
بسم الله الرحمن الرحیم

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 دوم

مولفان: بنجامین.اس. بلانچارد، والتر.جی. فابریکی

مترجمان: دکتر علی اسدی، محمدرضا حاجی‌خانیان

سازمان صنایع دفاع
معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری

سرشناسه : بلانچارد، بنجامین اس.، ۱۹۲۹ - م. Blanchard, Benjamin S
عنوان و نام پدیدآور : مهندسی و تحلیل سیستم‌ها
مشخصات نشر : تهران: شرکت پیشرو فناوری قائد، ۱۳۹۴-
مشخصات ظاهری : ۲ج.: مصور ،جدول ،نمودار
شابک : دوره :۱-۰۸-۷۷۴۹-۶۰۰-۹۷۸؛ ج.۲: ۴-۰۷-۷۷۴۹-۶۰۰-۹۷۸
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 : حاجی‌خانیان، محمدرضا، ۱۳۴۸- ، مترجم
شناسه افزوده : سازمان صنایع دفاع. معاونت علوم، تحقیقات و توسعه فناوری

عنوان: **مهندسی و تحلیل سیستم (جلد دوم)**
مولفان: بنجامین.اس. بلانچارد، والتر.جی. فابریکی
مترجمان: دکتر علی اسدی، محمدرضا حاجی‌خانیان
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 دوم: ۴-۰۷-۷۷۴۹-۶۰۰-۹۷۸
شابک دوره‌ی دو جلدی: ۱-۰۸-۷۷۴۹-۶۰۰-۹۷۸
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 ۰۲۱- ۲۲۷۷۱۲۲۳

تهران، نارمک، بالاتر از میدان نبوت (هفت حوض)، خیابان کیانی ثابت، مجتمع تجاری کیش، طبقه ششم، واحد ۱۱، انتشارات شرکت پیشرو فناوری قائد ۰۲۱-۷۷۲۴۱۰۱۴-۵

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، کاراتر و ارزان‌تر هستند. در عین حال، در فضای فناوری‌های پیچیده با عدم قطعیت‌های زیاد و محیط پویای قرن بیست ویکم، 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 به‌هم 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 به‌دنبال 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 علاوه‌بر تحمیل هزینه‌های هنگفت در فرایند طراحی، به‌دلیل 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
بهار۱۳۹۴

پیش‌گفتار

مسئله‌ی پیشرفت علمی و ارتباط علم با فنّاوری را در کشور جدّی 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)(۹۳/٤/۱۱)

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 توسه فناوری ضمن ارج نهادن به محققین دانش با حمایت از آثار مولفین و مترجمین و انتشار دستاوردهای با ارزش انان 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 به‌هم است که تشکیل یک کل واحد را می‌دهند. اما این‌طور نیست که هر مجموعه‌ای از آیتم‌ها، حقایق، روش‌ها یا دستورالعمل‌ها، یک سیستم را به‌وجود 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 به‌عنوان یک مرجع برای آموزش‌های شخصی برای عملیاتی نمودن مباحث مهندسی سیستم‌ها در صنایع به‌کار 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 درنظر 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 آثار 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 وقدردانی 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

بخش چهارم – طراحی برای امکان‌سنجی عملیات

طراحی و توسعه‌ی سیستم از طریق فرایند جامع طراحی سیستم که در بخش دوم این کتاب تشریح شد، انجام می‌شود. این کوشش برای طراحی سیستم، نیازمند استفاده‌ی مناسب و به‌موقع از مدیریت و مهندسی است تا احتمال طراحی سیستم که از نظر عملیاتی امکان‌پذیر است، بیشینه شود. امکان‌سنجی عملیاتی یعنی سیستم آن‌طور که مدنظر است کار کرده و به‌صورتی کارا و اثربخش، پاسخ دهنده‌ی نیاز معلوم مشتری باشد.

یک سیستم تا زمانی که استقرار نیافته و عملیاتی نشود، هیچ ارزشی ندارد. تنها پس از آن است که قابلیت اتکای طراحی سیستم در واقعیت مشخص می‌شود. استفاده از خصوصیات درست در ساختار سیستم کمک می‌کند تا از مطلوبیت خروجی عملیاتی، اطمینان حاصل شود. این هدف به راحت‌ترین روش توسط استفاده‌ی به‌موقع و مناسب از تخصص‌های مهندسی و فنی در ابتدای فرایند مهندسی سیستم‌ها به‌دست می‌آید.

اگرچه خصوصیات مرسوم در حوزه‌های آیرودینامیک، برق، مکانیک، سازه و دیگر حوزه‌های مربوط محل اصلی تاکید است، اما به تنهایی کافی نیستند. یک سیستم می‌تواند هدف مدنظر خود

را با بیش‌ترین اثربخشی ارائه دهد، اگر خصوصیات فنی و عملیات در طراحی سیستم مهندسی شده باشد. برای تضمین موفقیت، خروجی‌های عملیاتی مطلوب باید به‌عنوان بخشی از طراحی و توسعه‌ی کار در نظر گرفته شوند. این موارد عبارت‌اند از پارامترهای وابسته به طراحی مانند قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، قابلیت پشتیبانی، قابلیت بهره‌برداری، قابلیت تولید، قابلیت امحا، قابلیت حفاظت، مقرون به‌صرفه بودن و بقیه موارد است. به‌طور کلی در طراحی برای X، در نظر گرفتن این پارامترها در طراحی یک سیستم برای دست‌یابی به رفتار عملیاتی مطلوب ضروری است.

هدف از بخش چهارم، ارائه‌ی تعمیمی از حوزه‌های طراحی است که اثر قابل‌توجهی بر کارکرد و ارزش نهایی یک سیستم دارند. این کار با بررسی ملاحظات طراحی در پنج فصل مرتبط انجام شده است. فصل ۱۲ به قابلیت اطمینان به‌عنوان شناخته شده‌ترین پارامتر وابسته به طراحی اختصاص یافته است. در حالی‌که قابلیت اطمینان به زمان خرابی می‌پردازد، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به موضوعات زمان تعمیر اختصاص می‌یابد که در فصل ۱۳ مورد بحث قرار گرفته است. قابلیت بهره‌برداری، موضوع فصل ۱۴، یک پارامتر است که فاکتورهای انسانی در سیستم را مورد مطالعه قرار می‌دهد. فصل ۱۵ به ادامه‌ی موضوع خدمت‌دهی سیستم از طریق قابلیت پشتیبانی و قابلیت خدمت‌دهی پرداخته است. سپس، پارامترهای مربوط به خلق سیستم و از بین بردن آن (قابلیت تولید و قابلیت امحا) همراه با موضوع قابلیت حفاظت در فصل ۱۶ بحث شده است. در نهایت، فصل ۱۷ این بخش کتاب را با بررسی همه موضوعات مهم در هزینه چرخه‌ی عمر و مقرون به‌صرفه بودن سیستم به پایان می‌رساند.

۱۲

طراحی برای قابلیت اطمینان

یکی از اثرگذارترین اهداف در برآورده کردن نیازمندی‌ها برای ممکن بودن عملیات سیستم از طریق *طراحی برای قابلیت اطمینان* به‌دست می‌آید. قابلیت اطمینان، قابلیتی از سیستم برای اجرای ماموریت مدنظر آن در حالتی است که سیستم برای یک دوره‌ی زمانی مشخص عملیاتی باشد، یا از طریق سناریوی ماموریت برنامه‌ریزی شده انجام شود و در یک محیط عملیاتی واقعی اجرا شود. زمانی که سیستم در محیط واقعی کاربر، عملیاتی باشد، انتظار می‌رود که بتواند همه‌ی اهداف عملیاتی مطلوب را که توسط مشتری مشخص شده است، تامین نماید.

تاریخ مملو از مواردی است که سیستم‌ها در محیط عملیاتی، مطابق آنچه که انتظار می‌رفته، عمل نکرده‌اند. خرابی‌های نابهنگام اتفاق افتاده است، نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات بالا و هزینه‌های چرخه‌ی عمر سیستم بیش از حد بوده است. علاوه‌بر این، بسیاری از سیستم‌هایی که اکنون در حالت عملیاتی هستند، نمی‌توانند ماموریت را مطابق آن‌چه طراحی شده است، اجرا کنند.

هنگامی که روابط علت و اثر بررسی می‌شود، عدم توانایی سیستم در تامین اهداف عملیاتی مطلوب، اساسا به‌علت عدم توجه لازم به قابلیت اطمینان و خصوصیات آن در آغاز طراحی است.

قابلیت اطمینان باید طی طراحی مفهومی در قالب کمیت‌های معنادار به‌عنوان یک نیازمندی طراحی، در هنگامی که همه‌ی نیازمندی‌ها (یعنی TPMها) برای سیستم مشخص می‌شوند، به‌خوبی تعیین شود. این نیازمندی‌های سطح بالا باید به زیرسیستم‌ها تخصیص داده شده و خصوصیات (صفات) مناسب در طراحی‌های زیرسیستم و قطعات مدنظر قرار گیرند تا از برآورده شدن نیازمندی‌های مربوط به ماموریت که در ابتدا مشخص شده‌اند، اطمینان حاصل شود.

هدف از این فصل، فراهم آوردن یک درک جامع از قابلیت اطمینان و اهمیت آن در فرایند طراحی سیستم می‌باشد، که در بخش دوم تشریح شده است. این هدف از طریق موضوعات زیر به‌دست می‌آید:

- تعریف و تشریح قابلیت اطمینان؛
- شاخص‌های قابلیت اطمینان – تابع قابلیت اطمینان، نرخ خرابی و روابط اجزای آن؛
- قابلیت اطمینان در چرخه‌ی عمر سیستم – نیازمندی‌های سیستم، مدل‌های قابلیت اطمینان، تخصیص قابلیت اطمینان، انتخاب و استفاده از اجزا، افزونگی[1] در طراحی، مشارکت در طراحی، بازبینی و ارزیابی طراحی؛
- روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان – مد خرابی، آثار و تحلیل بحرانی (FMECA)؛ تحلیل درخت خطا (FTA)؛ تحلیل تنش- مقاومت؛ پیش‌بینی قابلیت اطمینان؛ تحلیل رشد قابلیت اطمینان؛
- آزمایش و ارزیابی قابلیت اطمینان.

نیازمندی‌های قابلیت اطمینان باید در طی فرایند نشان داده شده در شکل ۲-۵ مدنظر قرار گرفته و به‌عنوان یک پارامتر اصلی در اجرای وظایف طراحی که در بخش دوم کتاب بحث شد،

1.Redundancy

ملاحظه شود. بر این اساس، هدف اصلی این فصل فراهم آوردن محتوای فنی موردنیاز برای کسب دانش و قابلیت در زمینه‌ی پیاده‌سازی قابلیت اطمینان در طراحی است. یک خلاصه، مراجع و وب‌سایت‌های منتخب برای مطالعه‌ی بیش‌تر در قسمت پایانی فصل فراهم شده است.

۱۲-۱- تعریف و تشریح قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان به‌صورت احتمال آن‌که یک سیستم یا محصول، ماموریت محوله را به روشی مطلوب انجام دهد و یا احتمال آن‌که محصول یا سیستم، وظایفش را به روشی مطلوب در یک دوره‌ی زمانی و در شرایط عملیاتی اجرا کند، تعریف می‌شود. در این تعریف عناصر احتمال، عملکرد مطلوب، چرخه‌ی زمانی یا مربوط به ماموریت و شرایط عملیاتی وجود دارد. قابلیت اطمینان باید به‌طورمستقیم با یک یا چند سناریوی ماموریت مشخص یا با نیازمندهای عملیاتی سیستم که در قسمت ۳-۴ تشریح شد، در ارتباط باشد.

احتمال، عنصر اصلی در تعریف قابلیت اطمینان، اغلب به‌صورت کمی و با استفاده از یک کسر یا درصد بیان می‌شود که مشخص‌کننده‌ی تعداد دفعاتی است که انتظار می‌رود یک رخداد در کل دفعات مشاهده اتفاق افتد. برای مثال، احتمال عملیاتی بودن یک قطعه در ۸۰ ساعت کاری ۷۵/. یا ۷۵٪ است که می‌توان انتظار داشت که در ۷۵ بار از ۱۰۰ بار استفاده از قطعه، حداقل ۸۰ ساعت کاری در حالت عملیاتی باشد. هنگامی که تعداد زیادی از آیتم‌های عملیاتی مشابه، تحت شرایط مشابه وجود داشته باشند، می‌توان انتظار داشت که ۷۵٪ از قطعات در مدت زمان تعریف شده برای ماموریت به‌درستی کار خواهند کرد. انتظار می‌رود که خرابی‌ها در زمان‌های متفاوتی اتفاق افتند؛ بنابراین خرابی‌ها به‌صورت احتمال تشریح می‌شوند. اساس قابلیت اطمینان وابسته به تئوری احتمال می‌باشد.

عنصر دوم در تعریف قابلیت اطمینان عملکرد مطلوب است که مشخص می‌کند معیارهای مشخصی باید تامین شوند تا مطلوبیت را برای سیستم تشریح کند. این موضوع به تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، وظایفی که باید اجرا شوند و TPMهایی بر می‌گردد که در قسمت ۳-۴ و ۳-۶ تشریح شده است. *سیستم باید چه کاری انجام دهد تا نیازهای مشتری برآورده شود؟*

عنصر سوم، زمان می‌باشد که احتمالا از همه مهم‌تر است زیرا نمایانگر یک شاخص در مقابل درجه‌ی عملکرد عملیاتی سیستم است که باید تعیین شود. باید دوره‌ی زمانی که در آن احتمال تکمیل یک ماموریت یا یک وظیفه‌ی محوله ارزیابی می‌شود، مشخص باشد. قابلیت پیش‌بینی احتمال این‌که یک قطعه برای یک دوره‌ی زمانی به‌درستی کار کند یک موضوع مورد توجه است. از آن‌جا که زمان در قابلیت اطمینان حیاتی است، اغلب در قالب میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF) یا میانگین زمان تا خرابی (MTTF) بیان می‌شود.

شرایط عملیاتی مشخص شده که سیستم تحت آن وظایف خود را انجام می‌دهد، چهارمین عنصر مهم در تعریف قابلیت اطمینان است. این شرایط عبارت‌اند از فاکتورهای محیطی مانند مکان جغرافیایی که انتظار می‌رود در آن سیستم کار کند و دوره‌ی زمانی پیش‌بینی شده، پروفایل عملیاتی، و آثار بالقوه حاصل از چرخه‌های دمایی، رطوبت، ارتعاش، شوک و غیره است. چنین فاکتورهایی باید در شرایطی باشند که نه تنها در طی دوره‌ای که سیستم در آن کار می‌کند، وجود داشته باشند، بلکه طی دوره‌ای که سیستم در حالت انبارش بوده یا در حال انتقال از یک نقطه به نقطه دیگر است، حضور داشته باشند. از نقطه‌نظر قابلیت اطمینان، تجربه نشان می‌دهد که حمل و نقل، جابه‌جایی و مدهای انبارش برخی اوقات از شرایط تجربه شده در عملیات واقعی سیستم حیاتی‌تر هستند.

چهار عنصری که در این‌جا ارائه شد در تعیین قابلیت اطمینان یک سیستم یا محصول حیاتی هستند. از آن‌جا که قابلیت اطمینان یک خصوصیت ذاتی در طراحی است، ضروری است که این

عناصر در شروع پروژه به‌خوبی مدنظر قرار گیرند. نیازمندی‌های قابلیت اطمینان باید در تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم (قسمت ۳-۴) مدنظر باشند و TPMهای مناسب قابلیت اطمینان شناسایی شده و اولویت‌بندی شوند (قسمت ۳-۶) و DDPهای حاصل باید از آغاز در طراحی مدنظر قرار گیرند.

۱۲-۲- شاخص‌های قابلیت اطمینان

ارزیابی هر سیستم یا محصول در قالب قابلیت اطمینان بر پایه مفاهیم و شاخص‌های تعریف شده قابلیت اطمینان قرار دارد. بر این اساس، این قسمت به توسعه‌ی شاخص‌ها و عبارات منتخب قابلیت اطمینان می‌پردازد. درک اساسی این موارد پیش از وارد شدن به بحث وظایف دستورکار قابلیت اطمینان که به طراحی سیستم/محصول مربوط می‌شود، نیاز است. عباراتی مانند تابع قابلیت اطمینان، نرخ خرابی، تابع چگالی احتمالی، مدل قابلیت اطمینان و غیره تعریف شده و بررسی می‌شوند.

۱۲-۲-۱- تابع قابلیت اطمینان

تابع قابلیت اطمینان، که به *تابع بقا* نیز شناخته می‌شود، از احتمال این‌که یک سیستم (یا محصول) حداقل برای یک زمان مشخص شده t موفق باشد، تعیین می‌شود. تابع قابلیت اطمینان، $R(t)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$R(t)=1-F(t) \qquad (۱-۱۲)$$

که در آن $F(t)$ احتمال آن است که سیستم در زمان t از کار بیافتد. $F(t)$ اساسا *تابع توزیع خرابی* یا *تابع عدم قابلیت اطمینان* است. اگر متغیر تصادفی t دارای تابع چگالی $f(t)$ باشد، قابلیت اطمینان به‌صورت زیر بیان می‌شود

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \qquad (۲-۱۲)$$

اگر زمان تا خرابی توسط یک تابع چگالی نمایی بیان شود، آنگاه داریم

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta} \qquad (۳-۱۲)$$

که در آن θ میانگین عمر و t دوره‌ی زمانی مدنظر است. قابلیت اطمینان در زمان t به‌صورت زیر است

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta} dt = e^{-t/\theta} \qquad (۴-۱۲)$$

عمر میانگین (θ) میانگین حسابی زمان‌های عمر همه آیتم‌های مدنظر است که برای تابع نمایی برابر با MTBF است. در نتیجه

$$R(t) = e^{-t/M} = e^{-\lambda t} \qquad (۵-۱۲)$$

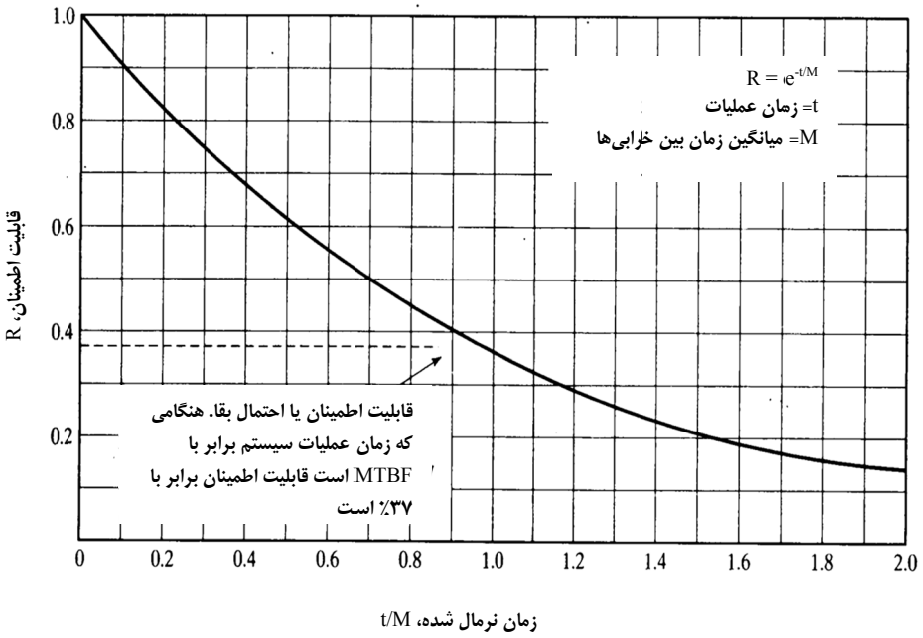
که در آن λ نرخ خرابی لحظه‌ای و M همان MTBT است.

اگر یک آیتم دارای نرخ خرابی ثابت باشد، قابلیت اطمینان آن آیتم در میانگین عمر آن تقریبا ۰/۳۷ می‌شود. بنابراین یک احتمال ۳۷٪ درصدی وجود دارد که سیستم بدون خرابی در میانگین عمر خود کار کند. میانگین عمر و نرخ خرابی رابطه زیر را با هم دارند

$$\lambda = \frac{1}{\theta} \qquad (۶-۱۲)$$

شکل ۱۲–۱ تابع قابلیت اطمینان نمایی را نشان می‌دهد که در آن زمان در واحد t/M داده شده است. شکل بر تابع قابلیت اطمینان با توزیع نمایی تمرکز دارد که می‌توان از آن در دیگر کاربردهایی که خرابی‌ها تصادفی هستند، استفاده کرد.

خصوصیات خرابی واحدهای مختلف لزوما یکی نیستند. توابع توزیع احتمالی شناخته شده زیادی وجود دارند که در عمل برای تشریح خصوصیات خرابی تجهیزات مختلف به‌کار می‌روند. این توزیع‌ها شامل توزیع‌های دوجمله‌ای، نمایی، نرمال، پواسون و ویبول است. بنابراین نباید فرض کرد که یک توزیع را می‌توان در همه وضعیت‌ها به‌کار برد.



شکل ۱۲- ۱- منحنی قابلیت اطمینان برای توزیع نمایی.

۱۲-۲-۲- نرخ خرابی

نرخی که در آن در یک بازه‌ی زمانی مشخص، خرابی‌ها اتفاق می‌افتند؛ *نرخ خرابی* برای آن بازه نامیده می‌شود. نرخ خرابی در ساعت به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$\lambda = (\text{تعداد خرابی‌ها}) / (\text{کل ساعات عملیات}) \qquad (۷-۱۲)$$

نرخ خرابی را می‌توان در قالب تعداد خرابی‌ها در ساعت، درصد خرابی‌ها در هر ۱۰۰۰ ساعت، یا خرابی‌ها در هر یک میلیون ساعت بیان کرد. به‌عنوان مثال، فرض کنید که ۱۰ قطعه در ۶۰۰ ساعت تحت شرایط عملیاتی آزمایش شده‌اند. قطعات (که قابل تعمیر نیستند) بدین صورت خراب شده‌اند: قطعه ۱ پس از ۷۵ ساعت، قطعه ۲ پس از ۱۲۵ ساعت، قطعه ۳ پس از ۱۳۰ ساعت، قطعه ۴ بعد از ۳۲۵ ساعت، قطعه ۵ پس از ۵۲۵ ساعت. در نتیجه پنج خرابی به‌وجود آمده و کل زمان عملیاتی ۴۱۸۰ ساعت بوده است. با استفاده از معادله ۱۲–۷، نرخ خرابی محاسبه شده در هر ساعت به صورت زیر است

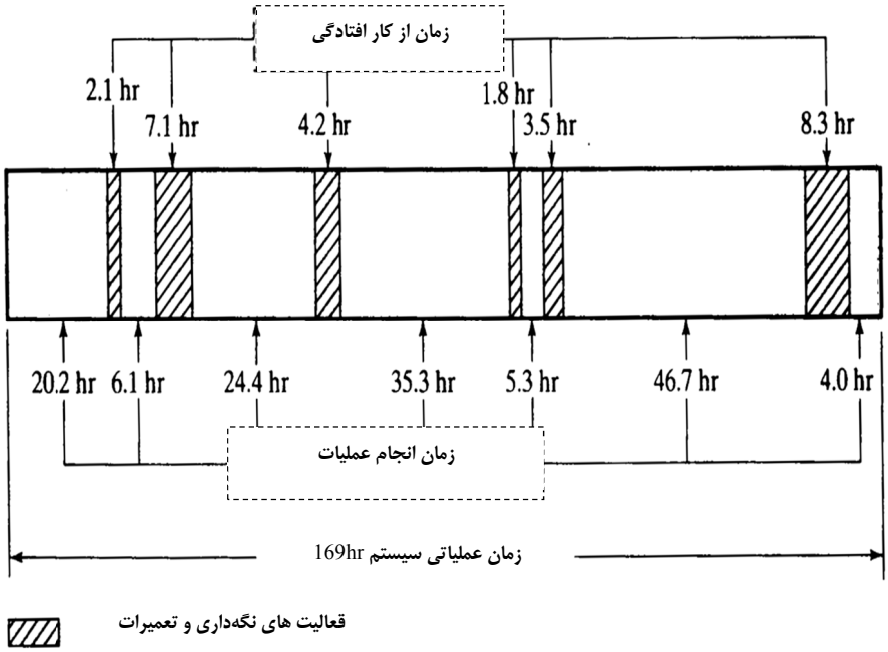
$$\lambda = \frac{5}{4180} = 0.001196$$

به‌عنوان یک مثال دیگر، فرض کنید که چرخه‌ی عملیاتی در یک سیستم ۱۶۹ ساعت باشد و به‌صورت شکل ۱۲–۲ نشان داده شود. طی این زمان، ۶ خرابی در زمان‌های نشان داده شده اتفاق می‌افتد. یک خرابی به صورت یک زمان در نظر گرفته شده است که با تنظیم مشخص پارامترها در حالت عملیاتی نباشد، تعریف می‌شود. نرخ خرابی، یا فراوانی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی، در هر ساعت به‌صورت زیر است

$$\lambda = \frac{6}{142} = 0.04225$$

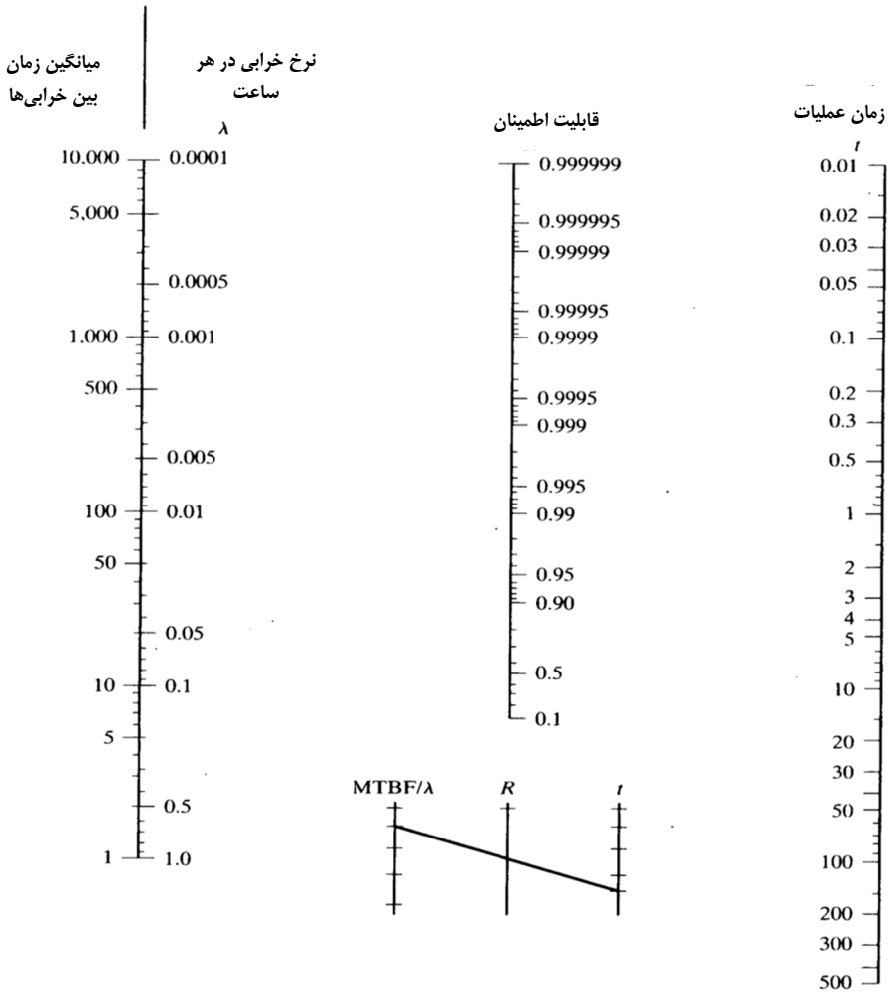
با فرض یک توزیع نمایی، میانگین عمر سیستم یا میانگین بین خرابی‌ها (MTBF) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.04225} = 23.6686$$



شکل ۱۲- ۲- چرخه عملیاتی یک سیستم.

شکل ۱۲–۳ یک نوموگراف قابلیت اطمینان (برای توزیع خرابی نمایی) را نشان می‌دهد که محاسبات MTBF، λ، $R(t)$ و زمان عملیات را تسهیل می‌کند. اگر MTBF ۲۰۰ ساعت (نرخ خرابی = ۰/۰۰۵) و زمان عملیات ۲ ساعت باشد، نوموگراف مقدار قابلیت اطمینان ۰/۹۹ را به‌دست می‌دهد.



شکل ۱۲-۳- نوموگراف قابلیت اطمینان برای توزیع خرابی نمایی.

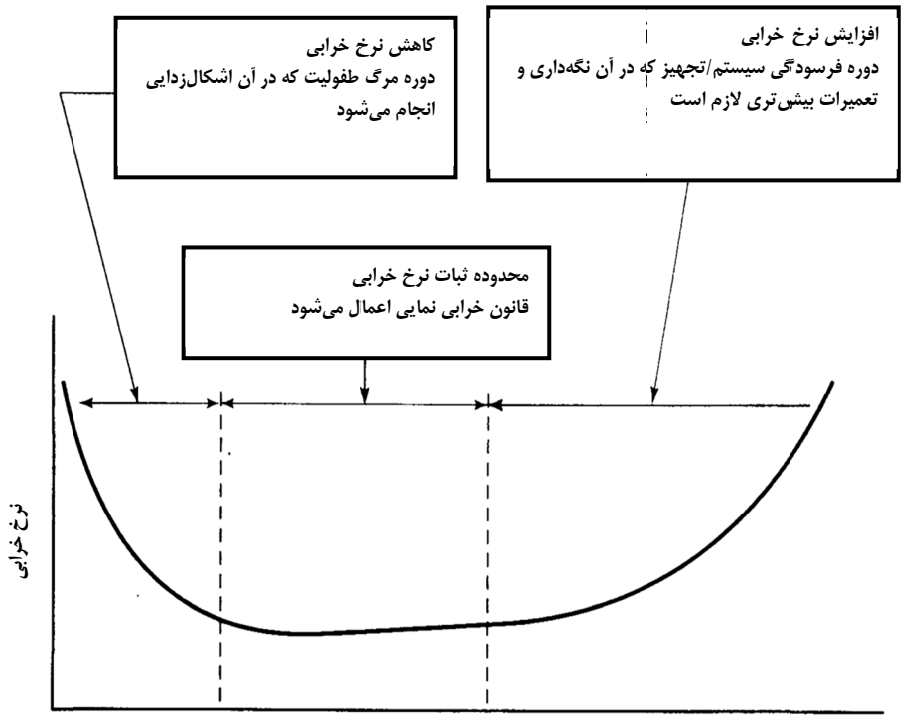
منبع: NAVAIR 00-65-502/NAVORD OD 41146, Reliability Engineering Handbook, Naval Air Systems Command and Naval Ordnance Systems Command

هنگامی که یک توزیع نمایی منفی فرض می‌شود، اگر طراحی سیستم بالغ شده باشد نرخ خرابی در شرایط نرمال عملیات تقریبا ثابت می‌ماند. بنابراین هنگامی که تجهیز تولید شده و سیستم برای

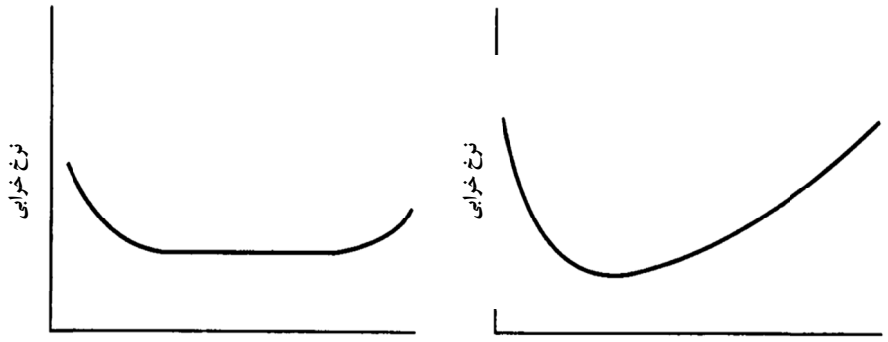
شروع بهره‌برداری عملیاتی توزیع شد، تعداد خرابی‌های حاصل از تغییرات اجزا و عدم تطابق‌ها، فرایندهای تولید و غیره اغلب بالاست. نرخ خرابی اولیه از آن‌چه پیش‌بینی می‌شود، بیش‌تر است اما به تدریج این مقدار کاهش می‌یابد و همان‌طور که در شکل ۱۲–۴ نشان داده شده است، طی دوره‌ی اشکال‌زدایی به سطح پایین‌تری می‌رسد. به‌طور مشابه، هنگامی که سیستم به یک عمر مشخص می‌رسد، دوره‌ی *فرسودگی* وارد شده و نرخ خرابی دوباره افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲–۴ در قسمتی که نرخ خرابی تقریبا ثابت است، قانون خرابی نمایی اعمال می‌شود.

شکل ۱۲–۴ روابط نسبی خاصی را نمایش می‌دهد. در حقیقت، منحنی به مقدار قابل توجهی به نوع سیستم و پروفایل عملیاتی بستگی دارد. علاوه‌بر این، اگر سیستم به‌طور پیوسته اصلاح شود، نرخ خرابی ثابت می‌ماند. در هر رخدادی، این نمایش پایه و اساس خوبی برای بحث در مورد روند نرخ خرابی خواهد بود.

در حوزه‌ی نرم‌افزار، خرابی‌ها ممکن است مربوط به زمان تقویمی، زمان پردازنده، تعداد تراکنش‌ها در هر دوره و تعداد خطاها در هر ماژول باشد. انتظارات اغلب بر پایه یک پروفایل عملیاتی و حساسیت ماموریت می‌باشد. بنابراین، یک تشریح دقیق از سناریو(های) ماموریت نیاز است (قسمت ۳–۴). اگرچه نرخ خرابی تجهیز عموما پروفایلی مانند شکل ۱۲–۴ خواهد داشت، اما نگه‌داری و تعمیرات نرم‌افزار اغلب اثری منفی بر قابلیت اطمینان کل سیستم خواهد داشت. عملکرد نگه‌داری نرم‌افزار به‌صورت پیوسته، همراه با ایجاد تغییرات در سیستم، اغلب بر نرخ خرابی کلی اثرگذار خواهد بود (شکل ۱۲–۵). هنگامی که یک تغییر یا اصلاح ایجاد می‌شود، اشکالات به‌وجود می‌آیند و این موضوع خود زمان زیادی برای رفع کردن آن می‌طلبد.

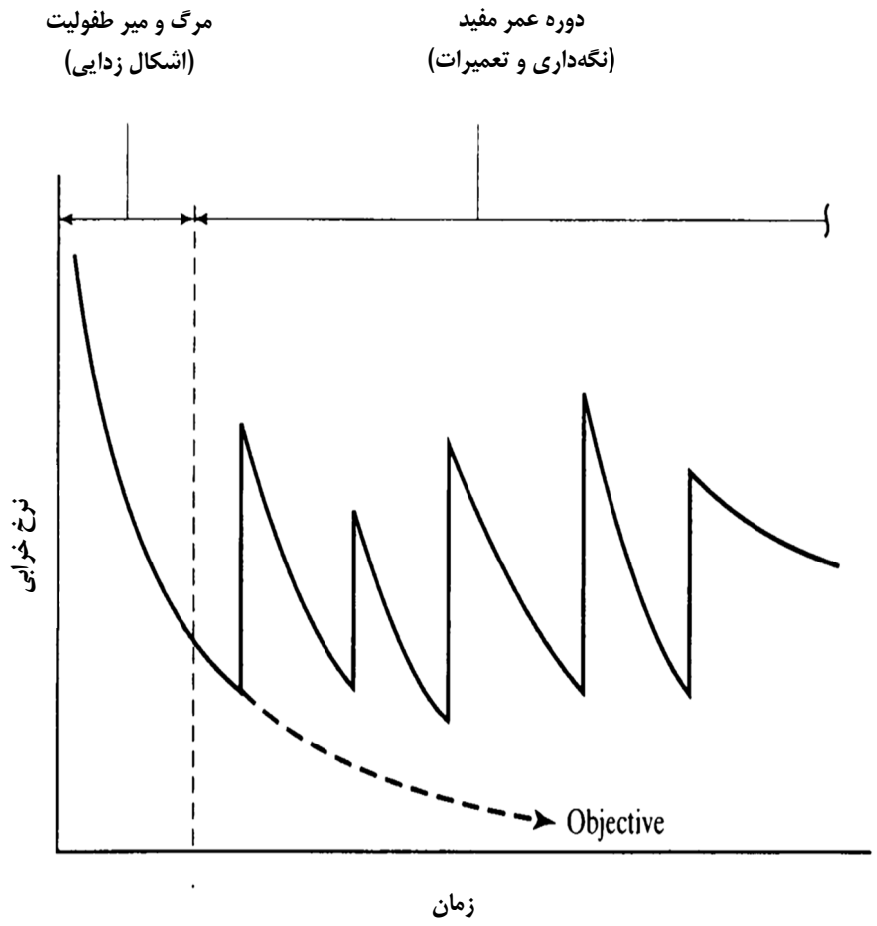


منحنی وان حمام بر اساس نرخ خرابی وابسته به زمان



تجهیزات الکترونیک تجهیزات مکانیک

شکل ۱۲- ۴- روابط منحنی نرخ خرابی مرسوم.



شکل ۱۲- ۵- منحنی نرخ خرابی همراه با نگه‌داری و تعمیرات (نرم‌افزار).

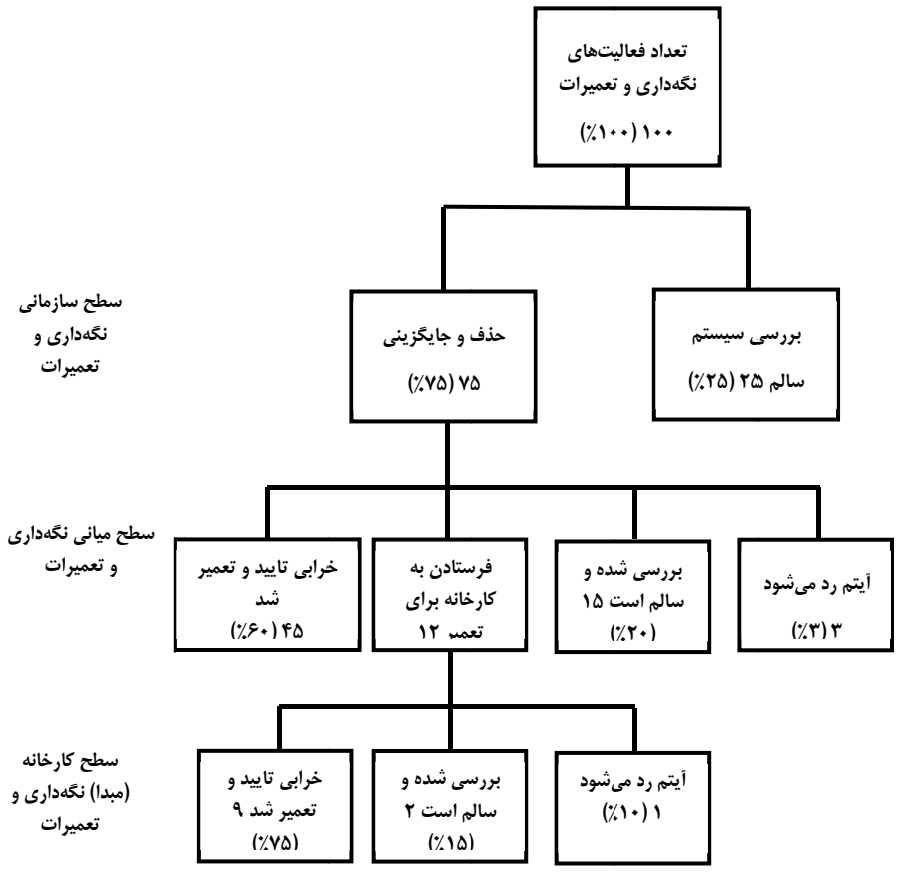
در این نقطه، تعریف خرابی‌ها و خصوصیات آن، هم به خرابی‌های اصلی نرم‌افزار و هم تجهیزات مربوط می‌شود که بر پایه تجربیات گذشته بنا شده است. بیش‌تر تاکید بر روی اجزای سیستم است تا خود سیستم به‌عنوان یک واحد. با این حال، هنگامی که خرابی‌ها (و نرخ‌های خرابی) از نقطه‌نظر کلی سیستم‌ها تعریف می‌شوند، درصورتی‌که سیستم به‌درستی کار نکند، یک خرابی اتفاق افتاده است. خرابی‌ها را می‌توان به دسته‌های خرابی اصلی یا فاجعه بار قطعه‌ی وابسته یا ثانویه، اشکالات تولید، خرابی ناشی از کاربر، خرابی مواد در جابه‌جایی و غیره دسته‌بندی کرد. نرخ خرابی کلی (به‌صورت تعداد در ساعت یا تعداد درماموریت) در این‌جا مدنظر است. جدول ۱۲-۱ نشان می‌دهد که چگونه علل مختلف خرابی در نرخ خرابی کل برای دو سیستم متفاوت نقش بازی می‌کنند. با مراجعه به جدول، باید به وابستگی به نوع سیستم، پیچیدگی، ترکیب انسان- ماشین و غیره توجه شود که نقش هر کدام در یک سیستم نسبت به سیستم دیگر می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال، تعداد خرابی‌های بالقوه حاصل از فعالیت‌های کاربر برای سیستم B بیش‌تر از سیستم A است.

هنگامی که این فاکتورها به تجربیات کاربر در محیط عملیاتی مربوط می‌شود، با وضعیتی مواجه می‌شویم که در شکل ۱۲-۶ نشان داده شده است. در این مثال، خرابی‌های یک سیستم هوا فضایی گزارش شده است (یعنی کاربر مشخص کرده است که یک خرابی اتفاق افتاده است و سازمان نگه‌داری و تعمیراتی را با خبر ساخته است). برای هر گزارش خرابی، یک فعالیت نگه‌داری و تعمیرات (MA) زمان‌بندی نشده آغاز شده است. برخی از فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات، یا ۷۵ در این مورد، منجر به حذف و جایگزینی اجزای سیستم در سطح سازمانی شده که به‌نوبه‌ی خود منجر به یک نیاز برای قطعات یدکی/تعمیری شده است. برخی از این آیتم‌ها که به‌کارگاه میانی برای نگه‌داری و تعمیرات در سطحی بالاتر وارد شده به‌عنوان خرابی (۴۸ در این مورد) در نظر گرفته شده و برخی به‌کارخانه سازنده فرستاده می‌شود تا تعمیراتی در سطحی بالاتر داشته

باشد (۱۲) و برخی از آن‌ها کاملا عملیاتی و سالم شناسایی شده‌اند (۱۵). در این مثال، ۵۸ فعالیت نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده انجام شده است. از طرفی، ۱۰۰ خرابی گزارش شده است که توسط کاربر شناسایی شده یا واقعا خراب شده بودند. هنگامی که تاکید بر گذشته ۵۸ مورد را متضمن می‌شود، دیدگاه کلی سیستم‌ها نیازمند آن است که مدیریت به‌صورت کلی به آن‌ها نگاه کند؛ یعنی ۱۰۰ مورد. به عبارت دیگر، در طراحی سیستم‌ها، نیاز است که خصوصیات مناسبی مدنظر قرار گیرد که از چنین مواردی که در جدول ۱۲–۱ شناسایی شده است، ممانعت کند.

جدول ۱۲- ۱- ترکیب نرخ‌های خرابی برای دو سیستم عملیاتی

		نرخ خرابی	
	مشارکت کننده	**سیستم B**	**سیستمA**
۱.	اشکالات داخلی (اصلی)	0.000298	0.000392
۲.	اشکالات وابسته (ثانویه)	0.000061	0.000072
۳.	اشکالات تولید	0.000004	0.000002
۴.	خرابی‌های ناشی از کاربر	0.000134	0.000003
۵.	خرابی‌های مربوط به تعمیرات	0.000015	0.000012
۶.	خرابی‌های مربوط به جابه‌جایی مواد/تجهیزت	0.000004	0.000005
۷.	خرابی‌های مربوط به فرسودگی مواد/تجهیزات	0.000002	0.000001
مجموع		0.000518	0.000487



شکل ۱۲- ۶- فعالیت‌های زمان‌بندی نشده نگه‌داری و تعمیرات برای سیستم XYZ.

۱۲-۲-۳ - روابط اجزا

پس از تعریف تابع اصلی قابلیت اطمینان و برخی شاخص‌های مربوط به خرابی‌های سیستم، مناسب است که کاربردها آن‌ها را در طراحی بررسی کرد. اجزا انتخاب شده و به‌صورت سری، موازی و یا ترکیبی از آن‌ها در کنار هم قرار می‌گیرند. نمودارهای بلوکی برای نمایش روابط اجزا و تحلیل قابلیت اطمینان توسعه می‌یابند.

شبکه‌های سری. روابط سری احتمالا رایج‌ترین نوع استفاده شده است و به‌سادگی تحلیل می‌شود. این ترکیب در شکل ۱۲–۷ نشان داده شده است و در شبکه سری، همه‌ی اجزا باید در یک سطح مطلوب کار کنند تا سیستم بتواند به‌درستی عملیات خود را انجام دهد. یک سیستم شامل زیرسیستم‌های A تا C می‌شود و قابلیت اطمینان سیستم برابر است با حاصل‌ضرب قابلیت اطمینان هر کدام از این زیرسیستم‌هاکه به‌صورت زیر بیان می‌شود

$$R = (R_A)(R_B)(R_C) \tag{۸–۱۲}$$

به‌عنوان مثال، فرض کنید که یک سیستم الکترونیکی شامل یک فرستنده، یک گیرنده و یک منبع برق است. قابلیت اطمینان فرستنده، گیرنده و منبع برق به‌ترتیب ۰/۸۵۲۱، ۰/۹۷۱۲ و ۰/۹۳۵۷ است. قابلیت اطمینان سیستم الکترونیکی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$R = (0.8521)(0.9712)(0.9357) = 0.7743$$

اگر یک سیستم سری برای انجام عملیات طی یک دوره‌ی زمانی مشخص موردانتظار باشد، قابلیت اطمینان کلی آن قابل استخراج است. با جایگزینی معادله ۱۲–۵ در ۱۲–۸ برای یک سیستم با nجزء داریم

$$R_S = \left(e^{-\lambda_1 t}\right)\left(e^{-\lambda_2 t}\right)\cdots\left(e^{-\lambda_n t}\right)$$

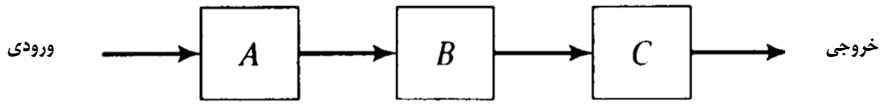
که می‌توان آن را به‌صورت زیرنمایش داد

$$R_S = e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n)t} \tag{۹–۱۲}$$

فرض کنید که یک سیستم سری شامل چهار زیرسیستم بوده و انتظار می‌رود که ۱۰۰۰ ساعت کند. چهار زیرسیستم A، B، C و D به‌ترتیب دارای MTBFهای برابر با ۶۰۰۰، ۴۵۰۰،

۱۰۵۰۰، و ۳۲۰۰ ساعت هستند. هدف تعیین قابلیت اطمینان کلی این شبکه سری است که در آن

$$\lambda_A = \frac{1}{6000} = 0.000167$$
$$\lambda_B = \frac{1}{4500} = 0.000222$$
$$\lambda_C = \frac{1}{10500} = 0.000095$$
$$\lambda_D = \frac{1}{3200} = 0.000313$$



شکل ۱۲-۷- یک شبکه سری.

قابلیت اطمینان شبکه سری از معادله ۱۲-۹ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$R = e^{-(0.000797)(1000)} = 0.4507$$

این بدان معناست که احتمال بقای سیستم (قابلیت اطمینان) برای ۱۰۰۰ ساعت ۴۵٫۱٪ است. اگر نیازمندی به ۵۰۰ ساعت کاهش پیدا کند، قابلیت اطمینان به ۶۷٪ افزایش پیدا می‌کند.

شبکه‌های موازی. یک شبکه‌ی کاملا موازی، شبکه‌ای است که در آن تعدادی از اجزای مشابه به‌صورت موازی وجود دارند و همه‌ی اجزا باید از کار بیافتند تا باعث خرابی سیستم شوند. یک شبکه‌ی موازی با دو جزء در شکل ۱۲-۸ نشان داده شده است. با فرض این‌که اجزای A و B مشابه هستند، اگر اجزای A یا B یا هر دو کار کنند، سیستم عملیاتی خواهد بود. قابلیت اطمینان برابر خواهد بود با

$$R = R_A + R_B - (R_A)(R_B) \qquad (۱۰-۱۲)$$

حال یک شبکه با سه جزء موازی مانند شکل ۱۲-۹ را در نظر بگیرید. قابلیت اطمینان را می‌توان به صورت زیر نشان داد

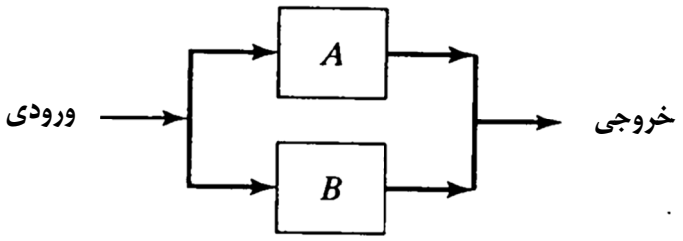
$$R = 10(1-R_A)(1-R_B)(1-R_C) \qquad (۱۱-۱۲)$$

اگراجزای A تا C مشابه باشند، آنگاه می‌توان قابلیت اطمینان را به‌صورت زیر ساده کرد

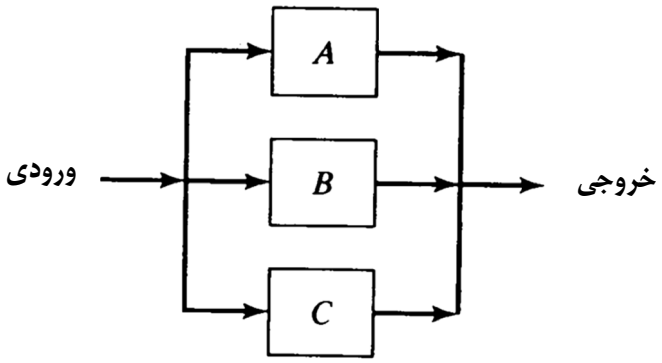
$$R = 1-(1-R)^3$$

برای یک سیستم با سه جزء موازی. برای یک سیستم با n موازی مشابه، قابلیت اطمینان برابر است با

$$R = 1-(1-R)^n \qquad (۱۲-۱۲)$$



شکل ۱۲-۸- یک شبکه موازی.



شکل ۱۲- ۹- یک شبکه موازی با سه جزء.

شبکه‌های موازی افزوده، اساسا برای بهبود قابلیت سیستم استفاده می‌شوند، همان‌طور که در معادلات ۱۲-۱۱ و ۱۲-۱۲ به‌صورت ریاضی مشخص شده است. مثال زیر را در نظر بگیرید: یک سیستم شامل دو زیرسیستم مشابه است که به‌صورت موازی قرار دارند و قابلیت اطمینان هر یک ۰/۹۵ است. قابلیت سیستم با استفاده از معادله ۱۲-۱۰ برابر است با

$$R = 0.95 + 0.95 - (0.95)(0.95) = 0.9975$$

فرض کنید نیاز است قابلیت اطمینان این سیستم افزایش یابد. با اضافه کردن یک زیرسیستم مشابه دیگر به‌صورت موازی، قابلیت سیستم از معادله ۱۲-۱۱ برابر می‌شود با

$$R = 1 - (1 - 0.95)^3 = 0.999875$$

توجه کنید که قابلیت اطمینان نسبت به ساختار قبلی به میزان ۰/۰۰۲۳۷۵ افزایش پیدا کرده است.

اگر زیرسیستم‌ها مشابه نباشند، معادله ۱۲-۱۰ استفاده می‌شود. برای مثال، یک شبکه موازی افزوده با دو زیرسیستم را در نظر بگیرید. $R_A=0.75$ و $R_B=0.82$ یک قابلیت اطمینان را برای سیستم نتیجه می‌دهد که برابر است با

$$R = 0.75 + 0.82 - (0.75)(0.82) = 0.955$$

افزونگی را می‌توان در طراحی سطوح مختلف سیستم در طراحی اعمال کرد. در سطح زیرسیستم‌ها، مناسب است که قابلیت‌های انجام وظیفه به‌صورت موازی مورد استفاده قرار گیرد تا سیستم در صورت خرابی یک مسیر، به‌درستی عملیات خود را انجام دهد. قابلیت کنترل پرواز (شامل گزینه‌های الکترونیکی، دیجیتال و مکانیکی) در یک هواپیما، مثالی است که در آن مسیر جایگزینی برای مورد خرابی یک مسیر درنظر گرفته شده است. در سطح جزئی قطعات، افزونگی برای بهبود قابلیت اطمینان وظایف بحرانی، مخصوصا حوزه‌هایی که نگه‌داری و تعمیرات برای آن‌ها ممکن نیست، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، در طراحی بسیاری از مدارهای الکترونیکی، افزونگی با هدف بهبود قابلیت اطمینان استفاده می‌شود، این در حالی است که انجام نگه‌داری و تعمیرات برای قطعات عملی نیست.

کاربرد افزونگی در طراحی، یک حوزه‌ی کلیدی در ارزیابی است. اگرچه افزونگی قابلیت اطمینان را بهبود می‌دهد، استفاده از اجزای اضافی در طراحی نیازمند فضا و وزن اضافی و هزینه‌های بیش‌تر است. این موضوع چندسوال را مطرح می‌کند: *آیا افزونگی درقالب بحرانی بودن برای عملیات سیستم و اجرای ماموریت نیاز است؟ تا چه سطحی افزونگی باید استفاده شود؟ چه نوع افزونگی باید مدنظر قرار گیرد (فعال یا آماده‌باش)؟ آیا تدارکات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات باید مدنظر قرار گرفته شود؟ آیا روش جایگزین دیگری برای بهبود قابلیت اطمینان وجود دارد*

(به‌طور مثال انتخاب قطعه بهبود یافته)؟ موضوعات و موارد مرتبط زیادی وجود دارد که نیاز به بررسی‌های بیش‌تری دارند.

شبکه‌های ترکیبی سری- موازی. سطوح متنوعی از قابلیت اطمینان را می‌توان با استفاده از یک ترکیب از شبکه‌های سری و موازی به‌دست آورد. سه مثال نشان داده شده در شکل ۱۲-۱۰ را در نظر بگیرید.

قابلیت اطمینان شبکه اول در شکل ۱۲-۱۰ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$R_a = R_A(R_B + R_C - R_B R_C) \qquad (۱۲-۱۳)$$

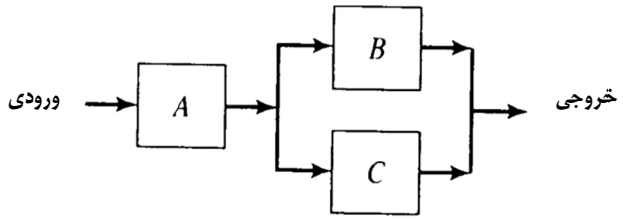
برای شبکه دوم قابلیت اطمینان برابر است با

$$R_b = \left[1-(1-R_A)(1-R_B)\right]\left[1-(1-R_C)(1-R_D)\right] \qquad (۱۲-۱۴)$$

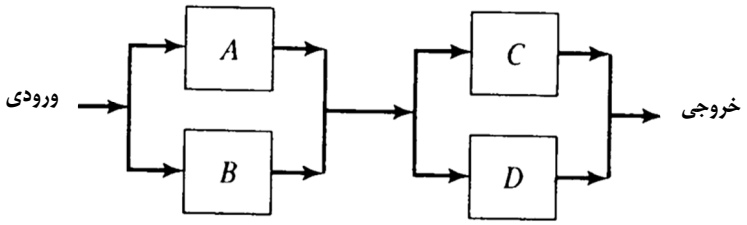
و برای سومین شبکه قابلیت اطمینان به‌صورت زیر است

$$R_c = \left[1-(1-R_A)(1-R_B)(1-R_C)\right][R_D]\left[R_E + R_F - (R_E)(R_F)\right] \qquad (۱۲-۱۵)$$

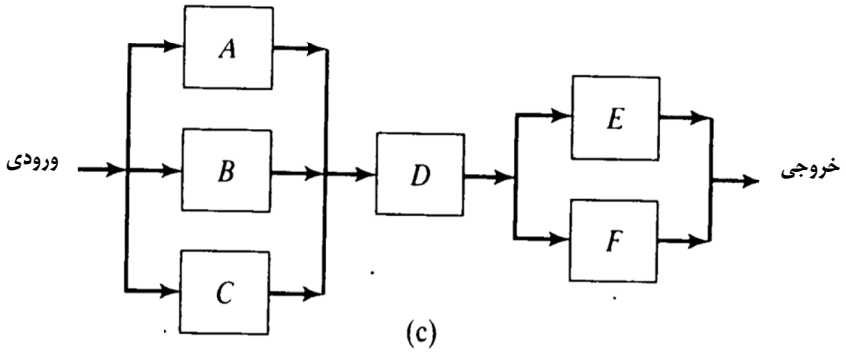
شبکه‌های ترکیبی سری- موازی مانند آن‌هایی که در شکل ۱۲-۱۰ نشان داده شده است نیازمند آن است که تحلیل‌گر ابتدا عناصر افزوده را شناسایی کرده تا قابلیت اطمینان واحد به‌دست آید. سپس قابلیت اطمینان کلی سیستم سپس با پیدا کردن حاصل‌ضرب قابلیت‌های اطمینان همه واحدها تعیین می‌شود.



(a)



(b)



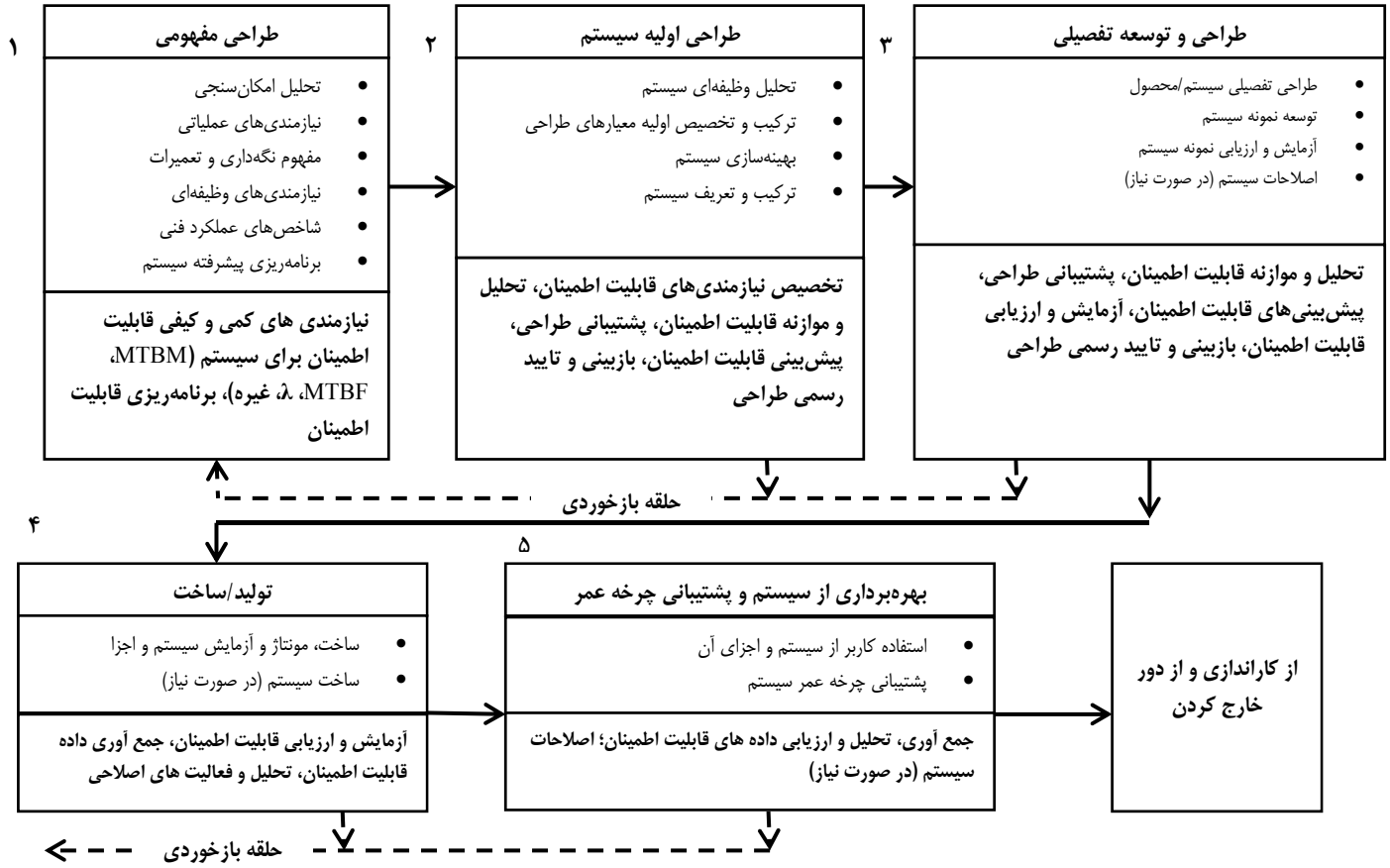
(c)

شکل ۱۲- ۱۰- برخی شبکه‌های ترکیبی سری- موازی.

