندی وظیفه‌ای در کنار ترکیب، تحلیل و ارزیابی طراحی مفهومی به مجموعه‌ای از "چگونه‌ها" تبدیل می‌شود. این فاز طراحی مفهومی زمانی انجام می‌شود که ساختار ابتدایی سیستم (یا معماری سیستم) تعریف شده باشد.

طی طراحی اولیه، با اتمام بلوک 1.1 سیستم از طریق عبارات تصحیح شده وظیفه‌ای که تعاریف را از بالا به پایین برای زیرسیستم‌ها فراهم می‌آورد و زمینه حرکت به پایین تا سطح اجزا را ایجاد می‌کند، تعریف می‌شود. در این جا "چه‌ها" از فاز طراحی مفهومی استخراج می‌شود. این "چه‌ها" سپس از طریق فرایند تکرار شونده‌ی تخصیص نیازمندی‌ها و تقسیم‌بندی وظیفه‌ای در کنار ترکیب، تحلیل و ارزیابی طراحی اولیه به مجموعه‌ای از "چگونه‌ها"ی کاربردی تبدیل می‌شود. این فاز طراحی اولیه جایی است که ساختار زیرسیستم‌ها (یا معماری زیر سیستم‌ها) در آن تعریف می‌شود.

بلوک‌های 1.1 تا 1.7 قسمت‌های تکامل یافته بلوک‌های 0.1 تا 0.8 هستند، بلوک‌های 2.1 تا 2.5 قسمت‌های تکامل یافته 1.1 تا 1.7 بوده و بلوک‌های 3.1 تا 3.6 قسمت‌های تکامل یافته 2.1 تا 2.5 هستند. فرایند کلی که در شکل نشان داده شده است، شامل یک طراحی تکاملی و فرایند توسعه‌ای است. با استفاده از بازخوردهای مناسب و همراه با تصحیح طراحی، فرایند به تدریج به یک طرح موفقیت‌آمیز تبدیل می‌شود. تعریف وظیفه‌ای سیستم، زیرسیستم‌هایش و اجزای آن‌ها به عنوان خطوط مبنا در تعریف نیازمندی‌های منابع در تولید و سپس در عملیات (یعنی سخت افزار، نرم افزار، افراد، تسهیلات، داده‌ها، عناصر پشتیبانی یا ترکیبی از آن‌ها) عمل خواهد کرد.



شکل ۲-۴- فعالیت‌ها و تعاملات فرایند سیستم طی چرخه‌ی عمر

۲-۳-۲- دیگر مدل‌های فرایند مهندسی سیستم‌ها

فرایند مهندسی سیستم‌ها و گام‌های نمایش داده شده در شکل ۴-۲ به صورت مفصل در بخش دوم این کتاب (فصل‌های ۳ تا ۶) توسعه داده شده و تشریح شده‌اند. هدف نهایی، تشریح فرایندی است که باید یک نیاز مشخص را تبیین کند.

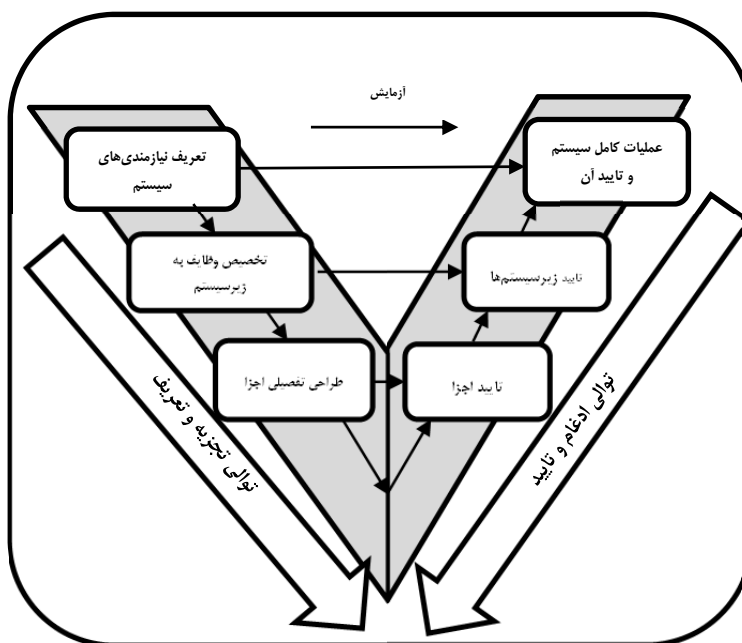
شکل ۴-۲ قصد تاکید بر هیچ مدل خاص مانند مدل آبشاری، مدل حلزونی، مدل “vee” یا مشابه آن‌ها را ندارد. این مدل‌ها به طور خلاصه در شکل ۵-۲ مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۴- ملاحظات طراحی سیستم

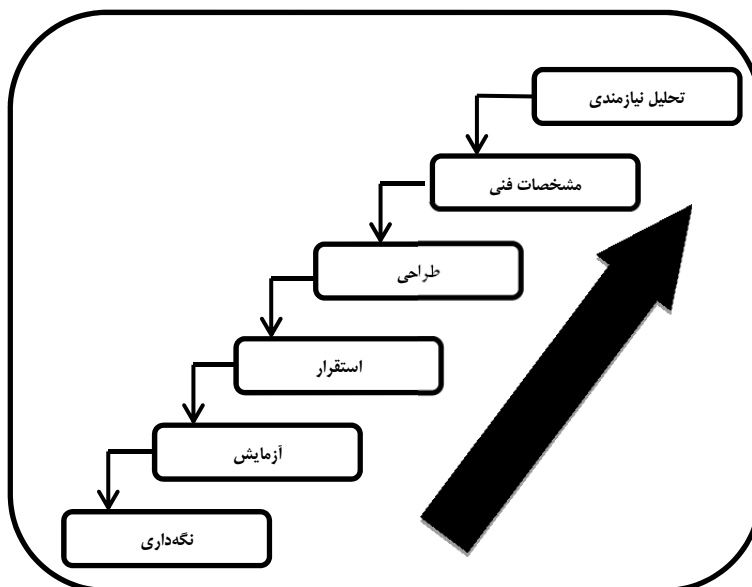
فرایند مهندسی سیستم به عنوان یک رویکرد ترجیحی برای خلق سیستم و محصولاتش است که از نقطه نظر جهانی و اثربخش - هزینه، رقابتی باشد. یک فعالیت فنی و ضروری در فرایند، ارزیابی طراحی سیستم است. ارزیابی باید به طور ذاتی در فرایند مهندسی سیستم‌ها باشد و به طور منظم با پیشرفت طراحی سیستم انجام گیرد. با این حال، ارزیابی سیستم نباید بدون راهنمایی گرفتن از نیازمندی‌های مشتری و معیارهای کاربردی طراحی سیستم یا بدون در نظر گرفتن مشتری انجام گیرد. هنگامی که این کار با شناخت کامل معیارهای طراحی و نیازمندی‌های مشتری انجام گیرد، ارزیابی از بهبود مستمر طراحی اطمینان حاصل می‌کند.

(الف) مدل‌های فرایند سیستم

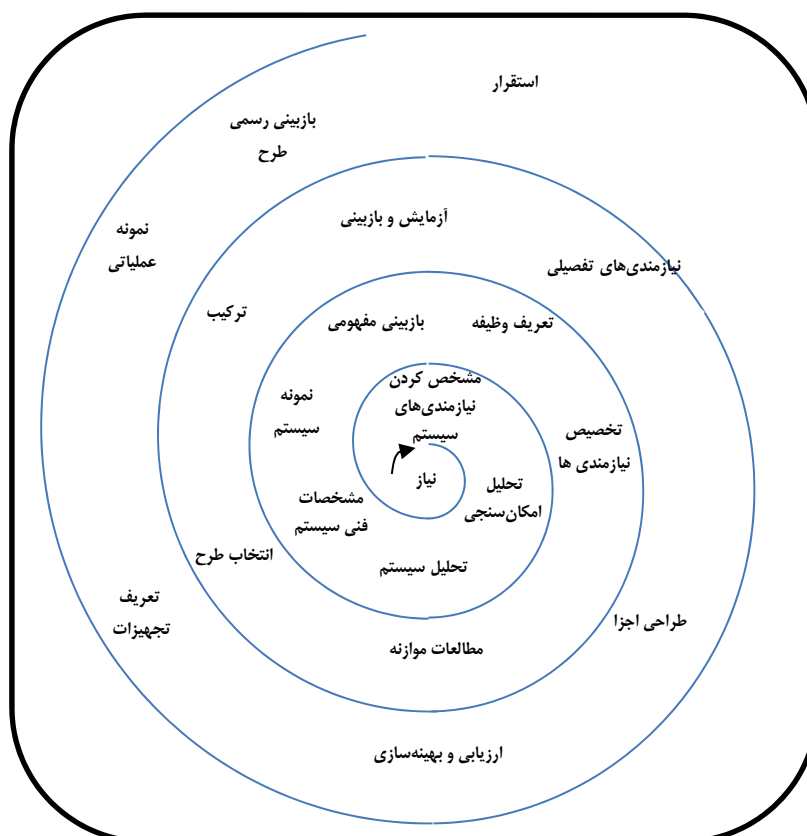
مدل Vee



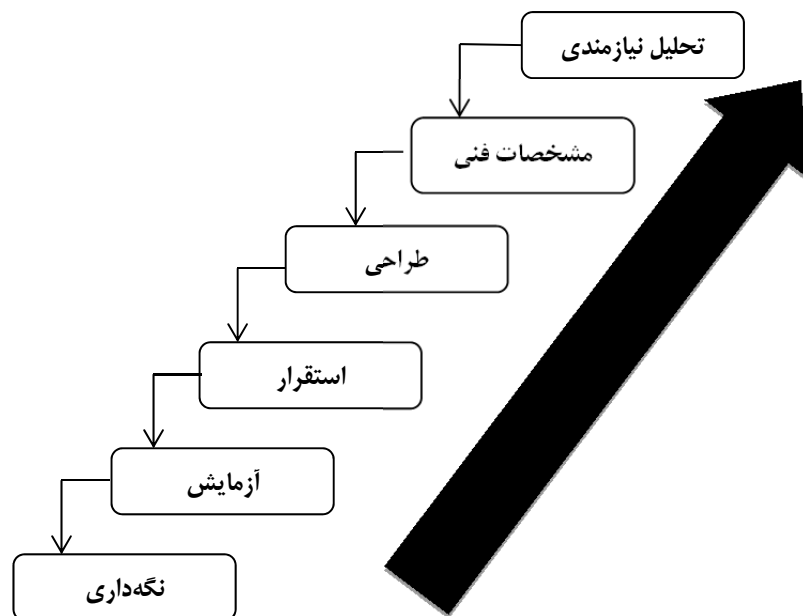
مدل آبشاری



مدل حلزونی

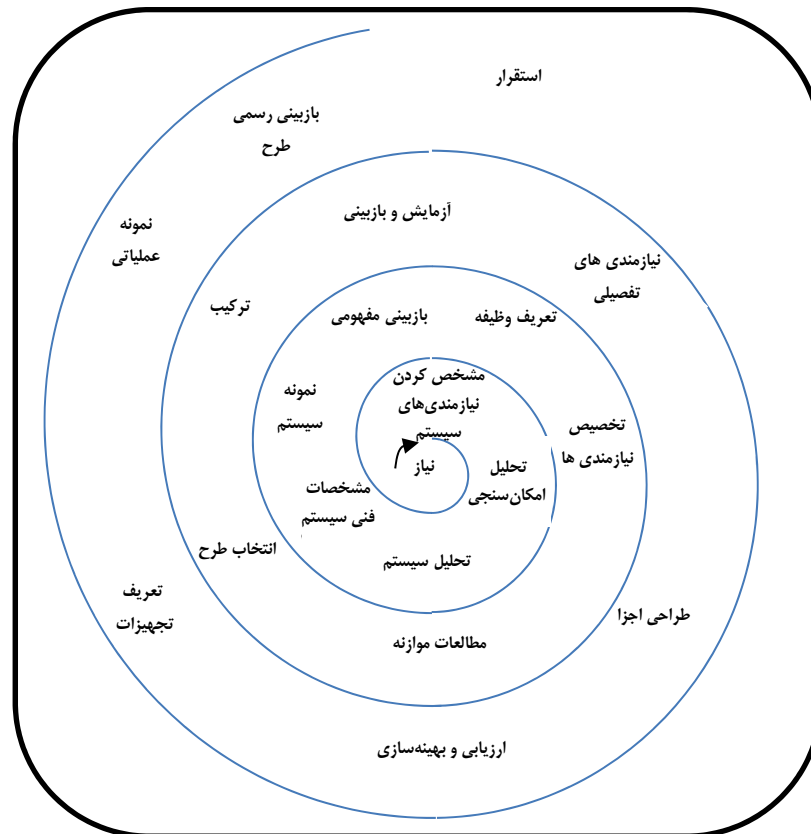


(ب) مدل آبشاری فرایند



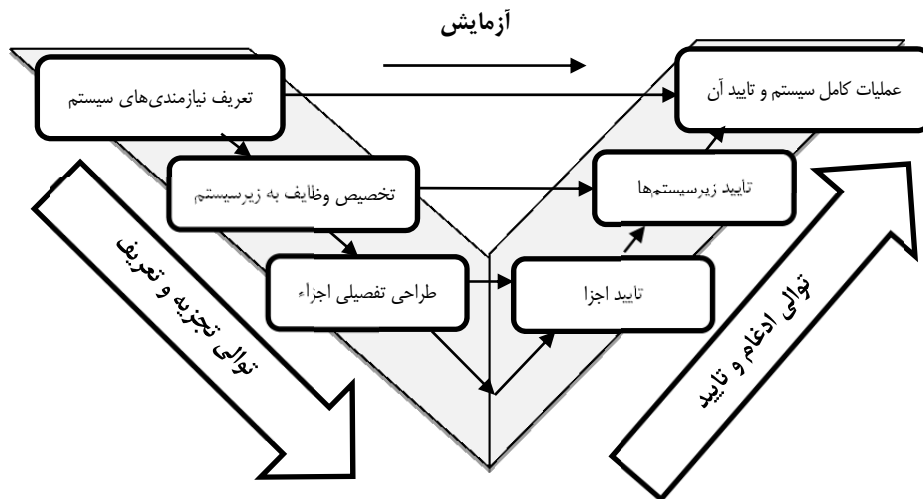
- مدل آبشار که توسط Royce در سال ۱۹۷۰ معرفی گردید، در ابتدا برای توسعه‌ی نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفت. این مدل معمولاً از پنج تا هفت گام یا فاز متوالی برای مهندسی سیستم‌ها یا توسعه‌ی نرم‌افزار تشکیل شده است. Boehm این مدل را در سال ۱۹۸۱ تبدیل به یک مدل هشت گامی از فعالیت‌های متوالی کرد.
- یک مدل مشابه سخت‌افزار و نرم‌افزار را به دو تلاش متمایز تقسیم می‌کند. در حالت ایده‌آل، هر فاز در توالی تکمیل می‌شود تا محصول به‌دست آید. با این حال، این یک مورد نادر است. هنگامی که نواقص کشف شود، فازها باید تا زمانی که این نواقص تصحیح شوند، تکرار گردند.

(پ) مدل حلزونی



- مدل حلزونی در توسعه‌ی چرخه‌ی عمر (که توسط Boehm در سال ۱۹۸۶ با استفاده از کار Hall در مهندسی سیستم در سال ۱۹۶۹ ارائه شد) قصد دارد که یک رویکرد ریسک-محرك برای توسعه‌ی سیستم‌ها یا محصولات ارائه دهد.
- این مدل یک اقتباس از مدل آبشار است که در اختیار نمونه نیست. مدل حلزونی، ویژگی‌های دیگر مدل‌ها مانند مدل بازخورد را داراست.
- کاربرد مدل حلزونی در عمل به‌صورت تکرار شونده است که از طریق فازهای متعدد از انواع مختلف نمونه‌های توسعه داده شده استفاده می‌کند. این مدل یک ارزیابی از ریسک را فراهم می‌کند تا قبل از وارد شدن به فاز بعدی آن را مورد بررسی قرار دهد.

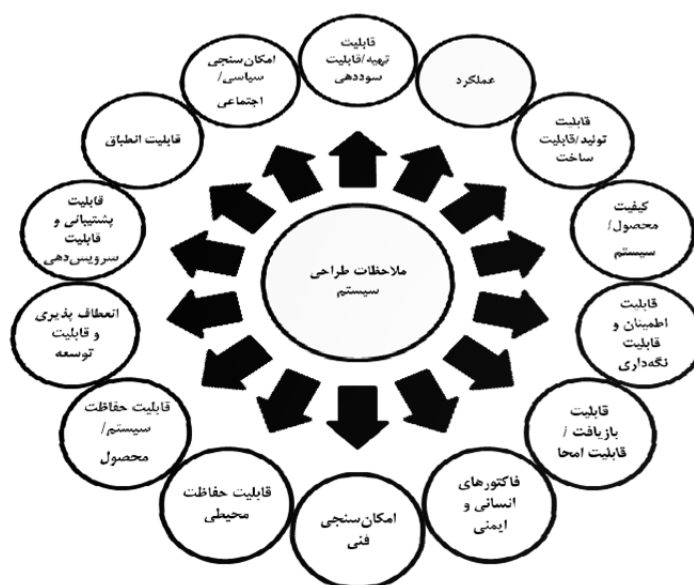
(ت) مدل Vee



- Forsberg و Mooz آنچه را جنبه فنی چرخه پروژه نامیدند، توسط مدل Vee تشریح کردند. این مدل با نیازهای کاربر در سمت بالا و چپ شروع شده و با یک سیستم تایید شده توسط کاربر در سمت راست و بالا به اتمام می‌رسد.
- در سمت چپ فعالیت‌های تعریف و تجزیه وجود دارد که جریانی رو به پایین داشته و معماری سیستم را با خلق طراحی تفصیلی به دست می‌آورد.
- ادغام و تایید که در سمت راست قرار دارد جریانی رو به بالا دارد که در آن به ترتیب سطوح بالای زیرسیستم‌ها تایید شده و در سطح سیستم به حد اعلی می‌رسد.
- تایید و تصدیق اعتبار از سطح اجزا تا تصدیق عملکردی سیستم پیشرفت می‌کند. در هر سطح از آزمایش، مشخصات فنی و نیازمندی‌های مستندسازی شده با مشاوران در میان گذاشته می‌شود تا از برآورده شدن مشخصات فنی سیستم، زیرسیستم و اجزا اطمینان حاصل شود.

شکل ۲-۵- برخی مدل‌های فرایند مهندسی سیستم‌ها

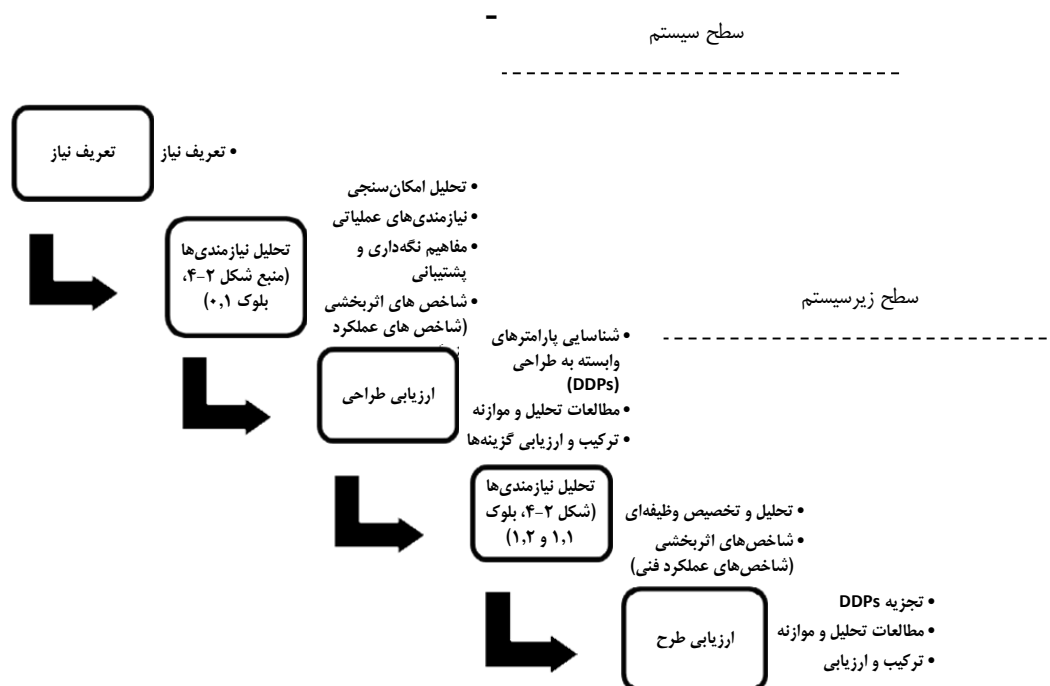
ملاحظات متعددی برای طراحی سیستم وجود دارد که هنگام توسعه معیارهای طراحی باید شناسایی شده و مورد مطالعه قرار گیرد. این ملاحظات در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. ملاحظات طراحی، گستره‌ی وسیعی از چیزهای ممکن را فراهم می‌کند که اقتباس معیارهای طراحی از آن می‌تواند تکامل یابد. یک بحث عمومی از این موضوع مهم در این فصل ارائه شده است. رویکردهای مدل‌سازی و تحلیل برای اجرای تحلیل سیستم و ارزیابی طراحی، همراه با مسائل چند معیاره، در بخش چهارم (فصل‌های ۷-۱۱) ارائه شده است.



شکل ۶-۲ - برخی ملاحظات طراحی سیستم

۲-۴-۱- توسعه معیارهای طراحی

همان‌طور که در شکل ۲-۷ ترسیم شده است، تعریف نیازها در سطح سیستم، نقطه‌ی آغازین تعیین نیازمندی‌های مشتری و توسعه‌ی معیارهای طراحی است. نیازمندی‌ها برای سیستم با تشریح وظایفی که باید انجام شوند، صورت می‌گیرد. وظایف عملیاتی و پشتیبانی (یعنی آن‌هایی که برای به سرانجام رساندن سناریوی مأموریت مشخص شده، یا یک سری از مأموریت‌ها موردنیاز است و آن‌هایی که برای حصول اطمینان از آن که سیستم می‌تواند وظایف را در هر زمان که نیاز باشد به خوبی انجام دهد) باید در بالاترین سطح توصیف شود. همچنین، مفاهیم عمومی و نیازمندی‌های حتمی برای تولید، ادغام سیستم و از کاراندازی باید تشریح شوند.



شکل ۲-۷- تجزیه نیازمندی‌های طراحی سیستم

در ارزیابی طرح، گام ابتدایی که به‌طور کامل معیارهای طراحی را شناسایی می‌کند، ایجاد خطوط مبنا است که هر گزینه یا ساختار طرح را بتوان با آن ارزیابی کرد. این خطوط مبنا از طریق فرایند تکرار شونده تحلیل نیازمندی‌ها (یعنی شناسایی نیازها، تحلیل امکان‌سنجی، تعریف نیازمندی‌های عملیاتی و پشتیبانی سیستم، انتخاب مفاهیم مناسب برای تولید، ادغام سیستم‌ها و از کاراندازی آن) تعیین می‌شود. خطوط راهنمای دقیق‌تر برای هر یک از سطوح سیستم در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. وظایفی که یک سیستم باید برای ارضای نیازهای مشخص مشتری انجام دهد، باید در کنار انتظارات چرخه‌ی زمانی، فراوانی، سرعت، هزینه، اثربخشی و دیگر فاکتورهای مربوطه تشریح گردد. نیازمندی‌های وظیفه‌ای باید ویژگی‌های طراحی را در یک سطح مناسب سیستم قرار داده شده باشد.

به‌عنوان بخشی از این فرایند، لازم است برخی شاخص‌های سیستم در ارتباط با عملکرد، اثربخشی، هزینه و دیگر فاکتورهای کمی برای پاسخ به انتظارات مشتری ایجاد شود. برای نمونه، سیستم چه وظایفی را باید انجام دهد، این وظایف در کجا اجرایی می‌شود، با چه فراوانی، در چه سطحی از قابلیت اطمینان و با چه هزینه‌ای؟ برخی از این فاکتورها از نظر مشتری می‌تواند مهم‌تر از بقیه باشد و در نتیجه فرایند طراحی تحت تاثیر سطوح مختلف اهمیت در معیارهای تبیین شده قرار خواهد گرفت.

سیستم‌های کاندید با استفاده از ترکیب طراحی حاصل شده و با توجه به اهداف مناسب برای تحلیل و ارزیابی، طراحی می‌شوند.

ارزیابی کردن به‌منظور مشخص کردن درجه ارضای معیارهای طراحی توسط نامزدهای سیستم انجام می‌گیرد. معیارهای کاربردی مربوط به سیستم باید در عبارات شاخص‌های عملکرد فنی (TPM's) بیان شده و در سطح سیستم ظاهر شود. TPMها، ویژگی‌هایی هستند که صفات

ذاتی طراحی را اقتباس می‌کنند. صفاتی که به‌طورمستقیم به ویژگی‌های سیستم مرتبط می‌شوند، پارامترهای وابسته به طراحی (DDP^1) نامیده می‌شوند که هر کدام با شاخص مشخصی همراه خواهند شد. در مقابل، فاکتورهای خارجی مربوط به طراحی پارامترهای مستقل طراحی (DIP^2) نام دارند.

توسعه‌ی معیارهای طراحی بر پایه مجموعه‌ی مناسبی از ملاحظات طراحی، که به شناخت پارامترهای وابسته و مستقل طراحی ختم می‌شود، موضوعی ضروری است. تعاریف دقیق‌تر این عبارات به‌صورت زیر هستند:

۱. ملاحظات طراحی – گستره‌ی کامل صفات و ویژگی‌هایی هستند که می‌توانند توسط سیستم، محصول یا خدمات مهندسی شده ظهور پیدا کنند. این موارد هم به مشتری و هم به تولیدکننده مربوط می‌شود (شکل ۲-۶ را ملاحظه کنید).

۲. پارامترهای وابسته به طراحی (DDP) – صفات و/یا ویژگی‌های ذاتی در طراحی هستند که برای پیش‌بینی یا تخمین شاخص‌ها موردنیاز می‌باشند (برای مثال عمر طراحی، وزن، قابلیت اطمینان، بهره‌وری، قابلیت نگهداری، قابلیت ایجاد آلودگی و غیره).

۳. پارامترهای مستقل از طراحی (DIP) – فاکتورهای خارجی برای طراحی هستند که باید پیش‌بینی شده و/یا تخمین زده شوند و برای ارزیابی در طول طراحی مورد استفاده قرار گیرند (مانند هزینه‌ی سوخت، نرخ نیروی کار، هزینه‌ی مواد در هر پوند، نرخ سود و غیره). این پارامترها به محیط عملیاتی و تولیدی سیستم بستگی دارند.

۴. شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) – مقادیر تخمین زده شده و/یا پیش‌بینی شده برای DDP ها هستند. آن‌ها همچنین شامل مقادیری برای ملاحظات عملکردی در سطوح بالاتر می‌شوند (مانند دسترسی‌پذیری، هزینه، قابلیت انعطاف و قابلیت پشتیبانی).

1. Design-Dependent Parameters

2. Design-Independent Parameters

۵. معیارهای طراحی - مقادیر اهداف تعیین شده مشتری برای شاخص‌های عملکرد فنی هستند. همچنین مقادیر رضایت‌بخش TPM ها می‌باشند که توسط مشتری به‌عنوان نیازمندی مشخص شده است.

مساله و اثر چندین معیار در پاراگراف‌های بعدی ارائه شده است. سپس در قسمت بعدی، به‌طورمستقیم به معیارهای طراحی به‌عنوان بخش مهمی از مورفولوژی برای ترکیب، تحلیل و ارزیابی توجه می‌شود. با انجام این کار، عبارات تعریف شده در بالا به یکدیگر ربط داده شده و فرایند ادراک سیستم تسهیل می‌شود.

۲-۴-۲- در نظر گرفتن چند معیار

در شکل ۲-۷، TPM های اولویت داده شده در بالاترین سطح، ویژگی‌های کلی عملکرد سیستم در هنگام اجرای اهداف ماموریتی در پاسخ به نیازهای مشتری را منعکس می‌کنند. ممکن است فاکتورهای زیادی از جمله اندازه و وزن سیستم، دقت و وسعت، سرعت عملکرد، ظرفیت، دسترسی پذیری عملیاتی، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری، قابلیت حفاظت، هزینه و غیره وجود داشته باشند. این شاخص‌های/اثر بخشی^۱ (MOE) باید به‌صورت یک سطح از اهمیت مشخص شده و توسط مشتری و بر پایه حساس بودن وظایفی که باید انجام شود، تعیین گردند.

برای مثال، ممکن است سناریوهای ماموریتی وجود داشته باشند که در آن دسترسی‌پذیری سیستم یک موضوع حساس باشد، در حالی که قابلیت اطمینان تا زمانی که ملاحظات قابلیت نگهداری در سیستم وجود دارد و راحتی در تعمیر را تسهیل می‌کند، اهمیت کم‌تری داشته باشد. برای ماموریت‌هایی که در آن‌ها، نگهداری و تعمیر ممکن نیست، قابلیت اطمینان اهمیت بیش‌تری پیدا خواهد کرد. بنابراین، طبیعت و حساسیت ماموریتی که باید انجام شود به شناخت نیازمندی‌ها و سطح نسبی اهمیت TPM های کاربردی می‌انجامد.

1. Measures of Effectiveness

با داشتن نیازمندی‌ها در بالاترین سطح، توسعه‌ی یک درخت از اهداف طراحی، مشابه آن‌چه در شکل ۲-۸ نشان داده شده است، می‌تواند مفید واقع گردد. ملاحظات درجه اول، دوم و سوم (و سطوح پایین‌تر) مدنظر قرار گرفته شده است. بر پایه MOE استقرار یافته در سیستم، شکست نیازمندی‌ها از بالا به پایین به شناسایی ویژگی‌هایی می‌انجامد که باید در طراحی شامل شده و بخش ذاتی آن تلقی شود. برای مثال، یک ملاحظه‌ی درجه اول می‌تواند ارزش سیستم باشد که به‌نوبه‌ی خود به فاکتورهای اقتصادی و فاکتورهای فنی تقسیم می‌شود.

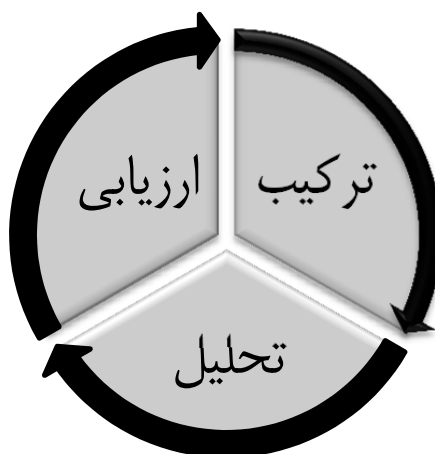
فاکتورهای فنی به‌صورت عبارات/تربخشی سیستم بیان می‌شوند که عملکرد یک وظیفه، دسترسی‌پذیری عملیاتی، وابستگی و غیره را نشان می‌دهند. این موضوع به ملاحظات ویژگی‌هایی مانند سرعت عملکرد، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری، اندازه، وزن و انعطاف‌پذیری منجر می‌شود. با فرض آن که قابلیت نگهداری و تعمیر اولویت بالایی در طراحی دارد، آنگاه بسته‌بندی، قابلیت دسترسی، کشف خطا و سوار کردن باید در طراحی مورد تاکید قرار گیرد. بنابراین معیارهای طراحی و DDP‌های همراه آن باید در مراحل ابتدایی و طی طراحی مفهومی استقرار یافته و سپس در سرتاسر چرخه‌ی طراحی مورد بررسی قرار گیرند. DDP‌ها حد و قلمروی فضای طراحی را مشخص می‌کنند که در آن می‌تواند تصمیم‌های متوازی گرفته شود. طی فرایند ایجاد این موازنه‌ها، نیازمندی‌ها باید به سطوح مناسب سلسله مراتبی در ساختار سیستم (یعنی سیستم، زیرسیستم، و ساختار آن)، همان‌طور که در شکل ۲-۷ نشان داده شد، مربوط شوند.



شکل ۲-۸- یک سلسله مراتب از ملاحظات طراحی سیستم

۲-۵- ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم

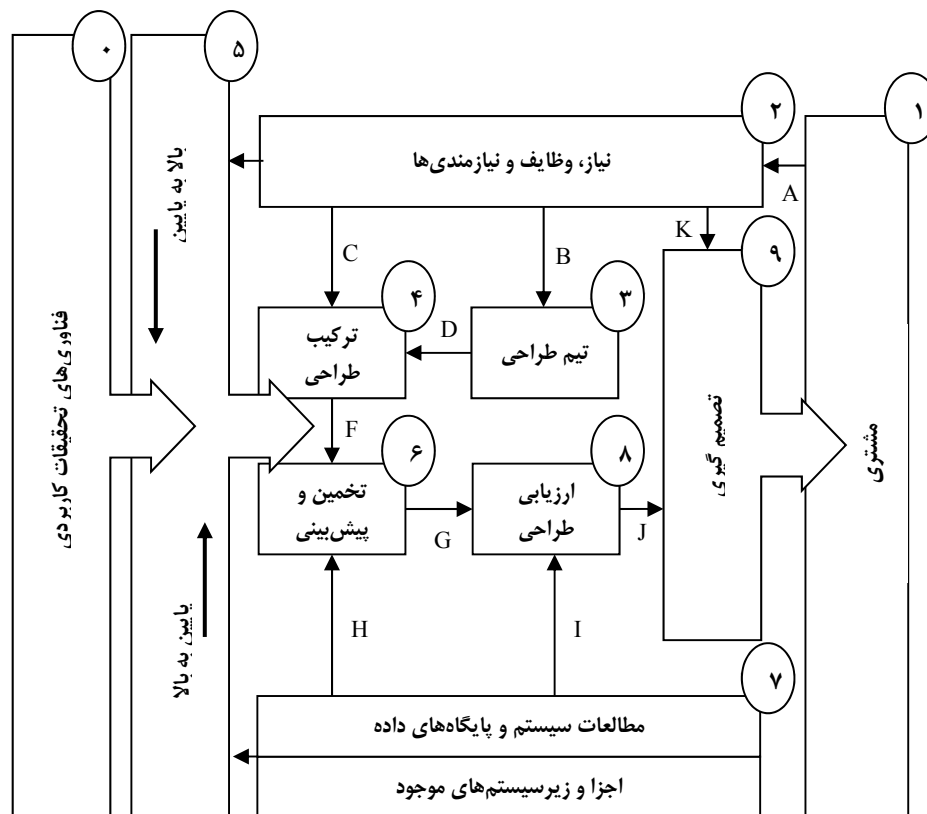
طراحی سیستم، محرک اصلی مهندسی سیستم است و ارزیابی طراحی سیستم، جهت‌دهنده‌ی آن است. طراحی سیستم نیازمند تکرار و ادغام بوده و نیازمند فرایندی است که ترکیب، تحلیل و ارزیابی را رهنمود سازد. شکل ۲-۹ این موضوع را به صورت مفهومی نشان می‌دهد. ادغام، تکرار پیوسته ارزیابی، تحلیل و ترکیب فعالیت‌های فنی در چرخه‌ی عمر سیستم یک نیاز ضروری است. فواید بهبود مستمر در طراحی سیستم بدین وسیله قابل دستیابی است.



شکل ۲-۹- رابطه ترکیب، تحلیل و ارزیابی

۲-۵-۱- مورفولوژی ترکیب، تحلیل و ارزیابی

شکل ۲-۱۰ یک ترسیم سطح بالا از فرایند مهندسی سیستم از نقطه نظر درک یک محصول را نشان می‌دهد. این یک مورفولوژی برای اتصال تحقیقات کاربردی و فناوری (بلوک ۰) به نیازهای مشتری (بلوک ۱) است. همچنین، این شکل یک ساختار برای تجسم فعالیت‌های فنی ترکیب، تحلیل و ارزیابی را فراهم می‌کند. هر یک از این فعالیت‌ها در پاراگراف‌های بعدی و براساس بلوک‌های مربوطه در مورفولوژی خلاصه شده است.



شکل ۲-۱۰- مورفولوژی مهندسی سیستم برای درک محصول

ترکیب. طراحی یعنی ترکیب پروژه و پیشنهاد آن چه که نیازها و نیازمندی‌های مشتری را رفع می‌کند که معمولاً این نیازمندی‌ها در عبارات وظیفه‌ای بیان می‌شوند (بلوک ۲). ترکیب یک فرایند ابتکاری است که در آن با قرار دادن چیزهای شناخته شده در کنار هم، یک ترکیب جدید و مفیدتر ایجاد می‌شود. برآوردن یک نیاز و اجابت نیازمندی‌های مشتری، هدف ترکیب طراحی است.

عناصر اصلی فعال کننده ترکیب طراحی، تیم طراحی (بلوک ۳) است که توسط ابزارهای سستی و رایانه‌ی برای ترکیب طراحی (بلوک ۴) پشتیبانی می‌شود.

ترکیب طراحی به بهترین نحو توسط ادغام فعالیت‌های بالا به پایین و پایین به بالا انجام می‌گیرد (بلوک ۵). اجزاء، بخش‌ها و زیرسیستم‌های موجود و جدید برای تولید طراحی‌های سیستم کاندید به‌طوری که آماده آزمایش و ارزیابی باشد، با هم ادغام می‌شوند.

تحلیل. تحلیل طراحی محصول یا سیستم کاندید یک جزء ضروری، اما غیرکافی در ارزیابی طراحی سیستم است. تحلیل شامل وظایف تخمین و پیش‌بینی مقادیر DDP(TPM) است (بلوک ۶) و مقادیر DIP را از طریق اطلاعات یافت شده در پایگاه‌های داده (بلوک ۷) فیزیکی و اقتصادی، تعیین یا پیش‌بینی می‌شود.

تحلیل سیستم و تحقیق در عملیات، گامی در جهت ارزیابی سیستم بر می‌دارد، اما اقتباس این مدل‌ها و روش‌ها در قلمرو طراحی ضروری است. این اقتباس به‌صراحت DDPها را شناسایی می‌کند که در بخش سوم این کتاب توسعه داده شده است.

ارزیابی. هر یک از طراحی‌های کاندید باید نسبت به کاندید دیگر مقایسه و بررسی شود که آیا با نیازمندی‌های مشتری مطابقت دارد یا نه. ارزیابی یک کاندید (بلوک ۸) پس از دریافت مقادیر DDP هر یک از کاندیدها در بلوک ۶ انجام می‌گیرد. این مقادیر DDP(TPM) هستند که در طراحی‌های کاندید تفاوت ایجاد می‌کنند.

مقادیر DIP در بلوک ۷ مقادیری است که از خارج از سیستم اعمال می‌شوند. این مقادیر بر همه‌ی طراحی‌های کاندید اعمال شده و هر کاندید پیش از ارائه برای تصمیم‌گیری (بلوک ۹) در بلوک ۸ بهینه‌سازی می‌شود. در بلوک ۹ است که بهترین کاندید مورد جستجو قرار می‌گیرد. از آن‌جا که گزینه‌ی ارجح، ذهنی است، در نهایت باید توسط مشتری به‌دست آید.

۲-۵-۲- بحث و بررسی مورفولوژی ۱۰ بلوکی

این بخش وظایف انجام گرفته توسط هر یک از بلوک‌ها را در مورفولوژی طراحی سیستم که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شد، ارائه داده و مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. بحث و بررسی در سطحی جزئی‌تر نسبت به توضیحات بالا در مورد ترکیب، تحلیل و ارزیابی خواهد بود.

فناوری‌ها (بلوک ۰). فناوری‌ها که در بلوک ۰ به نمایش درآمده است، محصول تحقیق کاربردی است. این فناوری‌ها از فعالیت‌های تحقیق و توسعه مهندسی تکامل پیدا کرده و برای استفاده در طراحی سیستم‌های کاندید در دسترس هستند. به عنوان یک نیروی محرک برای خلاقیت، فناوری‌ها قوی‌ترین جزء برای پیشرفت توانمندی‌های اجزای مصنوعی هستند.

این طراح/تولیدکننده است که مسئول پیشنهاد و کمک به مشتری است تا مشتری درک کند برای هر گزینه‌ی فنی چه چیزی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تولیدکنندگانی که بتوانند راه‌حل‌های فنی بهتری را به موقع و در محدوده‌ی بودجه جستجو و پیدا کنند، در بالاترین سطح رقابتی بودن در بازار جهانی قرار خواهند گرفت.

مشتری (بلوک ۱). هدف طراحی سیستم، ارضای نیازها و انتظارات مشتری (و ذی‌نفعان) است. این موضوع باید همراه با یک درک کامل باشد که در آن فهم موفق یک طراحی در نهایت توسط مشتری تعیین شود (که در بلوک ۱ شناسایی می‌شود).

طی فرایند طراحی، همه‌ی وظایفی که باید فراهم شده و همه نیازمندی‌هایی که باید برآورده شود باید از نقطه نظر مشتری یا نمایندگان آن‌ها تعیین شود. سهام‌داران و دیگر ذی‌نفعان نیز باید در این فرایند قرار گیرند تا همه نیازها و موضوع‌ها در فرایند طراحی منعکس شود. این موضوع‌ها باید شامل آثار انسانی و اکولوژیکی نیز باشد. پیکان A نماینده‌ی استنباط نیازهای مشتری، وظایف مطلوب و نیازمندی‌هاست.

نیاز، وظایف و نیازمندی‌ها (بلوک ۲). هدف این بلوک شناسایی و مشخص کردن رفتار مطلوب سیستم یا محصول در عبارات وظیفه‌ای است. مطالعه‌ی بازار برای یک نیاز، فرصت یا تهدید را نمایان می‌کند. از طریق نیاز، نیازمندی‌های پایه تعریف شده و اغلب به صورت عبارات وظیفه‌ای بیان می‌شوند. نیازمندی‌ها، ورودی‌های طراحی و معیارهای عملیاتی هستند و معیارها، پایه و اساس ارزیابی ساختار سیستم کاندید است.

در این نقطه، سیستم و محصولش از طریق وظایفش تعریف می‌شود نه شکل سیستم یا محصول. پیکان A نشان‌دهنده‌ی ورودی‌های مشتری است که نیاز، وظایف و نیازمندی‌های عملیاتی را تعریف می‌کند. پیکان B و C ترجمه و انتقال این اطلاعات به فرایند طراحی را ترسیم می‌کند.

تیم طراحی (بلوک ۳). تیم طراحی باید برای همکاری عمیق فنی - تخصصی و همچنین فراهم آوردن دید کلی‌تر از سیستم‌ها سازماندهی شوند. در این تیم برای هر فاز چرخه‌ی عمر محصول و عناصر موجود در مجموعه نیازمندی‌های سیستم، باید افراد با تخصص‌های مربوطه حضور داشته باشند.

برای هر فاز از طراحی ملاحظات درخور باید ارائه شود. در این ملاحظات اهداف موردنظر پیرو قابلیت تولید، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر، قابلیت امحاء، قابلیت حفاظت، و غیره لحاظ می‌شود. پیکان B نیازمندی‌ها و معیارهای طراحی را که در دسترس تیم طراحی است، ترسیم می‌کند. پیکان D مشارکت تیم در فعالیت‌های ترکیب را که در آن ملاحظات نیاز، وظایف و نیازمندی‌ها وجود دارد، نشان می‌دهد (پیکان C).

ترکیب طراحی (بلوک ۴). طراحی کردن، طرح‌ریزی و پیشنهاد آن چیزی است که باید وجود داشته باشد. ترکیب طراحی یک فعالیت ابتکاری است که بر پایه‌ی دانش متخصصان در بالاترین

سطح دانش عمومی و فناوری خواهد بود. با استفاده از این دانش، چند گزینه‌ی طراحی ممکن برای انجام تحلیل‌های موردنیاز آماده شده و ارائه می‌شود. بسته به فاز چرخه‌ی عمر محصول، ترکیب می‌تواند به صورت مفهومی، اولیه یا تفصیلی باشد.

طراحی کاندید توسط تجزیه وظیفه‌ای از بالا به پایین در بلوک ۲ و رویکرد ترکیبی پایین به بالا و با استفاده از عناصر در دسترس سیستم از بلوک ۷ به دست می‌آید. پیکان E نمایشگر مخلوطی از این رویکردها است. تعریف مکفی هر یک از گزینه‌های طراحی باید فراهم گردد تا شرایط تحلیل چرخه‌ی عمر از نقطه نظر نیازمندی‌ها فراهم شود. پیکان F این فرایند تعریف را که وابسته به انتقال طراحی کاندید به تحلیل طراحی در بلوک ۶ است، برجسته می‌کند.

بالا به پایین و پایین به بالا (بلوک ۵). روش‌شناسی طراحی در مهندسی سنتی عموماً بر پایه یک رویکرد پایین به بالا است. در این رویکرد که با مجموعه‌ای از عناصر تعریف شده آغاز می‌شود، طراحان سیستم/محصول را توسط کشف بهترین ترکیب از عناصر ترکیب می‌کنند. فرایند پایین به بالا تکرار شونده است و تعداد این تکرارها بسته به خلاقیت و مهارت تیم طراحی و همچنین پیچیدگی طراحی سیستم تعیین می‌شود. یک رویکرد بالا به پایین برای طراحی، ذات مهندسی سیستم‌ها است. این رویکرد با نیازمندی‌های رفتار خارجی هر یک از اجزا سیستم (در قالب وظایف ایجاد شده توسط اجزا) آغاز شده و سپس این رفتار تجزیه می‌شود. این رفتارهای وظیفه‌ای تجزیه شده در ادامه از طریق فرایند تحلیل به صورت تفصیلی تشریح شده و مشخص می‌گردد. پس از آن، مناسب بودن انتخاب اجزای وظیفه‌ای توسط ترکیب، تصدیق می‌شود. اکثر سیستم‌ها و محصولات از طریق یک ترکیب هوشمند از رویکردهای بالا به پایین و پایین به بالا درک می‌شود.

تحلیل طراحی (بلوک ۶). تحلیل طراحی تا حد زیادی بر تعیین مقادیر شاخص‌های اثربخشی و هزینه تمرکز دارد که طی فعالیت‌های تخمین و پیش‌بینی تولید شده است. مدل‌ها، پایگاه‌های

اطلاعات، و شبیه‌سازی برای به‌دست آوردن مقادیر DDP (یا TPM) برای هر یک از طراحی‌های ترکیب شده به‌دست آمده از بلوک ۴ مورد به‌کار گرفته می‌شود. پیکان خروجی G نتایج تحلیل را به ارزیابی طراحی (بلوک ۸) انتقال می‌دهد.

مقادیر TPM پایه‌ای برای مقایسه طراحی‌های سیستم در مقابل معیارهای موجود فراهم می‌کند تا شایستگی نسبی هر یک از کاندیدها را مشخص کند.

پایگاه‌های اطلاعاتی اقتصادی و فیزیک (بلوک ۷). بلوک ۷ بیش‌تر یک منبع برای فرایند طراحی است تا یک گام واقعی در جریان فرایند. یک بدنه‌ی دانش و اطلاعات وجود دارد که مهندسان، تکنسین‌ها، اقتصاددان‌ها و دیگر افراد در حوزه‌های دیگر علمی و عملی وظایف تحلیلی و ارزیابی خود را با استفاده از آن انجام می‌دهند. این دانش شامل قوانین فیزیکی، داده‌های تجربی، اطلاعات ارزشمند، پیش‌بینی‌های اقتصادی و تعداد زیادی از مطالعات و مدل‌های دیگر است.

بلوک ۷ هم‌چنین شامل توصیف اجزاء، بخش‌ها و زیرسیستم‌های سیستم موجود است. استفاده از پایگاه‌های داده در انجام تحلیل و ترکیب از انجام تکراری یک کار جلوگیری می‌کند. این بدنه‌ی دانش به‌صورت رسمی و غیررسمی در انجام مطالعات موردنیاز و هم‌چنین پشتیبانی از تصمیم‌هایی که باید از آن‌ها پیروی شود، به‌کار می‌رود.

در این نقطه و همان‌طور که توسط پیکان I نشان داده شده است، مقادیر DPI تخمین زده شده یا پیش‌بینی می‌شود و برای انجام فعالیت‌های ارزیابی طراحی در بلوک ۸ آماده می‌شوند.

ارزیابی طراحی (بلوک ۷). ارزیابی طراحی یک فعالیت ضروری در طراحی سیستم و محصول و فرایند مهندسی سیستم‌ها است. ارزیابی باید به‌صورت مناسبی در فرایند قرار داده شده و سپس با پیشروی توسعه و طراحی سیستم به‌طور مستمر دنبال شود.

هزینه‌ی چرخه‌ی عمر پایه و اساس مقایسه‌ی گزینه‌های طراحی است. هزینه‌ی چرخه‌ی عمر هر یک از گزینه‌ها برپایه فعالیت تخمین و پیش‌بینی که انجام گردیده است، تعیین می‌شود. پیکان J انتقال کاندیدهای ارزیابی شده به فرایند تصمیم‌گیری را مشخص می‌کند. انتخاب گزینه‌ی ارجح تنها پس از تحلیل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر و پس از مشخص شدن و اعمال شاخص‌های عملکردی انجام می‌گیرد.

تصمیم‌گیری (بلوک ۹). با در دست داشتن نیازهای متفاوت و گوناگون مشتری که در بلوک ۲ جمع‌آوری گردید، انتخاب گزینه‌ی ارجح به این سادگی نیست که فقط ارزان‌ترین طرح را انتخاب کرد. معیارهای ورودی که از نیازمندی‌های مشتری و محصول به‌دست آمده است توسط پیکان K و مقادیر DDP (TPM) و هزینه‌های چرخه‌ی عمر مشخص شده توسط پیکان J نمایش داده شده است. مشتری یا تصمیم‌گیرنده اکنون باید هزینه‌های چرخه‌ی عمر را در مقابل معیارهای اثربخشی به‌طور ذهنی موازنه کند. نتیجه‌ی آن شناسایی یک یا چند گزینه‌ی ارجح است که می‌تواند برای ادامه در سطح تفصیلی بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

گزینه‌ها در نهایت توسط مشتری مورد قضاوت قرار می‌گیرد. بر این اساس، پیکان L انتقال طراحی ارزیابی شده کاندید را برای بازبینی و تصمیم‌گیری توسط مشتری نشان می‌دهد. گزینه‌های غیرقابل قبول از نظر عملکرد را می‌توان دور انداخت یا آن را اصلاح کرده و گزینه‌ی جدید فراهم کرد. گزینه‌ها باید همه یا اکثر معیارهای عملکردی مهم را برآورده کنند و سپس بر اساس تخمین و پیش‌بینی مقادیر TPM و در کنار ارزیابی ریسک مورد بررسی قرار گیرند.

۲-۶- استقرار مهندسی سیستم‌ها

در زمینه‌ی ترکیب، تحلیل و ارزیابی، فرصت آن فراهم است که مهندسی سیستم‌ها در چرخه‌ی عمر سیستم به روشی دقیق که اثربخشی را تضمین می‌کند، استقرار یابد. این استقرار از آن‌جا که پیچیدگی سیستم‌های فنی به‌طور مستمر افزایش یافته و بسیاری از سیستم‌های امروزی

نیازهای عملکردی، اثربخشی و هزینه‌ای مشتری را فراهم نمی‌کند، ضروری است. فناوری‌های جدید به‌طور پیوسته معرفی می‌شوند، این در حالی است که چرخه‌ی عمر برای بسیاری از سیستم‌ها در حال توسعه است. مدت زمانی که برای توسعه و ایجاد یک سیستم جدید نیاز است باید کاهش یابد، هزینه‌های بهبود سیستم‌های موجود در حال افزایش است و منابع در دسترس در حال کاسته شدن هستند. در همین زمان، مشارکت بین‌المللی در سطح بالاتری انجام گرفته و رقابت در سطح جهانی در حال رشد است.

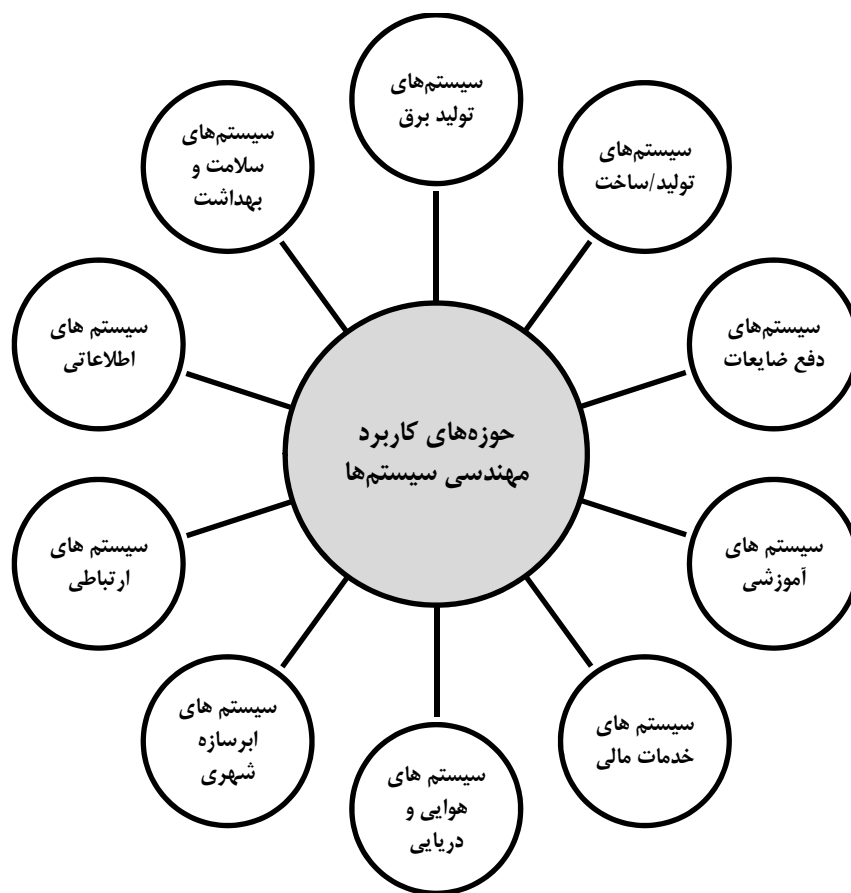
۲-۶-۱- حوزه کاربرد مهندسی سیستم‌ها

سیستم‌های مصنوعی انواع مختلفی داشته و حوزه‌های کاربردی متعددی را در بر می‌گیرند که مفاهیم و قواعد مهندسی سیستم‌ها را می‌توان به‌طور اثربخشی در آن‌ها مستقر کرد. هر زمان که یک نیاز جدید برای انجام یک وظیفه به‌وجود آید، نیاز به یک سیستم جدید ایجاد می‌شود. در هر مورد، یک طراحی و توسعه جدید در سطح سیستم باید صورت پذیرد. این موضوع به نوبه‌ی خود رویکردهای گوناگونی در سطح زیرسیستم و پایین‌تر را منجر می‌شود (یعنی طراحی و توسعه تجهیزات و نرم‌افزارهای جدید، انتخاب و ادغام آیتم‌های جدید تجاری، اصلاح آیتم‌های موجود و ترکیب آن‌ها با یکدیگر).

بر این اساس، برای هر نیازمندی جدید مشتری، نیاز به طراحی کل یک سیستم می‌باشد که گام‌های تشریح شده در قسمت ۲-۴ برای آن قابل اجراست. اگرچه عمق و گستره‌ی این تلاش‌ها متغیر است، اما مفاهیم و قواعد ایجاد سیستم، اساساً یکسان است. برخی حوزه‌های کاربردی خاص در شکل ۲-۱۱ برجسته شده و حوزه‌های کاربردی شامل موارد زیر می‌شوند:

۱. سیستم‌هایی با ابعاد بزرگ که دارای اجزای متعدد هستند، مانند سیستم‌های فضایی، سیستم‌های حمل و نقل شهری، سیستم تولید برق هیدروالکتریک، یا یک سیستم سلامت و بهداشت.

۲. سیستم‌هایی با ابعاد کوچک که به نسبت اجزای کم‌تری دارند، مانند یک شبکه ارتباطی محلی، سیستم رایانه‌ای، یک سیستم هیدرولیک، سیستم ترمز مکانیکی یا یک سیستم دریافت پول.



شکل ۲-۱۱- حوزه‌های کاربرد مهندسی سیستم‌ها

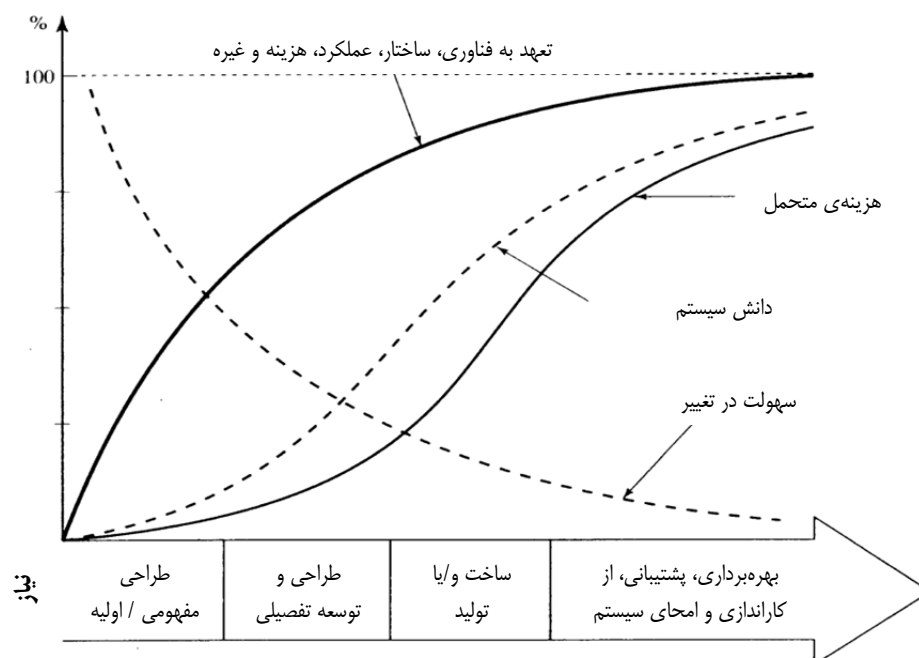
۳. سیستم‌های تولید که در آن روابط ورودی- خروجی، فرایندها، پردازش‌گرها، نرم‌افزارهای کنترلی، تسهیلات و افراد حضور دارند.
۴. سیستم‌هایی که در آن نیاز به حجم وسیعی از فعالیت‌های طراحی و توسعه وجود دارد (مانند معرفی یک فناوری جدید).
۵. سیستم‌هایی که در آن‌ها طراحی بر پایه تجهیزات موجود، نرم‌افزارهای تجاری یا تسهیلات در دسترس است.
۶. سیستم‌هایی که دارای سطح بالایی از تجهیزات، نرم‌افزارها، تسهیلات و اطلاعات هستند.
۷. سیستم‌هایی که در آن‌ها تامین‌کنندگان زیادی برای طراحی و توسعه در سطح محلی یا جهانی وجود دارد.
۸. سیستم‌هایی که برای مقاصد نظامی، شهری، تجاری یا خصوصی به صورت مجزا یا متصل باید طراحی و توسعه داده شود.
۹. سیستم‌های مصنوعی که در آن‌ها یک سیستم طبیعی دستخوش تغییر می‌شود تا نیازهای انسان را فراهم کند، درحالی که قسمت اعظم آن در حالت طبیعی باقی می‌ماند.

۲-۶-۲- شناسایی و مدیریت اثرات چرخه‌ی عمر

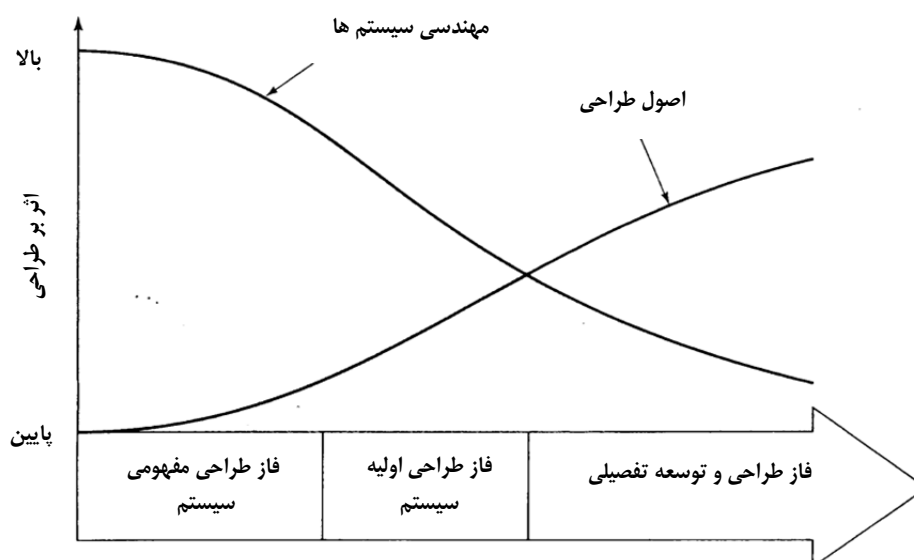
در ارزیابی تجربه‌های گذشته در مورد توسعه سیستم‌های فنی، مشخص شده است که بیش‌ترین مشکلات، نتیجه‌ی مستقیم اجرا نشدن رویکرد سیستمی بالا به پایین است. نیازمندی‌های کلی سیستم از ابتدا به‌درستی تعریف نمی‌شوند، برآورده کردن یک نیاز معمولاً طبیعی کوتاه‌مدت دارد، و بسیاری از نمونه‌ها از رویکرد "الان تحویل بده و بعداً درستش کن" و از یک رویکرد پایین به بالا در طراحی پیروی کرده‌اند. فرایند طراحی و توسعه سیستم به‌طور ذاتی از نبود برنامه‌ریزی مناسب اولیه و تعریف و تخصیص نیازمندی‌ها به روشی متدولوژیک و کامل

رنج برده است. هنوز در این مرحله‌ی ابتدایی چرخه‌ی عمر است که تصمیم‌هایی گرفته می‌شود که آثار بزرگی بر اثربخشی و هزینه‌ی سیستم خواهد داشت. این موضوع به صورت مفهومی در شکل ۲-۱۲ نمایش داده شده است.

بر اساس شکل ۲-۱۲، تجربه نشان می‌دهد در مراحل اولیه برنامه‌ریزی توجه زیادی به کاربرد فناوری، استقرار ساختار سیستم و ویژگی‌های عملکردی، منابع و هزینه‌های بالقوه چرخه‌ی عمر می‌شود. در این نقطه، درحالی که دانش در مورد سیستم محدود است، اما تصمیم‌های عمده‌ای در مورد انتخاب فناوری، انتخاب مواد و منابعی که باید تامین شود، تجهیزات بسته‌بندی و سطوح تشخیص خطا، انتخاب فرایند تولید، استقرار رویکرد نگهداری و تعمیر و غیره گرفته می‌شود. تخمین زده شده است که ۵۰ تا ۷۵ درصد از هزینه‌های چرخه‌ی عمر برای یک سیستم بر پایه طراحی مهندسی و تصمیم‌های مدیریتی در طی مراحل ابتدایی و طراحی مفهومی و اولیه قرار گرفته است. بنابراین، در این مرحله است که استقرار مفاهیم مهندسی سیستم و اصول آن حیاتی است. ضروری است که کار از درک درست نیاز مشتری و تعریف نیازمندی‌های سیستم آغاز شود. فرایند مهندسی سیستم‌ها در همه فازهای چرخه‌ی عمر قابل اجراست و بیش‌ترین منفعت در مراحل ابتدایی حاصل می‌شود (شکل ۲-۱۲). هدف آن تحت تاثیر قرار دادن طراحی در مراحل ابتدایی به‌صورت اثربخش و کارا از طریق تحلیل کامل نیازها، تعریف نیازمندی‌ها، تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای و سپس مشخص کردن فعالیت پیرو به‌صورتی منطقی و جلورونده همراه با بازخوردهای مناسب است. همان‌طور که شکل ۲-۱۳ بیان می‌دارد، هدف کلی، تحت تاثیر قرار دادن طراحی در مراحل اولیه‌ی اکتساب سیستم است که منجر به شناسایی هر نیاز به‌صورت اصولی می‌شود. این موضوع باید به‌صورتی زمان‌بندی شده انجام شده و از نیازمندی‌ها در سطح سیستم به نیازمندی‌های زیرسیستم‌ها و اجزا تکامل یابد.



شکل ۲-۱۲- تعهدات سیستمی، دانش سیستم، و هزینه‌های متحمل شده.



شکل ۲-۱۳- تاثیر اصول مهندسی و مهندسی سیستم‌ها بر طراحی

۲-۶-۳- منافع بالقوه مهندسی سیستم‌ها

فهم روابط میان فاکتورهای نشان داده شده در شکل ۲-۱۲ و ۲-۱۳ برای درک منافع بالقوه مهندسی سیستم‌ها ضروری است. اصول مهندسی کاربردی برای حصول اطمینان از ادغام مناسب عناصر در هر یک از سیستم‌های مورد طراحی، نیاز است. این نیاز با توجه به استقرار مناسب مهندسی، به صورت هم‌زمان توسعه می‌یابد که در آن چرخه‌های عمر برای پشتیبانی محصول و توانمندی‌های تولید، پشتیبانی، نگهداری و از کاراندازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲-۲). یک شبکه ارتباطی خوب باید برای همه‌ی افراد مهم پروژه در دسترس باشد. این موضوع زمانی که کارکنان پروژه در مکان‌هایی دور از هم و اغلب در سرتاسر دنیا قرار دارند یک چالش محسوب می‌شود.

استقرار موفق فرایند مهندسی سیستم نه تنها به در دسترس بودن و اجرای فناوری‌ها و ابزار مناسب، بلکه به برنامه‌ریزی و مدیریت فعالیت‌های مورد نیاز در دستیابی اهداف کلی بستگی دارد. اگرچه گام‌های تشریح شده در قسمت ۲-۳ می‌تواند برای یک برنامه مشخص شود، اما استقرار موفق آن تا زمانی که یک محیط سازمانی فراهم نشود که چنین استقراری را تشویق کند، امکان‌پذیر نخواهد بود. نمونه‌های زیادی وجود دارد که پروژه‌ی مهندسی سیستم را در برنامه‌ی خود قرار داده‌اند، اما تأثیری در فرایند طراحی به وجود نیامده است و اهداف برآورده نشده‌اند.

اگرچه برخی منافع اجرای مفاهیم و قواعد مهندسی سیستم‌ها در این فصل آورده شده است، فراهم کردن یک خلاصه به صورت مرجع مفید خواهد بود. بر این اساس، فرایند مهندسی سیستم‌ها می‌تواند به منافع زیر منجر شود:

۱. کاهش هزینه‌های طراحی و توسعه سیستم، تولید و/یا ساخت، پشتیبانی و عملیات سیستم، از کاراندازی سیستم و امحای مواد؛ در نتیجه کاهش هزینه‌های چرخه‌ی عمر اتفاق می‌افتد. اغلب این طور به نظر آمده است که مهندسی سیستم‌ها، هزینه‌ی اکتساب

محصول را افزایش می‌دهد. اگرچه ممکن است چند گام بیش‌تر در فازهای اولیه طراحی سیستم برداشته شود، این سرمایه‌گذاری می‌تواند نیازمندی‌های ادغام، آزمایش، و ارزیابی را در مراحل انتهایی یعنی فاز طراحی و توسعه تفصیلی به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. چنان‌چه یک تلاش مهندسی کل‌گرا در آغاز فرایند انجام گیرد، رویکرد پایین به بالا در راه اندازی سیستم را می‌توان ساده کرد. علاوه‌بر این تجربه نشان می‌دهد که تأکید بر مهندسی سیستم در مراحل ابتدایی می‌تواند بعداً در فازهای تولید، عملیات و پشتیبانی، و از کاراندازی در چرخه‌ی عمر، در هزینه صرفه‌جویی ایجاد کند.

۲. کاهش در زمان اکتساب سیستم (یا مدت زمان لازم از شناسایی اولیه نیاز مشتری تا تحویل یک سیستم به مشتری). ارزیابی همه رویکردهای ممکن در طراحی اولیه چرخه‌ی عمر (همراه با پشتیبانی ابزارها و فناوری‌های کمک کننده مانند CAD) می‌تواند کمک کند تا طراحی زودتر به بلوغ برسد. تغییرات در مراحل اولیه بسیار ساده‌تر و کم هزینه‌تر خواهد بود تا زمانی که طراحی نهایی شده و اصلاح در آن پرهزینه شود. علاوه‌بر این، نتایج باید در زمان موردنیاز برای ادغام آزمایش و ارزیابی سیستم نهایی صرفه‌جویی ایجاد کند.

۳. دید بیش‌تر و کاهش در ریسک‌های همراه با فرایند تصمیم‌گیری در مورد طراحی. با استفاده از مهندسی سیستم‌ها، می‌توان دید وسیع‌تری ایجاد نمود، زیرا چشم‌انداز سیستم از یک دیدگاه بلندمدت و چرخه‌ی عمر حاصل می‌شود. آثار بلندمدت به‌عنوان نتیجه تصمیم‌گیری‌های اولیه و روابط علی و معلولی را می‌توان در مراحل اولیه ارزیابی کرد. این موضوع باعث کاهش ریسک‌های بالقوه شده و رضایت بیش‌تر مشتری را سبب خواهد شد.

بدون وجود حمایت مناسب سازمانی توسط مدیریت ارشد، استقرار محیطی که زمینه خلاقیت و نوآوری را فراهم کند، شیوه‌ای از رهبری که رویکرد تیمی در طراحی را ترویج کند، استقرار مفاهیم و روش‌هایی که در این کتاب تشریح می‌شود، اتفاق نخواهد افتاد. بنابراین، مهندسی سیستم‌ها باید هم از نقطه نظر فناوری و هم از نقطه نظر مدیریتی استقرار یابد. بخش پنجم این کتاب که شامل دو فصل است که به این موضوع مهم می‌پردازد.

۲-۷- خلاصه فصل

هدف غایی مهندسی سیستم‌ها درعنوان این فصل قرار داده شده است. این هدف، ایجاد سیستم‌ها و محصولات است. هر کدام از تعریف‌های ارائه شده در قسمت ۱-۶ این هدف مطلوب را حمایت می‌کند. بر این اساس، مناسب است که این فصل را به ارائه‌ی نیازهای مهندسی سیستم‌ها اختصاص داد. فصل‌های بعدی، مباحث خاص موردنیاز برای رسیدن به این هدف را مورد بررسی قرار می‌دهند.

سیستم فنی یا مهندسی شده باید خلق گردد؛ سیستمی که قرار است جزئی از دنیایی مصنوعی باشد. بنابراین، تعریف و تشریح سیستم مهندسی شده در ابتدای این فصل قرار داده شده است. بررسی مفهومی سیستم‌ها در قسمت‌های ۱-۱ و ۱-۲ به‌طور خلاصه بیان شده است. در بیش‌تر موارد، یک محصول همراه یا درون یک سیستم هم‌زیستی داشته یا در مواردی دیگر، خود آن یک سیستم را شامل می‌شود. اما در هر دو مورد، نیازهای انسانی است که باید برآورده شود.

از آن‌جا که سیستم‌ها اغلب توسط محصولاتشان شناخته می‌شوند، دسته‌بندی‌های محصول و سیستم به‌عنوان چارچوبی برای مطالعات این فصل و فصول بعدی، شناسایی شدند. دسته‌های کلی، سیستم‌ها با محصول تک‌واحدی و سیستم‌های جمعیتی چند محصولی هستند. این نمونه از دسته‌بندی‌ها برای کمک به روشن شدن موضوعات و گام‌های فرایند ایجاد سیستم‌های فنی یا مهندسی شده تدوین شده است.

چرخه‌ی عمر سیستم و محصول به‌عنوان الگوی اصلی در سرتاسر این کتاب مورد استفاده قرار گرفته است. این الگو که منشا آن امور نظامی است برای کاربرد در بخش خصوصی نیز سودمند خواهد بود. چرخه‌ی عمر ابتدا در قسمت ۲-۲ با دو نمودار معرفی گردید، نمودار اول چرخه‌ی عمر محصول و نمودار دوم یک نگاه گسترده‌تر و هم‌زمان به چرخه‌ی عمر را نمایش می‌دهد. سپس، طراحی برای چرخه‌ی عمر با کمک نمودارهای دقیق چرخه‌ی عمر که تعداد بیش‌تری از فعالیت‌ها و تعاملات را نشان می‌دهند، بررسی شده است. در ادامه، دیگر مدل‌های فرایند مهندسی سیستم‌ها ارائه شده است تا یک نگاه کلی بر ساختارهای ایجاد سیستم‌ها و محصولات ایجاد شود.

از آن‌جا که طراحی هم برای محصول و هم برای سیستم، به‌طوراساسی یک فعالیت فنی است، باید با داشتن دانشی کامل از همه ملاحظات طراحی سیستم به جلو حرکت کرد. شناسایی DDPها و نقطه مقابل آن‌ها یعنی DIPها، پیرو آن است. شاخص‌های عملکرد فنی که از DDPها نشأت می‌گیرند، باید پیش‌بینی و تخمین زده شوند. انحراف موجود بین مقادیر پیش‌بینی شده TPMها و معیارهای مشخص شده توسط مشتری، اساس بهبود طراحی در تکرارهایی است که در آن‌ها انتظار می‌رود به طراحی ارجح سیستم دست یافت. طی این فعالیت طراحی، نیازمندی‌ها و معیارها باید مرکز توجه قرار گیرند. در نتیجه، بیش‌تر قسمت‌های این فصل به توضیح ارزیابی طراحی بر اساس معیارهای تعیین شده توسط مشتری اختصاص یافته است. این توضیحات با توسعه و نمایش مورفولوژی ۱۰ بلوکی برای ترکیب، تحلیل و ارزیابی ارتقا یافته است.

این فصل با برخی چالش‌ها و فرصت‌هایی به اتمام می‌رسد که مطمئناً طی استقرار مهندسی سیستم‌ها ایجاد خواهند شد. حوزه‌های کاربردی ممکن متعدد است. عقیده کلی بر آن است که مهندسی سیستم‌ها یک مهندسی بین رشته‌ای است که قوانین حاکم بر خود را دارد و یک حوزه‌ی مهندسی مهم را نمایان می‌کند. بدین ترتیب گمان بر آن است که شاکله دانش سیستمی مهندسی سیستم‌ها بدون استفاده از فرصت‌های حوزه‌های مهندسی نتواند به‌طور قابل‌توجهی

پیشرفت کند. با این حال واضح است هنگامی که منابع مورد نیاز برای فعالیت‌های مهندسی سیستم‌ها در مراحل اولیه چرخه‌ی عمر اختصاص یابد بهبود قابل توجهی در پروژه‌هایی که در یک حوزه‌ی مشخص اجرا می‌شوند، ایجاد خواهد شد.

برخی خوانندگان ممکن است نیاز به مطالعه فراتر از محتوای این کتاب داشته باشند. دو کتاب در این زمینه پیشنهاد می‌شود: کتاب راهنمای مدیریت و مهندسی سیستم‌ها^۱ مباحث مدیریتی و فنی در مهندسی سیستم‌ها را مورد بحث قرار داده است. کتاب طراحی و سیستم‌ها^۲ طبیعت فراگیر طراحی در بسیاری از تلاش‌های انسانی را از نقطه نظر فلسفی و رفتارشناسی روشن ساخته است.

در مورد شاکله‌ی دانش مهندسی سیستم‌ها، یک پروژه زمانبر در INCOSE در حال پیگیری است – فعالیت‌های پروژه SEBoK (شاکله دانش مهندسی سیستم‌ها) صدها عضو را شامل می‌شود. افراد علاقه‌مند به این موضوع می‌توانند به سایت www.incose.org مراجعه کنند. تلاش اولیه در این راستا درگیر کردن رهبران INCOSE در به تحریر درآوردن ۱۶ مقاله مرجع بوده است. این مقالات در مجله Systems Engineering جلد ۱ شماره ۱، جولای- سپتامبر ۱۹۹۴ به چاپ رسیده است. کپی این مجله خاص در سایت INCOSE موجود است.

1. The Handbook of Systems Engineering and Management: A.P. Sage and W.B. Rouse (Eds). John Wiley & Sons, Inc, 2009

2. Design and Systems, A. Collen and W.W. Gasparski (Eds). Transaction Publishers, 1995.

مسائل و سوالات

۱. برخی خصوصیات سیستم‌های مهندسی شده یا مصنوعی که آن‌ها را از سیستم‌های طبیعی مجزا می‌کند چیست؟
۲. برخی از خطوط اتصال بین دنیای طبیعت و دنیای مصنوعی را تشریح کنید.
۳. یک سیستم طبیعی را که توسط انسان اصلاح شده به دلخواه شناسایی و تشریح کنید. مشخص کنید چه چیزی آن را از سیستم‌های طبیعی متمایز می‌کند.
۴. یک محصول یا تجهیز اصلی را که جزئی از یک سیستم است، تشریح کنید؛ وظایف هر واحد را توضیح دهید.
۵. با انتخاب یک ساختار واقعی که با آن آشنا هستید، یک سیستم محصولی تک واحدی را که در بخش ۲-۱-۲ توضیح داده شد، به‌طور کلی تشریح کنید.
۶. با انتخاب یک ساختار واقعی که با آن آشنا هستید، یک سیستم محصولی چند واحدی را که در بخش ۲-۱-۲ توضیح داده شد، به‌طور کلی تشریح کنید.
۷. یک کالای مصرفی را انتخاب کرده و تولیدکننده کالا را نام ببرید.
۸. یک محصول انتخاب کرده و سیستمی موردنیاز برای ایجاد آن را تشریح کنید. توضیح دهید که اهمیت مهندسی سیستم و محصول در کنار یکدیگر برای این محصول چه چیزی می‌تواند باشد.
۹. برخی از فاکتورهای ضروری برای یک محصول رقابتی چیست؟ چرا رقابتی بودن برای محصول مهم است؟
۱۰. تفکر چرخه‌ی عمر سیستم چه چیزی به مهندسی اضافه می‌کند؟ منافع مورد انتظار از این تفکر چیست؟

۱۱. فازهای متعددی در چرخه‌ی عمر محصول در شکل ۱-۲ و ۲-۲ نمایش داده شده است. برخی از تعاملات بین چرخه‌ی عمر محصول و چرخه‌ی عمر سیستم را تشریح کنید.

۱۲. معنی کامل عبارت "طراحی برای چرخه‌ی عمر" چیست؟

۱۳. یک سیستم به دلخواه انتخاب کرده و فازها و فعالیت‌های اجرایی چرخه‌ی عمر را تشریح کنید.

۱۴. به بهترین طریقی که می‌توانید فعالیت‌های چرخه‌ی عمر را که در مدل آبشاری، حلزونی و Vee اتفاق می‌افتد، شناسایی کنید. از بین این مدل‌ها، مدلی را که ترجیح می‌دهید انتخاب کرده و توضیح دهد چرا این مدل برای شما بهتر است.

۱۵. ملاحظات طراحی گام اول در اقتباس شاخص‌های طراحی است. همه این گام‌ها را با تاکید بر مفهوم پارامتر وابسته به طراحی به‌طور خلاصه بنویسید.

۱۶. نیازمندی‌ها چگونه به شاخص‌های عملکرد فنی مربوط می‌شوند؟ هنگامی که نیازمندی‌ها و TPMها با هم تطابق ندارند، چه چاره‌ای می‌توان اندیشید؟

۱۷. یک وضعیت طراحی دلخواه را انتخاب کرده و معیارهای چندگانه را که باید مورد بررسی قرار گیرد، آیتم به آیتم مشخص کنید.

۱۸. یک نیازمندی سطح بالا انتخاب کرده و با توجه به ساختار نشان داده شده در شکل ۲-۲-۷ آن را تجزیه کنید.

۱۹. سیستم‌های کاندید نتیجه ترکیب طراحی است و مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرند. توضیح دهید.

۲۰. یکی از ملاحظات سیستم در سطح پایین را از شکل ۸-۲ انتخاب کرده و موقعیت و اثرات آن را بر سطح بالایی مورد بحث و بررسی قرار دهید.

۲۱. ترکیب، تحلیل و ارزیابی که در شکل ۲-۹ ترسیم شده را مدنظر قرار داده و فعالیت‌های نمایش داده شده در شکل ۲-۱۰ را دسته‌بندی کنید.
۲۲. برخی از حوزه‌های مهندسی را در مهندسی سیستم‌ها شناسایی کنید.
۲۳. برخی از موانع استقرار مهندسی سیستم چیست؟
۲۴. برخی از منافع حاصل از بهره‌برداری از تفکر و مهندسی سیستم‌ها را نام ببرید.
۲۵. به وبسایت INCOSE رفته و صفحه مجله Systems Engineering را پیدا کنید. یک مقاله را که مربوط به مباحث این فصل است، انتخاب کرده و در یک پاراگراف خلاصه‌ای از ارتباط مقاله با این فصل را بیان دارید.
۲۶. به وبسایت INCOSE رفته و یکی از افراد را در گروه Fellows انتخاب کنید. بگویید چرا دوست دارید با این فرد آشنا شوید.

بخش دوم

فرایند طراحی سیستم

طراحی سیستم فی نفسه مهندسی سیستمها تلقی نمی شود، اما تقریباً به همان اندازه فراگیر است. از نقطه نظر ترکیب، طراحی سیستم به اندازه‌ی مهندسی سیستمها عمیق است. طراحی سیستم به صورت اسمی شامل طراحی مفهومی، اولیه و تفصیلی می شود. این دسته‌های عملی در کنار آزمایش و ارزیابی، چهار فصل موجود در بخش دوم را تشکیل می دهند. در این فصل‌ها، درجه بالایی از ارتباط میان این دسته‌ها و همچنین زمینه‌ی خلق آنها که در فصل ۲ تشریح شد، انتشار یافته است.

موتوری که فرایند مهندسی سیستمها را به حرکت در می آورد، طراحی سیستم است. طراحی سیستم، خود یک فرایند است که جایگاهی ویژه در مهندسی سیستمها دارد. طراحی سیستم یک فعالیت ضروری است که درک منظم ساختار و ترکیب نهایی یک سیستم را تضمین می کند و پایه

و اساسی برای مشارکت طرح‌ها در فراهم آوردن قابلیت‌هایی چون نگهداری و تعمیر، پشتیبانی، حفاظت، بازیافت و امحا است.

فازهایی وجود دارند که باید توسط فرایند توسعه و طراحی طی شوند. اولین آن‌ها شناسایی و درک مساله بیان شده توسط مشتری است که تاکید ویژه‌ای بر سیستم مقصود دارد.

در ادامه‌ی نیازمندی‌ها در سطح سیستم، کشف نوآوری فناورانه و تعریف راه‌حل ممکن، طراحی و توسعه‌ی اجزای سیستم، ساخت مدل نمونه و/یا مهندسی، و تصدیق اعتبار و صحت‌گذاری سیستم از طریق آزمایش و ارزیابی انجام می‌گیرد. این فرایند توسط فازهای چرخه‌ی عمر سیستم که در بخش ۲-۲-۱ تشریح شده و در شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ ترسیم شده است، به نمایش در می‌آید.

چهار فصل تدوین شده در بخش دوم، فرایند طراحی و توسعه سیستم را به فازهای عمده آن تقسیم می‌کند. طراحی مفهومی، طراحی اولیه، طراحی و توسعه تفصیلی و آزمایش و ارزیابی ممکن است به غلط به صورت مجزا از هم در نظر گرفته شوند در حالی که بیش تر یک فرایند یکپارچه هستند. این تقسیم‌بندی با هدف راحتی و برقراری ارتباط بین خواننده و موضوع، ایجاد شده است. اجرای زمان‌بندی شده و درست بازخورد، تکرار و بهبود مستمر از ادغام فعالیت‌های ضروری، اطمینان حاصل می‌کند.

بر این اساس، هدف کلی فصول حاضر در بخش دوم، ایجاد فهم عمیق طراحی سیستم به عنوان یک فرایند است؛ فرایندی که فراتر از مجموعه دسته‌بندی‌های مصنوعی است که در عنوان هر فصل مشاهده می‌شود. برای رسیدن به این هدف، لازم است برخی فناوری‌ها و نمادها به طور ابتدایی تعریف شوند. فصول بعدی به طور کامل به این موارد می‌پردازد.

طراحی مفهومی سیستم

طراحی مفهومی اولین و مهم‌ترین فاز فرایند طراحی و توسعه‌ی سیستم است. این طراحی یک فعالیت ابتدایی و در سطح بالایی چرخه‌ی عمر است که دارای پتانسیل استقرار، اجرا و از دیدگاهی دیگر وظیفه، شکل، هزینه و توسعه‌ی زمان‌بندی شده سیستم مطلوب و محصولاتش است. شناسایی یک مساله و تعریف درخور نیاز، یک نقطه‌ی شروع مناسب و معتبر برای طراحی مفهومی سیستم است.

انتخاب مسیر برای طراحی و توسعه‌ی معماری مطلوب سیستم که در نهایت پاسخ‌گوی نیاز شناسایی شده مشتری باشد، هدف اصلی طراحی مفهومی است. استقرار این شالوده در مراحل ابتدایی و برنامه‌ریزی و ارزیابی اولیه رویکردهای فناورانه‌ی در دسترس، یک گام حیاتی در استقرار فرایند مهندسی سیستم‌هاست. از نقطه‌نظر سازمانی، مهندسی سیستم‌ها باید رهبری نیازمندی‌های سیستم را از ابتدای کار به‌دست گرفته و سپس از نقطه‌نظر چرخه‌ی عمر ادغام شده، آن‌ها را مدنظر قرار دهد.

این فصل گام‌های مشخصی را در فرایند مهندسی سیستم‌ها بررسی می‌کند. پس از مطالعه‌ی این فصل، دانش و دید مناسبی برای موارد زیر فراهم می‌شود:

- شناسایی یک مساله یا نقص و تعریف آن به صورت یک نیاز برای یک سیستم که راه حل مطلوب را ایجاد می‌کند؛
- انجام معماری و برنامه‌ریزی پیشرفته سیستم در پاسخ به نیاز شناسایی شده؛
- توسعه‌ی نیازمندی‌های عملیاتی سیستم که تشریح کننده‌ی وظایف اجرایی سیستم است و اهداف یا مأموریت‌های مقصود را به سرانجام می‌رساند؛
- انجام مطالعات اکتشافی که به تعریف یک رویکرد فنی برای طراحی سیستم منجر شود؛
- پیشنهاد یک مفهوم نگهداری و تعمیرات برای پشتیبانی از پایداری سیستم در سرتاسر چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده سیستم؛
- شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) و معیارهای مربوطه برای طراحی؛
- انجام تحلیل وظیفه‌ای در سطح سیستم و اختصاص نیازمندی‌ها به زیرسیستم‌ها و اجزای سیستم؛
- تحلیل سیستم‌ها و انجام مطالعات موازنه‌ای؛
- توسعه‌ی سیستمی مشخصات فنی؛
- بازنگری در طراحی مفهومی.

تکمیل گام‌های بالا، فرایند تعریف سیستم را در سطح مفهومی تشکیل می‌دهد. اگرچه عمق، تلاش و هزینه‌ی اجرای این گام‌ها می‌تواند متفاوت باشد، این فرایند برای هر نوع و دسته از سیستم‌ها، ساده یا پیچیده، بزرگ یا کوچک قابل اجراست. مهم است که این گام‌ها که نقطه آغازین فرایند مهندسی سیستم‌ها هستند، به خوبی درک شوند. با در نظر گرفتن همه‌ی این

موضوعات، این گام‌ها دارای یک هدف یعنی فراهم آوردن یک رویکرد کامل گام به گام برای بررسی این فاز حیاتی از فرایند مهندسی سیستم‌ها است.

۳-۱- تعریف مساله و شناسایی نیاز

فرایند مهندسی سیستم‌ها عموماً با شناسایی یک نیاز یا مطلوبیت براساس برخی نقصان‌های واقعی آغاز می‌شود. برای مثال، فرض کنید که قابلیت یک سیستم موجود برای برآورده کردن برخی اهداف عملکردی موردنیاز کافی نیست یا هنگامی که موردنیاز است در دسترس نیست و یا نمی‌توان به خوبی آن را پشتیبانی کرد و یا این که عملیات آن پرهزینه است. همچنین ممکن است فاقد قابلیت ایجاد ارتباط بین نقاط A و B با نرخ مطلوب X ، قابلیت اطمینان Y و با هزینه مشخص Z باشد. یا ممکن است بخش حمل و نقل محلی با مشکل ترافیک روز افزون دوطرفه در یک رودخانه مواجه باشد (این مثال خاص در قسمت‌های ۳-۳ و ۳-۴ بیش‌تر توسعه می‌یابد و در فصل ۴ یک طراحی اولیه برای آن ایجاد می‌شود).

کار با تعریف ابتدایی مساله و سپس تعریف نیاز برای قابلیت مشخص از سیستم که پاسخ‌گوی مساله باشد، آغاز می‌شود. غیرعادی نیست که ابتدا برخی نیازهای درک شده که در نهایت مساله‌ی موردنظر را حل نمی‌کند، شناسایی شود. به عبارت دیگر، چرا/این قابلیت خاص سیستم موردنیاز است؟ با داشتن تعریف مساله، یک نیازمندی جدید سیستم همراه با اولویت برای معرفی، تاریخی که قابلیت جدید سیستم نیاز است و تخمین منابع لازم برای اکتساب آن تعریف می‌شود. برای تضمین یک شروع خوب، بیان کامل مساله باید در قالب عبارات کمی و کیفی مشخص ارائه شود و جزئیات کافی برای توجیه حرکت به گام بعدی فراهم باشد. ضروری است که فرایند با تعریف مساله واقعی و اهمیت آن آغاز شود.

لزوم شناسایی نیاز ممکن است به نظر بدیهی و ابتدایی باشد؛ با این حال طراحی اغلب در نتیجه‌ی علاقه‌ی شخصی یا هوس سیاسی شروع می‌شود، بدون این که نیازمندی‌ها به حد کافی تعریف شده باشند. در حوزه‌ی فناوری اطلاعات و نرم‌افزار، زمانی که نیاز واقعی به‌خوبی شناسایی نشده است، گرایش به انجام حجم بالایی از کدنویسی و توسعه نرم‌افزار در سطحی تفصیلی وجود دارد. علاوه بر این، مثال‌هایی وجود دارد که در آن مهندسان باور دارند که می‌دانند نیازهای مشتری چیست، بدون این که مشتری را در فرایند کشف این نیاز وارد کنند. فلسفه "الان طراحی کن و بعدا درست کن" بسیار رایج بوده و به نوبه‌ی خود منجر به ایجاد هزینه‌های غیرضروری و تاخیر در تحویل می‌شود.

تعریف مساله اغلب سخت‌ترین بخش فرایند است، مخصوصا اگر در انجام آن عجله وجود داشته باشد. تعداد شروع‌های اشتباه و هزینه‌های حاصل تا زمانی که شالوده آغاز کار به‌خوبی ایجاد نشده باشد، قابل توجه خواهد بود (شکل ۲-۱۲). تشریح کامل یک نیاز که با استفاده از معیارهای مربوطه کمی بیان می‌شود، یک ضرورت است. مهم است که تعریف مساله، نیازمندی‌های مشتری را به‌ویژه در یک محیط با منابع محدود منعکس کند.

با تعریف تمام و کمال مساله، تحلیل نیازها با هدف ترجمه‌ی خواسته کلی به نیازمندی‌های مشخص‌تر در سطح سیستم ادامه می‌یابد. سوالات از این قبیل خواهند بود: چه چیزی از سیستم در قالب وظایف موردنیاز است؟ سیستم باید چه وظایفی را انجام دهد؟ وظایف اصلی کدامند؟ وظایف فرعی کدامند؟ چه کاری باید صورت پذیرد تا نقص بیان شده رفع شود؟ چه زمانی باید صورت گیرد؟ در چه جایی باید انجام شود؟ به چه تعداد یا با چه فراوانی باید صورت پذیرد؟

سوالات اساسی زیادی از این قبیل وجود دارند که تعریف نیازمندی‌های مشتری را در قالب وظایف، مهم می‌سازد. تا زمانی که شاکله از وظیفه تبعیت نکند، هدر رفتن منابع ارزشمند محتمل است. هدف نهایی، تعریف چه‌ها است و تعریف چگونه‌ها تا اتمام آن به تاخیر می‌افتد.

شناسایی مساله و اجرای تحلیل نیازها به‌طور رضایت‌بخش توسط یک رویکرد تیمی که مشتری، مصرف‌کننده یا کاربر نهایی، پیمانکار اصلی یا تولیدکننده و تامین‌کنندگان اصلی را شامل می‌شود، به بهترین نحو قابل دستیابی است. هدف، حصول اطمینان از وجود ارتباطات موثر و مناسب بین همه‌ی طرف‌های درگیر در فرایند است. از همه مهم‌تر، "صدای مشتری" باید شنیده شود تا فرصت پاسخ به‌موقع و مناسب برای توسعه دهنده(های) سیستم فراهم باشد.

۳-۲- برنامه‌ریزی و معماری پیشرفته سیستم

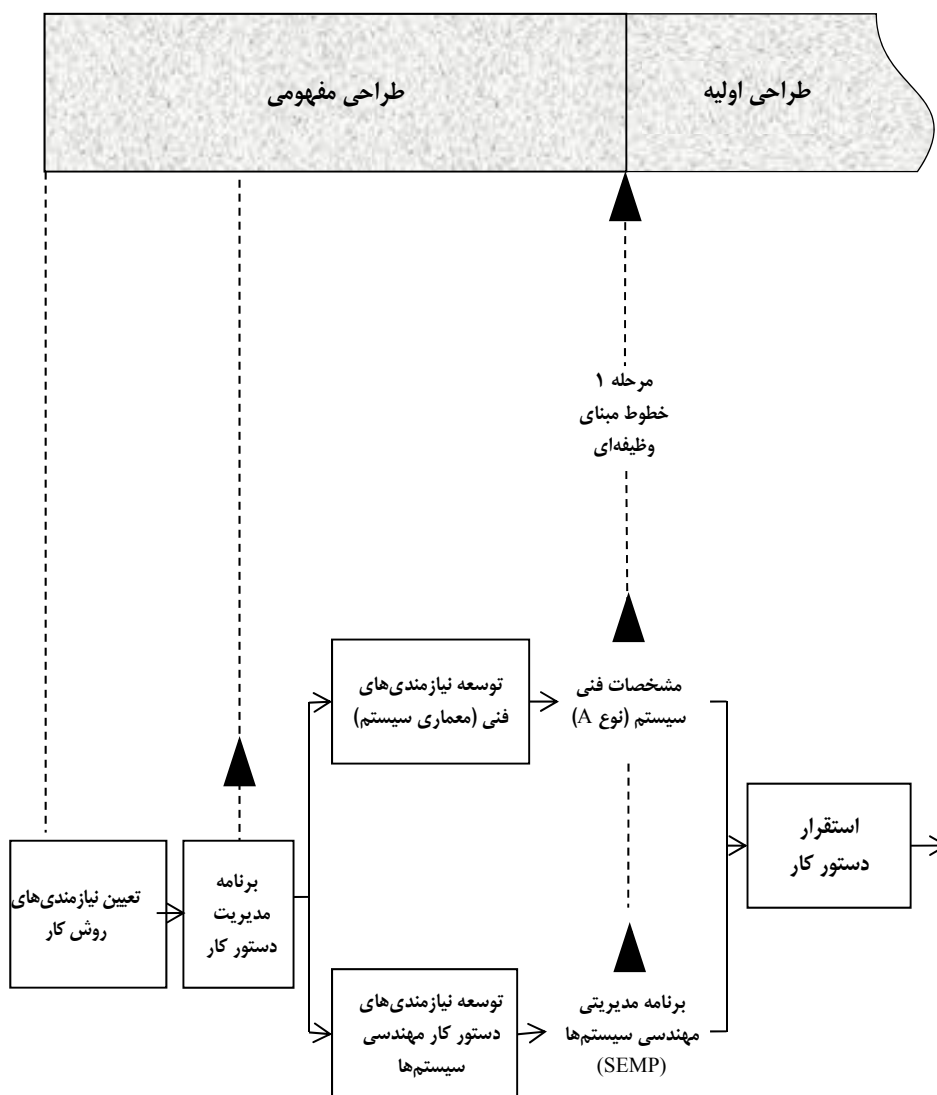
با داشتن یک نیاز برای یک سیستم جدید یا بهبود یافته، می‌توان مراحل پیشرفته برنامه‌ریزی و معماری را آغاز کرد. برنامه‌ریزی و معماری، فعالیت‌هایی ضروری و با ارزش یکسان برای ایجاد قابلیت‌های جدید یا بهبود یافته هستند. نیازمندی‌های کلی برنامه برای ایجاد قابلیت، یک فعالیت برنامه‌ریزی پیشرفته سیستم را آغاز کرده و برنامه مدیریت دستور کار^۱ (PMP) همان‌طور که در بلوک دوم شکل ۳-۱ نشان داده شده است، توسعه می‌یابد. درحالی که مجموعه‌ی واژگان و علائم برای این برنامه سطح بالا در هر یک از روش‌های کار متفاوت باشد، هدف آن فراهم آوردن برنامه مربوط به مدیریت است که خطوط راهنمای لازم برای همه فعالیت‌های فنی و مدیریتی بعدی را فراهم می‌کند.

با مراجعه به شکل ۳-۱، PMP توسعه نیازمندی‌ها برای استقرار یک دستورکار مهندسی سیستم‌ها و تدارک برنامه مدیریتی مهندسی سیستم‌ها (SEMP) یا برنامه مهندسی سیستم‌ها (SEP) را هدایت می‌کند. نیازمندی‌های فنی سیستم به‌طور هم‌زمان تعیین می‌گردند. این کار شامل توسعه‌ی معماری در سطح سیستم (ابتدا وظیفه‌ای و سپس فیزیکی) برای در برداشتن توسعه نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، تعیین معماری عملیاتی، پیشنهاد گزینه‌های مفاهیم فنی،

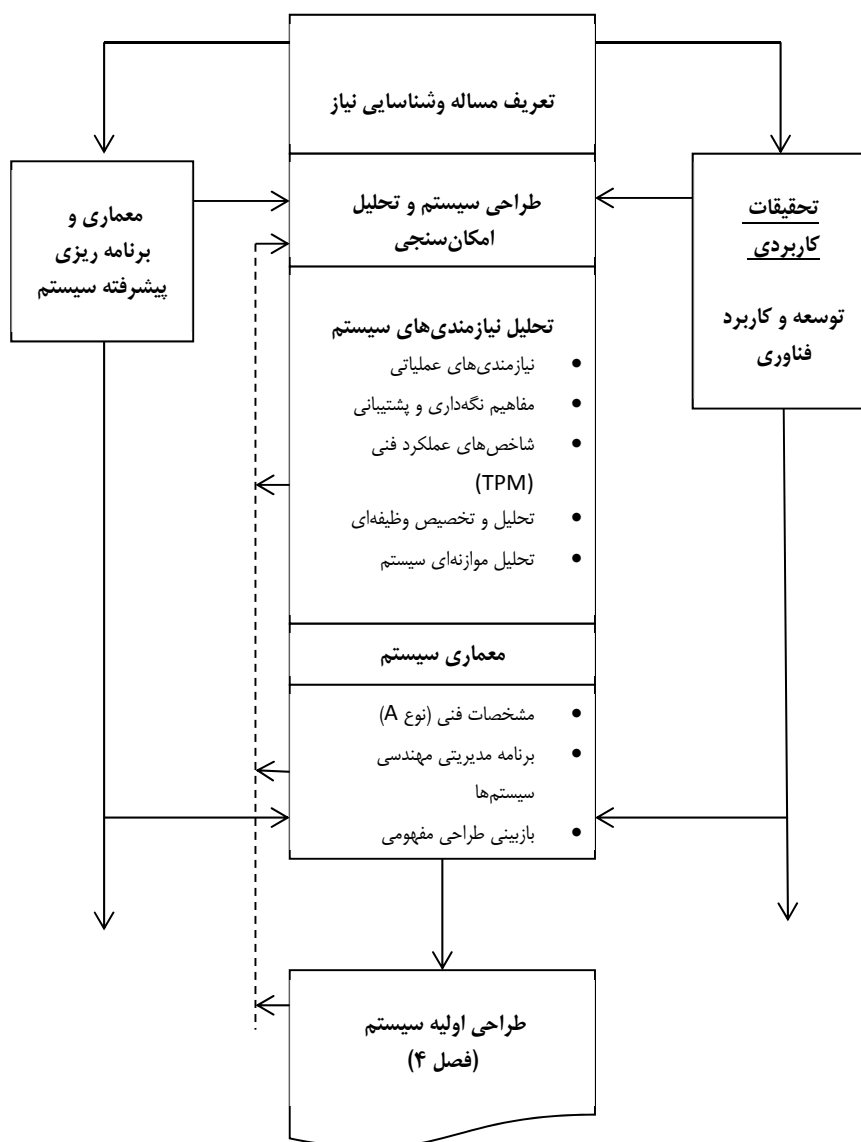
۱. Program management plan در این قسمت دو کلمه plan و program در فارسی هر دو برنامه ترجمه می‌شود. اما این جا برای ایجاد تمایز plan را برنامه و program را دستور کار ترجمه کرده‌ایم.

انجام تحلیل امکان‌سنجی برای مفاهیم پیشنهاد شده، انتخاب رویکرد پشتیبانی و نگهداری و تعمیرات، و غیره بوده و در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده منجر به فراهم شدن مشخصات فنی سیستم (نوع A) خواهد شد. تدارک SEMP و مشخصات فنی سیستم باید به‌طور هم‌زمان و به‌روشی دقیق و منظم صورت پذیرد. این دو سند باید باهم "حرف" بزنند و یکدیگر را پشتیبانی کنند.

از شکل ۱-۳ و ۲-۳ مشاهده می‌شود که نیازمندی‌های شناسایی شده به‌طورمستقیم فعالیت‌ها و مراحل مشخص شده در شکل ۲-۴ را پشتیبانی کرده و با آن هماهنگ هستند. مشخصات فنی سیستم (نوع A) دارای معماری در بالاترین سطح بوده و پایه‌ای برای فراهم کردن مشخصات فنی همه سطوح پایین‌تر با رویکردی بالا به پایین را تشکیل می‌دهد. این مشخصات فنی در سطوح پایین‌تر شامل مشخصات فنی توسعه (نوع B)، محصول (نوع C)، فرایند (نوع D)، و مواد (نوع E) می‌شود و در قسمت ۳-۹ بیش‌تر تشریح می‌گردد. برنامه مدیریتی مهندسی سیستم‌ها به تفصیل در قسمت ۱۸-۲ بیان می‌شود. فرایند و گام‌های مهندسی سیستم‌ها که در بخش پایینی شکل ۲-۴ و ۳-۲ نشان داده شده است، در قسمت‌های باقی‌مانده این فصل تشریح می‌شوند.



شکل ۳-۱ - معماری و برنامه‌ریزی پیشرفته سیستم در مراحل ابتدایی



شکل ۳-۲- گام‌های اصلی در فرایند تعریف نیازمندی‌های سیستم

۳-۳- تحلیل امکان‌سنجی و طراحی سیستم

پس از توجیه نیاز به یک سیستم جدید، لازم است که (۱) رویکردهای مختلف طراحی در سطح سیستم و گزینه‌های ممکن که بتوانند به نیاز پاسخ دهند، شناسایی شوند؛ (۲) ارزیابی رویکردهای ممکن برای پیدا کردن مطلوب‌ترین گزینه براساس عملکرد، اثربخشی، نگهداری، حفاظت و معیارهای اقتصادی چرخه‌ی عمر؛ و (۳) پیشنهاد یک دستورالعمل ارجح. ممکن است گزینه‌های متعددی وجود داشته باشد؛ با این حال، تعداد آن‌ها باید کاهش یافته و آن‌هایی که از نظر فیزیکی در نیازمندی‌های زمان‌بندی و منابع در دسترس امکان‌پذیر هستند، نگه داشته شوند.

در بررسی رویکردهای طراحی سیستم در دسترس، فناوری‌های کاربردی مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای مثال، در پاسخ به مساله عبور از رودخانه (که در قسمت ۳-۱ معرفی شد) مفاهیم طراحی ممکن شامل ایجاد یک تونل زیر رودخانه، یک پل بر روی رودخانه، یا ایجاد انحراف در مسیر رودخانه می‌شود. سپس یک مطالعه‌ی امکان‌سنجی برای تعیین رویکرد ارجح اجرا می‌شود. در اجرای چنین مطالعه‌ای برای مثال بالا، باید فاکتورهای محدودکننده مانند فاکتورهای جغرافیایی و ژئوتکنیکال، آب‌وهوایی، جریان آب و هیدرولوژی و همچنین قابلیت هر گزینه در برآورده ساختن اهداف هزینه‌ای چرخه‌ی عمر مدنظر باشد. در این مورد، ممکن است نتایج امکان‌سنجی تجربی مشخص سازد که احداث پل بهترین گزینه خواهد بود.

در سطحی جزئی‌تر، در طراحی یک سیستم ارتباطی، فناوری فیبر نوری ارجح است یا سیم پیچ؟ در طراحی هواپرد، تا چه حد استفاده از مواد کامپوزیت مدنظر باید باشد؟ در طراحی خودرو، یک سیستم کنترل مدار الکترونیکی در سرعت بالا نیاز است یا رویکردی الکترومکانیکال باید مورد استفاده قرار گیرد؟ در طراحی قابلیت انتقال اطلاعات، از قالب دیجیتال باید استفاده شود یا آنالوگ؟ در طراحی یک فرایند، تا چه حد از توانمندی‌های رایانه‌ای باید استفاده کرد؟ در فرایند

ارزیابی ملاحظات وجود دارد که وابسته به نوع و بلوغ فناوری، پتانسیل رشد و پایداری، عمر پیش‌بینی شده فناوری، تعداد تامین‌کنندگان منابع و غیره مدنظر قرار می‌گیرند.

در مرحله‌ی ابتدایی چرخه‌ی عمر سیستم است که تصمیم‌های عمده که وابسته به اقتباس یک رویکرد طراحی مشخص و فناوری کاربردی است، اتخاذ می‌شوند. بر این اساس، در این مرحله است که نتایج چنین تصمیم‌هایی اثر بزرگی بر خصوصیات رفتاری و هزینه‌ی چرخه‌ی عمر یک محصول خواهد گذاشت (به شکل ۲-۱۲ مراجعه کنید). فناوری کاربردی، مورد ارزیابی قرار گرفته و در برخی موارد که در آن اطلاعات کافی در دسترس نیست (یا یک راه‌حل خوب، ساده و بدیهی نیست)، تحقیقاتی با هدف توسعه‌ی دانشی جدید برای ایجاد دیگر رویکردها آغاز می‌گردد. در نهایت، این موضوع که نیاز باید دیکته شده و محرک فناوری باشد (نه بر عکس آن) باید مورد توافق قرار گیرد.

شناسایی گزینه‌ها و ملاحظات امکان‌سنجی به‌طور قابل توجهی بر خصوصیات عملیاتی سیستم و قابلیت ساخت، قابلیت تولید، قابلیت پشتیبانی، قابلیت حفاظت، قابلیت امحا و دیگر خصوصیات طرح تاثیرگذار است. انتخاب و به‌کارگیری یک فناوری موضوعاتی مانند قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیر را همراه خود دارد که بر عملکرد انسانی موثر است و می‌تواند ساخت یا تولید و عملیات مونتاژ را تحت‌تاثیر قرار دهد و یا اثر قابل توجهی برای نیاز سیستم به نگهداری، تعمیر و پشتیبانی داشته باشد. هر کدام از این موارد، مطمئناً هزینه‌ی چرخه‌ی عمر را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین ضروری است که ملاحظات چرخه‌ی عمر به‌عنوان بخشی ذاتی از فرایند تعیین مجموعه ممکن از گزینه‌های طراحی سیستم درنظر گرفته شود.

۳-۴- نیازمندی‌های عملیاتی سیستم

زمانی که نیاز و رویکرد فنی شناسایی شد، لازم است که این موضوعات را در قالب سناریوی عملیاتی یا مجموعه‌ای از نیازمندی‌های عملیاتی در آورد. در این نقطه سوالات زیر مطرح است: /نوع و تعداد پیش‌بینی شده تجهیزات، نرم‌افزارها، کارکنان، تسهیلات، اطلاعات، و غیره مورد نیاز چیست و در کجا قرار خواهند داشت؟ سیستم چگونه و برای چه مدت باید بهره‌برداری شود؟ محیط پیش‌بینی شده برای هر یک از سایت‌های عملیاتی چیست؟ سیستم چگونه و توسط چه کسی و به چه مدت پشتیبانی می‌شود؟ پاسخ این سوالات و سوالات مشابه به تعریف نیازمندی‌های عملیاتی منجر می‌شود و پیرو آن مفاهیم پشتیبانی و نگهداری و شناسایی معیارهای مشخص طراحی و خطوط راهنمای مربوط تعیین می‌گردد.

۳-۴-۱- تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم

نیازمندی‌های عملیاتی سیستم باید در زودترین زمان، با دقت تمام و در کامل‌ترین حالت ممکن و بر پایه‌ی نیاز مشخص شده و رویکرد فنی منتخب شناسایی و تعریف گردند. مفهوم و سناریوی عملیاتی که در این جا تعریف شده است در شکل‌های ۲-۷ و ۳-۲ شناسایی شده است و باید شامل موارد زیر باشد:

۱. **تعریف مأموریت:** شناسایی مأموریت‌های اصلی و جایگزین یا فرعی سیستم. سیستم چه چیزی را به سرانجام می‌رساند؟ سیستم چگونه به اهدافش می‌رسد؟ هدف می‌تواند از طریق یک یا مجموعه‌ای از سناریوها تعریف شود. شناسایی شرایط عملیاتی پویای سیستم تا حد ممکن از اهمیت بالایی برخوردار است.
۲. **پارامترهای فیزیکی و عملکردی:** تعریف خصوصیات و وظایف عملیاتی سیستم (به‌طور مثال اندازه، وزن، سرعت، گستره، دقت، نرخ جریان، ظرفیت، انتقال، دریافت و غیره).

پارامترهای عملکردی حیاتی سیستم کدامند؟ این پارامترها چگونه به سناریو(های) ماموریت مرتبط می‌شود؟

۳. *توزیع و پیاده‌سازی عملیاتی*: شناسایی تعداد تجهیزات، نرم‌افزارها، کارکنان، تسهیلات و غیره و مکان جغرافیایی مورد انتظار برای حمل و نقل و جابه‌جایی این نیازمندی‌ها. چه تعداد تجهیزات و نرم‌افزار باید توزیع شود و در کجا و برای چه مدتی مستقر می‌شود؟ چه زمانی سیستم کاملاً عملیاتی می‌شود؟

۴. *چرخه‌ی عمر عملیاتی (افق دید)*: زمان پیش‌بینی شده که سیستم در حالت عملیاتی است. پروفایل موجودی کل در سرتاسر چرخه‌ی عمر سیستم چیست؟ چه کسی و برای چه دوره‌ی زمانی سیستم را در حالت عملیاتی نگه خواهد داشت؟

۵. *نیازمندی‌های بهره‌برداری*: بهره‌برداری پیش‌بینی شده از سیستم و عناصر آن (به‌طور مثال ساعات عملیات در روز، درصد استفاده از ظرفیت کل، چرخه‌های عملیاتی در هر ماه، بارگذاری تجهیزات). سیستم توسط مشتری یا اپراتور چگونه مورد استفاده قرار می‌گیرد؟

ع. *فاکتورهای اثربخشی*: نیازمندی‌های سیستم که به‌عنوان میزان رویه (FOM^۱) مشخص می‌شوند مانند هزینه/اثربخشی سیستم، دسترسی‌پذیری عملیاتی (A_0)، وابستگی، اثربخشی پشتیبانی تدارکات، میانگین زمان بین نگهداری و تعمیر (MTBM)، نرخ خرابی (λ)، زمان از کار افتادگی نگهداری و تعمیر (MDT)، بهره‌برداری از تسهیل (به درصد)، سطوح مهارت اپراتور، و نیازمندی‌های اجرای وظایف. برای سیستمی که کار خواهد کرد اثربخشی و کارایی چگونه خواهد بود؟ این فاکتورها چگونه به سناریوهای مامورت مربوط می‌شوند؟

1. Figure of Merit

۷. **فاکتورهای محیطی:** تعریف محیطی که سیستم قرار است در آن کار کند (دما، رطوبت، کوه‌ها و دشت‌ها، هوابرد، زمین، دریا). این موضوع باید گستره‌ای از مقادیر کاربردی را شامل شده و همه‌ی موضوعات حمل و نقل، به‌کارگیری و انبار را پوشش دهد. حمل و نقل کشتی چگونه مدیریت می‌شود؟ در دوره‌ی عملیاتی سیستم تحت‌تاثیر چه چیزهایی تا چه زمانی است؟ پروفایل محیطی کاملی باید توسعه یابد.

علاوه‌بر نیازمندی‌های عملیاتی، سیستم در حال توسعه می‌تواند در یک ساختار کلی در سطحی بالاتر قرار گرفته و نیازمندی‌های رد و بدل کردن اطلاعات را مورد توجه قرار دهد. برای مثال، یک سیستم هوابرد می‌تواند شامل سیستم حمل و نقل هوایی در سطحی بالاتر باشد که بخشی از توانمندی حمل و نقل محلی است و غیره. سیستم‌های حمل و نقل زمینی و دریایی نیز می‌تواند در نیازمندی‌های عملیاتی سیستم تعریف شود.

در برخی موارد، آثار افقی و عمودی ممکن است وجود داشته باشد. دو سوال مهم مطرح است: *آثار بالقوه‌ی این سیستم جدید بر دیگر سیستم‌ها در ساختار مشابه SOS چیست؟ آثار خارجی دیگر سیستم‌ها بر سیستم جدید در ساختار مشابه SOS چیست؟*

۳-۴-۲- نمایش نیازمندی‌های عملیاتی سیستم

در پنج مثال نمونه که هر کدام درجات یا سطوح مختلفی از جزئیات را دارا هستند نیازمندی‌های عملیاتی سیستم (که در قسمت ۳-۴-۱ ارائه شد) بیش‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. اولین مثال مساله عبور از رودخانه است که در قسمت ۳-۱ معرفی شد.

مثال دوم، نیازمندی‌های عملیاتی یک سیستم هوابرد است که در سطحی جهانی پیاده می‌شود که با عمق بیش‌تری مورد بررسی قرار می‌گیرد. مثال سوم یک سیستم ارتباطی دارای کاربردهای زمینی و هوایی است. مثال چهارم خط هوایی تجاری مربوط به یک کلان شهر است.

مثال پنجم یک بیمارستان را به عنوان بخشی از سیستم حفظ سلامت در نظر گرفته است. در نهایت، توجه شده است که کاربردها و موقعیت‌های بی‌شمار دیگری وجود دارد که در آن روش‌شناسی به نمایش درآمده، اجرا می‌شود.

هدف از این مثال‌ها، تشویق در توجه عمیق‌تر به نیازمندی‌های عملیاتی در ابتدای چرخه‌ی عمر سیستم است، هنگامی که مشخصات فنی چنین نیازمندی‌هایی بیش‌ترین آثار را بر طراحی می‌گذارد (همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ و ۲-۱۳ تاکید شده است). اگرچه به تاخیر انداختن این ملاحظات در فرایند طراحی سیستم آسان‌تر است، عواقب آن می‌تواند در درازمدت بسیار پرهزینه باشد. هدف مهندسی سیستم ایجاد اجبار در توجه به نیازمندی‌های عملیاتی در زودترین زمان ممکن برای فرایند طراحی است.

مثال ۱: مساله عبور از رودخانه: مساله حمل و نقل عمومی در محلی که با مشکل فراهم آوردن قابلیت برای افزایش جریان ترافیک در عبور از رودخانه مواجه است که دو منطقه شهری را از هم جدا کرده است (یک چه). مطالعه‌ی بیش‌تر مساله (یعنی نقص فعلی) نیازمندی‌ها برای جریان دو طرفه وسایل نقلیه شخصی، تاکسی، اتوبوس، واگن‌های حمل و نقل تندرو، وسایل نقلیه تجاری، کامیون‌های بزرگ، افراد بر روی دوچرخه و موتورسیکلت و عابرین پیاده برای عبور از رودخانه آشکار می‌شود. از طریق برنامه‌ریزی پیشرفته سیستم و در نظر گرفتن معماری ممکن، مفاهیم گوناگون عبور از رودخانه برای امکان‌سنجی اقتصادی و فیزیکی پیشنهاد شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این موارد شامل عبور از زیر رودخانه، روی آب، پل بستن روی رودخانه یا در صورت امکان ایجاد انحراف در مسیر رودخانه است. مطالعات امکان‌سنجی انحراف مسیر رودخانه گزینه خوبی از نظر فیزیکی و هم‌چنین فراهم کردن جریان ترافیک روان در بالا دست و پایین دست رودخانه نیست.

نتایج مطالعات نشان می‌دهند که جذاب‌ترین رویکرد، احداث نوعی پل بر روی رودخانه است (یک چگونه). از این نقطه به بعد لازم است که در نیازمندی‌های عملیاتی که به انتخاب و ارزیابی نوع پل منجر می‌شود، بیش‌تر کاوش گردد (معلق، زیربنایی، جاده‌ای و غیره). فاکتورهای زیر در این موضوع باید مدنظر قرار گیرد:

۱. *تعریف مأموریت و پارامترهای عملکردی:* حداکثر جریان ترافیک در واحد نفر در ساعت

طی یک دوره ۲۴ ساعته باید ۴۰۰۰ واگن مسافری، ۱۲۰ تاکسی، ۲۰ اتوبوس، ۳۲۰ وسیله حمل و نقل تجاری، ۱۲۰ کامیون بزرگ، ۱۰۰ نفر بر روی دوچرخه و ۱۸۰ عابر پیاده باشد.

۲. *توزیع و پیاده‌سازی عملیاتی:* پل پیشنهادی باید در نقطه ABC و در محلی از رودخانه که

دارای مسیر مستقیم است بنا شده و دو مرکز شهری را به یکدیگر متصل کند (به‌طور مثال خیابان اصلی از منطقه X به خیابان مرکزی از منطقه Y). مکان موردنظر باید بر پایه مطالعات جغرافیایی، ژئوتکنیکال، هیدرولوژی و جریان آب و دیگر فاکتورهای مربوط باشد (به قسمت ۳-۳ مراجعه کنید).

۳. *چرخه‌ی عمر عملیاتی (افق عملیاتی):* پل پیشنهادی باید طی ۵ سال ساخته و عملیاتی

شود و چرخه‌ی عمر عملیاتی آن ۵۰ سال باشد.

۴. *فاکتورهای اثربخشی:* دسترسی‌پذیری عملیاتی (A_0) کل سیستم (یعنی خود پل و

زیربناهای عملیاتی آن) باید حداقل ۹۹.۵٪ باشد، MTBM ۵ سال یا بیش‌تر باشد، و زمان از کار افتادگی برای نگهداری و تعمیر (MDT) باید یک روز یا کم‌تر باشد.

۵. *فاکتورهای محیطی:* پل پیشنهادی باید در شرایط محیطی با دمای بین $+125^{\circ}\text{F}$ و

-50°F با ۱۰۰٪ رطوبت و در شرایط برفی یا بارانی عملیاتی باشد و شوک‌ها و لرزش‌های حاصل از جریان ترافیک را تحمل کند؛ و در برابر زلزله با مقیاس ۶ ریشتر

کاملاً مقاوم باشد. در شرایط شدید آب و هوایی (برف، یخبندان و بوران) پل باید طی ۲ ساعت یا کمتر به حالت عملیاتی برگردد.

۶. **فاکتورهای حفاظت محیطی:** هیچ فرسایشی در جریان رودخانه و دیواره آن نباید ایجاد شود، آلودگی هوا تولید نکند، فرسایش صوتی نداشته باشد و زیبایی ظاهری داشته باشد. منابع مصالح مورد استفاده در ساخت پل و زیربناهایش را باید بتوان در ۵ سال یا کمتر از زمانی که پل به حالت عملیاتی در می‌آید دوباره پر کرد.

۷. **فاکتورهای اقتصادی:** پل و زیربناهایش باید طوری تعریف شود که هزینه‌های چرخه‌ی عمر (LCC) از مقدار $\$X$ تجاوز نکند و هزینه سالانه عملیات و نگهداری و تعمیر نباید از ۱٪ هزینه اکتساب سیستم (طراحی، ساخت، آزمایش و ارزیابی) تجاوز کند. همه تصمیم‌های طراحی در آینده (اصلاحات و غیره) باید بر پایه هزینه‌ی چرخه‌ی عمر توجیه شود.

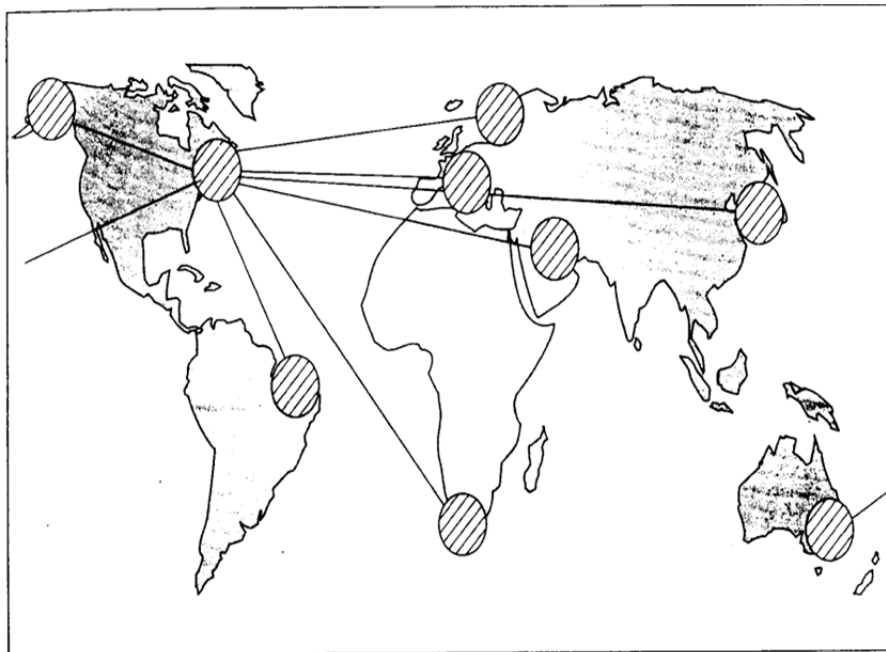
با این حال که فاکتورهای کیفی و کمی مشخص شده در این مثال، از یک پروژه به پروژه دیگر متفاوت است، این مثال قصد دارد تا ملاحظات را که در شروع طراحی مفهومی باید مدنظر باشد، در قالب مساله عبور از رودخانه به تصویر بکشد.

مثال ۲: سیستم هوابرد. بر پایه‌ی نتایج تحلیل امکان‌سنجی از گزینه‌های طراحی مفهومی، مشخص شد که یک نیاز برای یک هوابرد جدید وجود دارد. چندین عدد از این هوابردها باید تولید شده و در نقاط مختلف دنیا استقرار یابد. مکان‌های جغرافیایی پیش‌بینی شده، تعداد هوابردها در هر نقطه و میانگین زمان بهره‌برداری از هوابرد در شکل ۳-۳ ترسیم شده است.

در قالب ماموریت‌ها، هر هوابرد باید سه پروفایل ماموریتی مختلف را که در شکل ۳-۴ و در قالب مشخصات فنی ۱۲۳۴۵ تشریح شده است، به انجام رساند. اساساً یک هوابرد برای پرواز فراهم شده است یعنی درخواستن از زمین، انجام یک سناریوی ماموریت مشخص و بازگشت به آشیانه، تحت نگهداری و تعمیر قرار گرفتن در صورت نیاز و بازگشت به حالت آماده. با هدف برنامه‌ریزی، همه هوابردها باید حداقل یکبار در هفته سه پروفایل ماموریتی خود را به انجام رسانند.

هوابرد باید نیازمندی‌های عملکردی در مورد مشخصات فنی ۱۲۳۴۵ را برآورده کند؛ دسترسی‌پذیری عملیاتی (A_0) باید حداقل ۹۰٪ باشد؛ زمان از کار افتادگی برای نگهداری و تعمیر نباید بیش از ۳ ساعت باشد؛ زمان تعمیر (M_{ct}) باید ۳۰ دقیقه یا کمتر باشد؛ M_{max} در ۹۰امین درصد باید ۲ ساعت باشد؛ نفر ساعت نگهداری و تعمیر در هر ساعت عملیاتی (MLH/OH) برای هوابرد باید ۱۰ یا کمتر باشد؛ و هزینه نگهداری و تعمیر در سطح سازمانی نباید بیش‌تر از \$۱۰۰۰۰ باشد. هوابرد باید دارای یک قابلیت خود آزمایشی باشد که ۸۵٪ از کل سیستم هوابرد را خود تحت آزمایش و بررسی قرار دهد. هیچ پشتیبانی خارجی اجازه داده نخواهد شد.

برای پشتیبانی زیربنای، یک توانمندی متوسط نگهداری و تعمیر در آشیانه قرار داده خواهد شد. علاوه‌بر این، دو تسهیل نگهداری و تعمیر در مبدا حرکت قرار داده می‌شود. مفهوم کلی پشتیبانی در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است.



تعداد واحدهای عملیاتی مورد استفاده در سال

تعداد کل واحدها	شماره سال										حوزه‌های جغرافیایی عملیاتی
	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۳۱۰	۲۵	۳۵	۶۰	۶۰	۶۰	۴۰	۲۰	۱۰	-	-	شمال و جنوب آمریکا
۱۸۰	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۲	-	-	اروپا
۱۵۶	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۲	۱۲	۱۲	-	-	خاورمیانه
۱۸۰	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۱۲	-	-	جنوب آفریقا
۱۳۳	۱۲	۱۲	۲۴	۲۴	۲۴	۱۲	۱۲	۱۲	-	-	لبه اقیانوس ۱
۹۶	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	-	-	لبه اقیانوس ۲
۱۰۵۴	۱۲۱	۱۳۱	۱۶۸	۱۶۸	۱۶۸	۱۲۴	۱۰۴	۷۰	-	-	کل

شکل ۳-۳- نیازمندی‌های عملیاتی سیستم (توزیع و بهره‌برداری)

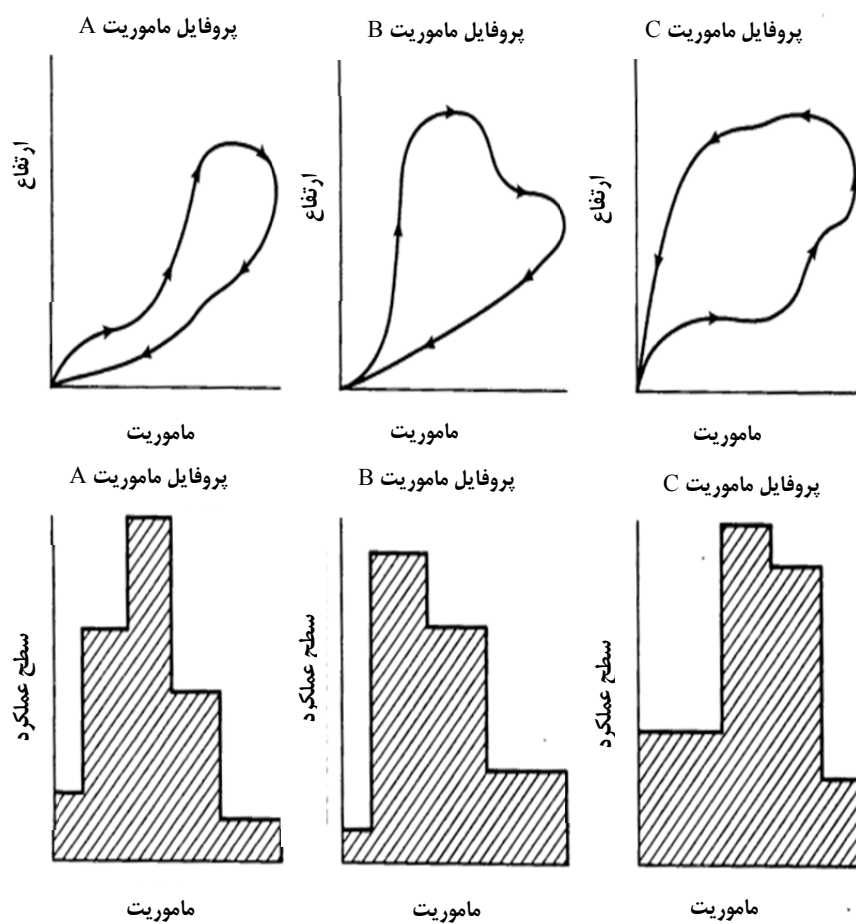
اگرچه توضیحات ارائه شده در این جا بیش تر به صورت کلی ارائه گردیده است، لازم است که به عنوان ورودی طراحی این موارد تعریف شوند:

(۱) مکان های جغرافیایی و محیط پیش بینی شده که سیستم در آن به بهره برداری می رسد؛

(۲) یک یا چند سناریوی ماموریتی برای شناسایی توالی عملیاتی، فشارهای بالقوه بر سیستم و نیازمندی های اثربخشی سیستم؛

(۳) چرخه ی عمر عملیاتی سیستم برای تعیین فاکتورهای عملکردی، نیازمندی های قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیر، نیازمندی های مهندسی نیروی کار و قابلیت پشتیبانی پایدار.

مفهوم کلی ترسیم شده در شکل های ۳-۳ تا ۳-۵ که همراه با شاخص های کمی است، باید برای استقرار خطوط مبنای طراحی و توسعه ی سیستم در آینده تعریف گردند. اگرچه بسیاری از فاکتورهای کمی مشخص شده در این مساله به طور رسمی در فصول بعدی (۱۲ و ۱۳) معرفی می گردند، هدف آن تاکید بیش تر بر توجه به چنین فاکتورهایی در تعیین اولیه ی نیازمندی های عملیاتی به عنوان ورودی فرایند طراحی است.

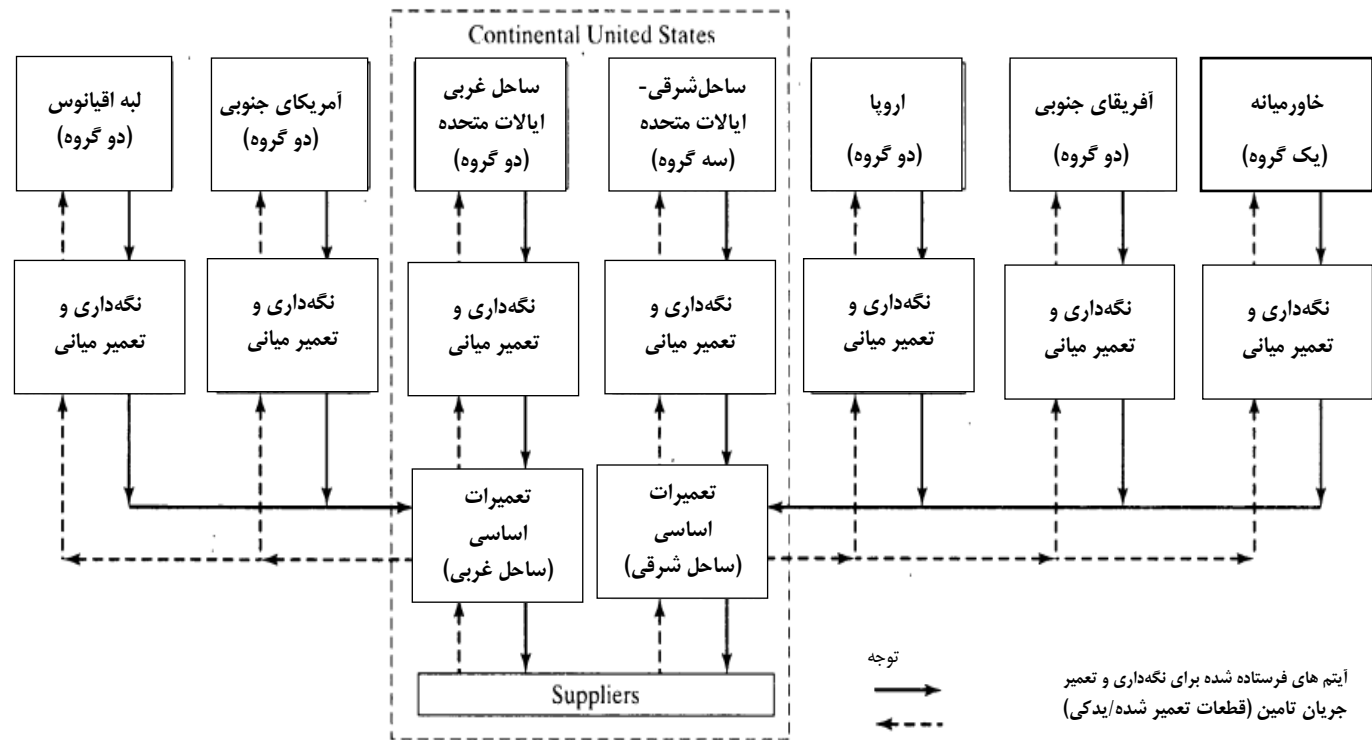


شکل ۳-۴- پروفایل‌های عملیاتی هواپرد

مثال ۳: سیستم ارتباطی. یک قابلیت ارتباطی جدید مورد نیاز است که دارای وسعت بیش تر و قابلیت اطمینان آن بهبود یافته باشد تا جایگزین تعداد زیادی از قابلیت موجود شود که در چندین نقطه از دنیا توزیع شده است. این سیستم سه ماموریت اصلی دارد:

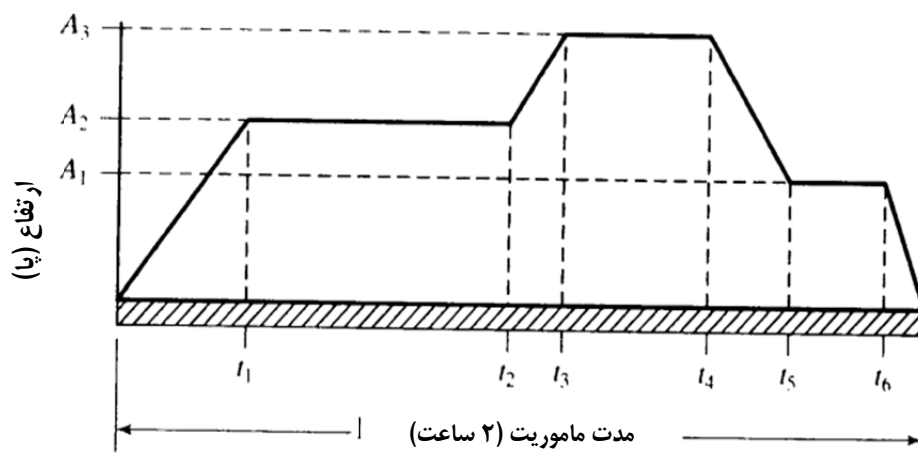
۱. سناریوی ماموریت ۱: عناصر سیستم باید در یک هوابرد سبک کوتاه پرواز (۱۰۰۰۰ پا یا کم تر) به تعداد ۱ عدد در هر هوابرد نصب شود. این سیستم باید بتواند با وسایل نقلیه پراکنده شده در کوه ها و دشت ها و یک مرکز ارتباطات، ارتباط برقرار کند. پیش بینی شده است که هر هوابرد ۱۵ ماموریت پروازی را با میانگین ۲ ساعت در هر ماموریت به انجام می رساند. یک پروفایل ماموریت ساده در شکل ۳-۶ نمایش داده شده است. نیازمندی بهره برداری از سیستم ۱۱۰٪ است (۱/۱ ساعت عملیات سیستم برای هر ساعت عملیات پرواز که شامل زمان پرواز به علاوه زمانی که روی زمین قرار دارد). سیستم باید ۹۵/۵٪ دسترسی پذیری داشته باشد و قابلیت اطمینان آن به صورت میانگین زمان بین خرابی ها (MTBF) نباید کم تر از ۲۰۰۰ ساعت باشد.

۲. سناریوی ماموریت ۲: عناصر سیستم باید در تجهیزات حمل و نقل زمینی (ماشین، کامیون سبک یا معادل های آن ها) به تعداد یک عدد در هر وسیله نقلیه سوار شود. سیستم باید بتواند با وسایل نقلیه دیگر در شعاع ۲۰۰ مایلی و در زمینی تقریباً مسطح قابلیت ایجاد ارتباط داشته باشد و با هوابرد در ارتفاع ۱۰۰۰۰ پا یا کم تر بتواند اطلاعات رد و بدل کند و با مرکز ارتباطات، تبادل اطلاعات داشته باشد. شصت و پنج درصد از وسایل نقلیه در هر نقطه زمانی در حالت عملیاتی بوده و در حالت ۱۰۰٪ مورد بهره برداری قرار می گیرد. سیستم باید از نظر قابلیت اطمینان دارای MTBF حداقل ۱۸۰۰ ساعته بوده و زمان تعمیرات اصلاحی باید کم تر از یک ساعت باشد.



شکل ۳-۵- ساختار پشتیبانی و نگهداری و تعمیر در بالاترین سطح سیستم

۳. سناریوی ماموریت ۳: عناصر سیستم (تسهیل ارتباطی مرکزی) در ۲۰ حوزه تسهیلات ارتباطی که در سرتاسر دنیا پراکنده شده است و ۵ تسهیل سیستم عملیاتی به آنها اختصاص داده شده است نصب شود. سیستم باید بتواند با هواپرد در حال پرواز در ارتفاع ۱۰۰۰۰ پا یا کمتر و در شعاع ۵۰۰ مایلی از طریق تسهیل ارتباطی (مرکزی) ارتباط برقرار کرده و یا با وسایل نقلیه در شعاع ۳۰۰ متری در زمین نسبتاً هموار در ارتباط باشد. چهار عدد از این سیستم‌ها به صورت ۲۴ ساعته در حال بهره‌برداری است و سیستم باقی‌مانده یک پشتیبان بوده و به‌طور متوسط ۶ ساعت در روز مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر یک از سیستم‌های عملیاتی باید از نظر قابلیت اطمینان دارای MTBF حداقل ۲۵۰۰ ساعته و Mct ۳۰ دقیقه یا کمتر باشد. هر تسهیل ارتباطی باید در یک فرودگاه قرار داشته باشد.

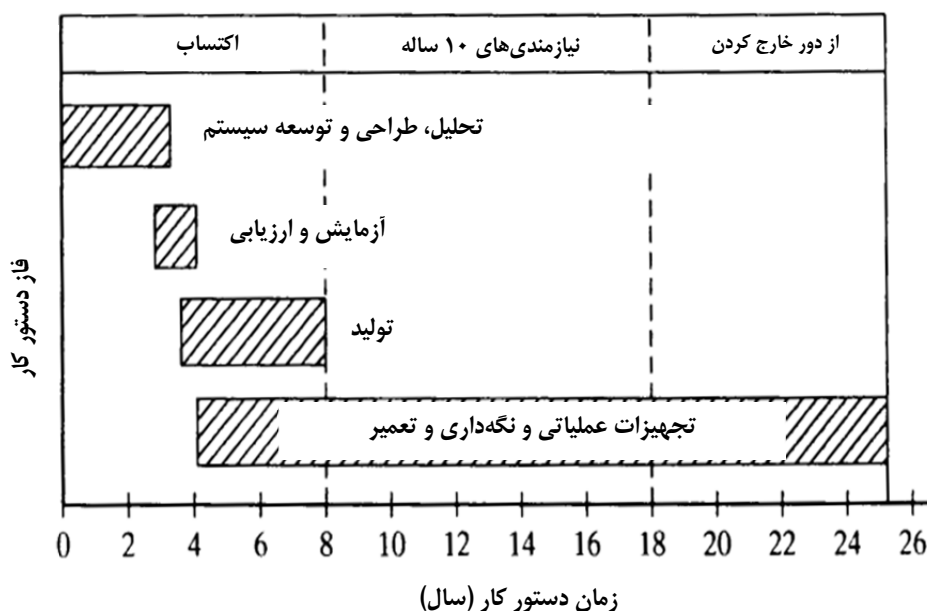


شکل ۳-۶- پروفایل ماموریت

برای حداقل کردن هزینه‌های پشتیبانی (مانند آزمایش و پشتیبانی تجهیزات، قطعات یدکی و کارکنان)، دستگاه فرستنده-گیرنده، که عنصر اصلی سیستم است، باید یک طراحی عمومی برای

استفاده وسیله‌ی نقلیه، هوابرد و سیستم مستقر بر زمین داشته باشد. استقرار آنتن‌ها در هر کدام از این موارد مختص خود آن‌هاست.

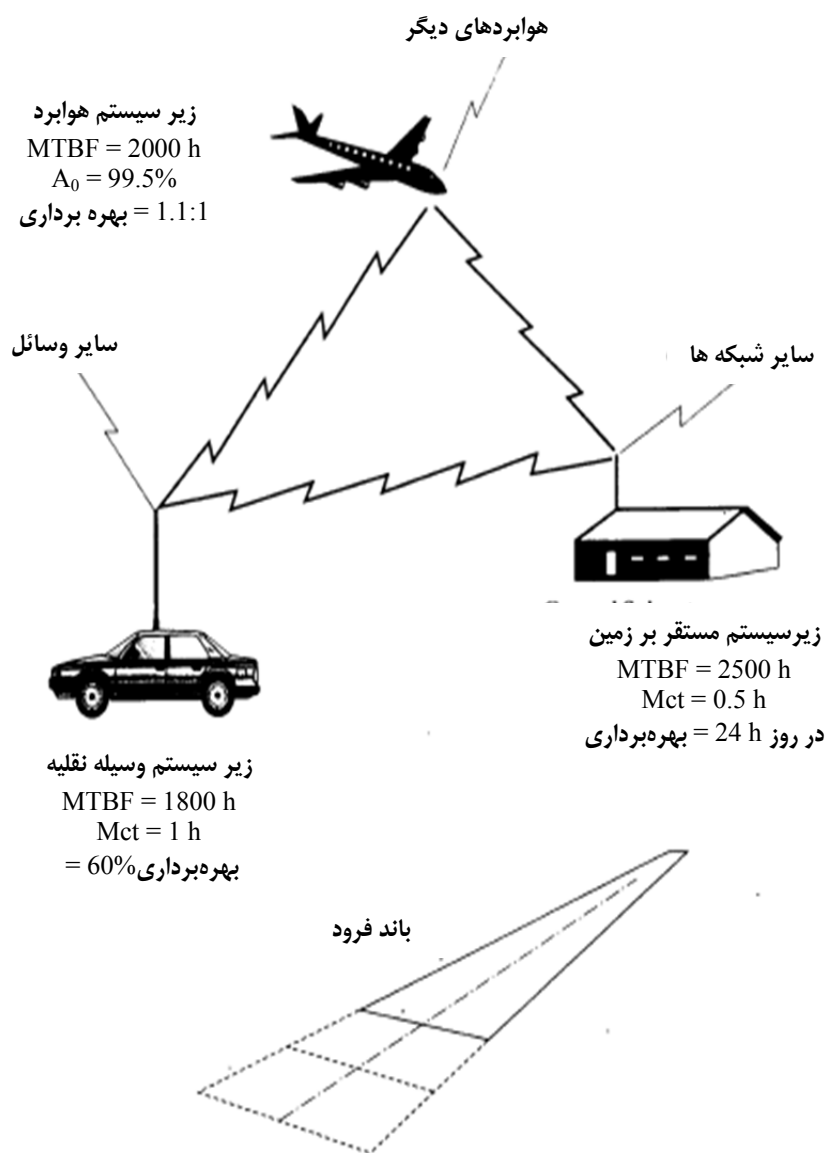
نرم‌افزار/ تجهیز اصلی عملیاتی باید برای استفاده در طی چهار سال از تاریخ کنونی معرفی شده باشد. آخرین تجهیز باید پس از ۲۵ سال از موجودی خارج شده باشد. برنامه زمانی در شکل ۷-۳ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳- زمان بندی برنامه

نیازمندی‌ها این موارد را دیکته می‌کنند: (۱) ۲۰ تسهیل ارتباطی مرکزی؛ (۲) ۱۱ هوابرد تخصیص داده شده به تسهیلات ارتباطی؛ و (۳) ۵۵ وسیله‌ی نقلیه تخصیص داده شده با تسهیلات ارتباطی. براساس سناریوهای ماموریت که تعریف شده‌اند، نیاز به ۱۴۲۰ تجهیز اصلی

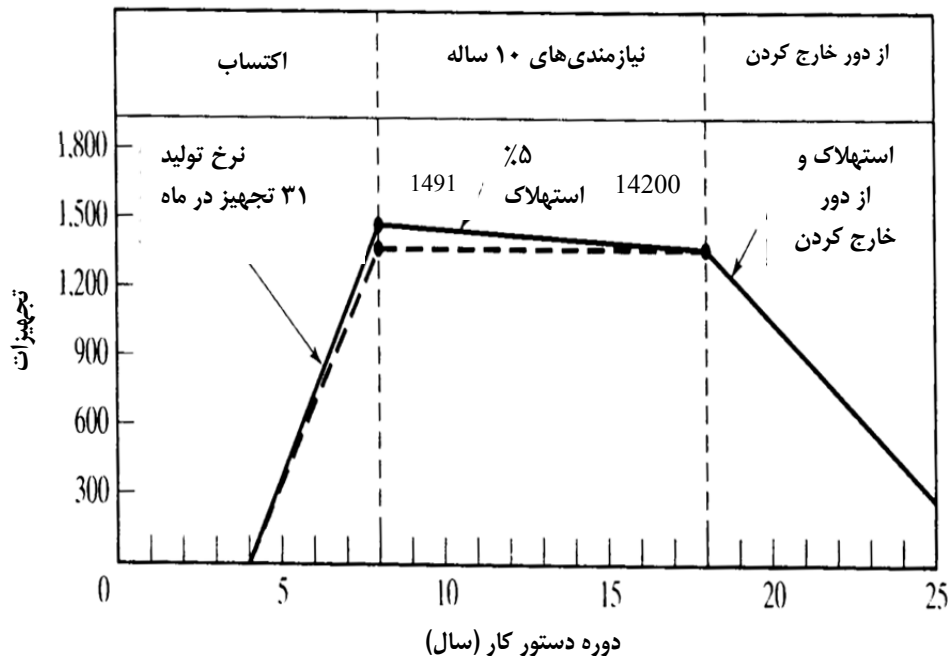
وجود دارد که به صورت یک شبکه ارتباطی سری استقرار می یابد و در شکل ۸-۳ نشان داده شده است.



شکل ۸-۳- شبکه ارتباطی

در پشتیبانی برنامه‌ی زمان‌بندی و نیاز اساسی، لازم است که یک پروفایل موجودی تجهیزات مانند شکل ۳-۹ فراهم شود. این پروفایل مشخص می‌کند که تعداد کل تجهیزات اصلی در موجودی انبار کاربر در هر سال در چرخه‌ی عمر چقدر باید باشد. پروفایل شامل نرخ تولید، که البته می‌تواند به‌طور قابل توجهی متغیر باشد، نوع و پیچیدگی تجهیز/نرم‌افزار، ظرفیت تولید تجهیز و هزینه تولید باشد. تعداد کل تجهیزات اصلی تولید شده باید ۱۴۹۱ باشد و فرضیات زیر در آن مطرح است: (۱) ۵٪ از تجهیزات به خاطر عدم اقتصادی بودن تعمیر در دوره ۱۰ ساله از دست می‌روند، و (۲) تولید تمامی تجهیزات یکباره انجام می‌شود (تا از هزینه‌های توقف تولید و راه‌اندازی آن ممانعت شود). به عبارت دیگر با فرض تولید پیوسته، ۱۴۹۱ قطعه تجهیز باید برای پوشش استهلاک و نگهداری و تعمیر نیازمندی‌های عملیاتی که در واقع ۱۴۲۰ تجهیز در ۱۰ سال است، تولید شود. پس از دوره ۱۰ ساله، تعداد واحدها از طریق استهلاک و از دور خارج کردن عمدی به علت منسوخ شدن تجهیز انجام می‌گیرد تا موجودی به صفر برسد.

تعریف نیازمندی‌های عملیاتی برای سیستم ارتباطی (یعنی توزیع، بهره‌برداری، فاکتورهای اثربخشی، شاخص‌های قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیر و غیره) پایه‌ای برای مفهوم نگهداری، تعمیر و پشتیبانی فراهم می‌نماید (به قسمت ۳-۵ مراجعه کنید) و همچنین نیازمندی‌های مشخص برای طراحی را مشخص می‌کند. با پیشروی فرایند طراحی و توسعه‌ی سیستم، نیازمندی‌های عملیاتی برای سیستم ارتباطی به صورت تکرار شونده بیش‌تر مورد تحلیل و کاوش قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۹- نیازمندی‌های موجودی پایه طی چرخه‌ی عمر سیستم

مثال ۴: ارتقای خط هوایی تجاری. سه خط هوایی تجاری برای فراهم آوردن خدمات برای یک منطقه بزرگ کلان شهری طی ۸ سال پیشنهاد شده است. با گسترش مورد انتظار در آینده، ممکن است بعداً شرکت‌های هوایی دیگر به آن‌ها اضافه شوند. به منظور انجام فعالیت‌های برنامه‌ریزی، پیش‌بینی ترکیبی از نیازمندی‌های حمل مسافر در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. نیازمندی‌های ترکیب خطوط هوایی به صورت زیر است.

۱. ورود و خروج پیش‌بینی شده پروازها در یک دوره‌ی زمانی مشخص تعیین شده است. فرض بر آن است که بار هر پرواز برابر با ۱۰۰ مسافر باشد.

۲. دسترسی‌پذیری هواپیما A₀ برابر ۹۵٪ است. یعنی ۹۵٪ از همه‌ی پروازها باید در زمان‌بندی صورت گرفته کاملاً در حالت عملیاتی باشند (بدون در نظر گرفتن تعلیق شدن پرواز به خاطر شرایط آب و هوایی). فاکتورهای مجاز برای نگهداری و تعمیر زمان‌بندی شده و بارگذاری مسافر به صورت زیر است:

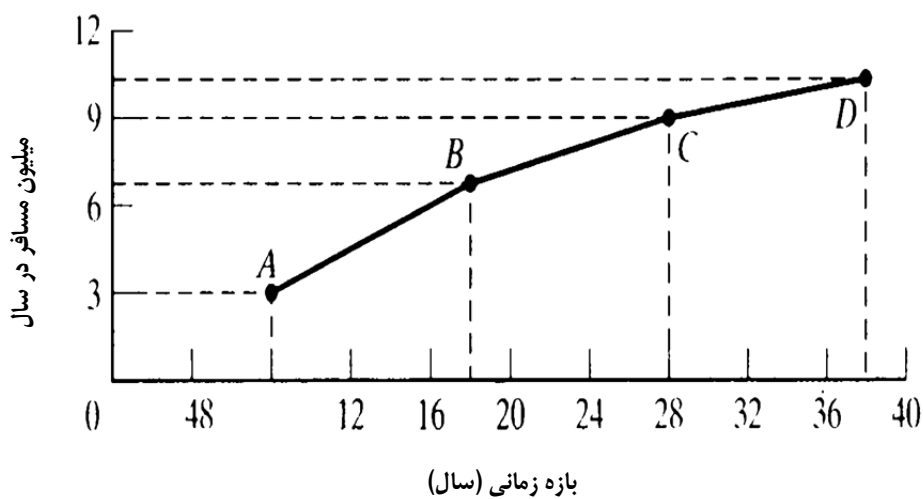
وظیفه	فراوانی	زمان از کار افتادگی
طی خدمات	هر پرواز	۳۰ دقیقه
خدمات بازگشت	هر بازگشت	۱ ساعت
بررسی خاتمه	هر خاتمه پرواز	۶ ساعت
بررسی سرویس	۱۵ روز	۹ ساعت

بازبینی اصلی و دوره‌ای در جای دیگری انجام می‌شود.

۳. نگهداری و تعمیر مجاز برنامه‌ریزی نشده باید محدود به سطح سازمانی بوده و شامل حذف و جایگزینی قطعات قابل تعویض، تعویض تایر و تعویض موتور در صورت نیاز می‌شود. محدودیت مشخص MDT به صورت زیر است:

- تعویض موتور – ۶ ساعت
- تعویض تایر – ۱ ساعت
- هر آیتم دیگر – ۱ ساعت

دوره زمانی	تعداد پروازهای پیش‌بینی شده در هر روز			
	نقطه A	نقطه B	نقطه C	نقطه D
6:00 A.M. – 11:00 A.M.	۳۳	۶۵	۹۵	۱۰۵
11:00 A.M. – 4:00 P.M.	۱۷	۴۳	۵۰	۵۵
4:00 P.M. – 9:00 P.M.	۳۳	۶۰	۹۰	۱۰۰
9:00 P.M. – 6:00 A.M.	۳	۱۰	۱۵	۱۸
کل	۸۶	۱۷۸	۲۵۰	۲۷۸



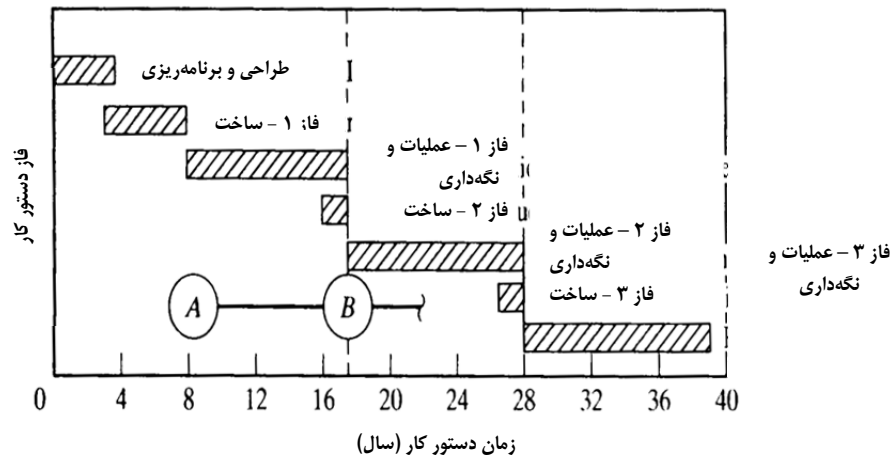
شکل ۳-۱۰- نیازمندی سرویس‌دهی به مسافر

۴. حوزه کلان شهری باید تجهیزات زمینی لازم برای پشتیبانی انواع هواپیما (که کاملاً پر است) را فراهم سازد: A-320، A-321، A-330، B-727، B-737، B-747، B-757، B-767، B-777 و MD-80. علاوه بر این تدارکات لازم برای حمل و انبار بار باید انجام گیرد.

شرکت‌های خطوط هوایی یک نیاز برای فراهم کردن خدمات حمل و نقل هوایی را شناسایی کرده‌اند، اما از نقطه نظر خطوط هوایی، حوزه کلان شهری باید منابع لازم را تدارک ببیند (تسهیلات، تجهیزات پشتیبانی و آزمایش، تجهیزات جابه‌جایی روی زمین، افراد، کارکنان نگهداری و تعمیرات و عملیات و غیره) تا این خدمات را پشتیبانی کند. این موضوع شامل این موارد است: انتخاب مکان برای تسهیلات حمل و نقل هوایی، طراحی و ساخت تسهیلات، فراهم کردن حمل و نقل محلی به/از پایانه هوایی، اکتساب تجهیزات پشتیبانی و آزمایش، قطعات یدکی/تعمیری، داده‌های مورد نیاز برای پشتیبانی عملیات و نگهداری و حفظ همه قابلیت‌هایی که پایداری برنامه عملیاتی ارائه شده را فراهم می‌کند.

به خاطر اندازه‌ی دستور کار و گسترش ویژگی‌های نمایش داده شده در شکل ۳-۱۰، یک دستور کار ساخت سه فاز برنامه‌ریزی شده است. زمان‌بندی مورد نظر در شکل ۳-۱۱ نشان داده است.

گام اول، انتخاب یک مکان برای تسهیلات حمل و نقل هوایی است. فرایند انتخاب زمین در دسترس، جغرافیا، پوشش گیاهی، آثار باد، فاصله از حوزه‌ی شهری، دسترسی از طریق بزرگراه یا حمل و نقل عمومی، نیازمندی‌های اکولوژی و سروصدا و هزینه را در نظر می‌گیرد. هنگامی که یک مکان مشخص شد، تسهیلات باید شامل باند فرود، تجهیزات کنترل پرواز، پایانه، برج مراقبت، ساختمان‌های عملیات، محل نگهداری و تعمیر، محل سوخت، قابلیت حمل و انبار بار، ابزارآلات و دیگر نیازمندی‌های مربوط به نیازها و راحتی مسافر شود.



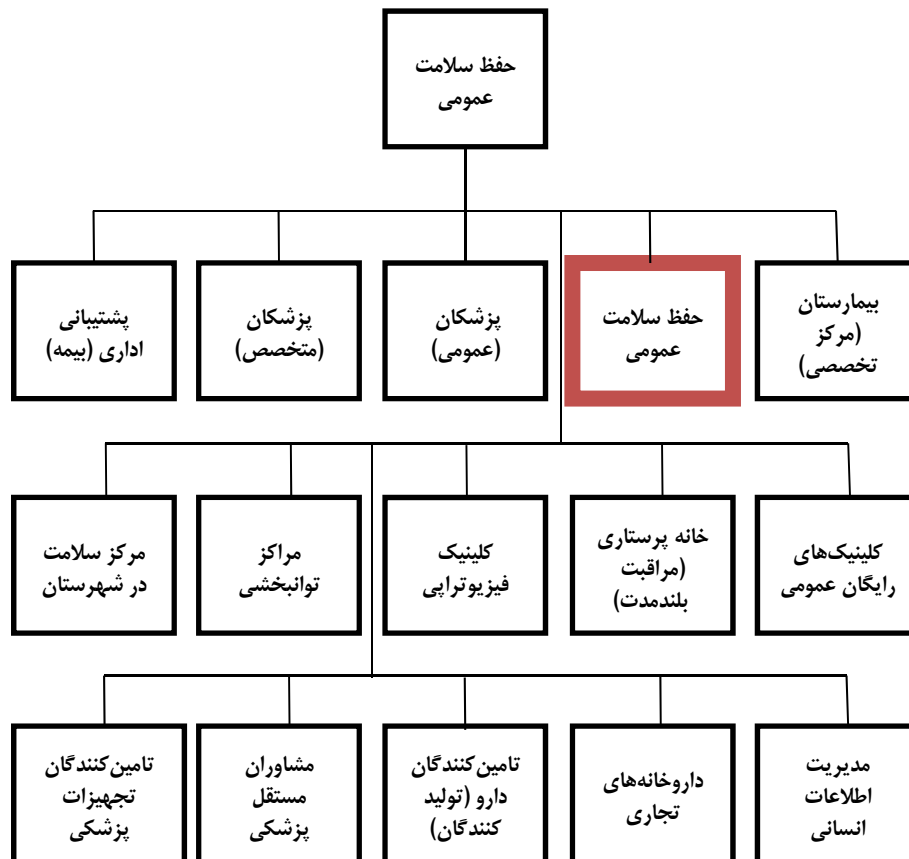
شکل ۳-۱۱- زمان‌بندی دستور کار

ساختار نهایی طراحی تسهیلات حمل و نقل هوایی به‌طور مستقیم بر پایه نیازمندی‌های عملیاتی است - پیش‌بینی‌های ورود و خروج پرواز خطوط هوایی، حجم مسافری، تعداد بازگشت هواپیما، نیازمندی‌های خدماتی و نگهداری و تعمیر. برای مثال، در سال ۱۸ (شکل ۳-۱۰ نقطه B)، میانگین تعداد پروازها ۳۰، زمان حضور در گیت ۶۵ دقیقه در روز بین ساعات ۶ تا ۱۱ صبح پیش‌بینی شده است. تعداد پروازها ۳۰، زمان حضور در گیت ۴۵ دقیقه (برای انجام خدمات سوار کردن مسافر)، تعداد بازگشت‌ها ۳۵ همراه با زمان گیت ۱ ساعت برای هر کدام است. زمان مورد نیاز در گیت (با در نظر گرفتن هیچ تاخیری برای ورود یا خروج هواپیما) ۵۰ ساعت بین دوره زمانی ۶ تا ۱۱ صبح در نظر گرفته شده است. در نتیجه ۱۰ گیت در پایانه مورد نیاز است تا حجم مسافران ورودی را پاسخ دهد. این نیازمندی به‌نوبه‌ی خود اندازه سالن انتظار و تعداد کارکنان خط هوایی را مشخص می‌کند. علاوه بر این، خدمات و حمل و نقل زمینی نیازمند منابع مصرفی (سوخت، روغن، روان‌کننده و غیره)، قطعات یدکی، آزمایش و پشتیبانی تجهیزات (کامیون‌های سوخت، وسایل نقلیه یدک‌کش و غیره)، داده‌های فنی (دستورالعمل‌های عملیاتی و نگهداری و تعمیر) است. امکان

وجود نگهداری و تعمیر زمان‌بندی نشده نیاز به کارکنان کاردان، قطعات یدکی، اطلاعات و نیروی نگهداری و تعمیرات پشتیبان دارد.

یک فرد می‌تواند به شناسایی نیازمندی‌های پشتیبانی از نیاز اصلی حوزه شهری و شرکت‌های تجاری خطوط هوایی بپردازد. به سادگی مشخص می‌شود که فهم نیازمندی‌های عملیاتی و پشتیبانی تدارکات نقشی عمده ایفا می‌کند. خطوط هوایی تجاری، مثالی مناسب است که تنها بخش کوچکی از این مساله مورد بررسی قرار گرفته است. مساله باید با رویکرد کلی سیستم‌ها و با در نظر گرفتن همه اشکال عملیاتی مربوطه مورد بررسی قرار گیرد.

مثال ۵: بیمارستان عمومی. نوع متفاوتی از سیستم انتخاب شده است تا نشان داده شود رویکرد مشابهی را می‌توان در انواع سیستم با ساختار متنوع اعمال کرد. به طور مشخص تر و بر پایه نتایج مطالعات امکان‌سنجی، در این جا هدف، طراحی و ساخت بیمارستانی است که نیازهای عمومی جمعیتی در حدود ۱۵۰۰۰۰ نفر با نرخ رشد جمعیت ۱۰٪ پاسخ دهد. این بیمارستان جدید، که خود یک سیستم فرض می‌شود، بخشی از یک قابلیت بزرگ‌تر یعنی "حفظ سلامت عمومی" است (شکل ۳-۱۲). توجه کنید که در اینجا ما یک ساختار سیستمی/از سیستم‌ها (SOS) را مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۳-۱۲- فراساختار حفظ سلامت عمومی

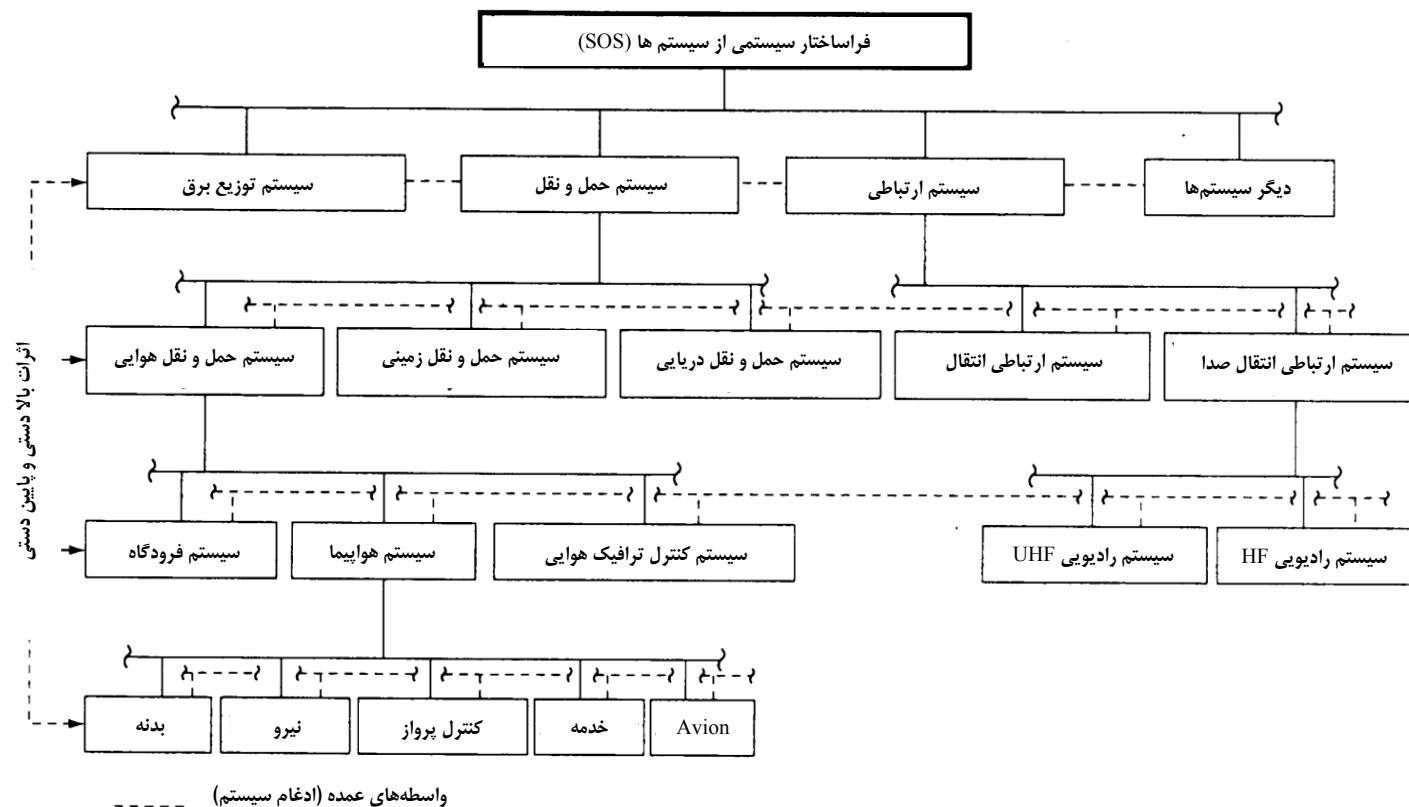
ماموریت پیش‌بینی شده برای بیمارستان جدید فراهم آوردن خدمات متنوع برای نیازمندان است که از ۲ سال بعد از تاریخ کنونی آغاز به کار کرده و برای افق زمانی برنامه‌ریزی شده ۵۰ ساله کار خواهد کرد. بیمارستان باید قابلیت‌های زیر را داشته باشد:

۱. فراهم کردن پشتیبانی ۱۲۰ بیمار که برای جراحی و دلایل مشابه پذیرش می‌شوند. فرض بر آن است که این نوع از بیماران به‌طور متوسط ۳ روز در بیمارستان بستری می‌شوند.