۱۲-۳- قابلیت اطمینان در چرخه‌ی عمر سیستم

قابلیت اطمینان، به‌عنوان یک خصوصیت ذاتی در طراحی، باید در مراحل اولیه‌ی فرایند کلی مهندسی سیستم‌ها در فاز طراحی مفهومی مورد توجه قرار گیرد. با مراجعه به شکل ۱۲-۱۱ (که تعمیمی از شکل ۲-۳ است)، نیازمندی‌های کیفی و کمی قابلیت اطمینان از طریق امکان‌سنجی (قسمت ۳-۳) توسعه نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات (قسمت ۳-۴ و ۳-۵)، و شناسایی و اولویت‌بندی TPMها (قسمت ۳-۶) صورت می‌پذیرد. شاخص‌های کاربردی قابلیت اطمینان باید استقرار یافته، اهمیت آن‌ها نسبت به شاخص‌های سیستم معین شود و نیازمندی‌ها برای طراحی از طریق توسعهTPMهای مناسب صورت گیرد.

با داشتن مشخصات فنی نیازمندی‌های قابلیت اطمینان در بلوک ۱ از شکل (هم‌چنین در مشخصات فنی نوع A شامل شده است، به قسمت ۳-۹ مراجعه کنید)، گام بعدی توسعه مدل قابلیت اطمینان با هدف تخصیص نیازمندی‌های سطح بالا به سطح زیرسیستم و سطوح پایین‌تر به‌عنوان بخشی از فرایند تخصیص سیستم تشریح شده در قسمت‌های ۳-۷ و ۴-۳ می‌باشد. با تعریف نیازمندی‌های اصلی، این نیازمندی‌ها ازطریق فرایند تکرار شونده ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم تکامل می‌یابند (به شکل ۲-۱۰ مراجعه کنید). برای تسهیل این فرایند، روش‌ها/ ابزار تحلیلی مختلفی وجود دارد که می‌توانند به‌صورتی اثربخش در تکامل از طراحی مفهومی به طراحی اولیه و طراحی تفصیلی اعمال شوند (بلوک‌های ۲ و۳ شکل ۱۲-۱۱).



شکل ۱۲- ۱۱- نیازمندی‌های قابلیت اطمینان در چرخه عمر سیستم.

با پیشرفت طراحی و توسعه مدل‌های سیستم (به‌صورت تحلیلی و فیزیکی)، فرایند ارزیابی پیوسته اتفاق افتاده و آزمایش قابلیت اطمینان به‌عنوان بخشی از فعالیت آزمایش و ارزیابی کل سیستم در نظر گرفته می‌شود که در فصل ۶ تشریح شد. از این نقطه به بعد، فعالیت‌های ارزیابی از طریق فازهای ساخت/تولید و بهره‌برداری از سیستم (بلوک ۴ و ۵) ادامه می‌یابد که همراه با یک بازخورد مناسب و اصلاح سیستم برای فعالیت اصلاحی یا برای بهبود محصول در صورت نیاز خواهد بود. در حقیقت، در هر فاز از چرخه‌ی عمر نشان داده شده در شکل ۱۲–۱۱ نیازمندی‌های قابلیت اطمینان وجود دارد.

۱۲-۳-۱- نیازمندی‌های سیستم

هر سیستم برای پاسخ به یک نیاز مشتری و اجرای برخی وظایف پیش‌بینی شده توسعه می‌یابد. اثربخشی که با آن سیستم این وظیفه را انجام می‌دهد شاخص غایی مطلوبیت سیستم و ارزش آن برای مشتری (یعنی کاربر) است. همان‌طورکه در شکل ۲–۸ ترسیم شد، اثربخشی سیستم از فاکتورهای زیادی تشکیل شده است که قابلیت اطمینان یکی از اجزای اصلی آن در تعیین مفید بودن نهایی یک سیستم است.

نیازمندی‌های قابلیت اطمینان که به‌صورت کمی و کیفی مشخص شده‌اند، در متن نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات تشریح شده در قسمت‌های۳–۴ و ۳–۵ تعریف می‌شوند که عبارت‌اند از:

۱. تعریف فاکتورهای عملکردی و اثربخشی سیستم، پروفایل(های) ماموریت و نیازمندی‌های وظیفه‌ای سیستم (شرایط بهره‌برداری، چرخه‌های کار و چگونگی انجام عملیات سیستم).

۲. تعریف چرخه‌ی عمر عملیاتی (زمان پیش‌بینی شده که سیستم در دسترس بوده و در حالت عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد).

۳. تعریف محیطی که سیستم قرار است در آن عملیات را انجام داده و نگه‌داری شود (دما، رطوبت، شوک و ارتعاش، سطوح نویز، سمی بودن و غیره). این موضوع باید شامل بازه‌ای از مقادیر کاربردی باشد و همه مودهای عملیاتی، حمل و نقل و جابه‌جایی، نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی و انبارش را پوشش دهد.

۴. تعریف واسطه‌های عملیاتی و پشتیبانی که می‌تواند در انجام ماموریت(های) سیستم در چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده اثرگذار باشد. این موضوع شامل عملیات سیستم در ساختار SOS و آثار داخلی و خارجی عملیات دیگر سیستم‌ها در ساختار مشابه SOS می‌شود.

سوال اساسی این است که *سیستم چه قابلیت اطمینانی باید داشته باشد تا ماموریت خود را در محیط تعریف شده و در چرخه‌ی عمر مشخص شده به‌صورت موفقیت‌آمیز به ثمر رساند؟* اگر نیازمندی‌های عملیاتی مشخص کنند که سیستم باید ۲۴ ساعت در روز برای ۳۶۰ روز در سال بدون خرابی کارکند، نیازمندی قابلیت اطمینان سیستم بسیار چالش‌برانگیز خواهد شد. برعکس، اگر سیستم تنها نیاز باشد که ۲ ساعت در روز برای ۲۶۰ روز در سال کار کند، نیازمندی‌های مشخص شده متفاوت خواهد بود. در هر مورد، نیازمندی‌های کمی و کیفی قابلیت اطیمنان باید برای سیستم بر پایه ملاحظات اشاره شده تعریف شوند.

همان‌طورکه در قسمت ۱۲-۲ ذکر شد، نیازمندی‌های کمی اغلب به‌صورت $R(t)$، MTBF، MTTF، λ، چرخه‌های موفق عملیاتی در هر دوره‌ی زمانی یا ترکیب‌های مختلفی از آن‌ها بیان می‌شوند. برای نرم‌افزار، قابلیت اطمینان می‌تواند به‌صورت تعداد خطاها در هرماژول نرم‌افزار یا در

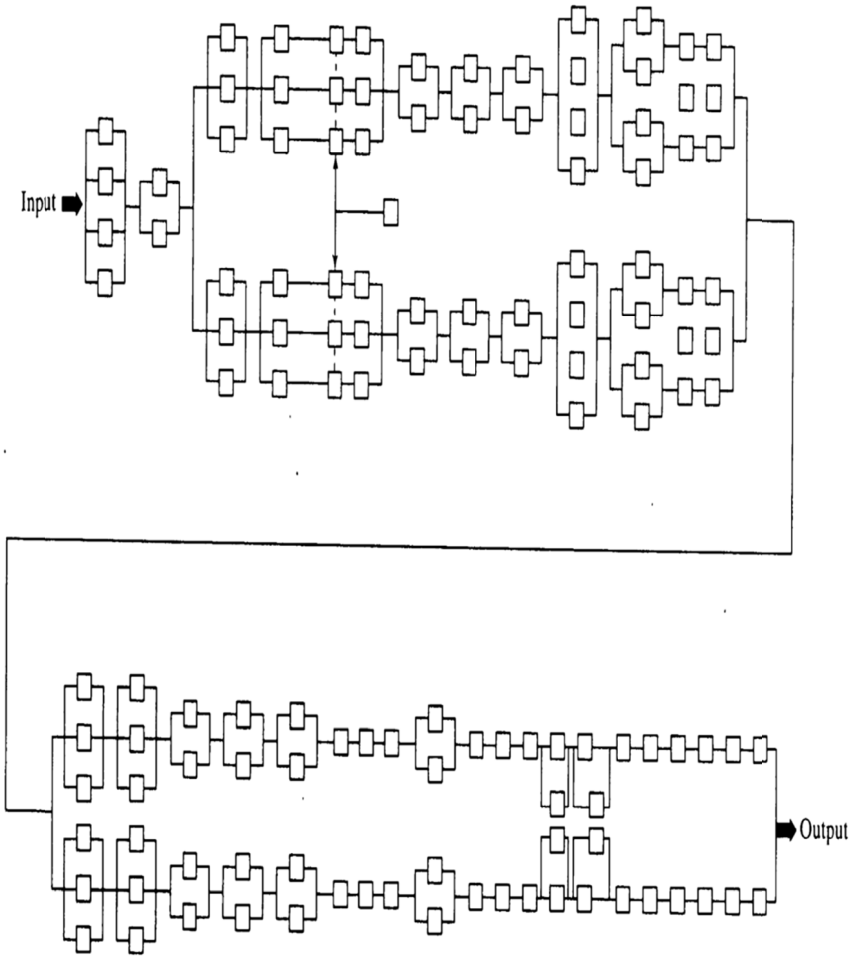
هرخط از کد آن، تعداد خطاهای پردازشگر، زمان اولین خرابی یا شاخص‌های مشابه اثرگذار بر خرابی سیستم مشخص شود. برای یک ساختار سیستم مانند پل عبوری از رودخانه که درقسمت ۳-۴-۱ تشریح شد، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان می‌تواند در قالب درجات نشست یا تعداد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات موردنیاز، در یک دوره‌ی زمانی مشخص و با یک الگوی جریان‌ترافیک موردانتظار بیان شود. در هر مورد، شاخص قابلیت اطمینان به یک یا چند پارامتر عملیاتی مرتبط است.

۱۲-۳-۲- مدل‌های قابلیت اطمینان

با مراجعه به فصل ۳، نیازمندی‌های سطح بالا برای یک سیستم همان‌طور که در قسمت‌های ۳-۲ تا ۳-۶ تشریح شد، در ابتدای فرایند تعیین می‌شوند. از این نیازمندی‌ها، سیستم در قالب وظایف و از طریق انجام تحلیل وظیفه‌ای و توسعه نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای تعریف می‌شود (به قسمت ۳-۷ مراجعه کنید). نتایج تحلیل وظیفه‌ای منجر به توسعه‌ی یک نمودار بلوکی قابلیت اطمینان و یک مدل می‌گردد که می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تخصیص قابلیت اطمینان، پیش‌بینی قابلیت اطمینان، تحلیل تنش- مقاومت و تحلیل‌ها و ارزیابی‌های بعدی طراحی استفاده شود. به‌عنوان مثالی از یک مدل قابلیت اطمینان، شکل ۱۲-۱۲ را ملاحظه کنید.

روابط سری- موازی استقرار یافته و با تکامل تعریف طراحی بیش‌تر توسعه می‌یابد. اجزا برای انجام نیازمندی‌های وظیفه‌ای برای هر بلوک انتخاب شده، خصوصیات قابلیت اطمینان برای هر جزء و هر بلوک شناسایی می‌شوند و نتایج برای انجام تخصیص نیازمندی‌های قابلیت اطمینان در یک رویکرد اولیه بالا به پایین ترکیب می‌شوند و در ادامه یک پیش‌بینی قابلیت اطمینان از پایین به بالا به منظور ارزیابی طراحی انجام می‌شود. مدل قابلیت اطمینان به‌عنوان یک خط مبنا برای شناسایی نقاط ضعف احتمالی و معرفی حوزه‌های ممکن برای بهبود طراحی مورد استفاده قرار

می‌گیرد. به‌علاوه، مدل قابلیت اطمینان به‌عنوان یک ورودی در انجام پیش‌بینی قابلیت اطمینان، FMECA، FTA، نگه‌داری و تعمیرات و تحلیل‌های مربوطه به‌کار می‌رود.



شکل ۱۲- ۱۲- مدل قابلیت اطمینان توسعه داده شده سیستم.

۱۲-۳-۳- تخصیص قابلیت اطمینان

تخصیص نیازمندی‌های قابلیت اطمینان به‌عنوان بخشی از فرایند تشریح شده در قسمت‌های ۳-۷-۲ و ۴-۳-۲ انجام می‌شوند. نیازمندی‌های سطح بالا برای سیستم مشخص شده و این نیازمندی‌ها سپس به سطح زیرسیستم، سطح واحد و سطوح پایین‌تر موردنیاز تخصیص داده می‌شوند تا یک ورودی معنادار برای طراحی را فراهم کنند (یعنی به‌دست آوردن معیار درست ورودی طراحی در سطح مناسب).

رویکرد استفاده شده در تخصیص نیازمندی‌های قابلیت اطمینان ثابت نیست، بلکه تا حدودی می‌تواند ذهنی و بسته به نوع و پیچیدگی سیستم می‌تواند متفاوت باشد. با مراجعه به شکل ۱۲-۱۳، فرض شده است که در سطح سیستم نیازمندی MTBF ۴۵۰ ساعت است. سوال این است که *چه نیازمندی قابلیت اطمینانی برای واحدهای* A، B و C *باید تعیین شود؟* برای پاسخ به این سوال دنبال کردن گام‌های زیر مناسب است:

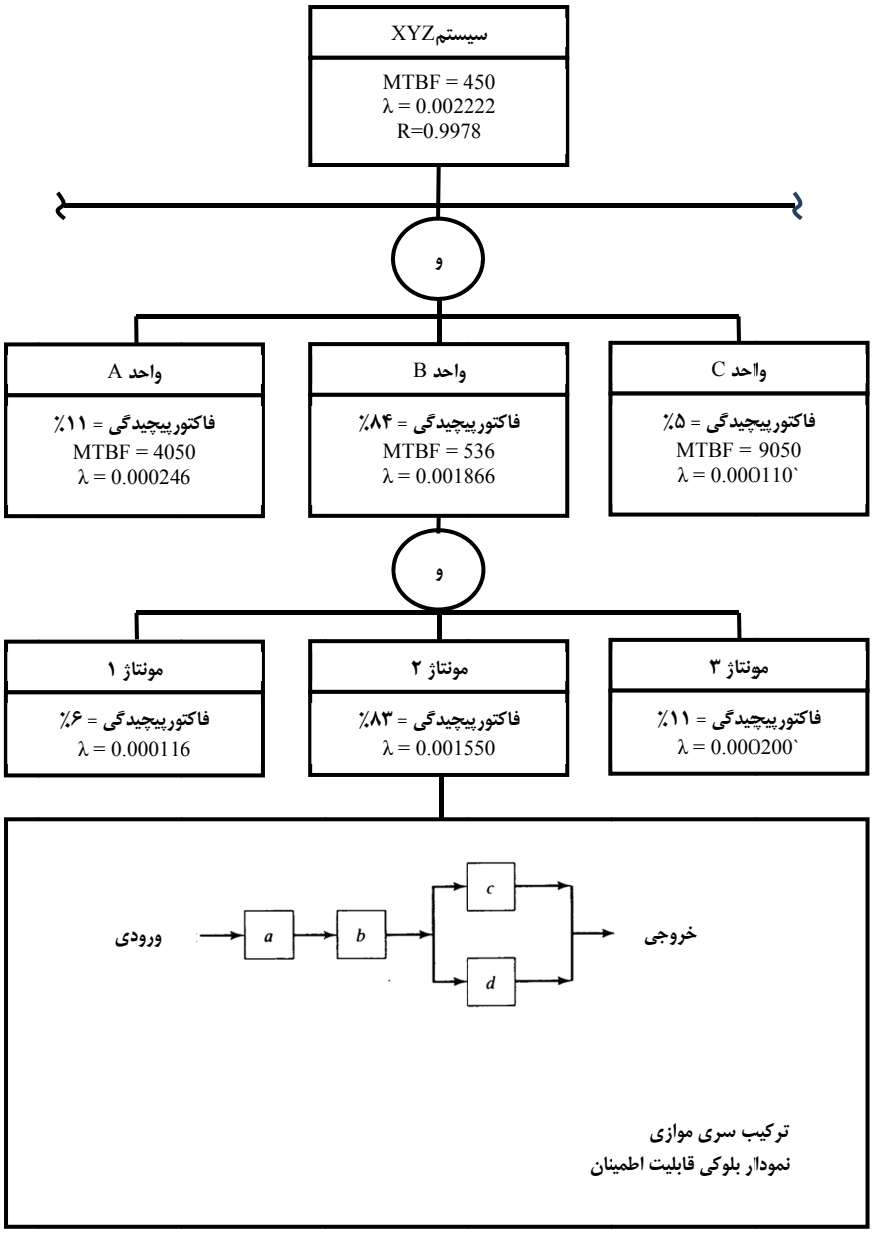
۱. عناصر سیستم که در طراحی شناخته شده‌اند و برای آن‌ها داده‌های قابلیت اطمینان موجود است یا می‌توان به‌راحتی آن‌ها را ارزیابی کرد، شناسایی کنید. برای مثال، از طریق انتخاب آیتم‌های COTS، انتظار می‌رود که داده‌های میدانی از تولیدکننده در دسترس بوده و بتوان ارزیابی نسبتا درستی از قابلیت اطمینان سیستم بر پایه تجربیات گذشته داشت. چنین فاکتورهایی باید به عناصر مناسب سیستم اختصاص داده شده و مشارکت نسبی آن‌ها در نیازمندی ۴۵۰ ساعته تعیین شود.

۲. حوزه‌هایی را که جدید بوده و اطلاعات طراحی آن‌ها در دسترس نیست، شناسایی کنید. فاکتورهای پیچیدگی یا وزنی را به هر کدام از بلوک‌ها اختصاص دهید. فاکتورهای پیچیدگی ممکن است بر پایه یک تخمین از تعداد و روابط قطعات اجزا، چرخه کار قرار داشته باشد، چه پیش‌بینی شده باشد که یک آیتم تحت شرایط دمایی شدید و غیره قرار

دارد یا خیر. تجربه طراح و دانش او ادر زمینه‌های کاربردی مشابه در گذشته برای این کار می‌تواند بسیار یاری‌رسان باشد. بخشی از نیازمندی قابلیت اطمینان سیستم را که به حوزه‌های شناخته شده طراحی اختصاص داده نشده است، با استفاده از فاکتورهای وزنی اختصاص داده شده تخصیص دهید.

نتیجه نهایی باید شامل یک سری مقادیر سطح پایین باشد تا هنگامی که ترکیب می‌شوند نیازمندی قابلیت سیستم را که در ابتدا مشخص شده بود، نشان دهند. فاکتورهای قابلیت اطمینان برای سه واحد نشان داده شده در شکل ۱۲–۱۳ به‌عنوان معیارهای طراحی خدمت کرده و در توسعه مناسب یا مشخصات فنی محصول مورد استفاده در اکتساب واحدها قرار می‌گیرند.

در رخدادی که سیستم XYZ در شکل ۱۲–۱۳ در ساختار SOS عملیات خود را انجام می‌دهد و یک واحد یا مونتاژ مشترک وجود دارد (به شکل ۳–۲۴ مراجعه کنید) که برای موفقیت عملیات سیستم نیاز است، فرایند تخصیص باید موضوع عنصر مشترک را با توجه به اولین گزینه بالا (برای آیتم‌هایی که قابلیت اطمینان معلوم دارند) یا گزینه دوم (برای آیتم‌های که تازه توسعه یافته و تجربه عملیاتی در مورد آن‌ها وجود ندارد) مورد بررسی قرار داد.



شکل ۱۲- ۱۳- تخصیص نیازمندی‌های قابلیت اطمینان.

۱۲-۳-۴- کاربرد و انتخاب اجزا

قابلیت اطمینان یک سیستم تا حد زیادی به قابلیت اطمینان اجزای آن و به انتخاب قطعاتی که با نیازمندی‌های یک کاربرد خاص مطابقت دارد، بستگی دارند. فرایند تهیه قطعه‌ای که به‌عنوان یک قطعه قابل اتکا تبلیغ می‌شود کافی نیست و نمی‌تواند یک سیستم با قابلیت اطمینان بالا را تضمین کند. کاربرد مشخص جزء، اهمیت بالایی دارد، مخصوصا زمانی که فاکتورهای خاصی مانند تلرانس‌های قطعه و خصوصیات شناوری، تنش‌های محیطی و الکتریکی و غیره مدنظر باشند.

در سیستم‌های الکترونیکی، تلرانس قطعه، خصوصیات شناوری، تنش‌های الکتریکی، و تنش‌های محیطی می‌توانند آثار قابل‌توجهی بر قابلیت سیستم و مدل‌های خرابی اجزای مختلف سیستم داشته باشند. برای آیتم‌های مکانیکی و سازه‌ای، هنگامی که تلرانس‌های قطعه، فاکتورهای تنش- مقاومت جزء و خصوصیات خستگی مواد درنظر گرفته می‌شوند، موضوعات مشابهی مستولی می‌شود. در نتیجه، یک رویکرد بنیادین برای دست‌یابی به سطح بالایی از قابلیت اطمینان، انتخاب و اعمال اجزا و مواد با قابلیت اطمینان‌های معلوم و توانمند در تامین نیازمندی‌های سیستم وجود دارد. در *طراحی برای قابلیت اطمینان*، فاکتورهای زیادی مورد تاکید است:

۱. انتخاب اجزا و مواد استاندارد تا بیش‌ترین حد ممکن. استفاده از اجزای استاندارد و رایج، با خصوصیات فیزیکی شناخته شده، قابلیت‌های اطمینان معلوم و غیره، باید بر انتخاب آیتم‌های غیراستاندارد و جدید که قبلا برای بهره‌برداری عملیاتی تایید نشده‌اند، ترجیح داده شوند.

۲. آزمایش و ارزیابی همه اجزا و مواد پیش از قبول آن‌ها برای طراحی. این موضوع عبارت است از ارزیابی همه ویژگی‌های عملیاتی اجزا، تلرانس‌های فیزیکی، حساسیت به تنش‌های خاص، خصوصیات فیزیکی خرابی و دیگر خصوصیات خاص اجزا مربوط به‌کاربرد مدنظر.

چالش در انتخاب و استفاده از آن اجزایی است که هنگامی که ترکیب می‌شوند بتوانند نیازمندی کلی قابلیت اطمینان برای سیستم را فراهم کنند. این هدف می‌تواند از طریق ترکیب تحلیل تئوری، یک مدل قابلیت اطمینان که کاربرد و روابط را ارزیابی می‌کند و تحلیل آزمایشگاهی برای ارزیابی نتایج آزمایش اجزا انجام گیرد.

۱۲-۳-۵- افزونگی در طراحی

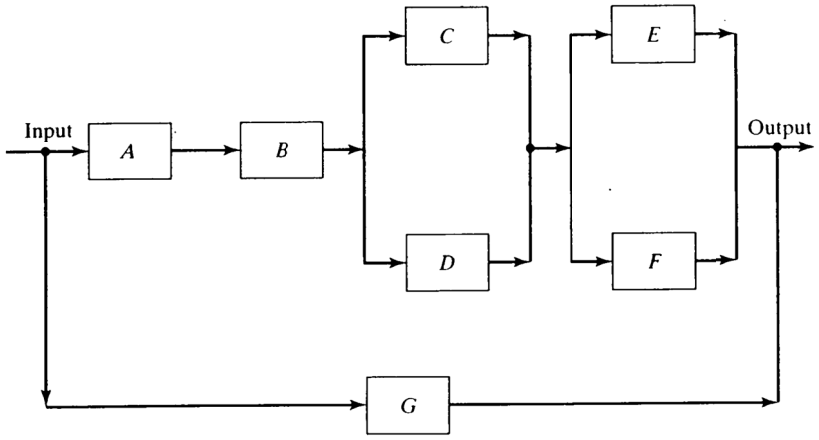
تحت شرایط خاصی در طراحی سیستم ممکن است در نظر گرفتن استفاده از افزونگی برای ارتقای قابلیت اطمینان سیستم توسط فراهم آوردن دو یا چند مسیر وظیفه‌ای (یا کانال‌های عملیاتی) در حوزه‌های حیاتی برای موفقیت ماموریت سیستم ضروری باشد. با این حال، استفاده از افزونگی الزاما همه مشکلات را حل نمی‌کند زیرا اغلب منجر به افزایش نیاز به فضا و وزن می‌شود، مصرف نیرو را بالا می‌برد، پیچیدگی را افزایش می‌دهد و هزینه بیش‌تری می‌طلبد. برعکس، استفاده از افزونگی ممکن است تنها راه‌حل برای بهبود قابلیت اطمینان در وضعیت‌های خاصی باشد.

افزونگی می‌تواند در سطوح مختلفی که در شکل ۱۲-۱۴ نشان داده شده است اعمال شود. در سطح سیستم، بلوک G یک قسمت افزوده به دیگر بلوک‌های شبکه است و در سطح دیگری، بلوک C قرار دارد که یک قسمت افزوده به بلوک D است. از نمودار بلوکی، مسیرهایی که منجر به عملیات موفق سیستم می‌شود شامل A,B,C,E؛ A,B,C,F؛ A,B,D,E؛ A,V,D,F؛ و G می‌شود. احتمال موفقیت، یا قابلیت اطمینان، برای هر مسیر با استفاده از قانون ضرب نشان داده

شده در معادله ۱۲–۸ محاسبه می‌شود. محاسبه قابلیت اطمینان سیستم (با در نظر گرفتن همه مسیرها) نیازمند آگاهی از نوع افزونگی استفاده شده و قابلیت اطمینان هر کدام از بلوک‌هاست. برای افزونگی عملیاتی (فعال)، که همه بلوک‌ها در چرخه‌ی عملیاتی به‌طور کامل تغذیه شده‌اند، معادلات مناسب در قسمت ۱۲–۲ می‌تواند استفاده شود تا قابلیت اطمینان سیستم محاسبه شود. معادلات ۱۲–۱۰ تا ۱۲–۱۲ و مثال‌های مرتبط می‌توانند در دست‌یابی به قابلیت اطمینان از طریق افزونگی به‌کار آیند.

هنگامی که مسائل طراحی تا حدی پیچیده‌تر از مثال‌های نمایش داده شده در قسمت ۱۲–۲–۳ می‌شود، تعداد رخدادهای ممکن افزایش می‌یابند. برای مثال در شکل ۱۲–۹، موارد زیر ممکن است رخ دهند:

۱. زیرسیستم‌های A، B و C همگی در حالت عملیاتی باشند.
۲. زیرسیستم‌های A و B عملیاتی بوده و C خراب باشد.
۳. زیرسیستم‌های A و C عملیاتی بوده و B خراب باشد.
۴. زیرسیستم‌های C و B عملیاتی بوده و A خراب باشد.
۵. زیرسیستم A عملیاتی باشد و زیرسیستم‌های B و C خراب باشند.
۶. زیرسیستم B عملیاتی باشد و زیرسیستم‌های A و C خراب باشند.
۷. زیرسیستم C عملیاتی باشد و زیرسیستم‌های B و A خراب باشند.
۸. زیرسیستم‌های A، B و C همگی خراب باشند.



شکل ۱۲- ۱۴- نمودار بلوکی قابلیت اطمینان برای نمایش افزونگی در سطوح سیستم و زیرسیستم.

برای سادگی، فرض کنید R نمایانگر قابلیت اطمینان و 1-R=Q عدم قابلیت اطمینان باشد. آنگاه

R^3 نمایانگر عملیاتی بودن A، B و C خواهد بود

$3R^2Q$ نمایانگر عملیاتی بودن دو زیرسیستم و خراب بودن یک زیرسیستم دیگر است

$3RQ^2$ نمایانگر عملیاتی بودن یک زیرسیستم و خراب بودن دو زیرسیستم دیگر است

Q^3 نماینگر خراب بودن هر سه زیرسیستم است

از آن‌جا که حاصل جمع R^3، $3R^2Q$، $3RQ^2$، و Q^3 نمایانگر همه رخدادهاست

$$R^3 + 3R^2Q + 3RQ^2 + Q^3 = 1 \qquad (۶-۱۲)$$

با مراجعه به شکل ۱۲-۹، فرض شده است که قابلیت اطمینان هر بلوک برابر با ۰/۹۵ باشد. در نتیجه، قابلیت اطمینان شبکه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$R = R^3 + 3R^2Q + 3RQ^2$$
$$= (0.95)^3 + 3(0.95)^2(0.05) + 3(0.95)(0.05)^2 = 0.999875$$

توجه کنید که این مقدار با نتایج قسمت ۱۲-۲-۳ و معادله ۱۲-۱۱ مطابقت دارد.

با مراجعه به شکل ۱۲-۱۴ فرض کنید که محاسبه قابلیت اطمینان برای شبکه نشان داده شده مطلوب است. رویکرد این است که ابتدا قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های C تا F مشخص شود؛ قانون ضرب را برای A و B و شبکه‌های حاصل در این مسیر (یعنی C تا F) اعمال کنید؛ سپس قابلیت اطمینان ترکیبی دو مسیر افزوده کلی را تعیین کنید (با در نظر گرفتن زیرسیستم G). فرض شده است که قابلیت اطمینان هر یک از زیرسیستم‌ها به‌صورت زیر باشد

A = 0.97
B = 0.98
C = 0.92
D = 0.92
E = 0.93
F = 0.90
G = 0.99

قابلیت اطمینان شبکه افزوده شامل زیرسیستم‌های C و D برابر است با

$$R_{CD} = R_C + R_D - (R_C)(R_D) = 0.9936$$

قابلیت اطمینان شبکه افزوده شامل زیرسیستم‌های E و F برابر است با

$$R_{EF} = R_E + R_F - (R_E)(R_F) = 0.9930$$

قابلیت اطمینان مسیر برابر است با

$$R_{ABCDEF} = (R_A)(R_B)(R_{CD})(R_{EF}) = 0.9379$$

قابلیت اطمینان شبکه ترکیبی در شکل ۱۲–۱۴ برابر است با

$$R_{\text{system}} = R_{ABCDE} + R_G - \left(R_{ABCDEF}\right)\left(R_G\right) = 0.999379$$

تا این‌جای بحث تنها برای یک حالت افزونگی، افزونگی عملیاتی انجام شد که در آن همه‌ی زیرسیستم‌ها در چرخه‌ی عملیاتی سیستم کاملا تغذیه می‌شوند. در کاربردهای واقعی، اغلب ترجیح استفاده از افزونگی آماده به‌کار است. شکل ۱۲–۱۵ یک مثال از افزونگی آماده به‌کار را نشان می‌دهد که در آن زیرسیستم A به‌طور تمام وقت عملیاتی است و زیرسیستم B در هنگام انجام عملیات در حالت آماده به‌کار است و اگر سیستم A خراب شود به‌کار می‌افتد. واحد آماده به‌کار (زیرسیستم B) تا زمانی که یک دستگاه حساس به خرابی، خرابی زیرسیستم A را تشخیص ندهد و عملیات به زیرسیستم B منتقل نشود (چه به‌صورت دستی یا خودکار)، عملیاتی نخواهد بود. به‌دلیل که زیرسیستم B تا زمانی که خرابی زیرسیستم A اتفاق نیافتد، عملیاتی نخواهد بود، قابلیت اطمینان چنین سیستمی بالاتر از حالتی است که هر دو سیستم A و B به‌طور پیوسته در حالت عملیاتی باشند.

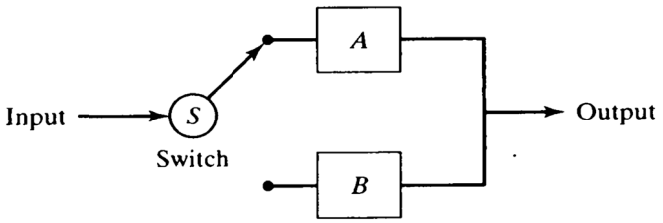
هنگام تعیین قابلیت اطمینان سیستم‌های آماده به‌کار، توزیع پواسون استفاده می‌شود زیرا سیستم‌های آماده به‌کار خصوصیت λt ثابت این توزیع را از خود نشان می‌دهند. در حقیقت، احتمال این‌که هیچ خرابی اتفاق نیافتد با عبارت اول یعنی $e^{-\lambda t}$ نمایش داده می‌شود و احتمال آن‌که یک خرابی اتفاق بیافتد با جمله دوم یعنی $\left(\lambda t\right)\left(e^{-\lambda t}\right)$ مشخص شده و بقیه نیز به همین منوال.

با مراجعه به شکل ۱۲–۱۵، در آن یک زیرسیستم عملیاتی و یک زیرسیستم آماده به‌کار که با هم تشکیل یک گروه داده‌اند، وجود دارد، احتمال آن‌که هیچ خرابی اتفاق نیافتد یا این‌که یک خرابی اتفاق بیافتد (با باقی ماندن یک زیرسیستم در شرایط مطلوب) باید مدنظر قرار گیرد. این احتمال ترکیبی به‌صورت زیر نشان داده می‌شود

$$P\left(\text{one standby}\right)=e^{-\lambda t}+\left(\lambda t\right)e^{-\lambda t} \qquad (۱۲-۱۷)$$

که در آن λt تعداد خرابی‌های انتظاری است. اگر یک زیرسیستم عملیاتی و دو زیرسیستم آماده به‌کار وجود داشته باشد، آنگاه احتمال ترکیب شده به‌صورت زیر است

$$P\left(\text{two standbys}\right)=e^{-\lambda t}+\left(\lambda t\right)e^{-\lambda t}+\frac{\left(\lambda t\right)^2 e^{-\lambda t}}{2!}$$



شکل ۱۲- ۱۵- شبکه افزوده آماده به‌کار.

یک جمله بیش‌تر در توزیع پواسون برای هر زیرسیستم آماده به‌کار اضافه می‌شود. به‌عنوان مثال فرض کنید می‌خواهیم قابلیت اطمینان را برای یک دوره‌ی عملیاتی ۲۰۰ ساعته برای ساختاری که شامل یک زیرسیستم عملیاتی و یک زیرسیستم مشابه آماده به‌کار است، تعیین کنیم. این ساختار در شکل ۱۲-۱۵ نمایش داده شده است و فرض شده است که قابلیت اطمینان انتقال عملیات ۱۰۰٪ است. نرخ خرابی $\left(\lambda\right)$برای هر زیرسیستم ۰/۰۰۲ خرابی در هر ساعت باشد. با استفاده از معادله ۱۲-۱۷، قابلیت اطمینان برابر است با

$$R=e^{-\lambda t}\left(1+\lambda t\right), \qquad \lambda t=\left(0.002\right)\left(200\right)=0.4$$
$$=e^{-0.4}\left(1+0.4\right)$$
$$=\left(0.67032\right)\left(1.4\right)=0.9384$$

برای نشان دادن تفاوت بین افزونگی عملیاتی و آماده به‌کار، فرض کنید هر دوسیستم درشکل ۱۲–۱۵ در حالت عملیاتی هستند. قابلیت اطمینان این ساختار به‌صورت زیر تعیین می‌شود

$$R = 1-(1-0.67032)^2 = 0.8913$$

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، قابلیت اطمینان سیستم آماده به‌کار (۰/۹۳۸۴) بیش‌تر از قابلیت اطمینان سیستم افزونگی عملیاتی (۰/۸۹۱۳) است.

۱۲–۳–۶ – بازبینی و ارزیابی طراحی

بازبینی و ارزیابی خصوصیات قابلیت اطمینان در طراحی سیستم به‌عنوان یک بخش از فرایند تشریح شده در قسمت‌های ۳–۱۰، ۴–۸ و ۵–۸ انجام می‌شود. ساختار طراحی و خصوصیات اجزای مختلف سیستم از نقطه‌نظر برآورده کردن نیازمندی‌های مشخص شده قابلیت اطمینان برای سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اگر نیازمندی‌ها تامین شده باشند، طراحی به همان صورتی که هست تایید می‌شود. اگر نه، تغییرات مناسب باید ایجاد شده و فعالیت‌های اصلاحی آغاز شود.

در بازبینی قابلیت اطمینان، بهتر است که یک چک‌لیست بازبینی طراحی مانند آنچه در پیوست ب فراهم شده است، توسعه داده شود که شامل سوالاتی کلی و خاص باشد. برای مثال برخی حوزه‌های کلیدی مدنظر که باید در سوالات مطرح شوند در زیر آورده شده است:

۱. آیا نیازمندی‌های کمی و کیفی قابلیت اطمینان به حد کفایت از ابتدای کار تعریف شده‌اند؟
۲. آیا این نیازمندی‌های به‌درستی به زیرسیستم‌ها (و سطوح پایین‌تر) تخصیص داده شده‌اند؟ آیا یک رهگیری بالا به پایین/پایین به بالا از این نیازمندی‌ها وجود دارد؟
۳. آیا نیازمندی‌های قابلیت اطمینان واقع‌گرایانه است؟ آیا با دیگر نیازمندی‌های سیستم هماهنگ است؟

۴. آیا پیچیدگی طراحی سیستم حداقل شده است؛ برای مثال، تعداد اجزا/قطعات؟
۵. آیا مدهای خرابی و آثار آن‌ها شناسایی شده‌اند؟
۶. آیا نرخ‌های خرابی سیستم، زیرسیستم، واحد، جزء و قطعه معلوم می‌باشند؟
۷. آیا خصوصیات خرابی (یعنی فیزیک خرابی) برای هر قطعه از اجزا معلوم است؟
۸. آیا دوره فرسودگی سیستم یا محصول شناسایی شده است؟
۹. آیا قطعات اجزا با نرخ‌های خرابی بیش از حد شناسایی شده‌اند؟
۱۰. آیا همه آیتم‌های عمر مفید بحرانی تا حد ممکن شناسایی و حذف شده‌اند؟
۱۱. آیا خصوصیات خرابی ایمن در صورت امکان مدنظر قرار گرفته است؟ (یعنی محافظت در مقابل خرابی‌های وابسته/ثانویه که از خرابی اصلی ناشی می‌شوند).
۱۲. آیا استفاده از اجزای قابل تنظیم حداقل شده است؟ (اگر حذف نشده‌اند).
۱۳. آیا تدارکات عملیات خنک کردن در طراحی حوزه‌های نقطه داغ فراهم شده است؟
۱۴. آیا همه شرایط خطرناک حذف شده‌اند؟
۱۵. آیا همه نیازمندی‌های قابلیت اطمینان برآورده شده است؟

باید توجه شود که پاسخ به سوالات بالا باید بله باشد. پاسخ همه این سوالات اساسا به نتایج تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان که به‌عنوان بخشی از فرایند طراحی روزانه انجام می‌شوند، بستگی دارد.

۱۲-۴- روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان

در طی طراحی (و به‌عنوان بخشی از فرایند تکراری ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم)، تعدادی از ابزارهای قابلیت اطمینان منتخب وجود دارد که می‌توانند به‌صورتی اثربخش در پشتیبانی اهداف تشریح شده در این کتاب به‌کار روند. این ابزار عبارت‌اند از FMECA ، FTA ، *تحلیل تنش-*

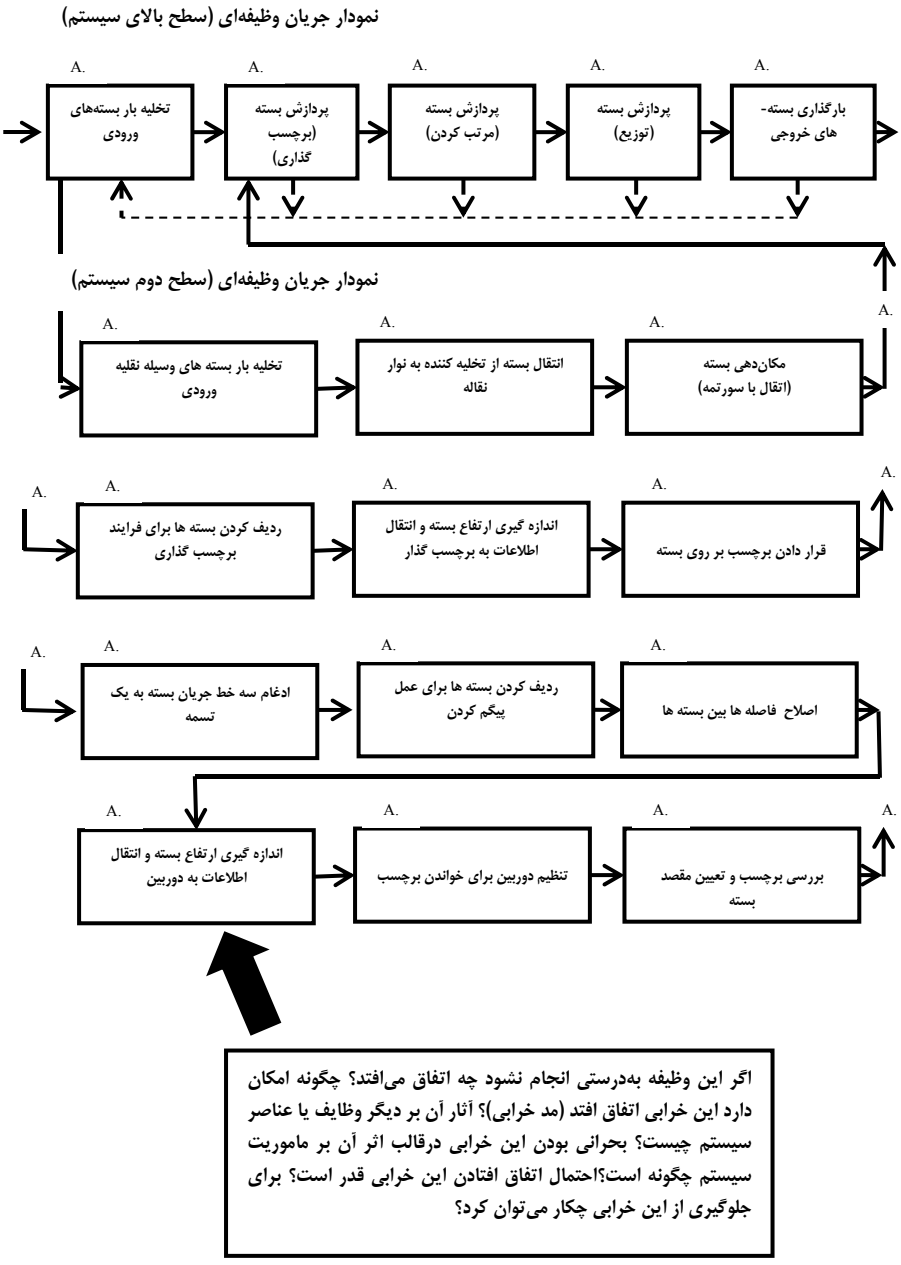
مقاومت، پیش‌بینی قابلیت اطمینان و مدل‌سازی افزایش قابلیت اطمینان. این ابزار همراه با دیگر ابزارهای تحلیلی معرفی شده در بخش سوم و فصول بعد، می‌توانند در هر فاز از چرخه‌ی عمر اعمال شوند، ولی باید نسبت به عمق طراحی و آن چیزی که برای آن استفاده می‌شود، تنظیم گردند.

۱۲-۴-۱- مد خرابی، آثار و تحلیل بحرانی بودن (FMECA)

مد خرابی، آثار و تحلیل بحرانی بودن (FMECA) یک تکنیک طراحی است که برای شناسایی و بررسی نقاط ضعف بالقوه سیستم (محصول یا فرایند) می‌تواند به‌کار رود.

این تکنیک، گام‌های لازم برای همه مسیرهایی که سیستم را خراب می‌کنند، معرفی می‌نماید، آثار خرابی بر عملکرد و ایمنی سیستم را بررسی می‌کند و جدیت این آثار را مورد بحث قرار می‌دهد. FMECA را می‌توان در ابتدای مراحل طراحی مفهومی و اولیه به‌کار برد و در ادامه همراه با تکامل تعریف سیستم از طریق طراحی و توسعه تفصیلی مورد استفاده قرار داد. اگرچه این تحلیل، بیش‌ترین کاربری را برای ارتقای عمل پیش از اتفاق افتادن درطراحی سیستم دارد، اما می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری برای عمل پس از وقوع اتفاق استفاده کرد و سیستم موجود را به‌صورت پیوسته ارزیابی کرده و بهبود داد.

FMECA را می‌توان هم برای یک موجودیت وظیفه‌ای و هم برای یک موجودیت فیزیکی استفاده کرد. برای مثال، شکل ۱۲-۱۶ بخشی از وظایف اصلی یک کارخانه حمل بسته‌ها یا یک سری از فعالیت‌ها برای پردازش بسته‌ها به منظور توزیع را ترسیم کرده است. سوال این است که *چه اتفاقی محتمل است اگر وظیفه* A.3.4 *به‌درستی انجام نشود و عواقب ممکن حاصل از چنین خرابی چه می‌تواند باشد؟* برعکس، ممکن است سوالی مشابه در مورد یک موجودیت فیزیکی مانند مونتاژ ۳ در شکل ۴-۶ یا ۴-۷ پرسیده شود. بنابراین، FMECA نیاز دارد که هم محصول و هم فرایند را مدنظر قرار دهد.



شکل ۱۲- ۱۶- نمودار جریان وظیفه‌ای کارخانه حمل و نقل بسته‌ها.

رویکرد استفاده شده در اجرای FMECA در شکل ۱۲–۱۷ نشان داده شده است. خلاصه‌ای از گام‌های موردنیاز در زیر تشریح شده است:

۱. *نیازمندی‌های سیستم (محصول یا فرایند) را تعریف کنید.* سیستم موردنظر، خروجی‌های موردانتظار و شاخص‌های عملکرد فنی مربوطه (TPM) را تشریح کنید. شکل ۱۲–۱۸ یک مثال که در آن FMECA را می‌توان برای فرایند تولید واشر و هم‌چنین واشر در خودرو را نشان می‌دهد. ابتدا یک FMECA برای عملیات مهر زنی انجام داده و مدها و آثار خرابی بر دیگر عملیات فرایند را تعیین کرده و آثار آن را بر روی واشر ارزیابی کنید. سپس یک FMECA محصول‌گرا می‌تواند برای ارزیابی آثار خرابی واشر بر بلوک موتور و بر کل خودرو اجرا شود.

۲. *انجام تحلیل وظیفه‌ای.* این قسمت شامل تعریف سیستم به‌صورت عبارات وظیفه‌ای است که در قسمت‌های ۳–۷–۱ و ۴–۳–۱ تشریح شده است. یک سیستم را می‌توان به واحدهای وظیفه‌ای در چرخه‌ی عمر و در ادامه به یک طرح بسته‌بندی فیزیکی شکست (به شکل ۴–۵ و ۱۲–۱۸ رجوع کنید).

۳. *انجام تخصیص نیازمندی‌ها.* این کار یک شکست از بالا به پایین نیازمندی‌های سطح سیستم است که در قسمت ۴–۳ تشریح شد.

۴. *شناسایی مدهای خرابی.* یک مدخرابی، مسیری است که یک عنصر در انجام وظیفه‌اش شکست می‌خورد. برای مثال، یک سوییچ در یک وضعیت باز می‌تواند خراب شود؛ یک لوله ممکن است گرفته شود؛ یک ماده ممکن است در اثر تنش دچار شکاف شود؛ یک سند ممکن است به موقع تحویل داده نشود و غیره.

۵. *تعیین علل خرابی.* این موضوع شامل تحلیل فرایند یا محصول برای تعیین علت اصلی مربوط به اتفاق افتادن یک خرابی است. علل می‌توانند شامل تنش‌های غیرعادی تجهیز در طول عملیات، فرسودگی، خطای نرم‌افزاری، ضعف نفر، مواد خراب، خسارت در حمل و نقل و جابه‌جایی، یا خطای ایجاد شده توسط کاربر و نگه‌داری و تعمیرات باشد. اگرچه تجربه سیستم‌های مشابه یا دسترسی‌پذیری داده‌های میدانی مناسب ترجیح داده می‌شود، استفاده از نمودار علت و اثر ایشیکاوا اثربخشی بالایی در معین کردن علل بالقوه خرابی دارد. شکل ۱۲–۱۹ چنین نموداری را نشان می‌دهد.

۶. *تعیین آثار خرابی.* خرابی‌ها، اغلب به چند طریق بر عملکرد و اثربخشی هم عنصر وظیفه‌ای مربوطه و هم کل سیستم اثرگذار است. در نظر گرفتن آثار خرابی بر دیگر عناصر در سطح عنصر مدنظر در ساختار سلسله مراتبی سیستم، سطوح بالاتر و در نهایت بر کل سیستم، با اهمیت است. با مراجعه به شکل ۱۲–۱۸، اگر عملیات مهر زنی دچار خرابی شود، آثار آن بر عملیات نهایی، بر خود واشر و بر اتومبیل و در نهایت بر مشتری کدامند؟

۷. *شناسایی روش‌های شناسایی خرابی.* برای یک FMECA فرایندگرا باید به کنترل‌های فرایند فعلی که می‌توانند خرابی‌ها یا اشکالات را شناسایی کنند مراجعه شود، با این حال، هنگامی که FMECA بر طراحی تمرکز دارد، با وجود هر خرابی، گیج، وسایل بازخوانی، پایش وضعیت یا رویه‌های ارزیابی که به کشف خرابی‌های بالقوه منجر می‌شوند، مراجعه می‌گردد.

۸. *نرخ شدت مد خرابی.* این موضوع به جدیت آثار یک خرابی خاص مربوط می‌شود. اگر یک خرابی اتفاق بیافتد، آیا باعث مرگ کاربر و از بین رفتن سیستم می‌شود یا تنها اثر

اندکی بر عملکرد سیستم خواهد داشت؟ برای نمایش درجه شدت آثار می‌توان از یک مقیاس ۱ تا ۱۰ استفاده کرد که آثار ناچیز با ۱، آثار اندک با ۲ و ۳، آثار متوسط با اعداد ۴ تا ۶، آثار زیاد با اعداد ۷ و ۸ و آثار خیلی زیاد با اعداد ۹ و ۱۰ نشان داده می‌شود. سطح شدت آثار می‌تواند به موضوعات وابسته به ایمنی و درجه عدم رضایت مشتری مربوط شود.

۹. *نرخ فراوانی مد خرابی.* با دانستن این موضوع که یک وظیفه یا جزء فیزیکی در سیستم می‌تواند به طرق مختلف خراب شود، این گام فراوانی اتفاق افتادن هر مد خرابی را مشخص می‌کند. مجموع فراوانی‌های خرابی‌های مدی برای یک عنصر سیستم باید برابر با نرخ خرابی آن باشد. می‌توان از یک مقیاس ۱ تا ۱۰ استفاده کرد تا این فراوانی را نشان داد به‌صورتی که ۱ نمایانگر دور بودن (غیرمحتمل بودن خرابی)، ۲ و ۳ نمایانگر اندک (خرابی‌های نسبتا کم) ۴ تا ۶ نمایانگر متوسط (خرابی‌های گاه به گاه)، ۷ و ۸ نمایانگر بالا (خرابی‌هایی که مرتبا اتفاق می‌افتند) و ۹ و ۱۰ نمایانگر بسیار بالا (خرابی که تقریبا حتمی است) باشد. این نرخ‌ها می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای تعداد انتظاری خرابی‌ها برای هر واحد زمانی یا معادل آن استفاده شوند.

۱۰. *احتمال شناسایی نرخ خرابی.* این موضوع وابسته به احتمال آن‌که کنترل‌های فرایند، ویژگی‌های طراحی، رویه‌های تصدیق اعتبار و غیره است که خرابی‌های بالقوه را به‌موقع شناسایی می‌کنند تا از یک فاجعه سیستمی ممانعت به عمل آورند. برای کاربرد در یک فرایند، باید یک مجموعه از کنترل‌های فرایند را که می‌توانند یک خرابی را پیش از آن که آثار آن به ادامه فرایند یا به مشتری/ مصرف کننده منتقل شود، شناسایی کرد. برای کمی کردن این موضوع می‌توان از یک مقیاس ۱ تا ۱۰ استفاده کرد که در

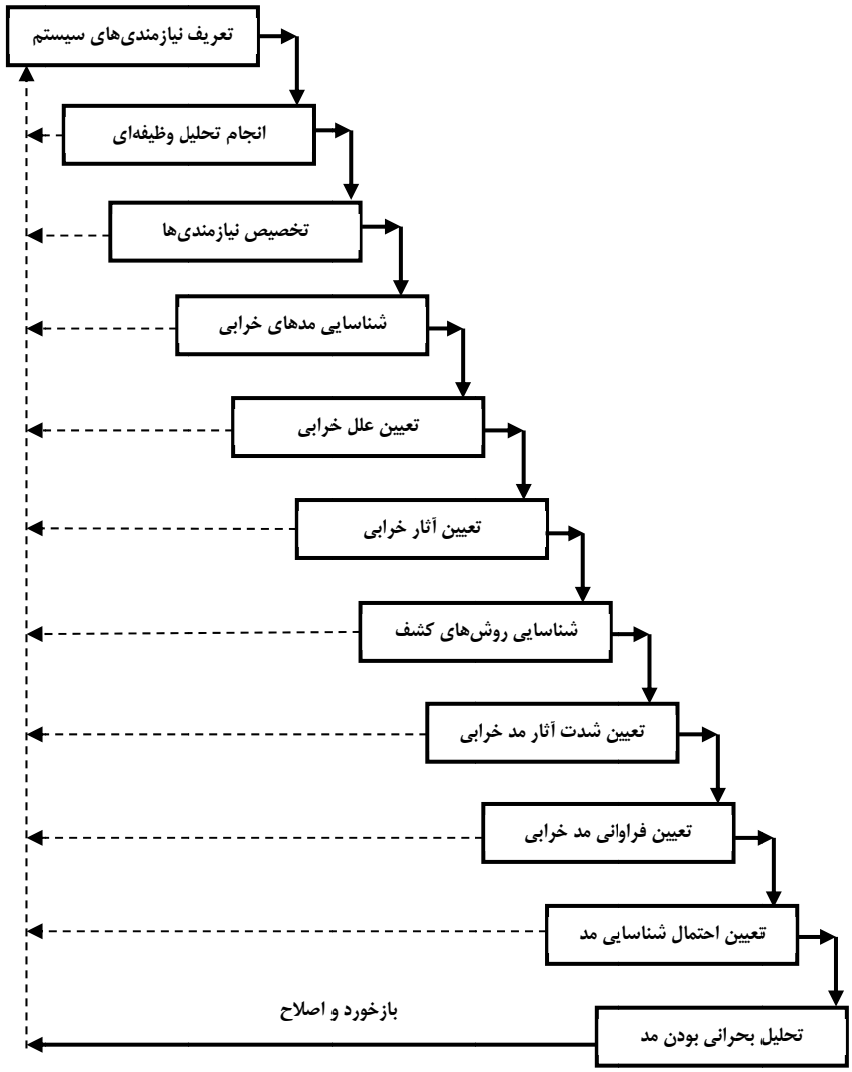
آن ۱ و ۲ احتمال بسیار بالا، ۳ و ۴ احتمال بالا، ۵ و ۶ احتمال متوسط، ۷ و ۸ احتمال ضعیف و ۹ احتمال بسیار ضعیف و ۱۰ اطمینان کامل از عدم شناسایی است.

۱۱. *تحلیل بحرانی بودن مد خرابی.* هدف این قسمت یکی کردن اطلاعات قبلی برای معین کردن جنبه‌های بحرانی‌تر در طراحی سیستم است. بحرانی بودن در این موضوع، تابعی از شدت، فراوانی و احتمال شناسایی است که می‌تواند در قالب عدد اولویت ریسک (RPN) بیان شود. RPN به‌صورت زیر تعیین می‌شود

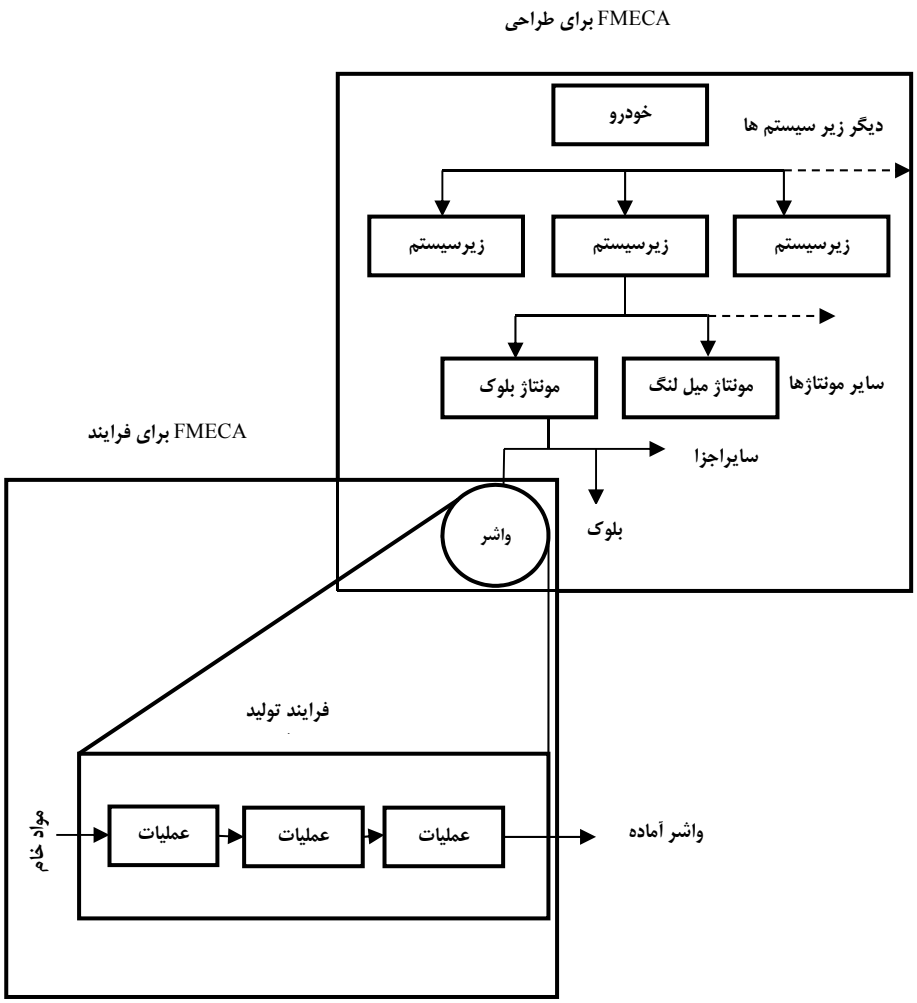
RPN = (نرخ شدت آثار)(نرخ فراوانی خرابی) (احتمال شناسایی خرابی) (۱۲–۸)

RPN منعکس‌کننده‌ی بحرانی بودن نرخ خرابی است. یک مد خرابی که دارای احتمال اتفاق افتادن بالا بوده، آثار قابل توجه بر عملکرد سیستم گذاشته و به سختی شناسایی می‌گردد احتمالا دارای یک RPN خیلی بالاست.

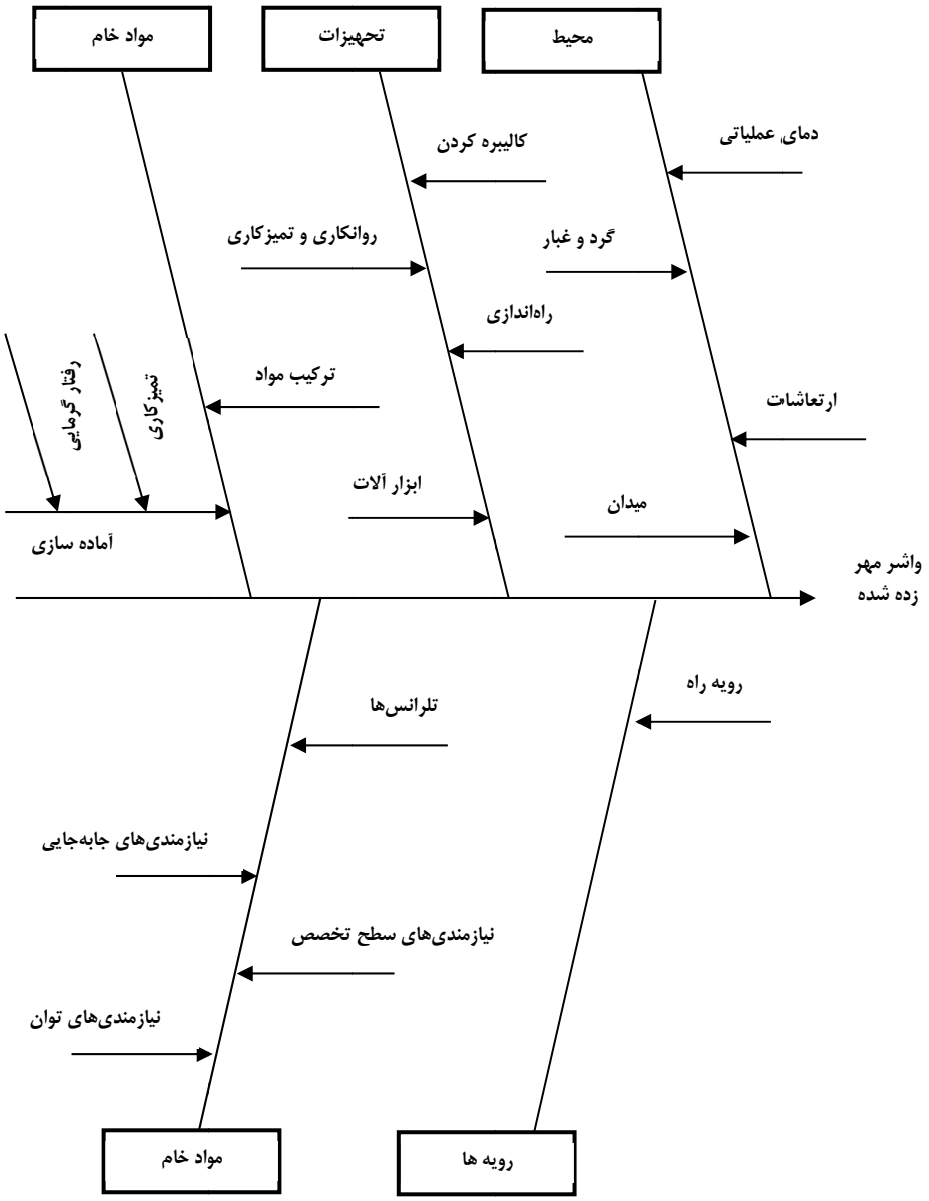
۱۲. *پیشنهادهایی برای بهبود محصول/فرایند.* این موضوع به شناسایی فرایند تکرارشونده حوزه‌هایی بستگی دارد که دارای RPN بالا و ارزیابی علل هستند و پیشنهادهایی را برای بهبود محصول/فرایند فراهم می‌کند (به حلقه بازخوردی شکل ۱۲–۱۷ مراجعه کنید). یک تحلیل پارتو، مانند آنچه در شکل ۱۲–۲۰ نشان داده شده است انجام می‌شود تا آیتم‌هایی با اولویت بالا را که نیاز به بررسی دارند، شناسایی کند.