۲. رسیدگی به ۴۰ بیمار در هر روز از طریق دپارتمان جراحی سرپایی (برای جراحی‌های جزئی و دستورالعمل‌های سرپایی). پذیرش نباید بیش از ۳۰ دقیقه به طول انجامد.
۳. رسیدگی به ۱۰۰ بیمار در روز که برای انجام عکس‌برداری و آزمایش برای تشخیص بیماری‌های مراجعه می‌کنند. فرایند پذیرش باید کمتر از ۳۰ دقیقه به طول انجامد.
۴. رسیدگی به ۵۰ بیمار در روز از طریق اورژانس.
۵. انتقال و دریافت پرونده‌های بایگانی در کمتر از ۱۵ دقیقه.
۶. پاسخ به همه‌ی نیازمندی‌ها با A0 کلی ۹۵٪ یا بیشتر.
۷. هزینه‌ی هر بیمار نباید بیش‌تر از X دلار شود.

با داشتن این نیازمندی‌های پایه، یک نفر می‌تواند اقدام به طراحی تجهیزات بیمارستان، چیدمان، مکان پیشنهادی و غیره نماید. علاوه‌بر این، ضروری است که طراحی و ساخت بیمارستان عمومی در زمینه‌ی طراحی کلی "حفظ سلامت عمومی" انجام گیرد که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است و همه واسطه‌ها بین این بخش و دیگر بخش‌های آن مدنظر قرار گیرد. اگرچه این مثال در سطحی مشابه از جزئیات نسبت به مثال‌های قبلی نیست، امید آن است که اهمیت تعریف نیازمندی‌های عملیاتی در مراحل ابتدایی طراحی مفهومی و بدون توجه به نوع سیستم درک شود.

مثال‌هایی دیگر. پنج مثال قبل، که از تحلیل‌های امکان‌سنجی پیشین اقتباس شده است، نماینده‌ی نیازهای عمومی است که در آن نیازمندی‌های عملیاتی سیستم در شروع دستور کار باید تعریف شود و باید به‌عنوان پایه‌ای برای فعالیت‌های بعدی در دستور کار قرار گیرد. این نیازمندی‌ها نه تنها باید در مرزهای مشخص ساختار سیستم استقرار یابند، بلکه باید همه واسطه‌های خارجی ممکن را نیز در نظر بگیرند.



شکل ۳-۱۳- چند سیستمی (سیستمی از سیستم‌ها)

برای نمونه همان‌طور که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است، یک فرد ممکن است با تعدادی از سیستم‌های مختلف که همگی با هم در ارتباط هستند و اثر مستقیمی برهم می‌گذارند، درگیر باشد. همچنین ممکن است برخی قابلیت‌ها در این سیستم‌ها مشترک باشند به‌طور مثال سیستم‌های حمل و نقل زمینی و هوایی دارای برخی اجزا هستند که به‌عنوان بخشی از سیستم ارتباطی کار می‌کنند. بنابراین، در طراحی هر سیستم جدید، باید آثار ممکن را که سیستم‌ها بر یکدیگر می‌گذارند، در ساختار مشابه SOS در نظر گرفت و همچنین آثار دیگر سیستم‌ها را بر سیستم جدید مدنظر قرار داد.

روش‌شناسی استفاده شده، به‌طور اساسی برای هر سیستم یکسان است چه مانند بخشی از پل روی رودخانه، یک هواپرد نصب شده در یک کشتی، یک آیتم نسبتاً کوچک باشد یا به بزرگی یک پروژه باشد مانند بیمارستان عمومی. در هر موردی، سیستم باید در قالب ماموریت، عملکرد، استقرار عملیاتی، چرخه‌ی عمر، بهره‌برداری، فاکتورهای اثربخشی و محیط پیش‌بینی شده بیان شود.

۳-۵- پشتیبانی، نگهداری و تعمیر سیستم

در بررسی نیازمندی‌های سیستم، گرایش عمومی این است که افراد، درگیر عناصری از سیستم می‌شوند که به‌طور مستقیم بر عملکرد ماموریت سیستم ارتباط دارند مانند تجهیزات اصلی، کاربران، نرم‌افزارهای عملیاتی، تجهیزات عملیاتی و داده‌های اطلاعات عملیاتی همراه. در همین زمان، توجه کمی به پشتیبانی، نگهداری و تعمیر سیستم و پایداری آن در سرتاسر چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده می‌شود. به‌طورعموم، تاکید بر بخشی از سیستم و نه کل سیستم به‌صورت یک موجودیت بوده است که در گذشته سبب هزینه‌های زیادی شده است.

برای درک منافع مهندسی سیستم‌ها، ضروری است که همه‌ی عناصر سیستم به‌صورت ادغامی از همان ابتدای کار مدنظر قرار گیرد. این موضوع تنها عناصر اصلی مربوط به مأموریت سیستم را شامل نمی‌شود، بلکه فراساختارهای نگهداری، تعمیر و پشتیبانی نیز مدنظر است. عناصر اصلی سیستم باید طوری طراحی شوند که به‌طور کارا و اثربخش در سرتاسر چرخه‌ی عمر سیستم پشتیبانی شوند و فراساختارهای پشتیبانی، نگهداری و تعمیر باید پاسخ‌گوی این نیاز باشند. این موضوع به‌نوبه‌ی خود بدین معنا است که باید ویژگی‌های طراحی در تجهیزات حمل و نقل، آزمایش و پشتیبانی تجهیزات، تسهیلات نگهداری و تعمیر، فرایند زنجیره‌ی تامین و دیگر عناصر کاربردی پشتیبانی تدارکات مدنظر قرار گیرد.

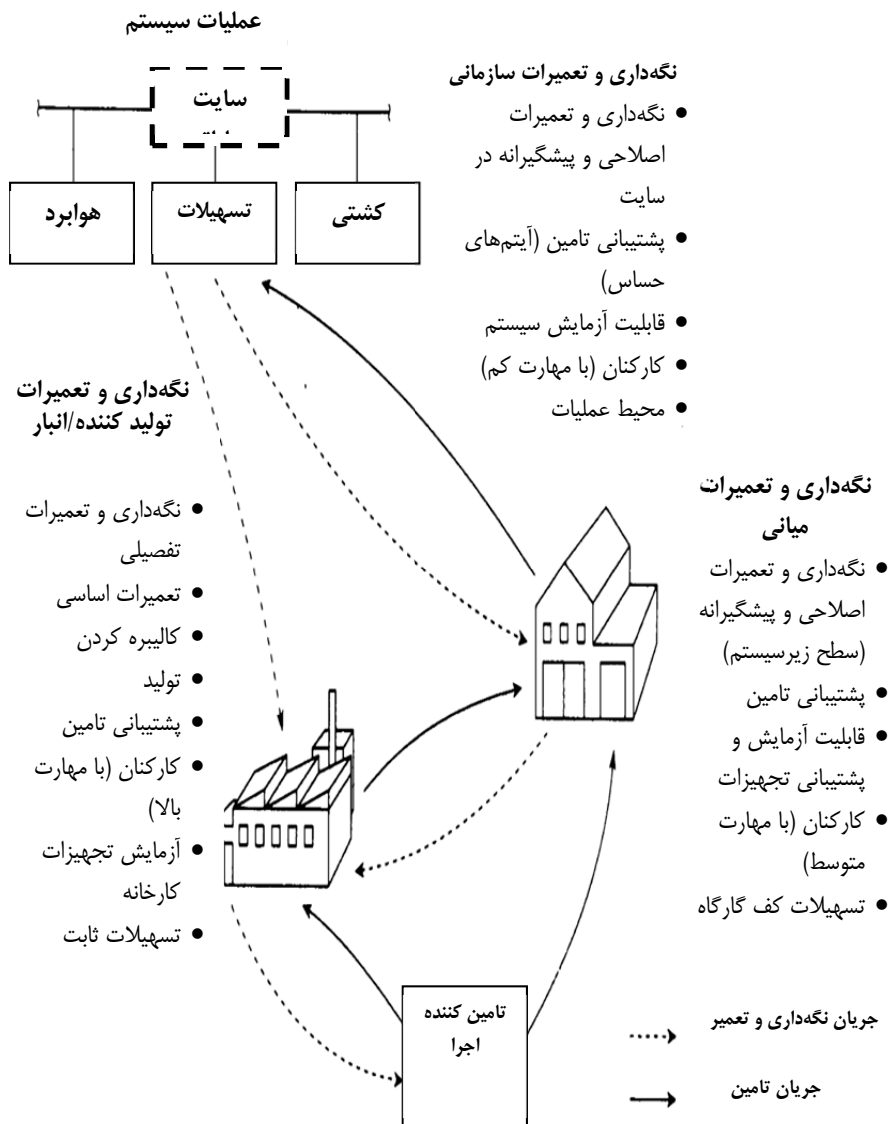
مفهوم پشتیبانی، نگهداری و تعمیر طی فاز طراحی مفهومی از تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم تکامل می‌یابد که در قسمت ۳-۴ تشریح شد. این مفهوم یک سری از مثال‌ها و اظهارات پیش از وقوع را تشکیل می‌دهد که منجر به تعریف قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر، فاکتورهای انسانی و ایمنی، قابلیت تولید و ساخت، قابلیت حفاظت، قابلیت امحا و نیازمندی‌های مربوط به طراحی می‌شود. این موضوع یک ورودی برای فرایند طراحی است و به نیازمندی‌های طراحی مربوط می‌شود، این در حالی است که برنامه‌ی نگهداری و تعمیر (که بعداً توسعه می‌یابد) نیازمندی‌های بعدی پشتیبانی سیستم را بر پایه یک ساختار طراحی معلوم تعریف می‌کند. نتایج تحلیل قابلیت پشتیبانی در فصل ۱۵ ارائه شده است

مفهوم پشتیبانی، نگهداری و تعمیر توسط شبکه و فعالیت‌ها و روابط بین آن‌ها منعکس شده و در شکل ۳-۱۴ به تصویر کشیده شده است. شبکه، هر زمان که نیازمندی برای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و/یا اصلاحی طی چرخه‌ی عمر موردنیاز باشد، وجود خواهد داشت. با بازبینی این نیازمندی‌ها، چنین موضوعاتی باید مورد بررسی قرار گیرد، مانند سطوح نگهداری و تعمیر، وظایف در هر سطح، مسئولیت‌ها برای انجام این وظایف، معیارهای طراحی وابسته به عناصر

متنوع پشتیبانی، فاکتورهای اثربخشی و نیازمندی‌های طراحی برای فراساختار پشتیبانی و نگهداری و تعمیر. اگرچه طراحی عناصر اصلی یک سیستم ممکن است کافی به نظر آید، توانمندی کلی سیستم برای انجام مأموریت موردنظر به اثربخشی فراساختار پشتیبانی نیز بستگی دارد.

اگرچه ممکن است تغییراتی بسته به نوع و طبیعت سیستم به وجود آید، مفهوم پشتیبانی، نگهداری و تعمیرات عموماً شامل آیتم‌های زیر می‌شود:

۱. **سطوح نگهداری و تعمیرات:** نگهداری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه می‌تواند بر روی سیستم و در مکانی که سیستم عملیاتی است توسط مشتری انجام شود، در یک کارگاه واسطه نزدیک به مکان عملیاتی مشتری، یا در انبار یا تسهیلات تولیدی صورت پذیرد. سطح نگهداری و تعمیرات به تقسیم‌بندی وظایف برای هر یک از حوزه‌ها که در آن نگهداری و تعمیرات انجام می‌شود وابسته است. فراوانی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینی شده، پیچیدگی کار، سطح مهارت موردنیاز از کارکنان، نیازهای خاص تسهیلات، نیازمندی‌های زنجیره تامین و غیره وظایف خاصی را که در هر سطح باید انجام شود، دیکته می‌کند. براساس طبیعت و مأموریت سیستم، می‌توان دو، سه یا چهار سطح نگهداری و تعمیرات را متصور شد؛ با این حال برای بحث بیش‌تر، نگهداری و تعمیرات را به چهار کلاس سازمانی، میانی، تولیدکننده/انبار و تامین‌کننده تقسیم‌بندی می‌شود. شکل ۳-۱۵ معیارهای اصلی و تفاوت‌ها بین این سطوح را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۴ - جریان عملیاتی و نگهداری و تعمیرات سیستم

نگهداری و تعمیرات تولیدکننده/انبار/تامین کننده	نگهداری و تعمیرات میانی	نگهداری و تعمیرات سازمانی	معیار
تسهیلات تامین کننده/تولیدکننده/انبار	واحد‌های ثابت	در مکان عملیاتی سیستم یا هرجایی که عناصر اصلی سیستم قرار داده شده است	کجا؟
فعالیت تخصصی تعمیر یا کارخانه تولیدکننده	کارگاه ثابت	کامیون، ون، و موارد مشابه آن	
کارکنان تسهیلات انبار یا کارکنان تولیدی	کارکنان اختصاص داده شده به واحد‌های ثابت، متحرک و نیمه متحرک (با مهارت متوسط در نگهداری و تعمیر)	کارکنان عملیاتی تجهیزات/سیستم (با مهارت کم در نگهداری و تعمیر)	توسط چه کسی؟
تولیدکننده (با مهارت‌های بالا در نگهداری و تعمیر)		استفاده از تجهیزات سازمان	توسط تجهیزات چه کسی؟
تجهیزاتی که متعلق به سازمان هستند			
اصلاحات پیچیده کارخانه تعمیر و اصلاح تجهیزات پیچیده	بازرسی تفصیلی و بازبینی سیستم	بازرسی چشمی	
تعمیرات اساسی و بازسازی	خدمات عمده	بازبینی عملیاتی	
کالیبره کردن تفصیلی	تعمیر و اصلاح تجهیزات بزرگ	خدمات جزئی	نوع کار؟
پشتیبانی تامین	تصحیحات پیچیده	تصحیح خارجی	
بارگذاری بیش از حد توسط سطح میانی	کالیبره کردن محدود	پیاده کردن و جای‌گذاری برخی اجزای	
نگهداری و تعمیرات	بارگذاری بیش از حد توسط سطح سازمانی نگهداری و تعمیر		

شکل ۳-۱۵- سطوح اصلی نگهداری و تعمیرات

۲. **سیاست‌های تعمیر:** در شکل ۳-۱۴ و ۳-۱۵ تعدادی از محدودیت‌های سیاست‌های ممکن نشان داده شده است که مشخص‌کننده‌ی گستره‌ی اجرای تعمیرات یک عنصر یا جزء از یک سیستم است. یک سیاست تعمیری می‌تواند این موضوع را دیکته کند که یک آیتم باید طوری طراحی شود که یک خرابی، *غیرقابل تعمیر، تا حدی قابل تعمیر و کاملاً قابل تعمیر* باشد. برپایه نیازمندی‌های عملیاتی تشریح شده در بخش ۳-۴ (به مثال‌های پنج سیستم مراجعه کنید)، یک سیاست تعمیر اولیه برای سیستمی که در حال توسعه است، باید در نظر گرفته شود. هدف آن فراهم کردن خطوط راهنما در ابتدای طراحی اجزای مختلفی است که سیستم را تشکیل می‌دهد. با مراجعه به مثال سیاست تعمیر که در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که تعداد زیادی از فاکتورهای کمی که از تعریف نیازمندی‌های سیستم اقتباس شده وجود دارد که خطوط راهنمای طراحی را به‌عنوان یک ورودی برای فرایند طراحی کلی مشخص می‌کند؛ برای مثال، سیستم باید طوری طراحی شود که در آن باید MTBM، ۱۷۵ ساعت یا بیش‌تر شود، MDT آن ۲ ساعت یا کم‌تر باشد، MLH/OH آن نباید از ۰/۱ تجاوز کند و غیره. طی فرایند طراحی مفهومی، یک سیاست تعمیر باید توسعه داده شده و انتخاب شود و در ادامه با پیشرفت طراحی که در آن نتایج تحلیل‌های قابلیت پایدار و سطح تعمیر به‌دست می‌آید، این سیاست به روز شود.

۳. **مسئولیت‌های سازمان:** اجرای نگهداری و تعمیرات می‌تواند مسئولیت مشتری، تولیدکننده، شخص ثالث یا ترکیبی از این موارد باشد. علاوه‌بر این، مسئولیت‌ها نه تنها برای هر جزء از سیستم متفاوت است، بلکه با گذشت زمان و در فاز عملیاتی و پشتیبانی پایدار سیستم پیشرفت پیدا می‌کنند. تصمیم‌هایی که به مسئولیت‌های سازمانی وابسته است، می‌توانند طراحی سیستم را از نقطه‌نظر تشخیص خطا و بسته‌بندی تحت‌تاثیر قرار داده و همچنین سیاست‌های تعمیر، تدارک خدمات پس از فروش محصول و موارد مشابه را دیکته

کند. اگرچه شرایط ممکن است تغییر کند، برخی از فرضیات در این نقطه از زمان مورد نیاز است.

۴. **عناصر پشتیبانی نگاه‌داری و تعمیرات:** به عنوان بخشی از مفهوم نگاه‌داری و تعمیر اولیه، معیارهای مربوط به عناصر مختلف پشتیبانی نگاه‌داری و تعمیرات باید مشخص گردند. این عناصر شامل این موارد است: پشتیبانی تامین (قطعات تعمیری و یدکی، موجودی‌های مربوطه و داده‌های تدارکاتی)، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، کارکنان و آموزش، حمل و نقل و جابه‌جایی تجهیزات، تسهیلات، داده‌ها و منابع رایانه‌ای. چنین معیارهایی که به عنوان ورودی طراحی هستند، ممکن است این موارد را پوشش دهد: تدارک خودکار، نیازمندی‌های آزمایش داخلی در مقابل آزمایش خارجی، سطوح مهارت و تعداد کارکنان، فاکتورهای حمل و نقل و جابه‌جایی، محدودیت‌ها و غیره. مفهوم نگاه‌داری و تعمیرات برخی از معیارهای اولیه طراحی سیستم را که وابسته به فعالیت‌های نشان داده شده در شکل ۳-۱۴ است، فراهم می‌کند و تعیین نهایی نیازمندی‌های مشخص پشتیبانی، نگاه‌داری، تعمیرات و تدارکات در فاز تحلیل قابلیت حفاظت تکمیل می‌شود.

۵. **نیازمندی‌های اثربخشی:** این نیازمندی‌ها، فاکتورهای اثربخشی مربوط به قابلیت پشتیبانی را تشکیل می‌دهند. در حوزه پشتیبانی تامین، این موارد وجود دارد: نرخ تقاضای قطعات یدکی، احتمال در دسترس بودن قطعه یدکی هنگامی که درخواست می‌شود، احتمال موفقیت ماموریت هنگامی که تعداد قطعات یدکی موردنظر در انبار موجود باشد و تعداد سفارش اقتصادی که به تدارکات انبار مربوط است. برای تجهیزات آزمایش، مدت زمان در صف قرار گرفتن برای آزمایش، زمان پردازش در ایستگاه آزمایش و قابلیت اطمینان تجهیزات آزمایش، فاکتورهای کلیدی هستند. در حمل و نقل، نرخ حمل و نقل، زمان حمل

و نقل، قابلیت اطمینان حمل و نقل و هزینه‌های حمل و نقل مهم هستند. برای کارکنان و آموزش، موارد مورد توجه عبارت‌اند از تعداد و سطح مهارت کارکنان، نرخ خطای انسانی، نرخ آموزش و تعداد آموزش. در نرم‌افزار، تعداد خطاها در هر بخش از مأموریت، در هر مازول سیستم، یا هر خط از کد می‌تواند شاخص‌های مهم باشند. برای زنجیره‌ی تامین کلی، قابلیت اطمینان خدمات، زمان پردازش آیتم و هزینه‌ی پردازش هر آیتم، شاخص‌هایی مناسب هستند. بی‌معنا است که نیازمندی‌های کمی اندکی را مشخص کنیم. نیازمندی‌های اثربخشی در زنجیره‌ی تامین قابل اجراست و قابلیت‌های پشتیبانی باید نیازمندی‌های سیستم کل را رفع کند.

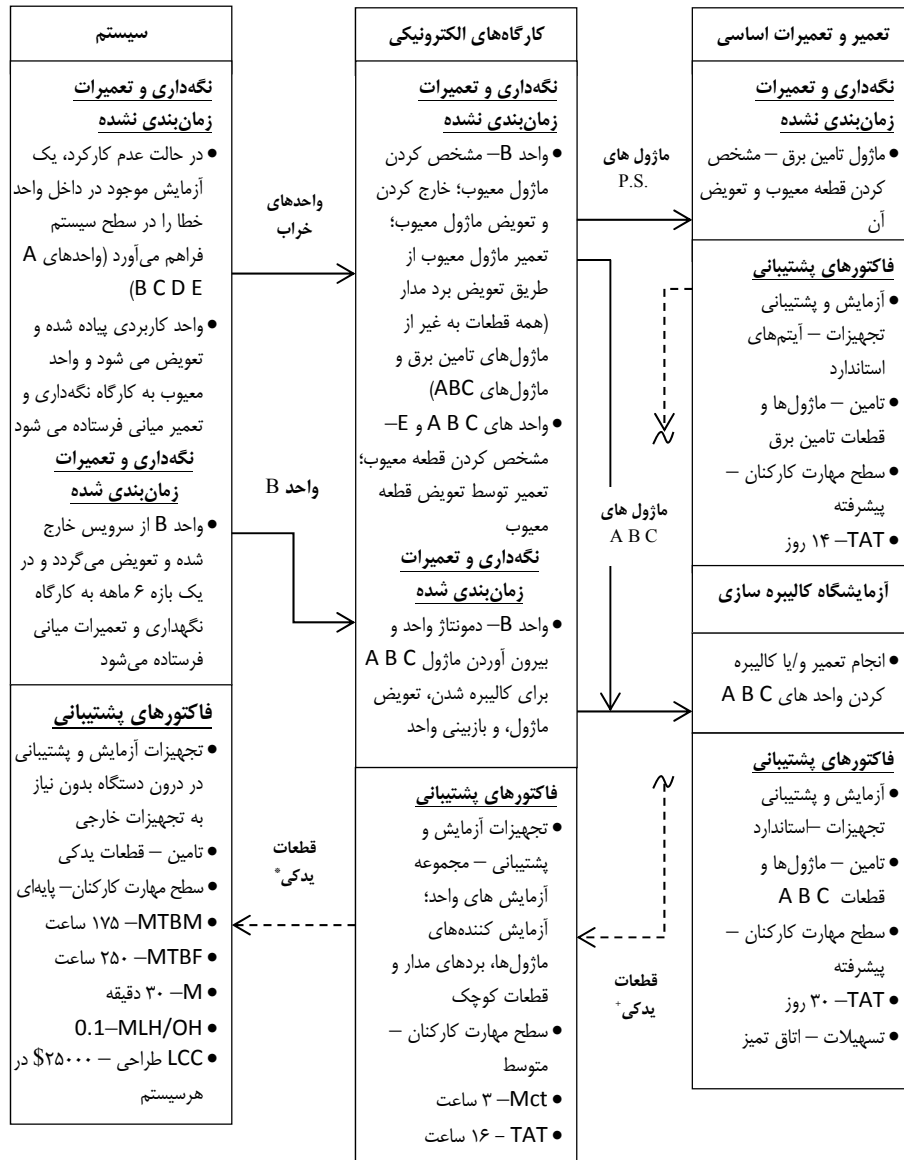
۶. محیط: تعریف نیازمندی‌های محیط که وابسته به فراساختار پشتیبانی، نگهداری و تعمیرات به اندازه‌ی بقیه موضوعات اهمیت دارد. این نیازمندی‌ها شامل آثار فاکتورهای خارجی مانند دما، شوک و لرزش، رطوبت، سروصدا، عملیات در کوه در مقابل دشت هموار، شرایط زمینی در مقابل شرایط دریایی و غیره بر طراحی فراساختار پشتیبانی، نگهداری و تعمیرات است. علاوه بر این، لازم است که آثار برون‌گرد^۱ محیطی از فراساختار پشتیبانی، نگهداری و تعمیر بر دیگر سیستم‌ها و محیط مورد مطالعه قرار گیرد.

مفهوم نگهداری و تعمیرات، شالوده‌ای را فراهم می‌کند که منجر به طراحی و توسعه‌ی فراساختار نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی شده و نیازمندی‌های طراحی برای عناصر متنوع پشتیبانی را تعریف می‌کند (یعنی قابلیت پشتیبانی تامین، تجهیزات حمل و نقل و جابجایی، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی و تسهیلات). این نیازمندی‌ها که برای پشتیبانی چرخه‌ی عمر سیستم اعمال می‌شوند، می‌توانند اثر بازخوردی قابل توجهی بر عناصر اصلی سیستم داشته باشند. بنابراین، تعریف نیازمندی‌های عملیاتی و توسعه مفهوم نگهداری و تعمیرات باید به‌طور هم‌زمان و در

1.Outward

مراحل ابتدایی فاز طراحی مفهومی صورت گیرد. نتایج ترکیب شده پایه و اساس توسعه موضوعات برای بحث در قسمت‌های بعدی این کتاب را فراهم کرده و خصوصا در بخش چهارم که در آن طراحی قابلیت اطمینان، طراحی قابلیت نگهداری و تعمیر، طراحی بهره‌برداری (فاکتورهای انسانی)، طراحی قابلیت حفاظت و غیره را فراهم می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به‌طور خلاصه، هنگامی که مفهوم نگهداری و تعمیر تعریف می‌شود، مهم است که به واسطه‌هایی که ممکن است بین نیازمندی‌های پشتیبانی و فراساختار سیستم جدید که در حال توسعه است و با نیازمندی‌های دیگر سیستم قابل مقایسه است و در ساختار سیستم (شکل ۳-۱۳) قرار می‌گیرد توجه شود. نیازمندی‌های این سیستم جدید باید تعریف شده، آثار آن بر دیگر سیستم‌ها ارزیابی گردد، تضادهای عمده شناسایی شود و در نهایت اصلاحات مورد نیاز انجام گیرد. باید مراقب بود تا سازش یا مصالحه‌ای در مورد نیازمندی‌های این سیستم جدید به هیچ‌وجه صورت نپذیرد. در نهایت، انتخاب فراساختار پشتیبانی، نگهداری و تعمیرات باید بر پایه LCC توجیه شود. آنچه به نظر یک رویکرد با کم‌ترین هزینه در پشتیبانی، نگهداری و تعمیرات در سطح محلی می‌آید، با در نظر گرفتن هزینه‌های همراه در همه فعالیت‌های زنجیره‌ی تامین برای سیستم مورد مطالعه این چنین کم‌هزینه نخواهد بود.



زمان حمل و نقل - ۱ هفته *

زمان حمل و نقل - ۲ هفته +

شکل ۳-۱۶- سیستم نگهداری و تعمیرات و سیاست تعمیر

۳-۶- شاخص‌های عملکرد فنی

همان‌طور که در قسمت ۲-۴ تعریف شد، شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) مقادیر (تخمین زده شده، پیش‌بینی شده یا اندازه‌گیری شده) کمی هستند که عملکرد سیستم را نمایش می‌دهند. TPM‌ها شاخص‌هایی هستند که صفات و/یا خصوصیات ذاتی طراحی را نشان می‌دهند. پارامترهای وابسته به طراحی (DDP) کمی شده و پایه و اساسی برای تعیین TPM‌هاست. طی طراحی مفهومی، این مقادیر توسط روش‌های پارامتری به بهترین نحو تعیین می‌شوند.

۳-۶-۱- شناسایی و ارزیابی TPM

TPM‌ها می‌توانند شامل فاکتورهای کمی مانند قابلیت اطمینان MTBF، قابلیت نگهداری و تعمیر MTBM و MDT، A_0 ، زمان پاسخ‌گویی تدارکات، زمان پردازش اطلاعات، نرخ بهره‌برداری از تسهیلات و یک مقدار مشخص از LCC به‌عنوان نیازمندی طراحی باشند. هدف آن تحت‌تاثیر قرار دادن فرایند طراحی برای در نظر گرفتن صفات/خصوصیات درست در ایجاد یک سیستم است که در نهایت نیازمندی‌های مشتری را به‌طور اثربخش و کارا برآورده می‌کند.

TPM‌ها در ابتدا از توسعه نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهوم نگهداری و تعمیر و پشتیبانی تکامل می‌یابند. با مراجعه به مثال‌های پنج سیستم در قسمت ۳-۴ و شبکه پشتیبانی و سیاست تعمیر نمایش داده شده در قسمت ۳-۵، پارامترهای کمی فراوانی وجود دارد که شاخص‌های عملکردی مربوطه را که در نهایت ساختار طراحی سیستم باید آن‌ها را برآورده کند، وجود دارد. برخی از این مقادیر مشخص شده هنگامی که خصوصیات خاص سیستم باید در طراحی تعیین گردد، متناقض هستند. به‌طور مثال در طراحی یک وسیله‌ی نقلیه، سرعت مهم‌تر است یا اندازه؟ برای یک کارخانه تولیدی، ظرفیت مهم‌تر است یا هزینه چرخه‌ی عمر؟ تعداد زیادی از اهداف متفاوت در طراحی وجود دارد و طراح باید درک کند که کدام یک مهم‌تر از دیگری است و در نهایت موازنه‌ای ایجاد کند که سیستم در برآوردن نیازمندی‌های سطح بالا قابل

قبول باشد. شکل ۳-۱۷ نتایج شناسایی و اولویت‌بندی یک TPM را که در آن یک تیم شامل مشتری، طراح، کارشناس پشتیبانی و نگهداری سیستم، تامین کننده اصلی و کارکنان کلیدی مدیریت حضور دارند، ترسیم کرده است. این تیم باید در موقعیت‌ها و زمان‌های متعدد با یکدیگر جلسه گذاشته و همراه با مشتری که خطوط راهنمای ضروری را فراهم می‌آورد، در مورد مهم‌ترین اهداف طراحی تصمیم‌گیری کنند. فاکتورهای عملکردی سرعت، دسترسی‌پذیری و اندازه در این نمونه حساس‌ترین فاکتورها بوده و تاکید طراحی باید در این مسیر قرار گیرد. ویژگی‌ها و صفات مشخص که باید در طراحی حضور داشته باشند (یعنی استفاده از اجزای استاندارد شده، تدارکات تشخیص خطای کامل و دقیق، استفاده از اجزا با قابلیت اطمینان بالا و استفاده از مواد سبک) باید به این نیازمندی‌ها پاسخ‌گو باشند و دارای نیازمندی‌های قابلیت رهگیری از سطح سیستم به عناصر مختلف آن باشند.

اهمیت نسبی (مطلوبیت مشتری) (%)	الگوی کنونی (سیستم رقیب)	نیازمندی‌های کمی (متریک)	شاخص عملکرد فنی
۱۰	۴۵ روز (سیستم M)	۳۰ روز (حداکثر)	زمان پردازش (روز)
۳۲	۱۱۵ مایل در ساعت (سیستم B)	۱۰۰ مایل در ساعت (حداقل)	سرعت (مایل در ساعت)
۲۱	۹۸/۹٪ (سیستم M)	۹۸/۵٪ (حداقل)	دسترسی‌پذیری (عملیاتی)
۱۷	۹ فوت طول ۸ فوت عرض ۴ فوت ارتفاع	۱۰ فوت طول ۶ فوت عرض ۴ فوت ارتفاع	ابعاد (فوت)

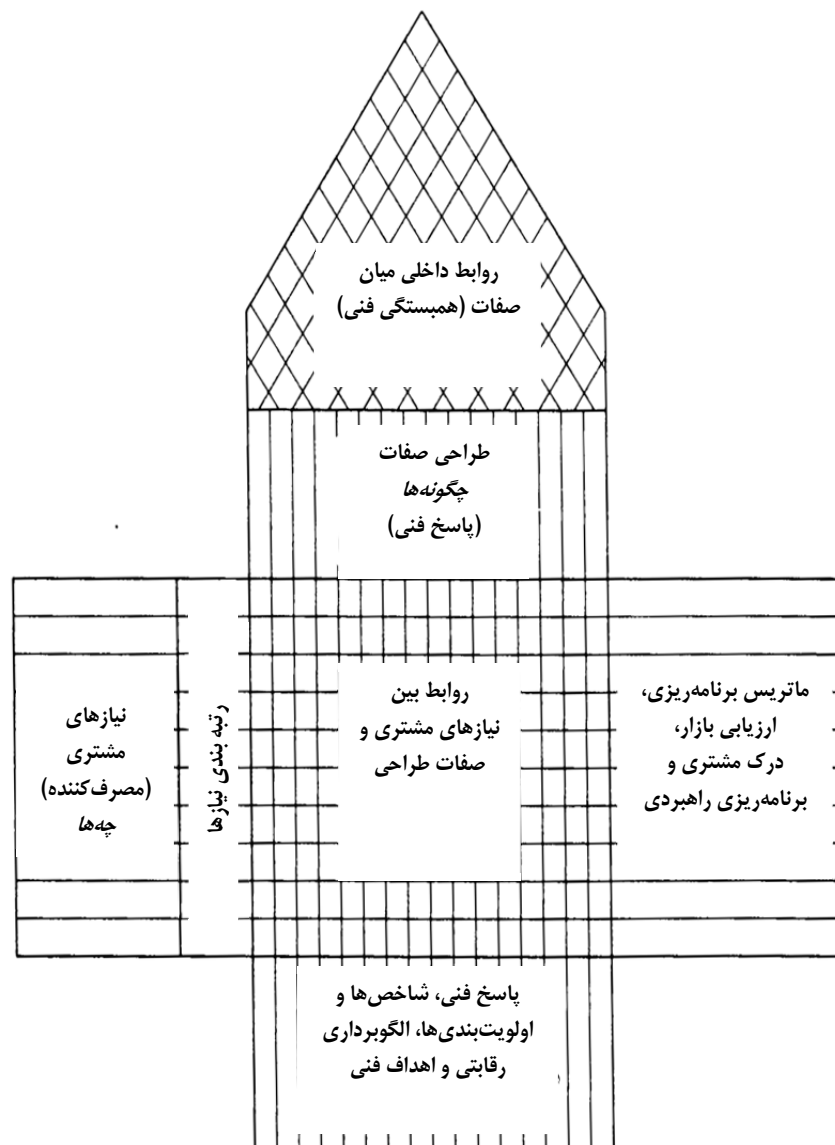
اهمیت نسبی (مطلوبیت مشتری) (%)	الگوی کنونی (سیستم رقیب)	نیازمندی‌های کمی (متریک)	شاخص عملکرد فنی
	(سیستم M)	(حداکثر)	
۵	۲٪ در سال	کمتر از ۱٪ نرخ خطا در	فاکتورهای انسانی
	(سیستم B)	هر سال	
۶	۶۵۰ پوند	۶۰۰ پوند	وزن (پوند)
	(سیستم H)	(حداکثر)	
۹	۲۷۵ مایل	۳۰۰ مایل	قابلیت نگهداری و تعمیر
	(سیستم H)	(حداقل)	(MTBM)
۱۰۰			

شکل ۳-۱۷- اولویت‌بندی شاخص‌های عملکرد فنی (TPM)

۳-۶-۲- گسترش عملکرد کیفیت^۱

یک ابزار مفید که در استقرار و اولویت‌بندی TPM ها می‌تواند اعمال شود، مدل گسترش عملکرد کیفیت (QFD) است. QFD شامل یک رویکرد تیمی است که در حصول اطمینان از بازتاب "صدای مشتری" و ترجمه‌ی این نیازمندی‌ها به راه‌حل‌های فنی یاری‌رسان است. نیازمندی‌های مشتری به صورت صفات، تعریف و دسته‌بندی می‌شوند که در ادامه براساس درجه‌ی اهمیت، وزن‌دار خواهند شد. روش QFD برای تیم طراحی، درکی از مطلوبیت مشتری ایجاد کرده و مشتری را وادار می‌کند که مطلوبیت‌های خود را اولویت‌بندی کند و مقایسه‌ی یک رویکرد طراحی با دیگری را ممکن می‌سازد. در نتیجه، هر صفت مشتری توسط یک راه‌حل فنی ارضا می‌شود.

1. Quality Function Deployment



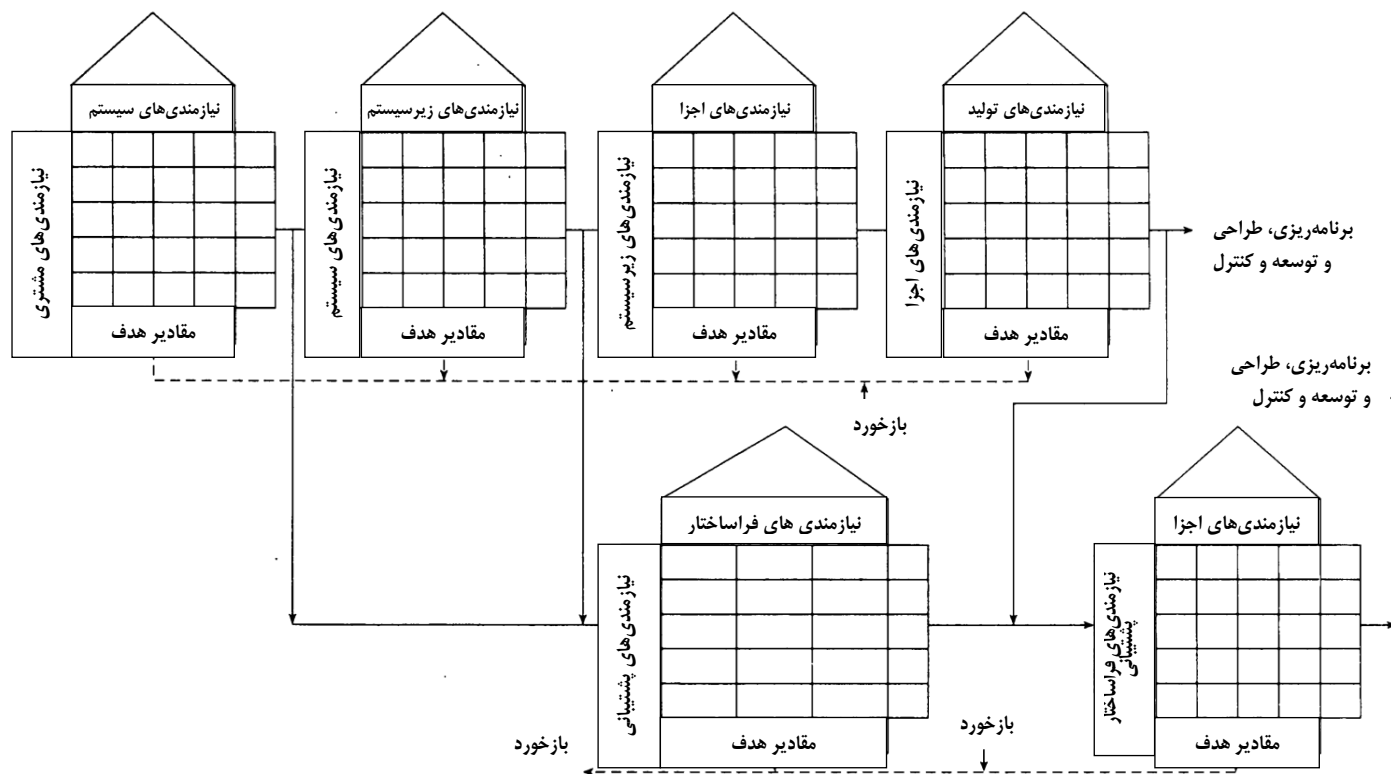
شکل ۳-۱۸-۱۸ HOQ اصلاح شده

فرایند QFD شامل ساخت یک یا چند شاخص است که خانه کیفیت^۱ (HOQ) نامیده می‌شود. یک ویرایش اصلاح شده از HOQ در شکل ۳-۱۸ نمایش داده شده است. نقطه شروع از سمت چپ ساختار با شناسایی نیازمندی‌های مشتری و رتبه‌بندی نیازها آغاز می‌شود که از طریق سطوح اهمیت به‌طور کمی نشان داده می‌شود. سمت چپ شکل، چه‌هایی را که باید مورد بررسی قرار گیرد، منعکس می‌کند. قسمت بالایی HOQ پاسخ فنی نسبی طراح به صفاتی را که در طراحی مشارکت داشته و به نیازها پاسخ می‌دهد، شناسایی می‌کند (صدای مشتری).

این قسمت چگونه‌ها را تشکیل می‌دهد و برای هر نیاز شناسایی شده‌ی مشتری باید حداقل یک راه‌حل فنی وجود داشته باشد. روابط داخلی میان صفات (یا همبستگی فنی) و همچنین حوزه‌های احتمالی دارای تناقض شناسایی شده‌اند. بخش مرکزی HOQ توانایی یا اثر پاسخ فنی بر نیازمندی شناسایی شده را ترسیم می‌کند. بخش پایینی یک مقایسه بین گزینه‌ها را فراهم کرده و سمت راست HOQ برای اهداف برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش QFD برای تسهیل ترجمه مجموعه اولویت‌بندی شده نیازمندی‌های ذهنی مشتری به مجموعه‌ای از نیازمندی‌ها در سطح سیستم، طی طراحی مفهومی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رویکرد مشابهی را می‌توان استفاده کرد که در ادامه نیازمندی‌ها در سطح سیستم را به مجموعه‌ای از نیازمندی‌های تفصیلی در هر سطح از فرایند طراحی و توسعه ترجمه می‌کند. در شکل ۳-۱۹ چگونه‌ها از یک خانه به چه‌ها در خانه بعدی تبدیل شده‌اند. نیازمندی‌ها ممکن است برای سیستم، زیرسیستم، اجزاء، فرایند تولید، فراساختار پشتیبانی و غیره توسعه یابند. هدف، تضمین توجیه و رهگیری نیازمندی‌ها از بالا به پایین است. علاوه بر این، نیازمندی‌ها باید در قالب عبارات وظیفه‌ای بیان شوند.

1. House of Quality



شکل ۳-۱۹- قابلیت رهگیری نیازمندی‌ها در "خانواده خانه‌ها"

اگرچه QFD تنها رویکرد مورد استفاده در تعریف نیازمندی‌های طراحی سیستم نیست، اما ابزاری عالی برای ایجاد دید لازم در شروع کار است. یکی از ریسک‌های بزرگ و مهم فقدان مجموعه‌ای مناسب از نیازمندی‌ها و عدم کفایت مشخصات فنی سیستم است. طبیعت مشخصات فنی سیستم باید شناسایی و اولویت‌بندی TPM‌ها باشد. TPM، شاخص‌های همراه، اهمیت نسبی آن‌ها و هدف الگو در قالب آن‌چه اکنون در دسترس است و خطوط راهنمای لازم برای طراح را فراهم می‌کند تا بر ریسک‌ها فایز آید. این موضوع برای ایجاد سطوح مناسب طراحی، تعریف معیارهایی که ورودی سیستم را تشکیل می‌دهند و شناسایی سطوح ریسک در عدم برآورده کردن نیازمندی‌ها بنا نهاده شده است. باز هم تاکید می‌شود که باید مراقب بود تا اطمینان حاصل شود این نیازمندی‌های سطح سیستم تحت‌تاثیر فاکتورهای خارجی و دیگر سیستم‌ها در ساختار SOS نباشند.

۷-۳- تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای

یک فعالیت ضروری در مراحل اولیه طراحی مفهومی و اولیه‌ی توسعه، شرح وظایف سیستم به‌عنوان پایه و اساسی برای شناسایی منابع ضروری سیستم در احقاق ماموریتش است. یک وظیفه به‌عمل مشخصی گفته می‌شود که برای رسید به هدف ضروری است: عملیاتی از سیستم که باید انجام شود یا یک کار نگهداری و تعمیر که برای بازگردان یک سیستم به حالت عملیاتی انجام می‌شود. چنین اعمالی می‌تواند در نهایت با استفاده از تجهیزات، نرم‌افزارها، افراد، تسهیلات، اطلاعات یا ترکیبی از آن‌ها انجام شود. با این حال، در این نقطه از چرخه‌ی عمر، هدف مشخص کردن چه‌هاست، نه چگونه‌ها: چه چیزی باید انجام شود، در مقابل چگونه باید انجام شود.

تحلیل وظیفه‌ای یک فرایند تکراری از ترجمه نیازمندی‌های سیستم به معیارهای تفصیلی طراحی و پس از آن شناسایی منابع موردنیاز برای عملیات و پشتیبانی سیستم است. این موضوع شامل نیازمندی‌ها در سطح سیستم تا زیرسیستم شده و تا سطوح پایین‌تر در ساختار سلسله مراتب

که لازم است، ادامه می‌یابد تا معیارها و محدودیت‌های طراحی برای عناصر مختلف سیستم شناسایی شود. هدف، توسعه معماری سطح بالای سیستم است که با "نیازمندی‌ها" و "ساختار" سروکار دارد.

با مراجعه به فرایند تکرارشونده شکل ۲-۴، تحلیل وظیفه‌ای به‌عنوان بخشی از تعریف مساله و تحلیل نیازها در فرایند طراحی مفهومی محسوب می‌شود (به قسمت ۳-۱ مراجعه کنید). در ادامه، "وظایف عملیاتی" و "نگهداری و تعمیرات" که منجر به توسعه نیازمندی‌های سیستم در سطح بالا (قسمت‌های ۳-۴ و ۳-۵) می‌شوند، شناسایی می‌گردند. هدف "تحلیل وظیفه‌ای" ارائه‌ی یک شرح ترکیب شده و ادغامی از معماری وظیفه‌ای سیستم است تا خطوط مبنای وظیفه‌ای برای فعالیت‌های بعدی طراحی و پشتیبانی ساخته شود و بنیانی فراهم آورد که همه نیازمندی‌های فیزیکی در آن تعریف و توجیه شده باشد: معماری فیزیکی. تحلیل وظیفه‌ای در سطح زیرسیستم و پایین‌تر در قسمت ۴-۳ ارائه شده است و مکانیک‌های مشخص برای توسعه نمودار بلوکی جریان وظیفه^۱ (FFBD) در پیوست الف مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۷-۱- نمودار بلوکی جریان وظیفه‌ای

اجرای تحلیل وظیفه‌ای توسط نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای (FFBD) تسهیل می‌شود. ساخت چنین نمودارهایی می‌تواند از طریق استفاده از هر یک روش‌های گرافیکی صورت پذیرد که عبارت‌اند از روش مدل‌سازی تعریف ادغامی^۲ (IDEF)، روش نمودار رفتاری^۳، روش نقشه‌کشی N-Squared و غیره. اگرچه نمایش‌های گرافیکی متفاوت هستند، هدف نهایی آن‌ها مشابه است.

1. Functional Flow Block Diagrams

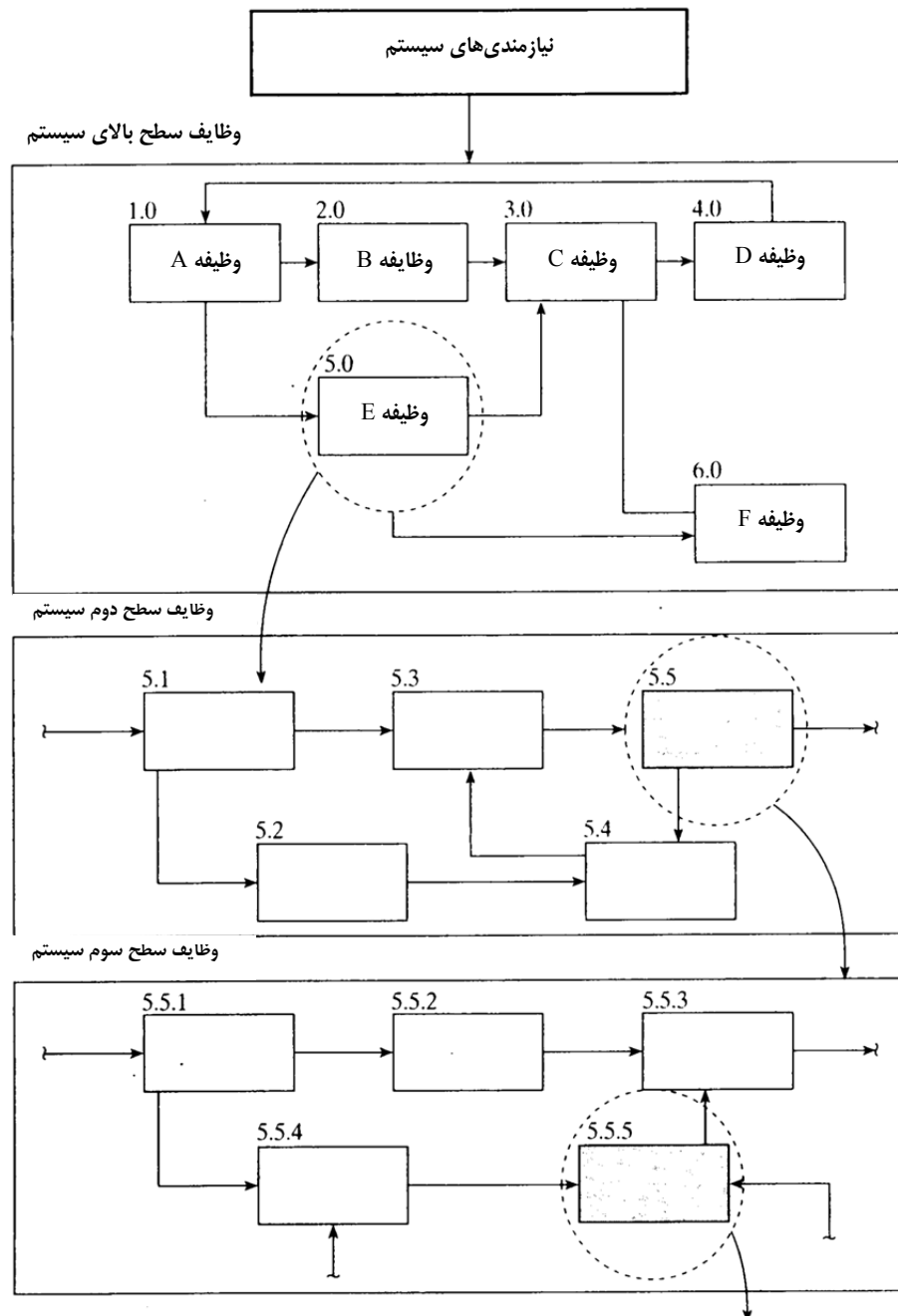
2. Integrated DEFinition

3. Behavioral Diagram

رویکرد در نظر گرفته شده در این جا در شکل‌ها ۳-۲۰ تا ۳-۲۲ ترسیم شده و در پیوست الف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۳-۲۰، یک نمودار جریان ساده شده نشان داده شده است. وظایف سطح بالا به وظایف سطح دوم و وظایف سطح دوم به وظایف سطح سوم شکسته شده و تا جایی که برای تشریح سیستم و عناصر متنوع آن در قالب عبارات وظیفه لازم است ادامه می‌یابد تا روابط واسطه‌ای وظیفه‌ای کاربردی را نشان داده و منابع موردنیاز برای استقرار این وظایف شناسایی شود. تعداد بلوک‌ها برای نشان دادن روابط توالی و موازی استفاده شده است و هدف اولیه آن رهگیری از بالا به پایین نیازمندی‌ها و سپس رهگیری و توجیه نیازمندی‌های فیزیکی لازم برای انجام این وظایف است.

شکل ۳-۲۱ توسعه‌ای از FFBD را نشان می‌دهد که بخشی از فعالیت‌های سطح بالا، شکست وظیفه ۴.۰ به جریان عملیاتی، و شکست وظیفه ۴.۲ به جریان نگهداری و تعمیر را در حالتی که این وظایف آن‌طور که موردنیاز است انجام نمی‌شود، شناسایی می‌کند. توجه کنید که کلمات در هر بلوک عملگرایانه است. هر بلوک نشان‌دهنده‌ی برخی از وظایف پشتیبانی، نگهداری، تعمیرات و عملیات است که برای انجام مأموریت محول شده به سیستم باید صورت پذیرند و در آن شاخص‌های عملکردی (متریک‌ها) همراه با هر بلوک که از بالا تخصیص داده شده است، وجود دارد. علاوه بر این، هر بلوک را می‌توان توسعه داد و سپس در قالب ورودی، خروجی، محدودیت‌ها، کنترل‌ها و مکانیسم‌های فعال‌ساز ارزیابی کرد. اساساً مکانیسم‌ها منجر به شناسایی منابع فیزیکی ضروری برای انجام وظایف می‌شود که از چه‌ها به چگونه‌ها تکامل می‌یابد. شناسایی منابع مناسب در قالب نیازهای تجهیزات، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، اطلاعات، داده‌ها، و غیره به یک رویکرد مناسب می‌انجامد که وظایف را به بهترین نحو انجام دهد.

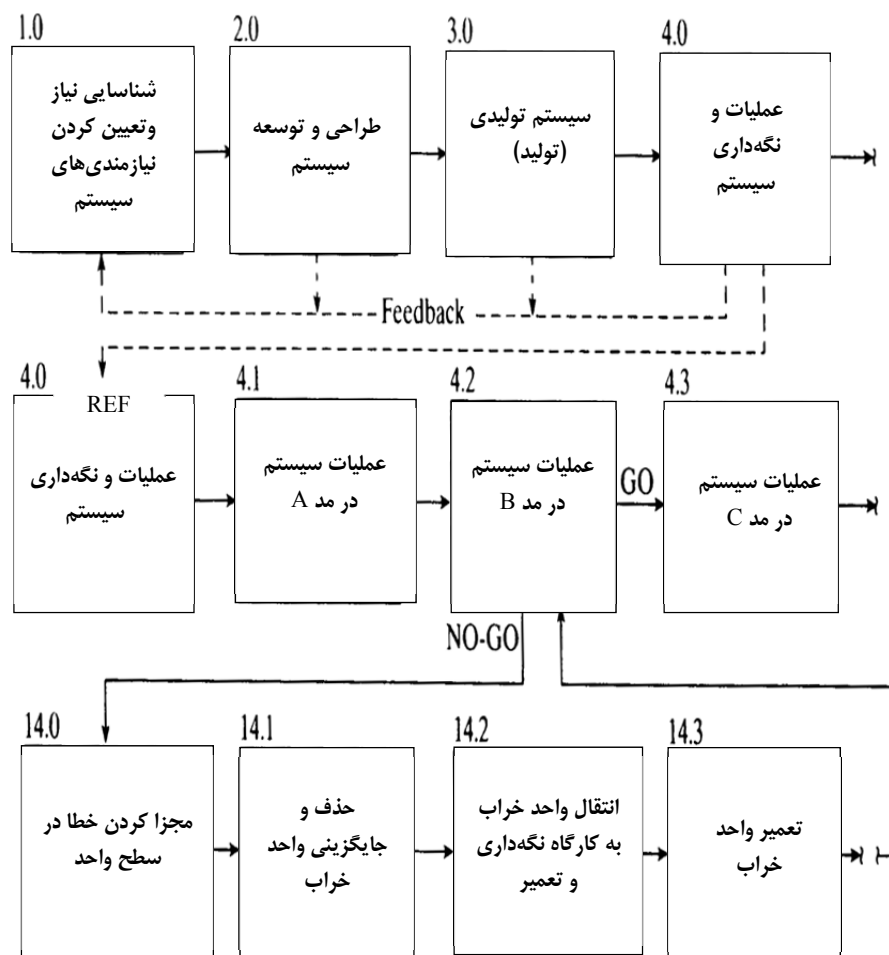


شکل ۳-۲- شکست وظایف سیستم

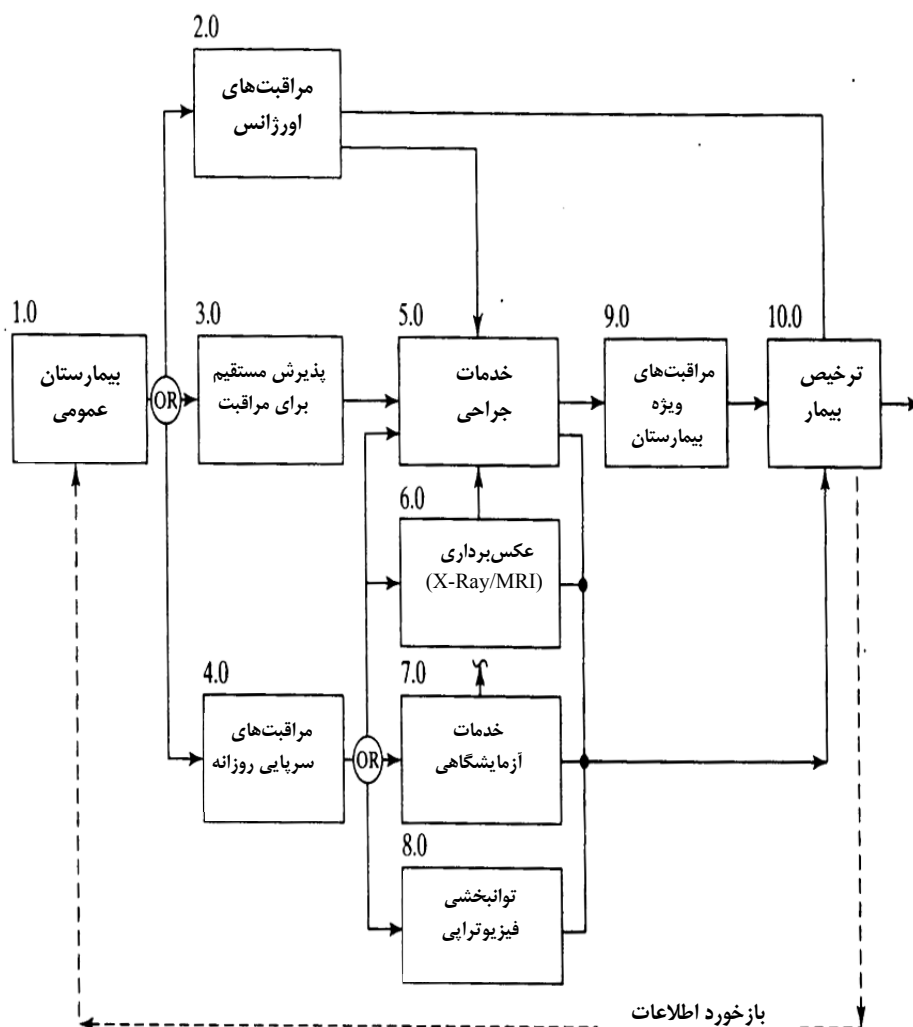
شکل ۳-۲۲ وظایف شناسایی شده در فراساختار سلامت عمومی را که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است، مفصل‌تر نشان می‌دهد. در این جا هدف نشان دادن قابلیت رهگیری از نیازمندی‌های سیستم در بخش ۳-۴ توسط انتخاب بلوک وظیفه‌ای خاص از یکی از مثال‌های نشان داده شده یعنی بیمارستان عمومی در مثال ۵ است.

تحلیل وظیفه‌ای از یک سری گام‌های متوالی که در شکل ۳-۲۳ نشان داده است، تشکیل می‌شود. در ابتدا، نیاز به ساخت یک یا چند وظیفه وجود دارد (قسمت‌های ۳-۱ و ۳-۳). از طریق تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم (قسمت ۳-۴) و مفهوم نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی (قسمت ۳-۵)، وظایف موردنیاز بیش‌تر ترسیم می‌شود: معماری وظیفه‌ای. FFBDها برای هدف اصلی یعنی ساخت این نیازمندی‌ها توسط واسطه‌های سازمانی و وظیفه‌ای توسعه داده می‌شوند.

هنگامی که از طریق تحلیل وظیفه‌ای به جلو پیش می‌رویم و هنگامی که یک سیستم جدید در ساختار SOS توسعه می‌یابد، وظایفی ممکن است شناسایی شود که به‌عنوان وظایف "مشترک" شناخته شده و در سیستم‌های مختلف به اشتراک گذاشته شود. برای مثال وظیفه ارسال یا دریافت برای دو سیستم متفاوت ارتباطی مشترک است. وظیفه‌ی "تامین برق" نیاز برق برای بیش از یک سیستم را فراهم می‌کند؛ "مرکز تصویربرداری" خدمات تشخیص پزشکی لازم برای بیش از بیمارستان یا ساختمان پزشکان را فراهم می‌کند (شکل ۳-۱۲) و غیره. شکل ۳-۲۴ کاربرد "وظایف مشابه" به‌عنوان بخشی از شکست وظیفه‌ای برای سه سیستم مختلف را نشان می‌دهد یعنی سیستم‌های A، B، و C.



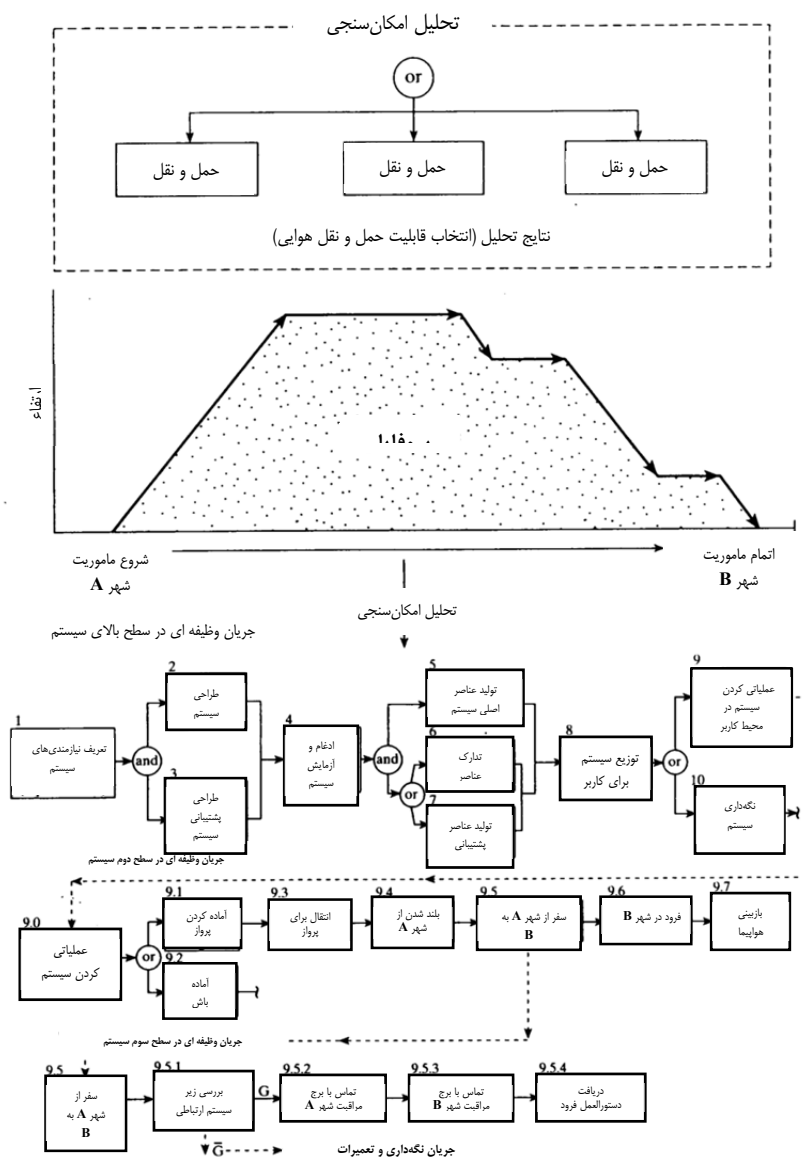
شکل ۳-۲۱- توسعه نمودار بلوکی وظیفه‌ای



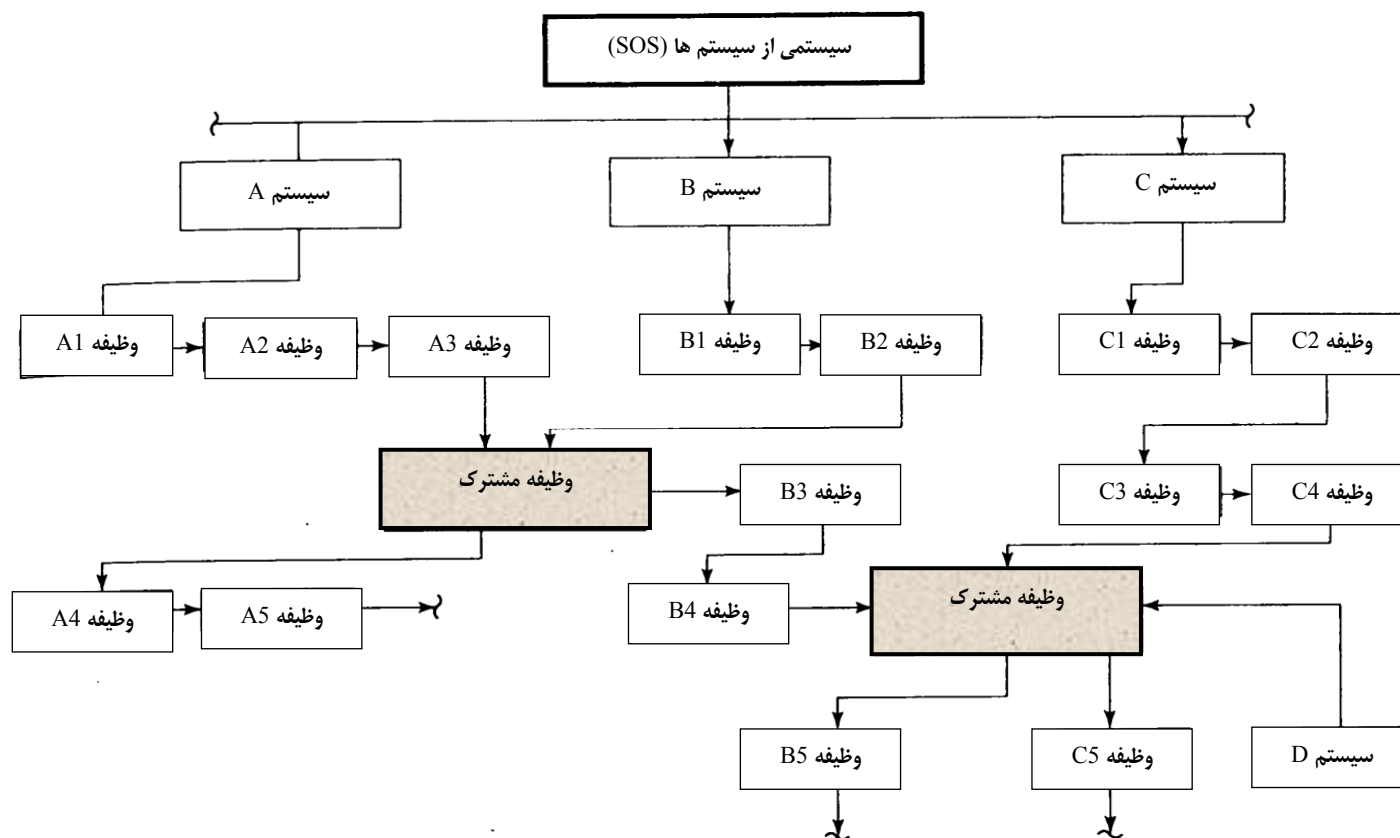
شکل ۳-۲۲- دیاگرام جریان وظیفه‌ای حفظ سلامت (توسعه شکل ۳-۱۲)

نیاز

توسعه قابلیت حمل و نقل بین شهر A و B



شکل ۳-۲۳- پیشروی از نیاز به تحلیل وظیفه‌ای



شکل ۳-۲۴- واسطه‌های وظیفه‌ای در ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS)

تحلیل وظیفه‌ای رسمی طی مراحل پایانی طراحی مفهوم انجام شده و هدف آن اتمام فرایند طراحی و توسعه سیستم به روشی کامل و منطقی است. به‌طور مشخص‌تر، رویکرد وظیفه‌ای در تضمین موارد زیر کمک می‌کند:

۱. همه اشکال طراحی و توسعه، تولید، عملیات، پشتیبانی و از دور خارج کردن سیستم در نظر گرفته شود (همه فعالیت‌های چرخه‌ی عمر سیستم).
 ۲. همه عناصر سیستم کاملاً شناخته شده و تعریف شود (تجهیزات اصلی، قطعات یدکی/تعمیری، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، تسهیلات، کارکنان، داده‌ها و نرم‌افزار).
 ۳. روش‌هایی برای مفاهیم جمع‌بندی سیستم و نیازمندی‌های پشتیبانی برای وظایف خاص سیستم (ارضای نیازمندی‌های طراحی وظیفه‌ای).
 ۴. توالی مناسب فعالیت‌ها و روابط طرح همراه با واسطه‌های حساس سیستم.
- در نهایت، باید تاکید شود که تحلیل وظیفه‌ای خطوط مبنا را برای نیازمندی‌های قابلیت اطمینان (فصل ۱۲ و مدل قابلیت اطمینان در شکل ۱۲-۱۲)، نیازمندی‌های قابلیت نگهداری و تعمیر (فصل ۱۳)، نیازمندی‌های فاکتورهای انسانی (فصل ۱۴) و نیازمندی‌های قابلیت حفاظت (فصل ۱۵) فراهم آورد. با مراجعه به شکل ۲-۴، خطوط مبنای وظیفه‌ای منجر به خطوط مبنای اختصاص داده شده و در نهایت به خطوط مبنای محصول منجر می‌شود.

۳-۷-۲- تخصیص وظیفه‌ای

با داشتن تشریح سطح بالا از سیستم از طریق تحلیل وظیفه‌ای، گام بعدی شکستن سیستم به عناصر (اجزا) از طریق تقسیم‌بندی^۱ است. چالش پیش‌رو شناسایی و دسته‌بندی وظایف نزدیک و مرتبط در دسته‌هایی است که منابع مشترک (به‌طور مثال یک تجهیز یا نرم‌افزار) را به‌کار گرفته و تا جای ممکن چند وظیفه را انجام می‌دهند. اگرچه ممکن است شناسایی نیازمندی‌ها و منابع

1.Partitioning

همراه به‌سادگی و به‌صورت مستقل شناسایی شود، این فرایند هنگامی که به جمع‌بندی اجزاء، وزن، اندازه و غیره سیستم می‌رسیم، ممکن است پرهزینه‌تر باشد. سوالات از این قبیل خواهند بود: چه نرم‌افزار یا سخت‌افزاری باید انتخاب شود که چند وظیفه را به‌صورت قابل اطمینان، اثربخش و کارا انجام دهد؟ چگونه می‌توان نیازمندی‌های جدید را بدون اضافه کردن عناصر فیزیکی به ساختار سیستم افزود؟

تقسیم‌بندی سیستم به عناصر، طبیعتی تکاملی دارد. وظایف مشابه می‌توانند برای فراهم کردن طرح جمع‌بندی سیستم، دسته‌بندی یا ترکیب شده و اهداف زیر را دنبال کنند:

۱. عناصر سیستم می‌توانند توسط مکان جغرافیایی، محیط مشترک، یا تشابه نوع آیتم‌ها (به‌طور مثال تجهیزات، نرم‌افزار، بسته‌های اطلاعات و غیره) که وظیفه مشابهی دارند، دسته‌بندی شوند.

۲. هر کدام از دسته‌های سیستم باید تا جای ممکن مستقل بوده و آثار تعاملی حداقلی با دیگر دسته‌ها داشته باشند. هدف طراحی، فعال کردن قابلیت حذف و جایگزینی دسته بدون حذف یا جایگزینی دسته دیگر در فرایند، یا بدون نیاز اضافی به تنظیم و تصحیح است.

۳. در شکست سیستم به زیرسیستم‌ها، ساختاری انتخاب می‌شود که در آن ارتباطات بین زیرسیستم‌های مختلف به حداقل برسد. به عبارت دیگر، در حالی که زیرسیستم‌ها ممکن است پیچیدگی درونی بالایی داشته باشند، پیچیدگی بیرونی باید اندک باشد. در شکست سیستم به دسته‌های مختلف باید از ایجاد نیاز به نرخ بالایی از انتقال اطلاعات بین این دسته ممانعت به عمل آید.

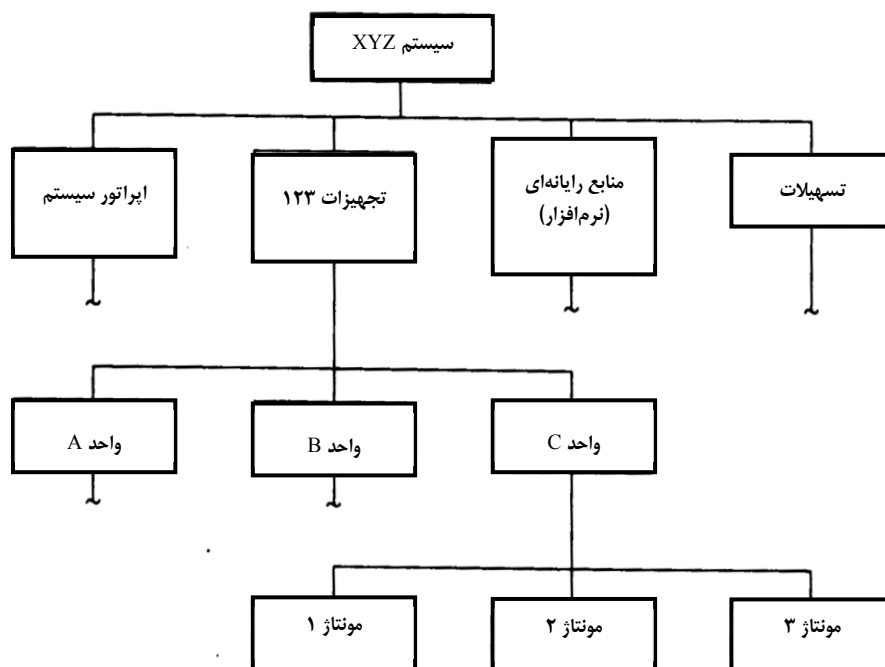
۴. هدف، تعقیب یک رویکرد معماری باز در طراحی سیستم است. این موضوع شامل استفاده از ماژول‌های استاندارد و رایج همراه با واسطه‌های شناخته شده و استاندارد است

و طوری دسته‌بندی می‌شود که به سیستم اجازه می‌دهد بدون تخریب کلیت عملکردی سیستم آن را اصلاح کرده و ارتقا بخشد.

هدف کلی طراحی، شکست سیستم به عناصر است به طوری که تنها چند رخداد بحرانی که بر کارکرد داخلی هر دسته (که معماری سیستم را تشکیل داده‌اند) تاثیر گذاشته یا آن را تغییر دهد.

از طریق فرایند تقسیم‌بندی و دسته‌بندی وظیفه‌ای، مطالعات موازنه در ارزیابی رویکردهای مختلف سیستم (که می‌تواند پیرو پاسخ به نیازمندی‌های سیستم باشد) انجام می‌گیرد. اجرای یک وظیفه تخصیص داده شده توسط یک تجهیز، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، داده‌ها و ترکیب آن‌ها می‌تواند مناسب باشد. بنابراین ترکیب مناسب ایجاد می‌شود و نتایج، ساختار سیستم را تشکیل می‌دهند که مشابه شکل ۳-۲۵ است. در این ساختار، گام بعدی تعیین نیازمندی‌های طراحی برای عناصر سیستم است؛ یعنی کاربران سیستم، تجهیزات ۱۲۳، واحد B، منابع رایانه‌ای و تسهیلات.

با مراجعه به قسمت ۳-۶ (و شکل ۳-۱۷)، نیازمندی‌های کمی طراحی در سطح سیستم مشخص می‌شود. این TPM‌ها که از تعریف نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم پشتیبانی و نگهداری و تعمیرات (قسمت ۳-۴ و ۳-۵) تکامل می‌یابند، باید به زیرسیستم‌ها یا عناصر مناسب که سیستم را تشکیل می‌دهند، تخصیص داده شده یا تقسیم شود.



شکل ۳-۲۵- شکست وظیفه‌ای سیستم به اجزا

برای مثال، با داشتن نیازمندی ۰/۹۸۵ برای دسترسی‌پذیری عملیاتی سیستم A_0 ، (شکل ۳-۱۷)، چه نیازمندی‌هایی باید برای تجهیزات، نرم‌افزار، تسهیلات و کاربران باید مشخص شود تا وقتی ترکیب می‌شوند، نیازمندی دسترسی‌پذیری سیستم را برآورده کنند؟ به عبارت دیگر، برای تضمین برآورد نیازمندی مشتری در ساختار نهایی طراحی سیستم، تخصیص بالا به پایین معیارهای طراحی از ابتدا باید وجود داشته باشد، یعنی طی مراحل انتهایی طراحی مفهومی. فرایند تخصیص در این نقطه شروع شده و در زیرسیستم‌های مناسب و سطوح پایین‌تر از آن در صورت نیاز ادامه می‌یابد. قسمت ۲-۳-۴ یک مورد مطالعاتی از نیازمندی‌های قابلیت اطمینان در فصل ۱۲، نیازمندی‌های نگهداری و تعمیر در فصل ۱۳ و غیره را نمایش می‌دهد.

۳-۷-۳- معماری سیستم

با تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم نگهداری، تعمیر و پشتیبانی و شناسایی و اولویت‌بندی TPMها، معماری پایه‌ای سیستم ایجاد می‌شود. این معماری با یک ساختار سطح بالای سیستم، واسطه‌های عملیاتی، پروفایل‌های بهره‌برداری پیش‌بینی شده (سناریوهای ماموریتی) و محیطی که در آن عملیات انجام می‌شود، سروکار دارد.

معماری، چگونگی تعامل نیازمندی‌های مختلف در سیستم را تشریح می‌کند. این موضوع به نوبه‌ی خود منجر به تشریح معماری وظیفه‌ای که از تحلیل وظیفه‌ای تکامل یافته می‌شود و سیستم در قالب عبارات وظیفه‌ای تشریح می‌شود. از این تحلیل و از طریق فرایند تخصیص نیازمندی‌ها و تعریف نیازمندی‌های منابع مختلف که برای انجام ماموریت سیستم ضروری هستند، معماری فیزیکی تعریف می‌شود. با استفاده از این فرایند، چه‌ها به چگونه‌ها تکامل می‌یابند.

۳-۸- تحلیل موازنه سیستم

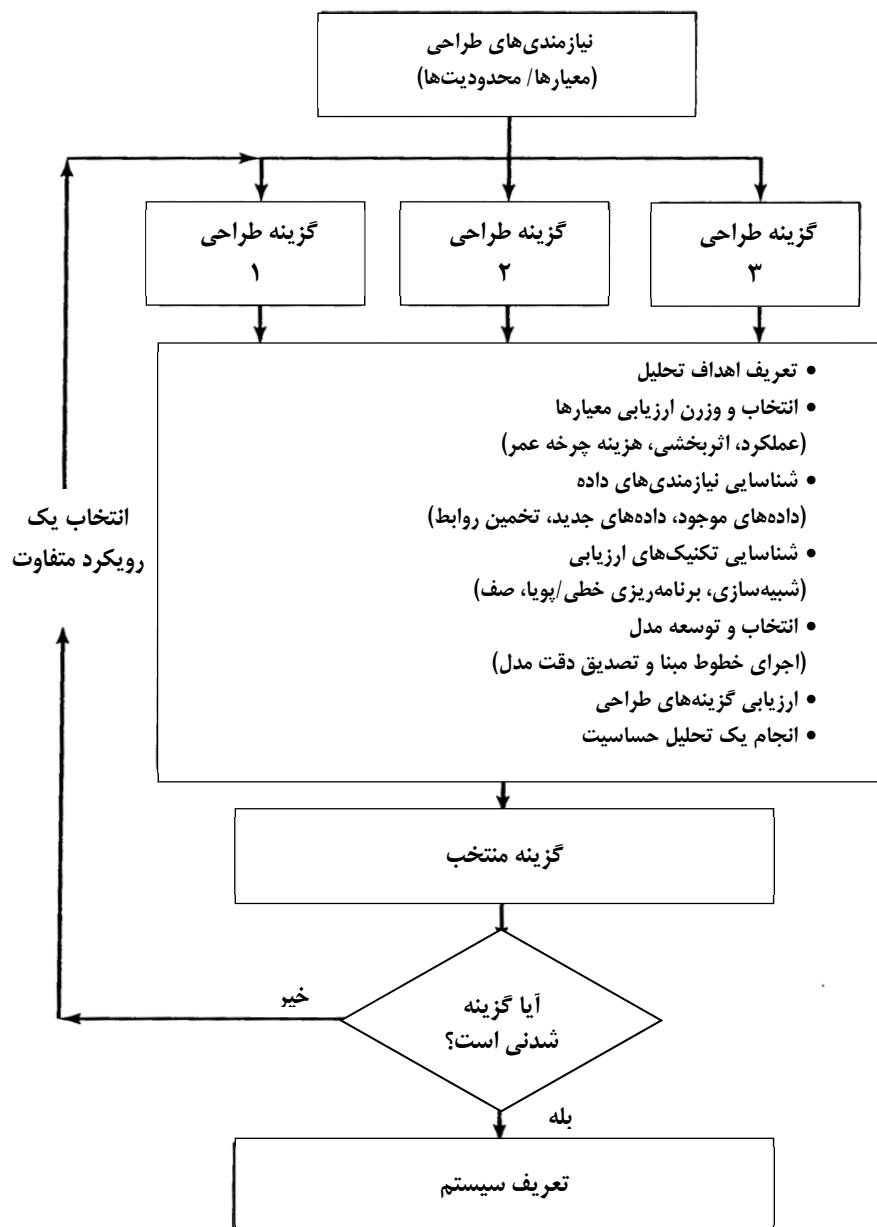
بسیاری از موازنه‌ها، به‌عنوان فرایندهای طراحی سیستم ممکن می‌شوند. در مورد ارزیابی و انتخاب فناوری‌های مناسب، ارزیابی و انتخاب اجزای تجاری، طرح و نقشه زیرسیستم و اجزاء، درجات ممکن خودکارسازی، روتین‌های آزمایش و تشخیص خطا، سیاست‌های مختلف نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی و غیره باید تصمیم‌گیری به‌عمل آید. در انتهای چرخه‌ی طراحی، ممکن است گزینه‌های فرایندهای تولید، برنامه‌های نگهداری و تعمیر کارخانه، ساختارهای پشتیبانی تدارکات، روش‌های از دور خارج کردن مواد، بازیافت و امحا مطرح شوند.

ابتدا باید مساله تعریف شده و سپس معیارها یا شاخص‌های طراحی شناسایی شوند تا با استفاده از آن‌ها، گزینه‌های مختلف در مقابل یکدیگر ارزیابی شده (TPMهای کاربردی) و تکنیک مناسب ارزیابی انتخاب گردد، هر یک از کاندیدهای موردنظر ارزیابی شود، تحلیل حساسیت برای

شناسایی ریسک‌های بالقوه صورت پذیرد و در نهایت رویکرد ارجح پیشنهاد داده شود. این فرایند در شکل ۳-۲۶ به تصویر کشیده شده است و می‌تواند در هر نقطه‌ای از چرخه‌ی عمر همان‌طور که در شکل ۳-۲ و ۴-۲ نشان داده شده است اعمال شود. بسته به طبیعت، تنها عمل تحلیل و ارزیابی سیستم تغییر می‌کند.

با مراجعه به قسمت ۲-۵، تحلیل‌های موازنه، ترکیب خواهند شد. ترکیب، به آمیختن و ساخت اجزا برای ایجاد یک ساختار ممکن برای سیستم اطلاق می‌شود. ترکیب طراحی است. در ابتدا، ترکیب برای توسعه مفاهیم اولیه به کار می‌رود و روابط میان اجزای مختلف سیستم را مشخص می‌کند. در ادامه، هنگامی که تعریف‌های وظیفه‌ای و تجزیه به حد کفایت صورت پذیرد، ترکیب برای تعریف عمیق‌تر چگونگی‌ها در سطحی پایین‌تر به کار می‌رود. ترکیب شامل ایجاد یک ساختار می‌شود که نماینده‌ی کالبدی است که در نهایت سیستم به خود می‌گیرد، اگرچه ساختار نهایی را نمی‌توان در این نقطه از فرایند طراحی متصور شد.

با داشتن ساختار ترکیب شده، خصوصیات آن باید در قالب نیازمندی‌های سیستم که قبلاً مشخص شده است ارزیابی گردد. این فرایند تکرار شونده‌ی ترکیب، تحلیل، ارزیابی و پالایش طراحی منجر به ایجاد خطوط مبنای وظیفه‌ای و سپس خطوط مبنای تخصیص و در نهایت خطوط مبنای تولید خواهد شد (شکل ۲-۴). تشریح کامل این خطوط مبنای، همراه با یک رویکرد علمی برای خطوط مبنای مدیریت، برای استقرار موفق فرایند مهندسی سیستم‌ها لازم و ضروری است.



شکل ۳-۲۶- فرایند تحلیل موازنه

۳-۹- مشخصات فنی سیستم

طی فاز طراحی مفهومی سیستم (که با تحلیل نیازها آغاز می‌شود)، اهداف عمده شامل توسعه و تعریف نیازمندی‌های مشخص طراحی برای سیستم است. نتایج فعالیت‌هایی که در قسمت ۳-۳ تا ۳-۸ تشریح شد، با هم آمیخته شده، ادغام شده و در *مشخصات فنی سیستم* (نوع A) قرار می‌گیرند. این مشخصات فنی، مستندات نیازمندی‌های فنی مرجع را شکل می‌دهند که خطوط راهنمای کلی برای طراحی سیستم از نخستین گام آن را فراهم می‌آورند. با مراجعه به شکل ۲-۴ و ۳-۱، این مشخصات فنی اغلب در قسمت جمع‌بندی طراحی مفهومی آماده می‌شوند. علاوه بر آن، این مشخصات فنی، سطح بالای خطوط مبنا برای توسعه مشخصات فنی در همه سطوح پایین‌تر شامل *مشخصات فنی توسعه* (نوع B)، *محصول* (نوع C)، *فرایند* (نوع D) و *مواد* (نوع E) را فراهم می‌آورند. یک مثال از این رویکرد در شکل ۳-۲۷ نمایش داده شده است.

۳-۱۰- بازیابی طراحی مفهومی

طراحی از یک چکیده به چیزی که دارای شکل و وظیفه است، استوار بوده و می‌تواند در نهایت به تعداد مشخصی دوباره تولید شود تا یک نیاز را برآورده کند. در ابتدا، یک نیاز تعریف می‌شود. از این نقطه، طراحی از طریق یک سری مراحل (طراحی مفهومی، طراحی اولیه سیستم، و طراحی و توسعه تفصیلی) تکامل می‌یابد. در هر یک از مراحل عمده فرایند طراحی، یک وظیفه قابل ارزیابی انجام می‌شود تا از درستی طرح، پیش از رفتن به مرحله بعد اطمینان حاصل شود. وظیفه قابل ارزیابی شامل تنظیم روز به روز پروژه به صورت غیررسمی و بازیابی رسمی طراحی و مستندات می‌شود. اطلاعات طراحی برای برآورده کردن نیازمندی‌های پایه سیستم و تجهیزات (عملکرد، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیر، قابلیت بهره‌برداری، قابلیت پشتیبانی، قابلیت حفاظت و غیره که توسط مشخصات فنی سیستم تعریف می‌شوند) ارائه و بازیابی خواهند شد. اگر

نیازمندی‌ها برآورده شده باشند، طراحی تایید می‌شود. اگر نه، پیشنهادهای اصلاحی به‌عنوان بخشی از بازیابی رسمی طراحی مورد بحث قرار می‌گیرند.

زمانی که بازیابی رسمی طراحی به‌خوبی زمان‌بندی شده و به روشی اثربخش انجام گردد، باعث کاهش ریسک نسبی تولیدکننده در برآورده ساختن نیازمندی‌های مشخصات فنی شده و به بهبود روش‌های عملیاتی تولیدکننده می‌انجامد. همچنین، مشتری از دریافت یک محصول بهتر سود می‌برد.

بازیابی‌های طراحی، پیش از هر گام تکاملی اصلی در فرایند طراحی مورد توجه قرار می‌گیرد (شکل ۲-۴). در برخی موارد، این کار ممکن است شامل یک بازیابی در انتهای هر مرحله (طراحی مفهومی و اولیه سیستم، طراحی و توسعه تفصیلی) باشد. برای هر یک از دیگر پروژه‌ها و در جایی که یک سیستم بزرگ مدنظر است و تعداد زیادی از طراحی‌های جدید ایجاد می‌شود، یک سری از بازیابی‌های رسمی بر عناصر سیستم اجرا خواهند شد. بنابراین مفید است که پردازش برخی آیتم‌ها زودتر انجام شود، مخصوصاً زمانی که با یک آیتم پیچیده و پر ریسک مواجه هستیم.

اگرچه تعداد و نوع زمان‌بندی بازیابی‌های طراحی از یک دستورکار به دستورکار دیگر متفاوت است، چهار نوع اصلی در اکثر دستورکارها مشترک بوده و به‌سادگی قابل شناسایی می‌باشد. این چهار نوع شامل بازیابی طراحی مفهومی (بازیابی نیازمندی‌های سیستم)، بازیابی طراحی سیستم، بازیابی طراحی تجهیزات/نرم‌افزار و بازیابی طراحی انتقادی می‌شوند.

موضوع مورد بحث در این فصل بازیابی طراحی مفهومی بوده که به بازیابی و تصدیق اعتبار نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم نگه‌داری، تعمیرات و پشتیبانی، TPM‌های مشخص شده و تحلیل وظیفه‌ای و تخصیص نیازمندی‌ها در سطح سیستم اختصاص دارد. با مراجعه به شکل ۲-۴، این بازیابی اغلب در انتهای فاز طراحی مفهومی و پیش از انجام طراحی اولیه صورت می‌گیرد.

مشخصات فنی سیستم	
۱. میدان دید	
۲. مستندات کاربردی	
۳. نیازمندی‌ها	
۳.۱. تعریف سیستم	
۳.۱.۱. تشریح عمومی	۳.۱.۱
نیازمندی‌های عملیاتی (نیاز، مأموریت، پروفایل بهره‌برداری، توزیع، چرخه‌ی عمر)	۳.۱.۲
مفهوم نگهداری و تعمیرات	۳.۱.۳
تحلیل وظیفه‌ای و تعریف سیستم	۳.۱.۴
تخصیص نیازمندی‌ها	۳.۱.۵
واسطه‌های وظیفه‌ای و معیارها	۳.۱.۶
۳.۲. خصوصیات سیستم	
خصوصیات عملکردی	۳.۲.۱
خصوصیات فیزیکی	۳.۲.۲
نیازمندی‌های اثربخشی	۳.۲.۳
قابلیت اطمینان	۳.۲.۴
قابلیت نگهداری و تعمیرات	۳.۲.۵
قابلیت بهره‌برداری (فاکتورهای انسانی)	۳.۲.۶
قابلیت پشتیبانی	۳.۲.۷
قابلیت حمل و نقل / تحرک	۳.۲.۸
انعطاف پذیری	۳.۲.۹
قابلیت حفاظت	۳.۲.۱۰
ایمنی	۳.۲.۱۱
۳.۳. طراحی و ساخت	
نیازمندی‌های CAD/CAM	۳.۳.۱
مواد، فرایندها و بخش‌ها	۳.۳.۲
سوار کردن و برچسب زدن	۳.۳.۳
تشعشعات الکترومغناطیسی	۳.۳.۴
ایمنی	۳.۳.۵
قابلیت تعویض	۳.۳.۶
مهارت	۳.۳.۷
قابلیت آزمایش	۳.۳.۸
امکان‌سنجی اقتصادی	۳.۳.۹
۳.۴. مستندسازی/داده	
۳.۵. تدارکات	
نیازمندی‌های نگهداری و تعمیرات	۳.۵.۱
پشتیبانی تامین	۳.۵.۲
تجهیزات آزمایش و پشتیبانی	۳.۵.۳
کارکنان و آموزش	۳.۵.۴
تجهیزات و تسهیلات	۳.۵.۵
بسته‌بندی، جابه‌جایی، انبارش، و حمل و نقل	۳.۵.۶
منابع رایانه‌ای (نرم افزار)	۳.۵.۷
خدمات مشتری	۳.۵.۸
۳.۶. قابلیت تولید	
۳.۷. قابلیت امحا	
۳.۸. قابلیت اجرا	
۴. آزمایش و ارزیابی	
۵. تدارکات تضمین کیفیت	
۶. توزیع و خدمات مشتری	
۷. ازکار اندازی و بازیافت/امحای مواد	

شکل ۳-۲۷- قالب مشخصات فنی نوع A (مثال)

۱۱-۳- خلاصه فصل

این فصل از بخش دوم به یک گذار از فصول مقدماتی (بخش اول) به فرایند طراحی سیستم و استقرار اصول و مفاهیم مهندسی سیستم‌ها به‌عنوان بخشی از این فرایند می‌پردازد. بر این اساس، این فصل نیازمندی‌های پایه برای طراحی و توسعه یک سیستم معمولی و واسطه‌هایش را مورد بحث قرار می‌دهد. چه سیستم بزرگ باشد و چه کوچک، گام‌های بحث شده در این فصل قابل اجرا هستند.

این فصل با تعریف یک مساله و توسعه یک تحلیل نیازها شروع شده و از طریق تحلیل امکان‌سنجی، تعریف نیازمندی‌های سیستم و مفهوم نگهداری، تعمیر و پشتیبانی، شناسایی و اولویت‌بندی TPMها، تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای، مطالعات موازنه سیستم و توسعه مشخصات فنی سیستم (نوع A) ادامه می‌یابد. هدف از ارائه‌ی این فصل تاکید بر گام‌های مطرح شده و اهمیت تعریف نیازمندی‌های ایجاد یک سیستم است. این هدف به‌نوبه‌ی خود منجر به استقرار اصول و مفاهیم مهندسی سیستم از طریق پیشرفت طراحی سیستم به سمت طراحی اولیه سیستم (فصل ۴)، طراحی و توسعه تفصیلی (فصل ۵) و آزمایش و ارزیابی سیستم (فصل ۶) می‌گردد. بر این اساس، محتوای این فصل شالوده‌ی همه فعالیت‌های تشریح شده در بخش دوم را فراهم می‌آورد.

یکی از موضوعات اصلی، اهمیت تعریف درست و کامل مجموعه نیازمندی‌ها از آغاز کار است. مشخص کردن نیازمندی‌ها، باید یک سیستم واحد و یک ساختار SOS را پوشش دهند و همه واسطه‌های همراه را شامل شوند. تعریف قلمرو (مرزها) و همه مفاهیم عملیاتی سیستم برای چرخه‌ی عمر حیاتی است. نوشتن مشخصات فنی سیستم در عبارات مبهم و با هدف منعطف نگه داشتن نیازمندی‌ها و فراهم کردن انعطاف در طراحی و فراهم کردن فرصت نوآوری در آخرین لحظات، کار غیر معمولی نیست. با این حال، بدون وجود یک شالوده خوب، مشخصات فنی C، B،

D، و E که در قالب عبارات مشخص‌تر تعریف می‌شوند، به‌خوبی منعکس نشده و در نهایت نیاز مشتری در قالب مشخصات فنی سیستم به‌درستی شناسایی نخواهد شد. علاوه‌بر این، اگر تعریف ضعیفی از سیستم که نیازمندی‌ها در آن تعریف می‌شوند ارائه گردد، مشخصات فنی سطح پایین نمی‌توانند قابل انطباق و پشتیبانی باشند.

بنابراین ضروری است که مشخصات فنی بر پایه عملکرد از ابتدا مهیا شود. البته این موضوع به کامل بودن و عمق نیازمندی‌های تعریف شده بستگی دارد (فعالیت‌هایی که در قسمت‌های ۳-۳ تا ۸-۳ تشریح شدند). با داشتن مشخصات فنی خوب، به یک برنامه کامل و دقیق برای استقرار یک دستور کار در توسعه سیستمی که نیازمندی‌های بیان شده را برآورده می‌کند نیاز است (SEMP یا SEP که در قسمت ۲-۳ تشریح شد). هم مشخصات فنی و هم برنامه باید با هم آماده شده و با یکدیگر در ارتباط باشند.

برای پوشش جزئی‌تر و عمیق‌تر فرایند مهندسی سیستم‌ها و موضوع نیازمندی‌ها، خواننده می‌تواند به برخی از مراجع در ادبیات موضوع مراجعه کند. منابع خاص زیر برای مطالعه بیش‌تر پیشنهاد می‌شود: INCOSE's Systems Engineering Handbook، ISO/IEC 15288 و ANSI/GEIA EIA-632، IEEE 1220-1998 (B.S. Blanchard). علاوه‌بر این خواننده می‌تواند به وبسایت INCOSE در آدرس <http://www.incose.org> مراجعه کند و لینک‌های مفید متعددی را دریافت کند.

سوالات و مسائل

۱. در انجام تحلیل نیازها در پاسخ به یک نقص مشخص، چه سیستم اطلاعاتی باید مدنظر قرار گیرد؟ فرایندی را که در توسعه‌ی اطلاعات ضروری به کار می‌برید، توضیح دهید.
۲. هدف تحلیل امکان‌سنجی چیست؟ چه ملاحظاتی در تکمیل این تحلیل باید رعایت شود؟
۳. از طریق مطالعه‌ی ادبیات موضوع، رویکرد QFD را توضیح داده و تشریح کنید چگونه می‌توان آن را در کمک به تعریف نیازمندی‌های طراحی سیستم اعمال کرد.
۴. چرا تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم مهم است؟ چه نوع اطلاعاتی را شامل می‌شود؟
۵. چالش‌های موجود در تعریف نیازمندی‌های عملیاتی برای یک ساختار سیستمی از سیستم‌ها چیست؟
۶. چرا تعریف سناریوهای ماموریت مشخص (پروفایل عملیاتی) در زمینه‌ی نیازمندی‌های عملیاتی سیستم مهم است؟
۷. چه اطلاعاتی باید در مفهوم نگهداری و تعمیر سیستم لحاظ شود؟ چگونه توسعه می‌یابد (گام‌ها را توضیح دهید) و در چه نقطه‌ای از چرخه‌ی عمر سیستم باید توسعه یابد؟
۸. چگونه نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم نگهداری و تعمیر را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند (اگر تاثیر دارند)؟
۹. چگونه مفهوم نگهداری و تعمیر، طراحی سیستم/محصول را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد؟ چند مثال مشخص بیاورید

۱۰. یک سیستم به‌طور دلخواه انتخاب کنید و نیازمندی‌های عملیاتی سیستم را توسعه دهید. در ادامه، مفهوم نگهداری و تعمیر را برای سیستم توسعه دهید. جریان عملیاتی و نگهداری و تعمیرات لازم را ایجاد کنید، سیاست‌های تعمیر را شناسایی کنید و فاکتورهای کمی اثربخشی را بر آن اعمال نمایید.

۱۱. به شکل ۳-۱۲ مراجعه کرده و فرض کنید فراساختاری مشابه در شرکت شما وجود دارد. قابلیت‌های مختلف سیستم را شناسایی کرده و ساختار کلی را ترسیم کنید (مشابه شکل) و برخی شاخص‌های حیاتی را که به‌عنوان ورودی چنین طراحی به کار می‌روند، شناسایی کنید.

۱۲. به شکل ۳-۱۳ مراجعه کنید. برای ساختار SOS انتخابی خود، برخی نیازمندی‌های حیاتی در طراحی یک SOS را تشریح کنید.

۱۳. آیا در ارزیابی باید یک مفهوم نگهداری دو سطحی مشخص شود یا سه سطحی؟ چه فاکتورهایی را در فرایند ارزیابی مدنظر قرار می‌دهید؟

۱۴. در توسعه مفهوم نگهداری و تعمیر، ضروری است که همه سطوح نگهداری و تعمیر به‌صورتی ادغامی در نظر گرفته شوند. چرا؟

۱۵. چرا شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) مهم هستند؟

۱۶. به شکل ۳-۱۷ مراجعه کنید. گام‌هایی را که در توسعه‌ی اطلاعات مربوط به این شکل طی می‌کنید، توضیح دهید.

۱۷. با در دست داشتن اطلاعات فراهم شده در شکل ۳-۱۷، چگونه این اطلاعات در فرایند طراحی سیستم اعمال می‌شوند؟

۱۸. تحلیل وظیفه‌ای یعنی چه؟ در چه زمانی در چرخه‌ی عمر انجام می‌گیرد؟ هدف آن چیست؟ برخی فواید اقتباس شده را شناسایی کنید. آیا یک تحلیل وظیفه‌ای می‌تواند برای هر سیستم اجرا شود؟ آیا یک تحلیل وظیفه‌ای برای ساختار SOS قابل اجراست؟

۱۹. منظور از وظیفه مشابه در تحلیل وظیفه‌ای چیست؟ وظایف مشابه چگونه شناسایی می‌شوند؟

۲۰. چگونه تحلیل وظیفه‌ای به تعریف نیازمندی‌های منابع در قالب سخت‌افزار، نرم‌افزار، افراد، داده، تسهیلات و غیره منجر می‌شود؟ به‌طور خلاصه گام‌های این فرایند را توضیح دهید و یک مثال بزنید. هدف از عددگذاری در هر بلوک در شکل‌های ۳-۲۰ تا ۳-۲۲ چیست؟

۲۱. هدف از تخصیص چیست؟ تا چه عمق از ساختار سلسله‌مراتبی سیستم تخصیص انجام می‌شود؟ چگونه بر طراحی سیستم اثر می‌گذارد؟ تخصیص در ساختار SOS چگونه انجام می‌شود؟

۲۲. در طراحی مفهومی، نیازمندی‌های متفاوتی برای تخمین و پیش‌بینی شاخص‌های سیستم وجود دارد. چه رویکردی برای آن مدنظر قرار می‌دهید؟

۲۳. هدف از بازبینی رسمی طراحی چیست؟ برخی از فواید آن را توضیح دهید. جنبه‌های منفی آن را تشریح کنید.

۲۴. اهداف اصلی در اجرای بازبینی طراحی مفهومی چیست؟

طراحی اولیه سیستم

فرایند طراحی مفهومی در فصل ۳ منجر به انتخاب یک معماری یا ساختار طراحی مفهومی سیستم گردید. نیازمندی‌های سطح بالا که در آنجا تعریف شدند، فاز طراحی اولیه سیستم را تکامل می‌دهند. این فاز، چرخه‌ی عمر، تعریف و توسعه‌ی مفهوم سیستم ارجح و نیازمندی‌های تخصیص داده شده به زیرسیستم و عناصر عمده‌ی آن را مورد بررسی قرار می‌دهد.

هدف ضروری طراحی اولیه، نشان دادن این موضوع است که مفهوم انتخاب شده سیستم، از عملکرد و مشخصات فنی طراحی پیروی کرده و می‌تواند با روش‌های در دسترس، تولید و/یا ساخته شود و محدودیت‌های زمان‌بندی و هزینه را برطرف نماید. برخی محصولات طراحی اولیه عبارت‌اند از تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای نیازمندی‌ها در سطح زیرسیستم و پایین‌تر، شناسایی معیارهای طراحی به‌عنوان ورودی فرایند طراحی، به‌کارگیری مدل‌ها و روش‌های تحلیلی در انجام موازنه‌های طراحی، بازبینی رسمی طراحی در سرتاسر فرایند توسعه و برنامه‌ریزی برای فاز طراحی و توسعه.

با مراجعه به شکل ۲-۴، استقرار فرایند مهندسی سیستم‌ها به روشی ادامه می‌یابد که گام‌های قبلی را دنبال کند و با آن‌ها هم‌خوانی داشته باشد. خصوصاً تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای در قسمت ۳-۷ به سطح پایین‌تر در ساختار سلسله مراتب سیستم در قسمت ۴-۳ توسعه می‌یابد، نیازمندی‌های خاص طراحی در قسمت‌های ۳-۴ تا ۶-۳ در قسمت ۴-۴ تقویت می‌شود، تحلیل‌های موازنه طراحی در سطح سیستم در قسمت ۳-۸ در سطوح جزئی‌تر در قسمت‌های ۴-۶ و ۴-۷ انجام می‌گیرد، و فرایند بازبینی طراحی که در قسمت ۳-۱۰ معرفی شد در بخش ۴-۸ گسترده‌تر می‌شود. یکی از موضوعات مهم، استفاده‌ی پیوسته از بازخورد (شکل ۲-۳ و ۴-۲) است. حلقه بازخوردی برای تصدیق این موضوع است که نیازمندی‌های مشخص شده‌ی اولیه، حقیقتاً معتبر بوده و اجازه تغییر در یک مکانیسم را فراهم می‌کنند (و اصلاح و بهبود سیستم را فعال می‌نمایند).

این فصل به‌طور مستقیم اطلاعات لازم برای طراحی و توسعه‌ی تفصیلی در فصل ۵ و آزمایش، ارزیابی و تصدیق اعتبار سیستم در فصل ۶ را فراهم می‌کند. این فصل، گام‌های زیر را در فرایند مهندسی سیستم‌ها، مورد بررسی قرار می‌دهد:

- توسعه‌ی نیازمندی‌های طراحی برای زیرسیستم‌ها و عناصر اصلی سیستم از نیازمندی‌های سطح سیستم؛
- فراهم آوردن مشخصات فنی توسعه، محصول، فرایند و مواد که برای زیرسیستم‌ها قابل کاربرد هستند؛
- انجام تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای به سطح زیرسیستم و سطوح پایین‌تر؛
- استقرار نیازمندی‌های تفصیلی طراحی و توسعه‌ی برنامه‌ها برای متخصصین حوزه‌ی مهندسی؛

- شناسایی و بهره‌برداری مناسب از ابزارها و فناوری‌های طراحی مهندسی؛
- انجام مطالعات موازنه برای دستیابی به اثربخشی عملیاتی و طراحی؛
- انجام بازی‌های طراحی در نقاط زمانی از پیش تعیین شده.

تکمیل این گام‌ها، فرایند پیاده‌سازی شده در بلوک‌های 1.1 تا 1.7 در شکل ۲-۴ را نشان می‌دهد. با وجود این که عمق، زحمت و هزینه‌های اجرای این کار از یک مورد کاربردی به دیگری ممکن است متفاوت باشد، فرایند نشان داده شده در توسعه هر نوع سیستم با هر اندازه‌ای، کاربردی خواهد بود. به‌عنوان یک هدف آموزشی، قصد آن فراهم کردن یک رویکرد معتبر و کامل برای خواننده در موضوعات طراحی اولیه است.

۴-۱- نیازمندی‌های طراحی اولیه

نیازمندی‌های طراحی اولیه از نیازمندی‌های طراحی سیستم تکامل می‌یابند که از طریق تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم نگهداری، تعمیر و پشتیبانی و شناسایی و اولویت‌بندی TPM انجام می‌شود. این نیازمندی‌ها در طی آماده‌سازی مشخصات فنی سیستم (نوع A) مستندسازی شده و در فاز طراحی اولیه مهیا گردیده است (قسمت ۳-۹ شکل ۳-۲۷). این نیازمندی‌ها به معیار تبدیل شده و توسط آن‌ها گزینه‌های طراحی اولیه مورد قضاوت قرار گرفته می‌شوند.

چه‌ها که نقطه شروع طراحی مفهومی هستند، چگونه‌ها را از طریق ارزیابی طراحی مفهومی تولید کرده و در مفاهیم طراحی مفهومی اعمال می‌کنند. در ادامه، چگونه‌ها از طریق تخصیص نیازمندی‌ها به طراحی اولیه انتقال داده می‌شوند. در این مرحله این چگونه‌ها به چه‌ها تبدیل شده و محرک طراحی اولیه در بررسی چگونه‌ها برای سطوح پایین‌تری می‌گردند.

این موضوع یک فرایند آشنایی است که الگوی نشان داده شده در شکل ۲-۴ را دنبال می‌کند و فرایندی است که به این سوال توجه می‌کند: سیستم چه کاری باید انجام دهد تا آنچه که سیستم را تعریف می‌کند، تعیین گردد.

نیازمندی‌های طراحی زیرسیستم‌ها و عناصر اصلی از طریق توسعه تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای، انجام مطالعات موازنه طراحی و غیره تعریف می‌شود. این کار شامل یک فرایند تکرارشونده طراحی از بالا به پایین / پایین به بالا است که تا زمان شناسایی و پیکربندی پایین‌ترین سطح از اجزای سیستم ادامه می‌یابد.

بار دیگر مساله عبور از رودخانه را در نظر بگیرید (مثال ۱ قسمت ۳-۴-۲). با استفاده از نتایج فاز طراحی مفهومی، احداث پل بر رودخانه از میان گزینه‌های دیگر عبور از رودخانه انتخاب شد. هر یک از طراحی‌های اولیه پل از طریق تحلیل و ملاحظات اجزای زیرسیستم ارزیابی می‌شوند. برای مثال، اگر گزینه‌ی ستون و روبنا تحت ارزیابی باشد، نیم پایه‌ها، ستون‌ها، و فرابنا که باید ترکیب شوند، تنظیم می‌گردند و ارزیابی می‌شوند. بهینه‌سازی و موازنه برای تعیین فضای موردنیاز ستون به نحوی که مجموع هزینه‌ی اولیه ستون‌ها و فرابنا، هزینه نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی تخمین زده شده، هزینه‌ی انتهای عمر و کل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر تعیین گردد، حداقل شود. نتایج بهینه پایه و اساس مقایسه‌ی این گزینه طراحی اولیه را در مقابل دیگر گزینه‌ها و با معیارهای مشابه که در قسمت ۹-۲ تشریح شده است، تشکیل می‌دهند. نیازمندی‌های سطوح پایینی از تخصیص نیازمندی‌ها برای طراحی اولیه پل که به صورت تجربی انتخاب شده است، سرچشمه می‌گیرند. این نیازمندی‌های سطوح پایینی معیارهای طراحی برای زیرسیستم‌ها و اجزای ستون و روبنای پل هستند. در این مثال خاص، زیرسیستم‌های اصلی شناسایی شده برای عبور از رودخانه از طریق پل عبارت‌اند از بستر راه‌آهن یا جاده اصلی، پیاده‌رو و محل عبور دوچرخه، تسهیلات عوارضی، زیربنای نگهداری، تعمیر و پشتیبانی و غیره. زیرسیستم‌ها به عناصر مربوطه

سیستم شکسته می‌شوند مانند روبنا، زیرسازی، نیم‌بند و پایه ستون، فونداسیون، دیوارهای محافظ، و مصالح ساختمانی. در ادامه این نیازمندی‌ها در سطوح پایین‌تر از طریق مشخصات فنی توسعه، محصول، فرایند و/یا مواد، مستندسازی می‌شوند. طراحی و توسعه‌ی عناصر یک سیستم مشخص در فاز طراحی و توسعه تفصیلی در فصل ۵ صورت می‌پذیرد.

۲-۴- مشخصات فنی توسعه، محصول، فرایند و مواد

نیازمندی‌های فنی برای مستندسازی نیازمندی‌های سیستم و عناصر آن از طریق یک سری از مشخصات فنی که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، انجام می‌گیرند. این مشخصات فنی با مهیا کردن مشخصات فنی سیستم (نوع A) که برای فاز طراحی مفهومی فراهم شده‌اند (شکل ۳-۲۷ قسمت ۳-۹) آغاز می‌گردد. این موضوع به نوبه‌ی خود، یک یا چند مورد از مشخصات فنی فرعی و/یا استاندارد شده‌ی زیرسیستم‌ها، اجزاء، تجهیزات، نرم‌افزار و دیگر اجزای سیستم را پوشش می‌دهد. به علاوه، ممکن است تعدادی استاندارد به کار می‌رود که برای پشتیبانی مشخصات فنی پایه مرتبط با دستورکار مورد استفاده قرار گیرند مانند ^۱ANSI، ^۲EIA، ^۳ISO.

اگرچه مشخصات فنی برای یک مساله می‌تواند مجموعه‌های متفاوتی را تشکیل دهند، اما رویکردی عمومی در این کتاب مورد استفاده قرار گرفته است. گروه‌های فرض شده در این جا در شکل ۴-۱ نمایش داده شده است. با مراجعه به این شکل، توسعه‌ی درخت مشخصات فنی برای هر دستورکار پیشنهاد می‌شود که یک رابطه‌ی سلسله مراتبی است و هنگامی که تضادی رخ دهد، این رابطه سلسله مراتبی نشان خواهد داد که کدام یک از مشخصات فنی ترجیح داده می‌شود. علاوه بر این، کلیدی است که مشخصات فنی و استانداردها طوری فراهم شود که از

1.American National Institute

2.Electronic Industries Alliance

3.International Organization for Standardization

قابلیت رهگیری نیازمندی‌ها از بالا به پایین اطمینان حاصل شود. فراهم کردن مشخصات فنی توسعه (نوع B)، مشخصات فنی محصول (نوع C) و غیره، باید دارای نیازمندی‌های مناسب TPM باشد که نیازمندی‌های کل سیستم را پشتیبانی می‌کند، برای مثال دسترسی‌پذیری عملیات A_0 برابر با ۰.۰/۹۸. رهگیری نیازمندی‌ها در درخت مشخصات فنی، از نقطه نظر گرایش فعلی به جهانی شدن، برون‌سپاری و استفاده از تامین‌کننده‌ی خارجی که هر روز افزایش می‌یابد و در آن تفاوت‌هایی در استقرار استانداردها ایجاد می‌کند، موضوع کاملاً مهمی است.

۱. **مشخصات فنی سیستم (نوع A):** شامل خصوصیات فنی، عملکردی، عملیاتی و پشتیبانی سیستم به‌عنوان یک موجودیت؛ نتایج تحلیل امکان‌سنجی، نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات؛ نیازمندی‌های TPM در سطح سیستم؛ تشریح وظایف سیستم؛ نیازمندی‌های طراحی برای سیستم؛ و اختصاص نیازمندی‌های طراحی به سطح زیرسیستم است (قسمت ۳-۹).

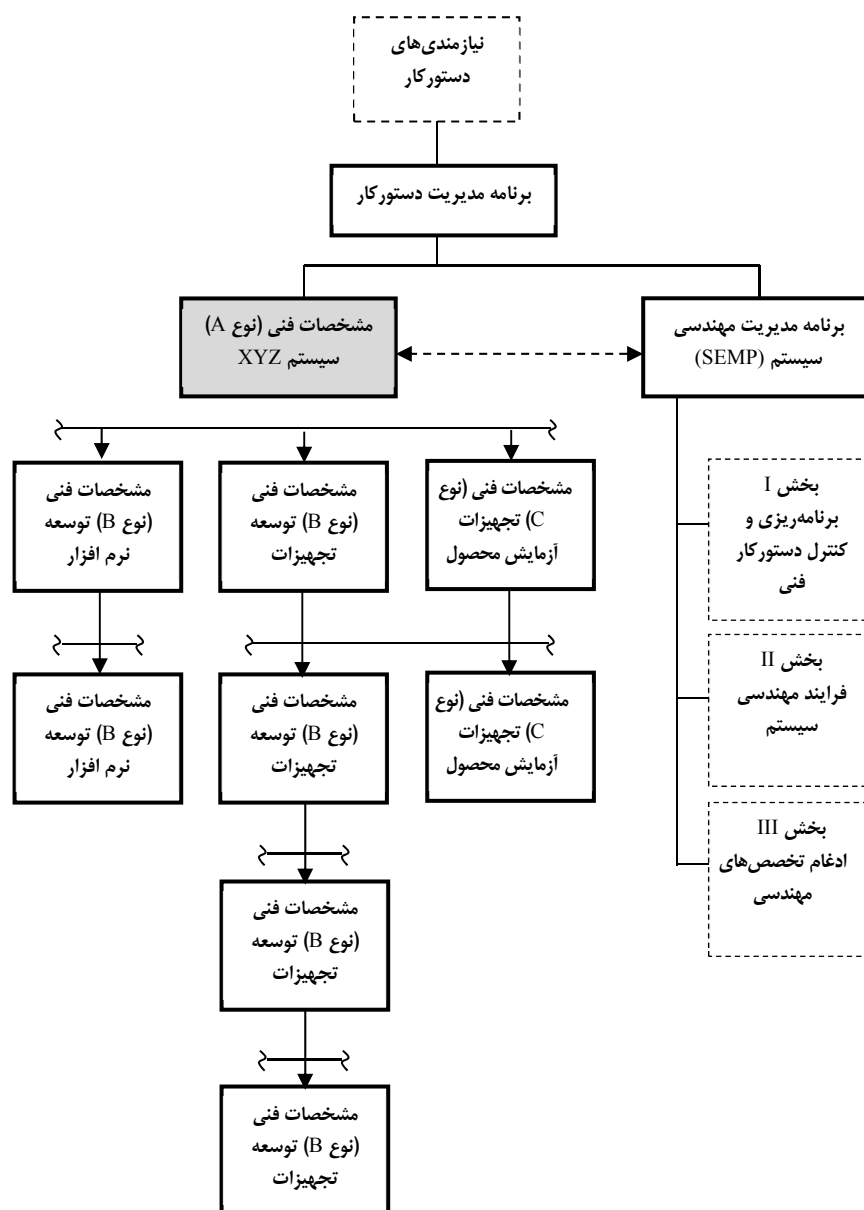
۲. **مشخصات فنی توسعه (نوع B):** شامل نیازمندی‌های فنی (کیفی و کمی) می‌باشند که برای یک آیتم در سطحی پایین‌تر از سطح سیستم به‌کار می‌روند و برای تحقیق، طراحی و توسعه موردنیاز هستند. این قسمت شامل یک تجهیز، قطعه‌ی مونتاژ شده، برنامه‌ی رایانه‌ای، تسهیل، آیتم حساس برای پشتیبانی، داده و غیره می‌شود. هر کدام از مشخصه‌های فنی باید شامل خصوصیات عملکرد، اثربخشی و پشتیبانی باشد که برای تکامل طراحی از سطح سیستم به سطوح پایین‌تر موردنیاز است.

۳. **مشخصات فنی محصول (نوع C):** شامل نیازمندی‌های فنی (کیفی و کمی) می‌باشند که برای هر یک از آیتم‌ها در سطحی پایین‌تر از سطح سیستم که هم اکنون در موجودی انبار وجود دارند و می‌توانند تدارک دیده شوند، به‌کار می‌روند. این قسمت می‌تواند تجهیزات تجاری، ماژول نرم‌افزار، یک جزء، آیتم پشتیبانی یا موارد مشابه دیگر باشد.

۴. **مشخصات فنی فرایند (نوع D):** شامل نیازمندی‌های فنی (کیفی و کمی) می‌باشند که با یک فرایند یا خدمت که با هر یک از عناصر سیستم یا برخی نیازمندی‌های وظیفه‌ای همراه هستند. این قسمت می‌تواند شامل فرایند تولید (ماشین‌کاری، خم‌کاری، جوشکاری و غیره)، فرایند تدارکات (حمل و نقل و جابه‌جایی مواد)، فرایند انتقال اطلاعات و غیره باشد.

۵. **مشخصات فنی مواد (نوع E):** شامل نیازمندی‌های فنی وابسته به مواد خام (فلز، ماسه، سنگ معدن)، سیالات (رنگ، ترکیبات شیمیایی)، مواد نیمه ساخته شده (کابل‌های الکتریکی، لوله) و غیره می‌باشند.

هر کدام از مشخصات فنی باید مستقیم، کامل و در قالب مشخصات مرتبط نوشته شده و نیازمندی‌ها طراحی را در قالب چه‌ها بیان کند؛ یعنی وظایفی که آیتم موردنظر باید انجام دهد. علاوه بر این، مشخصات فنی باید منطبق بر کارکرد یک آیتم باشد و باید مراقب بود که افراط و تفریط در این کار صورت نگیرد. درحالی که دستورکارها ممکن است برای اعمال به مجموعه‌ای از نقش‌ها تفاوت داشته باشد یا محتوای هر یک از مشخصات فنی متفاوت باشد، اما استقرار یک رویکرد کامل بالا به پایین که شامل نیازمندی‌های سیستم و عناصر آن باشد مهم است.



شکل ۴-۱- درخت مستندسازی دستورکار

۳-۴- تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای (زیرسیستم)

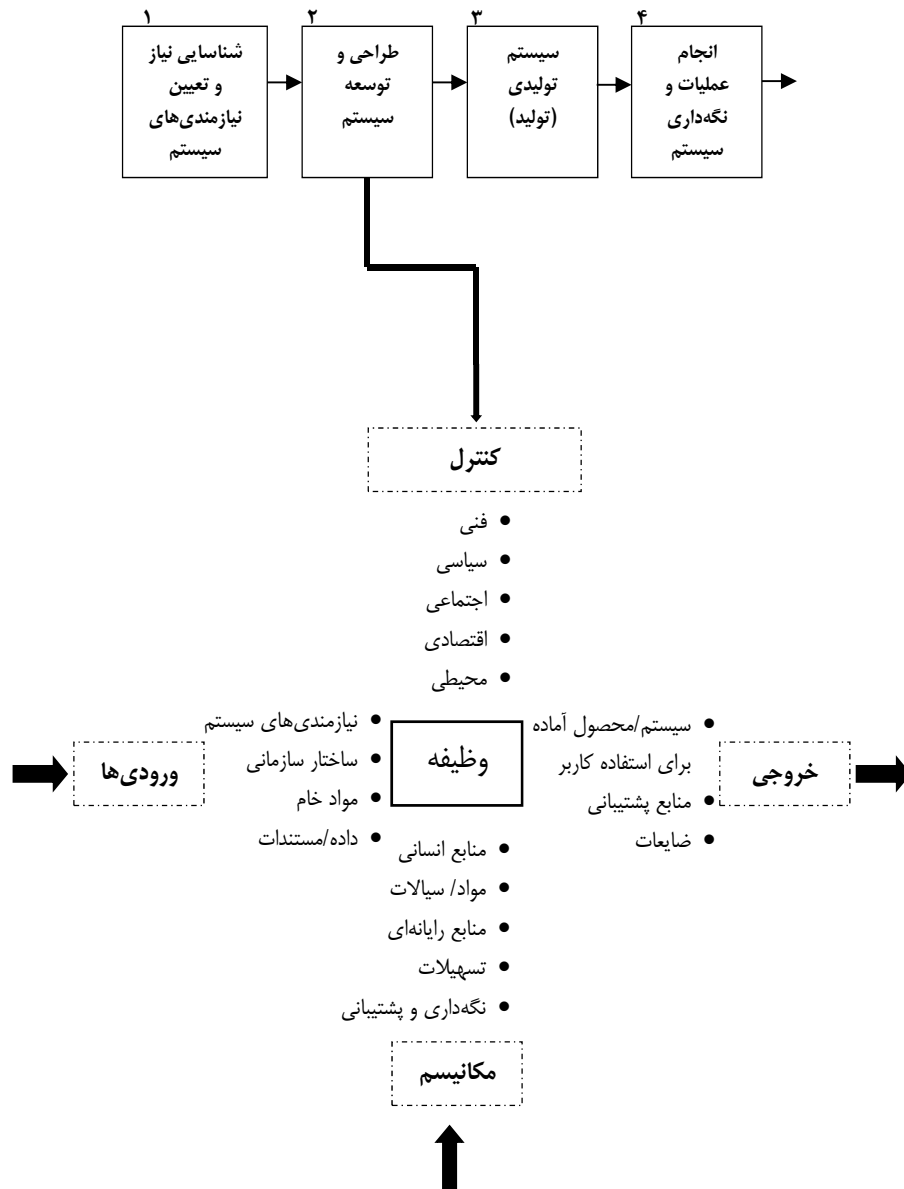
توسعه‌ی اهداف اصلی در انجام یک تحلیل وظیفه‌ای که در قسمت ۳-۷ تشریح شد و فرایند توسعه‌ی نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای (FFBD) که در پیوست الف بیش‌تر پوشش داده شده است، گام بعدی توسعه‌ی تحلیل وظیفه‌ای از سطح سیستم به سطح زیرسیستم و در صورت نیاز سطوح پایین‌تر است. عمق چنین تحلیلی (یعنی شکست FFBD ها از سطح سیستم به سطح دوم، سوم و ...) بسته به درجه شکست مطلوب، چه طراحی جدید یا موجود پیش‌بینی شده باشد، و/یا به سطحی که طراح می‌خواهد تا برخی نیازمندی‌ها طراحی را به‌عنوان ورودی ایجاد کند، می‌تواند متفاوت باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مهم است که یک معماری مناسب که سیستم، روابط داخلی و نیازمندی‌های مربوطه را تشریح می‌کند، استقرار یابد.

۳-۴-۱- فرایند تحلیل وظیفه‌ای

با مراجعه به شکل‌های ۳-۲۰ تا ۳-۲۴ و شکل الف-۲ در پیوست الف، مثال‌های متنوعی می‌توان یافت که شکست وظایف به زیروظیفه‌ها را نشان می‌دهد که در نهایت زیرسیستم‌های اصلی را تشریح خواهند کرد. شکل ۲-۲۳ توالی عمومی گام‌هایی را که از سطح سیستم به یک زیرسیستم ارتباطی (بلوک 9.5.1) ختم می‌شود، نشان می‌دهد. با این‌که شکل تنها یکی از زیرسیستم‌های موردنیاز برای برآورده کردن نیاز حمل و نقل یک هواپیما را نشان می‌دهد، اما همین رویکرد را می‌توان در تعریف دیگر زیرسیستم‌ها به‌کار گرفت. توسعه‌ی FFBD های عملیاتی می‌تواند به FFBD های نگهداری و تعمیراتی در شکل ۳-۲۱ ختم شود. با داشتن FFBD های عملیاتی و نگهداری و تعمیر که چه‌ها را منعکس می‌کند، می‌توان چگونه‌ها را تعیین کرد؛ چگونه هر یک از وظایف صورت می‌پذیرد؟ این موضوع توسط هر یک از بلوک‌های FFBD، تعریف ورودی‌های ضروری و خروجی‌های موردانتظار، تشریح کنترل‌ها و محدودیت‌های خارجی و تعیین مکانیسم یا منابع فیزیکی موردنیاز برای انجام یک وظیفه (تجهیزات، نرم‌افزارها، افراد، تسهیلات،

داده‌ها و اطلاعات یا ترکیب‌های مختلف آن‌ها) شناخته می‌شود. مثالی از این فرایند در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

با مراجعه به شکل (توجه کنید که تنها یک بلوک در شکل ۲-۴ برجسته شده است)، یک قالب مستند سازی مشابه آن‌چه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، باید مورد استفاده قرار گیرد. در این شکل، وظایف وابسته به طراحی و توسعه‌ی سیستم در راستای ورودی‌های موردنیاز، خروجی‌های موردانتظار و نیازمندی‌های پیش‌بینی شده از منابع شناسایی شده‌اند. اگرچه این مثال خاص، طبیعتی کیفی دارد، اما بسیاری از وظایف وجود دارند که در آن‌ها شاخص‌های مشخص (TPMها) می‌توانند به صورت محدودیت‌های طراحی اعمال شوند. برای مثال، با مراجعه به شکل ۳-۳، یک نیازمندی وظیفه‌ای در سطح سیستم وجود دارد که به صورت "عملیات سیستم در محیط کاربر" بیان شده و در بلوک ۹ نشان داده شده است. با فرض آن که نیاز به یک TPM سیستم برای دسترسی‌پذیری عملیاتی (A_0) برابر با 0.985 وجود دارد (به شکل ۳-۱۷ مراجعه کنید)، این شاخص اثربخشی یک نیازمندی طراحی را برای بلوک ۹ تشکیل می‌دهد و منابع مناسب برای اجرای آن باید در نظر گرفته شود. رویکردی مشابه در رابطه با همه نیازمندی‌های TPM که برای سیستم و یک یا چند وظیفه مشخص شده‌اند، قابل اجراست. بر این اساس، هدف از شکل ۳-۴ ارتقای یک رویکرد اصولی در اجرای تحلیل وظیفه است.



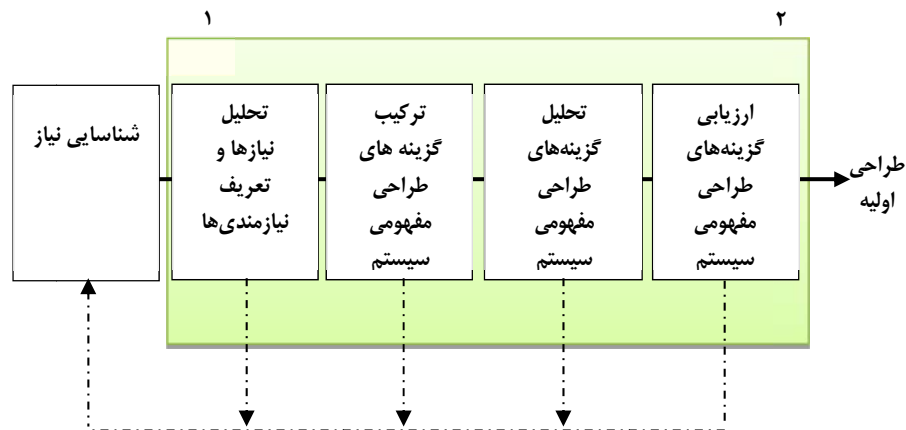
شکل ۴-۲- شناسایی نیازمندی‌های منابع (مکانیسم‌ها)

در انجام مطالعات موازنه در مورد بهترین رویکرد در پاسخ به یک نیازمندی وظیفه‌ای (یعنی مکانیسم‌ها)، نتایج می‌تواند به سمت انتخاب سخت‌افزار، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، داده و ترکیب آن‌ها حرکت کند. شکل ۴-۴ یک مثال را نشان می‌دهد که در آن نیازمندی‌های سخت‌افزار، نرم‌افزار و افراد در آن شناسایی شده است. با استفاده از تحلیل وظیفه‌ای (بلوک 0.2 در شکل ۴-۲)، یک طرح و گام‌های توسعه‌ای برای آن نشان داده شده و برنامه‌ای برای اکتساب این عناصر سیستم تهیه می‌شود. از نقطه‌نظر مهندسی سیستم، ضروری است که این فعالیت‌ها را از ابتدا و در راستای چرخه‌ی عمر تنظیم و ادغام کنند. به عبارت دیگر، ارتباطات مستمر در سرتاسر طراحی و توسعه بین سیستم و عناصر سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و افراد، باید وجود داشته باشند.

۴-۳-۲ - تخصیص نیازمندی‌ها

با مراجعه به قسمت ۷-۳، عناصر سطح پایین سیستم از طریق تحلیل وظیفه‌ای و سپس تقسیم‌بندی وظایف مشابه در دسته‌های منطقی، شناسایی زیرسیستم‌های اصلی، آیتم‌های ساختاری، واحدها، قطعات مونتاژی، ماژول‌ها و غیره تعریف می‌شوند (به شکل ۳-۲۵ مراجعه کنید). شکل ۴-۵ یک شمای کلی از این فرایند را ترسیم کرده است که از تعاریف وظیفه‌ای سیستم XYZ به جمع‌بندی سیستم در ۳ واحد یعنی واحدهای A، B و C تکامل می‌یابد.

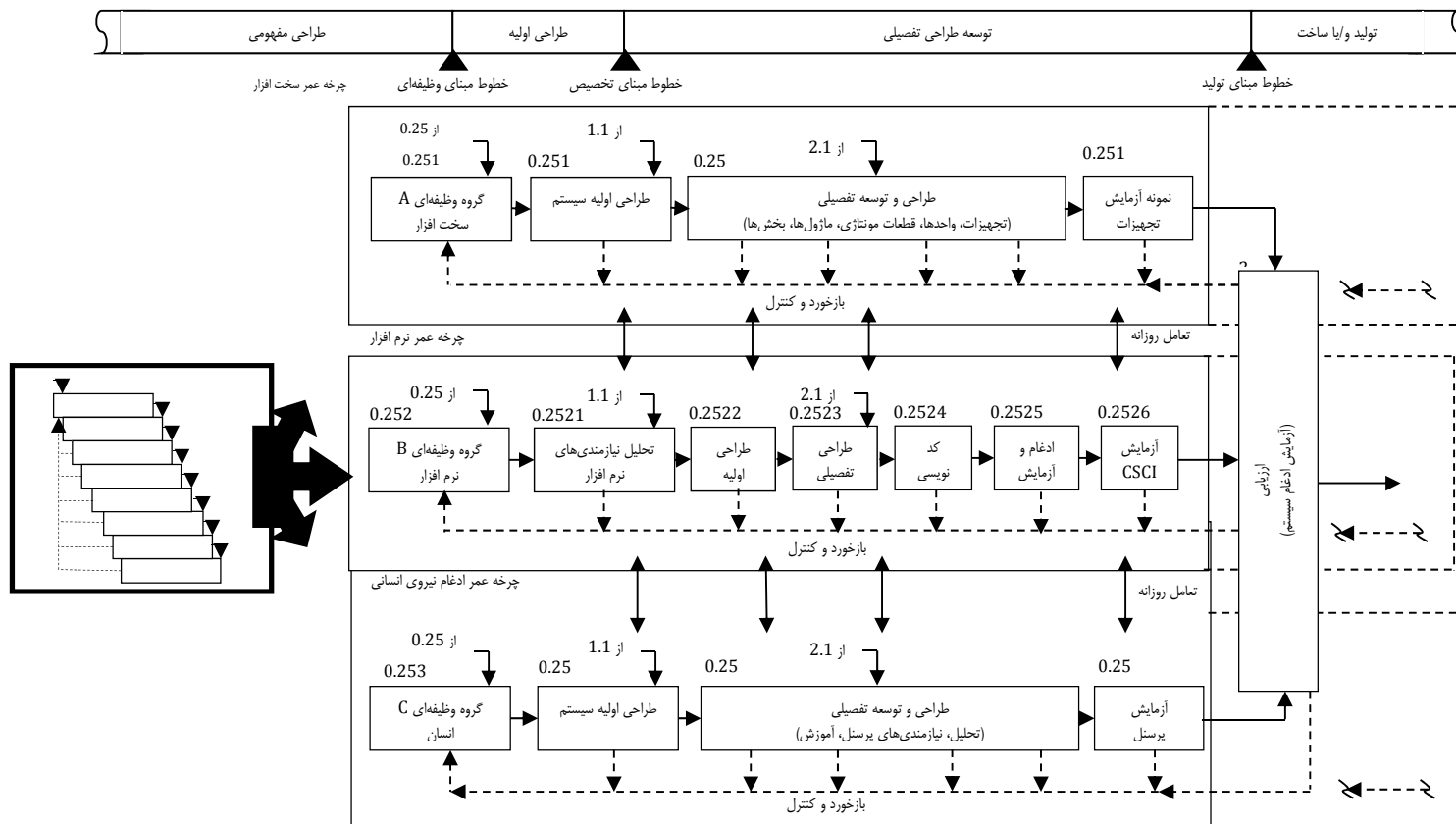
فرایند طراحی مفهومی مهندسی سیستم ها



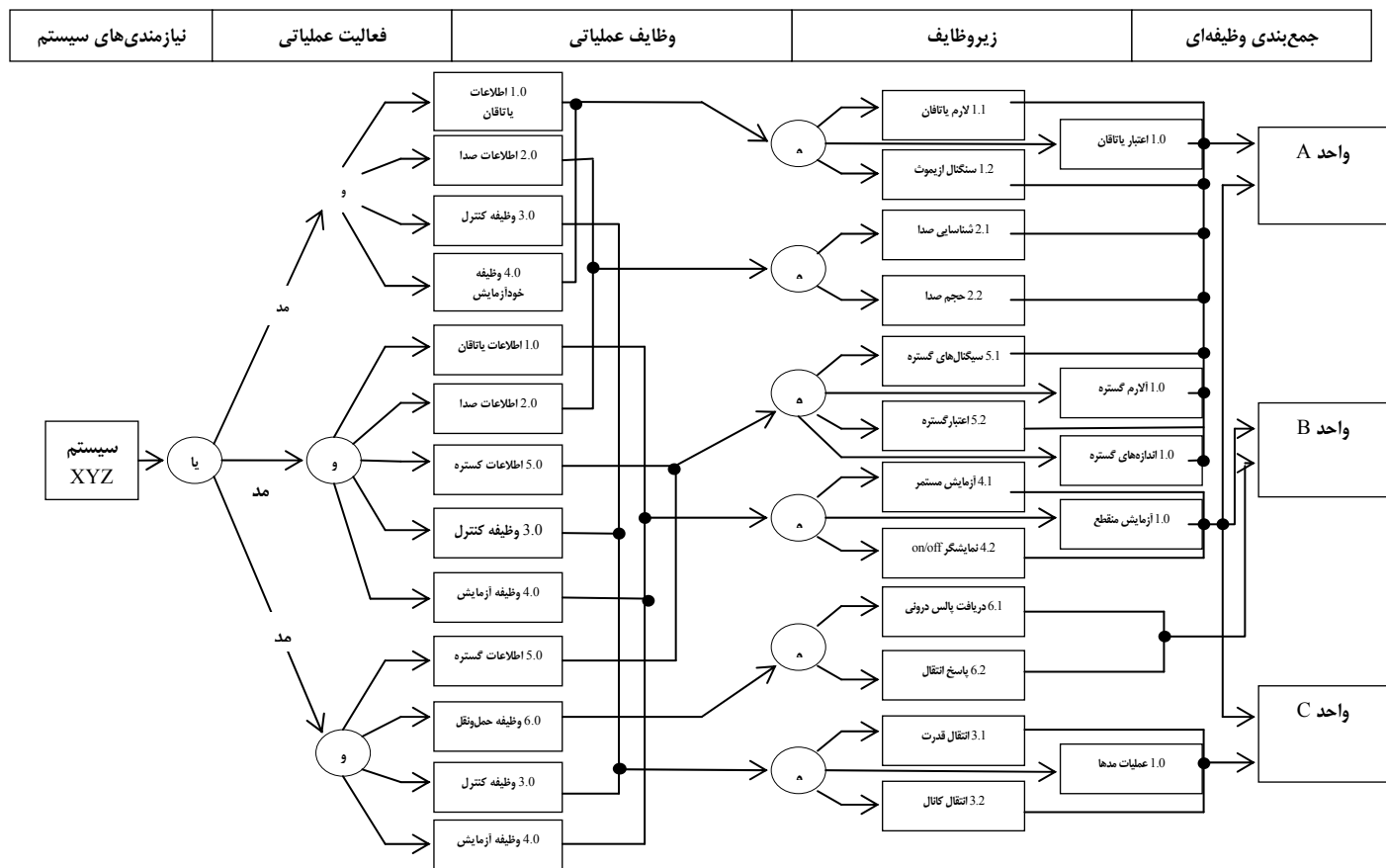
شماره فعالیت	تشریح فعالیت	ورودی‌های مورد نیاز	خروجی‌های مورد نیاز	نیازمندی‌های منابع
1.0	شناسایی نیاز	مطالعات مربوط به مشتری؛ ورودی‌های بازاریابی؛ واحد ارسال و خدمات؛ مطالعات بازار؛ تحقیقات در مورد محصول رقابتی.	بیان نیازها به صورت کمی و کیفی که پاسخ‌گوی نقص فعلی باشد. این نیاز باید به صورت عبارات وظیفه‌ای بیان شود.	الگوبرداری؛ تحلیل آماری داده‌ها (جمع‌آوری داده‌ها به عنوان نتایج بررسی‌ها و به دست آمده از گزارش‌های ارسال و خدمات، و غیره)
2.1	تحلیل نیازها و تعریف نیازمندی‌ها	بیان نیازها به صورت کیفی و کمی در قالب عبارات وظیفه‌ای	فاکتورهای کمی و کیفی مربوط به سطوح عملکردی سیستم، توزیع جغرافیایی محصول، پروفایل بهره‌برداری مورد انتظار، محیط کاربر/مصرف کننده، عملیات چرخه عمر، نیازمندی‌های اثربخشی، سطوح نگهداری و تعمیرات و	گسترش عملکرد کیفیت (QFD)، ماتریس‌های ورودی-خروجی، چک لیست‌ها؛ مهندسی ارزش؛ تحلیل آماری؛ تحلیل روندی؛ تحلیل ماتریسی؛ تحلیل پارامتری؛ گروه‌های متنوع مدل‌ها و ابزارهای تحلیل برای شبیه‌سازی؛ موازنه؛ و غیره

			پشتیبانی، ملاحظات عناصر کاربردی در پشتیبانی تدارکات، محیط پشتیبانی و غیره		
2.2	ترکیب گزینه‌های طراحی مفهومی سیستم	نتایج از تحلیل نیازها و فرایند تعریف نیازمندی‌ها؛ مطالعات تحقیقی فناوری؛ اطلاعات تامین کننده	شناسایی و تشریح گزینه‌های طراحی مفهومی و فناوری کاربردی	رویکرد تعمیم مفهوم Pugh؛ طوفان فکری؛ قیاس؛ چک لیست‌ها؛	
2.3	تحلیل گزینه‌های طراحی مفهومی سیستم	راه حل‌ها و فناوری‌های مفهومی کاندید؛ نتایج تحلیل نیازها و فرایند تعریف نیازمندی‌ها	تخمین مناسب بودن هر یک از راه حل‌های مفهومی نسبت به پارامترهای مستقیم و غیرمستقیم وابسته؛ این مناسب بودن می‌تواند از طریق نرخ‌های عددی، شاخص‌های احتمالی یا شاخص‌های فازی بیان شود	آزمایش غیر مستقیم سیستم (مدل سازی ریاضی یا شبیه سازی)؛ تحلیل پارامتری؛ تحلیل ریسک	
2.4	ارزیابی گزینه‌های طراحی مفهومی سیستم	نتایج حاصل از تحلیل ریسک در قالب مجموعه‌ای از گزینه‌های ممکن طراحی مفهومی سیستم	یک یا چند طراحی مفهومی سیستم ارجح؛ یک "احساس" از میزان بهتر بودن رویکرد(های) ارجح نسبت به دیگر گزینه‌های ممکن	رویکرد پارامتری وابسته به طراحی؛ تولید اعداد مختلط برای نشان دادن مناسب بودن یک راه حل کاندید؛ نمایش ارزیابی طراحی مفهومی سیستم	

شکل ۳-۴ - قالب مستندسازی که وظایف، نیازمندی‌های ورودی-خروجی، و نیازمندی‌های منابع



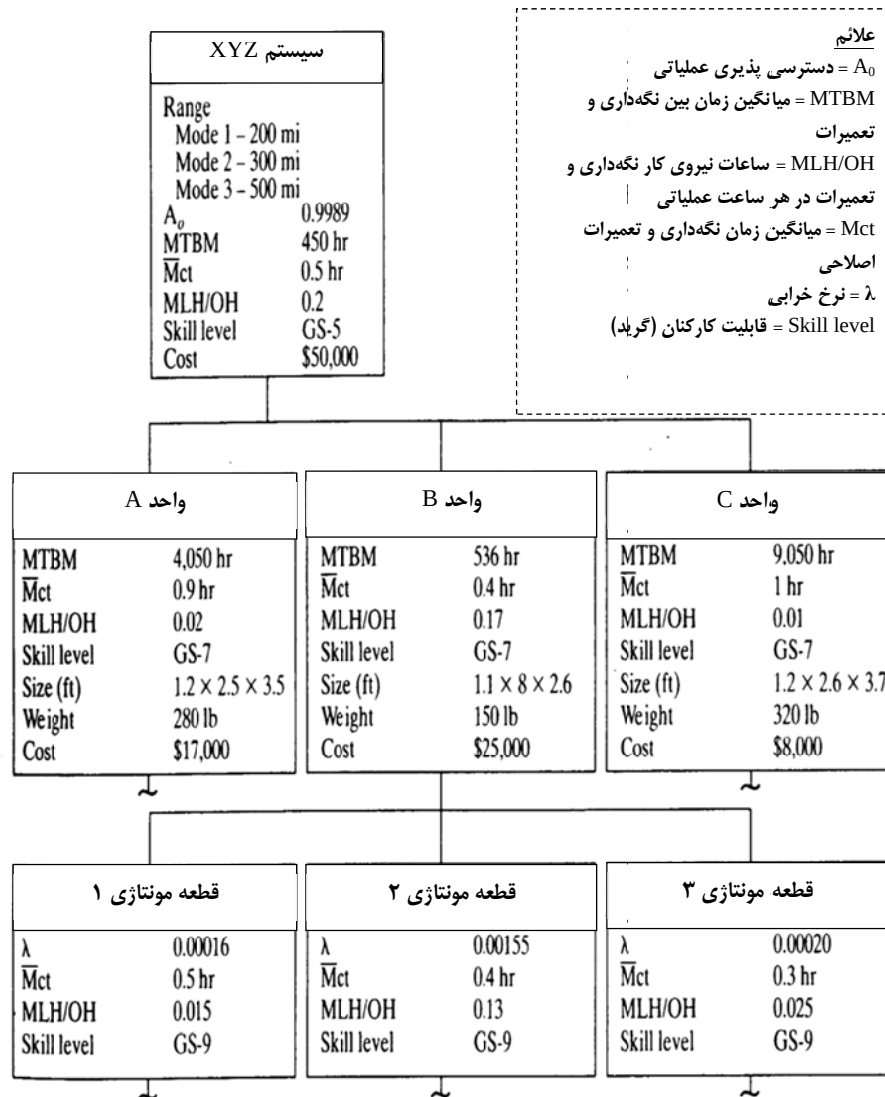
شکل ۴-۴- تکامل نیازمندی‌های سخت افزار، نرم افزار، و نیروی انسانی از تحلیل وظیفه‌ای



شکل ۴-۵- جمع بندی وظیفه ای سیستم به عناصر سیستم

با درک مفهوم جمع‌بندی در شکل ۴-۵، اکنون زمان مناسبی است که نیازمندی‌های طراحی برای هر یک از سه واحد تعیین گردد. این کار از طریق فرایند تخصیص صورت می‌پذیرد. در توسعه اهداف طراحی در سطح واحد، اولویت‌ها براساس TPM‌های سیستم ایجاد می‌شود، که در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است و هر دوی نیازمندی‌های کیفی و کمی مشخص می‌شوند. چنین نیازمندی‌هایی در ادامه منجر به مشارکت خصوصیات مناسب طراحی (صفات) در طراحی واحدهای A، B و C می‌شود. چنین خصوصیات طراحی، همان‌طور که در سلسله مراتب شکل ۲-۸ نشان داده شده است باید برای پاسخ به اهمیت نسبی هر یک از آن‌ها تنظیم شوند، زیرا هر کدام از آن‌ها، نیازمندی‌های سطح سیستم را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. این خصوصیات طراحی در ابتدا از بالا به پایین دیده شده و مقایسه می‌شوند. مطالعه‌های موازنه برای ارزیابی آثار تعامل انجام شده و خصوصیتی که بیش‌ترین اثر را در برآورده ساختن اهداف کل سیستم دارند، انتخاب می‌شوند.

شکل ۴-۶ مثالی را نشان می‌دهد که از فرایند تخصیص شرح داده شده حاصل شده است. TPM‌های سطح سیستم در راستای شاخص‌های طراحی برای هریک از واحدها و همچنین نیازمندی‌های قطعات مونتاژی ۱، ۲ و ۳ در واحد B شناسایی شده است. علاوه بر این، نیازمندی‌ها در سطح واحد مشخص شده و پس از آمیخته شدن باید با نیازمندی‌های سطوح بالاتر انطباق داشته باشد. بنابراین، روابط بالا به پایین و پایین به بالا وجود داشته و ممکن است موازنه‌های کاملی در سطح واحد انجام شود تا تعادل مناسبی از نیازمندی‌های کلی به‌دست آید. برآورده ساختن نیازمندی‌های کمی طراحی منجر به مشارکت خصوصیات مناسب در طراحی آیت‌م مورد بررسی می‌شود.



شکل ۴-۶- نیازمندی‌های تخصیص سیستم XYZ

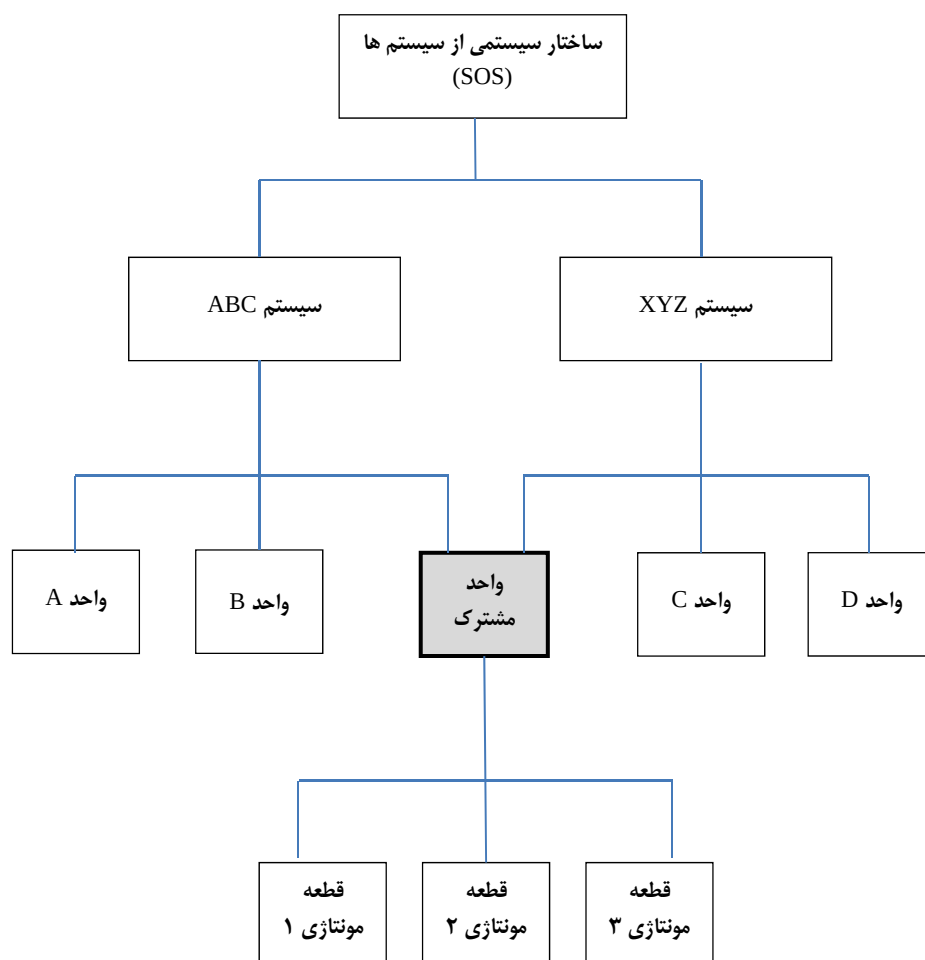
هدف از همراه کردن شکل ۴-۶ با همه شاخص‌ها تاکید بر *فرایند* و اهمیت آن در شروع طراحی سیستم است. اگرچه شاخص‌های نشان داده شده، اساساً به قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، دسترسی‌پذیری و فاکتورهای هزینه‌ی چرخه‌ی عمر طراحی بستگی دارد، باید توجه شود که در فرایند تخصیص، باید همه فاکتورهای عملکردی، قابلیت حفاظت، قابلیت امحاء، خصوصیات فیزیکی، بهره‌وری و غیره مدنظر قرار گیرد. برخی از این شاخص‌ها به‌صورت تفصیلی در بخش چهارم (فصول ۱۲ تا ۱۷) پوشش داده شده است و روابط داخلی آن‌ها، پس از مطالعه این فصول روشن‌تر می‌شود.

در شرایطی که تعداد سیستم‌ها در ساختار SOS زیاد باشد یا وظایف مشترک وجود داشته باشد، فرایند تخصیص اندکی پیچیده‌تر می‌شود. نه تنها باید نیازمندی‌های رهگیری از بالا به پایین و پایین به بالا برای سیستم در ساختار کلی برآورده شود، بلکه باید انطباق نیازمندی‌ها در سرتاسر سیستم مدنظر قرار گرفته شود. با مراجعه به شکل ۴-۷، دو سیستم وجود دارد، سیستم ABC و سیستم XYZ که در یک ساختار مشخص SOS قرار داشته و وظیفه‌ی مشترکی بین آن‌ها به اشتراک گذاشته شده است. در چنین وضعیتی، گزینه‌های زیادی ممکن است:

۱. یکی از سیستم‌هایی که در حال حاضر موجود بوده و عملیاتی است و طراحی براساس آن تثبیت می‌شود، در حالی که سیستم دیگر جدید است و در مراحل ابتدایی طراحی و توسعه قرار دارد. با فرض این که سیستم ABC در حال حاضر عملیاتی است، خصوصیات طراحی برای واحد شناسایی شده که در شکل "مشترک" نشان داده شده و به‌عنوان عنصر وظیفه‌ای سیستم ABC نیاز است، باید پابرجا بماند. این موضوع به‌نوبه‌ی خود اثر قابل‌توجهی بر اثربخشی سیستم XYZ خواهد داشت. برای برآورده کردن نیازمندی‌های کلی XYZ، فاکتورهای ورودی طراحی باید دقیق‌تر در طراحی واحد C و D برای سیستم جدید وارد شوند. یا یک واحد مشترک برای ایجاد انطباق نیازمندی‌های سطح بالای

XYZ اصلاح گردد که به‌نوبه‌ی خود بتواند اثربخشی عملیات سیستم ABC را تحت‌تاثیر قرار دهد. باید از برآورده شدن نیازمندی‌های هر دو سیستم ABC و XYZ اطمینان حاصل شود. این موضوع می‌تواند توسط استقرار یک نیازمندی ثابت برای واحد مشترک و توسط اصلاح نیازمندی‌های طراحی برای قطعه موتناژی ۱، ۲ و ۳ در همان واحد برای برآورده کردن نیازمندی‌های اختصاص داده شده در سیستم ABC و XYZ صورت پذیرد.

۲. هر دو سیستم ABC و XYZ جدید و هم‌زمان در حال توسعه باشند. فرایند تخصیص نمایش داده شده در شکل ۴-۶ در ابتدا توسط هریک از سیستم‌ها انجام شده و اطمینان حاصل می‌شود که نیازمندی‌های کلی در سطح سیستم استقرار یافته‌اند. خصوصیات طراحی برای "واحد مشترک" مقایسه شده و یک تک مجموعه از نیازمندی‌ها برای این واحد از طریق تحلیل‌های موازنه شناسایی می‌شود و نیازمندی‌ها برای هریک از واحدهای مختلف سیستم اصلاح شده و هم‌زمان از حفظ نیازمندی‌های سطح بالا اطمینان حاصل می‌شود. این کار شامل یک فرایند تکرار شونده از تحلیل، بازخورد و غیره است.



شکل ۴-۷- نیازمندی‌های تخصیص برای یک سیستم‌ها با وظیفه مشترک

به عنوان نقطه‌ی نهایی، آن نیازمندی‌های کمی و کیفی عناصر مختلف سیستم (زیرسیستم‌ها، واحدها و قطعات مونتاژی) باید در مشخصات فنی مناسب که در قسمت ۴-۲ (شکل ۴-۱) شناسایی شده است، قرار گیرد. به علاوه، یک رهگیری بالا به پایین / پایین به بالا از نیازمندی‌ها در سراسر ساختار سلسله مراتبی برای هر یک از سیستم‌ها باید موجود باشد.

۴-۳-۳ - کاربردهای تحلیل فنی

یکی از اهداف اصلی مهندسی سیستم‌ها، توسعه‌ی مجموعه‌ی کاملی از نیازهاست تا خطوط مبنای واحد را فراهم آورد و توسعه همه‌ی سطوح پایین‌تر تکامل یابد: یعنی توسعه‌ی خطوط مبنای وظیفه‌ای در طراحی مفهومی و سپس خطوط مبنای تخصیص در فاز طراحی اولیه سیستم (شکل ۴-۲). نتایج تحلیل وظیفه‌ای یک ورودی مورد نیاز برای تعدادی از فعالیت‌های مربوط به طراحی را که به طور متوالی اتفاق می‌افتد، تشکیل می‌دهد. شکست سیستم (و عناصرش) به واحدهای وظیفه‌ای حین جمع‌بندی وظیفه‌ای و توسعه یک ساختار با معماری باز از مهم‌ترین موضوعات هستند. هدف اصلی، توسعه یک ساختار است که بتواند در صورت نیاز به راحتی به روز شود (از طریق اضافه کردن فناوری جدید) و به راحتی از طریق چرخه‌ی عمرش پشتیبانی گردد (از طریق یک رویکرد نگهداری و تعمیرات ماژول بندی شده). علاوه بر این، تحلیل وظیفه‌ای، شالوده‌ای را فراهم می‌کند که بسیاری از کارهای تحلیلی بعدی و مستندسازی‌های مربوط به آن بر پایه‌ی آن صورت می‌گیرد که برخی از آن‌ها در این جا فهرست شده است:

۱. تحلیل قابلیت اطمینان: مدل‌های قابلیت اطمینان و نمودارهای بلوکی؛ مدهای خرابی، آثار و تحلیل حساسیت (FMECA^۱)؛ تحلیل درخت خطا (FTA)؛ پیش‌بینی قابلیت اطمینان (فصل ۱۲).

1. Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

۲. تحلیل قابلیت نگهداری و تعمیرات: مدل‌های قابلیت نگهداری و تعمیرات؛ نگهداری و تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان (RCM)؛ تحلیل سطوح خرابی (LORA)؛ تحلیل وظایف نگهداری و تعمیرات (MTA)؛ نگهداری و تعمیرات بهره‌ور (TPM)؛ پیش‌بینی قابلیت نگهداری و تعمیرات (فصل ۱۳).

۳. تحلیل فاکتورهای انسانی: تحلیل وظایف کاربر (OTA)؛ نمودارهای توالی عملیات (OSD)؛ تحلیل ایمنی/خطر؛ نیازمندی‌های آموزش کارکنان (فصل ۱۴).

۴. پشتیبانی نگهداری، تعمیرات و تدارکات: تحلیل زنجیره‌ی تامین و قابلیت پشتیبانی که منجر به تعریف نیازمندی‌های نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی می‌شود - اجزای یدکی/تعمیری و موجود انبار مرتبط با آن‌ها، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، تجهیزات حمل و نقل و جابه‌جایی، کارکنان نگهداری و تعمیرات، تسهیلات، داده‌های فنی، اطلاعات (فصل ۱۵).

۵. تحلیل قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت (فصل ۱۶).

۶. تحلیل مقرون به صرفه بودن: هزینه‌های چرخه‌ی عمر و هزینه‌ی مالکیت.

همه این فعالیت‌ها، همان‌طور که در بخش چهارم این کتاب تشریح شده است، وابسته و برپایه‌ی تحلیل وظیفه‌ای به‌عنوان یک ورودی است.

۴-۴- معیارهای طراحی اولیه

هدف(های) اصلی طراحی برای سیستم و عناصر آن باید (۱) با نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی و TPM‌های اولویت‌بندی شده مطابقت داشته باشد؛ (۲) با معیارهای طراحی اختصاص داده شده در قسمت ۳-۳-۲ موافقت داشته باشد؛ و (۳) همه نیازمندی‌های در مختصات فنی مختلف را برآورده سازد. خصوصیات خاص طراحی که باید در نظر گرفته شود از یک نمونه به دیگر فرق می‌کند و به نوع و پیچیدگی سیستم و مأموریت یا هدفی

که باید اجرا کند، بستگی دارد. در همه موارد، فعالیت تیم طراحی باید خروجی‌های نهایی چرخه‌ی عمر را مدنظر قرار داده و فازهای تولید و ساخت، بهره‌برداری و پشتیبانی حفاظت و از کاراندازی و بازیافت/ امحای مواد را مدنظر قرار دهند. اگرچه همه ملاحظات طراحی سیستم باید مورد بررسی قرار گیرند (شکل ۲-۶)، برخی از آن‌ها نیاز به تاکید بیش‌تری دارند:

۱. *طراحی برای قابلیت وظیفه‌ای* - قابلیت وظیفه‌ای از خصوصیات طراحی اقتباس گرفته می‌شود که به عملکرد فنی سیستم مربوط است؛ یعنی خصوصیات فنی که برای سیستم موردنیاز است تا ماموریت‌های موردنظر را به انجام رساند. این موضوع‌ها عبارت‌اند از فاکتورهایی مانند اندازه، وزن، حجم، شکل، دقت، ظرفیت، نرخ جریان واحدها در هر دوره‌ی زمانی، سرعت سفر، خروجی منبع برق و همه خصوصیات فنی و فیزیکی که سیستم (در حالت عملیاتی) باید از خود نشان دهد تا هدف(های) موردنظر را به انجام رساند. قابلیت وظیفه‌ای، موضوع اصلی و مرکز توجه طراحی هوافضا، طراحی عمرانی، طراحی شیمیایی، طراحی الکترونیکی، طراحی مکانیکی، طراحی سازه‌ای و غیره است.

۲. *طراحی برای قابلیت تطبیق*^۱ - قابلیت تطبیق، وابسته به قابلیت سیستم در انجام عملیات موفق در محیطی است که تعداد زیادی از دیگر سیستم‌های عملیاتی وجود داشته باشند. هدف، حداقل کردن آثار تعامل بین سیستم جدید و سیستم‌های موجود است؛ یعنی اثر این سیستم جدید بر دیگر سیستم‌های عملیاتی موجود و همچنین آثار خارجی دیگر سیستم‌ها بر سیستم جدید.

1. Interoperability

۳. *طراحی برای قابلیت حفاظت* - قابلیت حفاظت چنین تعریف می‌شود: پایداری عملیات و پشتیبانی سیستم‌ها در سرتاسر چرخه‌ی عمر بدون ایجاد صدمه در محیط یا منابع طبیعی زمین. فرض آن است که هر منبعی که در ابتدا مصرف می‌شود باید قابل جایگزینی باشد. هدف، طراحی یک سیستم است که ضایعات، گازهای گلخانه‌ای، مواد سمی، آلودگی هوا و آب و هر فاکتور دیگری که باعث ایجاد صدمه به محیط می‌شود، در آن حذف گردد. عبارات دیگری که این حوزه از فعالیت را تعریف می‌کنند عبارت‌اند از *مهندسی محیط زیست، مهندسی سبز، مهندسی قابلیت حفاظت*. طراحی برای قابلیت حفاظت در فصل ۱۶ پیش‌تر بحث خواهد شد.

۴. *طراحی برای قابلیت اطمینان* - قابلیت اطمینان خصوصیتی از طراحی و راه‌اندازی است که با اجرای عملیات موفقیت‌آمیز سیستم در طول مأموریت برنامه‌ریزی شده و طی چرخه‌ی عمر سیستم سروکار دارد. قابلیت اطمینان (R) اغلب به‌صورت احتمال موفقیت بیان شده و یا در قالب عباراتی مانند *میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)*، *میانگین زمان تا خرابی (MTTF)*، *نرخ خرابی (λ)* و یا ترکیبی از این موارد تعریف می‌شود. فصل ۱۲ طراحی برای قابلیت اطمینان را مورد بحث قرار می‌دهد.

۵. *طراحی برای قابلیت نگهداری و تعمیرات* - قابلیت نگهداری و تعمیرات، خصوصیتی از طراحی و راه‌اندازی است که منعکس‌کننده‌ی راحتی، دقت، ایمنی و اقتصادی بودن کارهای نگهداری و تعمیرات است. قابلیت نگهداری و تعمیرات از طریق شاخص‌هایی مانند زمان‌های نگهداری و تعمیرات (*میانگین زمان نگهداری و تعمیرات اصلاحی یا Mct*، *میانگین زمان نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه M*، *حداکثر زمان نگهداری و تعمیرات Mmax*، و *کل زمان از کارافتادگی برای نگهداری و تعمیرات یا MDT*)؛ فراوانی نگهداری و تعمیرات (*میانگین زمان بین نگهداری و تعمیرات یا MTBM*)؛

نیروی کار نگهداری و تعمیرات (نفر ساعت نگهداری و تعمیرات یا MLH)؛ و/یا هزینه نگهداری و تعمیرات تعریف می‌شود. هدف حداقل ساختن زمان‌ها و نفر ساعات نگهداری و تعمیرات و حداکثر کردن خصوصیت قابلیت حفاظت سیستم است (به‌طور مثال قابلیت دسترسی، تدارکات کشف خطا، استاندارد کردن، قابلیت مبادله)، حداقل کردن منابع تدارکاتی موردنیاز برای پشتیبانی در مشخصات فنی نگهداری و تعمیرات (به‌طور مثال قطعات یدکی و موجودی‌های پشتیبانی، تجهیزات آزمایش، کارکنان نگهداری و تعمیرات و تسهیلات) و حداقل کردن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات. فصل ۱۳ این موضوع را بررسی می‌کند.

۶. *طراحی برای قابلیت بهره برداری و ایمنی* - قابلیت بهره‌برداری خصوصیتی از سیستم است که با واسطه‌های بین انسان و سخت‌افزار، انسان و نرم‌افزار، انسان و تسهیلات، انسان و اطلاعات و غیره سروکار دارد؛ یعنی حصول اطمینان از وجود تطابق و ایمنی بین سیستم فیزیکی و ویژگی‌های وظیفه‌ای طراحی و عناصر انسانی در عملیات، نگهداری و تعمیرات و پشتیبانی سیستم. ملاحظات باید شامل موضوعات ابعاد بدن انسان، احساسات انسان، فاکتورهای فیزیولوژی باشد که در بحث قابلیت عملیاتی شدن و قابلیت حفاظت سیستم اعمال می‌شود. هدف، به حداقل رساندن نیاز به تعداد افراد و سطح مهارت آن‌ها، حداقل کردن نیازمندی‌های آموزشی و حداقل کردن خطای انسانی و در مقابل حداکثر کردن بهره‌وری و ایمنی است. فصل ۱۴ این موضوعات را به تفصیل پوشش می‌دهد.