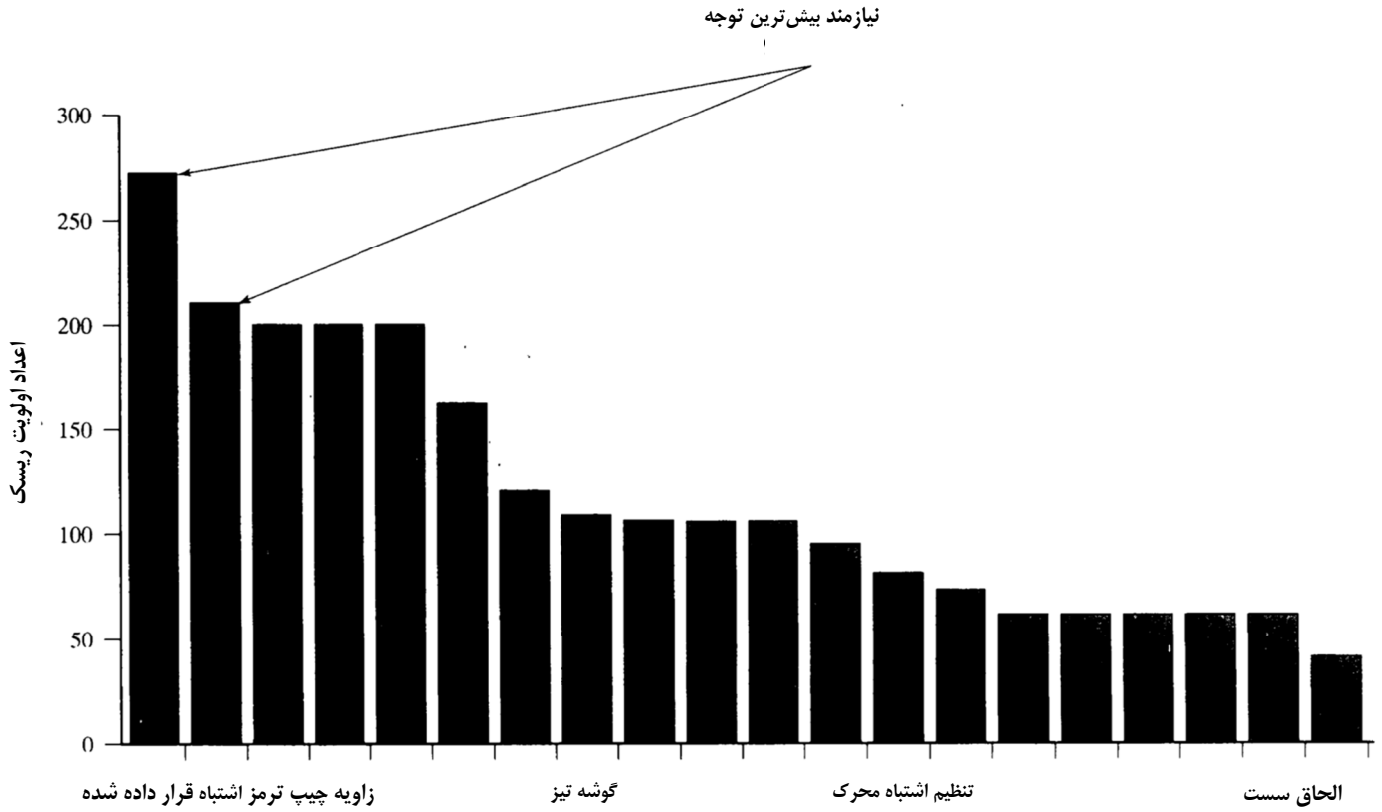
شکل ۱۲- ۱۷- فرایند تحلیل مد خرابی، آثار و بحرانی بودن.



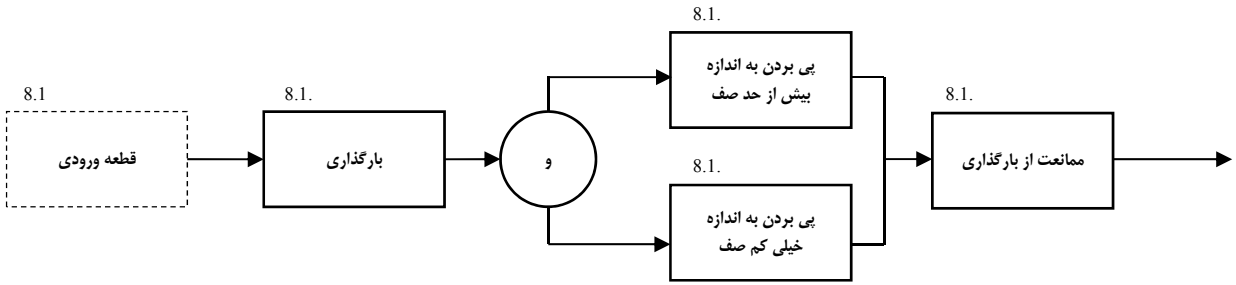
شکل ۱۲- ۱۸- نمونه‌ای از مد خرابی، آثار و تحلیل بحرانی بودن برای طراحی و فرایند.



شکل ۱۲- ۱۹- نمودار استخوان ماهی علت-اثر ایشیکاوا.

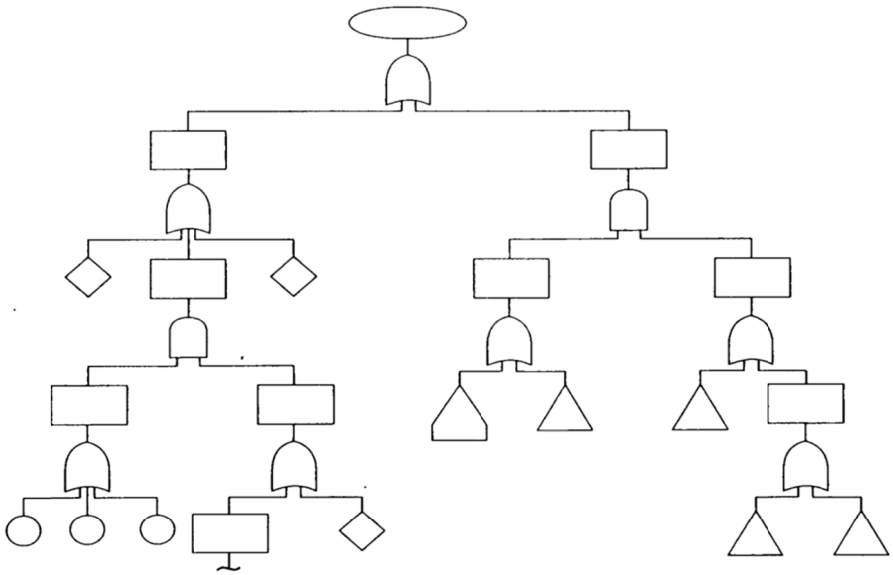


شکل ۱۲- ۲۰- تحلیل پارتو – علل بالقوه خرابی (جزئی).



فعالیت مربوطه	وضعیت پیشنهادات	RPN	شناسایی	شدت-مشتری	تشدت-تولید	رخداد	کنترل فعلی	اثرات بالقوه خرابی - مشتری	علت بالقوه خرابی - تولید کننده	مد خرابی بالقوه	تشریح فرایند	شماره رجوع
		۱۲۵۳۵	۱۳۵	۷	۱۷	۱	مشاهده متوقف می شود	فشردگی فرایند Lip تغییرات ارتفاع فشردگی فرایند Lip تغییرات ارتفاع فشردگی فرایند Lip تغییرات ارتفاع	خرابی حسگر کثیفی حسگر راه‌اندازی اشتباه	تغییر در انتشار آزاد	پی بردن به اندازه بیش از حد صف	شماره رجوع
		۲۴۲	۱۳۵	۷	۱۷	۲	مشاهده	فشردگی فرایند Lip فشردگی فرایند Lip فشردگی فرایند Lip	خرابی حسگر کثیفی حسگر راه‌اندازی اشتباه	جای‌گذاری اشتباه LIp	پی بردن به اندازه خیلی کم صف	شماره رجوع

شکل ۱۲- ۲۱- نتایج فایند FMECA جزئی.



بیضی نمایانگر رخداد اصلی است. بدیهی است که بیضی در بالاترین نقطه درخت خطا قرار می‌گیرد

مستطیل نمایانگر یک رخداد خطای میانی است. یک مستطیل می تواند هر جایی در درخت سیستم ظاهر شود به جز در پایین‌ترین سطح.

یک دایره نمایانگر رخداد خرابی در پایین‌ترین سطح است. رخدادهای پایه باید در پایین‌ترین سطح ظاهر شوند

لوزی نمایانگر یک رخداد توسعه داده نشده است. رخدادهای توسعه داده نشده باید بیشتر شکسته شود اما برای سادگی اینکار انجام نشده است. اغلب رخدادهای توسعه داده نشده پیچیده در یک درخت خطای دیگر تحلیل می شود. رخداد های توسعه داده نشده در پایین‌ترین سطح درخت خطا ظاهر می شوند

این نماد که برخی اوقات خانه نامیده می شود یک رخداد ورودی است. یک رخداد ورودی به یک سیگنال یا ورودی که می‌تواند باعث خرابی سیستم شود گفته می شود

این نماد نمایانگر یک گیت منطقی "و"می باشد. در این مورد، خروجی تنها پس از دریافت همه ورودی ها قابل اتفاق افتادن است

این نمای نمایانگر گیت منطقی "یا" است. در این مورد، هر یک از ورودی ها می‌تواند خروجی را نتیجه دهد.

شکل ۱۲- ۲۲- نمونه‌ای از قالب و نمادهای تحلیل درخت خطا.

شکل ۱۲–۲۱ یک نمایش جزئی از قالب مرسوم است که برای ثبت نتایج FMECA مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات از تحلیل جریان وظیفه‌ای استخراج شده و تعمیم می‌یابد تا شامل نتایج گام‌های نشان داده شده در شکل ۱۲–۱۷ گردد.

۱۲-۴-۲- تحلیل درخت خطا (FTA)

تحلیل درخت خطا (FTA) یک رویکرد استقرایی است که شامل شمارش و تحلیل مسیرهای مختلفی است که یک خرابی مشخص می‌تواند اتفاق افتد و احتمال رخ دادن آن را تحلیل می‌کند. این روش می‌تواند در مراحل اولیه طراحی اعمال شود، به مدهای خرابی مشخصی مربوط است و با استفاده از یک ساختار درخت خطا از بالا به پایین توسعه می‌یابد، مانند مثالی که در شکل ۱۲–۲۲ نشان داده شده است. یک درخت خطای مجزا برای هر مد خرابی بحرانی توسعه می‌یابد.

گام اول شناسایی رخداد در بالاترین سطح است. نیاز است که تعریف این رخداد دقیق باشد و باید به روشنی قابل مشاهده و اندازه‌گیری باشد. برای مثال، می‌تواند به‌صورت این‌که "سیستم دچار آتش‌سوزی شود" معین شود تا این‌که به‌صورت "سیستم از کار می‌افتد" نوشته شود. به محض آن‌که رخداد سطح بالا به روشنی تعریف شود، لازم است که یک سلسله مراتب علی به شکل یک درخت خطا ساخته شود. علل برای رخداد بالایی با استفاده از تکنیک نمودار علت و اثر ایشیکاوا (به شکل ۱۲–۱۹ مراجعه کنید) تعیین می‌شود؛ هر کدام از این علل نیز بررسی می‌شود تا علل خود آن‌ها پیدا شود؛ و به همین منوال فرایند ادامه می‌یابد. گام بعدی تعیین قابلیت اطمینان رخداد سطح بالایی با تعیین احتمالات مربوط به رخدادهای ورودی و ترکیب این احتمالات با توجه به منطق ایجاد شده در درخت رخداد صورت می‌گیرد. اگر قابلیت اطمینان رخداد سطح بالایی غیرقابل قبول به‌دست آید، آنگاه فعالیت‌های اصلاحی نیاز خواهد بود.

FTA به‌صورت اثربخشی می‌تواند در فازهای اولیه طراحی زمانی که مشکلات بالقوه مورد ظن قرار می‌گیرد، اعمال شود. مرکز توجه این روش باریک‌تر بوده و نسبت به FMECA ساده‌تر اجرا می‌شود و نیازمند ورودی‌های کم‌تری برای تکمیل است. برای سیستم‌های بزرگ و پیچیده، که تا حد زیادی بر نرم‌افزارها تکی داشته و تعداد زیادی واسطه وجود دارد، استفاده از FTA بر FMECA ترجیح داده می‌شود. برعکس، FMECA اطلاعات بیش‌تری برای ارزیابی سیستم دراختیار قرار می‌دهد، روابط علت و اثر را در سیستم تبیین می‌کند و محل‌های پرهزینه (پرریسک) را علامت‌گذاری می‌کند.

۱۲-۴-۳- تحلیل تنش- مقاومت

یکی از موضوعات مورد توجه در طراحی برای قابلیت اطمینان سیستم، خصوصیات تنش و مقاومت اجزای سیستم است. اجزا طراحی و تولید می‌شوند تا به روش مشخص تحت شرایط اسمی عمل کنند. اگر تنش‌های بیش از حد به خاطر بارهای الکتریکی، دما، ارتعاش، شوک، رطوبت و غیره وارد شود، آنگاه خرابی‌های غیرمترقبه‌ای اتفاق می‌افتد و قابلیت اطمینان سیستم پایین‌تر از مقدار پیش‌بینی شده می‌شود. در هر رخدادی، شرایط تنش‌های بیش از حد منجر به کاهش قابلیت اطمینان شده و طراحی برای شرایط تحت تنش بالا می‌تواند طراحی را پرهزینه کند؛ یعنی انجام کارهایی بیش از ضرورت واقعی برای سیستم.

یک تحلیل تنش- مقاومت اغلب برای ارزیابی احتمال شناسایی یک وضعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن مقدار تنش بسیار بیش‌تر (یا مقاومت بسیار کم‌تر) از مقدار اسمی آن باشد. چنین تحلیل با پیروی از گام‌های زیر اجرا می‌شود:

۱. برای قطعات انتخاب شده، تنش‌های اسمی را به صورت تابعی از بارها، دما، ارتعاش، شوک، خصوصیات فیزیکی و زمان تعیین کنید.

۲. فاکتورهای اثرگذار بر بیشینه تنش را مانند فاکتورهای مرکز تنش، فاکتورهای بار ایستا و پویا، تنش‌های حاصل از تولید و کارهای حرارتی، فاکتورهای تنش محیطی و غیره شناسایی کنید.

۳. اجزای تنشی بحرانی را شناسایی کرده و میانگین تنش‌های بحرانی را محاسبه کنید (به‌طور مثال حداکثر تنش برشی و تنش کششی).

۴. توزیع‌های تنش بحرانی برای عمر مفید مشخص شده را تعیین کنید. پارامترهای توزیع را تحلیل کرده و حاشیه ایمنی جزء را شناسایی کنید. توزیع‌های کاربردی شامل نرمال، پواسون، گاما، ویبول، لاگنرمال یا ترکیبی از آن‌ها است.

۵. برای آن اجزایی که بحرانی هستند و در جایی که حاشیه‌های ایمنی طراحی کافی نیست، باید فعالیت‌های اصلاحی آغاز شوند. این موضوع می‌تواند شامل جایگزینی قطعات اجزا یا طراحی مجدد عنصر سیستم مدنظر باشد.

مدل‌های قابلیت اطمینان برای تسهیل فرایند تحلیل تنش– مقاومت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (به شکل ۱۲–۱۲مراجعه کنید). بر پایه چنین تحلیلی، نرخ‌های خرابی قطعه (λ)تصحیح می‌شوند تا آثار تنش‌های مربوط به قطعات را شامل شوند.

۱۲-۴-۴- پیش‌بینی قابلیت اطمینان

با فراهم شدن داده‌های مهندسی، پیش‌بینی قابلیت اطمینان به‌عنوان یک بازبینی طراحی در مورد نیازمندی‌های سیستم و فاکتورهای مشخص شده و از طریق تخصیص انجام می‌شود. مقادیر پیش‌بینی شده R، MTBF، و/یا MTTF با نیازمندی‌ها مقایسه شده، حوزه‌های عدم تطابق ارزیابی شده و طراحی بهبود می‌یابد.

پیش‌بینی‌ها در زمان‌های مختلفی از فرایند توسعه سیستم انجام شده و با توجه به نوع داده‌های در دسترس می‌توانند تا حدودی متغیر باشند. تکنیک‌های پایه‌ای برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان در ادامه به‌صورت خلاصه ارائه شده است:

۱. *پیش‌بینی می‌تواند بر اساس تحلیل تشابه تجهیز باشد.* این تکنیک تنها زمانی که عدم وجود داده، استفاده از تکنیک‌های پیچیده‌تر را ناممکن می‌سازد، به‌کار می‌رود. پیش‌بینی‌ها از مقادیر MTBF برای تجهیزات مشابه با درجات مشابه پیچیدگی که وظایف مشابهی را انجام می‌دهند و خصوصیات مشابهی در مورد قابلیت اطمینان دارند، استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان یک تجهیز جدید برابر با شبیه‌ترین تجهیز از نظر عملکرد و پیچیدگی در نظر گرفته می‌شود. نوع و کیفیت قطعه، تنش‌ها و فاکتورهای محیطی در نظر گرفته نشده است. این تکنیک به‌راحتی قابل استفاده است اما دقت پایینی دارد.

۲. *پیش‌بینی می‌تواند بر پایه یک تخمین از گروه‌های عناصر فعال* (AEG) *باشد.*AEG کوچک‌ترین بلوک ساختمانی وظیفه‌ایست که انرژی را کنترل یا تبدیل می‌کند. یک AEG شامل یک عنصر فعال (پمپ،ترانزیستور، ماشین و غیره) و تعدادی عناصر غیرفعال است. با تخمین تعداد AEGها و استفاده از فاکتورهای پیچیدگی، MTBF قابل پیش‌بینی خواهد بود.

۳. *پیش‌بینی می‌تواند با شمارش قطعات یک تجهیز صورت گیرد.* روش‌های متعددی وجود دارند که به خاطر منبع اطلاعاتی، تعداد دسته‌های گوناگون قطعات از حیث نوع و سطوح تنش در نظر گرفته شده تا حدودی متفاوت هستند. اساسا، یک فهرست قطعات طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد و قطعات به دسته‌های مشخصی طبقه‌بندی

می‌شوند. نرخ‌های خرابی تخصیص داده شده و ترکیب می‌شوند تا در سطح سیستم یک MTBF پیش‌بینی شده را فراهم کنند. جدول ۱۲-۲ نمایانگر این رویکرد می‌تواند باشد.

۴. *پیش‌بینی می‌تواند بر پایه تحلیل تنش (که قبلا بحث شد) انجام شود.* هنگامی طراحی تفصیلی تجهیز تا حدی تکمیل شده باشد، پیش‌بینی قابلیت اطمینان پیچیده‌تر می‌شود. انواع و تعداد قطعات تعیین شده‌اند، نرخ‌های خرابی اعمال شده‌اند و نسبت‌ها تنش و فاکتورهای محیطی در نظرگرفته شده‌اند. آثار تعاملی بین اجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این رویکرد خاص بوده و تاحدودی با دیگر طراحی‌های سیستم/محصول متفاوت است. روش‌های رایانه‌ای برای تسهیل فرایند پیش‌بینی استفاده می‌شود.

جدول ۱۲- ۲- خلاصه داده‌های پیش‌بینی قابلیت اطمینان

قطعه	λ/قطعه (ساعت۱۰۰۰/٪)	تعداد قطعات	(λ/قطعه) (تعداد)
A	0.161	10	1.610
B	0.102	130	13.260
C	0.021	72	1.512
D	0.084	91	7.644
E	0.452	53	0.573
F	0.191	3	0.440
G	0.022	20	
			$\sum 48.995\%$

نرخ خرابی = 48.995%/1000 ساعت

$$\text{MTBF} = \frac{1000}{0.48995} = 2041 \text{ ساعت}$$

مرجع: MIL-HDBK-217. Military handnook, Reliability and Failure Rate Data for Electronic Equipment (Washington DC: Department of Defense)

شکل‌های استخراج شده از طریق پیش‌بینی قابلیت اطمینان یک سری داده ورودی پیش‌بینی قابلیت اطمینان، تحلیل قابلیت پشتیبانی و تعیین نیازمندی‌های پشتیبانی (تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، قطعات یدکی و تعمیراتی، غیره) را تشکیل می‌دهد. قابلیت اطمینان اساسا فراوانی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی را نشان می‌دهد و تعداد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات طی چرخه‌ی عمر پیش‌بینی می‌شود؛ در نتیجه، نتایج پیش‌بینی قابلیت اطمینان باید تا حد ممکن دقیق باشد.

۱۲-۴-۵- تحلیل افزایش قابلیت اطمینان

با مراجعه به شکل ۵-۹ (قسمت ۵-۸)، نتایج پیش‌بینی قابلیت اطمینان که برای بازبینی طراحی مفهومی فراهم شده است، مشخص می‌کند که MTBF سیستم تقریبا ۴۳۰ ساعت است، درحالی‌که نیازمندی سیستم ۴۸۵ ساعت است (حداقل). سوال این است که *چه تغییراتی در طراحی سیستم باید در نظر گرفته شود تا افزایش لازم برای برآورده کردن نیازمندی تعیین شده یعنی ۴۸۵ ساعت صورت پذیرد؟*

در پاسخ، یک برنامه فرمول شده باید پیاده‌سازی شود به‌طوری که افزایش قابلیت اطمینان برای تصحیح این عدم کارایی در زودترین زمان ممکن در فرایند طراحی اصلاح شود، نه آن‌که تا فاز آزمایش و ارزیابی سیستم نهایی صبر کرده و سپس کشف شود که نیازمندی‌ها برآورده نشده است. از نتایج پیش‌بینی قابلیت اطمینان، طراح می‌تواند آن عناصر از سیستم را شناسایی کند که نرخ خرابی نسبتا بالایی داشته و به‌نوبه‌ی خود باعث کاهش MTBF شده است. کاربرد FMECA می‌تواند در تعیین روابط علل اثر و شناسایی جنبه‌های خاصی از طراحی که قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهند، یاری رسان باشد. با معلوم بودن نقاط ضعف، یک تغییر پیشنهادی در طراحی پیرو یک رویه بحث شده در قسمت ۵-۹ (شکل ۵-۱۱) معرفی می‌شود. در ادامه، بار

دیگر قابلیت اطمینان پیش‌بینی می‌شود تا اثر کلی تغییر بر MTBF سیستم مشخص شود. این فرایند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که حداقل نیازمندی MTBF یعنی ۴۸۵ ساعت برآورده شود.

با مراجعه به شکل، یک تغییر طراحی طی فاز طراحی اولیه (اصلاحیه ۱) پیاده‌سازی شده و MTBF پیش‌بینی شده تقریبا برابربا ۴۴۵ ساعت می‌گردد؛ تغییر دوم درطراحی (اصلاحیه ۲) آغاز شده و اندکی افزایش (با یک MTBF بیش از ۴۵۰ ساعت) حاصل می‌شود؛ و پس از دو تغییر دیگر در طراحی (اصلاحیه ۳ و ۴) طی فاز طراحی و توسعه تفصیلی ایجاد شده و نیازمندی MTBF پیش‌بینی شده یعنی ۴۸۵ ساعت برآورده می‌شود.

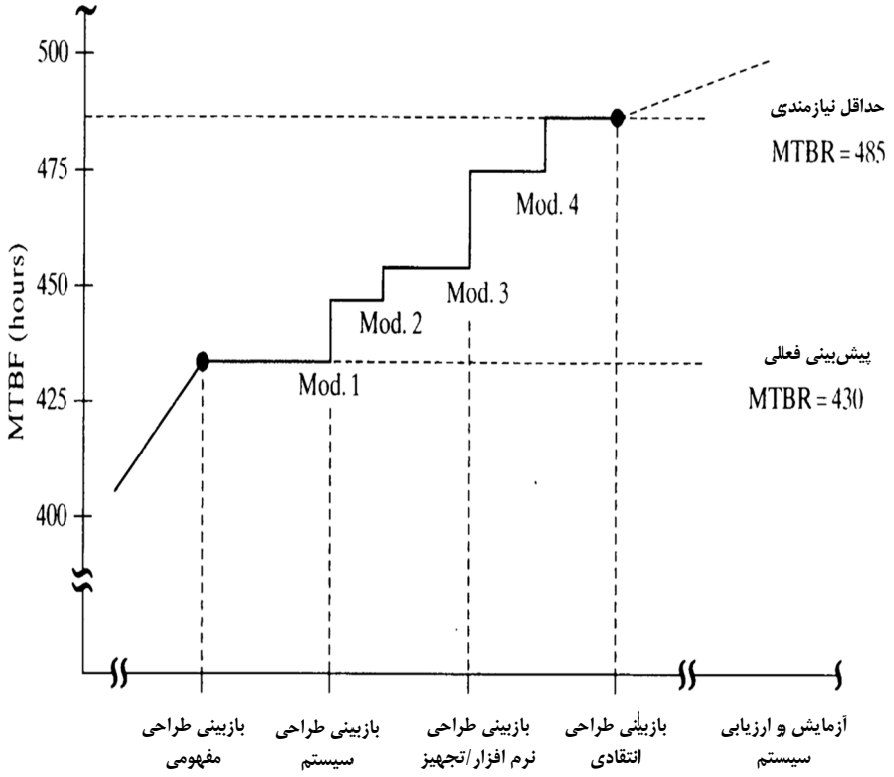
در حالی‌که برنامه افزایش قابلیت اطمینان که در شکل ۱۲-۲۳ نشان داده شده است بیش‌تر یک رویکرد پرهزینه شامل ۴ نوع مختلف در طراحی می‌شود (یعنی ECPها و پیاده‌سازی آن‌ها، شکل ۵-۱۱)، اما این امکان وجود دارد که تعدادی از حوزه‌های مختلف طراحی که MTBF را کاهش می‌دهد شناسایی شده و تغییرات لازم یک‌جا اعمال شود. در هر رخدادی، درجه اطمینان از برآورده شدن نیازمندی‌های قابلیت اطمینان سیستم باید به‌دست آمده و حوزه‌های مورد ظن در ارتباط با عدم کارایی باید در اولین زمان ممکن در طی فرایند کلی طراحی اصلاح شود.

۱۲-۵- آزمایش و ارزیابی قابلیت اطمینان

آزمایش قابلیت اطمینان به‌عنوان بخشی از آزمایش و ارزیابی سیستم که در فصل ۶ بحث شد، انجام می‌شود. مخصوصا، آزمایش قابلیت اطمینان به‌عنوان بخشی از آزمایش‌های نوع ۳ و ۴ که در قسمت ۶-۲ تشریح شد صورت می‌گیرد.

همان‌طور که برای هر نوع از آزمایش نیاز است، یک فاز برنامه‌ریزی، یک فاز آماده‌سازی آزمایش، آزمایش و ارزیابی، فاز جمع‌آوری و تحلیل داده، و گزارش‌دهی وجود دارد. نیازمندی‌های

عمومی برای هر یک از این موارد در فصل ۶ بحث شد. تنها آن رویه‌هایی که برای روش‌های آزمایش قابلیت اطمینان به‌کار می‌رود در این فصل پوشش داده شده است.



شکل ۱۲- ۲۳- برنامه افزایش قابلیت اطمینان.

هدف نهایی آزمایش قابلیت اطمینان این است که آیا سیستم (یا محصول) تحت آزمایش نیازمندی‌های مشخص شده MTBF را برآورده می‌کند یا نه. برای انجام این کار، سیستم به روشی از قبل تشریح شده برای یک دوره‌ی زمانی تعیین شده کار می‌کند و خرابی‌ها طی آزمایش

ثبت و ارزیابی می‌شوند. سیستم زمانی تایید می‌شود که یک حداقل عمر قابل قبول از خود نشان دهد.

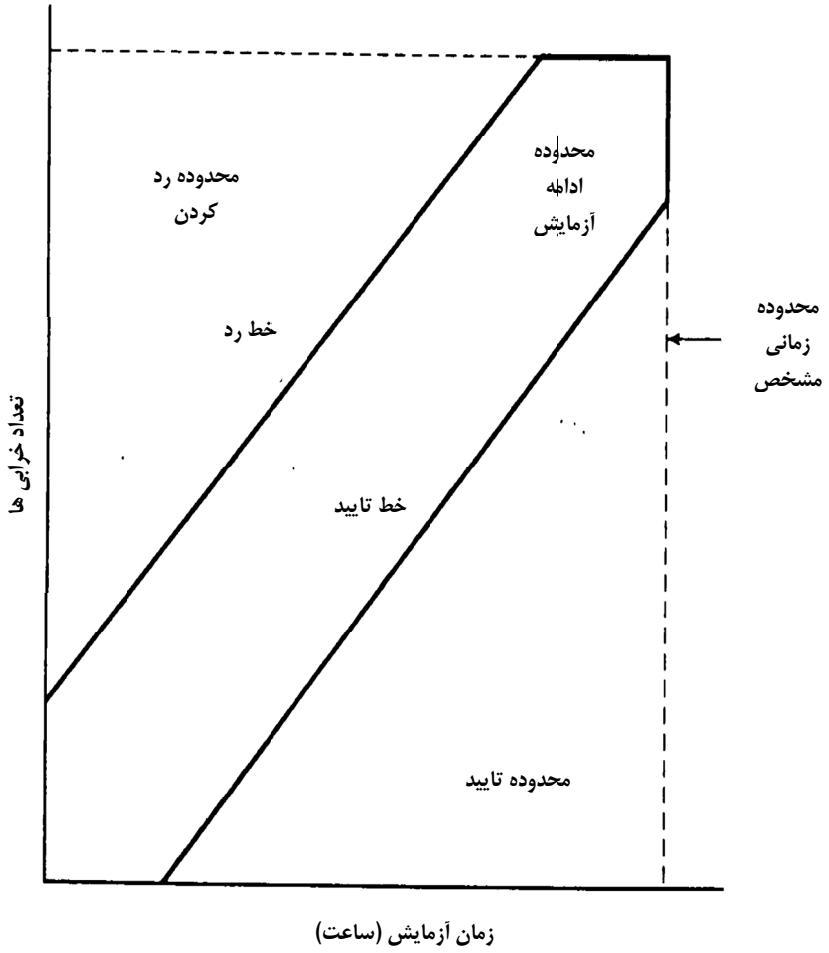
تعدادی روش آزمایش و رویه آماری وجود دارد که برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان سیستم طراحی شده است. بسیاری از این روش‌ها از توزیع نمایی استفاده می‌کنند. معیار قبول شدن سیستم (یا رد آن) بر پایه فرضیات آماری شامل اندازه نمونه آزمایش، فاکتورهای ریسک مصرف‌کننده– تولیدکننده، حدود اطمینان داده‌های آزمایش و غیره می‌شود. این فرضیات از یک مورد به مورد دیگر متغیر است و به نوع سیستم، ماموریتی که سیستم باید انجام دهد و این‌که آیا تکنیک‌های طراحی جدید در توسعه سیستم استفاده شده‌اند و منعکس کننده حوزه‌های پرریسک هستند یا نه بستگی دارند. از این نقطه‌نظر، غیرممکن است که بتوان همه اشکال آزمایش قابلیت اطمینان را که در این فصل وجود دارد، پوشش داد. با این حال، برای فراهم آوردن یک دید مناسب از رویکردهای استفاده شده، به‌طور خلاصه موضوعات آزمایش صلاحیت قابلیت اطمینان ترتیبی، آزمایش تایید قابلیت اطمینان، و آزمایش عمر به‌طور خلاصه پوشش داده می‌شود.

۱۲-۵-۱- آزمایش صلاحیت قابلیت اطمینان ترتیبی

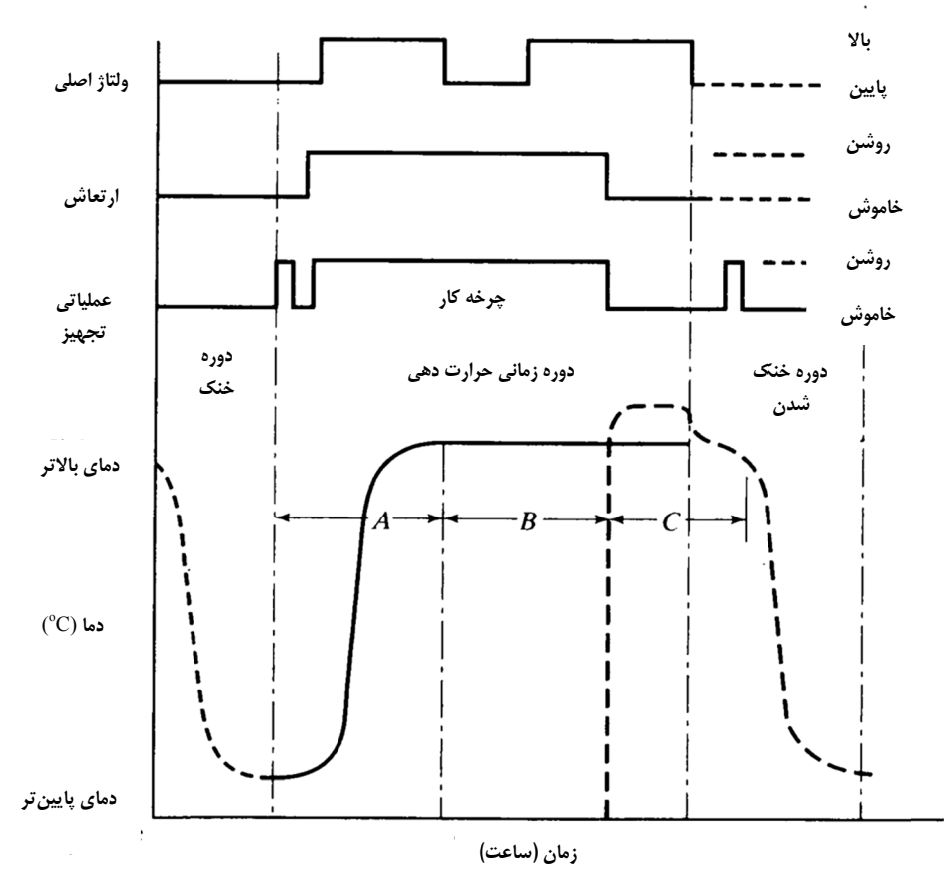
آزمایش صلاحیت قابلیت اطمینان، یک ارزیابی از پیشرفت توسعه‌ی سیستم و هم‌چنین تضمینی از برآورده شدن نیازمندی‌های مشخص شده را پیش از حرکت به فاز بعدی (یعنی فاز تولید یا سخت در چرخه‌ی عمر) فراهم می‌آورد. در ابتدا یک MTBF برای سیستم پیرو فرایند تخصیص و توسعه معیارهای طراحی استقرار می‌یابد. طراحی سیستم انجام شده و تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان صورت می‌گیرند تا به‌صورتی تحلیلی ساختار طراحی در ارتباط با تطابق با نیازمندی‌های سیستم ارزیابی شود. اگر پیش‌بینی‌ها، تطابق را تایید کنند، فرایند پیشروی کرده و وارد ساخت نمونه یا مدل پیش تولید، از سیستم شده و آزمایش صلاحیت آغاز می‌گردد.

هنگامی که یک آزمایش قابلیت اطمینان ترتیبی انجام می‌شود (که در اصل مربوط به الکترونیک، برق، الکترومکانیک و سیستم‌ها/محصولات مرتبط با آن‌ها می‌شود)، سه تصمیم ممکن وجود دارد: (۱) قبول کردن سیستم، (۲) رد کردن سیستم، و(۳) ادامه آزمایش. شکل ۱۲-۲۴ یک برنامه آزمایش ترتیبی رایج را نشان می‌دهد. سیستم مورد آزمایش به روشی کار می‌کند که منعکس‌کننده‌ی بهره‌برداری واقعی مشتری در یک محیط واقعی باشد. هدف شبیه‌سازی (تا جای ممکن) یک پروفایل ماموریت است یا حداقل قرار دادن سیستم مورد آزمایش در شرایط مشابه با آن‌چه مشتری از آن بهره‌برداری می‌کند. دست‌یابی به این هدف عموما شامل تسهیلات آزمایش محیطی و انجام عملیات سیستم یا تجهیز از طریق چرخه‌های کار مختلف و شرایط محیطی متنوع می‌شود. سیستم از طریق یک سری از این چرخه‌های کاری برای یک دوره‌ی مشخص زمانی عملیات خود را انجام می‌دهد.

با مراجعه به برنامه‌ی آزمایش ترتیبی در شکل ۱۲-۲۴، ساعات عملیاتی بودن سیستم در راستای محور افقی و خرابی‌ها در راستای قائم ترسیم شده است. اگر ساعات عملیاتی کافی بدون تعداد خرابی زیاد به‌دست آید، سیستم تایید شده و آزمایش متوقف می‌شود. برعکس، اگر تعداد قابل توجهی در اوایل عملیات آزمایشی اتفاق افتد، سیستم رد شده و غیرقابل قبول خواهد بود. در وضعیتی که نتایج بین این دو حالت باشد آزمایش را ادامه می‌دهیم تا به یکی از این دو حالت برسیم. در حقیقت، برنامه آزمایش ترتیبی اجازه تصمیم‌گیری در مراحل اولیه طراحی را فراهم می‌کند. سیستم‌های با قابلیت اطمینان بالا با مقدار کم‌تری آزمایش قبول می‌شوند. اگر سیستم غیرقابل اطمینان باشد نیز در همان زمان‌های ابتدایی آزمایش به سادگی این موضوع را نشان می‌دهد. از این حیث، آزمایش ترتیبی بسیار مفید است. برعکس، اگر قابلیت اطمینان سیستم حاشیه‌ای باشد، مقدار زمان موردنیاز زیاد خواهد بود و آزمایش پرهزینه می‌شود. یک نمونه واقعی از آزمایش ترتیبی بعدا ارائه خواهد شد.



شکل ۱۲- ۲۴- برنامه آزمایش ترتیبی.



$A =$ زمان برای اینکه تسهیل به پایداری در دمای بالا برسد

$B =$ مدت زمان عملیات تجهیز در دمای بالا

$C =$ عملیات غوطه وری داغ و بررسی راه اندازی داغ

شکل ۱۲- ۲۵- نمونه‌ای از چرخه آزمایش محیطی. *منبع:* MIL-STD-781, Reliability Design Qualification and Production Acceptance Tests: Exponential Distribution (Washington, DC: Department of Defense).

برنامه‌های آزمایش ترتیبی به‌شدت تحت ریسک‌هایی هستند که هم تولیدکننده و هم مشتری حاضر به قبول کردن آن‌ها در تصمیم‌های گرفته شده از نتایج آزمایش می‌باشند. این ریسک‌ها عبارت‌اند از:

۱. ***ریسک تولیدکننده (α)***. احتمال رد کردن یک سیستم زمانی که MTBF اندازه‌گیری شده برابر یا بهتر از MTBF تعیین شده باشد. به عبارت دیگر، این ریسک به احتمال رد کردن سیستمی مربوط می‌شود که باید تایید می‌شد که این موضوع ریسک تولیدکننده سیستم را به همراه دارد (خطای نوع یک نیز گفته می‌شود).

۲. ***ریسک مشتری یا مصرف کننده (β)***. احتمال قبول کردن یک سیستم وقتی MTBF اندازه‌گیری شده کم‌تر از MTBF تعیین شده باشد. این موضوع به احتمال قبول کردن سیستمی مربوط می‌شود که باید رد می‌شد که این موضوع ریسک کاربر سیستم را به همراه دارد (خطای نوع دو نیز گفته می‌شود).

احتمال یک تصمیم‌گیری اشتباه بر پایه نتایج آزمایش باید به روشی مشابه آزمایش فرضیه مورد بررسی قرار گیرد. یک فرض در نظر گرفته شده و آزمایش برای حمایت (یا مخالفت) با این فرض اجرا می‌شود. یک فرض صفر (H_0) قرار داده شده که یک عبارت در مورد یک پارامتر است به‌طور مثال "MTBF واقعی برابر با ۱۰۰ است". فرض جایگزین (H_1) این است که "MTBF برابر ۱۰۰ نباشد". هنگام آزمایش یک آیتم (که نماینده یک نمونه از کل جمعیت است)، سوال این است که آیا فرض H_0 باید قبول شود یا نه. نتیجه‌ی مطلوب، قبول فرض صفر است و رد کردن آن هنگامی است که فرض غلط است. رابطه‌ی ریسک‌ها در یک آزمایش نمونه در جدول ۱۲-۳ نشان داده شده است.

در انتخاب یک برنامه آزمایش ترتیبی، لازم است که دو مقدار از MTBF مشخص شود:

۱. MTBF تعیین شده که نمایانگر نیازمندی سیستم است (θ_0).

۲. MTBF کمینه که بر پایه نتایج آزمایش قابل قبول در نظر گرفته می‌شود (θ_1).

با داشتن θ_0 و θ_1، باید در مورد مقادیر ریسک تولیدکننده (α) و ریسک مشتری (β) تصمیم‌گیری شود. بیش‌تر برنامه‌های آزمایش مورد استفاده کنونی مقادیر ریسک بین ۵٪ تا ۲۵٪ را قبول می‌کنند. برای مثال، یک آزمایش که در آن $\alpha=0.10$ است بدین معنا است که ۱۰ مورد از ۱۰۰ مورد آزمایش رد می‌شود در حالی که باید تایید می‌شدند. مقادیر ریسک عموما در فاز برنامه‌ریزی آزمایش مورد تبادل نظر قرار می‌گیرند.

با مراجعه به شکل ۱۲-۲۴، طراحی برنامه آزمایش ترتیبی بر پایه مقادیر $\theta_0, \theta_1, \alpha, \beta$ قرار دارد. برای نمونه، شیب خط تایید بر اساس عبارت زیر تعیین می‌شود

$$t_1 = \frac{\ln(\theta_0/\theta_1)}{1/\theta_1 - 1/\theta_0}(r) - \frac{\ln[\beta/(1-\alpha)]}{1/\theta_1 - 1/\theta_0} \qquad (۱۹-۱۲)$$

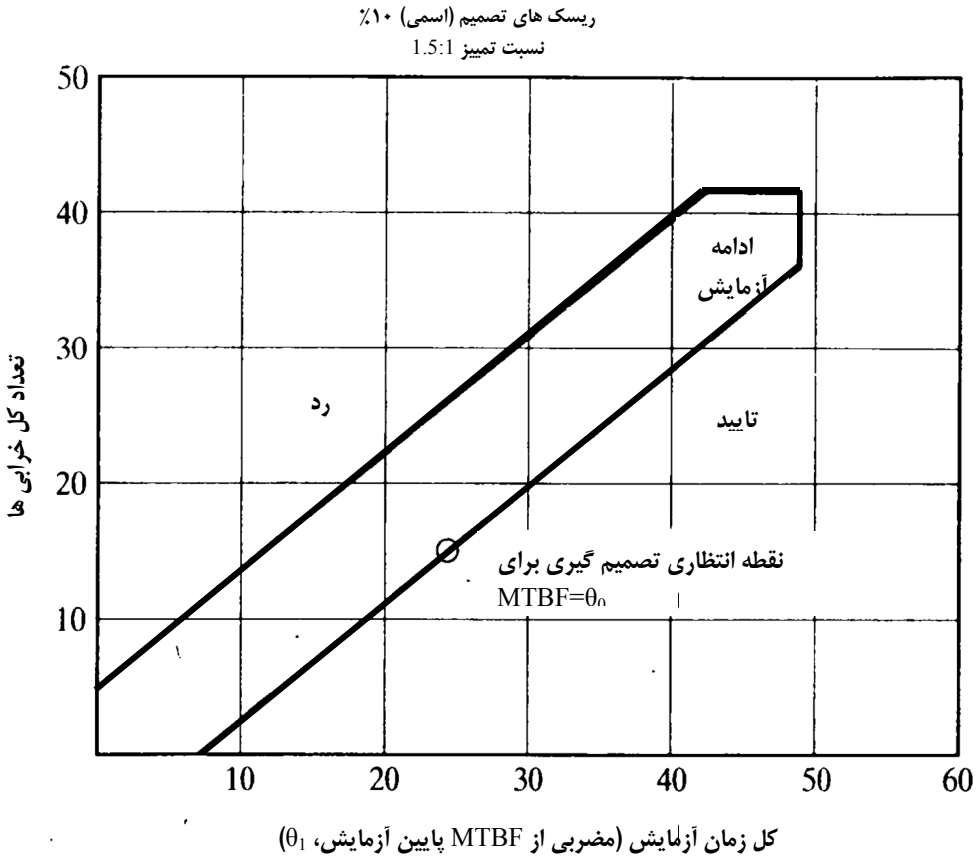
که در آن r تعداد خرابی‌هاست (خط تایید برای مقادیر فرض شده r ترسیم می‌شود). نسبت θ_0/θ_1 به‌عنوان نسبت تمایز شناخته می‌شود و یک پارامتر استاندارد آزمایش است. شیب خط رد بر پایه معادله ۱۲-۲۰ محاسبه می‌شود:

$$t_2 = \frac{\ln(\theta_0/\theta_1)}{1/\theta_1 - 1/\theta_0}(r) - \frac{\ln[(1-\beta)/\alpha]}{1/\theta_1 - 1/\theta_0} \qquad (۲۰-۱۲)$$

تعیین حد زمانی در شکل ۱۲-۲۴ بر اساس ضرایب θ_1 مشخص می‌شود.

جدول ۱۲-۳- ریسک‌ها در آزمایش نمونه

درستی فرضیه‌ها	قبول کردن H_0 و رد H_1 (MTBF=100)	در کردن H_0 و قبول کردن H_1 (MTBF≠100)
H_0 حقیقت دارد (MTBF=100)	احتمال بالا $1-\alpha$ (یعنی ۰,۹۰)	احتمال اندک خطا، α (یعنی ۰,۱۰)
H_0 حقیقت ندارد H_1 حقیقت دارد (MTBF≠100)	احتمال اندک خطا، β (یعنی ۰,۱۰)	احتمال بالا $1-\beta$ (یعنی ۰,۹۰)



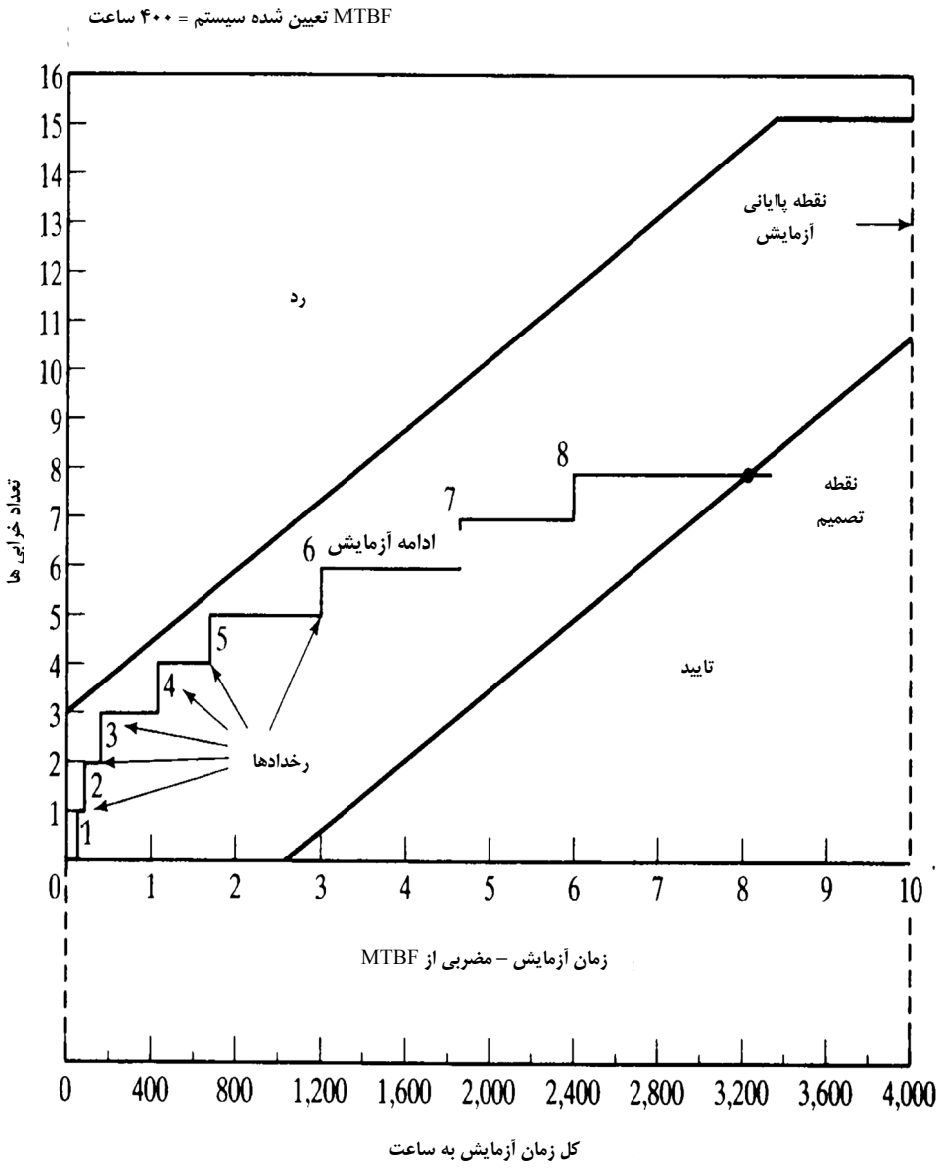
کل زمان آزمایش			کل زمان آزمایش		
تایید (مساوی یا بیش‌تر)	در (مساوی یا کم‌تر)	تعداد خرابی‌ها	تایید (مساوی یا بیش‌تر)	در (مساوی یا کم‌تر)	تعداد خرابی‌ها
۳۲,۱۵	۱۸,۹۲	۲۱	۶,۶۰	–	۰
۳۳,۳۶	۲۰,۱۳	۲۲	۷,۸۲	–	۱
۳۴,۵۸	۲۱,۳۵	۲۳	۹,۰۳	–	۲
۳۵,۷۹	۲۲,۵۶	۲۴	۱۰,۲۵	–	۳
۳۷,۰۱	۲۳,۷۸	۲۵	۱۱,۴۶	–	۴
۳۸,۲۲	۲۴,۹۹	۲۶	۱۲,۶۸	–	۵
۳۹,۴۴	۲۶,۲۱	۲۷	۱۳,۹۱	۰,۶۸	۶
۴۰,۶۷	۲۷,۴۴	۲۸	۱۵,۱۲	۱,۸۹	۷
۴۱,۸۸	۲۸,۶۵	۲۹	۱۶,۳۴	۳,۱۱	۸
۴۳,۱۰	۲۹,۸۶	۳۰	۱۷,۵۵	۴,۳۲	۹
۴۴,۳۱	۳۱,۰۸	۳۱	۱۸,۷۷	۵,۵۴	۱۰
۴۵,۵۳	۳۲,۳۰	۳۲	۱۹,۹۸	۶,۷۵	۱۱
۴۶,۷۴	۳۳,۵۱	۳۳	۲۱,۲۰	۷,۹۷	۱۲
۴۷,۹۶	۳۴,۷۳	۳۴	۲۲,۴۱	۹,۱۸	۱۳
۴۶,۱۷	۳۵,۹۴	۳۵	۲۳,۶۳	۱۰,۴۰	۱۴
۴۹,۵۰	۳۷,۱۶	۳۶	۲۴,۸۴	۱۱,۶۱	۱۵
۴۹,۵۰	۳۸,۳۷	۳۷	۲۶,۰۶	۱۲,۸۳	۱۶
۴۹,۵۰	۳۹,۵۹	۳۸	۲۷,۲۹	۱۴,۰۶	۱۷

کل زمان آزمایش			کل زمان آزمایش		
تایید (مساوی یا بیش‌تر)	در (مساوی یا کم‌تر)	تعداد خرابی‌ها	تایید (مساوی یا بیش‌تر)	در (مساوی یا کم‌تر)	تعداد خرابی‌ها
۴۹,۵۰	۴۰,۸۲	۳۹	۲۸,۵۰	۱۵,۲۷	۱۸
۴۹,۵۰	۴۲,۰۳	۴۰	۲۹,۷۲	۱۶,۴۹	۱۹
–	۴۹,۵۰	۴۱	۳۰,۹۳	۱۷,۷۰	۲۰

* کل زمان آزمایش برابر باکل ساعات تجهیز است و به‌صورت مضربی از حد پایین MTBF آزمایش بیان می‌شود

شکل ۱۲- ۲۶- معیارهای تایید-رد برای برنامه آزمایش نمونه. *منبع:* MIL-STD-781, Reliability Design Qualification and Production Acceptance Test: Exponential Distribution (Washington, DC: Department of Defense).

همان‌طور که مشخص شده است، تعدادی از برنامه‌های آزمایش ترتیبی مختلف وجود دارد که برای آزمایش قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک مثال در شکل ۱۲-۲۶ نشان داده شده است. ریسک‌های تصمیم‌گیری α و β هر کدام ۱۰٪ بوده و نسبت تمایز به‌صورت 1.5:1 مقرر شده و معیارهای تایید-رد تعیین شده است.



شکل ۱۲-۲۷- برنامه آزمایش قابلیت اطمینان سیستم XYZ.

یک رویکرد دیگر در شکل ۱۲-۲۷ نشان داده شده است که تجربه واقعی از آزمایش یک سیستم مشخص (که XYZ نامیده شده است) را نمایش می‌دهد. با مراجعه به شکل، MTBF تعیین شده برای سیستم ۴۰۰ ساعت است و حداکثر زمان آزمایش برای برنامه آزمایش ترتیبی ۴۰۰۰ ساعت است، ۱۰ برابر MTBF تعیین شده. بهترین رویکرد شامل انتخاب تعداد تجهیزات مقرر، انجام عملیات سیستم تحت شرایط عملکردی مشخص در یک دوره‌ی زمانی بسط داده شده و پایش تجهیز برای خرابی است. خرابی‌ها به‌عنوان رخدادهای مشاهده شده، از طریق فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاح می‌شوند و تجهیز برای ادامه آزمایش به حالت کاملا عملیاتی در می‌آید. یک تحلیل از هر رخداد باید علت خرابی را تعیین کند و روندها را مورد بررسی قرار دهد، اگر بیش از یک خرابی برای یک علت قابل رهگیری باشد. این موضوع الگوی خرابی است و در بسیاری از موارد، تغییری باید آغاز گردد تا از خرابی‌های مشابه در آینده جلوگیری شود.

با مراجعه به شکل ۱۲-۲۷، سیستم پس از ۳۲۰۰ ساعت آزمایش تایید می‌شود و هشت رخداد اتفاق می‌افتد. بنابراین، نیازمندی MTBF برآورده شده است. در این نمونه، اندازه‌ی آزمایش ۶ تجهیز است. اگر یک مدل برای آزمایش با حداقل زمان آزمایش ۴۰۰۰ ساعت موردنیاز باشد، طول برنامه آزمایش (با فرض آزمایش پیوسته) مشخصا بیش از شش ماه خواهد بود. این موضوع در قالب زمان‌بندی کلی برنامه و تحویل تجهیز واجد شرایط شدنی نیست. برعکس، استفاده از دو یا چند مدل زمان برنامه را کاهش می‌دهد. برخی اوقات پیاده‌سازی شرایط آزمایش تسریع شده تعداد خرابی‌ها را افزایش می‌دهد. این آثار ارزیابی شده و یک تعادل بهینه بین اندازه کوچک نمونه و زمان آزمایش بیش‌تر و اندازه نمونه بزرگ و زمان آزمایش کوتاه‌تر باید به‌دست آید.

۱۲-۵-۲- آزمایش تایید قابلیت اطمینان

همان‌طور که مشخص گردید، آزمایش قابلیت اطمینان می‌تواند به‌عنوان بخشی از آزمایش تایید صلاحیت پیش از آغاز تولید انجام گردد (که قبلا بحث شد) و طی تولید انبوه بر پایه

نمونه‌گیری انجام گیرد. برای تعیین آثار فرایند تولید بر قابلیت سیستم، این امکان وجود دارد که تعدادی نمونه از تجهیزات یا محصولات از هر بسته تولیدی انتخاب شده و به روشی که در بالا توضیح داده شد آزمایش شوند. نمونه می‌تواند بر پایه درصدی از کل تجهیزات در کل دوره تولید، یا تعدادی مشخص از تجهیزات در دوره‌های زمانی تقویمی انتخاب شوند (به‌طور مثال دو تجهیز در هر ماه طی فاز تولید).

در هر رخدادی، تجهیزات انتخاب شده، آزمایش می‌شوند و یک MTBF ارزیابی شده از داده‌های آزمایش به‌دست می‌آید. این مقدار با MTBF تعیین شده و مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش تایید صلاحیت قبلی مقایسه می‌گردد. روندهای افزایشی MTBF (یا روندهای منفی) با ترسیم مقادیر به‌دست آمده و با پیشرفت فعالیت آزمایش تعیین می‌شوند.

۱۲-۵-۳- آزمایش عمر قابلیت اطمینان

دو شکل اصلی از آزمایش عمر در عمل وجود دارد: (۱) آزمایش‌های عمر بر پایه زمان ثابت آزمایش، و (۲) آزمایش‌های عمر بر پایه رخداد یک تعداد خرابی از پیش تعیین شده. اولین رویکرد در آزمایش عمر (بر پایه زمان) فرض می‌کند که یک زمان آزمایش ثابت محاسبه شده، برنامه‌ریزی می‌شود و تعدادی خرابی مشخص از پیش معین می‌گردد. اگر تعداد خرابی‌های واقعی پس از پایان زمان برنامه‌ریزی شده آزمایش برابر (یا کم‌تر) از تعداد خرابی از پیش تعیین شده باشد، سیستم تایید می‌شود.

در رویکرد دوم آزمایش عمر (بر پایه خرابی‌ها) فرض می‌شود که یک برنامه آزمایش، توسعه یافته است که در آن تعدادی از خرابی‌های پیش تعیین شده و مدت زمان محاسبه شده وابسته به نرخ خرابی انتظاری سیستم مشخص شده‌اند. آزمایش تا زمانی که تعداد خرابی‌های تعیین شده اتفاق افتند، ادامه می‌یابد. اگر زمان آزمایش برابر با (یا بیش‌تر از) زمان محاسبه شده باشد سیستم

تایید می‌شود. آزمایش عمر قابلیت اطمینان اغلب در سطح جزئیات تفصیلی و هنگامی که یک آیتم معلوم برای مشارکت در طراحی ارزیابی می‌شود، انجام می‌گیرد.

۱۲-۵-۴- ارزیابی قابلیت اطمینان عملیاتی

تا این‌جا، شاخص قابلیت اطمینان بر پایه ترکیبی از مطالعات تحلیلی، پیش‌بینی‌ها و نمایش مدل‌های نمونه از عناصر مختلف سیستم (یعنی تجهیزات) قرار داشت. فرصت مشاهده سیستم در محیط واقعی سیستم امکان‌پذیر نبوده است پس از تکمیل موفقیت‌آمیز همه نیازمندی‌های قابلیت اطمینان و تایید شدن در آزمایش‌ها، گام بعدی ارزیابی واقعی قابلیت اطمینان سیستم در محیط عملیاتی کاربر است. براساس شکل ۶-۲، این کار توسط آزمایش‌های نوع ۳ و ۴ به‌عنوان بخشی از آزمایش، ارزیابی و تصدیق اعتبار کل سیستم که در قسمت ۶-۵ تشریح شد، صورت می‌گیرد.