۷. *طراحی برای امنیت* - امنیت در موضوع مورد مطالعه، وابسته به خصوصیتی از طراحی است که مانع از افرادی می‌شود که قصد دارند تا عمداً در سیستم خطا ایجاد کنند،

سیستم را منهدم نمایند، به کارکنان صدمه بزنند و/ یا اثری ایجاد کنند که جامعه و محیط را به خطر اندازد. این خصوصیات باید شامل یک قابلیت سیستم اعلان خطر خارجی باشد که حضور افراد متفرقه را شناسایی کرده و از دسترسی آن‌ها به سیستم ممانعت به عمل آورد، یک قابلیت پایش بر پایه وضعیت وجود داشته باشد که وضعیت سیستم و عناصر آن را به طور پیوسته بررسی کند و یک قابلیت داخلی تشخیص خطا داشته باشد که به طور مستقیم علت مشکل را شناسایی کرده و در ادامه خود را تعمیر کرده یا تعمیر سریع سیستم صورت پذیرد.

۸. *طراحی برای قابلیت پشتیبانی و سرویس‌دهی* - قابلیت پشتیبانی و سرویس‌دهی به خصوصیتی از طراحی اطلاق می‌شود که تضمین می‌کند سیستم در نهایت به صورت کارا و اثربخش در سراسر چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده پشتیبانی و سرویس‌دهی می‌شود. هدف، در نظر گرفتن هر دوی آن‌ها در خصوصیات داخلی عناصر اصلی سیستم (تجهیزات، نرم‌افزار، تسهیلات و کارکنان مورد استفاده در عملیات و به سرانجام رساندن مأموریت) و طراحی زیربنای پشتیبانی تدارکات، نگهداری و تعمیرات است. قابلیت پشتیبانی شامل ملاحظات و اجرای قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات و فاکتورهای انسانی در طراحی است. طراحی برای قابلیت پشتیبانی در فصل ۱۵ مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۹. *طراحی برای قابلیت تولید و امحا* - قابلیت تولید خصوصیتی از طراحی است که به راحتی و اقتصادی بودن تولید یک محصول یا یک سیستم مربوط می‌شود. هدف طراحی، ایجاد یک موجودیت به طریقی ساده و اقتصادی، با استفاده از روش‌ها و فرایندهای منعطف و رایج بدون قربانی کردن وظیفه، عملکرد، اثربخشی یا کیفیت است. این

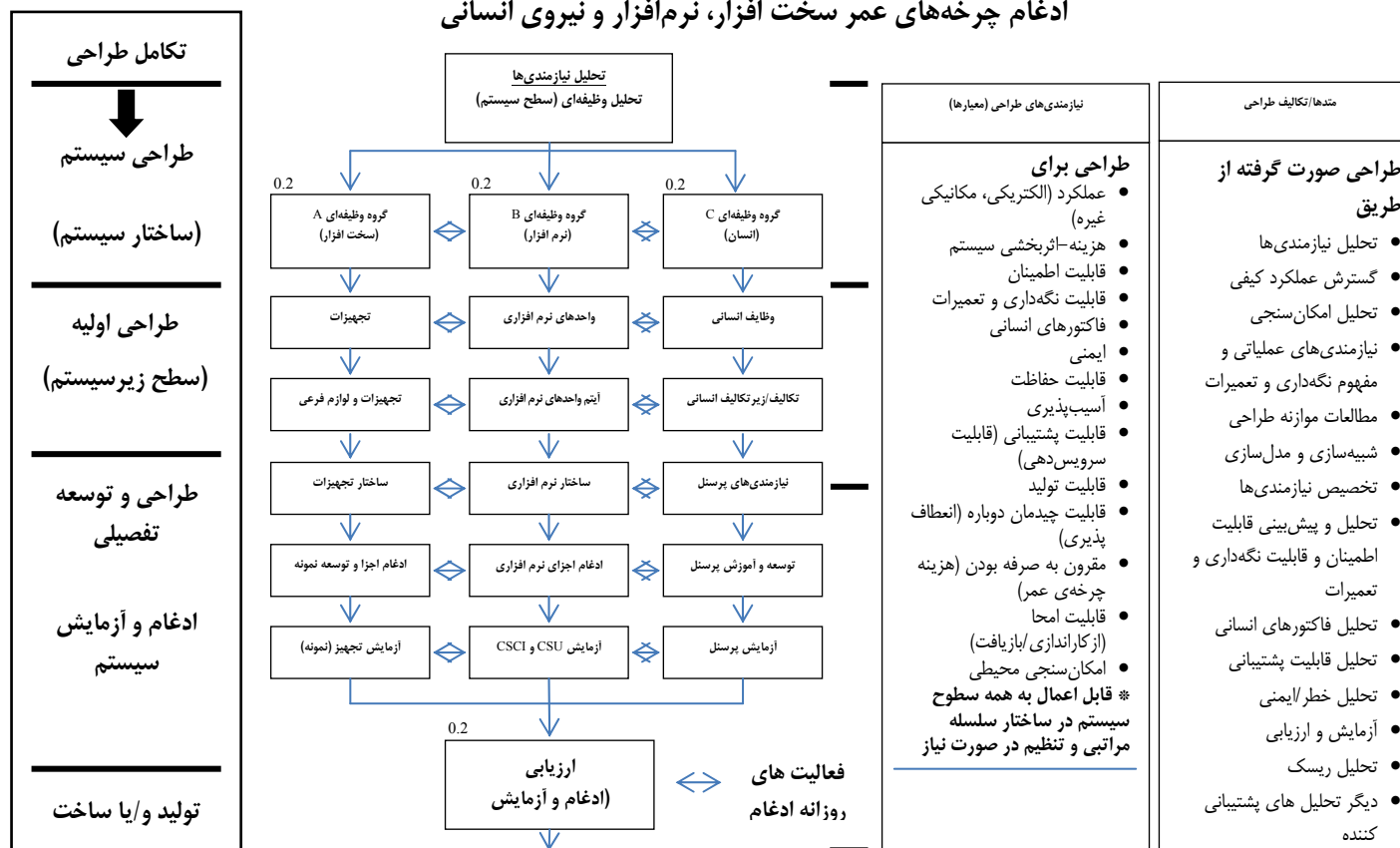
ملاحظات عبارت‌اند از بهره‌برداری از بخش‌های استاندارد، ساخت و بسته‌بندی برای راحتی مونتاژ (و دیمونتاژ)، استفاده از تجهیزات و ابزار استاندارد در تولید و غیره. قابلیت امحاء خصوصی از طراحی است که اجازه می‌دهد عناصر یا اجزای سیستم به‌سادگی، به‌سرعت و به‌روشی اقتصادی بدون ایجاد خسارت به محیط از هم جدا شده و امحاء شوند. طراحی برای قابلیت تولید و امحاء در بخش ۱۶ پوشش داده شده است.

۱۰. طراحی برای مقرون به‌صرفه بودن - امکان‌سنجی اقتصادی (یا مقرون به‌صرفه بودن) به خصوصی از طراحی و راه‌اندازی اطلاق می‌شود که بر هزینه‌ی کل سیستم و محدودیت‌های سرمایه‌ای اثرگذار است. هدف، توجه به تصمیم‌های طراحی بر پایه‌ی هزینه‌ی کل چرخه‌ی عمر سیستم است نه فقط هزینه اکتساب سیستم (یا قیمت خرید). امکان‌سنجی اقتصادی به مشارکت تنظیم و ترکیب شده‌ی قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی، قابلیت پشتیبانی، قابلیت تولید و دیگر خصوصیات طراحی بستگی دارد. طراحی برای امکان‌سنجی اقتصادی در فصل ۱۷ به‌صورت تفصیلی تشریح شده است.

رسیدن به هدف کلی طراحی سیستم نیازمند یک *توازن* مناسب میان همه‌ی این فاکتورها و فاکتورهای متعدد دیگر می‌باشد که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. نیازمندی‌های عملکردی، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات، نیازمندی‌های فاکتورهای انسانی، نیازمندی‌های قابلیت پشتیبانی، نیازمندی‌های قابلیت حفاظت و غیره از این جمله هستند و دستیابی به توازن مناسب میان آن‌ها اغلب سخت و دشوار است. زیرا برخی از اهداف بیان شده به نظر در نقطه‌ی مقابل اهداف دیگر هستند. برای مثال، استفاده از طراحی با عملکرد بالا و وظایف پیچیده، قابلیت اطمینان را کاهش داده و نیازمندی‌های پشتیبانی تدارکات و هزینه‌ی چرخه‌ی عمر را افزایش می‌دهد؛ قابلیت اطمینان بیش از حد، نیازمند استفاده از اجزای سیستمی

پرهزینه بوده و در نتیجه هزینه‌ی اکتساب و هزینه‌ی چرخه‌ی عمر را افزایش می‌دهد، قابلیت دسترسی بالا، قابلیت نگهداری و تعمیرات را افزایش داده، اما ممکن است باعث افزایش قابل توجه اندازه و وزن تجهیزات گردد. هدف انجام مطالعات موازنه لازم و به‌کارگیری آن ویژگی‌هایی است که برای برآوردن نیازمندی‌ها ضروری است – نه خیلی زیاد نه خیلی کم. باید توجه شود که افراط و تفریط در طراحی صورت نگیرد.

شکل ۴-۸ تعمیمی از مفاهیم شکل‌های ۴-۲ و ۴-۴ است. با مراجعه به شکل ۴-۴، تأکید بر سه چرخه‌ی عمر (یعنی سخت‌افزار، نرم‌افزار و انسان) مشاهده می‌شود که از سطح سیستم به سطح زیرسیستم تکامل می‌یابد. وقتی در فرایند طراحی پیش می‌رویم، خصوصیات خاص طراحی برای هر سطح باید تعریف شود (شکل ۴-۶). ساختار قابلیت اطمینان در هر سطحی مهم است، همین‌طور ملاحظات قابلیت نگهداری، تعمیر و غیره و خصوصیات متنوع باید در حرکت به پایین تکمیل‌کننده باشند. این خصوصیات همچنین باید تخصیص نیازمندی‌های شناسایی شده در شکل ۴-۶ را پشتیبانی کند. در نهایت، خصوصیات مناسب طراحی شناسایی شده در سطح باید در مشخصات فنی توسعه‌ی محصول یا مواد حضور داشته باشند. همچنین شکل ۴-۸ برخی از فعالیت‌ها و روش‌های طراحی استفاده شده برای کمک به دستیابی نهایی به اهداف کلی طراحی سیستم شناسایی شده است.



شکل ۴-۸ شکست نیازمندی‌های طراحی توسط سیاهه سطح سیستم (به شکل ۴-۴ مراجعه کنید)

۴-۵- فعالیت طراحی مهندسی

فعالیت‌های روزانه طراحی با استقرار برنامه‌ریزی مناسب که در فاز طراحی مفهومی (یعنی برنامه‌های مدیریت مهندسی سیستم و مدیریت دستورکار که در شکل‌های ۲-۴ و ۳-۱ شناسایی گردید) ایجاد شده است، آغاز می‌شود. این کار عبارتست از استقرار تیم طراحی و آغاز تکالیف مشخص طراحی، روابط نظام‌مند مستمر و کار با طراحان مختلف مسئول در سرتاسر سازماندهی پروژه، توسعه داده‌های طراحی، اجرای بازبینی‌های دوره‌ای طراحی و آغاز اصلاحات لازم.

موفقیت در مهندسی سیستم‌ها از درک این موضوع که فعالیت‌های طراحی نیازمند یک رویکرد تیمی است، اقتباس می‌شود. با پیشرفت از طراحی مفهومی به فازهای بعدی در چرخه‌ی عمر، شاکله‌ی حقیقی تیم در قالب تخصص‌های مشخص موردنیاز و تعداد کارکنان تخصیص داده به پروژه متغیر است. در فازهای ابتدایی طراحی مفهومی و اولیه، به تعداد اندکی از افراد با صلاحیت بالا با دانش جامع فنی نیاز است، افرادی که نیازمندی‌های مشتری و محیط عملیاتی مشتری، عناصر وظیفه‌ای اصلی سیستم و روابط واسطه‌ای و فرایند عمومی خلق یک سیستم را درک می‌کنند. این افراد کلیدی، آن‌هایی هستند که رویکرد سیستم را می‌فهمند و به آن اعتقاد دارند و می‌دانند چه زمانی از تخصص‌های عملی مناسب کمک گیرند. هدف این است که همه‌ی نیازمندی‌های طراحی که در قسمت ۴-۴ تشریح شده در نظر گرفته شود.

با پیشرفت طراحی، نیاز برای علوم طراحی مختلف افزایش پیدا می‌کند، با مراجعه به شکل ۴-۹ (که تعمیمی از شکل ۲-۶ است)، یک هدف پیاده‌سازی مهندسی سیستم حصول اطمینان از ادغام مناسب علوم طراحی بر طبق نیاز است. بسته به پروژه، ممکن است افراد نسبتاً محدودی مورد استفاده قرار گرفته یا صدها نفر در کار طراحی دخیل باشند. به‌علاوه، برخی از تخصص‌های مطلوب ممکن است در یک تسهیل فیزیک خاص گنجانده شده باشد، در حالی که اعضای دیگر تیم پروژه از راه دور به انجام تکالیف خود بپردازند (هم محلی هم بین المللی). در سیستمی از

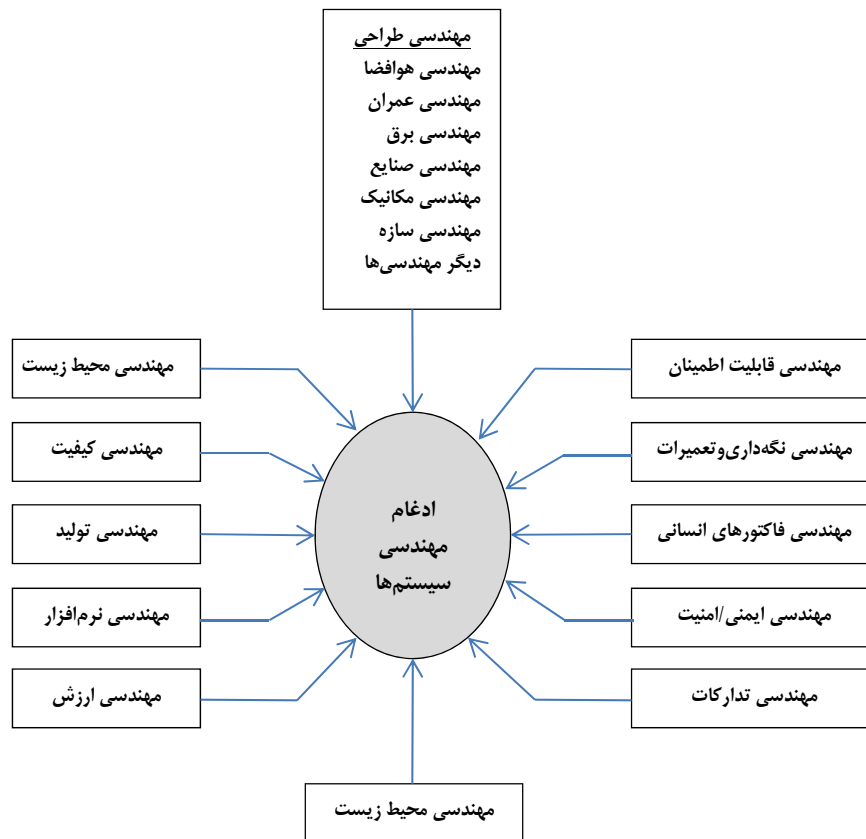
سیستم‌ها یا یک SOS، تیم پروژه ممکن است نیاز به افرادی داشته باشد که در واسطه‌های سیستم تخصص داشته باشند.

هدف عمده‌ی پیاده‌سازی فرایند مهندسی سیستم عبارتست از: (۱) درک نیازمندی‌های سیستم و انتظارات مشتری و (۲)، فراهم آوردن راهنمای فنی لازم برای حصول اطمینان از این که ساختار نهایی سیستم نیازها را برطرف ساخته است. تحقق این هدف به تدارک کارکنان و منابع درست در مکان درست و در زمان مناسب بستگی دارد. چنین منابعی می‌تواند شامل ترکیبی از موارد زیر باشند:

۱. تخصص فنی مهندسی (به‌طور مثال مهندسان هوافضا، مهندسان عمران، مهندسان برق، مهندسان مکانیک، مهندسان نرم‌افزار، مهندسان قابلیت اطمینان، مهندسان تدارکات، و مهندسان محیط زیست)

۲. پشتیبانی فنی مهندسی (به‌طور مثال تکنسین‌ها، متخصصان اجزاء، برنامه نویسان رایانه‌ای، مدل‌سازان، کارکنان طراحی، تکنسین‌های آزمایش، و تحلیل‌گران داده).

۳. پشتیبانی غیرفنی (به‌طور مثال بازاریابی، تدارکات و خرید، قراردادهای حسابداری و برنامه و بودجه، روابط صنعتی، کارکنان تولیدی، متخصصان زنجیره تامین).



شکل ۴-۹- ادغام علوم مهندسی

با هر موردی که مواجه باشیم، هدف مهندسی سیستم‌ها، ارتقای رویکرد تیمی و ایجاد محیط کار مناسب برای ارتباطات پیوسته و ضروری و همچنین تبادل اطلاعات به‌صورت پیوسته و روزانه است. شکل ۴-۹ مثالی از وظیفه‌ی ادغام موردنیاز بوده و مهندس سیستم باید در مورد علوم مختلف، اهداف نسبی آن‌ها و زمان ادغام این نیازمندی‌ها در فرایند کلی طراحی، دانش کافی داشته باشد. سازماندهی مهندسی سیستم‌ها به‌طور مفصل در فصل ۱۸ بحث شده است.

۴-۶- فناوری‌ها و ابزارهای طراحی مهندسی

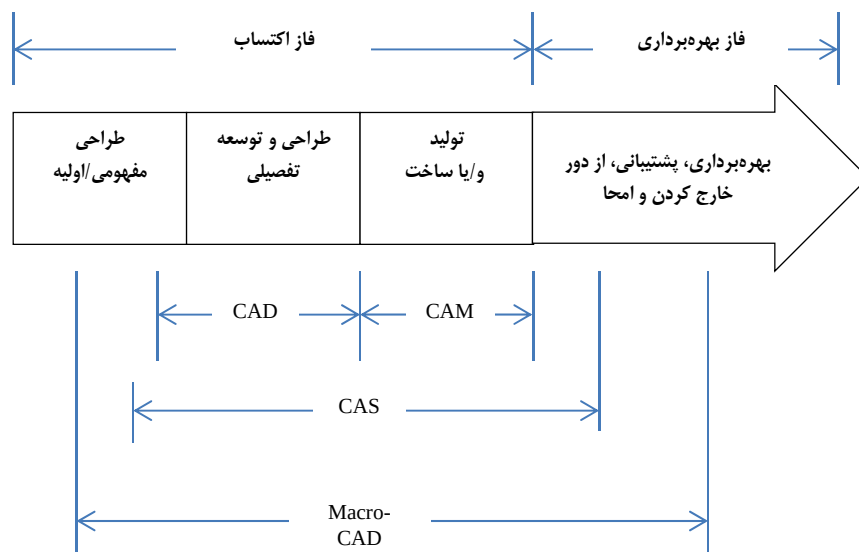
پیاده‌سازی موفق مهندسی سیستم‌ها تا حد زیادی به انتخاب و استفاده از مدل‌های تحلیل و ابزارهای رایانه‌ای مناسب در اجرای تکالیف ضروری بسیاری از دستورکارها بستگی دارد. نقاط کلیدی محدود و وابسته به ابزارهای رایانه‌ای و مدل‌های تحلیل در این قسمت ارائه شده است.

۴-۶-۱- کاربرد ابزارهای رایانه‌ای

همان‌طور که در قسمت ۲-۵ بحث شد، تیم طراحی باید گستره‌ی وسیعی از مسائل را حل کرده و گزینه‌های زیادی را در زمانی محدود ارزیابی کنند و در عین حال باید سیستمی طراحی کنند که همه نیازمندی‌ها را به‌صورت اثربخش و کارا برآورده کرده و در سطح جهانی رقابتی باشد. برآورده کردن این چالش، نیاز به استفاده از گستره‌ی وسیعی از طراحی‌ها به کمک رایانه دارد. دسته‌های عمومی روش‌های مبتنی بر رایانه عبارت‌اند از مهندسی به کمک رایانه (CAE)، طراحی به کمک رایانه (CAD)، اطلاعات طراحی به کمک رایانه (CADD)، تولید به کمک رایانه (CAM)، پشتیبانی به کمک رایانه (CAS)، مدل‌سازی هندسی به کمک رایانه (مدل‌سازی پارامتری بر پایه ویژگی) و هر ابزار مشابه با قابلیت‌های برابر.

استفاده از رایانه در فرایند طراحی، امروزه به بلوغ رسیده است و برای تولید نقشه‌ها و نمایش گرافیکی سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا تحلیل‌های بسیار مختلفی را به انجام رسانند مانند آن‌هایی که در بخش چهارم این کتاب مورد بررسی قرار می‌گیرند، مانند تولید فهرست مواد و قطعات، پشتیبانی وظایف و موارد بسیار دیگر که مربوط به پشتیبانی طراحی، هم با طبیعتی فنی و هم با طبیعتی اداری است. با این حال، کاربردهای متنوع ذکر شده به روشی کاملاً ادغام شده صورت نمی‌پذیرد. یک برنامه‌ی رایانه‌ای برای تولید نمایش گرافیکی سه بعدی توسعه یافته، دیگری برای تولید نقشه‌های طراحی، دیگری برای تحلیل قابلیت اطمینان، دیگری برای تولید فهرست قطعات و اجزا و غیره. به‌علاوه، نیازمندی‌های زبان و قالب‌های هر برنامه با دیگری

متفاوت بوده و محدودیت‌هایی در ادغام این روش‌های طراحی وجود دارد. عبارت جزیره‌های خودکارسازی در بسیاری از زمینه‌ها حقیقت را بیان می‌کند. یکی از اهداف مطلوب پیاده‌سازی فرایند مهندسی سیستم‌ها، انجام فعالیت‌ها به صورت اثربخش، کارا و به روشی یکپارچه است. این هدف نه تنها به دانش فرد از نیازمندی‌های فرایند و پیاده‌سازی، بلکه به در دسترس بودن ابزارهای مناسب در زمان درست و با پشتیبانی منابع موردنیاز وابسته است. یک رویکرد ادغامی چرخه‌ی عمر در استفاده از روش‌های رایانه‌ای نیاز است. یکی از روش‌های انعکاس چنین رویکردی از طریق مفهوم Macro-CAD محقق می‌شود که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰- روابط CAD، CAM، CAS، و Macro-CAD

هدف Macro-CAD ایجاد اتصال بین تصمیم‌های طراحی در ابتدای چرخه‌ی عمر با خروجی‌های عملیاتی با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی است. این رویکرد، یک رویکرد شدنی است، زیرا بدنه بزرگی از دانش در مورد مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملیاتی در دسترس است. موضوع کلیدی در این‌جا پیش‌بینی و/یا تخمین مقادیر پارامترهای وابسته به طراحی برای هر کدام از گزینه‌های طراحی است که پیرو بهینه‌سازی به‌موقع در متغیرهای طراحی است. برای هر مجموعه از مقادیر پارامترهای سیستم وابسته به طراحی می‌توان یک مقدار بهینه مشخص کرد تا در ارزیابی شاخص‌ها مورد استفاده قرار گیرد. با مقایسه‌ی این مقادیر بهینه در یک مجموعه از گزینه‌های موجود براساس معیارها، ساختار طراحی ارجح انتخاب می‌شود. پیاده‌سازی الگوریتمی و ریاضی برای ارزیابی طراحی در بخش دوم بیش‌تر توسعه می‌یابد.

به‌طور خلاصه، استفاده از CAD، CAM، CAS و روش‌های مرتبط، به‌صورت ادغامی پیاده‌سازی شده و مزیت‌های فراوانی دارد. برخی از آن‌ها در زیر ارائه شده‌اند:

۱. طراح می‌تواند گزینه‌های زیادی را در بازه‌ی نسبتاً کوتاهی از زمان مورد بررسی قرار دهد. با قابلیت ارزیابی تعداد بیش‌تر گزینه‌های ممکن، ریسک تصمیم‌گیری در مورد طراحی کاهش می‌یابد.
۲. طراحی قادر خواهد بود با استفاده از نمایش‌های سه بعدی، ساختارهای بیش‌تری را شبیه‌سازی، تصدیق اعتبار و طراحی کند. با به‌کارگیری پایگاه‌های داده الکترونیکی برای تسهیل این هدف می‌توان نیاز به ایجاد یک مدل فیزیکی را از بین برد و در نتیجه هزینه‌ها را کاهش داد.
۳. قابلیت برای ایجاد تغییرات در طراحی ارتقا یافته و هم زمان انجام طراحی را کاهش داده و هم دقت نمایش داده‌ها را بهبود می‌بخشد. اگر جریان اطلاعات به خوبی ادغام

شده باشد، تغییرات در سراسر پایگاه داده منعکس می‌شود. همچنین، ایجاد یک تغییر به طرز محسوسی ساده می‌شود.

۴. کیفیت اطلاعات طراحی، هم از جهت روش‌های نمایش اطلاعات و هم در ایجاد دوباره‌ی هر یک از عناصر اطلاعاتی بهبود می‌یابد. دسترسی‌پذیری بهبود یافته پایگاه‌های داده در ابتدای چرخه‌ی عمر، آموزش کارکنان پروژه را تسهیل می‌کند و نه تنها امکان تشریح بهتر طراحی به روش‌های گرافیکی فراهم می‌شود، بلکه یک پایگاه داده مشترک کمک می‌کند تا تضمین شود همه فعالیت‌ها در مسیر خطوط مبنای یکسانی حرکت می‌کنند.

۴-۶-۲- مدل‌های تحلیلی و مدل‌سازی

فرایند ارزیابی طراحی می‌تواند از طریق مدل‌ها، روش‌ها و ابزارهای تحلیلی (به‌عنوان پشتیبان اهداف Macro-CAD) بیش‌تر تسهیل شود. یک مدل در این زمینه، یک نمایش ساده شده از دنیای واقعی است که ویژگی‌های شرایط واقعی مربوط به مساله را تحلیل می‌کند. این ابزاری است که توسط یک تحلیلگر به کار گرفته می‌شود تا عواقب گزینه‌های مختلف را در عمل مورد آزمایش قرار دهد. مدل باید از مساله در دست اقتباس شده و خروجی باید به سمت معیارهای ارزیابی انتخاب شده گرایش داشته باشد. در خود مدل تصمیم‌گیرنده وجود ندارد، اما ابزاری را فراهم می‌کند که اطلاعات لازم در پشتیبانی فرایند تصمیم‌گیری را در زمانی معقول فراهم می‌کند.

حد تعمیم مدل به طبیعت مساله، تعداد متغیرها، روابط پارامتری ورودی، تعداد گزینه‌ها برای ارزیابی و پیچیدگی عملیات بستگی دارد. هدف نهایی انتخاب و توسعه مدلی است که ساده و مفید باشد.

مدل مورد استفاده باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

۱. مدل باید پویایی ساختار سیستم مورد ارزیابی را طوری نمایش دهد که به حد کافی برای فهم و دستکاری کردن ساده بوده و به واقعیت عملیات نزدیک باشد تا نتایج خوبی به دست آید.
۲. مدل باید فاکتورهایی را برجسته کند که بیشترین ارتباط را به مساله در دست داشته و از آن‌هایی که اهمیت زیادی ندارند، چشم‌پوشی کند.
۳. مدل باید کامل باشد یعنی همه فاکتورهای مربوطه را شامل شود و از نقطه نظر قابلیت تکرار نتایج قابل اتکا باشد (یعنی هنگامی که ورودی ثابتی به مدل داده می‌شود، نتیجه یکسانی به دست آید).
۴. طراحی مدل باید به حد کافی ساده باشد تا حل مساله در زمانی معقول را مهیا سازد. تا زمانی که ابزار نتوانند در مدت زمان معقول و به صورت کارا توسط تحلیلگر مورد استفاده قرار گیرند، مدل ارزشی ندارد. اگر مدل بزرگ و خیلی پیچیده باشد، بهتر است که یک سری از مدل‌ها توسعه داده شود که خروجی هریک را بتوان به عنوان ورودی دیگری مورد استفاده قرار داد. همچنین، ممکن است ارزیابی یک عنصر خاص از یک سیستم که به دیگر عناصر وابسته نیست، مطلوب باشد.
۵. طراحی مدل باید مقدمات لازم برای راحتی در اصلاح و تعمیم مدل را داشته باشد تا بتوان فاکتورهای اضافه شده را در صورت نیاز ارزیابی کرد. توسعه‌ی موفقیت آمیز مدل اغلب پیش از برآورده کردن هدف کلی، مشمول یک سری از آزمایش‌ها می‌شود. تلاش‌های اولیه ممکن است به شکاف‌های اطلاعاتی اشاره داشته باشند که در ابتدا به نظر قیامده و در نتیجه تغییرات مفیدی را بطلبد.

استفاده از مدل‌های ریاضی منافع زیادی دارد. از جهت کاربرد سیستم، ملاحظات زیادی وجود دارد - ملاحظات عملیاتی، ملاحظات طراحی، ملاحظات تولید/ساخت، ملاحظات آزمایش کردن، ملاحظات پشتیبانی و ملاحظات بازیافت و امحا. تعداد زیادی از عناصر با روابط داخلی وجود دارند که باید به صورت یک سیستم ادغام شوند و نباید به صورت تکی با آن‌ها رفتار کرد. مدل ریاضی این امکان را فراهم می‌کند که با مساله به عنوان یک موجودیت واحد برخورد کرده و اجازه می‌دهد ملاحظات همه متغیرهای مساله به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد. به صورت مشخص‌تر:

۱. مدل ریاضی، روابط پوشیده بین جنبه‌های مختلف مساله را که در تشریح شفاهی به چشم نمی‌آید، آشکار می‌کند.
۲. مدل ریاضی، یک مقایسه از راه‌حل‌های ممکن متعدد را فراهم کرده و در انتخاب بهترین آن‌ها به صورت اثربخش و سریع کمک خواهد کرد.
۳. مدل ریاضی، اغلب وضعیت‌هایی را توضیح می‌دهد که در گذشته در روابط علی و معلولی بدون توضیح باقی مانده است.
۴. مدل ریاضی به راحتی نوع داده‌هایی را که باید جمع‌آوری شود و در مساله به صورت کمی مورد بررسی قرار گیرد، مشخص می‌کند.
۵. مدل ریاضی، پیش‌بینی آینده‌ی رخدادها را بیان می‌کند برای مثال فاکتورهای اثربخشی، پارامترهای قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات، نیازمندی‌های تدارکات و غیره.

۶. مدل ریاضی در شناسایی حوزه‌های ریسک و عدم قطعیت کمک رسان است. در تحلیل یک مساله در قالب انتخاب مدل ریاضی برای ارزیابی، مطلوب است که در ابتدا ابزارهای در دست را مورد تحقیق و بازرسی قرار دهد. اگر یک مدل در حال حاضر موجود است و اثبات شده است، آنگاه ممکن است اقتباس آن مدل امکان‌پذیر باشد. با این حال، توجه ویژه‌ای

باید به ارتباط تکنیک درست و مساله مورد بررسی و اعمال آن در عمق لازم به کار گرفته شود تا حساسیت مورد نیاز در رسیدن به یک راه حل فراهم شود. کاربرد نامناسب ممکن است نتایج مطلوب را فراهم نکند و عواقب پرهزینه‌ای داشته باشد.

در مقابل، ممکن است ساخت یک مدل جدید لازم باشد. در انجام چنین کاری، باید فهرست کاملی از پارامترهای سیستم را برای وضعیتی که قرار است شبیه‌سازی شود، فراهم می‌گردد. در گام بعد، لازم است که ماتریسی توسعه داده شود که روابط پارامتری یعنی هر کدام از پارامترهای مورد بررسی نسبت به هر یک از دیگر پارامترها را مشخص کند و در نتیجه اهمیت هریک از روابط را تعیین کند. فاکتورهای ورودی-خروجی مدل و پارامترهای روابط بازخوردی باید استقرار یابد. مدل توسط ترکیب فاکتورهای مختلف ساخته شده و سپس برای تصدیق اعتبار مورد آزمایش قرار گیرد. آزمایش، کار سختی است زیرا مسائل مورد بررسی با فعالیتهایی سروکار دارد که در آینده اتفاق می‌افتد و تصدیق اعتبار آن‌ها غیرممکن است. با این حال، این امکان وجود دارد که یک آیتم از سیستم یا تجهیز که برای سال‌ها وجود داشته و مورد استفاده قرار گرفته است انتخاب شده و مدل را با استفاده از پارامترهای مشخص شده برای آن مورد استفاده قرار گیرد. اطلاعات و روابط مشخص بوده و قابل مقایسه با تجربه تاریخی است. در چنین رخدادی، تحلیلگر تلاش می‌کند که به این سوال جواب دهد: آیا مدل می‌تواند حقایق و شرایط شناخته شده را به خوبی تشریح کند؟ هنگامی که پارامترهای ورودی تغییر زیادی می‌کنند نتایج ثابت باقی می‌ماند و آیا به واقعیت نزدیک است؟ آیا مدل نسبت به تغییر نیازمندی‌های عملیات، طراحی، تولید/ساخت، و پشتیبانی تدارکات و نگهداری و تعمیرات حساس است؟ آیا روابط علی و معلولی را می‌توان ایجاد کرد؟

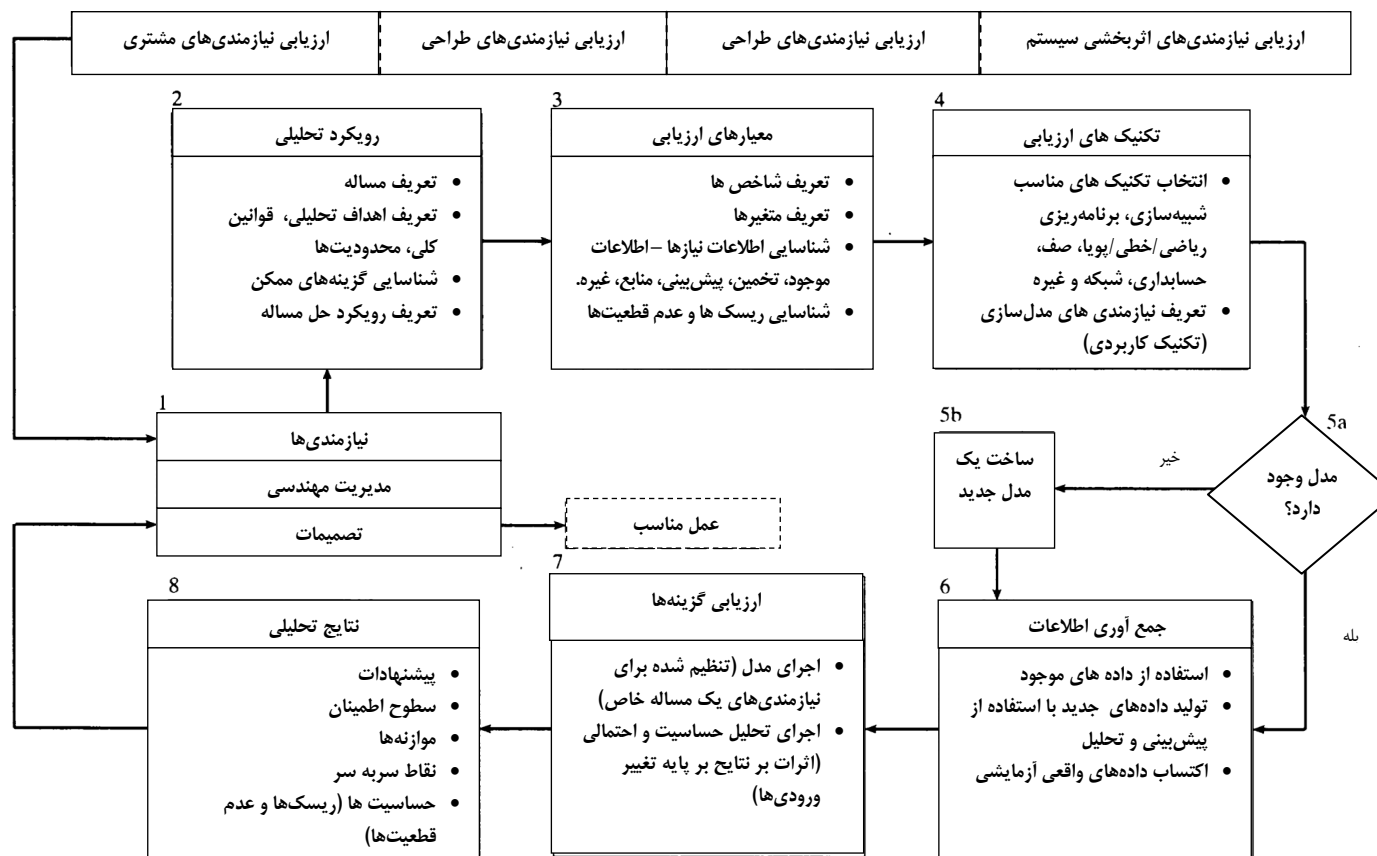
مدل‌ها و روش‌های مناسب تحلیل سیستم در بخش سوم بیش‌تر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. موازنه و بهینه‌سازی سیستم بر این روش‌ها و کاربرد آن‌ها تکیه دارد. یک دانش بنیادین از علم

آمار و احتمالات، روش‌های تحلیل اقتصادی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، تئوری صف، تکنیک‌های کنترل و دیگر تکنیک‌های تحلیلی برای تحلیل اثربخش سیستم ضروری است.

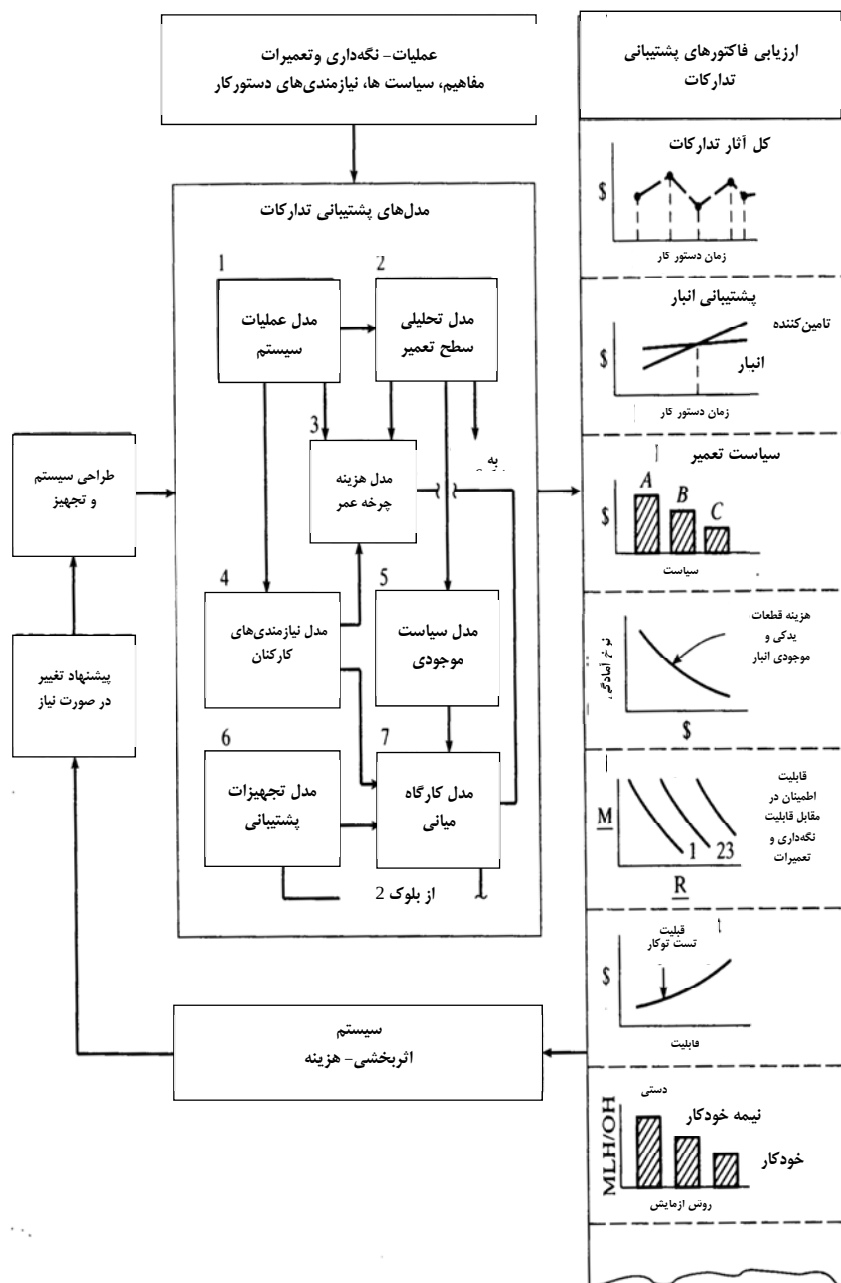
۷-۴- مطالعات موازنه و تعریف طراحی

با تکامل طراحی، فرایند ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم که در قسمت‌های ۲-۵ و ۳-۸ تشریح شد، ادامه پیدا می‌کند. ساختارهای پیشنهاد شده برای زیرسیستم‌ها و عناصر اصلی سیستم ترکیب می‌شوند، مطالعات موازنه صورت می‌گیرد، گزینه‌ها ارزیابی می‌شود و رویکرد طراحی ارجح انتخاب می‌شود. این فرایند از طریق فازهای طراحی مفهومی، طراحی اولیه سیستم و طراحی و توسعه تفصیلی ادامه پیدا می‌کند و منجر به تعریف ساختار سیستم تا سطح تفصیلی اجزا می‌شود (به شکل ۴-۸ مراجعه کنید).

این فرایند تکرار شونده در تحلیل سیستم به صورت عمومی و ساده شده در شکل ۴-۱۱ نمایش داده شده است. براساس این شکل (که در شکل ۳-۲۶ را تکمیل می‌کند) چالش کلیدی استفاده از تکنیک‌ها و مدل‌های تحلیلی مناسب است. همان‌طور که در بخش قبل بررسی شد، دانش روش‌های تحلیلی که در بخش سوم این کتاب تشریح شده است برای انجام گام‌های منعکس شده در بلوک‌های ۴ و ۵ (5a و 5b) در شکل ۱۱ نیاز هستند. به علاوه، هنگامی که یک مدل/ابزار تحلیلی مشخص توسعه می‌یابد تا تحلیل تسهیل شود، باید توجه شود که ابزار رایانه‌ای درست انتخاب شده و مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۴-۱۱- فرایند عمومی تحلیل سیستم‌ها



شکل ۴-۱۲- کاربرد تعدادی از مدل‌های تحلیلی

شکل ۴-۱۳ کاربرد تعدادی از مدل‌های تحلیلی متفاوت در ارزیابی گزینه‌های نگهداری و تعمیرات و سیاست‌های پشتیبانی تدارکات را نشان می‌دهد. این مثال تنها یکی از مثال‌های متعدد موجود است که در آن ترکیبی از چند ابزار ممکن است به کار گرفته می‌شود تا یک ساختار طراحی مورد ارزیابی قرار گیرد. اگرچه رویکرد ترسیم شده در این شکل به ظاهر مختص این مثال نیست، اما باید توجه شود که تعداد مدل‌های رایانه‌ای مختلفی در بازار در دسترس است و به عنوان راه حل مسائل متنوعی تبلیغ می‌شوند. اکثر این مدل‌ها نسبتاً به صورت مستقل توسعه یافته و یا از نقطه نظر زبان رایانه‌ای، نیازمندی‌های داده‌های ورودی و کاربرد آسان با یکدیگر تفاوت دارند. در حالت کلی، بسیاری از مدل‌های تبلیغ شده به زبان یکدیگر صحبت نمی‌کنند، بسیار پیچیده هستند، نیازمند ورودی‌های بسیار زیاد هستند و تنها در بخش‌های پایینی چرخه‌ی عمر در فاز طراحی و توسعه تفصیلی می‌توانند کاربردی اثر بخش داشته باشند، جایی که داده‌های زیادی در دست است.

از نقطه نظر مهندسی سیستم‌ها، یک هدف مناسب می‌تواند انتخاب یا توسعه یک ایستگاه طراحی ادغامی (شامل یک رویکرد Macro-CAD) باشد که بتوان در همه فازهای چرخه‌ی عمر سیستم مورد استفاده قرار گرفته و بتواند تعاریف طراحی در سطوح مختلف را هنگام حرکت از طراحی مفهومی به طراحی و توسعه تفصیلی اقتباس کرد (شکل ۴-۸). برای مثال، این واحد کاری باید شامل ابزارهای مناسبی باشد که هم در سطح بالای طراحی مفهومی و هم دوباره در سطحی عمیق‌تر در طراحی و توسعه تفصیلی اعمال شود. به صورت تئوری، باید استفاده از هر یک از ابزارهای ارائه شده در بخش سوم و چهارم در هر نقطه‌ی زمانی در چرخه‌ی عمر سیستم امکان‌پذیر باشد.

۴-۸- بازبینی، ارزیابی و بازخورد طراحی

اهداف و مزیت‌های اصلی فرایند بازبینی، ارزیابی و بازخورد طراحی در قسمت ۳-۱۰ بررسی شد و دو نوع از فعالیت‌ها را شامل می‌شد (شکل ۴-۱۳). اول، یک بازبینی و ارزیابی غیررسمی پیوسته از همه نتایج طراحی وجود دارد که به صورت روزانه انجام می‌گیرد، که در آن با پیشرفت طراحی، طراح مسئول، داده‌ها و اطلاعات فنی قابل کاربرد برای همه افراد پروژه را فراهم می‌کند. از طریق بازبینی‌های متوالی، بحث و بررسی و بازخورد، طراحی پیشنهادی تایید شده یا تغییرات پیشنهادی برای بررسی ارائه می‌شود. دوم، یک سری بازبینی‌های رسمی ساختاریافته وجود دارد که در زمان‌های مشخص از فرایند توسعه کل سیستم صورت می‌گیرد. اگرچه نوع، عناوین و زمان‌بندی این بازبینی‌های رسمی از یک برنامه به دیگری متفاوت است، در این‌جا فرض بر این است که بازبینی‌های رسمی باید شامل موارد زیر باشد:

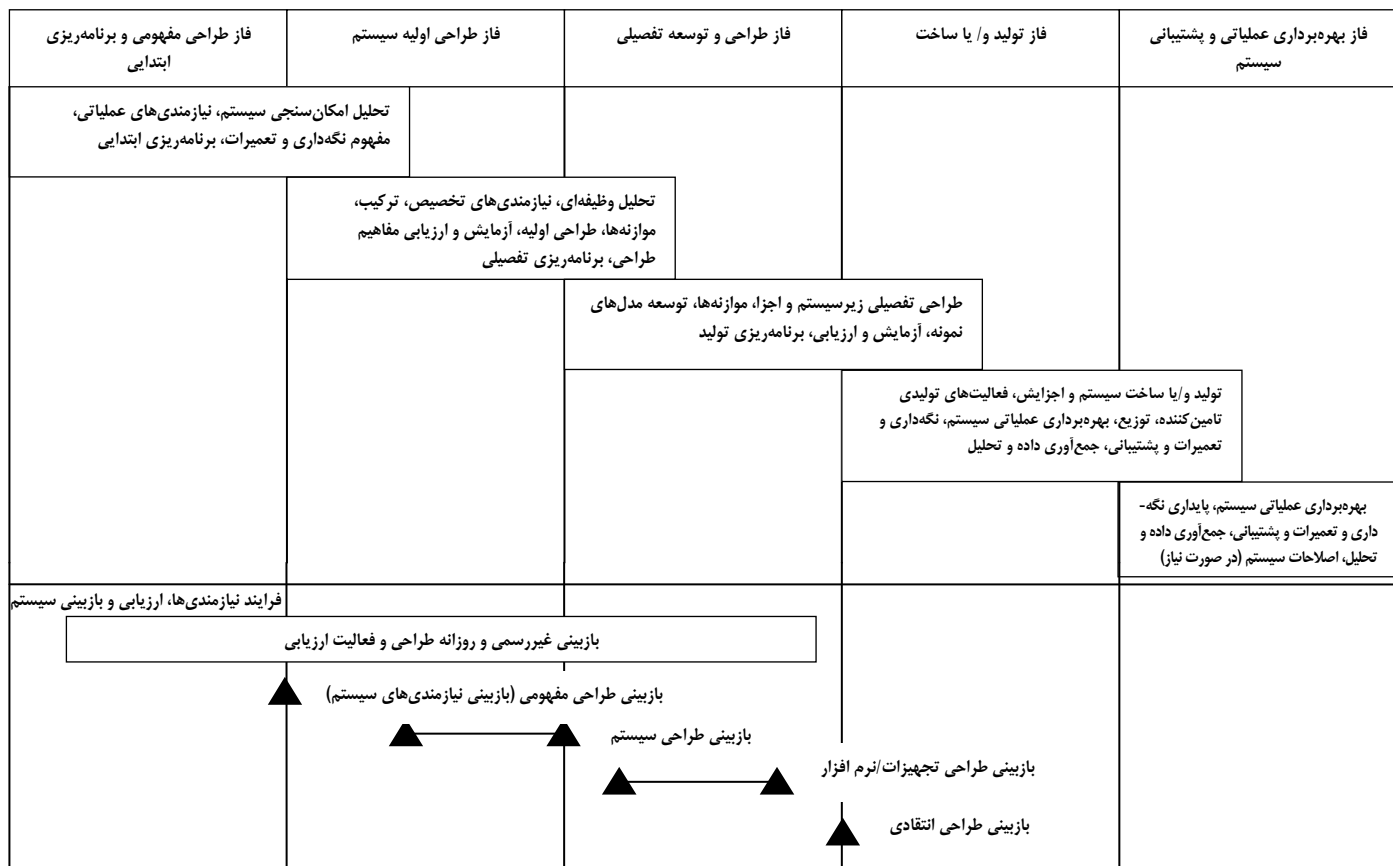
۱. بازبینی طراحی مفهومی اغلب در انتهای فاز طراحی مفهومی و پیش از ورود به فاز طراحی اولیه سیستم انجام می‌شود. هدف آن بازبینی و ارزیابی نیازمندی‌ها و خطوط مبنای سیستم و موارد پوشش داده شده در این بازبینی باید شامل این موارد باشد: نتایج امکان‌سنجی، نیازمندی‌های عملیات سیستم، مفهوم نگهداری و تعمیرات و پشتیبانی، TPM‌های کاربردی اولویت‌بندی شده، تحلیل وظیفه‌ای (برای سطح بالای سیستم)، مشخصات فنی سیستم (نوع A)، برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP)، آزمایش و ارزیابی Master plan، و معیارها و داده/مستندات طراحی سیستم. به شکل ۲-۴ و قسمت ۲-۴ مراجعه کنید.

۲. *بازبینی‌های طراحی سیستم* عموماً طی فاز طراحی اولیه سیستم زمان‌بندی می‌شوند: هنگامی که نیازمندی‌ها و تخصیص وظیفه‌ای مشخص شدند، چیدمان طراحی اولیه و مشخصات فنی تفصیلی فراهم می‌شود و مطالعات موازنه در سطح سیستم انجام می‌گیرد. این بازبینی‌ها بیش‌تر به ساختار کلی سیستم گرایش دارند تا به آیتم‌های یک تجهیز خاص، نرم‌افزار و دیگر اجزای سطح پایین سیستم. ممکن است یک یا چند بازبینی رسمی زمان‌بندی شود که این موضوع به اندازه‌ی سیستم و پیچیدگی طراحی بستگی دارد. بازبینی‌های طراحی سیستم، موضوعات متنوعی را پوشش می‌دهند که عبارت‌اند از مشخصات فنی توسعه، محصول، فرایند، و مواد (نوع B, C, D, E)؛ TPM‌های کاربردی؛ معیارهای عمده‌ی طراحی برای عناصر اصلی سیستم؛ مطالعات موازنه و گزارش‌های تحلیلی؛ پیش‌بینی‌ها؛ و داده‌های کاربردی طراحی (چیدمان‌ها؛ نقشه‌ها؛ فهرست قطعات/مواد؛ گزارش‌های تامین‌کننده و داده‌ها).

۳. *بازبینی‌های طراحی تجهیز/نرم‌افزار* طی فاز طراحی و توسعه تفصیلی زمان‌بندی شده و اغلب موضوعاتی را پوشش می‌دهد که می‌تواند شامل موارد زیر باشد. مشخصات فنی محصول، فرایند و مواد (نوع C, D, E): داده‌های طراحی برای تعریف زیرسیستم‌ها، تجهیزات، نرم‌افزارها و دیگر عناصر عمده سیستم (نقشه‌های مونتاژ، نقشه‌های مشخصات فنی کنترل، نقشه‌های ساخت، نقشه‌های راه‌اندازی، نقشه‌های منطق، فهرست قطعات/مواد و داده‌های تامین‌کننده)؛ تحلیل‌ها، پیش‌بینی‌ها، گزارش‌های مطالعات امکان‌سنجی، و دیگر مستندات مربوط به طراحی؛ و مدل‌های مهندسی، مدل‌های آزمایشگاهی، و/یا نمونه‌های مورد استفاده برای پشتیبانی یک ساختار طراحی خاص.

۴. *بازبینی طراحی/انتقادی* عموماً پس از پایان طراحی تفصیلی و پیش از ارائه داده‌های طراحی نهایی برای تولید/ساخت زمان‌بندی می‌شود. طراحی در این نقطه ضرورتاً نهایی شده است و ساختار پیشنهاد شده از نقطه نظر کفایت و قابلیت تولید/ساخت ارزیابی شده است. *بازبینی طراحی انتقادی* می‌تواند شامل موضوعات زیر باشد: جمع‌بندی کامل داده‌ها و مستندات طراحی نهایی؛ تحلیل‌های کاربردی، گزارش‌های مطالعات موازنه؛ پیش‌بینی‌ها و مستندات مربوطه؛ برنامه‌های تفصیلی تولید/ساخت؛ برنامه‌های عملیات و قابلیت حفاظت؛ برنامه‌های تفصیلی نگهداری و تعمیرات؛ و برنامه‌ی از کاراندازی سیستم و بازیافت/امحای مواد. نتایج *بازبینی طراحی انتقادی* خطوط مبنای ساختار نهایی سیستم را قبل از ورود به تولید و/یا ساخت را تشریح می‌کند.

فرایند *بازبینی، ارزیابی و بازخورد* در سراسر طراحی و توسعه‌ی سیستم (شکل ۲-۴ و ۴-۱۳) پیوسته بوده و در طراحی مفهومی، اولیه و تفصیلی گنجانده شده است. هدف بخش دوم این کتاب عبارت است از معرفی فرایند *بازبینی و تشریح* برخی مزایایی است که می‌توان از آن اقتباس کرد، فراهم آوردن یک فعالیت از منظر کلی و انواع و زمان‌بندی *بازبینی‌ها*، و تشریح برخی خصوصياتی است که به استقرار بهتر فرایندی منجر شود که در بخش ۵-۸ معرفی می‌گردد.



شکل ۴-۱۳- بازیابی‌های رسمی طراحی (مثال)

۹-۴- خلاصه فصل

این فصل فرایند طراحی سیستم را ادامه داده و گذار از "فاز طراحی مفهومی" به "فاز طراحی اولیه" و خود فاز طراحی اولیه را پوشش می‌دهد. فرایند مهندسی سیستم‌ها که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، چارچوب این کار را فراهم می‌کند.

به‌طور خاص، این فصل شامل تشریح موضوعاتی می‌شود که عبارت‌اند از نیازمندی‌های طراحی برای زیرسیستم‌ها و عناصر اصلی سیستم، تهیه مشخصات فنی تفصیلی، اجرای تحلیل وظیفه‌ای و تخصیص نیازمندی‌ها به سطح زیرسیستم و سطوح پایین‌تر، توسعه نیازمندی‌های تفصیلی طراحی، پایه‌گذاری فعالیت‌های طراحی مهندسی و استقرار تیم طراحی، استفاده از مدل‌های تحلیلی و فناوری در طراحی، انجام مطالعات موازنه به‌صورت تفصیلی و تشریح انواع و زمان‌بندی بازبینی‌های سیستم. موارد موجود در این فصل، همراه با آنچه در فصل ۳ بیان شد، شالوده‌ی موضوعاتی را فراهم می‌کند که در فصل ۵ "طراحی و توسعه تفصیلی" تشریح می‌شود.

یکی از موضوعات اساسی، ادغام مناسب علوم مختلف طراحی مهندسی (شکل ۹-۴) و استقرار "تیم طراحی" در قسمت ۴-۵ و انتخاب و/یا توسعه فناوری‌ها و ابزار/مدل‌های تحلیلی برای استفاده در سراسر فرایند مهندسی سیستم‌ها می‌باشد که در قسمت ۴-۶ شرح داده شد. پیاده کردن موفق این فرایند نیازمند آن است که طراح سیستم یا تیم طراحی بتوانند (۱) همه اهداف طراحی را سریع، دقیق و قابل اتکا در سرتاسر فرایند اکتساب سیستم به انجام رسانند؛ (۲) داده‌های کاربردی را طراحی کند و مستندات مربوطه را به نقاط مختلف (محلّی و بین‌المللی) به‌طور پیوسته و سریع انتقال دهد؛ و (۳) تغییرات در طراحی را به‌صورت اثربخش پیاده کند در حالی که به‌طور هم‌زمان ساختار کلی را به‌صورت اثربخشی حفظ کند. این فرایند پیوسته شامل اجرای مطالعات موازنه مختلف و متعددی می‌شود که موضوعات مربوط به طراحی گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. پاسخ به این اهداف نیازمند یک دانش جامع از تکنیک‌های و مدل‌ها/ ابزار تحلیلی می‌باشد که در

اختیار طراح (تیم طراحی) است. بنابراین، یک مهندسی سیستم با صلاحیت باید آگاه بوده و کاملاً با روش‌های تحلیلی مختلف که در بخش سوم (فصول ۷-۱۱) این کتاب تشریح شده است، آشنا باشد.

چالش‌های مربوط به کوتاه کردن چرخه اکتساب محصول برای سیستم‌های بسیار پیچیده که شامل گستره‌ی وسیعی از تامین‌کنندگان در سرتاسر دنیا می‌شود، نیاز به پیشرفت در استفاده از سیستم‌های رایانه‌ای و شبکه‌های جهانی در طراحی خودکار سیستم را دیکته می‌کند. نیاز گسترده‌ای به روش‌های بهبود یافته وجود دارد تا تحلیل‌های طراحی، ارتباطات فنی، و پردازش داده/اطلاعات تحقق یابد. به‌عنوان یک هدف، توسعه و پیاده‌سازی یک/ایستگاه طراحی/دغامی (قسمت ۴-۶) باید مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، "مهندس سیستم‌ها" باید دانش عمیقی از مفاهیم سیستم، نیازمندی‌های واسطه‌ها، روابط بین رشته‌ای و غیره داشته باشد و باید در جایگاه رهبری در دستیابی به این موضوعات و اهداف مربوطه در نظر گرفته شود.

برای مطالعه جزئی‌تر در مورد نیازمندی‌های مربوط به طراحی در مهندسی سیستم‌ها، خواننده می‌تواند از منابع زیر برای مطالعه بیش‌تر استفاده کند.

1. ANSI/GEIA EIA-632, IEEE 1220-1998,
2. INCOSE's Systems Engineering Handbook, Systems Engineering Guidebook
3. System Engineering Management(B.S. Blanchard)

همچنین می‌توان به وب‌سایت INCOSE به نشانی <http://www.incose.org> مراجعه کرد.

سوالات و مسائل

۱. یک سیستم را به دلخواه انتخاب کرده و نمودارهای جریان بلوکی وظیفه‌ای (FFBD) عملیاتی را در سطح سوم توسعه دهید. یک بلوک وظیفه‌ای را انتخاب کرده و جریان وظیفه‌ای نگه‌داری و تعمیرات را در سطح دوم توسعه دهید. نشان دهید که نمودارهای جریان وظیفه نگه‌داری و تعمیرات چگونه از جریان‌های عملیاتی تکامل می‌یابند.
۲. تشریح کنید که چگونه نیازمندی‌های منابع (یعنی سخت‌افزار، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، داده‌ها و عناصر پشتیبانی) از تحلیل وظیفه‌ای اقتباس می‌شوند.
۳. گام‌های موجود در گذار از تحلیل وظیفه‌ای به جمع‌بندی برای سیستم را تشریح کنید. یک مثال بیاورید.
۴. به تخصیص در شکل ۴-۶ مراجعه کنید. توضیح دهید که چگونه فاکتورهای کمی (مثل TPM) در سطوح واحد و قطعات مونتاژی اقتباس شده‌اند.
۵. چه گام‌هایی برای استقرار نیازمندی‌های تخصیص برای یک ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS) باید برداشته شود؟ فرایند کلی را تشریح کنید.
۶. یک سیستم به دلخواه انتخاب کرده و برخی از TPM‌های سطح بالا را به آن تخصیص دهید. این نیازمندی‌ها را در صورت امکان به سطوح دوم و سوم اختصاص دهید.
۷. با مراجعه به شکل ۴-۷ بیان کنید که نیازمندی‌های طراحی برای واحد مشترک را چگونه تعریف می‌کنید؟
۸. قابلیت تطبیق را توضیح دهید؟ اهمیت آن در چیست؟
۹. منظور از قابلیت حفاظت محیطی چیست؟ برخی از اهداف مشخص آن در طراحی را بیان کنید.
۱۰. چرا طراحی برای امنیت مهم است؟ برخی از اهداف آن در طراحی را شناسایی کنید.

۱۱. منظور از معیارهای طراحی چیست؟ چگونه توسعه می‌یابند؟ چگونه در فرایند طراحی اعمال می‌شوند؟
۱۲. به شکل ۴-۱ مراجعه کنید. چرا توسعه‌ی درخت مشخصات فنی مهم است؟ خصوصیات ذاتی در آن چه چیزهایی باید باشد؟
۱۳. به شکل ۴-۲ مراجعه کنید. چگونه شاخص‌های مشخص شده برای وظیفه نشان داده می‌شوند، یک مثال بیاورید.
۱۴. به شکل ۴-۴ مراجعه کنید. برخی از واسطه‌ها یا تعاملاتی که باید اتفاق بیافتد تا از وجود یک رویکرد کاملاً ادغامی در توسعه نیازمندی‌های سخت‌افزار، نرم‌افزار و نیروی انسانی سیستم اطمینان حاصل کرد. به‌طور مشخص توضیح دهید.
۱۵. CAD، CAM، CAS و Macro-CAD و روابط داخلی آن‌ها را تعریف کنید. مثال بزنید و واسطه‌ها، جریان اطلاعات و غیره را نشان دهید.
۱۶. فرض کنید شما مهندس طراحی بوده و به‌دنبال برخی مدل‌ها/ابزارهایی هستید که شما را در فرایند ترکیب، تحلیل و ارزیابی کمک کند. معیارهای مدنظر در انتخاب ابزار مناسب را توسعه دهید.
۱۷. فرض کنید که مدل تحلیلی انتخاب شده برای یک موضوع خاص را انتخاب کرده‌اید. توضیح دهید که چگونه تصدیق اعتبار می‌کنید که مدل برای انجام کارکرد موردنظر کفایت می‌کند.
۱۸. برخی از مزیت‌هایی را که در استفاده از مدل‌های رایانه‌ای وجود دارد، فهرست کنید. مشخص کنید کدام یک از این موضوعات برای مساله موردنظر سوال قبلی مهم است.
۱۹. به شکل ۴-۸ مراجعه کنید. برخی از اهداف در انتخاب مدل‌ها/ابزارهای مناسب در اجرای وظایف در ستون سمت راست را شناسایی کنید.

۲۰. به شکل ۴-۱۲ مراجعه کنید. برخی از اهداف در طراحی مجموعه ابزار را که در هفت بلوک در شکل نشان داده شده است، شناسایی کنید.
۲۱. بر چه پایه‌ای بازیابی‌های رسمی طراحی زمان‌بندی می‌شوند؟ برخی از مزیت‌های اقتباس شده از انجام بازیابی‌های رسمی طراحی چیست؟
۲۲. به‌طور خلاصه ورودی و خروجی بازیابی سیستم، بازیابی تجهیز/نرم‌افزار و بازیابی طراحی انتقادی را بیان کنید.
۲۳. نیازمندی‌های تامین‌کننده چگونه مشخص می‌شوند؟ این نیازمندی‌ها چگونه به تامین‌کننده منتقل می‌شوند؟
۲۴. طراحی، یک کار تیمی است. توضیح دهید چرا؟ چگونه تیم طراحی سازماندهی می‌شود؟ چگونه مهندسی سیستم‌ها در این فرایند جای می‌گیرد؟
۲۵. خروجی مطلوب فاز طراحی اولیه سیستم چیست؟

طراحی و توسعه تفصیلی

فاز طراحی و توسعه تفصیلی در چرخه‌ی عمر سیستم، ادامه‌ی فرایند توسعه تکرار شونده در شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ است. تعریف نیازمندی‌های سیستم، استقرار خطوط مبنا در سطح بالا و تهیه مشخصات فنی سیستم (نوع A) در فصل ۳ تشریح شد. این موضوع به‌نوبه‌ی خود منجر به تعریف و توسعه زیرسیستم‌ها و عناصر اصلی سیستم می‌شود که در فصل ۴ تشریح شد. تحلیل وظیفه‌ای، تخصیص نیازمندی‌های طراحی به سطوح پایین‌تر از سطح سیستم، انجام ترکیب و مطالعات موازنه و تهیه مشخصات فنی سطوح پایین‌تر (انواع B تا E)، و انجام بازبینی‌های رسمی، شالوده‌ای را فراهم می‌کند که تصمیم‌های طراحی تفصیلی که تا سطح اجزا پایین می‌رود، بر پایه آن صورت می‌گیرد.

با توسعه‌ی خطوط مبنای وظیفه‌ای به‌عنوان خروجی فاز طراحی مفهومی سیستم و خطوط مبنای تخصیص که طی فاز طراحی اولیه به‌دست می‌آید، تیم طراحی با خیالی آسوده به شناخت اجزای خاص سیستم و ایجاد ساختار سیستم در سطوح پایین‌تر در سلسله مراتب سیستم می‌پردازد. این شناخت شامل اجرای فعالیت‌هایی است که (۱) زیرسیستم‌ها، واحدها، قطعات موتاژی، اجزا در سطحی پایین‌تر، ماژول‌های نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، عناصر نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی و

غیره که سیستم را تشکیل داده تشریح کرده و روابط درونی آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ (۲) مشخصات فنی و داده‌های سیستم را برای همه‌ی اجزای سیستم فراهم می‌کند؛ و (۳) اجزای منتخب را به‌دست آورده و در ساختار نهایی سیستم ادغام می‌کند.

این فصل هشت گام ضروری در فرایند طراحی و توسعه تفصیلی را مورد بررسی قرار می‌دهد، در حالی که به‌طور هم‌زمان فهمی از پیچیدگی طراحی و توسعه‌ی تفصیلی در مهندسی سیستم‌ها را فراهم می‌کند. این موضوع عبارتست از:

- توسعه‌ی نیازمندی‌های طراحی برای همه‌ی اجزا سطح پایین سیستم؛
- استقرار فعالیت‌های فنی لازم برای تحقق اهداف طراحی؛
- ادغام عناصر و فعالیت‌های سیستم؛
- انتخاب و استفاده از ابزار طراحی؛
- فراهم کردن داده‌های طراحی و مستندسازی؛
- توسعه‌ی مدل‌های نمونه و مهندسی؛
- استقرار قابلیت بازمی‌آزمایی، ارزیابی، و بازخورد طراحی؛
- ایجاد تغییرات در طراحی در صورت نیاز.

این گام‌ها در فرایند کلی مهندسی سیستم‌ها باید به‌طور کامل درک شده و بازمی‌آزمایی شود. به‌عنوان یک هدف آموزشی، هدف فراهم آوردن یک رویکرد نسبتاً کامل است که جنبه‌های تفصیلی طراحی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۵-۱- نیازمندی‌های طراحی تفصیلی

نیازمندی‌های خاص در این مرحله از فرایند طراحی سیستم از مشخصات فنی سیستم (نوع A) اقتباس شده و از طریق مشخصات فنی سطح پایین (انواع B تا E) تکامل می‌یابد (شکل ۴-۱).

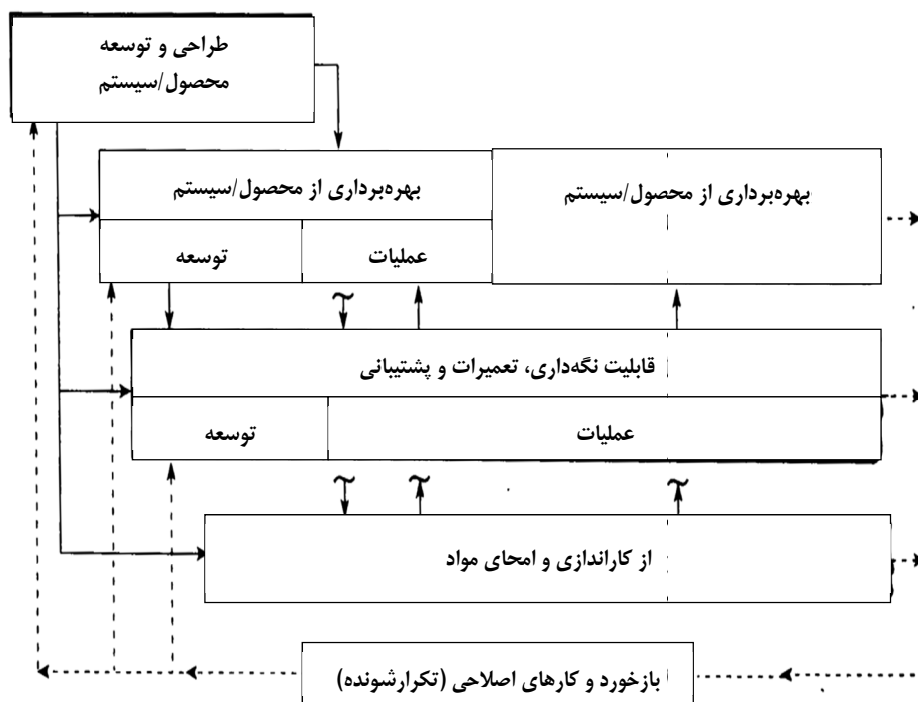
در این خصوصیات فنی، پارامترهای وابسته به طراحی (DDP)، شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) و معیارهای پشتیبان طراحی حضور دارند که منجر به شناسایی خصوصیات (صفات) خاصی می‌شود که باید در ساختار طراحی عناصر و اجزا مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع تحت‌تاثیر نیازمندی‌های فرایند تخصیص در شکل ۴-۶ بوده که در آن خصوصیات داخلی مناسب باید طوری باشد که نیازمندی‌های فنی اختصاص داده شده در شکل برآورده شود.

با داشتن این رویکرد بالا به پایین برای استقرار نیازمندی‌ها در هر سطح در ساختار سلسله مراتبی سیستم (شکل ۴-۶)، فرایند طراحی از طریق گام‌های تکرار شونده ترکیب، طراحی و ارزیابی تکامل یافته و تعریف اجزا منجر به ایجاد خطوط مبنای محصول می‌شود که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. در این نقطه، تدارک و اکتساب اجزای سیستم آغاز می‌شود، اجزای آزمایش شده و در یک سطح بالاتر ادغام می‌شود (به‌طور مثال زیرمونتاز، مونتاز، و واحد)، و مدل فیزیکی (المثنی) سیستم برای آزمایش و ارزیابی ساخته می‌شود. گام‌های ادغام، آزمایش و ارزیابی یک رویکرد پایین به بالا را تشکیل می‌دهند و باید ساختاری را نتیجه دهند که بتوان برآورده ساختن نیازمندی‌های مشخص شده مشتری را مورد ارزیابی قرار داد. این رویکرد بالا به پایین/پایین به بالا توسط گام‌های مشخص شده در مدل فرایندی "Vee" نشان داده شده در شکل ۵-۲ هدایت می‌شود.

پیشروی در فرایند طراحی و توسعه سیستم به روشی سریع در محیط رقابتی کنونی یک ضرورت است. حداقل کردن زمان از شناسایی ابتدایی یک نیاز تا تحویل سیستم نهایی به مشتری حیاتی است. این موضوع نیازمند اجرای فعالیت‌های مشخص طراحی به‌صورت هم‌زمان است. شکل ۵-۱ (تعمیم شکل ۲-۲) اهمیت "هم‌زمانی" در طراحی سیستم را بیش‌تر به تصویر می‌کشد.

با مراجعه به شکل ۵-۱، طراح(ها) باید به طریقی فکر کند که چهار چرخه‌ی عمر و روابط داخلی آن‌ها، به‌طور هم‌زمان و به روشی ادغامی، در عوض رویکردی ترتیبی طراحی که در گذشته زیاد مورد استفاده قرار می‌گرفت، صورت پذیرد. شناخت این الزام در اواخر دهه‌ی ۸۰ میلادی صورت گرفت و نتایج این مفاهیم به‌عنوان مهندسی هم‌زمان، توسعه‌ی ادغامی محصول و دیگر مفاهیم مطرح شد. اگر نیاز است که مزیت‌های این فرایند شناخته شود، این مفاهیم باید به‌صورت ذاتی در فرایند مهندسی سیستم جای گیرد.

چرخه‌ی عمر سیستم/محصول - رویکرد هم‌زمان

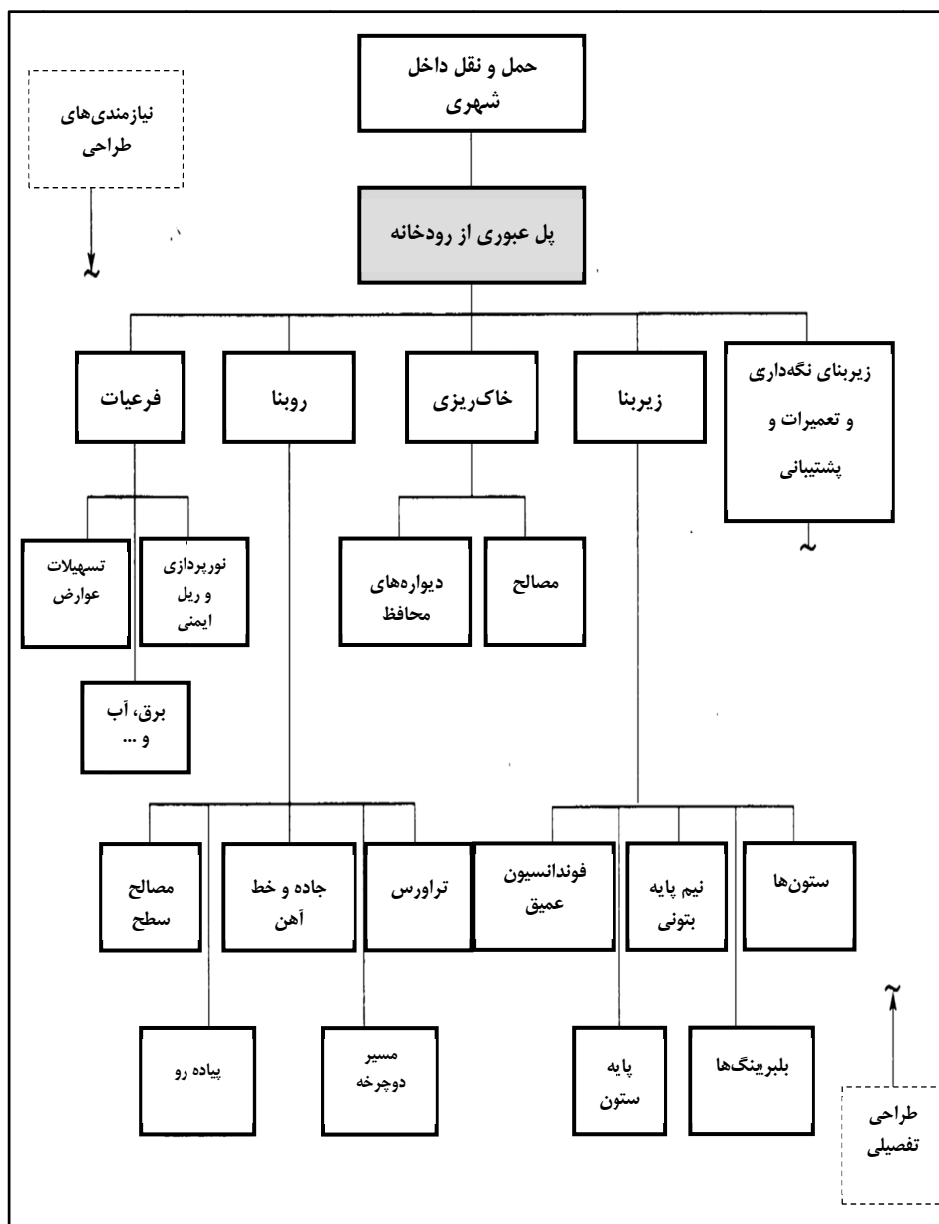


شکل ۵-۱ - رویکرد هم‌زمان در مقابل رویکرد ترتیبی در طراحی سیستم

۵-۲- تکامل طراحی تفصیلی

تکامل طراحی تفصیلی برپایه‌ی نتایج نیازمندی‌های ایجاد شده طی فازهای طراحی مفهومی و اولیه ایجاد می‌شود. به‌عنوان مثال، در مساله عبور از رودخانه که توسط سیستم پل بررسی شد، نیازمندی‌های اصلی سطح بالا در طراحی مفهومی شناسایی شد (قسمت‌های ۳-۱ و ۳-۳). این نیازمندی‌ها در قسمت ۳-۴-۲ بیش‌تر تجزیه می‌شود مثال ۱، طی فاز طراحی اولیه از طریق تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای نیازمندی‌ها تا زیرسیستم‌های اصلی توسعه می‌یابد و همچنین خطوط آهن، مسیرهای عبور دوچرخه و عابر پیاده، تسهیلات پرداخت عوارض، و زیربنای نگهداری و تعمیرات را شامل می‌شود (قسمت ۴-۱)؛ و سپس نیازمندی‌های تفصیلی‌تر طراحی برای سطوح پایین‌تر عناصر سیستم تعریف شود یعنی تا زیرساخت پل، فوندانسیون، ستون و پایه ستون، دیواره‌ها، دریافت‌کننده‌های عوارض، نورپردازی و غیره (که در این فصل بررسی می‌شود).

با مراجعه به شکل، نیازمندی‌های طراحی از بالا به پایین شناسایی شده در ادامه‌ی طراحی مفهومی همراه با تخصیص و نیازمندی‌های زیرسیستم‌های عمده انجام می‌گیرد. این نیازمندی‌ها از طریق تخصیص و تحلیل وظیفه‌ای در طی فاز طراحی اولیه برای تعریف نیازمندی‌های مشخص سطوح پایینی عناصر پل (بلوک‌های سفید) بیش‌تر گسترش می‌یابند (جاده و خط آهن، ستون، پایه، تسهیلات عوارض و غیره). نیازمندی‌های اصلی برای عبور از پل رودخانه از بالا به پایین تعریف و تخصیص داده شده است، در حالی که طراحی تفصیلی و پیرو آن ساخت پل از پایین به بالا صورت می‌پذیرد. این موضوع علت استفاده از فرایند بالا به پایین/پایین به بالا در مقابل رویکرد تنها از پایین به بالا است (به شکل ۲-۱۰ بلوک ۵ مراجعه کنید).



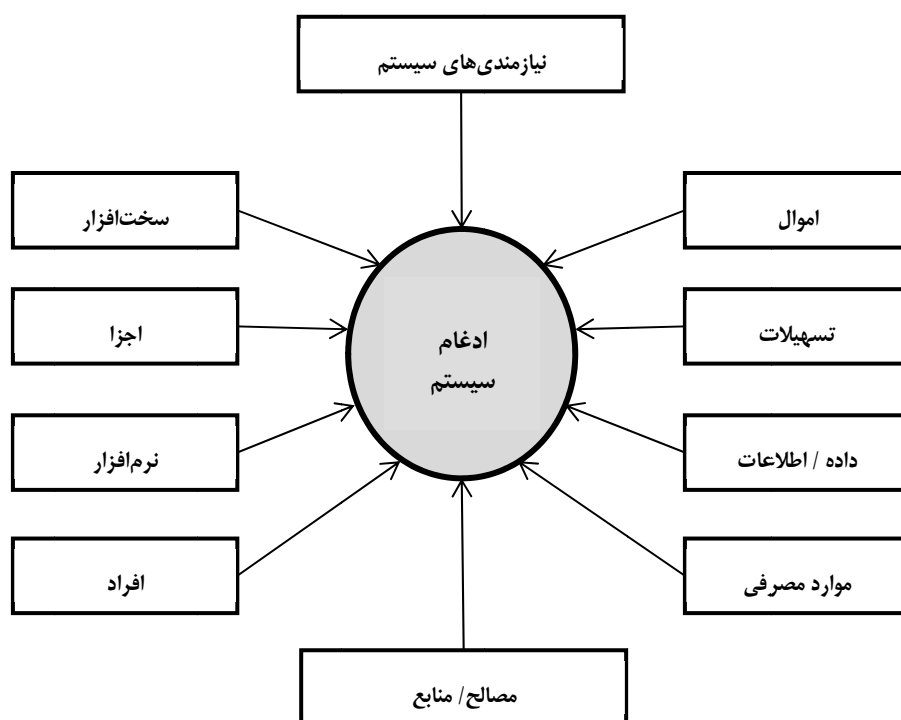
شکل ۵-۲- رویکرد بالا به پایین/پایین به بالا برای سیستم پل عبوری از رودخانه

با داشتن نیازمندی‌های اصلی سطح بالا برای سیستم کلی که در فصل ۳ و نیازمندی‌های طراحی اولیه که در فصل ۴ بررسی شد، فرایند طراحی از این نقطه به بعد اساساً تکاملی است. با مراجعه به شکل ۴-۹، تیم طراحی، اهداف کلی ادغام عناصر سیستم در ساختار نهایی سیستم را مقرر ساخته است. این عناصر نه تنها شامل سخت‌افزار و نرم‌افزارهای مربوط به مأموریت می‌شوند، بلکه افراد، تسهیلات و مسکن، اطلاعات و داده‌ها، موارد مصرفی، مواد و منابع لازم برای پشتیبانی عملیات و پایداری سیستم در چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده می‌شود. ادغام این عناصر در شکل ۵-۳ که تعمیمی از شکل ۴-۹ است، مورد تأکید است.

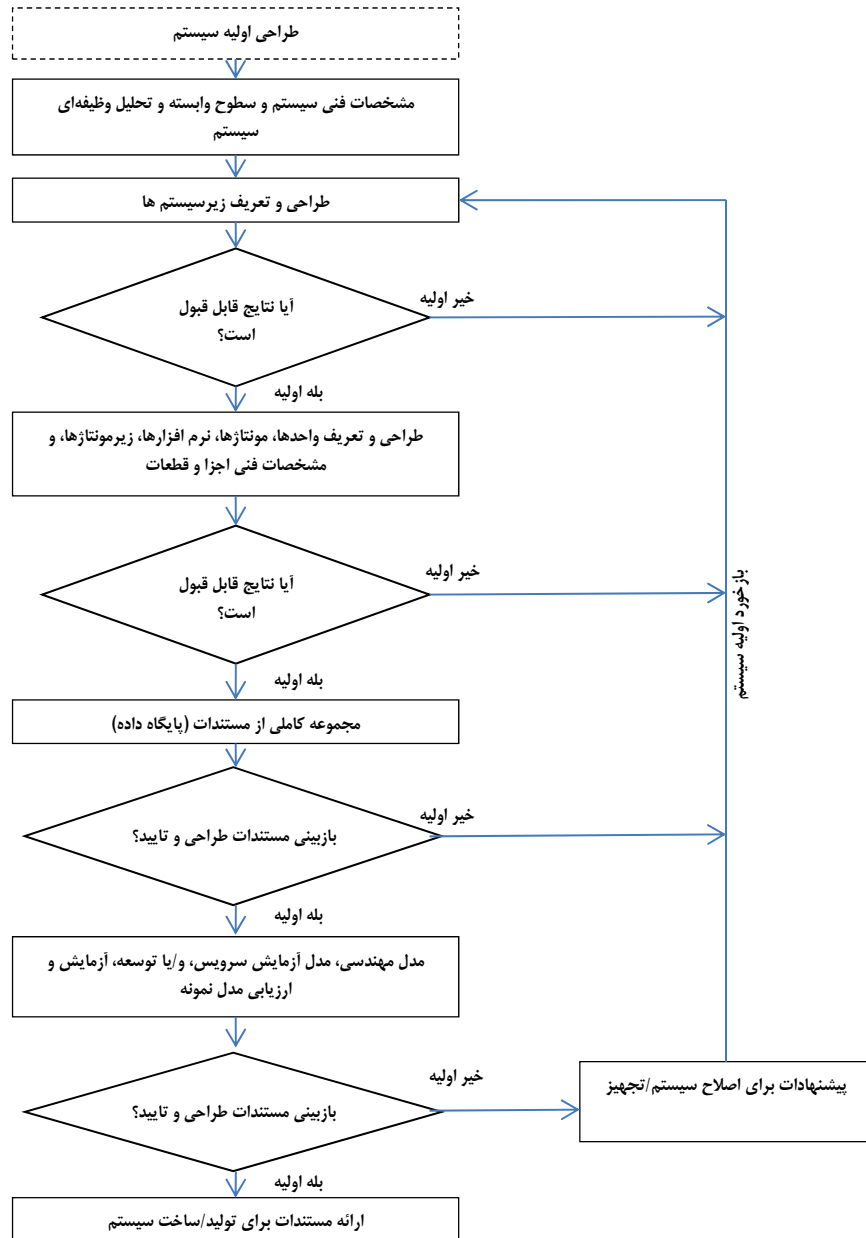
تکامل طراحی تفصیلی توالی اصلی فعالیت‌های نمایش داده شده در شکل ۵-۴ را دنبال می‌کند. این فرایند تکرار شونده بوده و از تعریف در سطح سیستم تا ساختار محصول که ساخته شده یا به‌صورت انبوه تولید می‌شود، حرکت می‌کند. بررسی و ایجاد تعادل به‌صورت بازبینی در هر مرحله از پیشرفت طراحی انجام شده و حلقه‌ی بازخوردی کارهای اصلاحی موردنیاز را فراهم می‌نماید. این بازبینی‌ها ممکن است نسبتاً غیررسمی باشد و به‌صورت مستمر انجام شود، در حالی که بازبینی‌های رسمی طراحی به‌صورت زمان‌بندی شده و در مایلستون‌های مشخص صورت می‌گیرد. در این مورد، فرایند مشابه ترکیب، تحلیل، ارزیابی، و تعریف محصول بوده که در مرحله طراحی اولیه انجام می‌شود، به جز نیازمندی‌های سطوح پایین‌تر (یعنی واحدها، مونتاژها، زیرمونتاژها و غیره). هر چه جزئیات یک سطح افزایش می‌یابد، تعریف واقعی آن‌ها از طریق توسعه‌ی اطلاعات تشریحی آیت‌م مورد طراحی انجام می‌گیرد. این داده‌ها ممکن است به‌صورت تشریح دیجیتالی یک آیت‌م در قالب الکترونیکی، نقشه‌های فیزیکی و الکترونیکی، فهرست‌های قطعات و مصالح، گزارشات و تحلیل‌ها، برنامه‌های رایانه‌ای و غیره نمایش داده شود.

بازگویی فرایند واقعی طراحی از طریق وب‌سایت (WWW)، شبکه محلی (LAN)، استفاده از ارتباطات راه دور و ویدئو کنفرانس، یا اشکال ارتباطی مشابه اتفاق می‌افتد. ساختار طراحی انتخاب

شده ممکن است از دیدگاه طراح مسئول بهترین طراحی ممکن باشد، اما نتایج تا زمانی که به خوبی مستند نشود و دیگران نتوانند خروجی را به چیزی که قرار است ساخته (مثال پل عبوری از رودخانه) یا تولید شود (قسمت ۲-۱۲ در مورد دسته‌بندی‌های سیستم و محصول) ترجمه و تبدیل کنند، بی‌ارزش خواهد بود.



شکل ۵-۳- ادغام عناصر سیستم



شکل ۵-۴- توالی طراحی همراه با بازخورد

۵-۳- ادغام عناصر و فعالیت‌های سیستم

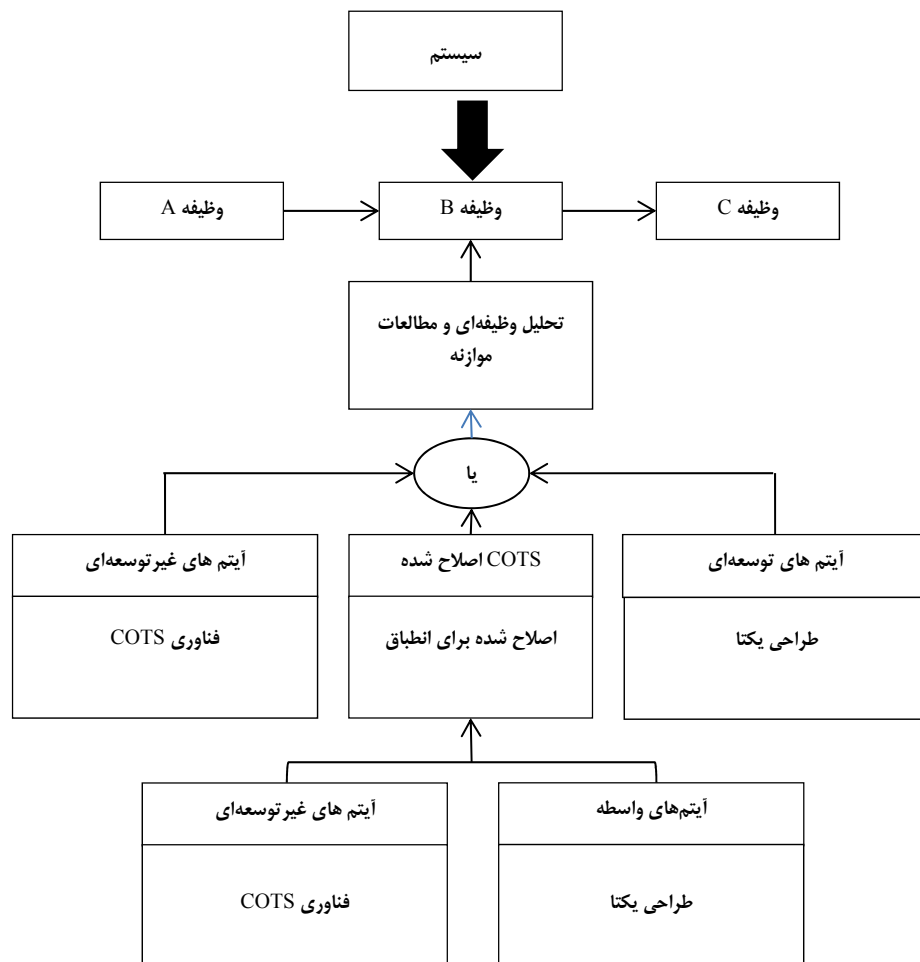
یکی از خروجی‌های مهم فرایند تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای، شناسایی عناصر مختلف سیستم و نیاز برای سخت‌افزار (تجهیزات)، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، مصالح، داده، یا ترکیبی از آن‌ها است. هدف انجام تحلیل‌های موازنه لازم برای تعیین بهترین روش در پاسخ‌گویی به چگونه‌هاست. نتایج ممکن است به صورت شکل‌های ۳-۲۵ و ۴-۶ در آیند که عناصر اصلی یک سیستم را شناسایی می‌کنند.

با داشتن ساختار اصلی عناصر سیستم، طراح باید تصمیم بگیرد که چگونه نیاز به انتخاب یک رویکرد مشخص در پاسخ به نیاز تجهیزاتی، نرم‌افزاری و غیره را برآورده کند. برای مثال، ممکن است رویکردهای متفاوتی در انتخاب منابع مشخص همراه با گام‌های مشخص در رسیدن به نتایج مطلوب (همان‌طور که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است) وجود داشته باشد:

۱. یک جزء استاندارد را که به‌صورت تجاری در دسترس است و تامین‌کننده‌های قابل اعتمادی برای آن وجود دارد، انتخاب کنید؛ برای مثال، یک آیتم تجاری یا شبیه آن. هدف عبارتست از کسب مزیت رقابتی (با هزینه‌ای کاهش یافته) و فراهم آوردن تضمین این موضوع که نگهداری و تعمیر و پشتیبانی مناسب آن به‌سادگی در آینده و در چرخه‌ی عمر سیستم در صورت نیاز در دسترس خواهد بود.

۲. اصلاح یک آیتم تجاری (COTS) در دسترس از طریق سوار کردن یک آیتم برای مقاصد راه‌اندازی سیستم، اضافه کردن کابل آداپتور برای مقاصد قابلیت انطباق، فراهم کردن یک ماژول واسطه‌ای نرم‌افزاری و غیره. باید تضمین شود که اصلاح پیشنهادی نسبتاً ساده و ارزان بوده و در نتیجه‌ی آن، مسائل و مشکلات زیادی در فرایند به‌وجود نیاید.

۳. طراحی و توسعه‌ی یک جزء یکتا و جدید برای برآوردن یک نیاز وظیفه‌ای مشخص. این رویکرد، نیازمند آن است که جزء انتخاب شده به‌درستی در فرایند کلی طراحی و توسعه‌ی سیستم و در زمان مناسب و به روشی اثربخش ادغام شود.



شکل ۵-۵- رویکردهای مختلف در انتخاب منابع

به نظر می‌آید که بهترین راه‌حل از منظر هزینه-اثربخشی برای بهره‌برداری از اجزای COTS زمانی حاصل می‌شود که هزینه‌ی اکتساب، زمان دسترسی‌پذیری آیت‌م و ریسک‌های همراه با برآورده کردن نیازمندی‌های فنی سیستم کاهش یابد. در هر رخدادی، فرایند تصمیم‌گیری در سطح زیرسیستم در ابتدای طراحی اولیه، در سطح آیت‌م، و/یا سطح واحد می‌تواند اتفاق افتد. این تصمیم‌ها بر پایه فاکتورهایی انجام می‌شود که عبارت‌اند از وظایفی که باید انجام شود، دسترسی‌پذیری و ثبات فناوری فعلی، تعداد منابع تامین و زمان‌های پاسخ تامین‌کننده، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات، نیازمندی‌های قابلیت پشتیبانی، هزینه و دیگر موارد مشابه. با استفاده از تصمیم‌های حاصل شده، نیازمندی‌های اکتساب (تدارک) یک جزء از طریق فراهم آوردن مشخصات فنی محصول (نوع C) یا مشخصات فنی فرایند (نوع D) برای اجزای COTS و یا مشخصات فنی توسعه (نوع B) برپا جزئی که باید طراحی شده یا اصلاح شود، پوشش داده می‌شود.

هنگامی که تصمیم‌های نهایی توسعه و طراحی یک عنصر جدید یا یکتای سیستم مشخص می‌شود، فعالیت طراحی پیرو آن شامل گام‌های متوالی است که از تعریف نیاز به ادغام و آزمایش آیت‌م به عنوان بخشی از فرایند اعتبارسنجی سیستم تکامل می‌یابند. برای مثال، تحلیل وظیفه‌ای شکل ۴-۴ متجر به شناسایی نیازمندی‌های سخت/افزار، نرم/افزار و نیروی انسانی می‌شود. توسعه‌ی سخت‌افزار اغلب به شناسایی واحدها، مونتاژها، ماژول‌ها و تا سطح قطعات و اجزا منجر می‌شود. فرایند اکتساب نرم‌افزار اغلب عبارت است از شناسایی آیت‌م‌های ساختاری نرم‌افزار رایانه‌ای (CSCI)، اجزای نرم‌افزار رایانه‌ای (CSC)، واحدهای نرم‌افزار رایانه‌ای (CSU)، توسعه کد، و ادغام و آزمایش CSC. توسعه نیازمندی‌های انسان عبارتست از شناسایی تکالیف هر فرد، ترکیب تکالیف به شرح وظایف یک پست، تعیین تعداد افراد و سطوح مهارت و نیازمندی‌های آموزشی کارکنان.

درحالی که شکل ۴-۴ تنها ۳ چرخه‌ی عمر را مورد بررسی قرار می‌دهد (سخت‌افزار، نرم‌افزار و نیروی انسانی)، ممکن است نیازمندی‌هایی برای دیگر منابع وجود داشته باشد که از تحلیل وظیفه‌ای سیستم تکامل یافته و شامل این موارد شود: تسهیلات، داده‌ها/اطلاعات، عناصر زیربنای نگهداری و تعمیرات و پشتیبانی، و غیره. همراه با هر کدام یک چرخه‌ی عمر خاص، یک کاربرد ویژه وجود دارد.

چند شکل و درجه از ارتباطات و ادغام در چرخه‌های عمر این اجزا وجود دارد که بر پایه یک روند مستمر قرار دارد. اغلب، مهندسان طراح، مجذوب توسعه‌ی سخت‌افزار شده و از واسطه‌ها و آثاری که تصمیم‌های سخت‌افزاری بر دیگر عناصر سیستم می‌گذارد، غفلت می‌کنند. گاهی فرایند توسعه‌ی سخت‌افزار به نیاز برای نرم‌افزار در یک سطح پایین می‌انجامد. به‌علاوه، ملاحظات انسانی، به‌عنوان عنصری از سیستم، اغلب در فرایند طراحی نادیده گرفته می‌شود. به خاطر این موارد در گذشته، ادغام عناصر سیستم تا اواخر فاز طراحی و توسعه تفصیلی و طی ادغام و آزمایش سیستم صورت نمی‌پذیرفت (به بلوک 2.3 شکل ۴-۴ مراجعه کنید)، و اغلب باعث ایجاد عدم تطابق شده و هزینه‌های اصلاحی سنگینی را به‌وجود می‌آورد.

بنابراین، هدف اصلی مهندسی سیستم‌ها حصول اطمینان از هماهنگی و به‌موقع بودن ادغام همه عناصر سیستم (و فعالیت‌های مرتبط با آن‌ها) از آغاز کار است. این موضوع می‌تواند با شروع مناسب و تعریف نیازمندی‌ها از طریق فراهم آوردن مشخصات فنی که به خوبی نگارش شده است، صورت پذیرد. این موضوع شامل زمان‌بندی مناسب بازیابی‌های رسمی طراحی نیز می‌شود که تضمین می‌کند ارتباطات مناسبی در سرتاسر پروژه وجود خواهد داشت و بررسی می‌کند که همه‌ی عناصر سیستم در زمان بازیابی دارای تطابق هستند. هنگامی که عدم تطابق رخ می‌دهد، طراحی سخت‌افزار نباید بدون حصول اطمینان از وجود نرم‌افزار قابل تطبیق به آن پیشروی داشته

باشد؛ توسعه نرم‌افزار بدون حصول اطمینان از منطبق بودن آن با نرم‌افزار نباید صورت پذیرد؛ و مواردی از این قبیل.

۵-۴- ابزارهای کمکی طراحی

تکمیل موفقیت آمیز فرایند طراحی به در دسترس بودن ابزارهای مناسب و کمکی طراحی که به تیم طراحی کمک می‌کنند تا اهدافش را به صورت اثربخش و کارا دنبال کند، بستگی دارد. کاربرد ابزارهای مهندسی به کمک رایانه (CAE) و طراحی به کمک رایانه (CAD) ایجاد گزینه‌های مختلف طراحی در طول چرخه‌ی عمر را ممکن می‌سازند. در مراحل اولیه طراحی، اغلب دشوار است که ساختار سیستم (یا عناصر آن‌ها) را به درستی تصور کرد و در ذهن آورد در حالی که با استفاده از CAD این امکان وجود دارد که به صورت سه بعدی چنین تصویری را فراهم آورد. در برخی موارد، اعتبارسنجی نیازمندی‌های سیستم از طریق روش‌های شبیه‌سازی طی فازهای طراحی اولیه و طراحی و توسعه تفصیلی انجام می‌شود تا سخت‌افزارها، نرم‌افزارها و غیره معرفی شوند. از طریق استفاده مناسب از این موارد و فناوری‌های مرتبط (شامل کاربرد مناسب مدل‌های تحلیلی انتخاب شده)، تیم طراحی در تولید سریع‌تر یک طراحی استوار که هم‌زمان ریسک فنی برنامه کلی را کاهش می‌دهد، توانمند می‌سازد.

به عنوان یک ابزار کمکی برای طراح، برخی اوقات مدل‌های سه بعدی فیزیکی یا مدل آزمایشی (با ابعاد واقعی) ساخته می‌شود تا شبیه‌سازی واقعی ساختار پیشنهادی سیستم فراهم شود. مدل‌ها می‌توانند در هر مقیاسی و با عمق متغیر جزئیات که بستگی به سطح تاکید مطلوب دارد، توسعه داده شوند. مدل‌های آزمایشی می‌توانند برای سیستم‌های بزرگ و کوچک توسعه یافته و با استفاده از مقوای چوب، فلز، یا ترکیبی از مواد مختلف ساخته شوند. مدل‌های آزمایشی می‌توانند نسبتاً ارزان ساخته شده و در یک مدت زمان کوتاه توسعه یابند. طراحی صنعتی و فاکتورهای انسانی در بسیاری از سازمان‌ها در دسترس هستند و در این راستا هدایت شده‌اند و باید تا حد

ممکن مورد استفاده قرار گیرند. برخی از ارزش‌ها و موارد کاربردی مدل‌های آزمایشی در زیر توضیح داده شده است:

۱. فراهم آوردن فرصت آزمایش چیدمان‌های مختلف تسهیلات، طرح کلی جمع‌بندی و غیره، پیش از تهیه داده‌های طراحی نهایی. یک مدل آزمایشی یا مدل مهندسی از پل عبوری از رودخانه که پیشنهاد شده است، می‌تواند ساختار کلی را بهتر به تصویر بکشد، مکان آن را نشان دهد، واسطه‌های دو طرف رودخانه را نمایش دهد و غیره.
۲. فراهم آوردن فرصت برای مهندسی فاکتورهای انسانی، قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیرات برای انجام بازیابی اثربخش‌تر ساختار طراحی پیشنهاد شده برای الحاق خصوصیات قابلیت پشتیبانی.
۳. فراهم آوردن ابزار برای مهندس فاکتورهای انسانی و قابلیت نگهداری و تعمیرات برای استفاده در تخمین‌ها و تحلیل‌های تفصیلی تکالیف. اغلب این امکان وجود دارد تا تکالیف نگهداری و تعمیرات و کاربران را شبیه‌سازی کرد و توالی تکالیف و داده‌های زمانی را به‌دست آورد.
۴. فراهم آوردن یک ابزار عالی برای مهندس طراح در ترسیم رویکرد نهایی طراحی طی یک بازیابی طراحی رسمی.
۵. سرویس‌دهی به‌عنوان یک ابزار بازاریابی عالی.
۶. می‌تواند برای تسهیل آموزش به‌کارکنان نگهداری و تعمیرات و کاربران به‌کارگرفته شود.
۷. می‌تواند توسط کارکنان مهندسی صنایع و تولید در توسعه فرایندهای مونتاژ، ساخت، تدارکات، طراحی ابزارآلات و جیگ و فیکسچرهای همراه مورد استفاده قرار گیرد.

۸. می‌تواند به‌عنوان یک ابزار در مرحله آخر چرخه‌ی عمر سیستم برای تصدیق اعتبار اصلاحات طراحی پیش از فراهم آوردن داده‌های رسمی و توسعه‌ی سخت‌افزار، نرم‌افزار و موارد پشتیبانی خدمت کند.

به‌طور ویژه، در حوزه‌ی توسعه نرم‌افزار، طراح برای ساخت بسته نرم‌افزاری نمونه تمایل دارد. موضوعات در طراحی نرم‌افزار با دیگر حوزه‌های مهندسی متفاوت است و تولید انبوه یک هدف معمول نیست. به جای آن، هدف توسعه نرم‌افزاری است که با دقت ویژگی‌های مطلوب کاربر (مشتري) را توصیف کند. برای مثال، در طراحی نمایشگر یک ایستگاه کاری پیچیده، کاربر در ابتدا ممکن است مفاهیم ارائه شده در روتین‌های دستوری و فرمت داده‌ها بر روی صفحه نمایش را متوجه نشود. هنگامی که سیستم تحویل داده می‌شود، مشکلات رخ داده و واسطه‌های کاربر به دلایل مختلف قابل قبول نخواهند بود. تغییرات پیشنهادی پس از آن انجام شده و اغلب هزینه‌های اصلاح و دوباره کاری بسیار بالاست.

جایگزین آن توسعه یک نمونه در ابتدای فرایند طراحی سیستم است، نرم‌افزار کاربرد را طراحی کنید، کاربر را در نمونه عملیاتی درگیر کنید، تغییرات لازم را اعمال کرده و دوباره کاربر را در جریان کار بگذارید و به همین منوال ادامه دهید. این فرایند تکرار شونده و تکاملی توسعه نرم‌افزار، از طریق فازهای طراحی اولیه و طراحی تفصیلی انجام شده و نمونه‌سازی سریع نامیده می‌شود. نمونه‌سازی سریع کاری است که اغلب پیاده شده و به‌صورت ذاتی در فرایند مهندسی سیستم قرار دارد، مخصوصاً در توسعه سیستم‌های نرم‌افزاری بزرگ.

۵-۵- داده، اطلاعات و ادغام طراحی

در نتیجه‌ی پیشرفت فناوری سیستم‌های اطلاعات، روش‌های مستندسازی طراحی به‌سرعت در حال تغییر است. این پیشرفت‌ها، استفاده از پایگاه‌های داده گسترده برای مقاصد پردازش، ذخیره‌سازی و بازیابی اطلاعات را ترویج می‌کنند. از طریق تکنیک‌های CAD، اطلاعات را

می‌توان به صورت تصاویر سه بعدی، نقشه‌های دوبعدی و در فرمت دیجیتال یا ترکیبی از این موارد ذخیره کرد. با استفاده از ابزارهای گرافیکی رایانه‌ای، قابلیت‌های پردازشی نوشتاری، ارتباطات از طریق پست الکترونیک، فناوری‌های تصویری و موارد مشابه آن، طراحی را می‌توان با جزئیات بیش‌تر، در قالبی ارائه داد که به سادگی اصلاح می‌شود و به سرعت به نمایش در می‌آید.

اگرچه پیشرفت‌های زیادی در کاربرد روش‌های رایانه‌ای در اکتساب، ذخیره‌سازی و بازیابی اطلاعات صورت گرفته است، همچنان نیاز به روش‌های ساده‌تر در مستندسازی طراحی باقی مانده است. این موضوعات شامل ترکیبی از موارد زیر می‌شود:

۱. نقشه‌های طراحی - نقشه‌های مونتاژ، نقشه‌های کنترل، نقشه‌های منطقی، چیدمان‌های

سازه‌ای، نقشه‌های راه اندازی و نصب، و غیره.

۲. فهرست قطعات و مصالح - فهرست قطعات، فهرست مصالح، فهرست آیتم‌های دیر

تحويل، فهرست آیتم‌های بزرگ و حجیم، فهرست تدارکات و غیره.

۳. تحلیل‌ها و گزارش‌ها - گزارش‌های مطالعات موازنه که تصمیم‌ها را پشتیبانی می‌کنند،

تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیرات، تحلیل‌های

فاکتورهای انسانی، گزارش‌های ایمنی، تحلیل‌های قابلیت پشتیبانی، گزارش‌های

شناسایی ساختار، مستندات رایانه‌ای، دستورالعمل‌های مونتاژ، نصب و راه‌اندازی و غیره.

نقشه‌های طراحی که منبع اصلی تعاریف را تشکیل می‌دهند، بسته به هدف طراحی در شکل

و کارکرد متغیر است. این اهداف می‌توانند نوع تجهیز در حال توسعه، میزان توسعه‌ی موردنیاز،

واگذاری طراحی به پیمانکار و غیره باشند. برخی از انواع رایج نقشه‌ها در شکل ۵-۶ نمایش داده

شده است.

طی فرایند طراحی تفصیلی، مستند سازی مهندسی اغلب به صورت ابتدایی و سپس با پیشرفت تدریجی در عمق و گستره‌ی تعاریف لازم، تولید محصول را امکان پذیر می کند. طراح مسئول، با استفاده از ابزارهای کمکی طراحی، یک نمودار وظیفه‌ای از کل سیستم ایجاد می کند. وظایف سیستم تحلیل شده و مفاهیم جمع بندی ابتدایی فرض می شوند. با کمک متخصصان علوم مختلف (عمران، برق، مکانیک، سازه، اجزاء، قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیرات، قابلیت حفاظت) و تامین کننده داده‌ها، چیدمان طراحی تفصیلی برای زیر سیستم‌ها، واحدها، مونتاژها، و زیرمونتاژها تهیه می شود. نتایج در قالب توانمندی‌های وظیفه‌ای، قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی، ایمنی، بهره‌وری و دیگر پارامترهای طراحی تحلیل شده و ارزیابی می شود تا از تطابق با نیازمندی‌های تخصیص داده شده و معیارهای مشخص شده طراحی در ابتدای فرایند طراحی سیستم اطمینان حاصل شود. این بازبینی و ارزیابی در هر مرحله در توالی طراحی اتفاق می افتد و اغلب گام‌های نمایش داده شده در شکل ۵-۷ را دنبال می کند.

داده‌های مهندسی در مقابل معیارهای چک لیست و استانداردهای طراحی بازبینی می شود. از طریق بخش‌های صنعتی و دولتی، کتاب‌های راهنما و استانداردهای طراحی توسعه داده شده است تا داده‌های تامین کننده و قطعات و اجزای ارجح، کار تولید و طراحی ارجح، سطوح کیفیت برای محصول خاص، نیازمندی‌های ایمنی و موارد مشابه پوشش داده شود. این استانداردها (ANSI, EIA, ISO) چنانچه قابل کاربرد باشد، می تواند به عنوان پایه‌ای برای بازبینی و ارزیابی طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

۱. نقشه‌های مقدماتی - روابط واحدهای اصلی آیتم پوشش داده شده را با یا بدون ابعاد کنترلی را نشان می‌دهند.
۲. نقشه‌های مونتاژ - روابط مونتاژی (الف) دو یا چند قطعه، (ب) ترکیبی از قطعات و زیرمونتاژها، یا (پ) گروهی از قطعات مونتاژی را که برای تشکیل یک تجهیز در سطحی بالاتر مورد نیاز است، ترسیم می‌کنند.
۳. نمودار اتصالات - اتصالات الکتریکی نصب و راهاندازی یا قطعات و دستگاه‌های اجزای آن را نشان می‌دهد.
۴. نقشه‌های ساخت - طراحی ساختمان‌ها، سازه‌ها و ساختارهای مربوطه را ترسیم می‌کنند (شامل عملیات مهندسی عمران و معماری).
۵. نقشه کنترلی - یک نقشه مهندسی است که مواردی را آشکار می‌کند که عبارت‌اند از ساختار و محدودیت‌های ساختار، نیازمندی‌های آزمایش و عملکرد، محدودیت‌های وزنی و حجمی، دسترسی، الصاق لوله‌ها و کابل‌ها، نیازمندی‌های پشتیبانی و غیره را تا حد لازم که در آن یک قطعه بتواند توسعه یافته یا از بازار تهیه شود تا نیازمندی‌های بیان شده را برآورده کند. نقشه‌های کنترلی به‌عنوان کنترل محدوده (محدودیت‌های ساختار)، کنترل مشخصات فنی، کنترل منابع، کنترل واسطه‌ها، و کنترل نصب و راهاندازی شناخته می‌شوند.
۶. نقشه تفصیلی - نیازمندی‌های کامل آیتم نهایی برای قطعه معین شده در نقشه را ترسیم می‌کند.
۷. نقشه ارزیابی - نمایش عمودی ساختمان‌ها یا سازه‌ها و یا پروفایل‌های تجهیزات را ترسیم می‌کند.
۸. نقشه‌های مهندسی - یک سند مهندسی است که از طریق روش‌های ارائه نوشتاری یا تصویری، یا ترکیبی از هر دو، نیازمندی‌های محصول نهایی یک آیتم را به‌صورت فیزیکی و وظیفه‌ای نمایان می‌کند.
۹. نقشه نصب و راهاندازی - ساختار عمومی و اطلاعات لازم برای نصب و راهاندازی یک آیتم را نشان می‌دهد که با ساختار پشتیبانی آن در ارتباط است.
۱۰. نمودار منطق - توالی و وظیفه مدار منطق را از طریق نمادهای گرافیکی نمایش می‌دهد.
۱۱. نقشه‌های کنترل عددی - مهندسی فیزیکی و وظیفه‌ای و نیازمندی‌های محصول یک آیتم را نشان داده تا تولید آن را با روش‌های کنترلی تسهیل کند.
۱۲. نمودار لوله‌کشی - اتصالات داخلی اجزا توسط لوله، تیوب، یا شلنگ را نشان داده و هنگامی که مطلوب باشد، توالی جریان سیال هیدرولیک یا هوا را در سیستم نمایش می‌دهد.
۱۳. فهرست سیم‌کشی - یک نقشه در قالب کتاب است که داده‌ها و دستورالعمل‌های مورد نیاز برای ایجاد اتصال بین سیم‌ها در آیتم‌ها یا بین آن‌ها را فراهم می‌کند.
۱۴. نمودار شماتیک - از طریق نمادهای گرافیکی، اتصالات الکترونیکی و وظایف یک مدار مشخص را نمایش می‌دهد.
۱۵. نمودارهای نرم افزار - نمودارهای جریان وظایف، جریان‌های فرایند، و نقشه‌های کدنویسی.
۱۶. نقشه‌های مهار کابل و سیم‌کشی - نشان دهنده مسیر گروهی از سیم‌ها که در یک ساختار مشخص قرار دارند و آماده نصب هستند.

شکل ۵-۶- دسته‌بندی نقشه‌های مهندسی رایج

چک‌لیست‌ها برای کاربرد خاصی از سیستم توسعه داده شود. برای مثال، فرایند تعریف نیازمندی‌ها در شناسایی اولیه شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) کمک‌کننده بوده است. این TPM‌ها در ادامه اولویت‌بندی شده تا سطوح اهمیتی آن‌ها را منعکس کنند (شکل ۳-۱۷). فاکتورهای کمی و کیفی سطح بالا برای استقرار معیارهای مناسب طراحی در هر سطح در ساختار سلسله مراتبی سیستم تخصیص داده می‌شوند (شکل ۴-۶). یک درخت پارامترهای طراحی را می‌توان فراهم کرد تا روابط بالا به پایین را به‌دست آورد. در نهایت، سوالاتی برای پشتیبانی از هر یک از پارامترها توسعه داده می‌شود و در یک چک‌لیست نهایی قرار داده می‌شود. هر سوال باید به یک TPM مشخص مربوط باشد. چک‌لیست‌های به‌دست آمده برای ارزیابی طراحی به کار گرفته می‌شوند. از طریق بازبینی داده‌های در دسترس طراحی، درجه انطباق با معیارهای چک‌لیست ارزیابی شده و پیشنهادی ارائه می‌شود که ممکن است آیت‌م را تایید کرده، پیشنهاد اصلاح دهد یا آن را رد کند.

شکل ۵-۸ یک چک‌لیست مختصر را نشان می‌دهد که طبیعتی عمومی دارد. هر کدام از دسته‌های شناسایی شده توسط سوالات تفصیلی پشتیبانی می‌شود (پیوست ب). این سوالات به‌نوبه‌ی خود باید بر پایه معیارهای کمی و کیفی بوده و همراه با فاکتورهای وزن‌دهی به این معیارها باشد تا اهمیت هر یک از آن‌ها مشخص باشد. این معیارها در دستیابی به یک طراحی استوار و کامل کمک کننده خواهند بود.

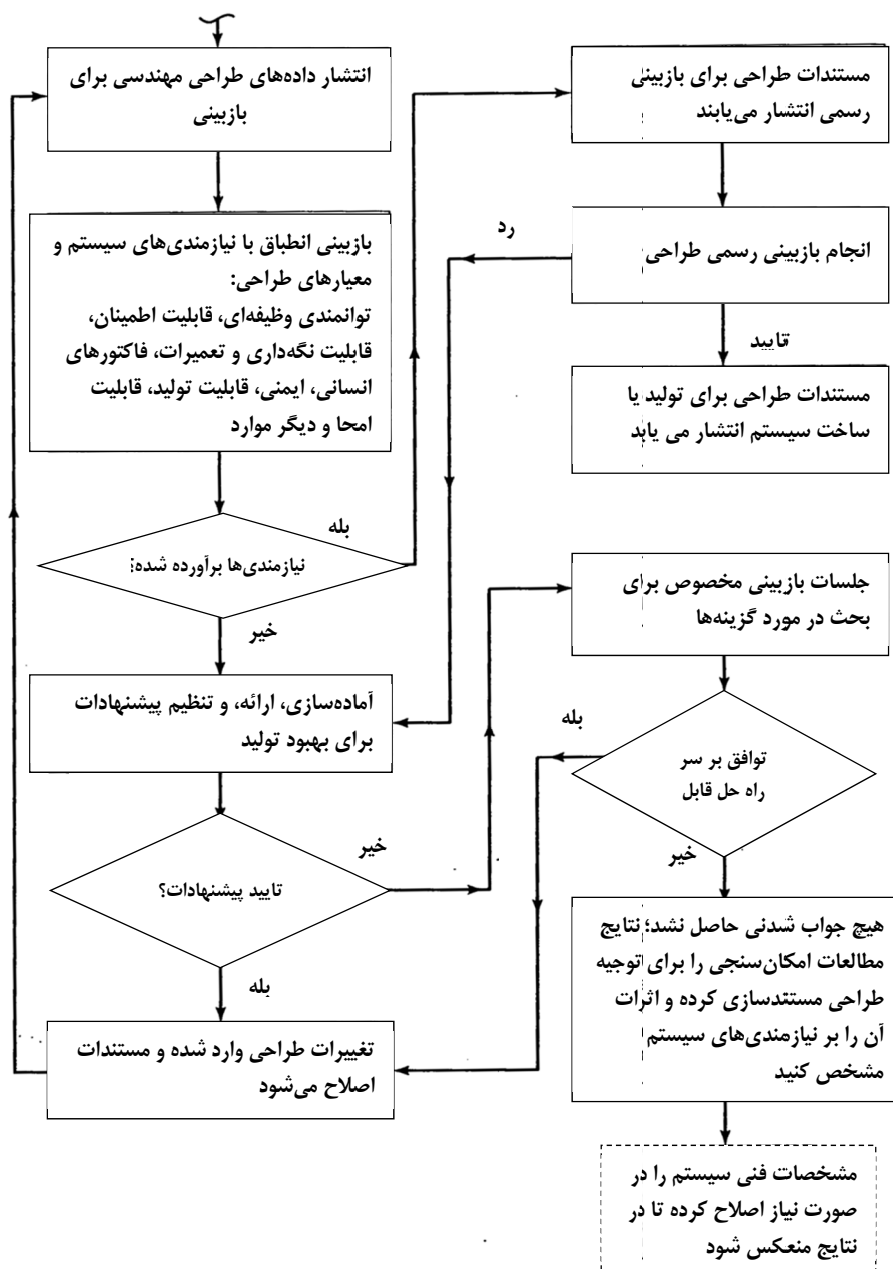
۵-۶- توسعه مدل‌های مهندسی

با پیشرفت طراحی و توسعه سیستم، فرایندهای اصلی سیستم از تشریح سیستم در قالب نقشه‌ها، مستندات و پایگاه‌های داده به سمت ساخت مدل فیزیکی یا مدل آزمایشی، ساخت مدل آزمایشگاهی یا مهندسی، ساخت نمونه و در نهایت تولید محصول نهایی تکامل می‌یابند. هدف از حرکت در قالب این گام‌ها فراهم آوردن یک پایه و اساس محکم در ارزیابی و اعتبارسنجی

طراحی است. بهتر است در فرایند طراحی هر چه زودتر بتوان به این هدف دست یافت، زیرا هر چقدر که تغییر اصلاحی در سیستم دیرتر (یعنی زمانی که طراحی به فاز تولید/ ساخت نزدیک‌تر می‌شود) انجام شود، هزینه‌بر و تخریبی‌تر خواهد بود.

دو گام ابتدایی در توالی توسعه‌ی این موضوع در قسمت‌های قبل بحث شد: قسمت ۴-۵ توسعه مدل آزمایشی و قسمت ۵-۵ توسعه نیازمندی‌های داده و مستندسازی را مورد بحث قرار داد. در این مرحله، نتایج به‌دست آمده یک مدل واقعی و کارکردی از سیستم را ایجاد نکرده است.

در برخی نقاط در فاز طراحی و توسعه تفصیلی، ممکن است ایجاد مدل مهندسی (یا مدل آزمایشگاهی) مناسب باشد. هدف، نمایش برخی یا همه وظایف است که سیستم در نهایت باید برای مشتری انجام دهد که با ساخت یک مدل عملیاتی و استفاده از آن در محیط تحقیقاتی در یک کارگاه مهندسی یا مشابه آن است. این مدل می‌تواند با استفاده از قطعات غیراستاندارد یا بدون صلاحیت ساخته شده و لزوماً نباید ساختار سیستمی را که در نهایت باید ساخته شود، داشته باشد. مقصود از آن اعتبارسنجی خصوصیات عملکردی خاص و ایجاد اطمینان از این که همه اجزا در کنار هم درست کار می‌کنند.



شکل ۵-۷- چرخه بازبینی داده‌های طراحی (به شکل ۵-۴ مراجعه کنید)

چک لیست بازیابی طراحی سیستم

عمومی

۱. نیازمندی‌های سیستم تعریف شده‌اند	۷. مستندسازی طراحی کامل شده است
۲. فاکتورهای اثربخشی استقرار یافته‌اند	۸. نیازمندی‌های پشتیبانی تدارکات تعریف شده‌اند
۳. مفهوم نگهداری و تعمیر سیستم تعریف شده است	۹. نیازمندی‌های اکولوژیکی برآورده شده‌اند
۴. تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای صورت گرفته است	۱۰. نیازمندی‌های اجتماعی برآورده شده‌اند
۵. مطالعات موازنه سیستم مستند شده است	۱۱. امکان‌سنجی اقتصادی مشخص شده است
۶. برنامه مدیریت مهندسی سیستم کامل شده است	۱۲. نیازمندی‌های قابلیت حفاظت برآورده شده‌اند

مشخصات

ویژگی‌های طراحی - آیا طراحی به حد کفایت ملاحظات زیر را منعکس می‌کند:

۱. قابلیت دسترسی	۱۲. بسته بندی و سوار کردن
۲. اصلاح و تنظیم	۱۳. پنل‌های نمایش و کنترل‌ها
۳. کابل‌ها و اتصال دهنده‌ها	

۴. کالبره کردن	۱۴. قابلیت تولید
۵. قابلیت امحا	۱۵. قابلیت اطمینان
۶. محیط	۱۶. ایمنی
۷. چفت و بست‌ها	۱۷. انتخاب مواد/قطعات
۸. جابه‌جایی	۱۸. سرویس و روانکاری
۹. فاکتورهای انسانی	۱۹. نرم‌افزار
۱۰. قابلیت تعویض	۲۰. استاندارد کردن
۱۱. قابلیت نگهداری و تعمیرات	۲۱. قابلیت پشتیبانی
	۲۲. قابلیت آزمایش

شکل ۵-۸ - چک‌لیست نمونه برای بازیابی طراحی

هنگامی بازیابی طراحی (چیدمان‌ها، نقشه‌ها، فهرست قطعات، گرافیک‌های رایانه‌ای، گزارش‌های مهندسی، برنامه‌های دستورکار)، این چک‌لیست می‌توان در پوشش وظایف برنامه‌های مختلف و ویژگی‌های طراحی مفید باشد. آیتم‌های فهرست شده می‌تواند با معیارهای تفصیلی بیش‌تر که در پیوست ب بحث شده است، همراه باشد. جواب همه‌ی آیتم‌های فهرست شده باید **بله** باشد.

۵-۷- توسعه‌ی نمونه سیستم

یک مدل نمونه ساختار تولیدی/ساخت یک سیستم (و عناصرش) را از هر جهت نمایش می‌دهد و تنها صلاحیت انجام عملیات و آزمایش‌های محیطی را به‌طور کامل ندارد. این مدل از قطعات رایج و تایید شده، با استفاده از مونتاژهای استاندارد و فرایندهای آزمایشی و با ساختار طراحی مشابه آنچه در نهایت قرار است به مشتری تحویل داده شده و در محیط عملیاتی او مورد استفاده قرار گیرد، ساخته می‌شود. سیستم نمونه از تجهیزات اصلی، نرم‌افزارهای عملیاتی، تسهیلات عملیاتی، داده‌های فنی و عناصر همراه با زیربنای نگهداری و تعمیرات و پشتیبانی که موردنیاز است، تشکیل می‌شود. هدف، انجام برخی آزمایش‌های مشخص به‌منظور ارزیابی طراحی پیش از ورود به فاز آزمایش و ارزیابی رسمی است. به‌عنوان بخشی از فرایند طراحی و توسعه سیستم کلی، ارزیابی مهندسی وظایف شامل استفاده از ابزارهای تحلیلی، مدل‌های آزمایشی فیزیکی، مدل‌های مهندسی، مدل‌های نمونه و ترکیب‌های متنوعی از این موارد می‌شود. براساس نوع و طبیعت سیستم (و وظایفش)، انتخاب و توسعه برخی از انواع "المثنی" سیستم متغیر است. هدف در این‌جا کمک به اعتبارسنجی مفاهیم فنی و رویکردهای مختلف طراحی سیستم است. حوزه‌های عدم تطابق با نیازمندی‌های مشخص شده شناسایی شده و اصلاحات مورد نیاز انجام می‌شود.

۵-۸- بازیابی، ارزیابی و بازخورد طراحی

اهداف اصلی و مزیت‌های فرایند بازیابی، ارزیابی و بازخورد مانند آن چیزی است که در قسمت ۳-۱۰ تشریح شد و انواع و زمان‌بندی بازیابی رسمی طراحی در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در قسمت ۴-۸ اشاره شد، فعالیت بازیابی و ارزیابی طراحی پیوسته بوده و شامل (۱) یک فرایند بازیابی و ارزیابی روزانه، تکرار شونده و غیررسمی، و (۲) زمان‌بندی

بازبینی‌های رسمی طراحی در نقاط گسسته زمانی و در سرتاسر فرایند اکتساب سیستم می‌شود. هدف، انجام هر نوع از بازبینی‌ها برای ارزیابی این است که آیا ساختار طراحی با نیازمندی‌های کمی و کیفی از پیش تعیین شده مطابقت دارد یا نه. شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) که در فاز طراحی مفهومی شناسایی و اولویت‌بندی شده (قسمت ۳-۶) و به عناصر مختلف سیستم تخصیص یافته است (قسمت ۴-۳-۲)، باید برای حصول اطمینان از انطباق با نیازمندی‌های مشخص شده اندازه‌گیری شود. به‌علاوه، این شاخص‌های حساس باید از یک بازبینی به بازبینی دیگر رهگیری و کنترل شود.

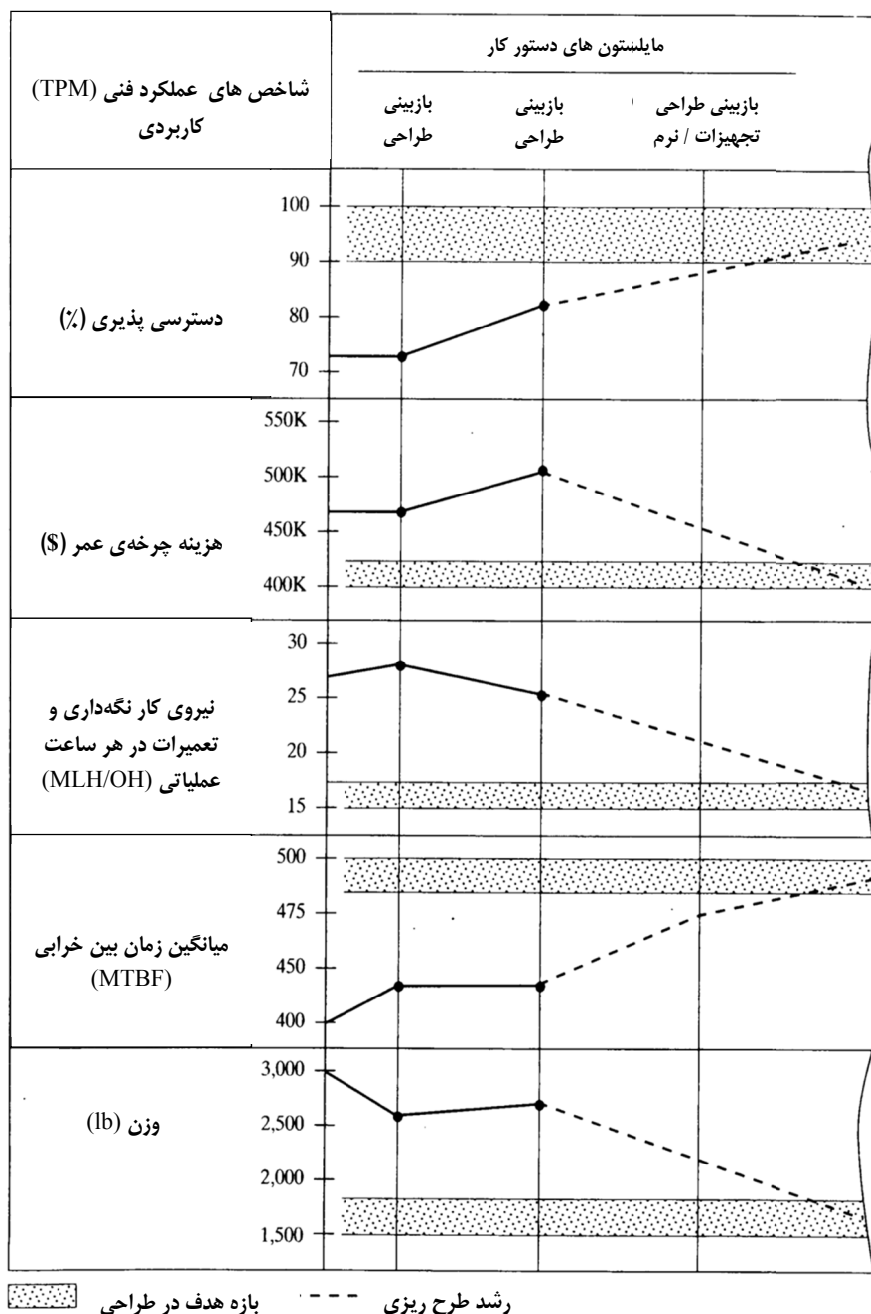
۵-۸-۱- رهگیری و کنترل TPM‌ها

در شکل ۵-۹ پنج TPM کلیدی انتخاب شده است تا رهگیری آن‌ها بررسی شود. فرض شده است که نیازمندی‌های کمی مشخص شده و با یک بازه قابل قبول "هدف" برای هر یک از مقادیر همراه شده است. برای نمونه، دسترسی‌پذیری عملیاتی سیستم (A_0) باید حداقل ۰/۹۰ باشد، اما مقادیر بالاتر نیز قابل قبول است. در نتیجه یک بازبینی طراحی سیستم، مشخص شده است که A_0 حدود ۰/۸۲ است. در نتیجه، نیاز است که یک برنامه رسمی توسعه طراحی تدوین شود که در آن فرایند موردنیاز برای درک گام‌های ضروری در افزایش قابلیت اطمینان درک شود تا نیازمندی ۰/۹۰ برآورده شود. هر یک از TPM‌های مشخص شده باید به روشی مشابه بازبینی شوند.

برای سیستم‌هایی که نسبتاً بزرگ هستند، ممکن است نیازمندی‌های TPM متمایز که باید برآورده شوند، متعدد باشند و باید آن‌ها را اولویت‌بندی و اهمیت نسبی هر کدام را مشخص کرد. درحالی‌که همه نیازمندی‌ها ممکن است مهم باشند، در برخی طراحان این گرایش وجود دارد که نیازمندی یک TPM را بر دیگری ترجیح دهند. با دانستن این موضوع که طراحی سیستم، نیازمند یک رویکرد تیمی است و این موضوع که اعضای مختلف تیم دارای تخصص‌های متفاوت

هستند، ممکن است نیاز به تلاش بیش‌تری باشد تا اطمینان حاصل شود که طراحی یک نیازمندی را بدون صرف‌نظر کردن از دیگری برآورده می‌کند. برای مثال، اگر سیستم در حال توسعه یک سیستم هوافضا باشد، وزن، اندازه و سرعت موضوعات حساسی بوده و از نقطه‌نظر مهندس هوافضا اهمیت بالایی دارد. در مقابل، نیازمندی MLH/OH موضوعی نیست که مدنظر مهندس هوافضا باشد، اما هنگامی که خصوصیات قابلیت نگهداری و تعمیر مطرح می‌شود، این نیازمندی اهمیت بالایی پیدا می‌کند.

برای حصول از برآورده شدن همه نیازمندی‌ها یا حداقل بررسی جدی آن‌ها، اعضای تیم طراحی باید TPM‌های مشخص را در سرتاسر فرایند طراحی رهگیری کنند. شکل ۵-۱۰ روابط بین TPM‌ها و علوم مختلف طراحی را (در قالب میزان اهمیت) نشان داده و مشخص می‌کند که تخصیص رهگیری کجا مشخص می‌شود. به عبارت دیگر، یک مهندس قابلیت اطمینان نیازمندی‌های مربوط به MTBF را رهگیری می‌کند، یک مهندس نگهداری و تعمیرات به MLH/OH، MTBM، و LCC علاقه دارد و موارد مشابه دیگر. از نقطه‌نظر مهندسی سیستم‌ها، همه فاکتورها باید بر اساس اولویت‌بندی مشخص شده رهگیری شوند.



شکل ۵-۹- اندازه گیری و ارزیابی پارامتر در بازبینی طراحی

MTBF (300 hr)	L	H	L	M	L	L	M	H	H	H	M	M	M
MTBM (250 hr)	L	L	L	L	L	M	H	L	L	M	L	L	H
سطوح مهارت کارکنان	M	L	M	M	H	M	H	L	L	L	L	L	H
اندازه (150ft by 75ft)	H	H	M	M	M	M	M	H	H	M	H	H	M
سرعت (450mph)	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	M	H
اثربخشی سیستم (80%)	M	L	L	M	L	M	M	L	L	M	M	M	H
وزن (150K.lb)	H	H	M	M	M	M	M	H	H	L	H	H	M

شکل ۵-۱- رابطه بین TPM ها و تخصص های مسئول در طراحی (H: توجه بالا؛ M: توجه متوسط؛ L: توجه اندک)

۵-۸-۲- رهگیری دیگر ملاحظات طراحی

با تکامل طراحی از طریق فرایند طراحی و توسعه تفصیلی، شامل انجام تحلیل‌های موازنه که منجر به انتخاب اجزا می‌شود، طراح باید از ملاحظات دیگری علاوه بر TPM آگاهی باشد. دو مورد از این ملاحظات در این جا به عنوان مثال ارائه می‌شود.

عمر موردانتظار هر یک از قطعات انتخاب شده در طراحی یکی از ملاحظات مهم است. اگر عمر قطعه کم‌تر از چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده سیستم باشد (یعنی یک "آیتم با عمر مفید بحرانی")، آنگاه این موضوع منجر به نیازمندی برای برنامه‌ی زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات به منظور تعویض قطعه می‌انجامد. اگر هنگام ترکیب و ادغام قطعات مختلف در یک قطعه مونتاژی بزرگ‌تر عمر موردانتظار از چرخه‌ی زمانی برنامه‌ریزی شده سیستم کم‌تر باشد، باز هم ممکن است نیاز به برنامه‌ریزی چرخه‌ی نگهداری و تعمیرات سیستم وجود داشته یا نیاز به طراحی مجدد برای رفع این مشکل باشد. در هر یک از این موارد، طراح باید موضوع کهنگی را در طراحی (قسمت ۴-۴) پیش از احقاق سیستم مورد بررسی قرار دهد، نه این که آن را رها کرده و اجازه دهد این موضوع بعداً حل شود.

یکی دیگر از این ملاحظات که باید در محیط کنونی رهگیری شود، مربوط به پیاده‌سازی اثربخش فرایند طراحی سیستم در زمانی محدود و با هزینه کاهش یافته است. کاهش فرایند (چرخه) اکتساب هم‌چنان یک هدف مطلوب است. به‌طور هم‌زمان، تمایل بر آن است که فرایند طراحی ادامه یافته و بر یک پایه تکاملی باشد و تا زمانی که ممکن باشد این کار طول بکشد تا لحظات آخر که سیستم به مشتری تحویل داده می‌شود، بهبودهای ممکن در طراحی اعمال شود. هرچقدر که این موضوع مطلوب به نظر آید، یک سیستم عالی که دیر تحویل داده شده و بیش از حد در آن هزینه شده باشد به عنوان یک شکست در نظر مشتری خواهد بود.

۵-۸-۳- انجام بازی‌های طراحی

بازی‌های طراحی به صورت دوره‌ای زمان‌بندی شده است. هر بازی‌ی به عمق برنامه‌ریزی، سازماندهی و آمادگی پیش از بازی‌ی بستگی دارد. هماهنگی‌های زیادی لازم است که شامل فاکتورهای زیر می‌شود:

۱. شناسایی آیت‌هایی که باید بازی‌ی شود.
۲. انتخاب تاریخ بازی‌ی.
۳. مکان یا تسهیلی که بازی‌ی در آن صورت می‌پذیرد.
۴. موضوع مورد بحث در بازی‌ی (شامل تعریف اهداف اصلی).
۵. یک برد بازی‌ی طراحی شامل عناصر سازمانی و تخصص‌های مختلف است که تحت‌تاثیر طراحی قرار می‌گیرند. این نمایندگان اصلی طراحی شامل قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی، کنترل کیفیت، تولید، قابلیت حفاظت و پشتیبانی لجستیک هستند. مسئولیت‌های سازمانی هر کدام باید مشخص باشد. بسته به نوع بازی‌ی، مشتری و/یا تامین‌کننده تجهیزات را می‌توان در بازی‌ی مشارکت داد.
۶. نیازمندی‌های تجهیزات (سخت‌افزارها) و/یا نرم‌افزار برای بازی‌ی. مدل‌های مهندسی، نمونه‌ها و/یا مدل‌های آزمایشی ممکن است برای تسهیل فرایند بازرسی مورد نیاز باشد.
۷. نیازمندی‌های داده‌های طراحی برای بازی‌ی. این موضوع ممکن است شامل مشخصات فنی کاربردی، فهرست‌ها، نقشه‌ها، داده‌های لجستیک، تحلیل‌ها و تخمین‌ها، داده‌های رایانه‌ای و گزارش‌های خاص باشند.
۸. نیازمندی‌های مالی. برنامه‌ریزی برای شناسایی منابع و روش‌های تامین بودجه برای انجام بازی‌ی‌ها.

۹. نیازمندی‌های گزارش‌دهی و مکانیسم انجام پیگیری‌های لازم که از پیشنهادات بازیینی طراحی نشأت می‌گیرد. مسئولیت‌ها و محدودیت‌های زمانی عمل - آیتم باید صورت پذیرد.

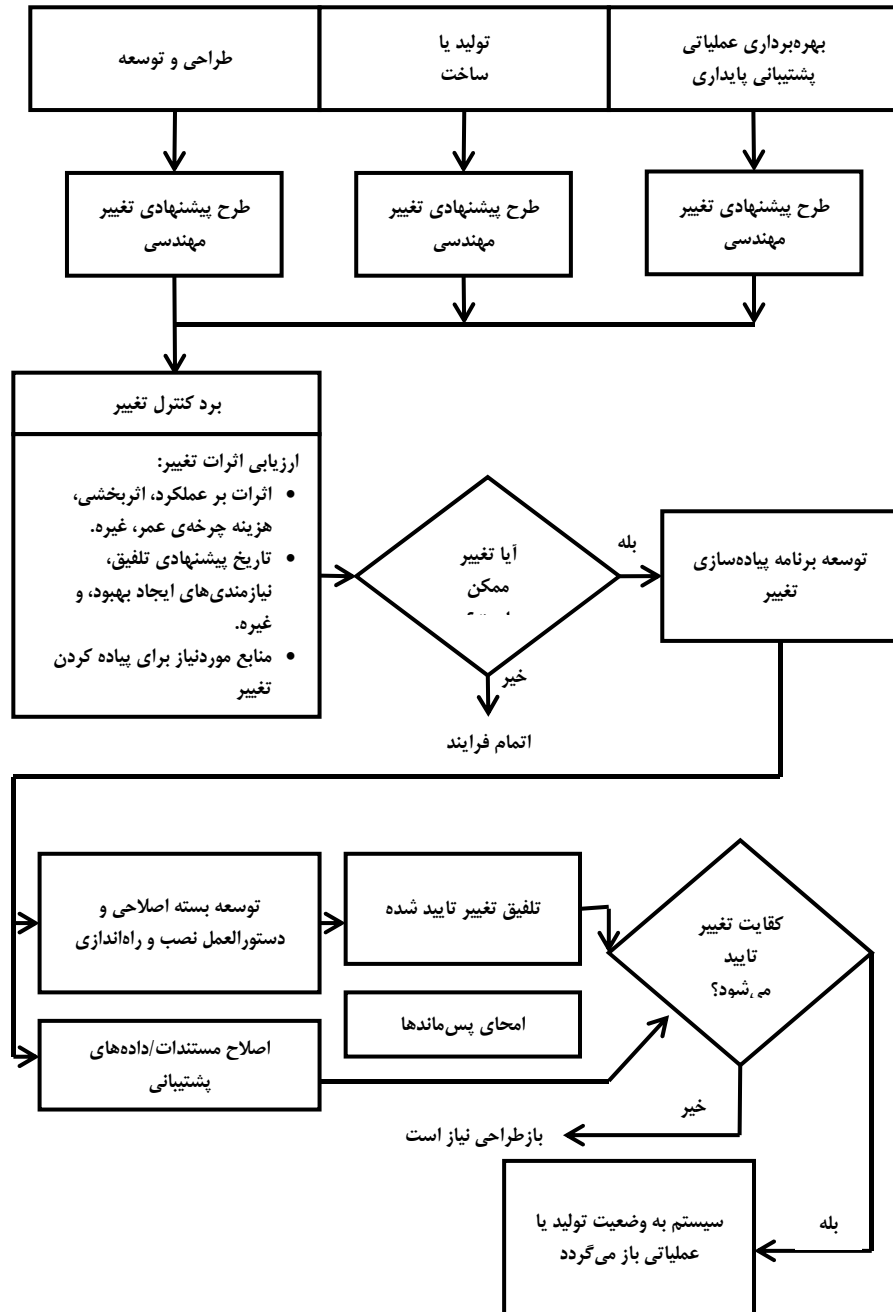
بازیینی طراحی شامل تعدادی از حوزه‌های علمی مختلف است که گستره‌ی متنوعی از داده‌های طراحی را پوشش می‌دهد و در برخی موارد شامل سخت‌افزار، نرم‌افزار و دیگر عناصر منتخب سیستم می‌شود. برای دستیابی سریع به اهداف بازیینی (یعنی بازیینی طراحی برای حصول اطمینان از برآورده شدن بهینه همه نیازمندی‌های سیستم)، بازیینی طراحی باید توسط برد ریاست بازیینی طراحی به‌خوبی سازماندهی و کنترل شود. جلسات بازیینی طراحی باید کوتاه بوده و متمرکز بر موضوع باشد و باید مراقب بود تا در این جلسات از موضوع اصلی بحث، دور نشد. افراد حاضر در جلسات باید محدود به افرادی باشد که به‌طور مستقیم با موضوعات طراحی درگیر بوده و بتوانند در موضوع مورد بررسی مشارکت داشته باشند. متخصصانی که در این جلسات همراه هستند، باید اختیار مذاکره و تصمیم‌گیری در مورد حوزه‌ی تخصصی خود را داشته باشند. در نهایت، بازیینی طراحی باید برای شناسایی، ثبت، زمان‌بندی و پایش فعالیت‌های اصلاحی مورد نیاز در ادامه، تدارکات لازم را فراهم ببیند. مسئولیت‌های مشخص برای فعالیت‌های بعدی باید توسط برد ریاست بازیینی طراحی تعیین گردیده و اختصاص داده شود.

۵-۹- تلفیق تغییرات طراحی

پس از استقرار خطوط مبنا در نتیجه‌ی بازیینی طراحی، تغییرات زیادی پایه‌گذاری می‌شود که دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد، از جمله اصلاح نقص در طراحی، بهبود یک محصول، تلفیق یک فناوری جدید، بهبود سطح قابلیت حفاظت، پاسخ به نیازمندی‌های عملیاتی یک تغییر، جبران قطعه منسوخ شده و غیره. تغییرات ممکن است طی پروژه‌ی بنیاد نهاده شده یا در نتیجه‌ی یک نیازمندی خارجی اعمال شده، به‌وجود آید.

در ابتدا ممکن است این‌طور به نظر آید که یک تغییر نسبتاً بی‌اهمیت است و ممکن است شامل یک تغییر در طراحی یک‌آیتم اصلی از یک تجهیز، یک اصلاح در نرم‌افزار، تجدیدنظر در یک داده، و/ یا یک تغییر در یک فرایند باشد. با این حال، چیزی که ممکن است در ابتدا به نظر جزئی آید، اغلب اثر بزرگی بر سیستم و در سرتاسر ساختار سلسله مراتبی آن ایجاد می‌کند. برای نمونه، یک تغییر در ساختار طراحی یک تجهیز اصلی (به‌طور مثال تغییر در اندازه، وزن، بسته‌بندی مجدد، و قابلیت عملکردی افزایش یافته) احتمالاً در موارد زیادی تغییر ایجاد می‌کند که عبارت‌اند از تغییر در نرم‌افزار مربوطه، طراحی تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، نوع و تعداد قطعات یدکی/تعمیر، داده‌های فنی، نیازمندی‌های حمل و نقل و جابه‌جایی، و مواردی از این قبیل. یک تغییر در نرم‌افزار می‌تواند بر تجهیز اصلی همراه با آن، داده‌های فنی و تجهیزات آزمایش اثرگذار باشد. به‌علاوه، اگر تعداد تغییراتی که باید به‌طور هم‌زمان صورت پذیرد، زیاد باشد، کل ساختار سیستم ممکن است از نقطه‌نظر حفظ قابلیت رهگیری نیازمندی‌ها به شدت نیاز به مصالحه داشته باشد.

تجربه سیستم‌های مختلف در گذشته مشخص می‌کند که تغییرات بسیاری زیادی در اواخر طراحی و توسعه تفصیلی، طی تولید یا ساخت، و/یا اوایل بهره‌برداری از سیستم و فاز پشتیبانی حفاظت سیستم صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شد، انجام تغییرات در این زمان از چرخه‌ی عمر ممکن است بسیار پرهزینه باشد؛ برای مثال، یک تغییر کوچک در یک تجهیز می‌تواند باعث تغییرات بعدی در نرم‌افزار، داده‌های فنی، تسهیلات، عناصر مختلف پشتیبانی، یا فرایند تولید شود.



شکل ۵-۱۱- فرایند کنترل تغییر

در حالی که تلفیق تغییرات (به هر دلیلی) اجتناب‌ناپذیر است، فرایند انجام آن باید به‌طور رسمی و کنترل شده باشد تا اطمینان حاصل شود که قابلیت رهگیری از خطوط مبنای یک ساختار به ساختار دیگر وجود خواهد داشت. همچنین، ضروری است تا تضمین شود که تلفیق این تغییرات با نیازمندی‌های مشخص شده در مشخصات فنی سیستم (نوع A) مطابق دارد. با مراجعه به شکل ۵-۱۱، یک تغییر پیشنهادی در ابتدا از طریق تهیه طرح پیشنهادی تغییر مهندسی (ECP^۱) و ارائه آن آغاز می‌شود که به‌نوبه‌ی خود توسط برد کنترل تغییرات (یا برد کنترل ساختار) بررسی می‌شود. هر یک از طرح‌های پیشنهادی تغییر باید به‌طور کامل از نقطه‌نظر آثار آن بر دیگر عناصر سیستم، TPM‌های مشخص شده، هزینه‌ی چرخه‌ی عمر و ملاحظات دیگر که در مراحل قبلی طراحی بررسی شده است (مانند قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی، قابلیت تولید، قابلیت حفاظت و قابلیت امحا)، مورد ارزیابی قرار گیرد. تغییرات تایید شده در ادامه منجر به توسعه‌ی بسته اصلاحی موردنیاز، دستورالعمل نصب و راهاندازی و تلفیق نهایی تغییر در ساختار سیستم می‌شود. براین اساس، نیاز به فرایند اصولی مدیریت ساختار (CM^۲) از ابتدا تا انتهای چرخه‌ی عمر به‌وجود می‌آید. این موضوع به‌خصوص در پیاده‌سازی موفق فرایند مهندسی سیستم‌ها مهم است.

۵-۱۰- خلاصه فصل

این فصل فرایند طراحی سیستم را ادامه داده و فاز طراحی و توسعه تفصیلی را پوشش می‌دهد. فرایند مهندسی سیستم‌ها که در شکل ۲-۳ و ۲-۴ نشان داده شد، چارچوب موردنیاز را فراهم می‌کند.

نیازمندی‌های طراحی تفصیلی (پایین‌تر از سطح زیرسیستم)، فرایند طراحی و ادغام فعالیت‌های طراحی، استفاده از ابزارهای کمکی در طراحی، تهیه داده‌ها و اسناد طراحی، توسعه‌ی

1, Engineering Change Proposal

2, Configuration Management

مدل‌های مهندسی و نمونه، پیاده‌سازی بازبینی و ارزیابی طراحی و پردازش و تلفیق تغییرات طراحی، موضوعات این فصل هستند. این موارد، در ادامه‌ی فصول ۳ و ۴، شالوده‌ی برنامه‌ریزی و موضوعات ارزیابی و آزمایش سیستم در فصل ۶ را فراهم می‌کنند.

برای انجام فعالیت‌های طراحی مهندسی، طراح (یعنی تیم طراحی) به تعداد منابع برای هدایت و راهنمایی بستگی دارد. در ابتدا، نیازمندی‌های سطح سیستم در قسمت‌های ۳-۳ تا ۳-۶ تشریح شد؛ معیارهای کیفی و کمی مشخصی از این نیازمندی‌ها تهیه می‌شوند (به‌طور مثال فاکتورهای TPM در شکل ۳-۱۷)؛ و انواع مشخصات فنی که در شکل ۴-۱ نشان داده است، فراهم می‌شوند (یعنی انواع A تا E مشخصات فنی).

خطوط راهنمای بیش‌تر در ANSI، EIA، IEEE، ISO و دیگر استانداردهای مرتبط فراهم شده است که این استانداردها، منجر به پیاده‌سازی طراحی به‌صورت استاندارد می‌شود. مهندس سیستم نه تنها باید از مشخصات فنی که در ساختار طراحی یک سیستم مشخص اعمال می‌شود، آگاهی داشته باشد، بلکه باید از استانداردهای مناسب که می‌تواند در سرتاسر طراحی و توسعه کلی مورد استفاده قرار گیرد، مطلع باشد. استانداردهایی مانند ANSI/GEIA EIA-632، IEEE 1220-1998، ISO 9001، ISO/IEC 15288، و منابع مشابه فراهم شده است. برای تسهیل این هدف، سازمان‌های استاندارد به‌عنوان منابع پیشنهادی برای مطالعات بیش‌تر در زیر فهرست شده است:

1. American National Standards Institute(ANSI)
2. Electronic Industries Alliance(EIA)
3. Government Electronics and Information Technology Association(GEIA)
4. International Organization for Standardization(ISO)

تمایل درونی بسیاری از طراحان انجام طراحی به صورت "آخرین و عالی‌ترین" است، حتی اگر منجر به قربانی کردن خطوط مبنای مدیریت و ساختار کنترل باشد. پیروی از این رویکرد نامناسب در گذشته، مشکلات زیادی را در مراحل پایانی چرخه‌ی عمر سیستم ایجاد کرده است. هزینه‌های تولید محصولات یکتا و مختلف (برخی همراه با تغییر و برخی بدون آن) بالا بوده و هزینه‌های نگهداری و پشتیبانی این سیستم‌ها که اندکی در ساختار متفاوت هستند، نیز بسیار بالاست. به عبارت دیگر، توسعه‌ی سیستم‌هایی که در آن‌ها کنترل‌های طراحی سست پیاده شده است (اگر کلاً نادیده گرفته نشده باشد)، هزینه‌های نهایی چرخه‌ی عمر بسیار بالا خواهد بود. بنابراین، درحالی که مناسب است به هدف نوین‌سازی طراحی سیستم و اکتساب محصول باید متعهد بود، همچنین نیاز است که برخی اشکال ساختار کنترل (یعنی کنترل تغییر) در فرایند حفظ شود. رویکرد خطوط مبنای مدیریت که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است و پیاده‌سازی درست اهداف مهندسی سیستم که در سرتاسر کتاب بیان شده است، در رسیدن به این هدف یاری‌رسان است. یک منبع خوب برای مدیریت ساختار، ANSI/GEIA EIA-649-A، National Consensus Standard for Configuration Management، Electronic Alliance(EIA)، Arlington, VA است. به وبسایت www.eia.org مراجعه کنید.

سوالات و مسائل

۱. تفاوت‌های بنیادی طراحی مفهومی، طراحی اولیه سیستم و طراحی توسعه مفهومی کدامند؟ آیا این مراحل طراحی در اکتساب همه سیستم‌ها کاربرد دارد؟ توضیح دهید.
۲. طراحی یک کار تیمی است، توضیح دهید، چرا؟ چه چیزی ساختار تیم طراحی را شکل می‌دهد؟ چطور این موضوع اجرا می‌شود؟ مهندسی سیستم‌ها چگونه در این فرایند قرار می‌گیرد؟

۳. به طور خلاصه نقش مهندسی سیستم‌ها را در فرایند کلی طراحی را مطابق با فصول ۳-۵ تشریح کنید.

۴. به شکل ۵-۱ مراجعه کنید. برخی مزایایی رویکرد هم‌زمان در طراحی کدامند؟ برخی از مشکلاتی را که در پیاده‌سازی آن‌ها مواجه هستیم، شناسایی کنید.

۵. به شکل ۴-۴ و ۴-۸ مراجعه کنید. به عنوان مدیر مهندسی سیستم‌ها در یک پروژه، چه گام‌هایی باید طی شوند تا از ادغام مناسب نیازمندی‌ها که در سه چرخه‌ی عمر (سخت‌افزار، نرم‌افزار و نیروی انسانی) از ابتدای کار اتفاق می‌افتد، اطمینان حاصل کرد؟
۶. به عنوان یک طراحی، یکی از وظایف شما انتخاب جزئی است که یک هدف خاص طراحی را برآورده کند. چه اولویت‌هایی در فرایند انتخاب در نظر می‌گیرید؟

۷. چرا استانداردهای طراحی (که به فرایندها و اجزا اعمال می‌شوند) مهم هستند؟

۸. چرا مستندات مهندسی و استقرار پایگاه داده طراحی ضروری هستند؟

۹. به شکل ۵-۵ مراجعه کنید. هنگامی که موازنه‌های لازم صورت می‌گیرند، ممکن است در این که کدام یک از سه گزینه موجود باید دنبال شوند، تردید و سردرگمی وجود داشته باشد. تشریح کنید که چه اطلاعاتی به عنوان ورودی نیاز است تا به رویکردی صریح و روشن تکامل یابد.

۱۰. تشریح کنید که چگونه استفاده از ابزارهای CAD، CAM و CAS می‌توانند فرایند طراحی را تسهیل کنند. برخی مزایای آن را شناسایی کنید. برخی از مشکلاتی را که در اجرای نادرست آن می‌تواند به وجود آیند، بررسی کنید.

۱۱. چگونه می‌توان ابزارهای CAD، CAM و CAS را در اعتبارسنجی طراحی به کار برد؟ برای دو مورد از آن‌ها مثال بیاورید.

۱۲. هدف از توسعه‌ی یک مدل فیزیکی از سیستم یا عنصری از آن در مراحل اولیه‌ی فرایند

طراحی سیستم چیست؟

۱۳. برخی تفاوت‌ها بین مدل مهندسی، مدل آزمایشگاهی و نمونه ساخته شده را بیان کنید.

۱۴. یک سیستم (یا عنصری از آن) را به دلخواه انتخاب کرده و یک چک‌لیست بازبینی

طراحی را توسعه داده تا برای مقاصد ارزیابی مورد استفاده قرار دهید (به شکل ۵-۸ و

پیوست ب مراجعه کنید).

۱۵. برخی مزایایی که می‌توان از استقرار فرایند بازبینی رسمی طراحی کسب کرد کدامند؟

۱۶. به شکل ۵-۹ مراجعه کنید. مقدار LCC پیش‌بینی شده برای سیستم در زمان بازبینی

طراحی سیستم حدود 500k\$ است که بالاتر از نیازمندی طراحی یعنی 420k\$ است.

چه گام‌هایی باید برداشته شوند تا نیازمندی نهایی در بازبینی طراحی انتقادی برآورده

شود؟ به تفصیل توضیح دهید.

۱۷. به شکل ۵-۱۰ مراجعه کنید. به‌عنوان مدیر مهندسی سیستم‌ها، چگونه از رهگیری

مناسب نیازمندی‌های همه TPM‌ها مطمئن می‌شوید؟

۱۸. چه چیز مشخص می‌کند که بازبینی طراحی موفقیت‌آمیز بوده است؟

۱۹. در ارزیابی امکان‌سنجی یک ECP، چه ملاحظات باید مدنظر قرار گیرد؟

۲۰. فرض کنید که یک ECP توسط CCB تایید شده است. چه گام‌هایی باید برداشته شوند

تا تغییر پیشنهادی پیاده شود.

۲۱. مدیریت ساختار چیست؟ چه زمانی می‌توان آن را پیاده کرد؟ چرا مهم است؟

۲۲. چرا مدیریت خطوط مبنا در پیاده‌سازی فرایند مهندسی سیستم‌ها این قدر مهم است؟

آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم

فعالیت‌های آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم باید طی فاز طراحی مفهومی در چرخه‌ی عمر، هم‌زمان با تعریف نیازمندی‌های طراحی سیستم صورت پذیرد. از این نقطه به بعد، آزمایش و ارزیابی توسط آزمایش هر جزء، آزمایش عناصر مختلف سیستم و زیرسیستم‌های عمده و سپس با آزمایش کل سیستم به‌عنوان یک موجودیت ادامه می‌یابد. هدف اقتباس یک رویکرد "پیش‌رونده" است که با تکامل فرایند طراحی و توسعه، خود را وقف پیاده‌سازی و بهبود مستمر می‌کند.

فعالیت‌های آزمایش و ارزیابی مورد بحث در این فصل می‌توانند در ابتدا هم‌ردیف با فعالیت‌های طراحی که در فصول ۳ تا ۵ تشریح شدند، انجام شوند و سپس در سرتاسر فازهای تولید/ساخت و بهره‌برداری و پشتیبانی سیستم ادامه یابند. این فصول یک رفتار تکاملی از فرایند طراحی سیستم را نشان می‌دهند و به خروجی‌های انتهایی فرایند که در آن‌جا نتایج، یک ساختار مشخص از سیستم را تعریف می‌کنند و توسط پایگاه داده طراحی پشتیبانی شده و توسط تحلیل‌های الحاقی تکمیل می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

گام بعدی، اعتبارسنجی است. اعتبارسنجی، همان‌طور که در این‌جا تعریف شده است، به گام‌ها و فرایند موردنیازی اطلاق می‌شود که اطمینان حاصل می‌کند ساختار سیستم، در هنگام طراحی

همه نیازمندی‌هایی را که از ابتدا توسط مشتری تعیین شده‌اند، برآورده می‌کند. فرایند اعتبارسنجی، طبیعی تکاملی دارد. با مراجعه به شکل ۲-۴، فعالیت‌های نشان داده شده در بلوک‌های 0.6، 1.5، 2.3 و 3.4 فرایند پیوسته‌ای از بازبینی، ارزیابی، بازخورد و اعتبارسنجی نهایی نیازمندی‌ها را نشان می‌دهد. این فعالیت‌ها اصولاً در جهت بررسی مفاهیم طراحی و عناصر مختلف سیستم قرار دارند. با این حال، تا این‌جا، یک رویکرد ادغامی برای اعتبارسنجی سیستم و عناصرش، به‌عنوان یک موجودیت ادغام شده، مورد بحث و بررسی قرار گرفته نشده است. اعتبارسنجی نهایی سیستم هنگامی اتفاق می‌افتد که سیستم هنگامی که در سطح بالاتری از ساختار SOS عملیات خود را انجام می‌دهد، به‌صورت اثربخش و کارا فعالیت کند.

هدف از این فصل ارائه‌ی یک رویکرد ادغامی برای آزمایش و ارزیابی سیستم و همچنین تسهیل اعتبارسنجی ساختار پیشنهادی سیستم است تا تضمین کند که سیستم به واقع نیازمندی‌های مشتری را برآورده می‌کند. این فصل موضوعات زیر را پوشش می‌دهد:

- مشخص کردن نیازمندی‌ها برای آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم؛
- تشریح دسته‌بندی‌های آزمایش و ارزیابی سیستم؛
- برنامه‌ریزی برای آزمایش و ارزیابی سیستم؛
- آماده‌سازی جهت آزمایش و ارزیابی سیستم؛
- انجام آزمایش، جمع‌آوری و تحلیل داده‌های آزمایش، مقایسه‌ی نتایج با نیازمندی‌های مشخص شده، تهیه یک گزارش از آزمایش؛
- اصلاح سیستم در صورت نیاز.

پس از اتمام این فصل، خواننده درک می‌کند که ارزیابی و اعتبارسنجی طراحی سیستم چگونه باید صورت پذیرد. بخش انتهایی این فصل، خلاصه‌ای از مطالب عنوان شده و منابعی برای مطالعه‌ی بیش‌تر را فراهم می‌کند.

۶-۱- فرایند آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم

هنگامی که نیازمندی‌های سطح سیستم از طریق تعریف نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم نگهداری، تعمیرات و پشتیبانی مشخص شدند، روشی باید ایجاد شود تا اندازه‌گیری و ارزیابی صورت پذیرفته و در ادامه مشخص شود که آیا این نیازمندی‌ها برآورده خواهند شد یا خیر. برای هر نیازمندی جدید این سوال مطرح است که چگونه می‌توانیم مشخص کنیم که آیا این نیازمندی برآورده می‌شود یا خیر، و چه رویکرد آزمایش و ارزیابی برای تصدیق اعتبار برآورده شدن نیازمندی باید پیاده‌سازی شود؟ نیازهای مشخص برای آزمایش کردن از شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) که در قسمت ۳-۶ تشریح شد، تکامل می‌یابند و عمق آزمایش تحت‌تاثیر سطح اهمیت که در اولویت‌بندی‌ها (شکل ۳-۱۷) منعکس شده است مقرر می‌شود.

شکل ۶-۱ یک فرایند ساده شده را نشان می‌دهد که می‌تواند از ابتدا پیاده شده و به‌صورت تکرارشونده مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع منجر به فراهم شدن برنامه اصلی آزمایش و ارزیابی (TEMP^۱) شده و یک رویکرد ادغام شده کلی برای اعتبارسنجی سیستم را فراهم می‌آورد. TEMP می‌تواند به‌صورت دوره‌ای همراه با تکامل فرایند طراحی و توسعه سیستم به‌روز شود. با مراجعه به شکل ۲-۴، نسخه ابتدایی TEMP در انتهای فاز طراحی مفهومی تهیه می‌شود.

با داشتن یک تعریف اولیه از نیازمندی‌های سطح سیستم، فرایند تکرارشونده و مستمر ارزیابی آغاز می‌شود. در ابتدای طراحی سیستم، تکنیک‌های تحلیلی مختلفی می‌تواند برای پیش‌بینی و ارزیابی خصوصیات پیش‌بینی شده در ساختار پیشنهادی طراحی سیستم مورد استفاده قرار گیرند. CAD و روش‌های مرتبط، اغلب برای ارائه‌ی یک نمایش سه بعدی از این طراحی مورد استفاده قرار گرفته می‌شود که در آن واسطه‌ها، دسترسی‌ها، اندازه‌ی اجزاء، روابط انسان-تجهیز و غیره

1. Test and Evaluation Master Plan

نشان داده می‌شود. عدم انطباق‌ها در طراحی در این نوع نمایش طراحی سیستم به‌سادگی نمایان می‌شود (به قسمت‌های ۴-۵ و ۵-۴ مراجعه کنید).

با پیشرفت طراحی به نقطه‌ای که مدل آزمایشی، مدل مهندسی، و نمونه‌ها توسعه یافته‌اند، فرایند آزمایش و ارزیابی به دلیل در دسترس بودن مدل‌های فیزیکی، سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای واقعی و دیگر عناصر سیستم، بیش‌تر معنا پیدا می‌کند. علاوه بر این، هنگامی که مدل‌های پیش‌تولید و تولید تکامل می‌یابند، زمانی که ساختار سیستم به ساختار عملیاتی مدنظر نزدیک می‌شود، اثربخشی فعالیت‌های آزمایش و ارزیابی درجه بالاتری از اهمیت خواهند داشت.