با انجام آزمایش‌های سیستم، قابلیت جمع‌آوری، تحلیل و گزارش‌دهی داده‌ها، اطلاعات مربوط به نوع و تعداد درست آزمایش فراهم شده، این توانمندی ایجاد می‌شود که نیازمندی‌های قابلیت اطمینان تصدیق اعتبار شوند. یک گزارش تحلیل خرابی باید برای پوشش هر کدام از خرابی‌های سیستم تهیه شده و اطلاعات فراهم شده باید شامل زمان خرابی (و خصوصیات عملیاتی سیستم هنگام اتفاق افتادن خرابی)، نشانه خرابی، مدهای خرابی، آثار خرابی بر عملیات سیستم، آثار خرابی بر دیگر عناصر سیستم، عناصر خرابی بر دیگر سیستم‌ها در ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS) و علت واقعی خرابی باشد. داده‌های کافی باید جمع‌آوری گردد تا به‌خوبی تعیین گردد که چه چیزی، چه زمانی، در کجا و به چه علت اتفاق افتاده است. این موضوع منجر به تایید نیازمندی MTBF تعیین شده می‌گردد یا یک عدم کارایی که نیازمند فعالیت اصلاحی و یک اصلاح در طراحی شناسایی می‌گردد (به قسمت ۶-۶ مراجعه کنید).

۱۲-۶- خلاصه فصل

این فصل تشریح مختصری از موضوع قابلیت اطمینان را فراهم کرده و بر اهمیت آن در فرایند طراحی و توسعه مهندسی سیستم‌ها تاکید می‌کند. این فصل با تعاریف کلیدی آغاز شده و از طریق استقرار اولیه نیازمندی‌های قابلیت اطمینان برای سیستم، توسعه شاخص‌های اصلی قابلیت اطمینان، تشریح مدل‌ها و تکنیک‌های منتخب تحلیل قابلیت اطمینان، کاربر فعالیت‌های قابلیت اطمینان در چرخه‌ی عمر سیستم و تصدیق اعتبار قابلیت اطمینان در طراحی به‌وسیله‌ی یک آزمایش رسمی و فرایند ارزیابی ادامه می‌یابد. هدف، تاکید بر اهمیت قابلیت اطمینان در نیازمندی‌ها و فعالیت‌های مربوط به طراحی است که برای برآورده کردن اهداف مهندسی سیستم‌ها مهم می‌باشند.

با توجه به‌کاربردهای فعلی از نقطه‌نظر تاریخی، تاکید اصلی بر تعیین نیازمندی‌های قابلیت اطمینان برای عناصر مختلف سیستم بوده است تا بررسی نیازمندی‌های سیستم به‌عنوان یک کل. برای مثال، طی چندین سال تلاش زیادی برای تعریف و پیشرفت نیازمندی‌های قابلیت اطمینان برای تجهیزات و اخیرا برای استخراج شاخص‌های قابلیت اطمینان و نیازمندی‌ها برای نرم‌افزار و غیره صورت گرفته است. چالش کنونی پیشرفت متدولوژی برای ادغام این نیازمندی‌ها در سطح سیستم است. این موضوع عبارتست از یک چالش در ادغام نیازمندی‌های قابلیت اطمینان وابسته به انسان، تسهیلات، فرایندهای داده/اطلاعات و موارد مشابه آن. پیشرفت‌های ورای این موضوعات که در جدول ۱۲-۱ منعکس شده است (نرخ‌های خرابی ترکیبی، شامل خرابی‌های ذاتی، وابسته و ناشی از کاربر) موردنیاز است که در آن قابلیت‌های اطمینان همه عناصر یک سیستم به‌درستی تعیین شده، ادغام می‌شوند و در فرایند طراحی در نظر گرفته می‌شوند و در ساختار نهایی سیستم منعکس می‌گردند. از نقطه‌نظر مهندسی سیستم‌ها، قابلیت اطمینان همه عناصر یک سیستم باید به‌صورت یک واحد ادغام شده در نظر گرفته شود.

در نهایت، همیشه یک چالش و نیاز به جمع‌آوری داده‌های مناسب تاریخی قابلیت اطمینان (به‌طور مثال نرخ‌های خرابی قطعه، فاکتورهای فرسودگی مواد، فاکتورهای محیطی و موارد مشابه) بر پایه تجربه عملیاتی سیستم وجود دارد. پیچیدگی سیستم‌ها، همراه با الحاق فناوری‌های جدید، با سرعتی بالا در حال افزایش است و به‌دست آوردن نرخ‌های خرابی درست به‌عنوان پایه‌ای برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان یک مشکل مهم ایجاد می‌کنند. این موضوع خصوصا زمانی حقیقت پیدا می‌کند که یک سیستم در ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS) عملیات خود را انجام دهد. تکنیک‌های بحث شده در این فصل ظاهرا معتبر است، اما خروجی حاصل شده شدیدا به در دسترس بودن داده‌های ورودی مناسب بستگی دارد. در حالی‌که این مساله کماکان وجود دارد، چالش در مورد بهبودهای بعدی باقی می‌ماند. اطلاعات به روز مربوط به اشکال مختلف قابلیت اطمینان را می‌توان از وب‌سایت‌های زیر به‌دست می‌آید:

۱. نشست سالانه قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (RAMS)– http://www.rams.org .

۲. مرکز تحلیل اطلاعات قابلیت اطمینان (RIAC)–http://theRIAC.org.

۳. انجمن مهندسان قابلیت اطمینان (SRE)–http://www.sre.org.

سوالات و مسائل

۱. قابلیت اطمینان را تعریف کنید. خصوصیات اصلی آن چیست؟

۲. چرا قابلیت اطمینان در طراحی سیستم مهم است؟ چه زمانی در فرایند چرخه‌ی عمر باید مدنظر قرار گیرد؟ تا چه حد قابلیت اطمینان در طراحی سیستم مورد تاکید است و برخی از فاکتورهای حاکم بر آن کدامند؟

۳. شاخص‌های کمی قابلیت اطمینان کدامند (شاخص‌های نرم‌افزاری، سخت‌افزاری، کارکنان، تسهیلات و داده‌ها را بحث کنید)؟

۴. نرخ خرابی یک سیستم را چگونه تعریف می‌کنید؟ چه چیزهایی را باید شامل شود (و نباید شامل شود)؟ چرا؟

۵. به شکل ۱۲–۴ مراجعه کنید. تخمین/پیش‌بینی قابلیت اطمینان اغلب بر پایه کدام بخش از منحنی وان حمام انجام می‌شود؟ چه اتفاقی می‌افتد اگر سیستم خیلی زود در بخش مرگ و میر طفولیت از منحنی تحویل مشتری شود؟ چه کار باید کرد تا بتوان به بخش هموار منحنی رسید؟

۶. با مراجعه به شکل ۱۲–۵، برخی از علل ممکن برای بخش دندانه‌دار منحنی را شناسایی کنید.

۷. یک سیستم شامل چهار زیرمونتاژ است که به صورت سری به‌هم وصل می‌شوند. قابلیت اطمینان هر کدام در زیر داده شده است: A=0.98, B=0.85, C=0.90, D=0.88. قابلیت اطمینان کل سیستم را تعیین کنید.

۸. یک سیستم شامل سه زیرسیستم موازی است (فرض کنید به‌عنوان قطعه افزوده کار کند). قابلیت اطمینان هر زیرسیستم بدین صورت است: A=0.98, B=0.85,C=0.88. قابلیت اطمینان کل سیستم را تعیین کنید.

۹. با مراجعه به شکل ۱۲-۱۴، قابلیت اطمینان کل شبکه را با استفاده از مقادیر قابلیت اطمینان برای هر زیرسیستم که در زیر آمده است تعیین کنید: A= 0.95, B=0.97 C=0.92, D=0.94, E=0.90, F=0.88, G=0.98.

۱۰. نرخ خرابی (λ) یک دستگاه ۲۲ خرابی در هر میلیون ساعت است. دو قطعه آماده به‌کار به سیستم اضافه می‌شود. MTBF سیستم را تعیین کنید.

۱۱. قابلیت اطمینان یک سیستم شامل یک واحد عملکردی و یک واحد آماده به‌کار را برای یک دوره ۲۰۰ ساعته به‌دست آورید. نرخ خرابی (λ) هر واحد ۰,۰۰۳ خرابی در هر ساعت است و قابلیت اطمینان سوئیچ ۱,۰ است.

۱۲. یک سیستم شامل ۵ زیرسیستم است که مقدار MTBF برای هریک از زیرسیستم‌ها به‌صورت زیر است: A=10540, B=16220, C=9500, D=12100, E=3600 ساعت.این ۵ زیرسیستم به صورت سری به‌هم متصل هستند. احتمال بقای سیستم در یک دوره عملیاتی ۱۰۰۰ ساعته را تعیین کنید.

۱۳. ده جزء برای ۵۰۰ ساعت آزمایش شده و هر کدام تحت شرایط از پیش تعیین شده عملیات خود را انجام داده‌اند. قطعه ۱ پس از ۳۰ ساعت، قطعه ۲ پس از ۸۵ ساعت، قطعه ۳ پس از ۲۲۰ ساعت و قطعه ۴ پس از ۴۴۵ ساعت خراب شده‌اند. نرخ خرابی‌ترکیبی کلی (λ) برای سیستم را تعیین کنید.

۱۴. فرض کنید که داده‌های طراحی زیر برای یک تجهیز موجود است و این داده‌ها برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان قابل استفاده است. MTBF پیش‌بینی شده چقدر خواهد بود؟

جزء	تعداد قطعات مورد استفاده	نرخ خرابی (ساعت ۱۰۰۰٪)
A	۱۶	۰,۱۳۵
B	۷۵	۰,۱۲۱
C	۳۲	۰,۲۲۵
D	۴۴	۰,۳۲۳
E	۶۰	۰,۱۲۰
F	۱۵	۰,۱۱۸
G	۲۸	۰,۰۹۲

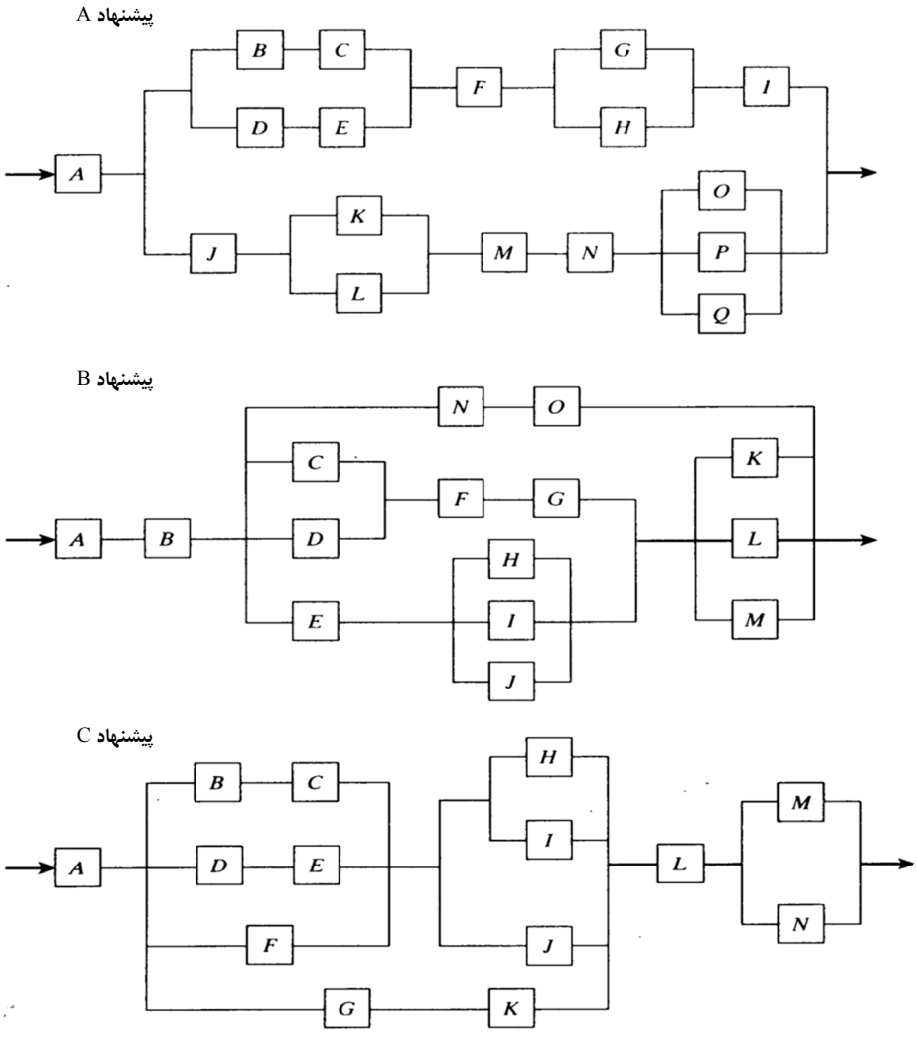
۱۵. فرض کنید که یک نیازمندی برای یک سیستم جدید برای یک عملکرد مشخص قابلیت اطمینان ۷۰٪ باشد. برای پاسخ به یک دعوت به مناقصه، سه تامین کننده ساختارهای پیشنهادی خود را ارائه داده و در شکل ۱۲–۲۸ منعکس شده است. فاکتورهای قابلیت اطمینان برای اجزا در جدول زیر آمده است.

جزء	قابلیت اطمینان	جزء	قابلیت اطمینان	جزء	قابلیت اطمینان
A	۰,۸۴	G	۰,۸۷	M	۰,۸۳
B	۰,۸۶	H	۰,۸۸	N	۰,۸۵
C	۰,۸۹	I	۰,۸۹	O	۰,۸۴
D	۰,۸۶	J	۰,۸۶	P	۰,۸۹
E	۰,۸۷	K	۰,۸۵	Q	۰,۸۹
F	۰,۸۲	L	۰,۸۶		

هزینه کل مربوط به پیشنهاد A ۵۷۰۰۰ دلار، B ۳۹۰۰۰ دلار، و C ۴۲۰۰۰ دلار است.

الف – قابلیت اطمینان سیستم برای هر یک از سه ساختار را تعیین کنید.

ب – در ارزیابی سه گزینه، معیار هزینه– اثربخشی را به‌کار برده و تعیین کنید بهترین ساختار کدام است.



شکل ۱۲– ۲۸– سه ساختار پیشنهادی.

۱۶. هنگام طراحی یک سیستم برای قابلیت اطمینان، چه خصوصیاتی (صفات) باید در ساختار نهایی در نظر گرفته شود تا سطح مطلوب قابلیت اطمینان حاصل شود؟ حداقل ۵ مورد را شناسایی کرده و تشریح کنید که هر کدام چگونه بر قابلیت اطمینان سیستم اثرگذار است.

۱۷. یک مدل قابلیت اطمینان چیست؟ یک مدل قابلیت اطمینان چگونه توسعه می‌یابد (یعنی چه گام‌هایی باید برای این کار برداشته شود)؟ چرا این مدل نیاز است؟ برخی از کاربردهای رایج یک مدل را در این زمینه تشریح کنید.

۱۸. فرایندی را تشریح کنید که باید برای شناسایی و توسعه نیازمندی‌های قابلیت اطمینان درسطح سیستم و سطوح پایین‌تر یعنی سطح زیرسیستم، سطح واحد و پایین‌تر از آن دنبال شود.

۱۹. منظور از افزونگی چیست؟ انواع افزونگی را تشریح کنید. چگونه افزونگی به قابلیت اطمینان در طراحی کمک می‌کند؟ برخی از آثار منفی افزونگی کدامند؟

۲۰. هر کدام از موارد زیر را تشریح کرده و هدف، کاربرد و اطلاعات موردنیاز آن را توضیح دهید

a. مد خرابی، آثار و تحلیل بحرانی بودن (FMECA)
b. تحلیل درخت خطا (FTA)
c. تحلیل تنش- مقاونت
d. پیش‌بینی قابلیت اطمینان
e. تحلیل افزایش قابلیت اطمینان

۲۱. یک سیستم را به دلخواه انتخاب کرده و سیستم را از نقطه‌نظر وظیفه‌ای تشریح کنید (یک نمودار بلوکی وظیفه‌ای بسازید). یک عنصر از سیستم را انتخاب کرده (یعنی محصول یا فرایند) و یک FMECA را برای آن اجرا کنید.

۲۲. فرض کنید که یک نیازمندی ۵۰۰ ساعته برای MTBF نیاز است. چه گام‌هایی باید برای بهبود قابلیت اطمینان برداشته شود تا این نیازمندی برآورده شود؟ چه تکنیک‌ها/ابزارهایی را برای تسهیل این هدف می‌تواند به‌کار برد؟

۲۳. در چه مرحله‌ای از چرخه‌ی عمرسیستم نیازمندی‌ها برای آزمایش و ارزیابی قابلیت اطمینان تعیین می‌شود؟ چه گام‌هایی نیاز است تا از برآورده شدن این نیازها اطمینان حاصل شود (یعنی گام‌های تصدیق اعتبار)؟

۲۴. برخی مزیت‌های آزمایش ترتیبی قابلیت اطمینان را تشریح کنید. برخی از معایب آن را شناسایی کنید. منظور از آزمایش عمر چیست؟ آزمایش تسریع شده چطور؟

۲۵. فرض کنید که برای تولید چندین محصول مشابه می‌خواهید برنامه‌ریزی کنید. چه گام‌هایی برای اطمینان از تحویل درست محصولاتی که خصوصیات قابلیت اطمینان را منعکس می‌کنند باید برداشته شود؟

۲۶. منظور از ریسک تولیدکننده و ریسک مشتری چیست؟

۲۷. یک سیستم از پنج قطعه ساخته شده است. هیچ افزونگی در سیستم وجود ندارد و همه اجزای سیستم به‌صورت سری قرار دارند. اجزا دارای یک MTBF هستند که در ستون ۲ جدول زیر نشان داده شده است. تحلیل طراحی نشان می‌دهد که همه اجزا می‌توانند دوباره طراحی شده و MTBF آن‌ها با یک فاکتور ۵ بهبود می‌یابد. هزینه تخمینی برای این توسعه در ستون ۳ جدول نشان داده شده است. کل هزینه توسعه معادل

مجموع هزینه‌های طراحی مجدد برای این اجزا است که توسعه‌دهنده برای بهبود آن انتخاب کرده است اما مشخص نشده است که کدام یک از این اجزا باید بهبود یابند. یک معیار هزینه–اثربخشی (CE) برای اولویت‌بندی طراحی مجدد این قطعات تعریف شده است. هزینه اثربخشی به‌صورت بهبود (کاهش) نرخ خرابی تقسیم بر هزینه طراحی مجدد برای هر جزء تعریف شده است. جزء با بیش‌ترین مقدار CE بیش‌ترین اولویت برای طراحی مجدد را دارد. دیگر اجزای فهرست شده به همین ترتیب اولویت‌بندی می‌شوند. پایه زمانی برای مساله قابلیت اطمینان حاضر ۱۰۰۰ ساعت است. هزینه تجمعی معادل هزینه کل برای پیاده‌سازی تغییرات طراحی برای اجزای ۱ تا n است.

a. MTBF کل سیستم را پیش از طراحی مجدد محاسبه کنید.
b. نرخ خرابی هر یک از اجزا را پیش از طراحی مجدد محاسبه کنید.
c. برای هر کدام از اجزا CE را محاسبه کنید.
d. بهبودهای قابلیت اطمینان اجزا را اولویت‌بندی کنید.
e. قابلیت اطمینان را پس از هر بهبود ایجاد شده محاسبه کنید و قابلیت اطمینان کلی را اگر همه اجزا دوباره طراحی شوند، به‌دست آورید.
f. قابلیت اطمینان کل سیستم را به‌عنوان تابعی از هزینه توسعه رسم کنید.
g. قابلیت اطمینان تجمعی را برای همه بهبودها محاسبه کنید.
h. مشخص کنید که چه تعداد از اجزا باید طراحی مجدد شود تا یک قابلیت اطمینان بالای ۰/۸ درصد به‌دست آید.
i. تعیین کنید که چه تعداد جزء باید طراحی مجدد شوند اگر مشتری بودجه‌ای بیش‌تر از ۱۰ میلیون دلار نداشته باشد.

جزء	MTBF	هزینه کاهش خرابی (میلیون دلار)
۱	۹۱۰۰	۱
۲	۱۲۵۰۰	۲
۳	۵۰۰۰	۳
۴	۱۴۳۰۰	۴
۵	۲۵۰۰۰	۵

۱۳

طراحی برای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

یکی از اهداف اصلی در طراحی برای ممکن بودن عملیات، حصول اطمینان از آن است که سیستم به‌صورتی اثربخش و کارا در زمانی که برای انجام ماموریت‌های خود موردنیاز است، در دسترس و عملیاتی باشد. دست‌یابی به یک نیازمندی دسترسی‌پذیری بستگی به دو فاکتور دارد: (۱) قابلیت اطمینان ذاتی سیستم مورد استفاده، و (۲) قابلیت نگه‌داری و تعمیرات یا توانمندی سیستم در عملیاتی ماندن و/یا تعمیر شدن (در صورت ایجاد خرابی) و بازگشت به حالت خدمت‌دهی به‌صورتی سریع و اثربخش.

هدف از این فصل توضیح مفاهیم، مدل‌ها و روش‌های مفید در اجرای طراحی برای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات است. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، یک خصوصیت طراحی است (یک پارامتر وابسته به طراحی) است که مرتبط با آسانی، دقت، ایمنی و اقتصادی بودن در عملکرد وظایف نگه‌داری و تعمیرات است. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، توانمندی نگه‌داری و تعمیرات یک سیستم است در حالی که نگه‌داری و تعمیرات، یک سری از فعالیت‌هایی است که برای بازگرداندن یا

حفظ یک سیستم در حالت عملیاتی و اثربخش است. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات باید جزئی ذاتی از طراحی باشد، درحالی که نگه‌داری و تعمیرات محصول طراحی است.

بسیاری از سیستم‌های مورد استفاده امروزی پیچیده بود و هنگامی که عملیاتی باشند نیازمندی‌های مشتری را برآورده می‌سازند. با این حال، تجربه گذشته نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان برخی از این سیستم‌ها حاشیه‌ای بوده و بیش‌تر مواقع غیرعملیاتی هستند و نیازمند نگه‌داری و تعمیرات پرهزینه و زمان‌بر هستند. زمان از کار افتادگی و منابع هدر رفته برای نگه‌داری و تعمیراتی، حاصل عدم ملاحظه‌ی مناسب به قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی است. نیازمندی‌های خاص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات باید به‌صورت قابل اندازه‌گیری تعیین شده و طی فرایند طراحی و توسعه سیستم در نظر گرفته شود. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات همتای قابلیت اطمینان است. هر دو پارامترهای وابسته به طراحی بوده و با انجام عملیات و خدمات مورد انتظار از سیستم همراه هستند. پس از اتمام این فصل، خواننده قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را درک کرده و متوجه اهمیت آن در فرایند طراحی سیستم می‌شود. این کار از طریق موارد زیر صورت می‌گیرد.

- تعریف و تشریح قابلیت نگه‌داری و تعمیرات؛
- شاخص‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات – زمان‌های سپری شده، فراوانی‌ها، ساعات نیروی کار و هزینه؛
- فاکتورهای دسترسی‌پذیری و اثربخشی؛
- قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در چرخه‌ی عمر سیستم – نیازمندی‌های سیستم، تخصیص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، انتخاب و پیش‌بینی اجزا، مشارکت در طراحی، و بازبینی طراحی؛

- روش‌های تحلیل قابلیت نگه‌داری و تعمیرات – ارزیابی موازنه قابلیت نگه‌داری و تعمیرات و قابلیت اطمینان، پیش‌بینی، نگه‌داری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)، تحلیل سطح تعمیر (LORA)، تحلیل وظیفه نگه‌داری و تعمیرات (MTA)، و نگه‌داری و تعمیرات بهره‌ور (TPM)؛
- نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات.

نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات باید در فرایند نمایش داده شده در شکل ۲-۴ در نظر گرفته شده و به‌عنوان یک پارامتر اصلی در طراحی یک سیستم مورد توجه باشد. بر این اساس، آخرین قسمت این فصل خلاصه‌ای بر چگونگی در نظر گرفتن قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را فراهم کرده و پیشنهادهایی برای مطالعه‌ی بیش‌تر ارائه داده است.

۱۳-۱- تعریف و تشریح قابلیت نگه‌داری وتعمیرات

یکی از اهداف مهندسی سیستم‌ها، طراحی و توسعه‌ی یک سیستم یا محصول است که بتوان آن را به‌صورتی اثربخش، ایمن، در کم‌ترین زمان و هزینه و با حداقل منابع مصرفی (یعنی افراد، مواد، تجهیزات پشتیبانی و تسهیلات) نگه‌داری کرد بدون این که اثر مخربی بر ماموریت سیستم داشته باشد. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات توانمندی سیستم در نگه‌داری شدن است، در حالی که نگه‌داری و تعمیرات یک سری از فعالیت‌ها برای بازگرداندن یا حفظ یک سیستم در حالت عملیاتی اثربخش است. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات یک پارامتر وابسته به طراحی است. نگه‌داری و تعمیرات حاصل طراحی است.

قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، به‌عنوان یک خصوصیت طراحی، در قالب زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات، فاکتورهای فراوانی نگه‌داری و تعمیرات، ساعات نیروی کار نگه‌داری و تعمیرات و هزینه

نگه‌داری و تعمیرات. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات می‌تواند بر پایه ترکیبی از فاکتورها، مانند فاکتورهای زیر، تعریف شود:

۱. یک خصوصیت طراحی و نصب که به‌صورت احتمال آن که آیتم در یک حالت مشخص در یک دوره زمانی حفظ شده یا به آن بازگردانده شود، زمانی که نگه‌داری و تعمیرات مطابق رویه‌ها و منابع از پیش معین شده انجام شود، بیان می‌شود.

۲. یک خصوصیت طراحی یا نصب که به‌صورت یک احتمال که نگه‌داری و تعمیرات برای بیش‌تر از x بار در یک دوره زمانی هنگامی که سیستم مطابق رویه‌ها عملیات خود را انجام می‌دهد موردنیاز نباشد، بیان می‌شود.

۳. یک خصوصیت طراحی یا نصب که به صورت یک احتمال که هزینه نگه‌داری و تعمیرات برای یک سیستم در یک دوره مشخص هنگامی که بر پایه رویه‌هایی از پیش معین شده عملیات را انجام داده و نگه‌داری شود، از y دلار تجاوز نکند.

نیازمندی‌های خاص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات از تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات بحث شده در قسمت‌های ۳-۴ و ۳-۵ استخراج می‌شود. نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات نه تنها برای عناصر اصلی مربوط به ماموریت یک سیستم، بلکه برای عناصر مختلف زیربنای پشتیبانی تدارکات و نگه‌داری و تعمیرات باید مشخص گردد. چنین نیازمندی‌هایی باید برای سناریوی ماموریت سیستم تنظیم گردند. شاخص‌های مناسب از طریق شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های عملکرد فنی (TPMها) که در قسمت ۳-۶ پوشش داده شد، توسعه می‌یابند.

۱۳-۲- شاخص‌های قابلیت نگه‌داری وتعمیرات

قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را می‌توان در قالب ترکیبی از فاکتورهای نگه‌داری و تعمیرات مختلف اندازه‌گیری کرد. از یک نقطه‌نظر سیستمی، فرض می‌شود که نگه‌داری و تعمیرات را می‌توان به دسته‌های کلی زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱. ***نگه‌داری وتعمیرات.*** نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده که پس از اتفاق افتادن خرابی انجام می‌شود، برای بازگرداندن سیستم یا محصول به یک سطح عملکردی مشخص اجرا می‌گردد. این دسته شامل شناسایی اولیه خرابی(ها)، تعیین محل و ایزوله کردن خطا (تشخیص)، جدا کردن (دسترسی) و جایگزینی (یا تعمیر) قطعه خراب، سوارکردن مجدد، اصلاح و/یا تنظیم (در صورت نیاز) و بررسی نهایی و تایید عملکرد درست سیستم می‌شود؛ که همان چرخه‌ی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی است.

۲. ***نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه.*** نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده که برای حفظ یک سیستم در یک سطح تعیین شده از عملکرد اجرا شده و از طریق بازرسی سیستمی، شناسایی، خدمت‌دهی یا ممانعت از خرابی‌های محتمل از طریق تعویض قطعه‌های دوره‌ای این موضوع را فراهم می‌کند.

در مواجهه با نرم‌افزار، دسته‌های بیش‌تری قابل استفاده است. *نگه‌داری و تعمیرات انطباقی* به فرایند پیوسته اصلاح نرم‌افزار در پاسخ به نیازمندی‌های متغیر در داده یا محیط پردازش (در ساختار وظیفه اولیه) اطلاق می‌شود. *نگه‌داری و تعمیرات کامل* عبارتی است که برای تشریح اصلاح نرم‌افزار به منظور ارتقای عملکرد، جمع‌بندی و دیگر نیازهای تکاملی مشتری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از موضوعات جالب توجه در این جا شاخص‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات است که عبارت‌اند از زمان از کار افتادگی (یعنی زمان سپری شده هنگامی که سیستم به علت انجام عملیات نگه‌داری و تعمیرات و کار نمی‌کند)، نفر ساعت کارکنان (یعنی کل تعداد افراد، سطح مهارت و ساعات کاری صرف شده برای انجام عملیات نگه‌داری و تعمیرات)، فراوانی‌های نگه‌داری و تعمیرات (یعنی فاکتورهای میانگین زمان بین نگه‌داری و تعمیرات‌ها)، هزینه نگه‌داری و تعمیرات و فاکتورهای مربوطه در مواجهه با عناصر مختلف پشتیبانی (یعنی قطعات یدکی/تعمیری، تجهیزات آزمایش، حمل و نقل و جابه‌جایی، تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات و فاکتورهای زنجیره تامین). شاخص‌های رایج مورد استفاده در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱۳-۲-۱- فاکتورهای زمان سپری شده نگه‌داری و تعمیرات

فاکتورهای زمان سپری شده شامل زمان‌های فعال نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه، تاخیرهای تدارکاتی و سازمانی و کل زمان ازکار افتادگی نگه‌داری و تعمیرات (MDT) است.

میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی $\left(\bar{M}ct\right)$**.** هنگامی که یک سیستم خراب می‌شود، یک سری از گام‌ها برای تعمیر یا بازگرداندن سیستم به وضعیت کاملا عملیاتی طی می‌شوند. این گام‌ها عبارت‌اند از شناسایی خطا، ایزوله کردن خطا، پیاده کردن تجهیز خراب برای دسترسی به آیتم خراب شده، تعمیر و غیره که در شکل ۱۳-۱ نشان داده شده است. تکمیل این گام‌ها برای هر خرابی، یک چرخه نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی را تشکیل می‌دهد.

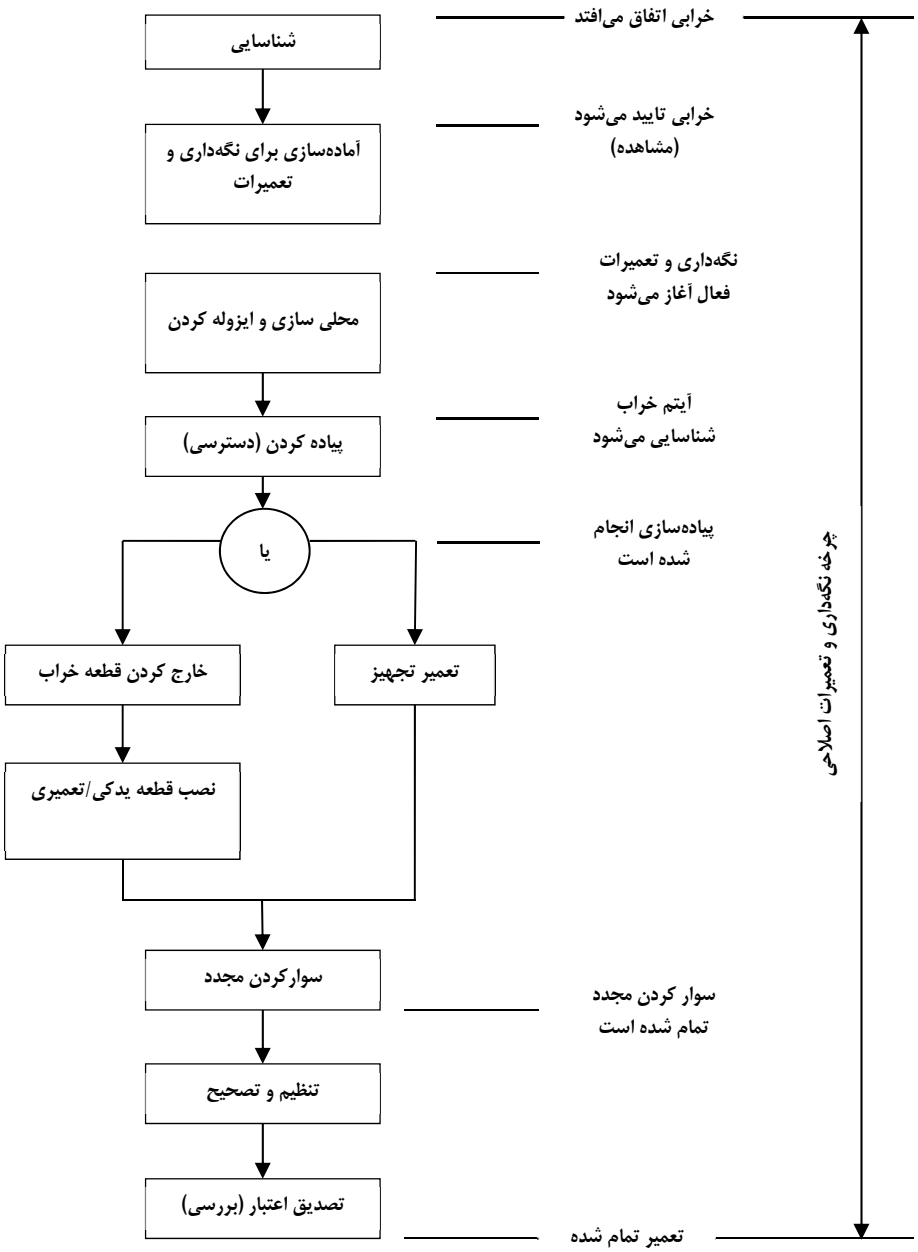
در فاز بهره‌برداری از سیستم، تعدادی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات وجود دارد که شامل یک سری از گام‌های نشان داده شده در شکل می‌شود. میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات

اصلاحی $\left(\overline{Mct}\right)$، یا معادل آن یعنی میانگین زمان تا تعمیر (MTTR)، یک مقدار ترکیبی است که نمایانگر میانگین حسابی زمان‌های هر چرخه نگه‌داری و تعمیرات (MCT_i) است.

جدول ۱۳–۱ شامل داده‌هایی است که یک نمونه از ۵۰ فعالیت تعمیری در نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی برای یک سیستم معمولی را نشان می‌دهد. هر کدام از زمان‌های مشخص شده نشان‌دهنده‌ی تکمیل یک چرخه نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی است. بر پایه مجموعه داده‌های خام نمایش داده شده که یک نمونه تصادفی را تشکیل می‌دهند، یک جدول توزیع فراوانی و هیستوگرام فراوانی می‌توان تهیه کرد که به ترتیب در جدول ۱۳–۲ و شکل ۱۳–۲ به تصویر کشیده شده است.

با مراجعه به جدول ۱۳–۲، بازه‌ی مشاهدات بین ۳۰ و ۹۷ دقیقه است یعنی مقداری برابر با ۶۷ دقیقه. این بازه می‌تواند به بازه‌های دسته‌بندی شده که برای راحتی، هر دسته بازه‌ای برابر با ۱۰ خواهد داشت. یک نقطه شروع منطقی انتخاب بازه ۲۹–۲۰، ۳۹–۳۰ و غیره است. در چنین مواردی، لازم است که نقاط تقسیم کننده بین دو بازه وجود داشته باشد، مانند ۳۹/۵،۲۹/۵ و غیره.

با داشتن توزیع زمان‌های تعمیر، می‌توان یک هیستوگرام رسم کرد که نشان‌دهنده‌ی مقادیر زمانی به دقیقه و فراوان رخدادها باشد (شکل ۱۳–۲). با تعیین نقطه‌ی میانی بازه‌ی هر دسته، یک خط شکسته فراوانی به‌صورت آن‌چه در شکل ۱۳–۳ نشان داده شده است، توسعه می‌یابد. این شکل توزیع احتمالی زمان‌های تعمیر برای سیستم در دست را مشخص می‌کند.



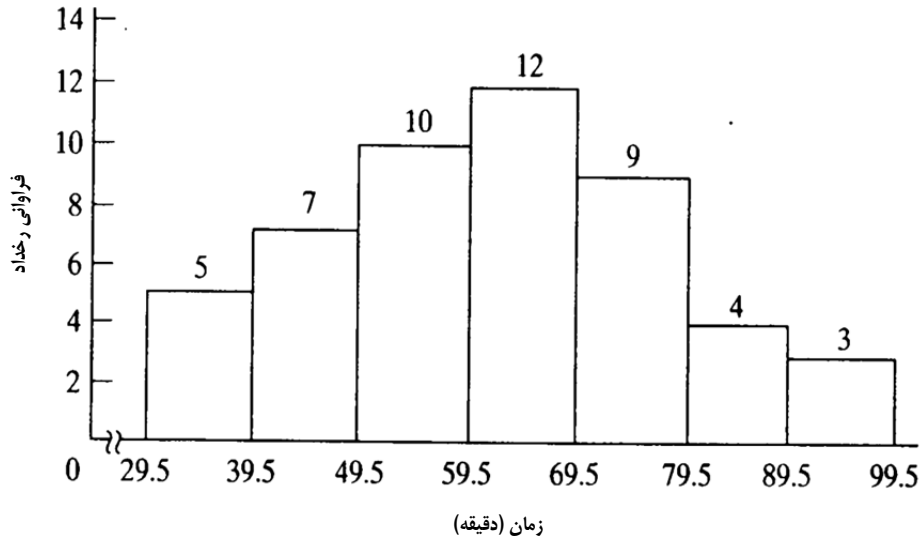
شکل ۱۳- ۱- چرخه نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی.

جدول ۱۳- ۱- زمان‌های نگه‌داری وتعمیرات اصلاحی (MCTi به دقیقه)

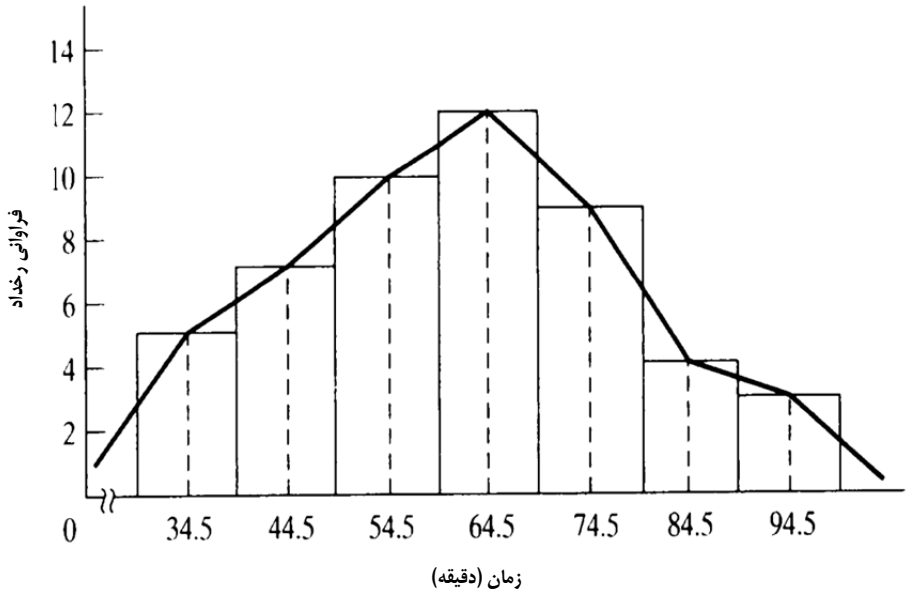
۹	۹	۶	۷	۸	۶	۴	۴	۵	۴
۲	۳	۶	۵	۳	۳	۵	۳	۸	۰
۷	۷	۹	۷	۶	۳	۶	۵	۵	۷
۵	۶	۷	۲	۲	۷	۴	۵	۲	۱
۶	۶	۵	۴	۷	۶	۳	۴	۶	۷
۴	۸	۹	۶	۱	۹	۹	۸	۴	۵
۶	۵	۳	۸	۴	۵	۳	۵	۴	۶
۳	۰	۳	۳	۸	۳	۰	۴	۱	۷
۶	۶	۵	۵	۳	۸	۷	۵	۷	۸
۳	۵	۹	۷	۷	۷	۲	۱	۴	۶

جدول ۱۳- ۲- توزیع فراوانی

بازه دسته	فراوانی	فراوانی تجمعی
۲۹,۵–۳۹,۵	۵	۵
۳۹,۵–۴۹,۵	۷	۱۲
۴۹,۵–۵۹,۵	۱۰	۲۲
۵۹,۵–۶۹,۵	۱۲	۳۴
۶۹,۵–۷۹,۵	۹	۴۳
۷۹,۵–۸۹,۵	۴	۴۷
۸۹,۵–۹۹,۵	۳	۵۰



شکل ۱۳- ۲- هیستوگرام زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات.



شکل ۱۳- ۳ خط شکسته فراوانی.

هم‌زمان با اتفاق افتادن فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی بیش‌تر و ترسیم نقاط داده برای سیستم مدنظر، منحنی نمایش داده شده در شکل ۱۳–۳ به شکل توزیع نرمال در می‌آید. منحنی نرمال تعریف شده توسط میانگین حسابی $\left(\bar{M}ct\right)$و انحراف معیار (σ)تعریف می‌شود. از زمان‌های تعمیر نشان داده شده در جدول ۱۳–۱، میانگین حسابی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\bar{M}ct = \frac{\sum_{i=1}^{n} Mct_i}{} = \frac{3095}{50} = 61.9 \qquad (۱–۱۳)$$

که در آن Mct_i کل زمان فعال چرخه نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی برای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات و اندازه نمونه n است. بنابراین، مقدار میانگین برای ۵۰ نمونه فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات ۶۲ دقیقه است.

انحراف معیار (σ)پراکندگی مقادیر زمان نگه‌داری و تعمیرات را اندازه‌گیری می‌کند. هنگامی که یک انحراف معیار محاسبه می‌شود، مناسب است که یک جدول ایجاد شود تا در آن انحرافات از میانگین ۶۲ نشان داده شود. جدول ۱۳–۳ این موارد را برای تنها چهار زمان از این فعالیت‌ها را نشان می‌دهد، گرچه همه‌ی ۵۰ فعالیت باید در محاسبات در نظر گرفته شود. مقدار مجموع ۱۳۰۱۳ همه‌ی ۵۰ فعالیت را پوشش می‌دهد.

جدول ۱۳-۳- داده‌های واریانس

$\left(Mct_i - \bar{M}ct\right)^2$	$Mct_i - \bar{M}ct$	مجموع
۴۸۴	−۲۲	۴۰
۸۱	+۹	۷۱
۱۶۹	+۱۳	۷۵
۲۵	+۵	۵۷
ادامه	ادامه	ادامه
۱۳۰۱۳		مجموع

انحراف معیار منحنی توزیع نرمال نمونه را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Mct_i - \bar{M}ct\right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{13013}{49}} = 16.3 \qquad (۲-۱۳)$$

ممکن است نیاز باشد که تعیین شود چه درصدی از کل فعالیت‌های تعمیر در بازه‌ی ۴۶ تا ۷۸ دقیقه قرار می‌گیرد. این کار توسط تبدیل بازه به مضربی از انحراف معیار قابل محاسبه است. در مثال مدنظر، بازه ۴۶–۷۸ برابر است با $\bar{M}ct \pm 1\sigma$ یا ۶۲ دقیقه ± انحراف معیار ۱۶ دقیقه‌ای. هنگامی که نرمال بودن فرض شده است، می‌توان بیان کرد که ۶۸٪ از جمعیت در بازه ۴۶–۷۶ قرار می‌گیرد و ۹۹,۷٪ جمعیت نمونه در بازه $\bar{M}ct \pm 3\sigma$ یا ۱۴–۱۱۰ دقیقه قرار می‌گیرد.

به‌عنوان یک استفاده رایج، ممکن است تعیین درصد کل دفعات تعمیر که بین ۴۰ و ۵۰ دقیقه قرار می‌گیرند مشخص شوند. این موضوع به‌صورت گرافیکی در شکل ۱۳–۴ نشان داده شده

است. مساله یافتن درصدی است که ناحیه‌ی هاشورزده را بیان کند. این درصد به‌صورت زیرقابل محاسبه است:

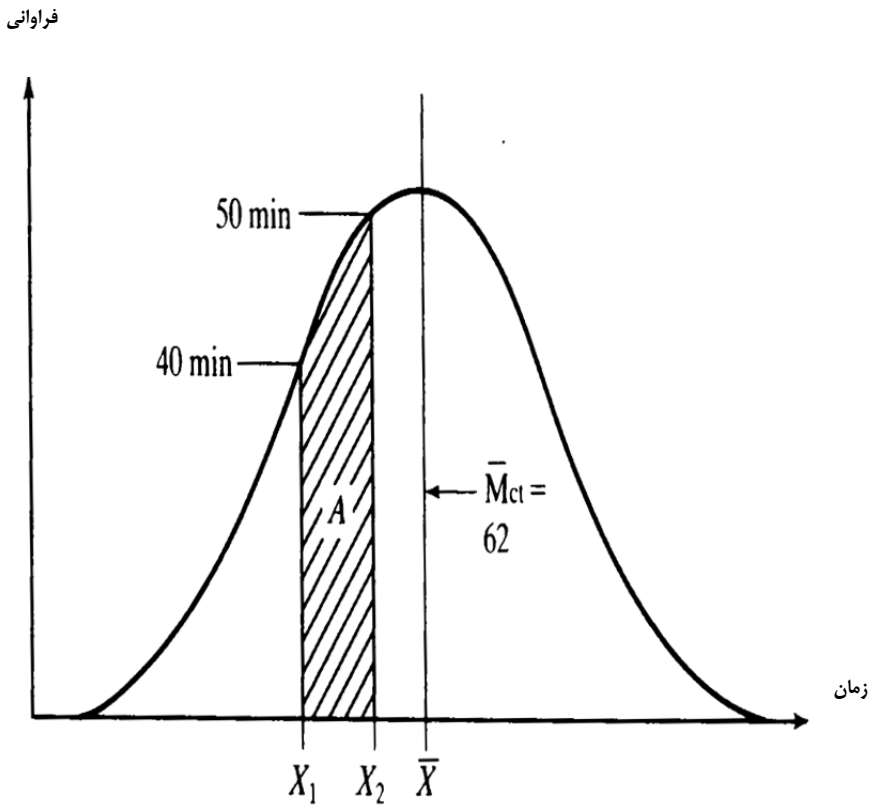
۱. زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات ۴۰ و ۵۰ دقیقه را به مقادیر استاندارد (Z) یا به تعداد انحراف معیارها بالا و پایین میانگین ۶۲ دقیقه‌ای تبدیل کنید:

$$Z\left(40\,\text{min}\right)=\frac{X_1-\bar{X}}{\sigma}=\frac{40-62}{16}=-1.37$$
$$Z\left(50\,\text{min}\right)=\frac{X_2-\bar{X}}{\sigma}=\frac{50-62}{16}=-0.75$$

زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات ۴۰ و ۵۰ دقیقه به‌صورت مقادیر انحراف معیارهای ۱٫۳۷- و ۰٫۷۵- زیر میانگین (زیرا مقادیر منفی هستند).

۲. نقطه $X_1(Z=-1.37)$ یک ناحیه ۰/۰۸۵۳ را نشان می‌دهد و نقطه X_2 یک ناحیه ۰/۰۲۲۶۶ را نمایش می‌دهد که از جداول احتمالی توزیع نرمال استخراج می‌گردد.

۳. ناحیه هاشور زده شده A در شکل ۱۳-۴ نشان دهنده‌ی ناحیه اختلاف یا ناحیه $X_2-X_1=0.2266-0.0853=0.1413$است. بنابراین، ۱۴/۱۳٪ جمعیت زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات بین ۴۰ تا ۵۰ دقیقه قرار می‌گیرند.



شکل ۱۳- ۴- توزیع نرمال زمان‌های تعمیر.

سپس، حدود اطمینان باید تعیین شود. از آن‌جا که ۵۰ فعالیت نگه‌داری و تعمیرات تنها یک نمونه از همه فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات بر روی تجهیز مورد ارزیابی را نشان می‌دهد، این امکان وجود دارد که یک نمونه ۵۰ تایی دیگر از فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات از همان تجهیز، مقدار میانگین بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۶۲ دقیقه داشته باشد. ۵۰ فعالیت اولیه به‌صورت تصادفی انتخاب شده و به‌صورت آماری نمایش داده شده است. با استفاده ار انحراف معیار، حدود بالا و پایین برای مقدار میانگین $\left(\bar{M}ct\right)$جمعیت قابل اندازه‌گیری است. برای نمونه، اگر احتمال اشتباه در ۱۵٪ مواقع مورد قبول باشد (حد اطمینان ۸۵٪) آنگاه،

$$\text{Upper limit} = \bar{M}ct + Z\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \qquad (۳-۱۳)$$

که در آن $\sigma / \sqrt{n}$ نشان دهنده فاکتور خطای استاندارد است.

مقدار Z از جداول توزیع نرمال به‌دست می‌آید که در آن ۰/۱۴۹۲ نزدیک به ۱۵٪ بوده و Z معادل آن ۱/۰۴ است. بنابراین

$$\text{Upper limit} = 62 + (1.04)\left(\frac{16}{\sqrt{50}}\right) = 64.35$$

این بدان معنی است که حد بالا در سطح اطمینان ۸۵٪ برابر با ۶۴/۴ دقیقه است یا به عبارت دیگر، یک احتمال ۸۵٪ وجود دارد که $\bar{M}ct$ زیر ۶۴/۴ باشد. تغییرات در ریسک و مقادیر حد بالا مربوط به آن‌ها در جدول ۱۳-۴ نشان داده شده است. اگر یک حد $\bar{M}ct$ مشخص برای طراحی تجهیز در نظر گرفته شده باشد (بر پایه ماموریت و نیازمندی‌های عملیاتی)، و معلوم (یا مفروض) باشد که زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات توزیع نرمال دارند، آن‌گاه نتایج اندازه‌گیری‌ها یا پیش‌بینی‌ها باید در طی فرایند توسعه با مقادیر مشخص مقایسه شود تا درجه انطباق تعیین گردد.

هنگامی که توزیع‌های احتمالی در حالت عمومی در نظر گرفته می‌شود، وابستگی زمانی بین احتمال تعمیر و زمان تخصیص داده شده برای تعمیر می‌توان اغلب برای تولید یک تابع چگالی احتمالی به‌صورت یکی از توزیع‌های رایج (نرمال، نمایی، لاگ نرمال) مورد انتظار باشد، همان‌طور که در شکل ۱۳-۵ نشان داده شده است.

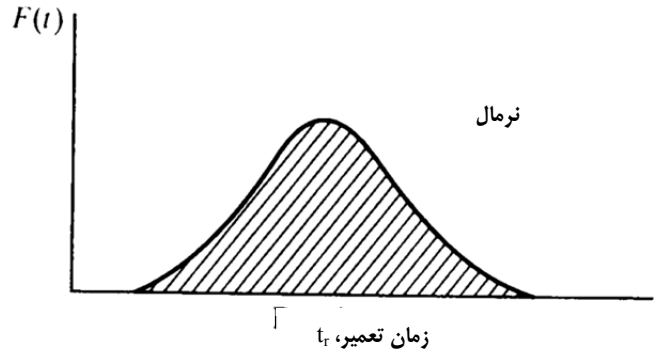
۱. ***توزیع نرمال*** به فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات نسبتا ساده (فعالیت‌های حذف و جایگزینی ساده) اعمال می‌شود که همیشه یک مقدار ثابت از زمان برای تکمیل نیاز دارند و تغییرات در آن‌ها اندک است.

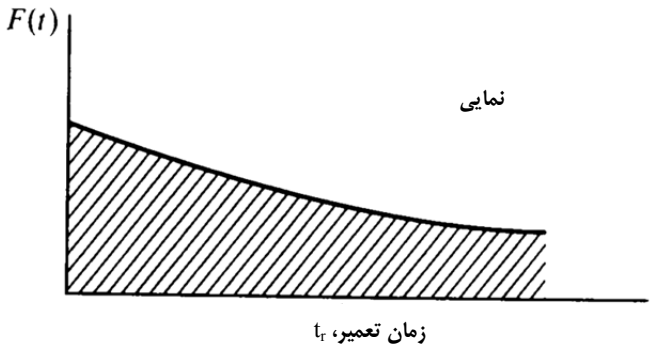
۲. ***توزیع نمایی*** به فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات که شامل روش‌های جایگزینی قطعه در سیستم‌های بزرگ می‌شود و منجر به یک نرخ خرابی ثابت می‌شوند، اعمال می‌شود.

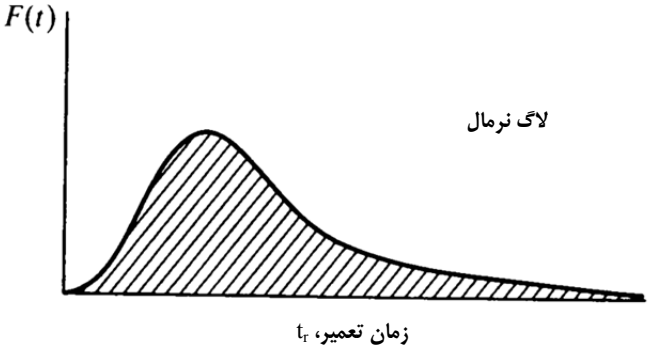
۳. ***توزیع لاگ*** *نرمال* به اغلب فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات که از فعالیت‌های متعدد تکمیلی با فراوانی و زمان‌های نامساوی تشکیل شده است، اعمال می‌شود.

جدول ۱۳- ۴- تغییرات ریسک- حد بالا

حد بالا	Z	اطمینان (درصد)	ریسک (درصد)
۶۵,۷۲	۱,۶۵	۹۵	۵
۶۴,۸۹	۱,۲۸	۹۰	۱۰
۶۴,۳۵	۱,۰۴	۸۵	۱۵
۶۳,۸۹	۰,۸۴	۸۰	۲۰







شکل ۱۳- ۵- توزیع‌های زمان تعمیر.

همان‌طور که مشخص گردید، زمان‌های فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات برای بسیاری از سیستم‌ها و تجهیزات همیشه در منحنی نرمال قرار نمی‌گیرد. تعدادی از فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات هستند که نمایانگر زمان‌های تعمیر گسترده بوده و باعث یک انحراف به راست می‌شوند. این موضوع به ویژه در تجهیزات الکترونیکی صدق می‌کند که توزیع زمان‌های تعمیر اغلب از یک منحنی لاگ نرمال نمایش داده شده درشکل ۱۳-۶ تبعیت می‌کند. استنتاج یک منحنی توزیع خاص برای یک مجموعه از زمان‌های فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات با استفاده از یک رویه مشابه آن‌چه در پاراگراف‌های قبلی ارائه شد، به‌دست می‌آید. یک جدول فراوانی تولید شده و یک هیستوگرام رسم می‌شود.

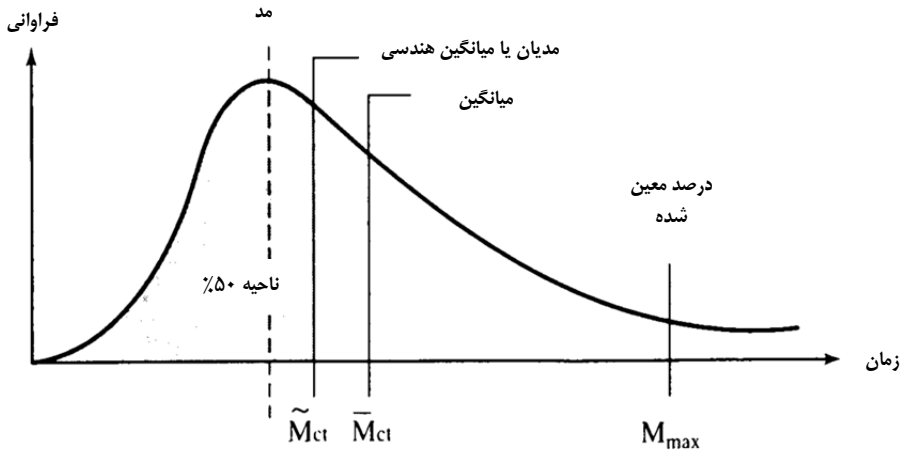
یک نمونه ۲۵ تایی از فعالیت‌های تعمیری برای یک تجهیز الکترونیکی در جدول ۱۳-۵ نشان داده شده است. با استفاده از داده‌های جدول، میانگین به‌صورت زیر تعیین می‌شود

$$\bar{M}ct = \frac{\sum_{i=1}^{n} Mct_i}{n} = \frac{1637}{24} = 68.21$$

هنگام تعیین $\bar{M}ct$ برای یک جمعیت نمونه مشخص از فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی، مناسب است که از معادله ۱۳-۴ که کاربرد گسترده‌تری دارد استفاده شود

$$\bar{M}ct = \frac{\sum(\lambda)(Mct)}{\sum \lambda_i} \qquad (۴-۱۳)$$

که در آن λ_i نرخ خرابی هر عنصر از آیتم مورد اندازه‌گیری است و اغلب به‌صورت تعداد خرابی‌ها در یک ساعت عملیات سیستم بیان می‌شود. معادله ۱۳-۴ $\bar{M}ct$ را به صورت یک میانگین وزنی با استفاده از فاکتورهای قابلیت اطمینان محاسبه می‌کند.



شکل ۱۳- ۶- توزیع لاگ نرمال زمان‌های تعمیر.

جدول ۱۳- ۵- زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی

۵۵	۲۸	۱۲۵	۴۷	۵۸	۵۳	۳۶	۸۸
۵۱	۱۱۰	۴۰	۷۵	۶۴	۱۱۵	۴۸	۵۲
۶۰	۷۲	۸۷	۱۰۵	۵۵	۸۲	۶۶	۶۵

باید توجه شود که $\bar{M}ct$ تنها زمان فعال نگه‌داری و تعمیرات یا زمانی را که به‌طور مستقیم بر روی سیستم کار می‌شود، در نظر می‌گیرد. زمان‌های تاخیر تدارکات (LDT) و تاخیرهای سازمانی (ADT) شامل این مورد نمی‌شود. اگرچه همه عناصر زمانی مهم هستند، اما فاکتور $\bar{M}ct$ در اصل یک شاخص از خصوصیات قابلیت پشتیبانی در یک محصول مشخص مانند تجهیز، نرم‌افزار و غیره است.

میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه $\left(\bar{M}pt\right)$**.** نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه به فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که برای نگه‌داری سیستم در یک سطح مشخص از عملکرد موردنیاز است که می‌تواند شامل وظایفی در قالب بازرسی دوره‌ای، سرویس، تعویض زمان‌بندی شده آیتم‌های حساس، کالیبره کردن، تعمیرات اساسی و غیره باشد. $\bar{M}pt$ میانگین زمان سپری شده برای انجام نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه یا زمان‌بندی شده برای یک آیتم است که به‌صورت زیر بیان می‌شود

$$\bar{M}pt = \frac{\sum\left(fpt_i\right)\left(Mpt_i\right)}{\sum fpt_i} \qquad (۵-۱۳)$$

که در آن fpt_i فراوانی نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه در هر ساعت عملیات سیستم است و Mpt_i زمان سپری شده موردنیاز برای iامین فعالیت نگه‌داری و تعمیرات است.

نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه می‌تواند زمانی انجام شود که سیستم در حالت کاملا عملیات است یا ممکن است منجر به از کار افتادگی سیستم شود. در این نمونه، تمرکز بر نگه‌داری و تعمیراتی است که باعث از کار افتادگی سیستم می‌شود. بار دیگر، $\bar{M}pt$ شامل تنها زمان‌های فعال نگه‌داری و تعمیرات می‌شود و LDT و ADT را در نظر نمی‌گیرد.