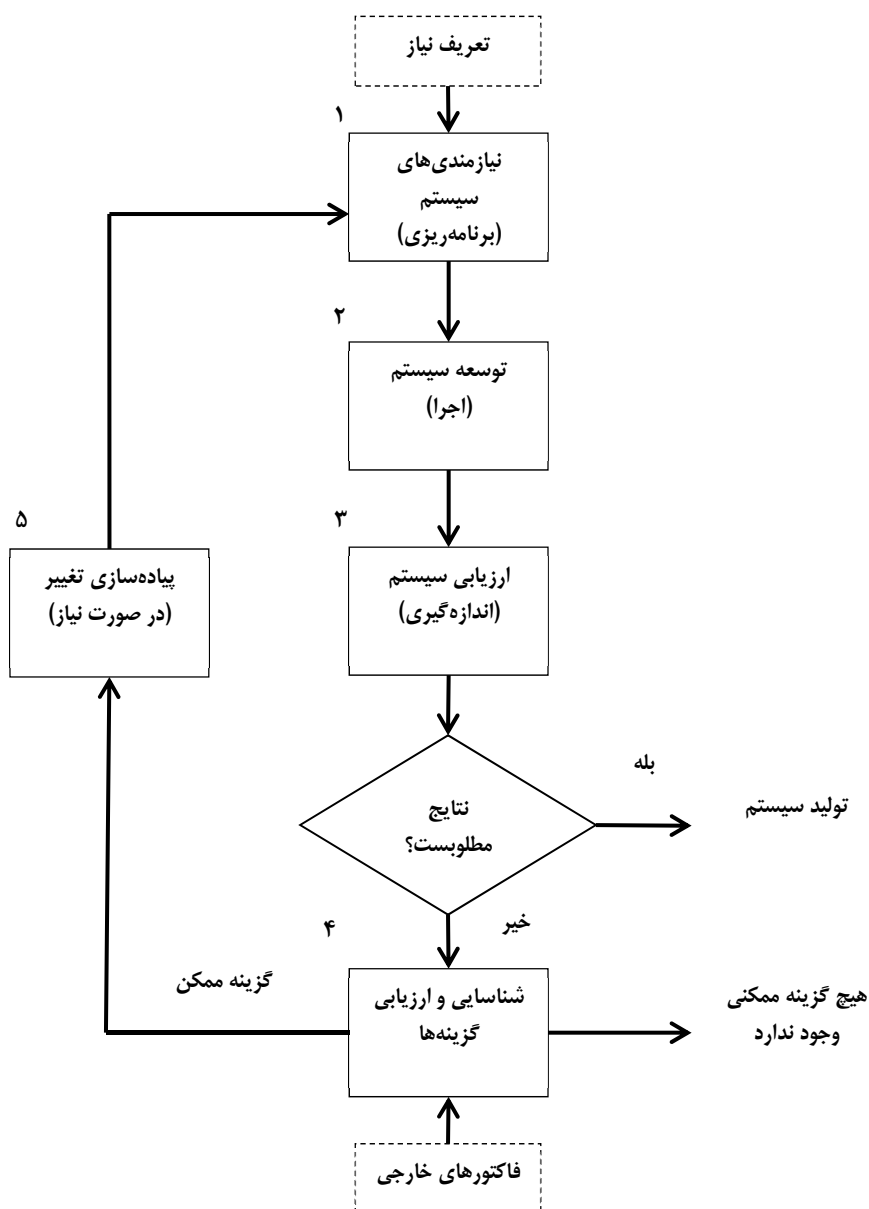
وقتی نیازمندی‌های کلی آزمایش در سطح سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد، باید درک شود که یک آزمایش واقعی (یعنی آزمایشی که از نقطه‌نظر ارزیابی عملکرد و اثربخشی کل سیستم مربوط باشد) ارزیابی یک سیستم استقرار یافته و مورد بهره‌برداری در محیط عملیاتی کاربر همراه با همه‌ی شرایط عملیاتی شناخته شده را تشکیل می‌دهد. برای مثال، یک هواپیما هنگامی که مأموریت موردنظر را انجام می‌دهد و طی یک پرواز واقعی در شرایط عملیاتی باید مورد آزمایش قرار گیرد؛ یک شبکه ارتباطی باید هنگامی که در حال انجام عملیات است آزمایش شود؛ یک وسیله حمل و نقل زمینی باید در شرایط جوی خشک، گرد و غبار و باد باید آزمایش شود اگر در نهایت قرار باشد در این شرایط محیطی کار کند و پل عبوری از رودخانه در هنگامی که ساخته شده و جریان ترافیک موردنظر بر روی آن در حال حرکت است، باید آزمایش گردد. کارکنان کاربر باید وظایف عملیاتی و نگهداری و تعمیر را همراه با دستورالعمل نگهداری و تعمیرات، دستورالعمل عملیات، تجهیزات پشتیبانی و غیره انجام دهند. در این شرایط، تجربه واقعی در محیط واقعی را می‌توان ثبت کرد و نتایج واقعی از اعتبارسنجی سیستم را به‌دست آورد.

با اینکه اعتبارسنجی سیستم نمی‌تواند تا زمانی که سیستم در محیط کاربر به‌صورت کاملاً عملیاتی درآید انجام شود، باید از همان ابتدا و با استقرار برنامه پیشرفت‌کننده آزمایش و ارزیابی

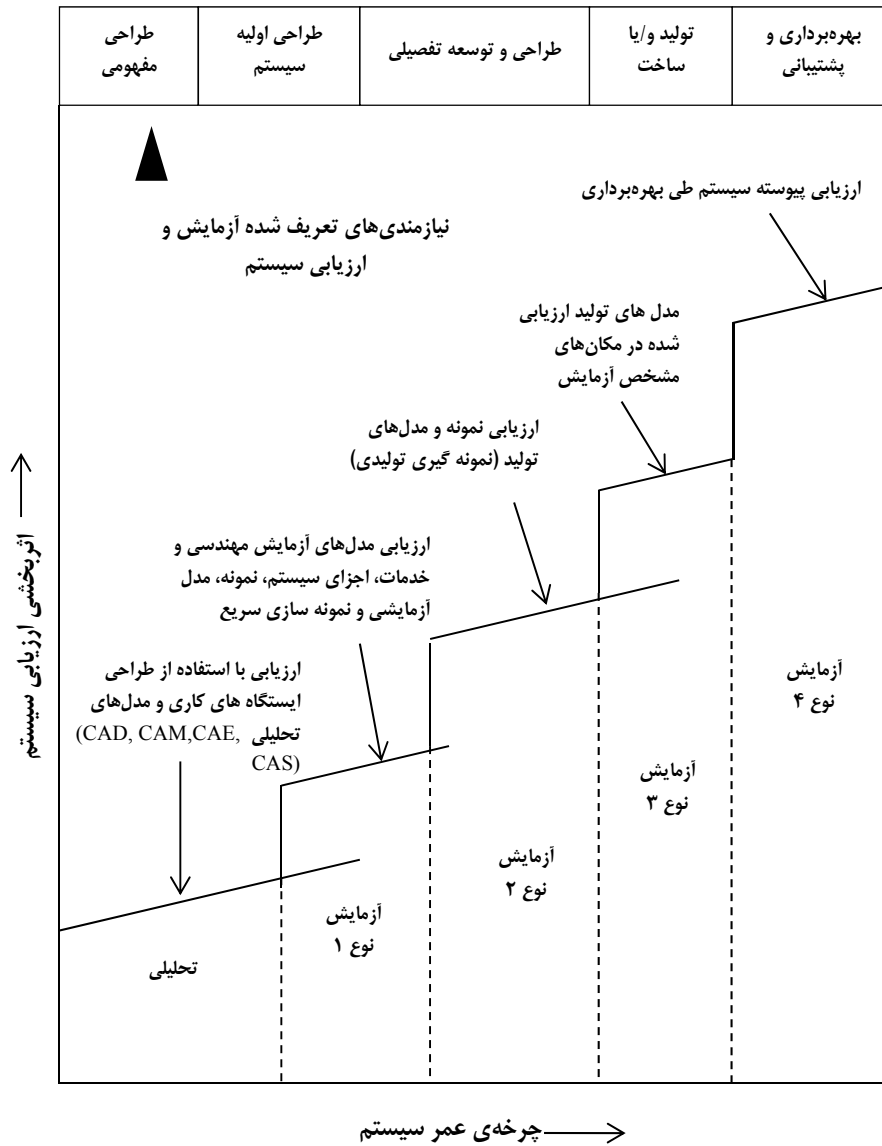
آغاز شود، همان طور که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. هدف کسب اطمینان تا جای ممکن از برآورده شدن نیازمندی‌های سیستم است. اگر به نظر آید که برخی از نیازمندی‌های مشخص ممکن است برآورده نشود، آنگاه فعالیت‌های اصلاحی باید صورت پذیرد. اگر این کار پیش از شناسایی مشکل بالقوه به مراحل بعدی چرخه‌ی عمر موکول شود و تغییر به زمان دیگری موکول شود، هزینه‌بر خواهد بود. بنابراین، پیاده‌سازی یک برنامه تکاملی و پیشرفت‌کننده که در شکل نشان داده شده است ترجیح داده می‌شود. هدف آغاز اعتبارسنجی سیستم در زودترین زمان ممکن یعنی زمانی است که نتایج آن معنادار باشد.

۶-۲- دسته‌بندی‌های آزمایش و ارزیابی سیستم

شکل ۶-۲ یک رویکرد تکاملی از آزمایش و ارزیابی سیستم را نشان می‌دهد. دسته‌بندی‌های مختلفی از آزمایش و ارزیابی توسط فاز برنامه شناسایی شده است و اثربخشی ارزیابی با حرکت از مسیر تحلیلی، آزمایش نوع ۱، آزمایش نوع ۲، آزمایش نوع ۳ و آزمایش نوع ۴ افزایش می‌یابد. قلمرو و عمق آزمایش به نوع سیستم، جدید یا توسعه‌ای بودن آن، پیچیدگی طراحی و ریسک‌های همراه بستگی دارد. آزمایش تمام و کمال ممکن است وقتی یک طراحی جدید در حال انجام است، تعداد واسطه‌های خارجی زیاد است، ناشناخته‌ها وجود دارند و ریسک‌ها بالا هستند، مورد نیاز باشد. در مقابل، اجزای ثابت شده COTS ممکن است آن‌چنان نیاز به آزمایش نداشته باشند مگر برای حصول اطمینان از انطباق و ادغام مناسب آن‌ها با دیگر عناصر سیستم. در انجام آزمایش‌ها، افراط و تفریط جایز نیست زیرا هر دو در نهایت پرهزینه خواهند بود.



شکل ۶-۱- نیازمندی‌های سیستم و روابط ارزیابی



شکل ۶-۲- مراحل آزمایش و ارزیابی سیستم طی چرخه‌ی عمر

۶-۲-۱- ارزیابی تحلیلی و شبیه‌سازی

استفاد از مدل‌های تحلیلی، روش‌های CAD، و ترکیب‌های مختلف آن‌ها می‌تواند در اعتبارسنجی روابط مشخص یک طراحی پیش از نهایی کردن آن اثربخش باشد. مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی در فازهای اولیه به علت فقدان عناصر ملموس برای آزمایش ضروری هستند. برای مثال، توسعه‌ی مدل فضایی سه‌بعدی سیستم از طریق ابزارهای گرافیکی رایانه‌ای می‌تواند روابط میان عناصر سیستم، مکان تجهیزات، واسطه‌های انسان-تجهیز، ایستگاه‌های عملیاتی و دسترسی‌ها برای نگهداری و تعمیر و پشتیبانی مفید باشد. با استفاده از این مورد، موانع بالقوه، تضادها در استفاده از فضا و غیره را می‌توان شناسایی کرد. با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی، طراح می‌تواند مفاهیم مشخصی از طراحی را در ابتدای چرخه‌ی عمر تصدیق اعتبار کند. هدف، کسب بیش‌ترین دید ممکن در مراحل ابتدایی پیش از محکم شدن نسبی ساختار طراحی است. برای ارزیابی سیستم پل عبوری از رودخانه، استفاده از CAD و مدل فضایی سه بعدی می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

۶-۲-۲- آزمایش نوع ۱

طی فازهای اولیه طراحی تفصیلی، نمونه‌ها، مدل‌های مهندسی، نرم‌افزارهای مهندسی و مدل‌های آزمایش خدمات ساخته شده و با هدف ارزیابی بر طراحی فیزیکی، عملکرد و خصوصیات عملیاتی اعمال می‌شود. این مدل‌ها که می‌توانند نماینده‌ی کل سیستم یا جزء مشخصی از سیستم باشند، اغلب به صورت وظیفه‌ای (الکترونیکی یا مکانیکی) کار می‌کنند اما به هیچ‌وجه نمایانگر یک تجهیز تولیدی نیستند. برخی اوقات در توسعه نرم‌افزار، کاربرد نمونه‌سازی سریع برای تصدیق کفایت طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آزمایش‌ها ممکن است شامل فعالیت‌های عملیاتی و پشتیبانی تدارکات باشد که با فعالیت‌هایی که قرار است در شرایط واقعی عملیاتی انجام شوند، قابل مقایسه هستند (به‌طور مثال اندازه‌گیری

یک پارامتر عملکردی، انجام یک کار تعویض، برآورده کردن یک نیازمندی خدمتی). اگرچه این آزمایش‌ها به صورت رسمی و به صورت کاملاً عملیاتی نیستند، اطلاعات مربوط به خصوصیات سیستم واقعی را می‌توان از آن‌ها اقتباس کرده و به عنوان ورودی در ارزیابی کل سیستم مورد استفاده قرار گیرد. چنین آزمایشی اغلب در تسهیلات تولیدکننده/تامین‌کننده توسط تولیدکننده انجام می‌شود. طی این فاز اولیه از آزمایش است که تغییرات در طراحی با حداقل هزینه صورت می‌گیرد. برای طراحی پل عبوری از رودخانه، عناصر مختلف ساختار را می‌توان برای انجام آزمایش و ارزیابی اولیه مورد استفاده قرار داد و از عملکرد مناسب آن‌ها اطمینان حاصل کرد؛ برای مثال، مصالح جاده و خط آهن، نورپردازی پیاده‌رو، تسهیلات دریافت عوارض و قسمت‌هایی از روبنا.

۶-۲-۳- آزمایش نوع ۲

آزمایش‌های رسمی طی بخش‌های پایانی طراحی تفصیلی، زمانی که پیش‌تولید نمونه تجهیزات، نرم‌افزارها، دستورالعمل‌های رسمی و مشابه آن‌ها در دسترس است، انجام می‌شود. تجهیز/نرم‌افزار نمونه ساختاری مشابه ساختار تولید واقعی دارد که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد ولی لزوماً دارای صلاحیت کامل نیست. یک سیستم دارای صلاحیت، سیستمی است که نشان‌دهنده‌ی ساختار کامل تولید (تایید شده از طریق بازبینی طراحی انتقادی) باشد و از طریق اتمام موفقیت‌آمیز آزمایش‌های عملکردی، آزمایش‌های صلاحیت محیطی (آزمایش‌های تغییرات دوره‌ای دما، شوک و ارتعاش)، صلاحیت قابلیت اطمینان، نمایش قابلیت نگهداری و تعمیرات، و آزمایش انطباق سیستم تست شده و تصدیق اعتبار شده باشد. نوع ۲ از آزمایش‌ها در اصل به فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که با تعیین صلاحیت سیستم برای بهره‌برداری عملیاتی همراه است و یک برنامه‌ی آزمایش می‌تواند شامل یک سری از آزمایش‌هایی باشد که در صورت نیاز مناسب‌سازی شده است. چنین برنامه شامل موارد زیر می‌شود:

۱. *آزمایش‌های عملکرد* - آزمایش‌هایی که برای تصدیق اعتبار خصوصیات عملکردی سیستم انجام می‌شوند. برای نمونه، آزمایش‌هایی طراحی می‌شوند که مشخص می‌کنند آیا موتور الکتریکی، خروجی لازم را فراهم می‌کند یا نه، آیا خطوط لوله در مقابل فشار آب مشخصی مقاومت خواهند داشت، آیا هواپیما مأموریت محوله را با موفقیت انجام می‌دهد، آیا فرایند تولید در هر دوره‌ی زمانی x واحد تولید می‌کند، آیا یک تسهیل سلامت می‌توان فرایند رسیدگی به بیمار y را در مدت زمان معلومی انجام دهد، آیا بخشی از پل عبوری از رودخانه توانایی تحمل و رسیدگی به وضعیت‌های موردانتظار ترافیکی را دارد، و غیره. همچنین لازم است که شکل، قابلیت تعویض، ایمنی محصول، و دیگر خصوصیات مقایسه‌ای آن تصدیق اعتبار شود.
۲. *صلاحیت محیطی* - چرخه‌ی دما، شوک و ارتعاش، رطوبت، باد، پاشش ماسه، گرد و غبار، رویش قارچ، آلودگی صوتی، انتشار آلودگی، جلوگیری از انفجار و اختلالات الکترومغناطیس باید مورد آزمایش قرار گیرد. این فاکتورها به عناصر مختلف سیستم طی عملیات، نگهداری و تعمیر و حمل و نقل و جابه‌جایی گرایش دارند. علاوه بر این، آثار آیت‌های مورد آزمایش بر محیط خارجی مورد توجه قرار می‌گیرد.
۳. *آزمایش‌های ساختاری* - آزمایش‌هایی هستند که برای مشخص کردن خصوصیات مصالح که مربوط به تنش، کرنش، خستگی، خمش، پیچش و تجزیه عمومی هستند، انجام می‌شوند.
۴. *صلاحیت قابلیت اطمینان* - آزمایش‌های انجام گرفته بر یک یا چند عنصر سیستم برای مشخص کردن MTBF و MTBM. همچنین، آزمایش‌های خاصی برای اندازه‌گیری عمر اجزا طراحی شده‌اند تا استهلاک را بررسی کرده و مدهای خرابی را تعیین کنند. نیازمندی‌های آزمایش قابلیت اطمینان در فصل ۱۲ بیش‌تر بررسی شده است.

۵. *نمایش قابلیت نگهداری و تعمیرات* - آزمایش‌هایی هستند که بر روی یک یا چند عنصر از سیستم انجام می‌شوند تا مقادیر میانگین زمان نگهداری و تعمیرات فعال $\bar{M}$ ، MLH/OH، و غیره را ارزیابی کنند. علاوه بر این، تکالیف نگهداری و تعمیرات، توالی و زمان‌های این تکالیف، تجهیزات اصلی - واسطه‌های تجهیزات آزمایش، تعداد و مهارت کارکنان نگهداری و تعمیرات، دستورالعمل‌های نگهداری و تعمیرات، و تسهیلات نگهداری و تعمیرات در درجات مختلف مورد تایید قرار می‌گیرند. عناصر پشتیبانی تدارکات در ابتدا برای هر عضو ارزیابی می‌شوند. نیازمندی‌های نمایش قابلیت اطمینان در فصل ۱۳ بیش‌تر تشریح شده است.

۶. *آزمایش‌های انطباق تجهیزات پشتیبانی* - آزمایش‌هایی هستند که اغلب برای تصدیق اعتبار وجود انطباق میان تجهیزات اصلی، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی و تجهیزات حمل و نقل و جابه‌جایی انجام می‌شوند. آزمایش و ارزیابی قابلیت پشتیبانی در فصل ۱۵ بیش‌تر بررسی می‌شود.

۷. *آزمایش و ارزیابی کارکنان* - آزمایش‌هایی هستند که اغلب برای تصدیق اعتبار روابط بین انسان و تجهیز، انسان و نرم‌افزار، تعداد و سطح مهارت کارکنان و نیازهای آموزشی صورت می‌گیرند. هر دوی تکالیف عملیاتی و نگهداری و تعمیرات ارزیابی می‌شوند. آزمایش و ارزیابی کارکنان در فصل ۱۴ بیش‌تر بحث شده است.

۸. *اعتبارسنجی داده‌های فنی* - اعتبارسنجی دستورالعمل‌های عملیاتی و نگهداری و تعمیرات اغلب صورت می‌گیرد.

۹. *اعتبارسنجی نرم‌افزار* - اعتبار سنجی نرم‌افزار عملیاتی و نگهداری و تعمیرات انجام می‌شود. این موضوع شامل واحدهای نرم‌افزار رایانه‌ای (CSU)، آیت‌های ساختار نرم‌افزار

رایانه‌ای (CSCI)، انطباق سخت‌افزار- نرم‌افزار، قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات نرم‌افزار و آزمایش‌های مرتبط می‌شود.

۱۰. *آزمایش‌های انطباق عناصر زنجیره تامین* - اعتبارسنجی عناصر مختلف زنجیره‌ی تامین پیشنهادی همراه با عناصر کاربردی سیستم انجام می‌شود. این موضوع عبارت است از روش‌های بسته‌بندی و جابه‌جایی اجزا، مودهای حمل و نقل و توزیع، روش‌های انبارش و انبارداری و رویکردهای تدارک. موضوعات زنجیره‌ی تامین در فصل ۱۵ بیش‌تر مورد بررسی قرار گرفته است.

۱۱. *آزمایش‌های انطباق با عناصر دیگر در سطوح بالاتر ساختار SOS (در صورت امکان)* - آزمایش‌های منتخب از طبیعتی خاص و یکتا در سطح زیرسیستم و پایین‌تر می‌توانند موردنیاز باشند تا از انطباق میان عناصر مشخصی از سیستم که طراحی تازه‌ای دارند و همچنین تطابق با عناصر خارجی دیگر سیستم‌های واسطه‌گر در ساختار SOS اطمینان حاصل شود. هدف، شناسایی عدم تطابق‌ها در اولین فرصت است. جایی که ممکن است نیازمند فعالیت‌های طراحی بیش‌تری باشد.

وضعیت ایده‌آل، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی هریک از آزمایش‌هایی است که در بالا فهرست شده است تا بتوان با رویکردی ادغامی به آن‌ها جامه عمل پوشاند. داده‌های خروجی یک آزمایش می‌تواند یک ورودی مفید برای آزمایش دیگر باشد. هدف فراهم کردن تاکید مناسب، یکپارچگی با نیاز و حذف هزینه‌های اضافی است. برنامه آزمایش مناسب یک ضرورت است.

جنبه دیگری از آزمایش نوع دوم شامل آزمایش‌های نمونه‌گیری تولید است که در زمان تولید انبوه یک آیتم صورت می‌گیرد. آزمایش‌های قبلی انجام شده قاعدتاً صلاحیت آیتم را بررسی کرده‌اند؛ یعنی ساختار تجهیزات سخت‌افزاری نیازمندی‌های تولید و عملیات را برآورده می‌کند. با این حال، با این که یک آیتم در ابتدا صلاحیتش تایید شده است، باید تا حدودی اطمینان حاصل

کرد که تکرار تولید آن آیتم به همان میزان از صلاحیت کافی برخوردار است. بنابراین، در تولید انبوه، تولید با استفاده از نمونه‌برداری و آزمایش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

آزمایش‌های نمونه‌برداری از تولید ممکن است خصوصیات مشخصی از عملکرد، قابلیت اطمینان یا هر پارامتر مشخص شده دیگری را پوشش دهند که ممکن است از یک آیتم به آیتم دیگر تفاوت معناداری داشته باشد. نمونه‌ها می‌توانند براساس درصدی از کل تجهیزات تولید شده یا برابر با عدد مشخصی که در بازه‌های زمانی سررسید مشخص شده‌اند، انتخاب شوند. این موضوع به ویژگی‌های سیستم و پیچیدگی فرایند تولید بستگی دارد. با استفاده از آزمایش‌های نمونه‌برداری از تولید می‌توان رشد یا انحطاط سیستم را در سرتاسر فرایند تولید/ ساخت اندازه‌گیری کرد.

آزمایش‌های نوع ۲ عموماً با تسهیلات تولیدکننده یا تامین‌کننده و افراد مسئول آن تسهیل صورت می‌پذیرد. تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، مختص کاربردهای عملیاتی، اصولاً دستورالعمل‌های فنی هستند که هر جایی که ممکن باشد استفاده می‌شود. کارکنان بهره‌برداری اغلب فعالیت‌های آزمایشی را مشاهده و/یا پیش‌بینی می‌کنند. تغییرات طراحی در نتیجه فعالیت‌های اصلاحی باید از طریق دستورالعمل رسمی تغییر مهندسی که در قسمت ۵-۹ تشریح شد، انجام گیرد.

۶-۲-۴- آزمایش نوع ۳

آزمایش‌ها و نمایش‌های رسمی که در پی آزمایش اولیه‌ی صلاحیت سیستم و پیش از اتمام فاز تولید/ساخت می‌توانند انجام شوند. چنین آزمایش‌هایی عموماً توسط کارکنان بهره‌برداری در مکان عملیاتی انجام می‌شوند که عبارت‌اند از یک کشتی، یک هواپیما، یک تسهیل حفظ سلامت، یک تسهیل در بیابان، یک تسهیل در جاده یا ریل‌پل، یک وسیله‌ی نقلیه که بین دونقطه سفر می‌کند. آزمایش‌های عملیاتی و تجهیزات پشتیبانی، نرم‌افزارهای عملیاتی، قطعات

یدکی عملیاتی و دستورالعمل‌های رسمی عملیات و نگهداری و تعمیرات مورد استفاده قرار می‌گیرند. به علاوه، آزمایش همراه با سیستمی که در ساختار کاربردی SOS همراه با همه واسطه‌های مورد نیاز نصب شده و عملیاتی است، انجام می‌گیرد. آزمایش عموماً پیوسته بوده و طی یک دوره‌ی زمانی تمدید شده انجام شده و ارزیابی تعدادی از عناصر سیستم را به صورت زمان‌بندی شده و از طریق شبیه‌سازی عملیات را پوشش می‌دهد.

آزمایش نوع ۳ زمانی اجرا می‌شود که برای اولین بار است که همه‌ی عناصر سیستم عملیاتی بوده و می‌توانند مورد ارزیابی واقعی قرار گیرند. انطباق بین تجهیزات و نرم‌افزارها، کارکنان و سخت‌افزار/نرم‌افزار، عناصر پشتیبانی و اجزای اصلی سیستم، عناصر پشتیبانی با یکدیگر، و عناصر دیگر سیستم در ساختار SOS تصدیق اعتبار می‌شود. TPM‌های مرتبط با وظایف عملیاتی و نگهداری و تعمیرات اندازه‌گیری و تصدیق اعتبار می‌شود تا نیازمندی‌هایی را که از قبل مشخص شده‌اند، برآورده کنند. اگرچه آزمایش‌های نوع ۳ در وضعیت کاملاً عملیاتی انجام نمی‌شوند، اما برای به دست آوردن یک تقریب نزدیک به واقعیت برنامه‌ریزی و طراحی می‌شوند.

۴-۲-۵- آزمایش نوع ۴

طی فاز بهره‌برداری عملیاتی و پشتیبانی سیستم، آزمایش‌های رسمی صورت می‌پذیرد تا دید بیش‌تری در برخی حوزه‌های خاص به دست آورد. ممکن است تغییر یک مأموریت یا نرخ بهره‌برداری از سیستم تغییر کند و آثار آن بر اثربخشی کلی سیستم و هزینه چرخه‌ی عمر مطلوب باشد، یا می‌توان گزینه‌های ممکن سیاست‌های پشتیبانی را ارزیابی کرد که آیا دسترسی‌پذیری عملیاتی سیستم (A_0) بهبود می‌یابد یا نه. یا ممکن است انتخاب یک رویکرد متفاوت در زنجیره‌ی تامین اثربخشی کلی را بهبود دهد و قابلیت پشتیبانی تدارکات افزایش یابد.

اگرچه سیستم در محیط مشتری طراحی و عملیاتی می‌شود، در این فاز است که برای اولین بار می‌توان قابلیت واقعی سیستم را ارزیابی کرد. امید آن است که سیستم اهدافش را به صورت

اثربخش و کارا به انجام رساند؛ با این حال، همیشه این امکان وجود دارد که بتوان با استفاده از تغییرات ساده در سیاست‌های عملیاتی و نگهداری و تعمیرات، بهبودهای قابل توجهی ایجاد کرد. علاوه بر این، آزمایش‌های رسمی را می‌توان همراه با ارتقای فناوری و ارتقای سیستم انجام داد تا از حفظ اثربخشی مناسب سیستم هم‌زمان با ادامه عملیات سیستم اطمینان حاصل کرد.

۳-۶- برنامه‌ریزی برای آزمایش و ارزیابی سیستم

برنامه‌ریزی آزمایش در حقیقت طی فاز طراحی مفهومی سیستم یعنی زمانی که نیازمندی‌های فنی سیستم تعریف می‌شوند، آغاز می‌گردد. اگر یک نیازمندی برای سیستم مشخص می‌شود، آنگاه باید راهی برای اندازه‌گیری و ارزیابی آن در آینده وجود داشته باشد تا از برآورده شدن آن نیازمندی اطمینان حاصل کرد؛ بنابراین، نیازمندی‌های آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی در اولین زمان ممکن می‌توانند درک شوند. برنامه‌ریزی آزمایش و اهداف پشتیبانی در برنامه اصلی آزمایش و ارزیابی (TEMP) قرار گرفته و در ابتدا طی مراحل پایانی طراحی مفهومی تهیه می‌شود (شکل ۲-۴). این برنامه باید هماهنگی نزدیکی با برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) داشته باشد که در قسمت ۳-۲ و ۱۸-۲ بررسی شده‌اند.

در مراحل مختلف توسعه سیستم، تعداد متفاوتی از آزمایش‌ها را می‌توان مشخص کرد تا زیرسیستم‌ها، تجهیزات، نرم‌افزارها، و ترکیب‌های مختلف عناصر سیستم را پوشش دهد. اغلب، گرایش به سمت مشخص کردن یک آزمایش که یکی از خصوصیات سیستم را اندازه می‌گیرد و یک آزمایش دیگر برای خصوصیت دیگر سیستم وجود دارد. بنابراین، حجم آزمایش‌های مشخص شده می‌تواند گنج گسترده و بسیار پرهزینه باشد.

نیازمندی‌های آزمایش باید بر یک پایه ادغامی استوار باشد. نیازمندی‌های هر آزمایش باید از نظر منابع موردنیاز و خروجی‌های موردانتظار بازبینی شده و به‌صورتی زمان‌بندی شوند که

بیش‌ترین منفعت را فراهم آورند. برای نمونه، داده‌های قابلیت اطمینان را می‌توان از انجام آزمایش‌های عملکردی سیستم به‌دست آورد و تعداد آزمایش‌های موردنیاز در این زمینه را کاهش داد. داده‌های نگهداری و تعمیرات را می‌توان با انجام آزمایش‌های قابلیت اطمینان به‌دست آورد و حجم نمایش قابلیت نگهداری و تعمیرات موردنیاز را کم کرد. داده‌های انطباق تجهیزات پشتیبانی و کارکنان را می‌توان از آزمایش‌های قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیرات به‌دست آورد.

بنابراین، آزمایش‌های تعیین صلاحیت قابلیت اطمینان باید اول زمان‌بندی شوند، سپس نمایش‌های قابلیت نگهداری و تعمیرات و به همین منوال ادامه داد. در برخی از موارد، ترکیب نیازمندی‌های آزمایش تا زمانی که خصوصیات مناسب و TPM‌ها اندازه‌گیری می‌شوند ممکن است. در هر رخدادی، مهندسی سیستم‌ها نیازمند دانش و فهم کامل از اهداف کلی آزمایش و اهداف هر یک از آزمایش‌های برنامه‌ریزی شده، نتایج ورودی-خروجی موردانتظار و غیره است.

در توسعه هر سیستم، یک برنامه ادغامی آزمایش تهیه شده و اغلب برای پیاده‌سازی در ابتدای فاز طراحی اولیه سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه محتوای آن بستگی به طبیعت، ساختار و پیچیدگی سیستم متغیر دارد، این برنامه عموماً شامل موارد زیر می‌شود:

۱. شناسایی همه آزمایش‌هایی که باید انجام شوند، آیتم‌هایی که باید ارزیابی شوند، زمان‌بندی هر یک، ورودی‌های موردنیاز و خروجی‌های موردانتظار، توالی آزمایش‌ها و غیره. در شناسایی نیازمندی‌های آزمایش، برخی عناصر سیستم می‌توانند از طریق همه دسته‌های نشان داده شده در شکل ۶-۲ تکامل یابند، این درحالیست که عناصر دیگر تنها تحت تعداد محدودی از آزمایش‌ها قرار می‌گیرند. این موضوع تابع درجه تعریف طراحی است که آیا یک عنصر با داده‌های تاریخی مناسب شناخته می‌شود یا با طراحی جدید در سطح بالایی از پیچیدگی. در هر رخدادی، چیدمان برنامه آزمایش پیشنهادی باید مدنظر باشد، مانند آنچه در شکل ۶-۳ نمایش داده شده است.

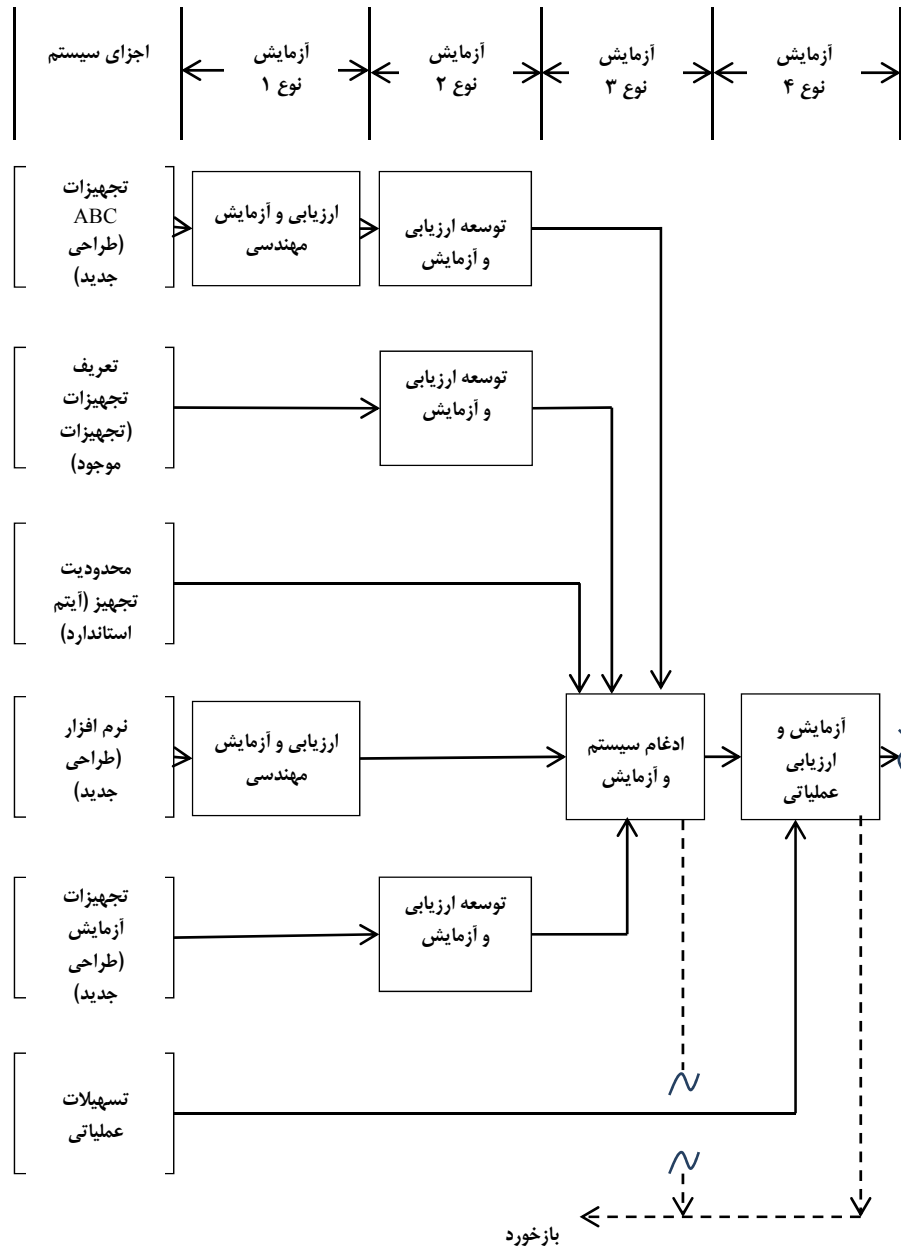
۲. شناسایی مسئولیت‌های سازمانی برای اداره امور، افرادی که آزمایش را اجرا می‌کنند، و کارکنان و تسهیلات موردنیاز برای پشتیبانی مستمر آزمایش (یعنی تکنسین‌های آزمایش، تسهیلات، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، جیگ و فیکسچرهای مخصوص آزمایش، پایش آزمایش، جمع‌آوری و ثبت داده، و گزارش‌دهی).
 ۳. تشریح مکان آزمایش، فاکتورهای سیاسی/اقتصادی/اجتماعی محلی، تدارکات و محیط آزمایش (یعنی شمالی، بیابانی، کوهستانی یا دشت هموار، تسهیلات، تدارکات ایمنی/امنیت) آزمایش سیستم در زمینه ساختار SOS شامل واسطه‌های مختلفی می‌شود که ممکن است در مکان‌های جغرافیایی مختلفی صورت گیرد. در این‌جا هدف، ترسیم یک رویکرد ادغامی است که روابط داخلی میان این مکان‌های آزمایش را فراهم آورد.
 ۴. تشریح فاز آماده‌سازی آزمایش برای هر دسته (نوع) آزمایش در صورت نیاز. این موضوع شامل انتخاب یک روش آزمایش، فراهم کردن دستورالعمل‌های آزمایش، آموزش کارکنان آزمایش و پشتیبانی، اکتساب زیربنای تدارکات و پشتیبانی نگهداری و تعمیرات موردنیاز، و آماده‌سازی مکان آزمایش و تسهیلات پشتیبانی.
 ۵. تشریح رسمی فاز آزمایش (یعنی کارکنان موردنیاز، نیازمندی‌های تجهیزات و نرم‌افزار، نیازمندی‌های تسهیلات، روش‌های جمع‌آوری و تحلیل داده، و گزارش‌دهی).
 ۶. یک برنامه و آمادگی برای آزمایش مجدد (یعنی رویکرد و روش‌های انجام آزمایش‌های اضافی در صورت نیاز به علت در شدن در آزمایش و موارد مشابه).
 ۷. تشریح گزارش نهایی آزمایش (یعنی، قالب، توزیع، بازخورد، و توصیه‌ها برای انجام فعالیت‌های اصلاحی در صورت نیاز).
- با این‌که تاکید بر آزمایش و ارزیابی خود سیستم به‌عنوان یک موجودیت جدا است، اما یک اعتبارسنجی واقعی از سیستم و قابلیت‌هایش باید بر این موضوع استوار باشد که تا چه حد سیستم

در شرایط عملیاتی و در سطوح بالاتر ساختار SOS کار خواهد کرد. برای مثال، با مراجعه به شکل ۳-۱۳، آیا سیستم حمل و نقل زمینی هنگام عملیاتی شدن در سطح بالاتر یعنی سیستم حمل و نقل کلی، مطابق انتظار عمل می‌کند؟ در شکل ۳-۲۴، تا چه حد سیستم B همراه با سیستم A و C درست عمل می‌کند؟ برنامه‌ریزی آزمایش و ارزیابی باید این واسطه‌های حساس را مورد بررسی قرار داده و در سرتاسر برنامه آزمایش، هماهنگی مناسبی باید با سازماندهی خارجی که این واسطه‌های سیستم را کنترل و عملیاتی می‌کند (سیستم‌های A و C در شکل ۳-۲۴) ایجاد و حفظ شود.

عموما، برنامه‌ی پایه‌ای آزمایش به‌عنوان یک مرجع ارزشمند در طراحی، توسعه و تولید سیستم خدمت می‌کند. این برنامه مشخص می‌کند که چه کاری باید انجام شود، نیازمندی‌های آزمایش چیست، زمان‌بندی برای پردازش تجهیز (و نرم‌افزار) کدامست و چه مواردی برای پشتیبانی آزمایش موردنیاز، چه روش‌هایی از جمع‌آوری داده و گزارش‌دهی باید استفاده شود، و غیره. این برنامه به‌عنوان یک ابزار ادغامی برای تعدادی از آزمایش‌ها در دسته‌بندی‌های مختلف عمل کرده و یک تغییر در هر یک از نیازمندی‌های آزمایش کل برنامه را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد.

۴-۶- آماده‌سازی آزمایش و ارزیابی سیستم

پس از برنامه‌ریزی اولیه و پیش از شروع ارزیابی رسمی، بازه‌ای از زمان صرف آماده‌سازی آزمایش می‌شود. در این دوره‌ی زمانی، شرایط مناسبی باید فراهم شود تا نتایج موثر تضمین شوند. اگرچه برخی تغییرات به نوع ارزیابی بستگی دارد، این شرایط یا پیش‌نیازها شامل انتخاب آیت‌هایی که باید آزمایش شوند، فراهم کردن تسهیلات و منابع آزمایش، اکتساب تجهیزات پشتیبانی، هماهنگی با سازماندهی در ساختار SOS، و آیت‌های مشخص از زنجیره‌ی تامین می‌شود تا اطمینان حاصل شود که برنامه آزمایش با موفقیت صورت می‌گیرد.



شکل ۶-۳- ارزیابی نیازمندی‌های آزمایش

۶-۴-۱- انتخاب آیت‌م(های) آزمایش

ساختار تجهیزات/نرم‌افزار مورد استفاده در آزمایش باید نمایانگر آیت‌م‌های عملیاتی در بیش‌ترین حالت ممکن خود باشند. برای آزمایش‌های نوع یک، مدل‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند که اغلب با تجهیزات عملیاتی به‌صورت مستقیم انطباق ندارند؛ با این حال، اکثر آزمایش‌های بعدی در چنین زمانی انجام می‌شود که تجهیزات (یا نرم‌افزار) نمایانگر ساختار نهایی هستند. یک کار پیش‌نیاز عبارتست از انتخاب مدل آزمایش توسط یک شماره سریال، تعریف ساختار از جهت وجود تغییرات مهندسی، و حصول اطمینان از در دسترس بودن زمان مورد نیاز. علاوه بر این، برای انجام آزمایش‌های نوع ۳ و ۴ که در آن‌ها واسطه‌های سیستم در ساختار SOS وجود دارد، فرایند انتخاب باید شامل آیت‌م‌های خارجی باشد که به‌طور مستقیم سیستم مورد ارزیابی را پشتیبانی می‌کنند. با مراجعه به شکل ۳-۲۴ (برای مثال)، اگر سیستم B سیستم مورد آزمایش باشد، آن‌گاه وظایف مشترک با سیستم A و C باید در دسترس و عملیاتی باشند.

۶-۴-۲- دستورالعمل‌های آزمایش و ارزیابی

انجام اهداف آزمایش شامل اجرای وظایف عملیاتی و نگهداری و تعمیرات می‌شود. به انجام رساندن این وظایف باید دستورالعمل‌های تایید شده و رسمی را دنبال کند که به‌صورت نظام‌نامه‌ی فنی در اواخر فازهای طراحی تفصیلی توسعه داده شده است. دنبال کردن دستورالعمل‌های تایید شده یک الزام است تا اطمینان حاصل شود که سیستم به‌روشی درست کار کرده و نگهداری و تعمیر می‌شود. انحراف از این دستورالعمل‌ها ممکن است باعث شود کارکنان دچار خطا شده و داده‌های آزمایش هنگام ثبت تحریف شود (به‌طور مثال فراوانی و زمان‌های نگهداری و تعمیرات). شناسایی دستورالعمل‌های مورد استفاده در آزمایش باید در یک برنامه ارزیابی گنجانده شود. چنین دستورالعمل‌هایی که واسطه‌های اصلی در ساختار SOS را پوشش می‌دهد (یعنی وظایف مشترک در شکل ۳-۲۴) باید در آزمایش‌های نوع ۳ و ۴ قرار گیرند.

۶-۴-۳- انتخاب محل آزمایش

یک مکان آزمایش برای ارزیابی محصول با شرایط محیطی معین می‌توان انتخاب کرد؛ یا مکان‌های زیادی ممکن است برای ارزیابی محصول تحت شرایط محیطی مختلف انتخاب شوند (به‌طور مثال مناطق شمالی در مقابل مناطق گرمسیری، دشت‌های هموار در مقابل کوهستان)، یا موقعیت‌های جغرافیایی مختلفی انتخاب شود تا محصول از نقطه‌نظر بازارهای مختلف و شرایط کاربر مورد ارزیابی قرار گیرد. این موضوع می‌تواند شامل یک مکان معین باشد که عناصر دیگر ساختار SOS در آن عملیاتی هستند. هر یک از این روش‌ها یا ترکیبی از آن‌ها می‌تواند مناسب باشد، این موضوع به نوع محصول و نیازمندی‌ها بستگی دارد.

۶-۴-۴- کارکنان آزمایش و آموزش

کارکنان آموزش عبارت‌اند از (۱) افرادی که عملیات و نگهداری و تعمیرات سیستم و تجهیزات را طی انجام آزمایش انجام می‌دهند، و (۲) مهندسان پشتیبانی، تکنسین‌ها، ثبت‌کنندگان داده، تحلیلگرها، و مدیران آزمایش. افرادی که برای عملیات و نگهداری و تعمیرات سیستم گماشته می‌شوند باید دارای پیش‌زمینه و مهارت در سطح کارکنان مصرف‌کننده (کاربر) باشند که برای انجام عملیات و پشتیبانی سیستم در چرخه‌ی عمر به‌کار می‌روند. سطح تخصص لازم از طریق ترکیبی از آموزش‌های رسمی و حین کار به‌دست می‌آیند.

۶-۴-۵- تسهیلات و منابع آزمایش

تسهیلات لازم، اتاق آزمایش، تجهیزات سرمایه‌ای، کنترل‌های محیطی، تجهیزات ابزار دقیق، و منابع مربوطه (به‌طور مثال گرما، آب، تهویه مطبوع، گاز، تلفن، برق، نورپردازی) باید شناسایی و زمان‌بندی شود. در بسیاری از موارد، طراحی و ساخت جدیدی موردنیاز است که به‌طورمستقیم زمان‌بندی و مدت زمان آماده‌سازی آزمایش را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. یک تشریح تفصیلی از

تسهیل آزمایش و چیدمان تسهیلات در مستندات برنامه‌ریزی آزمایش و گزارشات بعدی باید وجود داشته باشد. منابع و تسهیلات لازم دیگر برای پشتیبانی هر آزمایش سیستم و واسطه‌های خارجی باید شناسایی شود (یعنی یک سیستم که در ساختار SOS کار می‌کند).

۶-۴-۶ - تجهیزات آزمایش و پشتیبانی

نیازمندی‌های تجهیزات آزمایش و پشتیبانی در ابتدا در مفهوم نگهداری و تعمیرات (تشریح شده در قسمت ۳-۵) مدنظر قرار گرفته و سپس از طریق تحلیل نگهداری و تعمیرات و قابلیت پشتیبانی (تشریح شده در فصل ۱۵) تعریف شده است. طی فازهای آخر طراحی، آیت‌های لازم پشتیبانی تهیه شده و باید برای آزمایش‌های نوع ۲ تا ۴ در دسترس باشد. زمانی که نوع مناسب تجهیزات پشتیبانی در دسترس نیست و آیت‌های جایگزین موردنیاز است، چنین آیت‌هایی باید در برنامه‌ی آزمایش و ارزیابی شناسایی شوند. استفاده از آیت‌های جایگزین عموماً منجر به تحریف داده‌ها (به‌طور مثال زمان‌های نگهداری و تعمیر)، ایجاد خطا در عملکرد کارکنان شده و اغلب باعث تغییر دستورالعمل‌های آزمایش و نیازمندی‌های تسهیلات می‌شوند.

۶-۴-۷ - پشتیبانی تامین آزمایش

پشتیبانی تامین شامل همه‌ی مواد، داده‌ها، کارکنان و فعالیت‌های مربوطه همراه با نیازمندی‌ها، تدارکات و تهیه قطعات یدکی و تعمیری و موجودی انبار برای پشتیبانی سیستم در چرخه آزمایش برنامه‌ریزی شده سیستم است. این موضوع اساساً شامل همه آیت‌های موردنیاز زنجیره‌ی تامین است که برای سیستم عملیاتی شناسایی شده و باید برای ارزیابی عناصر اصلی سیستم در دسترس باشند.

۱. نیازمندی‌های اولیه برای قطعات یدکی، تعمیری و مصرفی برای عناصر اصلی سیستم. قطعات یدکی شامل آیت‌های تعویضی، اصلی و قابل تعمیر است. مصرفی‌ها شامل سوخت، روغن، روان‌کننده، اکسیژن مایع، نیتروژن و غیره می‌شوند.

۲. نیازمندی‌های اولیه قطعات یدکی، تعمیری، مواد و مصرفی‌ها برای عناصر مختلف پشتیبانی تدارکات (یعنی تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، تجهیزات حمل و نقل و جابه‌جایی، تجهیزات آموزش و تسهیلات).
۳. تسهیلات و انبارهای موردنیاز برای انبار کردن قطعات یدکی، تعمیری و مصرفی‌ها. این موضوع شامل ملاحظات نیازمندی‌های فضا، مکا، و نیازهای محیطی است.
۴. نیازمندی‌های کارکنان برای انجام فعالیت‌های پشتیبانی تامین مانند تدارکات، کاتالوگ‌سازی، مدیریت و کنترل موجودی، ارسال و امحای مواد هستند. این موضوع شامل نیازمندی‌های کارکنان برای پشتیبانی اجزای خارجی دیگر سیستم‌ها در ساختار SOS نیز می‌شوند که تحت ارزیابی هم‌زمان است.
۵. نیازمندی‌های اطلاعات فنی برای پشتیبانی تامین که شامل داده‌های اولیه تدارکات، کاتالوک‌ها، فهرست‌های مواد انبار شده و گزارش‌های امحای مواد می‌شوند.
- نوع قطعه یدکی و تعمیری موردنیاز در هر سطح نگهداری و تعمیرات، به مفهوم نگهداری و تعمیرات (قسمت ۳-۵) و تحلیل قابلیت پشتیبانی (فصل ۱۵) بستگی دارد. برای آزمایش‌های نوع ۳ و ۴، قطعات یدکی و تعمیری عموماً برای همه سطوح موردنیاز است، زیرا این آزمایش‌ها اساساً شامل یک ارزیابی از سیستم به‌عنوان یک کل می‌شود تا همه قابلیت‌های پشتیبانی تدارکات و نگهداری و تعمیرات را شامل شود. چرخه‌ی کامل نگهداری و تعمیرات، تدارکات پشتیبانی تامین (نوع و تعداد قطعات یدکی تعیین شده در هر سطح)، زمان‌های حمل و نقل، نیازمندی توزیع و انبارش، زمان بازگشت، و فاکتورهای مربوطه ارزیابی می‌گردند. در برخی نمونه‌های خاص، تسهیلات تولیدکننده ممکن است پشتیبانی در سطح انبار انجام شود. بنابراین، مهم است که یک قابلیت زیربنایی و واقعی از زنجیره‌ی تامین از سیستم مورد آزمایش فراهم شود. تشریح کامل این

زیربنا باید در برنامه اصلی آزمایش و ارزیابی (TEMP) جای داده شود و جمع‌آوری داده‌ها و نتایج پشتیبانی روزانه سیستم در چرخه آزمایش باید در گزارش نهایی آزمایش حضور داشته باشد.

۵-۶- آزمایش، جمع‌آوری، گزارش‌دهی و بازخورد آزمایش

به‌عنوان یک پیش‌نیاز آزمایش سیستم که توسط بررسی مناسب داده‌ها پشتیبانی می‌شود، ضروری است که مکان اعتبارسنجی فنی چرخه‌ی پروژه درک شده و تایید شود. هدف، شروع از نیازهای کاربر و اتمام کار با یک سیستم تصدیق اعتبار شده توسط کاربر می‌باشد. مدل فرایند مهندسی سیستم‌ها که در مدل Vee نمایش داده شده است (شکل ۲-۵، (ت)) به بهترین نحو این هدف را محقق می‌کند. همان‌طور که نشان داده شده است، تصدیق و تایید اعتبار از سطح اجزا به تصدیق اعتبار سیستم عملیاتی پیشرفت می‌کند. در هر سطح از آزمایش، مستندات مشخصات فنی و نیازمندی‌ها (در سمت چپ مدل Vee) مورد کنکاش قرار می‌گیرد تا اطمینان حاصل شود اجزا، عناصر سطح بالای سیستم و خود سیستم مشخصات فنی را برآورده می‌کند.

۵-۶-۱- رسمی کردن جمع‌آوری و رسیدگی به داده‌ها

با استقرار پیش‌نیازهای لازم، گام بعدی آغاز آزمایش و نمایش رسمی سیستم است. برای انجام اعتبارسنجی کامل سیستم به‌عنوان یک کل (از طریق انجام همه آزمایش‌های نوع ۳ و ۴ که در شکل ۲-۶ و در بلوک‌های 3.4 و 4.4 در شکل ۲-۴ نشان داده شده است) نیازمند آن است که سیستم به روشی که در برنامه‌ی آزمایش تشریح شده است، عملیاتی شده و نگهداری و تعمیر شود و شرایط عملیاتی در محیط کاربر را تا حد ممکن شبیه‌سازی کند. در سراسر فرایند آزمایش، داده‌های جمع‌آوری و تحلیل شده و منجر به ارزیابی عملکرد و اثربخشی سیستم در مقابل نیازمندی‌ها می‌شود. با داشتن سیستم در وضعیت عملیاتی، سوالات عبارت‌اند از عملکرد و اثربخشی واقعی سیستم در شرایط عملیاتی با حضور همه‌ی واسطه‌ها چگونه است؟ عملکرد و

اثر بخشی زیربنای پشتیبانی تدارکات و نگهداری و تعمیرات چیست؟ آیا همه TPM های مشخص شده و نیازمندی های مربوطه برآورده شده اند؟ آیا سیستم با دیگر سیستم ها در ساختار SOS/نطبق دارد؟

پاسخ به این سوالات نیازمند جمع آوری، تحلیل، گزارش گیری و بازخورد داده ها به صورت رسمی و کامل است. ایجاد چنین قابلیت یک فرایند دو گامی را تشکیل می دهد:

(۱) شناسایی نیازمندی ها و کاربرد چنین قابلیت؛ و (۲) طراحی، توسعه، و استقرار قابلیت که پاسخ گوی این نیازمندی ها باشد.

گام اول، نیازمند درک خصوصیات سیستم است که نیاز به ارزیابی دارد. با این که زیرسیستم های جمع آوری داده متعدد و مختلفی وجود دارد و در حال حاضر برای ارزیابی سیستم اعمال می شود، بسیاری از داده های جمع آوری شده اطلاعات مورد نیاز برای رسیدن به اهداف مدنظر را فراهم نمی کند. بنابراین، بازخورد این موضوع که واقعا چه اتفاقی در حال انجام است، وجود نخواهد داشت. در نتیجه، درک این موضوع که چه فاکتورهایی باید اندازه گیری شده و اطلاعات مورد نیاز کدامند، بسیار مهم است. شکل ۶-۴ (برای مثال) برخی اهداف اعتبارسنجی کامل سیستم را نشان می دهد. به این نکته باید توجه شود که نه تنها بررسی مأموریت اصلی عناصر سیستم بلکه زیربنای پشتیبانی نگهداری و تعمیرات نیز باید مورد بررسی قرار گیرد.

با داشتن نیازمندی های تعریف شده، گام دوم، توسعه فرم های مناسب و فرایند جمع آوری، تحلیل، گزارش گیری و بازخورد مناسب داده ها است. این فرم ها باید ساده و کامل باشند زیرا فعالیت ثبت داده ها تحت شرایط گوناگون محیطی (باران، باد، سرما، فضای محدود) و توسط افراد با سطوح مهارت متفاوت صورت می گیرد. اگر فرم ها دارای پیچیدگی باشند، ممکن است به درستی تکمیل نشوند (یا اصلا تکمیل نشوند). در همین زمان، کارکنانی که فرم های داده را پر می کنند

باید نیاز اطلاعاتی را بشناسند و برای تکمیل درست فرم، انگیزه داشته باشند. در غیر این صورت، اطلاعات مطلوبی به دست نیامده، ممکن است بدون استفاده یا گمراه کننده باشند.

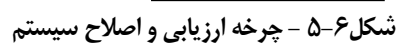
۶-۵-۲- بازخورد و اصلاح طراحی سیستم

با داشتن داده‌های ثبت شده، گام بعدی انجام تحلیل‌های مناسب، ارزیابی، گزارش‌دهی و بازخورد است. مهم است که اطلاعات درستی گزارش شود و بازخوردها به مسئولان مهندسی و مدیریت به سرعت منتقل شوند. این افراد نیاز دارند که بدانند سیستم نسبت به مشخصات فنی چگونه کار می‌کند و در صورت نیاز اصلاحات طراحی را اعمال کنند.

فرایند نمایش داده شده در شکل ۶-۵ شامل گام‌هایی می‌شود که جمع‌آوری داده، تحلیل، گزارش‌دهی و بازخورد را شامل می‌شود. اگرچه هدف اصلی فراهم کردن ارزیابی خوب از نحوه کارکرد سیستم در محیط عملیاتی کاربر است، هدف فرعی، شناسایی هرگونه مشکلی است که ممکن است کشف شده و پایه‌گذار گام‌هایی شود که منتهی به اصلاح و تغییرات موردنظر در سیستم شود.

۱.	فاکتورهای عمومی عملیات و پشتیبانی سیستم
a.	ارزیابی نیازمندی‌های مأموریت (سناریوهای عملیاتی، زمان ها، فراوانی‌ها).
b.	ارزیابی فاکتورهای عملکردی سیستم (ظرفیت، خروجی، اندازه، وزن، تحرک و غیره)
c.	فاکتورهای اعتبارسنجی هزینه و اثربخشی سیستم (TPM ها – دسترسی‌پذیری عملیاتی، قابلیت اطمینان MTBF، قابلیت نگهداری و تعمیر MTBM/MDT، فاکتورهای انسانی، ایمنی، هزینه چرخه‌ی عمر)
d.	اعتبارسنجی زیربنای پشتیبانی تدارکات و نگهداری و تعمیرات (سطوح و مکان‌های نگهداری و تعمیرات، سیاست‌های تعمیری، تدارکات، اثر بخشی تدارکات و زنجیره تامین، زمان پاسخ).
e.	ارزیابی امنیت سیستم (حفاظت کارکنان – شامل خطاها و تروریسم).
f.	اعتبارسنجی انطباق سیستم با دیگر سیستم ها در ساختار SOS.
۲.	نرم افزار عملیات و نگهداری و تعمیرات
a.	اعتبارسنجی انطباق نرم افزار عملیاتی با دیگر عناصر سیستم.
b.	اعتبارسنجی انطباق نرم افزار نگهداری و تعمیرات با دیگر عناصر سیستم.
c.	اعتبار سنجی قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیرات نرم‌افزار.
۳.	تسهیلات عملیاتی و نگهداری و تعمیرات
a.	اعتبارسنجی کفایت، بهره‌برداری، و پشتیبانی نگهداری و تعمیرات تسهیلات عملیاتی.
b.	اعتبارسنجی کفایت، بهره‌برداری، تعمیرات تسهیلات نگهداری و تعمیرات.
c.	اعتبارسنجی کفایت، بهره‌برداری و تعمیرات تسهیلات انبارداری.
d.	اعتبارسنجی کفایت، بهره‌برداری و تعمیرات تسهیلات آموزش.
۴.	حمل و نقل و جابه‌جایی
a.	اعتبارسنجی قابلیت‌های حمل و نقل و جابه‌جایی برای فعالیت‌های عملیاتی و نگهداری و تعمیرات سیستم (کفایت، ظرفیت، زمان‌های حمل و نقل، زمان پاسخ).
b.	ارزیابی قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی، ایمنی، امنیت و خصوصیات مربوط به تجهیزات حمل و نقل و جابه‌جایی.
۵.	کارکنان و آموزش
a.	اعتبارسنجی تعداد کارکنان عملیاتی و سطوح مهارت در هر مکان.
b.	اعتبارسنجی تعداد و سطوح مهارت کارکنان نگهداری و تعمیرات و پشتیبانی در هر مکان.
c.	ارزیابی سیاست‌ها و نیازمندی‌های آموزش کارکنان (کفایت، کامل بودن و غیره).
۶.	پشتیبانی تامین (قطعات یدکی و تعمیری)
a.	اعتبارسنجی انواع و تعداد قطعات یدکی و تعمیری در هر سطح/مکان نگهداری و تعمیرات.
b.	ارزیابی پاسخ‌دهی تامین (دسترسی‌پذیری قطعات یدکی در صورت نیاز)
c.	ارزیابی نرخ تعویض آئتم ها، نرخ استهلاک و غیره.
d.	ارزیابی سیاست‌های تعویض و موجودی قطعات یدکی و تعمیری.
۷.	تجهیزات آزمایش و پشتیبانی
a.	اعتبارسنجی انواع و تعداد تجهیزات پشتیبانی در هر سطح عملیاتی/نگهداری و تعمیرات.
b.	اعتبارسنجی دسترسی‌پذیری، قابلیت اطمینان، ایمنی و غیره برای تجهیزات پشتیبانی.
c.	ارزیابی نیازمندی‌های نگهداری و تعمیرات برای تجهیزات پشتیبانی (منابع موردنیاز).
۸.	داده‌های و اطلاعات فنی
a.	اعتبارسنجی پوشش داده‌ها فنی (سطح، دقت، دسترسی‌پذیری، و روش ارائه اطاعات در نظام نامه عملیاتی و نگهداری و تعمیرات)
b.	اعتبارسنجی کفایت اطلاعات مدیرتی و فنی (دقت، سرعت پردازش، قابلیت اطمینان، غیره)
c.	اعتبارسنجی کفایت جمع‌آوری، تحلیل، اصلاح و گزارش‌دهی داده‌ها.
۹.	پاسخ مشتری (کاربر)
a.	ارزیابی درجه رضایت‌مندی مشتری (کاربر).
b.	اعتبارسنجی برآورده شدن نیازهای مصرف کننده (مشتری/کاربر).

شکل ۶-۴ – چک‌لیست آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم (مثال)



شکل ۵-۶ - چرخه ارزیابی و اصلاح سیستم

با مراجعه به شکل ۶-۵، نتایج جمع‌آوری، تحلیل، گزارش‌دهی و فرایند بازخورد داده‌ها می‌تواند یک مساله مربوط به برآورده نشدن یک نیازمندی TPM (یا مشابه آن) را مشخص کند. از طریق تحلیل‌های بعدی، روابط علت-معلول مناسب ایجاد شده و نتایج می‌تواند یک نقص در یک تجهیز اصلی، یک ماژول نرم‌افزار یا یک عنصر از زیربنای پشتیبانی نگهداری و تعمیرات، یک مشکل در واسطه یک یا چند سیستم در ساختار SOS، و/یا برخی دستورالعمل‌های یا فرایندها را مشخص کند. در نتیجه، یک تغییر در طراحی از طریق فرایند پیشنهاد مهندسی تغییر (ECP) ارائه می‌شود. این فرایند که در قسمت ۵-۹ بحث شد برای بازبینی، ارزیابی و پیاده‌سازی تغییرات و اصلاحات سیستم در نتیجه انجام آزمایش کاربرد دارد.

۶-۶ - خلاصه فصل

آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم یک نقطه پایانی برای فصل‌های بخش دوم است که فرایند طراحی سیستم را تشریح می‌کند. این موضوع به علت نیازمندی‌های طراحی سیستم، استقرار یافته و منجر به تشریح ساختار پیشنهادی سیستم می‌شود. سپس، ساختار طراحی از طریق انجام آزمایش‌هایی که در ادامه‌ی آزمایش و ارزیابی کلی سیستم ادغام انجام می‌گردد، تصدیق اعتبار می‌شود.

فعالیت‌های آزمایش و ارزیابی در حقیقت در فرایند چرخه‌ی عمر انجام می‌شوند که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. این چرخه با طراحی مفهومی (بلوک 0.6) آغاز شده و از طریق فاز بهره‌برداری و پشتیبانی توسعه می‌یابد و اصلاحات سیستم با هدف ارتقای فناوری انجام می‌شوند (بلوک 4.4). بنابراین، این فعالیت‌ها به صورت پیوسته در همه فازهای چرخه‌ی عمر سیستم همراه با چرخه مناسب بازخورد صورت می‌پذیرند که به صورت پیوسته محصول / فرایند را بهبود می‌دهند.

استقرار موفق تصدیق اعتبار به این موارد بستگی دارد: (۱) توسعه‌ی مناسب برنامه آزمایش و ارزیابی سیستم ادغام شده از ابتدا؛ (۲) یک دانش گسترده و کامل از روش‌ها/ابزارهایی که می‌توان برای دستیابی به خروجی اثربخش و کارا در فرایند اعتبارسنجی مورد استفاده قرار داد؛ و (۳) یک قابلیت جمع‌آوری، تحلیل و گزارش‌دهی جامع که قابلیت‌های سیستم در محیط عملیاتی کاربر را با دقتی بالا فراهم آورد.

در آینده، در مورد آیت (۳) بیش‌تر تاکید خواهد شد؛ آیتی که در آن توسعه و پیاده‌سازی جمع‌آوری، تحلیل، گزارش‌دهی و بازخورد جامع و دقیق داده‌ها صورت می‌پذیرد. به‌طور معمول سیستم‌ها طراحی و توسعه داده می‌شوند، آزمایش می‌شوند تا اطمینان حاصل آید که نیازمندی‌های مشخص شده در قرارداد برآورده می‌شوند، به مشتری برای بهره‌برداری عملیاتی تحویل داده و پس از آن اغلب فراموش می‌شوند. با اینکه برخی دستورالعمل‌های جمع‌آوری و گزارش داده در بسیاری از سیستم‌های مورد استفاده امروزی وجود دارند، خروجی خالص این است که حجم زیادی از داده‌های جمع‌آوری شده به اطلاعات مفید تبدیل نمی‌شوند. علاوه بر این، بازخورد اندکی برای تیم طراحی فراهم می‌شود. بنابراین، کمبود قابل توجهی در تجربه عملیاتی بازخورد وجود داشته و فعالیت‌های طراحی پیرو آن سیستم‌ها و محصولات بعدی که طراحی و تولید می‌شوند دچار اشکالات و اشتباهات مشابه خواهند شد.

در پیاده‌سازی فرایند مهندسی سیستم‌ها، وفادار بودن به گام‌های عمومی نمایش داده شده در شکل ۲-۴ (از چپ به راست) یک موضوع حیاتی است. به‌علاوه، چرخه‌های بازخورد مختلف (که با خط چین‌ها مشخص شده‌اند) باید به‌صورتی اثربخش مورد استفاده قرار گیرد. فرایند شامل یک جریان تکرار شونده و جلو رونده از فعالیت‌هاست که با بازخوردهای مناسب همراه است.

برای مطالعه بیش‌تر در زمینه نیازمندی‌های اعتبارسنجی سیستم خواننده‌ی علاقه‌مند می‌تواند به این منابع مراجعه کند.

1. System Engineering Management (B.S. Blanchard)
2. Systems Engineering Handbook (INCOSE)
3. Systems Engineering Guidebook (INCOSE)

هم‌چنین مراجعه به وب‌سایت <http://www.itea.org> و <http://www.incose.org> پیشنهاد می‌شود.

سوالات و مسائل

۱. نیازمندی‌های خاص آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم چگونه تعیین می‌شوند؟
۲. فرایند آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم را تشریح کنید. اهداف آن چیست؟
۳. دسته‌بندی‌های اصلی آزمایش و کاربرد آن‌ها را توضیح دهید. چگونه آن‌ها در فرایند ارزیابی کلی سیستم جای می‌گیرند؟
۴. به شکل ۲-۴ مراجعه کنید. چگونه ارزیابی در هر یک از فازهای نشان داده شده صورت می‌گیرد (یعنی بلوک‌های 0.6, 1.5, 2.3, 3.4, 4.4)؟
۵. چه نیازمندی‌های خاصی باید برای سیستمی که در یک ساختار SOS کار می‌کند مشخص شوند؟ گام‌های موردنیاز برای حصول اطمینان از انطباق با دیگر سیستم‌ها در ساختار SOS را بیان کنید.
۶. چه زمانی برنامه‌ریزی برای آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم آغاز می‌شود؟ چرا؟
۷. یک سیستم را به دلخواه انتخاب کرده و برنامه آزمایش و ارزیابی سیستم را توسعه دهید (یعنی یک TPM یا مشابه آن).

۸. چرا استقرار سطح مناسب پشتیبانی تدارکات و نگهداری و تعمیرات در انجام آزمایش‌های سیستم مهم است؟ چه اتفاقی ممکن است رخ دهد اگر دستورالعمل مناسب آزمایش وجود نداشته باشد؟ در صورت عدم آموزش کافی کارکنان آزمایش چگونه؟ چه اتفاقی ممکن است رخ دهد اگر تجهیزات مناسب آزمایش و پشتیبانی در دسترس نباشد؟ توضیح دهید.
۹. چرا توسعه و پیاده‌سازی، جمع‌آوری، تحلیل، گزارش‌دهی و بازخورد خوب داده‌ها مهم است؟ در غیاب آن چه اتفاقی می‌افتد؟
۱۰. برخی اهداف توسعه و پیاده‌سازی جمع‌آوری، تحلیل و گزارش‌دهی داده‌ها را بیان کنید.
۱۱. چه داده‌هایی موردنیاز است تا این موارد اندازه‌گیری شود: هزینه-اثر بخشی، اثربخشی سیستم، دسترسی‌پذیری عملیاتی، هزینه چرخه‌ی عمر، قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیرات؟
۱۲. چگونه می‌توانید کفایت سیستم در پشتیبانی زنجیره تامین را ارزیابی کنید؟ چه شاخص‌هایی موردنیاز است؟
۱۳. چگونه قابلیت پایداری سیستم را اندازه‌گیری و ارزیابی می‌کنید؟
۱۴. در صورت وجود یک عدم انطباق در یک نیازمندی سیستم چه گام‌هایی اصلاحی برای رفع آن باید برداشته شود؟
۱۵. در صورتی که یک تغییر در طراحی پیشنهاد شده باشد تا یک نقص مشخص شده و طراحی اصلاح صورت پذیرد، چه کاری باید در پاسخ انجام داده شود؟
۱۶. چرا مدیریت ساختار در استقرار فرایند آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم مهم است؟
۱۷. چرا چرخه بازخورد مهم است (با فرض این که مهم است)؟

۱۸. به‌طور خلاصه فعالیت‌های مشتری/تولیدکننده/تامین‌کننده (و روابط بین آن‌ها) را در ارزیابی سیستم توضیح دهید.

۱۹. گزارش‌دهی مناسب آزمایش و ارزیابی چه منفعی به دنبال دارد؟

۲۰. نقش مهندسی سیستم‌ها را در فرایند آزمایش، ارزیابی و اعتبارسنجی سیستم توضیح دهید.

بخش سوم

تحلیل سیستم و ارزیابی طراحی

همان‌طور که عنوان این کتاب نشان می‌دهد، تحلیل سیستم‌ها یکی از بخش‌های مهم محتوای این کتاب، تحلیل سیستم یک فعالیت فنی بوده و هم‌زمان یک جزء اساسی در ارزیابی طراحی سیستم است. تحلیل پیرو ترکیب است و همراه با ارزیابی یک مورفولوژی عمومی برای خلق سیستم‌ها ایجاد می‌کنند. قسمت ۲-۵ همراه با شکل‌های ۲-۹ و ۲-۱۰ به این مثلث فراگیر اختصاص داده شده است.

نمی‌توان با روش‌های معمول تحلیل سیستم‌ها، ارزیابی طراحی را به‌صورت اثربخش در فرایند مهندسی سیستم‌ها اعمال کرد. بر این اساس، بخش سوم این کتاب به تغییر و اقتباس تئوری تصمیم، اقتصاد مهندسی، تئوری بهینه‌سازی، تحلیل صف، و روش‌های کنترل اختصاص داده شده است تا در ارزیابی گزینه‌های طراحی سیستم مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع در پنج فصل بحث و بررسی شده است.

فصل ۷ بر گزینه‌ها، مدل‌ها، تئوری تصمیم، چند معیاره بودن، نمایش ارزیابی تصمیم، و تصمیم‌گیری در شرایط ریسک و عدم قطعیت تمرکز دارد. فصل ۸ بر ارزیابی اقتصادی به روش کلاسیک و از نقطه‌نظر چند معیاره بودن و چند آینده بودن تمرکز دارد. در ادامه و در فصل ۹، روش‌های کلاسیک و دیگر روش‌های بهینه‌سازی با/بدون محدودیت در طراحی و عملیات توسعه داده شده است. تئوری و تحلیل صف برای جمعیت‌های محدود و نامحدود در فصل ۱۰ ارائه شده است. در نهایت، فصل ۱۱ به انواع مفاهیم، مدل‌ها و روش‌های کنترل اختصاص داده شده است.

جدا از ارزش تحلیل سیستم‌ها در بهینه‌سازی عملیات برای بهبود سیستم‌های موجود، کاربرد آن در ایجاد سیستم‌های جدید مفید است. موضوعات بخش سوم بر پایه شناسایی متغیرهای طراحی و دسته‌بندی پارامترهای سیستم به زیرمجموعه‌های وابسته و مستقل از طراحی قرار دارد. با این رویکرد، فضای بهینه‌سازی تقسیم‌بندی شده و از فضای طراحی متمایز می‌شود. ارزیابی طراحی توسط جستجوی فضای طراحی (که توسط پارامترهای وابسته به طراحی محدود شده است) پیش رفته و همیشه از طریق متغیرهای طراحی که همراه گزینه‌های طراحی است، بهینه‌سازی می‌شود.

نقشه‌راه برای بهبود مستمر طراحی توسط نمایش ارزیابی طراحی که در ابتدا در فصل ۷ معرفی شده است، مشخص می‌شود. این نمایش ارزیابی یک واسطه ضروری برای تصمیم‌گیری بین طراحی/تولید کننده و مشتری ایجاد می‌کند. این واسطه بهترین گزینه‌های طراحی را بر پایه‌ی نتایج تحلیل و مدل‌سازی که توسط تولیدکننده انجام می‌شود، تعیین می‌کند.

گزینه‌ها و مدل‌ها در تصمیم‌گیری

اکثر مهندسانی که با تحقیق، طراحی، توسعه، ساخت، تولید، عملیات و یا ترکیبی از آن‌ها درگیر هستند، به استفاده کارا از منابع محدود توجه می‌کنند. هنگامی که موقعیت‌های شناخته شده در استفاده‌ی کارا از منابع شکست می‌خورد، جستجو برای یافتن فرصت‌های بهتر آغاز می‌شود. این دیدگاه، که نیاز به ابتکار دارد، در ناشناخته‌ها قدم بر می‌دارد تا گزینه‌های جدیدی را پیدا کرده و برتری آن‌ها بر گزینه‌های شناخته شده مورد ارزیابی قرار گیرد.

درک فرایند تصمیم‌گیری اغلب نیازمند ساده‌سازی در پیچیدگی‌هاست که تصمیم‌گیرنده با آن مواجه است. ساده‌سازی مفهومی یک مساله واقعی یا مدل‌ها، روشی برای انجام این کار است. در این فصل، روشی که گزینه‌های مختلف را ایجاد کرده و رویکرد عمومی در ارزیابی تصمیم با استفاده از مدل‌ها را فراهم می‌کند، ارائه شده است تا تصمیم‌گیری در طراحی و عملیات را تسهیل کند.

پس از اتمام این فصل، خواننده دیدگاه موردنیاز در مورد گزینه‌ها را کسب کرده و به‌عنوان شالوده‌ای برای فرموله کردن مدل تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما مدل‌های تصمیم‌گیری

تنها برای تصمیم‌گیرنده و نقطه‌ی تصمیم‌گیری ایجاد شده‌اند. ارزیابی تصمیم یکی دیگر از گام‌هاست و در چارچوب تئوری ارزیابی تصمیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن موضوع تصمیم‌گیری چند معیاره و همچنین موضوعات ریسک و عدم قطعیت مورد بحث قرار خواهد گرفت.

این موضوعات در این فصل توسعه داده و ارائه شده است و موضوعات مورد نیاز برای فصول بعدی را فراهم می‌کند. پس از مطالعه‌ی این فصل، خواننده درکی عمومی نسبت به مفاهیم زیر پیدا می‌کند:

- گزینه‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها به عنوان پایه و اساسی برای پافراتر نهادن از شناخته شده‌ها و جستجوی فرصت‌های جدید برای ارتقای فناوری؛
- یک دسته‌بندی از مدل‌ها، آزمایش غیرمستقیم و فرمول‌بندی اعتبارسنجی مدل‌های تصمیم؛
- دو الگوی مربوط به تئوری ارزیابی تصمیم، مدل‌سازی جریان پول و مدل‌سازی بهینه‌سازی اقتصادی؛
- مقایسه‌ی نقش مدل‌ها و مدل‌سازی در طراحی و عملیات؛
- ملاحظات چندمعیاره بودن و برخی روش‌های کلاسیک برای انتخاب یکی از گزینه‌ها؛
- نمایش ارزیابی طراحی به عنوان روشی برای ارائه و بررسی گزینه‌ها در حالت چند معیاره؛
- تعدادی از رویکردهای کلاسیک و قوانین مواجهه با ریسک و عدم قطعیت در تصمیم‌گیری.

قسمت آخر این فصل، خلاصه‌ای از موضوعات بحث شده شامل مدل‌ها و مدل‌سازی تصمیم‌گیری و تعدادی از منابع موجود برای مطالعه بیشتر در زمینه‌ی این موضوعات را فراهم

کرده است. این قسمت یک دید مناسب در مورد فاکتورهایی را که قابل صرف‌نظر کردن نیستند، فراهم کرده و بر اهمیت درک و قضاوت درست در تصمیم‌گیری نهایی تاکید دارد.

۷-۱- گزینه‌ها در تصمیم‌گیری

یک گزینه کامل و جامع به‌ندرت در حالت نهایی خود ظاهر می‌شود. در ابتدا این گزینه به‌صورت یک ایده‌ی جذاب، ولی مبهم است. در ادامه توجه فرد یا سازمان به تحلیل و ترکیب معطوف شده و نتیجه‌ی آن یک پیشنهاد متقن است. در شکل رسمی خود، یک گزینه شامل تشریح کامل اهداف خود و نیازمندی‌هایش از نقطه نظر منفعت و هزینه است.

همه‌ی گزینه‌های پیشنهادی لزوماً قابل دست‌یابی نیستند. برخی برای تحلیل پیشنهاد می‌شوند هرچند به نظر آید که احتمال اثبات ممکن بودن آن بسیار کم باشد. ایده‌ی اصلی این است که باید گزینه‌های بیش‌تری مدنظر قرار گیرد تا این که یک گزینه که ممکن است ارجح باشد، مورد بررسی قرار گیرد. همه‌ی گزینه‌ها باید مورد تحلیل قرار گیرند حتی اگر احتمال اثبات ممکن بودن آن کم باشد. گزینه‌هایی که بررسی نشوند نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد، هرچقدر هم که ثابت شود برای سیستم مطلوب هستند.

۷-۱-۱- فاکتورهای محدودکننده و راهبردی

فاکتورهای مانع در دست‌یابی به اهداف، فاکتورهای محدودکننده نامیده می‌شوند. یک عنصر مهم در فرایند مهندسی سیستم‌ها، شناسایی فاکتورهای محدودکننده است که دست‌یابی به یک هدف مطلوب را محدود می‌کند. به محض آن که فاکتورهای محدودکننده شناسایی شوند، مورد بررسی قرار گرفته تا فاکتورهای راهبردی مشخص شوند، فاکتورهایی که می‌توانند تغییر کرده و پیشرفت را ممکن سازند.

شناسایی فاکتورهای راهبردی با اهمیت است زیرا به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد تا بر حوزه‌هایی که موفقیت قابل دستیابی است، تمرکز کند. این موضوع ممکن است به خلاقیت و توانمندی نوآوری یا توانمندی قرار دادن موضوعات موردنظر در کنار هم و ایجاد یک ترکیب جدید نیاز داشته باشد. روش‌های دستیابی به هدف مطلوب می‌تواند از یک دستورالعمل، یک فرایند فنی، یا یک تغییر سازمانی یا مدیریتی تشکیل شده باشد. فاکتورهای راهبردی که موفقیت را محدود می‌کنند می‌توانند توسط بررسی فاکتورهای مهندسی، نیروی انسانی و اقتصادی به صورت جدا و مشترک دور زده شوند.

یک عنصر مهم در فرایند مهندسی سیستم‌ها، شناسایی فاکتورهای محدودکننده است که دستیابی به یک هدف مطلوب را محدود می‌کنند. به محض آن‌که فاکتورهای محدودکننده شناسایی شوند، مورد بررسی قرار گرفته تا فاکتورهای راهبردی مشخص شوند و با هزینه‌ای مناسب تغییر کرده تا یکی از گزینه‌های در دست انتخاب شود.

۷-۱-۲- مقایسه یکسان گزینه‌ها

برای مقایسه‌ی یکسان گزینه، مهم است که آن‌ها را تبدیل به یک شاخص مشترک کنیم. تبدیل شدن به یک شاخص مشترک، مقایسه‌ی یکسان گزینه‌های را ممکن می‌سازد. مدل‌های جریان پول و مدل‌های بهینه‌سازی اقتصادی، موضوعاتی مرکزی در فرایند مقایسه بوده و به گزینه‌ها اجازه می‌دهند تا به صورت یکسان مقایسه شوند.

با تکمیل گام تبدیل، خروجی‌های کمی و کیفی و ورودی‌های هر یک از گزینه‌ها، پایه و اساس مقایسه و تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند. شاخص‌های کمی باید با استفاده از مدل‌های مناسب به دست آمده و تصمیم‌گیری بین گزینه‌ها باید بر پایه تفاوت‌های آن‌ها صورت گیرد. بنابراین، همه‌ی فاکتورهای مشابه می‌توانند هر زوج یا تعداد بیش‌تری از گزینه‌ها را در هر گامی از فرایند تصمیم‌گیری در تضاد باشند.

پس از تحلیل مناسب گزینه‌ها و تبدیل آن‌ها به یک شکل یکسان، تصمیم‌ها می‌توانند تنها توسط مشتری گرفته شود یا مشتری و تولیدکننده با هم این کار را انجام دهند، با این حال، این کار به‌ندرت تنها توسط تولیدکننده صورت می‌گیرد. مورد مدنظر هر چه که باشد، ارزیابی تصمیم یک الزام است و اغلب توسط برخی رویکردها و روش‌های مشترک تسهیل می‌شود.

برای هر گزینه تحت آزمایش، خروجی‌های متعددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مشخص است که همه خروجی‌ها نمی‌توانند اتفاق افتد و هر کدام از خروجی‌ها در هر زمانی ممکن است رخ دهد. بنابراین، تصمیم‌گیری یا انتخاب یک گزینه دارای ریسک و عدم قطعیت است.

علاوه بر گزینه‌های رسمی ایجاد شده برای ارزیابی، تقریباً همیشه گزینه‌های دیگری نیز وجود دارند که تصمیمی در قبال آن‌ها گرفته نمی‌شود. این موضوع بر پایه این حقیقت است که فرصت‌هایی در آینده به‌وجود می‌آید که از همه‌ی گزینه‌های مطلوب در دست در زمان حال مطلوب‌تر خواهند بود.

۷-۲- مدل‌های تصمیم‌گیری

مدل‌ها و کار با آن‌ها (فرایند شبیه‌سازی) اغلب ابزاری مفید در تحلیل سیستم‌هاست. یک مدل را می‌توان برای نمایش سیستمی که قرار است ایجاد شود یا تحلیل سیستمی که وجود دارد، مورد استفاده قرار داد. تحقیقات آزمایشگاهی با استفاده از یک مدل منجر به تصمیم‌گیری عملیاتی یا طراحی در زمان و هزینه کم‌تری می‌شود تا این که خود سیستم را به‌طور مستقیم مورد بررسی قرار داد. این موضوع زمانی بیش‌تر نمود می‌کند که سیستم واقعی را نتوان مورد بررسی قرار داد، به‌طور مثال زمانی که سیستم اصلاً وجود نداشته یا این که فعالیت‌های مدنظر پرهزینه و مخرب باشند. این موضوع در مورد سیستم‌های مصنوعی پیچیده کاملاً صدق می‌کند. بین مدل‌های مورد استفاده علمی و مهندسی یک تفاوت بنیادین وجود دارد. علم، موضوعات دنیای واقعی را دنبال

می‌کند، حال آن‌که مهندسی اساساً با دنیای مصنوعی درگیر است. علم مدل‌ها را مورد استفاده قرار می‌دهد تا نحوه‌ی کارکرد دنیای طبیعت را بیش‌تر درک کند. مهندسی مدل‌هایی را در دنیای مصنوعی به‌کار می‌گیرد تا بفهمند سیستم نهایی چگونه کار خواهد کرد. مدل‌های تایید شده در علم مورد استفاده مهندسی قرار می‌گیرند تا حدودی را مشخص کنند که در آن مهندسی بتواند ایجاد سیستم کرده محصولات این سیستم‌ها را بهبود بخشد.

۷-۲-۱- کلاس‌بندی مدل‌ها

کلمه مدل وقتی به‌صورت اسم در نظر گرفته می‌شود متضمن مفهوم نمایانگر است. در مهندسی هوا فضا می‌توان یک مدل چوبی از ساختار احتمالی یک هواپیما ساخت. یک معمار می‌تواند ساختمان مدنظر را در مقیاس کوچک‌تر مدل کند. یک مهندسی صنایع می‌تواند چیدمان تجهیزات در یک کارخانه را در نرم‌افزار نشان دهد. کلمه مدل می‌تواند به‌عنوان صفت در نظر گرفته شده و متضمن آن‌چه باشد که دلخواه است. در نتیجه، یک مرد می‌تواند به‌عنوان یک مدل شوهر و یا یک کودک به‌عنوان مدل دانش آموز در نظر گرفته شود. در نهایت کلمه مدل می‌تواند به‌عنوان فعل استفاده شود به‌طور مثال یک نفر لباس‌ها را مدل کند.

مدل‌ها برای نمایش سیستم مورد مطالعه طراحی می‌شوند و مثال موردنظر از واقعیت را ایجاد کرده تا روابط ضروری در آن را توضیح دهد. مدل‌ها را می‌توان از جنبه‌های فیزیکی، قیاسی، شماتیک و ریاضی دسته‌بندی کرد. مدل‌های فیزیکی شبیه چیزی خواهد بود که قرار است مدل شود، مدل‌های قیاسی مانند سیستم اصلی رفتار می‌کنند، مدل‌های شماتیک یک فرایند یا یک وضعیت را به‌صورت تصویری نمایش می‌دهند و مدل‌های ریاضی قواعد موجود در وضعیت مورد بررسی را با نمادها نشان می‌دهند. انواع مدل‌های مطرح شده در مهندسی و تحلیل سیستم‌ها به‌خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مدل‌های فیزیکی. مدل‌های فیزیکی از نظر هندسی معادل سیستم اصلی هستند که از نظر مقیاس می‌توانند کوچک‌تر، بزرگ‌تر یا هم‌اندازه‌ی سیستم واقعی باشند. کره‌های کوچک زمین مثالی از این دست است. این کره، شکل و محل خشکی‌ها، سطوح پوشیده از آب و دیگر خصوصیات کره زمین را نشان می‌دهد. یک مدل از منظومه شمسی، محل خورشید و دیگر سیاره‌ها را در فضا نشان می‌دهد. مدل ساختار اتم، مدلی است که شبیه ساختار اتم است ولی در مقیاسی بسیار بزرگ‌تر نمایش داده می‌شود. هر یک از این مدل‌ها برای نمایش واقعیت ساخته شده‌اند.

برخی مدل‌های فیزیکی در فرایند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک مهندس هوا فضا می‌تواند طراحی دم‌هواپیما را در تونل باد مورد بررسی و آزمایش قرار دهد. یک کارخانه را به‌صورت آزمایشی می‌توان ساخت تا مهندس شیمی یک فرایند جدید شیمیایی را آزمایش کند و مشکلات موجود در فرایند را پیش از تولید انبوه مورد بررسی قرار دهد. اغلب یک اتاقک ساخته می‌شود تا شرایط پیش‌بینی شده را برای فرایند مورد بررسی فراهم کند.

استفاده از قالب‌های چیدمانی درچیدمان کارخانه یک مثال از مدل‌های فیزیکی است. این قالب‌ها به‌صورت دو بعدی و سه بعدی در یک محیط مقیاس شده، مکان ماشین آلات و تجهیزات را نشان می‌دهند. رابطه فاصله‌ای بسیار مهم است و قالب‌ها تا زمانی که چیدمان موردنظر به‌دست آید، مورد تحلیل و تغییر قرار می‌گیرند. فاکتورهایی مانند تولید سروصدا، ارتعاشات و نور، فاکتورهای مهم دیگری هستند که در این تحلیل نمی‌گنجند و باید به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مدل‌های قیاسی. مدل قیاسی بر شباهت روابط تمرکز دارد. این قیاس‌ها اغلب از نقطه نظر بصری بی‌معنا هستند.

مدل‌های قیاسی می‌توانند فیزیکی باشند، به‌طور مثال مدارهای الکتریکی که سیستم‌های مکانیکی، سیستم‌ها هیدرولیکی یا حتی سیستم‌های اقتصادی را نمایش می‌دهند. با استفاده از رایانه برای کمک به این نوع مدل‌سازی می‌تواند سیستم‌های توزیع برق، فرایندهای شیمیایی و بارگذاری دینامیکی سازه‌ها را مورد بررسی قرار داد. قیاس از طریق عناصر فیزیکی نمایش داده می‌شود. هنگامی که یک رایانه‌ی دیجیتالی به‌عنوان مدل یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد، قیاس انتزاعی‌تر خواهد بود. برای مثال، طراحی دم که در تونل باد مورد آزمایش است ممکن است همه جزئیات را داشته باشد، اما همه خصوصیات و ویژگی‌ها مورد مطالعه قرار نگیرد. تونل باد احتمالاً فقط خصوصیات ایرودینامیک دم را آزمایش می‌کند نه خصوصیات ساختاری، وزن، و هزینه آن را. در نتیجه باید توجه کرد که مدل قیاسی تنها خصوصیات را مورد بررسی قرار می‌دهد که مدل برای آن ساخته شده است. این مدل‌ها، مانند انواع دیگر مدل‌ها، در موارد مشخصی از عدم کفایت رنج می‌برند.

مدل‌های شماتیک. یک مدل شماتیک توسط انعکاس یک حالت یا رخداد در یک چارت یا نمودار توسعه می‌یابد. مدل شماتیک می‌تواند شبیه وضعیت واقعی باشد یا ممکن است اصلاً شباهتی بین آن‌ها وجود نداشته باشد. اغلب ممکن است که توسط این مدل‌ها درک بهتری از رفتار سیستم به‌دست آورد. این کار از طریق فرایند کد کردن صریح در ساخت مدل صورت می‌گیرد. یک بازی فوتبال را می‌توان به‌صورت نموداری از اتفاقات بازی و به‌صورتی ساده نشان داد.

چارت سازمانی، یک مدل شماتیک رایج است. این مدل وضعیت روابط رسمی موجود بین اعضای یک سازمان را نشان می‌دهد. نمونه مرسوم دیگر، چارت انسان-ماشین است. این مدل، یک مدل از یک رخداد است که در آن تعامل یک یا چند نفر با یک یا چند ماشین در چرخه انجام کار به نمایش در می‌آید. چارت جریان فرایند یک مدل شماتیک است که توالی یا اتفاق افتادن

یک سری از رخدادها را نشان می‌دهد که یک هدف را تشکیل می‌دهند، مانند مونتاژ یک خودرو از اجزای تشکیل‌دهنده آن.

در هر یک از موارد، ارزش مدل شماتیک در توانمندی آن در تشریح جنبه‌های ضروری وضعیت موجود است. این مدل همه روابط و فعالیت‌های خارجی را شامل نمی‌شود، بلکه بیش‌تر بر یک وجه مساله تمرکز دارد. بنابراین، مدل شماتیک خودش یک راه‌حل نیست، بلکه دست‌یابی به یک راه‌حل را تسهیل می‌کند. پس از تحلیل مدل، یک جواب پیشنهادی تعریف، آزمایش و پیاده می‌شود.

مدل‌های ریاضی. یک مدل ریاضی از زبان ریاضی استفاده می‌کند و مانند بقیه مدل‌ها تشریح و توضیحی از سیستم را فراهم می‌آورد. اگرچه درک نمادها نسبت به نمادهای کلامی سخت‌تر است، اما سطح بالاتری از انتزاع و دقت را فراهم می‌کند. به خاطر منطقی که در این مدل‌ها وجود دارد، این مدل‌ها به‌خوبی بستر تحلیل دستورالعمل‌های ریاضی را فراهم می‌کنند.

تقریباً همه مدل‌های ریاضی هم برای پیش‌بینی و هم برای کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد. قانون‌هایی از جمله قانون بویل، قانون اهم، و قوانین نیوتون در حرکت همگی به‌صورت ریاضی فرموله شده و می‌تواند در پیش‌بینی خروجی پدیده‌های فیزیکی مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های ریاضی می‌توانند برای کنترل موجودی مورد استفاده قرار گیرند. در کنترل کیفیت، یک مدل ریاضی می‌تواند برای پایش درصد قطعات خراب قابل قبول در بسته تامین شده مورد استفاده قرار گیرد.

مدل‌های ریاضی که برای مطالعه سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند با مدل‌های معمول در علوم فیزیکی از دو جهت مهم متفاوتند. اول آن‌که چون سیستم مورد بررسی شامل فاکتورهای اقتصادی و اجتماعی می‌شود، این مدل‌ها باید عناصر احتمالی را شامل شوند تا رفتار تصادفی این

فاکتورها را در نظر بگیرند. دوم این که مدل‌های ریاضی فرموله شده برای توضیح عملیات موجود یا برنامه‌ریزی شده از دو دسته از متغیرها استفاده می‌کند: متغیرهای تحت کنترل تصمیم‌گیرنده و متغیرهایی که به‌طور مستقیم تحت کنترل نیستند (متغیرهای وابسته). هدف انتخاب مقادیر مناسب برای متغیرهای تحت کنترل است تا اثربخشی شاخص‌های اندازه‌گیری بهینه شود. بنابراین، این مدل‌ها در مهندسی و تحلیل سیستم بسیار سودمند هستند.

۲-۲-۷- مدل‌ها و آزمایش غیرمستقیم

مدل‌ها و فرایند شبیه‌سازی یک روش ساده در جمع‌آوری اطلاعات در مورد سیستم در حال طراحی یا سیستم موجود هستند. در طراحی، می‌توان نمونه‌های مختلفی ساخت، آن‌ها را آزمایش کرد و طراحی را براساس نتایج به‌دست آمده اصلاح کرد. این موضوع در بسیاری از موارد ممکن نیست زیرا هزینه و زمان موردنیاز برای این کار طی چرخه‌ی عمر سیستم بسیار زیاد است. بخش بزرگی از فرایند طراحی، نیازمند تصمیم‌هایی است که بر پایه مدل سیستم گرفته می‌شوند نه تصمیم‌هایی که از خود سیستم استخراج خواهند شد.

آزمایش مستقیم و غیرمستقیم. در آزمایش غیرمستقیم، شی، حالت یا رخداد، و/یا محیط مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مشاهده می‌شود. برای مثال، یک زوج می‌تواند مبلمان اتاق پذیرایی را بدین روش عوض کنند. در این روش، آن‌ها چیدمان را عوض کرده و نتیجه را مشاهده می‌کنند. این فرایند می‌تواند برای بار دوم و سوم نیز تکرار شود تا همه گزینه‌های منطقی بررسی شده و بهترین چیدمان انتخاب شود و در این زمان آزمایش به پایان می‌رسد. آزمایش مستقیم، مانند این مورد، می‌تواند برای چیدمان مجدد تجهیزات کارخانه مورد استفاده قرار گیرد. اما چنین کاری زمان‌بر، مخرب و پرهزینه است. در نتیجه، شبیه‌سازی یا آزمایش غیرمستقیم باید مورد استفاده قرار گیرد.

آزمایش مستقیم در یک هواپیما شامل ساخت یک نمونه در اندازه واقعی و آزمایش پرواز آن تحت شرایط واقعی می‌شود. اگرچه این یک گام ضروری در تکامل یک طراحی جدید است، اما گامی بسیار پرهزینه قلمداد می‌شود. فرایند معمول ارزیابی پیکربندی‌های پیشنهادی توسط مدل ساخته شده از هر کدام از بخش‌های هواپیما و آزمایش آن در تونل باد است. این فرایند به صورت آزمایش غیرمستقیم یا شبیه‌سازی است. این فرایند در حد وسیع در شرایطی که آزمایش مستقیم از نظر اقتصادی ممکن نیست، انجام می‌گیرد.

در تحلیل سیستم‌ها، آزمایش غیرمستقیم از فرموله‌بندی و مدل‌های تصمیم تاثیر می‌پذیرد. این کار چگونگی ایجاد تغییر در جنبه‌های تحت کنترل تصمیم‌گیرنده را تعیین کرده و سیستم مدل شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در آزمایش غیرمستقیم، تحلیلگر سیستم را توانمند می‌سازد تا خروجی محتمل یک تصمیم‌گیری را بدون ایجاد تغییر در عملیات سیستم بررسی کند. آزمایش غیرمستقیم در مطالعه‌ی عملیات روشی را فراهم می‌کند که در آن اطلاعات کمی بدون ایجاد هر گونه اختلالی در عملیات سیستم تحت کنترل تصمیم‌گیرنده در اختیار وی قرار می‌گیرد.

شبیه‌سازی از طریق آزمایش غیرمستقیم. در اکثر موقعیت‌های عملیاتی و طراحی، هدف بهینه‌سازی شاخص‌های اثربخشی یا بهره‌وری است. این کار به ندرت از طریق آزمایش مستقیم سیستم در حال توسعه یا سیستم موجود صورت می‌گیرد. هم‌چنین، هیچ تئوری مشخصی در دسترس نیست که مشخص کند بهترین مدل برای شبیه‌سازی یک سیستم کدام است. انتخاب یک مدل مناسب به تجربه تحلیلگر سیستم از سیستم مورد بررسی بستگی دارد.

کاربرد اصلی شبیه‌سازی در مهندسی سیستم‌ها، بررسی و جستجوی آثار تغییر خصوصیات سیستم بر عملکرد سیستم است بدون این که تولید یا آزمایش هر کدام از گزینه‌ها به صورت واقعی صورت پذیرد. اکثر مدل‌های مورد استفاده در دسته‌بندی ذکر شده قرار گرفته و بیش تر آن‌ها در دسته مدل‌های ریاضی قرار می‌گیرند. نوع مدل مورد استفاده به سوالاتی که باید پاسخ داده شود،

بستگی دارد. در برخی موارد نمودارهای شماتیک کفایت می‌کند. اما در بسیاری دیگر از آن‌ها، مدل‌های ریاضی و احتمالی نیاز است. شبیه‌سازی با کمک رایانه به‌صورت قیاسی و دیجیتال در بسیاری از موارد مورد نیاز است.

در بسیاری از موضوعات مهندسی و تحلیل سیستم‌ها، بسیاری از مدل‌ها فرموله‌بندی می‌شوند. این مدل‌ها یک بازه‌ی سلسله‌مراتبی را تشکیل می‌دهند که از ادغام جزئیات وسیع به‌دست می‌آیند. در شروع پروژه سیستم‌ها، دانش در دسترس از سیستم ناقص و کلی است. با پیشرفت طراحی، این دانش جزئی‌تر شده و در نتیجه مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی نیز باید تفصیلی‌تر شوند.

۷-۲-۳- فرمول‌بندی و اعتبارسنجی مدل‌های تصمیم

در فرمول‌بندی یک مدل ریاضی تصمیم، باید همه اجزای سیستم که در اثربخشی و هزینه آن تاثیرگذارند، مدنظر قرار گیرد. به‌علت غیرممکن بودن در نظر گرفتن همه فاکتورها در تابع ارزیابی، تنها فاکتورهایی که تاثیر معناداری در خروجی سیستم دارند، در نظر گرفته می‌شوند. این دیدگاه برخی اوقات منجر به نتیجه‌گیری‌های اشتباه شده که در آن قسمت‌های مختلف یک وضعیت از یکدیگر مجزا می‌شوند. اگرچه درنظر گرفتن روابط مهم امکان‌پذیر است، باید به یاد داشت که همه عناصر سیستم به یکدیگر وابستگی درونی دارند.

کار با مدل، به اصلاح مدل و کم کردن مغایرت‌ها بین مدل و دنیای واقعی منجر می‌شود. این فرایند اعتبارسنجی دارای الگوی هم‌زمان بوده که با روش عملی قابل قیاس است. این فرایند شامل سه گام است: (۱) قیاس منطقی یک مدل، (۲) آزمایش پیش‌بینی یا نتایج مدل در مقابل اندازه‌گیری‌ها و مشاهده‌ها، و (۳) اصلاح سیستم برای کاهش مغایرت‌ها.

فرایند اعتبارسنجی باید تا زمانی که مدل توسط شواهد اندازه‌گیری، مشاهده و تایید می‌شود، ادامه یابد. با تکامل مدل به حالتی معتبر، مدل یک قیاس منطقی از واقعیت را فراهم می‌کند که می‌توان به آن اتکا کرد. یک مدل ممکن است به حالت معتبر رسیده باشد اما نتایج آن دارای انحراف‌هایی باشد. در این‌جا مدل به این دلیل معتبر است که نتایج یک‌دستی ارائه می‌دهد و متغیر نیستند. یک مدل تصمیم را نمی‌توان در دسته دقیق یا غیردقیق قرار داد. اگر تغییرات ایجاد شده در مدل منجر به نتایجی می‌شود که در واقعیت نیز اتفاق می‌افتاد آنگاه مدل درست کار می‌کند اما اگر مشخص باشد که نتیجه یک سری از تغییرات به چه چیزی می‌انجامد، فرایند شبیه‌سازی غیرضروری خواهد بود.

مهندسان و مدیران هر چه بیش‌تر با این موضوع آشنا شده‌اند که تجربه، درک و قضاوت شخصی برای رسیدن به اهداف طراحی و عملیات، کافی نخواهد بود. مدل‌ها در طراحی و عملیات مفیدند، زیرا تصمیم‌گیرنده را به نقطه‌ی تصمیم می‌رسانند.

۷-۳- تئوری ارزیابی تصمیم

ارزیابی تصمیم، یک بخش مهم از مهندسی و تحلیل سیستم‌هاست. ارزیابی به‌عنوان پایه و اساس در انتخاب یک گزینه از میان چند گزینه موردنیاز است که این موضوع در فعالیت‌های طراحی سیستم و همچنین بهینه‌سازی عملیات موردنظر به‌وجود می‌آید. در هر دو مورد، هم ارزی^۱ یک معیار ارزیابی رایج است که توسط آن یک گزینه انتخاب می‌شود.

این قسمت دو دسته عمومی از مدل‌های تصمیم‌گیری را ارائه می‌کند. گروه اول بر پایه جریان پول قرار داشته و مدل‌سازی جریان پول را فراهم می‌کند و گروه دوم شامل جریان پول می‌شود، اما بیش‌تر با بهینه‌سازی سروکار دارد و مدل‌سازی بهینه‌سازی اقتصادی را تشکیل می‌دهد.

1. Equivalence

۷-۳-۱- ارزیابی توسط مدل‌سازی جریان پول

هم ارزی اقتصادی به صورت مقدار معادل فعلی (PE)، معادل سالانه (AE)، یا معادل آینده (FE) و همچنین با نرخ بازگشت سرمایه^۱ و دوره‌ی بازگشت سرمایه بیان می‌شود. هر کدام از این موارد در فصل ۸ توضیح و توسعه داده شده است.

به عنوان یک تابع هم ارزی عمومی که هر کدام از این عبارات معادل را در نظر می‌گیرد به صورت زیر بیان می‌شود

$$PE, AE, \text{ or } FE = f(F_t, i, n) \quad (1-7)$$

که در آن $t=0,1,2,\dots,n$ و

F_t = جریان مثبت یا منفی پول در پایان سال t

i = نرخ بهره سالانه

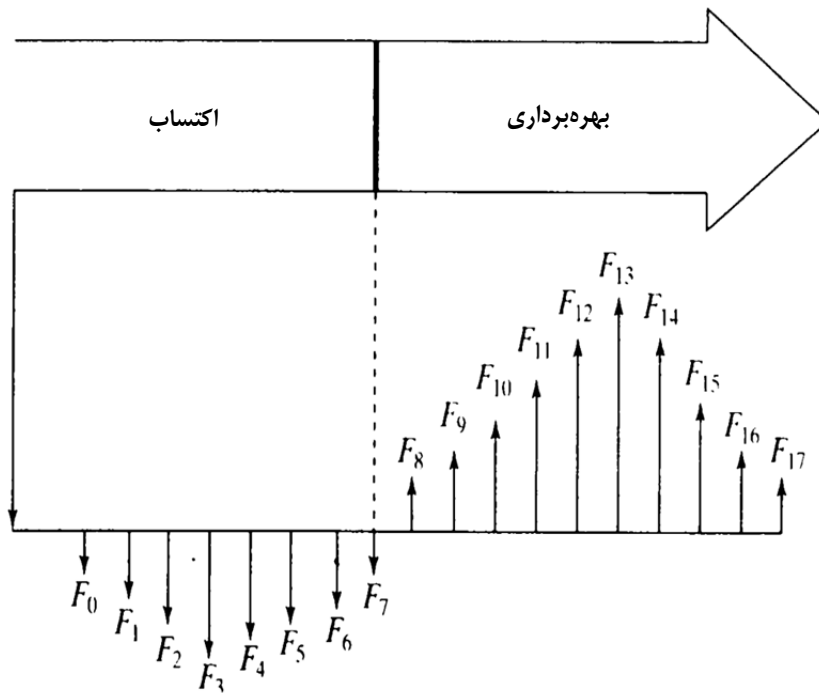
n = تعداد سال‌ها

چرخه‌ی عمر، تولیدکننده‌ی جریان پول طی فازهای اکتساب و بهره‌برداری سیستم است که در یک چرخه‌ی عمر فرضی ۱۷ ساله در شکل ۷-۱ نمایش داده شده است (به شکل ۲-۱ مراجعه کنید). در این مثال، اکتساب چندین سال به طور می‌انجامد و هزینه‌های پرداختی از F_0 تا F_7 را شامل می‌شود (F_0 و F_2 برای طراحی مفهومی و اولیه، F_3 و F_4 برای طراحی و توسعه تفصیلی و F_5 تا F_7 برای تولید و/یا ساخت). درآمد خالص در پایان هر سال طی ۱۰ سال بعدی اتفاق می‌افتد یعنی F_8 تا F_{17} . ارزش بازیافتی^۲ یا هزینه، اگر وجود داشته باشد، در F_0 در نظر گرفته شده است.

1, Rate of Return

2, Salvage Value

مقادیر معادل فعلی، معادل سالانه و معادل آینده (یا مقادیر معادل در هر نقطه‌ی زمانی) پایه و اساس‌های همسانی برای ارزیابی یک گزینه یا مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها هستند و فرقی در نتیجه‌ی آن‌ها ایجاد نمی‌شود. هر کدام از این موارد می‌تواند در تابع هم‌ارزی عمومی اقتصادی در معادله (۱-۷) مورد استفاده قرار گیرد. علاوه‌براین، معادله (۱-۷) یک ساختار عمومی برای ارزیابی توسط رویکردهای نرخ بازگشت سرمایه داخلی یا دوره پرداخت فراهم می‌کند. فصل ۸ مفاهیم مدل‌سازی تحلیلی موردنیاز برای ارزیابی تصمیم متناظر با معادله (۱-۷) را فراهم می‌کند.



شکل ۱-۷- جریان پول اکتساب و بهره‌برداری

۷-۳-۲- ارزیابی توسط مدل‌سازی بهینه‌سازی اقتصادی

ارزیابی تصمیم اغلب نیازمند ترکیبی از رویکردهای مدل‌سازی جریان پول و بهینه‌سازی اقتصادی است. هنگامی که هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، هزینه‌های دوره‌ای، یا عمر پروژه تابع یک یا چند متغیر تصمیم است، مهم است که این متغیرها به‌عنوان یک پیش‌نیاز برای تعیین معادله‌های اقتصادی بهینه شوند. بهینه‌سازی نیازمند آن است که یک شاخص ارزیابی از مدل بهینه‌سازی اقتصادی استخراج شود.

یک تابع بهینه‌سازی اقتصادی یک مدل ریاضی است که شاخص ارزیابی، E ، را به متغیرهای تصمیم قابل کنترل، X ، متصل می‌کند. این تابع روشی برای آزمایش متغیرهای تصمیم با حضور پارامترهای سیستم را فراهم می‌کند. این آزمایش یک آزمایش غیرمستقیم است که به‌صورت ریاضی صورت می‌گیرد که در نهایت یک مقدار بهینه برای E به‌دست می‌آورد. رابطه تابعی در حالت بدون محدودیت به شرح معادله زیر است.

$$E = f(X, Y) \quad (۷-۲)$$

به‌عنوان یک مثال از ساختار تابع بهینه‌سازی برای شرایط تصمیم‌گیری غیرمحدود، تعیین کمیت بهینه خرید برای عملیات موجودی انبار را در نظر بگیرید. در این‌جا، شاخص اندازه‌گیری هزینه و هدف، انتخاب یک کمیت خرید در مواجهه با تقاضا، هزینه خرید، و هزینه نگهداری است که در نهایت کل هزینه حداقل شود. کمیت خرید یک متغیر است که به‌طور مستقیم تحت کنترل تصمیم‌گیرنده است. تقاضا، هزینه خرید، و هزینه نگهداری مستقیماً تحت کنترل او نیست. استفاده از تابع بهینه‌سازی به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد تا موازنه‌ای بین عناصر متضاد هزینه‌ای ایجاد کند.

تابع بهینه‌سازی می‌تواند برای گزینه‌های تصمیم طراحی و عملیات تصمیم یابد. این تصمیم شامل شناسایی و مجزا کردن پارامترهای وابسته به طراحی یا تصمیم سیستم، Y_d ، از پارامترهای مستقل از طراحی یا تصمیم باشد، Y_i . معادله (۷-۲) می‌تواند به حالت غیرمحدود زیر درآید.

$$E = f(X, Y_d, Y_i) \quad (۷-۳)$$

به عنوان یک مثال از کاربرد این نسخه از تابع ارزیابی تصمیم، استقرار یک سیستم خرید و موجودی برای برآورده کردن تقاضای یک آیتم را در نظر بگیرید که از طریق منابع زیادی قابل تامین است. متغیرهای تصمیم سطح خرید و کمیت تدارک است. برای هر یک از منابع مدنظر، مجموعه‌ای از پارامترهای وابسته به منبع وجود دارد. این پارامترها هزینه واحد آیتم، هزینه واحد تدارک، نرخ دوباره کاری، و زمان تحویل است. پارامترهای غیرکنترلی (مستقل از منبع) سیستم شامل نرخ تقاضا، هزینه نگهداری در واحد دوره‌ی زمانی و هزینه‌ی جریمه کمبود می‌باشند. هدف مشخص کردن سطح خرید و تعداد خرید و انتخاب منبع خرید است به صورتی که هزینه کل سیستم حداقل شود.

در تصمیم‌گیری برای طراحی، استقرار جمعیتی از واحدهای تجهیزاتی قابل تعمیر را در نظر بگیرید که باید یک تقاضای مشخص شده در قسمت ۲-۱-۲ را برآورده کند. سه متغیر تصمیم را می‌توان شناسایی کرد: تعداد واحدها برای استقرار، تعداد کانال‌های موردنیاز برای نگهداری و تعمیرات، و مشخص کردن عمری که واحد در آن از کار می‌افتد. پارامترهای قابل کنترل سیستم شامل قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات، اثربخشی انرژی و عمر طراحی می‌باشند. پارامترهای غیرکنترلی سیستم شامل هزینه انرژی، ارزش زمانی پول و جریمه‌ای است که هنگام کافی نبودن واحدهای عملیاتی برای برآورده کردن تقاضا واقع می‌شود. از آنجا که پارامترهای قابل کنترل وابسته به طراحی هستند، هدف توسعه‌ی گزینه‌های طراحی در مقابل متغیرهای تصمیم

هستند، به‌طوری که گزینه‌های طراحی، هزینه‌ی کل سیستم را حداقل سازند. رویکرد پارامتر وابسته به طراحی، ارزیابی گزینه‌های طراحی سیستم در چرخه‌ی عمر را تسهیل می‌کند. این رویکرد شامل مجزا کردن فضای طراحی سیستم (که توسط پارامترهای وابسته به طراحی مشخص می‌شود) از فضای بهینه‌سازی (که توسط متغیرهای طراحی مشخص می‌شود) است. این عبارات به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

۱. پارامترهای وابسته به طراحی (Y_d): فاکتورهایی هستند که مقادیر آن‌ها، تحت کنترل

طراح(ها) است و طی فرایند توسعه تحت‌تاثیر قوانین تخصصی خود هستند. هر نمونه از مجموعه پارامترهای وابسته به طراحی نمایانگر یک سیستم کاندید مجزا یا یک گزینه طراحی است، زیرا این پارامترها، فضای طراحی را محدود می‌کند. مثال‌هایی از این پارامترها عبارت‌اند از قابلیت اطمینان، قابلیت تولید، قابلیت نگهداری و تعمیرات، زمان پرواز، توان عملیاتی و غیره.

۲. پارامترهای مستقل از طراحی (Y_i): فاکتورهایی هستند که خارج از کنترل طراح(ها)

است اما اثربخشی همه سیستم‌های کاندید یا گزینه‌های طراحی را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند و می‌توانند خوب بودن یا مطلوبیت هر کدام از گزینه‌ها را به‌شدت تغییر دهند. مثال‌هایی از این فاکتورها عبارت‌اند از نرخ هزینه نیروی کار، هزینه مواد، هزینه انرژی، فاکتورهای تورم و نرخ بهره و غیره.

۳. متغیرهای طراحی (X): فاکتورهایی هستند که فضای بهینه‌سازی طراحی را مشخص

می‌کنند. هر سیستم کاندید در مجموعه متغیرهای طراحی، پیش از مقایسه با دیگر گزینه‌ها، بهینه می‌شود. در این روش، هم ارزی تضمین شده است.

خلاصه‌ای از تکامل و توسعه تابع ارزیابی تصمیم در جدول ۱-۷ نمایش داده شده است. مدل‌های موجود در فصول بعدی بر اساس توابع ارزیابی تصمیم که در این قسمت ارائه شده و در جدول ۱-۷ خلاصه شده است، توسعه یافته‌اند.

جدول ۱-۷- اشکال توابع ارزیابی تصمیم

کاربرد	شکل تابع	منبع
عملیات	$E = f(x_i, y_j)$ $E =$ اثربخشی سیستم $x_i =$ متغیرهای تحت کنترل مستقیم $y_i =$ متغیرهای غیرقابل کنترل به صورت مستقیم	Churchman, Ackoff, and Arnoff (1957)
عملیات	$E = f(X, Y); g(X) = B$ $\leq$ $\geq$ $E =$ شاخص ارزیابی $X =$ متغیرهای کنترلی $Y =$ متغیرهای غیرکنترلی	Fabrycky, Ghare, and Torgersen (1984)
عملیات خرید	$E = F(X, Y_d, Y_i); g(X, Y_d) = C$ $\leq$ $\geq$ $E =$ شاخص اندازه گیری $X =$ سطح خرید و تعداد خرید $Y_d =$ پارامترهای وابسته به منبع $Y_i =$ پارامترهای مستقل از منبع	Banks and Fabrycky (1987)

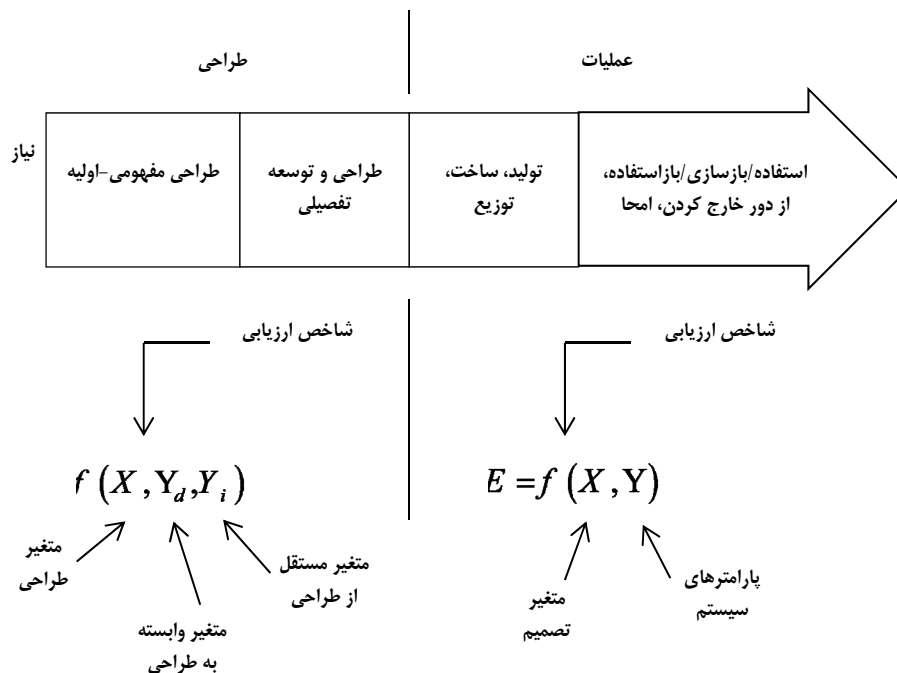
کاربرد	شکل تابع	منبع
بهینه‌سازی طراحی	$F(X, Y_d, Y_i); g(X, Y_d) = C$ $<$ $>$	Fabrycky and Blanchard (1991)
E = شاخص ارزیابی		
X = متغیرهای طراحی		
Y_d = پارمترهای وابسته به طراحی		
Y_i = متغیرهای مستقل از طراحی		

۷-۳-۳- مدل‌ها در طراحی و عملیات

محل و نقش معادلات (۷-۲) و (۷-۳) در تحلیل سیستم و ارزیابی طراحی متفاوت است. هنگامی که از نظر چرخه‌ی عمر مدنظر هستند، هر کدام در بخش عمده‌ای اعمال می‌شوند که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. معادله ۷-۲ برای بهینه‌سازی عملیاتی که در حال انجام است، کاربرد دارد. در حالی که معادله (۷-۳) برای انتخاب بین یک زوج از گزینه‌های طراحی و بر پایه پارامترهای وابسته به طراحی مفید است.

جدول ۷-۱ و شکل ۷-۲ را با هم به‌عنوان روشی در کاربرد مدل‌ها در طراحی و عملیات در نظر بگیرید. هم‌چنین در این جا یک پایه ریاضی برای تفاوت مدل‌ها در مهندسی سیستم‌ها و در تحلیل سیستم‌هاست. دو سطر اول در جدول ۷-۱ و فاز عملیات در شکل ۷-۲ فرمول‌بندی‌های کاربردی مدل تصمیم در عملیات، مخصوصاً در تحلیل سیستم (معادله (۷-۲)) هستند. پارامترهای وابسته به سیستم موردنیاز نیستند. در سطر سوم جدول ۷-۱ یک وضعیت عملیاتی مشخص در نظر گرفته شده است که عملیات خرید می‌باشد. در این کاربرد، پارامترهای سیستم به زیرمجموعه‌های مستقل از منبع و وابسته به منبع تقسیم شده‌اند. با این کار، ممکن است این معادله برای بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم در هر مجموعه از پارامترها و هر کدام از منابع مورد

استفاده قرار گیرد. البته با شناخت پارامترهای تقسیم شده، این کاربرد در تحلیل سیستم‌ها جای می‌گیرد نه در مهندسی سیستم‌ها، زیرا پارامترها وابسته به طراحی نیست.



شکل ۷-۲- بهینه‌سازی اقتصادی در طراحی و عملیات

در مهندسی سیستم‌ها، پارامترهای وابسته به طراحی موردنیاز هستند. با مراجعه به جدول ۷-۱ (سطر ۴) و شکل ۷-۲ (فاز طراحی)، توجه کنید که پارامترهای وابسته به طراحی صراحتاً تقسیم‌بندی شده است. مقادیر این پارامترها، TPMها هستند و تشخیص تفاوت بین گزینه‌های مشخص طراحی را ممکن می‌سازد. توجه کنید که معادله (۷-۳) به معادله (۷-۲) تبدیل شده و مشخص می‌کند تحلیل سیستم‌ها، پشتیبان مهندسی سیستم‌هاست. تحلیل سیستم‌ها در بهینه‌سازی عملیات در مواجهه با یک طراحی مشخص شده عمل کرده یا می‌تواند برای کمک به

نرم ساختن فضای طراحی که همیشه مجموعه متغیرهای تصمیم را بهینه می‌کند، مورد استفاده قرار گیرد.

از آنجایی که این مقادیر، مقادیر مشخص شده در پارامترهای وابسته به طراحی و مطلوب مشتری هستند (TPMها)، گزینه‌های مستقل طراحی باید در حوزه‌ی چند معیاره مورد ارزیابی قرار گیرند، به‌طوری که استخراج TPM از مقادیر مطلوب به‌راحتی قابل مشاهده باشد. قسمت ۴-۷ روش‌های کلاسیک متعددی را برای این کار ارائه داده و قسمت ۵-۷ یک روش گرافیکی در نمایش گزینه‌ها را فراهم می‌کند.

مدل‌ها برای تصمیم‌های طراحی و تصمیم‌گیری عملیاتی، چکیده‌هایی از سیستم مورد مطالعه هستند. مانند همه چکیده‌ها، مدل‌ها شامل تعدادی از فرض‌ها هستند: فرضیاتی در مورد خصوصیات عملیاتی اجزا، رفتار افراد، و طبیعت محیط. این فرض‌ها باید کاملاً درک شده و هنگامی که مدل برای تصمیم‌گیری در طراحی و عملیات مورد استفاده قرار می‌گیرد، مورد ارزیابی قرار گیرند.

۴-۷- تصمیم‌گیری چند معیاره

در شرایط تصمیم‌گیری به‌ندرت تنها یک معیار مدنظر است. در اکثر موارد، یک تصمیم باید چندین معیار را مدنظر قرار دهد و با هم مطلوبیت نسبی یک گزینه مورد بررسی را مشخص کند. تصمیم باید تنها بعد از در نظر گرفتن همه‌ی معیارهای مربوطه گرفته شود. با آگاهی از این موضوع که تعدادی قابل کمی شدن هستند و بقیه طبیعتی کیفی دارند. براین اساس، این قسمت برخی رویکردهای رسمی در مواجهه با شرایط چند معیاره بودن را فراهم می‌کند که دانش و قضاوت کیفی و کمی را نیز در نظر می‌گیرند.

۷-۴-۱- ملاحظات چند معیارگی

وقتی چند معیار وجود داشته باشد، انتخاب کار ساده‌ای نیست و اگر تصمیم‌گیرنده از کنار مفاهیم ابتدایی و خطوط راهنمای ساده به راحتی عبور کند، این مشکل همیشگی خواهد شد. بنابراین، پیش از توسعه و نمایش برخی روش‌های رسمی و ساختاریافته در فرایند تصمیم‌گیری چند معیاره، تعدادی از مفاهیم پایه باید شناخته شده و مدنظر قرار گیرد. مفاهیم پایه در این قسمت به عنوان روش‌های رسمی بوده و رویکردهایی است که باید دنبال شوند.

انتخاب معیارها. مهم است که گزینه‌ها پس از مشخص شدن، انتخاب و توصیف معیارهای مدنظر باهم مقایسه شوند. علاوه بر این، فرایند شناسایی و انتخاب، اغلب یک گام مفید در رسیدن به بهترین گزینه است.

مهم‌ترین موضوع در انتخاب معیارها، مستقل بودن آن‌ها از یکدیگر است. دو معیار وقتی از هم مستقل هستند که ترتیب رجحان و موازنه در سطوح مختلف معیارها بستگی به سطوحی که معیارها اتفاق می‌افتند، نداشته باشد.

اگرچه دستیابی به معیارهای مستقل در عمل دشوار است، استقلال در گام اول باید مدنظر قرار گیرد. سپس هرگونه عدم استقلالی باید توسط ترکیب معیارها یا اصلاح نتایج نهایی اصلاح شود.

تعداد معیارهایی که در نهایت انتخاب می‌شوند باید تا حد ممکن اندک باشد. آن‌هایی که مشخص شده‌اند که اثر قابل توجهی بر گزینه‌ها ندارند باید با اطمینان از فرایند تحلیل، حذف می‌شوند. اما از طرفی مشخص شده است که تعداد اندک معیارها ممکن است بدین معنا باشد که برخی معیارهای مهم در نظر گرفته نشده‌اند. متأسفانه، هیچ راهی برای مشخص کردن تعداد ایده‌آل معیارها در یک وضعیت تصمیم‌گیری مشخص وجود ندارد.

یک راه مناسب در کاهش تعداد معیارها، جستجوی معیارهایی است که از نظر آن‌ها هر کدام از معیارها بد یا خوب باشند. این کار با یک یا تعداد اندکی از معیار انجام شده و آن‌ها را تحت یک ارزیابی اولیه قرار می‌دهند تا یک دید کلی و نسبی در مورد عملکرد آن در شرایط تصمیم به‌دست آید. این فرایند تا جایی ادامه می‌یابد که زمان و هزینه متحمل شده در مقابل اطلاعاتی که به‌دست می‌آید، قابل توجیه باشد.

تفاوت‌ها پایه تصمیم‌گیری هستند. تصمیم‌های بین گزینه‌ها تنها باید بر پایه تفاوت‌های واقعی در همه معیارها صورت گیرد. تنها تفاوت‌های واقعی در تصمیم‌گیری مهم هستند. معیارهایی که یکسان هستند، می‌توانند حذف شوند. در این فرایند باید به این نکته توجه کرد و اطمینان حاصل کرد که معیارهای حذف شده حقیقتاً یکسان بوده و اهمیت یکسانی دارند. تا زمانی که صراحتاً مشخص نشده است که معیارها برای گزینه‌ها یکسان هستند، باید در فرایند تحلیل باقی بمانند.

در بسیاری از مطالعات، تنها عناصر کوچکی از کل یک سازمان مدنظر قرار می‌گیرد. برای مثال، مطالعاتی که برای ارزیابی عواقب خرید یک ابزار یا ماشین در یک تسهیل پیچیده انجام می‌شود. در چنین مواردی، مطلوب است که عنصر را از کل سیستم مجزا در نظر گرفت. برای مثال، این کار با در نظر گرفتن یک ماشین که قرار است خریده شود، لازم است که همه ورودی‌ها و خروجی‌های (اقتصادی) ماشین مدنظر قرار گیرد. اگر چنین کاری بتوان انجام داد، خروجی‌ها را از ورودی‌ها کم می‌کنیم. این مقدار منفعت را با در نظر گرفتن یک نرخ بازگشت می‌توان محاسبه کرد. اما فرایند ارزیابی به این‌جا نباید ختم شود. اغلب چند معیار مدنظر است و تفاوت‌ها در عناصر غیر اقتصادی نیز باید به‌خوبی مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد.

به‌عنوان یک مثال از یک تصمیم در حالت چند معیاره، تحلیل و ارزیابی گزینه‌های عبور از رودخانه را که برای اولین بار در قسمت ۳-۱ مطرح شد، در نظر بگیرید. معیارها می‌توانند

سرمایه‌ی اولیه موردنیاز برای یک پل، تونل، عبور با قایق، یا روشی دیگر، زمان عبور، حجم ترافیک قابل پشتیبانی، ایمنی، آثار محیطی و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات باشد.

در چنین شرایطی، یکی از تکنیک‌های ساختار یافته که معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی را به صورت اثربخش ترکیب می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ترکیب سپس به تصمیم‌گیرنده منتقل می‌شود و انتظار می‌رود در درک و قضاوت او موثر بوده و مخصوصاً درک او را از تفاوت‌ها در جنبه‌های کیفی وضعیت مورد بررسی را بهبود دهد.

۷-۴-۲- روش‌های رتبه‌بندی مستقیم

یک روش مستقیم برای انتخاب از میان گزینه‌ها، ارائه‌ی آن‌ها به تصمیم‌گیرنده برای رتبه‌بندی آن‌هاست. اما ابتدا بهترین کار آن است که معیارهای مهم را برای او فراهم آورده و خواسته شود که آن‌ها را رتبه‌بندی کند. با این روش، تصمیم‌گیرنده دید بهتری نسبت به معیارهایی که بهترین گزینه به آن‌ها بستگی دارد، پیدا می‌کند. براین اساس، روش‌های رتبه‌بندی می‌توانند بر معیارها یا گزینه‌ها اعمال شده یا ابتدا به معیارها و سپس به گزینه اعمال شود. مشکل است که بتوان روش‌های رتبه‌بندی را به طور هم‌زمان بر معیارها و گزینه‌ها اعمال کرد.

دستورالعملی که می‌تواند رتبه‌بندی را ساده‌تر و اثربخش‌تر سازد روش مقایسه‌ی زوجی نامیده می‌شود. روش مقایسه‌ی زوجی پیشنهاد می‌کند که گزینه‌ها و/یا معیارها به صورت زوجی به تصمیم‌گیرنده ارائه شود. یک مزیت دیگر این است که مقایسه‌ی زوجی به صورت ضمنی ارزش قضاوت تصمیم‌گیرنده را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد.

به عنوان مثال، ۵ معیار مهم وابسته به طراحی لوازم اداری را در نظر بگیرید. این معیارها باید رتبه‌بندی شوند: (۱) بهتر، (۲) ارزان‌تر، (۳) سریع‌تر، (۴) قابل تعمیر، (۵) قابل امحا. این معیارها در یک تحلیل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا بهترین طراحی برای این لوازم صورت پذیرد.

هنگامی که N معیار یا گزینه برای رتبه‌بندی وجود داشته باشد، $N(N-1)/2$ زوج برای مقایسه وجود خواهد داشت. برای پنج معیار وسایل اداری، فرض کنید که نتایج به‌صورت زیر باشد ($>$ به معنی ارجح و $=$ به معنی به یک اندازه ارجح):

$$\begin{array}{llll} 1 < 2 & 2 > 3 & 3 > 4 & 4 > 5 \\ 1 > 3 & 2 > 4 & 3 = 5 & \\ 1 > 4 & 2 > 5 & & \\ 1 = 5 & & & \end{array}$$

نمایش مقایسه زوجی در جدول ۷-۲ نشان داده شده است. P برای زوج به معنی ارجحیت معیار موجود در سطر بر معیار موجود در ستون است. در قطر اصلی نباید چیزی قرار گیرد زیرا یک معیار نمی‌تواند نسبت به خودش ارجح باشد. برای حصول اطمینان از این که همه زوج‌ها در نظر گرفته شده است، بررسی کنید که آیا جای هر زوج حداقل در بالا یا پایین قطر اصلی پر شده است یا نه.

جدول ۷-۲- نمایش مقایسه‌های ارجحیت

تعداد ارجحیت	۵	۴	۳	۲	۱	معیار
2+	=	P	P	-	-	۱
4	P	P	P	-	P	۲
1+	=	P	-	-	-	۳
1	P	-	-	-	-	۴
++	-	-	=	=	=	۵

تعداد دفعه‌هایی که هر معیار در هر سطح ارجح شناخته شده‌اند در ستون سمت راست جدول ۷-۲ نشان داده شده است. یک قانون ساده برای رتبه‌بندی شمارش تعداد دفعه‌هایی است که یک معیار بر بقیه معیارها ارجحیت دارد. برای مثال، ترتیب این رتبه‌بندی برای مثال مدنظر به‌صورت ۲ $< ۱ < ۳ < ۴ = ۵$ خواهد بود. بنابراین، ارزان‌تر بودن از همه مهم‌تر است و بهتر بودن در مکان

دوم قرار دارد. سریع بودن از قابل تعمیر و قابل امحا بودن مهم‌تر است. این دوم مورد آخر نسبت به هم ارجحیت معناداری ندارند.

روش ارائه شده یک انتقال پذیری در بررسی ارجحیت را فرض می‌کند. به این معنا که اگر ۱ بر ۲ و ۲ بر ۳ ارجحیت دارد، باید ۱ بر ۳ ارجحیت داشته باشد. اگر دو یا چند معیار به تعداد مساوی بر دیگر معیارها ارجح باشند، این موضوع گواهی بر عدم‌ثبات خواهد بود. در این مثال چنین چیزی وجود ندارد. اگر وجود داشت، راه‌حل آن بررسی دوباره‌ی گزینه‌های ارجحیت آن معیارها خواهد بود.

۷-۴-۳- روش‌های حذف نظام‌مند

روش‌های حذف نظام‌مند از جمله رویکردهای ساده در دسترس برای انتخاب بین چند گزینه با وجود چند معیار است. این روش‌ها هنگامی قابل استفاده هستند که مقادیر و/یا خروجی‌ها را برای همه‌ی معیارها و همه‌ی گزینه‌ها بتوان مشخص کرد. این مقادیر باید قابل اندازه‌گیری (اسکالر) بوده یا حداقل قابل مرتب کردن (ترتیبی) باشند.

روش‌های حذف، دو محدودیت دارند. اول آن‌که، آن‌ها وزن معیارها را در نظر نمی‌گیرند. دوم آن‌که این روش‌ها، غیرجبرانی هستند یعنی این روش‌ها، موازنه‌های ممکن میان معیارها و در طول گزینه‌ها را در نظر نمی‌گیرند.

یک مثال واحد انتخاب شده است تا سه رویکرد حذف نظام‌مند را ارائه شود. فرض کنید گزینه‌های از A تا D وجود دارد که در جدول ۷-۳ نشان داده شده است و هر کدام یک مقدار تخمینی یا پیش‌بینی شده عددی یا مقدار ترتیبی دارند. ستون‌های سمت راست مقادیر حداقل و ایده‌آل هر یک از معیارها را نمایش داده است.

جدول ۳-۷- مقادیر تخمینی معیارها برای گزینه‌ها

معیار	A	B	C	D	ایده‌آل	حداقل استاندارد
بهتر	۴۰	۳۵	۵۰	۳۰	۵۰	۳۰
ارزان‌تر	۹۰	۸۰	۷۵	۶۰	۱۰۰	۷۰
سریع‌تر	۶	۵	۸	۶	۱۰	۷
قابلیت اطمینان	G	P	VG	E	E	F

در جدول ۳-۷، معیارهای اول تا سوم به صورت عددی و معیار چهارم به صورت ترتیبی تخمین زده شده‌اند که در آن E به معنی عالی، VG یعنی خیلی خوب، G یعنی خوب، F یعنی متوسط، و P یعنی ضعیف. سه روش حذف نظام‌مند در ادامه تشریح شده است.

مقایسه‌ی گزینه‌ها در مقابل هم. واضح‌ترین روش حذف، بررسی غلبه یک گزینه از طریق مقایسه‌ی زوجی گزینه‌هاست. گزینه‌های مغلوب را می‌توان با خیال راحت حذف کرد. اگر گزینه‌ای بهتر یا برابر با گزینه دیگر در همه معیارها بود، آن‌گاه گزینه دیگر مغلوب است.

با توجه به جدول ۳-۷، توجه کنید گزینه A بر گزینه B غالب است. این موضوع به خاطر $40 > 35$ در بهتر بودن، $90 > 80$ در ارزان‌تر بودن، $6 > 5$ برای سریع‌تر بودن، و $G > P$ در قابلیت اطمینان است. هیچ زوج دیگری از گزینه نمی‌توان یافت که غلبه در آن اتفاق بیافتد.

غلبه تنها یک تکنیک حذف است. این روش لزوماً به انتخاب یک گزینه منجر نمی‌شود مگر آن‌که معیارهای دیگری در نظر گرفته شود. قسمت بعدی به این موضوع پرداخته است.

مقایسه‌ی گزینه‌ها با یک استاندارد. مقایسه با یک استاندارد (که ارضا نامیده می‌شود) رایج و ساده است. این روش‌های مقایسه را می‌توان در یکی از دو حد یا در یک نقطه مشخص در بین آن‌ها اعمال کرد. حدود قوانین زیر را فراهم می‌کنند:

قانون ۱: یک گزینه تنها اگر حداقل یکی از استانداردها را رعایت کند، باقی می‌ماند (حذف نمی‌شود).

قانون ۲: یک گزینه تنها اگر همه استانداردها را رعایت کند، باقی می‌ماند (حذف نمی‌شود). اجرای این قوانین و ترکیبی از آن‌ها با تنظیم یک جدول انجام می‌شود تا نتایج استخراج شده را مانند جدول ۷-۴ نمایش دهد. X نشان‌دهنده‌ی تجاوز یک گزینه از حدود مجاز (استاندارد) در مورد یک معیار است.

با بررسی نتایج جدول ۷-۴ به جمع‌بندی زیر در مورد گزینه‌ها می‌رسیم:

۱. همه گزینه‌ها حداقل یکی از استانداردها را رعایت می‌کنند و تحت قانون ۱ برای ارزیابی بیش‌تر باقی می‌مانند.

۲. گزینه C همه استانداردها را رعایت می‌کند و تحت قانون ۲ به تنهایی باقی می‌ماند. مقایسه معیارها در گزینه‌ها. مقایسه معیارها در گزینه‌ها می‌تواند به دوصورت پس از ترتیب‌بندی اهمیت نسبی معیارها انجام شود:

۱. برای مهم‌ترین گزینه، گزینه‌ای که بهترین مقدار را دارد، انتخاب کنید. هنگام ایجاد یک تساوی بین دو یا چند معیار، از دومین معیار مهم استفاده شود. این کار را تا زمانی که یک گزینه باقی بماند یا معیارها تمام شود، ادامه دهید.

۲. هر معیار را به صورت جدا برای همه گزینه، مورد بررسی قرار دهید. گزینه‌هایی که مقدار استاندارد را رعایت نمی‌کنند، حذف کنید. این کار را تا زمانی که همه‌ی گزینه‌ها به غیر از یک گزینه باقی بماند یا تا زمانی که معیارها تمام شود، ادامه دهید.

جدول ۴-۷- گزینه‌هایی که استاندارد معیارها را رعایت نمی‌کنند

گزینه	معیار			
	۱	۲	۳	۴
A			X	
B			X	X
C				
D		X	X	

برای مثال مدنظر، فرض کنید که اهمیت به صورت $2 > 1 > 3 > 4$ مرتب شده که طریق روش رتبه‌بندی مستقیم به دست آمده است. با استفاده از حداقل استانداردها در جدول ۷-۳، قوانین مقایسه نتایج زیر را به دست می‌دهد:

۱. معیار ۲ (ارزان‌تر) مهم‌ترین و گزینه‌ی A بهترین هنگام ارزیابی در این معیار است. با این

حال، این گزینه، استاندارد را برای یک معیار (سریع‌تر) رعایت نمی‌کند.

۲. بررسی یک گزینه به صورت مجزا و حذف آن‌هایی که استاندارد را رعایت نمی‌کنند

نتایج زیر را به دست می‌دهد:

معیار	حذف	باقی‌مانده
۱	هیچکدام	A,B,C,D
۲	D	A,B,C
۳	A,B,D	C
۴	هیچکدام	C

با استفاده از روش ذکر شده، تحت قانون اولی، گزینه A با در نظر نگرفتن معیار ۳ (سریع‌تر) انتخاب می‌شود. در غیر این صورت گزینه C با استفاده از قانون دوم انتخاب می‌شود.

۴-۴-۷- روش‌های ارزیابی وزنی

رتبه‌بندی اهمیت وزنی را می‌توان در روش‌های رتبه‌بندی و حذفی که ارائه شد، تعمیم داد. این تعمیم صراحتاً معیارهایی را که باید مهم‌تر یا با اولویت بیش‌تر در نظر گرفت، مشخص می‌کند. همچنین، اگر یک روش افزودنی وزنی مورد استفاده قرار گیرد، با جمع همه نتایج از معیارهای مختلف این اجازه وجود خواهد داشت که قدرت در یک معیار ضعف دیگری را جبران کند. بنابراین، قدرت می‌تواند ضعف را در ارزیابی نهایی جبران کند.

در این قسمت، تکنیک‌های مستقیم و ذهنی برای تخصیص وزن یا اهمیت به معیارها در نظر گرفته می‌شود. سپس، روش‌های جدولی یا گرافیکی افزودنی ارائه می‌شود. این تکنیک گاهی در انتخاب گزینه ارجح، اثربخش می‌باشد. آن‌ها بر پایه ترکیب اوزان معیارها و درجه‌بندی خروجی گزینه‌ها قرار گرفته است.

وزن‌دهی به معیار. بدون توجه به این که وزن‌ها توسط روش مستقیم یا روش ذهنی به‌دست آمده است، اوزان به‌دست آمده برای معیارها در همه گزینه اعمال می‌شود. همچنین، ضروری است که جمع اوزان به‌دست آمده 1.00 یا 100% باشد.

مثال قبل را در نظر بگیرید. فرض کنید که تنها معیارهای بهتر بودن، ارزان تر بودن و سریع تر بودن مدنظر باشد و گزینه‌های قابلیت پشتیبانی و قابلیت امحا به صورت ضمنی در بهتر بودن لحاظ شود. این کار معیار اول (بهتر بودن) را پیچیده تر می‌کند، اما تحلیل را با سه معیار برای هر گزینه ساده تر خواهد کرد.

جدول ۷-۵- اوزان افزودنی از نرخ اهمیت

وزن افزودنی	نرخ اهمیت	معیار
0.35	7	بهتر
0.45	9	ارزان تر
0.2	4	سریع تر

فرض کنید اوزان بهتر، ارزان تر و سریع تر به ترتیب 35%، 50% و 15% باشد که مجموعاً 100% خواهد بود. اگر وزن یکی از آن‌ها تغییر کند، بقیه نیز نیاز به تغییر دارند. بنابراین، تخصیص مستقیم اوزان می‌تواند به صورت تخصیص ۱۰۰ امتیاز به معیارهای مدنظر باشد. این معیارها وزن داده شده به همه گزینه‌های طراحی اعمال می‌شود.

به صورت جایگزین، درجه اهمیت ذهنی آن‌ها را می‌توان در مقیاس ۱۰ امتیازی مشخص کرد. فرض کنید بهتر، ارزان تر و سریع تر از این ۱۰ امتیاز به ترتیب ۷، ۹ و ۴ امتیاز کسب کنند. با یک محاسبه‌ی ساده، اوزان افزودنی به دست می‌آید که در شکل ۷-۵ نشان داده شده است. اگر این کار به صورت مستقل انجام شود، مقادیری را به دست می‌دهد که با روش تخصیص مستقیم متفاوت خواهد بود.

روش جدولی افزودنی. جدول ۷-۶ روش جدولی افزودنی را نمایش می‌دهد که بر پایه ورودی است که از قسمت قبل به دست می‌آید. این روش معیارها، اوزان (W)، نرخ عملکرد (R) هر یک

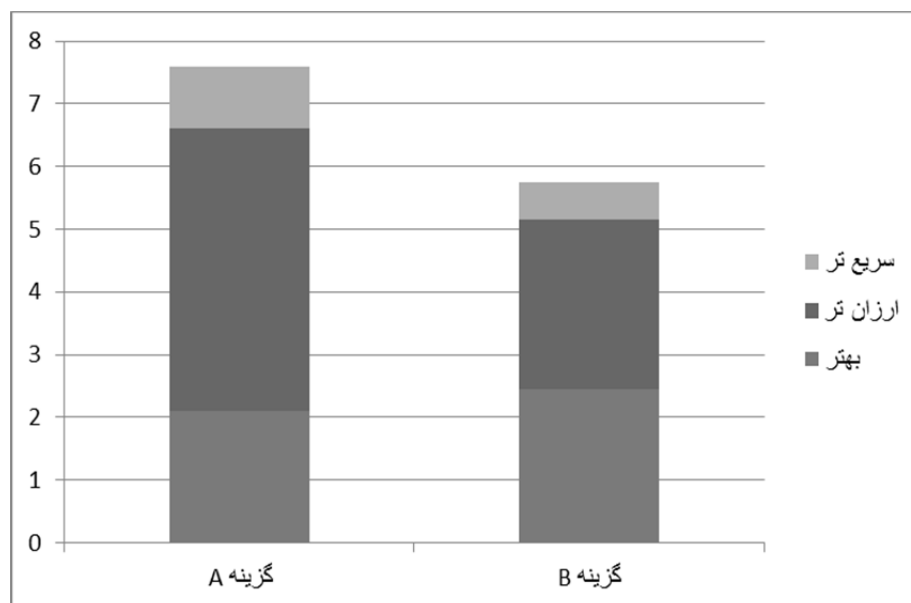
از گزینه در هر یک معیارها، حاصل ضرب وزن در نرخ ($W \times R$) و جمع ادغامی $W \times R$ را شناسایی می‌کند. این جمع‌های ادغامی در مقایسه گزینه‌ها به کار می‌رود.

امتیازات مقایسه‌ای ساده در جدول ۶-۷ از محاسباتی که اوزان هر معیار و نرخ‌های پیش‌بینی شده هر گزینه در هر معیار ترکیب می‌کند، به دست می‌آید. از آنجا که مجموع اوزان برابر ۱۰۰٪ بوده و بهترین مقدار برای همه‌ی معیارها ۱۰ است، مجموع وزنی میزان نزدیکی گزینه‌ها به حالت ایده‌آل را نشان می‌دهد.

روش افزودنی گرافیکی. نسخه گرافیکی اطلاعات داده شده در جدول ۶-۷ و در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. این شکل یک نمودار میله‌ای است که ارتفاع میله‌ها برابر با مجموع امتیازات هر گزینه است.

هر کدام از میله‌ها در شکل ۳-۷ از اجزایی تشکیل شده است که حاصل ضرب وزن هر معیار در نرخ عملکرد آن می‌باشد. مشارکت هر جزء در مجموع امتیاز هر گزینه نشان داده شده است. اگر گزینه دیگری مدنظر قرار گیرد، نمودار میله می‌تواند به سرعت نقش هر جزء در ساخت امتیاز کل آن گزینه را نشان دهد. علاوه بر این، این روش گرافیکی می‌تواند برای نشان دادن تحلیل حساسیت به کار رود، به‌ویژه زمانی که ممکن است باعث نقض یک تصمیم ممکن شود.

معیار	وزن (W)	گزینه A		گزینه B	
		نرخ (R)	$W \times R$	نرخ (R)	$W \times R$
بهتر	0.35	6	2.10	7	2.45
ارزان‌تر	0.45	10	4.50	6	2.70
سریع‌تر	0.20	5	1.00	3	0.60
مجموع	1.00		7.60		5.75



شکل ۷-۳- نمودار میله‌ای برای ارزیابی وزنی

۷-۵- نمایش ارزیابی تصمیم

روش نمایش ارزیابی تصمیم با روش‌هایی که تاکنون بحث شده است، کاملاً متفاوت می‌باشد. برخی تصمیم گیرندگان رتبه‌بندی، حذف، وزن‌دهی، نرخ‌دهی، و قوانین انتخاب مشابه را مانعی در کاربرد اثربخش دیدگاه، درک و قضاوت می‌دانند. در یک گزینه باید در ارتباط با تفاوت‌هایی که به یک تصمیم بستگی دارد، تمرکز داشت و ادامه مسیر را به تصمیم گیرنده واگذار کرد.

نمایش ارزیابی تصمیم بر پایه‌ی قضیه‌ی تفاوت‌ها بین گزینه و درجه برآورده‌سازی همراه با چند معیار قرار دارد که به‌خوبی به نمایش درآمد است و همه‌ی تصمیم گیرندگان به آن احتیاج دارند. براین اساس، نمایش ارزیابی تصمیم به‌عنوان راهی برای نمایش هم‌زمان تفاوت‌هایی که گزینه‌های مختلف در مقابل معیارها ایجاد می‌کنند، توصیه می‌شود.

شکل کلی و ساختار اساسی نمایش ارزیابی تصمیم در شکل ۷-۴ به نمایش درآمده است. این ساختار یک روش برای نمایش هم‌زمان عناصر مربوط به یک یا چند گزینه در مقابل معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی است. این عناصر عبارت‌اند از:

۱. **گزینه‌ها (A,B,C):** چند گزینه به صورت خطوط عمودی در فضای نمایش ارزیابی تصمیم، نمایش داده می‌شود.

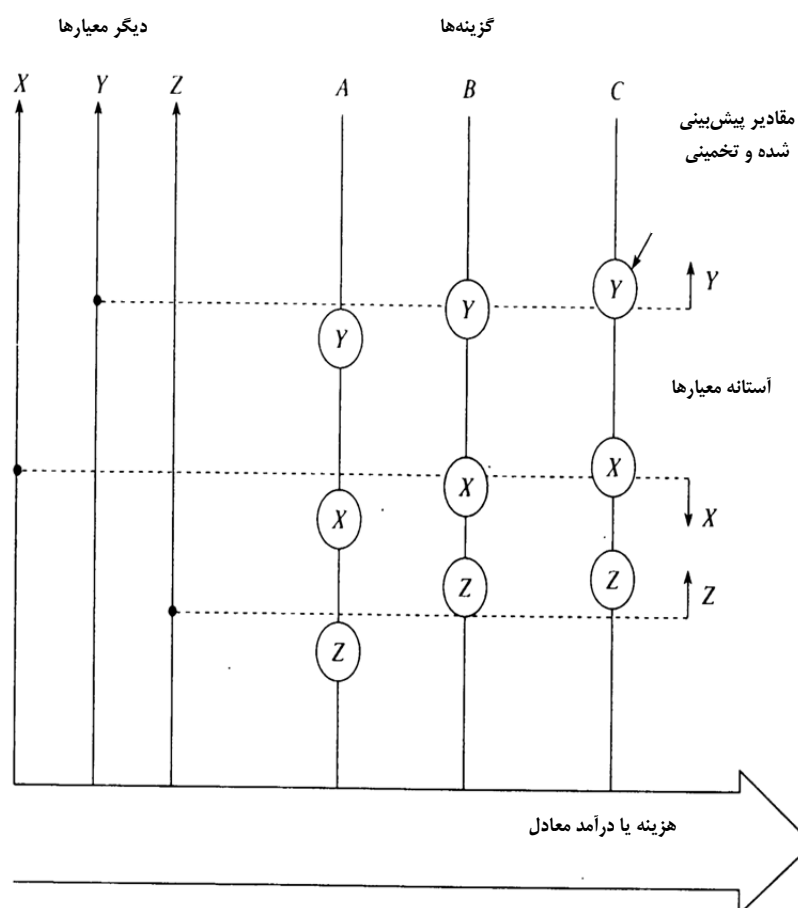
۲. **هزینه یا درآمد معادل:** محور افقی معادل کنونی، معادل آینده یا معادل سالانه هزینه یا درآمد را نشان می‌دهد. مقادیر هزینه یا درآمد روی محور برای هر گزینه نمایش داده شده، به صورت هزینه یا درآمد که از چپ به راست افزایش می‌یابد، مشخص می‌شود. به این طریق، تفاوت‌های معادل اقتصادی بین گزینه‌ها مشاهده خواهد شد.

۳. **دیگر معیارها (X,Y,Z):** محورهای عمودی در سمت چپ یک یا چند معیار را نشان می‌دهد که طبیعتی غیراقتصادی دارند. هر محور بسته به طبیعت خود مقیاس خاص خود را دارد.

۴. **آستانه دیگر معیارها:** خطوط افقی که از محورهای عمودی بیرون آمده‌اند مقادیر آستانه یا محدودکننده برای معیارهای غیراقتصادی را نشان می‌دهد (کم‌تر، مساوی یا بیش‌تر).

۵. **مقادی پیش‌بینی شده و/یا تخمین زده شده:** خروجی‌های پیش‌بینی شده برای هر گزینه (بر پایه‌ی پیش‌بینی یا تخمین) در دایره‌هایی وارد می‌شوند که بالا یا پایین حدود آستانه قرار دارد. بدین روش، تفاوت بین خروجی مطلوب و پیش‌بینی شده برای هر گزینه مشاهده می‌شود.

هزینه یا درآمد معادل از معادله ۷-۱ یا از معادلات ۷-۲ و ۷-۳ نشان داده شده روی محور افقی شکل ۷-۴، یک شاخص هدف است. هدف تصمیم‌گیری، انتخاب گزینه‌ای است که هزینه‌ی معادل کمینه یا (درآمد معادل بیشینه) داشته و همه دیگر معیارها را به حد کفایت ارضا کند.



شکل ۷-۴- نمایش ارزیابی تصمیم به صورت کلی

۷-۶- تصمیم‌گیری تحت ریسک و عدم قطعیت

یک تصمیم مشخص می‌تواند خروجی‌های زیادی را نتیجه دهد که به رخداد‌های مختلف در آینده بستگی دارد. برای مثال، یک تصمیم برای ماهیگیری، درجه بالایی از مطلوبیت را فراهم می‌کند، اگر هوا آفتابی باشد و چنانچه هوا بارانی باشد، سطح پایینی از رضایتمندی را نتیجه می‌دهد. بنابراین، برای دو حالت آفتابی و بارانی، نتیجه نهایی به گزینه‌ی انتخابی بستگی دارد.

در این قسمت، ماتریس ارزیابی تصمیم معرفی شده است تا تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن قطعیت، ریسک و عدم قطعیت را پوشش دهد. سپس هر یک از این شرایط تصمیم‌گیری به طور جدا بررسی شده و ریسک و عدم قطعیت مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۷-۶-۱- ماتریس ارزیابی تصمیم

یک ماتریس ارزیابی تصمیم یک روش رسمی برای نمایش تعامل یک مجموعه محدود از گزینه‌ها و یک مجموعه محدود از ویژگی‌های ممکن (حالات ممکن) است. در این روش، گزینه‌ها دارای تعریف ارائه شده در قسمت ۷-۱ هستند؛ یعنی برنامه‌های ممکن که تصمیم‌گیرنده می‌تواند انتخاب کند. حالت‌های ممکن معمولاً رخدادهای طبیعی مانند باران، بوران یا برف نیستند، بلکه گستره‌ی وسیعی از خروجی‌های ممکن در آینده هستند که تحت کنترل مستقیم تصمیم‌گیرنده نیست.

ماتریس ارزیابی تصمیم به صورت کلی یک مدل است که نتایج مثبت و منفی را که ممکن است برای هر گزینه‌ای در هر آینده‌ی ممکن رخ دهد، ترسیم می‌کند. شکل ۷-۵ ساختار این مدل را به صورت خلاصه و چکیده نمایش داده است. نمادهای استفاده شده در این شکل عبارت‌اند از:

$$A_i = \text{یک گزینه ممکن برای انتخاب توسط تصمیم‌گیرنده، که در آن } i = 1, 2, \dots, m$$

$$F_j = \text{یک آینده که تحت کنترل تصمیم‌گیرنده نیست، که در آن } j = 1, 2, \dots, n$$

$$P_j = \text{احتمال آن که } j \text{ امین آینده اتفاق بیافتد که در آن } j = 1, 2, \dots, n$$

$$E_{ij} = \text{شاخص ارزیابی (مثبت یا منفی) مربوط به } j \text{ امین گزینه و } i \text{ امین آینده تعیین شده در}$$

معادله ۷-۱ یا ۷-۳.

فرضیات زیادی زمینه‌ساز کاربرد مدل ماتریس ارزیابی تصمیم است تا تصمیم‌گیری در شرایط قطعیت، ریسک و عدم قطعیت انجام گیرد. مهم‌ترین آن‌ها، این پیش‌فرض است که همه‌ی

گزینه‌های ممکن در نظر گرفته شده باشد و همه آینده‌های ممکن شناسایی شده باشد. آینده‌های ممکن که شناسایی نشده باشند تاثیر قابل توجهی بر خروجی واقعی نسبت به خروجی برنامه‌ریزی شده دارد.

شاخص‌های ارزیابی در مدل ماتریسی مربوط به خروجی‌هایی هستند که می‌توانند عینی یا ذهنی باشند. رایج‌ترین آن، موردی است که در آن مقادیر خروجی عینی بوده و در نتیجه به صورت کمی توسط اعداد نمایش داده می‌شود. برای مثال نتیجه‌ی نهایی می‌تواند درآمد یا هزینه به دلار یا پوند باشد. خروجی‌های ذهنی در مقابل آن‌هایی هستند که در مقیاس ترتیبی و رتبه‌بندی ارزش‌گذاری می‌شوند. مثال‌هایی از این دست شامل ارجحیت‌هایی می‌شود مانند تصویری که به‌خوبی قابل رویت است یا تصویری که تار و مبهم است، کیفیت خوب در مقابل کیفیت پایین و غیره.

P_j F_j	P_1	P_2	$\dots$	P_n
	F_1	F_2	$\dots$	F_n
A_i				
A_1	E_{11}	E_{12}	$\dots$	E_{1n}
A_2	E_{21}	E_{22}	$\dots$	E_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
A_m	E_{m1}	E_{m2}	$\dots$	E_{mn}

شکل ۷-۵- ماتریس ارزیابی تصمیم

در زیر فرضیات مهم دیگری در نمایش ماتریس ارزیابی تصمیم‌ها ارائه شده است.

۱. رخ دادن هر یک از آینده‌ها، تاثیری در رخداد دیگر آینده‌ها ندارد (آینده‌ها به صورت زوجی مجزا هستند).

۲. اتفاق افتادن یک گزینه تحت تاثیر هیچ گزینه‌ای نیست.

۳. اتفاق افتادن یک آینده خاص به صورت قطعی نیست، با این که در تحلیل قطعی فرض می‌شود.

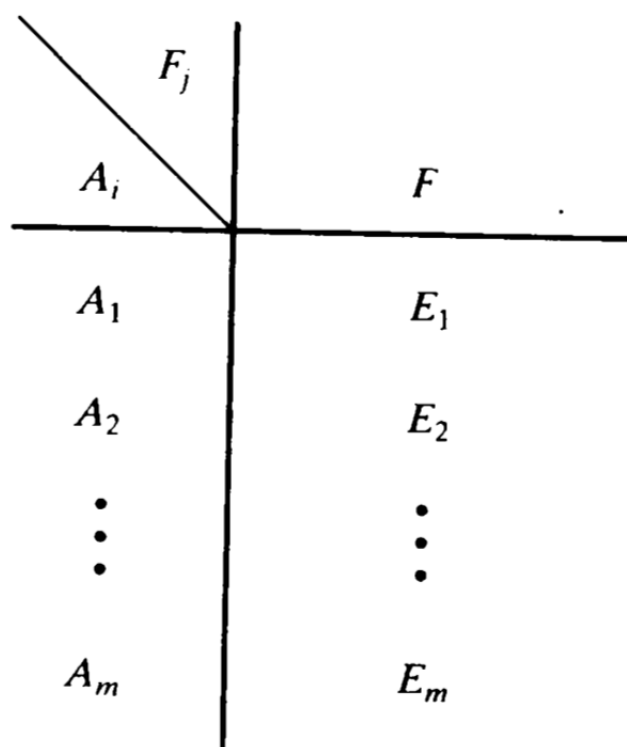
۷-۶-۲- تصمیم‌گیری در قطعیت

در مواجهه با جنبه‌های فیزیکی محیط، دانشمندان و مهندسان رشته فیزیک یک دانش نظام‌مند و قوانین فیزیکی در دست دارند که تحلیل‌ها و استنتاج‌ها را بر اساس آن‌ها انجام می‌دهند. چنین قوانینی مانند قانون بویل، قانون اهم، و قوانین نیوتن در حرکت از طریق جمع‌آوری و مقایسه موارد متعدد و با استفاده از فرایندی استنتاجی به دست آمده و توسعه داده شده است. این قوانین سپس با اطمینان بالاتری در نمونه‌های دیگر اعمال می‌شود. آن‌ها توسط مدل‌های متعدد پدیده‌های فیزیکی پشتیبانی می‌شوند که در نتیجه آن، نتیجه‌گیری‌های در مورد محیط فیزیکی صورت می‌گیرد که با واقعیت تفاوت اندکی دارد. در مورد محیط فیزیکی دانش وسیعی وجود دارد.

در مورد محیطی که تصمیم‌های عملیاتی در آن گرفته می‌شود، دانش بسیار کم‌تری وجود دارد. با وجود این، هدف اصلی تحقیق در عملیات و علم مدیریت، ایجاد یک رویکرد علمی است تا بهترین راه‌حل‌های ممکن و نزدیک به واقعیت فراهم شود. این کار با ساده‌سازی مفهومی و مدل‌سازی واقعیت انجام می‌شود که رایج‌ترین آن‌ها، فرض تنها یک آینده شناخته شده است. ادعا نمی‌شود که در مورد آینده آگاهی وجود دارد. بیش‌تر مواقع صرف‌نظر کردن از ریسک و

عدم قطعیت یک راه ساده‌سازی واقعیت است تا یک دید علمی نسبت به مساله ایجاد کند. چنین دیدی کمک بزرگی به تصمیم‌گیری می‌کند، در حالی که نقایص و کمبودهای شناخته شده است.

ماتریس ارزیابی برای تصمیم‌گیری در حالت قطعیت در حقیقت یک ماتریس نیست، بلکه یک بردار است که به تعداد گزینه‌ها، در آن ارزیابی صورت می‌گیرد و خروجی آن شامل یک ستون است. این بردار تصمیم یک حالت خاص از ماتریس شکل ۷-۵ است. این بردار در شکل ۷-۶ همراه با نتیجه نهایی آن که به صورت E_i نشان داده شده است، به تصویر کشیده شده است. یک آینده‌ی حتمی برای هر گزینه دارای احتمال یک در ماتریس است. همه‌ی آینده‌های دیگر صرف‌نظر شده و احتمالی برابر صفر دارند ($p = 0.0$).



شکل ۷-۶- بردار ارزیابی تصمیم

هنگامی که خروجی‌ها، E_i به صورت پولی (هزینه یا درآمد) بیان می‌شود، قانون تصمیم‌گیری در انتخاب ساده است. اگر گزینه‌ها نسبت به یکدیگر برابر باشند، گزینه‌ای انتخاب می‌شود که هزینه را حداقل یا درآمد را حداکثر کند.

در حالت هزینه، گزینه‌ای انتخاب می‌شود که

$$\min_i \{E_i\} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m$$

برای حالت درآمد، گزینه‌ای انتخاب می‌شود که

$$\max_i \{E_i\} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m$$

اغلب قبول این فرض که تنها هزینه یا درآمد مهم است، ممکن نیست. فاکتورهای غیرپولی که قابل کمی کردن نیستند ممکن است آن قدر مهم باشند که اختلاف بین هزینه‌ها یا درآمدهای گزینه‌ها را از دور خارج کند. در موارد دیگر، خروجی در قالب معیارهای پولی یا حتی به صورت کمی قابل بیان نیست، مانند زمان، درصد بازار، و غیره. مقایسه‌ی معتبر کیفی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که خروجی‌های کمی به تنهایی نتوانند منجر به تصمیم شده و خروجی‌ها غیرکمی باشند.

۷-۶-۳- تصمیم‌گیری تحت ریسک

اغلب اطمینان اندکی به این موضوع وجود دارد که آینده‌های پیش‌بینی شده مطابق آینده واقعی باشد. عناصر کمی و فیزیکی که یک گزینه به آن بستگی دارد با مقادیر پیش‌بینی شده مغایر است. نه تنها تخمین هزینه‌های آینده مشکل است، بلکه پیش‌بینی آینده و اتفاقات ممکن تنها با درجه محدودی از اطمینان حاصل می‌شود. این عدم قطعیت در مورد آینده، تصمیم‌گیری را برای فرد، صنعت و دولت با چالش مواجه می‌کند.

تصمیم‌گیری در حالت عدم قطعیت هنگامی رخ می‌دهد که تصمیم‌گیرنده در مورد آینده از چیزی صرف‌نظر نمی‌کند، بلکه از طریق تخصیص احتمال به اتفاقات ممکن آن را به صورت صریح مطرح می‌کند. چنین احتمالاتی می‌تواند بر پایه‌ی شواهد تجربی، نظر خبره، قضاوت ذهنی، یا ترکیبی از آن‌ها باشد.

مثال زیر را در نظر بگیرید. یک شرکت سیستم‌های رایانه‌ای این فرصت را دارد که در مناقصه دو قرارداد تبلیغات شهری شرکت کند. اولی مربوط به انتخاب و نصب سخت‌افزار و نرم‌افزار برای یک تسهیل رایانه‌ای مرکزی است. دومی شامل توسعه‌ی یک شبکه رایانه‌ای است که در آن سخت‌افزار و نرم‌افزار مناسب باید انتخاب و نصب شود. شرکت ممکن است هر کدام از قراردادهای C_1 یا C_2 یا هر دوی آن‌ها را برنده شود. بنابراین سه آینده ممکن برای شرکت وجود دارد.

در نظر گرفتن محتاطانه رویکردهای ممکن منجر به شناسایی ۵ گزینه می‌شود. اول آن که شرکت خود انتخاب و نصب نرم‌افزار را به پیمانکار سپرده و نرم‌افزار را توسعه دهد. دوم این که نرم‌افزار را به پیمانکار داده و خود سخت‌افزار را انتخاب و نصب کند. سوم آن که شرکت هر دوی نرم‌افزار و سخت‌افزار را انتخاب و نصب کند. چهارم این که شرکت با همکاری یک شرکت دیگر هر دو پروژه سخت‌افزار و نرم‌افزار را به عهده گیرد. آخرین گزینه این است که شرکت هر دو پروژه‌ی سخت‌افزار و نرم‌افزار را به پیمانکار سپرده و فقط به عنوان مدیر پروژه عمل کند.

با در دست داشتن آینده‌های ممکن و گزینه‌های مختلف شناسایی شده، گام بعدی تعیین مقادیر نتیجه‌ی نهایی هر کدام از انتخاب‌های ممکن است. همچنین احتمالات مربوط به هر یک از سه آینده که در آن مجموع احتمالات برابر با یک می‌شود، باید تعیین گردد. فرض کنید که تعیین این موارد منجر به درآمدها و احتمالات ارائه شده در جدول ۷-۷ شده است.

جدول ۷-۷- ماتریس ارزیابی تصمیم (درآمد به هزار دلار)

احتمال	0.3	0.2	0.5
آینده	C_1	C_2	$C_1 + C_2$
A_1	100	100	400
A_2	-200	150	600
گزینه A_3	0	200	500
A_4	100	300	200
A_5	-400	100	200

جدول ۷-۷ براساس قالب مدل ماتریس ارزیابی تصمیم ساخته می‌شود که در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که شرکت یک درآمد ۱۰۰۰۰۰ دلار را در صورت انتخاب گزینه A_1 و برنده شدن قرارداد C_1 پیش‌بینی کرده است. حال آن‌که اگر هر دو قرارداد را برنده شود، درآمد پیش‌بینی شده ۴۰۰۰۰۰ دلار خواهد بود. اطلاعات مشابه دیگری در جدول قابل بازیابی است.

پیش از آن‌که به مرحله‌ی اعمال معیارها برای هر گزینه وارد شویم، ماتریس ارزیابی تصمیم باید مورد بررسی قرار گیرد تا گزینه‌های غالب و مغلوب مشخص شوند. گزینه‌هایی که صراحتاً ارجح نیستند، بدون توجه به آینده‌ای که اتفاق می‌افتد، می‌تواند از ارزیابی خارج شود. اگر خروجی‌های گزینه x در همه‌ی آینده‌های ممکن، بهتر از خروجی‌های گزینه y باشد، گزینه x نسبت به گزینه y غالب است و y را می‌توان حذف کرد. شرکت سیستم‌های رایانه‌ای که با ماتریس جدول ۷-۷ مواجه است، می‌تواند گزینه A_5 را حذف کند زیرا همه گزینه‌های دیگر نسبت به آن غالب هستند. این به بدان معنا است که گزینه‌ای که در آن، شرکت فقط پروژه‌ها را مدیریت کند در همه حالت‌ها از گزینه‌های دیگر بدتر است. بنابراین جدول ۷-۷ به جدول ۸-۷

کاهش می‌یابد. معیارهای تصمیم‌گیری که در قسمت‌های بعدی ارائه شده است مورد استفاده قرار می‌گیرند تا به انتخاب یکی از گزینه‌های $A_1 - A_4$ کمک کنند.

جدول ۷-۸- ماتریس کاهش یافته ارزیابی تصمیم (مقادیر به هزار دلار)

احتمال		0.3	0.2	0.5
آینده		C_1	C_2	$C_1 + C_2$
گزینه	A_1	100	100	400
	A_2	-200	150	600
	A_3	0	200	500
	A_4	100	300	200

معیار سطح آرمانی. تشکیل سطوح آرمانی در برخی تصمیم‌گیری‌های شخصی و حرفه‌ای دیده می‌شود. یک سطح آرمانی، سطح مطلوبی از دست‌یابی به یک هدف مانند درآمد است یا یک سطح از غیرمطلوب است که از آن دوری می‌شود مانند ضرر. در تصمیم‌گیری تحت ریسک، معیار سطح آرمانی شامل انتخاب سطحی از دست‌یابی به یک هدف است که باید برآورده شود و پیرو آن، گزینه‌ای که احتمال دست‌یابی به این سطح آرمانی را بیشینه می‌کند، انتخاب می‌شود.

شرکت سیستم‌های رایانه‌ای اکنون با انتخاب یکی از گزینه‌های $A_1 - A_4$ که در جدول ۷-۸ نشان داده شده است، مواجه است. تحت معیار سطح آرمانی، مدیریت باید یک سطح آرمانی کمینه برای درآمد و یک سطح آرمانی بیشینه برای هزینه انتخاب کند. فرض کنید سطح درآمد باید حداقل ۴۰۰۰۰۰ دلار بوده و هزینه بیش‌تر از ۱۰۰۰۰۰ دلار نشود. با این سطوح آرمانی، گزینه‌های $A_1 - A_3$ از نظر درآمد دارای صلاحیت هستند، اما گزینه‌ی A_2 سطح آرمانی هزینه را

برآورده نمی‌کند و باید حذف شود. اکنون انتخاب به دو گزینه A_1 و A_3 باید با دیگر معیارها سنجیده شود، هر چند که هر دو سطح آرمانی را ارضا می‌کند.

معیار محتمل‌ترین آینده. گرایش انسان به تمرکز بر محتمل‌ترین خروجی از میان رخدادهای ممکن است. این رویکرد در تصمیم‌گیری پیشنهاد می‌شود، بدین صورت که همه‌ی آینده‌های محتمل غیر از محتمل‌ترین آن‌ها حذف شوند. اگرچه تا حدی شبیه به تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت است، این معیار هنگامی که محتمل‌ترین آینده دارای احتمال نسبتاً بالایی بوده و تا حدودی غالب است، به خوبی عمل می‌کند.

با استفاده از معیار محتمل‌ترین آینده، شرکت سیستم‌های رایانه‌ای فرایند انتخاب خود از میان چهار گزینه را بر آینده‌ی $C_1 + C_2$ متمرکز می‌کند (بردن هر دو مناقصه). این موضوع به علت احتمال اتفاق افتادن این آینده یعنی 0.5 می‌باشد. در این رویکرد گزینه A_2 انتخاب می‌شود. می‌توان از معیار محتمل‌ترین آینده برای انتخاب بین دو گزینه A_1 و A_3 استفاده کرد. در نتیجه گزینه A_3 انتخاب خواهد شد.

معیار ارزش انتظاری. بسیاری از تصمیم‌گیرندگان تلاش می‌کنند تا گزینه‌ای انتخاب شود که سود انتظاری را بیشینه یا هزینه انتظاری را کمینه کند. این موضوع به سادگی در شرایط تکرار شونده که در آن‌ها تصمیم‌پی در پی گرفته شده و اطمینان از محاسبه‌ی خروجی مورد انتظار افزایش می‌یابد، قابل توجیه است. این معیار تنها زمانی با احتیاط مورد استفاده قرار می‌گیرد که عواقب نهایی از خروجی‌های ممکن به طرز غیرمتناسبی بزرگ بوده و در نتیجه نتایج خروجی مورد انتظار با انحرافات قابل توجهی مواجه شود.

محاسبه ارزش انتظاری نیازمندی وزن‌دهی همه‌ی نتایج توسط احتمال وقوع آن‌هاست. سپس این اوزان برای همه‌ی آینده‌های محتمل جمع می‌شود. برای شرکت سیستم‌های رایانه‌ای، درآمد انتظاری گزینه‌های $A_1 - A_4$ به صورت زیر محاسبه می‌شود (مقادیر به هزار دلار):

$$A_1: \$100(0.3) + \$100(0.2) + \$400(0.5) = \$250$$

$$A_2: -\$200(0.3) + \$150(0.2) + \$600(0.5) = \$270$$

$$A_3: \$0(0.3) + \$200(0.2) + \$500(0.5) = \$290$$

$$A_4: \$100(0.3) + \$300(0.2) + \$200(0.5) = \$190$$

با انجام این تحلیل، گزینه A_3 انتخاب خواهد شد. بدیهی است که در انتخاب بین گزینه‌های A_1 و A_3 نیز گزینه A_3 انتخاب خواهد شد.

مقایسه نتایج. واضح است که هیچ انتخاب بهتری وجود ندارد که از طریق همه معیارهای تصمیم‌گیری در شرایط ریسک حاصل شود. تصمیم گرفته شده، به معیار انتخاب شده توسط تصمیم‌گیرنده بستگی دارد.

برای مثال ارائه شده در این قسمت، گزینه‌های انتخاب شده نسبت به هر یک از گزینه‌ها به صورت زیر است

معیار سطح آرمانی: A_1 یا A_3

معیار محتمل‌ترین آینده: A_2

معیار ارزش انتظاری: A_1

اگر از دو معیار آخر برای به دست آوردن یک گزینه بین A_1 و A_3 که از معیار سطح آرمانی به دست آمده استفاده شود، آنگاه گزینه A_3 دوبار و گزینه A_2 یکبار انتخاب شده‌اند. با توجه به این موضوعات، گزینه A_3 می‌تواند به عنوان بهترین گزینه در هر سه معیار معرفی شود.

۷-۶-۴- تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت

در برخی از شرایط ممکن است نتوان احتمالات مربوط به هر یک از آینده‌ها را شناسایی کرد. اغلب داده‌های معنادار در دسترس نیست تا این احتمالات به‌دست آیند. در موارد دیگر، تصمیم‌گیرنده ممکن است مایل به تخصیص یک احتمال ذهنی نباشد، مخصوصاً زمانی که ثابت شود آینده نامطلوب است. هنگامی که احتمالات برای تخصیص به رخدادهای آینده در دسترس نباشد، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت خواهد بود.

همان‌طور که در تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت و تحت ریسک مقایسه شد، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت دارای شرایط انتزاعی‌تری است. در این قسمت، معیارهای انتخاب مختلفی برای مثال جدول ۷-۷ اعمال می‌شود تا رویکردهای رسمی در دسترس را بررسی کنیم.

معیار لاپلاس. فرض کنید که شرکت سیستم‌های رایانه‌ای تمایلی به ارزیابی آینده‌ها در قالب احتمالات ندارد. مخصوصاً این که شرکت نمی‌خواهد بین احتمال بردن هریک از قراردادهای یا بردن هر دوی آن‌ها تمایزی قایل شود. در غیاب احتمالات، ممکن است این‌طور فرض شود که هر یک از آینده‌ها با احتمال برابر به‌وقوع پیوندند. پایه و اساس این فرضیه بر این است که هیچ دلیل و برهانی در مورد این که یک مورد محتمل‌تر از دیگری است، وجود ندارد. این فرضیه، اصل برهانی در مورد این که یک مورد محتمل‌تر از دیگری است، وجود ندارد. این فرضیه، اصل لاپلاس یا اصل برهان غیرکافی نام دارد و بر این فلسفه استوار است که طبیعت، بی‌تفاوت است.

تحت اصل لاپلاس، احتمال اتفاق افتادن هرآینده برابر با $\frac{1}{n}$ است که در آن n تعداد آینده‌های ممکن است. برای انتخاب بهترین گزینه، باید میانگین حسابی هر کدام محاسبه شود. برای ماتریس تصمیم جدول ۷-۸، این کار به‌صورتی انجام می‌شود که در جدول ۷-۹ نشان داده شده است. گزینه A_3 دارای بیش‌ترین درآمد برابر با ۲۳۳۰۰۰ دلار است و انتخاب می‌شود.

جدول ۷-۹- محاسبه میانگین حسابی

میانگین	گزینه
$(100+100+400) \div 3 = 200$	A_1
$(-200+150+600) \div 3 = 183$	A_2
$(0+200+500) \div 3 = 233$	A_3
$(100+300+200) \div 3 = 200$	A_4

معیارهای Maximin و Maximax. دو قانون ساده هستند که برای تصمیم‌گیری در مواجهه با عدم قطعیت به کار می‌روند. مورد اول قانون maximin است که بر پایه یک نگاه کاملاً بدبینانه به خروجی‌ها قرار دارد. استفاده از این قانون وقتی توجیه می‌شود که طبیعت را بدین صورت قضاوت کنیم که به بدترین نحو عمل خواهد کرد. مورد دوم maximax است که بر پایه یک نگاه کاملاً خوشبینانه به خروجی‌ها قرار دارد. استفاده از این قانون وقتی توجیه می‌شود که طبیعت را بدین صورت قضاوت کنیم که به بهترین نحو عمل خواهد کرد.

به خاطر بدبینانه بودن قانون maximin، این قانون منجر به انتخاب گزینه‌ای می‌شود تا اطمینان حاصل کند که بهترین خروجی از بین بدترین گزینه‌ی ممکن، انتخاب می‌شود. اگر E_{ij} استفاده شود تا نتیجه گزینه i در حالت j را نشان دهد، محاسبات موردنیاز به صورت زیر خواهد بود

$$\max_i \left\{ \min_j E_{ij} \right\}$$

جدول ۷-۱۰- درآمد توسط قانون maximin (مقادیر به هزار دلار)

گزینه	$\min_j E_{ij} (\$)$
A_1	100
A_2	-200
A_3	0
A_4	100

فرض کنید که شرایط تصمیم توسط ماتریس جدول ۷-۸ بیان شده است. استفاده از قانون maximin نیازمند آن است که حداقل ارزش هر سطر انتخاب شود. سپس بیش‌ترین مقدار از این مقادیر شناسایی شده و گزینه‌ی مربوط به دست می‌آید. این رویه در جدول ۷-۱۰ نشان داده شده است. انتخاب هر کدام از گزینه‌های A_1 و A_4 تضمین می‌کند که شرکت حداقل ۱۰۰۰۰۰ دلار در آمد داشته باشد بدون توجه به اینکه چه آینده‌ای رخ می‌دهد.

خوش‌بینی قانون maximax کاملاً در تضاد با قانون maximin است. با استفاده از این قانون، گزینه‌ای انتخاب می‌شود که بهترین خروجی ممکن را دارد. مانند قانون قبل، E_{ij} استفاده می‌شود تا نتیجه گزینه i در حالت j را نشان دهد، در نتیجه محاسبات مورد نیاز به صورت زیر خواهد بود

$$\max_i \left\{ \max_j E_{ij} \right\}$$

شرایط تصمیم‌گیری در جدول ۷-۸ را باز هم در نظر بگیرید. استفاده از قانون maximax نیازمند آن است که ارزش بیشینه در هر سطر انتخاب شود. سپس بیش‌ترین مقدار شناسایی شده

و گزینه‌ی مربوطه انتخاب می‌شود. این رویه در جدول ۷-۱۱ نشان داده شده است. در نتیجه گزینه A_2 انتخاب می‌شود. بنابراین، تصمیم‌گیرنده درآمدی معادل ۶۰۰۰۰۰ دلار را به دست می‌آورد، اگر آینده با او یار باشد.

جدول ۷-۱۱- درآمد توسط قانون maximax (مقادیر به هزار دلار)

گزینه	$\min_j E_{ij} (\$)$
A_1	400
A_2	600
A_3	500
A_4	300

تصمیم‌گیرنده‌ای که قانون maximin را انتخاب می‌کند تنها بدترین اتفاق ممکن را برای گزینه‌ها در نظر می‌گیرد و گزینه‌ای را انتخاب می‌کند که از بین بدترین نتیجه‌های ممکن، بهترین باشد. در مثال فوق، هنگامی که گزینه A_1 انتخاب می‌شود، شرکت مطمئناً ۱۰۰۰۰۰ دلار درآمد خواهد داشت اما حداکثر ۴۰۰۰۰۰ دلار سود خواهد کرد. یا اگر گزینه A_4 انتخاب شود شرکت درآمدی بالاتر از ۳۰۰۰۰۰ دلار نخواهد داشت. در مقابل، شرکتی که قانون maximax را انتخاب می‌کند، خوشبین است و تصمیم می‌گیرد که تنها گزینه‌ای که بیش‌ترین درآمد را به دست می‌دهد، انتخاب کند. براین اساس، در مثال فوق با این قانون گزینه A_2 انتخاب می‌شود که در آن، این امکان وجود دارد که شرکت متحمل هزینه ۲۰۰۰۰۰ دلاری شود.

۷-۶-۵- معیار Hurwicz

از آنجا که قوانین تصمیم‌گیری قبلی حدی هستند، بسیاری از تصمیم‌گیرندگان از آن اجتناب می‌کنند. اکثر افراد دارای درجه‌ای از خوش‌بینی یا بدبینی هستند، چیزی بین حدود نهایی آن‌ها.

رویکرد سوم تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت شامل یک اندیس از خوش‌بینی و بدبینی نسبی است. این رویکرد قانون Hurwicz نام دارد.

یک موازنه بین خوش‌بینی و بدبینی در قانون Hurwicz وجود دارد که در آن به تصمیم‌گیرنده اجازه داده می‌شود تا یک اندیس خوش‌بینی، α ، بین صفر و یک انتخاب شود. اگر این مقدار برابر صفر باشد، تصمیم‌گیرنده کاملاً بدبین و اگر برابر با یک انتخاب شود کاملاً خوشبین است. پس از انتخاب α ، قانون Hurwicz نیازمند محاسبات زیر است

$$\max_i \left\{ \alpha \left[\max_j E_{ij} \right] + (1 - \alpha) \left[\min_j E_{ij} \right] \right\}$$

که در آن E_{ij} نتیجه گزینه i در آینده j است.

به عنوان مثالی از قانون Hurwicz، فرض کنید در ماتریس جدول ۷-۸ مقدار α برابر با ۰.۲ باشد. محاسبات مورد نیاز در جدول ۷-۱۲ نشان داده شده و گزینه A_1 توسط شرکت انتخاب می‌شود.

جدول ۷-۱۲ - درآمد به دست آمده با قانون Hurwicz

گزینه	$\min_j E_{ij} (\$)$
A_1	$0.2(400) + 0.8(100) = 160$
A_2	$0.2(600) + 0.8(-200) = -40$
A_3	$0.2(500) + 0.8(0) = 100$
A_4	$0.2(300) + 0.8(100) = 140$

چنانچه به صورت گرافیکی مقادیر هر گزینه به ازای تمامی مقادیر α نمایش داده شود، دید بهتری در مورد قانون Hurwicz به دست می آید. بدین طریق مشخص می شود به ازای هر یک از مقادیر α کدام یک از گزینه ها انتخاب می شود. چنین گرافی در شکل ۷-۷ دیده می شود. مشاهده می شود که گزینه A_1 بیشترین درآمد مورد انتظار را وقتی $\alpha \leq \frac{1}{2}$ خواهد داشت. هنگامی که $\frac{1}{2} \leq \alpha \leq \frac{2}{3}$ باشد A_3 بهترین گزینه خواهد بود و گزینه A_2 در صورتی که $\frac{2}{3} \leq \alpha \leq 1$ باشد بیشترین درآمد انتظاری را خواهد داشت. گزینه A_4 در هیچ یک از مقادیر α بهترین گزینه نخواهد بود به جز وقتی که $\alpha = 0$ است که در آن حالت به خوبی گزینه A_1 خواهد بود.

هنگامی $\alpha = 0$ قانون Hurwicz نتایجی مشابه قانون maximin دارد و هنگامی که $\alpha = 1$ باشد قانون Hurwicz همان قانون maximax خواهد بود. این موضوع به صورت ریاضی می تواند نشان داده شود. هنگامی که $\alpha = 0$ آنگاه

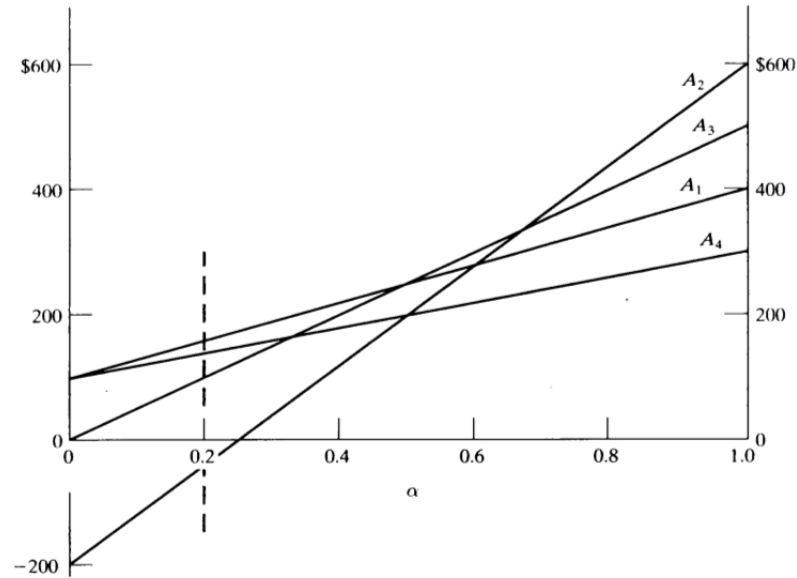
$$\max_i \left\{ 0 \left[\max_j E_{ij} \right] + (1-0) \left[\min_j E_{ij} \right] \right\} = \max_i \left[\min_j E_{ij} \right]$$

هنگامی که $\alpha = 1$ آنگاه

$$\max_i \left\{ 1 \left[\max_j E_{ij} \right] + (1-1) \left[\min_j E_{ij} \right] \right\} = \max_i \left[\max_j E_{ij} \right]$$

بنابراین قوانین maximax و maximin حالت های خاص قانون Hurwicz هستند.

فلسفه پشت قانون Hurwicz این است که تمرکز بر خروجی های یا عواقب در حالت حدی تصمیم های را محدود می کند. با استفاده از این قانون، تصمیم گیرنده می تواند وزن حدود را با توجه به اهمیت نسبی آن ها مشخص کند.



شکل ۷-۷- مقادیر قانون Hurwicz برای چهار گزینه مدنظر

مقایسه‌ی تصمیم‌ها. مانند حالتی که برای تصمیم‌گیری چند معیاره تحت ریسک برای مثال نظر بررسی شد، بدیهی است که معیار برتری برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت وجود ندارد. تصمیم گرفته شده به معیار تصمیم‌گیری انتخاب شده توسط تصمیم‌گیرنده بستگی دارد. در مثال فوق، گزینه‌های انتخاب شده توسط معیارهای مختلف به صورت زیر هستند

معیار لاپلاس: A_3

معیار maximin: A_1, A_4

معیار maximax: A_2

معیار Hurwicz: A_1

با بررسی گزینه‌های پیشنهادی مشخص می‌شود که هر یک ارزش خود را دارند. فاکتورهای متعددی وجود دارند که می‌توانند انتخاب یک قانون توسط تصمیم‌گیرنده را تحت‌تاثیر قرار دهند. طرز برخورد تصمیم‌گیرنده با عدم قطعیت (خوش‌بینانه یا بدبینانه) و تابع مطلوبیت شخصی او بسیار موثرند. بنابراین، انتخاب یک قانون تصمیم‌گیری در یک شرایط تصمیم‌گیری خاص باید بر پایه قضاوت‌های ذهنی باشد.

۷-۷- خلاصه فصل

تاخیر در توسعه‌ی مدل‌ها برای تفسیر و تصمیم‌گیری در مورد سیستم‌ها، ممکن است مربوط به مشغولیت در علوم فیزیکی و زیستی باشد. این موضوع قابل درک است، زیرا در طی تاریخ، فاکتورهای محدودکننده‌ی ارضای خواسته‌های انسان، فیزیکی و بیولوژیکی بوده است. اما با رشد دانش عملی، انسان توانسته است سیستم‌های پیچیده‌ای طراحی کند که نیازهایش را برآورده کند. قسمت اصلی این فصل، مدل‌سازی و مدل‌های تصمیم است، همراه با درک کامل این موضوع که مدل‌ها در خود تمام نمی‌شوند. مدل‌هایی که برای تحلیل سیستم و ارزیابی طراحی‌های سیستم ایجاد شده‌اند، گزینه‌ها را به صورت ورودی دریافت کرده و خروجی آن‌ها تصمیم‌های آگاهانه خواهد بود. به عبارت دیگر، مدل‌ها برای تصمیم‌گیری در مهندسی سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تنها بخش محدودی از این موضوع مهم در این فصل قابل بررسی بود. بر این اساس، دو منبع برای مطالعه بیش‌تر در این زمینه‌ها پیشنهاد می‌شود:

1. Systems Analysis and Modeling: A Macro-Micro Approach with Multidisciplinary Applications, by D.W. Boyd. Academic Press, 2001
2. Modeling and Indirect Experimentation in System Design Evaluation, by W.J. Fabrycky. Inaugural Issue of Systems Engineering, Vol. 1, No. 1, 1994.

تئوری ارزیابی تصمیم به‌عنوان یک ساختار مدلی برای تصمیم‌گیری در حالت چند گزینه و چند معیار معرفی گردید. این تئوری برپایه اقتصاد مهندسی و تحقیق در عملیات قرار دارد که دو بدنه‌ی دانش نظام‌مند پیشرفته هستند. این بدنه‌های دانش در فرایند مهندسی سیستم‌ها مفید واقع گشته‌اند. در ارتباط با این موضوع، بالارزش‌ترین الگو، رویکرد پارامتر وابسته به طراحی در تابع ارزیابی تصمیم است. پس از آن، نمایش ارزیابی تصمیم به‌صورت گرافیکی به‌طور مفهومی ارائه شد که روشی برای بررسی چند معیار را پیشنهاد می‌دهد. این روش نمایشی منجر به انتخاب یک گزینه ارجح نمی‌شود، بلکه وزن‌دهی و موازنه را به تصمیم‌گیرنده واگذار می‌کند. این تکنیک فرض می‌کند که تصمیم‌گیرنده یا گروه تصمیم‌گیری از طریق ارزیابی ذهنی، موازنه‌ی موردنیاز را انجام می‌دهد. موازنه‌ی رسمی‌تر بین هزینه چرخه‌ی عمر و شاخص‌های اثربخشی نیازمند استفاده از توابع ارجحیت و تئوری مطلوبیت است. این موضوع در این فصل مورد بررسی قرار نگرفت اما خواننده‌ی مشتاق می‌تواند به این منبع مراجعه کند:

Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs, by R.L. Kenney and H.Raiffa, John Wiley and Sons, Inc., 1976.

این فصل با بحثی به انتها می‌رسد که ترکیبی از تصمیم‌گیری در حالت‌های قطعیت، ریسک و عدم قطعیت را ارائه داده که بر پایه ماتریس ارزیابی تصمیم قرار دارند. اغلب یک آینده‌ی قطعی فرض می‌شود، اما این موضوع به ندرت اتفاق می‌افتد. براین اساس، ریسک اغلب با استفاده از مقادیر احتمالی و تعدادی از روش‌های انتخاب مورد بررسی قرار می‌گیرد. تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت نیز از طریق قوانین انتخاب کردن بررسی می‌شود، اما در این مورد از مقادیر احتمالی استفاده نمی‌شود. انتخاب روش رسمی مناسب برای یک شرایط تصمیم‌گیری خاص به طبیعت تصمیم و ترجیح تصمیم‌گیرنده بستگی دارد. هیچ قانون یا خطوط راهنمای مشخص وجود ندارد که

برای همه موارد استفاده می‌شود. با این حال، این موضوع عموماً مقبول است که از روش‌ها و تکنیک‌های ساختار یافته استفاده شود که حذف گزینه‌ها و دیگر فاکتورهای مهم را به حداقل برساند. در دنیای واقعی، معیارها متعدد بوده و واقعیت‌های زیادی از نظر دور می‌مانند. حتی با داشتن روش‌هایی برای مواجهه با مسائلی که چند گزینه و چند معیار را پشتیبانی می‌کنند، موارد زیادی وجود دارند که نمی‌توان گزینه‌ها را در قالب عبارات کمی دقیق کاملاً رتبه‌بندی کرد. بنابراین، انتخاب باید بر پایه قضاوت یک یا چند نفر انجام شود. کمک مهم تحلیل تصمیم، مرتب کردن حقایق است تا بتوان با استدلال به نتیجه منطقی رسید. با این روش، قضاوت را برای موقعیت‌هایی که دانش عینی وجود ندارد نگه می‌داریم. هر چه که نامیده شود، نمی‌توان از کنار این موضوع گذشت که قضاوت همیشه باید گام آخر در رسیدن به یک تصمیم در مورد آینده باشد. راه دیگری وجود ندارد. به نظر می‌آید که توانمندی افراد مختلف در دست‌یابی به یک نتیجه مناسب هنگامی که برخی حقایق در مورد یک وضعیت ناپیدا است، کاملاً متفاوت است. افرادی که می‌توانند قضاوت‌های درستی در این شرایط انجام دهند افرادی با استعداد بالایی هستند. با این حال هرچقدر هم که ادراک، استعداد و قضاوت در برخی شرایط اثربخش باشد، این نوع طرز تفکر باید برای زمانی که حقایق موردنیاز برای یک تصمیم وجود ندارد، کنار گذاشته شود.

پس از آنکه همه داده‌هایی که می‌توان برای تصمیم‌گیری در یک شرایط خاص مورد استفاده قرار گیرد در نظر گرفته شد، عدم قطعیت در برخی از حوزه‌ها ممکن است باقی بماند. اگر تصمیمی باید گرفته شود، باید از این حوزه‌های عدم قطعیت از طریق شناخت و ارزیابی ناشناخته‌ها عبور کرد. برخی این نوع ارزیابی را بصیرت خوانده و برخی آن را قضاوت یا حس ششم می‌نامند. در هر رخدادی، تصمیم‌گیرنده باید تا نقطه تصمیم‌گیری نقش خود را بازی کرده و برای اینکار از کمک مدل‌ها و شبیه‌سازی (آزمایش غیرمستقیم) که در این فصل معرفی شد استفاده کند.

سوالات و مسائل

۱. یک گزینه کامل و متقن به ندرت در انتها پدیدار می‌شود. توضیح دهید.
۲. آیا تصمیم‌گیری باید به‌عنوان هنر دسته‌بندی شود یا علم؟
۳. فاکتورهای راهبردی و محدودکننده را مقایسه کنید.
۴. معانی متفاوت کلمه مدل را مورد بحث قرار دهید.
۵. به طور خلاصه مدل‌های فیزیکی، مدل‌های شماتیک و مدل‌های ریاضی را توضیح دهید.
۶. مدل‌های ریاضی که در شرایط تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرند، چه فرقی با مدل‌های ریاضی در علوم فیزیکی دارند؟
۷. آزمایش مستقیم و غیرمستقیم را مقایسه کنید.
۸. تابع کلی ارزیابی تصمیم برای مدل‌سازی جریان پول را بنویسید و نمادهای آن را تعریف کنید.
۹. یک شرایط تصمیم را مشخص کرده و متغیرهای تحت کنترل تصمیم‌گیرنده و آن‌هایی را که به‌طورمستقیم تحت کنترل او نیستند، مشخص کنید.
۱۰. شباهت‌ها و تفاوت‌های توابع بهینه‌سازی اقتصادی را که در معادلات ۲-۷ و ۳-۷ معرفی شدند، مقایسه کنید. (شکل ۲-۷).
۱۱. چرا نمی‌توان یک مدل فرمول‌بندی کرد که واقعیت را دقیقاً نمایش دهد.
۱۲. تحت چه شرایطی ممکن است یک مدل که به‌خوبی مدل شده است برای تصمیم‌گیری بی‌فایده باشد؟
۱۳. طبیعت اجزای هزینه را که باید مدنظر تصمیم‌گیری باشد، برای این که تا چه حد باید محیط پویا را بررسی کرد، توضیح دهید.

۱۴. در استفاده از مدل‌ها باید مراقب چه چیزی بود؟
۱۵. در مورد دلایل مشخص و متعددی مبنی بر این که چرا مدل‌ها در تصمیم‌گیری با ارزش هستند، بحث کنید.
۱۶. یک شرایط تصمیم‌گیری چند معیاره را که تجربه کرده‌اید، شناسایی کنید. سه تا پنج مورد از مهم‌ترین معیارها را انتخاب کنید.
۱۷. بحث کنید که تا چه حد فکر می‌کنید که معیارهای انتخابی شما در سوال ۱۶ مستقل هستند. هر معیار را وزن داده و این اوزان را نرمال کنید تا مجموع درصد آن‌ها برابر ۱۰۰ شود. از روش مقایسه‌ی زوجی استفاده کنید تا معیارها را به ترتیب اهمیت رتبه‌بندی کنید.
۱۸. جواب سوال ۱۶ را گسترش دهید تا دو یا سه گزینه را شامل شود. ارزیابی کنید هر گزینه نسبت به هر معیار در مقیاس ۱ تا ۱۰ چقدر خوب است. سپس حاصلضرب این نرخ‌ها در اوزان معیارها را به‌دست آورده و ارزیابی وزنی هر معیار را با جمع مناسب آن‌ها به‌دست آورید.
۱۹. مقادیر سه گزینه در مقابل چهار معیار داده شده است (مقادیر بیش‌تر یعنی مقادیر بهتر). با استفاده از روش‌های حذف زیر چه نتایجی می‌توان گرفت؟
- (الف) مقایسه‌ی گزینه‌ها با یکدیگر (غالب و مغلوب)
- (ب) مقایسه‌ی گزینه‌ها با یک استاندارد (قانون ۱ و ۲)
- (پ) مقایسه‌ی معیارها در گزینه‌ها (معیارهای به‌صورت $2 > 3 > 1 > 4$ رتبه‌بندی شده‌اند).

معیار	معیار			ایده‌آل	حداقل استاندارد
	A	B	C		
۱	۶	۵	۸	۱۰	۷
۲	۹۰	۸۰	۷۵	۱۰۰	۷۰
۳	۴۰	۳۵	۵۰	۵۰	۳۰
۴	G	P	VG	E	F

۲۰. یک شرکت تخصصی توسعه نرم‌افزار برنامه‌ریزی می‌کند تا یکی از چهار محصول جدید را پیشنهاد دهد و درآمد را حداکثر کرده، ریسک را حداقل کند، و سهم بازار را افزایش دهد. برای سود سالانه، ریسک سود و سهم بازار به ترتیب اوزان ۶۵، ۲۰ و ۱۵٪ اختصاص داده شده است. با استفاده از روش افزودنی جدولی بهترین محصول را شناسایی کنید.

سهم بازار	ریسک سود (هزار دلار)	سود بالقوه (هزار دلار)	محصول جدید
زیاد	۴۰	۱۰۰	SW I
متوسط	۳۵	۱۴۰	SW II
کم	۵۰	۱۵۰	SW III
متوسط	۴۵	۱۳۰	SW IV

۲۱. نتایج سوال ۲۰ را به صورت نمودار میله‌ای تجمعی نشان دهید.

۲۲. اگر در مثال قسمت ۵-۷ مقادیر بهتر، ارزان‌تر و سریع‌تر جدول ۵-۷ را به ترتیب از ۷،

۹، ۴ به ۹، ۷، ۴ تغییر دهیم نتایج چه تغییری می‌کند.

۲۳. یک نمایش ارزیابی تصمیم را رسم کنید تا از میان سه خودرو مدنظر تحت سه معیار بهترین انتخاب شود.
۲۴. یک گزینه جدید به مساله قسمت ۷-۵ اضافه کنید. مشخص کنید مقادیر این گزینه نسبت به هر معیار باید چقدر باشند تا گزینه ارجح شود.
۲۵. یک ماتریس ارزیابی برای یک شرایط تصمیم‌گیری دلخواه تشکیل دهید.
۲۶. یک بردار ارزیابی برای یک شرایط تصمیم‌گیری دلخواه تشکیل دهید.
۲۷. یک مثال توسعه دهید و کاربرد خروجی‌های زوجی در تصمیم‌گیری از میان تعدادی گزینه غیرقابل کمی کردن را نشان دهید.
۲۸. چه رویکردهایی را می‌توان استفاده کرد تا به خروجی‌های آینده مقادیر احتمالی تخصیص داد.
۲۹. نقش غلبه در تصمیم‌گیری بین چند معیار چیست؟
۳۰. یک مثال از سطح آرمانی در تصمیم‌گیری بیاورید.
۳۱. چه هنگامی از معیار محتمل‌ترین آینده در تصمیم‌گیری پیروی می‌شود؟
۳۲. اشکال استفاده از معیار محتمل‌ترین آینده چیست؟
۳۳. معیار لاپلاس در تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت چگونه تبدیل به تصمیم‌گیری تحت ریسک می‌شود؟
۳۴. توضیح دهید چگونه قوانین maximin و maximax حالات خاص قانون Hurwicz است؟
۳۵. هزینه‌ی توسعه یک برنامه آموزش داخلی برای اداره اتوماسیون نامعلوم است اما به صورت توزیع احتمال زیر تشریح شده است:

هزینه	احتمال وقوع
80000	0.2
95000	0.3
105000	0.25
115000	0.20
130000	0.05

هزینه انتظاری چقدر است؟ محتمل‌ترین هزینه کدام است؟ بیش‌ترین هزینه‌ای که با ۹۵٪ اطمینان اتفاق می‌افتد چقدر است؟

۳۶. درآمد خالص برای پنج فرصت سرمایه‌گذاری در سه آینده ممکن در جدول زیر محاسبه شده است. کدام گزینه با معیار محتمل‌ترین آینده انتخاب می‌شود؟ کدام گزینه با معیار ارزش انتظاری انتخاب می‌شود؟

	(0.3) F ₁ (\$)	(0.2) F ₂ (\$)	(0.5) F ₃ (\$)
A ₁	100000	100000	380000
A ₂	-200000	160000	590000
A ₃	0	180000	500000
A ₄	110000	280000	200000
A ₅	400000	90000	180000

۳۷. پرداخت‌های روزانه مثبت و منفی برای پنج گزینه و پنج آینده در ماتریس زیر نمایش داده شده است. کدام گزینه باید انتخاب شود تا احتمال دریافت پرداختی بیش‌تر از ۹ را حداکثر کند؟ کدام گزینه با استفاده از معیار محتمل‌ترین آینده انتخاب می‌شود؟

	(0.15) F ₁ (\$)	(0.20) F ₂ (\$)	(0.30) F ₃ (\$)	(0.20) F ₄ (\$)	(0.15) F ₅ (\$)
A ₁	12	8	-4	0	9
A ₂	10	0	5	10	16
A ₃	6	5	10	15	-4
A ₄	4	14	20	6	12
A ₅	-8	22	12	4	9

۳۸. ماتریس زیر میزان مطلوبیت ۳ گزینه در سه آینده ممکن را مشخص می‌کند:

	S1	S2	S3
A ₁	50	80	80
A ₂	60	70	20
A ₃	90	30	60

با قانون لاپلاس کدام گزینه انتخاب می‌شود؟ با قانون maximin؟ با قانون

maximax؟ با قانون Hurwicz در $\alpha = 0.75$ ؟

۳۹. ماتریس زیر هزینه‌های مربوط به سه گزینه در چهار حالت ممکن نشان می‌دهد:

	S1	S2	S3	S4
A ₁	20	25	30	35
A ₂	40	30	40	20
A ₃	10	60	30	25

گزینه برتر را با استفاده از قانون maximin، maximax، لاپلاس، و Hurwicz با

$\alpha = 0.2$ به دست آورید. چگونه اعمال این قوانین در ماتریس هزینه با اعمال آن‌ها در

ماتریس درآمد تفاوت می‌کند؟

۴۰. یک هواپیمای باربری برای کار در نقاط مختلف دنیا در حال طراحی است و دستگاه‌های راهبر خارجی کیفیت‌های متفاوتی دارند. تولیدکننده پنج حوزه را شناسایی کرده است که هواپیما ممکن است در آن‌ها پرواز کند و احتمال حضور هر هواپیما در هر حوزه مشخص شده است. هواپیما در حوزه‌های 1-5 با فراوانی نشان داده شده در جدول حضور می‌یابد. همچنین جدول پنج دستگاه راهبر تحت مطالعه را به صورت N_1 تا N_5 نشان داده است. خطای انتظاری آن‌ها در هر حوزه در جدول نشان داده شده است. این مقادیر خطا در واحد گره دریایی مشخص شده است. خطاهای کم خوب هستند و خطاهای زیاد مطلوب نیست.

	(0.15) حوزه ۱	(0.20) حوزه ۲	(0.30) حوزه ۳	(0.20) حوزه ۴	(0.15) حوزه ۵
A_1	0.09	0.15	0.20	0.30	0.1
A_2	0.09	0.30	0.25	0.09	0.06
A_3	0.15	0.14	0.09	0.06	0.25
A_4	0.21	0.07	0.05	0.12	0.06
A_5	0.28	0.03	0.08	0.19	0.10

(الف) کدام سیستم(ها) احتمال دستیابی به خطای 0.10 یا کمتر را نتیجه می‌دهد؟

(ب) احتمال دستیابی به این خطا چقدر است؟

(پ) کدام گزینه با معیار محتمل‌ترین آینده به دست می‌آید؟

۴۱. ماتریس زیر درآمد انتظاری به هزار دلار را برای پنج راهبرد بازار در پنج سطح بالقوه فروش نشان داده است:

	L ₅	L ₄	L ₃	L ₂	L ₁
M ₁	10	20	30	40	50
M ₂	20	25	25	30	35
M ₃	50	40	5	15	20
M ₄	40	35	30	25	25
M ₅	10	20	25	30	20

کدام راهبرد بازار با قانون maximin، maximax و Hurwicz با $\alpha = 0.4$ انتخاب می‌شود؟

۴۲. گراف قانون Hurwicz را برای همه‌ی مقادیر α در مساله ۴۰ رسم کنید.

۴۳. ماتریس ارزیابی تصمیم زیر صرفه‌جویی انتظاری در هزینه‌های نگهداری تعمیرات (هزار دلار) برای سه سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در سه سطح عملیاتی نشان می‌دهد. با داشتن احتمالات در هر سطح به صورت $P_1 = 0.3, P_2 = 0.25, P_3 = 0.45$ بهترین سیاست را براساس معیار محتمل‌ترین آینده مشخص کنید.

	L ₁	L ₂	L ₃
M ₁	10	20	30
M ₂	22	26	26
M ₃	40	30	15

هم‌چنین بهترین سیاست را در شرایط عدم قطعیت و با استفاده قوانین لاپلاس، maximax و Hurwicz با $\alpha = 0.2$ تعیین کنید.

۴۴. هنگامی که یک وضعیت تصمیم‌گیری طوری است که توسط مدل مورد استفاده قابل توضیح نیست چه کار می‌توان کرد؟

مدل‌های ارزیابی اقتصادی

ملاحظات اقتصادی در مهندسی سیستم‌ها و روش‌هایی که برای خلق سیستم‌های فنی یا مهندسی شده پیشنهاد می‌شوند، مهم هستند. برای سیستم‌های موجود، ملاحظات اقتصادی پایه و اساس تحلیل و بهبود عملیات سیستم را تشکیل می‌دهند. مثال‌های متعددی از سیستم‌ها و محصولات آن‌ها وجود دارند که طراحی فیزیکی فوق‌العاده‌ای دارند، اما ارزش اقتصادی آن‌ها در برابر ارزش فنی آن اندک است.

با رجوع به گذشته، فاکتورهای محدودکننده غالباً فیزیکی بوده‌اند، اما با پیشرفت علم و فناوری سیستم‌ها و خدمات مهندسی شده که مطلوبیت اقتصادی ندارند، از نظر فیزیکی ممکن شده‌اند. خوشبختانه مهندسان به راحتی می‌توانند توانمندی ذاتی خود برای تحلیل و ارزیابی گسترش دهند تا فاکتورهای اقتصادی تحت کنترل را بررسی کنند. هدف اصلی این فصل دستیابی به چنین هدفی است.

پس از اتمام این فصل، خواننده دید لازم در خصوص فرمول‌های نرخ بهره و تعیین معادل‌های اقتصادی را به دست می‌آورد. معادل‌های اقتصادی در ادامه به عنوان روشی برای ارزیابی

یک یا چند گزینه توسط پنج روش کلاسیک نشان داده خواهند شد. با استفاده از نمایش ارزیابی تصمیم، دید لازم در مورد مسائل با چند گزینه و چند معیار به دست می‌آید. در نهایت تحلیل نقطه‌ی سر به سر برای شناسایی هزینه‌های ثابت و متغیر روش‌های تحلیل اقتصادی را گسترش می‌دهد.

پس از مطالعه این فصل، خواننده موارد زیر را درک کرده و در مورد آن‌ها توانمندی‌های مربوطه را به دست خواهد آورد:

- اقتباس فرمول‌های نرخ بهره و استفاده از آن‌ها برای تعیین معادل برای الگوهای متفاوت جریان پول در گذر زمان؛
- تعیین معادل‌های اقتصادی توسط شاخص‌های کلاسیک، و همچنین توسط نرخ بازگشت سرمایه و شاخص‌های پرداخت به عنوان پایه و اساس برای انتخاب بین چند گزینه؛
- پیدا کردن هزینه معادل سالانه برای یک دارای با استفاده از هزینه استهلاک و هزینه سرمایه؛
- ارزیابی یک یا چند گزینه توسط روش‌های کلاسیک و همچنین توسط نرخ بازگشت سرمایه و روش‌های پرداخت؛
- ارزیابی چند گزینه بر پایه معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی با استفاده از نمایش ارزیابی تصمیم؛
- اعمال مفهوم تحلیل نقطه سر به سر برای ارزیابی گزینه‌ها در حضور هزینه‌های ثابت و متغیر؛
- در نظر گرفتن چند آینده غیرقطعی و ریسک در ارزیابی اقتصادی گزینه‌ها؛

هدف این فصل فراهم کردن پیش‌نیازهای لازم است که در فصول بعدی هنگام ارزیابی اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف دیگر آن، آماده کردن خواننده برای ورود به بحث مقرون به صرفه بودن طراحی و تحلیل اثربخشی - هزینه چرخه عمر در فصل ۱۷ است.

۸-۱- نرخ بهره و فرمول‌های آن

ارزش زمانی پول به شکل یک نرخ بهره، یک عنصر مهم در بسیاری از شرایط تصمیم‌گیری است که جریان پول در گذر زمان در آن مطرح است. از آن‌جا که پول می‌تواند دارای یک نرخ بهره خاص باشد، ارزش یک دلار در دست در زمان حال از یک دلار در هر زمانی در آینده بیش‌تر است. فرد قرض دهنده، بهره‌ی دریافت شده را به‌عنوان سود دریافت می‌کند، درحالی که قرض گیرنده آن را به‌صورت یک هزینه نگاه می‌کند.

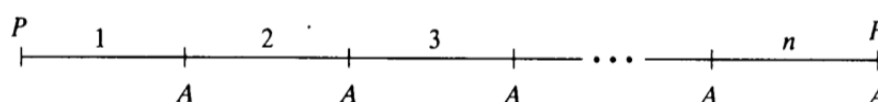
نرخ بهره نسبتی از پول قرض گرفته شده است که برای استفاده از آن در یک دوره‌ی زمانی که معمولاً یکسال است، پرداخت می‌شود. این نسبت به‌صورت درصد بیان می‌شود. به‌طور مثال اگر ۱۰۰ دلار برای استفاده از ۱۰۰۰ دلار در یکسال پرداخت شود، نرخ بهره ۱۰٪ خواهد بود. بهره ترکیبی، بهره‌ای است که در پایان دوره‌ی بهره یا در انتهای دوره پرداخت می‌شود یا بهره‌ای بر بهره خواهد داشت. این فرض ترکیب اغلب در ارزیابی اقتصادی گزینه‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. یک مدل شماتیک برای جریان پول در گذر زمان در شکل ۸-۱ نشان داده شده است. این شکل پایه و اساس استخراج فاکتورهای بهره بوده و می‌تواند در هر فاز چرخه‌ی عمر سیستم برای تحلیل درآمد یا هزینه چرخه‌ی عمر اعمال شود. (به شکل ۷-۱ مراجعه کنید). فرض کنید

i : نرخ بهره سالانه اسمی

n : تعداد دوره‌ها، معمولاً سالانه

P : مقدار اصلی در یک زمان که فرض می‌شود زمان حال است

A : یک مقدار واحد و یکسان برای n دوره متوالی و در انتهای هر دوره
 F : مقدار در دوره نهایی یعنی n که معادل مقدار ترکیب شده P یا مجموع ترکیبی مقادیر
 A با نرخ بهره i است.



شکل ۸-۱- مدل جریان پول

۸-۱-۱- فرمول مقدار ترکیبی تک-پرداخت

وقتی به بهره اجازه ترکیب داده شود، بهره دریافت شده طی هر دوره به مقدار اصلی در زمان شروع دوره بعدی اضافه می‌شود. با استفاده از عبارات تعریف شده در بالا، رابطه‌ی بین F ، P ، i و n در جدول ۸-۱ توسعه داده شده است. فاکتور $(1+i)^n$ به عنوان فاکتور مقدار ترکیبی تک-پرداخت شناخته شده و به صورت زیر نمایش داده می‌شود $(F/P, i, n)$

جدول ۸-۱- فرمول مقدار ترکیبی تک-پرداخت

سال	شروع سال	بهره دریافت شده طی سال	مقدار ترکیبی در سال آخر
۱	P	Pi	$P + Pi = P(1+i)$
۲	$P(1+i)$	$P(1+i)i$	$P(1+i) + P(1+i)i = P(1+i)^2$
۳	$P(1+i)^2$	$P(1+i)^2 i$	$(1+i)^2 + P(1+i)^2 i = P(1+i)^3$
n	$P(1+i)^{n-1}$	$P(1+i)^{n-1} i$	$^{n-1} + P(1+i)^{n-1} i = P(1+i)^n = F$

این فاکتور می‌تواند برای نمایش معادل بین مقدار کنونی P و مقدار آینده F با نرخ بهره i برای n سال استفاده شود. فرمول به صورت زیر است

$$F = P(1+i)^n$$

یا

$$F = P(F/P, i, n) \quad (۱-۸)$$

۸-۱-۲- فرمول تک-پرداخت مقدار کنونی

فرمول مقدار ترکیبی تک-پرداخت می‌تواند برای P به صورت زیر به دست آید

$$P = F \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$$

فاکتور به دست آمده، $\frac{1}{(1+i)^n}$ ، فاکتور تک-پرداخت مقدار کنونی شناخته شده و به صورت

زیر نشان داده می‌شود

$$(P/F, i, n)$$

این فاکتور برای بیان معادل بین مقدار آینده، F ، و مقدار کنونی، P ، با نرخ بهره i در n سال استفاده کرد. این فرمول به صورت زیر است

$$P = F(P/F, i, n) \quad (۲-۸)$$

۸-۱-۳- فرمول مقدار ترکیبی پرداخت یکسان

در برخی مواقع، یک سری از دریافت‌ها یا پرداخت‌ها به صورت یکسان در انتهای هر سال انجام می‌شوند. مجموع مقادیر ترکیبی این سری با توجه به شکل ۸-۱ را می‌توان تعیین کرد.

A دلار سپرده شده در انتهای سال n م بهره‌ای ندارد و به همان اندازه A در مقدار F مشارکت خواهد داشت. A دلار سپرده شده در انتهای سال $n-1$ به اندازه A_i بهره داشته و مقدار $A(1+i)$ در مقدار کل مشارکت خواهد داشت. به همین منوال مقدار سپرده شده در سال $n-2$ به اندازه $A(1+i)^2$ در مقدار نهایی اضافه می‌شود. در نتیجه سری زیر به دست می‌آید.

$$F = A(1) + A(1+i) + A(1+i)^2 + \dots + A(1+i)^{n-2} + A(1+i)^{n-1}$$

با ضرب دو طرف معادله در $(1+i)$ خواهیم داشت

$$F(1+i) = A \left[(1+i) + (1+i)^2 + (1+i)^3 + \dots + (1+i)^{n-1} + (1+i)^n \right]$$

با تفریق اولین جمله از دو طرف خواهیم داشت

$$F(1+i) - F = A \left[(1+i)^n - 1 \right]$$

$$Fi = A \left[(1+i)^n - 1 \right]$$

$$F = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$$

فاکتور به‌دست آمده یعنی $\left[(1+i)^n - 1 \right] / i$ به‌عنوان فاکتور مقدار ترکیبی سری پرداخت

یکسان شناخته شده و به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$(F/A, i, n)$$

این فاکتور برای نمایش معادل بین سری پرداخت‌های یکسان، A ، و مقدار آینده، F ، با نرخ

بهره i در n سال به کار می‌رود. فرمول به‌صورت زیر بیان می‌شود

$$F = A(F/A, i, n) \quad (۳-۸)$$

۸-۱-۴- فرمول وجه استهلاکی سری پرداخت

فرمول مقدار ترکیبی پرداخت یکسان را می‌توان برای به‌دست آوردن A به‌صورت زیر

نوشت

$$A = F \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right]$$

فاکتور به‌دست آمده، $\left[(1+i)^n - 1 \right] / i$ به‌عنوان فاکتور وجه استهلاکی پرداخت یکسان شناخته شده و به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$(A / F, i, n)$$

این فاکتور می‌تواند برای نمایش مقدار معادل بین یک مقدار آینده، F ، و یک سری پرداخت یکسان، A ، با نرخ بهره i در n سال مورد استفاده قرار گیرد. این فرمول به صورت زیر است

$$A = F (A / F, i, n) \quad (۴-۸)$$

۸-۱-۵- فرمول وصول سرمایه سری پرداخت یکسان

با جایگزینی $P(1+i)^n$ در F در فرمول وجه استهلاکی سری پرداخت یکسان خواهیم داشت

$$\begin{aligned} A &= P(1+i)^n \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \\ &= P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \end{aligned}$$

فاکتور به‌دست آمده، $\left[(1+i)^n - 1 \right] / i(1+i)^n$ ، به‌عنوان فاکتور وصول سرمایه سری پرداخت یکسان شناخته شده و به‌صورت زیر نشان داده می‌شود

$$(A / P, i, n)$$

این فاکتور می‌تواند برای به‌دست آوردن مقدار معادل بین سری پرداخت یکسان آینده، A ، و مقدار کنونی، P ، با نرخ بهره i در n سال مورد استفاده قرار گیرد. این فرمول به‌صورت زیر است.

$$A = P(A / P, i, n)$$

۸-۱-۶- فرمول مقدار کنونی سری پرداخت یکسان

فرمول وصول سرمایه سری پرداخت یکسان را می‌توان برای به‌دست آوردن P بازنویسی کرد

$$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

فاکتور به دست آمده، $\left[i(1+i)^n \right] / \left[(1+i)^n - 1 \right]$ ، به عنوان فاکتور مقدار کنونی سری پرداخت یکسان شناخته شده و به صورت زیر نمایش داده می شود

$$(P / A, i, n)$$

این فاکتور را می‌توان برای به‌دست آوردن مقدار معادل بین سری پرداخت آینده، A ، و مقدار کنونی، P با نرخ بهره i در n سال مورد استفاده قرار داد. فرمول به‌شرح زیر است

$$P = A(P / A, i, n) \quad (9-8)$$

۸-۱-۶- خلاصه فرمول‌های بهره

فاکتورهای بهره که در پاراگراف‌های قبلی استخراج شدند، روابط بین P ، F ، A ، i و n را بیان می‌کنند. در هر موردی، معادل بین F و P ، F و A ، F و P ، F و A ، F و P ، F و A و P برای هر نرخ i و برای تعداد سال n قابل محاسبه است. جدول ۸-۲ می‌تواند برای انتخاب فرمول بهره موردنیاز در یک شرایط خاص مورد استفاده قرار گیرد. فاکتور اختصاص داده شده در ستون

سمت راست، ایجاد یک مساله با استفاده از نمادها را پیش از حل آن توسط مقادیرش ممکن می‌سازد.

جداول بهره خلاصه شده در جدول ۸-۲ یادآوری نام فرمول‌ها را غیرضروری می‌کنند. چنین جداولی در تمامی منابع مرتبط با موضوع برای بازه‌ای از مقادیر i و n فراهم شده است. هر ستون در جدول توسط فرمول اختصاصی مشخص شده است که تابع مقدار جدولی در نمودار جریان پول را تعیین می‌کند. هر جدول بر پایه مقدار مشخصی از i و در یک بازه از n برای هر شش فاکتور مقدار معادل برای یک دلار را مشخص می‌کند.

جدول ۸-۲- خلاصه فرمول‌های بهره

فاکتور	فرمول	تابع	نام فرمول
$F = P(F/P, i, n)$	$F = P(1+i)^n$	P معلوم	مقدار ترکیبی
		F مجهول	تک پرداخت
$P = F(P/F, i, n)$	$P = F \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$	F معلوم	مقدار کنونی
		P مجهول	تک پرداخت
$F = A(F/A, i, n)$	$F = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$	A معلوم	مقدار ترکیبی
		F مجهول	پرداخت یکسان
$A = F(A/F, i, n)$	$A = F \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right]$	F معلوم	وجه استهلاکی
		A مجهول	پرداخت یکسان
$P = A(P/A, i, n)$	$P = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$	A معلوم	مقدار کنونی
		P مجهول	پرداخت یکسان
$A = P(A/P, i, n)$	$A = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$	P معلوم	وصول سرمایه
		A مجهول	پرداخت یکسان

۸-۱-۷- فرمول سری هندسی شیب‌دار

در برخی موارد، جریان سالانه پول با گذشت زمان با یک درصد ثابت کم یا زیاد می‌شود. اگر این درصد تغییر از یک سال به سال دیگر را g فرض کنیم، بزرگی جریان پول t ام مربوط به جریان پول F_1 به صورت زیر خواهد بود

$$F_t = F_1 (1 + g)^{t-1} \quad t = 1, 2, \dots, n$$

هنگامی که g مثبت باشد، سری مانند شکل ۸-۲ سری خواهد بود. هنگامی که g منفی باشد، سری نزولی خواهد بود.

برای استخراج یک عبارت برای مقدار کنونی، P ، رابطه بین F_t و F_1 قابل استفاده است. با کمک فاکتور مقدار کنونی تک پرداخت خواهیم داشت

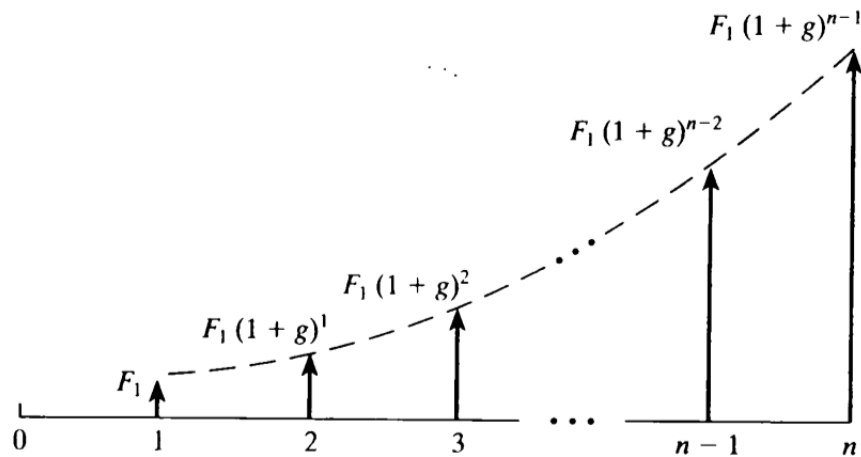
$$P = F_1 \left[\frac{(1+g)^0}{(1+i)^1} \right] + F_1 \left[\frac{(1+g)^1}{(1+i)^2} \right] + F_1 \left[\frac{(1+g)^2}{(1+i)^3} \right] + \dots + F_1 \left[\frac{(1+g)^{n-1}}{(1+i)^n} \right]$$

هر عبارت در سمت راست معادله را در $(1+g)/(1+i)$ ضرب می‌کنیم در نتیجه

$$P = \frac{F_1}{1+g} \left[\frac{(1+g)^1}{(1+i)^1} + \frac{(1+g)^2}{(1+i)^2} + \frac{(1+g)^3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{(1+g)^n}{(1+i)^n} \right]$$

فرض کنید

$$\frac{1}{1+g'} = \frac{1+g}{1+i}$$



شکل ۸-۲- یک سری هندسی شیب‌دار با $g > 0$

که در آن g' نرخ آزاد رشد است، نرخ i و g هر دو نرخ i را در خود داشته و در فرمول‌ها و جداول جای i می‌نشیند. با جایگزینی هر آیت در معادله خواهیم داشت

$$P = \frac{F_1}{1+g} \left[\frac{1}{(1+g')^1} + \frac{1}{(1+g')^2} + \frac{1}{(1+g')^3} + \dots + \frac{1}{(1+g')^n} \right]$$

عبارات داخل کروشه روش دیگری در محاسبه فاکتور مقدار کنونی پرداخت یکسان برای n سال را تشکیل می‌دهد. بنابراین با جایگزینی در فاکتور مقدار کنونی پرداخت یکسان داریم

$$P = \frac{F_1}{1+g} \left[\frac{(1+g')^n - 1}{g'(1+g')^n} \right]$$

یا

$$P = F_1 \left[\frac{(P/A, g', n)}{(1+g)} \right] \quad (Y-8)$$

فاکتور داخل کروش فاکتور سری هندسی شیب‌دار است. برای استفاده از این فرمول مقدار g' باید با حل رابطه زیر مشخص شود

$$\frac{1}{1+g'} = \frac{1+g}{1+i} \quad (8-8)$$

$$g' = \frac{1+i}{1+g} - 1$$

۸-۲- تعیین معادل اقتصادی

اگر دو یا چند وضعیت باید مقایسه شود، خصوصیات آن‌ها باید بر پایه یک معادل از یک جنس (کنونی، آینده، یکسان سالانه) صورت پذیرد. دو چیز معادل هستند، اگر اثری یکسان داشته باشند، برای نمونه، گشتاور ایجاد شده توسط نیروهای ۱۰۰ و ۲۰۰ پوندی روی دو سر اهرم که به ترتیب ۲ و ۱ فوت هستند با هم برابر خواهد بود، زیرا هردو گشتاوری معادل ۲۰۰ فوت-پوند ایجاد می‌کنند.

دو مقدار پولی هنگامی معادل هستند که مقداری برابر و قابل تعویض داشته باشند. سه فاکتور در معادل بودن حاصل جمع پول اثرگذار باشند: (۱) مقدار کنونی جمع، (۲) زمان اتفاق افتادن حاصل جمع، و (۳) نرخ بهره. در این رابطه، معادله ۷-۱ اعمال می‌شود. این معادله به‌طور مستقیم قابل استفاده در گزینه‌هایی است که توسط جریان پول در گذار زمان بر اساس تبدیل انجام شده در شکل ۸-۱ تشریح شده است. محاسبات ساده معادل، محاسبات سری هندسی شیب‌دار و نمودارهای توابع معادل در این قسمت ارائه شده است.

۸-۲-۱- محاسبات تعادل فرمول بهره

محاسبات تعادل بر پایه استفاده ساده فرمول بهره که در قسمت ۸-۱ استخراج شده است در این قسمت نمایش داده می‌شود. کاربرد کامل‌تری از آن‌ها بعداً ارائه می‌شود. در هر مورد،

تعیین معادل اقتصادی در ارتباط با تبدیل جریان پول در شکل ۸-۱ و بر پایه مقدار ۱ دلار است.

با نرخ بهره ۱۰٪ و تعداد سال $n = 8$ ، یک P برابر ۱ دلار معادل یک F برابر ۲.۱۴۴ است. این موضوع را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$F = 1 \overset{F/P, 10, 8}{(2.1440)} = 2.1440$$

کاربرد عملی این عبارت این است که ۱ دلار امروز باید سودی برابر ۲.۱۴۴ در ۸ سال بعد داشته باشد اگر نرخ بهره برابر ۱۰٪ باشد.

یک وضعیت برعکس زمانی است که $i = 12\%$ ، $n = 10$ ، و $F = 1$. P معادل آن به صورت زیر به دست می‌آید

$$P = 1 \overset{P/F, 12, 10}{(0.3220)} = 0.3220$$

کاربرد عملی این عبارت این است که برای به دست آوردن ۱ دلار در ۱۰ سال بعد نباید بیش از ۰.۳۲۲ دلار امروز صرف شود، اگر نرخ بهره برابر با ۱۲٪ باشد.

اگر $i = 8\%$ و $n = 20$ ، F معادل برای A یک دلاری به شرح زیر است

$$F = 1 \overset{F/A, 8, 20}{(45.7620)} = 45.7620$$

کاربرد عملی این عبارت معادل این است که ۱ دلاری که طی ۲۰ سال به صورت سالانه خرج می‌شود باید درآمدی معادل ۴۵.۷۶۲ دلار در پایان سال بیستم ایجاد کرده یا از چنین هزینه‌های جلوگیری کند اگر نرخ بهره ۸٪ باشد.

در شرایطی معکوس $i = 12\%$ ، $n = 6$ سال و F برابر یک دلار است. A معادل برای این یک دلار به صورت زیر به دست می‌آید

$$A = 1(0.1232)^{A/F, 12, 6} = 0.1232$$

یک کاربرد عملی این معادل، آن است که دریافت سالانه 0.1232 برای ۶ سال معادل دریافت یک دلار در سال ۶ام است.

اگر $i = 9\%$ ، $n = 10$ و A یک دلار باشد، P معادل این یک دلار برابر است با

$$P = 1(6.4177)^{P/A, 9, 10} = 6.4177$$

یک کاربرد عملی این معادل، آن است که سرمایه‌گذاری برابر با 6.4177 دلار امروز باید انجام گیرد تا درآمد سالانه‌ای برابر با یک دلار برای ۱۰ سال به دست آید اگر نرخ بهره ۹٪ باشد.

در شرایطی معکوس، $i = 14\%$ ، $n = 7$ و P برابر ۱ دلار است. مقدار A معادل این یک دلار برابر است با

$$A = 1(0.1987)^{A/P, 14, 7} = 0.1987$$

یک کاربرد عملی این معادل، آن است که یک دلار که امروز صرف می‌شود تا یک صرفه‌جویی سالانه 0.1987 دلاری برای ۷ سال صورت گیرد اگر نرخ بهره برابر با ۱۴٪ باشد.

۸-۲-۲- محاسبات معادل سری هندسی شیب‌دار

سری هندسی شیب‌دار برای یک سری صعودی در شکل ۸-۲ نشان داده شد و معادلات ۸-۷ و ۸-۸ به دست آمد، اما می‌توان از آن برای شیب منفی نیز استفاده کرد. در این مورد، g مقداری منفی خواهد بود، و g' مقداری مثبت دارد.

به عنوان مثال، فرض کنید که جریان درآمدی برابر با ۱ دلار در سال اول تحت یک کاهش ۱۰٪ سالانه برای ۸ سال قرار می‌گیرد. معادل کنونی درآمد پیش‌بینی شده با نرخ بهره ۱۷٪ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$g' = \frac{1 + 0.17}{1 - 0.10} - 1 = 0.3$$

$$P = 1 \frac{(2.9247)^{P/A, 30, 8}}{1 - 10} = 3.25$$

در این مثال، مقدار فاکتور P/A از جدول نرخ بهره ۳۰٪ در دسترس است.

۸-۲-۳- نمودارهای تابع معادل

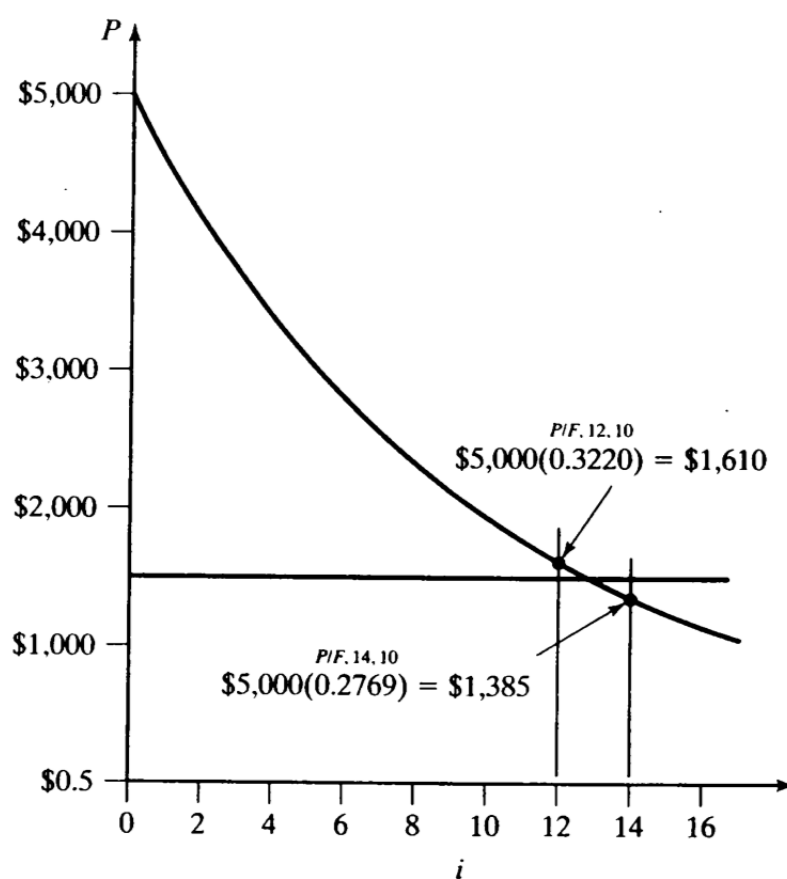
یک تکنیک مفید در تعیین معادل رسم مقدار کنونی به عنوان تابعی از نرخ بهره است. برای مثال، با چه نرخ بهره‌ای P ۱۵۰۰ دلار برابر با F ۵۰۰۰ در سال ۹ام برابر است؟ به صورت ریاضی

$$5000 = 1500 \left(\frac{F/p, i, 9}{} \right)$$

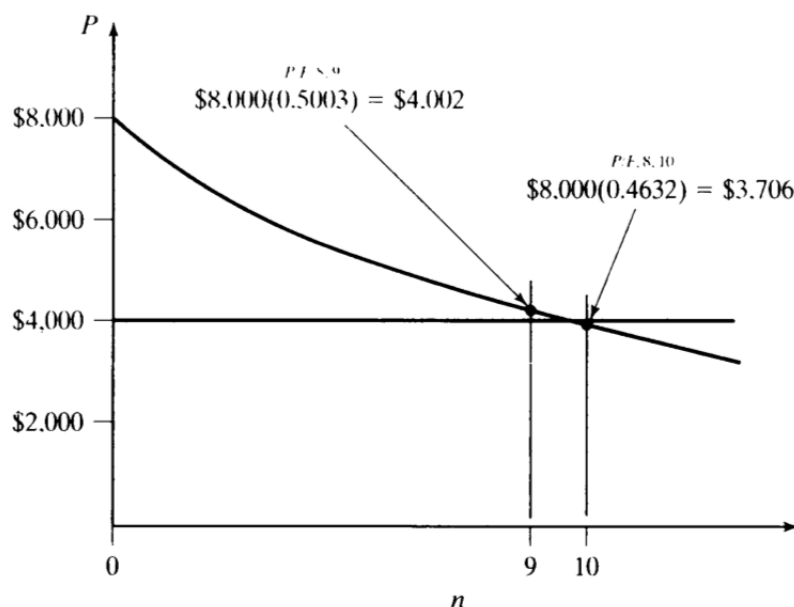
حل مورد نظر در شکل ۸-۳ نشان داده شده است که در آن i اندکی کمتر از ۱۳٪ است.

ارزش فعلی (مقدار کنونی) را می‌توان به‌عنوان تابعی از n نیز رسم کرد. برای مثال، به چه مقداری از n ، P ۴۰۰۰ دلاری با F ۸۰۰۰ دلاری با نرخ بهره ۸٪ معادل هستند؟ به‌صورت ریاضی

$$8000 = 4000 \left(\frac{F}{P} \right)^{8,n}$$



شکل ۸-۳- نمودار تابع معادل نسبت به i



شکل ۸-۴- نمودار تابع معادل نسبت به n

حل در شکل ۸-۴ نشان داده شده است که عددی بین ۹ و ۱۰ است.

توابع معادل را می‌توان برای A یا F به عنوان تابعی از i یا n نیز رسم کرد. در این موارد، معادل برای کمیت‌های A یا F به عنوان تابعی از i یا n به دست می‌آید.

۸-۳- ارزیابی یک گزینه

در اکثر موارد، یک تصمیم با انتخاب یک نظر از میان دو یا چند گزینه صورت می‌گیرد. با این حال در برخی موارد، تصمیم محدود به قبول یا رد تنها یک گزینه می‌شود. در چنین موردی، تصمیم بر پایه‌ی ارزش نسبی گزینه و دیگر فرصت‌هایی که ممکن است وجود داشته باشد، گرفته می‌شود، حتی اگر هیچ یک از گزینه‌های دیگر پیشنهاد نشده باشد.

هنگامی که تنها یک امکان مشخص وجود داشته باشد، این گزینه باید در چارچوبی ارزیابی شود که بتوان مطلوبیت آن را با فرصتی که ممکن است وجود داشته باشد (اما مشخص نشده است) مقایسه شود. رایج‌ترین مبنا برای این مقایسه، ارزیابی معادل کنونی، ارزیابی معادل سالانه، ارزیابی معادل آینده، ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه و ارزیابی عمر خدمت‌دهی است.

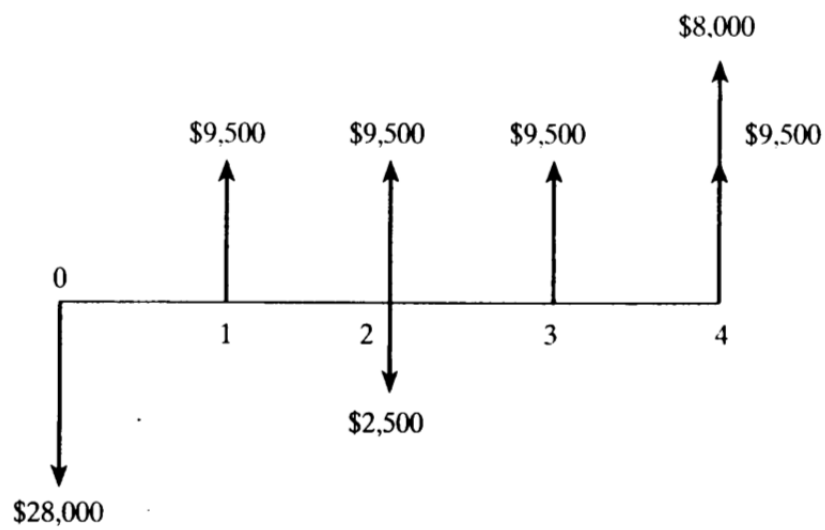
مثال زیر ارزیابی‌های مختلف یک گزینه مشخص در شرایط قطعیت در مورد خروجی‌های آینده را نشان می‌دهد. فرض کنید که یک سیستم گرمایش برای یک ساختمان کوچک مدنظر است. هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌های این پروژه در جدول ۸-۳ ارائه شده است. فرض کنید که نرخ بهره ۱۲٪ بوده زمان کنونی را ۱ ژانویه ۲۰۰۵ باشد.

برای راحتی، هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌هایی که طی سال صورت می‌گیرد در انتهای سال یا ابتدای سال بعد در نظر گرفته می‌شود که هر دو یک نقطه زمانی خواهند بود. یک خطای کوچک در استفاده از جریان‌های پولی است که در نظر گرفتن آن‌ها در انتهای سال است. با این حال این خطا در مقایسه با خطاهای دیگر بسیار ناچیز است (به جز در مواردی که نرخ بهره خیلی زیاد باشد). هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌ها توسط نمودار جریان پولی در شکل ۸-۵ ترسیم شده است.

جدول ۸-۳- هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌ها برای یک گزینه

صرفه‌جویی	هزینه	تاریخ	آیتم
-	۲۸۰۰۰	۲۰۰۵-۱-۱	هزینه اولیه
۹۵۰۰	-	۲۰۰۶-۱-۱	صرفه‌جویی، سال اول
۹۵۰۰	-	۲۰۰۷-۱-۱	صرفه‌جویی، سال دوم

آیتم	تاریخ	هزینه	صرفه جویی
تعمیرات اساسی	۲۰۰۷-۱-۱	۲۵۰۰	-
صرفه جویی، سال سوم	۲۰۰۸-۱-۱	-	۹۵۰۰
صرفه جویی، سال چهارم	۲۰۰۹-۱-۱	-	۹۵۰۰
ارزش اسقاطی	۲۰۰۹-۱-۱	-	۸۰۰۰



شکل ۸-۶- نمودار جریان پولی جدول ۸-۳

۸-۳-۱- ارزیابی معادل کنونی

ارزیابی معادل کنونی بر پایه پیدا کردن مقدار معادل کنونی، PE، است که نشان‌دهنده‌ی تفاوت میان معادل کنونی صرفه‌جویی و معادل کنونی هزینه‌ها برای یک گزینه در یک نرخ بهره معلوم است. بنابراین، مقدار معادل کنونی با یک نرخ مشخص i طی n سال با استفاده از معادله ۸-۲ به‌دست می‌آید.

$$PE(i) = F_0 \left(\frac{P/F, i, 0}{(1+i)^0} \right) + F_1 \left(\frac{P/F, i, 1}{(1+i)^1} \right) + F_2 \left(\frac{P/F, i, 2}{(1+i)^2} \right) + \dots + F_n \left(\frac{P/F, i, n}{(1+i)^n} \right) = \sum_{t=0}^n F_t \left(\frac{P/F, i, t}{(1+i)^t} \right) \quad (9-8)$$

$$\left(\frac{P/F, i, t}{(1+i)^t} \right) = (1+i)^{-t} \quad \text{از آنجا که}$$

$$PE(i) = \sum_{t=0}^n F_t (1+i)^{-t} \quad (10-8)$$

برای مثال فوق، مقدار معادل کنونی با نرخ بهره ۱۲٪ با استفاده از معادله ۹-۸ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\begin{aligned} PE(12) &= -28000 \left(\frac{P/F, 12, 0}{(1.12)^0} \right) + 9500 \left(\frac{P/F, 12, 1}{(1.12)^1} \right) + 7000 \left(\frac{P/F, 12, 2}{(1.12)^2} \right) \\ &\quad + 9500 \left(\frac{P/F, 12, 3}{(1.12)^3} \right) + 17500 \left(\frac{P/F, 12, 4}{(1.12)^4} \right) \\ &= 3946 \end{aligned}$$

یا با استفاده از معادله ۱۰-۸

$$\begin{aligned} PE(12) &= -28000(1.12)^0 + 9500(1.12)^{-1} + 7000(1.12)^{-2} \\ &\quad + 9500(1.12)^{-3} + 17500(1.12)^{-4} \\ &= 3946 \end{aligned}$$

چون مقدار معادل کنونی از صفر بیش‌تر است، در نتیجه گزینه در نرخ ۱۲٪ مطلوب است.

۸-۳-۲- ارزیابی معادل سالانه

ارزیابی معادل سالانه مشابه ارزیابی معادل کنونی است به جز آن که تفاوت بین صرفه‌جویی و هزینه در این مورد به صورت یک مقدار سالانه، PE، با نرخ بهره معلوم بیان می‌شود که به صورت زیر است:

$$AE(i) = PE(i) \left(\frac{A/P, i, n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (۸-۱۱)$$

اما از آن جا که

$$PE(i) = \sum_{t=0}^n F_t (1+i)^{-t}$$

و

$$\left(\frac{A/P, i, n}{(1+i)^n - 1} \right) = \left[\frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

در نتیجه

$$AE(i) = \left[\sum_{t=0}^n F_t (1+i)^{-t} \right] \left[\frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (۸-۱۲)$$

برای مثال فوق، ارزیابی معادل سالانه با استفاده ۸-۱۱ به صورت زیر صورت می‌گیرد

$$AE(12) = 3946 \left(\frac{A/P, 12, 4}{(1.12)^4 - 1} \right) = 1299$$

یا با استفاده از معادله ۸-۱۲

$$AE(12) = \left[-28000(1.12)^0 + 9500(1.12)^{-1} + 7000(1.12)^{-2} + 9500(1.12)^{-3} + 17500(1.12)^{-4} \right] \times \left[\frac{0.12(1.12)^4}{(1.12)^4 - 1} \right] = 1299$$

این نتایج به این معنا است که اگر در ۱ ژانویه ۲۰۱۰، ۲۸۰۰۰ دلار سرمایه‌گذاری شود، با نرخ بازگشت سرمایه ۱۲ این سرمایه‌گذاری برگردانده شده و مقدار ۱۲۹۹ دلار در ۱ ژانویه سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، و ۲۰۱۵ دریافت می‌شود.

۸-۳-۳- ارزیابی معادل آینده

معادل آینده برای مقایسه بر پایه مقدار معادل آینده، FE ، بوده و اختلاف معادل آینده صرفه‌جویی و معادل آینده هزینه‌ها را برای یک گزینه با نرخ بهره معلوم نمایش می‌دهد. بنابراین، مقدار معادل آینده با یک نرخ بهره i پس از n سال با استفاده از معادله ۸-۱ به دست می‌آید.

$$FE(i) = F_0 \left(\frac{F/P, i, n}{(1+i)^n} \right) + F_1 \left(\frac{F/P, i, n-1}{(1+i)^{n-1}} \right) + \dots + F_{n-1} \left(\frac{F/P, i, 1}{(1+i)^1} \right) + F_n \left(\frac{F/P, i, 0}{(1+i)^0} \right) \quad (13-8)$$

$$= \sum_{t=0}^n F_t \left(\frac{F/P, i, n-t}{(1+i)^{n-t}} \right)$$

اما چون

$$\left(\frac{F/P, i, n-t}{(1+i)^{n-t}} \right) = (1+i)^{n-t}$$

داریم

$$FE(i) = \sum_{t=0}^n F_t (1+i)^{n-t} \quad (14-8)$$

یا

$$FE(i) = PE(i) \left(\frac{F/P, i, n}{(1+i)^n} \right) \quad (15-8)$$

برای مثال فوق، ارزیابی معادل آینده با استفاده از معادل ۸-۱۳ به صورت زیر خواهد بود

$$\begin{aligned}
 FE(12) &= -28000 \left(\overset{F/P,12,4}{1.5740} \right) + 9500 \left(\overset{F/P,12,3}{1.4050} \right) + 7000 \left(\overset{F/P,12,2}{1.2542} \right) \\
 &\quad + 9500 \left(\overset{F/P,12,1}{1.1208} \right) + 17500 \left(\overset{F/P,12,0}{1.0000} \right) \\
 &= 6211
 \end{aligned}$$

یا با استفاده از معادله ۸-۱۵،

$$FE(12) = 3946 \left(\overset{F/P,12,4}{1.5740} \right) = 6211$$

چون مقدار معادل آینده بیش‌تر از صفر است، در نتیجه گزینه در نرخ ۱۲٪ مطلوب است.

۸-۳-۴- ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه

ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه احتمالاً بهترین روش برای مقایسه‌ی یک پیشنهاد مشخص با دیگر فرصت‌هایی است که ممکن است وجود داشته باشد، ولی معین نشده‌اند. نرخ بازگشت سرمایه یک شاخص جهانی از موفقیت اقتصادی است زیرا بازگشت دسته‌های مختلف فرصت‌ها اغلب به‌خوبی ایجاد شده و شناخته شده است. این روش اجازه مقایسه یک گزینه در مقابل نرم‌های قابل قبول را فراهم می‌کند. این ویژگی مقایسه نرخ بازگشت سرمایه در شرایطی که انتخاب یک گزینه به رد کردن یا قبول آن محدود می‌شود، به‌خوبی اقتباس شده است.

نرخ بازگشت سرمایه به‌عنوان شاخص سوددهی شناخته شده است. این نرخ به‌صورت نرخ بهره‌ای تعریف می‌شود که دریافت‌های معادل با پرداخت‌های معادل برابر شود. نرخ بهره‌ای که $FE(i)$ ، $PE(i)$ یا $AE(i)$ را برای یک سری از پرداخت‌ها و دریافت‌ها به صفر کاهش دهد یک راه دیگر تعریف نرخ بازگشت سرمایه است. از نظر ریاضی، نرخ بازگشت سرمایه برای یک سرمایه‌گذاری پیشنهادی یک نرخ بهره، i^* ، است که معادله زیر را ارضا کند

$$0 = PE(i^*) = \sum_{t=0}^n F_t (1+i^*)^{-t} \quad (۱۶-۸)$$

که در آن پیشنهاد عمری n ساله دارد.

به عنوان مثالی از ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه، مثال سیستم گرمایش می تواند با استفاده از نرخ بازگشت سرمایه معین شود که سرمایه گذاری انجام شده مطمئن خواهد بود. این کار می توان با معادل سازی هم معادل کنونی، هم معادل سالانه و هم معادل آینده انجام داد.

با معادل سازی مقدار معادل کنونی دریافت ها و پرداخت ها در $i = 15\%$ داریم

$$\begin{aligned} \left[9500 \overset{P/A, 15, 4}{(2.8850)} + 8000 \overset{P/F, 15, 4}{(0.5718)} \right] &= \left[28000 + 2500 \overset{P/F, 15, 2}{(0.7562)} \right] \\ [27408 + 4573] &= [28000 + 1890] \\ 31982 &= 29800 \end{aligned}$$

در $i = 20\%$

$$\begin{aligned} \left[9500 \overset{P/A, 20, 4}{(2.8850)} + 8000 \overset{P/F, 20, 4}{(0.5718)} \right] &= \left[28000 + 2500 \overset{P/F, 20, 2}{(0.7562)} \right] \\ [24592 + 3858] &= [28000 + 1736] \\ 28450 &= 29736 \end{aligned}$$

با درونیابی خواهیم داشت

$$\begin{aligned} i &= 15\% + (5) \left[\frac{[31982 - 29800] - 0}{[31982 - 29800] - [28450 - 29736]} \right] \\ i &= 18.15\% \end{aligned}$$

با این نتایج، یک گراف معادل کنونی به صورت شکل ۸-۶ می‌توان رسم کرد. این گراف نشان می‌دهد که نرخ بازگشت سرمایه بیش‌تر از ۱۸٪ است. این بدان معناست که سرمایه‌گذاری ۲۸۰۰۰ دلاری با نرخ بازگشت سرمایه برابر با ۱۸.۱۵٪ طی ۴ سال باز خواهد گشت.

۸-۳-۵- ارزیابی پرداخت

اغلب یک سیستم پیشنهادی می‌تواند در قالب اینکه چقدر طول می‌کشد تا از طریق درآمد، سود یا صرفه‌جویی هزینه خود را پرداخت کند. سیستم‌هایی مطلوب هستند که خودپرداخت را به سرعت انجام می‌دهند، زیرا عدم قطعیت کم‌تری در یک دوره‌ی کوتاه‌مدت‌تر وجود دارد. دوره پرداخت مدت زمان مورد نیاز برای صفر شدن اختلاف ارزش کنونی پرداخت و دریافت می‌باشد؛ ارزش سالانه پرداخت و دریافت می‌تواند برابر شود. در رویکرد معادل کنونی خواهیم داشت

$$0 \leq \sum_{t=0}^{n^*} F_t (1+i)^{-t} \quad (۸-۱۷)$$

کم‌ترین مقدار n^* که نامعادله بالا را ارضا کند دوره پرداخت خواهد بود.

برای یک دوره‌ی ۳ ساله معادله مربوط به معادل کنونی صرفه‌جویی‌ها و پرداخت‌ها به صورت زیر خواهد بود.

$$\left[9500 \overset{P/A, 12, 3}{(2.4018)} + 8000 \overset{P/A, 12, 3}{(0.7118)} \right] = \left[28000 + 2500 \overset{P/F, 12, 2}{(0.7972)} \right]$$

$$[22,817 + 5694] = [28000 + 1993]$$

$$28511 \neq 29993$$

برای یک دوره‌ی ۴ ساله نتایج به صورت زیر خواهد بود.

$$\left[9500 \left(\frac{P}{A}, 12, 4 \right) + 8000 \left(\frac{P}{A}, 12, 4 \right) \right] = \left[28000 + 2500 \left(\frac{P}{F}, 12, 2 \right) \right]$$

$$[22,855 + 5084] = [28000 + 1993]$$

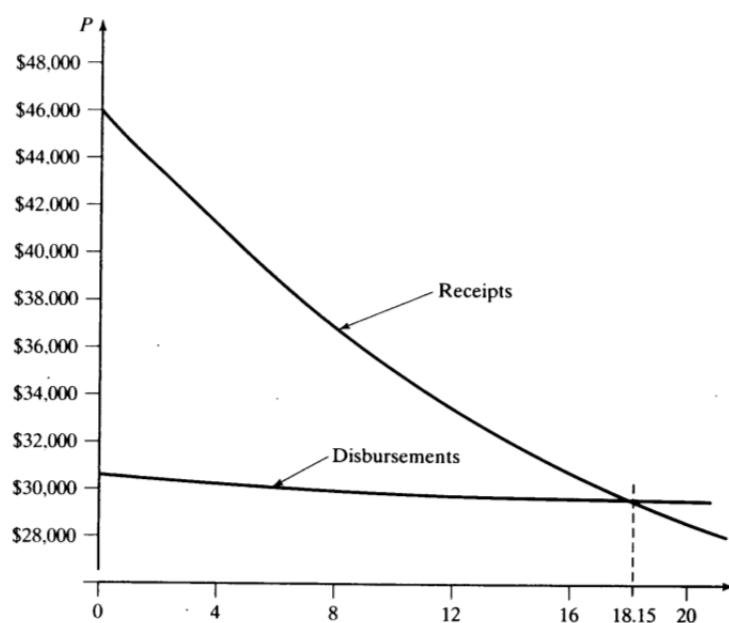
$$33939 \neq 29993$$

با درونیابی خواهیم داشت

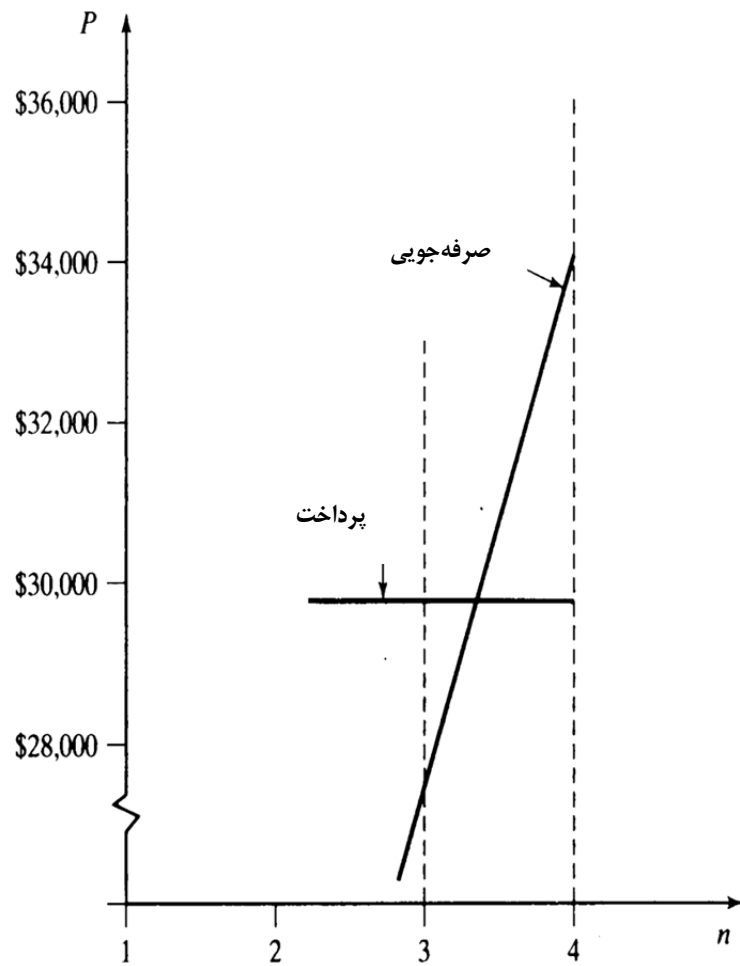
$$n = 3 + \frac{[28511 - 29993] - 0}{[28511 - 29993] - [33939 - 29993]}$$

$$n = 3.3$$

با استفاده از این نتایج، یک گراف معادل کنونی به صورت شکل ۸-۷ می‌توان ترسیم کرد. از طریق این گراف می‌توان دریافت که دوره پرداخت سیستم گرمایش بیش از ۳ سال است.



شکل ۸-۶- حل از طریق نرخ بازگشت سرمایه



شکل ۸-۷- حل برای دوره پرداخت

۸-۳-۶- هزینه معادل سالانه یک دارایی

یک کاربرد مفید ارزیابی معادل سالانه مربوط به هزینه یک دارایی است. هزینه هر دارایی شامل دو جزء است، هزینه استهلاک و هزینه بهره بالانس غیراستهلاکی. می‌توان نشان داد

که هزینه معادل سالانه یک دارایی از تابع استهلاک آن مستقل بوده و از آن برای نشان دادن ارزش دارایی در گذر زمان استفاده کرد.

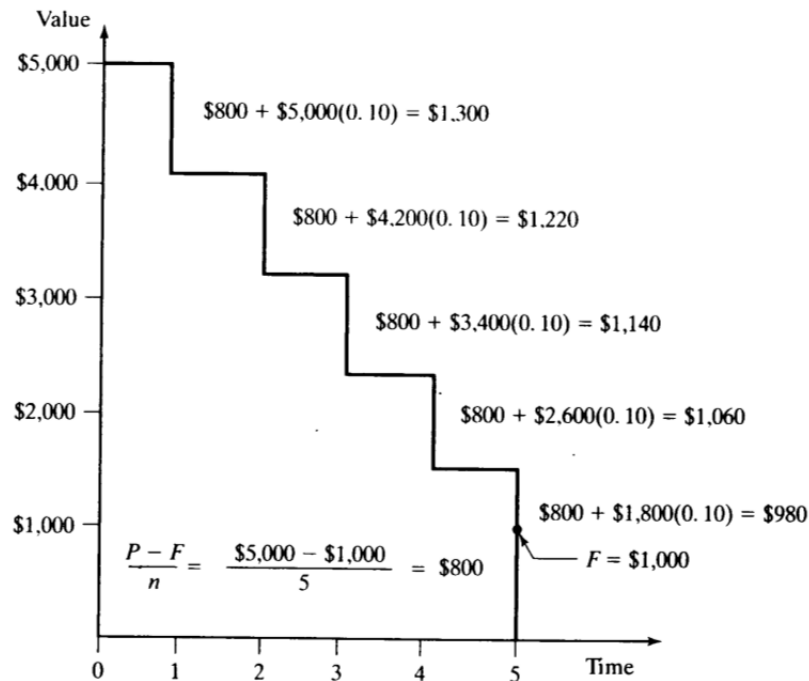
به عنوان مثال برای هزینه استهلاک و هزینه بالانس غیراستهلاکی، مثال زیر را که بر پایه استهلاک خطی است در نظر بگیرید. یک دارایی با هزینه اولیه ۵۰۰۰ دلار و ارزش اسقاطی ۱۰۰۰ دلار برای خدمت‌دهی طی ۵ سال مدنظر است و نرخ بهره ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. هزینه سالانه در شکل ۸-۸ نشان داده شده است.

هزینه‌ی معادل سالانه استهلاک به علاوه بهره بالانس غیراستهلاکی با استفاده از معادله ۹-۸ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} PE(10) &= 1300 \overset{P/F,10,1}{(0.9091)} + 1220 \overset{P/F,10,2}{(0.8265)} + 1140 \overset{P/F,10,3}{(0.7513)} \\ &\quad + 1060 \overset{P/F,10,4}{(0.6830)} + 980 \overset{P/F,10,5}{(0.6209)} \\ &= 4379 \end{aligned}$$

هزینه معادل سالانه دارایی از معادل ۸-۱۱ برابر خواهد بود با

$$AE(10) = 4379 \overset{A/P,10,5}{(0.2638)} = 1155$$



شکل ۸-۸- تابع ارزش- زمان

بدون توجه به تابع استهلاک که کاهش ارزش فیزیکی دارایی در گذر زمان را نشان می‌دهد، هزینه‌ی معادل سالانه یک دارایی را می‌توان به صورت معادل سالانه اولین هزینه منهای ارزش اسقاطی معادل به دست آورد. این هزینه معادل مقداری است که یک دارایی باید در هر سال جذب کند، اگر سرمایه باید در یک نرخ بازگشت سرمایه مشخص بازگردد. هزینه معادل سالانه به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$A = P \left(\frac{A/P, i, n}{\left(\right)} \right) - F \left(\frac{A/F, i, n}{\left(\right)} \right)$$

$$\left(\frac{A/F, i, n}{\left(\right)} \right) = \left(\frac{A/P, i, n}{\left(\right)} \right) - i$$

اما چون

$$A = P \left(\frac{A/P, i, n}{\quad} \right) - F \left[\left(\frac{A/P, i, n}{\quad} \right) - i \right]$$

پس داریم

$$A = (P - F) \left(\frac{A/P, i, n}{\quad} \right) + F(i) \quad (18-8)$$

این بدان معناست که هزینه معادل سالانه هر دارایی را می‌توان با دانستن هزینه اولیه، P ، زمان خدمت، n ، ارزش اسقاطی تخمین زده شده، F ، و نرخ بهره، i ، به دست آورد. برای مثال مطروح، یک دارایی با ارزش اولیه ۵۰۰۰، عمر خدمت‌دهی ۵ سال، ارزش اسقاطی ۱۰۰۰ دلار، با نرخ بهره ۱۰٪ هزینه معادل سالانه‌ای به صورت زیر خواهد داشت

$$(5000 - 1000) \left(\frac{A/P, i, n}{\quad} \right) + 1000(0.10) = 1155$$

فرمول هزینه معادل سالانه برای مطالعه "هزینه بایدی"^۱ مفید است. برای مثال، فرض کنید که یک پیمانکار باید از یک تجهیز، ابزار یا غیره برای یک قرارداد دفاعی خاص که هزینه‌ای برابر با ۳۲۵۰۰۰۰ دلار داشته و تا ۷۵۰۰۰۰ دلار پس از ۴ سال مستهلک می‌شود لازم دارد. اگر نرخ بهره ۱۰٪ باشد، هزینه معادل سالانه تجهیز پیمانکار به صورت زیر باید باشد

$$(3250000 - 750000) \left(\frac{A/P, 10, 4}{\quad} \right) + 750000(0.10) = 863750$$

ارزش معادل سالانه تنها یک جزء از کل "هزینه بایدی" قرار داد است. دیگر اجزا هزینه سالانه نیروی کار، مواد و بالاسری است.

1. Should Cost Study

۸-۴- ارزیابی چند گزینه

هنگامی که چند گزینه مستقل با ارزش برای خدمت‌دهی وجود دارد، مطلوب است که آن‌ها را به‌طور مستقیم با هم مقایسه کنیم. هنگامی که ارزش خدمت‌دهی گزینه‌ها متفاوت است هر گزینه باید به‌صورت جداگانه ارزیابی شده و با استفاده از روش‌های مقایسه قسمت ۳-۸ رد یا قبول شود. با این حال، در بسیاری شرایط، خروجی گزینه‌های در دست ارزشی یکسان دارند. در این شرایط، هدف، انتخاب گزینه‌ای است که کم‌ترین هزینه را تحمیل کند.

فرض کنید که یک پیمانکار صنایع دفاع، اکتساب یک مرکز آزمایش جدید را مدنظر قرار داده است. تجهیزات نیمه خودکار آزمایش برای هر مرکز آزمایش ۱۱۰۰۰۰ دلار هزینه داشته و می‌تواند برای ۶ سال مورد استفاده قرار گرفته شود و در انتهای دوره، ارزش اسقاطی معادل ۱۰۰۰۰ دلار خواهد داشت. هزینه‌های عملیاتی ۲۸۰۰۰ دلار در هر سال است. سیستم تمام خودکار هزینه‌ی اولیه معادل ۱۶۰۰۰۰ دلار داشته، ۶ سال کار می‌کند و ارزش اسقاطی آن ۱۴۰۰۰ دلار است. هزینه‌ی عملیاتی سالانه ۱۲۰۰۰ دلار است. در این مثال خدمات دو گزینه ارزش یکسانی را فراهم می‌کنند و از این نظر تفاوتی با هم ندارند. با نرخ بهره ۱۴٪ گزینه‌ای که معیار کم‌ترین هزینه را برآورده می‌کند، باید انتخاب شود.

این مثالی از اکتساب از طریق خرید است. تابع ارائه شده در معادله ۷-۱ به‌عنوان پایه و اساس مقایسه گزینه‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۸-۴-۱- ارزیابی معادل کنونی

در این روش، دو گزینه براساس هزینه معادلی که در زمان حال اتفاق می‌افتد با هم مقایسه می‌شوند. هزینه معادل کنونی تجهیز آزمایش نیمه خودکار در نرخ بهره ۱۴٪ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$PE(14) = 110000 + 28000 \left(\overset{P/A, 14, 6}{3.8887} \right) - 10000 \left(\overset{P/F, 14, 6}{0.4556} \right) = 214328$$

همین مقدار برای تجهیز تمام خودکار به صورت زیر است.

$$PE(14) = 160000 + 12000 \left(\overset{P/A, 14, 6}{3.8887} \right) - 14000 \left(\overset{P/F, 14, 6}{0.4556} \right) = 200286$$

این مقایسه نشان می‌دهد که تجهیز آزمایش تمام خودکار هزینه معادل کنونی کم‌تری داشته و صرفه‌جویی هزینه با انتخاب سیستم تمام خودکار در مقابل سیستم نیمه خودکار برابر با ۱۴۰۴۲ دلار خواهد بود.

۸-۴-۲- ارزیابی معادل سالانه

هزینه معادل سالانه به عنوان سری هزینه‌های یکسان طی عمر دارایی برای ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هزینه معادل سالانه تجهیز نیمه خودکار به صورت زیر به دست می‌آید

$$AE(14) = 110000 \left(\overset{A/P, 14, 6}{0.2572} \right) + 28000 - 10000 \left(\overset{A/F, 14, 6}{0.1175} \right) = 55118$$

همین مقدار برای تجهیز تمام خودکار به صورت زیر خواهد بود

$$AE(14) = 160000 \left(\overset{A/P, 14, 6}{0.2572} \right) + 12000 - 14000 \left(\overset{A/F, 14, 6}{0.1175} \right) = 51507$$

تفاوت معادل سالانه ۵۵۱۱۸ منهای ۵۱۵۰۷ یعنی ۳۶۱۱ دلار است و در نتیجه سیستم تمام خودکار هزینه معادل سالانه کم‌تری دارد. برای تایید اعتبار اختلاف به دست آمده می‌توان رابطه زیر را بررسی کرد.

$$14042 \left(\overset{A/P, 14, 6}{0.2572} \right) = 3611$$

۸-۴-۳- ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه

مقایسه‌های قبلی نشان داد که سیستم تمام خودکار در نرخ بهره ۱۴٪ مطلوب‌تر است. در نرخ بهره‌های بالاتر، دو گزینه می‌توانند ارزشی یکسان داشته یا حتی در نرخ‌های بهره خیلی بالا، سیستم نیمه خودکار ارزان‌تر تمام شود چون هزینه‌ی اولیه کم‌تری دارد. نرخ بهره‌ای که دو گزینه در آن مقادیر معادل کنونی برابری خواهند داشت با استفاده از حل معادله زیر برای نرخ بهره i قابل دستیابی است. بنابراین

$$\begin{aligned} 110000 + 28000 \left(\frac{P/A, i, 6}{P/F, i, 6} \right) - 10000 \left(\frac{P/F, i, 6}{P/F, i, 6} \right) \\ = 160000 + 12000 \left(\frac{P/A, i, 6}{P/F, i, 6} \right) - 14000 \left(\frac{P/F, i, 6}{P/F, i, 6} \right) \\ 16000 \left(\frac{P/A, i, 6}{P/F, i, 6} \right) + 4000 \left(\frac{P/F, i, 6}{P/F, i, 6} \right) = 50000 \end{aligned}$$

برای $i=20\%$

$$16000 \left(\frac{P/A, 20, 6}{P/F, 20, 6} \right) + 4000 \left(\frac{P/F, 20, 6}{P/F, 20, 6} \right) = 54548$$

برای $i=25\%$

$$16000 \left(\frac{P/A, 25, 6}{P/F, 25, 6} \right) + 4000 \left(\frac{P/F, 25, 6}{P/F, 25, 6} \right) = 48271$$

با درونی‌یابی داریم

$$i = 20 + (5) \frac{[54548 - 50000]}{[54548 - 48271]}$$

$$i = 23.6\%$$

اگر نرخ بهره زیر 23.6% باشد، سیستم تمام خودکار انتخاب خواهد شد و در نرخ‌های بالاتر از آن سیستم نیمه خودکار ارجح است.

۸-۴-۴- ارزیابی پرداخت

عمر خدمت‌دهی هر دو گزینه که ۶ سال است تنها در نتیجه یک تخمین به‌دست آمده و ممکن است دارای اشکال باشد. اگر نیاز باشد که خدمات در دوره‌های کوتاه‌تر یا بلندتر ارائه شود و اگر تجهیزات بتوانند دوره‌ی طولانی‌تری خدمت دهد، این موضوع برای یک گزینه یک مزیت به حساب می‌آید.

همان‌طور که یک نرخ بهره وجود دارد که هر دو گزینه مطلوبیت مساوی پیدا می‌کنند، یک عمر خدمت‌دهی نیز می‌توان به‌دست آورد که هزینه‌های معادل با هم برابر شود. این عمر خدمت با مساوی قرار دادن این گزینه‌ها با یکدیگر و حل عمر برای آن، n به‌دست می‌آید. بنابراین در نرخ بهره ۱۴٪ داریم

$$\begin{aligned} & 110000 + 28000 \left(\frac{P/A, 14, n}{P/F, 14, n} \right) - 10000 \left(\frac{P/A, 14, n}{P/F, 14, n} \right) \\ & = 160000 + 12000 \left(\frac{P/A, 14, n}{P/F, 14, n} \right) - 14000 \left(\frac{P/A, 14, n}{P/F, 14, n} \right) \\ & 16000 \left(\frac{P/A, 14, n}{P/F, 14, n} \right) + 4000 \left(\frac{P/A, 14, n}{P/F, 14, n} \right) = 50000 \end{aligned}$$

برای $n=4$ داریم

$$16000 \left(\frac{P/A, 14, 4}{P/F, 14, 4} \right) + 4000 \left(\frac{P/A, 14, 4}{P/F, 14, 4} \right) = 48988$$

برای $n=5$ داریم

$$16000 \left(\frac{P/A, 14, 5}{P/F, 14, 5} \right) + 4000 \left(\frac{P/A, 14, 5}{P/F, 14, 5} \right) = 57007$$

با درونیابی

$$n = 4 + (1) \frac{[50000 - 48988]}{[57007 - 48988]}$$

$$n = 4.12$$

بنابراین، اگر عمر خدمت کم‌تر از 4.12 سال باشد گزینه تجهیز نیمه خودکار و اگر بیش‌تر از آن باشد تجهیز تمام خودکار انتخاب می‌شود.

۸-۵- ارزیابی در حالت وجود چند معیار

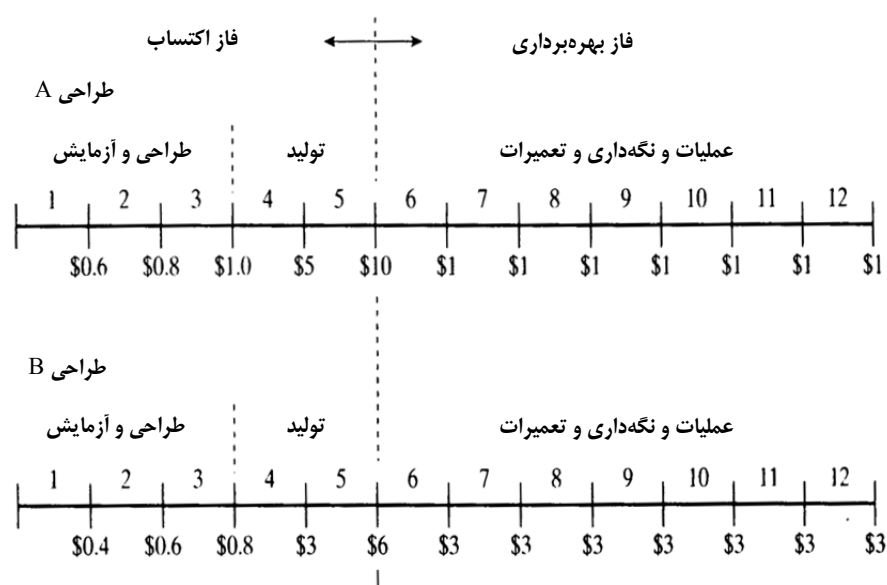
ارزیابی طراحی شامل چند معیار اولین بار در قسمت ۲-۴ معرفی شد. چند معیار هنگامی که هم فاکتورهای اقتصادی و هم فاکتورهای غیراقتصادی وجود داشته باشند، در تصمیم‌گیری مدنظر قرار می‌گیرند. این شرایط پیچیده می‌تواند توسط استفاده از یک یا چند روش ارائه شده در قسمت ۷-۴ ساده شده و مشخص گردد، یا از طریق نمایش ارزیابی تصمیم در قسمت ۷-۵ صورت گیرد.

به‌عنوان یک مثال از ارزیابی چند گزینه در شرایط قطعیت و حضور چند معیار، فرض کنید که دو طراحی برای اکتساب سیستم خودکار هشدار هوای نامساعد وجود دارد. هزینه‌ها (به میلیون دلار) برای چرخه عمر در شکل ۸-۹ تخمین زده شده است. علاوه‌بر این هزینه‌ها، معیارهای دیگری برای ارزیابی وجود دارد که در زیر ارائه شده است.

MTBF موردنیاز باید بیش‌تر از ۲۵۰۰ ساعت باشد. در این مثال طراحی A دارای MTBF ۳۰۰۰ ساعته بوده و این مقدار برای طراحی B ۱۵۰۰ ساعت است. هزینه‌های عملیات و نگهداری و تعمیرات برای گزینه B (۳۰۰۰۰۰۰) نشان‌دهنده‌ی فراوانی بیش‌تر طراحی B در مقابل طراحی A است که این مقدار تنها ۱۰۰۰۰۰۰ دلار است. سایر معیارها و فاکتورهای عملکردی و اثربخشی برای دو طرح یکسان فرض شده است.

معیار دیگر محدودیت بودجه طی اکتساب و بهره‌برداری است که به صورت زیر مشخص شده است:

۱. نیازمندی سرمایه در هر سال از فاز اکتساب نباید بیش‌تر از ۷۳۰۰۰۰۰ دلار باشد.
۲. هزینه‌های عملیات و نگهداری و تعمیرات در فاز بهره‌برداری نباید بیش‌تر از ۲۰۰۰۰۰۰ دلار باشد.



شکل ۸-۹- دو گزینه طراحی برای اکتساب سیستم

اگرچه انتخاب‌های دیگری نیز وجود دارند، این دو گزینه توسط هزینه‌های معادل در انتهای فاز اکتساب (زمانی که سیستم عملیاتی می‌شود) مقایسه می‌شوند. برای طراحی A هزینه چرخه‌ی عمر معادل این زمان در نرخ بهره ۱۰٪ به صورت زیر است.

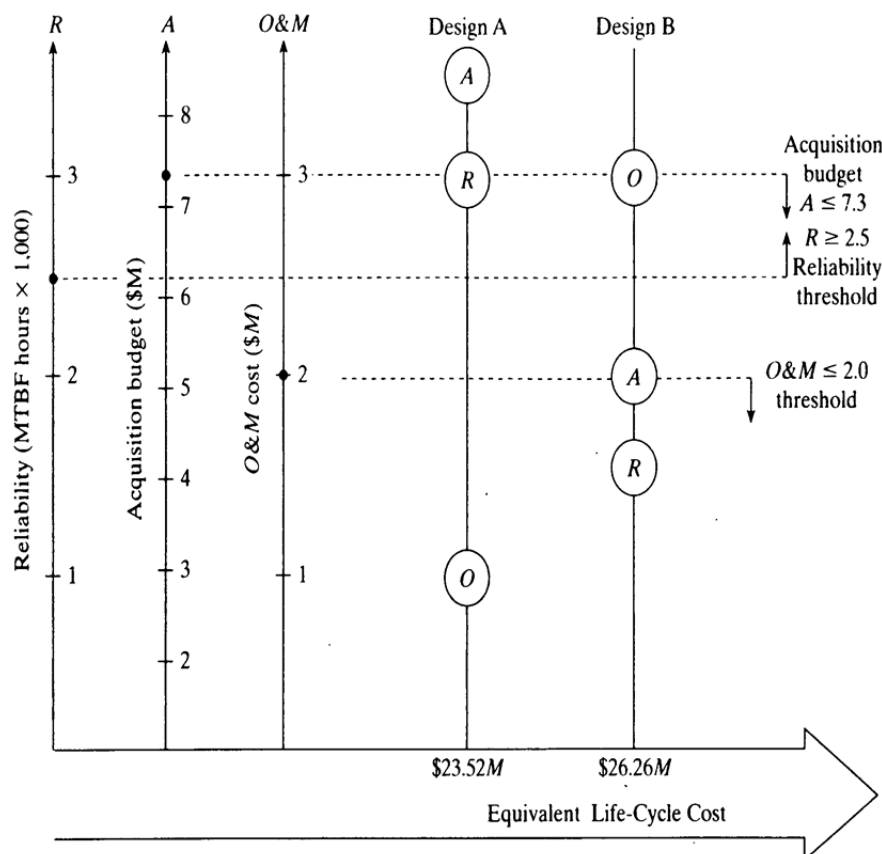
$$10 + 5 \left(\overset{F/P,10,1}{1.100} \right) + 1 \left(\overset{F/P,10,2}{1.210} \right) + 0.8 \left(\overset{F/P,10,3}{1.331} \right) + 0.6 \left(\overset{F/P,10,4}{1.464} \right) \\ + 1 \left(\overset{P/A,10,7}{4.8684} \right) = 23.52$$

همین مقدار برای طراحی B داریم

$$6 + 3 \left(\overset{F/P,10,1}{1.100} \right) + 0.8 \left(\overset{F/P,10,2}{1.210} \right) + 0.6 \left(\overset{F/P,10,3}{1.331} \right) + 0.4 \left(\overset{F/P,10,4}{1.464} \right) \\ + 3 \left(\overset{P/A,10,17}{4.8684} \right) = 26.26$$

اگر هزینه چرخه‌ی عمر تنها موضوع موردنظر بود، گزینه A ترجیح داده می‌شد، زیرا 23.52 کمتر از 26.62 است. با این حال این یک مساله چند معیاره بوده و با استفاده از نمایش ارزیابی تصمیم که در شکل ۸-۱۰ نمایش داده شده است، انجام می‌گیرد (به قسمت ۷-۵ مراجعه کنید).

اگرچه گزینه A هزینه چرخه‌ی عمر معادل کمتری دارد، اما از محدودیت بودجه تجاوز می‌کند. طراحی B هر دو نیازمندی MTBF و محدودیت بودجه برای عملیات و نگهداری و تعمیرات را رعایت نمی‌کند. بنابراین، تصمیم گیرنده باید یا طراحی A را با وجود تجاوز از بودجه اکتساب قبول کند یا این که به دنبال یک گزینه قابل قبول دیگر باشد. انتخاب باید بر پایه ارزیابی ذهنی تصمیم گیرنده انجام شود.



شکل ۸-۱۰- نمایش ارزیابی تصمیم برای دو طراحی

۸-۶- چند گزینه با چند آینده

یک شرکت مهندسی در طراحی یک ابزار ماشینی خاص فعالیت می‌کند. چون ابزار ماشینی از نظر فناوری پیشرفته است، شرکت ایجاد یک تسهیل تولیدی جدید جدا از عملیات دیگرش را مدنظر قرار داده است.

از آن‌جا که توانمندی مالی شرکت نمی‌تواند تهیه چنین تسهیلات جدید را پشتیبانی کند، نیاز است که منابع مالی برای این کار قرض گرفته شود. این شرکت سه منبع مالی که A، B و C را شناسایی کرده که می‌تواند از آن‌ها پول موردنیاز را تهیه کند.

هر یک از این منابع مالی بر پایه فروش‌های پیش‌بینی شده محصولات، پول قرض می‌دهند و از نرخ بهره‌های مختلف بر پایه تقاضای پیش‌بینی شده محصولات استفاده می‌کنند. اگر تقاضای محصول پیش‌بینی شده برای چند سال آینده کم باشد، حامیان مالی نرخ بهره بالایی را در نظر می‌گیرند. این بدین دلیل است که حامیان مالی فکر می‌کنند اگر محصول به خاطر پایین بودن تقاضا شکست بخورد، شرکت ممکن است نتواند پول قرض گرفته شده را در آینده پرداخت کند.

در مقابل، اگر منابع مالی احساس کنند که تقاضایی بالایی وجود خواهد داشت، مایل خواهند بود پول خود را با نرخ بهره پایین‌تری قرض دهند. زیرا امکان اینکه محصول پیشرفت کرده و سهم زیادی در بازار کسب کند را برای شرکت بالا می‌دانند. شرکت مهندسی، دریافت‌ها و پرداخت‌های مربوط به هر سطح تقاضا و منابع مالی مدنظر را با دقتی مناسب تخمین زده است. شرکت در مورد مبلغ سرمایه‌گذاری اولیه و دریافت‌ها طی ۳ سال آینده برای هر سطح از تقاضا آگاهی دارد که در جدول ۸-۴ خلاصه شده است. نرخ بهره‌های هر یک از منابع مالی در جدول ۸-۵ خلاصه شده است.

شرکت مهندسی می‌خواهد یک منبع مالی را در مقابل سه سطح ممکن تقاضا در آینده بدون آگاهی از آنکه کدام آینده اتفاق می‌افتد، انتخاب کند. بر این اساس، یک ماتریس ارزیابی تصمیم در گام اول توسعه می‌یابد. با استفاده از رویکرد معادل کنونی، ۹ مقدار ارزیابی استخراج شده و در جدول ۸-۶ نمایش داده شده است، که هر کدام برای یک منبع مالی و

یک سطح تقاضا به دست آمده است. بری مثال، اگر منبع مالی A انتخاب شده و سطح تقاضا پایین باشد، معادل کنونی به صورت زیر به دست می‌آید

$$PE(15) = -500 + 400(P/A, 15, 3) = 413$$

جدول ۸-۴- پرداخت‌ها و دریافت‌های پیش‌بینی شده برای تولید ابزار ماشینی (به هزار دلار)

دریافت سالانه	سرمایه اولیه	سطح تقاضا
۴۰۰	۵۰۰	پایین
۷۰۰	۱۳۰۰	متوسط
۹۰۰	۲۰۰۰	بالا

جدول ۸-۵- نرخ‌های بهره پیش‌بینی شده تامین مالی تولید

نرخ بهره	سطح تقاضا	منبع مالی
۱۵	پایین	A
۱۳	متوسط	
۷	بالا	
۱۴	پایین	B
۱۲	متوسط	
۸	بالا	
۱۵	پایین	C
۱۱	متوسط	
۸	بالا	

اگر شرکت احتمالات مربوط به هر یک از آینده‌های تقاضا را اعمال کند، تصمیم مالی به‌صورت یک تصمیم در شرایط ریسک تبدیل می‌شود. اگر احتمال تقاضای پایین 0.3، احتمال تقاضای متوسط 0.2، و احتمال تقاضای بالا 0.5 باشد، مقدار معادل کنونی مورد انتظار از هر یک از منابع مالی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A : 413(0.3) + 353(0.2) + 362(0.5) = 376$$

$$B : 429(0.3) + 382(0.2) + 320(0.5) = 365$$

$$C : 343(0.3) + 411(0.2) + 406(0.5) = 388$$

بر این اساس، منبع مالی C توسط این قانون انتخاب می‌شود.

در حالتی که شرکت نتواند احتمالات آینده‌های تقاضا را تخصیص دهد، تصمیم تعیین منبع مالی باید تحت عدم قطعیت صورت گیرد. تحت معیار لاپلاس، هر آینده با احتمال یکسان اتفاق می‌افتد و در نتیجه معادل کنونی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A : (413 + 353 + 362) \div 3 = 376$$

$$B : (429 + 382 + 320) \div 3 = 377$$

$$C : (343 + 411 + 406) \div 3 = 386$$

جدول ۸-۶- معادل کنونی پرداخت برای سه منبع مالی

منبع	سطح تقاضا		
	پایین	متوسط	بالا
A	۴۱۳	۳۵۳	۳۶۲
B	۴۲۹	۳۸۲	۳۲۰
C	۳۴۳	۴۱۱	۴۰۶

در نتیجه منبع مالی C با این قانون انتخاب می‌شود.

با استفاده از قانون maximin، شرکت حداقل مقدار معادل کنونی را که برای هر منبع مالی محاسبه شده و بیش‌ترین مقدار انتخاب می‌شود. این مقادیر حداقل عبارت‌اند از

$$A : 353$$

$$B : 320$$

$$C : 343$$

در نتیجه با این قانون تصمیم‌گیری گزینه A انتخاب می‌شود که بیش‌ترین مقدار حداقل برای مقدار معادل کنونی را داراست.

با استفاده از قانون maximax، شرکت حداکثر مقداری معادل کنونی را محاسبه کرده و از بین آن‌ها بیش‌ترین آن‌ها را انتخاب می‌کند. این مقادیر حداکثر به‌صورت زیر است

$$A : 413$$

$$B : 429$$

$$C : 411$$

با استفاده از این قانون منبع مالی B انتخاب می‌شود که دارای بیش‌ترین مقدار معادل کنونی است. خلاصه‌ای از نتایج هر قانون تصمیم‌گیری برای انتخاب منبع مالی در جدول ۷-۸ فراهم شده است.

جدول ۷-۸- خلاصه مساله انتخاب منبع مالی

قانون تصمیم	منبع مالی		
	A	B	C
ارزش انتظاری			X
لاپلاس			X
Maximin	X		
Maximax		X	

۸-۷- ارزیابی اقتصادی نقطه سر به سر

تحلیل نقطه سر به سر می‌تواند به صورت ریاضی یا گرافیکی انجام شود. این تکنیک ارزیابی اقتصادی در ارتباط با هزینه‌های ثابت و متغیر نسبت به ساعات انجام عملیات، تعداد واحدهای تولید شده، یا دیگر شاخص‌های اندازه‌گیری فعالیت‌های عملیاتی مفید است. در هر مورد، نقطه سر به سر مرکز توجه بوده که در آن بازه‌ای از متغیر تصمیم که از نظر اقتصادی مطلوب‌ترین است، شناسایی می‌شود.

هنگامی که دو یا چند گزینه تابعی از یک متغیر یکسان باشند، پیدا کردن مقداری که هزینه گزینه‌های مختلف در آن برابر باشد، مفید خواهد بود. مثال‌های متعددی در این قسمت ارائه شده است.

۸-۷-۱- ارزیابی ساخت یا خرید

در بسیاری از موارد، شرکت تولیدکننده می‌تواند بین خرید یا تولید یک جزء مشخص برای استفاده در محصول نهایی که تولید می‌کند، حق انتخاب داشته باشد. هنگامی که این مورد مدنظر باشد، شرکت با یک تصمیم ساخت یا خرید مواجه است.

برای مثال فرض کنید که شرکت متوجه می‌شود که منبع تامین برق برای سیستمی که تولید می‌کند، می‌تواند به قیمت هر واحد ۸ دلار خریداری کند. به جای آن، فرض کنید که شرکت می‌تواند همان واحد را با هزینه متغیر ۴ دلار برای هر واحد تولید کنید. تخمین زده می‌شود که یک هزینه ثابت ۱۲۰۰۰ دلاری در هر سال برای تولید این واحدها نیاز است. تعداد واحدهایی که نقطه سر به سر دو گزینه در دست است به تصمیم‌گیری کمک خواهد کرد.

ابتدا، هزینه کل سالانه به صورت تابعی از تعداد واحدها برای گزینه تولید فرمول بندی می‌شود که عبارتست از

$$TC_M = 12000 + 4N$$

هزینه کل سالانه برای گزینه خرید به صورت زیر خواهد بود

$$TC_B = 8N$$

نقطه سر به سر زمانی به دست می‌آید که $TC_M = TC_B$ یا

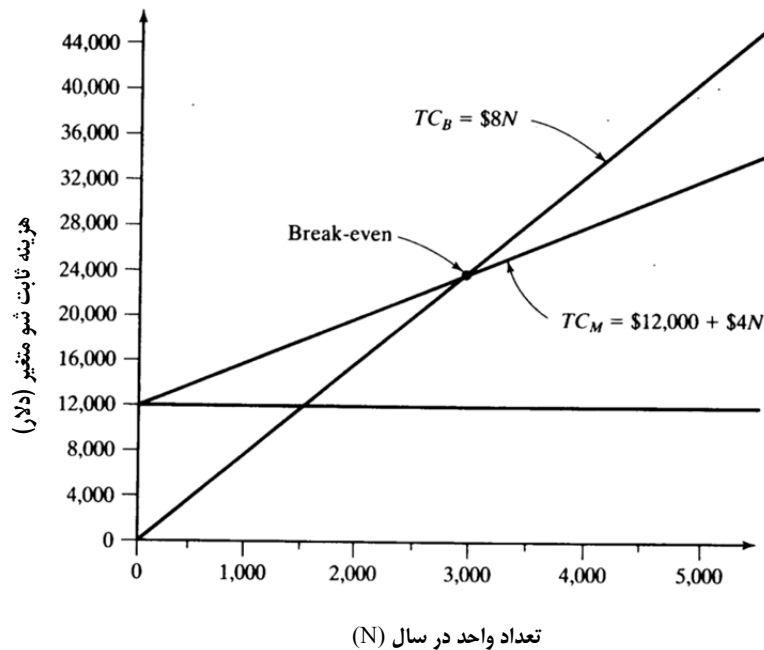
$$12000 + 4N = 8N$$

$$4N = 12000$$

$$N = 3000$$

این توابع هزینه و نقطه سر به سر در شکل ۸-۱۱ نشان داده شده است. برای یک نیازمندی که از ۳۰۰۰ واحد در هر سال تجاوز کند، گزینه تولید اقتصادی تر است. اگر نرخ استفاده کم تر از ۳۰۰۰ در سال باشد، خرید آن گزینه بهتری خواهد بود.

اگر نیازمندی تولید طی برنامه تولید تغییر کند، نقطه سر به سر در شکل ۸-۱۱ به تصمیم گیرنده کمک می‌کند تا بین دو گزینه خرید یا تولید بهترین را انتخاب کند. انحراف اندک پایین یا بالای ۳۰۰۰ واحد در سال تفاوت اندکی ایجاد می‌کند. با این حال، این تفاوت هنگامی که نیازمندی‌ها با مقدار ۳۰۰۰ واحد در سال اختلاف زیادی داشته باشد قابل توجه می‌شود.



شکل ۸-۱۱- نقطه سربه سر تولید یا خرید

۸-۷-۲- ارزیابی خرید یا اجاره

به‌عنوان مثال دیگری از تحلیل نقطه سر به سر، فرض کنید باید بین خرید یا اجاره یک تجهیز تصمیم گرفته شود. فرض کنید که رایانه‌ی الکترونیکی کوچکی برای پردازش داده در یک دفتر مهندسی نیاز است. فرض کنید که رایانه را می‌توان با هزینه ۵۰ دلار در هر روز اجاره کرد که این هزینه شامل هزینه نگهداری و تعمیرات آن نیز می‌شود. به جای آن، می‌توان رایانه را با قیمت ۲۵۰۰۰ دلار خریداری کرد.

تخمین زده می‌شود که رایانه عمر مفیدی برابر با ۱۵ سال داشته و ارزش اسقاطی آن ۴۰۰۰ دلار در پایان این زمان باشد. اگر نرخ بهره ۹٪ بوده و هزینه عملیات رایانه ۵۰ دلار در روز باشد، چه تعداد روز در هر سال رایانه باید کار کند تا دو گزینه سر به سر شوند؟

ابتدا، هزینه سالانه رایانه اجاره شده به صورت زیر نوشته می شود

$$\begin{aligned} TC_L &= (50 + 50)N \\ &= 100N \end{aligned}$$

و هزینه معادل سالانه را برای گزینه خرید رایانه به صورت زیر به دست می آوریم

$$\begin{aligned} TC_B &= (25000 - 4000)^{A/P, 9, 15} (0.1241) + 4000(0.09) + 2800 + 50N \\ &= 2606 + 360 + 2800 + 50N \\ &= 5766 + 50N \end{aligned}$$

سه عبارت اول هزینه ثابت و عبارت آخر هزینه متغیر است. نقطه سر به سر زمانی حاصل

می شود که $TC_L = TC_B$ یا

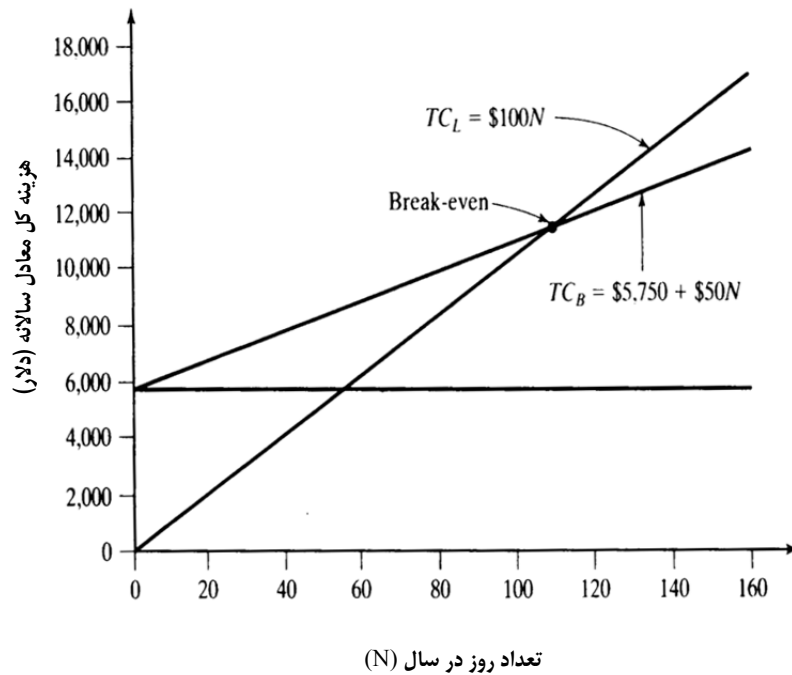
$$100N = 5766 + 50N$$

$$50N = 5766$$

$$N = 115$$

نمایش گرافیکی شرایط تصمیم برای این مثال در شکل ۸-۱۲ نشان داده شده است.

برای همه سطوحی که از ۱۱۵ روز در سال تجاوز می کند، خرید رایانه اقتصادی تر بوده و برای مقادی کمتر از آن اجاره آن بهتر است.



شکل ۸-۱۲- نقطه سر به سر خرید یا اجاره

۸-۷-۳ - ارزیابی انتخاب تجهیز

فرض کنید که یک کنترل‌کننده‌ی تمام خودکار برای مرکز بارگیری را می‌توان با هزینه ۱۴۰۰۰۰ دلار تهیه کرده و ارزش اسقاطی آن پس از چهار سال ۲۰۰۰۰ دلار تخمین زده می‌شود. هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات آن ۱۲۰۰۰ دلار در سال خواهد بود و هزینه‌ی عملیاتی آن ۸۵ دلار در ساعت است.

گزینه دیگر، یک کنترل کننده‌ی نیمه خودکار است که با هزینه ۵۵۰۰۰ دلار تهیه می‌شود. این دستگاه پس از ۴ سال ارزش اسقاطی ندارد. هزینه‌ی عملیات و نگهداری و تعمیرات آن ۱۴۰ دلار در هر ساعت تخمین زده شده است.

با نرخ بهره ۱۰٪، هزینه کل معادل سالانه برای نصب دستگاه تمام خودکار به‌عنوان تابعی از ساعات استفاده از آن در سال به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$TC_A = (140000 - 20000) \left(\frac{A/P}{10,4} \right) + 20000(0.10) + 12000 + 85N$$

$$= 51800 + 85N$$

هزینه کل معادل سالانه برای نصب دستگاه نیمه خودکار به‌عنوان تابعی از ساعات استفاده از آن در سال به‌صورت زیر است

$$TC_S = 55000 \left(\frac{A/P}{10,4} \right) + 140N$$

$$= 17400 + 140N$$

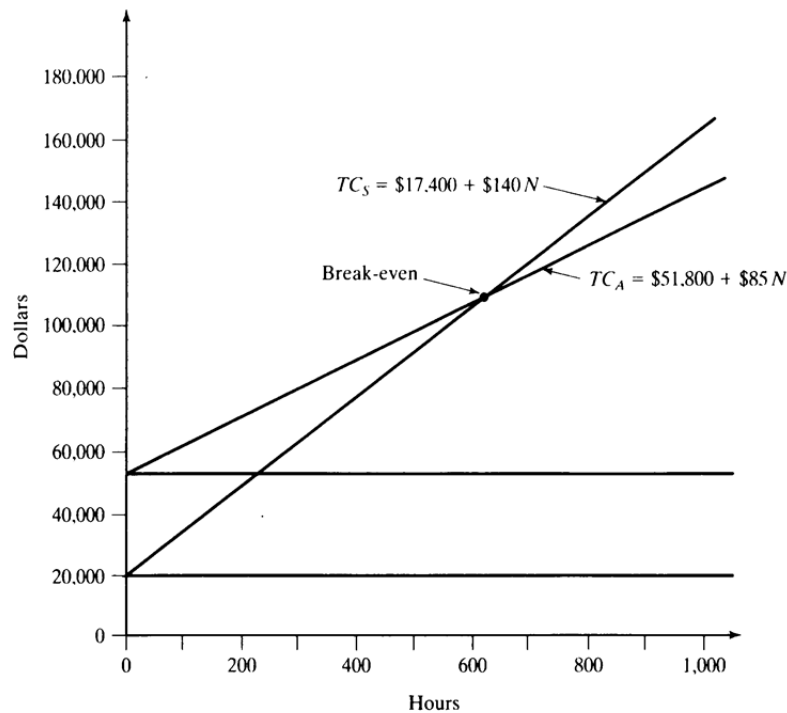
سر به سر بودن زمانی اتفاق می‌افتد که $TC_A = TC_S$ یا

$$51800 + 85N = 17400 + 140N$$

$$55N = 34400$$

$$N = 625$$

شکل ۸-۱۳ توابع هزینه دو گزینه و نقطه سر به سر را نشان می‌دهد. برای نرخ استفاده بیش‌تر از ۶۲۵ ساعت در سال کنترل کننده تمام خودکار اقتصادی‌تر بوده و برای مقادیر کم‌تر از این مقدار گزینه کنترل کننده نیمه خودکار انتخاب می‌شود.



شکل ۸-۱۳- نقطه سر به سر برای انتخاب تجهیز

۸-۷-۴- ارزیابی قابلیت سود دهی

دو جنبه در عملیات تولید وجود دارد. یکی شامل مونتاژ تجهیزات سیستم تولید، مواد، و افراد است و دیگری شامل فروش محصولات تولید شده است. موفقیت اقتصادی یک شرکت بستگی به توانمندی آن در انجام این فعالیت‌ها است به‌طوری که تفاوتی بین خالص درآمدها و هزینه‌های تولید باشد.

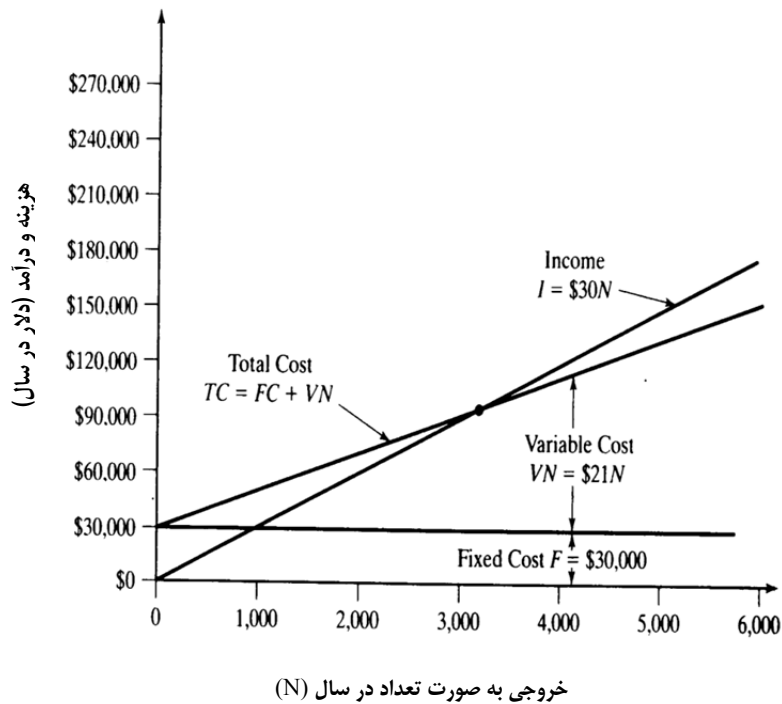
تحلیل خطی سر به سر یک ابزار مفید در ارزیابی اثر عملیات جدید پیشنهادی که هنوز پیاده سازی نشده است و هیچ اطلاعاتی از آن وجود ندارد، بر درآمد است. فرض کنید که یک فعالیت پیشنهادی شامل تولید و بازاریابی یک آیتم پلاستیکی مشخص است که قیمت فروش هر واحد

آن ۳۰۰۰۰ دلار تخمین زده می‌شود. ماشین مورد نیاز برای انجام عملیات ۱۴۰۰۰۰ دلار هزینه داشته و عمر مفید آن ۹ سال تخمین زده می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که هزینه‌ی تولید، شامل برق، نیروی کار، فضا و هزینه‌های فروش ۲۱ دلار برای هر واحد فروخته شده باشد. هزینه مواد برای هر واحد ۹.۵ دلار خواهد بود. در نظر گرفتن نرخ بهره ۱۲٪ برای توجیه نیازمندی‌های سرمایه‌گذاری لازم است. هزینه‌های پیش‌بینی شده برای این کار در جدول ۸-۸ نمایش داده شده است.

جدول ۸-۸- هزینه‌های متغیر و ثابت تولید

هزینه متغیر	هزینه ثابت	
	26278	بازگشت سرمایه
	$140000(A/P, 12, 8)$	
	2000	بیمه و مالیات
0.5/unit	1722	تعمیرات و نگهداری
9.5/unit		مواد
11.00/unit		نیروی کار
21.00/unit	30000	مجموع

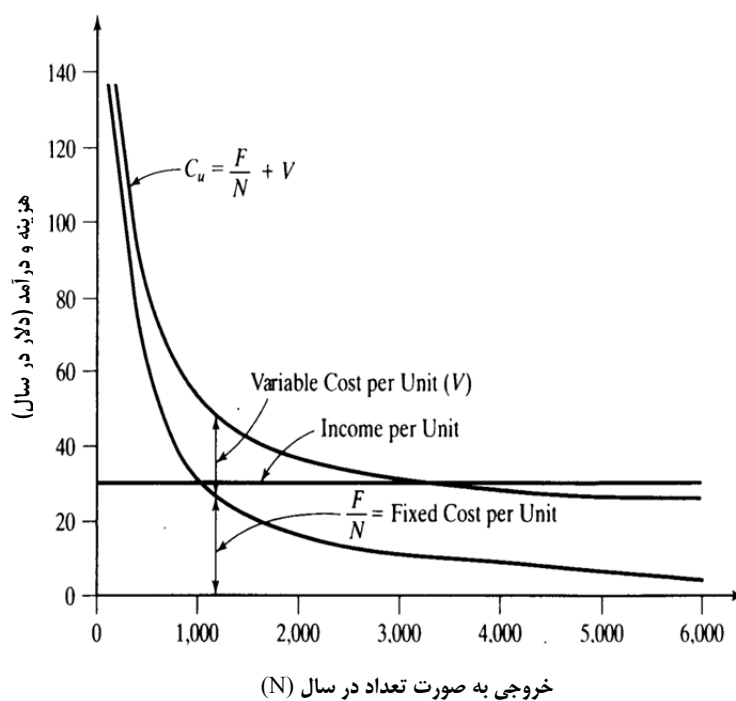
دشواری ایجاد یک تفاوت روشن بین هزینه‌های ثابت و متغیر در آیتیم تعمیرات و نگهداری مشخص می‌شود. در عمل، مشکل است که بین تعمیراتی که بر اثر استهلاک ایجاد می‌شود و آن‌هایی که به خاطر فرسودگی حاصل می‌گردد، تمایز قایل شد. با این حال، در تئوری، تمایز بین آن‌ها به‌صورتی که در این مثال دیده می‌شود، اعمال می‌شود و چنین فرض می‌شود که تعمیرات بر اثر فرسودگی ایجاد شده و به‌طور مستقیم به تعداد واحدهای تولیدی بستگی دارد. استهلاک نیز بدون شک باید به‌عنوان یک هزینه متغیر در نظر گرفته شود.



شکل ۸-۱۴- هزینه ثابت، متغیر و درآمد در هر سال

در این مثال، $F=30000$ ، $TC=30000+21N$ ، و $I=30N$. اگر F ، TC و I نسبت به N که از 0 تا 6000 واحد تغییر می‌کند رسم شود، نتایج به صورت شکل ۸-۱۴ قابل ترسیم است.

هزینه تولید آیتم پلاستیکی نسبت به تعداد تولید در سال متغیر است. هزینه تولید هر واحد توسط $F/N + V$ مشاهده می‌شود. اگر هزینه تولید واحد، هزینه متغیر واحد، و درآمد واحد نسبت به N مشابه رسم شود، نتایج به صورت شکل ۸-۱۵ خواهد شد. باید توجه شود که هزینه ثابت به ازای تولید یک واحد می‌تواند بی‌نهایت باشد. بنابراین، در تعیین هزینه‌های واحد، هزینه ثابت تا زمانی که تعداد واحدها مشخص نباشد، بی‌معنا است.



شکل ۸-۱۵- هزینه ثابت، متغیر، و درآمد برای هر واحد

درآمد برای اکثر سازمان‌ها به‌طورمستقیم بخشی از تعداد واحدهای فروخته شده است. با این حال، مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر برای یک واحد ممکن است به‌سادگی از درآمد واحد در حجم کم تجاوز کند. این موضوع توسط منحنی کل هزینه واحد و منحنی درآمد واحد در شکل ۸-۱۵ نشان داده شده است.

۸-۸- ارزیابی نقطه سر به سر در شرایط ریسک

در قسمت ۷-۸، تحلیل خرید یا تولید به کمک نمودار ۸-۱۱ نشان داد که نقطه سر به سر برای تصمیم‌گیری برای خرید یا تولید در کجا قرار دارد. تحلیل در شرایط قطعیت در مورد تقاضای

تامین نیروی برق انجام شد. اما عموماً تصمیم گیرنده با قطعیت نمی‌داند که سطح تقاضا چقدر خواهد بود.

فرض کنید که بازه تقاضا بین ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰۰ واحد بوده و احتمالات مرتبط با آن در جدول ۹-۸ ارائه شده است.

هزینه تولید و هزینه خرید با استفاده از معادلات قسمت ۷-۸ محاسبه شده و در شکل ۱۱-۸ نشان داده شده است.

جدول ۹-۸- بازه تقاضای خرید یا ساخت

	تقاضا						
	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
احتمال	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.15	0.10
هزینه ساخت	18000	20000	22000	24000	26000	28000	30000
هزینه خرید	12000	16000	20000	24000	28000	32000	36000

هزینه مورد انتظار را می‌توان با استفاده از احتمالات مربوط به هر سطح تقاضا که در

جدول ۹-۸ داده شده است محاسبه کرد

$$1500(0.05) + 2000(0.10) + 2500(0.15) + 3000(0.20) + 3500(0.25) \\ + 4000(0.15) + 4500(0.10) = 3175$$

از معادلات برای این وضعیت تصمیم‌گیری، هزینه کل مورد انتظار برای ساخت به صورت زیر به دست می‌آید

$$TC_M = 12000 + 4(3175) \\ = 24700$$

و هزینه کل انتظاری برای گزینه خرید

$$TC_B = 8(3175) \\ = 25400$$

بر این اساس، منبع برق باید ساخته شود. به طور جایگزین، می‌توان بر اساس معیار محتمل‌ترین آینده تصمیم‌گیری کرد. با استفاده از جدول ۸-۹ واضح است که سطح تقاضای ۳۵۰۰ واحدی از همه محتمل‌تر است. بنابراین هزینه ساخت برابر با ۲۶۰۰۰ بوده و نسبت به هزینه خرید که ۲۸۰۰۰ دلار است کم‌تر بوده و گزینه ساخت انتخاب می‌شود. این تصمیم با رویکرد تقاضای انتظاری نتیجه مشابهی ایجاد می‌کند.

۸-۹- خلاصه فصل

در بازار جهانی که هر روز رقابتی‌تر می‌شود، امکان‌سنجی اقتصادی در مرکز توجه قرار گرفته است. رویکرد مهندسی برای توجه به فاکتورهای فیزیکی در ایجاد مطلوبیت در حوزه‌ی اقتصادی پیشرفت کرده و تا جایی گسترده شده است که یک بازار موفق اغلب به توانمندی ادغام فاکتورهای فیزیکی و اقتصاد بستگی خواهد داشت. به‌طور کلی، پیش نیاز اساسی در استقرار یک مهندسی موفق، اقتصادی بودن آن است.

اکثر گزینه‌های طراحی و عملیاتی می‌توانند در قالب دریافته‌ها و پرداخت‌ها در گذر زمان بیان شوند. در چنین موردی، تقلیل این مقادیر پولی به یک پایه اقتصادی مشترک برای یک تصمیم‌گیری معتبر یک الزام است. در این فصل، مدل جریان پول برای همه مثال‌ها و کاربردها مورد استفاده قرار گرفت. این مدل با استفاده از یک خانواده از فرمول‌های نرخ بهره و یک فاکتور واحد نرخ بهره اعمال شد. مدل‌سازی جریان پول هم‌چنین پایه و اساس در نظر گرفتن ارزش زمانی طی چرخه‌ی عمر سیستم است. بر این اساس، اقتصاد مهندسی چرخه‌ی عمر، موضوع اصلی این فصل است و در موضوعات مقرون به صرفه بودن طراحی در فصل ۱۷ بیش‌تر مورد استفاده و بحث بررسی قرار می‌گیرد.

این فصل تنها مفاهیم و روش‌های پایه تحلیل را توسعه داده است که زمینه‌ساز ارزیابی اقتصادی بودن سیستم‌ها، محصولات و خدمات در غالب ارزش و هزینه خواهد بود. اصول اساسی دانش مربوطه فراتر از آن است که در این فصل ارائه شد. برای مطالعه‌ی بیش‌تر در زمینه‌ی موضوعات این فصل خواننده می‌تواند به G.J. Thuesen and W.J. Fabrycky, Engineering Economy, 9th ed., Prentice-Hall, 2001 هم‌چنین ۱۲ ماژول یادگیری تحت عنوان Economy 2.0 در وب‌سایت <http://www.a2i2.com> در قسمت Products موجود است. پیشنهاد می‌شود که این ماژول‌ها را دانلود کرده و هنگام مطالعه این فصل از آن‌ها استفاده شود.

هر دو انجمن American Society for Engineering Education و the Institute of Industrial Engineers بخش‌های اقتصاد مهندسی دارند که جزئی از سازمان این انجمن‌هاست. این بخش‌ها برای پیشرفت و کاربردی کردن اقتصاد مهندسی فعالیت می‌کنند. اطلاعات جزئی و مفصل‌تر در مورد اهداف و فعالیت‌های این بخش‌ها از دو وب‌سایت به آدرس‌های <http://www.asee.org> و <http://www.iienet2.org> قابل دستیابی است.

یک مجله با عنوان The Engineering Economist وجود دارد که با همکاری ASEE EED و IIE EED منتشر می‌شود. این مجله بهترین منبع در مورد ادبیات فنی موضوعات اقتصادی سرمایه‌گذاری است.

سوالات و مسائل

۱. چه مقدار پول باید سرمایه‌گذاری شود تا پس از ۸ سال معادل ۱۰۰۰۰ دلار باشد اگر نرخ ترکیب سالانه ۶٪ باشد؟
۲. در موارد سرمایه‌گذاری زیر مقدار تجمعی چقدر خواهد بود؟
الف. سالانه ۸۰۰۰ دلار با نرخ ترکیب ۷٫۲٪ برای ۱۰ سال
ب. سالانه ۵۲۵۰۰ دلار با نرخ ترکیب ۸٪ برای ۵ سال
۳. مقدار معادل کنونی برای یک سری پرداخت مساوی ۵ ساله به مقدار ۶۰۰۰ دلار با نرخ ترکیب ۸٪ چقدر است؟
۴. معادل کنونی یک سری پرداخت که در سال اول ۱۰۰۰ دلار بوده و با نرخ ۸٪ در هر سال افزایش می‌یابد، پس از ۲۰ سال با نرخ بهره ۸٪ چقدر خواهد شد؟
۵. معادل کنونی یک سری پرداخت که در سال اول ۱ میلیون دلار بوده و هر سال با نرخ ۲۵٪ کاهش می‌یابد، پس از ۴ سال و با نرخ بهره ۶٪ چقدر است؟
۶. نرخ بهره ترکیبی سالانه را بیابید که در آن ۴۰۰۰ دلار پس از ۶ سال ۱۰۰۰۰ دلار می‌شود؟
۷. چند سال طول می‌کشد که ۴۰۰۰ دلار به مقدار ۷۰۰۰ دلار افزایش پیدا کند اگر نرخ بهره که به صورت سالانه ترکیب می‌شود ۱۰٪ باشد؟

۸. چه نرخ بهره‌ای نیاز است تا مجموعه یک پول پس از ۸ سال دو برابر شود؟ چه حاصلضربی از i و n نیاز است تا این موضوع اتفاق بیافتد؟ این حاصلضرب تا چه حد دقیق است؟

۹. یک دارایی به قیمت ۵۲۰۰۰ دلار خریداری شده است و انتظار می‌رود ۱۲ سال کار کرده و پس از آن ارزش اسقاطی آن ۶۰۰۰ دلار خواهد بود. پس از ۵ سال کار، دارایی به قیمت ۱۸۰۰۰ دلار فروخته شد. نرخ بهره ۱۴٪ فرض شده است

الف. هزینه معادل سالانه دارای چقدر پیش‌بینی شده بود؟

ب. هزینه معادل سالانه واقعی آن چقدر است؟

۱۰. یک مخلوط کن به قیمت ۳۳۰۰۰ دلار خریداری شده و ارزش اسقاطی آن ۵۰۰۰ دلار و عمر آن ۳ سال پیش‌بینی شده است. ماهانه ۲۰۰ پوند در این مخلوط کن مورد اختلاط قرار می‌گیرد.

الف. هزینه معادل سالانه مخلوط کن را با نرخ بهره ۸٪ محاسبه کنید.

ب. هزینه معادل سالانه برای هر پوند مخلوط شده با نرخ بهره ۱۲٪ را محاسبه کنید.

۱۱. جدول زیر دریافت‌ها و پرداخت‌ها را برای یک مورد معلوم نشان می‌دهد. با استفاده از مقایسه معادل کنونی و معادل سالانه در نرخ بهره ۱۴٪ مطلوبیت آن را بررسی کنید.

پایان سال	دریافت	پرداخت
0	0	20000
1	6000	0
2	5000	4000
3	5000	0
4	12000	1000

۱۲. یک کنترل کننده رایانه‌ای با هزینه ۳۰۰۰۰ دلار قابل نصب بوده و ارزش اسقاطی آن پس از ۱۰ سال ۳۰۰۰ دلار خواهد بود و انتظار می‌رود هزینه مصرف انرژی را سالانه ۴۰۰۰ دلار کاهش دهد.

الف. نرخ بازگشت سرمایه مورد انتظار را اگر دستگاه ۱۰ سال کار کند به دست آورید.

ب. برای چه عمری دستگاه نرخ بازگشت سرمایه ۱۵٪ را نتیجه می‌دهد؟

۱۳. یک شرکت می‌خواهد یک اتوبوس به قیمت ۷۵۰۰۰ دلار خریداری کند که ظرفیت حمل ۴۰ مسافر را دارد. به عنوان یک گزینه دیگر، یک اتوبوس بزرگ‌تر را می‌توان با قیمت ۹۵۰۰۰ دلار خرید که ظرفیت حمل ۵۰ مسافر را دارد. ارزش اسقاطی هر دو گزینه ۸۰۰۰ دلار پس از ۱۰ سال است. اگر سود خالص سالانه به ازای هر مسافر ۴۰۰ دلار باشد کدام گزینه در نرخ بهره ۱۵٪ پیشنهاد می‌شود؟ با نرخ بهره ۷٫۵٪ چگونه؟

۱۴. یک ساختمان اداری و تجهیزاتش به مبلغ ۷۱۰۰۰۰۰ دلار بیمه شده است. حق بیمه سالانه ۰٫۸۵ دلار به ازای پوشش هر ۱۰۰ دلار است. یک سیستم آب پاش با عمر ۲۰ سال، بدون ارزش اسقاطی با هزینه ۱۸۰۰۰۰ دلار قابل نصب است. هزینه نگهداری و عملیات سالانه آن ۳۶۰۰ دلار تخمین زده می‌شود. حق بیمه با نصب این تجهیز به مقدار ۰٫۴ دلار در ازای پوشش ۱۰۰ دلار کاهش می‌یابد.

الف. نرخ بازگشت سرمایه پس از نصب سیستم آب پاش چقدر خواهد بود؟

ب. با نرخ بهره ۱۲٪، دوره پرداخت سیستم آب پاش را پیدا کنید.

۱۵. طراحی یک سیستم توسط از طریق یکی از دو گزینه در دست قابل پیگیری است. هر کدام از گزینه‌ها دارای یک آینده انتظاری است که هزینه چرخه‌ی عمر خود را دارند. هزینه‌های مربوطه در جدول زیر فراهم شده است (میلیون دلار). اگر احتمالات رخ

دادن آینده‌ها به ترتیب ۳۰٪، ۵۰٪ و ۲۰٪ باشد، کدام گزینه مطلوب است. از نرخ بهره ۱۰٪ استفاده کنید.

طراحی ۱	سال											
آینده	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
خوش‌بینانه	۰,۴	۰,۶	۵	۷	۰,۸	۰,۸	۰,۸	۰,۸	۰,۸	۰,۸	۰,۸	۰,۸
موردانتظار	۰,۶	۰,۸	۱	۵	۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
بدبینانه	۰,۸	۰,۹	۱	۷	۱۰	۱,۲	۱,۲	۱,۲	۱,۲	۱,۲	۱,۲	۱,۲

طراحی ۲	سال											
آینده	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
خوش‌بینانه	۰,۴	۰,۴	۰,۴	۱	۳	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵	۲,۵
موردانتظار	۰,۶	۰,۸	۱	۳	۶	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
بدبینانه	۰,۶	۰,۸	۱	۵	۶	۳,۱	۳,۱	۳,۱	۳,۱	۳,۱	۳,۱	۳,۱

۱۶. ماتریس ارزیابی تصمیم را برای مساله ۱۵ رسم کرده و سپس بهترین گزینه را تحت قوانین زیر به دست آورید: لاپلاس، $\maximin$ ، $\maximax$ ، Hurwicz با $\alpha=0.6$. فرض کنید انتخاب در شرایط عدم قطعیت است.

۱۷. یک آزمایشگاه نیاز به لوله کشی آب سرد از یک سردخانه مرکزی دارد. دو پیشنهاد برای سیستم لوله کشی در جدول زیر نشان داده شده است. با در نظر گرفتن عمر ۱۰ ساله، تعداد ساعاتی که سیستم باید عملیاتی باشد تا دو سیستم با هم سر به سر باشند را به دست آورید. نرخ بهره ۹٪ است.

سیستم ۸ اینچی	سیستم ۶ اینچی	
۳	۶	اندازه موتور به اسب بخار
۴۴۰۰۰	۳۲۰۰۰	هزینه اولیه پمپ و لوله
۳۰۰۰	۴۵۰۰۰	هزینه موتور نصب شده
۶۰۰۰	۵۰۰۰	ارزش اسقاطی
۲	۳,۲	هزینه انرژی برای یک ساعت عملیات

۱۸. تعویض حصار یک مزرعه اکنون ۴,۲ دلار به ازای هر هر فوت مربع است. تخمین زده می‌شود که می‌توان یک فوت مربع حصار را با جدا کردن حصار از تیر با هزینه متغیر ۱,۵ دلار تهیه کرد. هزینه ثابت سالانه برای تجهیزات این کار ۱۲۰۰ دلار تخمین زده می‌شود. اگر هزار فوت مربع سالانه نیاز باشد، صرفه‌جویی سالانه از طریق جدا کردن حصار از تیر را محاسبه کنید.

۱۹. اپراتور یک تجهیز می‌تواند یک قطعه تعمیری را از تامین کننده به قیمت واحد ۹۶۰ دلار تهیه کند. به جای آن، اپراتور می‌تواند آن جزء را با هزینه متغیر واحد ۴۶۰ دلار تعمیر کند. هزینه ثابت موردنیاز برای اینکار سالانه ۸۰۰۰۰ دلار است. تعداد واحدهایی که این دو گزینه را سر به سر می‌کند، به‌دست آورید.

۲۰. یک شرکت بازاریابی می‌تواند خودروهای موردنیاز برای کارکنان فروش را با هزینه روزی ۳۵ دلار به علاوه مایل ۰,۱۸ دلار اجاره کند. به‌عنوان جایگزین، شرکت می‌تواند به هر فرد ۰,۴۵ دلار به ازای هر مایل پرداخت کند تا از خودروی شخصی فرد استفاده شود. اگر این موارد تنها هزینه‌های موجود باشد، نقطه سر به سر را برای تعداد مایل‌هایی که باید سپری شود به‌دست آورید.

۲۱. یک تولید کننده قطعات الکترونیکی خرید یکی از دو دستگاه لیزری را مدنظر قرار داده است. پیش‌بینی فروش نشان می‌دهد که حداقل ۸۰۰۰ واحد در سال فروش خواهد داشت. دستگاه A هزینه ثابت سالانه را ۲۰۰۰۰ دلار افزایش داده و هزینه متغیر را ۵٫۶ دلار کاهش می‌دهد. دستگاه B هزینه ثابت را ۵۰۰۰ دلار افزایش داده و هزینه متغیر را ۳٫۶ دلار کاهش می‌دهد. اگر هزینه‌های متغیر اکنون ۲۰ دلار برای هر واحد باشد کدام دستگاه باید خریداری شود؟

۲۲. ماشین A هزینه ای برابر با ۲۰۰۰۰ دلار داشته و ارزش اسقاطی ندارد و نیاز به هزینه نیروی کار معادل ۱٫۱۵ دلار برای هر قطعه تولیدی دارد. ماشین B هزینه‌ای برابر با ۳۶۰۰۰ دلار داشته و ارزش اسقاطی ندارد و هزینه نیروی کار آن برای هر قطعه تولیدی ۰٫۹۰ دلار است. اگر نرخ بهره ۱۰٪ باشد و نرخ تولید سالانه ۲۰۰۰۰ واحد باشد چند سال طول می‌کشد تا هزینه دو ماشین سر به سر شود؟

۲۳. یک تولید کننده دو روش برای تولید یک برد مدار مدنظر دارد. روش اول هزینه ۹٫۸ دلار برای هر واحد داشته و هزینه ثابت سالانه آن ۱۰۰۰۰ دلار است. روش دوم ۱۸۰۰۰۰ دلار هزینه ثابت برای ۸ سال داشته و ارزش اسقاطی آن ۱۲۰۰۰ دلار است. پیش‌بینی می‌شود که هزینه متغیر آن ۳٫۲ دلار برای هر واحد باشد و سالانه ۴۰۰۰ دلار هزینه نگهداری داشته باشد. اگر نرخ بهره ۸٪ باشد، چه تعداد مدار باید تولید شود تا دو روش به یک نقطه سر به سر برسند؟

۲۴. تخمین زده می‌شود که فروش سالانه یک تجهیز صرفه‌جویی در انرژی ۲۰۰۰۰ در سال اول باشد و سالانه ۱۰۰۰۰ واحد افزایش پیدا کند تا به ۵۰۰۰۰ واحد برسد. پیشنهاد A خرید تجهیزات تولید با هزینه ۱۲۰۰۰۰ دلار و ارزش اسقاطی ۱۵۰۰۰ دلار در انتهای سال ۴ است. پیشنهاد B خرید یک دستگاه ۲۸۰۰۰۰ دلاری با ارزش اسقاطی ۳۲۰۰۰

دلار در پایان سال ۴ است. هزینه تولید یک واحد در پیشنهاد A و B به ترتیب ۸ و ۲٫۶ دلار است. اگر نرخ بهره ۹٪ باشد کدام پیشنهاد در افق تولیدی چهارساله باید پذیرفته شود؟

۲۵. هزینه ثابت عملیات یک ماشین (بازگشت سرمایه، بهره، نگهداری و تعمیرات، فضای اشغال کرده، نظارت، بیمه و مالیات) F دلار در هر سال است. هزینه متغیر عملیات (برق، و غیره بدون در نظر گرفتن نیروی کار مستقیم) V دلار در هر ساعت از عملیات است. اگر N تعداد ساعات عملیات در یک سال باشد، TC هزینه کل سالانه، TC_h هزینه ساعتی مرکز عملیاتی، t زمان به ساعت برای پردازش یک واحد، و M هزینه پردازش ۱ واحد باشد، روابط TC ، TC_h و M را بنویسید.

۲۶. در مساله ۲۵، فرض کنید $F = ۶۰۰۰۰$ دلار در سال، $t = ۰٫۲$ ساعت، $V = ۵۰$ دلار در ساعت و N بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تغییر کند (با افزایشی ۱۰۰۰ تایی)

الف. مقادیر M را در مقابل N رسم کنید

ب. عبارتی برای هزینه کل نیروی کار و هزینه ماشین در هر واحد بنویسید که در آن از نمادهای مساله ۲۵ استفاده شده باشد و W معادل هزینه نیروی کار مستقیم در هر ساعت باشد.

۲۷. یک شرکت خاص ظرفیت تولید ۸۰۰۰۰ واحد در سال دارد. هم اکنون، این شرکت در سطح ۷۵٪ ظرفیت کار می‌کند. درآمد هر واحد بدون در نظر گرفتن خروجی ۱۰،۰ است. هزینه ثابت سالانه ۲۸۰۰۰ دلار و هزینه متغیر ۰٫۰۶ دلار برای هر واحد است. سود یا ضرر سالانه را در این ظرفیت تولید پیدا کرده و ظرفیتی را که در آن شرکت به نقطه سر به سر می‌رسد، مشخص کنید.

۲۸. یک ماشین جوش که برای یک فرایند خاص به کار می رود ۹۰۰۰۰ دلار است. ماشین عمری ۵ ساله داشته و ارزش اسقاطی آن ۱۰۰۰۰ دلار است. هزینه‌های ثابت آن سالانه ۵۰۰۰ دلار شامل بیمه، مالیات، نگهداری و تعمیرات و غیره است. هزینه برق و دیگر موارد ۲۸ دلار در هر ساعت عملیاتی است و هزینه کل اپراتور (مستقیم و غیرمستقیم) ۶۵ دلار در ساعت است. اگر سیکل زمانی هر واحد ۶۰ دقیقه باشد و نرخ بهره ۸٪، هزینه هر واحد را برای تولید در این حجم‌ها به دست آورید. ۲۰۰، ۶۰۰ و ۱۸۰۰.

۲۹. یک مرکز پردازش خاص ظرفیت مونتاژ ۶۵۰۰۰ واحد در سال را دارد. ظرفیت مورد استفاده کنونی ۶۵٪ است. درآمد سالانه ۴۱۶۰۰۰ دلار است. هزینه ثابت سالانه ۱۹۲۰۰۰ و هزینه متغیر ۰٫۳۸ دلار برای هر واحد مونتاژ شده است.

الف. چه هزینه یا سودی می‌توان به مرکز نسبت داد؟

ب. در چه سطحی از تولید به نقطه سر به سر می‌رسد؟

با ظرفیت تولید ۷۰، ۸۰ و ۹۰٪ سود یا ضرر چقدر خواهد بود؟

۳۰. یک کمپانی دو کارخانه را راه‌اندازی کرده است، A و B، که هر کدام محصولی مشابه را تولید می‌کند. ظرفیت A ۶۰۰۰۰ گالن و B ۸۰۰۰۰ گالن است. هزینه ثابت سالانه A و B به ترتیب ۲۶۰۰۰۰ و ۲۸۰۰۰۰ دلار است و هزینه متغیر برای آن‌ها به ترتیب ۳۲ و ۳۹ دلار در هر گالن است. ظرفیت عملیاتی در حال حاضر برای A و B به ترتیب ۳۵٪ و ۴۰٪ درصد است.

الف. هزینه کل تولید A و B را بیابید.

ب. هزینه کل و میانگین هزینه واحد مجموع خروجی‌های دو کارخانه چقدر است؟

پ. اگر کل تولید به کارخانه A منتقل شود هزینه تولید هر گالن چقدر خواهد شد؟

ت. اگر کل تولید به کارخانه B منتقل شود هزینه تولید هر گالن چقدر خواهد شد؟

بهینه‌سازی در طراحی و عملیات

طراحی سیستم‌های پیچیده که به‌نحوی مناسب، بهینه‌سازی را در فرایند طراحی جای می‌دهند، مهندس سیستم‌ها را با یک چالش مهم مواجه می‌کند. یک چالش موازی ضعیف‌تر، هنگامی ظاهر می‌شود که به بهینه‌سازی عملیات سیستم موجود پرداخته شود. در حالت اول، مقادیر بهینه متغیرهای طراحی برای هر کدام از مجموعه پارامترهای وابسته به طراحی جستجو می‌شود. در حالت دوم، مقادیر بهینه برای متغیرهای سیاستی مطلوب است. رویکرهای مدل‌سازی، اساساً یکسان هستند. این تمایز تنها به‌عنوان روشی برای مقایسه‌ی طراحی سیستم و تحلیل سیستم‌ها مهم است.

در این فصل، رویکرد کلی فرمول‌بندی و کار با مدل‌های ریاضی ارائه شده است. روش‌های ریاضی استفاده شده دارای درجات مختلف پیچیدگی بوده و به سیستم مورد مطالعه بستگی دارد. مثال‌هایی از حالت دارای محدودیت و بدون محدودیت ارائه شده است. تکنیک‌های کلاسیک بهینه‌سازی در ابتدا ارائه شده و سپس رویکردهای غیرکلاسیک شامل روش‌های برنامه‌ریزی خطی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

این حوزه‌های بنیادی به تفصیل در این فصل با استفاده از ادغام مدل‌سازی و بهینه‌سازی اقتصادی توسعه داده شده است و همراه با مثال‌هایی فرضی از طراحی و عملیات می‌باشند. مطالعه‌ی محتوای این فصل بخشی از درک کلی بهینه‌سازی به‌عنوان روشی برای رسیدن به مقصود است نه اینکه خودش هدف باشد. خصوصاً خواننده در زمینه‌های زیر مهارت پیدا می‌کند.