جدول ۱۳- ۶- محاسبات برای $\tilde{M}ct$

Mct_i	$\log Mct_i$	$(\log Mct_i)^2$	Mct_i	$\log Mct_i$	$(\log Mct_i)^2$
۵۵	۱,۷۴۰	۳,۰۲۸	۶۴	۱,۸۰۶	۳,۲۶۲
۲۸	۱,۴۴۷	۲,۰۹۴	۱۱۵	۲,۰۴۱	۴,۲۴۸
۱۲۵	۲,۰۹۷	۴,۳۹۷	۴۸	۱,۶۸۱	۲,۸۲۶
۴۷	۱,۶۷۲	۲,۷۹۶	۵۲	۱,۷۱۶	۲,۹۴۵
۵۸	۱,۷۶۳	۳,۱۰۸	۶۰	۱,۷۷۸	۳,۱۶۱
۵۳	۱,۷۲۴	۲,۹۷۲	۷۲	۱,۸۵۷	۳,۴۴۸
۳۶	۱,۵۵۶	۲,۴۲۱	۸۷	۱,۹۳۹	۳,۷۶۰
۸۸	۱,۹۴۵	۳,۷۸۳	۱۰۵	۲,۰۲۱	۴,۰۸۴
۵۱	۱,۷۰۸	۲,۹۱۷	۵۵	۱,۷۴۰	۳,۰۲۸
۱۱۰	۲,۰۴۱	۳,۱۶۶	۸۲	۱,۹۱۴	۳,۶۶۳
۴۰	۱,۶۰۲	۲,۵۶۶	۶۶	۱,۸۱۹	۳,۳۰۹
۷۵	۱,۸۷۵	۳,۵۱۶	۶۵	۱,۸۱۳	۳,۲۸۷
			مجموع	۴۳,۳۱۵	۷۸,۷۸۵

مدیان زمان نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی $\left(\tilde{M}ct\right)$**.** مدیان زمان نگه‌داری و تعمیرات مقداری است که همه‌ی مقادیر زمان‌های از کار افتادگی را تقسیم می‌کند، به‌طوری که ۵۰٪ برابر یا کم‌تر از مدیان باشد و ۵۰٪ برابر یا بیش‌تر از مدیان باشد. مدیان اغلب بهترین نقطه میانی داده‌های نمونه را به‌دست می‌دهد. مدیان برای یک توزیع نرمال همان میانگین است، در حالی که مدیان در یک توزیع لاگ نرمال برابر با میانگین هندسی است (شکل ۱۳–۶). $\tilde{M}ct$ (که معادل $\mathrm{MTTR_g}$ نیز هست) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\tilde{M}ct = \text{antilog}\frac{\sum_{i=1}^{n}\log Mct_i}{n} = \text{antilog}\frac{\sum(\lambda_i)(\log Mct_i)}{\sum\lambda_i}$$

(۶–۱۳)

به‌عنوان یک مثال، مقادیر زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات جدول ۱۳–۵ در یک قالب دیگر در جدول ۱۳–۶ نشان داده شده است. مدیان به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\tilde{M}ct = \text{antilog}\frac{\sum_{1}^{24}\log Mct_i}{24}$$
$$= \text{antilog}\frac{43.315}{24} = \text{antilog}1.805 = 63.8$$

مدیان زمان فعال نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه $\left(\tilde{M}pt\right)$**.** مدیان زمان نگه‌داری و تعمیرات فعال با استفاده از رویکرد مشابه در محاسبه $\tilde{M}ct$ تعیین می‌شود؛ به‌صورتی‌که

$$\tilde{M}pt = \text{antilog}\frac{\sum(fpt_i)(\log Mpt_i)}{\sum fpt_i} \qquad (۷–۱۳)$$

میانگین زمان فعال نگه‌داری و تعمیرات $\left(\overline{M}\right)$**.** $\overline{M}$ میانگین زمان سپری شده موردنیاز برای انجام نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده (پیشگیرانه) و زمان‌بندی نشده (اصلاحی) می‌باشد. این میانگین شامل LDT وADT نمی‌شود و به‌صورت زیر بیان می‌شود

$$\overline{M} = \frac{(\lambda)(\overline{M}ct) + (fpt)(\overline{M}pt)}{\lambda + fpt} \qquad (۸-۱۳)$$

که در آن λ نرخ نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی یا نرخ خرابی است و fpt نرخ نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه است.

بیش‌ترین زمان فعال نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی (M_{max})**.** M_{max} را می‌توان به‌صورت مقدار زمان از کار افتادگی نگه‌داری و تعمیرات که انتظار می‌رود درصد مشخصی از همه‌ی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات تکمیل شود، تعریف کرد. M_{max} در اصل به توزیع لاگ نرمال مربوط می‌شود و ۹۰امین و ۹۵امین نقطه درصدی اغلب برای این مقدار در نظر گرفته می‌شود که در شکل ۱۳-۶ نشان داده شده است و به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$M_{\max} = \text{antilog}\left(\overline{\log Mct}\right) + Z\,\sigma_{\log Mct_i}) \qquad (۹-۱۳)$$

که در آن $\overline{\log Mct}$ میانگین لگاریتم‌های Mct_i، Z مقدار مربوط به نقطه درصدی مشخص که M_{max} در آن تعریف شده است (جدول ۱۳-۴، برای ۹۵٪ این مقدار ۱/۶۵- است)، و

$$\sigma_{\log Mct_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\log Mct_i\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\log Mct_i\right)^2 / n}{n-1}} \qquad (۱۰-۱۳)$$

یا انحراف معیار لگاریتم‌های میانگین زمان‌های تعمیر، Mct_i است.

برای مثال، M_{max} در نقطه درصدی ۹۵ام برای داده‌های نمونه در جدول ۱۳–۵ به‌صورت زیر تعیین شده است

$$M_{\max} = \text{antilog}\left[\log \bar{Mct} + (1.65)\sigma_{\log Mct_i}\right] \qquad (۱۱–۱۳)$$

که در آن، با مراجعه به معادله ۱۳–۱۰ و جدول ۱۳–۶

$$\sigma_{\log Mct_i} = \sqrt{\frac{78.785 - (43.315)^2 / 24}{23}} = 0.163$$

با جایگزینی فاکتور انحراف معیار و مقدار میانگین در معادله ۱۳–۱۱ داریم

$$M_{\max} = \text{antilog}\left[\log \bar{Mct} + (1.65)(0.163)\right]$$
$$\text{antilog}(1.805 + 0.269) = 119$$

اگر زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات دارای توزیع لاگ نرمال باشد، M_{max} نمی‌تواند به‌طورمستقیم با استفاده از مقادیر مشاهده شده نگه‌داری و تعمیرات به‌دست آید. با این حال، با محاسبه لگاریتم هر یک از مقادیر تعمیر، توزیع به‌دست آمده نرمال شده و استفاده از داده‌ها برای حالت نرمال را تسهیل می‌کند.

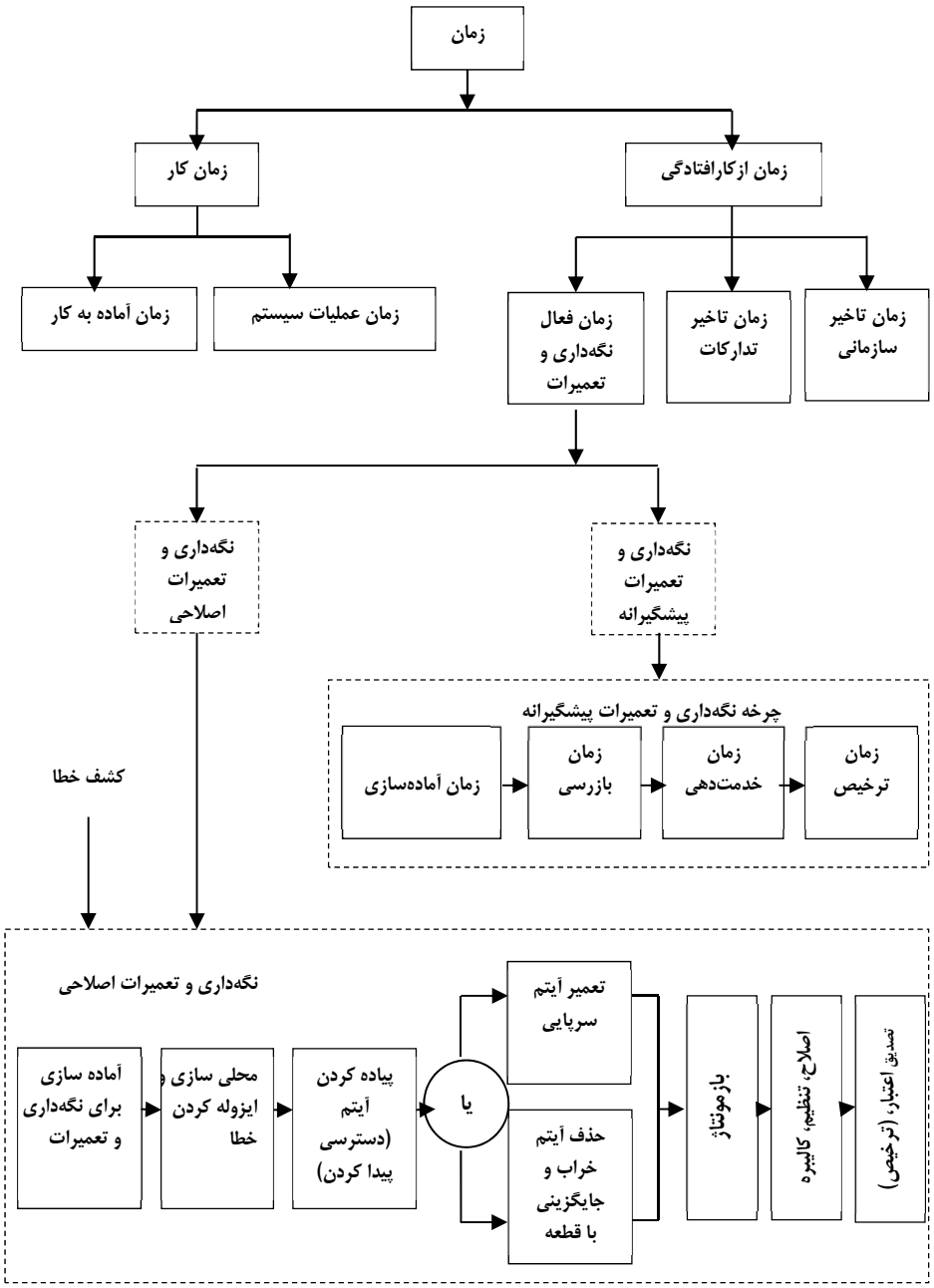
زمان تاخیر تدارکات (LDT). زمان تاخیر تدارکات به زمان از کار افتادگی نگه‌داری و تعمیراتی اطلاق می‌شود که در نتیجه انتظار برای در دسترس قرار گرفتن یک قطعه یدکی، انتظار برای دسترسی‌پذیری یک آیتم در تجهیز آزمایشی برای انجام نگه‌داری و تعمیرات، انتظار برای حمل و نقل، انتظار برای یک تسهیل موردنیاز برای نگه‌داری و تعمیرات و غیره، ایجاد می‌شود. LDT

شامل زمان فعال نگه‌داری و تعمیرات نمی‌شود اما یک عنصر اصلی در زمان از کار افتادگی نگه‌داری و تعمیرات (MDT) را تشکیل می‌دهد.

زمان تاخیر سازمانی (ADT)**.** زمان تاخیر سازمانی به آن قسمت از زمان از کارافتادگی اطلاق می‌شود که نگه‌داری و تعمیرات برای دلایلی که طبیعتی سازمانی دارد (مانند اولویت تخصیص کارکنان، اعتصاب نیروی کار، محدودیت‌های سازمانی و غیره) به تاخیر می‌افتد. ADT شامل زمان نگه‌داری و تعمیرات نمی‌شود، ولی قسمت مهمی از کل زمان ازکارافتادگی نگه‌داری و تعمیرات را شامل می‌شود (MDT).

زمان از کار افتادگی نگه‌داری و تعمیرات (MDT)**.** زمان ازکارافتادگی نگه‌داری و تعمیرات شامل کل زمان سپری شده (هنگامی که سیستم عملیاتی نباشد) موردنیاز برای تعمیر و بازگرداندن سیستم به وضعیت کاملا عملیاتی، یا برای حفظ سیستم در آن وضعیت گفته می‌شود. MDT شامل $\bar{M}$، LDT و ADT می‌شود. مقدار میانگین از زمان‌های سپری شده محاسبه شده برای هر وظیفه و فراوانی مربوطه محاسبه می‌شود (مانند رویکرد مورد استفاده در تعیین $\bar{M}$).

در نهایت، شکل ۱۳–۷ روابط فاکتورهای مختلف زمان از کار افتادگی را به تصویر کشیده است.



شکل ۱۳- ۷- دید ترکیبی به فاکتورهای زمان کار و زمان ازکارافتادگی.

۱۳-۲-۲- فاکتورهای نفر ساعت نگه‌داری و تعمیرات

فاکتورهای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات که در پاراگراف‌های قبل پوشش داده شد، مربوط به زمان‌های سپری شده است. اگرچه زمان‌های سپری شده در عملکرد نگه‌داری و تعمیرات به شدت مهم هستند، اما باید نفر ساعت نگه‌داری و تعمیرات که در فرایند صرف می‌شود نیز مدنظر قرار گیرد. زمان‌های سپری شده (در بسیاری از موارد) می‌توانند با اعمال منابع انسانی اضافی برای انجام یک فعالیت خاص کاهش یابد. با این حال، ممکن است این موضوع یک موازنه‌ی گران‌قیمت باشد، به ویژه زمانی که مهارت‌های سطح بالا برای انجام وظایفی نیاز باشد که زمان انجام کار را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات با سادگی و اقتصادی بودن عملکرد نگه‌داری و تعمیرات سر و کار دارد. به‌عنوان نمونه، یکی از اهداف به‌دست آوردن هماهنگی مناسب بین زمان سپری شده، زمان نیروی کار، و مهارت‌های کارکنان با کم‌ترین هزینه نگه‌داری و تعمیرات است.

وقتی شاخص‌های قابلیت اطمینان درنظر گرفته می‌شود، نه تنها فاکتورهایی مانند $\bar{M}ct$ و MDT باید بررسی شود، بلکه عناصر نیروی کار– زمان نیز باید مدنظر باشد. بنابراین، شاخص‌های دیگری مانند موارد به‌کار گرفته می‌شود:

۱. نفر ساعات نگه‌داری و تعمیرات در هر ساعت عملیاتی سیستم (MLH/OH).
۲. نفر ساعات نگه‌داری و تعمیرات در هر چرخه عملیاتی سیستم (MLH/cycle).
۳. نفر ساعات نگه‌داری و تعمیرات در هر ماه (MLH/month).
۴. نفر ساعات نگه‌داری و تعمیرات در هر فعالیت نگه‌داری (MLH/MA).

هر کدام از این فاکتورها را به‌صورت مقادیر میانگین می‌توان مشخص کرد. برای مثال، $\overline{MLH}_c$ میانگین نفرساعات نگه‌داری و تعیمرات اصلاحی است که به‌صورت زیر نشان داده می‌شود

$$\overline{MLH}_c = \frac{\left(\sum \lambda_i\right)\left(MLH_i\right)}{\Sigma \lambda_i} \qquad (۱۲-۱۳)$$

که در آن λ_i نرخ خرابی i امین آیتم (خرابی‌ها در ساعت) بوده و MLH_i میانگین نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات لازم برای تعمیر i امین قطعه است.

به‌علاوه، مقادیر برای میانگین نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه و میانگین کل نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات (تا نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی را شامل شود) به روش مشابه می‌توان محاسبه کرد. این مقادیر را می‌توان برای هر سطح نگه‌داری و تعمیرات پیش‌بینی کرد در تعیین نیازمندی‌های پشتیبانی و هزینه‌های همراه به کار گرفت.

۱۳-۲-۳- فاکتورهای فراوانی نگه‌داری و تعمیرات

قسمت ۱۲-۲ شاخص‌های قابلیت اطمینان شامل MTBF و λ به‌عنوان فاکتورهای کلیدی را پوشش می‌دهد. بر پایه مباحثی که تاکنون بررسی شده، واضح است که قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات ارتباط نزدیکی با هم دارند. فاکتورهای قابلیت اطمینان، MTBF و λ، پایه و اساس تعیین فراوانی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی است. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات با خصوصیات طراحی سیستم مربوط به حداقل کردن نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی برای سیستم هنگامی که در وضعیت عملیاتی فرض می‌شود، سر و کار دارد. بنابراین، در این حوزه، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات برای یک سیستم معلوم باید با هم انطباق داشته و یکدیگر را پشتیبانی کنند.

علاوه‌بر جنبه نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی پشتیبانی سیستم، قابلیت اطمینان با خصوصیات طراحی که نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه را کمینه می‌کند سر و کار دارد. برخی اوقات، نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه برای بهبود قابلیت اطمینان (کاهش خرابی‌ها با مشخص کردن تعویض قطعات منتخب در زمان‌های معین شده) اضافه می‌گردد. با این حال، می‌توان بر نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه به میزان نزدیکی کنترل داشت. علاوه‌بر این، انجام بیش از حد نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه (مخصوصا برای سیستم‌ها یا محصولات پیچیده) اغلب اثری منفی بر قابلیت اطمینان سیستم خواهد داشت. بنابراین، یک از اهداف قابلیت نگه‌داری و تعمیرات فراهم کردن تعادل مناسب بین نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه با کم‌ترین هزینه کل است.

میانگین زمان بین نگه‌داری و تعمیرات (MTBM)**.** MTBM میانگین یا متوسط زمان بین همه فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات (اصلاحی و پیشگیرانه) بوده و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$MTBM = \frac{1}{1/MTBM_u + 1/MTBM_s} \qquad (۱۳-۱۳)$$

که در آن $MTBM_u$ بازه متوسط نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده (اصلاحی) و $MTBM_s$ بازه متوسط نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده (پیشگیرانه) است. $MTBM_u$ و $MTBM_s$ نرخ‌های نگه‌داری و تعمیرات را در قالب فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات در هر ساعت عملیات سیستم تشکیل می‌دهند. $MTBM_u$ باید MTBF را تقریب بزند، با این فرض که یک نرخ ترکیبی خرابی شامل خرابی‌های ذاتی و اصلی، خرابی‌های وابسته، خطاهای تولیدی، خرابی‌های ناشی اپراتور و نگه‌داری و تعمیرات و غیره (جدول ۱۲-۱) شود، استفاده شده باشد.

میانگین زمان بین تعویض‌ها (MTBR). MTBR، فاکتوری از MTBM، به متوسط زمان بین تعویض‌های آیتم اطلاق می‌شود و یکی از پارامترهای اصلی در تعیین نیازمندی‌های قطعات یدکی است. در بسیاری از موقعیت‌ها، فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه بدون ایجاد نیازمندی برای تعویض قطعه انجام می‌شود (شکل ۱۲–۶). در بقیه موارد، تعویض آیتم موردنیاز است که به‌نوبه‌ی خود در دسترس بودن یک قطعه یدکی و یک نیازمندی موجودی را الزام می‌دارد. به‌علاوه، پشتیبانی سطوح بالاتر نگه‌داری و تعمیرات (سطوح مبدا و میانی) ممکن است موردنیاز باشد.

در حقیقت، MTBR یک فاکتور با اهمیت است که در هر دو فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی شامل تعویض قطعه حضور داشته و پارامتری کلیدی در تعیین نیازمندی‌های پشتیبانی تدارکات است. یکی از اهداف قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی سیستم حداکثر کردن MTBR (یا حداقل کردن تعداد تعویض‌ها تا حد ممکن) است.

۱۳–۲–۴– فاکتورهای هزینه نگه‌داری و تعمیرات

برای بسیاری از سیستم‌ها/محصولات، هزینه نگه‌داری و تعمیرات بخش بزرگی از کل هزینه چرخه‌ی عمر را تشکیل می‌دهد. به‌علاوه، تجربه نشان می‌دهد که هزینه نگه‌داری و تعمیرات به شدت تحت تاثیر تصمیم‌های طراحی است که در مراحل اولیه توسعه‌ی سیستم گرفته می‌شود. بنابراین ضروری است که کل هزینه چرخه‌ی عمر به‌عنوان یک پارامتر اصلی طراحی همراه با تعریف نیازمندی‌های عملیات سیستم در نظر گرفته شود (به قسمت‌های ۳–۴ و ۳–۵ مراجعه کنید).

یکی از مباحث مهم این فصل، جنبه اقتصادی در عملکرد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات است. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به‌طورمستقیم با خصوصیاتی از طراحی سیستم سر و کار دارد که در نهایت منجر به انجام نگه‌داری و تعمیرات با کم‌ترین هزینه کل می‌شود.

هنگامی که هزینه نگه‌داری و تعمیرات در نظر گرفته می‌شود، موارد هزینه‌ای زیر می‌توانند معیارهای مناسبی در طراحی سیستم باشند:

۱. هزینه هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات ($/MA).
۲. هزینه نگه‌داری و تعمیرات در هر ساعت عملیات سیستم ($/OH).
۳. هزینه نگه‌داری و تعمیرات در ماه ($/month).
۴. هزینه نگه‌داری و تعمیرات هر ماموریت یا قسمتی از ماموریت ($/mission).
۵. نسبت هزینه نگه‌داری و تعمیرات به کل هزینه چرخه‌ی عمر.

جنبه‌های مختلفی از نگه‌داری و تعمیرات و هزینه‌های مرتبط در فصل ۱۷ به تفصیل بحث شده است.

۱۳-۲-۵- فاکتورهای نگه‌داری و تعمیرات مربوطه

بدیهی است که از مفهوم نگه‌داری و تعمیرات سیستم در قسمت ۳-۵ که تعداد زیادی فاکتورهای دیگر وجود دارد که ارتباط نزدیک یا وابستگی زیادی به شاخص‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات تشریح شده دارند. این موارد شامل فاکتورهای مختلف تدارکات مانند موارد زیر می‌شود:

۱. پاسخ‌دهی تامین یا احتمال در دسترس بودن یک قطعه یدکی هنگامی که نیاز است، نرخ‌های تقاضای قطعات یدکی، زمان‌های تحویل آن‌ها برای آیتم‌ها، سطوح موجودی و غیره.
۲. اثربخشی تجهیزات آزمایش و پشتیبانی (قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری تجهیزات آزمایش)، بهره‌برداری از تجهیزات آزمایش، کامل بودن آزمایش سیستم و غیره.
۳. دسترسی‌پذیری و بهره‌برداری از تسهیل نگه‌داری و تعمیرات.
۴. مدهای حمل و نقل، زمان‌ها بین تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات و فراوانی.

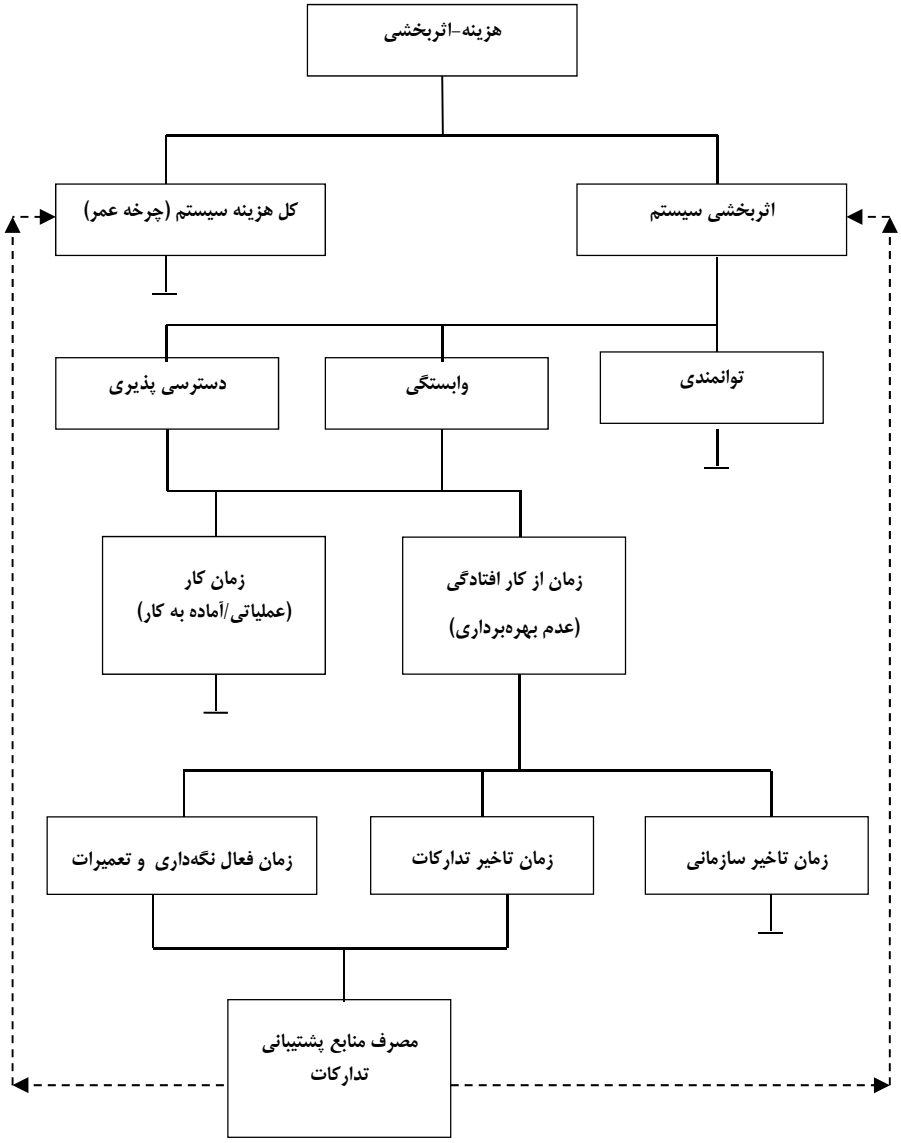
۵. اثربخشی سازمانی نگه‌داری و تعمیرات و کارایی کارکنان.

۶. ظرفیت، زمان و فراوانی پردازش اطلاعات و داده‌ها.

تعداد زیادی از دیگر فاکتورهای تدارکات و زنجیره تامین وجود دارد که باید معین، اندازه‌گیری و کنترل شود تا ماموریت نهایی سیستم اجرا گردد. برای نمونه، تعیین یک نیازمندی $\bar{M}ct$ ۱۵ دقیقه‌ای برای یک عنصر اصلی سیستم کاملا سوال برانگیز است اگر احتمال داشتن قطعه یدکی در صورت نیاز اندک باشد (که احتمالا منجر به یک زمان تاخیر تدارکات طولانی می‌شود)؛ اگر سازمان‌دهی نگه‌داری و تعمیرات به خوبی نفرگیری نشده باشد یا برای انجام وظیفه موردنیاز در دسترس نباشد، مشخص کردن نیازمندی‌های نفر ساعت نگه‌داری و تعمیرات ممکن است مناسب نباشد. اگر قابلیت اطمینان پیش‌بینی شده تجهیز آزمایش کم‌تر از قابلیت اطمینان تجهیز مورد آزمایش باشد، تعیین نیازمندی زمان آزمایش سیستم ممکن است نادرست باشد و غیره.

مثال‌های زیادی وجود دارد که در آن‌ها تعاملات بین سیستم اصلی و عناصر پشتیبانی آن حیاتی هستند و هر دو حوزه باید در استقرار نیازمندی‌های سیستم طی طراحی مفهومی مدنظر قرار گیرد. به‌علاوه، نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات برای یک سیستم مشخص باید در مورد آثار بر روی دیگر سیستم‌ها و آثار دیگر سیستم‌ها بر روی سیستم هنگامی که وظایف مشترک وجود دارد (شکل ۳-۲۴) و هنگامی که سیستم در ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS) قرار دارد (شکل ۳-۱۳) مدنظر قرار گیرد.

قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به‌عنوان یک خصوصیت در طراحی، ارتباط نزدیکی با حوزه پشتیبانی سیستم دارد زیرا نتایج به‌دست آمده از قابلیت نگه‌داری وتعمیرات به‌طورمستقیم بر نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات اثرگذار است. بنابراین، هنگامی که فاکتورهای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات مشخص می‌شوند، نیازمندی‌های کمی و کیفی برای پشتیبانی سیستم در تعیین آثار یک حوزه بر دیگر حوزه‌ها باید مورد بررسی قرار گیرند.



شکل ۱۳- ۸- رابطه بین زمان از کاراتفادگی نگه‌داری، تعمیرات و فاکتورهای تدارکات.

با مراجعه به شکل ۱۳–۸، یک رابطه بالا به پایین و پایین به بالا وجود دارد. برای برآورده کردن نیازمندی‌های زمان نگه‌داری و تعمیرات تعیین شده، زیربنای پشتیبانی باید به درستی در جای خود قرار داده شده باشد. این موضوع به‌نوبه‌ی خود می‌تواند یک اثر بازخوردی بر اثربخشی و هزینه کلی سیستم داشته باشد. به‌علاوه، اگر زیربنای پشتیبانی ایده‌آل نباشد، برخی اصلاحات دیگر در طراحی عناصر اصلی سیستم موردنیاز خواهد بود یا باید قسمت‌هایی به ساختار پشتیبانی اضافه شود (به‌طور مثال قطعات یدکی، کارکنان و تجهیزات آزمایش بیش‌تر). نتایج به‌دست آمده ممکن است پرهزینه باشند. فاکتورهای پشتیبانی تدارکات در فصل ۱۵ بیش‌تر بحث خواهند شد.

۱۳–۳– شاخص‌های دسترسی‌پذیری و اثربخشی

از شاخص‌های نگه‌داری وتعمیرات (تشریح شده در قسمت ۱۲–۲) و شاخص‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (تشریح شده در قسمت ۱۳–۲)، در این جا به بررسی برخی از شاخص‌های سطح بالاتر برای کل سیستم شامل شاخص *دسترسی‌پذیری* و شاخص *اثربخشی* سیستم پرداخته می‌شود.

دسترسی‌پذیری (A). دسترسی‌پذیری به سه شکل زیر قابل تعریف است.

۱. *دسترسی‌پذیری ذاتی* (A_i). دسترسی‌پذیری ذاتی "احتمال آن که یک سیستم یا تجهیز، هنگامی که تحت شرایط معین و در محیطی که به‌صورت *ایده‌آل* پشتیبانی می‌شود (یعنی ابزار، قطعات یدکی، کارکنان نگه‌داری و تعمیرات و غیره به راحتی در دسترس باشند)، به‌صورتی مطلوب در یک نقطه زمانی در صورت نیاز عملیات خود را انجام دهد." تعریف می‌شود. این تعریف شامل فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه یا زمان‌بندی شده، زمان تاخیر تدارکاتی و سازمانی نمی‌شود و به‌صورت زیر بیان می‌گردد

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + \bar{M}ct} \qquad (۱۳–۱۴)$$

که در آن MTBF میانگین زمان بین خرابی و $\bar{M}ct$ میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی است. عبارت $\bar{M}ct$ معادل میانگین زمان تا تعمیر (MTTR) است.

۲. *دسترسی‌پذیری به‌دست آمده* (A_a). دسترسی‌پذیری به‌دست آمده "احتمال آن که یک سیستم یا تجهیز، هنگامی که تحت شرایط بیان شده در محیط *ایده‌آل* پشتیبانی (یعنی ابزار، قطعات یدکی، کارکنان و غیره به‌راحتی در دسترس باشند)، به‌صورتی مطلوب دریک نقطه زمان عملیات خود را انجام می‌دهند." تعریف می‌شود. این تعریف مشابه تعریف A_i، به‌جز آنکه نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه یا زمان‌بندی شده در آن قرار داده می‌شود. زمان تاخیری تدارکاتی و سازمانی از آن حذف شده‌اند و به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} \qquad (۱۳-۱۵)$$

که در آن MTBM میانگین زمان بین نگه‌داری و تعمیرات و $\bar{M}$ میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات فعال است. MTBM و $\bar{M}$ به ترتیب توابع فعالیت‌ها و زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه هستند.

۳. *دسترسی‌پذیری عملیاتی* (A_0). دسترسی‌پذیری عملیاتی "احتمال آن که یک سیستم یا تجهیز، هنگامی که تحت شرایط بیان شده در محیط *واقعی* پشتیبانی (یعنی ابزار، قطعات یدکی، کارکنان و غیره به راحتی در دسترس باشند)، به‌صورتی مطلوب دریک نقطه زمانی عملیات خود را انجام می‌دهد." تعریف می‌شود و می‌توان به‌صورت زیر آن را نمایش داد

$$A_0 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \qquad (۱۳-۱۶)$$

که در آن MDT میانگین زمان از کار افتادگی است. در مقابل MTBM فراوانی نگه‌داری و تعمیرات وجود دارد که به‌نوبه‌ی خود فاکتور مهمی در تعیین نیازمندی‌های پشتیبانی تدارکات است. MDT شامل زمان فعال نگه‌داری و تعمیرات، زمان تاخیر تدارکاتی و زمان تاخیر سازمانی می‌شود.

عبارت *دسترسی‌پذیری* در موقعیت‌های مختلف به‌صورت متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است. اگر نیاز باشد که دسترسی‌پذیری به‌عنوان شاخصی در یک نیازمندی طراحی برای یک تامین‌کننده‌ی مشخص تجهیزات باشد و تامین‌کننده هیچ کنترلی بر محیط عملیاتی که تجهیزات در آن کار می‌کنند، نداشته باشد، آنگاه A_a و A_i می‌توانند شاخص‌هایی مناسب برای ارزیابی تامین‌کننده‌ی تجهیزات باشند. برعکس، اگر یک سیستم در محیط عملیاتی واقعی باید ارزیابی شود، آنگاه A_0 شاخص ارجح‌تری به‌منظور ارزیابی خواهد بود. به‌علاوه، دسترسی‌پذیری را می‌توان در هر نقطه در پروفایل کلی ماموریت که نمایانگر یک نقطه تخمینی بوده یا می‌تواند به‌صورتی مناسب‌تر به بخشی معینی از ماموریت که در آن نیازمندی‌ها از دیگر بخش‌های ماموریت متفاوت هستند، اعمال شود. بنابراین، باید به دقت تعریف شود که منظور از "دسترسی‌پذیری" چیست و چگونه اعمال می‌شود. در هر رخداد، قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات فاکتورهای اصلی در تعیین دسترسی‌پذیری سیستم هستند.

اثربخشی سیستم (SE). اثربخشی سیستم را می‌توان به‌صورت "احتمال آن‌که یک سیستم بتواند نیاز عملیاتی سیستم را در یک زمان مشخص تحت شرایط عملیاتی مشخص برآورده کند" یا "توانمندی یک سیستم در انجام کار مورد انتظار از آن" تعریف شود. *اثربخشی سیستم*، مانند دسترسی‌پذیری عملیاتی، عبارتی است که در یک حوزه‌ی جامع‌تر به کار رفته است تا خصوصیات فنی یک سیستم (یعنی عملکرد، دسترسی‌پذیری، قابلیت پشتیبانی، قابلیتی وابستگی و غیره) را منعکس کرده و می‌تواند بسته به ماموریت کاربردی تعیین شده تعریف شود. برخی اوقات یک

شاخص برای نمایش اثربخشی سیستم استفاده می‌شود و برخی اوقات چند شاخص می‌توان به کار برد. هدف، منعکس کردن صفات طراحی سیستم و عناصر پشتیبانی تدارکات است (شکل ۱۳–۹).

هزینه–اثربخشی (CE). *هزینه–اثربخشی* مربوط به اندازه‌گیری یک سیستم در قالب برآورده شدن ماموریت (اثربخشی سیستم) و کل هزینه چرخه‌ی عمر می‌تواند به روش‌های مختلفی بیان شود که بستگی به ماموریت یا پارامترهای سیستم دارد که باید ارزیابی شود. در حقیقت، هزینه–اثربخشی عبارتست از عناصر نمایش داده شده در شکل ۱۳–۹ و می‌توان آن را از طریق معادلات ۱۳–۱۷ تا ۱۳–۲۱ بیان شود. قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات فاکتورهای اصلی در تعیین هزینه اثربخشی یک سیستم است.

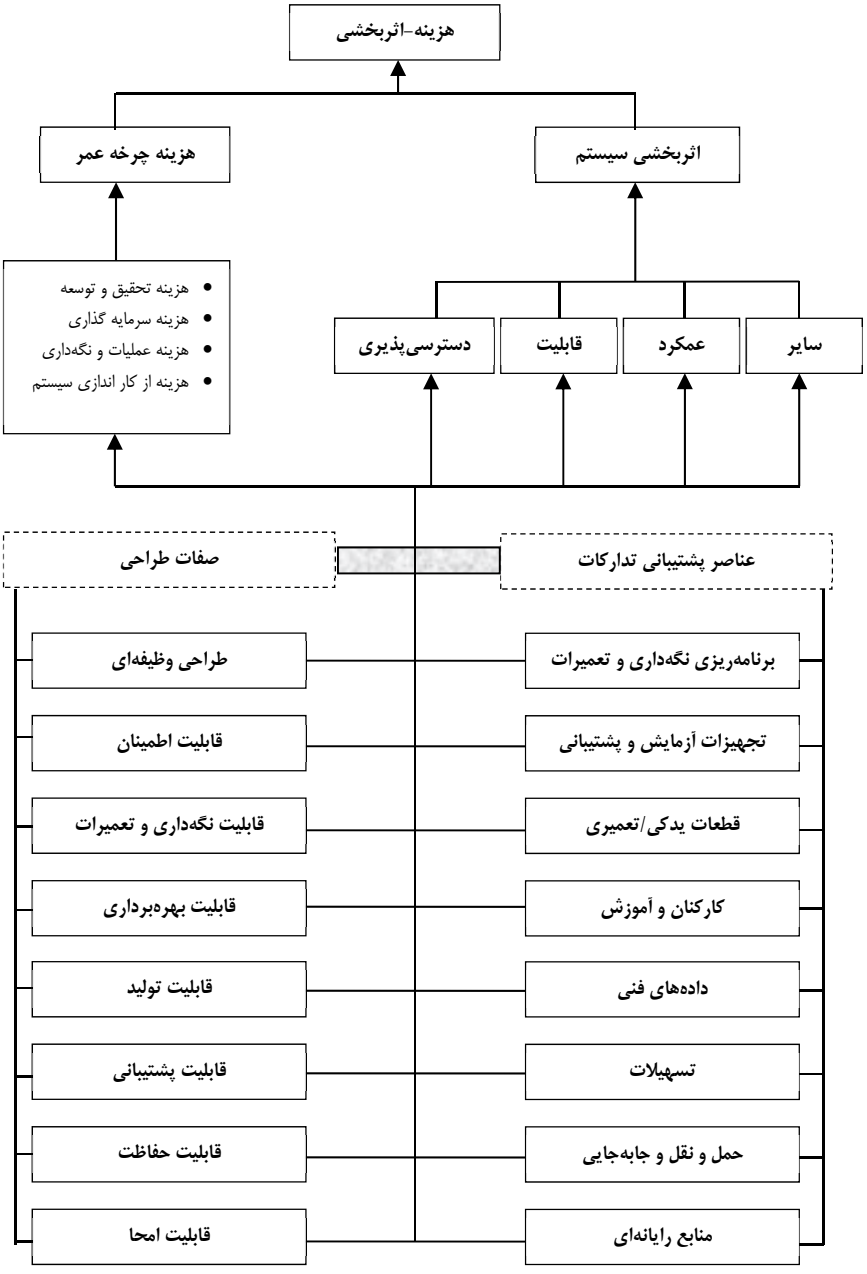
$$FOM = \frac{\text{system benefits}}{\text{life-cycle cost}} \qquad (۱۳–۱۷)$$

$$FOM = \frac{\text{system capacity}}{\text{life-cycle cost}} \qquad (۱۳–۱۸)$$

$$FOM = \frac{\text{system effectiveness}}{\text{life-cycle cost}} \qquad (۱۳–۱۹)$$

$$FOM = \frac{\text{availability}}{\text{life-cycle cost}} \qquad (۱۳–۲۰)$$

$$FOM = \frac{\text{supportability}}{\text{life-cycle cost}} \qquad (۱۳–۲۱)$$

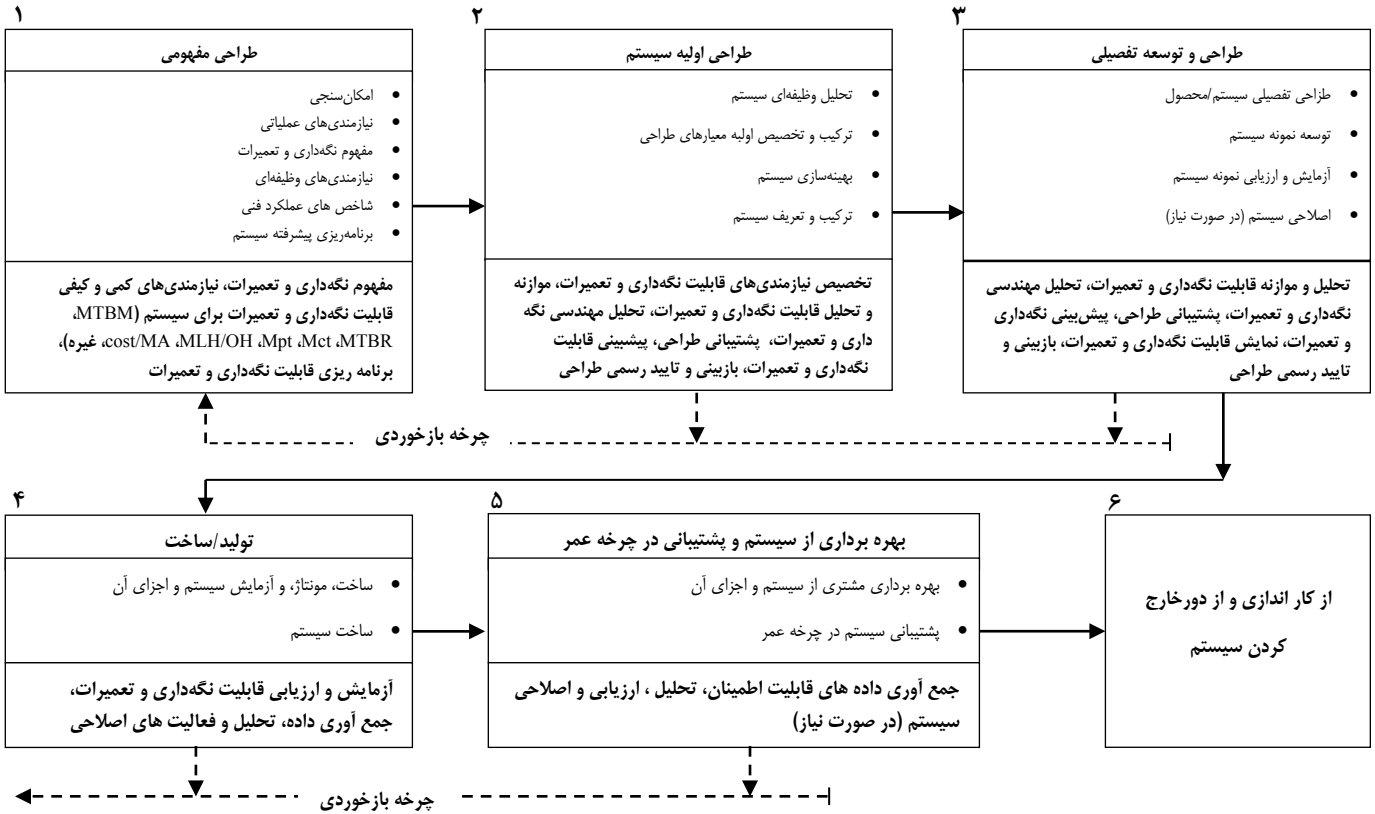


شکل ۱۳- ۹- عناصر اثربخشی.

۱۳-۴- قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در چرخه‌ی عمر سیستم

قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، مانند قابلیت اطمینان باید به‌عنوان یکی از ملاحظات اصلی طی فرایند مهندسی سیستم‌ها در نظر گرفته شده و طی فاز طراحی مفهومی آغاز شود. با مراجعه به شکل ۱۳-۱۰ (که تعمیم شکل ۲-۳ است)، نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات کمی و کیفی از طریق تحلیل امکان‌سنجی (قسمت ۳-۳)، توسعه‌ی نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم قابلیت اطمینان (قسمت‌های ۳ -۴ و ۳-۵)، و شناسایی و اولویت‌بندی TPMها (قسمت ۳-۶) توسعه می‌یابند. شاخص‌های کاربردی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات باید استقرار یابند، اهمیت آن‌ها نسبت به دیگر شاخص‌ها معین شوند و نیازمندی‌های طراحی باید از طریق توسعه‌ی DDPهای مناسب شناسایی گردند (شکل ۲-۷).

با داشتن مشخصات فنی نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در بلوک۱شکل (که درمشخصات فنی سیستم نوع A نیز وجود دارد — به قسمت ۳-۹ مراجعه کنید)، گام بعدی تکامل از تحلیل وظیفه‌ای (شناسایی وظایف نگه‌داری و تعمیرات) تا سطح زیرسیستم و پایین‌تر از آن به‌عنوان بخشی از فرایند تخصیص سیستم می‌باشد که در قسمت ۴-۲ بحث شد. با داشتن نیازمندی‌های اصلی تعریف شده، از طریق فرایند تکرار شونده ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم (شکل ۲-۱۰) به مرحله بعدی وارد می‌شویم. برای تسهیل این فرایند، روش‌ها و متدهای تحلیل متفاوتی وجود دارد که می‌توانند به‌طور اثربخشی در طراحی اولیه و تفصیلی مورد استفاده قرار گیرند (بلوک ۲ و ۳ شکل ۱۳-۲۱). با پیشرفت طراحی و توسعه مدل‌های فیزیکی، فرایند پیوسته ارزیابی اتفاق افتاده و آزمایش نمایش ارزیابی توانمندی به‌عنوان بخشی از فعالیت آزمایش و ارزیابی کل سیستم که در فصل ۶ تشریح شد انجام می‌گیرد.



شکل ۱۳- ۱۰- نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در چرخه عمر سیستم

۱۳-۴-۱- نیازمندی‌های سیستم

هر سیستمی برای پاسخ به یک نیاز یا انجام برخی وظایف پیش‌بینی شده توسعه می‌یابد. اثربخشی انجام این وظیفه توسط سیستم شاخص نهایی مطلوبیت و ارزش سیستم برای مشتری است. این اثربخشی ترکیبی از عملکرد، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات و دیگر فاکتورهاست. در حقیقت، قابلیت اطمینان فاکتور عمده‌ای در تعیین مفید بودن سیستم است.

نیازمندی‌های قابلیت اطمینان برای یک سیستم، که به‌صورت کمی و کیفی تعیین می‌شوند، به‌عنوان بخشی از نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات که در قسمت‌های ۳-۴ و ۳-۵ تشریح شد تعریف می‌شوند. موارد مهم زیر مدنظر هستند:

۱. تعریف فاکتورهای عملکرد سیستم، پروفایل ماموریت و نیازمندی‌های بهره‌برداری از سیستم (شرایط بهره‌برداری، چرخه‌های کار و این‌که سیستم چگونه باید عملیات خود را انجام دهد).

۲. تعریف چرخه‌ی عمر عملیاتی (زمان پیش‌بینی شده‌ای که سیستم موجود بوده و در حالت عملیاتی است).

۳. تعریف مفهوم پایه‌ای نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی سیستم (سطوح نگه‌داری و تعمیرات پیش‌بینی شده، مسئولیت‌های نگه‌داری و تعمیرات، وظایف اصلی در هر سطح، و عناصر اصلی پشتیبانی تدارکات در هر سطح – انواع قطعات یدکی، تجهیزات آزمایش، مهارت‌های کارکنان، تسهیلات و غیره)

۴. تعریف محیطی که سیستم قرار است عملیات خود را انجام داده و در آن نگه‌داری شود (دما، رطوبت، ارتعاش، گرمسیری یا سردسیری، کوهستانی یا دشت هموار، غیره). این

موضوع شامل بازه‌ای از مقادیر می‌شود و باید محیط تجربه شده برای همه مدهای حمل و نقل، جابه‌جایی و انبارش را پوشش دهد.

با داشتن اطلاعات بالا، تعیین می‌شود که کدام خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات باید در طراحی سیستم لحاظ شود. اگر نیازمندی‌های عملیاتی مشخص کنند که سیستم باید ۹۰٪ از زمان‌ها درحال کار باشد و قابلیت اطمینان سیستم پایین باشد، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان سیستم باید سخت‌گیرانه‌تر باشد تا دسترسی‌پذیری کلی سیستم را در سطح ۹۰٪ حفظ کند. برعکس، اگر قابلیت اطمینان بالا باشد (و در نتیجه خرابی‌های اندکی پیش‌بینی شود)، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان متفاوت خواهد بود. به‌علاوه، اگر مفهوم نگه‌داری و تعمیرات تعیین کند که تنها سطح سازمانی و مبدا مجاز هستند، آنگاه نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات ممکن است با حالتی که همه سه سطح نگه‌داری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده وجود دارد، کاملا متفاوت باشد. در هر رخداد، نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات کمی و کیفی باید بر پایه ملاحظات بالا برای سیستم تعریف شوند. اغلب نیازمندی‌های کمی به‌صورت MTBM, MTBR, M, Mct, Mpt, MDT, MLH/OH, $/MA یا ترکیبی از آن‌ها بیان می‌شوند.

در تعیین قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، ابتدا باید نیازمندی‌های اصلی سیستم از سطح بالای نمودار جریان وظیفه‌ای (قسمت ۳–۷) شناسایی شوند. این وظایف در صورت نیاز برای اهداف تعریف سیستم گسترش یافته و یک طرح وظیفه‌ای شناسایی می‌شود. نمودار وظیفه‌ای نگه‌داری و تعمیرات توسعه یافته، وظایف مهم نگه‌داری و تعمیرات تعریف شده و نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات برای وظایف مناسب نگه‌داری و تعمیرات و بسته‌های وظیفه‌ای متنوع سیستم استقرار می‌یابند. این کار یک فرایند تکرار شونده از تعریف نیازمندی‌ها است.

۱۳-۴-۲- تخصیص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

پس از آن‌که نیازمندی‌ها برای سیستم استقرار یافت، لازم است که این نیازمندی‌ها به معیارهای طراحی در سطح پایین تبدیل شوند و این کار توسط تخصیص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات انجام می‌شود و به‌عنوان بخشی از فرایند تخصیص نیازمندی‌های سیستم که در قسمت ۴-۳-۲ تشریح شد، صورت می‌گیرد.

به‌منظور نمایش این موضوع، سیستم XYZ (با ساختاری مشابه شکل (۴-۶) را فرض کنید که باید برای برآورده کردن یک نیازمندی دسترسی‌پذیری ذاتی ۰/۹۹۸۹، MTBF ۴۵۰ ساعته و یک MLH/OH (برای نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی) ۰/۲ داشته و نیاز است که $\bar{M}ct$ و MLH/OH در سطح مونتاژ تخصیص یابد. از معادله ۱۳-۱۴ داریم

$$\bar{M}ct = \frac{MTBF\left(1-A_i\right)}{A_i} \qquad (۲۲-۱۳)$$

یا

$$\bar{M}ct = \frac{450\left(1-0.9989\right)}{0.9989} = 0.5$$

بنابراین، نیازمندی $\bar{M}ct$ برابر با ۰/۵ ساعت است و این نیازمندی باید به واحد A تا C و مونتاژهای هر کدام از این واحدها تخصیص داده شود. فرایند تخصیص از طریق استفاده از یک قالب مشابه آنچه در جدول ۱۳-۷ آمده است، تسهیل می‌شود.

با مراجعه به شکل ۱۳-۷، هر نوع و تعداد آیتم‌ها (Q) در هر ساختار سیستم تعیین شده است. فاکتورهای قابلیت اطمینان تخصیص داده شده در ستون ۳ و درجه‌ای که نرخ خرابی هر واحد در نرخ خرابی کل مشارکت دارد (که با C_f نشان داده شده است) در ستون ۴ وارد گردیده است.

میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی برای هر واحد تخمین زده شده و در ستون ۶ قرار داده شده است. این زمان‌ها بر پایه خصوصیات ذاتی طراحی تجهیز قرار دارد که در این نقطه از چرخه‌ی عمر سیستم مجهول است. بنابراین، زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی با استفاده از یک فاکتور پیچیده که توسط نرخ خرابی مشخص می‌شود استخراج شده است. به‌عنوان یک هدف، آیتمی که بیش‌ترین درصد مشارکت در کل خرابی‌های پیش‌بینی شده را دارد (واحدB در این مورد) نیازمند $\bar{M}ct$ پایین و آن‌هایی که سهم کم‌تری دارند، نیازمند یک $\bar{M}ct$ بالاتر هستند. در مواقع خاص، در نظر گرفتن هزینه‌های طراحی در به‌دست آوردن $\bar{M}ct$ برای یک آیتم پیچیده منجر به یک رویکرد اصلاحی می‌شود که تا زمانی که نتایج نهایی در محدوده نیازمندی کمی قرار می‌گیرد، ممکن است.

مقدار تخمین زده شده از $\bar{M}ct$ برای هر واحد در ستون ۷ وارد شده و مجموع مشارکت همه واحدها را می‌توان برای تعیین $\bar{M}ct$ کل سیستم به‌کار برد

$$\bar{M}ct = \frac{\sum C_t}{\sum C_f} = \frac{1.077}{2.222} = 0.485 \qquad (۲۳-۱۳)$$

در جدول ۱۳-۷، $\bar{M}ct$ محاسبه شده برای سیستم در محدوده‌ی مجاز نیازمندی ۰/۵ ساعته قرار می‌گیرد. مقادیر $\bar{M}ct$ برای واحدها معیار زمان از کارافتادگی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی برای طراحی (DDP) را فراهم کرده و مقادیر در مشخصات فنی طراحی به کار گرفته می‌شوند.

جدول ۱۳- ۷- تخصیص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات برای سیستم XYZ

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
					میانگین زمان	
					نگه‌داری و	مشارکت کل زمان
	تعداد آیتم‌ها	نرخ خرابی	مشارکت کل	درصد مشارکت	تعمیرات	نگه‌داری و تعمیرات
	درهر سیستم	$(\lambda)\times 1000$	خرابی‌ها	$C_p = C_f \sum C_f \times 100$	اصلاحی	اصلاحی
آیتم	(Q)	ساعت	$C_f = (Q)(\lambda)$	(٪)	$(\bar{M}ct)$	$C_t = (C_f)(\bar{M}ct)$
واحد A	۱	۰.۲۴۶	۰.۲۴۶	۱۱	۰.۹	۰.۲۲۱
واحد B	۱	۱.۸۶۶	۱.۸۶۶	۸۴	۰.۴	۰.۷۴۶
واحد C	۱	۰.۱۱۰	۰.۱۱۰	۵	۱.۰	۰.۱۱۰
مجموع			$\sum C_f = 2.222$	۱۰۰		$\sum C_t = 1.077$

$$\bar{M}ct_{XYZ} = \frac{\sum C_t}{\sum C_f} = \frac{1.077}{2.222} = 0.485$$

هنگامی که تخصیص در سطح واحد انجام گرفت، مقادیر حاصل $\bar{M}ct$ می‌توانند به سطوح پایین‌تر تخصیص داده شوند. برای نمونه، مقدار $\bar{M}ct$ ۴ ساعته در واحد B را می‌توان به مونتاژهای ۱ تا ۳ تخصیص داد و رویه تخصیص مشابه آن‌چه در معادله ۱۳–۲۳ ارائه شده است، می‌باشد. به‌عنوان مثال، مقادیر تخصیص داده شده به مونتاژهای واحد B در جدول ۱۳–۸ ارائه شده است.

مقدار $\bar{M}ct$ آن جنبه از زمان سپری شده برای فعالیت‌های بازگردانی سیستم به حالت عملیاتی را پوشش می‌دهد. برخی اوقات این فاکتور هنگامی که با یک نیازمندی قابلیت اطمینان ترکیب می‌شود، برای استقرار خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات لازم در طراحی کافی می‌باشد. در موقعیت‌های دیگر، تعیین $\bar{M}ct$ به تنهایی کافی نیست زیرا ممکن است رویکردهای مختلفی از طراحی وجود داشته باشد که نیازمندی $\bar{M}ct$ را برآورده کند اما لزوما روشی هزینه–اثربخش نباشد. برآورده کردن نیازمندی $\bar{M}ct$ ممکن است باعث افزایش در سطوح مهارت کارکنان نگه‌داری و تعمیرات، افزایش در تعداد کارکنان برای وظایف نگه‌داری و تعمیرات، یا استفاده از تجهیزات خودکار به جای عملیات دستی شود. در چنین مواردی هزینه‌هایی تحمیل می‌شود؛ بنابراین، ممکن است نیاز باشد تا محدودیت‌های دیگری مانند سطح مهارت کارکنان در هر سطح نگه‌داری و تعمیرات و نفرساعات عملیاتی (MLH/OH) برای آیتم‌های مهم، اعمال گردد. به عبارت دیگر، یک نیازمندی می‌تواند الزام ایجاد کند که یک آیتم طوری طراحی شود که بتواند در یک زمان سپری شده مشخص و با تعداد مشخصی از کارکنان که سطح مهارتی معین دارند، تعمیر شود. این موضوع، طراحی را از جنبه قابلیت دسترسی، نیازمندی‌های جابه‌جایی، تدارک تشخیص خطا و غیره تحت تاثیر قرار داده و ممکن است در کل معنادارتر باشد.

فاکتور MLH/OH تابعی از پیچیدگی فعالیت و فراوانی نگه‌داری و تعمیرات است. نیازمندی سطح سیستم بر پایه نفرساعات سیستم، تعداد فعالیت‌های پیش‌بینی شده نگه‌داری و تعمیرات و

تخمینی از تعداد نفرساعات برای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات تخصیص داده می‌شود. داده‌های تجربی هر کجا که ممکن باشد، استفاده می‌شوند.

با دنبال کردن تکمیل تخصیص‌های کمی برای هر سطح از تجهیز، همه مقادیر در شکست وظیفه‌ای در شکل ۴-۶ قرار داده شده‌اند. این شکل یک دید کلی از نیازمندی‌های عمده طراحی سیستم را فراهم می‌کند. وقتی سیستم XYZ در شکل در ساختار SOS کار می‌کند و یک واحد یا مونتاژ مشترک برای موفق بودن عملیات سیستم لازم است (شکل ۳-۲۴)، فرایند تخصیص باید با واحد مشترک به روشی مشابه آن‌چه در تخصیص قابلیت اطمینان در قسمت ۱۲-۳-۳ تشریح شد، رفتار شود.

جدول ۱۳- ۸- تخصیص واحد B

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مونتاژ ۱	۱	۰,۱۱۶	۰,۱۱۶	٪۶	۰,۵	۰,۰۵۸
مونتاژ ۲	۱	۱,۵۵۰	۱,۵۵۰	٪۸۳	۰,۴	۰,۶۲۰
مونتاژ ۳	۱	۰,۲۰۰	۰,۲۰۰	٪۱۱	۰,۳	۰,۰۶۰
مجموع			۱,۸۶۶	٪۱۰۰		۰,۷۳۸

$$\bar{M}ct_B = \frac{\sum C_t}{\sum C_f} = \frac{0.738}{1.866} = 0.395$$ (نیازمندی: ۰,۴ ساعت)

۱۳-۴-۳- انتخاب اجزا

حد درنظر گرفتن خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی نه تنها به طراحی خود اجزا، بلکه به روشی بستگی دارد که این اجزا در ساختار سیستم قرار داده می‌شوند. اهداف مشخص شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. تا جای ممکن اجزا و مواد استاندارد انتخاب کنید. هدف، حداقل کردن تعداد کلی و انواع مختلف اجزا، تعداد و تنوع نیازمندی‌های قطعات یدکی/تعمیری (و موجودی انبار مربوطه) است در حالی‌که از تامین منابع قابل اتکا در چرخه‌ی عمر سیستم اطمینان حاصل می‌شود.

۲. برای آیتم‌های قابل تعمیر، آن‌هایی را انتخاب کنید که ویژگی‌های خود آزمایش داشته و سطح و عمق تشخیص خطا طوری باشد که تکمیل چرخه نگه‌داری و تعمیرات را در حداقل زمان ممکن و بالاتری درجه اطمینان انجام دهد. با مراجعه به شکل ۱۳-۱، اغلب زمان برترین گام‌ها در حوزه‌ی مشخص کردن مکان و نوع خرابی است، مخصوصا درتجهیزات الکترونیکی.

۳. آیتم‌هایی را انتخاب کنید که با ابزار و تجهیزات استاندارد و رایج قابل تعمیر بوده، تسهیلات به‌راحتی در دسترس باشند و نیاز به کارکنان با سطح آموزش و مهارت بالا نداشته باشد.

۴. اطمینان حاصل کنید که درجه مناسبی از قابل دسترس بودن فراهم شده باشد تا شناسایی سریع آیتم تعویضی به‌سرعت اتفاق افتد (یا حوزه‌های نیازمند تعمیر به راحتی قابل دسترس باشند)، توانمندی خارج کردن و تعویض قطعه خراب با یدکی وجود داشته باشد، و بازرسی سیستم برای اطمینان از یک وضعیت عملیاتی مناسب با کم‌ترین نیاز به تنظیم و تصحیح (بدون نیاز به کالیبره کردن) پیرو آن انجام شود. عموما آیتم‌هایی که انتظار می‌رود بیش‌ترین نگه‌داری و تعمیرات را نیاز داشته باشند، باید بیش‌ترین قابلیت دسترسی (یعنی آیتم‌های با نرخ خرابی بالا یا اجزای حیاتی) را داشته باشند.

۵. یک رویکرد وظیفه‌ای مقیاس شده را به‌کار برید که در هنگام رخداد خرابی، آیتم خراب به‌سرعت خارج و تعویض شود، بدون نیاز به خارج کردن و تعویض دیگر آیتم‌ها در فرایند. وابستگی درونی آیتم‌ها به یکدیگر باید حداقل شود. به‌علاوه، آیتم‌های خراب باید به‌راحتی خارج شوند و چفت و بستی داشته باشد که به‌راحتی و به‌سرعت آزاد شود. *معاوضه پذیری فیزیکی و وظیفه‌ای* کامل مطلوب است.

۶. از انتخاب اجزا با عمر کوتاه (یعنی آیتم‌ها با عمر مفید بحرانی) و نیازمندی برای نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه ممانعت کنید. هدف حذف همه نیازمندی‌ها برای نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه و زمان‌بندی شده است مگر آن که بر پایه داده/اطلاعات قابلیت اطمینان توجیه شده باشند. این موضوع می‌تواند از طریق انجام یک تحلیل RCM صورت گیرد که در قسمت ۱۳–۵ تشریح شد.

۷. مقدار مناسبی از برچسب‌گذاری و شناسه اجزای قابل تعمیر را همراه کنید تا به تکنسین‌ها در انجام وظایفشان به‌صورتی اثربخش و کارا کمک شود. حوزه‌های بالا، فقط تعدادی از موضوعات طراحی برای قابلیت اطمینان را نشان می‌دهند. هدف کلی حداقل کردن زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات، فراوانی‌های و منابع پشتیبانی تدارکات موردنیاز برای عملکرد تکالیف نگه‌داری و تعمیرات است.

۱۳-۴-۴- بازبینی و ارزیابی طراحی

بازبینی تا جایی که قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی سیستم مشارکت دارد به‌عنوان یک بخش ذاتی از فرایند تشریح شده در قسمت‌های ۳–۱۰، ۴–۸ و ۵–۸ انجام می‌شود. خصوصیات سیستم (و عناصر آن) در قالب نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات مشخص شده برای

سیستم ارزیابی می‌شوند. اگر نیازمندی‌ها به نظر برآورده شده‌اند، طراحی تایید شده و وارد فاز بعدی می‌شویم، وگرنه تغییرات مناسب آغاز شده تا فعالیت‌های اصلاحی صورت گیرند.

در انجام بازبینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، می‌توان یک چک‌لیست را توسعه داد تا فرایند بازبینی تسهیل شود. یک فهرست نمونه کوتاه شده در زیر نمایش داده شده است. باید توجه شود که جواب همه سوالات باید بله باشد.

۱. آیا نیازمندی‌های کمی و کیفی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات برای سیستم به حد کافی تعریف و مشخص شده است؟

۲. آیا نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات با دیگر نیازمندی‌های سیستم مطابقت دارند؟ آیا واقع‌گرایانه هستند؟

۳. آیا نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات با مفهوم نگه‌داری و تعمیرات سیستم مطابقت دارند؟

۴. آیا سطح مناسبی از قابلیت دسترسی در طراحی فراهم شده است تا انجام تعمیرات یا تعویض آیتم به راحتی انجام شود؟ آیا نیازمندی‌های دسترسی با فراوانی نگه‌داری و تعمیرات انطباق دارد؟ قابلیت دسترسی برای آیتم‌هایی که نیازمند نگه‌داری و تعمیرات متعدد هستند باید بیش‌تر از آیتم‌هایی باشد که نیازمند نگه‌داری و تعمیرات محدود هستند.

۵. آیا استانداردسازی تا بیش‌ترین حد ممکن در طراحی به کار گرفته شده است؟ در رابطه با توسعه‌ی یک قابلیت پشتیبانی تامین کارا، تعداد انواع مختلف قطعات یدکی باید حداقل نگه داشته شود.

۶. آیا بسته وظیفه‌ای تا حد ممکن استفاده شده است؟ آثاری تعاملی بین بسته‌های ماژولی باید حداقل شوند. باید این امکان وجود داشته باشد تا زمانی که یک خرابی اتفاق می‌افتد و نیاز به حذف دو، سه یا چهار ماژول مختلف وجود ندارد، نگه‌داری و تعمیرات را به حذف یک ماژول محدود کرد.

۷. آیا تدارکات آزمایش تشخیص خطا در طراحی انجام شده است؟ آیا عمق آزمایش با تحلیل سطح تعمیر مطابقت دارد؟

۸. آیا ماژول‌ها و اجزا وظایف مشابه الکتریکی، وظیفه‌ای و فیزیکی قابل معاوضه هستند؟

۹. آیا تدارکات جابه‌جایی برای آیتم‌های سنگین نیازمند حمل و نقل کافی است؟

۱۰. آیا چفت و بست‌های سریع باز شو بر روی درها و پنل‌های ورودی استفاده شده است؟ آیا تعداد کل چفت‌ها حداقل شده است؟ آیا چفت‌ها بر پایه نیازمندی برای ابزارهای استاندارد انتخاب شده‌اند؟

۱۱. آیا نیازمندی‌های تنظیم، تصحیح و کالیبره کردن حداقل شده‌اند؟

۱۲. آیا نیازمندی‌های سرویس و روانکاری حداقل شده‌اند؟

۱۳. آیا نیازمندی‌های برچسب گذاری اجزا، ماژول‌ها، زیرمونتاژها و مونتاژها کافی است؟ آیا برچسب‌های دائمی ضمیمه شده‌اند و امکان ندارد طی فعالیت نگه‌داری و تعمیرات یا شرایط محیطی کنده شود؟

۱۴. آیا همه نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات برآورده شده است؟

برای یک چک‌لیست تفصیلی به پیوست ب مراجعه کنید.

۱۳-۵- روش‌های تحلیل قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

در زمینه‌ی تحلیل قابلیت اطمینان (که به‌عنوان بخشی از فرایند تکرار شونده ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم انجام می‌شود)، تعدادی روش/ابزار وجود دارد که می‌توانند به‌طور اثربخشی در پشتیبانی از اهداف تشریح شده در این کتاب مورد استفاده قرار گیرند. موضوعاتی که در این‌جا بیش‌تر مورد توجه هستند؛ عبارت‌اند از موازنه بین قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، پیش‌بینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، نگه‌داری و تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان (RCM)، تحلیل سطح تعمیر (LORA)، تحلیل وظیفه نگه‌داری و تعمیرات (MTA) و نگه‌داری و تعمیرات بهره‌ور جامع (TPM). این روش‌ها در پاراگراف‌های زیر بحث شده‌اند.

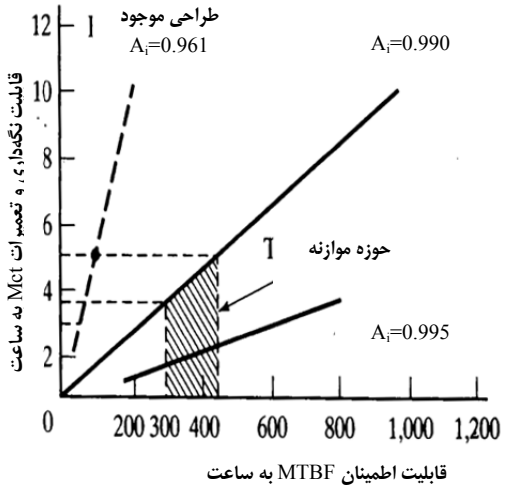
۱۳-۵-۱- ارزیابی موازنه‌ی قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

فرض کنیدکه یک نیازمندی برای تعویض تجهیز موجود با یک تجهیز جدید وجود دارد تا بتوان اثربخشی عملیات را بهبود داد. نیاز فعلی مشخص می‌کند که تجهیز باید ۸ ساعت در روز، ۳۶۰ روز در سال و برای ۱۰ سال کار کند. تجهیز فعلی دارای دسترسی‌پذیری ۰/۹۶۱، MTBF ۱۲۵ ساعته و $\bar{M}ct$ ۵ ساعته می‌باشد. سیستم جدید دارای دسترسی‌پذیری ۰/۹۹۰، MTBF بیش‌تر از ۳۰۰ ساعت و $\bar{M}ct$ که از ۵ ساعت تجاوز نمی‌کند. باید تعداد پیش‌بینی شده ۲۰۰ آیتم از تجهیز تهیه شوند. سه گزینه از ساختار طراحی برای رفع نیازمندی در نظر گرفته شده است و هر کدام از این پیکربندی‌ها یک اصلاح از سیستم موجود را نشان می‌دهد.

شکل ۱۳-۱۱ به‌صورت گرافیکی روابط میان دسترسی‌پذیری ذاتی (A_i)، MTBF و $\bar{M}ct$ را نشان می‌دهد و حوزه‌ی مجاز برای موازنه را به تصویر می‌کشد. پیکربندی انتخاب شده باید خصوصیت قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیراتی از خود نشان دهد که در محدوده‌ی هاشورزده قرار بگیرد. طراحی فعلی با نیازمندی جدید هماهنگی ندارد. سه گزینه ساختار طراحی مدنظر هستند. هر کدام از این ساختارها نیازمندی دسترسی‌پذیری را برآورده می‌کنند، و ساختار A

بیش‌ترین قابلیت اطمینان MTBF را داشته و ساختار C دارای بهترین خصوصیت قابلیت نگه‌داری و تعمیرات یعنی کم‌ترین مقدار $\bar{M}ct$ است. هدف انتخاب بهترین ساختار با کم‌ترین هزینه از میان سه گزینه موجود است.

هنگامی که هزینه در نظر گرفته می‌شود، هزینه‌ها مربوط به فعالیت تحقیق و توسعه (R&D)، هزینه‌های سرمایه‌گذاری یا تولید و هزینه‌های عملیات و نگه‌داری و تعمیرات (O&M) می‌شود. برای نمونه، بهبود خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات یا قابلیت اطمینان در طراحی منجر به افزایش هزینه R&D و سرمایه‌گذاری (تولید) می‌شود. به‌علاوه، تجربه نشان می‌دهد که چنین بهبودهایی هزینه O&M را کاهش می‌دهد، به ویژه در حوزه‌های هزینه کارکنان و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات و هزینه قطعات یدکی/تعمیری. بنابراین، ابتدا تحلیل‌گر ممکن است تنها به این دسته‌ها توجه کند. اگر تصمیم‌گیری نهایی قریب الوقوع باشد، مناسب است که دیگر دسته‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد. خلاصه‌ای از داده‌های هزینه در جدول ۱۳–۹ فراهم شده است.



هر ساختار دیگری قابل در نظر گرفتن است اگر پارامترهای اثربخشی در حوزه موازنه قرار بگیرد

ساختار	A_i	MTBF	$\bar{M}ct$
موجود	۰,۹۶۱	۱۲۵	۵,۰
گزینه A	۰,۹۹۱	۴۵۰	۴,۰
گزینه B	۰,۹۹۰	۳۷۵	۳,۵
گزینه C	۰,۹۹۱	۳۲۰	۲,۸

شکل ۱۳- ۱۱- موازنه قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات.

جدول ۱۳- ۹- خلاصه هزینه‌ها

دسته	ساختار A	ساختار B	ساختار C	توضیحات
هزینه R&D	۱۷,۱۲۰	۱۵,۲۲۷	۱۲,۱۱۰	قطعات با قابلیت اطمینان بالا
طراحی قابلیت اطمینان	۲,۱۰۹	۴,۸۹۸	۷,۱۱۵	بسته بندی، دسترسی
طراحی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات				
هزینه سرمایه‌گذاری	۳۴۲۲,۴۰۰	۳۲۵۸,۴۰۰	۳۰۲۲,۲۰۰	۱۷,۱۱۲ دلار در هر تجهیز A
تولید کردن				۱۶,۲۹۲ دلار در هر تجهیز B
(۲۰۰ سیستم)				۱۵,۱۱۱ دلار در هر تجهیز C
هزینه O&M				
کارکنان نگه‌داری و	۱۲۸۰,۰۰۰	۱۵۳۶,۰۰۰	۱۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰ فعالیت

توضیحات	ساختار C	ساختار B	ساختار A	دسته
نگه‌داری و تعمیرات در هر تجهیز A ۱۵,۳۶۰ فعالیت نگه‌داری و تعمیرات در هر تجهیز B ۱۸,۸۰۰ فعالیت نگه‌داری و تعمیرات در هر تجهیز C ۱۰٪ هزینه تولید کردن برای قطعات یدکی	۳۰۲,۲۲۲	۳۲۵,۸۴۰	۳۴۲,۲۴۰	تعمیرات و پشتیبانی قطعات یدکی و تعمیری
	۵۱۴۳,۶۴۵	۵۱۴۰,۳۶۵	۵۰۳۶,۸۶۹	مجموع

همان‌طور که در جدول ۱۳–۹ نشان داده شده است، دلتای هزینه‌های مربوط به سه گزینه از ساختار تجهیز در R&D و سرمایه‌گذاری لحاظ شده است. هزینه‌های کارکنان نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی که به‌عنوان بخشی از هزینه O&M قرار داده شده است، پایه و اساس تخمین زمان عملیات برای ۲۰۰ آیتم از تجهیز طی ۱۰ سال بهره‌برداری (یعنی ۲۰۰ آیتم تجهیز ۸ ساعت در روز، ۳۶۰ روز در سال و برای ۱۰ سال کار کند) و فاکتور قابلیت اطمینان MTBF می‌باشد. با فرض هزینه متوسط فعالیت نگه‌داری و تعمیرات برابر با ۱۰۰ دلار، هزینه کارکنان نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی با ضرب این فاکتور در تعداد تخمینی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات که از کل زمان عملیاتی تقسیم بر مقدار MTBF به‌دست می‌آید، تعیین می‌شود. بر پایه دلتای مقادیر نمایش داده شده در جدول ۱۳–۹، ساختار A نیازمندی‌های دسترسی‌پذیری، قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات سیستم را با حداقل هزینه برآورده می‌کند.

۱۳-۵-۲- پیش‌بینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

پیش‌بینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات عبارتست از یک ارزیابی اولیه از خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در سیستم که به‌صورت دوره‌ای در مراحل مختلف فرایند طراحی انجام می‌شود. از طریق بازبینی داده‌های طراحی، پیش‌بینی‌ها برای MTBM، $\bar{M}ct, \bar{M}pt$، MLH/OH و غیره انجام شده و با نیازمندی‌هایی که از قبل تعیین شده و در فرایند تخصیص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات شناسایی شده است، مقایسه می‌گردد. حوزه‌های عدم تطابق ارزیابی شده و در صورت امکان بهبود می‌یابد.

به‌طور جامع، پیش‌بینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات عبارتست از تخمین کمی فاکتورهای زمانی نگه‌داری و تعمیرات، فاکتورهای نفر ساعت نگه‌داری و تعمیرات، فاکتورهای فراوانی نگه‌داری و تعمیرات و فاکتورهای هزینه نگه‌داری و تعمیرات. انجام این کار نیازمند آن است که مهندس یا تحلیلگر داده‌های طراحی، چیدمان، فهرست قطعات–اجزا، فاکتورهای قابلیت اطمینان و داده‌های پشتیبانی را به‌منظور شناسایی وظایف نگه‌داری و تعمیرات و منابع موردنیاز برای تکمیل آن‌ها، مورد بازبینی قرار دهد. پیش‌بینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات نه تنها نیازمند تخمین زمان‌ها و فراوانی تکالیف دارد، بلکه نیازمند یک ارزیابی کیفی از خصوصیات طراحی برای قابلیت پشتیبانی دارد.

پیش‌بینی $\bar{M}ct$. پیش‌بینی میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی $\left(\bar{M}ct\right)$می‌تواند با استفاده از شکست عناصر سیستم، همان‌طور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، انجام شود و تعیین تکالیف نگه‌داری و تعمیرات و زمانی‌های سپری شده مربوطه در پیشرفت از یک عنصر به دیگری تعیین شود. شکست عناصر زیرسیستم‌ها، واحدها، مونتاژها، زیرمونتاژها و قطعات را پوشش می‌دهد. زیرتکالیف قابلیت نگه‌داری و تعمیرات مانند تعیین محل، ایزوله کردن، دسترسی، تعمیر و بازرسی، بر پایه خصوصیات موجود در طراحی، ارزیابی شده و همراه با یکی از سطوح

وظیفه‌ای تا سطح هر قطعه شناسایی می‌شود. زمان‌های قابل اعمال به هر قطعه (با فرض آن‌که هر قطعه در یک نقطه مشابه خراب می‌شود) ترکیب شده تا فاکتورهای سطح بالاتر را تشکیل دهد. یک قالب نمونه از داده‌ها برای یک مونتاژ در جدول ۱۳–۱۰ ارائه شده است.

با مراجعه به جدول ۱۳–۱۰، فاکتورهای فراوانی توسط نرخ خرابی (λ) برای هر قطعه که از داده‌های پیش‌بینی قابلیت اطمینان تعیین شده است ارائه شده و زمان‌های سپری شده موردنیاز برای تعیین محل، ایزوله کردن، پیاده کردن برای دسترسی به قطعه خراب و غیره مورد توجه قرار گرفته‌اند. زمان‌های تکالیف نگه‌داری و تعمیرات اغلب از تجربه و داده‌های به‌دست آمده در سیستم‌های مشابه مورد استفاده تخمین زده می‌شود. مجموع زمان‌های مختلف هر جزء یک چرخه زمانی نگه‌داری و تعمیرات (یعنی Mct_i) را تشکیل می‌دهد که در شکل ۱۳–۱ نشان داده شده است. داده‌های مشابه فراهم شده مطابق جدول ۱۳–۱۱ برای هر مونتاژ در سیستم ترکیب شده و فاکتورها محاسبه می‌شود تا به $\bar{M}ct$ پیش‌بینی شده برسیم.

پیش‌بینی $\bar{M}pt$. پیش‌بینی زمان نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه می‌تواند با استفاده از روشی مشابه به رویکرد نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی انجام شود. تکالیف نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه همراه با فراوانی و زمان‌های تکالیف تخمین زده می‌شود. یک مثال در جدول ۱۳–۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۳- ۱۰- کاربرگ پیش‌بینی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (مونتاژ ۴)

قطعه	λ	N	(N)(λ)	زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات (ساعت)							
				Loc	Iso	Acc	Ali	Che	Int	Mct_i	$(N)(\lambda)(Mct_i)$
A	۰.۱۶۱	۲	۰.۳۲۲	۰.۰۸	۰.۰۸	۰.۱۴	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۱۱	۰.۳۷۰	۰.۱۱۹
B	۰.۱۰۲	۴	۰.۴۰۸	۰.۰۱	۰.۰۵	۰.۱۲	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۱۲	۰.۳۳۰	۰.۱۳۴
C	۰.۰۲۱	۵	۰.۱۰۵	۰.۰۳	۰.۰۴	۰.۱۱	–	۰.۰۱	۰.۱۴	۰.۳۳۰	۰.۰۳۴
D	۰.۰۸۴	۱	۰.۰۸۴	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۱۰	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۱۱	۰.۳۰۰	۰.۰۲۵
E	۰.۴۵۲	۹	۱.۰۶۰	۰.۰۲	۰.۰۴	۰.۱۳	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۸	۰.۳۹۰	۱.۲۹۹
F	۰.۱۹۱	۸	۱.۵۲۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۱۱	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۷	۰.۲۴۰	۰.۳۶۴
G	۰.۰۲۲	۷	۰.۱۵۴	۰.۰۲	۰.۰۵	۰.۱۵	–	۰.۰۵	۰.۱۵	۰.۴۲۰	۰.۰۶۴
	مجموع		۶.۶۵۳							مجموع	۲.۰۳۹

Che= ترخیص Iso= ایزوله کردن N = تعداد قطعات Int = تعویض Acc = دسترسی λ = نرخ خرابی

Mct_i = چرخه زمانی نگهداری و تعمیرات Ali = تنظیم Loc = تعیین محل

برای تعیین $\overline{MLH}_c$، نفر ساعات را برای زمان‌های نگهداری و تعمیرات وارد کنید

جدول ۱۳- ۱۱- خلاصه داده‌های پیش‌بینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

شماره کاربرگ	آیتم مونتاژ	فاکتورهای کاربرگ	
		$\sum(N)(\lambda)$	$\sum(N)(\lambda)(Mct_i)$
۱	۱	۷,۷۷۶	۳,۰۲۱
۲	۲	۵,۳۲۸	۱,۹۲۸
۳	۳	۸,۴۱۱	۲,۹۸۱
۴	۴	۶,۶۵۳	۲,۰۳۹
۵	۵	۵,۱۱۲	۲,۵۷۶
⋮	⋮	⋮	⋮
۱۳	۱۳	۴,۷۹۸	۳,۱۱۲
مجموع		۸۶,۴۷۶	۳۳,۱۱۸

$$\bar{M}ct = \frac{\sum(N)(\lambda)(Mct_i)}{\sum(N)(\lambda)} = \frac{33.118}{86.486} = 0.382 \text{ ساعت}$$

پیش‌بینی نیازمندی‌های منابع نگه‌داری و تعمیرات. منابع نگه‌داری و تعمیرات در این مورد عبارتست از نیازمندی‌های کارکنان و آموزش، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، پشتیبانی تامین (یعنی قطعات یدکی و تعمیری و موجودی مربوطه)، نیازمندی‌های حمل و نقل و جابه‌جایی، تسهیلات، نرم‌افزار و داده‌های موردنیاز برای انجام فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات. برای نمونه، *چه تجهیز آزمایشی برای تشخیص خرابی و ایزوله کردن نیاز است؟ چه نوع تجهیز جابه‌جایی برای حمل و نقل آیتم به کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی لازم است؟* در حقیقت، عنصر زمان سپری شده به تنهایی نمی‌تواند پیش‌بینی کافی از خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی را فراهم کند. نیاز است که عنصر زمان و منابع موردنیاز پیش‌بینی شود.

۱۳-۵-۳- نگه‌داری و تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان (RCM)

نگه‌داری و تعمیرات بر پایه قابلیت اطمینان (RCM) یک رویکرد سیستمی برای توسعه دستور کار نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه به‌صورت متمرکز، اثربخش و هزینه-کارا و برنامه کنترل برای یک سیستم یا محصول است. این تکنیک در اوایل فرایند طراحی آغاز شده و با تکامل سیستم توسعه یافته، تولید شده و استقرار می‌یابد. با این حال، این تکنیک می‌تواند در ارزیابی دستورکارهای نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه برای سیستم‌های موجود با هدف بهبود مستمر محصول/فرایند به‌کار گرفته شود.

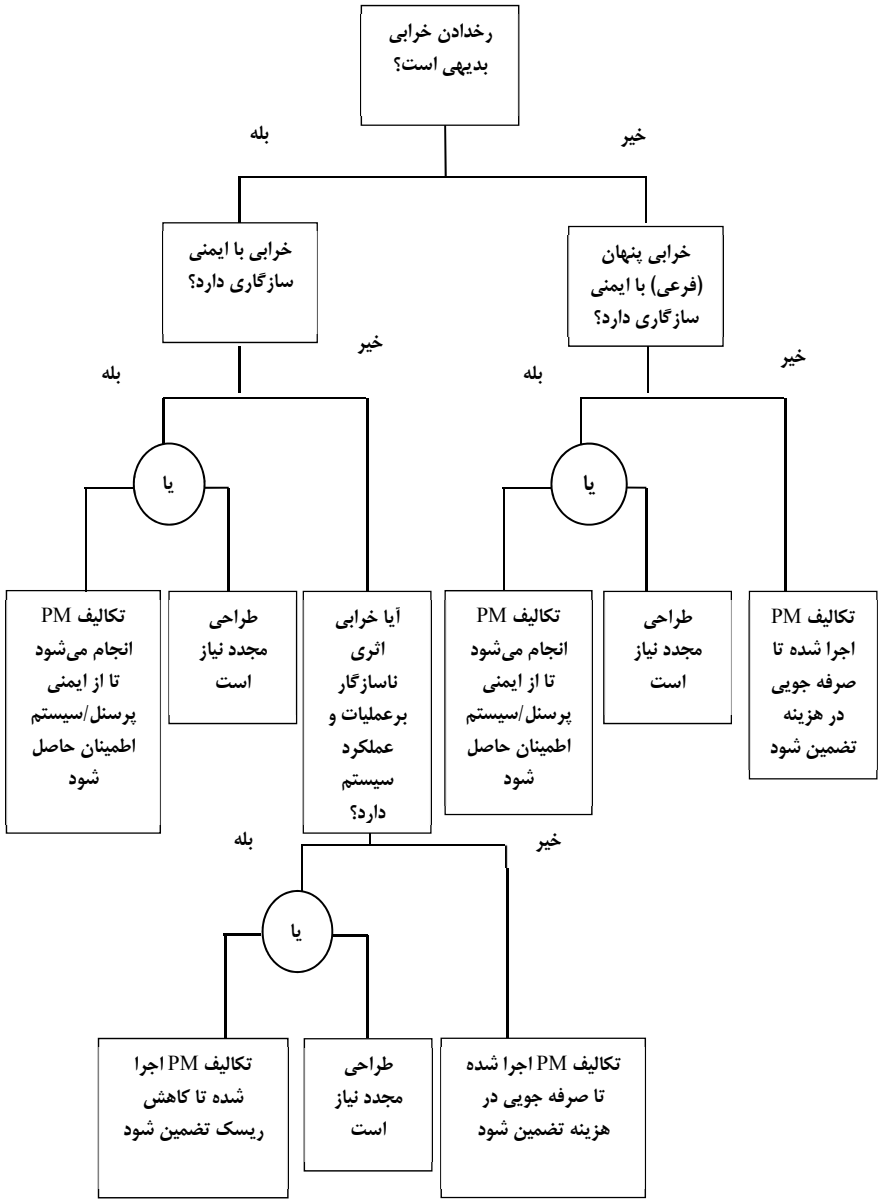
جدول ۱۳- ۱۲- خلاصه داده‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه

شرح تکلیف نگه‌داری وتعمیرات پیشگیرانه	فراوانی تکلیف $(fpt_i)(N)$	زمان تکلیف (Mpt_i)	حاصل‌ضرب $(fpt_i)(N)(Mpt_i)$
۱.روانکاری	۰,۱۱۵	۵,۵۱۱	۰,۰۶۰
۲.کالیبره کردن	۰,۵۴۲	۴,۲۳۴	۰,۲۲۰
⋮	⋮	⋮	⋮
۳۱.سرویس	۰,۳۲۱	۳,۳۱۵	۰,۱۰۶
مجموع	۱۳,۲۶۰		۳۱,۱۱۵

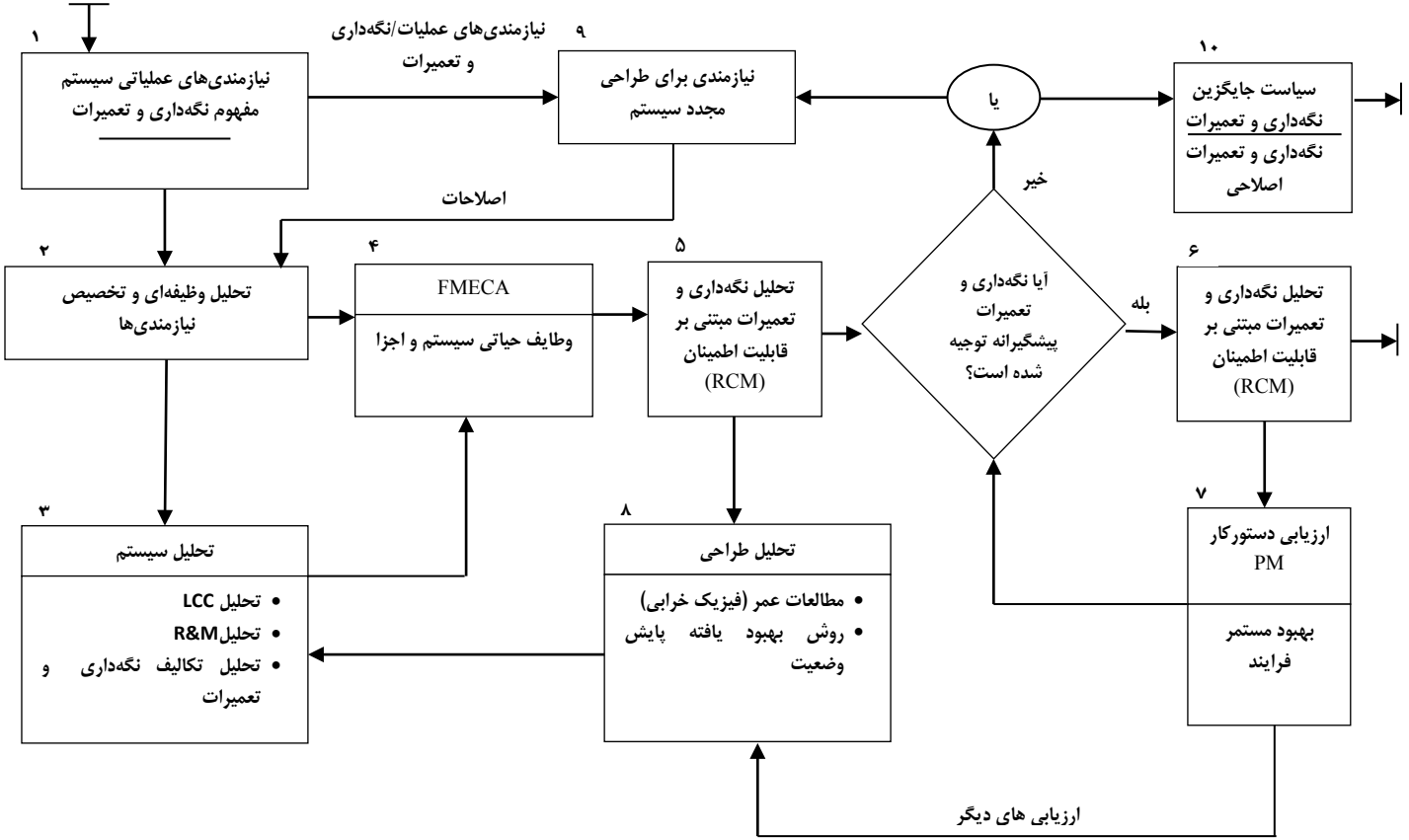
$$\bar{M}pt = \frac{\sum (fpt_i)(N)(Mpt_i)}{\sum (fpt_i)(N)} = \frac{31.115}{13.260} = 2.346 \text{ ساعت}$$

تکنیک RCM در دهه‌ی ۶۰ میلادی از طریق تلاش‌های صنعت تجارت هوایی توسعه یافت. این تکنیک با استفاده از یک درخت تصمیم ساختاریافته انجام می‌شود که تحلیلگر را از طریق یک رویکرد منطقی تنظیم شده به تعیین کاربردی‌ترین تکالیف نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه هدایت می‌کند (طبیعت و فراوانی آن‌ها). با مراجعه به شکل ۱۳–۱۲، یک ساختار ساده شده تصمیم– منطق RCM از بالا به پایین ارائه شده است که در آن ایمنی سیستم در کنار عملکرد و هزینه یکی از موضوعات اصلی مورد توجه است. با پیروی از گام‌های شکل ۱۳–۱۲مشخصات فنی نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه یا پیشنهاد برای طراحی مجدد حاصل می‌شود.

با تحلیل RCM که در جهت استقرار دستورکار نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه هزینه– اثربخش انجام می‌شود، یک پیش‌نیاز ضروری انجام FMECA است که در قسمت ۱۲–۴–۱ تشریح شده است. با مراجعه به شکل ۱۲–۲۱، یکی از خروجی‌های FMECA منجر به شناسایی نیازمندی نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه می‌شود – نیازمندی که بر پایه اطلاعات قابلیت اطمینان توجیه می‌شود. شکل ۱۳–۱۳ نشان می‌دهد که چگونه مدل تحلیل RCM را می‌توان با برخی دیگر از ابزارهای بحث شده در این کتاب ادغام کرد.



شکل ۱۳-۱۲- منطق تصمیم‌گیری ساده شده RCM.



شکل ۱۳- ۱۳- مدل تحلیل RCM و واسطه‌های آن

۱۳-۵-۴- تحلیل سطح تعمیر (LORA)

در تعمیم مفهوم نگه‌داری و تعمیرات برای استقرار معیارهای طراحی سیستم، لازم است که تعیین شود آیا از نظر اقتصادی تعمیر مونتاژها به‌صرفه است یا دوراندازی آن‌ها در هنگام خرابی. اگر تصمیم به تعمیر باشد، تعیین سطح نگه‌داری و تعمیرات باید مشخص کند که تا چه سطحی تعمیر باید انجام شود (یعنی سطح نگه‌داری و تعمیرات میانی یا نگه‌داری و تعمیرات مبدا/تامین‌کننده). این مثال نشان می‌دهد که یک تحلیل سطح تعمیر برپایه معیارهای هزینه چرخه‌ی عمر باید انجام شود که می‌تواند طی طراحی مفهومی یا اولیه سیستم و/یا مراحل بعدی (در صورت امکان) صورت گیرد.

فرض کنید یک سیستم رایانه‌ای به تعداد ۶۵ عدد در سه حوزه جغرافیایی اصلی توزیع شده است. این سیستم برای پشتیبانی وظایف عملی و مدیریتی در سازمان‌های صنعتی و آژانس‌های دولتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه بهره‌برداری واقعی از سیستم، از یک سازمان مصرف‌کننده به سازمان دیگر متفاوت است، به‌صورت میانگین فرض شده است که از این سیستم ۴ ساعت در روز (برای ۳۶۰ روز از سال) بهره‌برداری می‌شود.

سیستم رایانه‌ای هم اکنون در مرحله ابتدایی توسعه است و باید طی ۱۸ ماه ایجاد شود و پس از ۲ سال عملیاتی شود. انتظار می‌رود که کل ۶۵ سیستم برای ۴ سال کار کرده و طی ۸ سال در دسترس باشد تا از دور خارج کردن سیستم آغاز شود. چرخه‌ی عمر سیستم به منظور تحلیل ۱۰ سال است.

براساس داده‌های اولیه طراحی، سیستم رایانه‌ای در واحدهای اصلی همراه با قابلیت‌های خود-آزمایش بسته‌بندی شده که ایزوله کردن خرابی‌ها را در سطح واحد انجام می‌دهد. واحدهای خراب خارج شده و در سطح سازمانی تعویض می‌شود (یعنی تسهیلات مشتری) و برای تعمیر به کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی فرستاده می‌شود. تعمیر واحد از طریق تعویض مونتاژ انجام شده

و مونتاژهای خراب یا تعمیر می‌شود یا دور انداخته می‌شود. مجموع ۱۵ مونتاژ در نظر گرفته شده است و نیازمندی توجیه تعمیر یا دوراندازی مونتاژ بر پایه معیارهای هزینه چرخه‌ی عمر می باشد. نیازمندی‌های عملیاتی، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات و برنامه دستور کار در شکل ۱۳–۱۴ نشان داده شده است. مساله بیان شده اساسا به تحلیل ۱۵ مونتاژ اصلی ساختار سیستم رایانه‌ای بستگی دارد تا تعیین شود که آیا مونتاژها باید هنگام خرابی تعمیر شوند یا دور ریخته شود. به عبارت دیگر، مونتاژهای مختلف تک تک در قالب این موارد ارزیابی می‌شود: (۱) تعمیر مونتاژ در سطح میانی نگه‌داری و تعمیرات، (۲) تعمیر مونتاژ در سطح مبدا یا تامین‌کننده، و (۳) امحای مونتاژ. هزینه‌های چرخه‌ی عمر اگر قابل اعمال به سطح مونتاژ باشد، تخمین زده شده و در فرایند انتخاب گزینه‌ها استفاده می‌شود. مجموع کل هزینه‌های سیستم رایانه‌ای در یک سطح بالاتر تعیین می‌شود که در این مثال نمی‌گنجد.

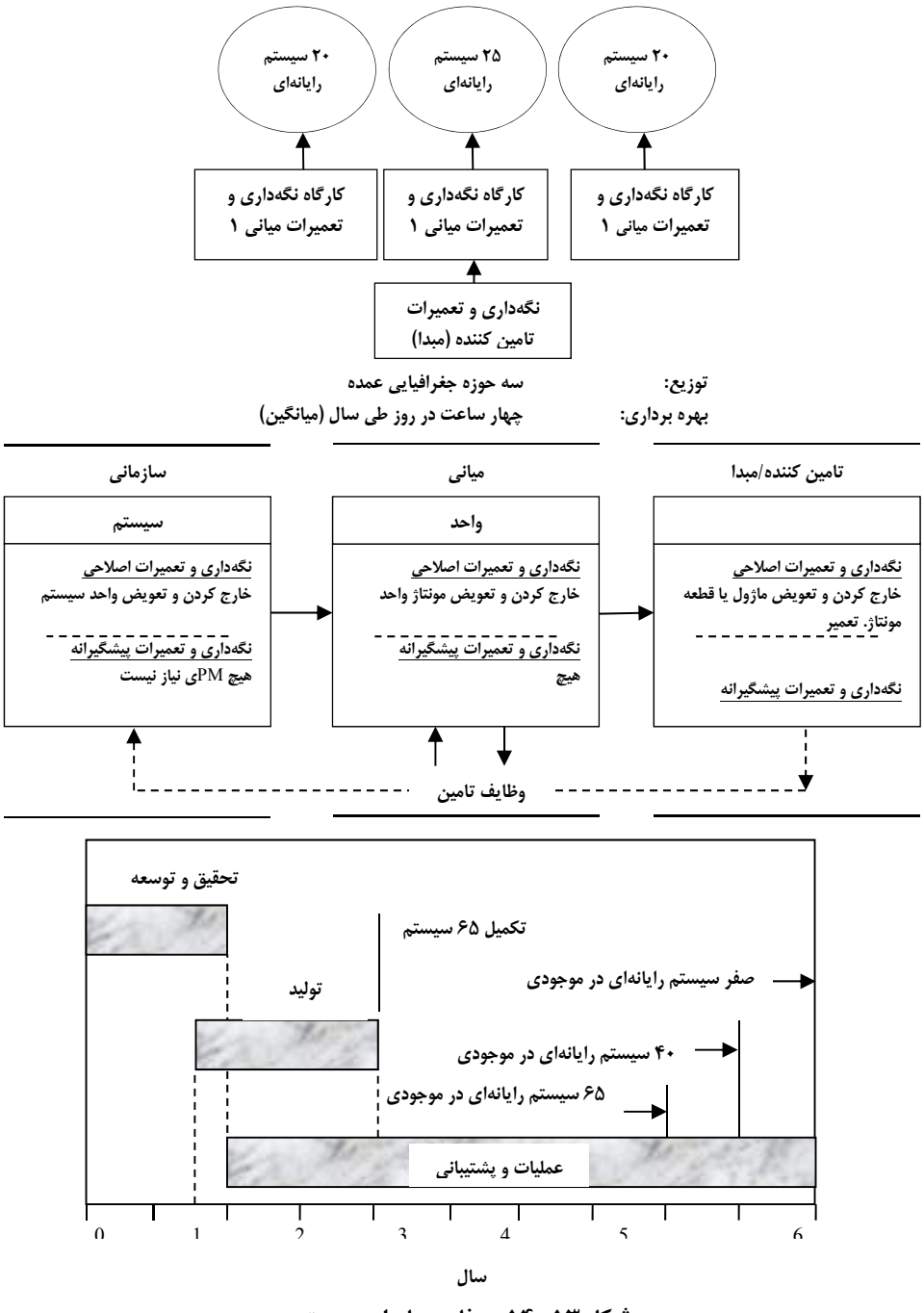
با داشتن اطلاعات مساله، گام بعدی توسعه یک ساختار شکست هزینه (CBS) و استقرار معیارهای ارزیابی است. معیارهای ارزیابی شامل ملاحظات همه هزینه‌ها در هر دسته می‌شود که قابل اعمال در CBS است، اما تاکید بر هزینه‌های عملیات و پشتیبانی (O&S) به‌عنوان تابعی از هزینه اکتساب است. بنابراین، هزینه تحقیق و توسعه و هزینه تولید به‌عنوان یک عنصر نمایش داده شده است در حالی که اجزای هزینه‌های O&S به‌صورت تک تک شناسایی می‌شود. شکل ۱۳–۱۵ معیارهای ارزیابی، داده‌های هزینه، و یک شرح خلاصه و توجیه هر دسته را به تصویر کشیده است. اطلاعات نمایش داده شده در شکل تنها ۱۵ مونتاژ را پوشش می‌دهد.

داده‌های نمایش داده شده در شکل ۱۳–۱۵ نشانگر مونتاژ A-1 که به‌صورتی که در شکل ۱۳–۱۴ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. گام بعدی به‌کاربردن معیارهای مشابه در تعیین سطح تعمیر پیشنهادی برای هر کدام از ۱۴ مونتاژ دیگر (مونتاژهای ۲ تا ۱۵) است. اگرچه هزینه‌های اکتساب، فاکتورهای قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، و نیازمندی‌های

خاص تدارکات برای هر مونتاژ متفاوت است، بسیاری از روابط تخمین هزینه برای آن‌ها مشابه است. هدف یک‌دست بودن در رویکرد تحلیلی و در استفاده از فاکتورهای ورودی هزینه تا سرحد ممکن در هر جایی می‌باشد که قابل اعمال است. خلاصه‌ی نتایج برای کل ۱۵ مونتاژ در جدول ۱۳–۱۳ نشان داده شده است.

با مراجعه به جدول ۱۳–۱۳، توجه کنید که تصمیم برای مونتاژ A-1 تعمیر در سطح میانی است؛ تصمیم برای مونتاژ A-2 تعمیر در سطح مبدا یا تامین‌کننده است؛ تصمیم در مورد مونتاژ A-3 عدم انجام هر گونه تعمیر و دور اندازی آن در صورت خرابی است؛ و بقیه نیز به همین منوال مشخص شده‌اند. جدول سیاست‌های پیشنهادی برای هر کدام از مونتاژها را منعکس می‌کند. به‌علاوه، سیاست کلی، هنگامی که کل ۱۵ مونتاژ به‌عنوان یک بسته کامل در نظر گرفته می‌شود، تعمیر با تسهیلات تامین‌کننده است.

پیش از نتیجه‌گیری نهایی، تحلیل‌گر باید هر کدام از موقعیت‌هایی را که تصمیم به آن نزدیک است، مجددا ارزیابی کند. با مراجعه به شکل ۱۳–۱۵، واضح است که تصمیم دوراندازی غیراقتصادی است؛ با این حال، دو گزینه تعمیر نسبتا به هم نزدیک هستند. بر اساس نتایج تحلیل‌های هر کدام از مونتاژها، تحلیل‌گر می‌داند که تصمیم در مورد سطح تعمیر به‌شدت به هزینه اکتساب هر مونتاژ و تعداد کل پیش‌بینی شده از تعویض‌ها (یعنی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات بر اساس قابلیت اطمینان مونتاژها) در چرخه‌ی عمر انتظاری بستگی دارد. روندها در شکل ۱۳–۱۶ نشان داده شده است که در آن‌ها روندهای تصمیم با افزایش هزینه اکتساب و تعداد تعویض‌ها (کاهش قابلیت اطمینان) از دور اندازی به تعمیر در سطح میانی تغییر پیدا می‌کنند.



شکل ۱۳- ۱۴- مفاهیم پایه‌ای سیستم.

تشریح و توجیه	هزینه دور اندازی هنگام خرابی (دلار)	هزینه تعمیر تامین‌کننده (دلار)	هزینه تعمیر میانی (دلار)	معیار ارزیابی
هزینه اکتساب شامل همه هزینه‌های تخصیص داده شده به مونتاژ A-1 بر پایه یک نیازمندی ۶۵ سیستم می‌شود. طراحی و تولید مونتاژ در حوزه دور اندازی ساده‌سازی شده است.	۴۷۵ برای هر مونتاژ یا ۳۰,۸۷۵	۵۵۰ برای هر مونتاژ یا ۳۵,۷۵۰	۵۵۰ برای هر مونتاژ یا ۳۵,۷۵۰	۱. هزینه‌های تخمینی اکتساب برای مونتاژ A-1 (شامل هزینه R&D و هزینه تولید)
بر پایه عمر کاربری ۸ ساله سیستم، ۶۵ سیستم، بهره‌برداری ۴ ساعته در روز، نرخ خرابی ۰,۰۰۰۴۵ برا مونتاژ A-1 و Mct ۲ ساعته، تعداد انتظاری فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیراتی ۲۷۰ است. هنگامی که تعمیر انجام می‌شود، دو تکنسین به‌صورت تمام وقت نیاز است. نرخ نیروی کار ۱۲ دلار در ساعت برای نگه‌داری و تعمیرات میانی و ۱۵ دلار در ساعت برای نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده است.	قابل اعمال نیست	۸۱۰۰	۶۴۸۰	۲. هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده

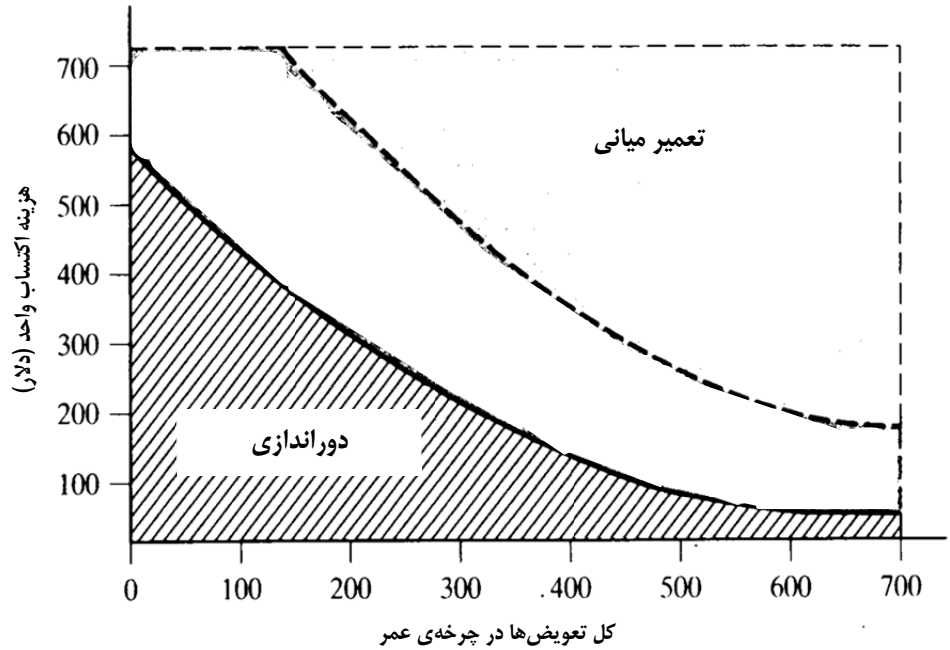
تشریح و توجیه	هزینه دور اندازی هنگام خرابی (دلار)	هزینه تعمیر تامین‌کننده (دلار)	هزینه تعمیر میانی (دلار)	معیار ارزیابی
برای نگه‌داری و تعمیرات میانی ۶ مونتاژ یدکی برای جبران زمان حمل و نقل، صف نگه‌داری و تعمیرات، TAT و غیره نیاز است. برای نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده/مبدا ۹ مونتاژ یدکی نیاز است. در حالت دور اندازی ۱۰۰٪ قطعه یدکی نیاز است.	۱۲۸۲۵۰	۴۹۵۰	۳۳۰۰	۳. پشتیبانی تامین مونتاژهای یدکی
برای هر فعالیت تعمیر ۲۵ دلار مصالح نیاز است	قابل اعمال نیست	۶۷۵۰	۶۷۵۰	۴. پشتیبانی تامین ماژول‌های و قطعات یدکی برای تعمیر مونتاژ
۲۰٪ مقدار موجودی مفروش است (مونتاژها، ماژول‌ها و قطعات یدکی)	۲۵۶۵۰	۲۳۴۰	۲۰۱۰	۵. پشتیبانی تامین مدیریت موجودی
تجهیزات آزمایش خاص موردنیاز برای حالت تعمیر. هزینه اکتساب و پشتیبانی ۲۵۰۰۰ دلار برای هر نصب و راه اندازی است. تخصیص ۱۶۶۷ دلار در هر نصب	قابل اعمال نیست	۱۶۶۷	۵۰۰۱	۶. تجهیزات پشتیبانی و آزمایش

تشریح و توجیه	هزینه دور اندازی هنگام خرابی (دلار)	هزینه تعمیر تامین‌کننده (دلار)	هزینه تعمیر میانی (دلار)	معیار ارزیابی
برای مونتاژ A-1. تجهیزات آزمایش خاصی برای مورد دور اندازی نیاز نیست.				
هزینه‌های حمل و نقل در سطح میانی قابل صرف نظر کردن است.برای نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده، ۳۴۰ سفر یکطرفه با هزینه 175/100lb در نظر گرفته می‌شود. هر مونتاژ ۵ پوند وزن دارد.	قابل اعمال نیست	۲۹۷۵	قابل اعمال نیست	۷. حمل و نقل و جابه‌جایی
هزینه آموزش برای پوشش نگه‌داری و تعمیرات مونتاژ بر اساس زیر است: میانی – ۲۶ دانشجو، هر کدام ۲ ساعت، ۲۰۰ دلار به ازای هر دانشجو در هفته تامین‌کننده – ۹ دانشجو، هر کدام ۲ ساعت، ۲۰۰ دلار به ازای هر دانشجو در هفته	قابل اعمال نیست	۹۰	۲۶۰	۸. آموزش نگه‌داری و تعمیرات
بر پایه تجربه، یک رابطه تخمین هزینه ۰٫۵۵ دلاری برای هر نفر ساعت نگه‌داری و تعمیرات مستقیم	قابل اعمال نیست	۸۱۰	۵۹۴	۹. تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات

تشریح و توجیه	هزینه دور اندازی هنگام خرابی (دلار)	هزینه تعمیر تامین‌کننده (دلار)	هزینه تعمیر میانی (دلار)	معیار ارزیابی
در سطح میانی و ۰٫۷۵ دلار در سطح تامین‌کننده مفروض است.				
۵ صفحه نمودار و نوشته برای پوشش هر تعمیر مونتاژ با هزینه ۲۵۰ دلار به ازای هر صفحه مفروض است	قابل اعمال نیست	۱۲۵۰	۱۲۵۰	۱۰. داده‌های فنی
۱۰ دلاربرای هر مونتاژ و ۱ دلار برای هر ماژول یا قطعه به منظور امحا است.	۲۷۰۰	۲۷۰	۲۷۰	۱۱. امحا
	۱۸۷۴۷۵	۶۴۹۵۲	۶۱۶۶۵	کل هزینه پیش‌بینی شده

شکل ۱۳- ۱۵- ارزیابی تعمیر در مقابل دوراندازی (مونتاژ A-1).

در مواردی که نتیجه تحلیل نزدیک به خط تقاطع در شکل ۱۳-۱۶ باشد، تحلیل نیاز به بازبینی داده‌های ورودی، فرضیه‌ها، انجام تحلیل حساسیت شامل هزینه‌های بالا دارد. هدف ارزیابی ریسک و اعتبارسنجی تصمیم است. این شرایطی برای مونتاژ A-1 است که در آن تصمیم به تعمیر در سطح میانی و در سطح تامین‌کننده نزدیک است (شکل ۱۳-۱۵).



شکل ۱۳- ۱۶- معیارهای اقتصادی.

پس از بازبینی تحلیل‌ها برای ۱۵ مونتاژ که برای تضمین دست‌یابی به بهترین تصمیم ممکن انجام می‌شود، نتایج جدول ۱۳-۱۳ در صورت نیاز به‌روز می‌شود. با فرض این‌که تصمیم‌ها تقریبا ثابت باقی می‌مانند، تحلیلگر به دو روش به مرحله بعد وارد می‌شود. اول، تصمیم‌های داخل جدول بدون تغییر قبول می‌شوند که پشتیبان یک سیاست ترکیبی است که در آن برخی مونتاژها در هر کدام از سطح‌های نگه‌داری و تعمیرات تعمیر شده و بقیه هنگام خرابی دور انداخته می‌شوند. با این رویکرد، تحلیلگر آثار تعاملی را که ممکن است اتفاق بیافتد، بازبینی می‌کند (یعنی آثار بر قطعات یدکی، استفاده از تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، استفاده از کارکنان نگه‌داری و تعمیرات و غیره). در حقیقت هر مونتاژ جداگانه بر اساس فرضیات مشخص ارزیابی می‌شود، نتایج به‌صورت کلی

بازبینی می‌شود و آثار بازخوردی ممکن ارزیابی می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که هیچ اثر معناداری بر تصمیم وجود ندارد.

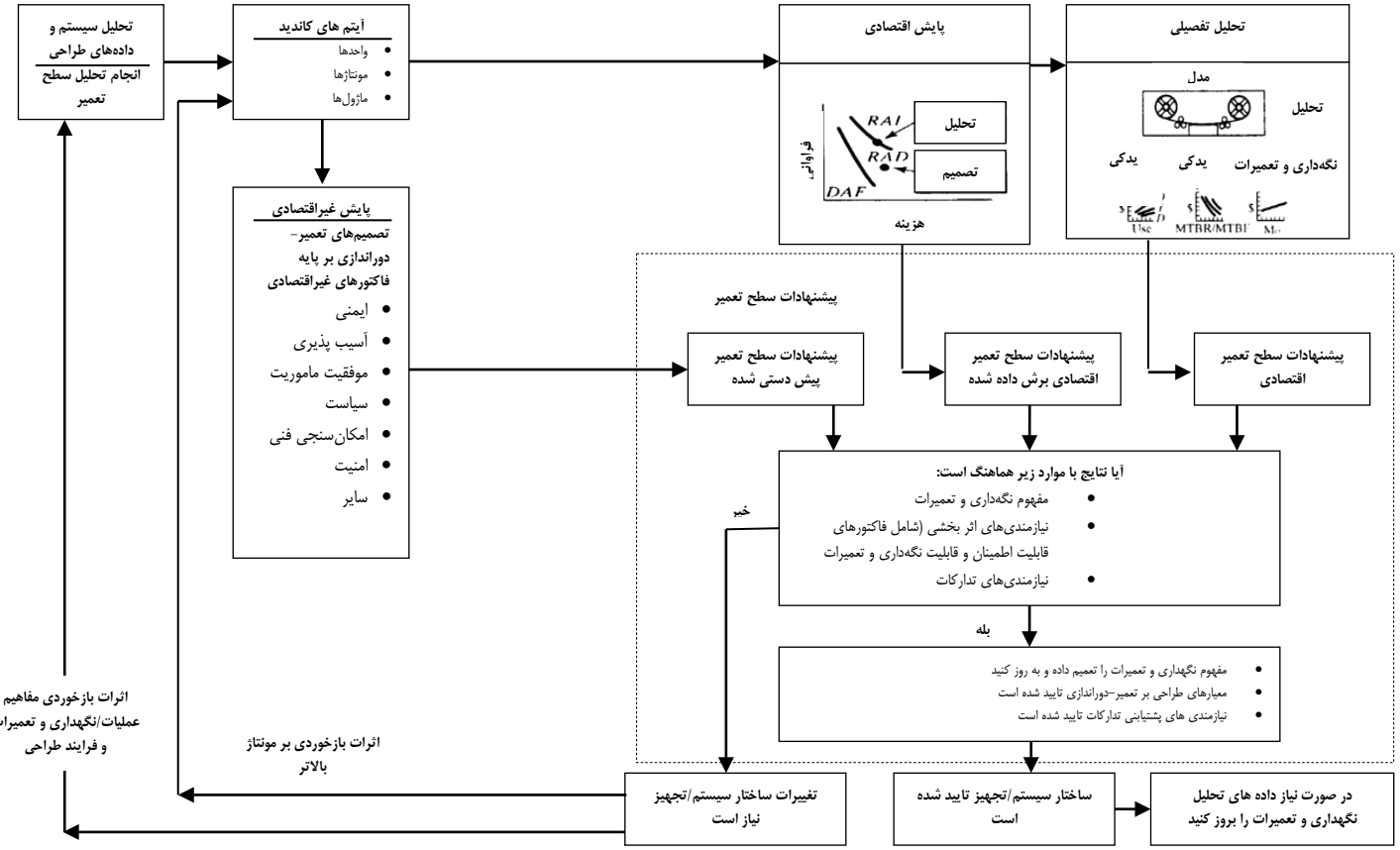
جدول ۱۳- ۱۳ خلاصه هزینه‌های سطح تعمیر

	وضعیت نگه‌داری و تعمیرات			
تصمیم	هزینه دور اندازی هنگام خرابی (دلار)	هزینه تعمیر در سطح تامین‌کننده (دلار)	هزینه تعمیر میانی (دلار)	شمار مونتاژ
تعمیر – میانی	۱۸۷۴۷۵	۶۶۷۰۲	۶۱۶۶۵	A-1
تعمیر – تامین‌کننده	۱۲۲۶۱۱	۵۱۳۴۱	۵۸۱۴۹	A-2
دور اندازی	۷۳۹۳۲	۸۱۵۴۴	۸۵۱۱۵	A-3
دور اندازی	۶۵۰۷۱	۷۸۹۷۲	۸۵۷۷۸	A-4
تعمیر – تامین‌کننده	۹۵۱۰۸	۶۱۷۲۴	۶۶۶۷۹	A-5
تعمیر – میانی	۸۹۲۱۶	۷۲۹۸۸	۶۵۱۰۱	A-6
تعمیر – میانی	۹۲۱۱۴	۷۵۵۹۱	۷۲۲۲۳	A-7
دوراندازی	۷۶۲۲۲	۷۸۲۰۴	۸۹۳۴۸	A-8
تعمیر – تامین‌کننده	۸۹۸۷۵	۷۱۴۴۴	۷۸۷۶۲	A-9
تعمیر – میانی	۹۷۲۱۲	۶۷۸۰۵	۶۳۹۱۵	A-10
دور اندازی	۶۴۲۲۹	۶۶۱۵۸	۶۷۰۰۱	A-11
تعمیر – میانی	۸۲۱۰۹	۷۱۵۷۵	۶۹۲۱۲	A-12
تعمیر – تامین‌کننده	۸۳۲۱۹	۶۵۵۵۵	۷۷۱۰۱	A-13

تصمیم	وضعیت نگه‌داری و تعمیرات			شمار مونتاژ
	هزینه دور اندازی هنگام خرابی (دلار)	هزینه تعمیر در سطح تامین‌کننده (دلار)	هزینه تعمیر میانی (دلار)	
تعمیر – میانی	۶۲۰۰۵	۶۲۵۱۵	۵۹۲۹۹	A-14
دور اندازی	۶۳۰۵۰	۶۵۲۴۴	۷۱۹۱۹	A-15
تعمیر – تامین‌کننده	۱۳۴۳۴۴۹	۱۰۳۷۳۶۲	۱۰۷۱۲۶۷	هزینه سیاست

رویکرد دوم انتخاب یک سیاست کلی برای ۱۵ مونتاژ است که کم‌ترین هزینه کل را داشته باشد (یعنی تعمیر مونتاژ در سطح نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده یا مبدا). در این مورد، همه مونتاژها با تسهیلات تامین‌کننده تعمیر می‌شوند و تحلیل هر کدام درقالب معیارهای شکل ۱۳–۱۵ انجام می‌شودن تا آثار تعاملی ممکن مربوط به هر سیاست تعیین گردند. نتایج ممکن است برخی تغییرات در جدول ۱۳–۱۳ را ایجاد کنند.

در نهایت، خروجی تحلیل سطح تعمیر باید بازبینی شود تا تطابق آن با مفهوم مشخص شده نگه‌داری و تعمیرات سیستم در ابتدای فرایند طراحی تضمین شود. داده‌های تحلیل می‌تواند به‌طورمستقیم مفهوم نگه‌داری و تعمیرات را پشتیبانی کرده و تعمیمی از آن باشند یا این‌که مفهوم نگه‌داری و تعمیرات درنتیجه تحلیل نیاز به تغییر داشته باشد. اگر حالت دوم اتفاق افتد، دیگر اشکال طراحی سیستم می‌توانند به شدت تحت تاثیر قرار گیرند. عواقب چنین تغییراتی در مفهوم نگه‌داری و تعمیرات باید پیش از رسیدن به تصمیم سطح تعمیر نهایی کاملا مورد ارزیابی قرار گیرد. رویه تحلیل سطح تعمیر در شکل ۱۳–۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۳- ۱۷- رویه تحلیل سطح تعمیر

۱۳-۵-۵- تحلیل تکالیف نگه‌داری و تعمیرات (MTA)

MTA فرایند ارزیابی ساختار یک سیستم با در نظر گرفتن اهداف زیر را تشکیل می‌دهد:

۱. منابع موردنیاز برای حفظ نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی سیستم در طی چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده را شناسایی کنید. چنین نیازمندی‌های منابع می‌تواند شامل تعداد و سطح مهارت کارکنان موردنیاز برای نگه‌داری و تعمیرات، قطعات یدکی/تعمیری و موجودی‌های مربوطه، ابزار و تجهیزات آزمایش، نیازمندی‌های حمل و نقل و جابه‌جایی، تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات و دارایی‌های سرمایه‌ای مربوطه، اطلاعات و داده‌های فنی، و منابع رایانه‌ای موردنیاز برای پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات می‌شود.