- مفاهیم و روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک بر پایه ریاضیات برای حالات تک متغیره و چندمتغیره در طراحی و عملیات؛
- فهم این موضوع که استفاده از بهینه‌سازی که در این فصل ارائه شده است، قابلیت رهگیری داشته و توسط رشته تحقیق در عملیات توسعه یافته است؛
- اعمال تئوری تصمیم از فصل ۷ و روش‌های ارزیابی اقتصادی در فصل ۸ برای توسعه و درک جامع‌تر از منافع معادل‌سازی؛
- ساخت وضعیت‌های غیرمحدود که نیاز به بهینه‌سازی دارد به‌عنوان پیش‌زمینه‌ی نمایش جریان پول براساس چرخه‌ی عمر؛
- در نظر گرفتن بهینه‌سازی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری به‌عنوان گامی در راه تعیین ارزیابی کامل چرخه‌ی عمر طراحی و عملیات؛
- اعمال بهینه‌سازی در مواجهه با محدودیت‌ها به‌عنوان توسعه‌ای از مثال‌ها و وضعیت‌های غیر محدود؛
- ارزیابی وضعیت‌های بهینه‌سازی و چند معیاره با استفاده از نمایش ارزیابی تصمیم؛
- درک و اعمال بهینه‌سازی محدود توسط روش‌های گرافیکی و روش سیمپلکس برنامه‌ریزی خطی.

قسمت آخر این فصل، خلاصه‌ای از حوزه‌ی بهینه‌سازی همراه با کاربرد مثال‌های منتخب در طراحی و عملیات را فراهم می‌کند. همچنین منابعی دیگر برای مطالعه‌ی بیشتر و بهبود درک موضوعات این فصل در این قسمت ارائه شده است.

۹-۱- تئوری بهینه‌سازی کلاسیک

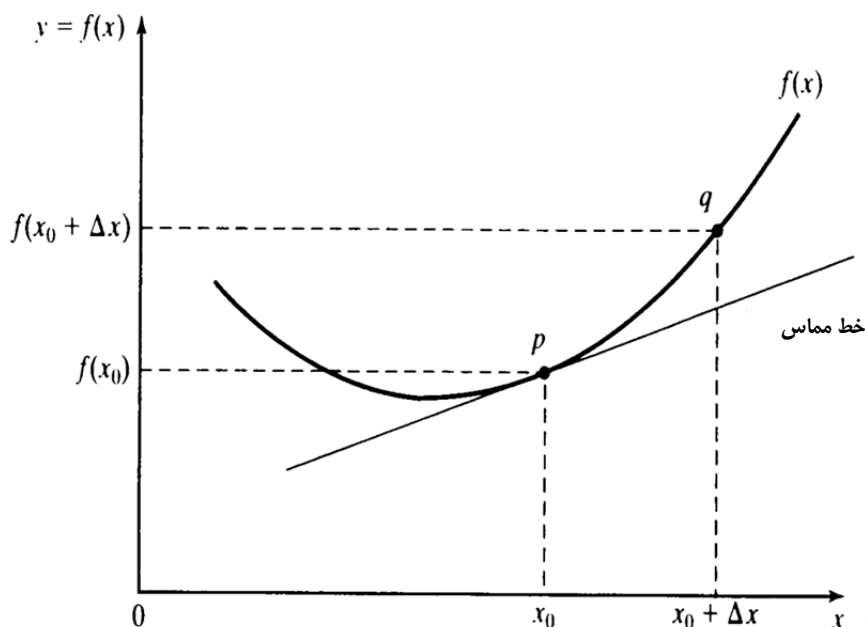
بهینه‌سازی یک فرایند است که بهترین را جستجو می‌کند. در مهندسی و تحلیل سیستم‌ها، این فرایند برای هر یک از گزینه‌های مربوط به تئوری ارزیابی تصمیم که در قسمت ۷-۳ بیان شد، اعمال می‌شود. برای این کار، تابع بهینه‌سازی عمومی سیستم از معادله ۷-۲ و همچنین تابع ارزیابی تصمیم در معادله ۷-۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد و توسط مثال‌هایی فرضی توضیح داده می‌شود. پیش از ارائه مثال‌های مشخص از بهینه‌سازی در طراحی و عملیات، این قسمت مروری بر روش‌های ریاضی توابع بهینه‌سازی را برای یک یا چند متغیر تصمیم خواهد داشت.

۹-۱-۱- شیب یک تابع

شیب یک تابع $y = f(x)$ به صورت نرخ تغییرات متغیر وابسته، y نسبت تقسیم بر نرخ تغییرات متغیر مستقل x تعریف می‌شود. اگر یک تغییر مثبت در x یک تغییر مثبت در y را منجر شود، شیب مثبت است. برعکس، اگر یک تغییر مثبت در x یک تغییر منفی در y را منجر شود، شیب منفی است.

اگر $y = f(x)$ یک خط راست را تعریف کند، اختلاف بین هر دو نقطه x_1 و x_2 تغییرات x را نشان داده و اختلاف بین هر دو نقطه y_1 و y_2 نشان دهنده‌ی تغییرات y خواهد بود. بنابراین، نرخ تغییرات y نسبت به x به صورت شیب خط راست، $(y_1 - y_2) / (x_1 - x_2)$ خواهد بود. این شیب برای همه نقاط خط راست یکسان خواهد بود؛ $\Delta y / \Delta x$ ثابت است.

برای یک تابع غیرخطی، نرخ تغییرات y نسبت به تغییرات x ثابت نیست، بلکه با تغییر x تغییر می‌کند. شیب باید در هر نقطه از منحنی ارزیابی شود. این کار را می‌توان با فرض یک نقطه‌ی دلخواه روی تابع p که در آن مقادیر x و y به صورت x_0 و $f(x_0)$ انجام داد که در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. نرخ تغییرات y نسبت به x در نقطه‌ی p برابر با شیب یک خط مماس به تابع در این نقطه است. مشاهده می‌شود که نرخ تغییرات y نسبت به x در هر نقطه‌ای روی منحنی با نقطه p متفاوت است.



شکل ۹-۱- شیب یک تابع

۹-۱-۲- اصول حساب دیفرانسیل

حساب دیفرانسیل یک ابزار ریاضی برای یافتن تقریب‌های متوالی بهتر برای شیب خط مماس در شکل ۹-۱ است. یک نقطه دیگر روی $f(x)$ فرض کنید که با q مشخص شده است و با

نقطه p فاصله‌ای به اندازه‌ی Δx در راستای x و فاصله‌ای برابر با Δy در راستای y دارد. در نتیجه شیب خط بین دو نقطه q و p معادل یک شیب $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ است. اما این یک شیب میانگین از $f(x)$ بین این دو نقطه است. در بهینه‌سازی کلاسیک، نرخ تغییر لحظه‌ای در یک نقطه جستجو می‌شود.

نرخ تغییر نقطه $f(x)$ در $x=x_0$ را می‌توان با قرار دادن $\Delta x \rightarrow 0$ به‌دست آورد. با مراجعه به شکل ۱-۹، این موضوع را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد

$$\lim_{\Delta x} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (1-9)$$

توجه شود که مقدار Δx تا حد ممکن باید کوچک باشد تا خط وصل کننده بین نقطه p و q تبدیل به یک خط مماس در نقطه p شود. بنابراین هنگامی شیب تابع در نقطه x_0 توسط معادله ۱-۹ به‌دست می‌آید که Δx بی‌نهایت کوچک باشد.

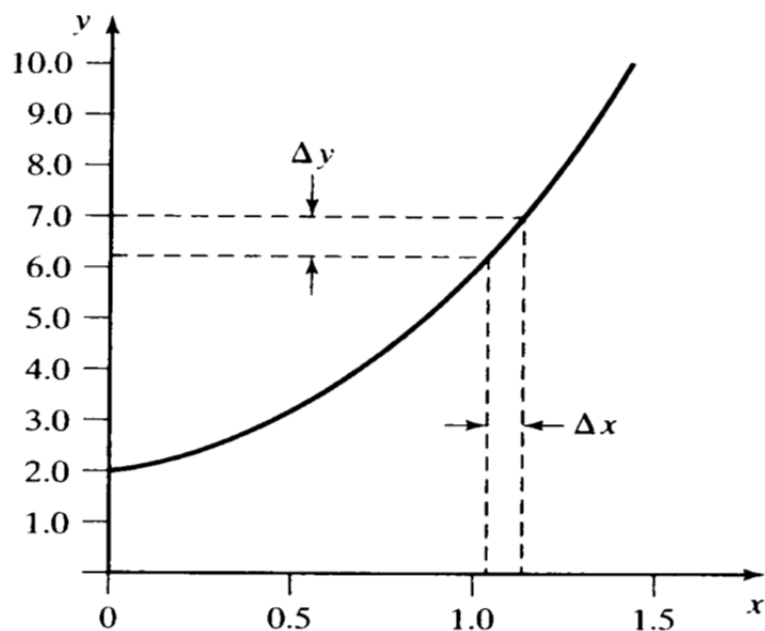
معادله ۱-۹ یک عبارت برای کاربرد عمومی شیب است که یک مشتق نامیده شده و کاربرد آن در یک فرایند شناخته شده با عنوان مشتق‌گیری است. برای تابع $y = f(x)$ ، نماد dy/dx یا $f'(x)$ نشان دهنده‌ی مشتق است.

به‌عنوان مثال از کاربرد فرایند مشتق‌گیری معادله ۱-۹، تابع $y = f(x) = 8x - x^2$ را فرض کنید. با جای‌گذاری در معادله ۱-۹ داریم

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{[8(x + \Delta x) - (x + \Delta x)^2] - [8x - x^2]}{\Delta x} \\ = \frac{8\Delta x - 2x\Delta x - \Delta x^2}{\Delta x} \\ = 8 - 2x - \Delta x \end{aligned}$$

هنگامی که $\Delta x \rightarrow 0$ ، مشتق، $dy/dx = 8 - 2x$ شیب تابع در هر نقطه‌ای خواهد بود. برای مثال در نقطه $x=4$ ، $dy/dx = 0$ مشخص می‌کند که شیب تابع در نقطه $x=4$ برابر صفر است.

به‌عنوان مثالی دیگر از فرایند مشتق‌گیری بدون استفاده از معادله ۹-۱ فرض کنید تابعی مانند $y = f(x) = 3x^2 + x + 2$ وجود دارد.



شکل ۹-۲- تابع $f(x) = 3x^2 + x + 2$

فرض کنید x به اندازه Δx تغییر کند. آنگاه افزایش y با یک مقدار Δy که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است، به‌صورت زیر خواهد بود

$$\begin{aligned}
 y + \Delta y &= 3(x + \Delta x)^2 + (x + \Delta x) + 2 \\
 &= 3[x^2 + 2(\Delta x)x + (\Delta x)^2] + (x + \Delta x) + 2 \\
 \Delta y &= 3[x^2 + 2x(\Delta x) + (\Delta x)^2] + (x + \Delta x) + 2 - y
 \end{aligned}$$

از آن جا که $y = 3x^2 + x + 2$ داریم

$$\begin{aligned}
 \Delta y &= 3x^2 + 6x(\Delta x) + 3(\Delta x)^2 + x + \Delta x + 2 - 3x^2 - x - 2 \\
 &= 6x(\Delta x) + 3(\Delta x)^2 + \Delta x
 \end{aligned}$$

نرخ میانگین تغییرات Δy نسبت به Δx به صورت زیر است

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta y}{\Delta x} &= \frac{6x(\Delta x)}{\Delta x} + \frac{3(\Delta x)^2}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta x} \\
 &= 6x + 3(\Delta x) + 1
 \end{aligned}$$

اما چون داریم

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{dy}{dx} = f'(x)$$

نرخ تغییرات لحظه ای برابر با $6x + 1$ خواهد بود.

پیش از ادامه مطالب، قوانین مشتق‌گیری برای توابع رایج به صورت زیر باید مدنظر قرار گیرد.

۱. مشتق یک عدد ثابت: اگر $f(x) = k$ ، یک ثابت باشد، آنگاه $dy/dx = 0$.

۲. مشتق یک متغیر: اگر $f(x) = x$ ، یک متغیر باشد، آنگاه $dy/dx = 1$.

۳. مشتق یک خط راست: اگر $f(x) = ax + b$ ، یک خط راست باشد، آنگاه

$$dy/dx = a$$

۴. مشتق یک متغیر توان‌دار: اگر $f(x) = x^n$ ، یک متغیر توان‌دار باشد، آنگاه

$$dy/dx = nx^{n-1}$$

۵. مشتق ضرب عدد ثابت در یک تابع: اگر $f(x) = k[g(x)]$ آنگاه

$$\frac{dy}{dx} = k \left[\frac{dg(x)}{dx} \right]$$

۶. مشتق جمع دو تابع: اگر $f(x) = g(x) \pm h(x)$ آنگاه

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dg(x)}{dx} \pm \frac{dh(x)}{dx}$$

۷. مشتق ضرب دو تابع: اگر $f(x) = g(x)h(x)$ آنگاه

$$\frac{dy}{dx} = g(x) \frac{dh(x)}{dx} + h(x) \frac{dg(x)}{dx}$$

۸. مشتق یک تابع نمایی: اگر $f(x) = e^x$ آنگاه

$$\frac{dy}{dx} = e^x$$

۹. مشتق لگاریتم طبیعی: اگر $f(x) = \ln x$ آنگاه

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{x}$$

روش‌های نمایش داده شده بالا برای پیدا کردن مشتقات مراتب بالاتر قابل استفاده است. هنگامی که از یک تابع مشتق گرفته می‌شود یک تابع حاصل می‌شود که می‌توان دوباره از آن مشتق گرفت. برای مثال مشتق تابع $8x - x^2$ به صورت $8 - 2x$ بود. این مشتق شیب تابع است. اگر از شیب دوباره مشتق گرفته شود، یک مشتق مرتبه بالاتر به دست می‌آید که برابر ۲- است که به صورت d^2y/dx^2 یا $f''(x)$ نمایش داده می‌شود. فرایند مشتق‌گیری را برای مراتب بالاتر تا جایی که تابعی برای مشتق‌گیری باقی مانده باشد، می‌توان ادامه داد.

۹-۱-۳- مشتق‌گیری نسبی

مشتق‌گیری نسبی، فرایندی است که نرخ تغییرات را برای متغیر وابسته در تابعی به‌دست می‌آورد که بیش‌تر از یک متغیر مستقل داشته باشد. در این فرایند، همه متغیرها به غیر از متغیر وابسته و متغیر مستقل انتخاب شده برای مشتق‌گیری به‌عنوان ثابت برای مشتق‌گیری در نظر می‌گیریم. نماد $\delta y / \delta x_1$ برای نشان دادن مشتق نسبی y نسبت به x_1 مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به‌عنوان مثال، فرض کنید یک تابع با دو متغیر مستقل x_1 و x_2 به‌صورت زیر موجود است.

$$4x_1^2 + 6x_1x_2 - 3x_2$$

مشتق نسبی y نسبت به x_1 به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\frac{\delta y}{\delta x_1} = 8x_1 + 6x_2 - 0$$

مشتق نسبی y نسبت به x_2 به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\frac{\delta y}{\delta x_2} = 0 + 6x_1 - 3$$

مشتق‌گیری نسبی، دیدی فراهم می‌کند که در آن شیب تابع در یک بعد برای یک تابع n بعدی قابل نمایش است. با ترکیب این اطلاعات از یک تابع، شیب در هر نقطه‌ای قابل محاسبه است. یک نقطه مهم و کاربردی در یک تابع، نقطه‌ای است که شیب صفر می‌شود. برای تابع قبل، این نقطه با قرار دادن مشتق‌های نسبی برابر صفر و حل آن‌ها برای نقاط x_1 و x_2 به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$8x_1 + 6x_2 = 0$$

$$6x_1 - 3 = 0$$

که از آن داریم

$$x_1 = 1/2, \quad x_2 = -2/3$$

معنی این نقطه در قسمت بعد توضیح داده می‌شود.

۹-۱-۴ - بهینه‌سازی بدون محدودیت

بهینه‌سازی بدون محدودیت به این معنا است که برای تابع مدنظر هیچ محدودیتی قرار داده نشده است. با این فرض، شرط لازم برای اینکه x^* نقطه بهینه تابع $f(x)$ باشد این است که مشتق اول آن برابر صفر باشد که به صورت زیر نمایش داده شده است

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x^*} = 0 \quad (۹-۲)$$

برابر بودن مشتق اول با صفر برای اینکه نقطه x^* بهینه باشد کافی نیست زیرا ممکن است مشتقی که برابر صفر است یک نقطه خمیدگی باشد. شرط کافی برای آنکه نقطه x^* بهینه باشد این است که مشتق دوم در نقطه x^* مثبت یا منفی باشد؛ اگر مشتق دوم مثبت بود x^* نقطه کمینه و اگر مشتق دوم منفی بود نقطه x^* بیشینه است.

اگر مشتق دوم برابر صفر بود، مشتق مرتبه بالاتر جستجو می‌شود تا یک مقدار غیر صفر در n امین مشتق به صورت زیر به دست آید

$$\left. \frac{d^n f(x)}{dx^n} \right|_{x=x^*} = 0 \quad (۹-۳)$$

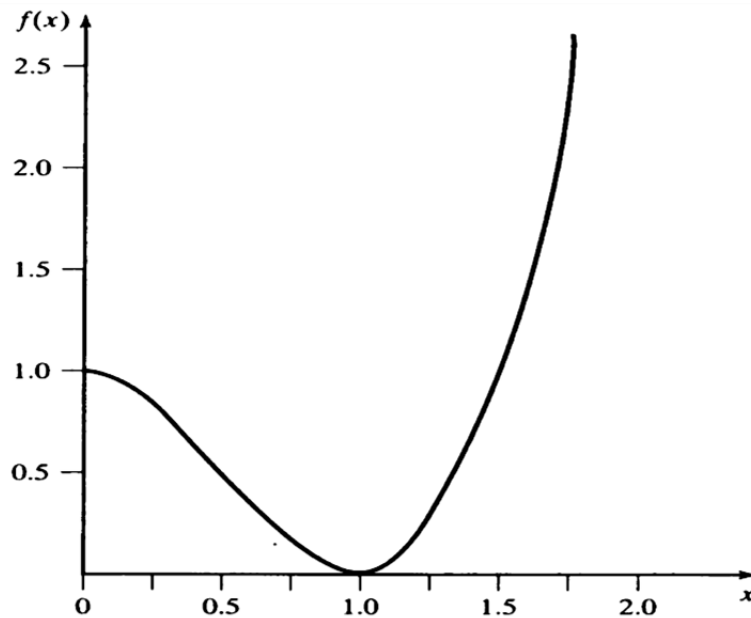
اگر n فرد باشد، آنگاه x^* یک نقطه خمیدگی است. اگر n فرد بوده و اگر

$$\left. \frac{d^n f(x)}{dx^n} \right|_{x=x^*} < 0 \quad (۴-۹)$$

آنگاه x^* یک بیشینه محلی است، اما اگر

$$\left. \frac{d^n f(x)}{dx^n} \right|_{x=x^*} > 0 \quad (۵-۹)$$

آنگاه x^* یک کمینه محلی است.



شکل ۹-۳- تابع $2x^3 - 3x^2 + 1$

برای مثال فرض کنید که مقدار کمینه x برای تابع $2x^3 - 3x^2 + 1$ که در شکل ۹-۳

نشان داده شده است، مدنظر است. شرط لازم برای وجود یک کمینه به‌صورت زیر است

$$\frac{df(x)}{dx} = 6x^2 - 6x = 0$$

هر دو نقطه $x=0$ و $x=1$ شرط بالا را ارضا می‌کند. بر این اساس، مشتق دوم به صورت زیر باید محاسبه شود

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = 12x - 6$$

و باید در نقاط $x=0$ و $x=1$ ارزیابی شود. در نقطه $x=0$ مشتق دوم برابر ۶- است که نشان می‌دهد این نقطه یک نقطه بیشینه است. در نقطه $x=1$ مقدار مشتق دوم برابر ۶ است و در نتیجه این مقدار کمینه مورد جستجو است. این نقاط در شکل ۹-۳ نشان داده شده است.

برای توابعی که تعداد متغیرهای مستقل بیش‌تر از یکی است، بردار $x^* = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ یک نقطه ایستا در یک تابع $f(x)$ دارد اگر همه عناصر در بردار مشتق‌های نسبی اول که در نقطه x^* ارزیابی شده اند برابر صفر باشد. یا به عبارت دیگر

$$F(x) = \left[\frac{\delta F(x)}{\delta x_1}, \frac{\delta F(x)}{\delta x_2}, \dots, \frac{\delta F(x)}{\delta x_n} \right] = 0 \quad (9-6)$$

یک تابع با دو متغیر مستقل x_1 و x_2 را به صورت زیر در نظر بگیرید.

$$f(x_1, x_2) = x_1^2 - 8x_2 + 2x_2^2 - 6x_1 + 30$$

شرط لازم مورد نیاز آن است که

$$\frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_1} = 2x_1 - 6 = 0$$

9

$$\frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_2} = 4x_2 - 8 = 0$$

مقدار بهینه x_1^* برابر با ۳ و مقدار بهینه x_2^* برابر با ۲ به دست می‌آید. این مقادیر را می‌توان در تابع قرار داد تا مقدار بهینه تابع را به دست آورد

$$f(x_1, x_2) = (3)^2 - 8(2) + 2(2)^2 - 6(3) + 30 = 13$$

برای تعیین این که آیا این مقدار برای تابع مدنظر یک بیشینه است یا یک کمینه، مشتق دوم نیاز است.

$$\frac{\delta(2x_1 - 6)}{\delta x_1} = 2 \quad \frac{\delta(4x_2 - 8)}{\delta x_2} = 4$$

هر دوی این مقادیر از صفر بزرگترند که مشخص می‌کند که یک مقدار کمینه به دست آمده است. برای تایید این موضوع رابطه زیر باید ارضا شود

$$\left(\frac{\delta^2 y}{\delta x_1^2} \right) \left(\frac{\delta^2 y}{\delta x_2^2} \right) - \left(\frac{\delta^2 y}{\delta x_1 \delta x_2} \right) > 0 \quad (9-7)$$

که در آن

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x_1 \delta x_2} = \frac{\delta(\delta y / \delta x_1)}{\delta x_2}$$

از آنجا که

$$\begin{aligned} \frac{\delta y}{\delta x_1} &= 2x_1 - 6 \\ \frac{\delta^2 y}{\delta x_1 \delta x_2} &= \frac{\delta(2x_1 - 6)}{\delta x_2} = 0 \end{aligned}$$

با جای‌گذاری در معادل ۹-۷، داریم $8 = 0 - (4)(2)$ که تایید می‌کند مقدار به‌دست آمده یک حداقل واقعی است.

۹-۲- بهینه‌سازی کلاسیک غیرمحدود

در طراحی و عملیات، وضعیت‌های تصمیم‌گیری زیادی وجود دارد که رویکردهای بهینه‌سازی باید پیش از مقایسه‌ی گزینه‌ها اعمال شوند. بسیاری از تصمیم‌های اقتصادی با دو یا چند فاکتور مشخص می‌شوند که تحت‌تأثیر متغیرهای رایج طراحی یا سیاستی هستند. هزینه‌های خاص می‌توانند به‌طور مستقیم با افزایش مقدار یک متغیر تغییر کنند، در حالی که نسبت به بقیه متغیرها برعکس عمل می‌کنند. هنگامی که هزینه کل یک گزینه، تابعی از اجزای هزینه‌ای افزایش‌دهنده و کاهش‌دهنده باشد، یک مقدار برای متغیر یا متغیرهای مشترک می‌تواند وجود داشته باشد که هزینه گزینه را حداقل سازد. این قسمت مثال‌های منتخب از وضعیت‌های کلاسیکی را ارائه می‌دهد که کاربرد تئوری بهینه‌سازی غیر محدود در طراحی و عملیات را به تصویر می‌کشد.

۹-۲-۱- بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری یا هزینه اولیه

سرمایه‌گذاری (یا هزینه اولیه) اثر قابل‌توجهی بر هزینه معادل چرخه‌ی عمر یک سیستم دارد. بر این اساس، مهم است که هزینه سرمایه‌گذاری پیش از تحلیل سیستم حداقل شود. در این قسمت، وضعیت کلاسیک طراحی پل مورد استفاده قرار می‌گیرد تا رویکرد مناسب به‌عنوان یک اصل عمومی به تصویر کشیده شود.

پیش از ورود به طراحی تفصیلی، مهم است که سرمایه‌پیش‌بینی شده به‌صورت بهینه به روبنا و ستون‌های پل اختصاص داده شود. این کار با شناسایی این موضوع انجام می‌شود که یک رابطه‌ی معکوس بین هزینه روبنا و تعداد ستون‌ها وجود دارد. با افزایش تعداد ستون‌ها، هزینه روبنا کاهش می‌یابد. برعکس، هزینه روبنا با کاهش تعداد ستون‌ها افزایش می‌یابد. هزینه ستون برای پل به‌طور مستقیم به تعداد آن‌ها بستگی دارد. این یک وضعیت طراحی کلاسیک است که

شامل اجزای هزینه‌ای افزایشی و کاهشی است که مجموع آن در یک تعداد ستون به حداقل می‌رسد. شکل ۴-۹ دو طراحی روبنا را نشان می‌دهد که دارای فاصله بین پل‌ها برابر با S است.

یک مدل ریاضی عمومی برای ارزیابی سرمایه‌گذاری در روبنا و ستون‌ها می‌توان اقتباس کرد.

تابع ارزیابی تصمیم در معادله ۷-۲ به صورت زیر اعمال می‌شود

$$E = f(X, Y)$$

که در آن

E = شاخص ارزیابی (کل هزینه اولیه)

X = متغیر طراحی، فاصله بین ستون‌ها

Y = پارامترهای سیستم شامل طول پل، وزن روبنا، هزینه نصب روبنا در هر پوند و هزینه ستون‌ها در واحد ستون.

معادله ۷-۳ تابع ارزیابی طراحی است که برای ارزیابی گزینه‌های طراحی قابل استفاده است. در این گزینه‌ها، پارامترها وابسته به طراحی کلید انتخاب بهترین گزینه است. فرض کنید

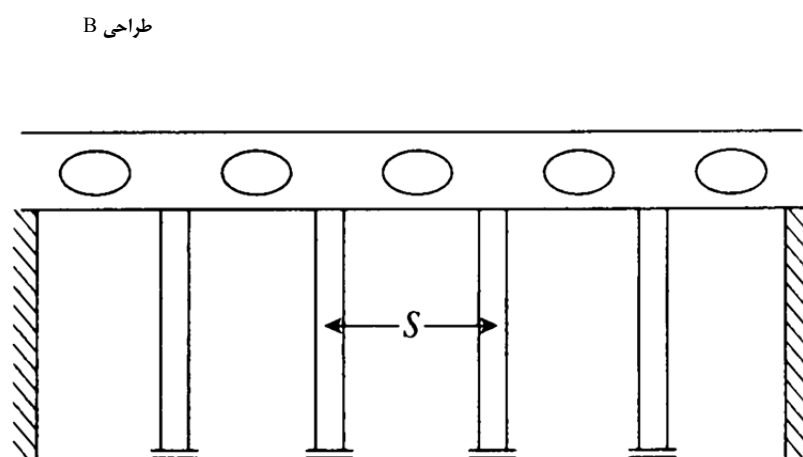
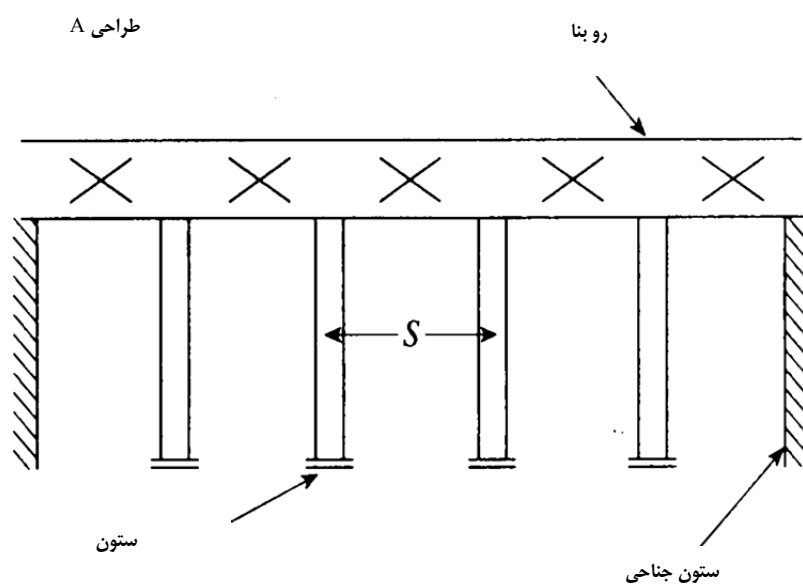
L = طول پل (فوت)

W = وزن روبنا (پوند در هر فوت)

S = فاصله بین ستون‌ها (فوت)

C_S = هزینه نصب روبنا (دلار در هر پوند)

C_P = هزینه نصب هر ستون (دلار در هر ستون)



شکل ۹-۴- دو گزینه طراحی روبنای پل

فرض کنید وزن روبنا به صورت خطی بوده و به صورت $W=AS+B$ نشان داده شود که در آن A و B ضرایبی است که با استفاده از یک دستورالعمل تجربی تعیین می‌شود. بر این اساس، هزینه رو بنا (SC) به صورت زیر خواهد بود

$$SC = (AS + B)(L)(C_s) \quad (۸-۹)$$

هزینه کل پایه‌ها، PC به صورت زیر است

$$PC = \left(\frac{L}{S} + 1\right)(C_p) \quad (۹-۹)$$

که در آن دو ستون جناحی نیز به عنوان ستون در نظر گرفته شده است.

هزینه کل اولیه پل به صورت زیر قابل محاسبه است

$$\begin{aligned} TFC &= SC + PC \\ &= (AS + B)(L)(C_s) + \left(\frac{L}{S} + 1\right)(C_p) \quad (۱۰-۹) \\ &= ASLC_s + BLC_s + \frac{LC_p}{S} + C_p \end{aligned}$$

برای یافتن فاصله بهینه بین ستون‌ها، معادله ۹-۱۰ نسبت به S مشتق‌گیری شده و برابر صفر

قرار داده می‌شود

$$\begin{aligned} \frac{d(TFC)}{dS} &= AL C_s - \frac{LC_p}{S^2} = 0 \\ S^* &= \sqrt{\frac{C_p}{AC_s}} \quad (۱۱-۹) \end{aligned}$$

هزینه کل اولیه کمینه برای پل با جایگزینی معادله ۹-۱۱ برای S در ۹-۱۰ به صورت زیر

به دست می‌آید

$$TFC^* = 2\sqrt{AC_p L^2 C_s} + BLC_s + C_p \quad (9-12)$$

معادله ۹-۱۱ را می‌توان برای به‌دست آوردن فاصله بهینه ستون‌های برای یک طراحی پل معلوم استفاده کرد. با این حال، برای ارزیابی گزینه‌های طراحی پل، معادله ۹-۱۲ در ابتدا استفاده شده و در ادامه معادله ۹-۱۱ به کار می‌رود. این دستورالعمل در مثال زیر نشان داده شده است.

تک گزینه طراحی. فرض کنید که یک پل عابر پیاده ۱۰۰۰ فوتی باید از فولاد ساخته شده و ساختار مشخصی از تیرآهن‌ها داشته باشد (شکل ۹-۴). برای این گزینه طراحی، وزن روبنا به پوند در هر فوت به صورت خطی بوده و از رابطه زیر پیروی می‌کند

$$W = 16S + 600$$

همچنین فرض کنید که هزینه نصب هر پوند روبنا برابر با ۰/۶۵ دلار باشد. برای هر ستون هزینه‌ای معادل ۸۰۰۰۰ دلار تخمین زده شده است و این مقدار برای ستون‌های جناحی نیز مشابه است.

از معادله ۹-۱۱ فاصله بهینه ستون‌ها به صورت زیر به دست می‌آید

$$S^* = \sqrt{\frac{80000}{16 \times 0.65}} = 87.7$$

این مقدار نظری باید اصلاح شود تا یک عدد صحیح برای تعداد ستون‌ها به دست آید. با اصلاح این مقدار ۱۲ ستون (۱۱ فاصله) نیاز است که با استفاده از معادله ۹-۱۰ هزینه کل برابر با ۲۲۹۵۴۵۴ دلار خواهد بود. فاصله ستون‌ها ۹۰/۹ فوت بوده که اندکی بیش‌تر از مقدار بهینه در تئوری است. می‌توان برای اطمینان هزینه کل برای ۱۳ ستون (۱۲ فاصله) را محاسبه کرد که در این مورد هزینه کل بیش‌تر خواهد بود. در نتیجه طراحی ۱۲ ستونی انتخاب می‌شود.

هزینه کل به‌عنوان تابعی از فاصله ستون‌ها در جدول ۹-۱ خلاصه شده است. توجه کنید که یک مقدار کمینه هنگامی حاصل می‌شود که ۱۲ ستون مشخص شده باشد؛ در حقیقت ۱۰ ستون و ۲ ستون جناحی نصب شود. فاصله بهینه بین ستون‌ها نیز ۹۰/۹ فوت خواهد بود.

جدول ۹-۱ - TFC به‌عنوان تابعی از فاصله بین ستون‌ها

فاصله	تعداد ستون‌ها	هزینه ستون	هزینه رو بنا	کل هزینه اولیه
142.8	8	640000	1875714	2515714
111.1	10	800000	1545555	2345555
100.0	11	880000	1430000	2310000
90.9	12	960000	1335454	2295454
83.3	13	1040000	1256666	2296667
76.9	14	1120000	1190000	2310000
71.4	15	1200000	1132857	2332857
66.6	16	1280000	1083333	2363333
58.8	18	1440000	1001765	2441765

چند گزینه طراحی. برای معرفی طراحی بهینه برای چند گزینه، فرض کنید که یک ساختار فرابنای دیگر برای طراحی پل مدنظر است که در قسمت قبل توضیح داده شد (شکل ۹-۴). وزن به پوند در هر فوت در این گزینه به‌صورت زیر به‌دست آمده است

$$W = 22S + 0$$

فرض کنید که همه فاکتورهای دیگر مشابه طراحی قبلی باشد.

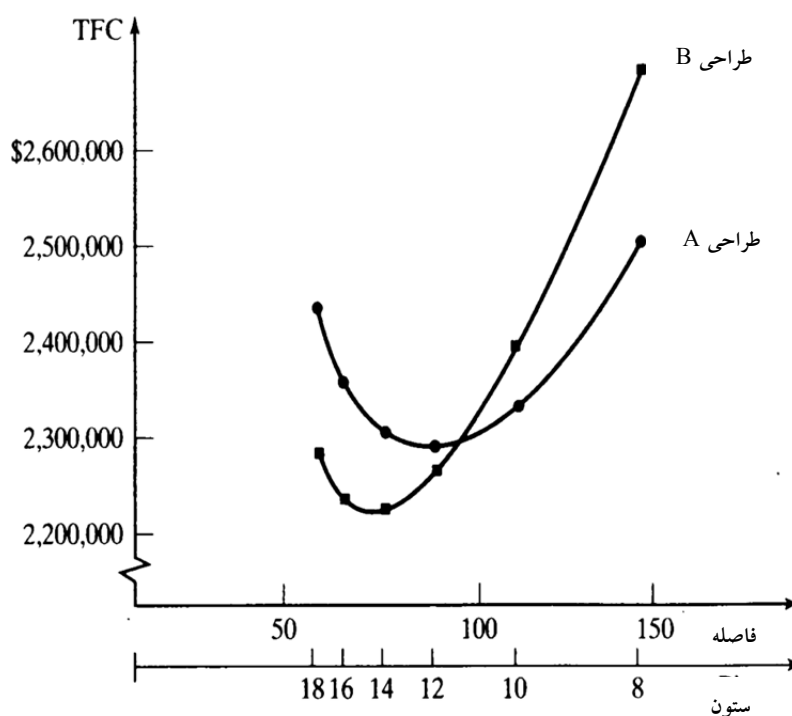
انتخاب بین گزینه‌های طراحی با پیدا کردن مقدار هزینه کل بهینه برای آن‌ها با استفاده از معادله ۹-۱۲ صورت می‌گیرد. این هزینه برای طراحی A این مقدار ۲۲۹۴۲۸۱ دلار و برای طراحی B به روش مشابه ۲۲۱۹۱۵۹ دلار محاسبه شده است. در نتیجه طراحی B باید انتخاب شود.

برای طراحی B، فاصله بهینه بین ستون‌ها از طریق معادله ۹-۱۱ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$S^* = \sqrt{\frac{80000}{22 \times 0.65}} = 74.8$$

و کوچک‌ترین عدد صحیح مربوط به این مقدار که تعداد ستون‌ها را مشخص می‌کند برابر با ۱۴ است (۱۳ فاصله).

جدول ۹-۲ این تصمیم طراحی را با استفاده از هزینه کل به عنوان تابعی از تعداد ستون‌ها برای هر گزینه خلاصه کرده است. تابع هزینه کل تئوریک برای هر گزینه در شکل ۹-۵ همراه با مشخص کردن تعداد ستون‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۹-۵- هزینه اولیه کل برای دو گزینه طراحی پل

جدول ۹-۲- TFC دو گزینه طراحی پل

تعداد ستون‌ها	هزینه ستون	هزینه روبنا		هزینه کل اولیه	
		طراحی A	طراحی B	طراحی A	طراحی B
8	640000	1875714	2042857	2515714	2682857
10	800000	1545555	1588889	2345555	2388889
11	880000	1430000	1430000	2310000	2310000
12	960000	1335454	1300000	2295454	2260000
13	1040000	1256666	1191666	2296667	2231666
14	1120000	1190000	1100000	2310000	2220000
15	1200000	1132857	1021438	2332857	2221438
16	1280000	1083333	953333	2363333	2233333
18	1440000	1001765	841176	2441765	2281176

۹-۲-۲- بهینه‌سازی هزینه چرخه عمر

هزینه سرمایه‌گذاری با استفاده از مشتق‌گیری بهینه شد و یک مثال کاربردی ارائه شد. هنگامی که هزینه سالانه نگهداری و تعمیرات و/یا عملیات بین گزینه‌های طراحی متفاوت باشد، تابع هزینه باید طوری فرمول‌بندی شود که هم هزینه اولیه و هم این هزینه‌ها را در نظر داشته باشد تا به‌عنوان معیاری برای انتخاب بهترین گزینه عمل کند.

ارزیابی پل با در نظر گرفتن نگهداری و تعمیرات. معادله ۹-۱۲ هزینه کل اولیه پل را به دست می‌آورد. این معادله را می‌توان با معادله ۸-۷ کامل کرد تا معادل کنونی هزینه چرخه‌ی عمر (PELCC) به دست آید که به صورت زیر نمایش داده شده است

$$PELCC = \left[2\sqrt{AC_p L^2 C_s} + BLC_s + C_p \right] + M \left[\frac{\left(\frac{P/A, g', n}{1+g} \right)}{1+g} \right] \quad (9-13)$$

که در آن عبارتی که تاکنون تعریف نشده‌اند، عبارت‌اند از:

n = عمر پیش‌بینی شده پل.

M = هزینه نگهداری و تعمیرات در سال اول.

g = درصد افزایش هزینه نگهداری و تعمیرات در سال بعدی.

به عنوان مثالی از کاربرد معادله ۹-۱۳، فرض کنید که دو گزینه طراحی پل که در شکل ۹-۴ نشان داده شده است دارای هزینه نگهداری و تعمیرات متفاوتی هستند. طراحی A دارای هزینه نگهداری و تعمیرات ۱۰۰۰۰۰ دلار در سال اول است و هر سال ۵٪ به این مقدار اضافه می‌شود. طراحی B دارای هزینه نگهداری و تعمیرات ۹۰۰۰۰ دلار در سال اول است و هر سال ۷٪ به این مقدار اضافه می‌شود. اگر نرخ بهره ۱۰٪ فرض شود، PELCC برای طراحی A به عنوان تابعی از عمر خود، n ، به صورت زیر به دست می‌آید

$$PELCC_A = \left[2\sqrt{16(80000)(1000)^2(0.65)} + 600(1000)(0.65) + 80000 \right] + 100000 \left[\frac{\left(\frac{P/A, g', n}{1+0.05} \right)}{1+0.05} \right]$$

که در آن

$$g' = \frac{1+i}{1+g} - 1 = \frac{1+0.10}{1+0.05} - 1 = 4.76\%$$

PELCC برای طراحی A به عنوان تابعی از عمر خود، n، به صورت زیر به دست می‌آید

$$PELCC_A = \left[2\sqrt{16(80000)(1000)^2(0.65)} + 80000 \right] + 90000 \left[\frac{\left(\frac{P/A, g', n}{1+0.07} \right)}{1+0.07} \right]$$

که در آن

$$g' = \frac{1+i}{1+g} - 1 = \frac{1+0.10}{1+0.07} - 1 = 2.80\%$$

فرض کنید که عمر خدمت‌دهی ۴۰ سال باشد، معادل کنونی هزینه برای طراحی A به صورت

زیر خواهد بود

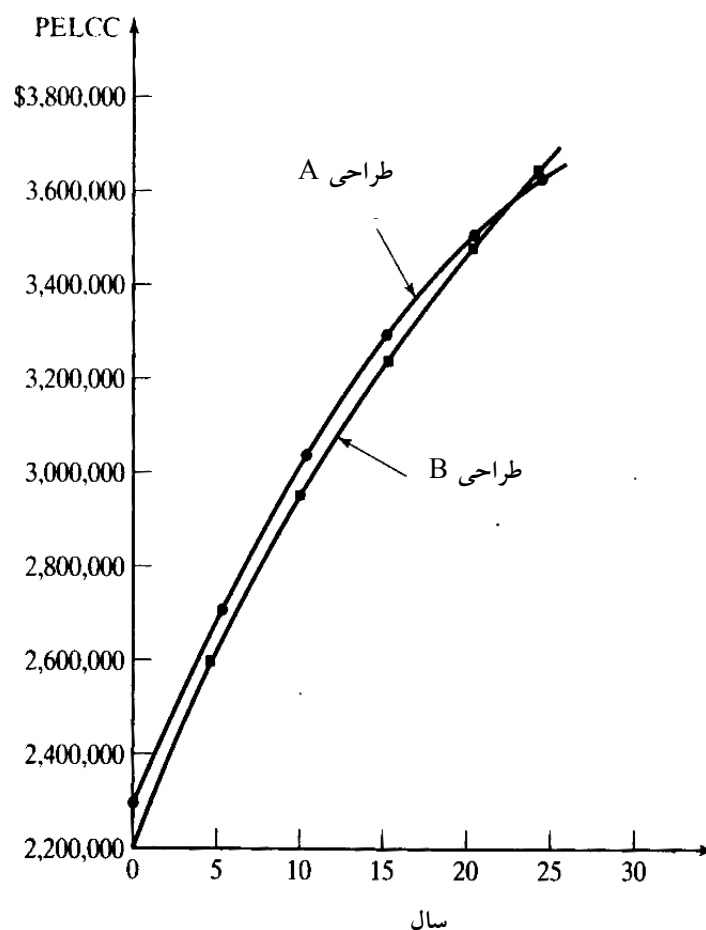
$$PELCC_A = 2294281 + 100000 \left[\frac{\left(\frac{P/A, 4.76, 40}{1.05} \right)}{1.05} \right] = 3983633$$

و برای طراحی B

$$PELCC_A = 2219159 + 90000 \left[\frac{\left(\frac{P/A, 2.80, 40}{1.07} \right)}{1.07} \right] = 4227816$$

در نتیجه گزینه A بهترین است.

نمایش سربه سر معادل کنونی هزینه چرخه‌ی عمر طراحی A و B در شکل ۹-۶ نشان داده شده است. از این شکل، بدیهی است که گزینه A از B بیش‌تر است اگر عمر خدمت‌دهی بیش‌تر از ۲۲ سال باشد. بنابراین گزینه A تایید می‌شود.



شکل ۹-۶- معادل فعلی تجمعی هزینه چرخه‌ی عمر برای دو گزینه طراحی پل

۹-۲-۳- عمر بهینه تجهیز

عمر خدمت‌دهی بهینه یک دارایی می‌تواند از آگاهی در مورد هزینه‌ی اولیه آن و با تخمین هزینه‌های نگهداری، تعمیرات و عملیات طرح‌ریزی شود. هدف، حداقل کردن هزینه معادل سالانه در عمر خدمت‌دهی است. این عمر بهینه همچنین به عنوان حداقل هزینه عمر خدمت‌دهی یا بازه‌ی تعویض بهینه شناخته می‌شود.

در این قسمت، یک مدل عمومی برای یافتن عمر بهینه یک دارایی توسعه داده شده است. این مدل سپس برای تعیین عمر اقتصادی یک دارایی موجود و انتخاب یک دارایی از بین گزینه‌های طراحی اعمال می‌شود. در هر مورد، هزینه چرخه‌ی عمر پایه و اساس تصمیم‌گیری را تشکیل می‌دهد.

ارزیابی با رویکرد ریاضی. هزینه‌های نگهداری و عملیات عموماً با افزایش عمر تجهیز افزایش می‌یابند. این روند افزایش با کاهش هزینه معادل سالانه بازگشت سرمایه تعدیل می‌شود. بنابراین، برای برخی عمرها، یک هزینه چرخه‌ی عمر کمینه وجود خواهد داشت.

اگر از ارزش زمانی پول صرف‌نظر شود، هزینه میانگین سالانه چرخه‌ی عمر یک دارایی همراه با هزینه نگهداری و تعمیرات که به طور ثابت افزایش می‌یابد، به صورت زیر خواهد بود

$$ALCC = \frac{P}{n} + O + (n-1) \frac{M}{2} \quad (۹-۱۴)$$

که در آن

$ALCC$ = هزینه میانگین سالانه چرخه‌ی عمر

P = هزینه اولیه دارایی

O = بخش ثابت سالانه هزینه عملیات (معادل هزینه عملیات در سال اول که نگهداری و تعمیرات جزئی از آن است)

M = مقداری که توسط آن هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در هر سال افزایش می‌یابد

n = عمر تجهیز (سال)

عمر هزینه نگهداری و تعمیرات به صورت ریاضی با استفاده از حساب دیفرانسیل از طریق رابطه زیر به دست می‌آید

$$\frac{dALCC}{dn} = -\frac{P}{n^2} + \frac{M}{2} = 0 \quad (۱۵-۹)$$

$$n^* = \sqrt{\frac{2P}{M}}$$

بنابراین، حداقل هزینه میانگین چرخه‌ی عمر به صورت زیر خواهد بود

$$ALCC^* = P\sqrt{\frac{M}{2P}} + O + \left(\sqrt{\frac{2P}{M}} - 1\right)\frac{M}{2}$$

$$= \sqrt{\frac{PM}{2}} + O + \sqrt{\frac{PM}{2}} - \frac{M}{2} \quad (۱۶-۹)$$

$$= 2\sqrt{\frac{PM}{2}} + O - \frac{M}{2}$$

$$= \sqrt{2PM} + O - M / 2$$

به عنوان یک مثال از کاربرد معادله ۱۶-۹ یک دارایی را در نظر بگیرید که دارای هزینه اولیه ۱۸۰۰۰ دلار، ارزش اسقاطی صفر در هر عمری، هزینه نگهداری و تعمیرات و عملیات معادل ۴۰۰۰ دلار که سالانه ۱۰۰۰ دلار افزایش می‌یابد. عمر حداقل هزینه از معادله ۱۵-۹ به صورت زیر به دست می‌آید

$$n^* = \sqrt{\frac{2(18000)}{1000}} = 6$$

هزینه کل کمینه در این عمر از معادله ۱۶-۹ به صورت زیر به دست می‌آید

$$ALCC^* = \sqrt{2(18000)(1000)} + 4000 - 500 = 9500$$

این وضعیت را می‌توان با جدول‌بندی اجزای هزینه و میانگین هزینه چرخه‌ی عمر که در شکل ۳-۹ نشان داده شده است، به‌دست آورد. هزینه چرخه‌ی عمر حداقلی در عمر ۶ سال اتفاق می‌افتد. شکل ۷-۹ طبیعت افزایشی و کاهشی اجزای هزینه و عمر بهینه ۶ ساله را نشان می‌دهد. یک ساختار تجهیز جایگزین را در نظر بگیرید که قابل اطمینان‌تر از ساختار قبلی است و منجر به هزینه نگهداری، تعمیرات و عملیاتی در سال اول معادل ۳۲۰۰ دلار و افزایش سالانه ۸۰۰ دلار می‌شود. این ساختار، هزینه اولیه ۲۵۶۰۰ دلاری دارد. عمر بهینه هزینه از معادله ۹-۱۵ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$n^* = \sqrt{\frac{2(25600)}{800}} = 8$$

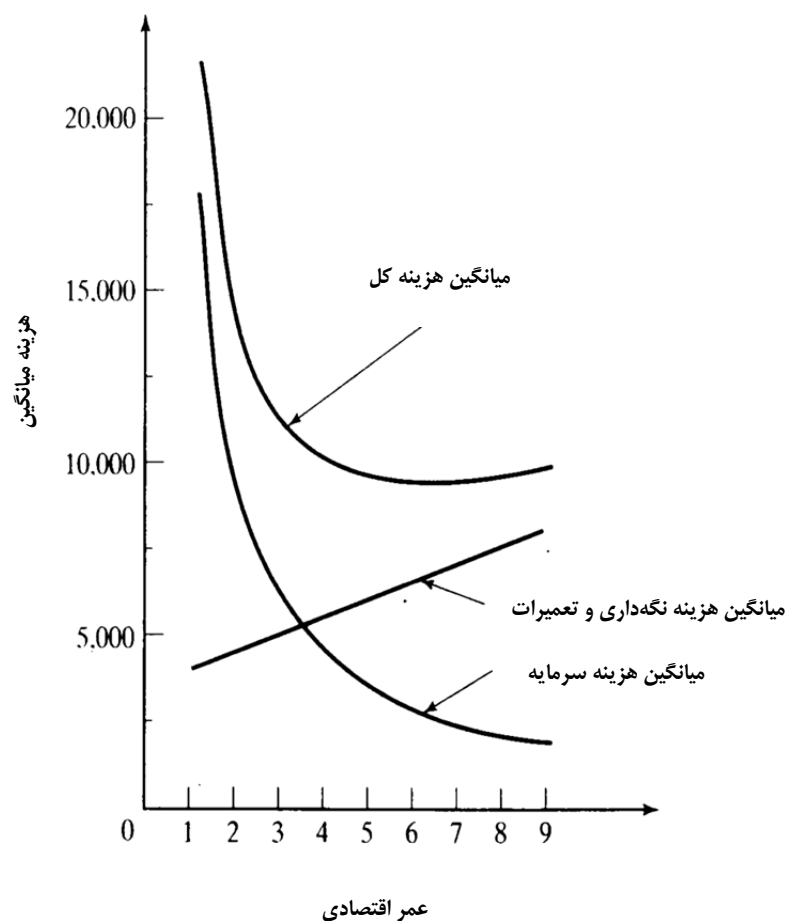
هزینه چرخه‌ی عمر حداقل با این عمر از معادله ۹-۱۶ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$ALCC^* = \sqrt{2(25600)(800)} + 3200 - 400 = 9200$$

جدول ۳-۹- میانگین هزینه سالانه چرخه‌ی عمر یک دارایی (ساختار اول)

میانگین هزینه چرخه عمر	میانگین هزینه سرمایه	میانگین هزینه نگهداری و تعمیرات	هزینه نگهداری و تعمیرات تجمعی	هزینه نگهداری و تعمیرات در انتهای سال	انتهای سال
F=D+E	E=18000/A	D=C/A	C=ΣB	B	A
22000	18000	4000	4000	4000	1
13500	9000	4500	9000	5000	2
11000	6000	5000	15000	6000	3
10000	4500	5500	22000	7000	4
9600	3600	6000	30000	8000	5
9500	3000	6500	39000	9000	6
9571	2571	7000	49000	10000	7
9750	2250	7500	60000	11000	8
10000	2000	8000	72000	12000	9

این شرایط را می‌توان مانند قبل جدول‌بندی کرد تا اجزای هزینه و میانگین هزینه چرخه‌ی عمر را نشان داد که در جدول ۹-۴ فراهم شده است. هزینه کل کمینه در عمر ۸ ساله به مقدار ۹۲۰۰ اتفاق می‌افتد. شکل ۸-۹ طبیعت افزایشی و کاهشی اجزای هزینه‌ها و عمر بهینه ۸ ساله را نشان می‌دهد. این ساختار از نقطه‌نظر میانگین هزینه چرخه‌ی عمر و از نقطه‌نظر عمر خدمت‌دهی ارجح است.

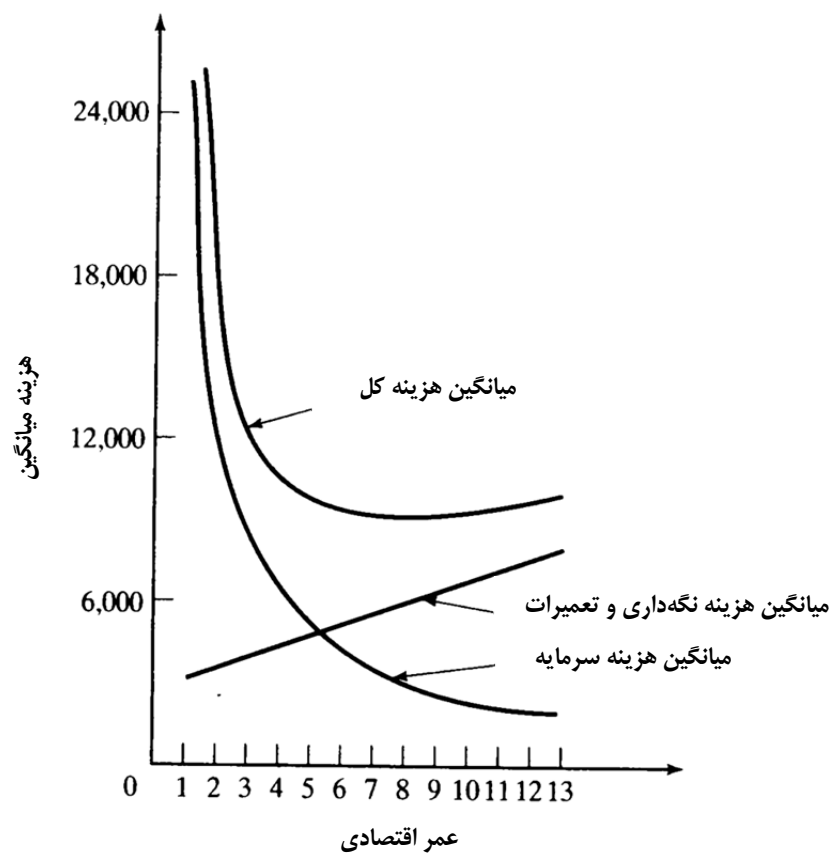


شکل ۹-۷- اجزا هزینه و LCC یک دارایی (ساختار اول)

ارزیابی با رویکرد جدولی. اغلب این امکان وجود ندارد که عمر بهینه هزینه به صورت ریاضی یافت شود. هنگامی که مباحث غیرخطی وارد مساله شده و ارزش زمانی پول مدنظر باشد، رویکرد جدولی باید مورد استفاده قرار گیرد. مثال زیر را فرض کنید. آینده اقتصادی یک دارایی با هزینه اولیه ۱۵۰۰۰ دلار، با ارزش‌های اسقاطی خطی نزولی و هزینه عملیاتی که از ۱۰۰۰ دلار شروع شده و در سال‌های بعد ۳۰۰ دلار به آن افزوده می‌شود (خود میزان افزایش سالانه ۵۵ دلار افزایش می‌یابد) در شکل ۹-۹ نشان داده شده است.

جدول ۹-۴- میانگین هزینه سالانه چرخه‌ی عمر یک دارایی (ساختار جایگزین)

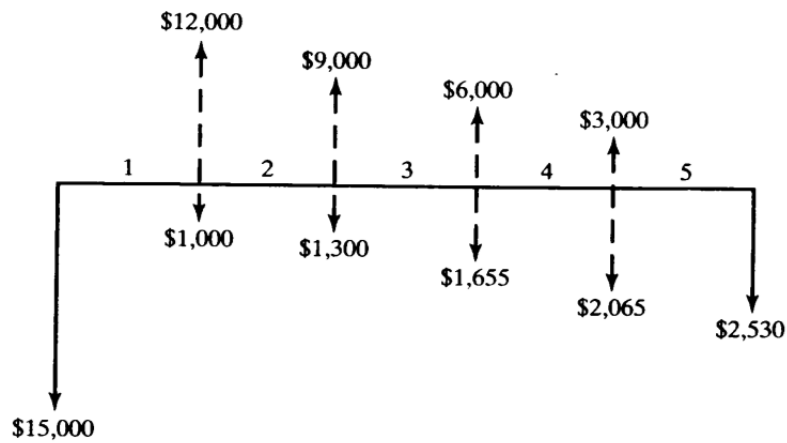
میانگین هزینه چرخه عمر	میانگین هزینه سرمایه	میانگین هزینه نگهداری و تعمیرات	هزینه نگهداری و تعمیرات تجمعی	هزینه نگهداری و تعمیرات در انتهای سال	انتهای سال
$F=D+E$	$E=25600/A$	$D=C/A$	$C=\sum B$	B	A
28800	25600	3200	3200	3200	1
16400	12800	3600	7200	4000	2
12533	8533	4000	12000	4800	3
10800	6400	4400	17600	5600	4
9920	5210	4800	24000	6400	5
9467	4267	5200	31200	7200	6
9257	3657	5600	39200	8000	7
9200	3200	6000	48000	8800	8
9244	2844	6400	57600	9600	9
9360	2560	6800	68000	10400	10
9527	2327	7200	79200	11200	11
9733	2133	7600	91200	12000	12



شکل ۹-۸- اجزای هزینه و LCC یک دارایی (ساختار جایگزین)

برای یافتن عمر بهینه دارایی لازم است که جریان‌های پولی را از آن چه در شکل ۹-۹ نمایش داده شده است، جدا کنیم. برای مثال، اگر دارایی پس از ۳ سال از کار بیافتد، هزینه سرمایه معادل سالانه در نرخ ۱۲٪ از معادله ۸-۸ به صورت زیر به دست می‌آید

$$(15000 - 6000) \left(\frac{A/P, 12, 3}{0.4164} \right) + 6000(0.12) = 4468$$



شکل ۹-۹- جریان پولی برای یک دارایی (ساختار اول)

جدول ۹-۵- محاسبات جدولی برای عمر بهینه

سال انتهای سال	ارزش اسقاطی دارایی در زمان ازکاراندازی	هزینه‌های عملیاتی	معادل سالانه هزینه دارایی	معادل سالانه هزینه عملیاتی	معادل سالانه LCC
A	B	C	D	E	F
1	12000	1000	4800	1000	5800
2	9000	1300	4630	1142	5722
3	6000	1655	4468	1294	5762
4	3000	2065	4310	1455	5765
5	0	2530	4161	1624	5785

و هزینه عملیاتی معادل سالانه به صورت زیر خواهد بود

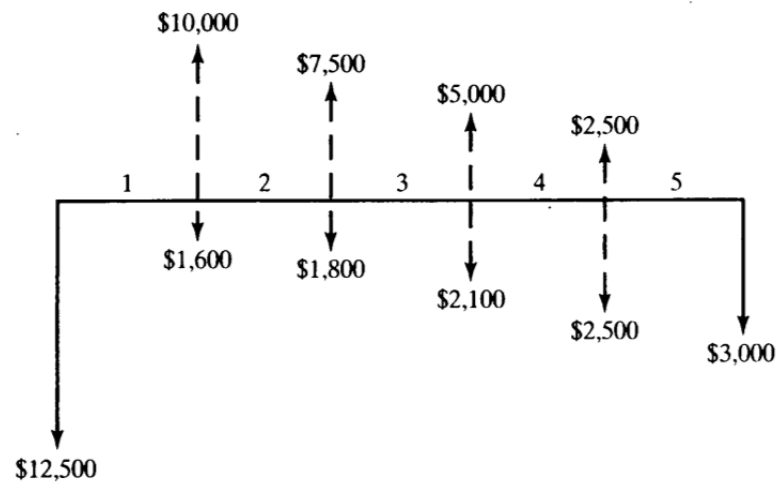
$$(1000)^{P/F,12,1} + 1300(0.7972)^{P/F,12,2} + 1655(0.7116)^{P/F,12,33} (0.4164)^{A/P,12,3} = 1294$$

هزینه معادل سالانه چرخه‌ی عمر همان‌طور که در ستون F جدول ۹-۵ نشان داده شده است برابر است با ۱۲۹۴ + ۴۴۶۸. این مقدار بهینه است و می‌تواند برای مقایسه با دیگر گزینه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

فرض کنید که نیاز برای دارایی بحث شده در جدول ۹-۵ را بتوان با یک ساختار فیزیکی جایگزین برآورده کرد. سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز برای دارایی جایگزین ۱۲۵۰۰ دلار بوده و مانند قبل دارای ارزش اسقاطی نزولی خطی است و هزینه عملیات از ۱۶۰۰ دلار در سال اول شروع شده و سالانه ۲۰۰ دلار کاهش می‌یابد و این کاهش سالانه ۱۰ دلار بیش‌تر می‌شود و نرخ بهره ۱۲٪ است. برای پیدا کردن عمر بهینه دارایی، لازم است که جریان پولی مربوطه شناسایی شود. این جریان‌های پولی در شکل ۹-۱۰ ترسیم شده و پایه و اساس محاسبات هزینه معادل سالانه چرخه‌ی عمر خواهند بود که در جدول ۹-۶ نشان داده شده است.

در این مثال، هر دوی مورد اول و ساختار جانشین عمر بهینه ۳ سال را دارا هستند. با این حال، ساختار جایگزین ارجح است زیرا هزینه معادل سالانه چرخه‌ی عمر کم‌تر است

$$5762 - 5538 = 224$$



شکل ۹-۱۰- جریان مالی یک دارایی (ساختار جایگزین)

جدول ۹-۶- محاسبات جدولی عمر بهینه (ساختار جایگزین)

انتهای سال	ارزش اسقاطی دارایی در زمان ازکاراندازی	هزینه‌های عملیاتی	معادل سالانه هزینه دارایی	معادل سالانه هزینه عملیاتی	معادل سالانه LCC
A	B	C	D	E	F
1	10000	1600	4000	1600	5600
2	7500	1800	3859	1694	5553
3	5000	2100	3723	1815	5538
4	2500	2500	3592	1958	5550
5	0	3000	3468	2122	5590

۹-۲-۴ - بهینه‌سازی تدارکات و عملیات موجودی

مثال‌های انتخاب تجهیز و طراحی پل کاربرد تئوری بهینه‌سازی کلاسیک در سیستم‌ها بدون وجود فعالیت را نمایش دادند. در این قسمت، تئوری بهینه‌سازی کلاسیک در سیستم‌های موجودی با یک آیت، یک منبع و چندین منبع اعمال می‌شود. در این سیستم دارای فعالیت، هدف تعیین سیاست بهینه تدارکات و موجودی است به صورتی که در گذر زمان با حداقل هزینه عملیات خود را انجام دهد.

در سیستم تک منبعی زمان خرید و مقدار خرید متغیرهایی سیاستی مهم هستند. تابع ارزیابی تصمیم از معادله ۷-۲ به صورت زیر اعمال می‌شود

$$E = f(X, Y)$$

که در آن

E = شاخص ارزیابی (هزینه کل سیستم)

X = متغیرهای سیاستی زمان خرید و مقدار خرید

Y = پارامترهای سیستم شامل تقاضا، زمان تحویل، نرخ جانشینی، هزینه آیت، هزینه خرید، هزینه انبارش و هزینه کمبود.

معادله ۷-۳ تابع ارزیابی تصمیم قابل استفاده در سیستم‌های چند منبعی است که در آن پارامترهای وابسته به منبع کلید تعیین بهترین منبع خرید هستند. هر دو نسخه از تابع در شرایط غیر محدود در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرند.

TC = هزینه کل سیستم در هر دوره

$L = \text{سطح خرید}$

$$Q = \text{تعداد خرید}$$

$$D = \text{نرخ تقاضا در هر دوره}$$

$$T = \text{زمان تحویل در واحد دوره}$$

$$N = \text{تعداد دوره‌ها در هر سیکل}$$

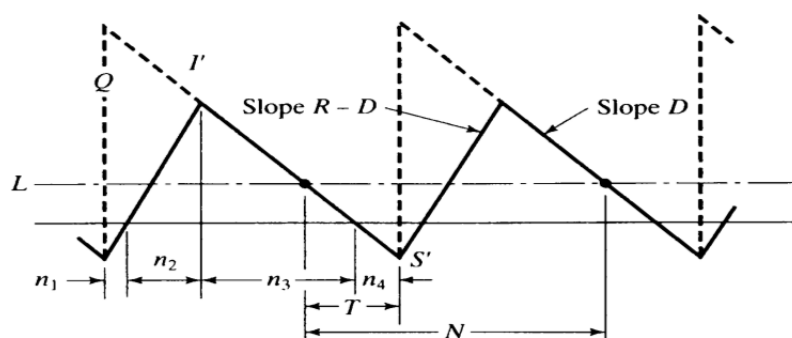
$$R = \text{نرخ جایگزینی برای واحدها در یک دوره}$$

$$C_i = \text{هزینه آیتم در هر واحد}$$

$$\text{هزینه خرید} = C_p$$

$$C_h = \text{هزینه انبارش، هر واحد در هر دوره}$$

C_s = هزینه کمبود هر واحد در هر دوره



شکل ۹-۱۱- هندسه سیستم موجودی قطعی عمومی

فرض شده است که نرخ جایگزینی بیش‌تر از نرخ تقاضا است و تقاضای برآورده نشده از دست نمی‌رود. از شکل ۹-۱۱، تعداد دوره‌های هر سیکل از معادله زیر به‌دست می‌آید

$$N = \frac{Q}{D} \quad (۹-۱۷)$$

هم‌چنین، روابط زیر بدیهی هستند

$$(n_1 + n_2)(R - D) = (n_3 + n_4)D \quad (۹-۱۸)$$

$$n_1 + n_2 = \frac{Q}{R} \quad (۹-۱۹)$$

و

$$n_3 + n_4 = \frac{I' + DT - L}{D} \quad (۹-۲۰)$$

از معادلات ۹-۱۸ تا ۹-۲۰

$$I' = Q \left(1 - \frac{D}{R} \right) + L - DT \quad (۹-۲۱)$$

تعداد کل دوره‌ها طی سیکل موجودی، I به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\begin{aligned} I &= \frac{I'}{2} (n_2 + n_3) \\ &= \frac{I'^2}{2(R - D)} + \frac{I'^2}{2D} \end{aligned} \quad (۹-۲۲)$$

با جایگزینی معادله ۹-۲۱ برای I'

$$I = \frac{\left[Q \left(1 - \frac{D}{R} + \frac{L - DT}{Q} \right) \right]^2}{2} \left(\frac{1}{R - D} + \frac{1}{D} \right) \quad (۹-۲۳)$$

تعداد کل دوره‌های کمبود طی سیکل S

$$S = \frac{S'}{2}(n_1 + n_4)$$

$$= \frac{S'^2}{2(R-D)} + \frac{S'^2}{2D}$$

اما چون $S' = DT - L$

$$S = \frac{(DT - L)^2}{2} \left(\frac{1}{R-D} + \frac{1}{D} \right) \quad (24-9)$$

هزینه کل سیستم در هر دوره مجموع هزینه آئتم برای دوره، هزینه خرید برای دوره، هزینه

انبارش برای دوره، و هزینه کمبود برای دوره است یا

$$TC = IC + PC + HC + SC \quad (25-9)$$

هزینه آئتم یک دوره حاصلضرب هزینه آئتم هر واحد در نرخ تقاضای هر دوره است یا

$$IC = C_i D \quad (26-9)$$

هزینه خرید در یک دوره، هزینه خرید تقسیم بر تعداد دوره‌ها در هر سیکل موجودی است یا

$$PC = \frac{C_p}{N}$$

$$= \frac{C_p D}{Q} \quad (27-9)$$

هزینه انبارش در هر دوره حاصلضرب هزینه انبارش هر واحد در هر دوره در تعداد میانگین

واحدهای موجود طی دوره است یا

$$HC = \frac{C_h I}{N}$$

$$= \frac{C_h D}{Q} \left\{ \frac{[Q(1 - D/R) + L - DT]^2}{2} \left(\frac{1}{R - D} + \frac{1}{D} \right) \right\}$$

توجه کنید که رابطه زیر وجود دارد:

$$\frac{D}{Q} \left(\frac{1}{R - D} + \frac{1}{D} \right) \frac{1}{Q(1 - D/R)} \quad (28-9)$$

با استفاده از معادله ۹-۲۴، جزء هزینه انبارش به صورت زیر می شود

$$HC = \frac{C_h}{2Q(1 - D/R)} \left[Q \left(1 - \frac{D}{R} \right) + L - DT \right]^2 \quad (29-9)$$

هزینه کمبود برای هر دوره، حاصل ضرب هزینه کمبود هر واحد در دوره در تعداد میانگین

واحدهای کمبود در طی دوره است یا

$$SC = \frac{C_s S}{N}$$

$$= \frac{C_s D}{Q} \left[\frac{(DT - L)^2}{2} \left(\frac{1}{R - D} + \frac{1}{D} \right) \right] \quad (30-9)$$

می توان معادله ۹-۳۰ را به صورت زیر بازنویسی کرد

$$SC = \frac{C_s (DT - L)^2}{2Q(1 - D/R)} \quad (31-9)$$

هزینه کل سیستم در هر دوره با حاصل جمع چهار جزء هزینه که در بالا توسعه داده شده

به صورت زیر به دست می آید

$$TC = C_i D + \frac{C_p D}{Q} + \frac{C_h}{2Q(1-D/R)} \left[Q \left(1 - \frac{D}{R} \right) + L - DT \right]^2 + \frac{C_s (DT - L)^2}{2Q(1-D/R)} \quad (۳۲-۹)$$

سطح خرید و تعداد خرید با کم‌ترین هزینه را می‌توان با استفاده از مشتق‌های جزئی و برابر صفر قرار دادن آن‌ها و حل معادله‌ها به‌دست آورد. با اصلاح معادله ۳۲-۹ داریم

$$TC = C_i D + \frac{C_p D}{Q} + \frac{C_h Q (1-D/R)}{2} - C_h (DT - L) + \frac{C_h (DT - L)^2}{2Q(1-D/R)} + \frac{C_s (DT - L)^2}{2Q(1-D/R)} \quad (۳۳-۹)$$

با مشتق‌گیری نسبت به Q از معادله ۳۳-۹ و سپس مشتق‌گیری نسبت به DT-L و قرار دادن هر دو برابر صفر داریم

$$\frac{\delta TC}{\delta Q} = -\frac{C_p D}{Q^2} + \frac{C_h (1-D/R)}{2} - \frac{C_h (DT - L)^2}{2Q^2(1-D/R)} - \frac{C_s (DT - L)^2}{2Q^2(1-D/R)} = 0 \quad (۳۴-۹)$$

$$\frac{\delta TC}{\delta (DT - L)} = -C_h + \frac{C_h (DT - L)}{Q(1-D/R)} + \frac{C_s (DT - L)}{Q(1-D/R)} = 0 \quad (۳۵-۹)$$

معادله ۳۵-۹ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت

$$\frac{DT - L}{Q} = \frac{C_h (1-D/R)}{C_h + C_s} \quad (۳۶-۹)$$

با جایگزینی معادله ۳۶-۹ در معادله ۳۴-۰ داریم

$$-\frac{C_p D}{Q^2} + \frac{C_h (1-D/R)}{1} - \frac{C_h^2 (1-D/R)}{2(C_h + C_s)^2} - \frac{C_s C_h^2 (1-D/R)}{2(C_h + C_s)^2} = 0$$

$$\frac{C_p D}{Q^2} = \frac{C_h C_s (1-D/R)}{2(C_h + C_s)}$$

با حل برای Q داریم

$$Q^* = \sqrt{\frac{1}{1-D/R}} \sqrt{\frac{2C_p D}{C_h} + \frac{2C_p D}{C_s}} \quad (37-9)$$

با جایگزینی معادله ۳۷-۹ در ۳۶-۹ داریم

$$L^* = DT - \frac{C_h (1-D/R)}{C_s + C_h} \sqrt{\frac{1}{1-D/R}} \sqrt{\frac{2C_p D}{C_h} + \frac{2C_p D}{C_s}} \quad (38-9)$$

$$L^* = DT - \sqrt{1-\frac{D}{R}} \sqrt{\frac{2C_p D}{C_s (1+C_s/C_h)}}$$

معادلات ۳۷-۹ و ۳۸-۹ را می‌توان در معادله ۳۳-۹ قرار داد تا هزینه کمینه کل سیستم را

به‌دست آورد. پس از چند گام، نتیجه به‌صورت زیر خواهد بود

$$TC^* = C_i D + \sqrt{1-\frac{D}{R}} \sqrt{\frac{2C_p C_h C_s D}{C_h + C_s}} \quad (39-9)$$

گزینه تک منبعی. به‌عنوان یک مثال از سیستم موجودی با یک منبع خرید، وضعیتی را در نظر

بگیرید که پارامترهای سیستم زیر برای یک آیتم در دست باشد

$$D = 10 \text{ واحد در هر دوره}$$

$$R = 20 \text{ واحد در هر دوره}$$

$$T = ۸ \text{ دوره}$$

$$C_i = ۴,۸۲ \text{ دلار در هر واحد}$$

$$C_p = ۱۰۰ \text{ دلار برای هر خرید}$$

$$C_h = ۰,۲۰ \text{ دلار برای هر واحد در هر دوره}$$

$$C_s = ۰,۱۰ \text{ دلار برای هر واحد در هر دوره}$$

جدول ۹-۷- هزینه کل سیستم به‌عنوان تابعی از Q و L

$\begin{matrix} Q \\ L \end{matrix}$	242	243	244	245	246	247	248
-6	56.399	56.390	56.386	56.383	56.383	56.380	56.377
-5	56.387	56.383	56.380	56.377	56.374	56.372	56.371
-4	56.378	56.375	56.372	56.370	56.368	56.367	56.365
-3	56.371	56.369	56.367	56.366	56.365	56.364	56.364
-2	56.366	56.365	56.364	56.363	56.363	56.364	56.364
-1	56.364	56.364	56.364	56.364	56.365	56.366	56.367
0	56.364	56.365	56.366	56.367	56.368	56.370	56.373
1	56.367	56.369	56.370	56.372	56.374	56.377	56.380
2	56.373	56.375	56.377	56.380	56.383	56.386	56.390
3	56.381	56.383	56.386	56.390	56.394	56.398	56.403
4	56.391	56.394	56.398	56.403	56.407	56.442	56.418

هزینه کل سیستم را می‌توان به‌صورت جدولی به‌عنوان تابعی از Q و L با استفاده از معادله ۹-۳۲ به‌دست آورد. مقادیر حاصل در حوزه‌ی نقطه کمینه هزینه در جدول ۹-۷ ارائه شده است. هزینه کمینه Q و L را می‌توان با ارزیابی جدول به‌دست آورد. مانند مثال قبل، رویه ایجاد شده توسط مقادیر TC بیش‌تر حالتی تخت و صاف دارد. همچنین، انتخاب مقادیر صحیح برای Q و L هزینه کل را آن چنان تحت‌تاثیر قرار نمی‌دهد.

تعداد خرید با هزینه کمینه و سطح خرید با هزینه کمینه را می‌توان به‌طور مستقیم با جایگزینی معادله ۳۷-۹ در ۳۸-۹ به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$Q^* = \sqrt{\frac{1}{1 - 10/20}} \sqrt{\frac{2(100.00)(10)}{0.20} + \frac{2(100.00)(10)}{0.10}} = 244.95$$

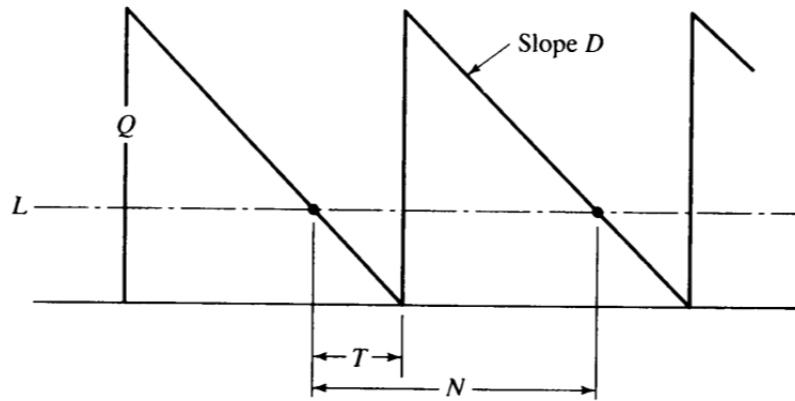
$$L^* = 10(8) - \sqrt{1 - \frac{10}{20}} \sqrt{\frac{2(100.00)(10)}{0.10(1 + 0.10/0.20)}} = -1.65$$

هزینه کل سیستم حاصل در تعداد و سطح خرید با حداقل هزینه از طریق معادله ۳۹-۹ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$TC^* = 4.82(10) + \sqrt{1 - \frac{10}{20}} \sqrt{\frac{2(100.00)(0.20)(0.10)(10)}{0.20 + 0.10}} = 56.363$$

بر این اساس، آیتم باید در بسته‌های ۲۴۵ واحدی تولید شود. خرید زمانی باید انجام شود که موجودی در دست مقداری منفی پیدا کرده باشد؛ این بدین معنی است که دچار عقب افتادگی دو واحدی شده باشد. هزینه کل سیستم برای هر دوره در این شرایط عملیاتی بهینه ۵۶,۳۶ دلار خواهد بود.

گزینه تک منبعی برای خرید. به‌عنوان مثالی از یک سیستم موجودی که یک منبع خرید دارد، خرید آیتم موردنیاز را در نظر بگیرید که حالت خاصی از گزینه تولید در قسمت قبل است. در این حالت، $R = \infty$ (جایگزینی آنی) و $C = \infty$ (کمبود نباید رخ دهد). با این اصلاحات، شکل ۹-۱۱ به‌صورت شکل ۹-۱۲ ظاهر می‌شود.



شکل ۹-۱۲- هندسه موجودی در حالت قطعیت با $R = \infty$ و $C = \infty$

هزینه کل سیستم از طریق معادله ۹-۳۲ و با جایگزینی $R = \infty$ و $C_s = \infty$ به صورت زیر به دست می آید

$$TC = C_i D + \frac{C_p D}{Q} + \frac{C_h Q}{2} \quad (۹-۴۰)$$

تعداد خرید بهینه با مشتق گیری از TC نسبت به Q و برابر صفر قرار دادن آن به صورت زیر به دست می آید

$$\frac{\delta TC}{\delta} = -\frac{C_p D}{Q^2} + \frac{C_h}{2} = 0 \quad (۹-۴۱)$$

با حل معادله برای به دست آوردن مقدار بهینه Q داریم

$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_p D}{C_h}} \quad (۹-۴۲)$$

این نتیجه را می توان از معادله ۹-۳۷ نیز به دست آورد.

مقدار بهینه برای سطح خرید، L^* ، به سادگی با ضرب D در T به علاوه ذخیره احتیاطی^۱ به دست آورد که در آن هزینه انبار ذخیره احتیاطی توسط مشارکت آن در کاهش احتمال ایجاد کمبود، توجیه می‌شود. یک رویکرد در تنظیم یک سطح ذخیره احتیاطی، رویکردی است که در آن توزیع زمان تحویل تقاضا، LTD ، را می‌توان از طریق تحلیل مونت کارلو توسعه داد.

به عنوان مثالی از کاربرد معادله ۹-۴۲، فرض کنید که تقاضای سالانه یک قطعه یدکی ۱۰۰۰ واحد باشد. هزینه‌ی هر واحد تحویل داده شده در کارگاه ۶ دلار است. هزینه خرید سفارش ۱۰ دلار و هزینه انبار هر واحد برای یک سال ۱,۳۲ دلار تخمین زده می‌شود.

تعداد خرید اقتصادی را می‌توان با جایگزینی مقادیر مناسب در معادله ۹-۴۲ به صورت زیر به دست آورد

$$Q^* = \sqrt{\frac{2(10)(1000)}{(1.32)}} = 123$$

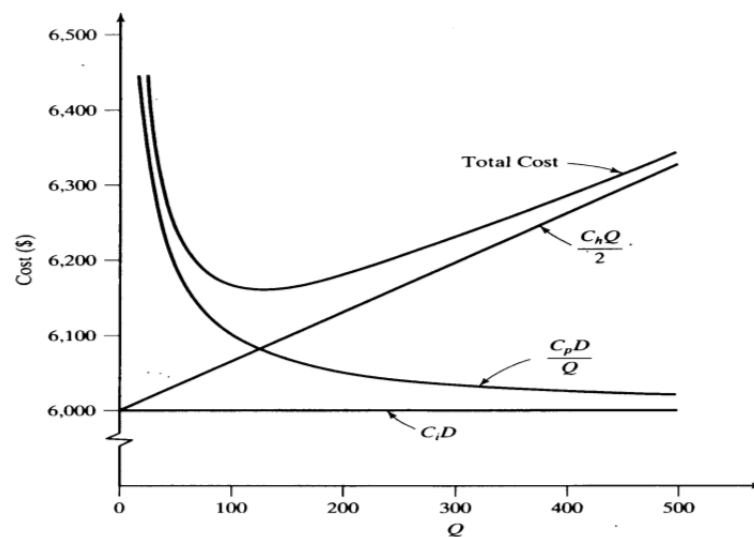
هزینه کل را می‌توان به به صورت تابعی از Q با جایگزینی هزینه‌ها و مقادیر مختلف Q در معادله ۹-۴۰ بیان کرد. نتایج در جدول ۹-۸ ارائه شده است. مقدار هزینه کل جدولی برای $Q=123$ تعداد بهینه در شرایط خاص بیان شده است. هزینه کل به عنوان تابعی از Q در شکل ۹-۱۳ نمایش داده شده است.

جدول ۹-۸- هزینه سیستم موجودی به عنوان تابعی از Q

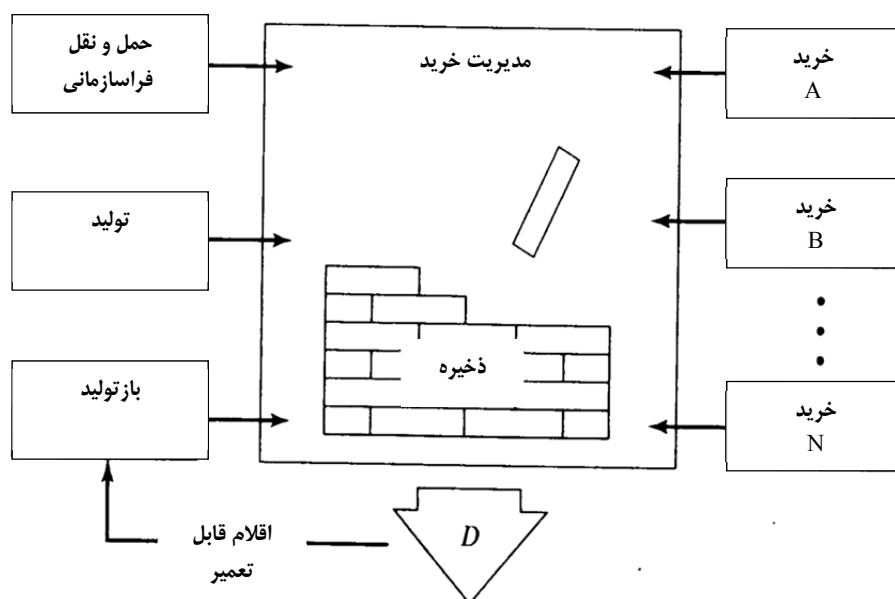
Q	$C_i D$	$\frac{C_p D}{Q}$	$\frac{C_h Q}{2}$	TC
0	6000	∞	0	∞
50	6000	200	33	6233
100	6000	100	66	6166
123	6000	81	81	6162
150	6000	67	99	6165
200	6000	50	132	6182
400	6000	25	264	6289
600	6000	17	396	6413

گزینه‌های چند منبعی. وضعیت زیر را در نظر بگیرید. یک تک آیتم موجودی برای برآورده کردن تقاضا نگهداری می‌شود. هنگامی که تعداد واحدهای در دست از یک سطح از پیش تعیین شده کمتر شود، عملیات خرید برای جایگزینی قطعات فروش رفته توسط یکی از منابع ممکن آغاز می‌شود که در شکل ۹-۱۴ نشان داده شده است. هدف تعیین سطح خرید، تعداد خرید و منبع خرید با در نظر گرفتن پارامترهای هزینه‌ای و سیستمی است تا مجموع همه هزینه‌های مربوط به سیستم حداقل شود.

زمان تحویل خرید، نرخ جایگزینی، هزینه آیتم، و هزینه خرید به منبع وابسته هستند. بنابراین، تابع ارزیابی تصمیم معادله ۷-۳ همراه با پارامترهای وابسته به منبع اعمال می‌شود. همه پارامترهای دیگر هزینه و سیستم مستقل از منبع هستند. شناسایی صریح پارامترهای وابسته به منبع اجازه استفاده از معادله ۹-۳۹ را برای یافتن منبع خرید با کمترین هزینه را فراهم می‌کند. رویه کار مقایسه TC^* هر منبع و انتخاب منبعی است که کمترین TC^* را داشته باشد. پس از آن معادلات ۹-۳۷ و ۹-۳۸ را می‌توان برای پیدا کردن تعداد و سطح خرید با کمترین هزینه اعمال کرد.



شکل ۹-۱۳- هزینه سیستم موجودی به‌عنوان تابعی از Q



شکل ۹-۱۴- چند منبع جایگزینی

مثالی از این رویه وضعیتی است که در آن یک مدیر سیستم با یک تقاضای چهار واحدی در هر دوره برای یک آیتم مواجه است و می‌تواند هم آن را تولید کند و هم آن را از یکی از دو فروشنده تهیه کند. هزینه انبار هر واحد در هر دوره ۰,۲۴ دلار و هزینه کمبود هر واحد در هر دوره ۰,۱۷ دلار است. مقادیر پارامترهای وابسته به منبع در جدول ۹-۹ ارائه شده است.

منبع خریدی که حداقل هزینه کل سیستم را به‌دست دهد از معادله ۹-۳۹ به‌دست می‌آید. برای گزینه تولید داریم

$$TC^* = 19.85(4) + \sqrt{1 - \frac{4}{12}} \sqrt{\frac{2(17.32)(0.24)(0.17)(4)}{0.24 + 0.17}}$$

$$= 82.43$$

جدول ۹-۹- پارامترهای وابسته به منبع برای سیستم چند منبعی

پارامتر	تولید	فروشنده A	فروشنده B
R	12	∞	∞
T	6	3	4
C _i	19.85	17.94	18.33
C _p	17.32	18.7	17.5

برای گزینه خرید از فروشنده A داریم

$$TC^* = 17.94(4) + \sqrt{1 - \frac{4}{\infty}} \sqrt{\frac{2(18.7)(0.24)(0.17)(4)}{0.24 + 0.17}}$$

$$= 75.62$$

برای گزینه خرید از فروشنده B داریم

$$TC^* = 18.33(4) + \sqrt{1 - \frac{4}{\infty}} \sqrt{\frac{2(17.5)(0.24)(0.17)(4)}{0.24 + 0.17}}$$

$$= 77.05$$

بر پایه این تحلیل، گزینه خرید از فروشنده A به عنوان منبع با کم‌ترین هزینه خرید انتخاب می‌شود.

تعداد خرید با کم‌ترین هزینه از این منبع از معادله ۹-۳۷ به صورت زیر به دست می‌آید

$$Q^* = \sqrt{1 - \frac{4}{\infty}} \sqrt{\frac{2(18.7)(4)}{0.24} + \frac{2(18.7)(4)}{0.17}}$$

$$38.78$$

سطح خرید با کم‌ترین هزینه این منبع از معادله ۹-۳۸ به صورت زیر است

$$L^* = 4(3) - \sqrt{1 - \frac{4}{\infty}} \sqrt{\frac{2(18.7)(4)}{0.17(1 + 0.17/0.24)}}$$

$$= -10.69$$

بنابراین، مدیر سیستم فعالیت خرید را زمانی آغاز می‌کند که سطح واحدها به مقدار ۱۰/۶۹- برسد تا مقدار ۳۸/۷۸ واحد از منبع A خریداری کند.

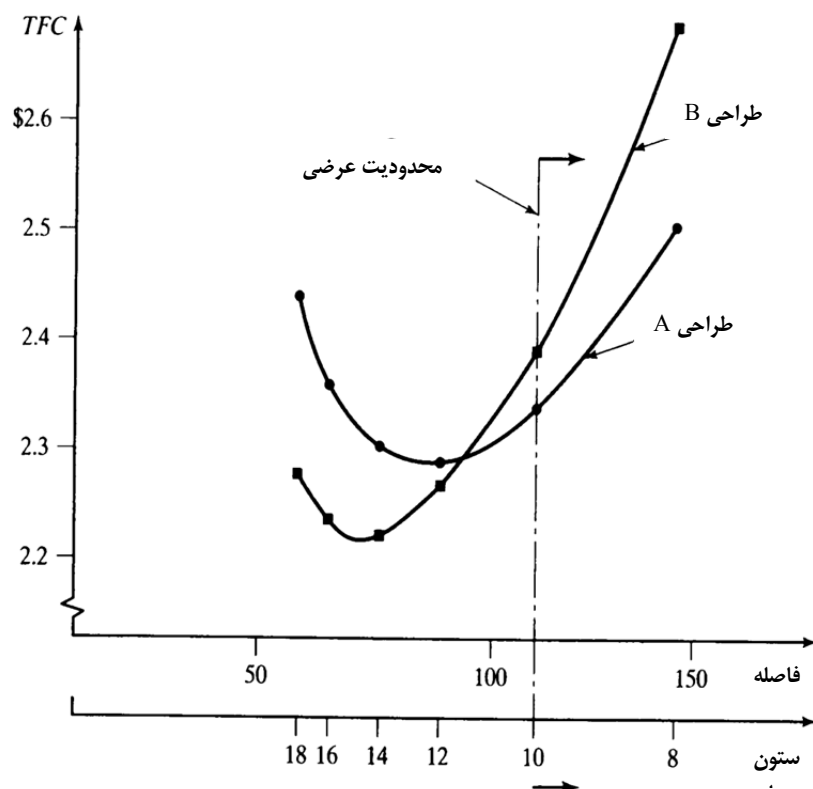
۹-۳- بهینه‌سازی کلاسیک با محدودیت

در طراحی و عملیات مشابه، محدودیت‌های اقتصادی و فیزیکی وجود دارند که بهینه کلی سیستم را محدود می‌کنند. این محدودیت‌ها دلایل مختلفی دارند و تصمیم‌گیرنده نمی‌تواند از آن‌ها صرف‌نظر کند. بر این اساس، چاره‌ای نیست جز این که بهتری جواب یا راه‌حل بهینه را با وجود محدودیت‌ها پیدا کند. در چنین شرایطی، مثال‌های ارائه شده قبلی برای نمایش دو مورد از

شرایط محدودیت فیزیکی اصلاح می‌شود: طراحی پل با عرض محدود و عملیات سیستم موجودی با محدودیت فضا.

۹-۳-۱- طراحی پل با عرض محدود

جدول ۹-۲ هزینه کل را براساس تابعی از تعداد ستون‌ها برای دو گزینه طراحی پل نشان داد. فرض کنید که محدودیتی برای فاصله بین پل‌ها وجود دارد به این صورت که حداقل فاصله مجاز ۱۱۰ فوت باشد تا عبور و مرور ایمن ترافیک را تضمین کند. با وجود این نیازمندی، از جدول ۹-۲ و شکل واضح است که بهترین گزینه به جای A گزینه B خواهد بود.



شکل ۹-۱۵- طراحی پل با محدودیت عرضی

این محدودیت مشخص منجر به یک تصمیم‌گیری معکوس شده و ایجاد یک جریمه در هزینه کل می‌کند. اگرچه این معکوس شدن همیشه اتفاق نمی‌افتد، اما یک جریمه به هزینه کل اضافه می‌شود. در این مورد، جریمه ایجاد شده از جدول ۹-۲ به دست آمده که معادل ۲۳۴۵۵۵۵- یا ۲۳۸۸۸۸۹ دلار است.

۹-۳-۲- عملیات موجودی با محدودیت فضا

فضای انبار اغلب یک منبع کمیاب است. این فضا را می‌توان در واحد مکعب و با نماد W نشان داده می‌شود. هر واحد در انبار، مقداری از فضا را اشغال می‌کند که با w نشان داده می‌شود. تعداد واحدهای موجود، نیازمند فضایی است که نباید از میزان فضای در دسترس تجاوز کند. در حالت کلی، این موضوع را می‌توان به صورت $Iw \leq W$ نشان داد که در آن I' حداکثر مقدار تجمعی واحدهاست.

مدل موجود با محدودیت فضا. عملیات موجودی در شکل ۹-۱۱ را در نظر بگیرید. کل هزینه برای مدل توسط معادله ۹-۳۲ و حداکثر موجودی، I' توسط معادله ۹-۲۱ به دست آمد. اگر

$$I' \leq \frac{W}{w} \text{ یا } I'w \leq W \text{ آنگاه}$$

$$I' = Q \left(1 - \frac{D}{R} \right) + L - DT \leq \frac{W}{w}$$

اگر محدودیت انبار فعال باشد، آنگاه $I'w = W$ یا

$$I' = Q \left(1 - \frac{D}{R} \right) + L - DT - \frac{W}{w} = \quad (۹-۴۳)$$

برای محدودیت فعال انبار، حداقل هزینه کل در محل تقاطع رویه تعریف شده توسط معادله ۳۲-۹ و صفحه تخت تعریف شده توسط معادله ۴۳-۹ اتفاق می افتد. معادله TC جدید با جایگزینی معادله ۴۳-۹ در معادله ۳۲-۹ به صورت زیر تعیین می شود

$$TC = C_i D + \frac{C_p D}{Q} + \frac{C_h (W/w)^2}{2Q(1-D/R)} + \frac{C_s [Q(1-D/R) - W/w]^2}{2Q(1-D/R)} \quad (۴۴-۹)$$

که در نهایت به صورت زیر خلاصه می شود

$$TC = a_1 + \frac{a_2}{Q} = a_3 Q \quad (۴۵-۹)$$

که در آن

$$a_1 = C_i D - C_s \left(\frac{W}{w} \right)$$

$$a_2 = C_p D + \frac{(C_h + C_s)(W/w)^2}{2(1-D/R)}$$

۹

$$a_3 = \frac{C_s(1-D/R)}{2}$$

مقدار بهینه Q را می توان با مشتق گیری از معادله ۴۵-۹ نسبت به Q و قرار دادن آن برابر با

صفر به دست آورد و برای Q* حل کرد که به صورت زیر خواهد بود

$$\frac{\delta TC}{\delta Q} = -\frac{a_2}{Q^2} + a_3 = 0$$

۹

$$Q^* = \sqrt{\frac{a_2}{a_3}}$$

که می‌توان آن را با پارامترهای اصلی به صورت زیر بازنویسی کرد

$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_p D}{C_s (1-D/R)}} + \frac{(C_h + C_s)(W/w)^2}{C_s (1-D/R)^2} \quad (۴۶-۹)$$

L^* بهینه را می‌توان از معادله ۴۳-۹ و با جایگزینی $Q=Q^*$ به صورت زیر به دست آورد

$$L^* = DT + \frac{W}{w} - Q^* \left(1 - \frac{D}{R}\right) \quad (۴۷-۹)$$

در نهایت حداقل هزینه کل با جایگزینی مقادیر بهینه Q در معادله ۴۴-۹ یا ۴۵-۹ به صورت زیر می‌توان به دست آورد

$$TC^* = a_1 + \frac{a_2}{Q^*} + a_3 Q^* \quad (۴۸-۹)$$

گزینه تک منبعی با محدودیت فضا. به عنوان مثالی از کاربرد معادلات ۴۳-۹ تا ۴۸-۹، فرض کنید که یک مدیر خرید یک آئتم را که دارای پارامترهای زیر است، باید خریداری کند

$$D = ۶ \text{ واحد در هر دوره}$$

$$R = \infty \text{ واحد در هر دوره}$$

$$T = ۷ \text{ دوره}$$

$$C_i = ۳۴,۷۵ \text{ دلار در هر واحد}$$

$$C_p = ۲۳,۱۶ \text{ دلار در هر خرید}$$

$$C_h = ۰,۳۰ \text{ دلار در هر واحد در هر دوره}$$

$$C_s = ۰,۳۰ \text{ دلار در هر واحد در هر دوره}$$

$$W = ۱۰۰ \text{ واحد مکعب از فضا}$$

$$W = ۲۴ \text{ واحد مکعب برای هر آیتم}$$

بدون هیچ محدودیتی مقدار بهینه $Q^* = 43.04$ از معادله ۹-۳۷، $L^* = 20.48$ از معادله ۹-۳۸ و $TC^* = 214.96$ با استفاده از معادل ۹-۳۹ به دست می‌آید. اگر $R = \infty$ ، معادله ۹-۴۳ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد

$$I'^* = Q^* + L^* - DT \quad (۹-۴۹)$$

هنگامی که مقادیر بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد، با معادله ۹-۴۹ به نتیجه زیر می‌رسیم

$$I'^* = 43.04 + 20.48 - 6(7) = 21.52$$

ار آن‌جا که $I'^* = 21.52 < 100/24 = W/w$ ، محدودیت انبار فعال است. در ادامه، مقادیر سیاستی بهینه برای انبار محدود تعیین می‌شود که در آن $I'^* = W/w = 100/24 = 4.17$ می‌باشد. از معادله ۹-۴۶ با $1 - D/R \rightarrow 1$ نتیجه می‌شود:

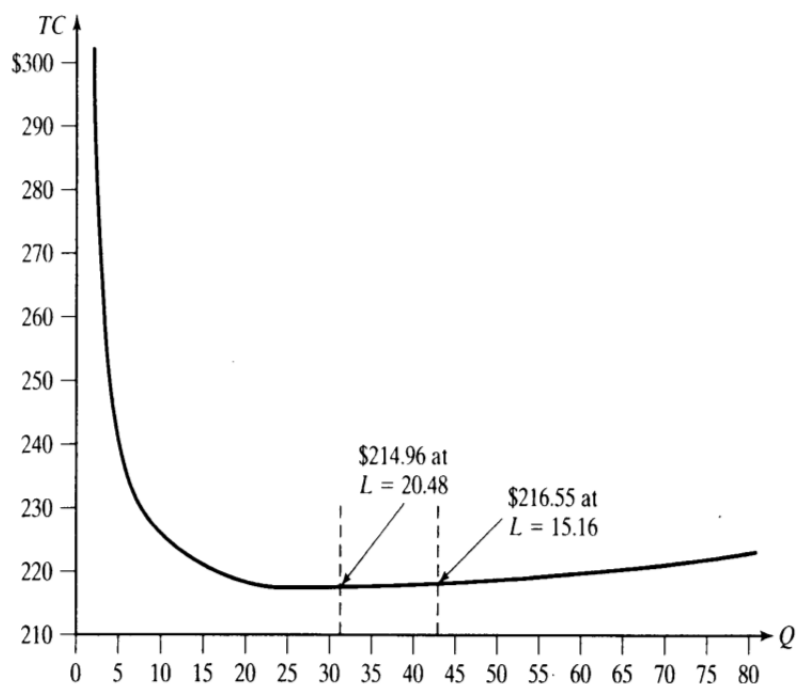
$$Q^* = \sqrt{\frac{2(23.16)(6)}{0.30} + \frac{(0.30 + 0.30)(4.17)^2}{0.30}} = 30.57$$

سپس با استفاده از معادله ۹-۴۷ و با فرض $1 - D/R \rightarrow 1$ ، L^* به صورت زیر خواهد بود

$$L^* = 6(7) + 4.17 - 30.57 = 15.60$$

در نهایت، هزینه کل بهینه با استفاده از معادله ۹-۴۴ و با فرض $1 - D/R \rightarrow 1$ به صورت زیر به دست می‌آید

$$TC^* = 34.75(6) + \frac{23.16(6)}{30.57} + \frac{0.30(4.17)^2}{2(30.57)} + \frac{0.30[6(7) - 15.17]^2}{2(30.57)} = 216.55$$



شکل ۹-۱۶ - هزینه کل با وجود محدودیت

اختلاف در TC در نقطه بهینه تقریباً ۱/۶ دلار در هر دوره است. کل هزینه به عنوان تابعی از تعداد خرید با و بدون محدودیت انبار در شکل ۹-۱۶ نشان داده شده است.

گزینه‌های چند منبعی با محدودیت فضا. شناخت صریح پارامترهای وابسته به سیستم، شرایط استفاده از مدل‌های سیستم محدود را برای استفاده در سیستم چند منبعی تک آیتمی فراهم

می‌کند. رویه مورد استفاده ارزیابی هر منبع، یافتن منبعی است که کم‌ترین هزینه کل را حاصل کند و محدودیت‌ها را برآورده سازد.

به‌عنوان مثال فرض کنید سیستم دارای محدودیت فضای انبار برابر با ۱۰۰۰ واحد مکعب است. هم‌چنین فرض کنید که هر واحد نیازمند ۱۲۰ واحد مرکب از فضاست. با استفاده از معادله ۹-۴۹ مشخص می‌شود که آیا محدودیت فضا برای فروشنده A فعال است یا نه. این کار به‌صورت زیر انجام می‌شود

$$I'^* = 38.7806 - 10.6917 - 4(3) = 16.0889$$

از آن‌جا که $I'^* = 16.0889 < 1000/120 = W/w$ ، محدودیت انبار فعال است.

سپس، مقادیر سیاستی بهینه برای وضعیت محدود با داشتن $I'^* = 1000/120 = 8.3333$

تعیین می‌شود. از معادله ۹-۴۶ و با فرض $1 \rightarrow 1 - D/R$ ، Q^* به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$Q^* = \sqrt{\frac{2(18.70)4}{0.17} + \frac{(0.24 + 0.17)(8.3333)^2}{0.17}} = 32.3648$$

با استفاده از معادله ۹-۴۷ و با فرض $1 \rightarrow 1 - D/R$ ، L^* به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$L^* = 4(3) + 8.3333 - 32.3648 = -12.0315$$

جدول ۹-۱۰ - سیاست‌های بهینه برای سیستم چند منبعی محدود

منبع	L^*	Q^*	TC^*
تولید	5.6710	40.0000	82.5158
فروشنده A	-12.0315	32.3648	75.8454
فروشنده B	-7.1470	31.4820	77.2550

به‌عنوان گام آخر، هزینه کل بهینه با استفاده از معادله ۹-۴۴ و با فرض $1 - D/R \rightarrow 1$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$TC^* = 17.94(4) + \frac{18.70(4)}{32.3648} + \frac{0.24(8.3333)^2}{2(32.3648)} + \frac{0.17[(32.3648) - 8.3333]^2}{2(32.3648)} = 75.85$$

جریمه‌ای که به خاطر وجود محدودیت انبار به‌وجود آمده است، مقدار ۲۳/۰ دلار می‌باشد که از حاصل تفریق ۷۵/۸۵ و ۷۵/۶۲ به‌دست می‌آید.

ممکن است منبع انتخاب شده در حالت محدود با منبع انتخاب شده در حالت بدون محدودیت با هم متفاوت باشد. بر این اساس، گزینه‌های دیگر ممکن باید در مقابل محدودیت انبار مورد ارزیابی قرار گیرند. نتایج این ارزیابی در جدول ۹-۱۰ آورده شده است. در نتیجه گزینه A بهترین گزینه باقی می‌ماند.

۹-۴- بهینه‌سازی چند معیاره

بهینه‌سازی خودش یک هدف نیست، بلکه تنها یک روش برای قابل مقایسه کردن چند گزینه به‌صورت زوجی است. مانند مدل‌سازی جریان پول، بهینه‌سازی یک گام ضروری برای مقایسه گزینه‌ها است. اگر تنها یک گزینه وجود داشته باشد، کار بیش‌تری نیاز نیست.

هنگامی که چند معیار وجود داشته باشد، نه بهینه‌سازی اقتصادی و نه تحلیل جریان پول کافی نیستند. اگرچه این گام‌ها ضروری هستند، اما باید با اطلاعاتی در مورد درجه برآورده شدن هر یک از معیارها برای هر گزینه تکمیل شود. یک روش برای انجام این کار، رویکرد نمایش

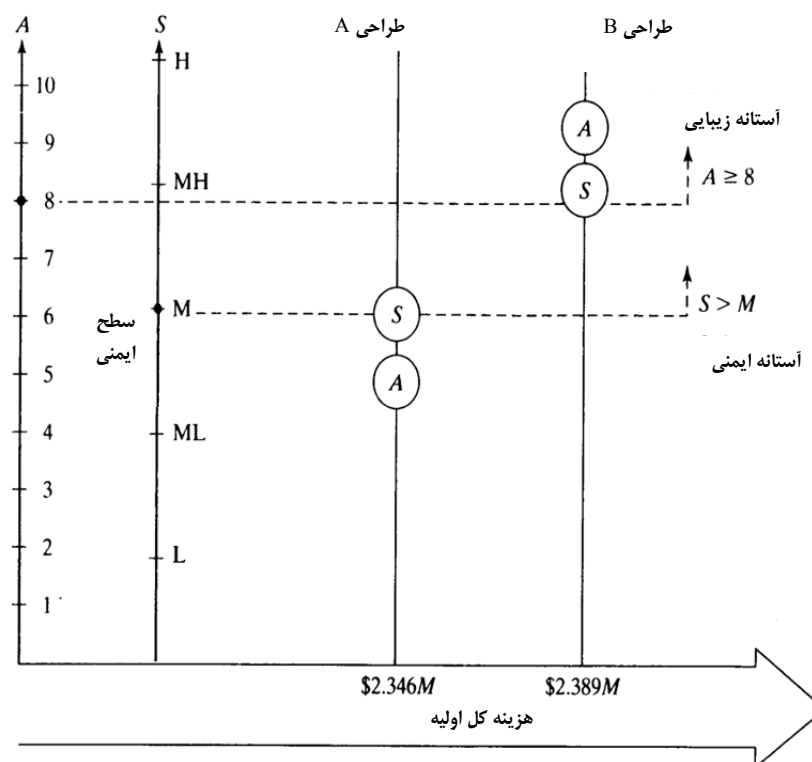
ارزیابی تصمیم است که در بخش ۷-۵ معرفی شد. در این بخش، دو مثال از این رویکرد بر اساس وضعیت ارائه شده در قسمت‌های ۲-۹ و ۳-۹ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۹-۴-۱- ارجحیت طراحی روبنا

گزینه‌های طراحی روبنا را که در شکل ۹-۴ نشان داده شد، در نظر بگیرید. اگر مشتری نسبت به ساختار روبنا بی‌تفاوت باشد، آنگاه می‌توان یک گزینه را تنها بر اساس فاکتورهای اقتصادی انتخاب کرد. به یاد آورید که گزینه B در حالت غیرمحدود و گزینه A در حالت محدود انتخاب می‌شد. این انتخاب تنها بر اساس ملاحظات هزینه اولیه انجام گرفته است.

اکنون فرض کنید که ساختار طراحی A دارای برخی ظواهر و خصوصیات ایمنی نامطلوب در مقابل طراحی B است. خصوصاً، فرض کنید که کمیته زیباسازی شهری در مقیاس ۱۰ نمره به طراحی A نمره ۵ و به طراحی B نمره ۹+ را داده است. علاوه بر این، مامور ایمنی معتقد است که طراحی A دارای ریسک بالایی است، از این نظر که افراد جوان ممکن است بخواهند از پل بالا بروند. در یک مقیاس L/ML/M/MH/H، طراحی A نمره M و طراحی B نمره MH را می‌گیرد.

این نمره‌ها برای زیبایی و ایمنی را می‌توان همراه با هزینه اولیه در شکل ۹-۱۷ نشان داد. در اینجا نمایش ارزیابی تصمیم مشخص می‌کند که مزیت‌های اقتصادی شناسایی شده و اندازه‌گیری شده است. تفاوت هزینه کل اولیه، دیگر تنها معیار تصمیم نیست. علاوه بر این، زیبایی باید نمره حداقل ۸ و ایمنی بزرگ‌تر از M باشد، در نتیجه گزینه A از نظر شاخص زیبایی رد می‌شود. تنها کار باقی مانده بحث و بررسی تنها گزینه باقی مانده به صورت ذهنی است.



شکل ۹-۱۷- نمایش ارزیابی تصمیم گزینه‌های روبنا

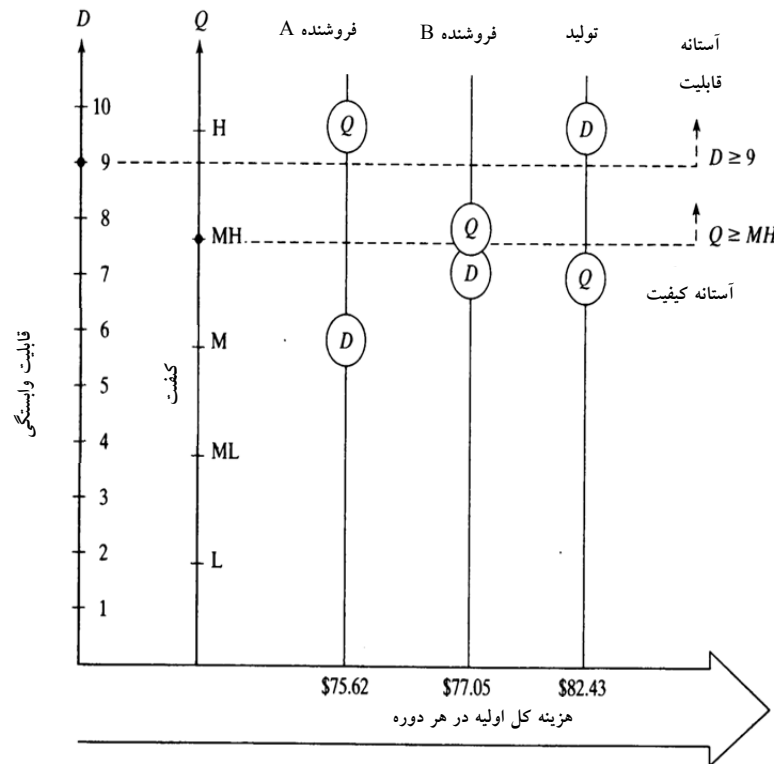
۹-۴-۲- ارجحیت منبع خرید

تولی یا خرید از یکی از دو فروشنده، به‌عنوان یک منبع خرید توسط پارامترهای وابسته به منبع در جدول ۹-۱۰ معرفی شد. هزینه کل اولیه هر منبع از طریق معادله ۹-۳۹ یافت گردید. با این حال، ملاحظات دیگری نیز وجود دارد.

تولید، یک منبع تامین است که بدون هیچ اختلالی نیاز را برآورده می‌کند و در این زمینه در یک مقیاس ۱۰ نمره‌ای، نمره ۹⁺ را گرفته است. در این زمینه فروشنده‌های A و B به‌ترتیب نمره‌های ۶ و ۷ را دریافت کرده‌اند. از نظر کیفیت، فروشنده A می‌تواند سطح کیفیتی معادل H و فروشنده B

سطح کیفیت MH^+ را فراهم کند و تولید نمره کیفی MH را به‌دست آورد. این مقادیر و هزینه‌های اولیه در شکل ۹-۱۸ نشان داده شده است.

فرض کنید که نرخ قابلیت وابستگی باید حداقل ۹ باشد و کیفیت باید بیش‌تر از MH باشد. در نتیجه تصمیم‌گیری به موازنه دو فاکتور غیراقتصادی در مقابل هزینه کل محدود خواهد شد. این کار تنها توسط یک فرد یا یک گروه و با استفاده از ارزیابی ذهنی، مذاکره و با کمک نمایش ارزیابی تصمیم به نتیجه خواهد رسید.



شکل ۹-۱۸- نمایش ارزیابی تصمیم برای گزینه‌های خرید

۹-۵- بهینه‌سازی با محدودیت توسط برنامه‌ریزی خطی

مدل برنامه‌ریزی خطی عمومی (LP) را می‌توان به صورت ریاضی به صورت یک تابع ارزیابی که بهینه می‌شود به صورت زیر نشان داد

$$E = \sum_{j=1}^n e_j x_j \quad (9-50)$$

که محدود است به

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = c_i, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

بهینه‌سازی نیاز به مشخص بودن این موضوع دارد که آیا با توجه به شاخص مورد ارزیابی، مساله حداکثرساز است یا حداقل‌ساز. تصمیم‌گیرنده بردار متغیرها، x_{ij} را کنترل می‌کند. بردار ضرایب ارزیابی e_j ، ماتریس محدودیت‌ها a_{ij} و بردار ثابت‌ها c_i ، به طور مستقیم تحت کنترل نیستند. این ساختار با تابع ارزیابی تصمیم در معادله ۷-۲ تطابق دارد.

۹-۵-۱- روش‌های بهینه‌سازی گرافیکی

بیان ریاضی مدل عمومی برنامه‌ریزی خطی را می‌توان به صورت گرافیکی توضیح داد. n متغیر وجود دارد که یک فضای n بعدی را تعریف می‌کنند. هر محدودیت یک فرایضحه را در این فضا تشکیل می‌دهد. این محدودیت‌ها، فضای شدنی جواب‌ها را توسط فرارویه‌ها محدود می‌کنند و در نتیجه ناحیه در داخل یک چندوجهی محدب قرار می‌گیرد. از آن‌جا که تابع ارزیابی خطی می‌باشد، نیاز به این‌که تابع برخی مقادیر ثابت داشته باشد که یک فرایضحه ایجاد کند. این فرایضحه ممکن است چندوجهی را قطع کند یا نکند. اگر قطع کند، یک یا چند جواب شدنی

به‌وجود می‌آید. با تغییر مقادیر ثابت‌ها، یک خانواده از فراصفحه‌های موازی با هم ایجاد می‌شود. فاصله از ناحیه تا یک عضو از این خانواده نسبتی از مقدار تابع ارزیابی خواهد بود.

دو فراصفحه محدودکننده می‌تواند شناسایی شود، یکی مربوط به بزرگ‌ترین مقادیر تابع ارزیابی است که در آن فراصفحه با چندوجهی تماس پیدا کرده است و دیگری مربوط به کوچک‌ترین مقدار است. در اکثر موارد، فراصفحه‌های محدودکننده تنها با یک راس از چندوجهی محدود تماس دارند. این نقطه‌ی محدودکننده بیرونی، جواب بهینه تابع ارزیابی است.

اگرچه این یک تفسیر گرافیکی است، زمانی که بیش از یک متغیر وجود داشته باشد، جواب گرافیکی به راحتی به‌دست نمی‌آید. مثال زیر مدل عمومی برنامه‌ریزی خطی را نشان داده و روش بهینه‌سازی گرافیکی را برای عملیات با دو و سه فعالیت مورد بررسی قرار می‌دهد.

حداکثرسازی گرافیکی برای دو فعالیت. به‌عنوان مثال فرض کنید که دو فعالیت برای منابع کمیاب رقابت می‌کنند، سیستم تولید زیر را در نظر بگیرید. دو محصول باید تولید شوند. یک واحد از محصول A نیازمند $2/4$ دقیقه برای پانچ و ۵ دقیقه برای مونتاژ می‌باشد. درآمد حاصل از محصول A $60/60$ دلار به ازای هر واحد است. یک واحد از محصول B نیازمند ۳ دقیقه برای پانچ و $2/5$ دقیقه برای جوشکاری است. درآمد حاصل از فروش یک واحد محصول B $70/70$ دلار است. ظرفیت بخش پانچ برای این محصولات مجموعاً ۱۲۰۰ دقیقه در هفته است. بخش جوشکاری دارای ظرفیت ۶۰۰ دقیقه در هفته و بخش مونتاژ ظرفیت ۱۵۰۰ دقیقه در هفته دارد. داده‌های تولید و بازاریابی برای سیستم تولید در جدول ۹-۱۱ خلاصه شده است.

در این مثال، دو محصول برای زمان تولید در دسترس رقابت می‌کنند. هدف تعیین تعداد تولید محصول A و B است به‌طوری که درآمد کل بیشینه شود. این کار نیازمند حداکثر کردن رابطه زیر دارد

$$TP = 0.60A + 0.70B$$

محدود به

$$2.4A + 3.0B \leq 1200$$

$$0.0A + 2.5B \leq 600$$

$$5.0A + 0.0B \leq 1500$$

$$A, B \geq 0$$

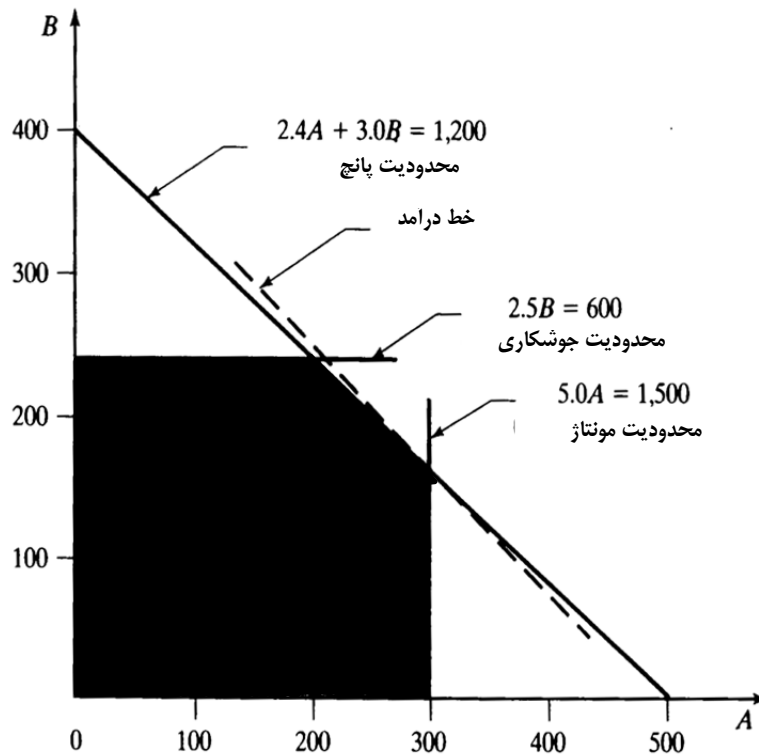
جدول ۹-۱۱- داده‌های تولید و بازاریابی برای دو محصول

بخش	محصول A	محصول B	ظرفیت
پانچ	۲/۴	۳	۱۲۰۰
جوشکاری	۰,۰	۲/۵	۶۰۰
مونتاژ	۵	۰,۰	۱۵۰۰
درآمد	۰/۶	۰/۷	

معادل گرافیکی عبارات جبری این سیستم دو محصولی در شکل ۹-۱۹ نشان داده شده است. مجموعه محدودیت‌های خطی، یک ناحیه از جواب‌های شدنی را ایجاد می‌کنند. این ناحیه پایین‌تر از $2.4A + 3.0B = 1200$ قرار داشته و با نیازمندی‌های $A \leq 300, B \leq 240$ بیش‌تر محدود می‌شود و از طرف دیگر مقادیر A و B نباید منفی باشد. بنابراین، منابع کمیاب مشخص می‌کنند که چه ترکیبی از فعالیت‌ها شدنی و کدام ترکیب‌ها نشدنی هستند.

ترکیب تعداد تولید A و B در ناحیه جواب‌های شدنی، برنامه‌های تولید شدنی را تشکیل می‌دهند. ترکیب یا ترکیب‌هایی از A و B که درآمد را بیشینه می‌کنند، مورد جستجو است. رابطه بین A و B به صورت $1.167A = B$ است. این رابطه بر پایه درآمد نسبی هر محصول به دست آمده است. درآمد کل به ترکیب تولید محصولات بستگی دارد. بنابراین، یک خانواده از خطوط درآمد

وجود دارد که یکی از آن‌ها حداقل یک نقطه دارد که در ناحیه شدنی ترکیب‌های تولید قرار گرفته و بیش‌ترین فاصله را از مبدا دارد. عضوی که این شرط را برآورده می‌کند با ناحیه جواب‌های شدنی در نقطه حدی $A=300$ و $B=160$ برخورد می‌کند. این نقطه به‌صورت خط تیره در شکل ۹-۱۹ نشان داده شده است و نماینده درآمد کل برابر با $0.6(300)+0.7(160)=292$ دلار است. هیچ ترکیب تولید دیگری وجود ندارد که درآمد بیش‌تری ایجاد کند.



شکل ۹-۱۹- بهینه‌سازی گرافیکی برای عملیات تولید دو محصول

برنامه‌های تولید جایگزین با همین مقدار درآمد ممکن است در برخی موارد وجود داشته باشد. زمانی این اتفاق می‌افتد که خط درآمد با یکی از خطوط محدودیت موازی باشد. برای مثال، اگر

درآمد نسبی محصول A و B به صورت $A=1.25B$ بود، خط درآمد در شکل ۹-۱۹ با محدودیت $2.4A + 3.0B = 1200$ مطابقت می‌کرد. در این مورد، خط درآمد ناحیه جواب‌های شدنی به جای یک نقطه با یک خط تماس پیدا می‌کرد. همه ترکیب‌های تولید در طول این خط درآمد را بهینه می‌کردند.

حداکثرسازی گرافیکی برای سه فعالیت. هنگامی که سه فعالیت برای منابع کمیاب رقابت می‌کنند، یک فضای سه بعدی ایجاد می‌شود. هر محدودیت یک صفحه در فضاست و همه محدودیت‌ها با هم یک حجم از جواب‌های شدنی را تشکیل می‌دهند. تابع ارزیابی نیز یک صفحه خواهد بود که فاصله‌اش از ناحیه نسبتی از مقدار آن است. مقدار بهینه برای تابع ارزیابی زمانی اتفاق می‌افتد که این صفحه به صورتی قرار گیرد که در یک نقطه حدی با فضای جواب تماس داشته باشد.

به عنوان مثال فرض کنید که عملیات تولید در مثال قبل برای یک محصول سوم توسعه یابد که C نامیده می‌شود. یک واحد از محصول C نیازمند ۲ دقیقه پانچ، ۱/۵ دقیقه جوشکاری و ۲/۵ دقیقه مونتاژ است. درآمد حاصل از یک واحد C ۰/۵ دلار است. داده‌های بازاریابی و تولید برای این وضعیت اصلاح شده تولید در جدول ۹-۱۲ خلاصه شده است.

در این مثال، سه محصول برای زمان تولید در دسترس رقابت می‌کنند. هدف تعیین ترکیب تولید از سه محصول است به طوری که درآمد کل بیشینه شود. این کار نیازمند حداکثر کردن رابطه زیر است

$$TP = 0.60A + 0.70B + 0.50C$$

محدود به

$$2.4A + 3.0B + 2.0C \leq 1200$$

$$0.0A + 2.5B + 1.5C \leq 600$$

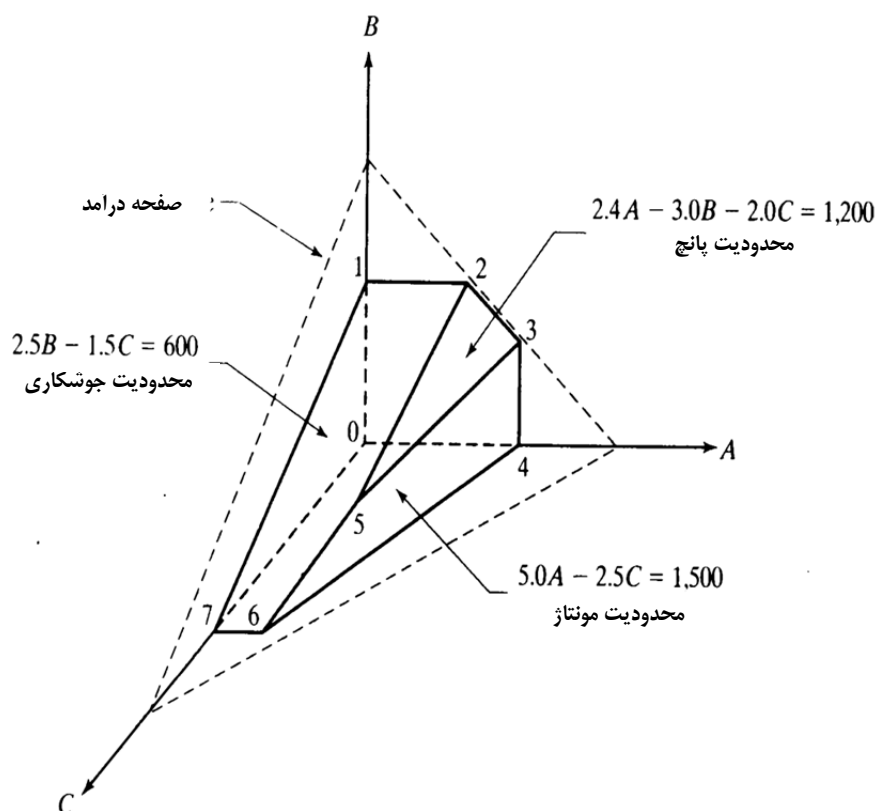
$$5.0A + 0.0B + 2.5C \leq 1500$$

$$A, B, C \geq 0$$

معادل گرافیکی عبارات جبری این وضعیت تولید سه محصولی در شکل ۹-۲۰ نشان داده شده است. مجموعه صفحه‌های محدود کننده یک حجم از جواب‌های شدنی را تشکیل می‌دهند. این ناحیه زیر $2.4A + 3.0B + 2.0C = 1200$ قرار داشته و با دو محدودیت دیگر بیش‌تر محدود می‌شود. همچنین مقادیر AB و C باید منفی نباشند. بنابراین، منابع محدود مشخص می‌کنند که کدام ترکیب از فعالیت‌های ممکن و کدام یک ناممکن است.

جدول ۹-۱۲- داده‌های بازاریابی و تولید برای سه محصول

ظرفیت	محصول C	محصول B	محصول A	بخش
۱۲۰۰	۲	۳	۲/۴	پانچ
۶۰۰	۱/۵	۲/۵	۰,۰	جوشکاری
۱۵۰۰	۲/۵	۰,۰	۵	مونتاژ
	۰/۵	۰/۷	۰/۶	درآمد



شکل ۹-۲۰- بهینه‌سازی گرافیکی عملیات تولید سه محصولی

ترکیب تولید سه محصول A ، B ، و C در این حجم جواب‌های شدنی برنامه‌ی تولید ممکن را تشکیل می‌دهند. ترکیب یا ترکیب‌هایی که درآمد کل را بیشینه کنند، مورد جستجو است. عبارت $0.60A + 0.70B + 0.50C$ رابطه‌ی A ، B و C را مشخص می‌کند که نسبت درآمد هر محصول نسبت به دیگری است. کل درآمد به ترکیب انتخابی مقادیر تولید از محصولات بستگی دارد. بنابراین، یک خانواده از صفحات درآمد وجود دارد. یکی از این صفحات در حجم جواب‌های شدنی حداقل یک نقطه دارند که بیش‌ترین فاصله را از مبدا دارد. این موضوع نیاز به محاسبه‌ی

درآمد هر نقطه حدی دارد که در جدول ۹-۱۳ ارائه شده است. مختصات هر نقطه‌ی حدی با استفاده از تقاطع صفحات محدودیت و صفحه درآمد به‌دست می‌آید.

با بررسی مقادیر درآمد جدول ۹-۱۳، نقطه ۵ که دارای مختصات ۱۸۰، ۹۶ و ۲۴۰ است دارای بیش‌ترین درآمد است. این بدان معنی است که به‌ترتیب محصولات A، B و C باید به تعداد ۱۸۰، ۹۶ و ۲۴۰ عدد در هفته تولید شود تا درآمد کل بیشینه شود. هیچ ترکیب دیگری وجود ندارد که درآمدی بیش‌تری حاصل کند. هم‌چنین هیچ جواب بهینه دیگری وجود ندارد زیرا تقاطع صفحه درآمد با حجم فضای شدنی تنها در یک نقطه صورت می‌گیرد.

جدول ۹-۱۳ - محاسبات درآمد کل در نقاط حدی شکل ۹-۱۴

نقطه	مختصات			درآمد
	A	B	C	
0	0	0	0	0
1	0	240	0	168
2	200	240	0	288
3	300	160	0	292
4	300	0	0	180
5	180	96	240	295.2
6	100	0	400	260
7	0	0	400	200

اضافه کردن یک محصول سوم به سیستم تولیدی دو محصولی، درآمد کل را از ۲۹۲ دلار در هفته به ۲۹۵,۲ دلار در هفته افزایش داد. این افزایش در درآمد از تقسیم بهتر زمان تولید در دسترس و استفاده‌ی بیش‌تر از ظرفیت بیکار بخش جوشکاری به‌وجود آمد. تعداد واحدهای محصول A از ۲۰۰ به ۱۸۰ و تعداد واحدهای محصول B از ۲۴۰ به ۹۶ کاهش پیدا کرد. این کار باعث شد تا بتوان ۲۴۰ واحد از محصول C در برنامه تولید قرار داده شود و اندکی افزایش در درآمد ایجاد کند.

۹-۵-۲- الگوریتم بهینه‌سازی سیمپلکس

بسیاری از مسائل که مدل برنامه خطی برای آن‌ها استفاده می‌شود، n بعدی هستند که در آن n فعالیت برای منابع کمیاب رقابت می‌کنند. در این موارد، روش‌های بهینه‌سازی گرافیکی را نمی‌توان استفاده کرد و تکنیک عددی بهینه‌سازی که با نام الگوریتم سیمپلکس شناخته می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الگوریتم بهینه‌سازی سیمپلکس یک تکنیک تکرارشونده است که از یک جواب شدنی کار خود را آغاز کرده، بهینه بودن آن را آزمایش می‌کند و به دنبال یک جواب بهتر می‌گردد. می‌توان نشان داد که این الگوریتم در نهایت اگر جواب بهینه‌ای وجود داشته باشد، به جواب بهینه می‌رسد. در این قسمت، روش سیمپلکس برای مساله تولید سه محصولی اعمال می‌شود. مراجعه به حل گرافیکی وجهه‌های خاص رویه انجام محاسبات را نشان می‌دهد.

ماتریس سیمپلکس. مساله تولید سه محصولی نیازمند حداکثرسازی کل درآمد با وجود محدودیت‌های خاصی است. این محدودیت‌ها با یک فرم مشخص و یکسان درآمده و مدل برنامه‌ریزی خطی عمومی را تشکیل می‌دهد. این موضوع نیازمند سه متغیر slack است تا نامعادله‌ها را از بین ببرد. در نتیجه، محدودیت‌ها به صورت زیر در می‌آید.

$$2.4A + 3.0B + 2.0C + S_1 = 1200$$

$$0.0A + 2.5B + 1.5C + S_2 = 600$$

$$5.0A + 0.0B + 2.5C + S_3 = 1500$$

میزان زمان هر بخش که در تولید مورد استفاده قرار نمی‌گیرد با متغیرهای slack نشان داده شده است. بنابراین، هر مقداری که لازم باشد متغیر slack می‌گیرد تا معادله برقرار شود. اگر چیزی تولید نشود، مقادیر slack برابر با زمان در دسترس برای تولید در هر بخش خواهد بود. در واقع این مقدار یک جواب اولیه ممکن است که در آن $S_1 = 1200, S_2 = 600, S_3 = 1500$. هر متغیر slack یکی از متغیرهای x_j در مدل کلی است. با این، از آنجایی که هیچ درآمدی از ظرفیت بیکار به دست نمی‌آید، درآمد کل را می‌توان به صورت زیر نشان داد

$$TP = 0.60A + 0.70B + 0.5C + 0S_1 + 0S_2 + 0S_3$$

ماتریس اولیه مورد نیاز الگوریتم سیمپلکس را می‌توان اکنون به صورت جدول ۹-۱۴ به دست آورد. ستون اول e_i نام گذاری شده است که ضرایب کاربردی در جواب ممکن اولیه را به دست می‌دهد. این مقادیر همگی صفر هستند، زیرا جواب اولیه شامل اختصاص کل زمان تولید به متغیرهای slack است. ستون دوم که Sol نامیده شده است، متغیرها را در جواب اولیه نشان می‌دهد. این‌ها، متغیرهای slack هستند که قبلاً معرفی شده‌اند. ستون سوم که b نام دارد تعداد دقایق زمان تولید مربوط به متغیرهای جواب در ستون قبلی را نشان می‌دهد. این مقادیر منعکس‌کننده ظرفیت تولید در جواب اولیه است. هر کدام از این سه ستون در ادامه متغیرهای slack قرار دارند که بسته به این که متغیر slack مربوط به کدام معادله است مقدار صفر یا یک می‌گیرد. عنوان e_j برای این ستون‌ها مقدار صفر را می‌گیرد که نشان‌دهنده درآمد صفر است. سه ستون آخر متغیرهای فعالیت، همراه با عناصر وارد شده از معادلات محدودیت هستند. e_j

برای این ستون‌ها، درآمد مربوط به هر متغیر فعالیت است. ستون آخر که θ نام دارد، در فرایند محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۹-۱۴- ماتریس اولیه برای مساله تولید سه محصولی

e_j		0 0 0 0.60 0.70 0.5							
e_i	Sol	B	S ₁	S ₂	S ₃	A	B	C	θ
0	S ₁	1200	1	0	0	2.4	3.0	2.0	400
0	S ₂	600	0	1	0	0	2.5	1.5	240
0	S ₃	1500	0	0	1	5.0	0	2.5	∞
E_j		0	0	0	0	0	0	0	
$E_j - e_j$			0	0	0	-0.60	-0.70	-0.5	

k

آزمایش بهیمنگی. پس از به‌دست آوردن یک جواب اولیه، باید آزمایش شود که آیا یک برنامه با درآمد بیش‌تر می‌توان پیدا کرد. آزمایش بهیمنگی با کمک دو ستون آخر جدول ۹-۱۴ انجام می‌شود. گام‌های موردنیاز برای این کار به‌صورت زیر است:

۱. مقادیر مربوط به سطر E_j از عبارت $E_j = \sum e_i a_{ij}$ را وارد کنید، که در آن a_{ij} عناصر

ماتریس سطر i ام و ستون j ام است.

۲. مقدار $E_j - e_j$ را برای همه مکان‌ها در سطر $E_j - e_j$ محاسبه کنید.

۳. اگر $E_j - e_j$ حداقل برای یک j منفی است، یک جواب بهتر وجود دارد.

کاربرد آزمایش بهینگی برای جواب شدنی اولیه در دو سطر آخر جدول ۹-۱۴ نشان داده شده است. اولین عنصر در سطر E_j به صورت $0(1500)+0(600)+0(1200)=0$. عنصر دوم $0(1)+0(0)=0$. همه مقادیر در این سطر صفر هستند زیرا همه مقادیر e_j برای جواب شدنی اولیه صفر هستند. عنصر اول در سطر $E_j - e_j$ به صورت $0-0=0$ است، دومی $0-0=0$ ، سومی $0-0=0$ ، چهارمی $0-0.6=-0.6$ و بقیه مقادیر به همین شکل محاسبه می‌شوند. چون حداقل یک مقداری منفی برای $E_j - e_j$ وجود دارد، جواب اولیه بهینه نیست.

تکرار به سمت برنامه بهینه. اگر آزمایش بهینگی مشخص کند که برنامه بهینه پیدا نشده است، رویه تکرارشونده زیر استفاده می‌شود:

۱. حداقل مقدار $E_j - e_j$ را پیدا کرده و ستون مربوطه را k نام‌گذاری کنید. متغیری که در این ستون قرار دارد، متغیر ورودی است.

۲. در ستون θ مقادیر را از رابطه $\theta_i = b_i / a_{ik}$ به دست آورید.

۳. حداقل مقدار مثبت θ_i را پیدا کرده و ستون مربوطه با r مشخص کنید. متغیر مربوط به این سطر متغیر خروجی خواهد بود.

۴. یک ماتریس جدید ساخته و متغیر ورودی را به جای متغیر خروجی قرار دهید. عناصر جدید را برای a'_{ij} بدین صورت محاسبه کنید. $a'_{ij} = a_{ij} / a_{rk}$ برای $i = r$ و $a'_{ij} = a_{ij} - a_{ik} a'_{rj}$ برای $i \neq r$. آزمایش بهینگی را اجرا کنید.

گام‌های ۱ تا ۳ رویه فوق را برای ماتریس اولیه انجام دهید. در جدول ۹-۱۴، در گام اول B متغیر ورودی خواهد بود. مقادیر برای θ_i در گام دوم محاسبه می‌شود. گام سوم S_2 را به عنوان متغیر خروجی مشخص می‌کند. سطر و ستون مربوطه با r و k در جدول ۹-۱۴ مشخص شده‌اند.

جدول ۹-۱۵- تکرار اول برای مساله تولید سه محصولی

e_j		0 0 0 0.60 0.70 0.5							
e_i	Sol	B	S_1	S_2	S_3	A	B	C	θ
0	S_1	480	1	-1.20	0	2.40	0	0.20	200
0.70	B	240	0	0.40	0	0	1	0.6	∞
0	S_3	1500	0	0	1	5.0	0	2.50	300
E_j		168	0	0.28	0	0	0.70	0.42	
$E_j - e_j$			0	0.28	0	-0.60	0	-0.08	

k

گام‌های ۴ و ۵ نیازمند یک ماتریس جدید است که به صورت جدول ۹-۱۵ نشان داده شده است. متغیر ورودی B همراه با درآمد مربوطه، با متغیر خروجی S_2 و درآمدش جابه‌جا می‌شود. عناصر دو سطر باقیمانده با فرمول دوم گام ۴ انجام می‌شود. آزمایش بهینگی مشخص می‌کند که جواب بهینه هنوز به دست نیامده است. توجه کنید که پس از این تکرار، درآمد در نقطه ۱ در شکل ۹-۲۰ نشان داده شده است. مقایسه نتایج در جدول ۹-۱۴ و ۹-۱۵ با محاسبات کل درآمد در جدول ۹-۱۳ مشخص می‌کند که صفحه درآمد که از نقطه مبدا شروع می‌شود، اکنون تا نقطه ۱ جلو آمده است. درآمد به دست آمده پس از این تکرار $۱۶۸ - ۰ = ۱۶۸$.

از آن‌جا که جواب بهینه این تکرار بهینه نیست، لازم است که گام‌های ۱ تا ۵ تکرار شود. گام‌های ۱ تا ۳ به جدول ۹-۱۵ اعمال شده و در نتیجه متغیر A به عنوان متغیر ورودی و متغیر S_1 به عنوان متغیر خروجی خواهد بود و همراه با درآمدهایشان به صورت جدول ۹-۱۶ جابه‌جا

می‌شوند. همه عناصر دیگر در این ماتریس جدید با استفاده از فرمول‌های گام ۴ انجام می‌شود. کاربرد آزمایش بهینگی مشخص می‌کند که جواب به‌دست آمده بهینه نیست. جدول ۹-۱۳ و شکل ۹-۱۸ نشان می‌دهد که صفحه درآمد اکنون در نقطه ۲ است. درآمد به‌دست آمده در این تکرار $120 = 168 - 288$ است.

جدول ۹-۱۶- تکرار دوم برای مساله تولید سه محصولی

e_j		0 0 0 0.60 0.70 0.5							
e_i	Sol	B	S_1	S_2	S_3	A	B	C	θ
0.6	A	200	0.416	-0.50	0	1	0	0.084	2381
0.70	B	240	0	0.40	0	0	1	0.6	400
0	S_3	500	-2.08	2.50	1	5.0	0	2.08	240
E_j		288	0.25	-0.02	0	0.60	0.70	0.47	
$E_j - e_j$			0.25	-0.02	0	0	0	-0.03	

k

جدول ۹-۱۷- تکرار سوم برای مساله تولید سه محصولی

e_j		0 0 0 0.60 0.70 0.5							
e_i	Sol	B	S_1	S_2	S_3	A	B	C	θ
0.60	A	180	0.50	-0.60	-0.04	1	0	0	
0.70	B	96	0.60	-0.32	-0.029	0	1	0	
0.50	C	240	-1	1.20	0.48	0	0	1	
E_j		295.20	0.22	0.016	0.016	0.60	0.70	0.50	
$E_j - e_j$			0.22	0.016	0.016	0	0	0	

جدول ۹-۱۶ به جواب بهینه نرسیده است و نیاز است که گام‌های ۱-۵ باز هم تکرار شوند. گام‌های ۱ تا ۳ مشخص می‌کند که متغیر ورودی C و متغیر خروجی S_3 است. جابه‌جایی این متغیرها به همراه درآمد مربوطه انجام می‌شود و جدول ۹-۱۷ حاصل می‌شود. بقیه عناصر با استفاده از فرمول‌های گام ۴ محاسبه می‌شود. با استفاده از آزمایش بهینگی مشخص می‌شود که جواب بهینه به دست آمده است. جدول ۹-۱۷ و شکل ۹-۲۰ مشخص می‌کند که صفحه درآمد به نقطه ۵ رسیده است. درآمد حاصل از این تکرار برابر است با $295/20 - 288 = 7/20$.

حداقل کردن توسط الگوریتم سیمپلکس. الگوریتم محاسباتی را که در بالا ارائه شد، می‌توان بدون ایجاد اصلاح برای مسائل حداقل‌سازی مورد استفاده قرار داد اگر ضرایب هزینه را از مثبت به منفی تغییر دهیم. این قانون که حداکثرسازی یک تابع منفی به معنای حداقل‌سازی تابع اصلی است، اعمال می‌شود. اگر این ضرایب در ماتریس سیمپلکس با علامت منفی اعمال شوند، مقدار جواب به دست آمده با انجام محاسبات سیمپلکس کاهش می‌یابد.

۹-۵-۳- عملیات بهینه‌سازی و طراحی توسط LP

اقتباس و مثال‌های برنامه‌ریزی خطی در قسمت ۹-۵ تابع ارزیابی تصمیم در معادله ۷-۲ است. آن‌ها برای عملیات بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اعمال برنامه‌ریزی خطی در بهینه‌سازی طراحی که منجر به انتخاب طراحی بهینه می‌شود، تابع ارزیابی تصمیم در معادله ۷-۳ باید مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع با قرار دادن معادله ۷-۲ در حوزه‌های چرخه‌ی عمر عملیات و طراحی در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. تمرکز بر ارزیابی گزینه‌هایی است که توسط معادله ۷-۳ بهینه شده است، که در آن پارامترهای وابسته به طراحی شناسایی شده و از پارامترهای مستقل از طراحی جدا شده است.

برای بازبینی کاربرد LP، به تابع ارزیابی معادله ۹-۵ مراجعه کرده و سمت راست مجموعه محدودیت‌ها مربوط به مثال سیستم تولید را در نظر بگیرید. سمت راست شاخص‌های ظرفیت را

مشخص می‌کند، مخصوصاً به ظرفیت تولید انواع تجهیزات که در آن قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیرات پارامترها وابسته به طراحی هستند. این ترکیب پارامترها، ظرفیت در دسترس را مشخص می‌کند. بر این اساس، طراحی یک سیستم تولید را می‌توان با استفاده از LP برای هر تجهیز در هر گزینه تولید بر پایه پیش‌بینی‌های انجام شده برای مقادیر MTBF و MTTR بهینه کرد. تجهیزات با قابلیت اطمینان بالا که به راحتی قابل تعمیر هستند، ظرفیت بیش‌تری را فراهم می‌کنند. هزینه آن‌ها را می‌توان در مقابل درآمد افزوده شده در سطح تولید بالاتر مورد بررسی قرار داد.

کاربردهای دیگری از پارامترهای وابسته به طراحی وجود دارند که از معادله ۷-۳ و LP استفاده می‌کنند. برای مثال، زمان مصرفی توسط هر محصول در هر مرکز تجهیز به طراحی محصول بستگی دارد. برای هر گزینه طراحی محصول، می‌توان الگوریتم LP را استفاده کرد تا به درآمد بهینه (بیشینه) رسید. گزینه طراحی محصول که بیش‌ترین درآمد را ایجاد می‌کند، در ادامه شناسایی می‌شود.

۹-۶- خلاصه فصل

بهینه‌سازی طراحی و عملیات، عنوان و تمرکز این فصل است. این عنوان عمداً انتخاب شده است تا مفهوم نقش دوگانه مفهوم آشنای بهینه‌سازی ترویج داده شود. قسمت ۷-۳ با عنوان "تئوری ارزیابی تصمیم"، پیش‌زمینه موردنیاز را فراهم کرده است. در این قسمت، شکل ۷-۲ ارائه شده است تا جایگاه معادله ۷-۲ و ۷-۳ در چرخه‌ی عمر مشخص شود. این معادلات کلیدی، هنگامی که با هم در چرخه‌ی عمر در نظر گرفته می‌شوند، برای هدایت بهینه‌سازی در مهندسی و تحلیل سیستم‌ها استفاده خواهند شد.

این فصل با تئوری پایه‌ای بهینه‌سازی کلاسیک آغاز می‌شود که با حساب دیفرانسیل شروع شده است. بهینه‌سازی کلاسیک غیرمحدود شامل چند گزینه معرفی شده و توسط چندین مثال فرضی در عملیات و طراحی توضیح داده شد. در ادامه با استفاده از چند مثال، بهینه‌سازی کلاسیک با محدودیت ارائه شد. دو مثال توسعه داده شد تا بحث چند معیاری را بررسی کرده و از نمایش ارزیابی تصمیم استفاده شود. موضوع نهایی بهینه‌سازی با محدودیت توسط روش‌های گرافیکی و سیمپلکس در برنامه خطی است.

همه موضوعات که در بالا خلاصه شده برای ایجاد توانمندی در پیاده‌سازی معادل‌سازی به معنای تمام و کمال آن است. یعنی برای ادغام مدل‌سازی جریان پول و مدسازی بهینه‌سازی اقتصادی. موارد خاص برای نشان دادن چگونگی و چرایی این ادغام در مهندسی و تحلیل سیستم‌ها مهم است و دیگر موارد برای برجسته کردن روش درست برای مقایسه گزینه‌ها به روشی عادلانه برای وضعیت‌های تک معیاره و چند معیاره پیشنهاد شده است.

قواعد عمومی زیادی در توسعه مثال‌های کاربردی این فصل وجود دارد. نیاز است که مثال‌ها مشخص بوده و موارد زیر را رعایت کنند.

۱. از نقطه نظر تئوری محض، کاربرد حساب دیفرانسیل در مشخص کردن مقدار بهینه یک تابع هدف، نیازمند یک آزمایش مشتق دوم است که از معادله ۹-۷ تبعیت می‌کند. با این حال، همه مثال‌های این فصل، توابع ارزیابی مناسبی هستند که حداقل و حداکثر آن‌ها به وضوح مشخص است.

۲. مدل‌سازی جریان پول، که در ارتباط با تابع ارزیابی معادله ۷-۱ اعمال شد باید مقدم بر بهینه‌سازی سرمایه (یا هزینه اولیه) با استفاده از معادله ۷-۲ (معادله ۹-۱۲ را ببینید) باشد. این موضوع تضمین می‌کند که موضوعات مربوط به مفهوم معادل‌سازی پیش از مقایسه گزینه‌ها با یکدیگر به صورت تمام و کمال اجرا شده است.

۳. مقایسه گزینه‌ها تنها بر اساس هزینه اولیه، ممکن است در هنگامی که هزینه چرخه‌ی عمر مدنظر است منجر به یک انتخاب غلط شود. این موضوع توسط یک مثال با مقایسه‌ی شکل‌های ۹-۵ و ۹-۶ نشان داده شده است که در آن‌ها تصمیم معکوس اتفاق می‌افتد.

۴. بهینه‌سازی هزینه چرخه‌ی عمر در تدارک دارایی می‌تواند بهترین راه تخصیص منابع محدود برای اکتساب (یا هزینه اولیه) و همچنین برای نگهداری و تعمیرات را آشکار نماید. یک مثال از بهینه‌سازی که مطلوبیت سرمایه‌گذاری بیش‌تر اکتساب برای جلوگیری از هزینه‌های بیش‌تر عملیات را نشان می‌دهد، مقایسه‌ی جداول ۹-۴ و ۹-۳ است. با این حال، این مقایسه بدون در نظر گرفتن هزینه بهره بوده و در نتیجه یک مثال دیگر در جداول ۹-۵ و ۹-۶ همراه با هزینه بهره نمایش داده شد. سرمایه‌گذاری بیش‌تر در اکتساب در این حالت توجیه نمی‌شود.

۵. شکل ۹-۱۴ تعمیمی از مدل‌های موجودی برای تعیین بهترین منبع تدارک را نمایش می‌دهد. این موضوع با شناسایی پارامترهای وابسته به منبع و تکرار معادله ۹-۳۹ برای سه منبع ممکن در مثال جدول ۹-۹ انجام می‌گیرد. این ارزیابی بهینه‌سازی گزینه‌های طراحی را توسط شناسایی پارامترهای وابسته به طراحی در دیگر مثال‌ها را ارائه می‌دهد.

۶. قسمت ۹-۳ مثال‌های غیرمحدود قبلی را با اضافه کردن محدودیت‌ها مورد بررسی قرار داده و آثار آن را مورد بررسی قرار می‌دهد. در مثال اول محدودیت منجر به برعکس شدن تصمیم در مورد طراحی می‌شود و هزینه کل سیستم افزایش می‌یابد. این موضوع به‌صورت گرافیکی در شکل ۹-۱۵ نشان داده شده است. در مثال دوم، محدودیت فضا منجر به افزایش هزینه کل در هر دوره شده است که در شکل ۹-۱۶ نمایش داده

می‌شود. هنگامی که وضعیت‌های غیرمحدود و با محدودیت مقایسه می‌شود، همیشه جریمه‌هایی رخ می‌دهد.

۷. در دو مثال ارزیابی شامل بهینه‌سازی و چندمعیار (قسمت ۹-۴)، روشن است که نمی‌توان تنها بر مبنای هزینه تصمیم‌گیری کرد. استفاده از نمایش ارزیابی تصمیم و در نظر گرفتن مشتری برای انتخاب گزینه ارجح در هر مثال لازم است.

۸. آخرین موضوع این فصل بهینه‌سازی یک تابع ارزیابی خطی محدود به محدودیت‌های خطی است. کاربرد آن در عملیات افسانه‌ای است. آخرین زیربخش، ۹-۵-۳، سعی دارد تا برنامه‌ریزی خطی در حوزه طراحی را با استفاده از خصوصیات طراحی محصول خروجی و همچنین با استفاده از نقش قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیرات (پارامترهای وابسته به طراحی) در دسترسی‌پذیری تولید قرار دهد.

تعمیم مطالب این فصل در هر کتاب خوب تحقیق در عملیات موجود است. با این حال، خواننده علاقه‌مند می‌تواند به W.J. Fabrycky, P.M. Ghare, and P.E. Torgersen, Applied Operations Research and Management Science, Prentice Hall, 1984 مراجعه کند.

سوالات و مسائل

۱. ابعاد یک مستطیل با محیط p را طوری تعیین کنید که مساحت آن بیشینه شود.

۲. هزینه تولید هر واحد در یک تجهیز به صورت تابع زیر است

$$UC = 2x^2 - 10x + 50$$

که در آن x تعداد هزار واحد تولید شده است. برای چه مقداری از x هزینه کمینه می‌شود (غیر از صفر)؟ هزینه کمینه در این حجم تولید چقدر است؟ نشان دهید که این مقدار یک کمینه واقعی است.

۳. مشخص شده است که هزینه تبلیغات با درآمد تقریبی حاصل به صورت تابع زیر است

$$P = x^3 - 100x^2 + 3125x$$

که در آن x هزینه‌ها در قالب هزار دلار است. چه هزینه تبلیغاتی بیش‌ترین سود را فراهم می‌کند؟ این سود چقدر است؟ نشان دهید این مقدار بیشینه واقعی است؟

۴. هزینه تولید و فروش یک آئتم مشخص $۲۲۰x + ۱۵۰۰۰$ برای ۱۰۰۰ واحد اول و $۱۲۰x + ۱۱۵۰۰۰$ برای یک بازه تولید بین ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ واحد و $۹۷۵۰۰ - ۲۰۵$ برای بیش‌تر از ۲۵۰۰ واحد است که در آن x تعداد تولید است. اگر قیمت فروش ۲۰۰ دلار در هر واحد باشد و همه واحدهای تولید شده فروش روند، سطح تولیدی که درآمد را بیشینه می‌کند، مشخص کنید.

۵. استیک اتیل از اسید استیک و الکل اتیل تولید می‌شود. فرض کنید x جرم اسید استیک به پوند و y جرم الکل اتیل به پوند و z جرم استیک اتیل به پوند باشد. رابطه ورودی به خروجی به صورت زیر است

$$\frac{z^2}{(1.4x - z)(1.91y - z)} = 3.9$$

الف- تعیین کنید خروجی استیک اتیل در هر پوند استیک اسید که در آن نسبت استیک اسید به الکل اتیل ۲،۱ و ۰/۶۷ باشد و گراف حاصل را رسم کنید.

ب - هزینه مواد در هر پوند از استیک اتیل برای نسبت‌های داده شده را رسم کرده و مشخص کنید کدام ترکیب حداقل هزینه در هر پوند استیک اتیل کمینه می‌شود اگر هزینه هر پوند استیک اسید ۰/۸ دلار و هزینه هر پوند اتیل الکل ۰/۹۲ دلار باشد.

۶- مشخص شده است که اتلاف گرما از سقف یک ساختمان 0.13 Btu در هر ساعت در هر فوت مربع به ازای هر ۱ درجه فارنهایت است. اگر سقف ۲۲۰۰ فوت مربع عایق‌بندی شود، مقدار گرمای اتلاف شده در هر ساعت در هر درجه اختلاف دما در هر فوت مربع به صورت زیر خواهد بود

$$\frac{1}{(1/0.13) + (t/0.27)}$$

که در آن t ضخامت عایق به اینچ است. هزینه عایق با ضخامت ۲، ۴ و ۶ اینچ به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۶۰ و ۰/۸۸ دلار است. ساختمان ۳۰۰۰ ساعت در سال در دمای ۷۲ درجه سانتیگراد بوده و یک کوره گازی با کارایی ۵۰٪ وظیفه تامین گرما را ارد. دمای میانگین خارجی ۴۵ درجه فارنهایت است و هزینه استفاده از گاز طبیعی ۸/۸ دلار در هر ۱۰۰۰ فوت مکعب بوده و ارزش گرمایی معادل 1020 Btu در هر فوت مکعب است. کدام ضخامت عایق در نرخ بهره ۱۰٪ باید استفاده شود اگر قیمت ساختمان پس از ۶ سال به خاطر عایق استفاده شده ۲۰۰۰ دلار افزایش یابد (با هر ضخامتی)؟

۷. یک پل عابر پیاده برای یک خیابان در نظر گرفته شده است. روبنای طراحی مدنظر با بتن مسلح ساخته می‌شود و وزن آن در هر فوت به فاصله‌های بین ستون‌های پل عبوری بستگی دارد و رابطه آن به صورت $W = 32(S) + 1850$ است. ستون‌ها باید از فولاد ساخته شده و هر کدام ۲۵۰۰۰۰ دلار قیمت دارد. روبنا با هزینه ۳/۲ دلار در هر پوند

استقرار می‌یابد. اگر تعداد ستون‌ها یکی کم‌تر از تعداد فاصله‌ها باشد، تعداد ستون‌ها را طوری به‌دست آورید که هزینه کل برای ستون‌ها و روبنا حداقل شود ($L=600$ فوت).

۸. دو طراحی تیرآهن برای یک پل با طول ۱۲۰۰ فوت مدنظر است. برای اولی پیش‌بینی می‌شود که وزن روبنا در هر فوت $22(S)+800$ بوده که در آن S فاصله بین ستون‌هاست. در دومی وزن روبنا در هر فوت $20(S)+1000$ است. ستون‌ها و دو ستون جناحی ۲۲۰۰۰۰ دلار تخمین زده شده است. روبنا با هزینه ۵.۴ دلار در هر پوند استقرار می‌یابد. طراحی را انتخاب کنید که هزینه آن کمینه بوده و تعداد ستون‌های بهینه را مشخص کنید.

۹. مزیت هزینه‌ای در انتخاب بهترین طراحی در سوال ۸ را تشریح کنید؟ اگر تعداد ستون‌ها توسط طراحی بهینه تعیین شود اما گزینه دیگر انتخاب شود هزینه جریمه چقدر خواهد بود؟

۱۰. یک دانشجو می‌تواند یک خودروی کارکرده را خریداری کرده تا نیاز رفت و برگشت خود به دانشگاه را تامین کند. هزینه خودرو (بدون گارانتی) ۵۵۰۰ دلار است. هزینه نگهداری و تعمیرات در سال اول ۳۵۰ دلار پیش‌بینی شده که هر سال ۱۰۰ دلار به آن اضافه می‌شود. هزینه‌های عملیاتی خودرو ۱۲۰۰ دلار در هر سال بوده ارزش اسقاطی آن سالانه ۱۵٪ کاهش می‌یابد.

الف — عمر اقتصادی بدون در نظر گرفتن ارزش زمانی پول چقدر است؟

ب — با نرخ بهره ۱۰ درصد عمر اقتصادی را به‌دست آورید؟

۱۱. به‌عنوان یک گزینه دیگر برای سوال ۱۰، دانش‌آموزی می‌تواند یک مدل جدید با قیمت ۱۳۶۰۰ دلار و سه سال گارانتی است. هزینه نگهداری و تعمیرات در سال اول ۵۰ دلار بوده که سالانه ۵۰ دلار به آن اضافه می‌شود. هزینه عملیات هر خودرو ۹۶۰ دلار

پیش‌بینی می‌شود و ارزش اقتصادی آن سالانه ۲۰٪ کاهش می‌یابد. مزیت اقتصادی این اتومبیل در حالت بدون وجود بهره و با در نظر گرفتن بهره ۱۰٪ را به‌دست آورید.

۱۲. تجهیز خاصی با هزینه ۸۰۰۰۰ دلار طراحی و ساخته می‌شود. این تجهیز ارزش اسقاطی ۷۰۰۰۰ دلاری در سال اول داشته که سالانه ۱۰۰۰۰ دلار تا سال ۸ کاهش می‌یابد هزینه‌های عملیاتی و نگهداری آن در سال اول ۱۸۰۰۰ دلار بوده و سالانه تا سال ۵، ۵٪ افزایش می‌یابد. سازمان پیشنهاد می‌دهد که برای این طراحی می‌توان پول موردنیاز را با نرخ بهره ۹٪ قرض کرد. با استفاده از رویکرد جدولی، عمر اقتصادی این تجهیز را به‌دست آورید.

۱۳. شرکت X استفاده از یک آچار ضربه‌ای حساس به گشتاور را در نظر گرفته است تا عملیات بستن پیچ را در یکی از خطوط مونتاژ انجام دهد. این آچار که با قیمت ۹۵۰ دلار خریداری می‌شود حداکثر ۴ سال عمر می‌کند. آچار ضربه‌ای در سال اول ارزش اسقاطی ۶۰۰ دلاری داشته و سالانه ۲۰۰ دلار کاهش می‌یابد. آچار ضربه‌ای دارای هزینه عملیات و نگهداری تعمیرات معادل ۱۰۰ دلار در سال اول، ۲۵۰ دلار در سال دوم، ۳۲۵ دلار در سال سوم و ۴۰۰ دلار در سال چهارم است. حداقل نرخ بازگشت سرمایه شرکت ۲۵٪ است. با استفاده از رویکرد جدولی، ارزش اقتصادی آچار ضربه‌ای را پیدا کنید. ارزش اقتصادی آچار ضربه‌ای را به‌صورت گرافیکی نشان دهید.

۱۴. یک نمودار جریان موجودی مشابه شکل ۹-۱۱ رسم کنید اگر $R = \infty$. مقادیر بهینه Q ، L و TC تحت این فرضیات را به‌دست آورده و نتایج را با جایگزینی در معادلات ۹-۳۸ تا ۹-۴۰ تایید کنید.

۱۵. یک نمودار جریان موجودی مشابه شکل ۹-۱۱ رسم کنید اگر $R=\infty$ و $C_s=\infty$ باشد. مقادیر بهینه Q ، L ، و TC تحت این فرض‌ها را به‌دست آورده و نتایج را با جایگزینی در معادلات ۹-۳۸ تا ۹-۴۰ تایید کنید.

۱۶. یک بازسازی کننده موتور ۸۲ پیستون در روز برای عملیات مونتاژ احتیاج دارد. هیچ کمبودی جایز نیست. کارگاه ماشینی می‌تواند ۵۰۰ پیستون در روز تولید کند. هزینه اولیه فعالیت‌های تولید ۴۰۰ دلار و هزینه نگهداری هر پیستون در روز ۰/۴۵ دلار است. هزینه تولید هر پیستون ۱۰۵ دلار است.

الف - تعداد تولید با هزینه کمینه را پیدا کنید؟

ب - سطح تدارک را اگر زمان تحویل ۸ روز باشد طوری پیدا کنید که هزینه کمینه شود؟

پ - هزینه کل سیستم در روز را محاسبه کنید؟

۱۷. یک پیمانکار پیدا شده است که می‌تواند پیستون‌ها را برای مساله قبل تامین کند. هزینه خرید ۹۰ دلار در برای هر سفارش بوده و هزینه هر پیستون ۱۰۸ دلار است.

الف - کمینه هزینه کل سیستم در روز را برای خرید از پیمانکار محاسبه کنید؟

ب - مزیت اقتصادی آن چیست؟

۱۸. تقاضا برای یک آیتم مشخص ۱۲ واحد در هر دوره است. هیچ کمبودی جایز نیست. هزینه نگهداری ۰/۰۲ دلار برای هر واحد در هر دوره است. تقاضا را می‌توان هم با خرید و هم با تولید برآورده کرد. هر کدام از این منابع در جدول زیر تشریح شده است.

تولید	خرید	
۱۳ دوره	۱۸ دوره	زمان تحویل
۹/۶ دلار	۱۱ دلار	هزینه آیتم
۹۰ دلار	۲۰ دلار	هزینه تدارک
۲۵ واحد در هر دوره	∞	نرخ جایگزینی

الف- منبع تامین با کم‌ترین هزینه را پیدا کرده و مزیت اقتصادی آن بر دیگر گزینه‌ها را محاسبه کنید.

ب- تعداد تدارک بهینه را پیدا کنید.

پ - سطح تدارک بهینه را پیدا کنید.

۱۹. یک شرکت تولید کننده قطعه الکترونیکی دارای تقاضای ۲۵۰ واحد در هر دوره است. آغاز تولید هزینه ای معادل ۴۰۰ دلار دارد تا با نرخ ۶۰۰ قطعه در هر دوره شروع به تولید کند. هزینه تولید یک واحد ۹۰ دلار است. هزینه نگهداری هر واحد ۰/۱۵ دلار و هزینه کمبود ۳/۲۵ دلار برای یک دوره است. تعیین کنید (الف) تعداد تولید با کم‌ترین هزینه، (ب) سطح تدارک با کم‌ترین هزینه اگر زمان تحویل ۱۲ دوره باشد، و (پ) هزینه کل سیستم در هر دوره.

۲۰. عبارات تعداد و سطح تدارک با کم‌ترین هزینه را هنگامی که C_H بی‌نهایت فرض شده باشد، به دست آورد. یک وضعیت واقعی را نام ببرید که در آن چنین مدلی اعمال می‌شود.

۲۱. اگر فاصله بین ستون‌ها در مساله ۷ لازم باشد که بیش‌تر از ۷۰ فوت باشد، هزینه جریمه با اضافه شدن این محدودیت چقدر است؟

۲۲. فرض کنید که نمی‌توان بیش از ۵ ستون برای مساله ۷ استفاده کرد. هزینه جریمه با اضافه شدن این محدودیت چقدر خواهد بود اگر هزینه هر ستون ۳۰۰۰۰۰ دلار باشد؟

۲۳. یک آیتم با تقاضای ۳۰۰ واحد در هر دوره باید خریداری شده و هیچ کمبودی جایز نیست. هزینه آیتم ۱/۳ دلار، هزینه نگهداری یک واحد در یک دوره ۰/۰۲ دلار، و هزینه فرایند سفارش‌دهی ۲۸ دلار است. هر آیتم ۲ فوت مربع از فضای انبار را اشغال می‌کند. انبار دارای فضای ۱۵۰۰ فوت مکعبی است. تعداد و سطح خرید با کم‌ترین هزینه را

برای این مساله تحت محدودیت‌های ذکر شده به‌دست آورید اگر زمان تحویل دو دوره باشد. هزینه جریمه با وجود محدودیت انبار چقدر است؟

۲۴. تقاضا برای یک آیتم ۲۰ واحد در هر دوره است. تقاضای ارضا نشده هزینه کمبودی برابر با ۰٫۶ دلار برای هر واحد در هر دوره را ایجاد می‌کند. هزینه شروع تولید ۴۸ دلار بوده و هزینه نگهداری هر واحد در هر دوره ۰٫۰۴ دلار در هر دوره است. هزینه تولید هر واحد ۷/۹ دلار بوده و نرخ تولید ۶۰ واحد در هر دوره خواهد بود. هر آیتم ۳ فوت مکعب فضای انبار را اشغال کرده و فضای در دسترس انبار ۳۰۰ فوت مکعب است. تعداد و سطح تدارک با کم‌ترین هزینه را با این محدودیت پیدا کنید و فرض کنید که زمان تحویل ۳ دوره است. هزینه جریمه ایجاد شده در هر دوره به خاطر محدودیت انبار چقدر است؟

۲۵. به‌صورت گرافیکی مقادیر x و y را طوری تعیین کنید که تابع زیر با محدودیت‌های آن بیشینه شود

$$Z = 2.2x + 3.8y$$

محدود به

$$2.4x + 3.2y \leq 140$$

$$0.0x + 2.6y \leq 80$$

$$4.1x + 0.0y \leq 120$$

$$x, y \geq 0$$

۲۶. یک کارگاه کوچک قابلیت خم کاری، فرزکاری، سوراخکاری و جوشکاری را دارد. ظرفیت ماشین ۱۶ ساعت در روز برای خمکاری، ۸ ساعت در روز برای فرزکاری، ۱۶ ساعت در روز برای سوراخ کاری و ۸ ساعت در روز برای جوشکاری است. دو محصول A و B مدنظر هستند. سود خالص هر واحد از این محصولات ۳۵/۱۰ دلار است و نیاز به

زمان برای ماشین کاری مطابق جدول زیر هستند. به صورت گرافیکی تعداد واحدهای تولیدی از هر محصول را طوری به دست آورید که سود بیشینه شود.

محصول B	محصول A	
۰/۱۲۴	۰/۰۴۶	خم کاری
۰/۰۴۸	۰/۱۱۲	فرزکاری
۰	۰/۰۴	سوراخ کاری
۰/۱۲۰	۰	جوشکاری

۲۷. مقادیر x , y , و z را برای مساله بیشینه سازی با محدودیت زیر حل کنید.

$$P = 7.8x + 9.4y + 2.6z$$

محدود به

$$4.2x + 11.7y + 3.5z \leq 1800$$

$$0.8x + 4.3y + 1.9z \leq 2700$$

$$12.7x + 3.8y + 2.5z \leq 950$$

$$x, y, z \geq 0$$

۲۸. یک تجهیز تولیدی طراحی شده را برای دسترسی پذیری بالاتر نسبت به آنچه در جدول

۹-۱۲ ارائه شده است، ارزیابی کنید. به ویژه، فرض کنید که MTBF بیش تر و MTTR

کم تر منجر به افزایش ظرفیت ۱۳۲۰ دقیقه ای در هفته برای پرس، ۶۸۰ دقیقه برای

جوشکاری و ۱۶۰۰ دقیقه برای مونتاژ شود که در جدول زیر ارائه شده است. این مقادیر

پارامترهای وابسته به طراحی بالاتر هزینه بیش تری خواهد داشت و باعث کاهش سود

محصول A به ۵۸۵ دلار، محصول B به ۶۸ دلار و محصول C به ۴۹ دلار

می شود. تعیین کنید که ترکیب تولید بهینه و سود هفتگی حاصل چقدر است اگر این

امکان وجود داشته باشد که طراحی تجهیز با دسترسی‌پذیری بالاتر استفاده شود. آیا این گزینه باید انتخاب شود؟

واحد	محصول A	محصول B	محصول C	ظرفیت
پرس	۲/۴	۳	۲	۱۳۲۰
جوشکاری	۰	۲/۵	۱/۵	۶۸۰
مونتاژ	۵	۰	۲/۵	۱۶۰۰
سود	۰/۵۸۵	۰/۶۸	۰/۴۹	

تئوری و تحلیل صف

سیستم صف یا خط انتظار را که در این فصل بررسی می‌شود، به صورت زیر می‌توان تشریح کرد. یک تسهیل از گروهی از تسهیلات نگه داشته شده، برای برآورده کردن تقاضا و خدمت‌دهی که توسط یک جمعیت از افراد یا موجودیت‌ها ایجاد شده است. این واحدها یک صف یا خط انتظار را تشکیل می‌دهند و براساس قانونی از پیش تعیین شده صف خدمات خود را دریافت می‌کنند. در اکثر موارد، واحدی که خدمات را دریافت کرده است، دوباره کاندید دریافت خدمت می‌شود. در برخی موارد، افراد، یک خط انتظار را در مرحله بعدی سیستم ایجاد می‌کنند.

سیستم‌ها با این خصوصیات در عملیاتی که در آن افراد، مواد، تجهیزات یا وسائل نقلیه خطوط انتظار را تشکیل می‌دهند، رایج هستند. افراد در یک کافه، مطب دکتر و تئاتر خط انتظار تشکیل می‌دهند. در تولید، جریان آیتم‌های در حال پردازش در هر مرکز پردازش خط انتظار تشکیل می‌دهند. در نگهداری و تعمیرات، تجهیزاتی که باید خدمات نگهداری و تعمیرات دریافت کنند، یک خط انتظار را تشکیل می‌دهند. در حمل و نقل، خطوط انتظار در عوارضی، چراغ‌های راهنمایی و رانندگی و سکوهای بارگیری صف تشکیل می‌دهند. در هر کدام از این موارد، هدف بهینه‌سازی

در یک مجموعه از متغیرهای تصمیم در مواجهه با پارمترهای سرویس است که در آن‌ها، مقادیر این پارامترها هم می‌توانند ثابت بوده و هم می‌توانند بسته به شرایط موجود متغیر باشند.

حوزه‌های بنیادین که در بالا خلاصه شد با در نظر گرفتن حوزه‌های جمعیت محدود و نامحدود توسعه یافته است. در ابتدا، طبیعت کلی سیستم‌های صف ارائه شده است. در ادامه تحلیل مونت کارلو تشریح شده است. مدل‌های تک کاناله در ادامه استخراج شده و پیرو آن مدل‌های چند کاناله اقتباس شده است که در هر دو آن‌ها، فرضیات مختلف توزیع‌های ورود و زمان خدمت‌دهی بررسی می‌شوند. این فصل با بررسی مدل‌های صف با جمعیت محدود به پایان می‌رسد. با در نظر گرفتن این موضوعات، انتظار می‌رود که خواننده مفاهیم زیر را در پایان فصل فرا گرفته باشد:

- درک مولفه‌ها و عناصری که سیستم‌های صف را تشکیل می‌دهند که شامل مکانیسم‌های ورود، انتظار و خدمت‌دهی می‌شوند؛
- انجام تحلیل مونت کارلو در فرایند صف و تحلیل نتایج؛
- درک استخراج تعدادی از شاخص‌های رایج برای سیستم‌های صف با یک و چند کانال با ورود و زمان خدمت‌دهی نمایی؛
- جایگزینی فرضیه زمان خدمت‌دهی نمایی با دیگر توزیع‌های غیرنمایی و درک آثار آن؛
- مقایسه‌ی مشابهت‌ها و تفاوت‌ها در تئوری صف با جمعیت محدود و نامحدود؛
- اعمال جداول صف محدود در بهینه‌سازی کانال خدمت‌دهی، کنترل زمان خدمت‌دهی و تغییر فاکتور خدمت؛
- استفاده از تئوری ارزیابی تصمیم برای ارزیابی تحلیل و طراحی سیستم صف با جمعیت محدود یا نامحدود.

آخرین قسمت این فصل، خلاصه‌ای از مطالب این فصل در حوزه‌ی تئوری و تحلیل صف را ارائه کرده و نکات کلیدی برای مطالعه‌ی بیش‌تر را فراهم آورده است. هم‌چنین، منابع پیشنهادی برای مطالعه بیش‌تر برای درک سیستم‌های صف ارائه شده است.

۱۰-۱- سیستم صف

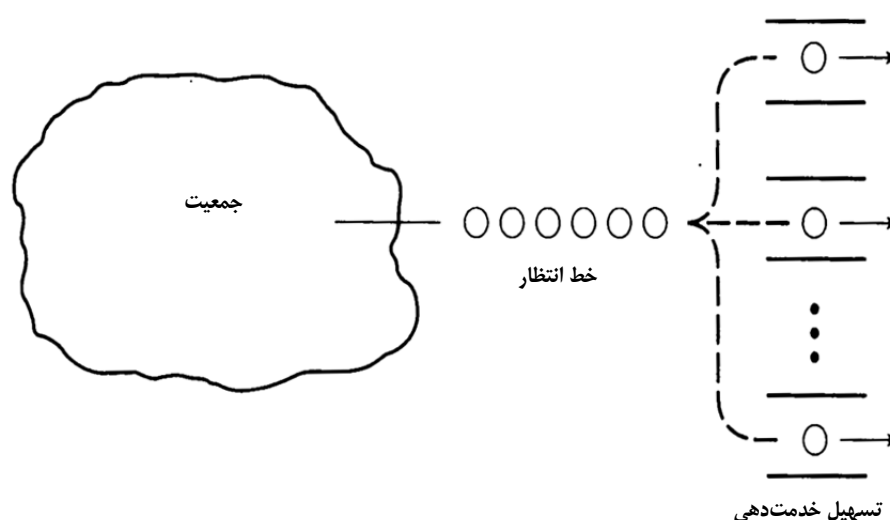
یک سیستم صف چند کاناله در شکل ۱۰-۱ به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است. چنین سیستمی به این علت به‌وجود آمده است که جمعیت نشان داده شده خواستار خدمت‌دهی هستند. برای ارضای تقاضای سیستم، تصمیم‌گیرنده باید سطح ظرفیت خدمت‌دهی را که موردنیاز است، فراهم کند. این موضوع شامل افزایش یا کاهش ظرفیت خدمت‌دهی است که توسط تغییر نرخ خدمت‌دهی در کانال‌های موجود یا با اضافه کردن یا حذف کانال‌ها انجام می‌شود. قسمت‌های بعدی مولفه‌های سیستم خط انتظار را تشریح کرده و اهمیت آن‌ها در فرایند ارزیابی تصمیم را مشخص می‌کنند.

۱۰-۱-۱ مکانیسم ورود

تقاضا برای سرویس، اساساً یک سیستم صف را ایجاد کرده و وجودش را توجیه می‌کند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، سیستم خط انتظار ممکن است برای برآورده کردن تقاضای خدمت‌دهی ایجاد شده توسط افراد، مواد، تجهیزات یا وسایل نقلیه به‌وجود آمده باشد. خصوصیات الگوی ورود به طبیعت جمعیتی دارد که برای دریافت سرویس وارد سیستم می‌شوند.

سیستم‌های خط انتظار به این علت به‌وجود می‌آیند که یک جمعیت از افراد یا واحدها در برهه‌های مختلف زمانی نیازمند خدمات هستند. اغلب جمعیت ورودی به‌عنوان گروهی از آیتم‌ها هستند که برخی از آن‌ها به صف ملحق شده و بعضی آن را ترک می‌کنند. برای مثال، اگر جمعیت مدنظر از همه هواپیماهای یک خط هوایی تشکیل شده باشد، آنگاه زمان‌بندی پرواز و

رخدادهای تصادفی تعیین‌کننده‌ی تعداد هواپیماهایی است که الگوی فرود را در یک فرودگاه برای یک بازه‌ی زمانی مشخص تعیین می‌کنند. اگر جمعیت از مشترکان خط تلفن تشکیل شده باشند، آنگاه زمانی از روز و روزهایی از هفته و همچنین بسیاری دیگر از فاکتورها، تعداد تماس‌های برقرار شده را مشخص خواهند کرد. اگر جمعیت شامل ماشین‌های تولیدی باشد، استهلاک، فرسودگی و نرخ‌های بهره‌برداری مشخص‌کننده‌ی مکانیسم ارسال تقاضا برای تعمیر و ایجاد خط انتظار برای خدمات نگه‌داری و تعمیر خواهد بود.



شکل ۱۰-۱ - یک سیستم صف چند کاناله

جمعیت ورودی اگرچه در اندازه‌ی محدود است، اما می‌تواند در شرایط خاصی، نامحدود در نظر گرفته شود. اگر نرخ خروج نسبت به اندازه‌ی جمعیت کوچک باشد، تعداد واحدهایی که به صورت بالقوه ممکن است نیاز به خدمات داشته باشد، خالی نخواهد شد. تحت چنین شرایطی، جمعیت را می‌تواند نامحدود در نظر گرفت. مدل‌های استفاده شده برای توضیح رفتار چنین سیستم‌هایی

بسیار راحت‌تر از حالت جمعیت محدود فرموله می‌شوند. مثال‌هایی از جمعیت‌هایی که می‌توانند نامحدود در نظر گرفته شوند، اتومبیل‌هایی هستند که نیازمند عبور از یک پل هستند، مشتریانی که ممکن است مشتری ثابت یک تئاتر شوند، مشترکان تلفنی که تماس برقرار می‌کنند و سفارش‌های تولیدی که نیازمند انجام عملیات در یک مرکز ماشین کاری هستند.

در برخی موارد، بخشی از جمعیت نیازمند خدمات وقتی که با خود جمعیت مقایسه می‌شود، ممکن است نسبتاً بزرگ باشد. در این موارد، جمعیت با خروج افراد تا جایی که نرخ خروج پایدار نماند، خالی می‌شود. از آن‌جا که مدل‌های استفاده شده برای توضیح سیستم‌های خط انتظار به پایداری نرخ ورود بستگی دارند، موارد محدود باید با انجام رفتارهای خاصی صورت گیرند.

مثال‌هایی از عملیات خط انتظار که می‌تواند به‌عنوان حالت محدود دسته‌بندی شود شامل آیتم‌هایی از تجهیزات است که نیازمند تعمیر هستند، تسهیلات نیمه خودکار تولید که نیازمند توجه عملیات هستند و یک بوفه در یک شرکت که جمعیت داخل آن را خدمت‌دهی می‌کند. سیستم‌های صف برای موردی که در آن فرض جمعیت نامحدود وجود ندارد در قسمت ۱۰-۶ بحث شده است. کاربرد کلی صف محدود که سیستم جمعیت تجهیزات قابل تعمیر نامیده می‌شود در قسمت ۱۷-۵ مورد بررسی قرار گرفته است.

۱۰-۱-۲- خط انتظار

در هر سیستم صف، یک مکانیزم خروج وجود دارد که نرخی را کنترل می‌کند که در آن افراد جمعیت را ترک کرده و به صف وارد می‌شوند. این مکانیزم خروج مسئول تشکیل خط انتظار برای دریافت خدمات است. تشکیل صف یک فرایند گسسته است. افراد یا آیتم‌هایی که به خط انتظار ملحق می‌شوند به‌صورت مقادیر صحیح مورد بررسی قرار می‌گیرند. تعداد واحدهای در صف در هر نقطه زمانی یک مقدار صحیح است. به‌ندرت پیش می‌آید که فرایند صف پیوسته باشد.

افراد یا آیتم‌هایی که بخشی از صف انتظار می‌شوند یک جایگاه در صف پیدا می‌کنند که بستگی به قانون مشخص خط انتظار دارد. رایج‌ترین قانون صف، قانونی است که می‌گوید "آن که اول می‌آید، اول خدمت می‌گیرد (FIFO)" است. دیگر قوانین اولویت‌بندی وجود دارند مانند فرایند انتخاب تصادفی؛ قانون فوریت نسبی؛ آن که اول می‌آید، آخر خدمت می‌گیرد و قوانینی که ترکیبی از این موارد می‌باشند. علاوه بر این، افرادی که برای یک دوره در صف باقی می‌مانند دوباره به جمعیت ملحق می‌شوند. این رفتار رجوع نامیده می‌شود.

هنگامی که یک واحد به خط انتظار ملحق می‌شود، یا خدمت داده می‌شود، یک هزینه انتظار به وجود می‌آید. هزینه انتظار برای هر واحد در هر دوره‌ی به واحدهای مورد بررسی بستگی دارد. اگر یک وسیله‌ی گران‌قیمت برای عملیات انتظار بکشد، یا نیازمند نگهداری و تعمیرات باشد، سود از دست رفته بزرگ خواهد بود. وسایل نقلیه که در صف عوارض قرار گرفته‌اند به علت اختلال در انجام سفر، دچار هزینه انتظار خواهند شد. مشتریانی که در کانتینر خروجی عصبی می‌شوند، مالک مکان، دچار هزینه‌ی عدم رضایت مشتری خواهد شد.

افزایش ظرفیت خدمت‌دهی باعث کاهش در طول خط انتظار و زمان مورد نیاز برای اتمام خدمات می‌شود. در نتیجه، زمان انتظار کاهش می‌یابد. از آنجا که هزینه انتظار سیستم، نتیجه‌ی تعداد واحدهای در انتظار و مدت زمان انتظار است، این کار باعث کاهش مولفه هزینه می‌شود. اما از آنجا که افزایش ظرفیت خدمت‌دهی یک تسهیل هزینه خدمات را افزایش می‌دهد، باید به دنبال نقطه‌ای باشیم که در آن کاهش هزینه انتظار در مقابل افزایش هزینه خدمت‌دهی قابل توجیه باشد.

۱۰-۱-۳ - مکانیسم خدمت‌دهی

نرخ‌ی که واحدهای نیازمند به خدمات، خدمت دریافت می‌کنند، یک متغیر است که به‌طور مستقیم تحت کنترل تصمیم‌گیرنده است. این متغیر می‌تواند یک مقدار خاص گرفته تا هزینه سیستم خط انتظار را کمینه کند.

خدمت‌دهی، فرایندی است که فعالیت‌های موردنیاز واحدهای در خط انتظار را فراهم می‌کند. خدمت‌دهی می‌تواند شامل دریافت عوارض، پر کردن سفارش، انجام تعمیرات لازم یا اتمام عملیات تولیدی باشد. در هر مورد، عمل فراهم کردن سرویس برای یک واحد باعث می‌شود که خط انتظار کوتاه شود. مکانیسم خدمت‌دهی، مانند مکانیسم ورود، گسسته است زیرا آیتم‌های به‌صورت واحد به واحد مورد پردازش قرار می‌گیرند.

تسهیل خدمت‌دهی می‌تواند شامل یک کانال بوده یا از چندین کانال موازی تشکیل شده باشد (شکل ۱۰-۱). اگر از یک کانال تشکیل شده باشد، همه ورودی‌ها باید به تدریج از این کانال عبور کنند. اگر چند کانال فراهم شده باشد، آیتم‌ها می‌توانند از یک خط انتظار به خط انتظار بعدی که خالی شده است، بروند. نرخ‌ی که در آن آیتم‌ها مورد پردازش قرار می‌گیرند، به ظرفیت خدمت‌دهی که در هر کانال ایجاد شده و به تعداد کانال‌ها بستگی دارد.

خدمت ممکن است تنها توسط انسان انجام شود یا توسط انسان و با کمک ابزار و تجهیزات انجام شود و یا فقط تجهیزات آن را صورت دهند. برای مثال، دریافت هزینه لزوماً کار یک منشی است که نیازمند تجهیز یا ابزار دیگری نیست. در مقابل، تعمیر یک وسیله نقلیه نیازمند تجهیزات و ابزارهای مکانیکی است. پردازش یک تماس تلفنی که یک مشترک ایجاد کرده است به‌ندرت نیازمند دخالت انسان بوده و اغلب توسط تجهیزات خودکار صورت می‌گیرد. این مثال‌ها مشخص می‌کند که تسهیلات خدمت‌دهی بسیار متنوع بوده و ترکیبات مختلفی از انسان و ماشین می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد تا خدمات موردنیاز فراهم شود.

هر کانال از تسهیل خدمت‌دهی نمایانگر یک سرمایه‌گذاری به‌علاوه هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و تعمیرات است. علاوه بر این، دستمزدهای کارکنان و هزینه‌های بالاسری را نیز می‌توان اضافه کرد. توانمندی یک کانال در خدمت‌دهی به واحدهای نیازمند خدمات تابعی از منابع مصرف شده در کانال است. برای مثال، کانال می‌تواند شامل یک تعمیرکار و ابزار ساده باشد، یا ممکن است یک گروه از تکنسین‌ها با ابزار و تجهیزات پیچیده باشند.

از آن‌جا که افزایش ظرفیت خدمت‌دهی باعث کوتاه شدن خط انتظار می‌شود، مفید است که ظرفیت خدمت‌دهی را طوری اصلاح کنیم که مجموع هزینه انتظار و هزینه خدمت‌دهی کمینه شود. ساختار کلی مدل‌های ارزیابی برای رسیدن به این هدف در ادامه ارائه شده است.

۱۰-۱-۴- ارزیابی سیستم صف

برای یک سیستم صف موجود، تابع ارزیابی به شکل معادله ۷-۲ قابل استفاده است. به ویژه

$$E = f(X, Y)$$

که در آن

E = شاخص ارزیابی

X = متغیر سیاستی مربوط به سطح ظرفیت خدمت‌دهی که باید فراهم شود

Y = پارامترهای سیستم شامل نرخ ورود، نرخ خدمت‌دهی، هزینه انتظار و هزینه تسهیلات

خدمت‌دهی

اگر سیستم صف مورد طراحی باشد، یک تابع ارزیابی به شکل معادله ۷-۳ مورد استفاده قرار

می‌گیرد که به‌صورت زیر است

$$E = f(X, Y_d, Y_i)$$

که در آن

$$E = \text{شاخص ارزیابی}$$

$$X = \text{متغیر طراحی مربوط به سطح ظرفیت خدمت‌دهی که باید مشخص شود}$$

$$Y_d = \text{پارامترهای وابسته به طراحی (معمولا شامل قابلیت اطمینان و/یا قابلیت نگهداری و تعمیرات واحدهای نیازمند خدمت)}$$

$$Y_i = \text{پارامترهای مستقل از طراحی شامل هزینه انتظار و هزینه تسهیلات خدمت‌دهی}$$

قسمت‌های بعدی به توسعه‌ی مدل‌های ارزیابی تصمیم با خصوصیات ذکر شده می‌پردازند.
فرض کنید

$$TC = \text{هزینه کل سیستم در یک دوره}$$

$$A = \text{تعداد دوره‌ها بین ورود}$$

$$S = \text{تعداد دوره‌ها برای اتمام یک واحد از خدمات}$$

$$C_w = \text{هزینه انتظار یک واحد در یک دوره}$$

$$C_f = \text{هزینه تسهیلات خدمت‌دهی برای ارائه خدمات به یک واحد}$$

نمادهای دیگر در صورت نیاز در مدل‌های تصمیم‌گیری ارائه و تعریف می‌شوند.

۱۰-۲- تحلیل مونت کارلو برای صف

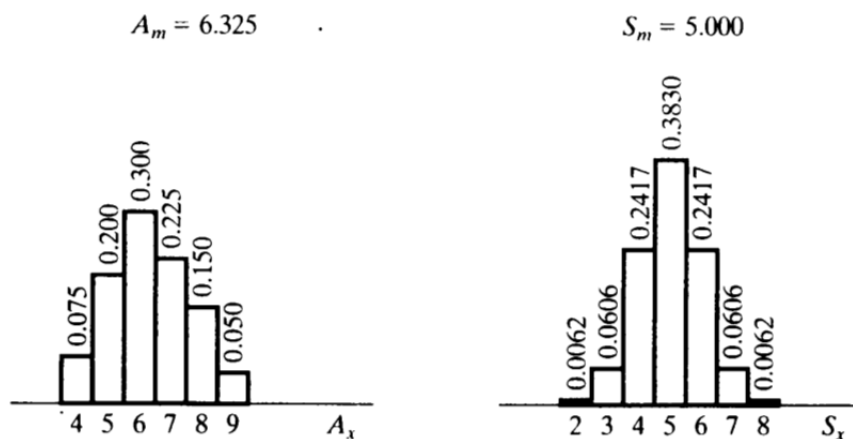
مدل‌های تصمیم برای سیستم‌های احتمالی خط انتظار، اغلب بر پایه‌ی فرض‌هایی هستند که مربوط به شکل ریاضی توزیع‌های ورود و زمان خدمت‌دهی است. تحلیل مونت کارلو نیازی ندارد که این توزیع‌ها از شکل‌های مشخص تئوریک پیروی کنند. داده‌های خط انتظار به صورت

سیستمی تولید می‌شوند که در طی زمان شبیه‌سازی می‌گردد. بدون توجه به شکل توزیع‌های موجود، از آمار خروجی می‌توان نتیجه‌گیری کرد. علاوه بر این، تشریح تفصیلی و عددی که تحلیل مونت کارلو فراهم می‌کند به فهم فرایند احتمالی صف بسیار کمک خواهد کرد. این قسمت کاربرد تحلیل مونت کارلو در یک سیستم خط انتظار تک کاناله با جمعیت نامحدود را نشان می‌دهد.

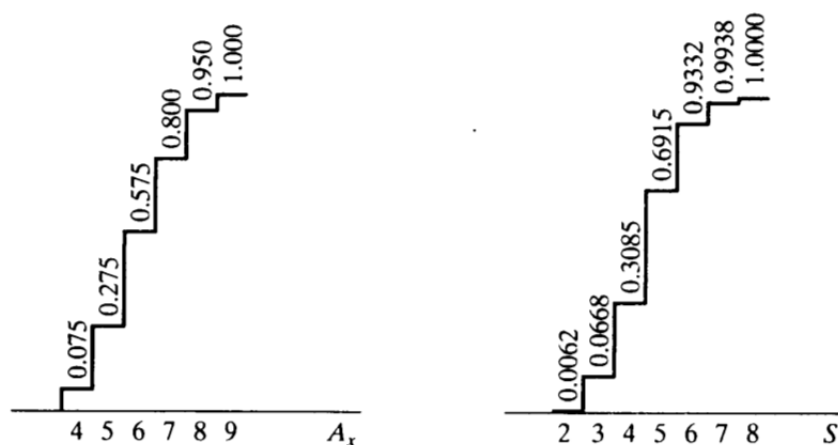
۱۰-۲-۱- توزیع‌های ورود و زمان خدمت‌دهی

سیستم احتمالی خط انتظار اغلب شامل یک توزیع زمان ورود و یک توزیع زمان خدمت‌دهی می‌شود. تحلیل مونت کارلو نیاز دارد که شکل و پارامترهای این توزیع‌ها مشخص باشد. سپس توزیع تجمعی می‌تواند توسعه یافته و به عنوان روشی برای تولید داده‌های ورود و زمان خدمت‌دهی استفاده شود.

برای مثال، فرض کنید زمان بین ورود، A_x ، دارای یک توزیع تجربی با میانگین $6/325$ دوره باشد ($A_m = 6.325$). فرض می‌شود که زمان خدمت‌دهی، S_x ، دارای توزیع نرمال با میانگین 5 دوره ($S_m = 5$) و انحراف معیار 1 دوره باشد. این توزیع‌ها در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده‌اند. احتمالات مربوط به هر یک از مقادیر A_x و S_x مشخص شده‌اند. با جمع این احتمالات از چپ به راست، توزیع‌های تجمعی شکل ۱۰-۳ حاصل می‌شود. این توزیع‌ها را می‌توان در یک جدول تصادفی مورد استفاده قرار داد تا مقادیر تصادفی برای ورود و زمان خدمت را تولید کرد یا می‌توان از یک الگوریتم رایانه‌ای استفاده کرد.



شکل ۱۰-۲- توزیع‌های ورود و زمان خدمت‌دهی



شکل ۱۰-۳- توزیع‌های تجمعی زمان ورود و خدمت‌دهی

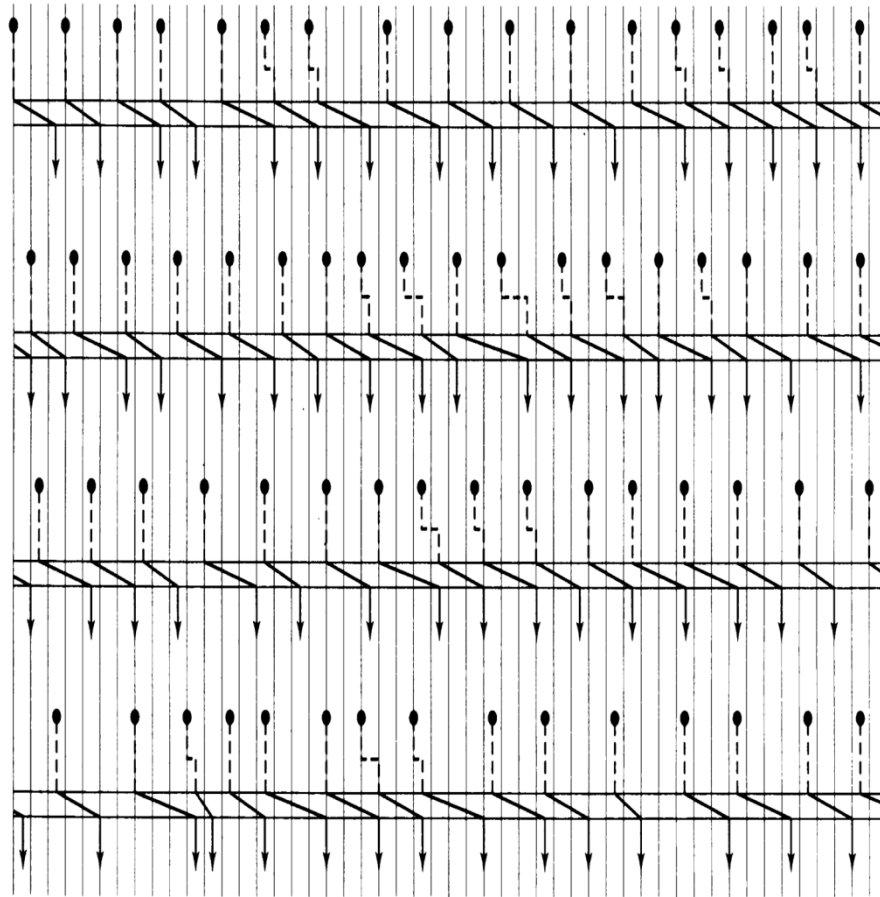
۱۰-۲-۲- تحلیل مونت کارلو

فرض شده است که فرایند صف مورد مطالعه، زمانی شروع می‌شود که اولین ورود رخ دهد. یک واحد بی‌درنگ به تسهیل خدمت‌دهی وارد می‌شود، اگر این تسهیل خالی باشد. اگر تسهیل خالی نباشد، واحد در صف منتظر می‌ماند. واحدهای در خط انتظار با قانون FIFO به تسهیل

خدمت‌دهی وارد می‌شوند. هدف تحلیل مونت کارلو شبیه‌سازی این فرایند در گذر زمان است. تعداد دوره‌های انتظار در صف و در خدمت‌دهی را می‌توان برای هر یک از نرخ‌های خدمت‌دهی مشاهده کرد. نرخ خدمت‌دهی که کم‌ترین هزینه را برای سیستم داشته باشد در نهایت انتخاب می‌شود.

فرایند خط انتظار که از توزیع‌های نشان داده شده در شکل ۱۰-۲ حاصل می‌شود در شکل ۱۰-۴ نمایش داده شده است. شکل از چپ به راست خوانده شده که در آن خط دوم ترکیبی از اولی است و بقیه خط‌ها نیز به همین منوال ایجاد شده است. بازه‌ی بین خطوط عمودی نشان‌دهنده‌ی دو دوره است، نقاط پر رنگ ورودها را نشان می‌دهد، خط مورب یک واحد در خدمت‌گیری را نشان می‌دهد و پیکان اتمام خدمت‌گیری را مشخص می‌کند. هنگامی که یک واحد نتواند وارد کانال خدمت‌دهی شود در صف منتظر می‌ماند که با یک خط افقی نشان داده شده است.

فرایند احتمالی خط انتظار نشان داده شده در شکل ۱۰-۴ شامل ۴۰۰ دوره بوده و به صورت زیر توسعه یافته است. ابتدا، توالی ورودها با استفاده از اعداد تصادفی و توزیع تجمع‌ی ورود شکل ۱۰-۳ استقرار یافته است. سپس، هر ورود به کانال خدمت‌دهی وارد می‌شود، اگر کانال در دسترس باشد. دسترسی‌پذیری کانال یک تابع از الگوی ورود و زمان خدمت‌دهی است که با کمک توزیع تجمع‌ی زمان خدمت‌دهی در شکل ۱۰-۳ و تولید اعداد تصادفی بر اساس آن به دست آمده است.



شکل ۱۰-۴- تحلیل صف تک کاناله با استفاده از مونت کارلو

تحلیل مونت کارلو به صورت زیر ادامه می یابد. اعداد تصادفی به صورت ۵۶۶۸، ۳۵۱۳، ۲۰۶۰، ۷۸۰۴، ۰۸۱۵ و بقیه به همین منوال انتخاب شده است. بازه ی ورود مربوط به این اعداد ۶، ۵، ۷ و بقیه به همین منوال خواهد بود. سپس به همین روش برای زمان خدمت دهی به صورت ۳۲۳، ۲۴۹، ۴۰۴، ۲۷۵ و ۸۷۹ و بقیه به همین منوال به دست آمده است. زمان خدمت دهی مربوط به این اعداد ۵، ۴، ۵، ۴ و ۶ و بقیه به همین منوال به دست می آید. این زمان های خدمت، زمان

ورود و خروج از کانال را برای یک ورودی مشخص می‌کنند. با این روش، شکل ۱۰-۴ حاصل می‌شود.

۱۰-۲-۳- ارزیابی اقتصادی نتایج

۴۰۰ دوره شبیه‌سازی شده یک الگوی انتظار شامل ۳۰۰ دوره انتظار در سرویس و ۲۳ دوره انتظار در صف را ایجاد کرده است. تعداد کل دوره‌های انتظار برای نمونه ۴۰۰ دوره‌ای ۳۶۰ بوده است.

فرض کنید که هزینه انتظار هر واحد در هر دوره ۹/۶ دلار و هزینه هر دوره خدمت‌دهی ۱۶/۱۰ دلار باشد که توسط توزیع زمان خدمت در شکل ۱۰-۴ مشخص شده است. هزینه کل سیستم در دوره مورد مطالعه $9896 = 16.10(400) + 9.60(360)$ دلار خواهد شد. هزینه کل سیستم را می‌توان با هزینه کل گزینه‌های دیگر با سیاست‌های خدمت‌دهی متفاوت توسط شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه کرد. اگرچه این فرایند زمان‌بر است، در بسیاری از وضعیت‌ها که نمی‌توان از روش‌های ریاضی استفاده کرد، کاربردی است.

۱۰-۳- مدل‌های صف تک کاناله

فرض کنید که جمعیت واحدهای نیازمند به خدمات، نامحدود باشد و تعداد ورودها در هر دوره، یک متغیر تصادفی با توزیع پواسون باشد. همچنین فرض شده است که زمان خدمت‌دهی برای هر واحد، یک متغیر تصادفی با توزیع نمایی است. رخدادها در زمان ورود یک واحد یا در زمان اتمام خدمت‌دهی اتفاق می‌افتد.

تحت فرض‌های ورود پواسون و خدمت نمایی، می‌توان نشان داد که احتمال وقوع یک رخداد (ورود یا اتمام خدمات) طی یک بازه مشخص به زمان اتفاق افتادن آن بستگی ندارد. تعداد ورودی‌های مورد انتظار در هر دوره را می‌توان به صورت $1/A_m$ نمایش داد که با λ تعریف

می‌شود و تعداد خدمات انجام شده مورد انتظار به صورت $1/S_m$ نشان داده می‌شود که با μ تعریف می‌شود.

۱-۳-۱+ احتمال وجود n واحد در سیستم

تحت فرض‌های بالا، احتمال آنکه یک ورود بین زمان t و $t + \Delta t$ رخ دهد برابر است با $\lambda \Delta t$. به‌طور مشابه، احتمال آنکه اتمام یک خدمت بین زمان t و $t + \Delta t$ رخ دهد برابر است با $\mu \Delta t$. فرض کنید که:

n = تعداد واحدهای در سیستم در زمان t ، شامل واحدهای در حال خدمت‌گیری

$$P_n(t) = \text{احتمال وجود } n \text{ واحد در سیستم در زمان } t$$

از آن‌جا که بازه زمان Δt کوچک است، می‌توان فرض کرد که احتمال بیش از یک ورود یا اتمام خدمت‌دهی در این بازه قابل صرف‌نظر کردن باشد. فرض کنید این رخداد که تعداد n واحد در زمان $t + \Delta t$ در سیستم وجود داشته باشد ($n \geq 1$) به‌صورت زیر بیان شود

$$\text{رخداد} \{ \text{وجود } n \text{ واحد در سیستم در زمان } t + \Delta t \}$$

= رخداد $\{n$ واحد در سیستم در زمان t وجود داشته باشد و هیچ ورودی در بازه Δt اتفاق نیافتد و هیچ خدمتی در بازه Δt تکمیل نشود $\}$ ، یا

رخداد $\{n+1$ واحد در سیستم در زمان t در سیستم وجود داشته باشد، هیچ ورودی در بازه Δt اتفاق نیافتد و یک خدمت در بازه Δt تمام شود $\}$ ، یا

رخداد $\{n-1$ واحد در سیستم در زمان t باشد، یک ورود در بازه Δt اتفاق بیافتد، و هیچ خدمتی در بازه Δt تکمیل نشود $\}$

احتمال رخ دادن n واحد در سیستم در زمان $t + \Delta t$ را می‌توان به صورت زیر به عنوان مجموع احتمالات این سه رخداد مستقل بازنویسی کرد

$$\begin{aligned} P_n(t + \Delta t) &= \{P_n(t)[1 - \lambda\Delta t][1 - \mu\Delta t]\} \\ &\quad + \{P_n(t)[1 - \lambda\Delta t]\mu\Delta t\} + \{P_{n-1}(t)\lambda\Delta t[1 - \mu\Delta t]\} \\ &= P_n(t) - (\lambda + \mu)P_n(t)\Delta t + \lambda\mu P_n(t)(\Delta t)^2 + \mu P_{n+1}(t)\Delta t \\ &\quad - \lambda\mu P_{n+1}(t)(\Delta t)^2 + \lambda P_{n-1}(t)\Delta t - \lambda\mu P_{n-1}(t)(\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (1-10)$$

از عبارات $(\Delta t)^2$ می‌توان صرف نظر کرد. با تفریق $P_n(t)$ از دو طرف و تقسیم آن‌ها بر Δt داریم

$$\frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = -(\lambda + \mu)P_n(t) + \mu P_{n+1}(t) + \lambda P_{n-1}(t)$$

به صورت حدی

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = \frac{d}{dt} P_n(t) = -(\lambda + \mu)P_n(t) + \mu P_{n+1}(t) + \lambda P_{n-1}(t) \quad (2-10)$$

برای مورد خاص $n=0$ داریم

رخداد {وجود صفر واحد در سیستم در زمان $t + \Delta t$ }

= رخداد {صفر واحد در سیستم در زمان t وجود داشته باشد و هیچ ورودی در بازه Δt }

اتفاق نیافتد و هیچ خدمتی در بازه Δt تکمیل نشود، یا

رخداد {1 واحد در سیستم در زمان t در سیستم وجود داشته باشد، هیچ ورودی در بازه

Δt اتفاق نیافتد و یک خدمت در بازه Δt تمام شود}

احتمال حضور صفر واحد در سیستم در زمان $t + \Delta t$ را می‌توان به صورت مجموع احتمالات این دو رخداد مستقل به صورت زیر نوشت

$$\begin{aligned} P_0(t + \Delta t) &= \{P_0(t)[1 - \lambda\Delta t]\} + \{P_1(t)[1 - \lambda\Delta t]\mu\Delta t\} \\ &= P_0(t) - \lambda P_0(t)\Delta t + \mu P_1(t)\Delta t - \lambda\mu P_1(t)(\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (3-10)$$

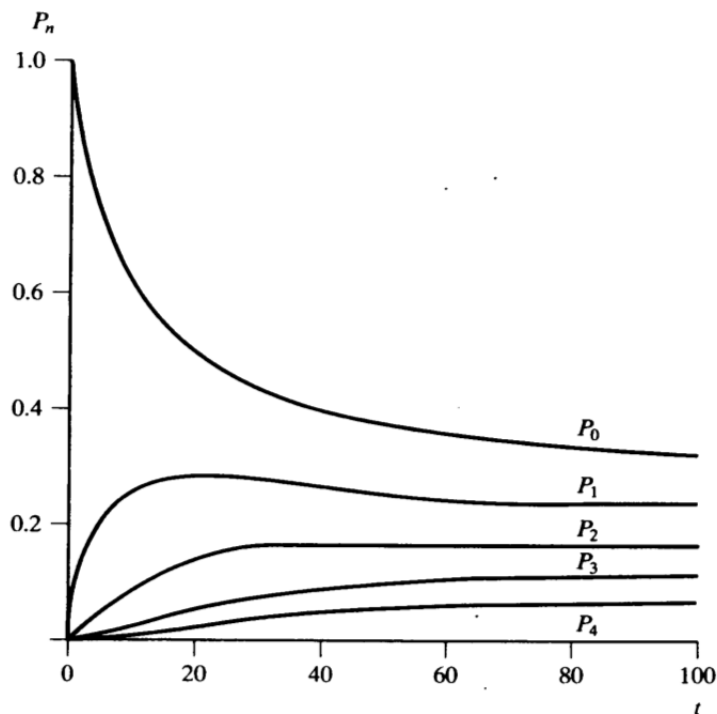
با صرف نظر کردن از $(\Delta t)^2$ و تفریق دو طرف با $P_0(t)$ از دو طرف و تقسیم آن‌ها بر Δt داریم

$$\frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

به صورت حدی داریم

$$\frac{d}{dt}P_0(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \quad (4-10)$$

معادلات ۲-۱۰ و ۴-۱۰ معادلات حاکم در یک صف تک کاناله با ورود پواسون و خدمت‌دهی نمایی نامیده می‌شود. معادلات دیفرانسیلی یک سیستم نامحدود را تشکیل می‌دهد که به دست آوردن یک جواب کلی برای آن دشوار است. شکل ۵-۱۰ مثالی از طبیعت جواب برای یک مورد خاص را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۵- حل گذرا برای معادلات حاکم

تا زمانی که احتمالات $P_n(t)$ نسبت به زمان تغییر می‌کند، صف در حالت گذار در نظر گرفته می‌شود. از شکل ۱۰-۵ باید توجه شود که این تغییر در $P_n(t)$ با گذشت زمان کمتر و کمتر می‌شود. به تدریج این تغییرات اندک شده و صف به حالت پایدار می‌رسد. در حالت پایدار، نرخ تغییر $dP_n(t)/dt$ را می‌توان صفر فرض کرد و احتمالات در نظر گرفته شده مستقل از زمان خواهد بود. معادلات حاکم در حالت پایدار به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$(\lambda + \mu)P_n = \mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} \quad (۱۰-۵)$$

9

$$\lambda P_0 = \mu P_1 \quad (۱۰-۶)$$

معادلات ۵-۱۰ و ۶-۱۰ یک سیستم نامحدود از معادلات جبری را تشکیل می‌دهد که با جایگزینی $P_{n+l} = P_n \cdot \rho$ در معادله ۵-۱۰ به صورت زیر قابل حل است

$$(\lambda + \mu) \rho P_{n-1} = (\rho^2 \mu + \lambda) P_{n-1}$$

$$(\lambda + \mu) \rho = \rho^2 \mu + \lambda$$

که در آن

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

با جای گذاری در معادله ۶-۱۰ نتیجه مشابهی حاصل می‌شود. با این جای گذاری، جواب کلی به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$P_1 = \rho P_0$$

و

$$\begin{aligned} P_n &= \rho P_{n-1} \\ &= \rho^n P_0 \end{aligned} \quad (۷-۱۰)$$

با این حال، از آن جا که $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{n=0}^{\infty} P_0 \rho^n = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n \\ &= P_0 \left(\frac{1}{1-\rho} \right) \end{aligned} \quad (۸-۱۰)$$

بنابراین

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}$$

و

$$P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \quad (9-10)$$

برای همگرایی مجموع $\sum_{n=0}^{\infty} (\lambda/\mu)^n$ تنها نیاز است که λ/μ کمتر از ۱ باشد. این بدین معنا است که اگر نرخ ورود λ کمتر از نرخ خدمت‌دهی μ باشد صف به حالت پایدار می‌رسد.

به‌عنوان یک مثال از اهمیت معادله ۹-۱۰ در عملیات خط انتظار، فرض کنید که یک صف دارای ورود پواسون با نرخ میانگین ۱/۱۰ واحد در هر دوره بوده و زمان خدمت‌دهی دارای توزیع نمایی با میانگین ۴ دوره است. نرخ بنابراین خدمت‌دهی ۱/۴ یا ۰.۲۵ خواهد بود. احتمالات مربوط به هر مقدار از n را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد

$$P_0 = (0.6)(0.4)^0 = 0.600$$

$$P_1 = (0.6)(0.4)^1 = 0.240$$

$$P_2 = (0.6)(0.4)^2 = 0.096$$

$$P_3 = (0.6)(0.4)^3 = 0.039$$

$$P_4 = (0.6)(0.4)^4 = 0.015$$

$$P_5 = (0.6)(0.4)^5 = 0.006$$

$$P_6 = (0.6)(0.4)^6 = 0.003$$

$$P_7 = (0.6)(0.4)^7 = 0.001$$

شکل ۱۰-۶ توزیع احتمالات برای n واحد در سیستم را نمایش می‌دهد. خصوصیات مهم سیستم خط انتظار را می‌توان از این توزیع به‌دست آورد. برای مثال، احتمال اینکه یک یا چند واحد در سیستم باشد $۰/۴$ ، احتمال اینکه هیچ واحدی در سیستم نباشد، $۰/۶$ ، احتمال اینکه بیش‌تر از ۴ واحد در سیستم باشد، $۰/۰۱$ ، و بقیه موارد به همین صورت به‌دست آمده است. چنین اطلاعاتی هنگامی که محدودیت تعداد واحد در سیستم وجود داشته باشد مفید خواهد بود. با تغییر جمعیت ورودی یا نرخ خدمت‌دهی یا هر دو، احتمالات مربوط به تعداد واحدها در سیستم را که از یک مقدار خاص تجاوز می‌کنند، می‌توان کنترل کرد.

۱۰-۳-۲ میانگین تعداد واحدهای در سیستم

میانگین تعداد واحدهای در سیستم به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود

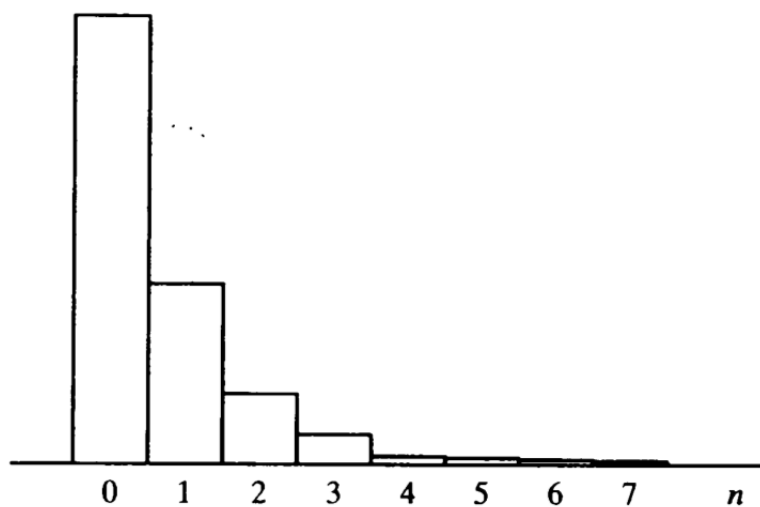
$$\begin{aligned} n_m &= \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n (1-\rho) \rho^n \\ &= (1-\rho) \sum_{n=0}^{\infty} n \rho^n \end{aligned}$$

$$\text{فرض کنید } g = \sum_{n=0}^{\infty} n \rho^n \text{ آنگاه}$$

$$\rho g = \sum_{n=0}^{\infty} n \rho^{n+1} = \sum_{n=1}^{\infty} (n-1) \rho^n$$

با تفریق ρg از g

$$\begin{aligned}
 (1-\rho)g &= \sum_{n=0}^{\infty} n\rho^n - \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)\rho^n \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} n\rho^n - \sum_{n=1}^{\infty} n\rho^n + \sum_{n=1}^{\infty} \rho^n \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} \rho^n = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \rho^{n-1} = \frac{\rho}{1-\rho}
 \end{aligned}$$



شکل ۱۰-۶- توزیع احتمالی n واحد در سیستم

بنابراین

$$n_m = (1-\rho)g = \frac{\rho}{1-\rho}$$

با جایگزینی $\rho = \lambda / \mu$

$$n_m = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (10-10)$$

برای مثال قبلی، میانگین تعداد واحدهای در سیستم به صورت زیر به دست می آید

$$n_m = \frac{0.10}{0.25 - 0.10} = 0.667$$

۱۰-۳-۳- میانگین طول صف

میانگین طول صف m_m را می‌توان به صورت میانگین تعداد واحدهای در سیستم منهای تعداد واحدهای در حال خدمت گیری به صورت زیر نوشت

$$\begin{aligned} m_m &= \frac{\lambda}{\mu - \lambda} - \frac{\lambda}{\mu} \\ &= \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \end{aligned} \quad (10-11)$$

برای مثال قبلی، میانگین طول صف به صورت زیر است

$$m_m = \frac{(0.10)^2}{0.25(0.25 - 0.10)} = 0.267$$

که این عدد میانگین طول خط انتظار غیرخالی است. احتمال آنکه صف خالی نباشد به صورت

زیر است

$$\begin{aligned} P(m > 0) &= 1 - P_0 - P_1 \\ &= 1 - (1 - \rho) - (1 - \rho)\rho = \rho^2 \end{aligned} \quad (10-12)$$

و میانگین طول صف غیرخالی به صورت زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned}
 (m|m > 0)_m &= \frac{m_m}{P(m > 0)} \\
 &= \frac{\lambda^2 / \mu(\mu - \lambda)}{\rho^2} \\
 &= \frac{\mu}{\mu - \lambda}
 \end{aligned}
 \tag{۱۰-۱۳}$$

برای مثال عددی قبل، احتمال اینکه صف خالی نباشد

$$P(m > 0) = \rho^2 = \frac{(0.10)^2}{(0.25)^2} = 0.16$$

و میانگین طول صف غیر خالی

$$\frac{0.25}{0.25 - 0.10} = 1.667$$

۱۰-۳-۴- توزیع زمان انتظار

در یک سیستم صف احتمالی، زمان انتظار یک واحد قبل از وارد شدن به خدمت‌دهی یک متغیر تصادفی است که به وضعیت سیستم در زمان ورود و همچنین به زمان مورد نیاز برای خدمت‌دهی به واحدهای در انتظار بستگی دارد. در مورد سیستم تک کاناله، واحد وارد شده می‌تواند به‌طور مستقیم وارد خدمت‌دهی شود، اگر واحدی در سیستم وجود نداشته باشد. در هر حالت دیگری واحد وارد شده باید منتظر بماند.

دو رخداد مختلف را می‌توان تحت ورود پواسون و خدمت‌دهی نمایی برای زمان انتظار، W شناسایی کرد:

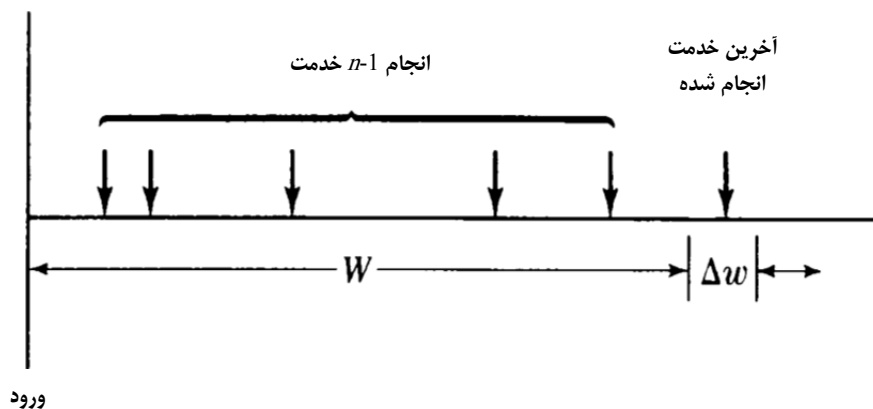
۱. رخداد $\{w=0\}$ که معادل رخداد $\{\text{صفر واحد در سیستم باشد}\}$ است.

۲. رخداد {زمان انتظار در بازه w و $w + \Delta w$ } که یک رخداد ترکیبی از وجود n واحد در سیستم در زمان ورود واحد، $n-1$ خدمتدهی که در مدت زمان w انجام شود و آخرین خدمتدهی در بازه w و $w + \Delta w$ تکمیل شود. احتمال اولین رخداد به صورت زیر به دست می آید

$$\begin{aligned} p(w=0) &= P_0 \\ &= 1 - \frac{\lambda}{\mu} \end{aligned} \quad (10-14)$$

رخداد دوم در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است. یک چنین رخدادی برای هر n وجود دارد. علاوه بر این

$$\begin{aligned} P(w \leq \text{waiting time} \leq w + \Delta w) &= f(w) \Delta w \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ P_n \cdot P[(n-1) \text{ services in time } w] \right\} \\ &\quad \cdot P(\text{one service completion in time } \Delta w) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \left[\frac{(\mu w)^{n-1} e^{-\mu w}}{(n-1)!} \right] \mu \Delta w \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \left[\frac{(\mu w)^{n-1}}{(n-1)!} \right] e^{-\mu w} \left(1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \mu \Delta w \end{aligned}$$



شکل ۱۰-۷- زمان انتظار هنگامی که n واحد در سیستم وجود داشته باشد

فرض کنید $k = n - 1$. آنگاه

$$f(w) \Delta w = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{\lambda^k w^k}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right) e^{-\mu w} \left(1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \mu \Delta w \quad (15-10)$$

با این حال

$$\sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{\mu^k w^k}{k!} = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda w}{k!} \right)^k = e^{\lambda w} \quad (16-10)$$

با جایگزینی معادله ۱۶-۱۰ در ۱۵-۱۰ داریم

$$\begin{aligned} f(w) \Delta w &= e^{\lambda w} \left(\frac{\lambda}{\mu} e^{-\mu w} \right) \mu \Delta w \left(1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) \\ &= \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{\mu} \right) e^{-(\mu-\lambda)w} \Delta w \end{aligned}$$

یا

$$f(w) = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) e^{-(\mu-\lambda)w} \quad (10-17)$$

معادلات ۱۴-۱۰ و ۱۷-۱۰ توزیع زمان انتظار برای صف تک کاناله با ورود پواسون و خدمت‌دهی نمایی را تشریح می‌کند. این توزیع نیمه گسسته و نیمه پیوسته است.

میانگین زمانی را که یک ورودی برای خدمت‌دهی انتظار می‌کشد، می‌توان از توزیع زمان انتظار به صورت زیر به دست آورد

$$w_m = 0 \cdot P(w=0) + \int_{w>0} w \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) e^{-(\mu-\lambda)w} dw$$

پس از چندین گام داریم

$$w_m = \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} \quad (10-18)$$

برای مثال عددی که قبلاً ارائه شد داریم

$$\begin{aligned} w_m &= \frac{0.10}{0.25(0.25-0.10)} \\ &= 2.667 \end{aligned}$$

میانگین زمانی که یک واحد در سیستم سپری می‌کند شامل میانگین زمان انتظار و میانگین

زمان موردنیاز برای خدمت‌دهی است یا

$$\begin{aligned}
 t_m &= \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} + \frac{1}{\mu} \\
 &= \frac{\lambda + \mu - \lambda}{\mu(\mu-\lambda)} = \frac{1}{\mu-\lambda}
 \end{aligned}
 \quad (۱۹-۱۰)$$

برای مثال قبلی، میانگین زمانی که واحد در سیستم سپری می‌کند به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$t_m = \frac{1}{0.25 - 0.10} = 6.667$$

۱۰-۳-۵- نرخ خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه

هزینه انتظاری کل سیستم در هر دوره معادل مجموع هزینه انتظاری انتظار در هر دوره و هزینه انتظاری تسهیلات در هر دوره است یعنی

$$TC_m = WC_m + FC_m$$

هزینه انتظاری انتظار در هر دوره به صورت حاصلضرب هزینه انتظار در هر دوره در تعداد واحدهای انتظاری در انتظار ضرب در میانگین زمانی که هر واحد در سیستم سپری می‌کند به‌دست می‌آید، یا

$$\begin{aligned}
 WC_m &= C_w(\lambda) \frac{1}{\mu-\lambda} \\
 &= \frac{C_w \lambda}{\mu-\lambda}
 \end{aligned}
 \quad (۲۰-۱۰)$$

به طریق دیگر، این هزینه را می‌توان به‌صورت ضرب هزینه انتظار در هر دوره در میانگین تعداد واحدهای در سیستم در هر دوره به‌صورت زیر محاسبه کرد

$$\begin{aligned} WC_m &= C_w (n_m) \\ &= \frac{c_w \lambda}{\mu - \lambda} \end{aligned} \quad (21-10)$$

هزینه انتظاری خدمت‌دهی در هر دوره از ضرب هزینه خدمت‌دهی به یک واحد در نرخ خدمت‌دهی در هر دوره به‌صورت زیر محاسبه کرد

$$FC_m = C_f (\mu) \quad (22-10)$$

هزینه انتظاری کل سیستم در هر دوره با جمع این اجزا به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$TC_m = \frac{C_w \lambda}{\mu - \lambda} + C_f (\mu) \quad (23-10)$$

نرخ خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه را می‌توان با مشتق‌گیری نسبت به μ و برابر صفر قرار دادن آن و حل معادله زیر برای μ به‌دست آورد.

$$\begin{aligned} \frac{dTC_m}{d\mu} &= -C_w \lambda (\mu - \lambda)^{-2} + C_f = 0 \\ (\mu - \lambda)^2 C_f &= \lambda C_w \end{aligned}$$

$$\mu = \lambda + \sqrt{\frac{\lambda C_w}{C_f}} \quad (24-10)$$

به‌عنوان کاربردی از مدل بهینه‌سازی بالا، وضعیت ورود پواسون و زمان خدمت‌نمایی زیر را در نظر بگیرید. میانگین زمان بین ورودها ۸ دوره و هزینه انتظار ۰/۱۰ دلار برای هر واحد در هر دوره است و هزینه تسهیلات برای خدمت‌دهی به هر واحد ۰/۱۶۵ دلار است. هزینه انتظاری انتظار در هر دوره، هزینه انتظاری تسهیل در هر دوره، و هزینه انتظاری کل سیستم در هر دوره به‌صورت تابعی از μ در جدول ۱۰-۱ نشان داده شده است. هزینه انتظاری تسهیل در هر دوره با

افزایش مقدار μ افزایش می‌یابد. هنگامی که $\lambda = \mu$ باشد هزینه انتظار بی‌نهایت شده و با افزایش μ کاهش می‌یابد. حداقل هزینه انتظاری کل سیستم زمانی اتفاق می‌افتد که μ برابر با 0.4 واحد در هر دوره باشد.

نرخ خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه را به‌طور مستقیم می‌توان با استفاده از معادله $10-24$ به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$\begin{aligned}\mu &= 0.125 + \sqrt{\frac{(0.125)(0.10)}{0.165}} \\ &= 0.125 + 0.275 = 0.400\end{aligned}$$

۱۰-۴- مدل‌های صف با چند کانال

در قسمت‌های قبلی، واحدهای وارد شده تنها توسط یک تجهیز خدمت‌دهی می‌شدند. در بسیاری از وضعیت‌های واقعی، چندین تسهیل خدماتی وجود دارند. برای مثال در یک عوارضی تعداد زیادی گیت دریافت عوارض وجود دارد تا به ترافیک وارد شده خدمات ارائه دهند.

در مورد حالت چند کاناله، تسهیل خدماتی دارای c کانال سرویس‌دهی است که هر کدام می‌توانند یک واحد را در یک زمان خدمت‌دهی کنند. واحد وارد شده به اولین کانال خدمت‌دهی در دسترس که مشغول به کار نباشد، وارد می‌شود. اگر همه کانال‌ها مشغول باشند، ورودی‌های اضافی تشکیل یک صف می‌دهند.

جدول ۱۰-۱- مولفه‌های هزینه برای مثال خدمت‌دهی نمایی

μ	WC_m	FC_m	TC_m
0.125	∞	0.0206	∞
0.150	0.5000	0.0248	0.5248
0.200	0.1667	0.0330	0.1997
0.250	0.1000	0.0413	0.1413
0.300	0.0714	0.0495	0.1209
0.400	0.0455	0.0660	0.1115
0.500	0.0333	0.0825	0.1158
0.600	0.0263	0.0990	0.1253
0.800	0.0185	0.1320	0.1505
1.000	0.0143	0.1650	0.1793

به محض این‌که هر یک از کانال‌های مشغول خدمت خود را تکمیل کند و در دسترس قرار گیرد، اولین واحد در صف را برای خدمت‌دهی قبول می‌کند. احتمالات حالت پایدار برای چنین سیستمی به صورت زیر تعریف می‌شود

$P_{m,n}(t)$ = احتمال آنکه n واحد برای منتظر در صف بوده و m کانال در زمان t مشغول باشند

باید توجه شود که m تنها می‌تواند یک عدد صحیح بین صفر و c بوده و تا زمانی که $n+m=c$ برابر صفر است.

تعیین احتمالات حالت پایدار از همان منطق استفاده شده در مورد تک کاناله پیروی می‌کند. نتایج ارائه شده در زیر برای ورود پواسون و خدمت‌دهی نمایی است. فرض کنید

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$$

آنگاه

$$P_{c,n} = P_{0,0} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \frac{1}{c!} \rho^n$$

$$P_{m,0} = P_{0,0} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m \frac{1}{m!}$$

$$P_{0,0} = \frac{1}{(\lambda/\mu)^c (1/c!) [1/(1-\rho)] + \sum_{r=0}^{r=c-1} (\lambda/\mu)^r (1/r!)}$$

(۱۰-۲۵)

به‌عنوان یک مثال، یک سیستم سه کاناله با ورود پواسون با نرخ میانگین ۰/۵۰ واحد در هر دوره و خدمت‌دهی نمایی در هر کانال با میانگین ۰/۲۵ واحد در هر دوره را در نظر بگیرید. تحت این شرایط،

$$P_{0,0} = \frac{1}{(0.50/0.25)^3 (1/3!) [1-2/3] + \sum_0^2 (0.50/0.25)^r (1/r!)}$$

$$= \frac{1}{4+1+2+2} = \frac{1}{9}$$

۱۰-۴-۱- میانگین طول صف

میانگین طول صف به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$m_m = P_{0,0} \frac{(\lambda/\mu)^{c+1}}{(c-1)!(c-\lambda/\mu)^2} \quad (۱۰-۲۶)$$

برای مثال بالا داریم

$$m_m = \frac{1}{9} \left[\frac{(0.50 / 0.25)^4}{2! (3 - 0.50 / 0.25)^2} \right]$$

$$= \frac{1}{9} \left(\frac{(2)^4}{2} \right) = \frac{8}{9} = 0.89$$

۱۰-۴-۲- میانگین تعداد واحدهای در سیستم

میانگین تعداد واحدهای سیستم به صورت زیر است

$$n_m = m_m + \frac{\lambda}{\mu} \quad (۱۰-۲۷)$$

برای مثال بالا داریم

$$n_m = 0.89 + \frac{0.50}{0.25} = 2.89$$

۱۰-۴-۳- میانگین زمان انتظار

میانگین زمان انتظار برای m_m را می توان به صورت زیر به دست آورد

$$w_m = \frac{m_m}{\lambda} \quad (۱۰-۲۸)$$

برای مثال بالا، $w_m = 0.89 / 0.5 = 1.78$.

۱۰-۴-۴- میانگین تاخیر

میانگین تاخیر از مجموع زمان انتظار و زمان خدمت دهی به صورت زیر به دست می آید

$$d_m = w_m + \frac{1}{\mu} \quad (۱۰-۲۹)$$

برای مثال بالا، میانگین تاخیر $1.78 + 4 = 5.78$ است.

۱۰-۴-۵- احتمال آنکه واحد وارد شده مجبور شود انتظار بکشد

احتمال یک تاخیر معادل احتمال مشغول بودن همه کانال‌هاست. یعنی

$$\begin{aligned} \Pr(w > 0) &= \sum_0^{\infty} P_{c,n} \\ &= P_{0,0} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^c \frac{1}{c!(1-\rho)} \end{aligned} \quad (10-3)$$

برای مثال بالا، احتمال انتظار واحد وارد شده به صورت زیر است

$$\begin{aligned} P(w > 0) &= \frac{1}{9} \left(\frac{0.50}{0.25} \right)^3 \frac{1}{3!(1-2/3)} \\ &= \frac{1}{9} (8) \frac{1}{2} = \frac{4}{9} = 0.444 \end{aligned}$$

۱۰-۵- صف با خدمت‌دهی غیرنمایی

فرض این موضوع که تعداد ورودها در هر دوره از توزیع پواسون پیروی می‌کند یک فرض عملی است. اگرچه نمی‌توان گفت که توزیع پواسون همیشه می‌تواند توزیع تعداد ورود در هر دوره را مشخص کند، شواهد زیادی وجود دارد که در اغلب موارد این فرضیه صحیح است. زیرا نرخ‌های ورود اغلب مستقل از زمان، طول صف یا هر خصوصیت دیگر سیستم خط انتظار هستند. با این حال شواهد حمایت کننده از توزیع نمایی برای زمان خدمت‌دهی به این اندازه قوی نیستند. اغلب این توزیع به خاطر عملیات ریاضی قسمت‌های قبل، راحت فرض شده است.

هنگامی که توزیع زمان خدمت غیرنمایی باشد، توسعه‌ی مدل‌های تصمیم تا حدودی دشوار می‌شود. این قسمت مدل‌هایی از خدمت غیرنمایی را بدون اثبات آن‌ها، ارائه می‌دهد.

۱۰-۵-۱ - ورود پواسون با زمان خدمت ثابت

هنگامی که خدمت از طریق یک ماشین به صورت خودکار صورت گیرد، یا هنگامی که عملیات خدمت‌دهی به صورت مکانیکی انجام شود، زمان خدمت‌دهی می‌تواند ثابت باشد. تحت این شرایط، توزیع زمان خدمت‌دهی واریانسی برابر صفر خواهد داشت. میانگین تعداد واحدهای در سیستم به صورت زیر خواهد بود

$$n_m = \frac{(\lambda / \mu)^2}{2[1 - (\lambda / \mu)]} + \frac{\lambda}{\mu} \quad (۱۰-۳۱)$$

و میانگین زمان انتظار

$$w_m = \frac{\lambda / \mu}{2\mu[1 - (\lambda / \mu)]} + \frac{1}{\mu} \quad (۱۰-۳۲)$$

هزینه‌ی انتظاری کل سیستم در هر دوره معادل مجموع هزینه‌های انتظار در هر دوره و هزینه انتظاری تسهیل در هر دوره است

$$TC_m = WC_m + FC_m$$

هزینه انتظار در هر دوره، از ضرب هزینه انتظار هر واحد در هر دوره در میانگین تعداد واحدهای سیستم در هر دوره به صورت زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned} WC_m &= C_w(n_m) \\ &= C_w \left\{ \frac{(\lambda / \mu)^2}{2[1 - (\lambda / \mu)]} + \frac{\lambda}{\mu} \right\} \end{aligned}$$

هزینه انتظاری تسهیل در هر دوره از ضرب هزینه خدمت‌دهی به یک واحد در نرخ خدمت‌دهی واحدهای هر دوره به صورت زیر به دست می‌آید

$$FC_m = C_f(\mu)$$

هزینه انتظاری کل سیستم از مجموع این دو مولفه را می‌توان به صورت زیر بیان داشت

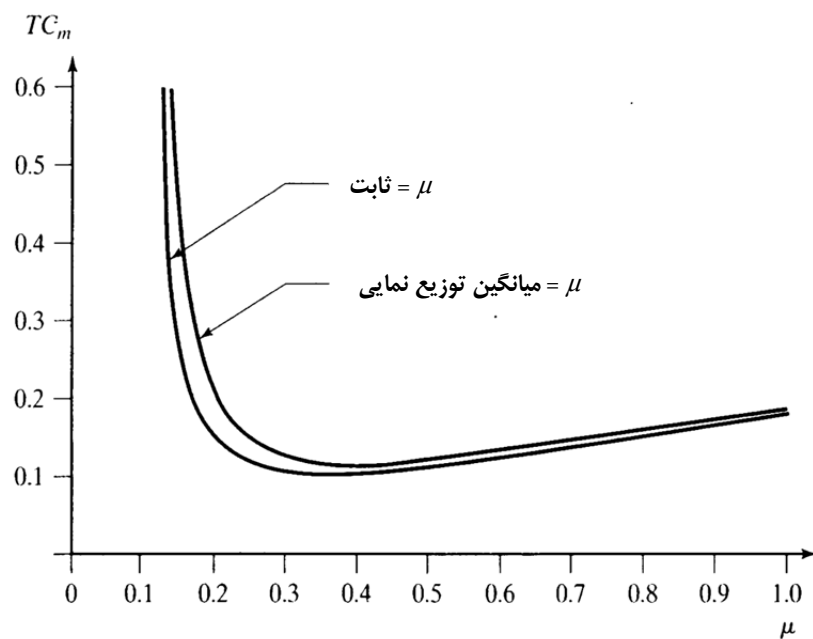
$$TC_m = C_w \left\{ \frac{(\lambda / \mu)^2}{2[1 - (\lambda / \mu)]} + \frac{\lambda}{\mu} \right\} + C_f(\mu) \quad (۳۳-۱۰)$$

جدول ۱۰-۲- مولفه‌های هزینه برای مثال خدمت‌دهی ثابت

μ	WC_m	FC_m	TC_m
0.1250	∞	0.0206	∞
0.1500	0.2913	0.0248	0.3161
0.2000	0.1145	0.0330	0.1475
0.2500	0.0750	0.0413	0.1163
0.3000	0.0556	0.0495	0.1061
0.4000	0.0383	0.0660	0.1043
0.5000	0.0292	0.0825	0.1117
0.6000	0.0236	0.0990	0.1226
0.8000	0.0170	0.1320	0.1490
1.0000	0.0134	0.1650	0.1785

به عنوان کاربردی از این مدل، مثال ارائه شده در قسمت قبل را در نظر بگیرید. به جای این که پارامتر μ مقدار انتظاری از توزیع نمایی باشد، آن را ثابت فرض کنید. هزینه انتظار در هر دوره، هزینه انتظاری خدمت‌دهی در هر دوره و هزینه کل سیستم در هر دوره به صورت تابعی از μ در جدول ۱۰-۲ نشان داده شده است. اگرچه تابع هزینه انتظار نسبت به مثال قبل متفاوت است، بازه‌ی خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه کماکان ۰/۴ واحد در هر دوره است.

مثال‌ها را می‌توان به راحتی به صورت گرافیکی با هم مقایسه کرد که در شکل ۱۰-۸ نشان داده شده است. منحنی بالایی هزینه انتظاری کل سیستم برای حالت نمایی است. منحنی پایینی هزینه انتظاری کل سیستم را در حالت ثابت نشان می‌دهد. تفاوت معناداری بین سیاست کم‌ترین هزینه برای مثال در نظر گرفته شده وجود ندارد.



شکل ۱۰-۸ TC_m به عنوان تابعی از نرخ خدمت‌دهی

۱۰-۵-۲ ورود پواسون و هر توزیع از زمان خدمت‌دهی

برای تعمیم بیش‌تر، مطلوب است که عباراتی برای خصوصیات سیستم نوشت که برای هر توزیع زمان خدمتی کاربرد داشته باشد. اگر σ^2 واریانس توزیع زمان خدمت‌دهی باشد، میانگین تعداد واحدهای در سیستم به صورت زیر به دست می‌آید

$$n_m = \frac{(\lambda / \mu)^2 + \lambda^2 \sigma^2}{2[1 - (\lambda / \mu)]} + \frac{\lambda}{\mu} \quad (34-10)$$

و میانگین زمان انتظار

$$w_m = \frac{(\lambda / \mu^2) + \lambda \sigma^2}{2[1 - (\lambda / \mu)]} + \frac{1}{\mu} \quad (35-10)$$

اگر $\sigma^2 = 0$ باشد، معادله ۳۴-۱۰، معادله ۳۱-۱۰ و معادله ۳۵-۱۰ معادله ۳۲-۱۰ را به دست می‌دهد. علاوه بر این، از آن جاکه واریانس توزیع نمایی برابر با $(1/\mu)^2$ است، اگر چنین جایگزینی انجام شود، معادله ۳۴-۱۰، معادله ۱۰-۱۰ و معادله ۳۵-۱۰، معادله ۲۳-۱۰ را نتیجه خواهد داد.

هزینه انتظاری کل سیستم در هر دوره حاصل جمع هزینه انتظار در هر دوره و هزینه انتظاری تسهیل خدمت‌دهی در هر دوره به صورت زیر است

$$TC_m = WC_m + FC_m$$

هزینه انتظار در هر دوره از ضرب هزینه انتظار یک واحد در هر دوره در میانگین تعداد واحدهای در سیستم در هر دوره به دست می‌آید. هزینه انتظاری تسهیل در هر دوره با ضرب هزینه خدمت‌دهی به یک واحد در نرخ خدمت‌دهی به واحدها در هر دوره به دست می‌آید. بنابراین، هزینه انتظاری کل سیستم به صورت زیر به دست می‌آید

$$TC_m = C_w \left\{ \frac{(\lambda / \mu)^2 + \lambda^2 \sigma^2}{2[1 - \lambda / \mu]} + \frac{\lambda}{\mu} \right\} + C_f(\mu) \quad (36-10)$$

به عنوان مثالی از کاربرد این مدل، وضعیت زیر را در نظر بگیرید. تعداد واحدهای ورودی دارای توزیع پواسون با میانگین ۰/۲ واحد است. هزینه انتظاری هر واحد در هر دوره ۲/۱ دلار بوده و هزینه خدمت‌دهی به هر واحد ۴/۰۵ دلار است. تصمیم‌گیرنده می‌خواهد یکی از دو سیاست

خدمت‌دهی را انتخاب کند. اولین سیاست خدمت‌دهی با نرخ 0.4 در ساعت و واریانس 3 ساعت است. دومی ارائه خدمت با نرخ 0.5 و واریانس 4 ساعت است.

هزینه انتظاری کل سیستم در سیاست اول به صورت زیر به دست می‌آید

$$TC_m = 2.1 \left\{ \frac{(0.2/0.4)^2 + (0.2)^2 (3)}{2[1 - (0.2/0.4)]} + \frac{0.2}{0.4} \right\} + 4.05(0.4)$$

$$= 1.83 + 1.62 = 3.45$$

برای سیاست دوم این مقدار از طریق زیر به دست می‌آید

$$TC_m = 2.10 \left\{ \frac{(0.2/0.5)^2 + (0.2)^2 (4)}{2[1 - (0.2/0.5)]} + \frac{0.2}{0.5} \right\} + 4.05(0.5)$$

$$= 1.40 + 2.03 = 3.43$$

بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت اندکی بین دو سیاست وجود دارد.

۱۰-۶- مدل‌های صف با جمعیت محدود

مدل‌های خط انتظار محدود برای آن دسته از سیستم‌های خط انتظار اعمال می‌شود که نرخ ورود نسبتاً کمی دارند. در این سیستم‌ها، واحدهایی که جمعیت را ترک می‌کنند، به شدت خصوصیات جمعیت و احتمالات ورود را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. فرض شده است که هم‌زمان بین تقاضا برای خدمت‌دهی برای یک واحد از جمعیت و زمان‌های خدمت‌دهی، دارای توزیع نمایی هستند.

۱۰-۶-۱- تئوری صف محدود

واحدها، زمانی جمعیت را ترک می‌کنند که خراب شوند و تعداد واحدهای خراب را می‌توان با یک رویکرد مشابه در قسمت ۱۰-۳ مشخص کرد. فرض کنید

N = تعداد واحدها در جمعیت

M = تعداد کانال‌های خدمت‌دهی در تسهیل تعمیر

λ = نرخ خرابی یک آیتم، $1/MTBF$

μ = نرخ تعمیر در یک کانال تعمیر، $1/MTTR$

n = تعداد آیتم‌های خراب شده

P_n = احتمال n واحد خراب شده در حالت پایدار

P_0 = احتمال این که هیچ آیتمی خراب نشده باشد

$M\mu$ = بیش‌ترین نرخ تعمیر ممکن

λ_n = نرخ خرابی هنگامی که n واحد در سیستم خراب شده باشد

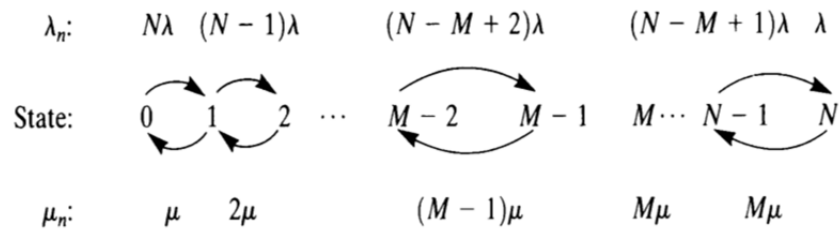
μ_n = نرخ تعمیر هنگامی که n واحد خراب شده باشد

نرخ خرابی یک آیتم به صورت $\lambda = 1/MTBF$ بیان شده و نرخ خرابی کل جمعیت هنگامی که n واحد در سیستم باشد را می‌توان به صورت $\lambda_n = (N - n)\lambda$ نشان داده که در آن $N - n$ تعداد واحدهای عملیاتی است که هر کدام با نرخ λ خراب می‌شوند. به صورت مشابه، نرخ تعمیر در هر کانال به صورت $\mu = 1/MTTR$ بیان شده و نرخ تعمیر کل تسهیل تعمیری هنگامی که n واحد خراب شده باشد به صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$\mu = \begin{cases} n\mu & \text{if } n \in 1, 2, \dots, M-1 \\ M\mu & \text{if } n \in M, M+1, \dots, N \end{cases} \quad (37-10)$$

یک تحلیل فرایند تولید-مرگ مورد استفاده قرار گرفته است تا توزیع احتمالی، P_n ، برای تعداد واحدهای خراب شده را به دست آورد. در فرایند تولید-مرگ، حالت سیستم تعداد واحدهای خراب

شده است (حالت $= ۱, ۲, \dots, N$). نرخ‌های تغییر بین حالت‌ها نرخ‌های خراب شدن، λ_n بوده و نرخ تعمیر، μ_n خواهد بود.



اگر عملیات در حالت پایدار سیستم مدنظر باشد داریم

$$\begin{aligned}
 N \lambda P_0 &= \mu P_1 \\
 N \lambda P_0 + 2 \mu P_2 &= [\mu + (N-1) \lambda] P_1 \\
 (N-1) \lambda P_1 + 3 \mu P_3 &= [2 \mu + (N-2) \lambda] P_2 \\
 &\vdots \\
 (N-M+2) \lambda P_{M-2} + M \mu P_M &= [(M-1) \mu + (N-M+1) \lambda] P_{M-1} \\
 &\vdots \\
 2 \lambda P_{N-2} + M \mu P_N &= (M \mu + \lambda) P_{N-1} \\
 \lambda P_{N-1} &= M \mu P_N
 \end{aligned}$$

علاوه بر این

$$\sum_{n=0}^N P_n = 1$$

حل این معادلات تعادل نتیجه زیر را حاصل می‌کند

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^N C_n \right)^{-1} \quad (۳۸-۱۰)$$

که در آن

$$C_n = \begin{cases} \frac{N!}{(N-n)!n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n & \text{if } n = 0, 1, \dots, M \\ \frac{N!}{(N-n)!M!M^{n-M}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n & \text{if } n = M+1, M+2, \dots, N \end{cases} \quad (39-10)$$

معادلات ۳۸-۱۰ و ۳۹-۱۰ را می‌توان برای پیدا کردن احتمال وجود n واحد خراب به صورت زیر استفاده کرد.

$$P_n = P_0 C_n, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

برای مثال، فرض کنید یک جمعیت محدود ۱۰ واحدی وجود دارد که زمان بین خرابی‌ها ۳۲ ساعت است. همچنین فرض کنید میانگین زمان خدمت‌دهی برای یک آیتم در یک کانال تک خدمتی ۸ ساعت باشد.

با استفاده از این داده‌ها نرخ‌های خرابی و خدمت‌دهی به صورت زیر مشخص می‌شود

$$\lambda = 1/32, \quad \mu = 1/8$$

و از آن

$$\frac{\lambda}{\mu} = 0.25$$

ابتدا C_n برای n برابر با صفر و یک با استفاده از عبارت اول معادله ۳۹-۱۰ محاسبه می‌کنیم

$$C_0 = \frac{10!(0.25)^0}{10!0!} = 1$$

$$C_1 = \frac{10!(0.25)^1}{9!1!} = 2.5$$

سپس این مقدار را برای $n = ۲, ۳, \dots, ۱۰$ و با استفاده از عبارت دوم در معادله ۳۹-۱۰ محاسبه

می‌کنیم

$$C_2 = \frac{10!(0.25)^2}{8!1!1^1} = 5.625$$

$$C_3 = \frac{10!(0.25)^3}{7!1!1^2} = 11.250$$

$$C_4 = \frac{10!(0.25)^4}{6!1!1^3} = 19.6875$$

$$C_5 = \frac{10!(0.25)^5}{5!1!1^4} = 29.53125$$

$$C_6 = \frac{10!(0.25)^6}{4!1!1^5} = 36.9140625$$

$$C_7 = \frac{10!(0.25)^7}{3!1!1^6} = 36.9140625$$

$$C_8 = \frac{10!(0.25)^8}{2!1!1^7} = 27.685547$$

$$C_9 = \frac{10!(0.25)^9}{1!1!1^8} = 13.842773$$

$$C_{10} = \frac{10!(0.25)^{10}}{0!1!1^9} = 3.460693$$

$$\sum_{n=0}^{10} C_n = 188.410888$$

از معادله ۳۸-۱۰

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{10} C_n} = \frac{1}{188.410888} = 0.0053076$$

P_n برای $n=0,1,\dots,N$ را اکنون از $P_n = P_0 C_n = 0.0053076(C_n)$ به صورت زیر محاسبه

می‌کنیم

$$\begin{aligned} P_0 &= 0.0053076 \times 1 &= 0.0053076 \\ P_1 &= 0.0053076 \times 2.5 &= 0.0132690 \\ P_2 &= 0.0053076 \times 5.625 &= 0.0298553 \\ P_3 &= 0.0053076 \times 11.250 &= 0.0597105 \\ P_4 &= 0.0053076 \times 19.6875 &= 0.1044934 \\ P_5 &= 0.0053076 \times 29.53125 &= 0.1567400 \\ P_6 &= 0.0053076 \times 36.9140625 &= 0.1959251 \\ P_7 &= 0.0053076 \times 369140625 &= 0.1959251 \\ P_8 &= 0.0053076 \times 27.685547 &= 0.1469438 \\ P_9 &= 0.0053076 \times 13.842773 &= 0.0734719 \\ P_{10} &= 0.0053076 \times 3.460493 &= 0.0183680 \end{aligned}$$

احتمالات حالت پایدار برای n واحد خراب قبلاً محاسبه شد و اکنون می‌توان برای پیدا کردن

میانگین تعداد واحدهای خراب به صورت زیر از آن استفاده کرد

$$\sum_{n=0}^{10} n \times P_n$$

به صورت

$$0.0053076 + 1 \times 0.0132690 + \dots + 10 \times 0.0183680 = 6.023$$

۱۰-۶-۲- جداول صف محدود

اقتباس صف محدود در قسمت قبلی و کاربرد عددی مناسب آن برای احتمالات کامل برای n

واحد که خراب می‌شود، فراهم شد. از این احتمالات، تعداد انتظاری واحدهای خراب شده به دست

می‌آید.

در این قسمت، یک رویکرد بر پایه جداول صف محدود ارائه شده است. برای راحتی، نمادهای مورد استفاده در جداول به صورت زیر است.

$$T = \text{میانگین زمان خدمت‌دهی}$$

$$U = \text{میانگین زمان بین تقاضا برای خدمت‌دهی}$$

$$H = \text{میانگین تعداد واحدهای خدمت‌دهی شده}$$

$$L = \text{میانگین تعداد واحدهای در انتظار برای خدمت‌دهی}$$

$$J = \text{میانگین تعداد واحدهای در حال کار}$$

منابع مربوط به تئوری صف جداول صف محدود (برای جمعیت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ واحدی) را فراهم کرده است. هر مجموعه از مقادیر با N اندیس‌گذاری شده است، که تعداد واحدهای در جمعیت است. در هر مجموعه، داده‌ها با فاکتور خدمت‌دهی، X ، و تعداد کانال‌های خدمت‌دهی، M ، دسته‌بندی شده‌اند. دو مقدار برای هر یک از N ، X و M فهرست شده است. مقدار اول D است که احتمال تاخیر را به صورت احتمال اینکه واحد ورودی مجبور به انتظار باشد مشخص می‌کند. مقدار دوم F است که یک فاکتور کارایی موردنیاز برای محاسبه H ، L و J است.

فاکتور خدمت‌دهی تابعی از میانگین زمان خدمت‌دهی و میانگین زمان بین نیاز برای خدمت‌دهی است

$$X = \frac{T}{T + U} \quad (۴۰-۱۰)$$

میانگین تعداد واحدهای در حال خدمت تابعی از فاکتور کارایی، تعداد واحدها در جمعیت و فاکتور خدمت‌دهی است

$$H = FN X \quad (۴۱-۱۰)$$

میانگین تعداد واحدهای در حال انتظار برای خدمت‌گیری تابعی از تعداد واحدهای در جمعیت و فاکتور کارایی است

$$L = N(1 - F) \quad (42-10)$$

در نهایت، میانگین تعداد واحدهای در حال کار تابعی از تعداد واحدهای در جمعیت، فاکتور کارایی و فاکتور خدمت‌دهی هستند.

$$J = NF(1 - X)$$

دانستن مقادیر N ، U و T برای سیستم خط انتظار مورد مطالعه و یک مجموعه از جداول صف محدود، پیدا کردن مقادیر میانگین برای پارامترهای مهم صف را ساده می‌کند. برای مثال، میانگین تعداد واحدهای خراب محاسبه شده در قسمت ۱۰-۶-۱ یعنی $6/0.23$ را می‌توان از معادلات ۱۰-۴۰ تا ۱۰-۴۲ به صورت زیر به دست آورد

$$\begin{aligned} X &= \frac{8}{8+32} = 0.2 \\ H &= 0.497(10)(0.20) = 0.994 \\ L &= 10(1 - 0.497) = 5.03 \end{aligned}$$

در نتیجه $H + L = 6.024$ به عنوان میانگین تعداد واحدهای خراب شده به دست می‌آید. دیگر مثال‌ها در قسمت‌های بعدی ارائه شده است.

۱۰-۶-۳- تعداد کانال‌های سرویس تحت کنترل

فرض کنید که جمعیتی ۲۰ واحدی وجود داشته باشند که برای هر کدام زمان مورد نیاز برای خدمت‌دهی ۳۲ دقیقه است. هر کدام از کانال‌های فراهم شده دارای میانگین زمان خدمت‌دهی ۸

دقیقه است. هر دو دارای توزیع نمایی هستند. تعداد واحدهای خدمت‌دهی تحت کنترل مدیریت است. هزینه ایجاد هر کانال با میانگین زمان خدمت‌دهی ۸ دقیقه ۱۰ دلار در ساخت است. هزینه انتظار هر واحد ۵ دلار در ساعت است. فاکتور خدمت‌دهی برای این سیستم برابر است با:

$$X = \frac{T}{T + U} = \frac{8}{8 + 32} = 0.20$$

جدول ۱۰-۳ میانگین‌های سیستمی برای جدا کردن تعداد کانال‌ها با کم‌ترین هزینه را نشان می‌دهد. مقادیر ستون A و B از جدول و با $N=20$ و $X=0.20$ وارد شده است. میانگین تعداد واحدهای تحت خدمت‌دهی از معادله ۱۰-۴۱ به‌دست آمده و در جدول C نشان داده شده است. میانگین تعداد واحدهای در انتظار از معادله ۱۰-۴۲ به‌دست آمده و در ستون D قرار داده شده است. میانگین تعداد واحدهای در انتظار در صف و در حال خدمت‌گیری در ستون E مشخص شده‌اند. داده‌های ستون‌های A و E را می‌توان با هزینه مربوطه ضرب کرد تا هزینه کل سیستم به‌دست آید.

جدول ۱۰-۳- هزینه به‌عنوان تابعی از تعداد کانال‌های خدمت‌دهی

M (A)	F (B)	H (C)	L (D)	H+L (E)	هزینه انتظار (F)	هزینه خدمت‌دهی (G)	هزینه کل (H)
8	0.999	4.00	0.02	4.02	20.10	80	100.00
7	0.997	3.99	0.06	4.05	20.25	70	90.25
6	0.988	3.95	0.24	4.19	20.95	60	80.95
5	0.963	3.85	0.74	4.59	22.95	50	72.95
4	0.895	3.58	2.10	5.68	28.40	40	68.40
3	0.736	2.94	5.28	8.22	41.10	30	71.10
2	0.500	2.00	10.00	12.00	60.00	20	80.00

با ضرب ۵ دلار برای هر واحد در هر ساعت در میانگین تعداد واحدهای در انتظار هزینه انتظار در هر ساعت در ستون F را نشان می‌دهد. سپس، با ضرب ۱۰ دلار برای هر کانال در هر ساعت توسط تعداد کانال‌های در نظر گرفته شده، هزینه خدمت‌دهی در هر ساعت در ستون G به‌دست می‌آید. در نهایت با جمع این دو مقدار، هزینه کل سیستم در ستون H به‌دست می‌آید. تعداد کانال‌ها با کم‌ترین هزینه ۴ خواهد بود.

در این مثال، هزینه انتظار ۵ دلار در ساعت در نظر گرفته شده بود. اگر این موضوع به خاطر سود از دست رفته برای واحدهایی باشد که کار نمی‌کنند، جواب مساله با هدف حداکثر کردن سود نیز مشابه خواهد بود. مانند قبل، مقادیر ستون A و B از جدول ۱۰-۴ از جدول با فرض $N=20$ و $X=0.20$ به‌دست می‌آید. میانگین تعداد واحدهای در حال کار از معادله ۱۰-۴۳ محاسبه شده و در ستون C قرار می‌گیرد.

سود در هر ساعت در ستون D با ضرب میانگین تعداد واحدهای در حال کار در ۵ دلار سود در هر ساعت به‌دست می‌آید. هزینه خدمت‌دهی در هر ساعت در ستون E با ضرب تعداد کانال‌ها در ۱۰ دلار در تعداد کانال‌ها در هر ساعت به‌دست آمده است. در نهایت سود خالص در ستون F با تفریق سود از هزینه در هر ساعت به‌دست می‌آید. مانند قبل، تعداد کانال‌های بهینه ۴ است. این مثال نشان می‌دهد که هر دو رویکرد بیشینه کردن سود و کمینه کردن هزینه به نتیجه یکسانی می‌رسد.

۱۰-۶-۴ - میانگین زمان خدمت تحت کنترل

فرض کنید که جمعیتی ۱۰ واحدی توسط یک کانال باید خدمت‌دهی شوند. میانگین تقاضا برای خدمت‌دهی ۳۰ دقیقه است. اگر میانگین نرخ خدمت‌دهی ۶۰ واحد در هر ساعت باشد، هزینه خدمت‌دهی ۱۰۰ دلار در هر ساعت خواهد بود. هزینه خدمت‌دهی در هر ساعت نسبت معکوس با زمان خدمت‌دهی به یک واحد در یکای دقیقه دارد که به‌صورت $100/T$ نشان داده می‌شود. هر

دو زمان بین تقاضا برای خدمت‌دهی و زمان خدمت‌دهی دارای توزیع نمایی هستند. سود از دست رفته به خاطر انتظار واحدها در سیستم ۱۵ دلار در هر ساعت است.

ستون A جدول ۱۰-۵ ظرفیت کانال را به صورت میانگین زمان خدمت‌دهی برای هر واحد در یکای دقیقه بیان می‌دارد. فاکتور خدمت‌دهی برای هر زمان خدمت‌دهی توسط معادله ۱۰-۳۸ محاسبه و در ستون B قرار داده شده است. فاکتور کارایی در ستون C با استفاده از درونیابی خطی برای $N=10$ و فاکتور خدمت‌دهی مربوطه محاسبه شده و در ستون B قرار داده می‌شود. میانگین تعداد واحدهای در حال کار از معادله ۱۰-۴۱ محاسبه شده و در ستون D قرار داده شده است. داده‌های ستون A و D را می‌توان برای محاسبه ظرفیت سیستم که بیش‌ترین سود را حاصل می‌کند، به کار برد.

جدول ۱۰-۴- سود به عنوان تابعی از تعداد کانال‌های خدمت‌دهی

سود خالص (F)	هزینه خدمت‌دهی (E)	سود ناخالص (D)	J (C)	F (B)	M (A)
8	0.999	15.98	79.90	80	-0.10
7	0.997	15.95	79.75	70	9.75
6	0.988	15.81	79.05	60	19.05
5	0.963	15.41	77.05	50	27.05
4	0.895	14.32	71.60	40	31.60
3	0.736	11.78	58.90	30	28.90
2	0.500	8.00	40.00	20	20

جدول ۱۰-۵- سود به عنوان تابعی از میانگین زمان خدمت‌دهی

T(A)	X(B)	F(C)	J(D)	سود ناخالص (E)	هزینه خدمت‌دهی (F)	سود خالص (G)
1	0.032	0.988	9.56	143.20	100.00	43.2
2	0.062	0.945	8.86	132.90	50.00	82.90
3	0.091	0.864	7.85	117.75	33.33	84.42
4	0.118	0.763	6.73	101.00	25.00	76.00
5	0.143	0.674	5.77	86.51	20.00	66.51

سود انتظاری در هر ساعت در ستون E با ضرب میانگین تعداد واحدهای در حال کار در ۱۵ دلار به دست می‌آید. هزینه خدمت‌دهی در هر ساعت با تقسیم ۱۰۰ دلار بر مقدار T در ستون A به دست می‌آید. این هزینه‌ها در ستون F وارد می‌شوند. با تفریق هزینه خدمت‌دهی در هر ساعت و سود ناخالص انتظاری در هر ساعت، سود خالص انتظاری در هر ساعت در ستون G به دست می‌آید. میانگین زمان خدمت‌دهی که بیش‌ترین سود خالص انتظاری را حاصل می‌کند، سه دوره است.

۱۰-۶-۵- فاکتور خدمت‌دهی تحت کنترل

فرض کنید که یک جمعیت از تجهیزات تولیدی تحت مطالعه بوده و هدف انتخاب سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات با کم‌ترین هزینه است. فرض شده است که هر دو زمان بین تقاضا برای نگهداری و تعمیرات برای یک واحد از جمعیت و زمان خدمت‌دهی توزیع نمایی داشته باشند. دو پارامتر سیستم که تحت کنترل مدیریت است به صورت روبرو است: (۱) با افزایش توانمندی تعمیر (کاهش T) میانگین زمان از کارافتادگی ماشین کاهش می‌یابد؛ و (۲) سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه میانگین زمان تا خرابی‌ها، U، را تغییر می‌دهند. بنابراین، مساله نگهداری و

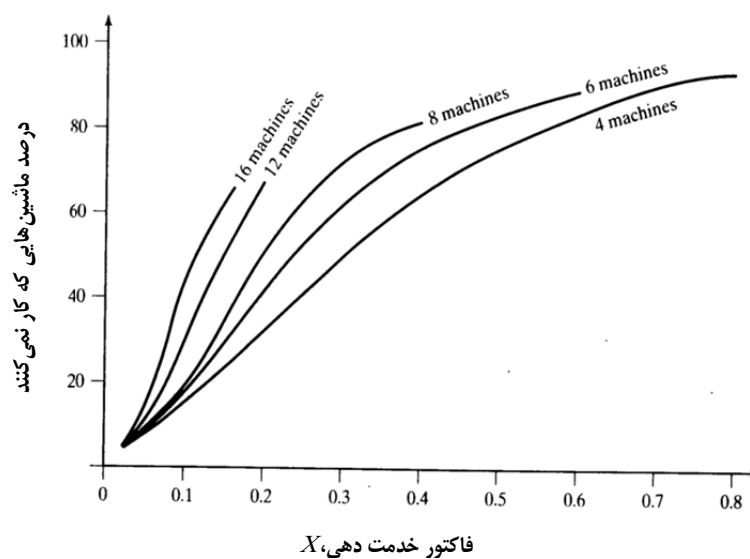
تعمیرات ماشین به تعیین فاکتور X که منجر به عملیات با کمترین هزینه می‌شود خلاصه می‌شود. این قسمت، روش‌هایی برای استقرار و کنترل فاکتور خدمت‌دهی در عملیات نگهداری و تعمیرات را ارائه می‌دهد.

هنگامی که ماشین خراب می‌شود، غیرمولد شده و باعث ایجاد هزینه اقتصادی می‌شود. این هزینه را می‌توان با کاهش فاکتور خدمت‌دهی کاهش داد. اما کاهش فاکتور خدمت‌دهی هم نیاز به کاهش زمان تعمیر داشته و هم نیازمند یک سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه پرهزینه‌تر دارد. بنابراین، هدف پیدا کردن تعادل اقتصادی بین هزینه ماشین در حالت غیرتولیدی و هزینه ایجاد یک فاکتور خدمت‌دهی مشخص است.

تحلیل این وضعیت توسط توسعه منحنی‌هایی انجام می‌شود که درصد زمان ازکارافتادگی ماشین را به‌عنوان تابعی از فاکتور خدمت‌دهی به‌دست دهند. شکل ۹-۱۰ منحنی‌هایی را برای جمعیت انتخاب شده در هنگامی نشان می‌دهد که یک کانال خدمت‌دهی موجود باشد. هر منحنی با استفاده از معادله ۱۰-۴۱ و جداول صف محدود به‌دست آمده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، درصد عدم کارکرد ماشین با افزایش فاکتور خدمت‌دهی افزایش می‌یابد.

به‌عنوان یک مثال از تعیین فاکتور خدمت‌دهی با کمترین هزینه، فرض کنید ۸ ماشین توسط یک مکانیک نگهداری و تعمیر می‌شود. هر ماشین در هر ساعت که کار کند ۲۲ دلار درآمد ایجاد می‌کند. هزینه‌ی ماشین برای شرکت، ۲۸/۸۰ دلار در هر ساعت است. سه سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مدنظر است. اولین سیاست ۸۰ دلار در ساعت هزینه دارد. پس از در نظر گرفتن افزایش در میانگین زمان تا خرابی‌ها و اثر آن بر زمان خدمت‌دهی، تخمین زده می‌شود که فاکتور خدمت‌دهی حاصل ۰/۰۴ باشد. سیاست دوم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه است که در هر ساعت ۴۲ دلار هزینه داشته، اما فاکتور خدمت آن ۰/۱۰ خواهد شد. گزینه سوم شامل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نمی‌شود؛ بنابراین هزینه‌ای از این جهت نخواهد داشت، اما یک فاکتور

خدمت‌دهی معادل $0/2$ حاصل می‌شود. زمان بین تقاضا برای خدمت‌دهی و زمان‌های خدمت‌دهی نمایی هستند. با مراجعه به شکل ۹-۱۰، نتایج جدول ۶-۱۰ توسعه داده شده است.



شکل ۹-۱۰- درصد ماشین‌هایی که کار نمی‌کنند به‌عنوان تابعی از فاکتور خدمت‌دهی.

جدول ۶-۱۰- سه سیاست نگهداری و تعمیرات

سیاست نگهداری و تعمیرات	فاکتور خدمت‌دهی، X	ماشین‌هایی که کار نمی‌کنند	هزینه سود از دست رفته	هزینه نگهداری و تعمیرات	هزینه مکانیک	هزینه کل
1	0.04	0.5	11.00	80	28.80	119.80
2	0.10	1.6	35.20	42	28.80	10.6.00
3	0.20	4.1	90.20	0	28.80	119.00

از ستون آخر، بدیهی است که دومین سیاست نگهداری و تعمیرات باید اتخاذ شود.

۷-۱۰- خلاصه فصل

پدیده‌ی صف، فراگیر است. در مهندسی و تحلیل سیستم‌ها، این موضوع باید به‌خوبی مورد مطالعه قرار گیرد. اما روش‌های مدل‌سازی و تحلیل، بسیار مفصل‌تر از آن است که در این فصل ارائه شد. براین اساس خواننده تشویق می‌شود که بسته به فرض‌های در نظر گرفته شده برای جمعیت، به یکی از دو کتاب زیر یا هر دو مراجعه کند.

برای فرضیه جمعیت نامحدود، به مراجعه کنید.

1. R.W. Hall, *Queuing Methods for Service and Manufacturing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001

برای مورد جمعیت محدود به مراجعه نمایید.

2. L.G. Peck and R.N. Hazelwood, *Finite Queuing Tables*, John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, NJ, 1958.

قسمت‌های ۱-۱۰ تا ۵-۱۰ این فصل، مدل‌ها و تحلیل‌هایی را مورد بررسی قرار داده است که در آن فرض نامحدود بودن جمعیت برقرار بود، با وجود این که هیچ جمعیت نامحدود شناخته شده‌ای وجود ندارد. تنها قسمت ۶-۱۰ مورد جمعیت محدود را پوشش می‌دهد. با این حال، این موضوع در فصل ۱۷ که در آن سیستم جمعیت تجهیزات قابل تعمیر ارائه شده است (اولین بار در قسمت ۷-۲ معرفی گردید) بیش‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادبیات موضوع تحقیقات اندکی در مورد جمعیت محدود وجود دارد.

سیستم صف و ارزیابی آن در قسمت ۱-۱۰ مورد توجه قرار گرفت. پس از تعریف و تشریح مکانیسم ورود، خط انتظار و مکانیسم خدمت‌دهی، به اصول تئوری در ارزیابی سیستم صف پرداخته شد. بار دیگر، الگوی ارزیابی عمومی از معادلات ۲-۷ و ۳-۷ قابل کاربرد است. سپس، پیش از پرداختن به موضوعات دیگر، تحلیل مونت کارلو برای صف معرفی و مورد بررسی قرار گرفت.

مدل‌های صف تک کاناله به راحتی قابل استخراج بوده و این موضوع در قسمت ۱۰-۳ مورد بررسی قرار گرفت. با فرض این که ورود پواسون و خدمت‌دهی نمایی است، شاخص‌های تعداد واحد در سیستم، میانگین طول صف و توزیع زمان انتظار به‌دست آمد. برای سیستم‌های صف چند کاناله، مدل‌های مربوطه بدون اثبات ارائه شده و میانگین طول صف، تعداد واحدهای در سیستم، میانگین زمان انتظار، میانگین زمان در سیستم و احتمال این که یک ورودی نیاز به منتظر شدن داشته باشد، محاسبه گردید. بدون اثبات، فرض توزیع زمان خدمت‌دهی غیرنمایی مدنظر قرار گرفت. موارد پوشش داده شده آن‌هایی هستند که زمان خدمت‌دهی در آن‌ها ثابت بوده و یا هر توزیع دلخواه دیگری داشته باشد.

مورد جمعیت محدود در پایان این فصل مورد بررسی قرار گرفت. این موضوع بر پایه فرایند تولید-مرگ استخراج شد. در این‌جا، جداول صف محدود که در بالا به آن‌ها رجوع شد، همگی مهم هستند. در مثال اول تعداد کانال‌ها طوری انتخاب شد که هزینه کمینه شود. سپس در مثال بعدی، فاکتور خدمت‌دهی تحت کنترل بود تا یک سیاست خدمت‌دهی انتخاب شود که کم‌ترین هزینه را ایجاد می‌کند. هر دو مثال به پارامترهای وابسته به طراحی شامل قابلیت اطمینان، قابلیت نگهداری و تعمیرات بستگی دارند که در فصول ۱۲ و ۱۳ مورد بحث قرار می‌گیرند.

سوالات و مسائل

۱. تحت چه شرایطی لازم یا مطلوب است که از تحلیل مونت کارلو برای مطالعه یک

سیستم صف استفاده شود؟

۲. بدون تغییر انحراف معیار S_x در شکل ۱۰-۲، میانگین را از ۵ به ۶ تغییر داده و تحلیل

مونت کارلو را برای ۱۰۰ دوره تکرار کنید. تفاوت‌های ایجاد شده را مورد بحث قرار

دهید.

۳. چرا در فرایند احتمالی خط انتظار ضروری است که μ بزرگ‌تر از λ باشد؟

۴. فرض کنید که زمان بین ورود از توزیع نمایی با میانگین ۶ دقیقه پیروی کرده و زمان خدمت‌دهی ثابت و برابر ۵ دقیقه باشد. خدمت‌دهی بر پایه FIFO صورت می‌گیرد. هیچ واحدی در سیستم در ساعت ۸ صبح وجود ندارد. با استفاده از تحلیل مونت کارلو تعداد کل دقایق انتظار بین ساعت ۸ صبح تا ۱۲ ظهر را تخمین بزنید.

۵. از تحلیل مونت کارلو استفاده کنید تا معادله ۹-۱۰ را تصدیق اعتبار نمایید با این فرض که تعداد ورودها در هر دوره دارای توزیع پواسون با میانگین 0.10 بوده و زمان خدمت‌دهی دارای تابع نمایی با میانگین چهار دوره باشد. هیستوگرام مربوط به تعداد واحدهای در سیستم را رسم کرده و با شکل ۶-۱۰ مقایسه کنید.

۶. فرض کنید که ورودها دارای توزیع پواسون با میانگین 0.125 واحد در هر دوره بوده و زمان خدمت‌دهی دارای توزیع نمایی با میانگین پنج دوره است. توزیع احتمال n واحد در سیستم را توسعه دهید. احتمال آن که بیش از چهار واحد در سیستم باشد چقدر است؟

۷. نرخ ورود برای یک سیستم خط انتظار از توزیع پواسون با میانگین 0.5 واحد در هر دوره پیروی می‌کند. احتمال این که یک واحد یا بیش‌تر در سیستم باشد، نباید از 0.20 تجاوز کند. در این صورت حداقل نرخ خدمت‌دهی موردنیاز چقدر باید باشد؟ فرض کنید که توزیع خدمت‌دهی نمایی است.

۸. تعداد واحدهای در سیستم مورد انتظار و زمان انتظاری انتظار برای شرایط مساله ۶ چقدر است؟

۹. تعداد واحدهای انتظاری در سیستم در یک سیستم خط انتظار که دارای ورود پواسون با نرخ 0.4 واحد در هر دوره است نباید از ۸ واحد تجاوز کند. حداقل نرخ خدمت‌دهی چقدر باید باشد اگر زمان خدمت‌دهی نمایی باشد؟ زمان انتظاری انتظار چقدر خواهد بود؟

۱۰. اگر هزینه انتظار در مساله ۷، ۵ دلار در هر دوره باشد، و هزینه تسهیل خدمت‌دهی $2/0.5$ دلار برای هر واحد خدمت گرفته باشد، هزینه کل سیستم چقدر خواهد شد؟ اگر نرخ خدمت‌دهی با هزینه $3/5$ دلار برای هر واحد دوبرابر شود، هزینه کل سیستم چقدر خواهد شد؟

۱۱. میانگین تعداد واحدهای در سیستم و میانگین زمان انتظار را به‌عنوان تابعی از λ / μ رسم کنید اگر تعداد ورودها در هر دوره از توزیع پواسون و زمان خدمت‌دهی از توزیع نمایی پیروی کند. اهمیت این نمودار چیست؟

۱۲. تعداد ورودها در هر دوره بر اساس یک توزیع پواسون با مقدار انتظاری 0.75 واحد در هر دوره توزیع شده است. هزینه انتظار هر واحد در هر دوره $3/20$ دلار است. هزینه تسهیل برای خدمت‌دهی به یک واحد در هر دوره $5/15$ دلار است. چه نرخ خدمت‌دهی مورد انتظاری باید اتخاذ شود اگر زمان خدمت‌دهی توزیعی نمایی داشته باشد؟ هزینه انتظاری کل سیستم چقدر خواهد بود؟

۱۳. زمان انتظاری انتظار در یک سیستم خط انتظار با ورود پواسون در یک نرخ $1/5$ واحد در ساعت نباید از ۶ ساعت تجاوز کند. حداقل نرخ خدمت‌دهی ثابت چقدر باید باشد؟ تعداد واحدهای مورد انتظار در سیستم چقدر است؟

۱۴. کامیون‌ها به صورت پواسون با نرخ $3/5$ واحد در روز برای بارگیری وارد بارانداز می‌شوند. هزینه انتظار هر کامیون در روز ۳۲۰ دلار است. یک گروه دو نفره که می‌توانند با نرخ ثابت چهار کامیون در روز بارگیری را انجام دهند هزینه‌ای معادل ۴۴۰ دلار در روز دارد. هزینه کل سیستم برای این عملیات را محاسبه کنید.

۱۵. مشتریان یک بانک با نرخ 0.2 در هر دوره و نرخ خدمت‌دهی 0.4 مشتری در هر دوره وارد بانک می‌شوند. اگر یک باجه وجود داشته باشد، میانگین طول صف چقدر است؟

اگر نرخ ورود به $0/6$ در هر دوره افزایش پیدا کند و تعداد باجه‌ها به دو افزایش پیدا کند، چه تغییری در طول صف ایجاد می‌شود؟ فرض کنید که ورود پواسون و خدمت‌دهی نمایی باشد.

۱۶. وسایل نقلیه با نرخ 60 در هر دوره وارد عوارضی می‌شوند. چهار کیوسک وجود دارد که هر کدام می‌توانند 30 وسیله نقلیه را در ساعت خدمت‌دهی کنند. با فرض توزیع پواسون برای ورود و توزیع نمایی برای زمان خدمت‌دهی، تعیین کنید (الف) احتمال این که هیچ وسیله نقلیه‌ای در عوارضی نباشد، (ب) میانگین طول خط انتظار، و (پ) میانگین زمان سپری شده توسط یک وسیله نقلیه در عوارضی.

۱۷. در مساله ۱۶ اگر هزینه عملیات کیوسک عوارضی 55 دلار در هر ساعت باشد و هزینه انتظار وسیله نقلیه $0/75$ در دقیقه باشد، چه تعداد کیوسک نیاز است که هزینه کل کمینه شود؟

۱۸. در یک سیستم صف سه کاناله، نرخ ورود 1 واحد در هر دوره زمانی و نرخ خدمت‌دهی $0/6$ واحد در هر دوره است. احتمال آن که واحد ورودی منتظر نماند چقدر است؟

۱۹. از معادله $10-39$ استفاده کنید تا مثال قسمت $10-6$ را برای دو کانال توسعه دهید. میانگین تعداد واحد منتظر را با حالت تک کاناله مقایسه کنید.

۲۰. هر کامیون در یک ناوگان حمل و نقل با میانگین بازه زمانی 150 دقیقه به انبار مراجعه می‌کند. به صورت میانگین 30 دقیقه لازم است که بارگیری انجام شود. اگر کارکنان انبار مشغول بارگیری یک کامیون باشند، کامیون دیگر باید صبر کند. هر دو زمان بین ورود و زمان بارگیری نمایی هستند. هزینه انتظار در سیستم 48 دلار برای هر کامیون بوده و هزینه کل برای هر کدام از کارکنان انبار 40 دلار در ساعت است. تعداد کارکنان انبار که کم‌ترین هزینه را برای سیستم حاصل می‌کند چقدر است؟

۲۱. یک جمعیت ۱۰ واحدی از هواپیمای باربری وجود دارد که هر کدام در یک دوره ۲۴ ساعته اگر برای تخلیه بار زمان تلف نکند ۴۰۰۰ دلار سود ایجاد می‌کند. زمان بین ورود نمایی با میانگین ۱۴۴ ساعت است. زمان تخلیه بار در بارانداز به صورت نمایی با میانگین ۱۸ ساعت است. هزینه اجاره بارانداز ۱۵۰ دلار است. چه تعداد بارانداز باید اجاره شود؟

۲۲. هر واحد در یک جمعیت ۱۰ واحدی با میانگین بازه زمانی ۲۰ دقیقه برای خدمت‌گیری رجوع می‌کنند. اگر هزینه انتظار ۳۲ دلار برای هر واحد در هر ساعت بوده و هزینه خدمت‌دهی 50/T برای هر واحد در هر ساعت باشد، زمان خدمت‌دهی بهینه را پیدا کنید اگر دو کانال خدمت‌دهی وجود داشته باشد. فرض کنید که ورودها بواسون و زمان خدمت‌دهی نمایی باشد.

۲۳. یک جمعیت شامل ۳۰ واحد پردازش شیمیایی توسط دو نفر نمونه‌برداری می‌شود. میانگین زمان بین انجام این عملیات ۶۸ دقیقه است. اگر میانگین نرخ خدمت‌دهی یک واحد در دقیقه باشد، هزینه افراد و ابزار دقیق‌ها ۱۶ دلار در دقیقه خواهد بود. این هزینه به مقدار ۱۲، ۹، و ۷ دلار به ترتیب برای بازه خدمت‌دهی ۲، ۳ و ۴ دقیقه کاهش می‌یابد. اگر سود از دست رفته در هر ساعت برای هر واحد بیکار ۲۸ دلار باشد، بازه خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه را بیابید.

۲۴. برای یک جمعیت ۲۰ ماشینی با ورود و خدمت‌دهی نمایی درصد ماشین‌هایی که کار نمی‌کنند را به عنوان تابعی از فاکتور خدمت‌دهی رسم کنید اگر (الف) از یک کانال خدمت‌دهی استفاده شود، و (ب) از دو کانال خدمت‌دهی استفاده شود.

۲۵. یک جمعیت ۱۰ سلولی توسط تعداد نامعلوم از کانال‌ها باید خدمت‌دهی شود. میانگین زمان بین تقاضا برای خدمت‌دهی ۱۵ دقیقه است. هزینه هر کانال خدمت‌دهی ۶۰ دلار

در ساخت و با میانگین نرخ خدمت‌دهی ۶۰ سلول در هر ساعت بوده و هزینه خدمت‌دهی هر کانال در ساعت نسبت به نرخ خدمت‌دهی رابطه عکس دارد. اگر سود خالص از هر سلول ۱۰ دلار در هر ساعت باشد، ترکیب بهینه تعداد کانال‌ها و زمان‌های خدمت‌دهی را مشخص کنید.

۲۶. گروهی از ۱۲ ماشین قابل تعمیر هنگام خرابی توسط یک تعمیرکار، تعمیر می‌شود. هر ماشین هنگامی که کار می‌کند، ۲۲ دلار در ساعت ایجاد درآمد می‌کند. هزینه مکانیک شرکت ۹۲ دلار در ساعت است که هزینه‌های بالاسری در آن لحاظ شده است. در حال حاضر هیچ نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ای انجام نمی‌شود. پیشنهاد شده است که یک تکنسین استخدام شود تا برخی روتین‌های نگهداری و تعمیرات و وظایف اصلاحی را انجام دهد. این کار ۱۶/۶۰ دلار در هر ساعت هزینه داشته ولی فاکتور خدمت‌دهی را از ۰/۱۳ به ۰/۰۸ کاهش می‌دهد. مزیت اقتصادی استقرار نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه چیست؟

مفاهیم و روش‌های کنترل

بسیاری از سیستم‌ها، استقرار یافته و سپس در یک محیط که طی زمان متغیر است، عملیات خود را انجام می‌دهند. به استثنای سیستم‌های ایستا، تغییرات محیطی می‌توانند به عدم پایداری سیستم منجر شوند، مگر آن‌که فعالیت‌های کنترلی بر آن‌ها اعمال گردد. ارزش سیستم‌های پویا را می‌توان از طریق فعالیت‌های کنترلی اعمال شده حین انجام عملیات ارتقا داد. کنترل یک بخش یا کل یک سیستم می‌تواند به نگهداری عملکرد سیستم در تolerانس مشخص شده کمک کند یا خروجی سیستم را افزایش دهد.

موضوع کنترل با سیستم‌های فیزیکی و تئوری فرمان‌یار آغاز شد. مهندسانی که در دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی توجه خود را به سیستم‌های بزرگ مقیاس معطوف کردند به مکانیسم‌های فرمان‌یار و دیگر وسائل کنترلی علاقه‌مند شدند. یک سیستم مصنوعی در مقیاس بزرگ، سیستمی است که در آن تعداد زیادی از حالت‌های ممکن، متغیرهای کنترلی و محدودیت وجود دارد. تئوری کلاسیک کنترل را به‌طور مستقیم نمی‌توان برای بهینه‌سازی خروجی‌ها در اکثر سیستم‌ها از این نوع به کار برد. با این حال، مفاهیم کلاسیک می‌تواند پایه‌ای برای تشریح

ساختارسازی سیستم و روابط داخلی مورد استفاده قرار گیرد تا پدیده‌ی بازخورد و اقتباس طی طراحی سیستم مدنظر قرار گیرد.

مفاهیم بنیادین که در بالا خلاصه شد در این فصل توسعه یافته و به شناسایی وضعیت‌ها، مدل‌ها و روش‌های متعدد کنترل می‌پردازد. برخی از این موارد عبارت‌اند از کنترل فرایند آماری برای متغیرها و صفات، کنترل سیاست بهینه، روش‌های کنترل دو پروژه و چهار جنبه از حوزه‌ی عمومی کنترل کیفیت جامع. مطالعه‌ی این موضوعات، خواننده را در درک مفاهیم و ایده‌های زیر توانا می‌سازد:

- مفهوم و عناصر یک سیستم کنترل، انواع سیستم‌های کنترلی و اطلاعات به‌عنوان واسطه کنترل؛
- کنترل فرایند آماری و کاربرد آن از طریق چارت‌های کنترلی برای متغیرها و روش‌های چارت کنترل برای صفات؛
- پایش جواب بهینه که از طریق کنترل سیاست بهینه مدل تصمیم به‌دست آمده است؛
- کنترل فعالیت‌های و زمان‌بندی پروژه، با استفاده از روش‌های مسیر بحرانی (CPM) و تکنیک‌های ارزیابی و بازیابی برنامه (PERT)؛
- نقش طراحی آزمایش (ED)، طراحی پارامتر (PD)، مهندسی کیفیت (QE) در حوزه‌ی جامع‌تر کنترل کیفیت جامع (TQC)؛
- طراحی پارامتر تاگوچی و رویکرد پارامتر وابسته به طراحی؛ مشابهت‌ها و تفاوت‌ها.

قسمت آخر، خلاصه‌ای از موضوعات گسترده‌ی کنترلی را فراهم می‌کند که در بالا فهرست شد. هم‌چنین موارد کلیدی را برای مطالعه‌ی بیش‌تر مورد تاکید قرار می‌دهد. با این حال، در

مطالعه‌ی این فصل، فرض بر آن است که خواننده پیش‌نیازهای مربوط به تئوری احتمالات و تحلیل‌های آماری را از پیش فرا گرفته است.

۱۱-۱- برخی مفاهیم پایه کنترل

یک مساله کنترل، زمانی به وجود می‌آید که نیاز باشد سرعت، دما، کیفیت یا کمیت تنظیم شده یا خط سیر یک هواپیما یا سفینه فضایی تعیین شود. در هر کدام از موارد، تخصیص منابع اندک در طی زمان مهم است. متغیرهای کنترل باید به نحوی بیان متغیرهایی که خصوصیات سیستم را تشریح می‌کنند یا شرایطی که باید کنترل شوند، مربوط می‌شوند.

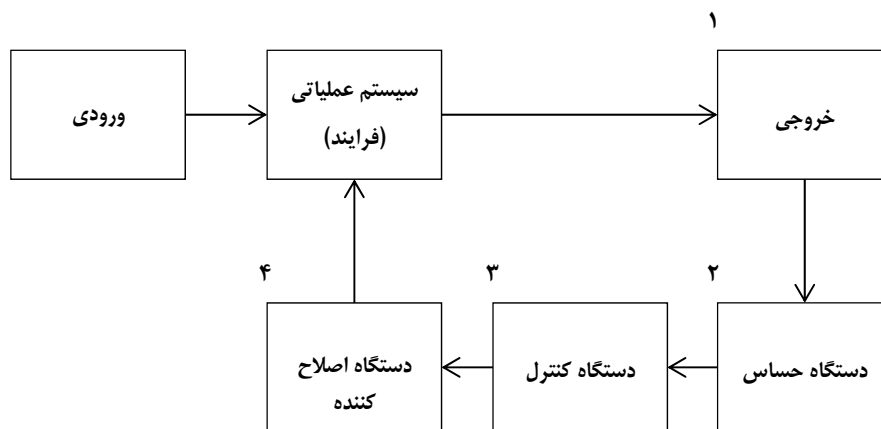
مثال کلاسیک کنترل، تعیین خط سیر یک موشک است. متغیرهای کنترلی شامل میزان، زمان‌بندی و جهت فشار موتور موشک هستند که در آن فشار موتور محدود به سوخت در دسترس است. متغیرهای حالت خط سیر را با جرم، مکان و سرعت در ارتباط هستند. فشار موتور و متغیرهای حالت توسط معادلات دیفرانسیل در ارتباط بوده و تابع اثربخشی باید بهینه شود. اغلب هدف، بیشینه کردن ظرفیت حمل و نقل به یک مقصد است.

مسائل کنترل در سیستم‌های انسان-تجهیز با مقیاس بزرگ به وجود می‌آید. در کنترل ترافیک هوایی، متغیرهای کنترل تعداد هواپیماها در مسیر، تعداد هواپیماهای منتظر برای فرود، تعداد هواپیماهای منتظر روی زمین، تعداد کانال‌های ارتباطی و غیره است. متغیرهای کنترل در کنترل ترافیک هوایی، دستورالعمل‌هایی هستند که کنترل‌کننده‌های ترافیک از آن استفاده می‌کنند.

۱۱-۱-۱- عناصر یک سیستم کنترل

هر سیستم کنترل دارای چهار عنصر اصلی است. این عناصر همیشه با یک توالی یکسان اتفاق افتاده و رابطه‌ای مشابه با یکدیگر دارند. این عناصر عبارت‌اند از:

۱. یک خصوصیت یا وضعیت کنترل شده.
 ۲. یک دستگاه یا روش حساس برای اندازه‌گیری خصوصیت یا وضعیت.
 ۳. یک دستگاه کنترل که عملکرد اندازه‌گیری شده را با عملکرد برنامه‌ریزی شده مقایسه می‌کند.
 ۴. یک دستگاه فعال شونده که سیستم را اصلاح می‌کند تا یک تغییر در خروجی خصوصیت یا وضعیت تحت کنترل ایجاد کند.
- شکل ۱-۱۱ رابطه‌ی میان چهار عنصر یک سیستم کنترل را نشان می‌دهد. خروجی سیستم (شکل ۱-۱۱، بلوک ۱) یک خصوصیت یا وضعیت است که باید اندازه‌گیری شود. این خروجی می‌تواند سرعت، دما، کیفیت یا هر خصوصیت یا وضعیت از سیستم مدنظر باشد.
- دستگاه حساس (شکل ۱-۱۱، بلوک ۲) عملکرد خروجی را اندازه‌گیری می‌کند. طراحی سیستم باید شامل دستگاه‌هایی مانند سرعت‌سنج، ترموکوپل، گرماسنج، مبدل، بازرسی‌کننده و دیگر حسگرهای فیزیکی یا انسانی شوند. اطلاعات جمع‌آوری شده توسط دستگاه حساس برای انجام عملیات یک سیستم کنترل الزامی است.



شکل ۱۱-۱- عناصر و روابط سیستم کنترل

سومین عنصر در سیستم کنترل، دستگاه کنترل کننده است (شکل ۱۱-۱، بلوک ۳). این عنصر برای تعیین وجود نیاز به عمل کنترلی برپایه اطلاعات فراهم شده از دستگاه حساس حضور دارد. این دستگاه می‌تواند یک ریزرایانه یا یک رایانه باشد. مهم است که این عنصر در سیستم کنترل بتواند تفاوت‌های معنادار بین خروجی برنامه‌ریزی شده و خروجی واقعی را تشخیص دهد.

هر سیگنال خارج از دستگاه کنترل کننده، باید توسط دستگاه اصلاح کننده (شکل ۱۱-۱، بلوک ۴) مورد یک عمل اصلاحی قرار گیرد. این دستگاه چهارمین عنصر در یک سیستم کنترل است. نقش آن پیاده‌سازی یک عمل است. دستگاه‌های اصلاح کننده می‌توانند مکانیکی، الکترومکانیکی، هیدرولیک، پنوماتیک یا انسان باشند، به‌طور مثال در موردی که یک کاربر تنظیمات یک ماشین را تغییر می‌دهد تا ابعاد محصول در حال تولید را تغییر دهد.

۱۱-۱-۲- انواع سیستم‌های کنترل

دو نوع اصلی از سیستم‌های کنترل وجود دارد که عبارت‌اند از سیستم حلقه باز و حلقه بسته. هر کدام خصوصیات خود را دارند. تفاوت اصلی این است که آیا دستگاه کنترل بخشی از سیستم تحت کنترل هست یا نه.

در کنترل حلقه باز، فعالیت بهینه کنترل کاملاً در ابتدای چرخه‌ی سیستم مشخص می‌شود. در کنترل حلقه بسته، فعالیت بهینه کنترل هم توسط شرایط اولیه و هم توسط مقادیر فعلی متغیر حالت تعیین می‌شود. اگرچه در کنترل حلقه باز، همه‌ی تصمیم‌ها از پیش گرفته شده است، در کنترل حلقه بسته، تصمیم‌ها با توجه به اطلاعات جدید دریافت شده در مورد وضعیت سیستم اصلاح می‌شوند.

مثال‌های رایج از کنترل حلقه باز و حلقه بسته، خشک‌شویی و ترموستات خانگی است. در خشک‌شویی طول چرخه‌ی خشک کردن یکبار توسط انسان تنظیم می‌شود. در مقابل، در ترموستات خانگی، سیگنال‌های کنترلی مشخص می‌کنند که هرگاه دما نسبت به سطح از پیش تعیین شده پایین‌تر بیاید، روشن شود. هنگامی که یک سیستم توسط یک فرد تنظیم می‌شود، مانند مورد خشک‌شویی، باید به خروجی مطلوب که باید به‌دست آید توجه شود. در مثال حلقه باز، زمان خشک شدن با توجه به تجربه‌ی فرد به‌صورت مناسب در زمان‌سنج تعیین می‌شود.

اگر کنترل در قالب عملیات سیستم انجام شود، مانند ترموستات، آنگاه این کنترل یک کنترل حلقه بسته است. تفاوت معنادار در این نوع از سیستم کنترل این است که دستگاه کنترل، یک عنصر از خود سیستم تحت کنترل است. در کنترل حلقه بسته، چهار عنصر از یک سیستم کنترل که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده، همگی با هم برای رسیدن به هدف در حال کار هستند. کنترل حلقه باز تنها به تنظیم اولیه و مطلوب نیاز دارد، مگر آن که عناصری تصادفی در اندازه‌گیری یا عملیات سیستم وجود داشته باشند.

۱۱-۳ - کنترل بازخورد و پاسخ

یک بخش ضروری در سیستم حلقه بسته، بازخورد است. بازخورد، یک فرایند است که در آن خروجی یک سیستم به‌طور پیوسته یا در بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده اندازه‌گیری می‌شود که در ادامه به‌عنوان کنترل داده نمونه ارائه می‌شود. به‌طور کلی، هزینه‌ها در اندازه‌گیری یک خصوصیت یا وضعیت ایجاد می‌شوند. این هزینه‌ها می‌توانند در قالب بارکاری اضافه شده، انرژی اضافی، وزن اضافی و غیره باشند.

ساختار کنترل، پاسخی را برای تکمیل بازخورد توسط اندازه‌گیری یا پیش‌بینی اغتشاش پیش از اثرگذاری بر فرایند تحت کنترل فراهم می‌کند. این پاسخ اصلاحی به کنترل بازخورد، باید با معیارهای طراحی مطابقت داشته باشد. اغتشاش اندازه‌گیری شده باید (۱) قابل اندازه‌گیری باشد، (۲) یک اغتشاش مهم را شناسایی کند، (۳) نباید بر عنصر نهایی اثرگذار باشد، و (۴) پویایی اغتشاش نباید سریع‌تر از پویایی جبران باشد.

اغلب، کنترل بازخورد در یک سیستم نگه داشته می‌شود، زیرا پاسخ تنها اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده را جبران می‌کند و مدل پیش‌بینی استفاده شده کامل نیست. مانند همه‌ی مدل‌ها، این مدل تنها تقریبی از واقعیت است. درستی فعالیت کنترلی پاسخ نمی‌تواند بهتر از درستی پیش‌بینی انجام شده باشد.

۱۱-۴ - اطلاعات به‌عنوان واسطه کنترل

کنترل همه‌ی خصوصیات یا وضعیت‌های خروجی یک سیستم اغلب ممکن نیست. در نتیجه، انتخاب هوشمندانه خصوصیتی که باید اندازه‌گیری شوند، مهم است. کنترل موفقیت‌آمیز خصوصیت انتخاب شده منجر به کنترل موفقیت‌آمیز سیستم می‌شود. این نیازمندی معمولاً زمانی

برآورده می‌شود که خصوصیت کنترل شده به زبان مورد استفاده در حلقه اصلاحی بیان شود. پیش از جمع‌آوری اطلاعات، باید تعیین شود که چه چیزی باید منتقل شود.

در جریان اطلاعات اندازه‌گیری شده، هنگامی که این اطلاعات به اطلاعات اصلاحی تبدیل می‌شوند، این امکان به وجود می‌آید که یک خصوصیت یا وضعیت یک سیستم تحت کنترل در آید. اطلاعاتی که باید با استاندارد کنترل مقایسه شوند باید در قالب مشابه استاندارد بیان گردد تا تصمیم‌گیری درباره‌ی وضعیت کنترلی یک سیستم تسهیل شود. این اطلاعات را اغلب می‌توان با نمونه‌برداری از خروجی به دست آورد. البته، یک نمونه تنها یک تخمین از یک گروه یا جمعیت است. نمونه‌گیری آماری بر پایه تئوری احتمالات می‌تواند اطلاعات کنترلی معتبر همراه با برخی خطاها را فراهم کند.

عنصر حساس در شکل ۱-۱۱ اطلاعاتی را فراهم می‌کند که پایه‌ی فعالیت‌های کنترلی است. اطلاعات خروجی با خصوصیت یا وضعیت کنترل شده مقایسه می‌شود. در کنترل بازخورد، انحراف‌های معنادار ثبت شده و اطلاعات اصلاحی برای دستگاه اصلاح‌کننده فراهم می‌شود.

اطلاعات دریافت شده از دستگاه کنترلی باعث می‌شود تا دستگاه اصلاح‌کننده پاسخ دهد. با این حال، هر سیستم کنترلی یک تاخیر محدود در زمان پاسخ‌دهی خود دارد که می‌تواند باعث مشکلاتی در اصلاح بیش از حد ایجاد کند. این مشکل می‌تواند با کاهش زمان بین اندازه‌گیری خروجی و اصلاح سیستم یا معرفی یک زمان تحویل در سیستم کنترل از بین رود. کنترل پاسخ روشی دیگر در کاهش تاخیر در عمل کنترلی است اما مشکلات مربوط به خود را در پی خواهد داشت زیرا تمرکزش بر آینده است.

۱۱-۲- کنترل فرایند آماری

تغییر، یک پدیده‌ی ذاتی در خصوصیت یا وضعیت خروجی اکثر فرایندهاست. الگوهایی از تغییرات آماری در تعداد واحدهای پردازش شده از طریق نگاه‌داری و تعمیرات در یک دوره زمانی از یک قطعه ماشینکاری شده، زمان تحویل یک آئتم و تعداد خرابی‌ها در محصولات تولید شده وجود دارد. کنترل فرایند آماری یک متدولوژی برای آزمایش این موضوع است که آیا سیستم عملیاتی تحت کنترل است یا نه.

اندازه‌گیری، کلید ارزیابی در کنترل فرایند آماری است. این اندازه‌گیری در خروجی سیستم با هدف شناسایی اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر ایده‌آل یا هدف اعمال می‌شود. با اعمال کنترل آماری در یک فرایند که به‌خوبی متمرکز بر مشخصات فنی محصول است، می‌توان به کیفیت محصول خروجی اطمینان حاصل کرد. کنترل آماری به تولیدکننده اجازه می‌دهد که علل تغییرات را شناسایی و حذف کند درحالی‌که علل تصادفی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، خروجی تولید شده تحت کنترل آماری عموماً نیاز به بازرسی نمونه ندارد. بازرسی با نمونه‌گیری به‌دنبال آئتم‌های خراب و حذف آن‌ها می‌گردد و چنان چه موردی کشف شود، ایجاد اختلال کرده و هزینه‌بر است.

یک الگوی پایدار یا الگوی احتمالی در حالت پایدار از تغییرات زمانی وجود دارد تا پارامترهای توزیع‌های آماری عملیات در گذر زمان ثابت بمانند. برخی اوقات، شکل توزیع دچار تغییر نیز خواهد شد.

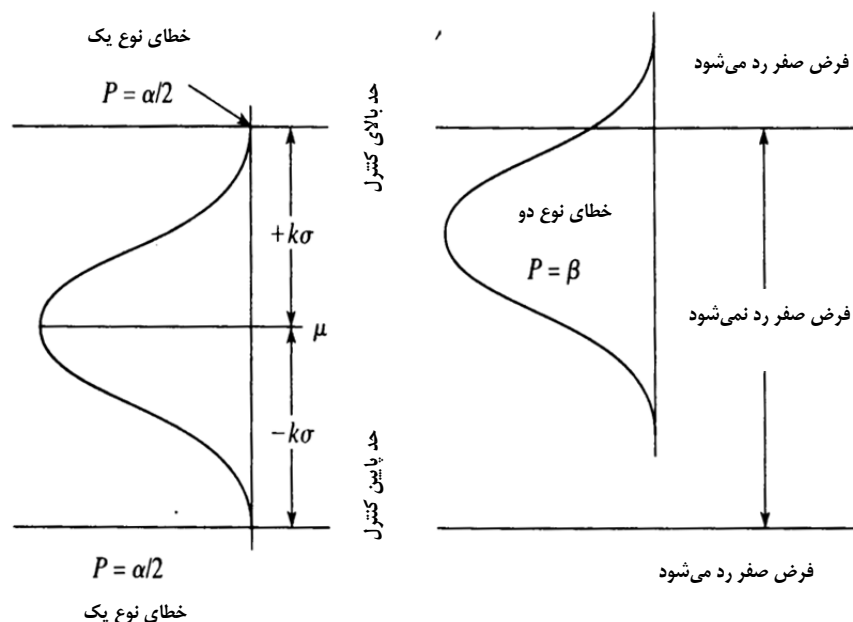
اغلب حدودی برای کنترل یک الگوی اولیه پایدار از تغییرات قرار داده می‌شود تا تغییرات بعدی در این الگو شناسایی شوند؛ یک دخالت آماری هنگامی که مقدار یک نمونه مدنظر قرار می‌گیرد، اعمال می‌شود. اگر نمونه درون حدود کنترل قرار گیرد، فرایند مورد مطالعه، تحت کنترل

است. اگر نمونه بیرون از حدود قرار گیرد، فرایند تغییر یافته در نظر گرفته می‌شود و خارج از کنترل گفته می‌شود.

شکل ۱۱-۲ حدود کنترل با فاصله $k\sigma$ از میانگین الگوی پایدار اولیه از تغییرات را نشان می‌دهد. اگر یک نمونه خارج از حدود کنترل قرار گیرد و فرایند تغییری نکرده باشد، خطای نوع یک با احتمال α به‌وجود آمده است. برعکس، اگر یک نمونه داخل حدود کنترل قرار گیرد، در حالی که فرایند تغییر کرده است، خطای نوع دوم با احتمال β اتفاق افتاده است. اگر حدود کنترل به الگوی پایدار اولیه از تغییرات نزدیک باشد، مقدار α افزایش می‌یابد. مزیت ایجاد شده حساسیت بیش‌تر مدل به تغییرات ایجاد شده است. معیار نهایی هزینه مربوط به خطاهای نوع یک و نوع دو است. حدود باید طوری تعیین شوند که مجموع این دو هزینه را کمینه کند.

کنترل فرایند آماری بر پایه فرضیه، یک فرایند پایدار قرار دارد. اگر پایدار باشد، یک خصوصیت محصول که منعکس‌کننده رفتار فرایند است، اندازه‌گیری می‌شود. خصوصیت اندازه‌گیری شده دارای یک توزیع در حالت پایدار (در مفاهیم احتمالی) است؛ یعنی هر نمونه از محصول که از فرایند گرفته می‌شود، توزیع آماری یکسانی دارد.

یک فرایند پایدار که یک محصول با مشخصات فنی برآورده شده را ایجاد می‌کند، ممکن است در ادامه تولید ناپایدار کند. ناپایداری از علل خاصی نشأت می‌گیرد. پایش مستمر فرایند با استفاده از کنترل فرایند آماری می‌تواند گذار به یک حالت ناپایدار را شناسایی کرده و وجود دلایل خاصی را مشخص کند. یک فرایند که آزمایش آماری را پشت سر می‌گذارد همیشه پایدار نخواهد بود. با این حال، احتمال این که یک فرایند ناپایدار، تولید خروجی‌هایی که آزمایش‌های آماری را تایید کنند، بسیار کم است (به شکل ۱۱-۲ مراجعه کنید).



شکل ۱۱-۲- یک الگوی پایدار و یک الگوی تغییر رده از تغییرات

اگرچه روش‌های کنترل فرایند در ابتدا برای تولید اعمال شد، اما استفاده از آن‌ها تنها به تولید محدود نمی‌شود. کنترل فرایند آماری برای ارزیابی و بهبود فرایندهای مهندسی به کار می‌رود. کنترل فرایند آماری روشی برای به‌دست آوردن اطلاعات مفید برای بازخورد محصول و طراحی سیستم تولید است. علاوه بر چارت‌های کنترلی، منحنی‌های پارتو، نمودارهای علت و اثر، شبکه‌های CPNI و PERT برای ارزیابی و بهبود فرایندهای تولید و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با در دسترس قرار گرفتن اطلاعات موجود در طراحی، تولید، و پشتیبانی، مهندسان شروع به اندازه‌گیری پارامترهای تولید و همچنین تغییرات در پارامترهای کنترلی فرایند می‌کنند. چنین کاربردهایی رابطه‌ی نزدیکی با مهندسی کنترل دارند و بسیاری از این اصول پایه را استفاده می‌کنند.

۱۱-۳- چارت‌های کنترل آماری

یک چارت کنترل آماری، یک وسیله‌ی کنترلی است (شکل ۱۱-۱، بلوک ۳) که برای اندازه‌گیری اطلاعات از یک دستگاه حساس (شکل ۱۱-۱، بلوک ۲) استفاده می‌کند و اطلاعات تغییری برای سیستم را به دستگاه اصلاح‌کننده (شکل ۱۱-۱، بلوک ۴) منتقل می‌نماید. چارت‌های کنترل از نمونه‌های جمع‌آوری شده از خروجی سیستم و حدود کنترل استفاده می‌کنند تا مشخص شود عملیات تحت کنترل است یا نه. هنگامی که مقدار یک نمونه خارج از حدود کنترل قرار گیرد، یک سیستم پایدار از تغییرات آماری احتمالا دیگر وجود ندارد. سپس کارهای بعدی برای پیدا کردن علت وضعیت "خارج از کنترل" انجام می‌شوند تا فرایند را بتوان به حالت تحت کنترل در آورد یا فعالیت‌های جبرانی صورت گیرند.

چارت‌ها در کنترل فرایند آماری برای انجام آزمایش پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی که مقدار یک خصوصیت اندازه‌گیری را بتوان اندازه‌گیری کرد، چارت‌های $\bar{X}$ و R به کار می‌روند. هنگامی که نسبت دو مقدار از یک خصوصیت اندازه‌گیری شود، یک چارت p مناسب است و هنگامی که تعداد کل خرابی‌ها اندازه‌گیری می‌شود، چارت c کاربردی است.

۱۱-۳-۱- چارت‌های کنترل برای متغیرها

یک چارت کنترل یک نمایش گرافیکی از یک مدل ریاضی مورد استفاده در پایش فرایند متغیر تصادفی است تا تغییرات در یک پارامتر از فرایند شناسایی شود. رسم داده‌های آماری یک آزمایش بدین صورت است که آیا فرایند بر اساس نمونه گرفته شده تغییر کرده است یا نه. یک چارت کنترل برای ایجاد تمایز بین الگوی پایدار از تغییرات و اتفاق افتادن یک الگوی ناپایدار استفاده می‌شود. اگر یک الگوی ناپایدار از تغییرات کشف شود، فعالیت‌هایی برای پیدا کردن علت عدم پایداری آغاز می‌شوند. حذف علت باید باعث شود که فرایند به حالت پایدار برگردد.

چارت‌های کنترل متغیرهای عملیاتی به‌صورت پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. دو چارت برای این نوع عملیات وجود دارد. چارت $\bar{X}$ نموداری است که میانگین نمونه‌های گرفته شده از یک فرایند را نشان می‌دهد. این چارت در اصل برای شناسایی تغییرات در میانگین فرایندی که نمونه از آن گرفته می‌شود، به‌کار می‌رود. چارت R یک نمودار است که گستردگی این نمونه‌ها را در گذر زمان نشان می‌دهد. این چارت برای شناسایی پراکندگی در فرایند به‌کار می‌رود. این چارت‌ها اغلب با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ساخت چارت $\bar{X}$. چارت $\bar{X}$ ورودی را به‌صورت میانگین یک نمونه گرفته شده از فرایند تحت مطالعه دریافت می‌کند. اغلب نمونه دارای چهار یا پنج مشاهده می‌شود که تعدادی کافی در استفاده از قضیه حد مرکزی است. با قبول یک توزیع نرمال برای میانگین‌های نمونه، اجازه استقرار حدود کنترل همراه با دانش در مورد احتمال خطای نوع یک ممکن است. لازم نیست که از شکل توزیع فرایند آگاه بود.

گام اول در ساخت یک چارت $\bar{X}$ تخمین میانگین فرایند، μ ، و تخمین واریانس فرایند، σ^2 است. این موضوع نیازمند اتخاذ m نمونه که اندازه هر کدام n است و با محاسبه میانگین، $\bar{X}$ و بازه، R ، برای هر نمونه انجام می‌شود. جدول ۱۱-۱ قالب مورد استفاده برای انجام محاسبات را نشان می‌دهد. میانگین میانگین نمونه‌ها، $\bar{\bar{X}}$ ، برای تخمین μ به‌کار می‌رود و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}}{m} \quad (11-1)$$

و میانگین بازه‌های نمونه‌ها، $\bar{R}$ ، به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R}{m} \quad (۲-۱۱)$$

نسبت انتظاری بین میانگین بازه‌ها، $\bar{R}$ ، و انحراف از معیار فرایند برای اندازه‌های مختلف نمونه، n ، محاسبه می‌شود. این نسبت که با d_2 نشان داده می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌گردد

$$d_2 = \frac{\bar{R}}{\sigma}$$

جدول ۱۱-۱- قالب محاسبات برای تعیین $\bar{R}$ و $\bar{X}$

تعداد نمونه‌ها	مقادیر نمونه‌ها				میانگین $\bar{X}$	بازه R
1	x_{11}	x_{12}	$\cdots$	x_{1n}	$\bar{X}_1$	R_1
2	x_{21}	x_{22}	$\cdots$	x_{2n}	$\bar{X}_2$	R_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
M	x_{m1}	x_{m2}	$\cdots$	x_{mn}	$\bar{X}_m$	R_m

بنابراین، σ می‌تواند به صورت زیر تخمین زده شود

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (۳-۱۱)$$

مقادیر d_2 به عنوان تابعی از اندازه نمونه در جدول ۲-۱۱ قابل یافت است.

میانگین چارت $\bar{X}$ در $\bar{X}$ قرار داده شده است. حدود کنترل به صورت نرمال در $\pm 3\sigma_{\bar{X}}$ قرار

داده شده است، که منجر به احتمال خطای نوع اول برابر با ۰/۰۰۲۷ می‌شود. زیرا

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

با جایگزینی در معادله ۱۱-۳ داریم

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}}$$

۹

$$3\sigma_{\bar{X}} = \frac{3\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \quad (۱۱-۴)$$

فاکتور $3/d_2 \sqrt{n}$ به عنوان A_2 در جدول ۱۱-۲ به صورت جدولی محاسبه شده است.

بنابراین، حدود بالا و پایین کنترل برای چارت $\bar{X}$ به صورت زیر مشخص می‌شود

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad (۱۱-۵)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad (۱۱-۶)$$

جدول ۱۱-۲- فاکتورها برای ساخت چارت‌های $\bar{X}$ و R

اندازه نمونه n	چارت		چارت R	
	d_2	A_2	D_3	D_4
2	1.128	1.880	0	3.267
3	1.693	1.023	0	2.575
4	2.059	0.729	0	2.282
5	2.326	0.557	0	2.115
6	2.534	0.482	0	2.004
7	2.704	0.419	0.076	1.924
8	2.847	0.373	0.136	1.864
9	2.970	0.337	0.184	1.816
10	3.078	0.308	0.223	1.777

ساخت چارت R. چارت R به روش مشابه چارت $\bar{X}$ ساخته می‌شود. اگر چارت $\bar{X}$ تکمیل شده باشد، $\bar{R}$ را می‌توان با استفاده از معادله ۱۱-۲ محاسبه کرد. مقادیر جدولی حدود کنترل 3σ برای بازه‌ی ترجمه شده برای اندازه‌های مختلف نمونه در جدول ۱۱-۲ فراهم شده است. حدود بالا و پایین کنترل برای چارت R به صورت زیر مشخص شده‌اند

$$UCL_R = D_4 \bar{R} \quad (۷-۱۱)$$

$$LCL_R = D_3 \bar{R} \quad (۸-۱۱)$$

از آن جا که D_3 برای اندازه‌های کوچک‌تر از ۶ در جدول ۱۱-۲ برابر صفر است، $LCL_R = 0$. درحقیقت حدود 3σ برای حد پایین کنترل مقداری منفی می‌شود که برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

این بدین معنا است که در اندازه نمونه ۶ یا کم‌تر، امکان ندارد که یک مقدار در چارت R خارج از حد پایین قرار گیرد. بنابراین، چارت R قابل استفاده برای کاهش پراکندگی خروجی فرایند نیست.

کاربرد چارت‌های R و $\bar{X}$. به محض آن که حدود کنترل برای هر چارت مشخص شود، داده‌های مورد استفاده در ساخت حدود در نمودار مشخص می‌شوند. یک مقدار خارج از حدود در چارت $\bar{X}$ مشخص می‌کند که فرایند تحت یک تغییر نسبت به خط مرکزی قرار گرفته است. یک مقدار خارج از حدود نمودار R گواهی است بر این که تغییرات فرایند خارج از کنترل است. در هر دو مورد، باید به دنبال منشا تغییرات در رفتار سیستم بود. اگر یک یا دو مقدار خارج از حدود باشند و بتوان علت را یافت، آنگاه این مقادیر را می‌توان از نمودار حذف کرد و حدود کنترل را اصلاح کرد. اگر حدود اصلاح شده شامل همه‌ی مقادیر باقی‌مانده شود، چارت کنترل برای استفاده آماده است. اگر نه، این رویه باید تکرار شود.

فرض کنید که چارت‌های کنترلی برای پایش وزن به اونس برای قوطی‌های پر شده مورد استفاده قرار گیرد. هر قوطی باید ۱۰ اونس وزن داشته باشد و برای رسیدن به این وزن، فرایند باید طوری تنظیم شود تا اندکی بیش‌تر از این مقدار را در قوطی پر کند. نمونه‌ای پنج‌تایی هر ۳۰ دقیقه گرفته می‌شود. داده‌های نمونه، همراه با میانگین و بازه نمونه در جدول ۱۱-۳ فراهم شده است.

یک چارت R در ابتدا با این داده‌ها ساخته می‌شود. با استفاده از معادله ۱۱-۲، $\bar{R}$ محاسبه شده و مقدار آن ۲/۰۵ خواهد بود. حدود کنترل را با استفاده از معادلات ۱۱-۷ و ۱۱-۸ می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد.

$$UCL_R = 2.115(2.05) = 4.34$$

$$LCL_R = 0(2.05) = 0$$

این حدود برای ساختن چارت R در شکل ۱۱-۳ مورد استفاده قرار گرفته است. از آن‌جا که همه مقادیر در حدود کنترل هستند، چارت R قابل قبول است و به‌عنوان یک روش ارزیابی تغییرات فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر یک نقطه خارج از حدود بود، باید آن نقطه حذف و حدود دوباره محاسبه شود.

در گام بعدی چارت $\bar{X}$ رسم می‌شود. میانگین نمونه‌ها، $\bar{\bar{X}}$ با استفاده از معادله ۱۱-۱ معادل ۱۱،۱۹ به‌دست می‌آید. میانگین بازه‌های نمونه، $\bar{R}$ قبلاً محاسبه شده و معادل ۲/۰۵ است. حدود کنترل اولیه چارت $\bar{X}$ را اکنون می‌توان با استفاده از معادلات ۱۱-۵ و ۱۱-۶ به‌صورت زیر به‌دست آورد:

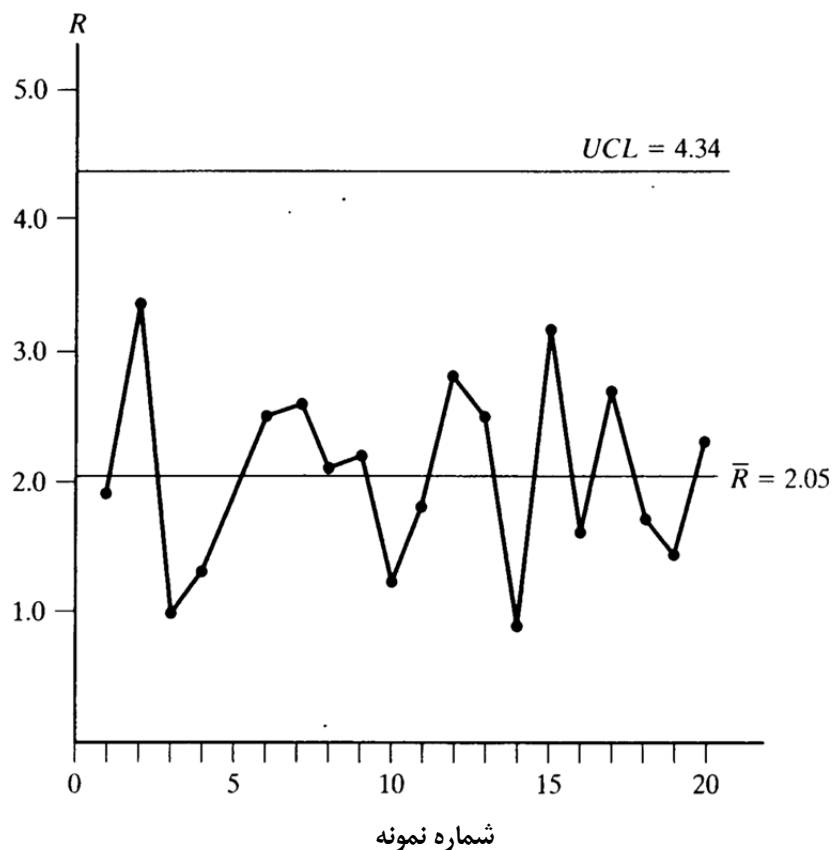
$$UCL_{\bar{X}} = 12.19 + 0.577(2.05) = 13.37$$

$$LCL_{\bar{X}} = 12.19 - 0.577(2.05) = 11.01$$

این حدود برای ساخت چارت $\bar{X}$ مورد استفاده قرار گرفته و در شکل ۱۱-۴ نشان داده شده است.

جدول ۱۱-۳- وزن قوطی‌ها (اونس)

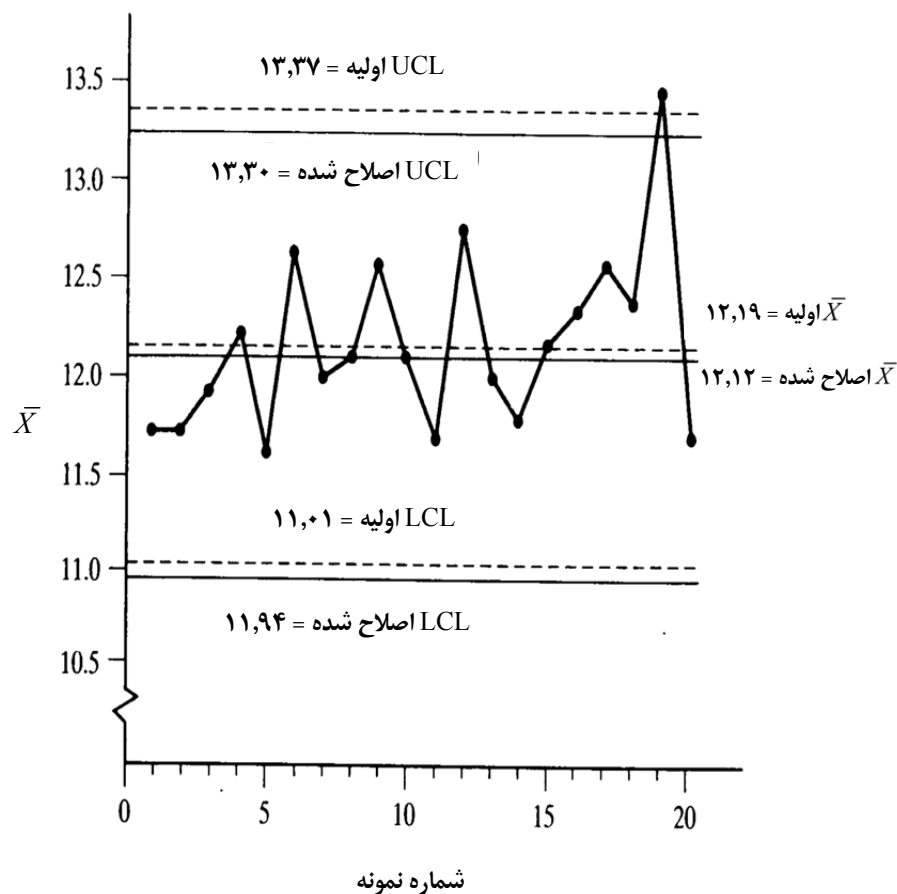
تعداد نمونه	مقدار نمونه‌ها						بازه R	میانگین X
1	11.3	10.5	12.4	12.2	12.0	11.7	1.9	
2	9.6	11.7	13	11.4	12.8	11.7	3.4	
3	11.4	12.4	11.7	11.4	12.4	11.9	1.0	
4	12	11.9	13.2	11.9	12.2	12.2	1.3	
5	12.4	11.9	11.7	11.6	10.5	11.6	1.9	
6	13.8	12.5	13.9	11.9	11.4	12.7	2.5	
7	13.3	11.6	13.2	10.7	11.4	12.0	2.6	
8	11.1	11.3	13.2	12.8	12.0	12.1	2.1	
9	12.5	11.9	13.8	11.6	13.0	12.6	2.2	
10	12.1	11.7	12.0	11.7	12.9	12.1	1.2	
11	11.7	12.6	12.3	11.2	10.8	11.7	1.8	
12	13.8	12.3	12.4	14.1	11.3	12.8	2.8	
13	10.6	11.8	13.1	12.8	11.7	12.0	2.5	
14	12.0	11.2	12.1	11.7	12.1	11.8	0.9	
15	11.5	13.1	13.9	11.9	10.7	12.2	3.2	
16	13.4	12.6	12.4	11.9	11.8	12.4	1.6	
17	12.1	13.1	14.1	11.4	12.3	12.6	2.7	
18	11.5	13.2	12.4	12.6	12.2	12.4	1.7	
19	13.8	14.2	13.5	13.2	12.8	13.5	1.4	
20	11.5	11.4	13.1	11.6	10.8	11.7	2.3	



شکل ۱۱-۳- یک چارت R برای داده‌های جدول ۱۱-۳

میانگین‌های ۲۰ نمونه اکنون می‌توانند رسم شود. مشاهده می‌شوند که نمونه ۱۹ از حد کنترل بالا تجاوز می‌کند. این بدان معنا است که در این نقطه از زمان، محیطی که این نمونه از آن گرفته شده است، الگوی پایداری از تغییرات را نشان نمی‌دهد. تغییرات خاصی بین نمونه‌گیری ۱۸ و ۱۹ رخ داده است. همچنین مشاهده می‌شود که پس از نمونه ۱۹، فرایند به حالت اولیه بازگشته است. می‌توان براساس درست بودن این اطلاعات عمل کرده و علت این تغییر شناسایی شود. اما می‌توان این‌طور برداشت کرد که میانگین نمونه ۱۹ به‌طور تصادفی و بدون هیچ علتی از حدود کنترل خارج شده و خطای نوع یک اتفاق افتاده است. در مقابل، ممکن است که این تغییر در الگو

پیش از نمونه ۱۸ صورت گرفته و به حالت اولیه برنگشته است که در این صورت خطای نوع دوم در نقاط دیگر اتفاق افتاده است.



شکل ۱۱-۴- یک چارت $\bar{X}$ برای داده‌های جدول ۱۱-۳

داده نمونه ۱۹ باید حذف شده و حدود کنترل با استفاده از داده‌های باقی مانده محاسبه شود. میانگین باقی مانده‌ی میانگین‌های نمونه‌ها ۱۲/۱۲ می‌شود. بازه دوباره مورد محاسبه قرار نمی‌گیرد.

و فرض می‌شود که تغییرات فرایند با حذف نمونه ۱۹ تغییری نکرده است. حدود کنترل به‌صورت زیر اصلاح می‌شود

$$UCL_{\bar{X}} = 12.12 + 5.77(2.05) = 13.30$$

$$LCL_{\bar{X}} = 12.12 - 0.577(2.05) = 10.94$$

این موارد در چارت کنترلی شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است و دوباره بررسی می‌شود که نمونه‌ای خارج از حدود کنترل نباشد. مشاهده می‌شود که دیگر نیازی به تغییر نیست و چارت کنترلی با حدود اصلاح شده در شکل ۴-۱۱ و چارت کنترلی شکل ۳-۱۱ را می‌توان اکنون برای پایش فرایند مورد استفاده قرار داد. این مدل کنترل را می‌توان برای آزمایش تغییرات فرایند در آینده مورد استفاده قرار داد.

۱۱-۳-۲- چارت‌های کنترل برای صفات

یک خصوصیت یا وضعیت سیستم گاهی اوقات به‌صورت دو مقداری نمایش داده می‌شود. یک سیستم دفاعی می‌تواند از نظر عملیاتی آماده باشد یا تحت نگهداری و تعمیرات باشد.

یک سطح از یک قطعه ممکن است قابل قبول باشد یا نباشد. یک خدمه نگهداری و تعمیرات ممکن است در حال کار باشد یا بیکار باشد. هنگامی که یک دسته‌بندی دو مقداری وجود دارد، نسبت مشاهده‌هایی که در یک دسته قرار می‌گیرند، طی یک دوره‌ی زمانی از پیش تعیین شده می‌توانند در گذر زمان در چارت p مورد پایش قرار گیرد.

مشاهده‌ها اغلب چند مقداره هستند، اما دسته‌بندی گسسته‌ای خواهند داشت. یک کارمند ممکن است در طی یک دوره دچار صفر، یک، دو یا چند حادثه شود. تعداد تقاضاها طی یک دوره مشخص برای یک سیستم تامین یک عدد گسسته است. یک مکانیک نگهداری و تعمیرات ممکن است وظیفه تخصیص داده شده به او را تمام و کمال انجام دهد یا ممکن است یک یا چند

خطا داشته باشد. هنگامی که دسته‌بندی گسسته انجام می‌شود، یک خصوصیت یا وضعیت سیستم را می‌توان با استفاده از چارت c در گذر زمان مورد پایش قرار داد.

چارت p . هنگامی که یک خصوصیت یا وضعیت نمونه‌گیری شده و سپس در یکی از دو دسته از پیش تعیین شده قرار می‌گیرد، بخشی از واحدهایی را که در یک دسته قرار می‌گیرند، می‌توان در گذر زمان توسط یک چارت p کنترل کرد. توزیع احتمال مورد استفاده توزیع دو جمله‌ای است. میانگین این توزیع و انحراف معیار آن را همان‌طور که در معادله ۱۳-۴ نشان داده شده است، می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\mu = np$$

$$\sigma = \sqrt{np(1-p)}$$

این پارامترها را می‌توان به صورت نسبت‌هایی توسط تقسیم اندازه نمونه، n ، بیان داشت.

اگر $\bar{p}$ به صورت یک تخمین از پارامتر نسبی μ/n باشد، و s_p تخمینی از σ/n باشد، آنگاه این آماره‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

$$\bar{p} = \frac{\text{total number in the class}}{\text{Total number of observations}} \quad (9-11)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (10-11)$$

کاربرد چارت p با یک مثال از یک مطالعه نمونه‌برداری از فعالیت نشان داده می‌شود. این تکنیک اندازه‌گیری فعالیت، اطلاعاتی در مورد فعالیت‌های کارگران یا ماشین‌ها به دست می‌دهد که اغلب در زمانی کمتر و هزینه‌ای پایین‌تر نسبت به روش‌های مرسوم جمع‌آوری می‌شود. مشاهده‌های تصادفی و آنی با دسته‌بندی فعالیت در یک نقطه‌ی زمانی به یک و تنها یک دسته صورت می‌گیرد. در ساده‌ترین شکل، دسته‌های بیکار و مشغول استفاده می‌شود. چارت کنترل

برای مطالعات نمونه‌گیری از کارهایی مفید است که در آن نسبت مشاهده‌ها می‌توانند در کنترل بودن را تایید کنند.

حالتی را در نظر بگیرید که در آن یک مطالعه‌ی نمونه‌گیری از فعالیت‌هایی شامل پایانه‌های رایانه‌ای در یک دفتر کار مدنظر است. هدف، تعیین بخشی از زمانی است که پایانه‌ها در حال استفاده هستند، در مقابل زمان‌هایی که بیکارند. یکصد مشاهده در هر روز در همه روزهای کاری یک ماه برداشت شده است. تعداد زمان‌هایی که پایانه‌ها مشغول به کار هستند و نسبت آن در هر روز در جدول ۴-۱۱ ارائه شده است. از این جدول و معادله ۹-۱۱، $\bar{p}$ به صورت زیر به دست می‌آید

$$\bar{p} = \frac{546}{(21)(100)} = 0.260$$

جدول ۴-۱۱ - تعداد زمان‌ها در روز که پایانه‌ها در حال استفاده بوده‌اند

نسبت	زمان‌های استفاده	روز کاری	نسبت	زمان‌های استفاده	روز کاری
0.46	46	12	0.22	22	1
0.31	31	13	0.33	33	2
0.24	24	14	0.24	24	3
0.22	22	15	0.20	20	4
0.22	22	16	0.18	18	5
0.29	29	17	0.24	24	6
0.31	31	18	0.24	24	7
0.21	21	19	0.29	29	8
0.26	26	20	0.18	18	9
0.24	24	21	0.27	27	10
	546	مجموع	0.31	31	11

انحراف معیار داده‌ها با استفاده معادله ۱۱-۱۰ به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$s_p \sqrt{\frac{(0.26)(0.74)}{100}} = 0.044$$

با داشتن $\bar{p} = 0.26$ به عنوان بهترین تخمین از نسبت جمعیت، اکنون یک چارت کنترلی را می‌توان ساخت. حدود کنترل در نمونه‌گیری از فعالیت اغلب به صورت $\bar{p} \pm 2s_p$ تعیین شده و این حدود، هر روز تغییر نمی‌کند، زیرا اندازه‌ی نمونه در هر روز ثابت نگه داشته شده است. با این حدود کنترل، احتمال اتفاق افتادن خطای نوع اول به صورت $\alpha = 0.0456$ تعریف می‌شود اگر توزیع نرمال به عنوان توزیع تقریبی استفاده شده باشد. چنین تقریبی برای این مثال می‌تواند درست باشد زیرا در توزیع دو جمله‌ای وقتی $n > 50$ و $0.20 < p < 0.80$ باشد توزیع نرمال می‌تواند تقریبی از توزیع دو جمله‌ای باشند. اگر این پیش نیازها وجود نداشته باشد یا تخمین دقیق‌تری نیاز باشد، باید از توزیع دو جمله‌ای استفاده کرد. حدود کنترل برای چارت p تعریف شده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} UCL_p &= \bar{p} + 2s_p \\ &= 0.260 + 2(0.044) = 0.348 \end{aligned} \quad (11-11)$$

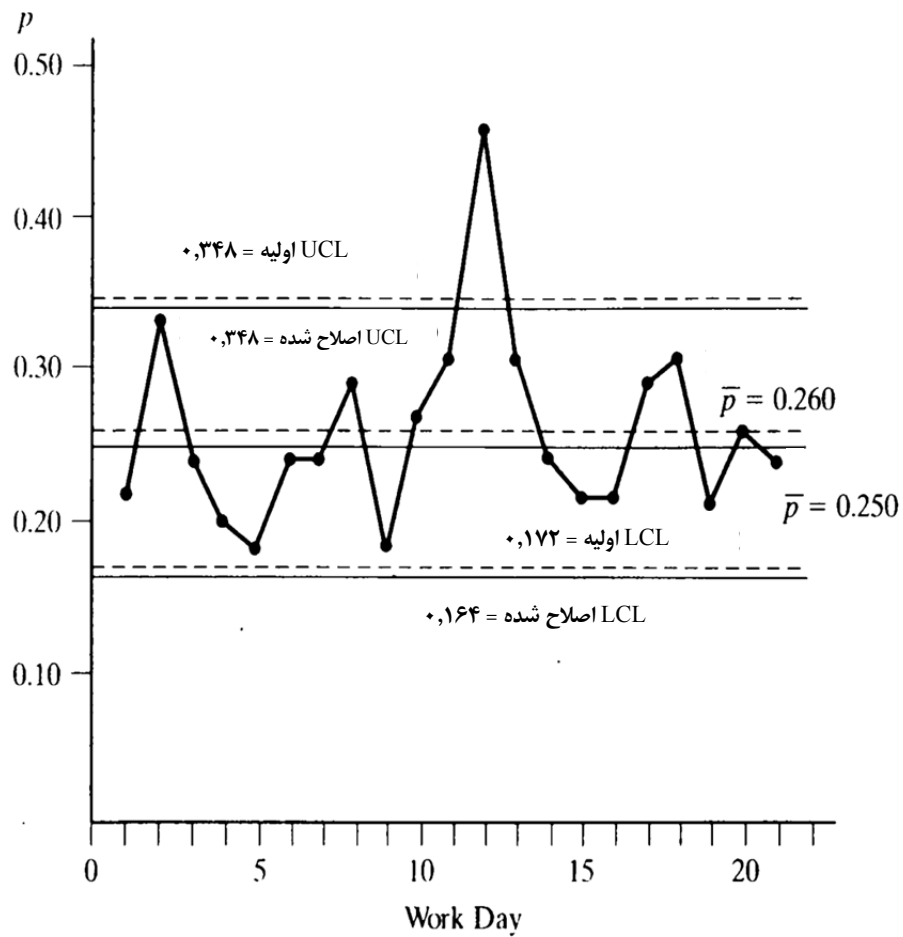
$$\begin{aligned} LCL_p &= \bar{p} - 2s_p \\ &= 0.260 - 2 = 0.172 \end{aligned} \quad (12-11)$$

چارت p به صورتی که در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده است، ساخته می‌شود. یک نمودار از داده‌ها مشخص می‌کند که روز ۱۲ یک روز عادی در استفاده از پایانه‌ها نبوده است. بررسی‌های بعدی نشان می‌دهند که کارکنان یک دفترکار دیگر در آن روز از پایانه‌های دفترکار استفاده

می‌کردند. از آن‌جا که این مورد یک نمونه غیرعادی است، این نمونه حذف شده و میانگین و انحراف معیار به‌صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$\bar{p} = \frac{500}{(20)(100)} = 0.250$$

$$s_p = \sqrt{\frac{(0.25)(0.75)}{100}} = 0.043$$



شکل ۱۱-۵- یک چارت p برای استفاده از پایانه‌ها

حدود کنترل اصلاح شده را می‌توان اکنون به طریق زیر محاسبه کرد و در چارت قرار داد.

$$\begin{aligned} UCL_p &= \bar{p} + 2s_p \\ &= 0.250 + 2(0.043) = 0.336 \\ LCL_p &= \bar{p} - 2s_p \\ &= 0.250 - 2(0.043) = 0.164 \end{aligned}$$

مشاهده می‌شود که هیچ روز دیگری خارج از این حدود قرار نمی‌گیرد و چارت حاضر و داده‌های آن، بدون در نظر گرفتن روز ۱۲، را می‌توان به‌عنوان یک الگوی پایدار از تغییرات در استفاده از پایانه مورد استفاده قرار داد. انحراف‌ها از این وضعیت تحت کنترل را می‌توان مشاهده کرد و کارهای کنترلی مناسب را در قبال آن‌ها انجام داد.