۲. یک ارزیابی از ساختار مربوط به خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی را هم در طراحی عناصر اصلی مرتبط با ماموریت سیستم و هم در طراحی زیربنای نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی فراهم کنید. هدف، حصول اطمینان از آن است که ساختار طراحی سیستم با TPMها و DDPهای تعریف شده در قسمت ۳-۶ مطابقت دارد و نیازمندی‌های منابع موردنیاز برای پشتیبانی حداقل شده است. همان‌طور که در فصل ۳ بحث شد، شکل سیستم نباید تنها شامل عناصر اصلی مربوط به ماموریت (سخت افزار و نرم‌افزار عملیاتی، کارکنان عملیاتی، تسهیلات عملیاتی، و غیره) باشد، بلکه عناصر شبکه پشتیبانی و زیربنا نیز در نظر گرفته شود (شکل ۳-۵) – دو جنبه از ایجاد تعادل وجود دارد، همان‌طور که در شکل ۱۳-۹ ترسیم شده است.

در نتیجه، MTA بر پایه یک ساختار طراحی مشخص است زیرا در زمان تحلیل و ارزیابی موجود است و به‌عنوان یک ابزار ارزیابی عالی در اندازه‌گیری اثربخشی زیربنای پشتیبانی خدمت می‌کند. با انجام مکرر MTA طی فرایند طراحی و با یک قابلیت بازخورد مناسب، این روش یک

مکانیسم خوب در اجرای تغییرات طراحی است، همان‌طور که برای بهبود مستمر محصول و فرایند نیاز است.

MTA می‌تواند در یک سطح بزرگ طی فاز طراحی مفهومی اجرا شود، زمانی که تعریف کافی از عناصر خاص سیستم (که از مفهوم نگه‌داری و تعمیرات تکامل می‌یابد — به قسمت ۳–۵ مراجعه کنید) وجود داشته باشد یا زمانی که یک آیتم قابل تعمیر در طراحی کلی در نظر گرفته می‌شود (آیتم COTS). با پیشرفت طراحی طی فازهای طراحی اولیه و تفصیلی و بهتر شدن تعریف ساختار سیستم، تحلیلگر می‌تواند یک MTA را از طریق بازبینی داده‌های طراحی، نقشه‌ها، فهرست مواد و قطعات، گزارشان فنی و غیره در دسترس اجرا کند. تحلیلگر آن‌چه را ارزیابی خواهد کرد که از داده‌هایی می‌بیند که برای فاز بهره‌برداری سیستم پیش‌بینی شده است.

به‌منظور جمع‌بندی MTA، تحلیل وظیفه‌ای تشریح شده در قسمت ۳–۷–۱ و ۴–۳–۱ شالوده لازم را فراهم می‌کند. برای مثال، یک کارخانه تولیدی انتخاب شده و از طریق نمودار بلوکی وظیفه‌ای خلاصه شده در شکل ۱۳–۱۸ تشریح شده است. شاخص‌های مناسب (یعنی TPMها) باید شناسایی شده و به هر بلوک وظیفه‌ای اختصاص یابد. هر وظیفه‌ی عملیاتی می‌تواند در قالب معیارهای *برو/نرو* همراه با توسعه وظایف نگه‌داری و تعمیرات که از وظایف عملیاتی تکامل یافته است در نظر گرفته شود. این فرایند در شکل ۱۳–۱۹ نشان داده شده است.

وظایف نگه‌داری و تعمیرات می‌تواند درادامه به زیروظایف، دستورات، گروهی از فعالیت‌ها، تکالیف، زیرتکالیف و غیره شکسته شود. با "چه‌ها"ی تشریح شده در قالب تکالیف شناسایی شده، تحلیلگر رویکردهای مختلف برای اجرای تکالیف را شناسایی و ارزیابی می‌کند. نتایج منجر به شناسایی "چگونه‌ها" و منابع مشخص موردنیاز برای نگه‌داری و تعمیرات می‌شود.

با مراجعه به شکل ۱۳–۱۸، گمان آن است که فعالیت "بازرسی و آزمایش سیستم" (وظیفه ۱۳) یک حوزه‌ی بالقوه مشکل را تشکیل داده و انجام MTA به‌منظور ارزیابی مطلوب است. با دانستن آن‌که این وظیفه مکررا شکست می‌خورد، تحلیلگر می‌تواند شروع به تهیه یک نمودار جریان منطقی خلاصه شده کند که در شکل ۱۳–۲۰ نشان داده شده است. با شروع از یک نشانه معمول خرابی (نشانه‌ای که بیش‌تر اتفاق می افتد)، یک رویکرد *برو/نرو* گام به گام را می‌توان معین کرد که همراه با شناسایی تکالیف حیاتی توسط اعداد بالای هر بلوک خواهد بود. "مسیر" انتخاب شده چرخه‌ی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی را که شامل تشخیص خطا، تعمیر و تایید وضعیت است. پوشش می‌دهد.

گام بعدی ارزیابی تکالیف حیاتی شناسایی شده در شکل ۱۳–۲۰ است. با مراجعه به شکل ۱۳–۲۱ (برگه ۱ و برگه ۲، که یک تعمیم هستند)، هر کدام از تکالیف انتخاب شده ارزیابی شده و منابع نگه‌داری و تعمیرات موردنیاز شناسایی می‌شود (یعنی زمان‌ها و توالی تکلیف در بلوک ۱۲ و ۱۳، فراوانی تکلیف در بلوک ۱۴، نیازمندی‌های تعداد و سطح مهارت کارکنان در بلوک ۱۵–۱۸، قطعات یدکی و جایگزین در بلوک‌های ۸–۱۱ (برگه ۲)، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی در بلوک‌های ۱۲–۱۵، و نیازمندی‌های تسهیل در بلوک ۱۶).

با معلوم بودن اطلاعات نمایش داده شده در شکل ۱۳–۲۱ (برگه‌های ۱ و ۲)، تحلیلگر می‌تواند برخی از حوزه‌های مورد توجه را مورد سوال قرار دهد:

۱. با وجود منابع وسیع موردنیاز برای تعمیر مونتاژ A-7 (به‌طور مثال تنوع تجهیزات خاص آزمایش و پشتیبانی، لزوم یک تسهیل "اتاق پاک" برای نگه‌داری و تعمیرات، مقدار زیاد زمان لازم برای حذف و جایگزینی CB-1A5 و غیره)، این امکان وجود دارد که مونتاژ A-7 به‌عنوان "غیرقابل تعمیر" شناسایی شود. به عبارت دیگر، بررسی کنید که

مونتاژهای واحد B باید به‌عنوان "قابل تعمیر" یا "دوراندازی هنگام خرابی" دسته‌بندی شود.

۲. با مراجعه به وظایف ۱ و ۲، یک قابلیت "خود آزمایش" در سطح سازمانی برای ایزوله کردن خرابی در زیرسیستم وجود دارد. با این حال، ایزوله کردن خطا برای واحد نیازمند یک آزمایشگر سیستم خاص (0-2310B) بوده و ۲۵ دقیقه زمان آزمایش و یک فرد با مهارت بسیار بالا برای انجام وظیفه نیاز است. درحقیقت، باید بررسی شود که توسعه‌ی خودآزمایشی به سطوح پایین‌تر واحد و حذف نیاز به آزمایش‌گر سیستم خاص و فرد با مهارت بالا ممکن است یا نه.

۳. حذف و تعویض فیزیک واحد B از سیستم ۱۵ دقیقه طول می‌کشد که زیاد به نظر می‌رسد. اگرچه آیتم عمده‌ای نیست، مفید است که بررسی شود که زمان حذف/تعویض را می‌توان کاهش داد یا نه (به کم‌تر از ۵ دقیقه به‌طور مثال).

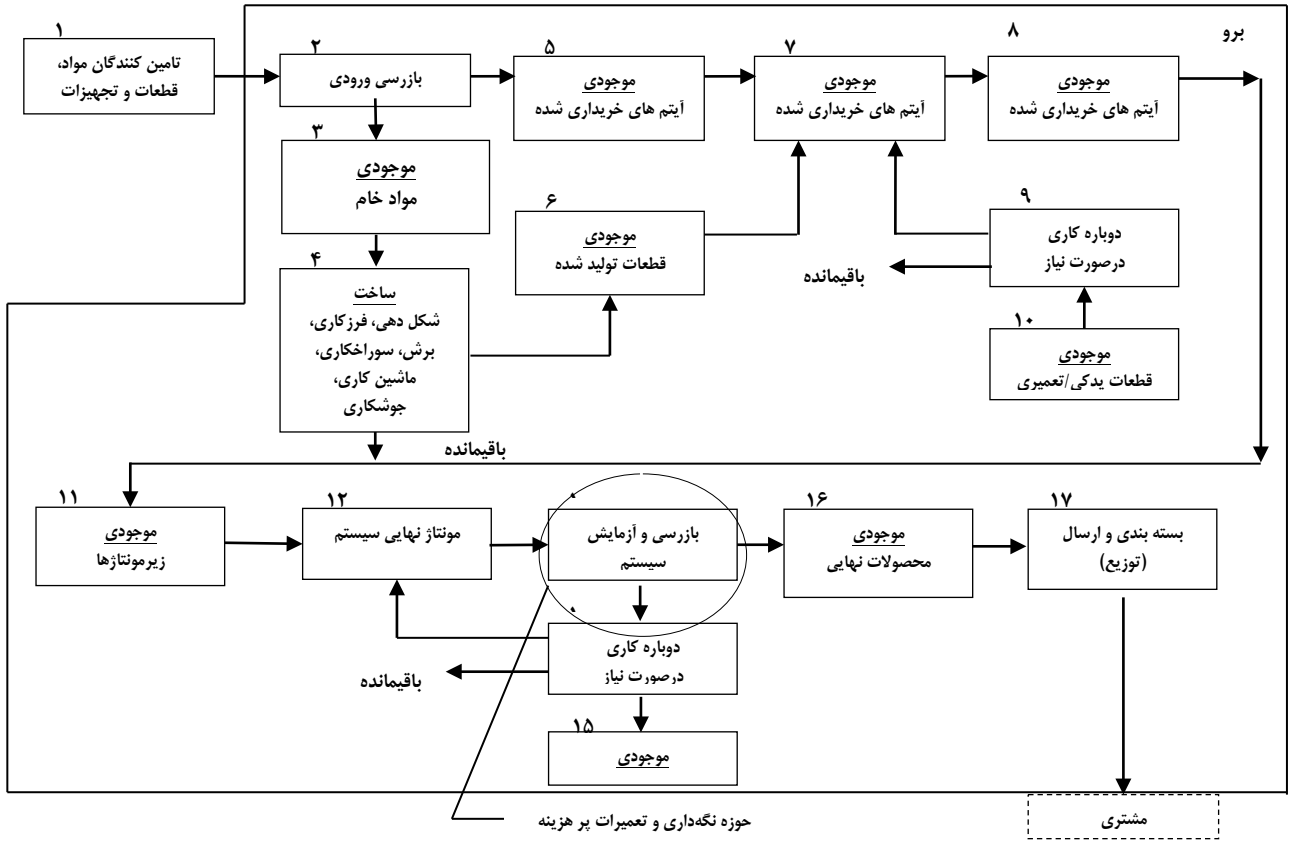
۴. با مراجعه به تکالیف ۱۰–۱۵، یک تسهیل خاص اتاق پاک برای نگه‌داری و تعمیرات نیاز است. با فرض آن‌که مونتاژهای واحد B تعمیر شده‌اند (در مقابل دسته دوراندازی هنگام خرابی)، مفید است که تغییر طراحی این مونتاژ طوری بررسی شود که محیط اتاق پاک برای انجام نگه‌داری و تعمیرات نیاز نباشد. به عبارت دیگر، آیا نیازمندی تسهیل گران‌قیمت نگه‌داری و تعمیرات قابل حذف است؟

۵. یک نیازمندی برای تعداد تجهیز/ابزار آزمایش مخصوص وجود دارد؛ یعنی آزمایش‌گر ویژه سیستم [0-2310B]، آزمایش‌گر ویژه سیستم [I-8891011-A]، آزمایش‌گر ویژه سیستم [I-8891011-8]، مجموعه آزمایش [C.B.[D-2252-A، ابزار استخراجی ویژه [EX20003-4]، و ابزار استخراجی ویژه [EX45112-6]. اغلب این آیتم‌های *ویژه* از

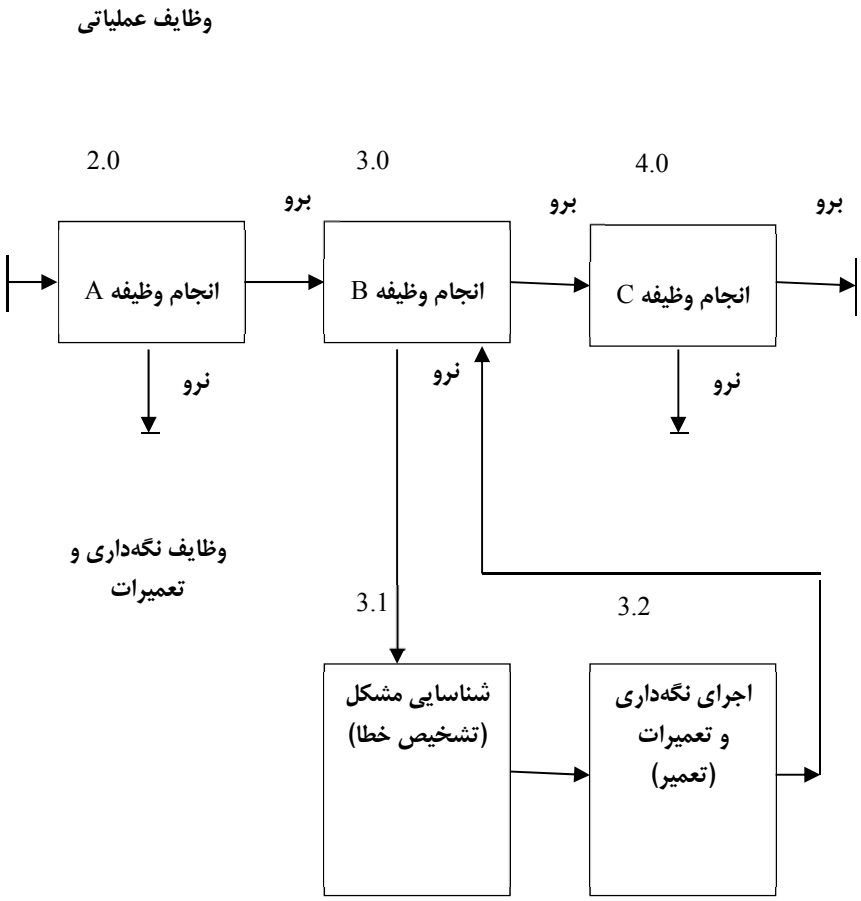
جنبه کاربرد عمومی آن‌ها برای دیگر سیستم‌ها محدود هستند و اکتساب و نگه‌داری آن‌ها پر هزینه است. در ابتدا، باید بررسی شود که آیا می‌توان این آیتم‌ها را حذف کرد یا نه. اگر ابزارها/تجهیزات آزمایش موردنیاز باشند، آیا آیتم‌های استاندارد (به‌جای آیتم‌های ویژه) قابل استفاده هستند؟ هم‌چنین، اگر آزمایش‌گرهای ویژه متنوع موردنیاز است، آیا می‌توان آن‌ها را به یک نیازمندی واحد ادغام کرد؟ به‌عبارت دیگر، آیا یک آیتم واحد را می‌توان طراحی کرد که به‌جای سه آزمایشگر ویژه و مجموعه آزمایش C.B. قرار داده شود؟ کاهش نیازمندی‌های کلی برای آزمایش ویژه و تجهیزات پشتیبانی یک هدف اصلی است.

۶. با مراجعه به تکلیف ۹، یک کانتینر جابه‌جایی ویژه برای حمل و نقل مونتاژ A-7 وجود دارد. این موضوع مساله دسترسی‌پذیری کانتینر را در هنگامی که نیاز برای آن وجود دارد، مطرح می‌کند. مناسب است که مشخص شود آیا می‌توان از روش‌های بسته بندی و جابه‌جایی عادی استفاده کرد یا نه.

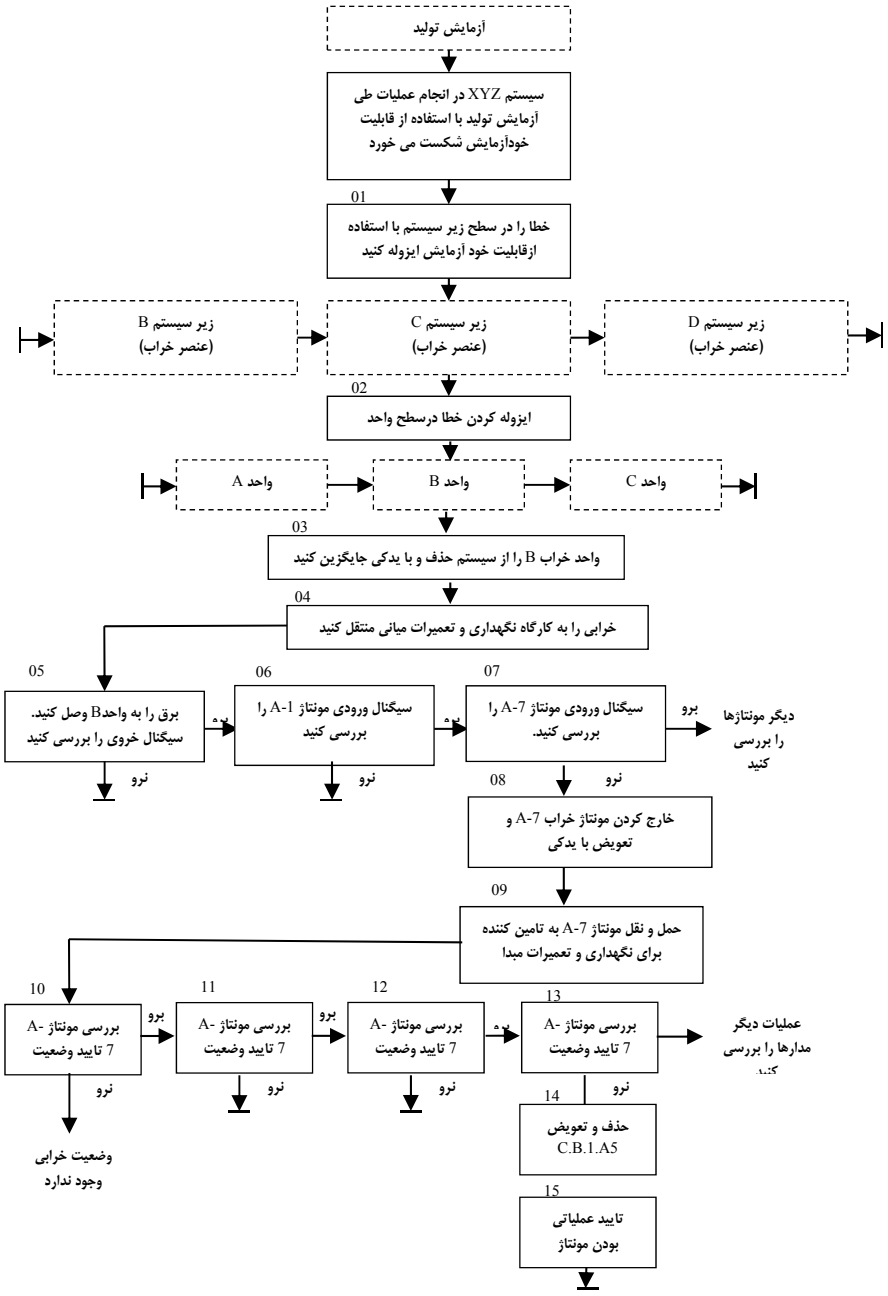
۷. با مراجعه به تکلیف ۱۴، حذف و جایگزینی C8-1A5 ۴۰ دقیقه طول می‌کشد و نیازمند یک فرد با مهارت بسیار بالا برای انجام تکلیف نگه‌داری و تعمیرات است. با فرض آن‌که مونتاژ A-7 قابل تعمیر است، مناسب است که رویه حذف/جایگزینی با اضافه کردن قطعات متصل شده ساده‌سازی شود یا حداقل تکلیف ساده شود تا اجازه داده شود که کار در یک سطح با مهارت اولیه صورت گیرد.



شکل ۱۳- ۱۸- نمودار بلوکی جریان وظیفه برای یک عملیات تولید



شکل ۱۳- ۱۹- شناسایی وظایف نگه‌داری و تعمیرات از وظایف عملیاتی.



شکل ۱۳- ۲۰- نمودار جریان منطق خلاصه شده.

۱. سیستم: XYZ	۲. شماره آیتم/قطعه: آزمایش تولید/A432	۳. مونتاژ سطح بالاتر مونتاژ و آزمایش	۴. تشریح نیازمندی : طی تولید و آزمایش محصول ۱۲۳۴۵ (شماره سریال ۶۵۴) سیستم XYZ خراب می شود. نشانه خرابی خروجی برق است. نیازمندی: کشف عیب و تعمیر سیستم

۵. Req. No.	۶. نیازمندی: تشخیص خطا/تعمیر	۷. فراوانی نیازمندی	۸. سطح نگهداری و تعمیرات سازمانی/میانی	۹. Ma. Cont. No.
01		۰.۰۰۴۵۰		A12B100

۱۰. شماره تکلیف	۱۱. تشریح تکلیف	۱۲. زمان سپری شده–دقیقه	۱۳. کل زمان سپری شده	۱۴.فراوانی تکلیف	نفر دقیقه کارکنان			
		2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 3638			۱۵. B	۱۶. I	۱۷. S	۱۸. مجموع
۰۱	ایزوله کردن خطا در سطح زیر سیستم		۵	۰.۰۰۴۵۰	۵	–	–	۵

	(زیر سیستم Cخراب است)																					۰.۰۰۴۵۰					
۰۲	ایزوله کردن خطا در سطح واحد																				۲۵	۰.۰۰۴۵۰	–	۲۵	–	۲۵
	(واحد B خراباست)																					۰.۰۰۴۵۰			۲۵	۲۵
۰۳	واحد B را از سیستم جدا کنید																				۱۵	۰.۰۰۴۵۰	۱۵	–	–	۱۵
	با واحد یدکی B جایگزین کنید																					۰.۰۰۴۵۰				
۰۴	واحد خراب را به کارگاه میانی انتقال دهید																				۳۰	۰.۰۰۴۵۰	۳۰	–	–	۳۰
۰۵	برق را به واحد خراب وصل کنید.																				۲۰	۰.۰۰۴۵۰	–	۲۰	–	۲۰
	سیگنال خروجی را بررسی کنید																					۰.۰۰۴۵۰				
۰۶	سیگنال ورودی به مونتاژ را																				۱۵	۰.۰۰۴۵۰	–	۱۵	–	۱۵

	بررسی کنید																								
	A-1 (20v P-P@T.P.7)																			۰.۰۰۴۵۰					
۰۷	سیگنال ورودی به مونتاژ را بررسی کنید																		۲۰	۰.۰۰۴۵۰	–	۲۰	–	۲۰
	A-7 (PW-5sec@T.P.2)																			۰.۰۰۴۵۰					
۰۸	A-7 خراب را خارج کرده و تعویض کنید																		۱۰	۰.۰۰۴۵۰	۱۰	–	–	۱۰
۰۹	واحد A-7 خراب را به																			۰.۰۰۴۵۰					
	تامین کننده برای نگهداری و تعمیرات مبدا بفرستید																			۰.۰۰۴۵۰					
۱۰	A-7 رابررسی کرده و وضعیت خراب را تایید کنید																		۲۵	۰.۰۰۴۵۰	–	–	۲۵	۲۵
۱۱	عملیات CB-3A2 را بررسی کنید																		۱۵	۰.۰۰۴۵۰	–	–	۱۵	۱۵

۱۲	عملیات CB-2A4 را بررسی کنید																			۱۰	۰.۰۰۴۵۰	–	–	۱۰	۱۰
۱۳	عملیات CB-1A5 را بررسی کنید																			۲۰	۰.۰۰۴۵۰	–	–	۲۰	۲۰
۱۴	CB-1A5 را حذف و جایگزین کنید																			۴۰	۰.۰۰۴۵۰	–	۴۰	–	۴۰
	مدار خراب را دور اندازید																				۰.۰۰۴۵۰				
۱۵	تایید کنید که عملیات مونتاژ درست انجام می شود																			۱۵	۰.۰۰۴۵۰	–	–	۱۵	۱۵
	و به انبار بر گردانید																				۰.۰۰۴۵۰				
۲۹۰																		مجموع		۲۶۵	۰.۰۰۴۵۰	۶۰	۱۲۰	۱۱۰	۲۹۰

شکل ۱۳- ۲۱- تحلیل تکلیف نگهداری و تعمیرات (برگه ۱)

۱. شماره آیتم آزمایش تولید/A432			۲. شماره درخواست 01	۳. نیازمندی تشخیص خطا و تعمیر		۴. فراوانی نیازمندی ۰.۰۰۴۵	۵. سطح نگهداری وتعمیرات سازمانی، میانی، مبدا	۶. Ma. Cont. No. A12B100
		قطعات تعویضی		تجهیزات آزمایش، پشتیبانی و حمل و نقل			۱۶. تشریح نیازمندی‌های تسهیل	۱۷.دستورالعمل‌های مخصوص داده‌های فنی
۷. شماره تکلیف	۸. تعداد در مونتاژ	۹.نماد قطعه ۱۱.شماره قطعه	۱۰. فراوانی تعویض	۱۲.تعداد	۱۳.نماد آیتم ۱۵. شماره آیتم	۱۴. زمان استفاده		
۰۱	–	------	–	۱	تجهیز خود آزمایش A123456	۵	------	نگهداری و تعمیرات سازمانی
۰۲	–	------	–	۱	آزمایشگر ویژه سیستم O-2310B	۲.۵	------	
۰۳	۱	واحد B B180265	0.01866	۱	بسته ابزار استاندارد STK-100-B	۱۵	------	
۰۴	–	------	–	۱	واگن استاندارد (M-10)	۳۰	------	نگهداری و تعمیرات میانی
۰۵	–	------	–	۱	آزمایشگر ویژه سیستم 1-8891011-A	۲۰	------	
۰۶	–	------	–	۱	آزمایشگر ویژه سیستم 1-8891011-A	۱۵	------	
۰۷	–	------	–	۱	آزمایشگر ویژه سیستم 1-8891011-A	۲۰	------	

به دستورالعمل ویژه حذف مراجعه کنید	------	۱۵	ابزار استخراجی ویژه EX20003-4	۱	0.00995	مونتاژ A-7 MO-2378A	۱	۰۸
محیط حمل و نقل طبیعی	------	۲۰	کانتینر ویژه جابجایی T-300A	۱	–	------	–	۰۹
نگه‌داری و تعمیرات تامیین کننده	محیط اتاق پاک	۱۰	آزمایشگر ویژه سیستم 1-8891011-A	۱	–	------	–	۱۰
		۱۴	مجموعه آزمایش D-2252-A–C.B.	۱	–	------	–	۱۱
		۲۵	مجموعه آزمایش D-2252-A–C.B.	۱	–	------	–	۱۲
		۱۵	مجموعه آزمایش D-2252-A–C.B.	۱	–	------	–	۱۳
		۴۰	ابزار استخراجی ویژه EX20003-4 بسته ابزار استاندارد STK-100-B	۱	۱	CB-1A5 GDA-221056C	۱	۱۴
برگرداندن مونتاژ عملیاتی به انبار		۱۵	آزمایشگر ویژه سیستم 1-8891011-A	۱	0.00450	------	–	۱۵

شکل ۱۳-۲۱- تحلیل تکلیف نگه‌داری و تعمیرات (برگه ۲)

۱۳-۵-۶- نگه‌داری و تعمیرات بهره‌ور جامع (TPM)

نگه‌داری و تعمیرات بهره‌ور جامع، مفهومی که توسط ژاپنی‌ها در اوایل دهه ۷۰ میلادی معرفی شد، یک "رویکرد چرخه‌ی عمر ادغامی برای نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی یک کارخانه تولیدی" را ارائه می‌دهد. تجربه نشان می‌داد که بسیاری از کارخانه‌های موجود پایین‌تر از ظرفیت کامل خود کار می‌کردند، بهره‌وری عمومی پایین بوده و هزینه‌های عملیات بالایی داشتند. علاوه‌بر این، بخش بزرگی از هزینه کل برای انجام کسب و کار مربوط به "اتلاف در تولید" بود که این اتلاف محصول از کارافتادگی بیش از حد کارخانه و نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیر بود. این هزینه‌ها به‌نوبه‌ی خود به هزینه‌های محصول تولید شده منتقل می‌شد. به عبارت دیگر، هزینه بسیاری از محصولات تحویلی به مصرف‌کننده بالا بود، زیرا هزینه تولید بالا بود که به‌نوبه‌ی خود اثری منفی بر بازار تجاری داشت. بنابراین، فعالیت‌های گسترده‌ای در ژاپن آغاز شد تا بهره‌وری افزایش یابد و هزینه‌های تولید با هدف قراردادن نگه‌داری و تعمیرات کاهش یابد.

اگرچه موضوع نگه‌داری و تعمیرات در ابتدا یک انگیزش بود، آثار نسبی پیاده‌سازی مفاهیم و اصول TPM بسیار فراتر هستند. در حقیقت، TPM یک رویکرد برای بهبود اثربخشی و کارایی کلی یک کارخانه تولیدی است. اهداف این رویکرد از قرار زیر است:

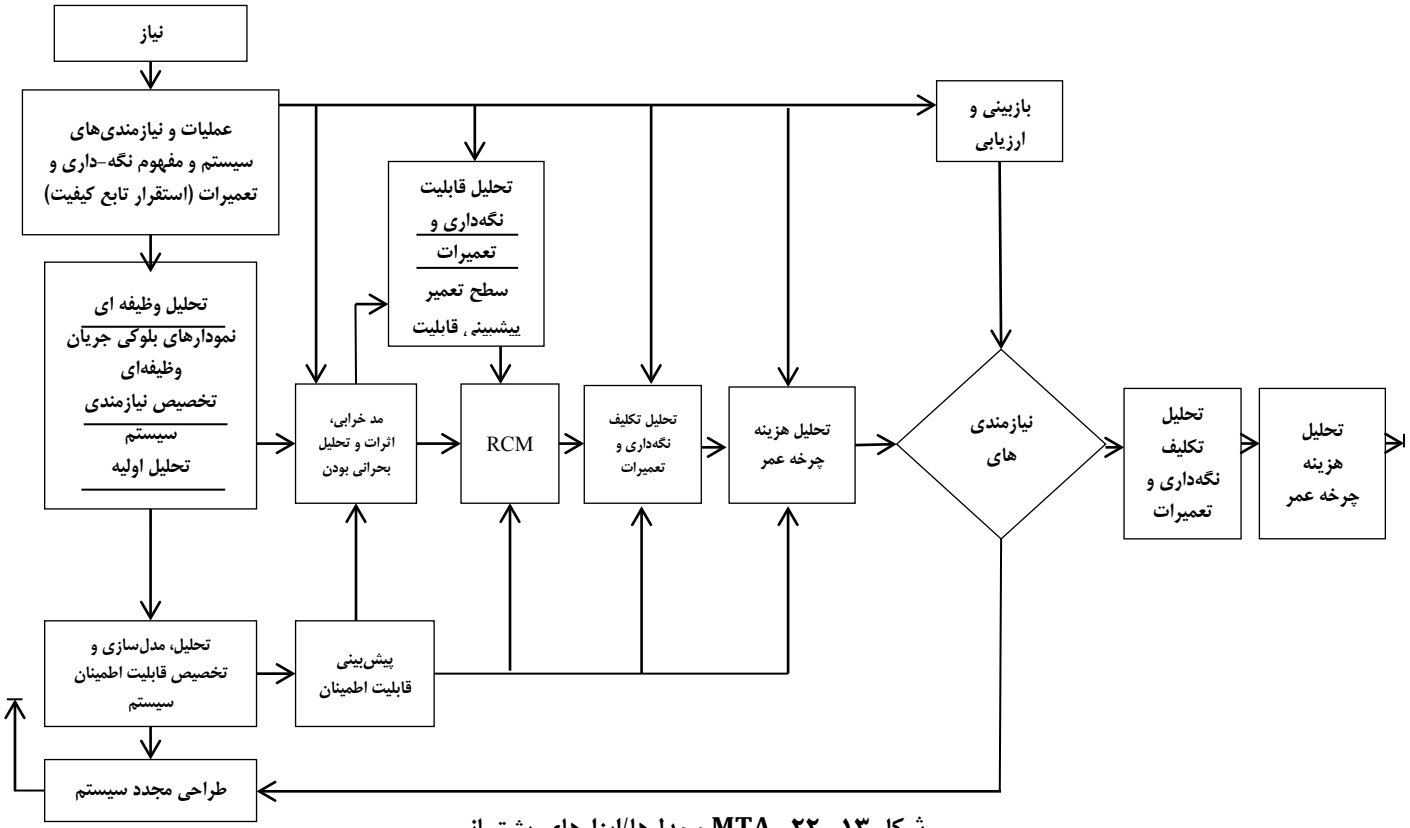
۱. اثربخشی تجهیزات و فرایندهای تولید را حداکثر کنید. این موضوع به بیشینه کردن دسترسی‌پذیری فرایند تولید از طریق بهبود قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات تجهیز و با هدف کمینه کردن زمان از کار افتادگی بستگی دارد.

۲. یک رویکرد چرخه‌ی عمر در اجرای نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه را استقرار دهید. این موضوع به کاربرد رویکرد RCM برای توجیه نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه بستگی دارد.

۳. همه گروه‌ها/دپارتمان‌های عملیاتی در سازمان‌دهی کارخانه تولیدی در برنامه‌ریزی و استقرار یک دستور کار نگه‌داری و تعمیرات باید درگیر شوند (یعنی نماینده‌های مهندسی، عملیات، آزمایش، بازاریابی، و نگه‌داری و تعمیرات). هدف دست‌یابی به یک تعهد کامل سراسر سازمان تولیدی است.

۴. کارمندان از مدیران کارخانه تا کارگران کارگاه را درگیر کنید. باید یک تعهد سازمانی از بالا به پایین در سلسله مراتب سازمان وجود داشته باشد.

۵. یک دستور کار بر اساس ارتقای نگه‌داری و تعمیرات از طریق مدیریت انگیزش و توسعه فعالیت‌های خودکار در گروه‌های کوچک را آغاز کنید (یعنی انجام نگه‌داری و تعمیرات از طریق یک رویکرد تیمی). اپراتور باید مسئولیت بیش‌تری در مورد عملیات تجهیز خود داشته و باید برای تشخیص وضعیت غیرعادی تجهیز، فهم روابط علت–اثر، و انجام تعمیرات جزئی آموزش ببیند. هم‌چنین اپراتور توسط دیگر اعضای تیم برای اجرای فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات در سطوح بالاتر نگه‌داری و تعمیرات پشتیبانی می‌شود. اجرای FMECA و نمودار ایشیکاوا می‌تواند در شناسایی روابط علت–اثر کمک کند (شکل ۱۲–۱۹).



شکل ۱۳- ۲۲- MTA و مدل‌ها/ابزارهای پشتیبانی

شاخص نگه‌داری و تعمیرات بهره ورجامع (TPM) را می‌توان به‌صورت اثربخشی کلی تجهیز (OEE) که تابعی از دسترسی‌پذیری، نرخ عملکرد و نرخ کیفیت است به‌صورت زیر تعریف کرد

OEE = (دسترسی‌پذیری)(نرخ عملکرد)(نرخ کیفیت)

که درآن

$$\text{Availability}(A) = \frac{\text{loading time - downtime}}{\text{loading time}} \qquad (۲۵-۱۳)$$

که در آن loading time کل زمان در دسترس برای تولید محصولات (که به‌صورت روز، ماه، یا دقیقه بیان می‌شود) و downtime به توقف‌ها حاصل از خرابی‌ها، راه اندازی‌ها، اصلاحات و غیره است. بنابراین

$$\text{Performance rate}(P) = \frac{(\text{output})(\text{actual cycle time})}{(\text{loading time - downtime})} \times \frac{(\text{ideal cycle time})}{(\text{actual cycle time})} \qquad (۲۶-۱۳)$$

که در آن output به تعداد محصولات تولید شده؛ ideal cycle time به چرخه زمانی ایده آن برای هر محصول (به‌طور مثال دقیقه برای هر محصول)؛ و actual cycle time زمان واقعی تجربه شده از چرخه زمانی تولید یک محصول است. این شاخص فرایند و نرخ عملکرد را مورد خطاب قرار می‌دهد. بنابراین

$$\text{Quality Rate}(Q) = \frac{\text{input-}(\text{quality defects+start up defects+rework})}{\text{input}} \qquad (۲۷-۱۳)$$

که در آن input به کل محصولات پردازش شده و defects به کل تعداد خرابی‌ها اطلاق می‌شود.

در حقیقت، یک کارخانه تولیدی به‌عنوان یک سیستم در نظر گرفته شده و فاکتور OEE شاخصی از اثربخشی سیستم است، همان‌طور که در قسمت ۱۳-۳ بحث شد. کارخانه تولیدی می‌تواند به‌صورت وظیفه‌ای تعریف شود، شاخص‌ها به هر عنصر وظیفه‌ای تخصیص داده شوند، اجزای پرهزینه شناسایی شوند، روابط علت- اثر استقرار یابد و در صورت نیاز پیشنهادهایی برای بهبود سیستم ارائه گردد. بنابراین، اگرچه این موضوع در این فصل مورد بحث قرار گرفت، بسیاری از مفاهیم و اصول بحث شده در بخش دوم این کتاب برای طراحی، توسعه، ساخت، عملیات و پشتیبانی کارخانه تولیدی قابل استفاده است.

۱۳-۶- نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به‌عنوان بخشی از ارزیابی و آزمایش سیستم که در فصل ۶ بحث شد، انجام می‌گیرد. به ویژه، نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به‌عنوان بخشی از آزمایش نوع ۲ انجام می‌شود تا نیازمندی‌های کمی و کیفی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به‌دست آمده تایید شوند. هم‌چنین ارزیابی فاکتورهای متنوع تدارکات مربوط و موثر بر پارامترهای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات و آیتم‌های از کار افتادگی را فراهم می‌کند (به‌طور مثال تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، قطعات یدکی/تعمیری، داده‌های فنی، کارکنان و سیاست‌های نگه‌داری و تعمیرات).

نمایش نگه‌داری و تعمیرات اغلب طی بخش پایانی فاز طراحی و توسعه تفصیلی انجام شده و باید در یک محیط شبیه‌سازی شده از محیط برنامه‌ریزی شده برای عملیات و نگه‌داری و تعمیرات آیتم صورت گیرد. نمایش نگه‌داری و تعمیرات بسته به نیازمندی‌های سیستم و اهداف آزمایش به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند متغیر باشد. در این قسمت دو رویکرد تشریح شده است تا ایده‌ای از گام‌های موردنیاز فراهم کرده باشد.

۱۳-۶-۱ نمایش به روش ۱

نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به روش ۱ از یک رویکرد آزمایش ترتیبی پیروی می‌کند که شبیه آزمایش قابلیت اطمینان تشریح شده در قسمت ۱۲-۵ است. دو برنامه آزمایش ترتیبی مختلف به‌کار می‌روند تا $\bar{M}ct$ و $M_{\max}$ (برای نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی) نمایش داده شوند. یک تصمیم تایید برای تجهیز تحت آزمایش هنگام به‌دست می‌آید که تصمیم برای هر دو برنامه موثق باشد. برنامه‌های آزمایش فرض می‌کنند که توزیع زمان‌های تکلیف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی لاگ نرمال هستند. رویکرد برنامه آزمایش ترتیبی، تصمیم‌گیری سریع را هنگامی که قابلیت نگه‌داری و تعمیرات تجهیز تحت آزمایش خیلی بالاتر یا خیلی پایین تر از مقادیر $\bar{M}ct$ و $M_{\max}$ هستند، باعث می‌شود.

آزمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات توسط شبیه‌سازی خرابی‌ها در سیستم و مشاهده زمان‌های تکالیف و منابع موردنیاز تدارکات برای اصلاح وضعیت انجام می‌شود. این کار شامل گام‌های زیر می‌شود:

۱. یک خرابی در تجهیز بدون آگاهی تیم آزمایش اتفاق می‌افتد. خرابی اتفاق افتاده تنها از طریق مد خرابی شبیه‌سازی شده حاصل می‌شود. به‌عبارت دیگر، به تکنسین‌ها برای انجام نگه‌داری و تعمیرات هیچ راهنمایی ارائه نمی‌شود تا متوجه شوند خرابی از کجا نشات گرفته است.

۲. تکنسین نگه‌داری و تعمیرات فراخوانده می‌شود تا عملیات تجهیز را بررسی کند. در نقطه از رویه بازرسی، علائمی از کارکرد نادرست کشف می‌شود.

۳. هنگامی که کارکرد نادرست شناسایی شد، تکنسین نگه‌داری و تعمیرات تکالیف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی لازم را انجام می‌دهد (یعنی تعیین محل خطا، ایزوله

کردن، پیاده کردن، حذف و تصحیح و تنظیم، و بازرسی سیستم – شکل ۱۳–۱). در انجام هر گام، تکنسین باید رویه نگه‌داری و تعمیرات تایید شده را دنبال کند و از تجهیزات مناسب آزمایش و پشتیبانی استفاده کند. تکالیف نگه‌داری و تعمیرات باید مطابق با مفهوم نگه‌داری و تعمیرات و سطح نگه‌داری و تعمیرات مشخص شده انجام شود. قطعات تعویضی موردنیاز برای فعالیت‌های تعمیر باید با قطعات یدکی و تعمیری پیشنهاد شده برای پشتیبانی عملیات مطابقت داشته باشد.

۴. هنگامی که تکنسین نگه‌داری و تعمیرات تکالیف اصلاحی را انجام می‌دهد (با شروع از شناسایی یک کارکرد نادرست و ادامه دادن تا بازگرداندن تجهیز به حالت کاملا عملیاتی)، یک ثبت کننده آزمایش داده‌های توالی تکلیف، حوزه‌های دشوار تکلیف، و زمان‌های تکلیف را جمع‌آوری می‌کند. علاوه‌بر این، کفایت و عدم کفایت پشتیبانی تدارکات مورد توجه قرار می‌گیرد. برای مثال، *آیا نوع درست پشتیبانی فراهم شده است؟ آیا هیچ تاخیری در آزمایش به علت عدم کفایت وجود داشته است؟ آیا بیش از حد بودن یا کمبود در برخی آیتم‌ها مشاهده شده است؟ آیا هر عنصر مشخص شده پشتیبانی به‌صورت مطلوب کار خود را انجام داده است؟ آیا رویه آزمایش کافی بوده است؟* این سوالات و سوالات مرتبط دیگر باید در ذهن ثبت کننده داده‌ها طی مشاهده آزمایش باشد.

این چرخه آزمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات n بار انجام می‌شود که در آن n اندازه نمونه انتخاب شده است. برای تست ترتیبی، تعداد نمایش‌ها می‌تواند بیش از ۱۰۰ باشد. بنابراین، در آماده‌سازی آزمایش، یک اندازه نمونه از ۱۰۰ نمایش باید برنامه‌ریزی شود. تکالیف انتخاب شده باید نماینده و بر پایه درصد مشارکت مورد انتظار در راستای نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات باشد. آن آیتم‌هایی که نرخ خرابی بالا دارند بیش‌تر خراب می‌شوند و نیازمند نگه‌داری و تعمیرات

و منابع تدارکات بیش‌تری است؛ در نتیجه، باید در نمایش بیش‌تر از آیتم‌هایی که نگه‌داری و تعمیرات کم‌تری دارند ظاهر شوند.

فرایند انتخاب تکلیف توسط توزیع نسبتی ۱۰۰ تکلیف از میان عناصر وظیفه‌ای عمده یک سیستم انجام می‌شود. با فرض این‌که سه واحد سیستم را تشکیل می‌دهند، ۱۰۰ تکلیف تخصیص داده می‌شود که در جدول ۱۳–۱۴ نشان داده شده است. با مراجعه به جدول، عناصر سیستم و نرخ‌های خرابی مربوطه (از داده‌های قابلیت اطمینان)فهرست شده‌اند. درصد مشارکت هر آیتم در نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی پیش‌بینی شده کلی (ستون ۵) به‌صورت زیر محاسبه شده است:

$$\text{درصد مشارکت آیتم} = \frac{Q\lambda}{\sum Q\lambda}\times 100 \qquad (۲۸–۱۳)$$

این فاکتور در تخصیص تکالیف به هر واحد استفاده می‌شود. به روشی مشابه، ۲۱ تکلیف در واحد A به مونتاژهای آن واحد تخصیص داده می‌شود و بقیه به همین منوال. هنگامی که تخصیص کامل شد، یک تکلیف می‌تواند وجود داشته باشد که به یک مونتاژ مشخص تخصیص داده شده است و مونتاژ می‌تواند شامل اجزای مختلفی باشد که خرابی منعکس کننده مدهای خرابی مختلف باشد (به‌طور مثال بدون خروجی، خروجی نامنظم، خروجی پایین و غیره). از طریق یک فرایند تصادفی، یکی از اجزا در مونتاژ به‌عنوان آیتمی که خرابی از آن نشات می‌گیرد انتخاب شده و مسیری که توسط آن خرابی نشات گرفته شده است، مشخص شده است.

با تکالیف شناسایی شده و فهرست شده با ترتیبی تصادفی، نمایش با اولین تکلیف آغاز شده و سپس تکالیف بعدی مشخص می‌شوند. معیارهای تایید/رد تصمیم در شکل ۱۳–۲۳ نشان داده شده است. زمان‌های تکلیف (Mct_i) اندازه‌گیری شده و با مقادیر $\bar{M}ct$ و M_{max} تعیین شده مقایسه می‌شود. هنگامی که زمان نمایش داده شده از مقدار تعیین شده تجاوز می‌کند، یک رخداد

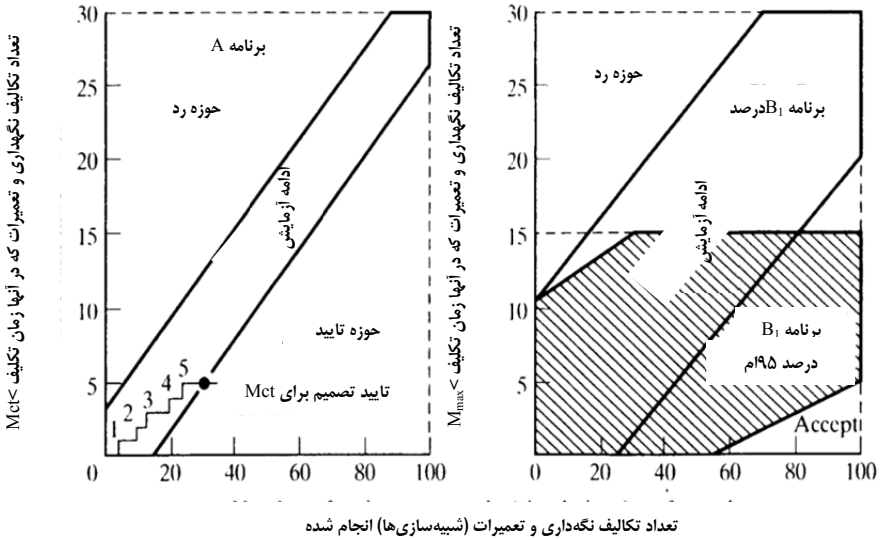
همراه با یک گراف مشاهده شده و حوزه‌های مشکل ساز تشریح می‌گردد. سپس آزمایش تا وقتی خط رخداد به حوزه تایید یا رد وارد شود ادامه می‌یابد.

به‌عنوان مثالی از برگه امتیاز آزمایش نمایش جدول ۱۳–۱۵ ارائه شده است. اعداد تایید–رد خطوط تصمیم در شکل ۱۳–۲۳ را حمایت می‌کنند (به منحنی $\bar{M}ct$ مراجعه کنید). در این مورد، ۲۹ تکلیف پیش از تصمیم تایید انجام شده‌اند. آزمایش ترتیبی نیازمند آن است که هر دو معیار $\bar{M}ct$ و M_{max} پیش از تایید نهایی تجهیز برآورده شوند. M_{max} می‌تواند بر پایه ۹۰مین یا ۹۵مین درصد باشد، بسته به نیازمندی سیستم و برنامه آزمایش انتخاب شده. اگر یک برنامه آزمایش به‌صورت خط رخداد متقاطع با حوزه تایید تکمیل شود، آزمایش تا زمانی که تصمیم در برنامه آزمایش دیگری گرفته شود ادامه می‌یابد.

با مراجعه به شکل ۱۳–۲۳، معیارها برای آزمایش ترتیبی مشخص می‌کند که حداقل تعداد تکالیف ممکن برای یک تصمیم سریع برای $\bar{M}ct$، ۱۲ است (برنامه آزمایش A). برای M_{max} در ۹۰مین درصد، حداقل تعداد تکالیف ممکن ۲۶ است (برنامه آزمایش B_1) در حالی که برای درصد ۹۵م ۵۷ است (برنامه آزمایش B_2). بنابراین، اگر قابلیت نگه‌داری و تعمیرات یک آیتم خوب باشد و نشان‌دهنده‌ی عدم نیاز به نمونه کامل ۱۰۰ تکلیفی باشد، بنابراین زمان و هزینه صرفه‌جویی خواهد شد. برعکس، اگر قابلیت نگه‌داری و تعمیرات یک آیتم حاشیه‌ای بوده و تصمیم ادامه آزمایش زیاد اتفاق افتد، برنامه آزمایش نیازمند نمایش همه ۱۰۰ تکلیف است. اگر کوتاه‌سازی به‌دست آید، تجهیز برای $\bar{M}ct$ تایید می‌شود اگر ۲۹ تکلیف یا کم‌تر از مقدار مشخص شده $\bar{M}ct$ تجاوز نکند. فاکتورهای قابل مقایسه برای M_{max} ۵ یا کم‌تر برای درصد ۹۰م و ۲ یا کم‌تر برای درصد ۹۵م است.

جدول ۱۳- ۱۴- تخصیص تکالیف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی

(۱)آیتم	(۲)تعداد(Q)	(۳)خرابی/آیتم ۱۰۰۰/ساعت (λ)	(۴)کل خرابی‌ها(λ)(Q)	(۵)٪مشارکت	(۶)تکالیف نگه‌داری و تعمیرات تخصیص داده شده برای نمایش
واحد A	۱	۰,۴۸	۰,۴۸	۲۱	۲۱
واحد B	۱	۱,۷۱	۱,۷۱	۷۶	۷۶
واحدC	۱	۰,۰۶	۰,۰۶	۳	۳
مجموع			۲,۲۵	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۱۳- ۲۳- ترسیم گرافیکی برنامه‌های نمایش قابلیت اطمینان.

۱۳-۶-۲ نمایش به روش ۲

این روش برای نمایش $\bar{M}ct$، $\bar{M}pt$، و $\bar{M}$ قابل استفاده است. توزیع زمان‌های تعمیرات و نگه‌داری محدود نیست (هیچ پیش‌فرضی وجود ندارد) و اندازه نمونه ۵۰ تکلیف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی برای $\bar{M}ct$ و ۵۰ تکلیف نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه برای $\bar{M}pt$ را تشکیل می‌دهد. $\bar{M}ct$ به‌صورت تحلیلی از نتایج آزمایش $\bar{M}ct$ و $\bar{M}pt$ تعیین می‌شود. $\bar{M}_{\max}$ نیز می‌تواند تعیین شود اگر توزیع لاگ نرمال فرض شده باشد. این روش مزیت اندازه نمونه ثابت را دارد که تخمین هزینه‌های آزمایش را تسهیل می‌کند.

جدول ۱۳- ۱۵- طراحی برای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

نیازمندی: Mct = 0.5hr=30min				برنامه A
شماره تکلیف نگه‌داری و تعمیرات	زمان تکلیف Mct_i	تعداد Cum $Mct_i > \bar{M}ct$	تایید هنگامی که Cum≤Than	رد شدن هنگامی که Cum>Than
۱	۱۲	۰	–	–
۲	۶	۰	–	–
۳	۱۸	۰	–	–
۴	۳۲	۱	–	–
۵	۱۹	۱	–	۵
۶	۲۷	۱	–	۶
۷	۱۰۸	۲	–	۶
۸	۶	۲	–	۶
۹	۱۴	۲	–	۷
۱۰	۴۷	۳	–	۷
۱۱	۲۸	۳	–	۷
۱۲	۱۹	۳	۰	۷
۱۳	۴	۳	۰	۸

۱۴	۲۴	۳	۰	۸
۱۵	۷۸	۴	۱	۸
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
۲۴	۲۰	۴	۳	۱۱
۲۵	۱۲۷	۴	۴	۱۱
۲۶	۲۱	۴	۴	۱۲
۲۷	۱۳	۴	۴	۱۲
۲۸	۲۸	۴	۴	۱۲
۲۹	۸	۵	۵	۱۲

تایید $\bar{M}ct$

آزمایش شامل انتخاب عملکرد تکالیف نگه‌داری و تعمیرات به‌صورت مشابه آنچه برای نمایش به روش ۱ تشریح شد می‌شود. تکالیف بر پایه مشارکت پیش‌بینی شده در نگه‌داری و تعمیرات کل انتخاب شده و هر تکلیف در قالب زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات و منابع موردنیاز تدارکات انجام شده و ارزیابی می‌شود. نمایش این روش از طریق یک مثال صورت گرفته است. فرض شده است که یک سیستم برای برآورده کردن نیازمندی‌های زیر طراحی شده است و بر اساس آن‌ها باید نمایش داده شود:

$$\bar{M} = 75$$
$$\bar{M}ct = 65$$
$$\bar{M}pt = 110$$
$$M_{\max} = 120$$

$$\text{ریسک تولید کننده}(\alpha) = 20\%$$

این آزمایش انجام شده و داده‌های جمع آوری شده در جدول ۱۳–۱۶ نشان داده شده است. تعیین $\bar{M}ct$ (حد بالای اطمینان) بر پایه عبارت زیر قرار دارد

$$\text{حدبالا} = \bar{M}ct + Z\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_c}}\right) \qquad (۲۹-۱۳)$$

که در آن

$$\bar{M}ct = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} Mct_i}{n_c} = \frac{3105}{50} = 62.1 \approx 62$$

و از جدول ۱۳-۴ $Z=0.84$. در نتیجه

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c}\left(Mct_i - \bar{M}ct\right)^2}{n_c - 1}} = \sqrt{\frac{15016}{49}} = 17.5$$

که در آن n_c اندازه نمونه نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی برابر با ۵۰ است.

$$\text{حد بالا} = 62 + \frac{(0.84)(17.5)}{\sqrt{50}} = 64.07$$

جدول ۱۳- ۱۶- داده‌های زمان آزمایش نگه‌داری و تعمیرات

شماره نمایش تکلیف	زمان Mct_i مشاهده شده	$Mct_i - Mct$ $(Mct_i - 62)$	$(Mct_i - Mct)^2$
۱	۵۸	-۴	۱۶
۲	۷۲	+۱۰	۱۰۰
۳	۳۲	-۳۰	۹۰۰
⋮	⋮	⋮	⋮
۵۰	۴۸	-۱۴	۱۹۶
مجموع	۳۱۰۵		۱۵۰۱۶

آماره تکمیل شده $\bar{M}ct$ با معیارهای تایید– رد مربوطه مقایسه شده که تایید می‌شود اگر

$$\bar{M}ct + Z\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_c}}\right) \le \bar{M}ct \text{ (تعیین شده)} \qquad (۳۰-۱۳)$$

و رد می‌شود اگر

$$\bar{M}ct + Z\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_c}}\right) > \bar{M}ct \text{ (تعیین شده)} \qquad (۳۱-۱۳)$$

با اعمال داده‌های آزمایش، می‌تواند مشاهده کرد که ۶۴٫۰۷ کم‌تر از مقدار تعیین شده ۶۵ است. بنابراین، سیستم آزمایش $\bar{M}ct$ تا با موفقیت پشت سر گذاشته و قبول می‌شود.

برای نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه، رویکرد مشابهی استفاده شده است. ۱۵ تکلیف نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه نشان داده شده و زمان‌های تکالیف (Mpt_i) ثبت شده‌اند. میانگین نمونه زمان از کارافتادگی پیشگیرانه برابر است با

$$\bar{M}pt = \frac{\sum Mpt_i}{n_p} \qquad (۳۲-۱۳)$$

معیارهای تایید–رد مشابه معادلات ۱۳–۳۰ و ۱۳–۳۱ هستند، فقط از فاکتورهای نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه استفاده شده است. یعنی تایید می‌شود اگر

$$\bar{M}pt + Z\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_p}}\right) \le 110$$

و رد می‌شود اگر

$$\bar{M}pt + Z\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n_p}}\right) > 110$$

با داشتن مقادیر آزمایش برای $\bar{M}ct$ و $\bar{M}pt$، زمان نگه‌داری و تعمیرات میانگین محاسبه شده برابر است با

$$\bar{M} = \frac{(\lambda)(\bar{M}ct) + (fpt)(\bar{M}pt)}{\lambda + fpt} \qquad (۳۳-۱۳)$$

که در آن

λ = نرخ نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی یا تعداد انتظاری تکالیف نگه‌داری وتعمیرات اصلاحی که در یک دوره‌ی معین اتفاق می افتد

Fpt = نرخ نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه یا تعداد انتظاری تکالیف نگه‌داری وتعمیرات پیشگیرانه که در همان دوره‌ی معین اتفاق می افتد

با استفاده از این داده‌ها، مقدار حاصل $\bar{M}$ باید برابر یا کم‌تر از ۷۵ دقیقه باشد. در نهایت M_{max} از رابطه زیر تعیین می‌شود

$$M_{\max} = \text{antilog}\left(\log Mct + Z\,\sigma_{\log Mct_i}\right) \qquad (۳۴-۱۳)$$

مقدار محاسبه شده باید برابر یا کم‌تر از ۱۲۰ باشد تا قبول شود. مثالی از محاسبه M_{max} در قسمت ۱۳-۲-۱ ارائه شد. اگر همه مقادیر نمایش داده شده بهتر از مقادیر تعیین شده باشد، با پیروی از معیارهایی که قبلا تعریف شده است، سیستم تایید می‌شود. اگر نه، بسته به جدیت مشکل یا باید تنظیم مجدد شده یا طراحی مجدد انجام می‌شود.

۱۳-۶-۳- ارزیابی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات

با داشتن آزمایش‌های تکمیل شده نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات موفقیت‌آمیز، به‌عنوان بخشی از آزمایش نوع ۲، گام بعدی انجام ارزیابی حقیقت سنجی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات سیستم در واقعیت است. با مراجعه به شکل ۶-۲، این کار توسط آزمایش‌های نوع ۳ و ۴ به‌عنوان بخشی از آزمایش، ارزیابی و تصدیق اعتبار کل سیستم انجام می‌شود که در قسمت ۶-۵ تشریح شد. با انجام آزمایش‌های سیستم، فرایند جمع‌آوری، تحلیل و گزارش‌دهی داده‌ها باید همه‌ی تکالیف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه را که باید انجام شوند، در برگیرند که عبارت‌اند از توالی تکالیف، فراوانی تکالیف، نفر ساعات کارکنان و منابع پشتیبانی (یعنی تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، قطعات یدکی/تعمیری، کارکنان، تسهیلات و غیره) که برای انجام نگه‌داری و تعمیرات سیستم لازم هستند. این موضوع منجر به تصدیق اعتبار MTBM، MLH/OH ,MTD سیستم شده یا نواقصی کشف می‌شود که نیاز به فعالیت‌های اصلاحی برای بهبود طراحی دارد (به قسمت ۶-۶ مراجعه کنید).

۱۳-۷- خلاصه فصل

این فصل یک دید کلی در مورد موضوع قابلیت نگه‌داری و تعمیرات با تاکید بر روابط قابلیت اطمینان و اهمیت آن در طراحی مهندسی سیستم‌ها و فرایند توسعه را فراهم کرده است. این فصل با تعاریف کلیدی آغاز شده و در ادامه به نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، توسعه شاخص‌های اصلی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، شاخص‌های دسترسی‌پذیری و اثربخشی سیستم، تشریح مدل‌ها و تکنیک‌های تحلیل قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، کاربرد فعالیت‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در چرخه عمر سیستم و تصدیق اعتبار قابلیت نگه‌داری و تعمیرات از طریق آزمایش و نمایش فرموله شده می‌پردازد.

مطالعه این فصل، فرد را در شناسایی رابطه و وابستگی موجود بین قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات توانمند می‌کند. بسیاری از نیازمندی‌های وابسته به قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی به داده‌های قابلیت اطمینان به‌عنوان ورودی است و بسیاری از تصمیم‌های طراحی برای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات اثر بازخوردی خوبی بر قابلیت اطمینان دارند. شاخص‌های قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، هنگامی که ترکیب می‌شوند، باید به‌درستی متعادل شوند تا نیازمندی دسترسی‌پذیری کلی سیستم را برآورده سازند. بر این اساس، قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات باید به درستی اعمال شده و برای دست‌یابی به امکان‌پذیر شدن واقعی عملیات با هم ادغام شوند.