چارت c. برخی سیستم‌ها، خصوصیات از خود نشان می‌دهند که می‌توان به‌صورت عددی آن‌ها را بیان کرد. برای مثال، تعداد ورودها در ساعت به یک عوارضی برای تصمیم‌گیری در مورد قابلیت خدمت‌دهی به ورودی‌ها باید مشخص شود. اگر تعداد ورودی‌ها در ساعت از الگوی پایدار تغییرات منحرف شود، ممکن است لازم شود که این انحراف با باز کردن یا بستن یک کیوسک جبران شود.

توزیع پواسون اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد تا تعداد ورودها در هر دوره‌ی زمانی را مشخص کند. در این‌جا، فرصت اتفاق افتادن یک رویداد، n ، زیاد است اما احتمال اتفاق افتادن هر کدام، p ، کوچک است. میانگین و واریانس توزیع پواسون معادل $\mu = \sigma^2 = np$. این پارامترها را می‌توان از آماره‌های $\bar{c}$ و s_c^2 تخمین زد. در بسیاری از موارد، مقادیر n و p را نمی‌توان تعیین کرد اما حاصل ضرب آن‌ها یعنی np قابل محاسبه است.

در نتیجه میانگین و واریانس به صورت زیر تخمین زده می‌شود

$$\bar{c} = s_c^2 = \frac{\sum(np)}{n} \quad (۱۱-۱۳)$$

جدول ۱۱-۵- تعداد ورودها در ساعت در عوارضی

شماره ساعت	np تعداد ورودها	شماره ساعت	np تعداد ورودها
۱	۶	۱۱	۶
۲	۴	۱۲	۴
۳	۳	۱۳	۲
۴	۵	۱۴	۲
۵	۴	۱۵	۴
۶	۶	۱۶	۸
۷	۵	۱۷	۲
۸	۴	۱۸	۳
۹	۲	۱۹	۵
۱۰	۵	۲۰	۴
		مجموع = ۸۴	

کاربرد چارت c برای فرایند ورود به عوارضی را مدنظر قرار دهید. داده‌ها برای ۲۰ ساعت گذشته جمع‌آوری شده و در جدول ۱۱-۵ نشان داده شده است. میانگین جمعیت ورودی را می‌توان از معادله ۱۱-۱۳ به صورت زیر محاسبه کرد

$$\bar{c} = \frac{80}{24} = 4.20$$

و انحراف معیار را می‌توان به صورت زیر تخمین زد

$$\begin{aligned}s_c &= \sqrt{\bar{c}} \\ &= \sqrt{4.20} = 2.05\end{aligned}$$

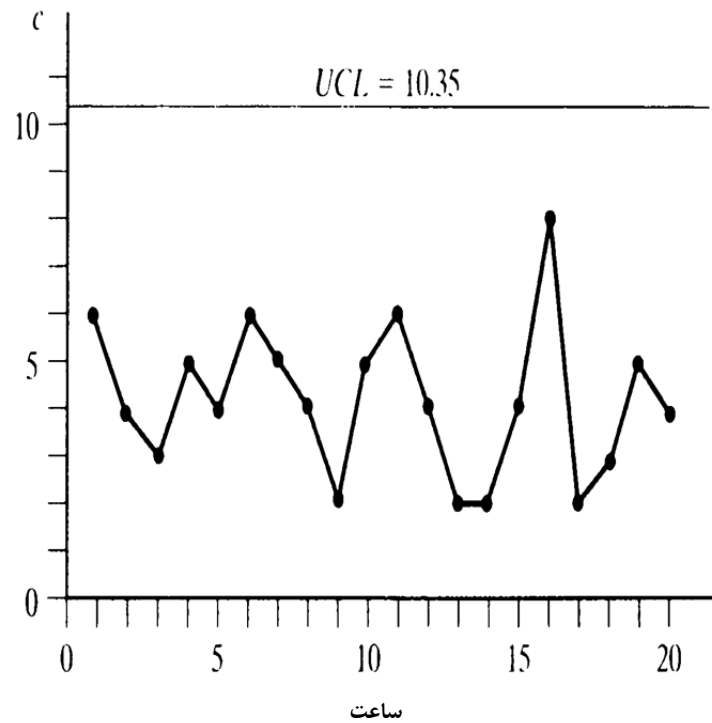
با این تخمین‌ها، چارت کنترلی را می‌توان اکنون ساخت. حدود کنترل به صورت $\bar{c} \pm 2s_c$ مشخص می‌شوند. احتمال خطای نوع یک را می‌توان از مقادیر تجمعی از جدول آماری مربوطه به دست آورد. برای مثال مدنظر،

$$\begin{aligned}UCL_c &= \bar{c} + 3s_c \\ &= 4.2 + 3(2.05) = 10.35\end{aligned}\quad (11-14)$$

$$\begin{aligned}LCL_c &= \bar{c} - 3s_c \\ 4.2 - 3(2.05) &< 0\end{aligned}\quad (11-15)$$

هیچ حد پایینی وجود ندارد. احتمال خطای نوع اول احتمال آن است که بیش از ۱۱ ورودی در یک ساعت در جمعیت با $\bar{c} = 4.2$ اتفاق افتد. این احتمال برابر است با یک منهای احتمال وقوع ۱۰ ورود یا کمتر یا به عبارتی $1 - 0.994 = 0.006$. از طرفی، حد کنترل می‌تواند به عنوان حد احتمال تعریف شود. اگر تعریف $\alpha \leq 0.01$ مطلوب باشد، حد کنترل باید در $9/5$ تنظیم شود. تحت این سیاست کنترلی، احتمال شناسایی ۱۰ یا بیش‌تر از ۱۰ ورود شرط $\alpha \leq 0.01$ برآورده شود.

در چارت c در شکل ۱۱-۶ همه مقادیر بین حدود کنترل قرار دارد و چارت را همان‌طور که ساخته شده است، می‌توان مورد استفاده قرار داد. کارهایی برای برآورده شدن الگوی تقاضای جدید باید صورت گیرد. در همین زمان، یک چارت جدید بر پایه آخرین داده‌ها ساخته و پیاده‌سازی می‌شود. در این مسیر، تصمیم گیرنده از شرایط سیستم که برای اصلاح سیاست عملیاتی نیاز است، آگاه می‌شود.



شکل ۱۱-۶- یک چارت C برای تعداد ورودها در ساعت

۱۱-۴- سیاست کنترل بهینه

یک چارت کنترل آماری باید برای پایش جواب بهینه که از مدل تصمیم‌گیری به‌دست آمده است، مورد استفاده قرار گیرد. بسیاری از مدل‌های تصمیم‌گیری نیازمند پایش هستند زیرا آن‌ها به طور خودکار نمی‌توانند عدم پایداری را در شرایط تصمیم‌گیری اقتباس کنند.

این مدل‌ها اغلب در نقطه‌ای از زمان با یک مجموعه مشخص از پارامترهای ورودی فرمول‌بندی می‌شوند. یک جواب از یک مدل تصمیم، تنها تا زمانی بهینه است که پارامترهای ورودی مقادیر اولیه را حفظ کرده باشند.

کنترل سیاست بهینه برای موردی که در آن یک فاکتور خدمت‌دهی بهینه برای یک وضعیت نگه‌داری و تعمیرات تعیین شده است، نشان داده می‌شود. هنگامی که فاکتور خدمت‌دهی که کم‌ترین هزینه را برای عملیات دارد به دست می‌آید، مطلوب است که یک مدل کنترلی برای شناسایی آثار یک تغییر در نرخ ورود یا نرخ خدمت‌دهی یا هر دو پیاده‌سازی شود. این موضوع را می‌توان با ساخت یک چارت کنترل برای تعداد ماشین‌هایی که کار نمی‌کنند، انجام داد. چارت‌های کنترل آماری که ارائه شد نمی‌توانند به‌طور مستقیم برای این متغیر استفاده شوند، زیرا توزیع آن به شدت دارای انحراف شده است. شکل انتظاری توزیع از قبل معلوم است؛ با این حال، یک فاکتور اغلب در دیگر کاربردهای کنترلی از قلم می‌افتد.

به‌عنوان یک مثال از چارت‌های کنترل در عملیات خط انتظار، فرض کنید که یک کارگر برای N ماشین وجود دارد. تصور کنید که ۲۰ ماشین خودکار باید توسط یک کارگر راه‌اندازی شده و کار کنند و فاکتور خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه ۰/۰۳ است. فرض شده است که ماشین‌ها نیازمند زمان خدمت‌دهی با توزیع تصادفی هستند به‌صورتی که زمان‌های خدمت‌دهی توزیعی نمایی داشته و ماشین‌های با قانون FIFO خدمت‌دهی می‌شوند. احتمال آن که n ماشین در صف و در خدمت‌دهی (در حال کار نباشند) به‌صورت زیر به دست می‌آید

$$P_n = \frac{N!}{(N-n)!} \rho^n P_0 \quad (11-16)$$

که در آن

$$P_n = \text{احتمال آن که } n \text{ ماشین در یک نقطه زمانی در حال کار نباشند}$$

$$P_0 = \text{احتمال آن - که همه ماشین‌ها در یک نقطه زمانی در حال کار باشند}$$

$$\rho = \text{نسبت } \lambda / \mu$$

N = تعداد ماشین‌های تخصیص داده شده

n = تعداد ماشین‌هایی که در یک نقطه زمانی کار نمی‌کنند

مقادیر P_n در ستون C در جدول ۱۱-۶ برای $0 \leq n \leq N$ ارائه شده است. اولین ورودی با تقسیم اولین ورودی در ستون B بر 2.30005387 به دست می‌آید. دومین خروجی با تقسیم دومین مقدار از ستون B بر مقدار مشابه قبلی به دست می‌آید و بقیه مقادیر نیز به همین منوال به دست می‌آید. نتایج برای P_n در شکل ۱۱-۷ ترسیم شده است. توزیع n به نظر بسیار نامنظم می‌آید و به شدت محدب است. بر خلاف برخی کاربردهای چارتهای کنترلی، توزیع متغیری که باید کنترل شود مشخص است. این موضوع می‌تواند در تعیین حدود کنترل مورد استفاده قرار گیرد.

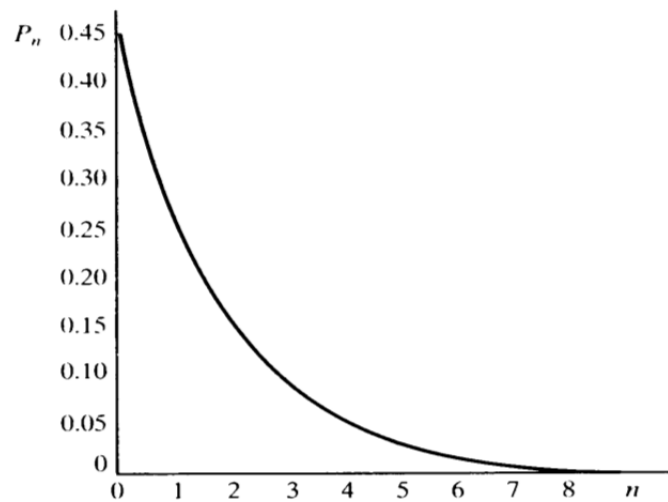
بنابراین که احتمال آن که همه ماشین‌ها در حال کار باشند ۰/۴۳۵ است، حد کنترل صفر می‌شود. حد بالای کنترل تنها چیزی است که باید تعیین شود زیرا متغیر n تنها از بالا می‌تواند از کنترل خارج شود. بنابراین، کل بازه بحرانی در حد بالای توزیع اتفاق می‌افتد. مطلوب است که این حد طوری تنظیم شود که مکرراً از آن تجاوز نشود. از آن‌جا که n یک عدد صحیح است، بزرگی بازه بحرانی را می‌توان به عنوان تابعی از n در ستون D در جدول ۱۱-۶ مشاهده کرد. اگر شش ماشین بیکار به عنوان یک نقطه تحت کنترل انتخاب شود و هفت نقطه خارج از کنترل باشد، احتمال تصور خارج از کنترل بودن سیستم در حالی که سیستم تحت کنترل است به صورت زیر به دست می‌آید

$$1 - \sum_{n=0}^6 P_n = 0.0059$$

جدول ۱۱-۶- محاسبات P_n و $\sum P_n$

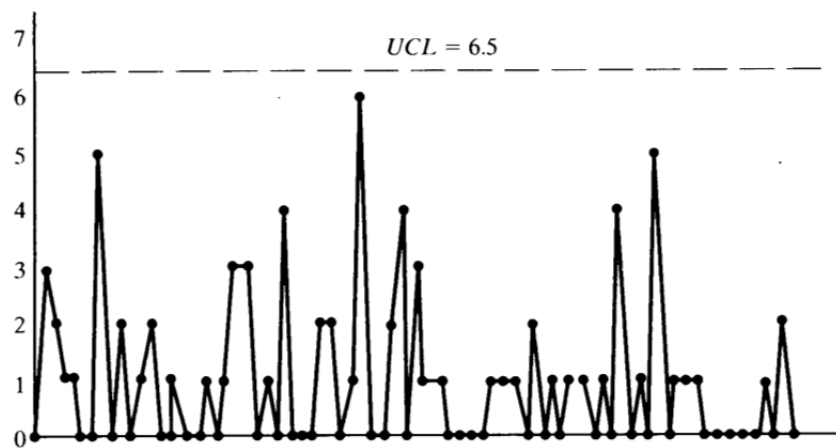
T n (A)	P_n P_0 (B)	P_n (C)	(D)
0	1.000000000	0.434772422	0.434772422
1	0.600000000	0.260863453	0.695635875
2	0.342000000	0.148692168	0.844328043
3	0.184680000	0.080293771	0.924621814
4	0.094186800	0.040949823	0.965571637
5	0.045209664	0.019655915	0.985227552
6	0.020344349	0.008845162	0.994072714
7	0.008544627	0.003714968	0.997787682
8	0.003332405	0.001448838	0.999236520
9	0.001199666	0.000521582	0.999758102
10	0.000396890	0.000172122	0.999930224
11	0.000395890	0.000051637	0.999981861
12	0.000032067	0.000013943	0.999995803
13	0.000006796	0.000003346	0.999999149
14	0.000001616	0.000000703	0.999999852
15	0.000000291	0.000000127	0.999999979
16	0.000000044	0.000000019	0.999999998
17	0.000000005	0.000000002	1.000000000
18	0.000000000	0.000000000	1.000000000
19	0.000000000	0.000000000	1.000000000
20	0.000000000	0.000000000	1.000000000

2.300053887



شکل ۱۱-۷- توزیع احتمالی ماشین‌هایی که کار نمی‌کنند

بنابراین، یک حد کنترلی تنظیم شده در $6/5$ کفایت می‌کند. چارت کنترلی برای یک بازه‌ی زمانی عملیاتی را می‌توان در شکل ۱۱-۸ مشاهده کرد. می‌توان چنین برداشت کرد که فاکتور خدمت‌دهی طی دوره بررسی تغییر نکرده است.



شکل ۱۱-۸- چارت کنترل برای تعداد ماشین‌هایی که کار نمی‌کنند

برای این که استفاده از این چارت معتبر باشد، دو شرط باید معتبر باشد. اول، مشاهده‌ها باید در زمان‌های تصادفی انجام شود. دوم، مشاهده‌ها نباید با فاصله‌های زمانی مناسب انجام شود تا شرط استقلال مشاهده‌ها برآورده شود. برای مثال، اگر میانگین زمان خدمت‌دهی ۵ دقیقه و اگر تعداد ۶ ماشین در یک مشاهده بیکار باشند، آنگاه مشاهده بعدی پس از ۱۰ دقیقه احتمال حداقل چهار ماشین بیکار را نتیجه می‌دهد. مشاهده‌ها باید به اندازه‌ی کافی دور از هم انجام شوند تا یک خط انتظار مشخص سرویس‌دهی شده باشد. برای حصول اطمینان از تصادفی بودن و وجود فاصله بین مشاهده‌ها، همه اعداد از ۴۵ تا ۹۰ باید از یک جدول اعداد تصادفی که ترتیب آن حفظ شده است استفاده کرد: یعنی اعداد ۰۰ تا ۴۴ و ۹۱ تا ۹۹ باید حذف شوند. در ادامه از این اعداد می‌توان برای فاصله دادن بین مشاهده‌ها استفاده کرد. این کار منجر به یک میانگین از ۸ مشاهده تصادفی در روز می‌شود که باید بین هر کدام حداقل ۴۵ دقیقه فاصله باشد و نباید فاصله بین مشاهده‌ها بیش از ۹۰ دقیقه باشد.

اگر چارت کنترل مشخص کند که n دیگر تحت کنترل نیست، فعالیت‌های اصلاحی باید انجام شوند. این کار نیاز به بازرسی دارد تا تعیین شود که آیا فاکتور خدمت‌دهی تغییر کرده است یا نه، زیرا تغییر در میانگین زمان بین تقاضا برای خدمت‌دهی یا یک تغییر در میانگین زمان خدمت‌دهی، یا هر دو را نشان می‌دهد. آیتم‌های مشخصی که می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند سیاست نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه، عمر ماشین‌ها، قابلیت کابران یا خصوصیات مواد هستند. به محض آن که علتی برای وضعیت خارج از کنترل پیدا شود، باید اصلاح شده و سیستم به شرایط عملیاتی بهینه بازگردد.

۱۱-۵- کنترل پروژه با CMP و PERT

یک پروژه از یک سری از فعالیت‌های هدایت شده برای انجام یک هدف مطلوب تشکیل شده است. اکثر پروژه‌ها، غیرتکرار شونده بوده و تصمیم گیرنده با وضعیتی مواجه است که در آن

تجربه و دانش قبلی برای کنترل آن وجود ندارد. بنابراین، تکنیک‌های کنترل پروژه باید این شرایط را برآورده کنند: (۱) طی فاز برنامه‌ریزی پروژه، آن‌ها باید یک برنامه منطقی و در صورت امکان بهینه برای پروژه تعیین کنند؛ و (۲) طی اجرای یک پروژه، باید پیشرفت پروژه را در مقابل برنامه تعیین شده مورد ارزیابی قرار دهند.

برنامه‌ریزی و کنترل یک پروژه در مقیاس بزرگ توسط یک شبکه از فعالیت‌ها به‌عنوان واسطه برنامه‌ریزی و کنترل انجام می‌شود. تکنیک‌های برنامه‌ریزی و کنترل را می‌توان به‌صورت قطعی (CPM) و در حالت احتمالی (PERT) دسته‌بندی کرد.

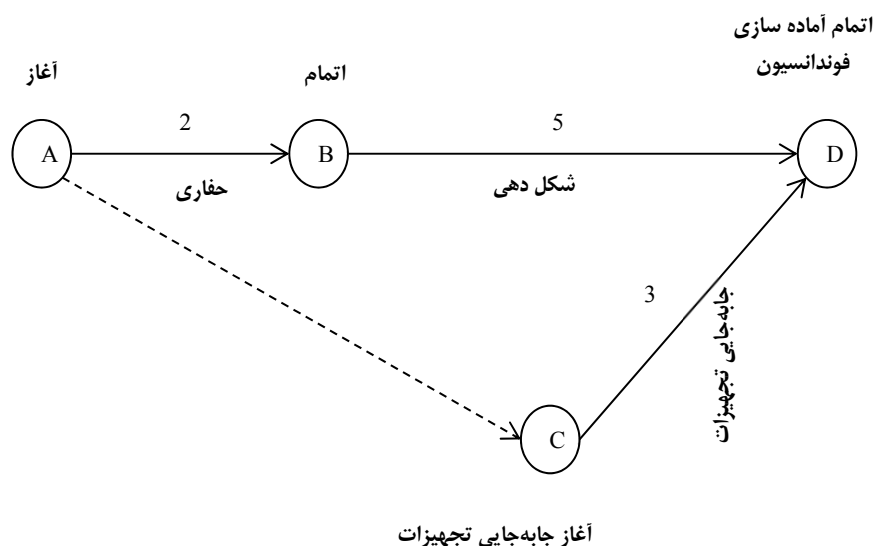
CPM و PERT ساختار منطقی مشابهی دارند. پروژه‌ها، به‌وسیله‌ی مجموعه‌هایی از فعالیت‌های موردنیاز همراه با تفاوت بنیادی در تخمین زمان موردنیاز برای تکمیل هر فعالیت نمایش داده می‌شوند. در PERT، زمان فعالیت یک متغیر تصادفی با یک توزیع احتمالی فرض شده در نظر گرفته می‌شود.

۱۱-۵-۱- روش‌های مسیر بحرانی

بسیاری از پروژه‌های مهندسی شامل طراحی، توسعه و استقرار عملیات، طبیعتی تکرار شونده ندارند. اگرچه یک پروژه خاص باید یکبار اجرا شود، اما نیاز به بسیاری از فعالیت‌های وابسته به هم وجود دارد. برخی باید هم‌زمان انجام شوند. هر کدام نیازمند کارکنان و تجهیزات هستند که به منابع تخصیص داده شده بستگی دارند. کل مدت زمان پروژه و هزینه کل آن به فعالیت‌ها در مسیر بحرانی و منابع اختصاص داده شده به آن‌ها بستگی دارد. روش‌های مسیر بحرانی برای مواجهه با این وضعیت در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

شبکه فعالیت‌ها و رخدادها. یک شبکه پایه و اساس ساختار روش‌های مسیر بحرانی است. این شبکه برای نمایش روابط بین فعالیت‌های یک پروژه استفاده می‌شود. شکل ۱۱-۹ یک شبکه را

نشان می‌دهد که فعالیت‌ها و رخدادهای به هم مربوط را برای آماده‌سازی فوندانسیون به تصویر کشیده است. چهار رخداد و سه فعالیت نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۹- شبکه فعالیت- رخداد برای آماده کردن فوندانسیون

یک رخداد در CPM به صورت دایره نشان داده می‌شود. این دایره اتمام یک فعالیت را مشخص می‌کند. در مورد یک فعالیت اولیه، شروع پروژه یا آغاز فعالیت‌های مربوطه را نشان می‌دهد. رخدادهای A و C در شکل ۱۱-۹ به ترتیب آغاز حفاری و آغاز جابه‌جایی تجهیزات را نشان می‌دهند. رخداد D نمایانگر اتمام آماده‌سازی فوندانسیون است.

فعالیت‌ها در CPM به صورت یک پیکان نشان داده می‌شوند که دو رخداد را به هم وصل می‌کنند. این رخدادها کوشش موردنیاز برای تکمیل یک رخداد را در واحدهای زمانی نشان می‌دهند. جهت آن‌ها ترتیبی را نشان خواهند داد که رخدادها باید اتفاق افتند. برای مثال، فعالیت BD (شکل‌دهی) و CD (جابه‌جایی تجهیزات) برای دستیابی به رخداد D (تکمیل آماده‌سازی

فوندانسیون) لازم هستند. رابطه پیش‌نیازی بین رخدادهای D و B و بین رخدادهای D و C توسط پیکان‌ها نمایش داده می‌شود. رخدادهای B و C باید پیش از رخداد D (فوندانسیون آماده) انجام شوند.

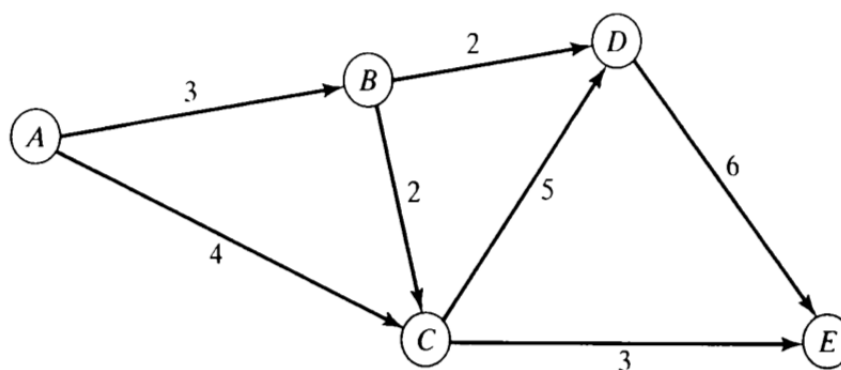
در نمایش برخی شبکه‌ها لازم است که فعالیت‌های موهومی ایجاد شوند تا روابط پیش‌نیازی واضح گردند. یک فعالیت موهومی در شکل ۹-۱۱ توسط یک پیکان خط چین نشان داده شده است که رخداد A را به رخداد C وصل می‌کند و مشخص می‌کند رخداد C پس از رخداد A قرار دارد. اگرچه فعالیت‌های موهومی نیاز به زمان ندارند و منبعی مصرف نمی‌کنند، ممکن است زمان تکمیل یک پروژه را با استقرار ترتیبی که رخدادها باید به وقوع پیوند تغییر دهد.

هر فعالیت دارای یک زمان تخمینی برای انجام است. این تخمین اغلب بالای پیکان در شبکه نشان داده می‌شود. لازم نیست که طول پیکان نسبتی از طول فعالیت باشد. در شکل ۹-۱۱ تخمین زمان‌ها به هفته نوشته شده است.

دو زمان قطعی دیگر برای هر رخداد شناسایی می‌شوند. اولین آن‌ها زودترین زمان، T_E که زمان تقویمی را که در آن رخداد اتفاق می‌افتد، مشخص می‌کند با این فرض که همه فعالیت‌های قبلی در زودترین زمان ممکن اتفاق بیافتند. دومی دیرترین زمان، T_L ، برای هر رخداد است که دیرترین زمان تقویمی است که فعالیت در آن تکمیل می‌شود بدون این که تاخیری در فعالیت‌های پس از آن و تکمیل پروژه ایجاد شود.

تفاوت بین زودترین و دیرترین زمان‌ها برای هر فعالیت فرجه زمانی برای یک رخداد را تعریف می‌کند. فرجه با مقدار مثبت برای یک رخداد، بیش‌ترین زمانی را مشخص می‌کند که در انجام یک فعالیت می‌توان تاخیر داشت و هیچ تاخیری در انجام فعالیت‌های بعدی و زمان کل پروژه ایجاد نشود. در مثال فوق، رخداد B هیچ فرجه‌ای ندارد زیرا دیرترین زمان برای تکمیل حفاری و

زودترین زمان برای شکل‌دهی یک نقطه زمانی مشابه هستند. هر تاخیری در رسیدن به رخداد B یک تاخیر در پروژه ایجاد می‌کند. از این جهت، بدیهی است که فعالیت‌های حفاری و شکل‌دهی فعالیت‌های بحرانی هستند. فعالیت جابه‌جایی تجهیزات برای رخداد D غیربحرانی است، زیرا شروع جابه‌جایی تجهیزات در هر زمانی پیش از ۳ هفته جلوتر از تکمیل پروژه می‌تواند انجام شود. بنابراین، چهار هفته فرجه زمانی برای رخداد C وجود دارد.



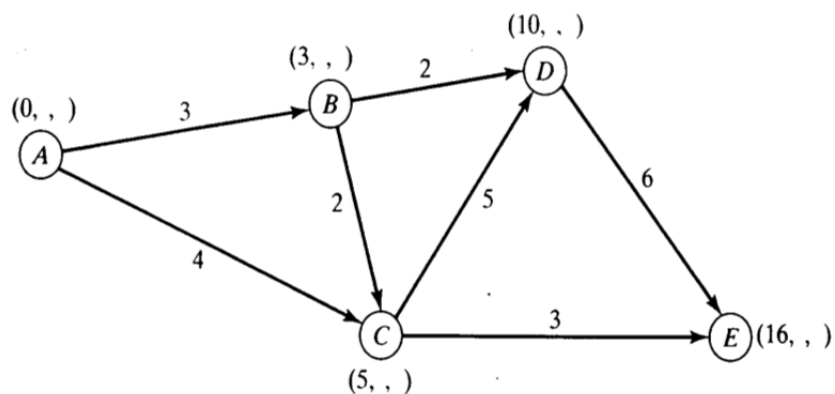
شکل ۱۱-۱۰- یک شبکه برای ایجاد یک ساختار مشخص

پیدا کردن مسیر بحرانی. در CPM همه فعالیت‌های بحرانی باید شناسایی شده و مورد توجه ویژه قرار گیرند. این موضوع یک الزام است زیرا هر تاخیری در انجام این فعالیت‌ها می‌تواند به یک تاخیر در فعالیت‌های بعدی و کل پروژه منجر شود. اغلب این امکان وجود دارد که مسیر بحرانی با ردیابی فعالیت‌ها در یک توالی از رخدادها که دارای فرجه زمانی صفر هستند، شناسایی شود. مجموع زمان‌های فعالیت‌ها در مسیر بحرانی کوتاه‌ترین زمان ممکن برای تکمیل پروژه را نشان می‌دهد. در مثال فوندانسیون این مقدار ۷ هفته است.

به‌عنوان یک مثال از یک رویه نظام‌مند برای شناسایی مسیر بحرانی، یک پروژه را در نظر بگیرید که نیازمند ایجاد یک ساختار مشخص است. ۵ رخداد اصلی و هفت فعالیت باید انجام شوند

که در شکل ۱۰-۱۱ نشان داده شده است. اعداد نشان داده شده روی هر پیکان زمان تخمینی انجام هر پروژه به ماه است و پیکان‌ها رابطه پیش‌نیازی را نشان می‌دهد. رویه پیدا کردن مسیر بحرانی با تعیین زودترین و دیرترین زمان‌ها برای هر رخداد انجام می‌شود. با تفریق T_E از T_L برای هر رخداد، فرجه زمانی پیدا می‌شود. برای تسهیل این فرایند هر رخداد به صورت (T_E, T_L, S) برچسب‌گذاری می‌شود که در آن S نمایانگر فرجه زمانی رخداد است. ابتدا، $T_E S$ برای هر رخداد تعیین شده و به صورت (T_E) برچسب‌گذاری می‌شود. سپس، $T_L S$ به دست آمده و برچسب به صورت (T_E, T_L) در می‌آید. در نهایت، S با تفریق T_E از T_L به دست آمده و برچسب (T_E, T_L, S) برای هر رخداد تکمیل می‌شود.

زودترین زمان برای هر رخداد، با اضافه کردن زودترین زمان برای رخداد پیشین به زمان فعالیت متصل‌کننده دو رخداد به دست می‌آید. هنگامی که تعداد رخدادهای پیش‌نیاز بیش از یکی باشد، بزرگ‌ترین مقدار به عنوان زودترین زمان برای رخداد مدنظر انتخاب می‌شود. فرایند تعیین این زودترین زمان‌ها از اولین رخداد شروع به جلو حرکت می‌کند که فرض شده است زودترین زمان برای آن زمان صفر است. این فرایند در شکل ۱۱-۱۱ و جدول ۱۱-۷ برای مثال مدنظر نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۱۱- زودترین زمان برای هر رخداد

جدول ۱۱-۷- محاسبات زودترین زمان‌ها

رخداد	پیش‌نیاز	T_E برای پیش‌نیاز به علاوه زمان فعالیت	بیش‌ترین مجموع = زودترین زمان
A	هیچ	$0+0=0$	0
B	A	$0+3=3$	3
C	A	$0+4=4$	
	B	$3+2=5^*$	5
D	B	$3+2=5$	
	C	$5+5=10^*$	10
E	C	$5+3=8$	
	D	$10+6=16$	16

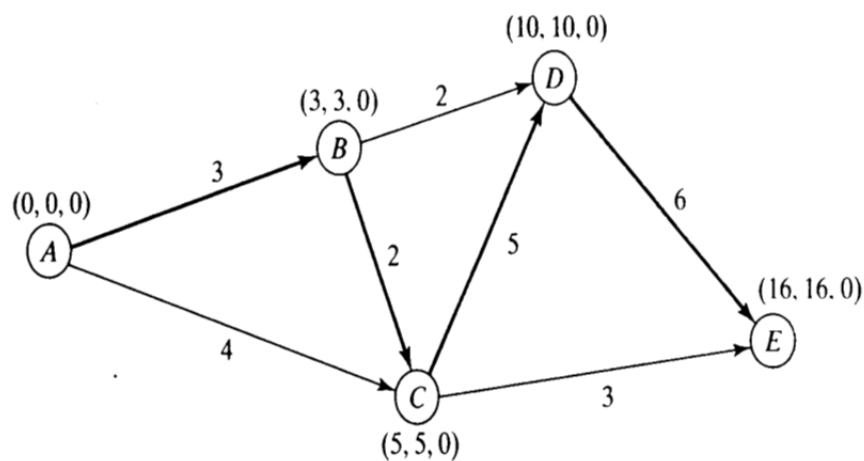
دیرترین زمان برای هر رخداد را می‌توان به روشی مشابه روش پیدا کردن زودترین زمان‌ها تعیین کرد با این تفاوت که فرایند از آخرین رخداد شروع شده و رو به عقب پیشروی می‌کند.

دیرترین زمان برای آخرین رخداد با زودترین زمان برای آن رخداد یکی است، اگر این چنین نباشد، پروژه دچار تاخیر می‌شود. برای هر رخداد، دیرترین زمان با تفریق زمان انجام فعالیتی که رخداد را به رخداد پس‌نیاز وصل می‌کند از دیرترین زمان رخداد پس‌نیاز به‌دست می‌آید. اگر بیش از یک رخداد پس‌نیاز وجود داشته باشد، کم‌ترین اختلاف به‌عنوان دیرترین زمان برای رخداد مدنظر انتخاب می‌شود. در نهایت یک فرجه زمانی برای هر رخداد به‌دست می‌آید که در شکل ۱۱-۱۲ و ۱۱-۸ نشان داده شده است.

مسیر بحرانی اکنون با استفاده از مقادیر T_L ، T_E و S که در شکل ۱۱-۱۲ نشان داده شده است، قابل شناسایی است. این کار با ردیابی همه رخدادهای با فرجه زمانی صفر و مشاهده آن‌ها به‌صورت یک مسیر انجام می‌شود. در این مثال، مسیر بحرانی $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ و زمان کمینه پروژه برابر با ۱۶ ماه خواهد بود.

جنبه‌های اقتصادی CPM. مثال بالا CPM تحت این فرض ارائه شد که فعالیت‌ها با زمان نرمال و تخصیص نرمال منابع اجرا می‌شوند. به این حالت *زمان‌بندی نرمال* گفته می‌شود. هنگامی که یک یا چند فعالیت با منابع اضافی انجام می‌شوند تا زمان اجرای آن‌ها کاهش یابد، *زمان‌بندی خرد شده*^۱ وجود خواهد داشت.

دو هزینه در یک پروژه وجود دارد. برای هر فعالیت هزینه‌های مستقیم وجود دارد. این هزینه‌ها با افزایش در منابع تخصیص داده شده با هدف کاهش زمان فعالیت افزایش می‌یابند. هزینه‌های غیرمستقیم مربوط به طول اجرای کل پروژه می‌شوند. این فعالیت‌ها با نسبتی مستقیم به یک افزایش در کل زمان موردنیاز برای اتمام پروژه منتهی می‌گردند.



شکل ۱۱-۱۲- برچسب‌گذاری رخدادها و شناسایی مسیر بحرانی

جدول ۱۱-۸- محاسبات دیرترین زمان

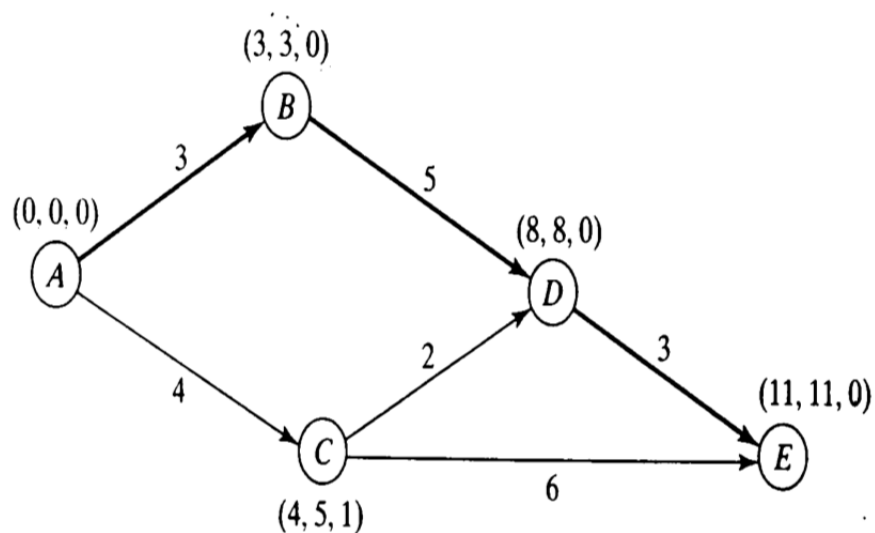
رخداد	پس‌نیاز	T_L برای پس‌نیاز منهای زمان فعالیت	کم‌ترین اختلاف = دیرترین زمان
E	هیچ	$16-0=16$	16
D	E	$16-6=10$	10
C	D	$10-5=5^*$	5
	E	$16-3=13$	
B	C	$5-2=3^*$	3
	D	$10-2=8$	
A	B	$3-3=0^*$	0
	C	$5-4=1$	

این رابطه باید خود بدیهی باشد، زیرا هزینه‌های بالاسری از سطح فعالیت‌ها مستقل بوده و به گذشت زمان بستگی ندارند.

در اکثر پروژه‌ها، مطلوب است که جنبه‌های اقتصادی افزایش هزینه‌های مستقیم هم‌زمان با کاهش هزینه‌های بالاسری به علت تسریع فعالیت‌ها مورد بررسی قرار گیرند. یک تخصیص بهینه منابع به هر فعالیت مورد بررسی قرار می‌گیرد تا هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم کمینه شود.

گام اول در پیدا کردن زمان‌بندی بهینه پروژه پیدا کردن مسیر بحرانی در تخصیص نرمال هزینه‌هاست. این تنها یک نقطه شروع است. سپس، فعالیتی که در مسیر بحرانی قرار دارد و کم‌ترین اثر بر هزینه مستقیم را داراست، کوتاه می‌شود. هنگام کوتاه کردن این فعالیت، دیگر مسیرهای بحرانی ممکن است ظاهر شود. اگر چنین اتفاقی بیافتد، لازم است که زمان فعالیت‌های در این مسیرهای بحرانی به اندازه‌ی مساوی در هر مسیر کاهش یابد. هنگامی که به حد کاهش فعالیت رسیده یا زمانی که صرفه‌جویی در هزینه غیرمستقیم بیش‌تر از هزینه مستقیم نباشد باید این کاهش در زمان‌ها متوقف شود. این فرایند برای همه فعالیت‌ها در مسیر یا مسیرهای بحرانی تکرار می‌شود. پروژه مثال را که در شکل ۱۱-۱۳ نشان داده شده است، مدنظر قرار دهید. هزینه‌های غیرمستقیم ۱۰۰۰ دلار برای صرفه‌جویی در هر روز حذف شده از زمان کل پروژه قابل تصور است. زمان‌های رخدادهای نشان داده شده آن‌هایی هستند که در شرایط نرمال اتفاق می‌افتند. برچسب برای هر رخداد قبلاً تعریف شده است. مسیر بحرانی به صورت $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$ به‌دست آمده است.

داده در مورد زمان‌های فعالیت‌ها در حالت نرمال و در حالت خرد شده در جدول ۱۱-۹ ارائه شده است. این داده‌ها، هزینه‌های روزانه هستند که با این فرض است که هر کارگر اضافه هزینه مستقیم ۵۰ دلار در روز به‌دست آورده است. هزینه‌های اضافه شده تجهیزات، آن‌هایی هستند که تخمین زده می‌شود برای هر روز کاهش از زمان نرمال فعالیت تخمین زده شده است.



شکل ۱۱-۱۳- یک شبکه CPM با فعالیت‌های نرمال

جدول ۱۱-۹- محاسبات هزینه‌های خرد شدن

فعالیت	تعداد کاهش روزها	هزینه کارگر اضافه شده			هزینه‌های اضافه شده تجهیزات	کل هزینه خرد شدن
		کارگرهای اضافه شده	روزهای کاری	هزینه‌های اضافه شده		
AB	1	2	2	200	600	800
AC	1	3	3	450	300	750
BD	1	1	4	200	500	700
	2	3	3	450	450	900
	3	3	2	300	1700	2000
CD	0	0	5	0	0	0
CE	1	0	5	0	950	950
	2	4	4	800	1110	1900
DE	0	0	3	0	0	0

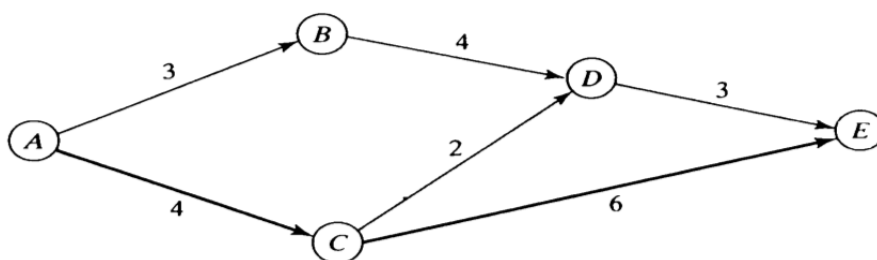
پروژه ترسیم شده در شکل ۱۱-۱۳ در حالت نرمال زمان فعالیت‌ها ۱۱ روز طول می‌کشد تا تکمیل شود. هیچ هزینه خردشدنی تحمیل نمی‌شود و بنابراین هیچ هزینه غیرمستقیمی صرفه‌جویی نمی‌شود.

یک زمان‌بندی ۱۰ روزه را می‌توان با کاهش ۱ روزه BD به‌دست آورد. از جدول ۱۱-۹، یک هزینه خرد شدن ۷۰۰ دلاری تحمیل خواهد شد. یک صرفه‌جویی ۱۰۰۰ دلاری در هزینه‌های غیرمستقیم نتیجه این کاهش خواهد بود. هیچ کاهش دیگری در BD نباید انجام شود زیرا مسیر بحرانی عوض می‌شود. این زمان‌بندی ۱۰ روزه در شکل ۱۱-۱۴ نشان داده شده است.

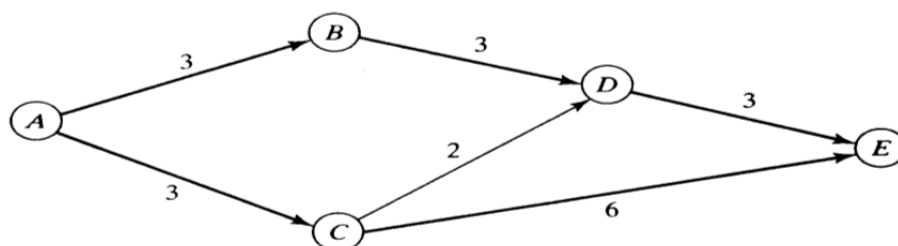
در این‌جا دو مسیر بحرانی وجود دارد، مسیر ابتدایی و یک مسیر جدید به‌صورت $A \rightarrow C \rightarrow E$. کاهش فعالیت BD به میزان یک روز یک زمان‌بندی ۹ روزه را حاصل می‌کند. این موضوع منجر به تحمیل هزینه مستقیم ۹۰۰ دلاری شده که هزینه‌ای کمتر از کاهش BD و AB به‌میزان یک روز خواهد داشت. زمان یک فعالیت در مسیر بحرانی $A \rightarrow C \rightarrow E$ نیز باید هم‌زمان یک روز کاهش یابد. کاهش یک روزه AC منجر به هزینه ۷۵۰ دلاری شده که کمتر از کاهش یک روزه CE است. یک صرفه‌جویی ۲۰۰۰ دلاری حاصل خواهد شد. این زمان‌بندی ۹ روزه در شکل ۱۱-۱۵ نشان داده شده است.

در زمان‌بندی ۹ روزه مسیر همان دو مسیر بحرانی $A \rightarrow C \rightarrow E$ و $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$ که در زمان‌بندی ۱۰ روزه نیز وجود داشتند، باقی می‌مانند. کاهش‌های هم‌زمان در این مسیرها هم‌چنان جستجو خواهد شد. یک زمان‌بندی ۸ روزه با کاهش یک روزه AB با هزینه تحمیلی ۸۰۰ دلار و کاهش دو روزه BD با هزینه ۹۰۰ دلار و مجموعاً ۱۷۰۰ دلار به‌دست می‌آید. این کاهش بهتر از کاهش ۳ روزه BD است. لازم است که CE و AC به میزان ۹۵۰ به‌علاوه ۷۵۰ دلار یعنی ۱۷۰۰ دلار کاهش یابد. این کار بهتر از کاهش دو روزه CE است. یک صرفه‌جویی

۳۰۰۰ دلار برای این زمان‌بندی می‌توان متصور شد. سه مسیر بحرانی در این زمان‌بندی ظاهر می‌شوند: $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$ ، $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ و $A \rightarrow C \rightarrow E$ که هر کدام ۸ روزه هستند. هیچ کاهش دیگری امکان‌پذیر نیست. زمان‌بندی نهایی در شکل ۱۱-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۱۴- زمان‌بندی ۱۰ روزه



شکل ۱۱-۱۵- زمان‌بندی ۹ روزه

در نهایت پیدا کردن زمان‌بندی بهینه الزامی است. این کار با خلاصه کردن هزینه‌های خردکردن و صرفه‌جویی‌ها در جدول ۱۱-۱۰ انجام شده است. بیش‌ترین صرفه‌جویی خالص در زمان‌بندی ۹ روزه اتفاق می‌افتد.

۱۱-۵-۲- تکنیک ارزیابی و بازبینی دستور کار

PERT برای برنامه‌ریزی اولیه پروژه که در آن تخمین دقیق زمان‌ها به راحتی به دست نمی‌آید، ایده‌آل است. مزیت PERT آن است که روشی برای مواجهه با تغییرات تصادفی پیشنهاد داده و

زمان‌بندی فعالیت‌ها را ممکن می‌کند. PERT می‌تواند به‌عنوان یک پایه و اساس در محاسبات احتمالی در مورد این که آیا پروژه در زمان‌بندی مقرر شده تحویل داده می‌شود یا نه به کار رود.

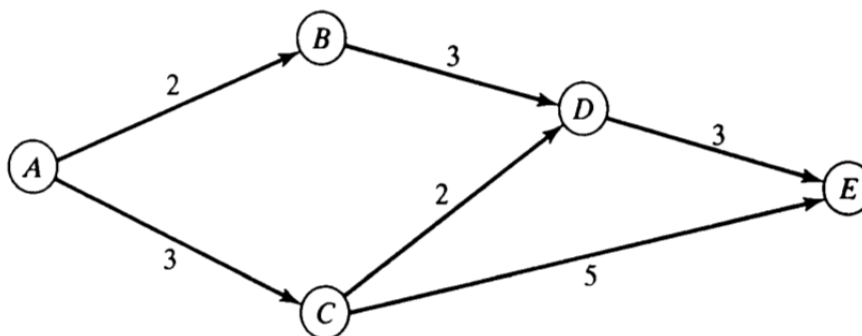
محاسبات شبکه PERT. یک شبکه PERT در شکل ۱۱-۱۷ نشان داده شده است. می‌توان از یک نقطه پایانی شروع کرد (یعنی رخداد H در شکل ۱۱-۱۷) و روبه عقب حرکت کرد تا رخداد A شناسایی شود. هر رخداد برچسب‌گذاری شده، کد می‌شود، و در قالب چارچوب زمانی دستور کار بررسی می‌شود. فعالیت‌ها سپس شناسایی شده و اطمینان حاصل می‌شود که به‌درستی ترتیب‌بندی شده است. برخی فعالیت‌ها را می‌توان به‌صورت هم‌زمان و برخی را به‌صورت سری باید انجام داد. برای هر شبکه تکمیل شده، یک رخداد آغازین و یک رخداد پایانی وجود دارد و همه فعالیت‌ها باید به یکی از این دو فعالیت ختم شود.

گام بعدی در توسعه یک شبکه PERT تخمین زمان‌های فعالیت‌ها و مربوط کردن این زمان‌ها به احتمال اتفاق افتادن آن‌ها است. یک مثال از محاسبات برای یک شبکه معمولی PERT در جدول ۱۱-۱۱ ارائه شده است. گام‌های زیر باید انجام شوند:

۱. ستون ۱ رخدادهای فهرست کرده است، که از آخرین رخداد شروع شده و رو به پایین به رخداد آغازین ختم می‌شود.
۲. ستون ۲ همه رخدادهای قبلی را که باید پیش از فعالیت فهرست شده در ستون ۱ انجام شوند، مشخص می‌کند.

۳. ستون‌های ۳ تا ۵ به ترتیب زمان‌های خوشبینانه (t_a)، محتمل (t_b)، و بدبینانه (t_c) در واحد ماه یا هفته را برای هر فعالیت نشان می‌دهد. زمان خوشبینانه یعنی این که امکان کمی وجود دارد که فعالیت در مدت زمان کم‌تری نسبت به این زمان تکمیل شود، در حالی که زمان بدبینانه یعنی این که احتمال کمی وجود دارد که فعالیت بیش‌تر

از مقدار نمایش داده شده طول بکشد. مقدار زمان (t) به صورت یک متغیر تصادفی با توزیع بتا و با بازه a تا b و m به صورتی که در شکل ۱۱-۱۸ نشان داده شده است، تعریف می‌شود.



شکل ۱۱-۱۶- زمان بندی ۸ روزه

جدول ۱۱-۱۰- صرفه جویی های خالص برای زمان بندی های خرد شده

زمان بندی خرد شده	هزینه خرد کردن	صرفه جویی در هزینه غیرمستقیم	صرفه جویی خالص
۱۰ روزه	۷۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰
۹ روزه	۱۶۵۰	۲۰۰۰	۳۵۰
۸ روزه	۳۴۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰-

۴. ستون ۶ زمان میانگین یا انتظاری (t_e) را با استفاده از رابطه زیر به دست می‌دهد

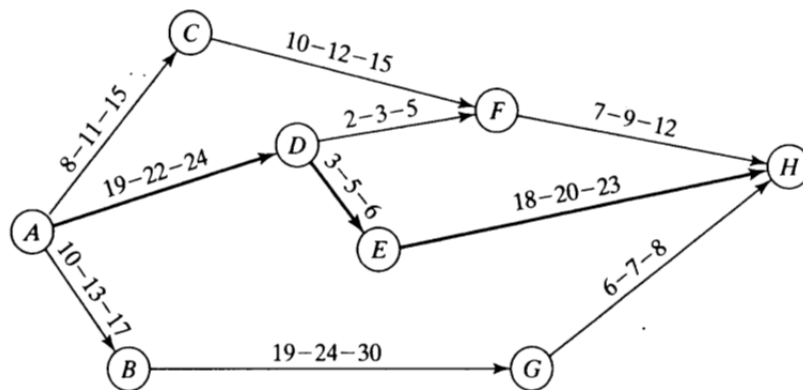
$$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6}$$

۵. ستون ۷ واریانس، σ^2 ، را از رابطه زیر فراهم می‌کند

$$\sigma^2 = \left(\frac{t_c - t_a}{6} \right)^2$$

۶. ستون ۸ زودترین زمان مورد انتظار (T_E) را به عنوان حاصل جمع همه زمان‌های (t_e) برای هر فعالیت و کل زمان‌های مورد انتظار به صورت تجمعی را از طریق رخداد پیش‌نیاز که در مسیر مشابه در سرتاسر شبکه باقی مانده است، نشان می‌دهد. هنگامی که فعالیت‌های متعددی به یک رخداد ختم شود، بیش‌تری مقدار (t_e) استفاده می‌شود. برای مثال در مسیر $A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow H$ در شکل ۱۱-۱۷، ۴۶/۸ خواهد بود.
۷. ستون ۹ دیرترین زمان مجاز (T_L) محاسبه شده با شروع از دیرترین زمان برای آخرین فعالیت که معادل T_E است محاسبه می‌شود. سپس به سمت عقب حرکت کرده و با کم کردن مقدار در ستون ۶ از هر فعالیت و با ماندن در مسیر مشابه محاسبه می‌شود.
۸. ستون ۱۰ فرجه زمانی (S) را به عنوان اختلاف بین دیرترین زمان مجاز (T_L) و زودترین زمان مورد انتظار (T_E) از رابطه زیر به دست می‌آید

$$S = T_L - T_E$$



شکل ۱۱-۱۷- یک شبکه PERT با رخدادها و زمان‌های فعالیت‌ها

جدول ۱۱-۱۱- مثال از محاسبات PERT

شماره رخداد (۱)	رخداد قبلی (۲)	ta (۳)	tb (۴)	tc (۵)	Te (۶)	2σ (۷)	TE (۸)	TL (۹)	S (۱۰)	PT (۱۱)	احتمال (۱۲)
H	G	6	7	8	7	0.108				46	0.266
	F	7	9	12	9.2	0.693					
	E	18	20	23	20.2	0.693	46.8	46.8	0.0		
G	B	19	24	30	24.2	3.349	37.7	39.8	2.1		
F	D	2	3	5	3.2	0.250					
	C	10	12	15	12.2	0.693	23.4	37.6	14.2		
E	D	3	5	6	4.8	0.250	26.6	26.6	0.0		
D	A	19	22	24	21.8	0.693	21.8	21.8	0.0		
C	A	8	11	15	11.2	1.369	11.2	25.4	14.2		
B	A	10	13	17	13.5	1.369	13.5	15.6	2.1		

۹. ستوهای ۱۱ و ۱۲ زمان موردنیاز پروژه (PT) برای شبکه را نشان می‌دهد. با فرض

آن که PT ۴۶ است، لازم است که احتمال برآورده کردن چنین نیازمندی تعیین شود.

این احتمال به صورت زیر به دست می‌آید

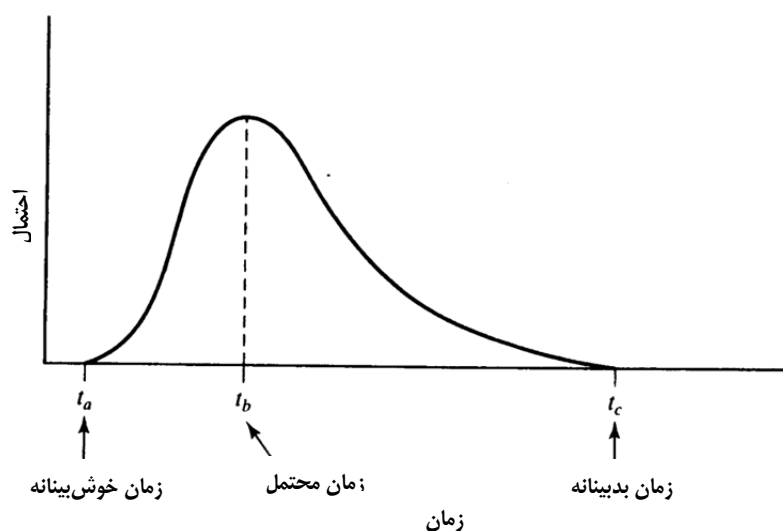
$$Z = \frac{PT - T_L}{\sqrt{\sum \sigma}}$$

Z ناحیه زیر منحنی توزیع نرمال بوده و واریانس حاصل جمع واریانس‌های فعالیت‌های مسیر

بحرانی که در شکل ۱۱-۱۷ نشان داده شده است (مسیر A:D:E:H) خواهد بود. برای این مثال

$$Z = \frac{46.0 - 46.8}{\sqrt{0.693 + 0.250 + 0.693}} = -0.625$$

مقدار محاسبه شده برای -0.625 به صورت یک ناحیه تقریباً برابر با 0.266 است. یعنی احتمال برآورده شدن زمان برنامه‌ریزی شده ۴۶ هفته 0.266 است.



شکل ۱۱-۱۸- توزیع β برای زمان‌های فعالیت

هنگام ارزیابی مقدار احتمال حاصل (ستون ۱۲ جدول ۱۱-۱۱)، مدیریت باید در مورد بازه فاکتورهای مجاز در قالب ریسک تصمیم‌گیری کند. اگر فاکتور احتمالی بسیار پایین باشد، منابع اضافی به پروژه باید اعمال گردد تا زمان‌های زمان‌بندی فعالیت‌ها را کاهش دهد و احتمال موفقیت را افزایش دهد. برعکس، اگر فاکتور احتمال بسیار بالا باشد، ممکن است بدین معنا باشد که منابع اضافی اعمال شده باید به دیگر پروژه‌ها تخصیص داده شود.

PERT هزینه‌ای. یک تعمیم از PERT برای شامل شدن ملاحظات اقتصادی و در نظر گرفتن فاکتورهای هزینه در تصمیم‌های کنترل پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک شبکه هزینه بر

روی یک شبکه PERT قرار داده می‌شود که این کار با تخمین هزینه کل و شیب هزینه برای هر زمان فعالیت انجام می‌شود.

هنگام پیاده‌سازی PERT هزینه‌ای، همیشه گزینه زمان - هزینه وجود دارد که تصمیم گیرنده را برای ارزیابی گزینه‌های نسبی در اختصاص منابع در انجام فعالیت‌ها توانمند می‌کند. در بسیاری از موارد، زمان را می‌توان با اعمال منابع بیش‌تر کاهش داد یا به‌صورت برعکس، هزینه را می‌توان با افزایش زمان تکمیل یک فعالیت کم کرد. گزینه زمان - هزینه با اعمال گام‌های زیر به‌دست می‌آید:

۱. تخمین‌های زمان و هزینه را برای همه فعالیت‌ها تعیین کنید و گزینه کم‌ترین هزینه را برای هر مورد انتخاب کنید.

۲. زمان مسیر بحرانی را برای شبکه محاسبه کنید. اگر مقدار محاسبه شده برابر یا کم‌تر از مقدار کل مجاز بود، گزینه کم‌ترین هزینه را برای هر فعالیت انتخاب کرده و اطمینان حاصل کنید که کل افزایش زمان‌های فعالیت‌ها از زمان مجاز برای تکمیل پروژه تجاوز نمی‌کند. اگر مقدار محاسبه شده از زمان مجاز تجاوز کرد، فعالیت‌های مسیر بحرانی را بررسی کرده و گزینه‌ای را انتخاب کنید که کم‌ترین شیب هزینه را دارد و سپس مقدار زمان را طوری کاهش دهید که نیازمندی برنامه ارضا شود.

۳. پس از آن که مسیر بحرانی در قالب گزینه کم‌ترین هزینه استقرار یافت، همه مسیرهای شبکه را با استفاده از فرجه زمانی بازبینی کرده و فعالیت‌ها را تا جایی که می‌توان از نظر زمانی تغییر دهید تا هزینه‌ها تا جایی که ممکن است کاهش یابد. فعالیت‌ها با بیش‌ترین شیب هزینه - زمان زودتر باید مورد بررسی قرار گیرد.

گزینه زمان - هزینه را می‌توان با مراجعه به دو مسیر بحرانی که در شکل ۱۱-۱۷ نمایش داده شده است به تصویر کشید. داده‌های مربوط به هر مسیر در جدول ۱۱-۱۲ ارائه شده است. در این

مثال، مسیر $A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow H$ بحرانی است و مسیر جایگزین $(A \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow H)$ دارای فرجه زمانی $14/2$ است. اگر مسیر بحرانی مورد توجه باشد (از آن جا که این مسیر بر فاکتور شکست یا پیروزی برنامه حاکم است)، تغییر منابع از گزینه جایگزین به فعالیت‌های مسیر بحرانی را می‌توان در نظر گرفت. برای نمونه، فرض کنید که 200 دلار از فعالیت HF به فعالیت HE بازتخصیص داده شود. در نتیجه، فعالیت HF و HE به ترتیب به $12/2$ و $18/7$ واحد زمانی احتیاج خواهند داشت. کل زمان در مسیر بحرانی کاهش یافته و پروژه در $45/3$ واحد زمانی کامل می‌شود. برعکس، زمان مسیر جایگزین به $35/6$ واحد زمانی افزایش می‌یابد و فرجه به $9/7$ واحد کاهش می‌یابد. کل شبکه باید دوباره ارزیابی شود تا اثرات این تغییر بر مسیر بحرانی تعیین شود. این فرایند باید با موازنه منابع در مقابل زمان ادامه یابد تا جایی که یک نتیجه قابل قبول حاصل شود.

جدول ۱۱-۱۲

مسیر $A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow H$				مسیر $A \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow H$			
شماره رخداد	رخداد قبلی	هزینه تخمینی فعالیت te	شماره رخداد	رخداد قبلی	هزینه تخمینی فعالیت te	شماره رخداد	رخداد قبلی
H	E	20.2	3500	H	F	9.2	1050
E	D	4.8	940	F	C	12.2	2350
D	A	21.8	4800	C	A	11.2	1870
مجموع		46.8	9240	مجموع		32.6	5370

۱۱-۶- کنترل کیفیت جامع

کنترل کیفیت جامع (TQC) یک مفهوم مدیریتی است که از یک نیاز به رقابت در بازارهای جهانی که در آن کیفیت بالاتر، هزینه کمتر و توسعه سریع‌تر برای رهبری بازار ضروری است، به وجود آمده است. مدیریت برای کیفیت جامع به عنوان روشی برای بهبود خصوصیات هزینه-کیفیت محصولات، فرایندها و خدمات به سرعت در حال ظهور است.

رویکردهایی که اکنون در حال ترویج هستند، تاکید می‌کنند که پیروی از مشخصات فنی لازم است، اما کافی نیست. نزول کیفیت با انحراف یک پارامتر محصول از مقدار بهینه یا اسمی شروع به رشد می‌کند. در نتیجه، کیفیت باید در محصولات و فرایندها طراحی شود. علاوه بر این، مقادیر بهینه پارامترهای محصول یا فرایند باید مشخص شده و در چرخه عمر محصول کنترل شوند.

۱۱-۶-۱- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش (ED) اولین بار در دهه‌ی ۱۹۲۰ میلادی توسط رونالد فیشر معرفی شد. توسعه‌های بعدی منجر به افزایش کارایی آزمایش‌ها توسط فاکتورهای تغییرکننده شد، نه به صورت یکی یکی، بلکه به صورت طراحی فاکتوریل. فیشر مفهوم تصادفی سازی را معرفی کرد (به صورتی که روندهای به وجود آمده از فاکتورهای منحرف کننده در نتایج اغتشاش ایجاد نکنند)، ایده‌ای که تخمین معتبری از خطای آزمایش در طراحی را به دست می‌دهد و روشی برای جلوگیری از حذف تفاوت‌های سیستمی است که از دسته‌ها مختلف معرفی می‌شود.

طراحی آزمایش در دهه‌ی ۱۹۳۰ در صنعت معرفی شد. در آن زمان، بخش صنعت و کشاورزی در Royal Statistical Society در لندن تازه افتتاح شده بود و مقالات در کاربردی تولید شیشه، تولید حباب شیشه‌ای، نخ‌ریسی پارچه‌ای و مشابه آن ارائه و مورد بحث قرار می‌گرفت. این موضوع منجر به روش‌های جدید آماری مانند تحلیل مولفه واریانس برای کاهش تغییر در تولید پارچه گشت.

طی جنگ جهانی دوم، نیاز برای طراحی‌ها که بتواند تعداد زیادی از فاکتورها را پایش کنند منجر به معرفی طراحی‌های فاکتوریال کسری و دیگر آرایه‌های متعامد گردید. این طراحی‌ها به‌صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار گرفت و مثال‌های موفق صنعتی در مقالات و کتاب‌های دهه ۱۹۵۰ میلادی تشریح شده است. همچنین در اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی، جورج باکس روش‌های رویه پاسخ را برای بهبود و بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی با آزمایش توسعه داد.

تحقیق و توسعه مهندسی نوین شامل آزمایش‌ها و تحلیل‌های قابل توجه است. آزمایش‌هایی که به‌صورت آماری طراحی شده‌اند مهندس را قادر می‌سازد تا به اهداف توسعه‌ای در زمان کمتر و با منابع کم‌تری دست یابد. غیرطبیعی نیست که برای توسعه زمان سیکل و هزینه به نصف کاهش یابد هنگامی که روش‌های طراحی آزمایش با فرایند توسعه مهندسی هم‌زمان ادغام شود. هنگامی که کیفیت محصول و طراحی فرایند در ابتدای چرخه‌ی عمر مورد بررسی قرار می‌گیرد، بسیاری از تصمیم‌ها را که عمر محصول، قابلیت اطمینان و بهره‌وری را تحت تاثیر قرار می‌دهند، می‌توانند پیش از تولید محصول مورد ارزیابی قرار گیرند.

۱۱-۶-۲- طراحی پارامتر

طراحی پارامتر (PD) بر پایه ایده قابل کنترل‌ها و غیرقابل کنترل‌ها در طراحی و عملیات در قسمت ۷-۳ معرفی شد. بهینه‌سازی پارامتر شامل انتخاب مقادیر قابل کنترل در محصول و فرایند تولید و نگهداری و تعمیرات می‌شود تا برخی شاخص‌ها بهبود یابند (یا در صورت امکان بهینه شوند).

بهینه‌سازی پارامتر به‌صورت سنتی هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هدف بهبود برخی شاخص‌های عملکردی باشد. امروزه این روش برای کاهش تغییرات به منظور افزایش کیفیت و کاستن از هزینه استفاده می‌شود. اگرچه طراحی پارامتر برای کاهش تغییرات را می‌توان به روش‌های زیادی انجام داد، یک تکنیک شناخته وجود دارد. این تکنیک به جینیچی تاگوچی نسبت داده شده است.

تاگوچی از عبارت مهندسی کیفیت استفاده می‌کند تا یک رویکرد در دستیابی به کیفیت بهبود یافته و هزینه کمتر را تشریح کند. او دو روش برای مواجهه با تغییرات شناسایی می‌کند: بهینه‌سازی پارامتر و طراحی تلرانس. مورد اول سعی بر کمینه کردن آثار تغییرات و دومی به دنبال حذف علل آنها است.

مثال‌های زیادی از کاربرد موفق بهینه‌سازی پارامتر وجود دارد. موردی که بیش از همه گزارش شده است تولید کاشی در ژاپن است. بهبودهای مشابهی در تولید خودرو، تولید قطعات الکترونیک، عملیات رایانه، فرایندهای چیپ‌های IC، جوشکاری اولتراسونیک، طراحی موتورهای و ترمزهای دیسکی مشاهده شده است.

مفهوم یک تابع اتلاف کیفیت در بهینه‌سازی پارامتر مورد استفاده قرار گیرد تا اثر تغییرپذیری بررسی شود. برای مثال، اتلاف برای یک صاحب اتومبیل هنگامی که یک قطعه از کار می‌افتد شامل هزینه تعمیر، هزینه دستمزدهای از دست رفته و مشکلات استفاده نکردن از خودرو می‌شود. در بسیاری از موارد، از دست رفتن کیفیت را می‌توان توسط یک تابع کوادراتیک از پارامترهای مهم طراحی تقریب زده شود. فرض می‌شود که تابع تحلیلی بوده و در نتیجه می‌تواند با سری‌های تیلور برای برخی مقادیر بهینه معلوم T بسط داده شود. سپس دو عبارت اول بسط را می‌توان صفر فرض کرده و عبارت زیر به دست آید

$$L(y) = (y - T)^2 \frac{L''(T)}{2!}$$

یا

$$L(y) = k(y - T)^2$$

$L(y)$ = اتلاف به عنوان تابعی از y

$T =$ مقدار هدف یا بهینه برای پارامتر y

$L''(T) =$ مشتق دوم L که در T ارزیابی شده است

$k =$ ضریب اتلاف برای یک کاربرد مشخص

تاگوچی از تابع اتلاف استفاده کرده است تا اثر تغییر را چه مشخصات فنی ارضا شده باشد چه نه، اندازه‌گیری کند. او همچنین از طراحی آزمایش متعامد برای کارایی که اثر تنظیمات هر پارامتر را در مواجهه با نویز ارزیابی می‌کند، استفاده کرده است.

۱۱-۶-۳- مهندسی کیفیت

مهندسی کیفیت (QE) همان‌طور که توسط تاگوچی ترویج داده شد شامل فعالیت‌های زیر می‌شود:

۱. یک آزمایش را برنامه‌ریزی کنید. تابع اصلی، آثار جانبی و مدهای خرابی را شناسایی کنید. فاکتورهای نویز و شرایط آزمایش برای ارزیابی اتلاف کیفیت، خصوصیتی از کیفیت که باید مشاهده شود، تابع کیفیت که باید بهینه شود و پارامترهای قابل کنترل و تنظیمات را شناسایی کنید.
۲. آزمایش را انجام دهید. تعداد محدودی از آزمایش‌ها را که به‌طور هم‌زمان همه پارامترها را براساس الگوی یک ماتریس متعامد مناسب تغییر می‌کند، انجام دهید. داده‌های نتایج آزمایش‌ها را جمع‌آوری کنید.
۳. تحلیل و تصدیق نتایج. داده‌ها را تحلیل کنید، تنظیمات بهینه پارامترها را تعیین کنید، و عملکرد را تحت این تنظیمات پیش‌بینی کنید. یک اعتبارسنجی آزمایش را اجرا کرده و تصدیق کنید که نتایج به‌دست آمده بهینه هستند.

مانند کنترل فرایند آماری، روش تاگوچی بر یک فرض اتکا دارد. بخش ارزیابی شامل یک سری از آزمایش‌ها برای تایید این موضوع است که فرض بر پایه شواهد آزمایش رد نمی‌شود. برای مقایسه‌ی آثار تغییر مقادیر پارامترهای مختلف، تاگوچی شاخص نسبت سیگنال به نویز را معرفی می‌کند که شامل اضافه کردن ساده مشارکت تنظیمات هر پارامتر می‌شود. این ویژگی اضافه شده فرضی است که باید آزمایش شود.

رابطه‌ی طراحی پارامتر تاگوچی و رویکرد پارامتر وابسته به طراحی که در معادله ۳-۷ معرفی شد در شکل ۱۱-۱۹ به تصویر کشیده شده است. خلاصه رابطه به صورت زیر است:

۱. رویکرد طراحی پارامتر (تاگوچی).

a. تابع/تلاف. در انحراف مقدار واقعی پارامتر از مقدار هدف کوادراتیک بوده و توسط k به طراحی مرتبط می‌شود.

b. طراحی/آزمایش. یک آزمایش فاکتوریال که فاکتورهای کنترل را در دو سطح به فاکتورهای نویز در دو یا چند سطح مرتبط می‌کند.

۲. رویکرد پارامتر وابسته به طراحی (معادله ۳-۷).

a. تابع/ارزیابی طراحی. یک تابع هزینه چرخه‌ی عمر بهینه شده در متغیرهای طراحی برای هر مورد از پارامترها وابسته به طراحی.

b. آزمایش غیرمستقیم. استفاده از مدل سازی، نمونه‌گیری مونت کارلو و تحلیل حساسیت برای ارزیابی جریمه LCC برای ترکیب‌های مختلف مقادیر پارامترهای وابسته به طراحی در مواجهه با تغییرات پارامترهای مستقل از طراحی.

رویکردهای پارامتر وابسته به طراحی همان‌طور که در فصل ۷ معرفی و نمایش داده شد، و طراحی پارامتر (تاگوچی) بسیار مشابه هم هستند. تاگوچی از فرایند طراحی هم‌زمان و رویکرد تابع

ارزیابی طراحی، طراحی سیستم، استفاده می‌کند. طراحی سیستم شامل نوآوری و دانش در مورد حوزه‌های علمی و مهندسی می‌شود. این موضوع شامل انتخاب مواد، قطعات، پارامترهای تولید در مرحله طراحی محصول (شکل ۲-۲، چرخه‌ی عمر بالایی) و انتخاب تجهیزات تولید و مقادیر فاکتورهای فرایند در مرحله طراحی فرایند (شکل ۲-۲، دومین چرخه عمر) می‌شود.

مقادیر اسمی تجربی برای پارامترهای وابسته به طراحی در بازه‌های مشخص شده ارزیابی می‌شوند که در پارامتر تاگوچی به آن گام طراحی گفته می‌شود. هدف آن تعیین مقادیر پارامترهای محصول است که کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات در نویز پارامترهای مستقل از سیستم و فاکتورهای نویز محیطی داشته باشد.

آزمایش غیرمستقیم از طریق مدل‌سازی و نمونه‌گیری شبیه‌سازی شده یک روش در تعیین بهترین ترکیب از سطوح پارامترهای وابسته به طراحی است. تابع اتلاف در تابع ارزیابی طراحی در معادله ۳-۷ مورد استفاده قرار گرفته است. طراحی پارامتر تاگوچی یک رویکرد است که هنوز باید در طراحی مفهومی و اولیه اقتباس شود. از آن‌جا که محصول و فرایند تولید هنوز وجود ندارند، رویکردهای ED به جز در سیستم‌های جانشین قابل استفاده نیستند.

طراحی تلرانس که توسط تاگوچی تعریف شده است، گران‌قیمت بوده و در نتیجه باید کمینه شود. در این حوزه است که SPC بیش‌ترین کمک را می‌کند. هدف تعریف پارامترهای وابسته به طراحی به طریقی است که قابلیت‌های تولید، عملیات و پشتیبانی تحت‌تاثیر پارامترهای وابسته به طراحی قرار نگیرد. هدف تاگوچی و رویکردهای پارامتر وابسته به طراحی دستیابی به یک پایداری در مقابل فاکتورهای نویز است، به‌طوری که هزینه چرخه‌ی عمر کمینه شود.

۱۱-۷- خلاصه فصل

مفاهیم پایه‌ای کنترل که در قسمت ۱۱-۱ ارائه شد به صورت خیلی عمیقی توضیح داده نشد. همچنین، وسعت پوشش موضوع محدود است. اگرچه محتوا برای قسمت‌های بعدی کافی است، اما خواننده علاقه‌مند برای درک عمیق‌تر این موضوعات می‌تواند به Introduction to System Science, by G.M. Sandquist, Prentice Hall, 1985 مراجعه کند. این کتاب یک دید علمی-سیستمی از تئوری کنترل را فراهم آورده است. کتاب‌های دیگری وجود دارد اما بیش‌تر به سیستم‌های فیزیکی پرداخته‌اند.

دو انجمن بزرگ حرفه‌ای در حوزه‌ی کنترل و سیستم‌های کنترلی هستند. این انجمن‌ها عبارت‌اند از:

(۱) انجمن سیستم‌های کنترلی IEEE با وبسایت www.ieeecss.org.

(۲) IFAC (فدراسیون بین‌المللی کنترل خودکار) با وبسایت www.ifac-control.org. علاوه بر این، انجمن آمریکایی کیفیت با وبسایت www.asq.org توجه خاصی به بعد کنترل و موضوعات مربوط به کیفیت دارد.

مطالعه‌ی اکثر محتویات این فصل به توانمندی در تئوری احتمال و آمار بستگی دارد.

سه موضوع بنیادین از تئوری احتمال در قسمت ۱۱-۲ برای کنترل فرایند آماری مطرح شد:

۱. قضیه حد مرکزی - یک قضیه که بیان می‌دارد توزیع میانگین‌های نمونه با افزایش اندازه‌ی نمونه به نرمال بودن نزدیک می‌شود، با این فرض که مقادیر نمونه‌ها از هم مستقل باشند. این موضوع، پایه‌ای برای ساخت چارت‌های کنترلی برای متغیرها است.
۲. توزیع دوجمله‌ای - یک توزیع احتمالی تئوریک است که پایه و اساس چارت‌های کنترل برای صفات است که در آن خصوصیات نمونه‌ها در دو دسته قرار می‌گیرد.

۳. توزیع پواسون - یک توزیع احتمالی تئوریک که پایه و اساسی برای چارتهای کنترل برای صفات است که در آن خصوصیت نمونه‌ها به صورت عددی شمرده می‌شود. این توزیع در قسمت ۱۱-۳ برای کنترل سیاست بهینه پایه ریزی شد.

یک کتاب کامل در این زمینه، Introduction on Statistical Quality Control, 5th ed., by D.C. Montgomery, John Wiley & Sons, Inc., 2005، برای کسانی که علاقه به مطالعه بیش تر در زمین کنترل کیفیت آماری دارند، پیشنهاد می‌شود. به علاوه، وبسایت انجمن آمریکایی برای کیفیت در www.asq.org یک منبع عالی برای اطلاعات در این زمینه است.

کنترل پروژه در مهندسی سیستم‌ها بسیار مهم است. در نتیجه، این فصل تئوری پایه CPM و PERT، شامل PERT هزینه‌ای را توسعه داد. رابطه و اهمیت این روش‌های کنترل در مدیریت مهندسی سیستم‌ها به بخش پنجم موکول می‌شود.

قسمت پایانی به کنترل کیفیت جامع و بازبینی تاریخچه کنترل کیفیت آماری می‌پردازد. سپس به تاریخچه طراحی آزمایش پرداخته و دیدگاه نوین آن با تمرکز بر قابل پیش‌بینی بودن خروجی چرخه‌ی عمر مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، طراحی پارامتر و مهندسی کیفیت پایان بخش این فصل بود. این موضوعات رابطه نزدیکی با رویکرد پارامتر وابسته به طراحی این کتاب دارد.

سوالات و مسائل

۱. سرعت، یک خصوصیت یا یک وضعیت از یک خودرو است که باید کنترل شود. در مورد نقش هر یک از عناصر یک سیستم کنترل برای کنترل سرعت بحث کنید.
۲. یک نمودار مانند شکل ۱۱-۱ رسم کنید که بتواند برای سیستم گرمایش تحت کنترل با ترموستات اعمال شود. هر بلوک را بحث کنید.

۳. یک مثال از کنترل حلقه باز و کنترل حلقه بسته بزنید.
۴. چه رابطه‌ای بین یک الگوی ناپایدار از تغییرات، حدود کنترل و خطای نوعی و نوع دو وجود دارد؟
۵. نمونه‌های $n=10$ از یک فرایند در یک دوره‌ی زمان گرفته شده است و میانگین فرایند به صورت $\bar{X} = 0.0250$ و بازه فرایند $\bar{R} = 0.0020$ اینچ تخمین زده شده است. حدود کنترل برای یک چارت $\bar{X}$ و یک چارت R را تعیین کنید.
۶. چارت‌های کنترل توسط متغیرها برای توان کششی ایجاد شده است. نمونه‌های پنج‌تایی در هر ساعت طی ۲۰ ساعت گذشته گرفته و ثبت شده است و در جدول زیر ارائه شده است

	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰								
۰	۴	۴	۸	۷	۷	۴	۲	۴	۳	۷	۹	۷	۳	۴	۶	۵	۰	۶	۸
۱	۶	۴	۲	۶	۴	۶	۶	۶	۴	۴	۸	۱	۶	۳	۷	۵	۹	۷	۴
۹	۰	۴	۹	۶	۳	۶	۵	۶	۹	۴	۱	۰	۶	۰	۱	۷	۵	۸	۹
۲	۷	۷	۹	۸	۰	۸	۲	۶	۷	۲	۶	۸	۸	۰	۸	۷	۹	۶	۰
۳	۸	۸	۶	۰	۵	۶	۵	۳	۵	۰	۶	۲	۶	۶	۶	۶	۸	۵	۶

- الف - یک چارت $\bar{X}$ برای این داده‌ها رسم کنید.
- ب - یک چارت R برای این داده‌ها رسم کنید.
۷. یک حد مشخصات فنی پایین ۴۲ برای شرایط مساله ۶ لازم است. رابطه بین حد مشخصات فنی و حدود کنترل را رسم کنید. چه نسبتی خراب خواهد بود؟

۸. تعداد کل تصادف‌ها در آخر هفته‌های طولانی و تعداد مرگ و میرها طی یک دوره ده ساله در جدول زیر فراهم شده است. فرض کنید که فرایند نسبت به مرگ و میرها تحت کنترل است. یک چارت p ساخته و داده‌های ۸ آخر هفته را ثبت کنید.

تعداد مرگ و میرها	تعداد حوادث	آخر هفته	تعداد مرگ و میرها	تعداد حوادث	آخر هفته
۵۲۳	۳۹۴۳	۱۶	۴۲۶	۲۳۷۸	۱
۵۵۷	۳۹۵۰	۱۷	۵۱۱	۳۳۷۵	۲
۵۳۶	۴۳۵۸	۱۸	۴۹۸	۳۱۰۸	۳
۵۳۳	۴۲۱۷	۱۹	۵۲۵	۳۷۵۶	۴
۵۴۷	۳۹۵۹	۲۰	۵۶۴	۳۹۴۷	۵
۵۵۴	۴۱۰۸	۲۱	۴۷۵	۲۹۵۳	۶
۵۷۹	۴۳۷۹	۲۲	۴۹۰	۳۰۷۵	۷
۵۹۸	۴۴۵۵	۲۳	۵۰۴	۳۱۷۳	۸
۵۸۵	۴۷۵۳	۲۴	۵۲۸	۳۴۷۹	۹
۵۴۳	۴۲۷۹	۲۵	۵۵۵	۳۵۴۵	۱۰
۵۰۷	۳۸۶۸	۲۶	۵۳۷	۴۸۶۵	۱۱
۵۲۳	۳۹۴۷	۲۷	۵۲۹	۳۷۴۷	۱۲
۵۷۵	۳۶۶۵	۲۸	۵۶۹	۴۰۱۱	۱۳
۵۶۹	۴۰۷۸	۲۹	۴۷۰	۳۱۰۸	۱۴
۵۷۸	۴۰۲۵	۳۰	۵۱۰	۳۲۰۷	۱۵

۹. طی یک دوره بازرسی ۴ هفته‌ای، تعداد خرابی‌ها در جدول در یک نمونه ۴۰۰ تایی از قطعات الکترونیکی نشان داده شده است. یک چارت c برای این داده‌ها رسم

کنید. آیا به نظر می‌آید که یک علت برای تغییرات طی دوره بازرسی قابل یافت است؟

تعداد خرابی‌ها	تاریخ	تعداد خرابی‌ها	تاریخ
۶	۱۱	۷	۱
۸	۱۲	۸	۲
۱۶	۱۳	۹	۳
۲	۱۴	۸	۴
۴	۱۵	۳	۵
۲	۱۶	۹	۶
۶	۱۷	۵	۷
۵	۱۸	۶	۸
۳	۱۹	۱۵	۹
۷	۲۰	۹	۱۰

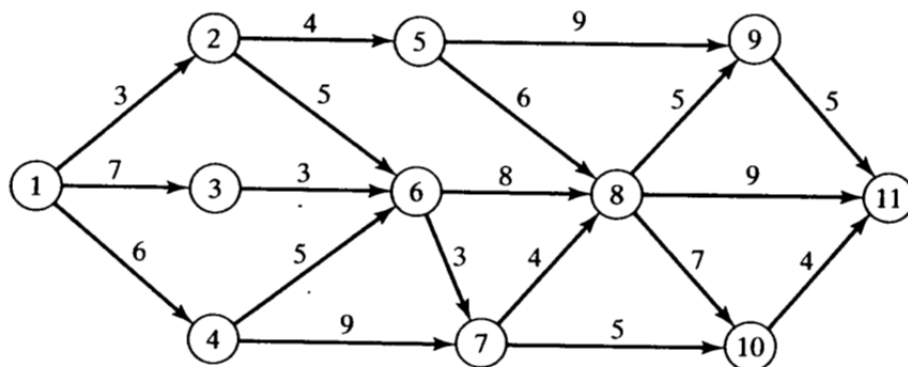
۱۰. یک مطالعه طی یک ماه نشان می‌دهد که تعداد خودروهای خراب در یک بزرگراه به صورت جدول زیر است. یک نمونه ۱۰۰ تایی در هر روز گرفته شده است. یک نمودار c برای داده‌ها رسم کنید. آیا می‌توان یک علت برای ایجاد تغییرات در این دوره تخصیص داد؟

خودروهای خراب	تاریخ	خودروهای خراب	تاریخ	خودروهای خراب	تاریخ
۹	۲۱	۹	۱۱	۱۲	۱
۸	۲۲	۷	۱۲	۱۵	۲
۱۷	۲۳	۱۳	۱۳	۱۳	۳
۱۶	۲۴	۱۲	۱۴	۹	۴
۱۳	۲۵	۶	۱۵	۱۴	۵
۱۸	۲۶	۱۸	۱۶	۱۷	۶
۱۲	۲۷	۱۵	۱۷	۸	۷
۹	۲۸	۵	۱۸	۲۱	۸
۱۱	۲۹	۱۴	۱۹	۱۲	۹
۱۹	۳۰	۱۲	۲۰	۱۴	۱۰

۱۱. یک کاربر برای راه‌اندازی و کار با ۱۴ ماشین خودکار تخصیص داده شده است. فاکتور خدمت‌دهی با کم‌ترین هزینه ۰/۲ است. ماشین‌ها در زمان‌های تصادفی نیاز به توجه دارند و مدت خدمت‌دهی به‌صورت نمایی توزیع شده است. ماشین‌ها با قانون FIFO خدمت‌دهی می‌شود. حد کنترل بالا را طوری تعیین کنید که احتمال خارج از کنترل بودن نشان دادن را وقتی فرایند تحت کنترل است از ۰/۰۵ تجاوز نکند.

۱۲. مسیر بحرانی برای شبکه نشان داده شده را پیدا کنید.

۱۳. یازده فعالیت و هشت رخداد یک پروژه تحقیق و توسعه را تشکیل می‌دهند. فعالیت‌ها و زمان‌های تکمیل انتظاری به‌صورت زیر است:



الف - پروژه را به صورت یک شبکه رخداد- فعالیت نمایش دهید.

ب - مقادیر T_E و T_L برای هر رخداد محاسبه کنید و برچسب T_E ، T_L و S را قرار دهید.

پ - مسیر بحرانی را شناسایی کرده و کوتاه‌ترین زمان ممکن تکمیل پروژه را به دست آورید.

فعالیت	زمان تکمیل به هفته
AB	5
AC	6
AD	3
BE	10
BF	7
CE	8
DE	2
EF	1
EG	2
FH	5
GH	6

۱۴. در مساله ۱۳ فرض کنید که رخداد C باید پیش از رخداد D اتفاق افتد. شبکه فعالیت-رخداد را اصلاح کرده و نشان دهید که مسیر بحرانی عوض می‌شود.

۱۵. نه فعالیت و شش رخداد برای انجام و تکمیل یک برنامه خاص لازم است. فعالیت‌ها و زمان‌های اجرای آن‌ها به هفته تحت شرایط نرمال و شرایط تسریع شده به صورت زیر است

فعالیت	نرمال		تسریع شده	
	زمان	هزینه	زمان	هزینه
AB	۱۰	۳۰۰۰	۸	۵۰۰۰
AC	۵	۲۵۰۰	۴	۳۶۰۰
AD	۲	۱۱۰۰	۱	۱۲۰۰
BC	۶	۳۰۰۰	۳	۱۲۰۰۰
BE	۴	۸۵۰۰	۴	۸۵۰۰
CE	۷	۹۸۰۰	۵	۱۰۲۰۰
CF	۳	۲۷۰۰	۱	۳۵۰۰
DF	۲	۹۲۰۰	۲	۹۲۰۰
EF	۴	۳۰۰	۱	۴۶۰۰

یک رابطه خطی بین هزینه-زمان نرمال و تسریع شده وجود دارد. هزینه بالاسری در هر هفته ۱۱۰۰۰ دلار است که می‌توان صرفه‌جویی شود اگر پروژه زودتر از زمان نرمال تمام شود.

الف - برنامه را به صورت یک شبکه فعالیت-رخداد رسم کنید.

ب - زودترین زمان را که در آن پروژه در شرایط نرمال تمام می‌شود، پیدا کنید.

پ - زمان‌بندی با کم‌ترین هزینه را برای برنامه به دست آورید.

۱۶. هشت فعالیت نگهداری و تعمیرات با زمان‌های نرمال در قالب هفته و گروه نیروی کاری برای شرایط نرمال به صورت زیر است:

فعالیت	زمان به هفته	اندازه گروه کاری
AC	۶	۸
BC	۶	۷
BE	۲	۶
CD	۳	۲
CE	۴	۱
DF	۷	۴
EF	۴	۶
FG	۵	۱۰

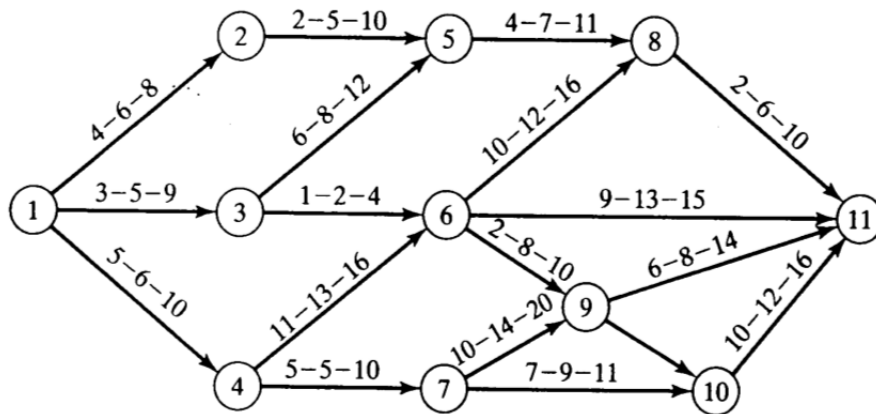
الف – پروژه نگهداری و تعمیرات را به صورت شبکه فعالیت-رخداد نشان دهید.

ب – مسیر بحرانی را شناسایی کرده و کم‌ترین زمان برای تکمیل پروژه را به دست آورید.

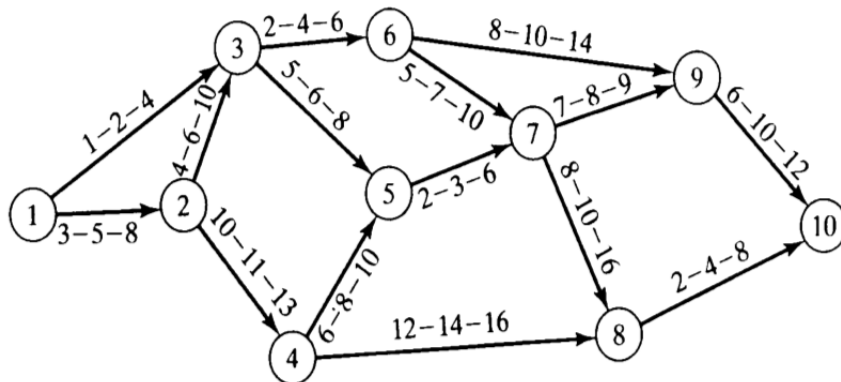
پ – می‌توان از افراد بیش‌تری استفاده کرد تا فعالیت‌های BC، CE، DF و EF را به صورت زیر تسریع کرد:

هزینه خرد شدن در هفته	هفته‌های صرفه‌جویی شده	نیروی کار اضافی
۱۰۰	۱	۱
۱۲۰	۲	۲
۲۰۰	۲	۳
۲۵۰	۳	۴

اگر یک هزینه جریمه ۱۲۵۰ دلاری در هفته ورای کم‌ترین زمان نگهداری و تعمیرات ۱۷ هفته مدنظر باشد، زمان‌بندی پیشنهادی با کم‌ترین هزینه چقدر است. ۱۷. مسیر بحرانی شبکه PERT نشان داده شده را تعیین کنید. دومین مسیر بحرانی کدام است؟



۱۸. احتمال برآورده شدن زمان‌بندی ۵۰ واحدی برا شبکه PERT زیر را محاسبه کنید



تحلیل وظیفه‌ای

یک گام حیاتی در پیاده‌سازی فرایند مهندسی سیستم‌ها، انجام تحلیل وظیفه‌ای و تعریف سیستم در قالب وظایف است. وظایف در ابتدا به‌عنوان بخشی از تعریف نیاز و نیازمندی‌های اساسی برای سیستم شناسایی می‌شوند (شکل ۲-۴، بلوک 0.1). نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهوم نگهداری و تعمیرات تعریف شده و تحلیل وظیفه‌ای برای استقرار یک خط مبنای وظیفه‌ای تعمیم داده شده است که از آن نیازمندی‌های منابع برای سیستم شناسایی می‌شوند، یعنی تجهیزات، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، داده‌ها، عناصر مختلف نگهداری و تعمیرات و پشتیبانی و غیره. تحلیل وظیفه‌ای طی فاز طراحی مفهومی آغاز شده و در قسمت ۳-۷ تشریح گردیده است. با ادامه طراحی و توسعه، تحلیل وظیفه‌ای عمیق‌تر انجام شده و طی فاز طراحی اولیه سیستم که در قسمت ۴-۳ تشریح شد، به سطح زیرسیستم و پایین‌تر تخصیص داده می‌شود. این پیوست خطوط راهنمایی فراهم می‌کند که شامل گام‌های تفصیلی می‌شود که در انجام تحلیل وظیفه‌ای و توسعه نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای (FFBD) وجود دارند.

تحلیل وظیفه‌ای عبارتست از فرایند ترجمه نیازمندی‌های سطح بالای سیستم به نیازمندی‌های کمی و کیفی طراحی. با معلوم بودن نیاز یک سیستم که با تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهومی نگه‌داری و تعمیرات پشتیبانی می‌شود، لازم است که این اطلاعات به معیارهای معنادار طراحی ترجمه شوند. این ترجمه یک فرایند تکرارشونده از شکست نیازمندی‌های سطح سیستم به سطوح تفصیلی بعدی است؛ یک مکانیسم ساده برای ارتباط دادن این اطلاعات به سطوح مختلف FFBD ها.

الف-۱- نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای

نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای (FFBD) برای تشریح سیستم و عناصر آن به صورت وظیفه‌ای توسعه داده می‌شوند. این نمودارها هر دوی فعالیت‌های عملیاتی و پشتیبانی را منعکس می‌کنند، همان‌طور که در چرخه‌ی عمر سیستم اتفاق می‌افتد. این نمودارها طوری ساختار می‌یابند که جنبه‌های سلسله‌مراتبی سیستم را به تصویر بکشند (شکل ۳-۲۰ را ببینید). برخی از ویژگی‌های کلیدی فرایند جریان وظیفه‌ای کلی در زیر ذکر شده است:

۱. رویکرد نمودار بلوکی وظیفه‌ای باید همه فعالیت‌ها در چرخه‌ی عمر سیستم را پوشش دهد و روش ارائه باید توالی فعالیت‌ها و روابط بین واسطه‌ها را منعکس کند.
۲. اطلاعاتی که در بلوک‌های وظیفه‌ای وجود دارد باید با "چه" ای که مورد نیاز است پیش از آن که به چگونه پرداخته شود، مورد توجه قرار گیرند.
۳. فرایند باید انعطاف داشته باشد تا بتوان در صورت اضافه کردن یک تعریف جدید یا کاهش جزئیات در صورت نیاز قابل تعمیم یا تقلیل باشد.

در توسعه نمودارهای جریان وظیفه‌ای، برخی درجات استانداردسازی در تعریف سیستم ضروری است. بنابراین، در صورت امکان در چیدمان فیزیکی نمودارهای وظیفه‌ای، نمادهای

مشخصی باید مورد استفاده قرار گیرند. پاراگراف‌های زیر برخی خطوط راهنما در این زمینه را فراهم می‌کنند.

۱. **بلوک وظیفه.** هر وظیفه در نمودار وظیفه‌ای باید به صورت یک مستطیل بسته نشان داده شود. هر وظیفه می‌تواند کلی یا با جزئیات مورد نیاز در سطح مناسب نمودار وظیفه‌ای نمایش داده شود. باید توجه شود که یک وظیفه باید یک فعالیت محدود و گسسته باشد به صورتی که توسط تجهیزات، کارکنان، تسهیلات، نرم‌افزارها و یا ترکیبی از آن‌ها انجام شود. وظایف سوال برانگیز باید در بلوک‌های با مرز نقطه‌چین نمایش داده شود.

۲. **شماره‌گذاری وظیفه.** وظایف شناسایی شده در نمودارهای جریان وظیفه‌ای در هر سطح باید به صورتی شماره‌گذاری شود که پیوستگی وظایف را حفظ کرده و اطلاعاتی در مورد مبدا وظیفه در ساختار سیستم را فراهم کند. وظایف سطح بالای نمودار وظیفه‌ای باید به صورت 1.0، 2.0 و غیره شماره‌گذاری شوند. وظایف تشکیل‌دهنده باید شناسه‌ای مشابه پدر خود داشته باشند و باید با استفاده علامت اعشار سطح آن مشخص شود. برای مثال، وظیفه سطح ۱ به صورت 3.0، سطح ۲ به صورت 3.1، سطح بعدی 3.1.1 و بقیه نیز به همین منوال نام‌گذاری می‌شود. وظایفی که در یک سطح قرار دارند به صورت ترتیبی شماره‌گذاری می‌شود تا پیوستگی وظیفه حفظ شود. برای مثال، اگر بیش از یک وظیفه برای وظیفه 3.0 مدنظر باشد بدین صورت نام‌گذاری می‌شود: 3.1، 3.2، ...، 3.n. برای تعمیم وظیفه 3.3 در سطح دوم بدین صورت عمل می‌شود: 3.3.1، 3.3.2، ...، 3.3.n. هنگامی که سطوح متعددی در یک نمودار وظیفه‌ای ظاهر می‌شود، الگوی مشابهی باید

استفاده شود. بهتر است که در طراحی نمودار وظیفه‌ای طوری عمل شود که حداقل تعداد جریان‌ها در آن ترسیم شود.

۳. مرجع وظیفه‌ای. هر نمودار وظیفه‌ای باید یک مرجع برای یک نمودار وظیفه‌ای سطح بالاتر داشته باشد که این کار از طریق بلوک مرجع انجام می‌شود. برای مثال، وظیفه 4.3 باید به عنوان بلوک مرجع در نظر گرفته شود اگر قرار است این وظیفه به وظایف 4.3.1، 4.3.2، ...، 4.3.n تعمیم داده شود. بلوک‌های مرجع باید برای مشخص کردن وظایف واسطه استفاده شود.

۴. اتصال جریان. خطوطی که وظایف را به هم متصل می‌کنند تنها توسط جریان وظیفه‌ای مشخص شده و نباید به عنوان زمان سپری شده یا یک فعالیت میانی نشان داده شود. خطوط افقی و عمودی بین بلوک‌ها باید که همه وظایف را مشخص کند. خطوط اریب را می‌توان برای مشخص کردن توالی جایگزین استفاده کرد (مواردی که راه‌های جایگزین وجود دارد که منجر به وظیفه بعدی می‌شود).

۵. جهت جریان. نمودارهای وظیفه‌ای باید طوری چیده شود که جریان وظیفه‌ای از چپ به راست بوده و در صورت وجود جریان معکوس، این جریان‌ها از راست به چپ نشان داده شوند. خطوط ورودی اصلی باید از سمت چپ بلوک وظیفه وارد شده و از سمت راست آن خارج شود. خط برو باید سمت راست وجود داشته باشد و خط نرو در زیر بلوک وظیفه قرار می‌گیرد.

۶. گیت تجمیع. یک دایره برای نمایش داده گیت تجمیع استفاده می‌شود. در مورد بلوک‌های وظیفه‌ای، خطوط به تعداد مناسب به گیت تجمیع وارد یا از آن خارج می‌شود. گیت تجمیع برای همگرایی، واگرایی، یا مسیرهای جایگزین/موازی استفاده شده و با عبارات "و" یا "یا" پر می‌شود. واژه "و" هنگامی استفاده می‌شود که همه وظایف موازی که به گیت وارد می‌شوند، باید انجام شوند تا به وظیفه

بعدی وارد شد. عبارت "یا" هنگامی استفاده می‌شود که برای وارد شدن به وظیفه بعدی تنهای یکی از وظایف قبلی باید انجام شود. گیت "یا" می‌تواند برای مشخص کردن یک مسیر جایگزین یا دنبال کردن یک وظیفه خاص مورد استفاده قرار گیرد.

۷. مسیرهای برو و نرو. نمادهای G و $\bar{G}$ به ترتیب برای نشان دادن برو و نرو استفاده می‌شود. نمادها در کنار خطوط قرار داده می‌شود.

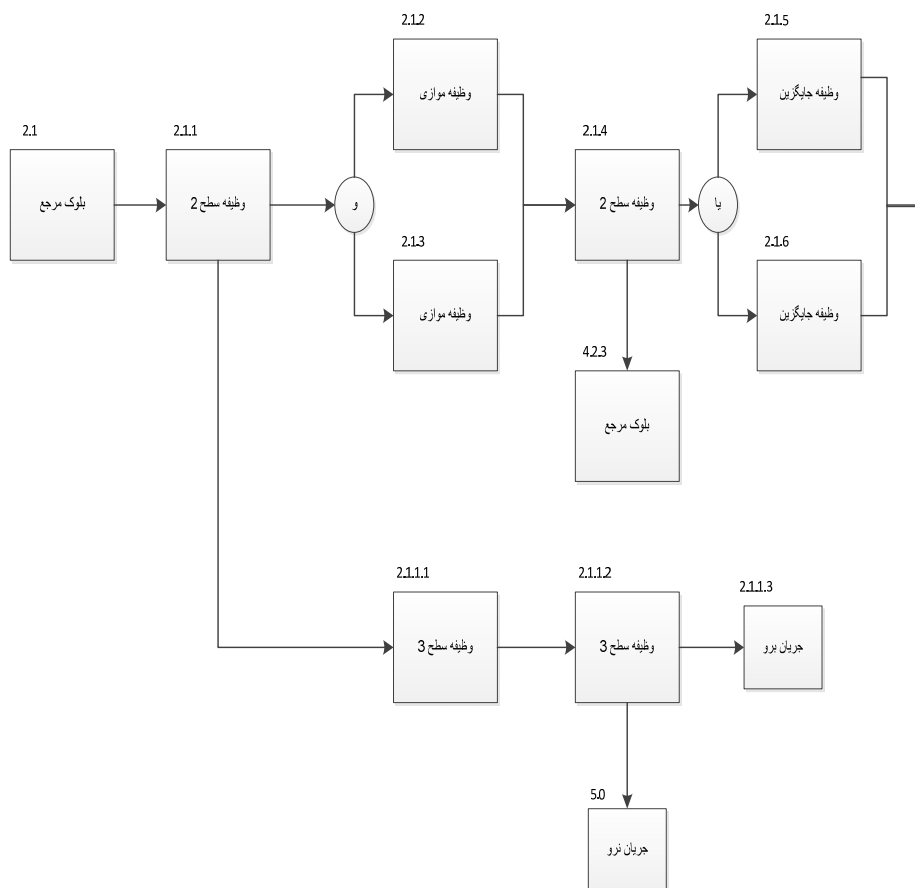
۸. رویه شماره گذاری هنگامی ایجاد تغییرات. وظایف اضافه شده به داده‌های موجود باید توسط یک وظیفه جدید در یک مکان اصلاحی بدون توجه به توالی شماره گذاری قرار داده شود. این وظیفه جدید باید با استفاده از یک شماره استفاده نشده در نمودار شماره گذاری شود.

الف-۲- دو مثال کاربردی

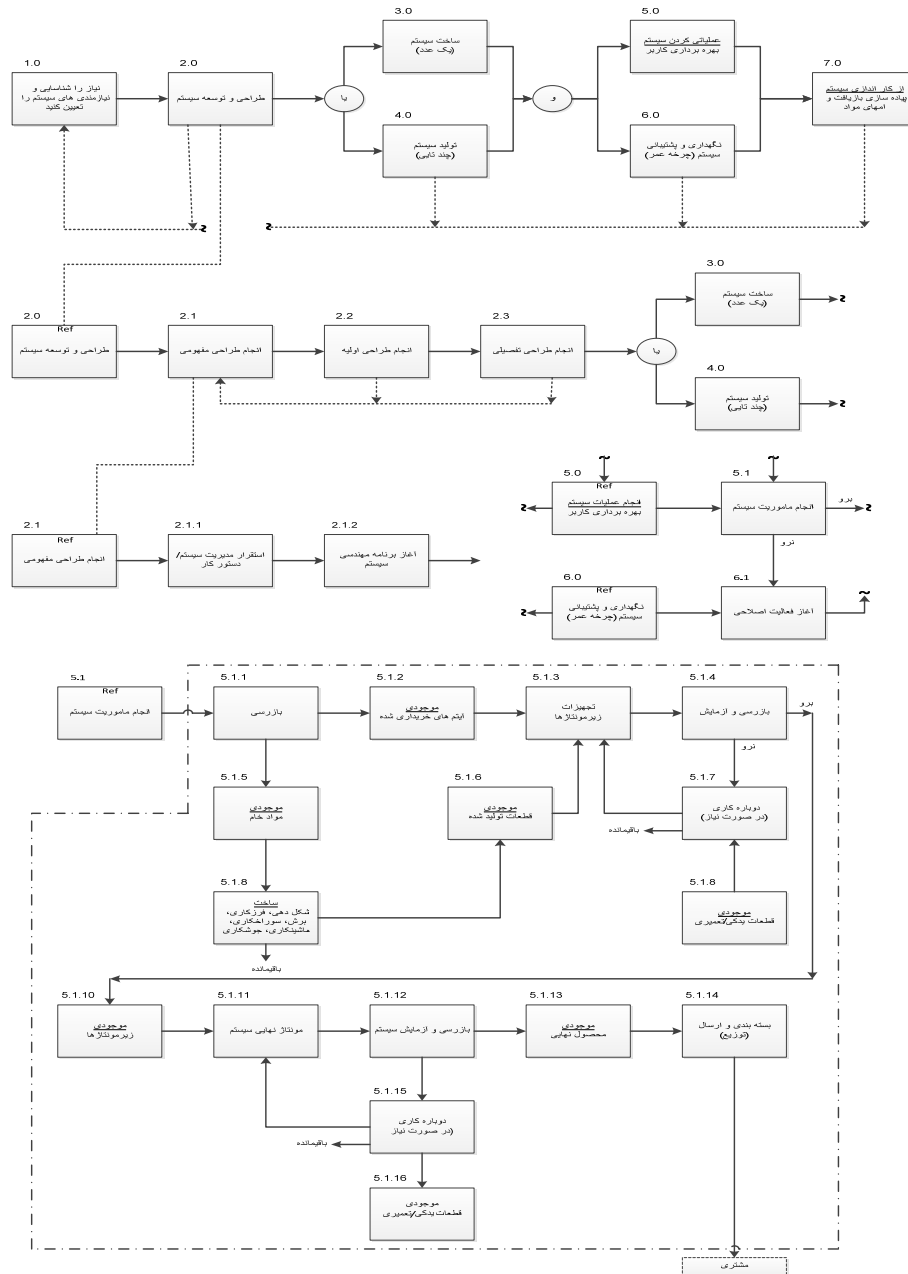
در این قسمت دو نمونه نمودار وظیفه‌ای برای مثال نشان داده شده است. شکل‌های الف-۱، الف-۲ این مثال‌ها را تشکیل می‌دهند.

۱. شکل الف-۱ مثالی از قالب اصلی استفاده شده در توسعه نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای به صورت کلی را ترسیم می‌کند.

۲. شکل الف-۲ یک قابلیت تولید (بلوک‌های ۱ تا ۷)، تعمیم وظیفه طراحی (بلوک ۲)، و تعمیم وظایف عملیاتی را از یک کارخانه تولیدی نشان می‌دهد.



شکل الف - ۱ - قالب عمومی برای توسعه نمودار بلوکی جریان وظیفه‌ای



شکل الف-۲- یک نمودار بلوکی جریان وظیفه‌ای برای تولید

چک‌لیست‌های طراحی و مدیریت

طی فرایند طراحی و توسعه سیستم، وضعیت‌های بی‌شماری وجود دارند که بازبینی و ارزیابی طراحی مناسب است. با مراجعه به شکل ۴-۱۳، چنین بازبینی‌هایی به‌صورت رسمی یا غیررسمی در نقاط گسسته‌ای از چرخه‌ی عمر سیستم انجام می‌شوند. طی فرایند طراحی، یک سری از بازبینی‌های جزئی و غیررسمی انجام می‌شود که حوزه‌های حیاتی طراحی را پوشش می‌دهند. به‌علاوه، بازبینی‌های رسمی همراه با تکامل تعریف سیستم از سطح سیستم به سطح زیرسیستم و تا سطح تفصیلی اجزا، در زمان‌های مشخصی صورت می‌گیرد. با مراجعه به شکل‌های ۲-۴ و ۴-۱۱، بازبینی‌های رسمی طراحی که در این کتاب بحث شد عبارت‌اند از بازبینی طراحی مفهومی، سیستم، تجهیزات/نرم‌افزار و بازبینی انتقادی طراحی. همان‌طور که در قسمت‌های ۳-۱۰، ۴-۸ و ۵-۸ بحث شد، هدف از این بازبینی‌ها حصول اطمینان از آن است که پیکربندی طراحی با نیازمندی‌های سیستم که در شروع کار تعریف شد، هماهنگ است.

در انجام یک بازبینی طراحی، چه رسمی و چه غیررسمی، توسعه و استفاده از یک چک‌لیست به‌دستیابی به هدف ذکر شده کمک خواهد کرد. چک‌لیست می‌تواند شامل هر تعداد آیت،

موضوع، و/یا سوال باشد به‌طوری که منعکس‌کننده‌ی نیازمندی‌های نهایی سیستم بوده و بر پیکربندی طراحی مورد بازبینی تمرکز داشته باشد. چک‌لیست‌ها برای پوشش دادن خصوصیات فنی طراحی و نیازمندی‌های مدیریتی یک سیستم معلوم توسعه می‌یابند. هر آئتم در یک چک‌لیست نمایانگر یک نیازمندی خاص است و بازبینی به‌عنوان یک واسطه برای مشخص کردن این موضوع است که آیا آن نیازمندی‌ها برآورده شده است یا خیر.

فرایندی که منجر به توسعه چک‌لیست‌ها می‌شود در شکل ب-۱ نشان داده شده است. اگرچه یک چک‌لیست جامع طراحی فنی و مدیریت شدنی نیست، یک مثال از هر کدام از این چک‌لیست‌ها در قسمت‌های بعدی مورد بحث قرار گرفته است (یعنی یک چک‌لیست برای بازبینی طراحی و یک چک‌لیست بازبینی مدیریتی).

ب-۱- چک‌لیست بازبینی طراحی

برای تسهیل فرایند بازبینی و ارزیابی طراحی از نقطه نظر فنی، یک چک‌لیست بازبینی طراحی مشابه آنچه در شکل ۵-۸ نشان داده شد، قابل توسعه است. با مراجعه به شکل، هر موضوع لیست شده نشانگر یک حوزه‌ی مورد بررسی است و هر موضوع توسط یک سری سوال پوشش داده می‌شود که با هدف ایجاد دیدی وسیع‌تر در آن حوزه و مجبور کردن فرد ممیز کننده به ارزیابی برآورده شدن نیازمندی‌های طراحی نمایش داده شده است. هر کدام از سوالات در چک‌لیست باید توسط یک معیار طراحی کمی یا کیفی که از تعریف نیازمندی‌های سیستم تکامل یافته‌اند، پشتیبانی شود (یعنی نیازمندی‌های عملیاتی، مفهوم نگهداری و تعمیرات و پشتیبانی و TPM‌ها). برای مثال، سوالات زیر تحت موضوع قابلیت دسترسی قابل استفاده است: آیا همه نیازمندی‌های دسترسی با فراوانی نیاز مطابقت دارد؟ آیا دریاچه ورودی برای نگهداری و تعمیرات حداقل ۷/۹ در ۷/۲ اینچ است؟ آیا دریاچه ورودی بدون ابزار قابل باز شدن است؟



شکل ب- ۱- توسعه چک‌لیست‌های بازبینی طراحی

سوالات در شکل ب-۲ تنها سه حوزه از ۳۴ حوزه شناسایی شده در شکل ۵-۸ را پوشش می‌دهند. برای هر سوال نمایش داده شده، پاسخ باید بله باشد. این موضوع مشخص می‌کند که نیازمندی مربوطه برآورده شده است. سوالات می‌تواند با فاکتورهای کمی طراحی (TPM) مشخص شود یا ممکن است دارای طبیعتی کمی باشد. توسعه یک بازبینی طراحی باید برای سیستم و عناصر آن تنظیم شود و باید تنها سوالاتی در آن قرار داده شود که مربوط به سیستم مورد ارزیابی است.

ب-۲- چک‌لیست بازبینی مدیریتی

چک‌لیست بازبینی مدیریتی به روشی مشابه ساخته می‌شود. حوزه‌های کلیدی شناسایی شده‌اند، سوالات تدوین گردیده است، ارزیابی انجام شده و نتایج در قالب انطباق با نیازمندی‌های دستورکار و/یا اهداف الگوبرداری شده مورد بررسی می‌گردد.

با این که مدیریت طیف وسیعی از موضوعات را پوشش می‌دهد تا فعالیت‌ها و وظایف مشتری، تولیدکننده/پیمانکار و تامین‌کننده را شامل شود، شکل ۱۹-۴ در این کتاب تنها مثالی از یک مورد از آن‌هاست: چک‌لیست ارزیابی تامین‌کننده. با دانستن آن که ممکن است تعداد زیادی تامین‌کننده برای اکتساب یک سیستم بزرگ وجود داشته باشد و با دانستن این که تامین‌کنندگان از نظر جغرافیایی در مکان‌های دور قرار دارند، اهمیت توسعه یک ابزار بازبینی و ارزیابی خوب برای عملکرد تامین‌کننده قابل تامل خواهد بود. در نتیجه، مطالعه‌ی مجدد قسمت ۱۹-۲ (و شکل ۱۹-۴) پیشنهاد می‌شود. برای تکمیل فرایند، یک سری از سوالات در شکل ب-۳ به عنوان مثال فراهم شده است. بار دیگر، سوالات چک‌لیست باید برای یک دستورکار خاص تنظیم شود.

۱۲-۰ بسته‌بندی و سوار کردن

۱-۱۲ آیا بسته‌بندی از نقطه نظر مشتری جذاب است (رنگ، شکل، اندازه)

۲-۱۲ آثار تعاملی بین بسته‌بندی‌ها باید حداقل شود. باید امکان آن وجود داشته باشد تا هنگام خرابی نگهداری و تعمیرات به حذف یک ماژول (شامل قطعه خراب) محدود شود و نیاز به حذف دو، سه، یا چهار ماژول برای حل مساله وجود نداشته باشد. آیا این موضوعات تا سر حد ممکن انجام شده است؟

۳-۱۲ آیا طراحی بسته‌بندی با تصمیم‌های تحلیل سطح تعمیر مطابقت دارد؟ آیتم‌های قابل تعمیر طوری طراحی شوند تا موضوعات نگهداری و تعمیرات مانند نقاط آزمایش، قابلیت دسترسی و اجزای الحاقی را شامل شود. آیتم‌هایی که هنگام خرابی باید دور ریخته شود باید در محفظه‌هایی قرار داده شده و باید نسبتاً کم هزینه باشند. این موضوعات هنگامی که ماژول قابل امحا است، نیاز نیستند.

۴-۱۲ مطلوب است که پشتیبانی کلی از طریق یک مفهوم طراحی بدون نگهداری و تعمیرات کاهش یابد. این موضوع تا زمانی باید انجام شود که آیتم‌هایی که دور انداخته می‌شوند نسبتاً دارای قابلیت اطمینان بالا و هزینه اندک باشد. آیا این موضوعات تا سرحد ممکن اجرایی شده است؟

۵-۱۲ آیا ماژول‌ها و اجزای الحاقی تا آن‌جا که ممکن است مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (مگر آن‌که استفاده از اجزای الحاقی به شدت قابلیت اطمینان تجهیز را کاهش دهند)؟

۶-۱۲ آیا سطح دسترسی به ماژول‌ها کفایت لازم را دارد؟

۷-۱۲ آیا ماژول‌ها و قطعات طوری سوار شده‌اند که خارج کردن یک آیتم برای نگهداری و تعمیرات نیاز به خارج کردن دیگر آیتم‌ها نداشته باشد؟

۸-۱۲ در حوزه‌هایی که تراکم ماژول‌ها به علت کمبود فضا لازم است، آیا ماژول‌های سوار شده در چنین شرایطی بر اساس فراوانی خارج کردن و تعویض آیت‌م چیده شده است؟

۹-۱۲ آیا ماژول‌ها و اجزای با چهار چفت و بست یا کم‌تر سوار شده است؟ ماژول‌ها باید به‌صورت ایمن سوار شوند، اما تعداد چفت و بست‌ها باید حداقل باشد.

۱۰-۱۲ زمانی که نیازمندی‌های شوک و ارتعاش وجود دارد، آیا موضوعات مربوط به کاهش شوک و ارتعاش اجرایی شده است؟

۱۱-۱۲ رویه‌های لازم برای جلوگیری از نصب ماژول اشتباه تدوین و اجرا شده است؟

۱۲-۱۲ آیا ماژول‌ها و اجزای الحاقی بدون استفاده از ابزار قابل خارج شدن هستند؟ اگر ابزار نیاز باشد، باید از ابزارهای استاندارد استفاده شود.

۱۳-۱۲ آیا از ابزارهای کمکی برای تسهیل نصب ماژول فراهم شده اند؟

۱۴-۱۲ آیا ماژول‌ها و اجزا برچسب گذاری شده است؟

۱۵-۱۲ آیا برچسب ماژول‌ها و اجزا طوری قرار داده شده است که براحتی قابل رویت باشد؟

۱۶-۱۲ آیا برچسب‌ها به‌صورت دائمی نصب شده اند تا هنگام انجام عملیات نگهداری و تعمیرات یا در نتیجه اثرات محیطی پاک نشود؟ آیا اطلاعات روی برچسب کافی است؟ ماژول‌های قابل امحا نیز باید برچسب گذاری شوند. در قفسه تجهیزات، آیا آیت‌م‌های سنگین تر در پایین قفسه جای داده شده است؟ وزن واحد باید با افزایش ارتفاع نصب کاهش یابد.

۱۷-۱۲ آیا پنل‌های اپراتور به‌صورت بهینه طراحی شده است؟ برای کارکنانی که باید ایستاده کار کنند، پنل‌ها باید در ارتفاعی بین ۴۰ تا ۷۰ اینچ از زمین قرار داده شود. کنترل‌های دقیق یا حیاتی باید در ارتفاع بین ۴۸ تا ۶۴ اینچ از زمین قرار داشته باشد.

شکل ب- ۲- سوالات متداول بازیابی طراحی (مثال)

۹-۰ نرم افزار

۹-۱ آیا همه نیازمندی‌های نرم افزار سیستم برای وظایف عملیاتی و نگهداری و تعمیرات تعریف شده است؟ آیا این نیازمندی‌ها از طریق تحلیل وظیفه ای سطح سیستم توسعه یافته‌اند تا قابل رهگیری باشند؟

۹-۲ آیا نرم‌افزار از نقطه نظر عمق و دورنما کامل است؟

۹-۳ آیا نرم‌افزار با تجهیزاتی که واسطه آن‌هاست انطباق دارد؟ آیا نرم افزار عملیاتی با نرم افزار نگهداری و تعمیرات انطباق دارد؟ با عناصر دیگر سیستم چطور؟

۹-۴ آیا نیازمندی‌های زبانی برای نرم افزار عملیاتی و نرم افزار نگهداری و تعمیرات قابل انطباق است؟

۹-۵ آیا نرم‌افزار به حد کفایت دارای مستندسازی مناسب است (جریان‌های منطقی کارکردی، کدها، و غیره)؟

۹-۶ آیا نرم افزار به حد کفایت آزمایش شده و دقت (عملکرد)، قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری و تعمیرات آن تایید شده است؟

۲-۰ قابلیت آزمایش

۲-۱ آیا قابلیت خود آزمایشی در محل مناسب قرار داده شده است؟

۲-۲ آیا استهلاک قابلیت اطمینان از طریق خود آزمایشی حداقل شده است؟ قابلیت BIT نباید اثر قابل توجهی بر قابلیت اطمینان کلی سیستم داشته باشد.

۲-۳ آیا عمق و گستره خود آزمایشی با تحلیل سطح تعمیر هماهنگی دارد؟

۲-۴ آیا خودآزمایشی خودکار تدارک دیده شده است؟

۲-۵ آیا اندیکاتور مستقیم خطا تعبیه شده است (یک چراغ خطا، یک سیگنال صوتی، یا روش که مشخص کند چیزی اشتباه کار می‌کند)؟ آیا نظارت پوسته بر وضعیت در محل مناسب قرار داده شده است؟

۶-۲ آیا نقاط آزمایش طوری آماده شده است که بازرسی و ایزوله کردن خطا ورای سطح خود آزمایشی باشد؟ اگر مونتاژ هنگام خرابی دور انداخته می‌شود، نقاط آزمایش برای ایزوله کردن خطا در یک مونتاژ نباید تعبیه شود. نقطه آزمایش باید با تحلیل سطح تعمیر هماهنگی داشته باشد.

۷-۲ آیا نقاط آزمایش قابل دسترسی هستند؟ قابلیت دسترسی باید مطابق با گستره‌ی نگهداری و تعمیرات انجام شده باشد. نقاط آزمایش بر روی پنل جلوی اپراتور در فعالیت نگهداری و تعمیرات مبدا نیاز نیست.

۸-۲ آیا نقاط آزمایش از نظر عملکردی و راحتی طوری گروه بندی شده است تا آزمایشات ترتیبی به صورت اثربخش و کار انجام شود؟

۹-۲ آیا این نقاط آزمایش برای یک آزمایش مستقیم (برای همه آیتم‌های قابل تعویض) فراهم شده است؟

۱۰-۲ آیا نقاط آزمایش به حد کفایت برچسب‌گذاری شده است؟ هر نقطه آزمایش باید به صورت یکتا شماره‌گذاری شود و سیگنال مناسب یا خروجی اندازه‌گیری شده مورد انتظار باید بر روی برچسب به وضوح ذکر شود.

۱۱-۲ آیا نورپردازی برچسب در نقاط آزمایش کفایت لازم را دارد تا تکنسین به راحتی بتواند شماره و مقدار سیگنال را ببیند؟

۱۲-۲ آیا عدم کارکرد درست جزء که ممکن است اتفاق افتد از طریق یک علامت نرو در سطح سیستم قابل کشف است؟ آیا نرخ اخطارهای نادرست حداقل شده است؟ این یک شاخص از ثبات آزمایش است.

۱۳-۲ آیا نرم افزار نگهداری و تعمیرات که پیش تر تشریح شد اطلاعات کشف خطای کافی را فراهم می کند؟

شکل ب- ۲- سوالات متداول بازیابی طراحی (ادامه)

چک لیست بازبینی تامین کننده

۱. آیا پروپوزال تامین کننده پاسخ دهنده‌ی نیازهای مشخص شده در RFP تامین کننده است؟
۲. آیا پروپوزال تامین کننده مستقیماً پشتیبان نیازمندی‌های مشخصات فنی سیستم (نوع A) و برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) می باشد؟
۳. آیا خصوصیات عملکردی و فاکتورهای اثربخشی به حد کفایت برای محصول پیشنهادی تعیین شده است؟ آیا آن‌ها معنی دار، قابل اندازه گیری، و از نیازمندی‌های سطح سیستم قابل رهگیری است؟
۴. هنگامی که یک طراحی جدید نیاز است، آیا فرایند طراحی در سازمان تامین کننده به خوبی تعریف شده است؟ آیا فرایند به کار رفته از ابزارهای رایانه‌ای استفاده می کند (CAS، CAM، CAD)؟ آیا فرایند مستقیماً فرایند طراحی توسعه دهنده‌ی سیستم را پشتیبانی می کند؟
۵. آیا طراحی تامین کننده به حد کفایت از طریق داده‌ها و مستندات تعریف شده است (یعنی نقشه‌ها، فهرست مواد و قطعات، گزارشات تحلیل موازنه‌ای، پایگاه‌های داده، غیره)؟
۶. آیا تامین کننده یک نیازمندی برای آزمایش، ارزیابی و تصدیق اعتبار پیشنهاد داده است؟ آیا این پیشنهاد با نیازمندی‌ها برای آزمایش، ارزیابی و تصدیق اعتبار سیستم هماهنگی دارد و آیا به درستی در برنامه اصلی آزمایش و ارزیابی (TEMP) ادغام شده است؟
۷. آیا تامین کننده نیازمندی‌های پشتیبانی چرخه‌ی عمر را برای محصول پیشنهادی تعریف کرده است (یعنی نیازمندی‌های منابع برای حفظ نگهداری و تعمیرات، از کاراندازی، و بازیافت و امحای مواد در چرخه‌ی عمر محصول)؟ آیا این نیازمندی‌ها از طریق یک طراحی خوب تا حد ممکن حداقل شده است؟

۸. هنگام اتفاق افتادن نیاز برای تغییر در طراحی، آیا تامین‌کننده دارای یک سیاست/رویه خوب برای کنترل تغییر می باشد؟ آیا تامین‌کننده دارای یک برنامه مدیریت ساختار (CMP) است؟
۹. آیا تامین‌کننده برنامه‌ی جامع تولید/ساخت را توسعه داده است؟ آیا فرایندهای تولیدی کلیدی همراه با خصوصیات آن‌ها شناسایی شده است؟
۱۰. آیا تامین‌کننده دارای یک برنامه تضمین کیفیت خوب است؟ آیا روش‌های کنترل مناسب مانند کنترل کیفیت آماری شناسایی شده است؟ آیا تامین‌کننده دارای برنامه دوباره‌کاری مناسب برای آیتم‌های رد شده است؟
۱۱. آیا پروپوزال تامین‌کننده شامل یک برنامه جامع مدیریت می‌شود؟ آیا برنامه تامین‌کننده دارای یک WBS، زمانبندی تکالیف، ساختار سازمانی و مسئولیت‌ها، نمایش هزینه‌ها، رویه‌های نظارت و کنترل، غیره است؟ آیا مسئولیت تکالیف مهندسی سیستم‌ها تعریف شده است؟
۱۲. آیا تامین‌کننده همه جنبه‌های کل هزینه (هزینه اکتساب، هزینه عملیات و پشتیبانی نگهداری و تعمیرات، هزینه امحا/بازیافت مواد، هزینه چرخه‌ی عمر) را مورد بررسی قرار داده است؟
۱۳. آیا تامین‌کننده دارای تجربه در زمینه طراحی، توسعه، تولید، و پشتیبانی چرخه‌ی عمر محصولی مشابه محصول پیشنهادی است؟
۱۴. آیا تامین‌کننده همه ریسک‌های مدیریتی و فنی مربوط به دستورکار پیشنهاد شده را شناسایی کرده است؟

شکل ب- ۳- چک‌لیست بازیابی مدیریتی تامین‌کننده (مثال)

اختصارات

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
SOS	System-of-Systems	سیستمی از سیستم‌ها
NAE	National Academy of Engineering	آکادمی ملی مهندسی (امریکا)
INCOSE	International Council on System Engineering	انجمن بین المللی مهندسی سیستم‌ها
DOD	Department of Defense	وزارت دفاع امریکا
ISSS	International Society for the System Sciences	مجمع بین المللی برای علوم سیستم
OAA	Omega Alpha Association	انجمن آلفا امگا
CAD	Computer-Aided Design	طراحی به کمک رایانه
CAM	Computer-Aided Manufacturing	تولید به کمک رایانه
TPM	Technical Performance Measure	شاخص عملکرد فنی
DDP	Design-Dependent Parameters	پارامترهای وابسته به طراحی

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
DIP	Design-Independent Parameters	پارامترهای مستقل طراحی
MOE	Measures of Effectiveness	شاخص‌های اثربخشی
SEBoK	Systems Engineering Body of Knowledge	شاکله دانش مهندسی سیستم‌ها
PMP	Program management plan	برنامه مدیریت دستور کار
SEMP	Systems Engineering Management Plan	برنامه مدیریتی مهندسی سیستم‌ها
SEP	Systems Engineering Plan	برنامه مهندسی سیستم‌ها
FOM	Figure of Merit	میزان رویه
MTBM	Mean Time Between Maintenance	میانگین زمان بین نگهداری و تعمیر
MDT	Maintenance Downtime	زمان از کار افتادگی نگهداری و تعمیر
LCC	Life Cycle Cost	هزینه چرخه عمر
Mct	Maintenance Time	زمان تعمیر
MTBF	Mean Time Between Failures	میانگین زمان بین خرابی‌ها
QFD	Quality Function Deployment	گسترش عملکرد کیفیت
HOQ	House of Quality	خانه کیفیت
FFBD	Functional Flow Block Diagram	نمودار بلوکی جریان وظیفه
IDEF	Integrated DEFinition	تعریف ادغامی
ANSI	American National Institute	موسسه ملی آمریکا
EIA	Electronic Industries Alliance	اتحادیه صنایع الکترونیک

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
ISO	International Organization for Standardization	سازمان بین المللی استاندارد
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis	مدهای خرابی، اثرات و تحلیل حساسیت
FTA	Fault Tree Analysis	تحلیل درخت خطا
RCM	Reliability-Centered Maintenance	نگهداری و تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان
LORA	Level-of-Repair Analysis	تحلیل سطوح تعمیر
MTA	Maintenance Task Analysis	تحلیل وظایف نگهداری و تعمیرات
TPM	Total Productive Maintenance	نگهداری و تعمیرات بهره ور
OTA	Operator Task Analysis	تحلیل وظایف اپراتور
OSD	Operational Sequence Diagram	نمودارهای توالی عملیات
MTTF	Mean Time to Failure	میانگین زمان تا خرابی
CAE	Computer Aided Engineering	مهندسی به کمک رایانه
CADD	Computer Aided Design Data	اطلاعات طراحی به کمک رایانه
CAS	Computer Aided Support	پشتیبانی به کمک رایانه
COTS	Commercial off-the-shell	آیتم تجاری
CSCI	Computer Software Configuration items	آیتم های ساختاری نرم افزار رایانه ای
CSC	Computer Software Component	اجزای نرم افزار رایانه ای

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
CSU	Computer Software Unit	واحد های نرم افزار رایانه‌ای
ECP	Engineering change proposal	طرح پیشنهادی تغییر مهندسی
CM	Configuration management	مدیریت ساختار
TEMP	Test and Evaluation Master Plan	برنامه اصلی آزمایش و ارزیابی
PELCC	Present Equal of Life Cycle Cost	معادل کنونی هزینه چرخه عمر
LTD	Lead Time Demand	زمان تحویل تقاضا
TC	Total Cost	کل هزینه
LP	Linear Programming	برنامه ریزی خطی
FIFO	First in First out	آنکه اول می‌آید اول خدمت می‌گیرد
CPM	Critical Path Method	روش مسیر بحرانی
PERT	Program Evaluation and Review Technique	تکنیک ارزیابی و بازبینی برنامه
ED	Experimental Design	طراحی آزمایش
PD	Parameter Design	طراحی پارامتر
TQC	Total Quality Control	کنترل کیفیت جامع
QE	Quality Engineering	مهندسی کیفیت
PT	Project Time	زمان پروژه
MA	Maintenance Activity	فعالیت نگهداری و تعمیرات
AEG	Active Element Group	از گروه عناصر فعال
RAMS	Reliability And Maintainability	نشست قابلیت اطمینان و قابلیت

معدل فارسی	معدل انگلیسی	اختصار
نگهداری و تعمیرات	Symposium	
مرکز تحلیل اطلاعات قابلیت اطمینان	Reliability Information Analysis Center	RIAC
انجمن مهندسان قابلیت اطمینان	Society of Reliability Engineers	SRE
میانگین زمان تا تعمیر	Mean Time to Repair	MTTR
زمان تاخیر تدارکات	Logistics Delay Time	LDT
تاخیرات سازمانی	Administrative Delay Time	ADT
اثربخشی سیستم	System Effectiveness	SE
هزینه- اثربخشی	Cost-Effectiveness	CE
تحقیق و توسعه	Research & Development	R&D
عملیات و نگهداری و تعمیرات	Operation & Maintenance	O&M
ساختار شکست هزینه	Cost Breakdown Structure	CBS
اثربخشی کلی تجهیز	Overall Equipment Effectiveness	OEE
زنجیره تامین	Supply Chain	SC
ادغام سیستم‌های انسانی	Human Systems Integration	HIS
تحلیل تکالیف اپراتور	Operator Task Analysis	OTA
آموزش هنگام کار	On-Job Training	OJT
تحلیل قابلیت پشتیبانی	Supportability Analysis	SA
تجارت الکترونیک	Electronic Commerce	EC

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
IT	Information Technology	فناوری اطلاعات
EDI	Electronic Data Interchange	تبادل اطلاعات الکترونیکی
SCM	Supply Chain Management	مدیریت زنجیره تامین
MIT	Massachusetts Institute of Technology	موسسه فناوری ماساچوست
CSCMP	Council of Supply Chain Management Professionals	انجمن حرفه ای های مدیریت زنجیره تامین
ILS	Integrated Logistics Support	پشتیبانی ادغامی تدارکات
PBL	Performance-Based Logistics	تدارکات بر پایه عملکرد
AIT	Automatic Information Technology	فناوری های اطلاعات خودکار
RFID	Radio Frequency Identification	شناسایی فرکانس رادیویی
EOQ	Economic Order Quantity	تعداد سفارش اقتصادی
TAT	Turnaround Time	زمان بازگردانی
LMI	Logistics Management Information	اطلاعات مدیریت تدارکات
CPPI	Continuous Process/Product Improvement	از بهبود مستمر فرایند/محصول
CALS	Continuous Acquisition and Life-cycle Support	اکتساب مستمر و پشتیبانی چرخه عمر
ECDM	Environmental Conscious Design and Manufacturing	طراحی و تولید آگاهانه محیطی
DFE	Design for Environment	طراحی برای محیط

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
EM	Environmental Management	مدیریت محیطی
LCA	Life Cycle Analysis	تحلیل چرخه عمر
VCD	Variable Center Device	دستگاه مرکزی متغیر
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm	بازوهای رباتی مونتاژی انتخاب‌گر
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development	سازمان همکاری و توسعه اقتصادی
ISSP	International Society of Sustainability Professionals	مجمع بین‌المللی حرفه‌ای‌های قابلیت حفاظت
DTC	Design-to-cost	هزینه طراحی
WBS	Work Breakdown Structure	ساختار شکست کار
CER	Cost Estimating Relationships	روابط تخمین هزینه
ABC	Activity-Based Costing	هزینه سنجی بر پایه فعالیت
LCSys	Location/Communication System	سیستم مکان‌یابی/ارتباط
CCB	Change Control Board	هیات کنترل تغییرات
SWBS	Summary Work Breakdown Structure	ساختار شکست کار خلاصه
CWBS	Contract Work Breakdown Structure	ساختار شکست کار قرارداد
SOW	Statement of Work	اظهار کار
IPPD	Integrated Product and Process	توسعه ادغامی محصول و فرایند

معادل فارسی	معادل انگلیسی	اختصار
	Development	
تیم محصول ادغام شده	Integrated Product Team	IPT
درخواست برای پروپوزال	Request for Proposal	RFP
دعوت به مناقصه	Invitation for Bid	IFB
سیستم اطلاعات مدیریت	Management Information System	MIS
مدل ارزیابی قابلیت مهندسی سیستم‌ها	Systems Engineering Capability Assessment Model	SECAM
ادغام مدل بلوغ قابلیت	Capability Maturity Model Integration	CMMI

واژه‌نامه

Accessibility	قابلیت دسترسی
Achieved Availability	دسترس‌پذیری بدست آمده
Acquisition	اقتساب
Active Maintenance Time	زمان نگهداری و تعمیرات فعال
Activity	فعالیت
Activity-based costing	هزینه‌سنجی بر پایه فعالیت
Adaptive maintenance	نگهداری و تعمیرات اقتباسی
Administrative delay time	زمان تاخیر اداری
Advance system planning and architecting	برنامه‌ریزی و معماری پیشرفته
Affordability	مقرون به صرفه بودن
Age	عصر
Air Transportation	حمل و نقل هوایی
Aircraft system	سیستم هواپیما
Allocation	تخصیص

Alternative	گزینه
Analogue models	مدل‌های قیاسی
Analysis	تحلیل
Approach	رویکرد
Arrival Mechanism	مکانیسم ورود
Assessment	ارزیابی
Asset	دارایی
Attribute	صفت
Availability	دسترسی‌پذیری
Baseline	خط مبنا
Behavior	رفتار
Benchmarking	الگوبرداری
Binomial Distribution	توزیع دوجمله‌ای
Break-even analysis	تحلیل نقطه سربه سر
Bringing systems into being	خلق سیستم‌ها
Business logistics	تدارکات کسب و کار
Capability	قابلیت
Cause and effect	علت و اثر
Characteristics	خصوصیات
Chart	چارت
Checklist	چک‌لیست
Common function	وظیفه مشترک
Component	جزء
Concept	مفهوم

Concurrent Engineering	مهندسی هم‌زمان
Configuration	ساختار
Considerations	ملاحظات
Consumer	مصرف‌کننده
Corrective	اصلاحی
Criterion/Criteria	معیار/معیارها
Critical design review	بازبینی انتقادی طراحی
Cumulative	تجمعی
Customer	مشتری
Cycle	چرخه
Data	داده
Decision	تصمیم
Decision making	تصمیم‌گیری
Defect	نقص
Dependent failure	خرابی وابسته
Depot	مبدا
Design	طراحی
Detail design	طراحی تفصیلی
Development	توسعه
Diagram	نمودار
Disposability	قابلیت امحا
Disposal	امحا
Distribution	توزیع

Documentation	مستندسازی
Drawing	نقشه
Ecological	اکولوژیکی
Ecology	اکولوژی
Effectiveness	اثربخشی
Elapsed time	زمان سپری شده
Elements	عناصر
Engineering	مهندسی
Entropy	آنتروپی
Environment	محیط
Environmental	محیطی
Equipment	تجهیز / تجهیزات
Equivalence	تعادل
Ergonomics	ارگونومی
Error	خطا
Estimation	تخمین
Evaluation	ارزیابی
Evolution	تکامل
Expansion	انبساط
Experimental	آزمایشی
Exponential	نمایی
Facility	تجهیز
Factor	فاکتور
Feasibility analysis	امکان‌سنجی

Feedback	بازخورد
Flow	جریان
Function	وظیفه
Functional	وظیفه‌ای
Gantt chart	گانت چارت
Geometric	هندسی
Growth	رشد
Hardware	سخت افزار
Hazard	خطر
Hierarchy	سلسله مراتب
Human	انسان
Human factors	فاکتورهای انسانی
Human-made systems	سیستم‌های مصنوعی
Human-modified systems	سیستم‌های اصلاح شده
Humidity	شرجی بودن
Hypothesis	فرض
Identification	شناسایی
Impact	اثر
Improvement	بهبود
Industrial	صنعتی
Infant	نوزاد
Inflation	تورم
Information	اطلاعات

Inherent	ذاتی
Input	ورودی
Integrated	ادغام شده
Integration	ادغام
Interchangeability	قابلیت تعویض
Interest	بهره
Intermediate	میانی
Inventory	موجودی
Job	شغل
Labor	نیروی کار
Leadership	رهبری
Leadtime	زمان تحویل
Learning curve	منحنی یادگیری
Level	سطح
Life	عمر
Life-cycle	چرخه عمر
Loading time	زمان بارگذاری
Logistics	تدارکات
Machine	ماشین
Maintainability	قابلیت نگهداری و تعمیرات
Maintenance	نگهداری و تعمیرات
Management	مدیریت
Manufacturability	قابلیت تولید
Manufacturer	تولیدکننده

Market	بازار
Material	مواد
Mathematical models	مدل‌های ریاضی
Matrix	ماتریس
Maturity	بلوغ
Measure	شاخص
Mechanism	مکانسیم
Method	روش
Mission	ماموریت
Mockups	مدل آزمایشی
Mode	مد
Model	مدل
Modification	اصلاح
Motivation	انگیزه
Need	نیاز
Network	شبکه
Noise	سروصدا
Objective	هدف
Operational	عملیاتی
Operator	اپراتور
Optimization	بهینه‌سازی
Optimum	بهینه
Organization	سازمان/سازماندهی

Organizational	سازمانی
Outline	طرح کلی
Output	خروجی
Outsourcing	برون‌سپاری
Packaging	بسته‌بندی
Parameter	پارامتر
Parametric	پارامتری
Partnership	همکاری
Path	مسیر
Performance	عملکرد
Personnel	کارکنان
Phaseout	از دور خارج کردن
Physical	فیزیکی
Plan	برنامه
Policy	سیاست
Prediction	پیش‌بینی
Preliminary	اولیه
Primary	اصلی
Prime	اصلی
Prioritization	اولویت‌بندی
Process	پردازش / فرایند
Procurement	خرید / تدارک
Producer	تولیدکننده
Producibility	قابلیت تولید

Product	محصول
Profile	پروفایل
Program	دستور کار
Proposal	پروپوزال
Prototype	نمونه
Quality	کیفیت
Queuing	صف
Radiation	تشعشع
Rate	نرخ
Recovery	بازیابی
Recycle	بازیافت
Reliability	قابلیت اطمینان
Remanufacturing	بازتولید
Repair	تعمیر
Replacement	تعویض
Reporting	گزارش‌دهی
Requirements	نیازمندی‌ها
Research	تحقیق
Retirement	ازکار اندازی
Review	بازبینی
Risk	ریسک
Safety	ایمنی
Scenario	سناریو

Schedule	زمان‌بندی
Science	علم
Secondary	فرعی
Sensitivity analysis	تحلیل حساسیت
Sequence	توالی
Simulation	شبیه‌سازی
Software	نرم افزار
Spares and repair parts	قطعات یدکی و تعمیراتی
Specifications	مشخصات فنی
Statistical	آمار
Stress-strain	تنش-کرنش
Structural	ساختاری
Structure	ساختار
Subsystem	زیرسیستم
Supplier	تامین‌کننده
Support	پشتیبانی
Supportability	قابلیت پشتیبانی
Sustainability	قابلیت پایداری
Synthesis	ترکیب
Systematic	سیستمی
Task	تکلیف
Technical	فنی
Technology	فناوری
Test	آزمایش

Trade-off	موازنه
Transportation	حمل و نقل
Uncertainty	عدم قطعیت
Uniform	یکنواخت
Unscheduled	زمان‌بندی نشده
Usability	قابلیت استفاده
Utilization	بهره‌برداری
Validation	اعتبارسنجی
Value	ارزش
Verification	صحه‌گذاری
Vision	چشم انداز
Waiting	در انتظار
Warehousing	انبارداری
Wearout	فرسودگی

SYSTEMS, SYSTEMS ANALYSIS, AND SYSTEMS ENGINEERING

1. Ackoff, R. L., *Redesigning the Future: A Systems Approach to Societal Problems*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1974.
2. ANSI/GEIA EIA-632, *Processes for Engineering a System*, Electronic Industries Alliance (EIA), Arlington, VA, September 2003.
3. Aslaksen, E. W., *Designing Complex Systems: Foundations of Design in the Functional Domain*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
4. Blanchard, B. S. and W. J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*, 5th ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2011.
5. Blanchard, B. S., *System Engineering Management*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2008.
6. Boardman, J. and B. Sauser, *Systems Thinking: Coping with 21st Century Problems*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2008.
7. Boyd, D. W., *Systems Analysis and Modeling: A Macro—Micro Approach with Multidisciplinary Applications*, Academic Press, San Diego, CA, 2001.
8. Buede, D. M., *The Engineering Design of Systems: Models and*

- Methods*. 2nd ed.. John Wiley & Sons, Inc.. Hoboken, NJ. 2009.
9. Cempel, C.. *Teoria I Inzynieria Systemow*, Instytut Mechaniki Stosowanej. Poznan. PL (in Polish), 2006.
 10. Collen, A. and W. W. Gasparski (Eds.). *Design and Systems: General Applications of Methodology*, Transaction Publishers, New Brunswick. NJ. 1995.
 11. DAU, *Systems Engineering Fundamentals*. Defense Acquisition University (DAU) Press, Fort Belvoir, VA. December 2005.
 12. Dickerson, C. and D. N. Mavris. *Architecture and Principles of Systems Engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
 13. DOD, *Systems Engineering Guide for Systems of Systems*. Department of Defense, Washington, DC, 2008.
 14. Eisner, H., *Essentials of Project and Systems Engineering Management*. 3rd ed.. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ. 2008.
 15. Garvey, P. R., *Analytical Methods for Risk Management: A Systems Engineering Perspective*, CRC Press, Boca Raton, FL. 2008.
 16. GEIA EIA-731-1, *Systems Engineering Capability Maturity Model (SECM)*. Electronic Industries Alliance (EI A). Arlington. VA, August 2002.
 17. GEIA EIA-731-2, *Systems Engineering Capability Model Appraisal Method*. Electronic Industries Alliance (EI A), Arlington, VA. August 2002.
 18. Gilb, T., *Competitive Engineering: A Handbook for Systems Engineering, Requirements Engineering, and Software Engineering Using Planguage*, Elsevier Butterworth Heinemann, Burlington. MA, 2005.
 19. Grady, J. O., *System Engineering Deployment*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.
 20. Graedel, T.E. and B. R. Allenby, *Industrial Ecology*, 2nd ed.,

- Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
21. Hitchins, D. K., *Systems Engineering: A 21st Century Systems Methodology*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2008.
 22. Hubka, V. and W. E. Elder, *Theory of Technical Systems*, Springer-Verlag, Berlin. 1984.
 23. IEEE 1220, *Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, NY, 2005.
 24. IEEE 1233, *IEEE Guide for Developing System Requirements Specifications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, NY, 2005.
 25. (IEEE), New York, NY, 2005.
 26. INCOSE—The International Council on Systems Engineering, *INSIGHT*, Quarterly Newsletter, INCOSE, 7670 Opportunity Rd., Suite 220, San Diego, CA 92111.
 27. INCOSE—The International Council on Systems Engineering, *Systems Engineering*, -Quarterly Journal, published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
 28. INCOSE-TP-2003-016-02, *Systems Engineering Handbook*, International Council on Systems Engineering (INCOSE), San Diego, CA, 2007.
 29. ISO/IEC-15288, *Systems Engineering: Systems Life-Cycle Processes*, 2002.
 30. ISO/IEC-19760, *A Guide for the Application of ISO/IEC-15288 System Life-Cycle Processes*, 2004.
 31. Jamsgidi, M., *Systems of Systems Engineering: Principles and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. 2009.
 32. Kossiakoff, A. and W. Sweet, *Systems Engineering: Principles and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2003.

33. Maier, M. W. and E. Rechtin, *The Art of Systems Architecting*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
34. Martin, J. N., *Systems Engineering Guidebook: A Process for Developing Systems and Products*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.
35. MIL-STD-499, *Systems Engineering Management*, Department of Defense, Washington, DC, 1969.
36. Moody, J. A., W. L. Chapman, F. D. Van Voorhees, and A. T. Bahill, *Metrics and Case Studies for Evaluating Engineering Designs*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.
37. Pugh, S., *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*, Addison- Wesley Publishing, Reading, MA, 1991.
38. Sage, A. P. and J. E. Armstrong, *Introduction to Systems Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2000.
39. Sage, A. P. and W. B. Rouse (Eds.), *Handbook of Systems Engineering and Management*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2009.
40. Sage, A. P., *Systems Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1992.
41. Sandquist, G. M., *Introduction to System Science*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1985.
42. Stasinopoulos, P., M. H. Smith, K. Hargroves, and C. Desha, *Whole System Design: An Integrated Approach to Sustainable Engineering*, Earthscan Publishing, London, UK, and Sterling, VA, 2009.
43. Wasson, C.S., *System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2006.
44. Young, R. R., *Effective Requirements Practices*, Addison-Wesley Publishing, Reading, M A, 2001.

CONCURRENT AND SIMULTANEOUS ENGINEERING

45. Anderson, D. M., *Design for Manufacturability and Concurrent Engineering*, CIM Press, 2008.

46. Hartley, J. R., *Concurrent Engineering: Shortening Lead Times, Raising Quality, and Lowering Costs*, Productivity Press, New York, NY, 1998.
47. Loureiro, G. and R. Curran, *Complex Systems Concurrent Engineering: Collaboration, Technology Innovation and Sustainability*, Springer Publishers, 2007.
48. Prasad, B., *Concurrent Engineering Fundamentals: Integrated Product Development*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.
49. Shina, S. G. (Ed.), *Successful Implementation of Concurrent Engineering Products and Processes*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1997.

SOFTWARE AND COMPUTER-BASED SYSTEMS

50. Boehm, B. W., *Software Engineering Economics*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1981.
51. Eisner, H., *Computer-Based Systems Engineering*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1989.
52. IEEE/EIA-12207. *Information Technology: Software Life-Cycle Processes*. Defense Automated Printing Services, Philadelphia, PA.
53. ISO/IEC 15939, *Software Engineering: Software Measurement Process*, 2002.
54. Jones, C., *Software Assessments, Benchmarks, and Best Practices*. Addison Wesley Longman, Reading, M A, 2000.
55. Moore, J.W., *The Roadmap to Software Engineering: A Standards-Based Guide*, Wiley IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 2006.
56. Pfleeger, S. L. and J. M. Atlee, *Software Engineering: Theory and Practice*, 4th ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2009.
57. Pressman, R. S., *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, NY, 2009.
58. Sage, A. P. and J. D. Palmer, *Software Systems Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1990.

60. Sage, A. P, *Systems Management for Information Technology and Software Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1995.
61. Sommerville, I., *Software Engineering*, 8th ed., Addison Wesley, MA, 2006.
62. van Vliet, H., *Software Engineering: Principles and Practices*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2008.
63. Wiegers, K. E., *Software Requirements*, 2nd ed., Microsoft Press, Redmond, WA, 2003.

RELIABILITY ENGINEERING

64. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Proceedings, Sponsored by 10 Technical Societies, Scien-Tech Associates, Inc., Banner Elk, NC.
65. Barlow, R. E., *Engineering Reliability (Statistics and Applied Probability)*, Society of Industrial & Applied Mathematics, New York, NY, 1998.
66. Blischke, W. R. and D. N. P. Murthy, *Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2000.
67. Dhillon, B. S., *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
68. Halpern, S., *The Assurance Sciences*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1978.
69. Henly, E. J. and H. Kumamoto, *Design for Reliability and Safety Control*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1985.
70. IEEE 1332-1998, *IEEE Standard Reliability Program for Development and Production of Electronic Systems and Equipment*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, NY, 1998.
71. IEEE 1413-1998, *IEEE Standard Methodology for Reliability Predictions and Assessment for Electronic Systems and Equipment*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, NY, 1998.
72. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), *IEEE Transactions on Reliability*, published quarterly, IEEE, Piscataway, NJ.

73. Ireson, W. G. (Ed.), *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, NY, 1995.
74. Knezevic, J., *Reliability, Maintainability, and Supportability: A Probabilistic Approach*. McGraw-Hill, UK, 1993.
75. MIL-HDBK 217F, *Reliability Prediction for Electronic Equipment*, Department of Defense. Washington, DC.
76. Nachlas, J. A., *Reliability Engineering: Probabilistic Models and Maintenance Methods*. CRC Press. Boca Raton, FL, 2005.
77. Nikolaidis, E., D. M. Ghiocel, and S. Singhal, *Engineering Design Reliability Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
78. O'Connor, P. D.T., D. Newton, and R. Bromley. *Practical Reliability Engineering*. 4th ed., John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, NJ, 2002.
79. Pecht, M. (Ed.). *Product Reliability, Maintainability, and Supportability Handbook*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
80. RIAC. *Handbook of 217Plus Reliability Prediction Models*. Reliability Information Analysis Center (RIAC), Utica, NY, 2006.
81. RIAC, *System Reliability Toolkit, Reliability Information Analysis Center (RIAC)*, Utica, NY, 2005.
82. Smith, D. J., *Reliability, Maintainability, and Risk*, 7th ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, 2005.

MAINTAINABILITY ENGINEERING AND MAINTENANCE

83. Blanchard, B. S., D. Verma, and E. L. Peterson, *Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1995.
84. Bloom, N., *Reliability-Centered Maintenance (RCM): Implementation Made Simple*, McGraw-Hill, NY, 2005.
85. Dhillon, B. S., *Engineering Maintenance*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
86. Dhillon, B.S., *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*,

- CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
87. Knezevic, J., *Systems Maintainability: Analysis, Engineering, and Management*, Chapman and Hall. London, UK, 1997.
 88. Maintenance Steering Group 3 Task Force, *Operator/Manufacturer Schedule Maintenance Development*, Air Transport Association (ATA) of America, Washington, DC, April 2001 (<http://www.airlines.org>).
 89. Moubray, J., *Reliability-Centered Maintenance*, 2nd ed., Industrial Press, Boca Raton, FL, 1997.
 90. Nakajima, S., *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*, Productivity Press, New York, NY, 1994.
 91. Nyman, D. and J. Levitt, *Maintenance Planning, Scheduling, and Coordination*, Industrial Press, Boca Raton, FL, 2002.
 92. Palmer, R., *Maintenance Planning and Scheduling Handbook*, 2nd ed., McGraw-Hill, NY, 2005.
 93. Patton, J.D., *Maintainability and Maintenance Management, Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA)*, 2005.
 94. RIAC. *Maintainability Toolkit: A Practical Guide for Designing and Developing Maintainable Products and Systems*, Reliability Information Analysis Center, Utica, NY, 2000.
 95. Willmott, P. and D. McCarthy, *Total Productive Maintenance: A Route to World-Class Performance*, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, 2001.
 96. Wireman, T., *Total Productive Maintenance*, 2nd ed., Industrial Press, Boca Raton, FL, 2003.

HUMAN FACTORS AND SAFETY ENGINEERING

97. Bahr, N. J., *System Safety Engineering and Risk Assessment: A Practical Approach*. Taylor & Francis, New York, NY, 1997.
98. Booher, H. R., *Handbook of Human Systems Integration*. Wiley-Interscience, Hoboken.
99. NJ, 2003.

100. Bridger, R.S., Introduction to Ergonomics. 3rd ed., CRC. Boca Raton, FL. 2008.
101. Chapanis, A., Human Factors in Systems Engineering, John Wiley & Sons. Inc.. Hoboken, NJ, 1996.
102. Dhillon, B. S., Engineering Safety: Fundamentals, Techniques, and Applications. World Scientific Publishing, 2003.
103. GEIA HEB 1, Human Engineering: Principles and Practices, Government Electronics and Information Technology Association (GEIA), June 2002.
104. Kroemer, K. H. E., H. J. Kroemer, and K. E. Kroemer-Elbert. Ergonomics: How to Design for Ease and Efficiency, 2nd ed., Pearson Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ. 2001.
105. Lehto, M.R. and J. Buck, Introduction to Human Factors and Ergonomics for Engineers, CRC, Boca Raton, FL, 2007.
106. Raheja, D.G. and M. Allocco, Assurance Technologies Principles and Practices: A Product, Process, and Systems Safety Perspective, 2nd ed., John Wiley & Sons. Inc.. Hoboken, NJ, 2006.
107. Roland, H. E. and B. Moriarity, System Safety Engineering and Management. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1990.
108. Salvendy, G. (Ed.), Handbook of Human Factors and Ergonomics. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1997.
109. Sanders, M. S. and E. J. McCormick, Human Factors in Engineering and Design, 7th ed., McGraw-Hill, New York, NY, 1993.
110. Wickens, C. D., J. Lee, Y. D. Liu, and S. Gordon-Becker, An Introduction to Human Factors Engineering, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
111. Woodson, W. E., P. Tillman, and B. Tillman, Human Factors Design Handbook, 2nd ed.. McGraw-Hill, New York, NY, 1992.

PRODUCTION, MANUFACTURING. AND QUALITY ASSURANCE

112. Akao, Y., Quality Function Deployment: Integrating Customer

Requirements in to

113. Product Design, Productivity Press, Portland, OR, 2004.
114. Anderson, D. M., Design for Manufacturability, CIM Press, 1990.
115. Besterfield, D. H., Quality Control, 8th ed., Pearson-Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2008.
116. Breyfogle, F. W., J. M. Cupello, and B. Meadows, Managing Six Sigma: A Practical Guide to Understanding, Assessing, and Implementing the Strategy That Yields Bottom-Line Success, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2000.
117. Bralla, J., Design for Manufacturability Handbook, 2nd ed., McGraw-Hill, NY, 1998.
118. Evans, J. R., Total Quality Management, Organization, and Strategy, 4th ed., SouthWestern Publishing, 2004.
119. Ficalora, J. and L. Cohen, Quality Function Deployment and Six Sigma. 2nd ed.. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2009.
120. Fowlkes. W. Y. and C. M. Creveling, Engineering Methods for Robust product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development, Addison-Wesley, Reading. MA, 1995.
121. Fowlkes. W. Y. and C. M. Creveling, Engineering Methods for Robust product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development, Addison-Wesley, Reading. MA, 1995.
122. Hoyle. D.. ISO 9000 Quality Systems Handbook, 5th ed., Butterworth-Heinemann, NY, 2005.
123. ISO 9000 Family. Quality Management Standards, International Organization for Standardization (ISO).
124. ISO 14000 Family, Environmental Management Standards, International Organization for Standardization (ISO).
125. Juran, J. M. and G. A. Blanton (Eds.), Juran's Quality Control Handbook, 5th ed., McGraw-Hill, New York, NY, 1998.

126. Lowenthal, J. N., Six Sigma Project Management: A Pocket Guide, ASQ Quality Press, Milwaukee, WI, 2001.
127. Madu, C. N. (Ed.). Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing, Kluwer Academic Publishers, New York, NY, 2001.
128. McMahon, C. and J. Browne, CAD-CAM: Principles, Practice and Manufacturing Management. 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 1998.
129. Montgomery, D. C., Introduction to Statistical Quality Control, 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2008.
130. RIAC, Quality Toolkit, Reliability Information Analysis Center (RIAC), Utica, NY, 2001.
131. Revelle, J. B., Manufacturing Handbook of Best Practices: An Innovation, Productivity, and Quality Focus, St. Lucie Press, Boca Raton, FL, 2001.
132. Roy, R. K., Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2001.
133. Smith, G. M., Statistical Process Control and Quality Improvement, 4th ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
134. Swamidass, P. M. (Ed.), Innovations in Competitive Manufacturing, American Management Association (AMACOM), Boston, MA, 2002.

LOGISTICS, SUPPLY CHAIN, SUPPORTABILITY, AND SUSTAINABILITY

135. Ballou, R. H., Business Logistics/Supply Chain Management, 5th ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
136. Blackburn, W. R., The Sustainability Handbook: The Complete Management Guide to Achieving Social, Economic, and Environmental Responsibility, Earthscan Publications Ltd., UK, 2007.
137. Blanchard, B. S., Logistics Engineering and Management, 6th ed.,

- Pearson Prentice- Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.
138. Bowersox, D. J., D. J. Closs, and M.B. Cooper, Supply Chain Logistical Management, 3rd ed., McGraw Hill, NY, 2009.
139. Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP), Annual Conference Proceedings, CSCMP, Lombard, IL.
140. Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP), Journal of Business Logistics, CSCMP, Lombard, IL.
141. Coyle, J. J., E. J. Bardi, and C. J. Langley, The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective, 7th ed., South-Western, Mason, OH, 2002.
142. Dresner, S.. The Principles of Sustainability, 2nd ed., Earthscan Publications Ltd., UK, 2009.
143. Epstein, M. J., J. Elkington, and H. B. Leonard, Making Sustainability Work: Best Practices in Managing and Measuring Corporate Social, Environmental, and Economic Impacts. Berrett-Koehler Publishers, 2008.
144. Frazelle, E. H., Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management, McGraw-Hill, New York, NY, 2002.
145. Frohne, P.T.. Quantitative Measurements for Logistics, McGraw Hill, NY, 2008.
146. Jones, J. V.. Integrated Logistics Support Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill, NY, 2006.
147. Jones, J. V., Supportability Engineering Handbook: Implementation, Measurement, and Management, McGraw Hill, NY, 2007.
148. Langford, J. W., Logistics: Principles and Applications, 2nd ed., McGraw-Hill, NY, 2006.
149. MIL-HDBK-502, Department of Defense Handbook on Acquisition Logistics, Department of Defense, Washington, DC, 1997.
150. M1L-PRF-49506, Performance Specification, Logistics Management Information, Department of Defense, Washington, DC.

151. RIAC, Supportability Tool Kit, Reliability Information Analysis Center (RIAC), Utica, NY, 2005.
152. SOLE-The International Society of Logistics, Logistics Spectrum, Quarterly Journal, SOLE, Hyattsville, MD.
153. SOLE-The International Society of Logistics, Annual Symposium Proceedings, SOLE, Hyattsville, MD.
154. Taylor, G. D. (Ed.), Logistics Engineering Handbook, CRC Press, Boca Raton, FL, 2008.
155. Taylor, G. D. (Ed.), Introduction to Logistics Engineering, CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
156. U. S. Air Force, Air Force Journal of Logistics, Quarterly Journal, Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

OPERATIONS RESEARCH AND OPERATIONS MANAGEMENT

157. Fabrycky, W. J., P. M. Ghare, and P. E. Torgersen, Applied Operations Research and Management Science, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1984.
158. Hall, R. W., Queuing Methods for Service and Manufacturing, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
159. Hillier, F. S. and G. J. Lieberman, Introduction to Operations Research, 8th ed., McGraw-Hill, NY, 2005.
160. Krajewski, L. J. and L. P. Ritzman, Operations Management: Strategy and Analysis, 5th ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 1998.
161. Peck, L. G. and R. N. Hazelwood, Finite Queuing Tables, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1958.
162. Russell, R. S. and B. W. Taylor, Operations Management, 4th ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
163. Stevenson, W. J., Operations Management, 8th ed., McGraw-Hill, Boston, MA, 2005.

164. Taha, H. A., *Operations Research: An Introduction*, 8th ed., Pearson Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, 2006.

ENGINEERING ECONOMICS AND LIFE-CYCLE COST ANALYSIS

165. Blank, L. and A. Tarquin, *Engineering Economy*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, NY, 2002.
166. Canada, J. R., W. G. Sullivan, D. J. Kulonda, and J. A. White *Capital Investment Analysis for Engineering and Management*, Pearson Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, 2005.
167. Conkins, G., *Activity-Based Cost Management: An Executive's Guide*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2001.
168. Fabrycky, W. J. and B. S. Blanchard, *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1991.
169. Fabrycky, W. J., G. J. Thuesen, and D. Verma, *Economic Decision Analysis*, 3rd ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998.
170. Fisher, G. H., *Cost Considerations in Systems Analysis*, American Elsevier Publishing Co., New York, NY, 1971.
171. Hicks, D.T., *Activity-Based Costing: Making It Work for Small and Mid-Sized Companies*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1998.
172. Ostwald, P. F. and T. S. McLaren, *Cost Analysis and Estimating for Engineering and Management*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
173. Thuesen, G. J. and W. J. Fabrycky, *Engineering Economy*, 9th ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.

MANAGEMENT AND SUPPORTING AREAS

174. ANSI/GEIA E1 A 649-A, *National Consensus Standard for Configuration Management*, Electronic Industries Alliance (EIA), Arlington, VA, April 2004.
175. Camp, R. C. *Benchmarking: The Search for Industry Best Practices That Lead to Superior Performance*, Productivity Press, OR, 2006.

176. 3. Chapman, C. and S. Ward, *Project Risk Management: Processes, Techniques, and*
177. *Insights*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2003.
178. Chrissis, M. B., M. Konrad, and S. Shrum, *CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement*, 2nd ed., Addison-Wesley Publisher, Reading, MA, 2006.
179. Cleland, D. I., *Project Management: Strategic Design and Implementation*, 3rd ed., McGraw-Hill, NY, 1998.
180. Corbitt, R. A., *Standard Handbook of Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York, NY, 1999.
181. DOD 5000.2-R, *Mandatory Procedures for Major Defense Acquisition Programs (MDAPS) and Major Automated Information System (MAIS) Acquisition Programs*, Office of the Secretary of Defense, The Pentagon, Washington, DC, April 5, 2002.
182. DODI 5000.02, *Operation of Defense Acquisition System*, Department of Defense, Washington, DC, 2008.
183. Gibson, J. L., J. H. Donnelly, J. M. Ivancevich, and R. Konopaske, *Organizations: Behavior, Structure, and Processes*, McGraw-Hill/Irwin, NY, 2003.
184. Gordon, J. R. and S. R. Gordon, *Information Systems: A Management Approach*, 2nd ed., Dryden Press, NY, 1998.
185. Haimes, Y. Y., *Risk Modeling, Assessment, and Management*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1998.
186. Kerzner, H., *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 9th ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2005.
187. Kulpa, M.K. and K.A. Johnson. *Interpreting the CMMI: A Process Improvement Approach*, Auerbach Publications, 2003.

-
188. Lewis, J. P, *Fundamentals of Project Management*. 3rd ed., AMACOM, NY, 2006.
189. Magrab, E. B., *Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.
190. National Academy of Engineering (NAE). *Educating the Engineer of 2020*. The National Academies Press, Washington, DC, 2005.
191. Smith, P. G. and G. M. Merritt, *Proactive Risk Management: Controlling Uncertainty in Product Development*, Productivity Press, OR, 2002.
192. Sorrentino, J., *Configuration Management: Implementation, Principles, and Applications for Manufacturing Industries*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2008.