یک چالش اصلی کاربرد اصول و مفاهیم قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در یک سیستم به‌عنوان یک موجودیت است. با در نظر داشتن قابلیت اطمینان، تاریخ مملو از مثال‌هایی است که در آن‌ها تاکید بر قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به سمت عناصر مختلف یک سیستم هدایت شده است (به‌طور مثال تجهیزات) و این عناصر به‌صورت یک کل ادغام شده مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. یک سیستم از محصولات و فرایندها تشکیل شده است و شامل ترکیب‌های مختلفی از سخت افزار، نرم‌افزار، افراد، تسهیلات، داده، اطلاعات و غیره می‌شوند. خرابی‌های سیستم می‌توانند ریشه در عوامل مختلفی داشته باشند، پس باید تاکید بیش‌تری بر نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات شود. با مراجعه به قسمت ۱۳–۳، برای مثال، نیاز است که شاخص‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در قالب کلی دسترسی‌پذیری علمیاتی (A_0) و اثربخشی سیستم بیش‌تر مورد بررسی قرار گیرند.

هنگامی که سیستم به‌عنوان یک موجودیت در نظر گرفته می‌شود، فرد نیاز دارد تا همه عناصر سیستم را در نظر گیرد تا زیربنای پشتیبانی تدارکات را شامل شود. بخشی مهم از این زیربنا شامل فعالیت‌های مختلف در زنجیره تامین (SC) است. در بازار جهانی امروزی، اغلب زنجیره تامین

عنصر عمده‌ای از پشتیبانی را تشکیل می‌دهد و این عنصر است که مکررا سهم زیادی در زمان ازکارافتادگی سیستم دارد. توقف‌های ناشی از تعطیلات، اعتصاب کارگران، مسائل فرهنگی، و غیره باعث تاخیرهای غیرمنتظره‌ای می‌شود که پیش‌بینی نشده‌اند. بنابراین، هنگامی که دسترسی‌پذیری عملیاتی و اثربخشی سیستم در نظر گرفته می‌شود، موضوعات زنجیره تامین باید مورد بررسی قرار گیرند. این موضوع در فصل ۱۵ بررسی شده است.

سوالات و مسائل

۱. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را تعریف کنید. تفاوت آن با نگه‌داری و تعمیرات چیست؟ مثال بزنید.

۲. چرا قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی سیستم مهم است؟ چه زمانی فرایند چرخه عمر باید در نظر گرفته شود؟ چرا؟

۳. شاخص‌های کمی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات کدامند؟ (شاخص‌های مربوط سخت افزار، نرم‌افزار، کارکنان، تسهیلات و زیربنای پشتیبانی تدارکات را بحث کنید)

۴. تفاوت اصلی بین MTBF و MTBM کدامند؟ بین MTBF و MTBR چطور؟ بین MTBR و MTBM چطور؟

۵. زمان‌های تکلیف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی به‌صورت زیر مشاهده شده است

فراوانی	زمان تکلیف	فراوانی	زمان تکلیف
۴	۳۷	۲	۳۱
۱۰	۲۵	۳	۳۹
۵	۳۶	۲	۴۷
۷	۳۱	۵	۳۵
۳	۱۳	۱۳	۲۳
۲	۱۱	۱۰	۲۷
۸	۱۵	۶	۳۳
۸	۲۹	۱۲	۱۷
۱۴	۲۱	۱۲	۱۹

(a) بازه‌ی مشاهدات چیست؟

(b) با استفاده از پهنای بازه دسته چهار، تعداد بازه‌های دسته را تعیین کنید. منحنی داده‌ها را رسم کنید. منحنی چه نوع توزیعی دارد؟

(c) $\overline{M}ct$ چیست؟

(d) میانگین هندسی زمان‌های تعمیر چیست؟

(e) انحراف معیار داده‌های نمونه چیست؟

(f) مقدار M_{max} چیست؟ سطح اطمینان را ۹۰٪ فرض کنید

۶. زمان‌های تکالیف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی مشاهده شده و در جدول داده شده است.

(a) بازه‌ی مشاهدات چیست؟

(b) با فرض ۷ دسته و پهنای بازه دسته چهار، داده‌ها و منحنی را رسم کنید. توزیع منحنی را تعیین کنید.

(c) میانگین زمان خرابی چیست؟

فراوانی	زمان تکلیف	فراوانی	زمان تکلیف
۱۲	۲۵	۲	۳۵
۱۰	۱۹	۶	۱۷
۱۲	۲۱	۲	۱۲
۱۳	۲۳	۴	۱۵
۸	۲۹	۱	۳۷
۳	۱۳	۱۰	۲۷
۱	۹	۳	۳۳
–	–	۶	۳۱

(d) انحراف معیار داده چیست؟

(e) سیستم باید میانگین زمان خرابی ۲۵ دقیقه را در سطح اطمینان ۹۵٪ برآورده کند. آیا داده‌ها چنین نیازمندی را برآورده می‌کند؟ چرا؟

۷. با دسترسی‌پذیری ذاتی ۰/۹۹۰و MTBF ۴۰۰ ساعت، $\bar{M}ct$ چیست؟

۸. با استفاده از داده‌های داده شده تمام پارامترهایی را که می‌توان محاسبه کرد، تعیین کنید.

داده شده	تعیین کنید	
λ=0.004	MTBM	A_i
کل زمان عملیات = ۱۰۰۰۰	MTBF	A_a
میانگین زمان از کار افتادگی = ۵۰ساعت	$\bar{M}$	A_0
تعداد کل فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات = ۵۰	$MTTR_g$	$\bar{M}ct$
میانگین زمان نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه = ۶ساعت		M_{max}

۹. با داشتن داده‌های زیر، دسترسی‌پذیری به‌دست آمده را محاسبه کنید.

$\bar{M}ct = 0.5$ (a)

$MTBM_u=2$ (b)

$\bar{M}pt = 2.0$ (c)

$MTBM_s=1000$ (d)

۱۰. تخصیص قابلیت نگه‌داری و تعمیرات چیست؟ هدف آن چیست؟ تا چه حد (در ساختار سلسله مراتبی سیستم) تخصیص انجام میشود؟

۱۱. یک $\bar{M}ct$ ۱ ساعته برای سیستم ABC مدنظر است. این زمان را برای سطح مونتاژ سیستم با استفاده از داده‌های جدول زیر تخصیص دهید.

مونتاژ	تعداد	λ	$\bar{M}ct$
A	۱	۰,۰۵	؟
B	۲	۰,۱۶	؟
C	۱	۰,۲۷	؟
D	۱	۰,۱۲	؟

۱۲. فرض کنید که یک سیستم باید برای ۴۰ ساعت در هفته، ۵۰ هفته در سال و برای ۱۵ سال کار کند تا نیاز مشتری برآورده شود. سیستم دارای MTBF ۴۰۰ ساعت، $\bar{M}ct$ ۲ ساعت است و دو تکنسین نگه‌داری و تعمیرات برای انجام فعالیت‌ها در نظر گرفته شده است. MLH/OH را تعیین کنید.

۱۳. هدف از پیش‌بینی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات چیست؟ چه زمانی در چرخه عمر سیستم انجام می‌شود؟

۱۴. هر کدام از موارد زیر، هدف آن، کاربرد، و اطلاعات موردنیاز را تشریح کنید.

(a) RCM

(b) LORA

(c) MTA

۱۵. در انجام یک تحلیل سطح تعمیر برای یک مونتاژ، نتایج مشخص کرده‌اند که یک تصمیم به انجام تعمیر گرفته شده است. با این حال، داده‌ها مشخص می‌کند که تصمیم به هردوی انجام تعمیر در سطح میانی و در سطح تامین‌کننده نزدیک است. در عملکرد تحلیل حساسیت، تصمیم گرفته شد که زمان عملیات سیستم بسیار بیش‌تر از آنچه در ابتدا به نظر می‌رسید، باشد. بنابراین، زمان عملیات افزایش یافته و فرض آن است که دیگر خصوصیات سیستم تغییر نکرده است. این تغییر چه اثری بر تصمیم تعمیر دارد؟ توضیح دهید.

۱۶. TPM را تشریح کنید. اهداف آن چیست؟ چه شاخص‌هایی مربوط به TPM می‌شود؟

۱۷. با داشتن زمان بارگذاری ۴۶۰ دقیقه در روز، زمان از کار افتادگی ۱۰۰ دقیقه، چرخه‌ی زمانی ایده‌آل ۱۰ دقیقه برای محصول، چرخه‌ی زمانی واقعی ۱۵ دقیقه برای محصول، تعداد برنامه‌ریزی شده تولید ۲۲ محصول، و تعداد تولید واقعی ۲۰ محصول OEE را حساب کنید.

۱۸. هنگام طراحی یک سیستم برای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، چه خصوصیات (صفات) باید در ساختار نهایی در نظر گرفته شود تا سطح مطلوب قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به‌دست آید؟ حداقل ۵ مورد را شناسایی کرده و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر قابلیت نگه‌داری و تعمیرات سیستم را تشریح کنید.

۱۹. فرض کنید شما آیتم‌های زیر را دارید:

(a) تلویزیون

(b) رادیو

(c) کامپیوتر

(d) خودرو

(e) رطوبت دهنده

(f) چاپگر

(g) چمن زن

برای هر کدام از آیتم‌ها رویکرد نگه‌داری و تعمیرات در هنگام خرابی و برگرداندن آن به حالت عملیاتی انتخابی خود را توضیح دهید. چه معیارهایی را برای این کار در نظر گرفتید؟

۲۰. نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه چگونه تعیین می‌شوند؟ چگونه توجیه می‌شوند؟ اگر به درستی توجیه نشوند چه اتفاقی ممکن است بیافتد؟

۲۱. چگونه FMECA و RCM با هم ارتباط پیدا می کنند؟

۲۲. یک سیستم را به دلخواه انتخاب کرده، فرض کنید که یک خرابی اتفاق می‌افتد و MTA را اجرا کنید تا نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی را پوشش دهد (مشابه گام‌های نمایش داده شده در شکل ۱۳–۲۰ و ۱۳–۲۱)

۲۳. هدف از نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات چیست؟ کدام عناصر تصدیق اعتبار می‌شوند؟ چه زمان در چرخه‌ی عمر سیستم اجرا می‌شوند؟

۲۴. برای آماده‌سازی نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات،

(a) چه تکالیفی باید نمایش داده شود و چگونه انتخاب می‌شوند؟

(b) چه معیارهایی استفاده می‌شود تا کارکنان برای انجام تکالیف موردنیاز نگه‌داری و تعمیرات برای نمایش انتخاب شوند؟

(c) چه چیزی نیازمندی‌ها را تعیین کرده و چگونه دیگر منابع برای نمایش انتخاب می‌شوند؟

۲۵. نیازمندی $\bar{M}ct$ برای یک آیتم تجهیز ۶۵ دقیقه و فاکتور ریسک ۱۰٪ است. یک نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات اجرا شده است و نتایج در جدول زیر برای ۵۰ تکلیف نمایش داده شده است (زمان‌های تکالیف به دقیقه).

۷۵	۸۵	۴۲	۶۷	۶۶	۶	۳۲	۷۴	۵۱	۷۰
۷۳	۵۰	۳۶	۴۵	۸۷	۶۴	۳۸	۵۵	۸۱	۶۳
۶۶	۳۳	۴۵	۵۱	۶۳	۶۷	۷۱	۳۳	۳۶	۷۲
۷۶	۷۸	۶۷	۴۶	۳۵	۳۸	۷۸	۸۱	۸۰	۷۶
۴۵	۳۸	۴۱	۳۲	۷۳	۶۵	۶۷	۵۸	۶۶	۷۷

آیا آیتم تجهیز نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را با موفقیت پشت سر می گذارد؟

۲۶. نیازمندی $\bar{M}pt$ برای یک واحد یک تجهیز ۱۲۰ دقیقه است. نمایش سیستم اجرا شده و نتایج در جدول زیر آورده شده است (۵۰ تکلیف). آیا آیتم تجهیز نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را با موفقیت پشت سر می گذارد؟ فاکتور ریسک ۱۰٪ است.

139	72	121	119	110	138	135	117	70	138
138	145	116	97	97	109	134	125	99	84
81	143	114	149	124	61	149	117	93	85
130	100	137	114	131	87	60	78	144	144
68	101	113	63	122	80	85	67	99	105

۲۷. به نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات به روش ۲ مراجعه کرده و مشخص کنید نیازمندی $\bar{M}ct$ برآورده می‌شود اگر ریسک تولید کننده ۵٪ فرض شود؟

۲۸. روابط بین قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را تشریح کنید. یعنی این‌که چطور قابلیت اطمینان به قابلیت نگه‌داری و تعمیرات مرتبط می‌شود و برعکس؟ مثال‌هایی را فراهم کنید که موازنه موردنیاز و اجرایی در طراحی یک سیستم را نشان دهد.

۱۴

طراحی برای قابلیت بهره‌برداری(فاکتورهای انسانی)

تا این‌جا بیش‌ترین تاکید در طراحی و توسعه‌ی سیستم‌های مصنوعی به اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مربوط می‌شد. قابلیت اطمینان (فصل ۱۲)، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (فصل ۱۳) و ملاحظات طراحی مربوطه برای تجهیزات، نرم‌افزار و عناصر مربوط به سیستم اعمال شد. با این حال، برای این‌که یک سیستم هنگام خدمت‌دهی اثربخش و پایدار باشد، عنصر انسان باید از دیدگاه قابلیت بهره‌برداری و قابلیت انجام عملیات مورد بررسی قرار گیرد. این موضوع شامل درک واسطه‌های بین انسان و دیگر عناصر فیزیکی سیستم یا ادغام سیستم‌های انسانی (HIS) می‌شود.

طراحی سخت‌افزار و نرم‌افزار به تنهایی قابلیت بهره‌برداری (قابلیت انجام عملیات) را تضمین نمی‌کند، هر چقدر هم که عالی انجام شده باشند. در نتیجه، هدف این فصل تاکید بر اهمیت طراحی برای قابلیت بهره‌برداری (فاکتورهای انسانی) است. ملاحظات طراحی که به انسان و فاکتورهای انسانی در عملیات و نگه‌داری و تعمیرات یک سیستم وابسته است مرکز توجه است. طراحی خوب سیستم نه تنها بر طراحی برای بهره‌برداری عادی، بلکه بر طراحی برای مقابله با بهره‌برداری نادرست اعمال می‌شود.

موضوعات ایمنی و امنیت نیز نیازمند توجه است. ملاحظات عبارت‌اند از خصوصیات تن‌سنجی کاربر (یعنی ابعاد فیزیکی انسان)، فاکتورهای حسی (یعنی قابلیت‌های سمعی، بصری، لمسی و بویی)، فاکتورهای فیزیولوژی (یعنی آثار محیطی)، فاکتورهای روان‌شناسی (یعنی رفتار، انتظارات و انگیزه فردی) و روابط میان این فاکتورها. اهداف طراحی سیستم عبارت‌اند از بیشینه کردن راحتی در استفاده، حداقل کردن خطاهای ممکن ناشی از انسان، بهبود محیط و قابلیت‌های ارتقای شغلی فرد، بیشینه کردن ایمنی انسان، حداقل کردن ریسک‌های بیماری، صدمه یا قطع عضو انسان، کاهش نیازمندی‌های آموزش و غیره.

هدف این فصل فراهم کردن یک درک عمومی از فاکتورهای انسانی است. پس از اتمام محتوای این فصل، خواننده نیازمندی‌های فاکتورهای انسانی در فرایند طراحی سیستم را درک خواهد کرد. این فصل شامل موضوعات زیر می‌شود:

- تعریف و توضیح فاکتورهای انسانی و ادغام سیستم‌های انسانی؛
- شاخص‌های متعارف در فاکتورهای انسانی؛
- فاکتورهای انسانی در چرخه‌ی عمر سیستم – نیازمندی‌های سیستم، تخصیص نیازمندی‌ها، مشارکت طراحی، و بازبینی طراحی؛
- روش‌های تحلیل فاکتورهای انسانی – تحلیل تکالیف کاربر (OTA)، نمودارهای توالی عملیات (OSD)، تحلیل خطا و تحلیل ایمنی/خطر.
- نیازمندی‌های آموزش کارکنان؛
- آزمایش و ارزیابی کارکنان.

در نظر گرفتن انسان به‌عنوان یک عنصر اصلی در سیستم (در کنار سخت‌افزار، نرم‌افزار، تسهیلات، داده‌ها و غیره) در ابتدا و در طی چرخه‌ی عمر سیستم، در طراحی برای ممکن بودن عملیاتی الزامی است. به‌علاوه، در نظر گرفتن انسان به‌عنوان کاربر سیستم یا محصول سهمی در قابلیت بهره‌برداری سیستم‌های مصنوعی دارد.

۱۴-۱- تعریف و توضیح فاکتورهای انسانی

نیازمندی‌ها برای انسان به‌عنوان بخشی از یک طراحی سیستم، در ابتدا از طریق تعریف نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات و انجام تحلیل وظیفه‌ای سطح بالا اقتباس می‌شود (شکل ۲-۴، بلوک‌های 0.1 و 0.2). تشریحی از ماموریت(ها)یی که باید انجام شوند یک گام ضروری اولیه در فرایند تعریف نیازمندی‌ها است. بر این اساس، یک تحلیل وظیفه‌ای تکمیل می‌شود که در آن وظایف عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات که مشخص کننده *چه‌ها* هستند، شناسایی می‌گردد: سیستم، چه کاری باید انجام دهد (قسمت‌های ۳-۷-۱ و ۴-۳-۱). از طریق فرایند متوالی ترکیب، تحلیل و ارزیابی، یک رویکرد طراحی مشخص را می‌توان انتخاب کرد تا *چگونه‌ها* تعیین شوند: وظایف چگونه باید اجرا شوند. این موضوع به شناسایی نیازمندی‌های انسان برای سیستم می‌شود که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

با داشتن وظایفی که شناسایی شده و به انسان تخصیص داده شده است، گام بعدی شکست این وظایف به *عملیات شغلی*، *تکالیف*، *زیرتکالیف* و غیره است که در شکل ۱۴-۱ نشان داده شده است. تشریح خلاصه‌ای از هر کدام در ادامه ارائه شده است:

۱. *عملیات شغلی*[1]: انجام یک وظیفه معمولا شامل ترکیبی از تکالیف و خدمات است. عملیات شغلی شامل یک یا چند گروه از کارها شده و ممکن است نیازمند یک یا چند

1.Job Operations

نفر برای انجام آن باشد (یعنی سمت‌ها در یک حوزه تخصصی معلوم). به‌عنوان مثال، استفاده از یک وسیله‌ی نقلیه موتوری یا انجام یک نیازمندی نگه‌داری و تعمیرات.

۲. *خدمت*[1]. به‌صورت مجموعه‌ای از تکالیف در عملیات شغلی معلوم تعریف می‌شود. برای مثال، هنگامی که استفاده از یک وسیله‌ی نقلیه موتوری مدنظر است، یک مجموعه از تکالیف مربوط عبارت‌اند از (۱) رانندگی با وسیله‌ی نقلیه درترافیک روزانه، (۲) ثبت سالانه وسیله‌ی نقلیه، (۳) سرویس‌دهی در صورت نیاز، و (۴) انجام نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه برای وسیله‌ی نقلیه به‌صورت دوره‌ای.

۳. *تکلیف*. ترکیبی از فعالیت‌های مرتبط (فعالیت‌های اطلاعاتی، تصمیمی و کنترلی) را تشکیل می‌دهد که توسط یک فرد انجام شده تا یک مقدار کار از پیش تشریح شده در یک محیط مشخص به انجام رسد. یک تکلیف می‌تواند شامل یک سری از عملیات که ارتباط نزدیکی دارند، بازرسی‌های نگه‌داری و تعمیرات و غیره باشد. در مورد رانندگی کردن با وسیله‌ی نقلیه، مثال‌هایی از تکالیف عبارت‌اند از (۱) اعمال فشار مناسب به پدال گاز برای ماندن در سرعت مطلوب، (۲) تعویض دنده در صورت لزوم برای حفظ دور موتور در محدوده‌ی مناسب، یا (۳) چرخاندن فرمان در صورت نیاز برای حرکت در مسیر مطلوب.

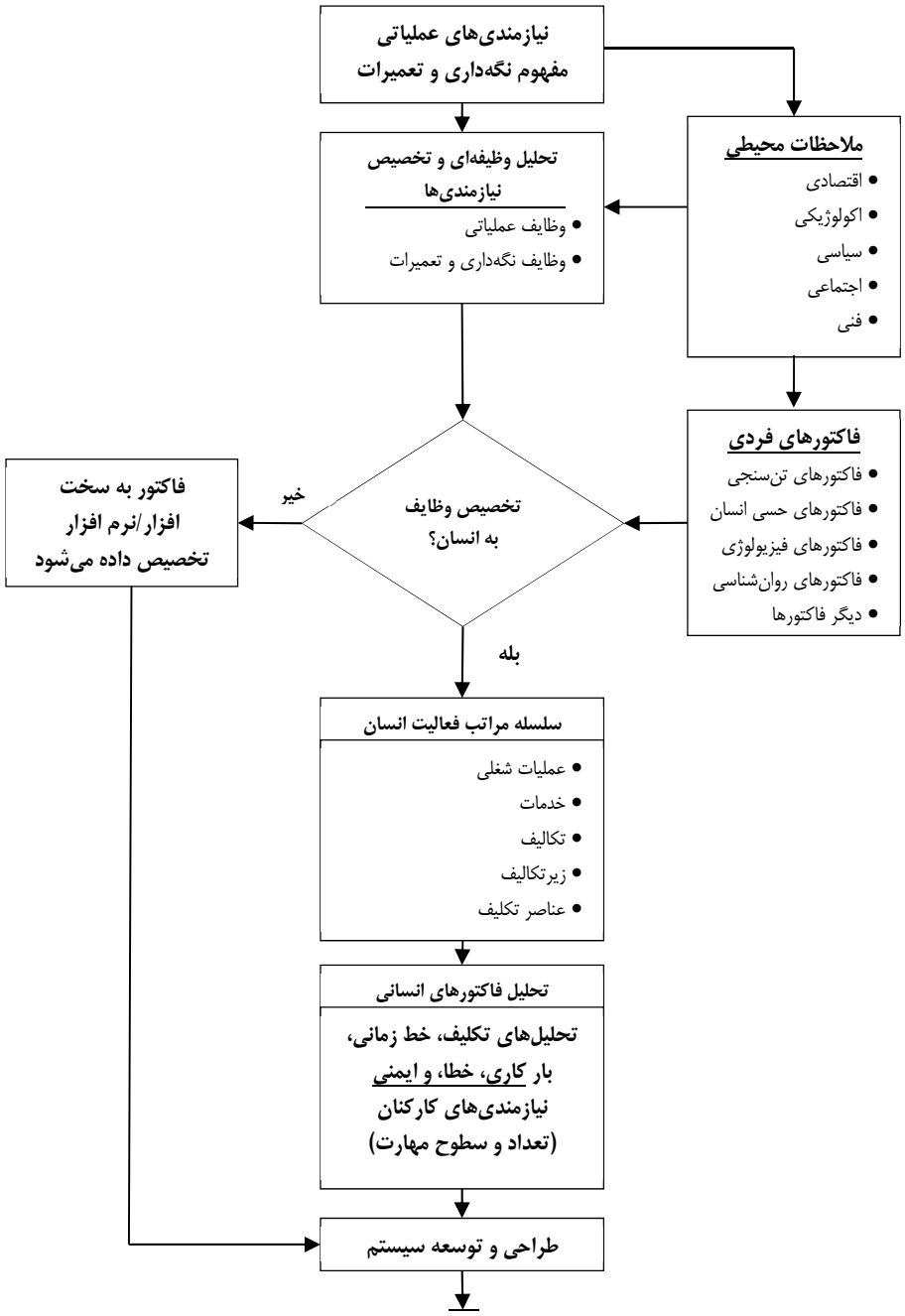
۴. *زیرتکلیف*. بسته به پیچیدگی موقعیت، یک تکلیف می‌تواند به زیرتکلیف‌ها شکسته شود تا فعالیت‌های گسسته را پوشش دهد. یک زیرتکلیف می‌تواند شامل تعویض دنده از یک به دو، تنظیم یک ماشین، یا یک فعالیت مشابه باشد.

۵. *عنصر تکلیف*. عناصر تکلیف می‌توانند به‌عنوان کوچک‌ترین شکل قابل تعریف یک فعالیت (بر پایه ادراک، تصمیم‌ها و فعالیت‌های کنترلی) طبقه‌بندی شوند که نیازمند

1.Duty

پاسخ‌های رفتاری فرد برای تکمیل یک تکلیف یا یک زیرتکلیف است. برای مثال، شناسایی یک سطح سیگنال در صفحه نمایش، یک تصمیم براساس یک فعالیت فیزیکی، فعال کردن یک سوییچ در پنل کنترل و ترجمه یک سیگنال برو/نرو را می‌توان به‌عنوان یک عنصر تکلیف دسته‌بندی کرد. عنصر تکلیف پایین‌ترین دسته فعالیت است که خصوصیات رفتاری برای آن شناسایی و ارزیابی می‌شود.

سلسله مراتب ارائه شده نمایانگر یک شکست وظایف از سطح بالای سیستم (فصل ۳) به کوچک‌ترین عناصر فعالیت می‌باشد که شامل عملکرد انسان است. در توسعه این شکست، همیشه نمی‌توان به‌راحتی وظایف را از تکالیف، تکالیف را از زیرتکالیف و غیره جدا کرد. با این حال، باید از وظایف سطح بالا به پایین تا سطح لازم حرکت کرد تا واسطه‌ی مناسب انسان– ماشین مشخص گردد. مانند سلسله مراتب یک تجهیز، این شکست یک تقسیم‌بندی منطقی فعالیت انسانی را تشکیل می‌دهد که به‌عنوان پایه و اساسی برای استقرار نیازمندی‌های فاکتورهای انسانی در طراحی به‌کار می‌رود.



شکل ۱۴- ۱- نیازمندی‌های فاکتورهای انسانی.

به‌وسیله‌ی نتایج تحلیل وظیفه‌ای و سلسله مراتب فعالیت انسانی شناسایی شده (حداقل بر یک پایه و اساس اولیه)، فرد باید برخی فاکتورهای محیطی و فردی را مورد بررسی قرار دهد که در نهایت انجام کار را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. شکل ۱۴-۱ روابط این عناصر در فرایند تعریف نیازمندی‌های کلی فاکتورهای انسانی برای سیستم را به تصویر کشیده است. ملاحظات محیطی مشاهده شده در این شکل، فاکتورهایی را تشکیل می‌دهند که محدودیتی در توسعه سیستم به‌عنوان یک کل اعمال می‌کنند. فاکتورهای فردی را می‌توان به‌صورت فاکتورهای تن‌سنجی، فاکتورهای حسی انسان، فاکتورهای فیزیولوژی، و فاکتورهای روان‌شناسی دسته‌بندی کرد. این دسته‌ها به‌طور خلاصه تشریح شده است.

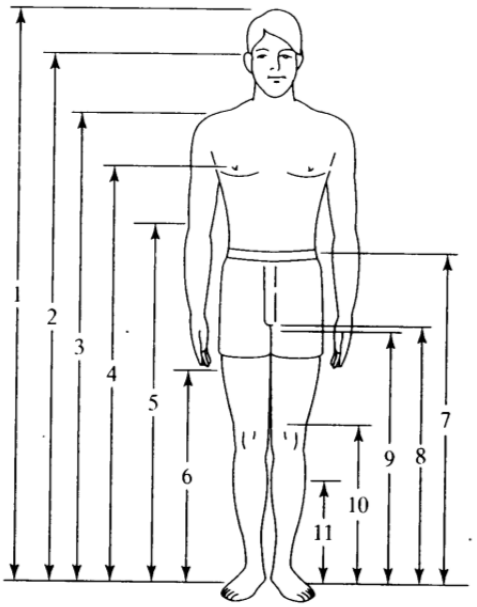
۱۴-۱-۱- فاکتورهای تن‌سنجی[1]

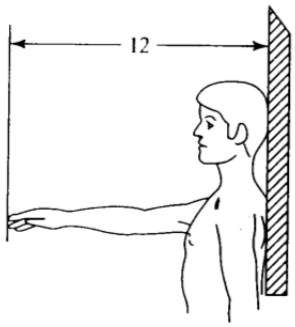
هنگام استقرار نیازمندی‌های پایه‌ای طراحی برای سیستم، به‌ویژه آن‌هایی که با فعالیت‌های انسانی در ارتباط هستند، بدیهی است که فرد باید ابعاد فیزیکی بدن انسان را در نظر بگیرد. وزن، قد، طول بازو، اندازه دست و غیره هنگام طراحی ایستگاه کاری کاربر، پنل‌های کنترل، دسترسی‌ها برای مقاصد نگه‌داری و تعمیرات، و موارد مشابه حیاتی هستند. به‌علاوه، ابعاد بدن در حالت ایستا و شرایط پویا تا حدی متفاوت است. اندازه‌گیری‌های *ایستا* به حالتی از انسان اطلاق می‌شود که فرد در یک حالت استاندارد ثابت کار می‌کند در حالی‌که در اندازه‌گیری‌های *پویا* زمانی انجام می‌شود که وضعیت‌های کاری متنوع وجود داشته و فرد به‌طورمستمر در حال حرکت است. هنگامی که حرکت وجود داشته باشد، اندازه‌های بدن تغییر می‌کند. بنابراین، هنگامی که گزینه‌های مختلف طراحی در نظرگرفته می‌شود، طراح باید از پروفایل‌های مختلف انسان که ممکن است در عملکرد کاربر و فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات مربوط به سیستم اتفاق افتد، آگاه باشد.

1.Anthropometric Factors

برای کمک به طراح در دست‌یابی به اطلاعات مربوط به اندازه‌های انسان، دو منبع داده اصلی مدنظر است: (۱) مطالعه‌ی تن‌سنجی که در آن اندازه‌های یک نمونه از جمعیت به‌دست می‌آید؛ و (۲) داده‌های آزمایشگاهی که از شبیه‌سازی وضعیت عملیاتی مختص سیستم در حال توسعه استخراج می‌شوند. طراح می‌تواند به هر دو دسته از منابع یا ترکیبی از آن‌ها دسترسی داشته باشد. در بسیاری از موارد، اکتساب داده‌های آزمایشگاهی معنادار پرهزینه است. بنابراین، اغلب اندازه‌های ایستا برای طراحی استفاده می‌شود.

شکل ۱۴-۲ و ۱۴-۳ به‌ترتیب مثال‌هایی از اندازه‌های ایستای بدن در وضعیت‌های ایستاده و نشسته ارائه داده‌اند. اندازه‌های تن‌سنجی اغلب به‌صورت درصد، بازه‌ها و میانگین‌ها نشان داده می‌شوند. داده‌های نمایش داده شده در پنجمین و نود و پنجمین مقادیر درصدها برای مردان و زنان یک جمعیت نمونه نشان داده شده است. اگرچه طراح نمی‌تواند همه‌ی اندازه‌ها یا پروفایل‌های ممکن را پوشش دهد، طراح می‌تواند اکثر وضعیت‌ها را پوشش دهد. ساختار نهایی طراحی باید بیش‌تر جمعیت را پوشش دهد تا کاربر و فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات به‌صورت کارا انجام شود. آن افرادی که اندازه‌های خیلی بزرگ یا خیلی کوچک دارند می‌توانند کار یا وظیفه را انجام دهد، با این حال این احتمال وجود دارد که عدم کارایی‌هایی به‌وجود آمده و برای فرد ایجاد خستگی کند و ممکن است خرابی‌هایی را در سیستم منجر شود.

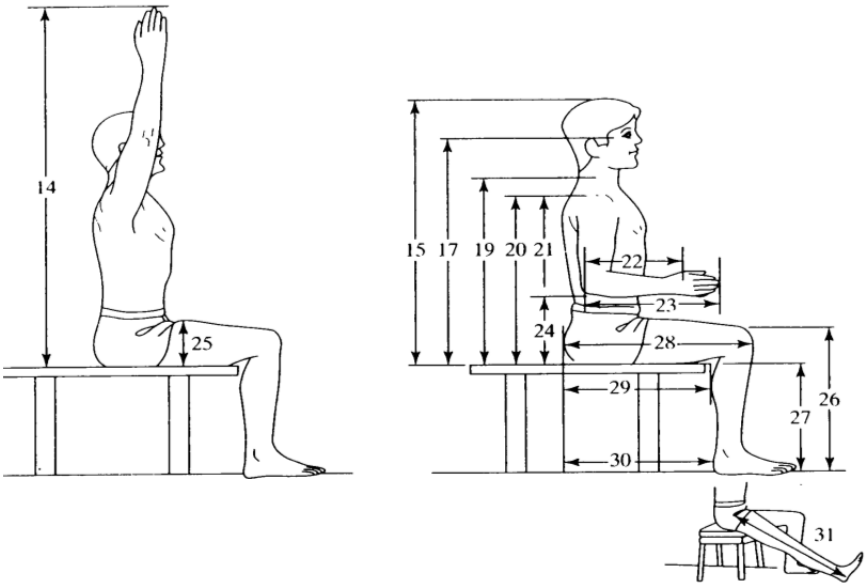




فاکتورها	درصد مقادیر			
	۵امین درصد		۹۵امین درصد	
	مرد	زن	مرد	زن
وزن (کیلوگرم)	۵۷٫۴	۴۶٫۴	۹۱٫۶	۷۶٫۵
ابعاد بدن ایستاده				
۱. قد.	۱۶۳٫۸	۱۵۲٫۴	۱۸۵٫۶	۱۷۲٫۲
۲. ارتفاع چشم	۱۵۲٫۱	۱۴۲٫۷	۱۷۳٫۳	۱۶۰٫۱
۳. ارتفاع شانه	۱۳۳٫۶	۱۲۳٫۰	۱۵۴٫۲	۱۴۳٫۴

فاکتورها	درصد مقادیر			
	۵امین درصد		۹۵امین درصد	
	مرد	زن	مرد	زن
۴. ارتفاع سینه		۱۱۰		۱۲۷,۳
۵. ارتفاع آرنج	۱۰۴,۸		۱۲۰	
۶. ارتفاع نوک انگشت	۶۱,۵		۷۳,۲	
۷. ارتفاع مچ	۹۷,۵	۹۳,۱	۱۱۵,۲	۱۱۰,۱
۸. ارتفاع بین دو ران	۷۶,۳	۶۶,۴	۹۱,۸	۸۱,۴
۹. ارتفاع سرینی		۶۶,۲		۷۹,۴
۱۰. ارتفاع کشکک زانو	۴۷,۵		۵۸,۶	
۱۱. ارتفاع ساق	۳۱,۱		۴۰,۶	
۱۲. دسترسی	۷۲,۷	۶۷,۷	۹۰,۹	۸۰,۴

شکل ۱۴- ۲- داده‌های تن‌سنجی –ابعاد بدن ایستاده.

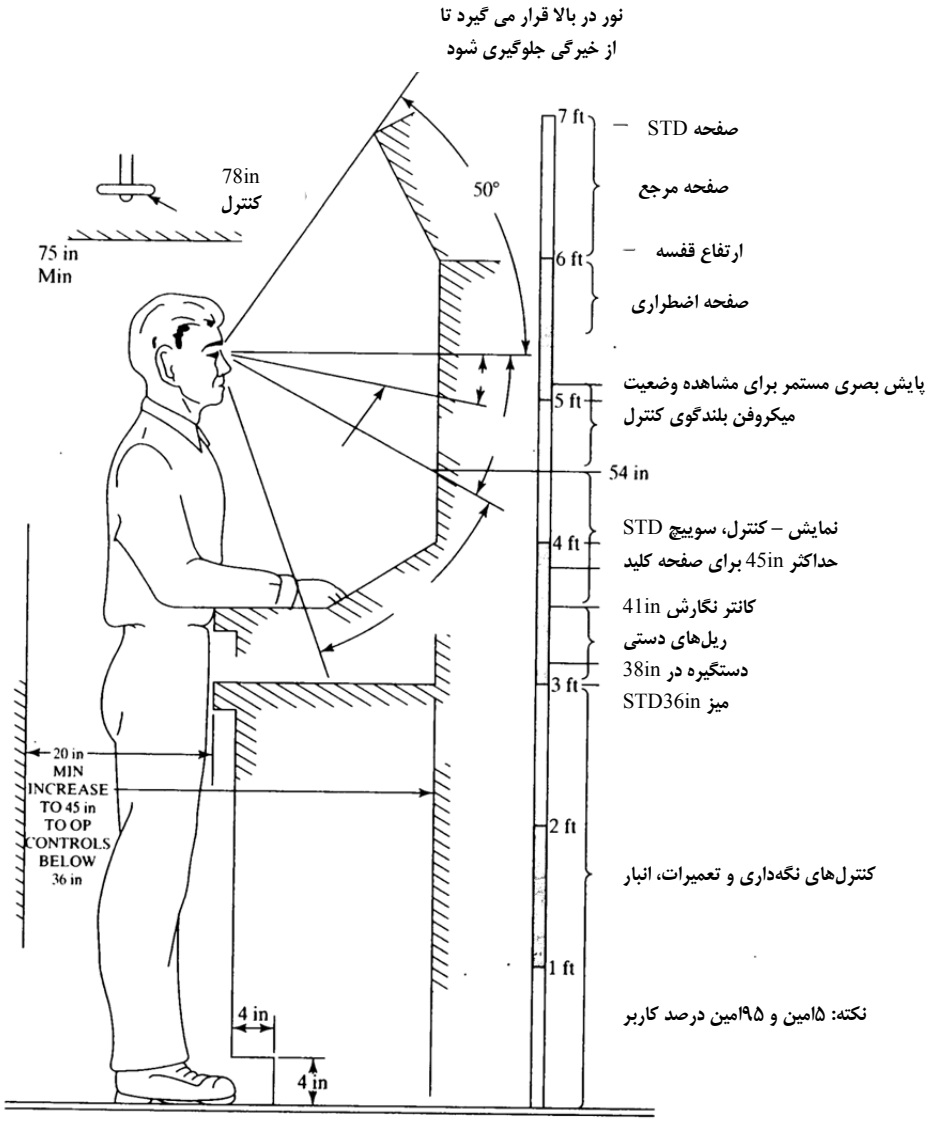


فاکتورها	درصد مقادیر			
	۵امین درصد		۹۵امین درصد	
	مرد	زن	مرد	زن
ابعاد بدن نشسته				
۱۴. دسترسی عمودی در حالت نشسته	۱۲۸٫۶		۱۴۷٫۸	
۱۵. ارتفاع، در حالت راست	۸۴٫۵	۷۸٫۴	۹۶٫۹	۹۰٫۹
۱۶. ارتفاع، در حالت استراحت	۸۲٫۵	۷۶٫۹	۹۴٫۸	۸۹٫۷
۱۷.ارتفاع چشم، در حالت راست	۷۲٫۸	۶۸٫۷	۸۴٫۶	۷۸٫۸
۱۸.ارتفاع چشم، در حالت استراحت	۷۰٫۸	۶۷٫۲	۸۲٫۵	۷۷٫۶
۱۹.ارتفاع میان شانه‌ها	۵۷٫۱	۵۳٫۷	۶۷٫۷	۶۲٫۵
۲۰.ارتفاع شانه	۵۴٫۲		۶۵٫۴	

فاکتورها	درصد مقادیر			
	۵امین درصد		۹۵امین درصد	
	مرد	زن	مرد	زن
۲۱.ارتفاع کتف	۳۳٫۸	۳۰٫۲	۴۰٫۲	۳۶٫۲
۲۲. طول ساعد	۳۲٫۶		۳۷٫۹	
۲۳.طول آرنج–نوک انگشت	۴۴٫۳	۳۸٫۹	۵۱٫۹	۴۵٫۷
۲۴.ارتفاع آرنج تا نشیمنگاه	۱۷٫۵	۱۸٫۷	۲۸	۲۶٫۹
۲۵.پهنای ران		۱۰٫۴		۱۴٫۶
۲۶.ارتفاع زانو	۴۹٫۷	۴۳٫۷	۵۸٫۷	۵۱٫۶
۲۷.ارتفاع ساق	۴۰٫۶	۳۸	۵۰	۴۴٫۱
۲۸.طول ران	۵۴٫۹	۵۲	۶۴٫۳	۶۱٫۹
۲۹.فاصله ساق تا پشت نشیمنگاه	۴۵٫۸	۴۳٫۴	۵۴٫۵	۵۲٫۶
۳۰.فاصله پاشنه تا پشت نشیمنگاه	۴۶٫۷		۵۶٫۴	
۳۱. فاصله پاشنه تا پشت نشیمنگاه (قطری)	۱۰۳٫۹		۱۲۰٫۴	

شکل ۱۴- ۳- داده‌های تن‌سنجی – ابعاد بدن نشسته

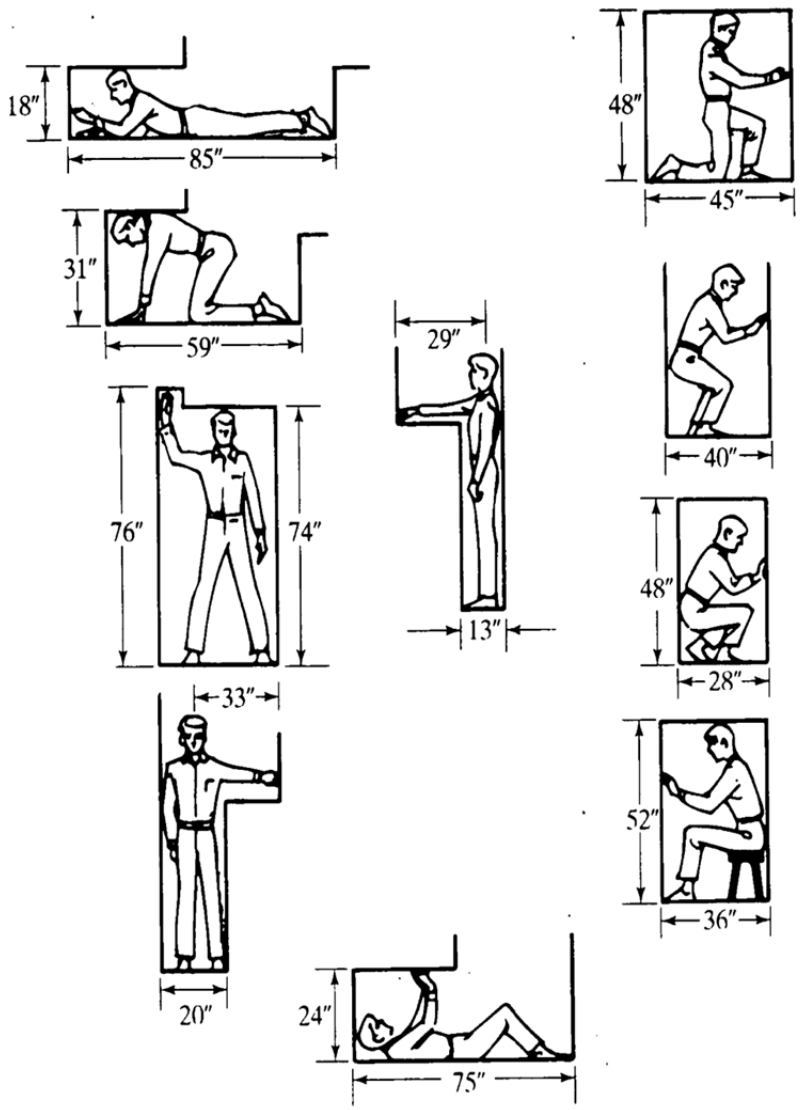
در طراحی یک سیستم، نیازمندی‌های محل کار باید برای کاربرانی که وظایف عملیاتی را انجام می‌دهند و کارکنان نگه‌داری و تعمیرات که تکالیف نگه‌داری و تعمیرات را اجرا می‌کنند فراهم شود. شکل‌های ۱۴–۴ و ۱۴–۵ مثال‌هایی از طراحی همراه با فاکتورهای تن‌سنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- ۴- پارامترهای پیشنهادی برای محل کار استاندارد کاربر.

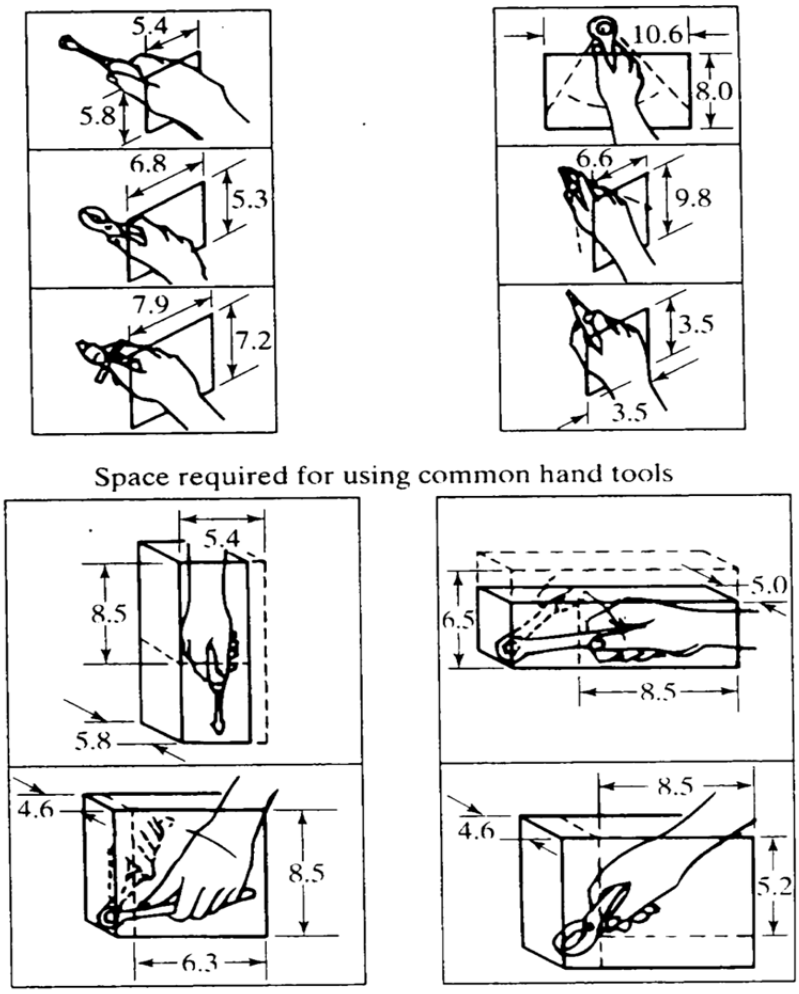
منبع: H.P. Van Cott and R.G. Kinkade, Human Engineering Guide to Equipment Design, revised ed. (Washington, DC: U.S.Government Printing Office, 1972)

کاربرد داده‌های تن‌سنجی در طراحی شامل ملاحظات زیادی می‌شود. بدن انسان و ابعاد محل کار مهم هستند. با این حال، فرد باید پیش از انجام بیش‌تر طراحی باید ادبیات موضوع را بیش‌تر مطالعه نماید زیرا محتوای این قسمت محدود بوده و تنها موضوع را معرفی می‌کند. معیارهایی وجود دارد که اشکال مختلفی از طراحی پنل کنترل و فرمان، طراحی محل کار، طراحی صندلی و غیره را پوشش می‌دهند. هم‌چنین، جنبه‌های همراه با ابعاد بدن ظرفیت نیرو و باربرداری است. اگر سیستم (یا قسمتی از سیستم که واسطه وجود دارد) به‌درستی طراحی شود، یک انسان می‌تواند نیروی بیش‌تری اعمال کرده و کم‌تر خسته شود. مقدار نیرویی که می‌توان اعمال کرد توسط محل بدن و اعضایی که نیرو را اعمال می‌کنند، جهت اعمال نیرو و شیء که به آن نیرو وارد می‌شود، تعیین می‌گردد. ظرفیت باربرداری که رابطه نزدیکی با نیرو دارد، به شدت به وزن، اندازه و موقعیت فرد بستگی دارد. حوزه‌ی تن‌سنجی با علم و تکنیک اندازه‌های انسان سر و کار دارد؛ با این حال، فاکتورهای زیاد دیگری وجود دارد که به‌طور مستقیم تحت‌تاثیر تصمیم‌های طراحی هستند.



فضای آزاد موردنیاز برای وضعیت‌های مختلف بدن

حداقل منفذ برای کار با ابزار معمول



شکل ۱۴- ۵- داده‌های تن‌سنجی مربوط به نیازمندی‌های فضای کاری.

منبع: NAV-SHIPS 94324, Maintability Design Criteria Handbook for Designers of Shipboard Electronics Equipments (Washington, DC:Naval Ship Systems Command, U.S., Navy, 1964)

۱۴-۱-۲- فاکتورهای احساسی انسان

در مواجهه با واسطه انسان– ماشین درطراحی سیستم، فرد باید با قابلیت‌های احساسی انسان آشنا باشد. اگرچه اکثر حواس انسان در طراحی سیستم تحت‌تاثیر قرار می‌گیرد، فاکتورهای وابسته به بینایی (بصری) و شنوایی (سمعی) اهمیت خاصی دارند.

بینایی. بینایی یا بصر، همان‌طور که به طراحی سیستم بستگی دارد، اغلب به حوزه‌های افقی و عمودی مطلوب محدود می‌شود که در شکل ۱۴–۶ نشان داده می‌شود. طراحی باید درجات چرخش چشم و سر را به‌عنوان حداکثر مقادیر مجاز در طراحی پنل فرمان و کنترل در نظر بگیرد. نیازمندی‌های خارج از این محدوده منجر به خستگی، عدم کارایی کاربر و خرابی سیستم می‌شوند.

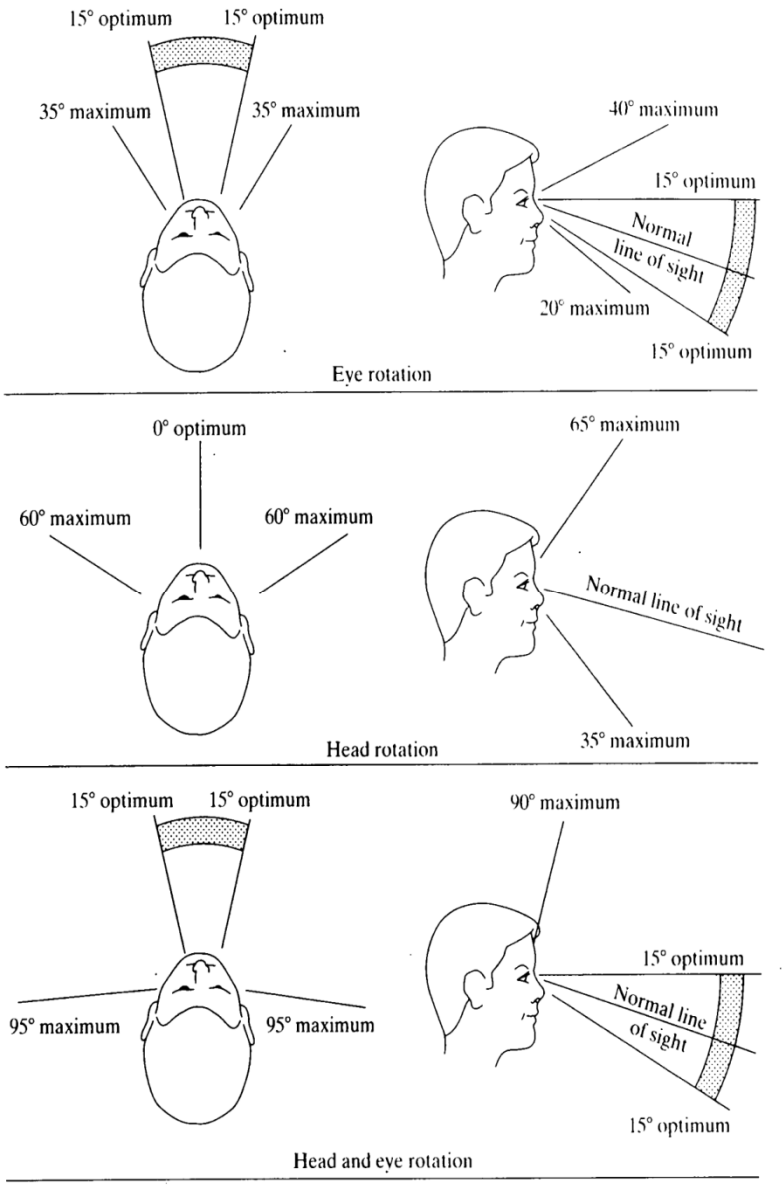
در حوزه‌ی دید نمایش داده شده در شکل، چشم انسان می‌تواند اشیای مختلف را از زوایای دید مختلف ببیند. حوزه‌ی دید توسط تشعشعات الکترومغناطیس با طول موج مشخص، یا با طیف قابل رویت الکترومغناطیسی شبیه‌سازی می‌شود. چشم، خطوط مختلف (بخشی از طیف) را با درجات متغیر روشنی می‌بیند. در مورد رنگ، فرد می‌تواند اغلب همه‌ی رنگ‌ها را با مستقیم نگاه کردن درک کند. با این حال، ادراک رنگ با کاهش زاویه دید کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، هنگامی که پنل‌های فرمان به‌صورت رنگی طراحی می‌شوند یا چراغ‌های اخطار رنگی مدنظر است، فرد باید مکان مناسبی را در نظر بگیرد تا در حوزه‌ی دید مناسب کاربر باشد. شکل ۱۴–۷ حدود رنگ قابل رویت را به تصویر کشیده است.

در نهایت، عملکرد مطلوب وظایف به‌شدت به سطح نورپردازی بستگی دارد. نه تنها طراحی باید به حوزه‌ی دید و رنگ توجه کند، بلکه سطح مناسبی از نورپردازی نیز یک الزام بدیهی است. سطوح نورپردازی تا حدودی به تکلیفی که باید انجام شود، بستگی دارد. جدول ۱۴–۱ سطوح مختلف نورپردازی برای آیتم‌های معین را پیشنهاد داده است.

شنوایی. در فعالیت‌های انسانی، طراحی باید هم نیازمندی‌های ارتباط شفاهی و هم جنبه‌های نویز یا سر و صدا را مورد بررسی قرار دهد. اثر سر و صدا در انجام کار موضوع مهمی است. سر و صدا عموما به‌عنوان یک منحرف کننده و یک بازدارنده در کارایی در نظر گرفته می‌شود. با افزایش سطح سر و صدا، انسان احساس ناراحتی کرده و در نتیجه بهره‌وری و کارایی کاهش می‌یابد. به‌علاوه، ارتباطات کلامی در چنین محیطی غیرممکن یا بی‌اثر خواهد بود. هنگامی که سطح سر و صدا به ۱۲۰ dB نزدیک می‌شود، اغلب انسان یک احساس فیزیکی را تجربه می‌کند. در سطح بالای ۱۳۰ dB، درد احساس می‌شود.

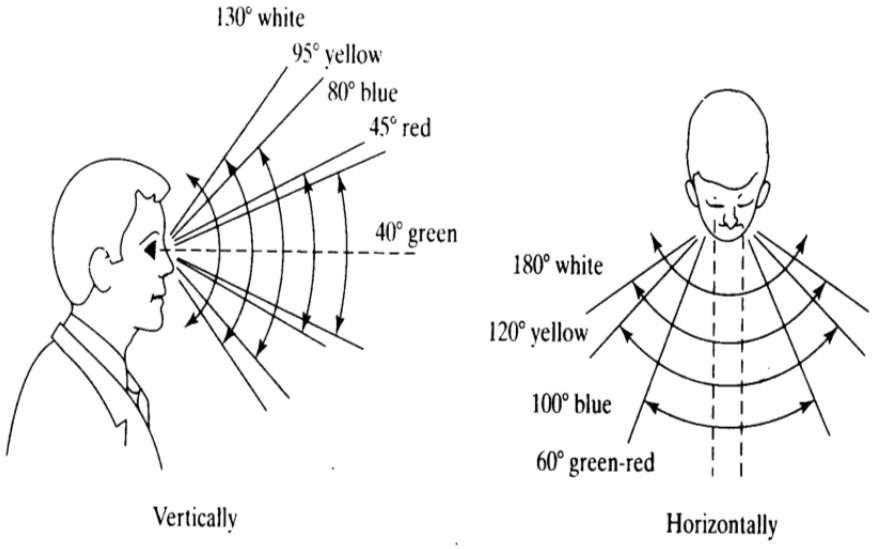
فاکتور مهم دیگر در تعیین این‌که تا چه حد سر و صدا می‌تواند منحرف‌کننده باشد، خصوصیت سر و صدا می‌باشد، این که آیا پایدار است یا متناوب است. در وضعیتی که سر و صدا پایدار است، فرد می‌تواند به آن عادت کرده و کارایی تغییر محسوسی نخواهد داشت. اگر سطح سر و صدا خیلی بالا باشد (حتی اگر پایدار باشد)، فرد ممکن است دچار صدمه ماندگار و از دست دادن شنوایی خود شود. برعکس، هنگامی که سر و صدا متناوب است، فرد بدون توجه به شدت آن دچار حواس پرتی می‌شود. در این نمونه، تلاش بیش‌تری نیاز است تا کارایی حفظ شود اگرنه امکان خستگی زودرس وجود دارد.

طراح، هنگامی‌که انسان را جزئی از سیستم در نظر می‌گیرد، باید تکالیفی را که توسط انسان انجام می‌شود، شناسایی کند. این تکالیف باید از منظر محیطی که کار در آن‌ها انجام می‌شود، مورد ارزیابی قرار گیرند و سر و صدای تولید شده توسط سیستم (یا خارج از سیستم) باید در سطحی حفظ شود که کارایی انسان بیشینه باقی بماند. سطح شدت مطلوب بین بازه ۵۰ تا ۸۰ dB است؛ با این حال، طراحی باید ادبیات موضوع را در این مورد بیش‌تر مورد بررسی قرار دهد.



شکل ۱۴- ۶- حوزه دید افقی و عمودی.

دیگر حواس. جدا از بینایی و شنوایی، حواس دیگری وجود دارند که نمی‌توان به‌طور کامل در طراحی سیستم از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. برای مثال، در یک محیط نسبتا بسته که بوی خیلی بدی در آن وجود دارد، انسان ممکن است دچار حالت تهوع شده که به‌نوبه‌ی خود عملکرد را کاهش می‌دهد، درنتیجه، بویایی یک مشکل عمده بوده و هنگام طراحی ایستگاه کاری، باید اطمینان حاصل شود که تهویه مطلوب هوا مدنظر قرار گرفته است. به‌علاوه، حس لامسه نیز مهم است مخصوصا در طراحی محل کار و شکل کلیدهای کنترل بر روی پنل کنترلی. برای مثال، دستگیره کنترل که نوک تیز است یک چیز را مشخص می‌کند و دستگیره گرد معنی دیگری می‌دهد. موقعیت بدن و حرکات مربوط به آن نیز مهم هستند. اثر دریازدگی و ارتفاع زدگی و مشابه آن می‌تواند اثر تخریبی قابل توجهی بر عملکرد داشته باشد.



شکل ۱۴- ۷- حدود تقریبی تمایز رنگ.

جدول ۱۴- ۱ نیازمندی‌های نورپردازی یک تکلیف مشخص

سطح نورپردازی		
	Foot-Candles	
نوع تکلیف	پیشنهادی	حداقل
۱. عملیات ماشینی	۱۰۰	۵۰
۲. سطوح فرمان	۵۰	۳۰
۳. گیج‌ها و اندازه‌گیرها	۵۰	۳۰
۴. مونتاژ کارخانه – عمومی	۵۰	۳۰
۵. مونتاژ کارخانه – دقیق	۳۰۰	۲۰۰
۶. بازرسی – معمولی	۳۰۰	۲۰۰
۷. بازرسی – دقیق	۵۰	۳۰
۸. کار اداری، عمومی	۷۰	۵۰
۹. تکالیف ابتدایی با مشاهده	۵۰	۳۰
۱۰. پنل‌ها	۵۰	۳۰
۱۱. راهروها و پله‌ها	۲۰	۱۰
۱۲. خواندن، حروف بزرگ	۳۰	۱۰
۱۳. خواندن، حروف کوچک	۷۰	۵۰
۱۴. تعمیر – عمومی	۵۰	۳۰
۱۵. تعمیر – ابزار دقیق	۲۰۰	۱۰۰
۱۶. آزمایش – عادی	۲۰۰	۱۰۰
۱۷. آزمایش – سخت گیرانه	۵۰	۳۰
۱۸. جدول‌بندی	۱۰۰	۵۰

۱۴-۱-۳- فاکتورهای روان‌شناسی

مطالعه‌ی روان‌شناسی فراتر از موضوع این کتاب است. با این حال، برخی موضوعات در مورد آثار فشار محیطی بر بدن انسان، هنگام انجام تکالیف سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرند. *استرس* به هر نوع فعالیت اضافی یا فعالیت محیطی بر روی فرد اطلاق می‌شود به‌صورتی که اثری منفی بر فرد گذارد. استرس هم از نظر فیزیولوژی و هم از نظر روانی بر فرد اثرگذار است. برخی از علل استرس در ادامه توضیح داده شده است:

۱. ***دمای بیش از حد.*** تجربه نشان داده است که دمای بیش از حد (زیاد/کم) آثاری زیان‌بار بر کارایی دارد. با افزایش دما بالای محدوده‌ی آسایش (یعنی ۵۵ تا ۷۵ درجه فارنهایت)، فرایندهای ذهنی کند شده، پاسخ ذهن کاهش یافته و احتمال خطا بالا می‌رود. برعکس، با کاهش دما (به‌طور مثال ۵۰ درجه فارنهایت و پایین‌تر)، خستگی فیزیکی مستولی می‌گردد. به همین دلیل، طراح باید از پروفایل‌های محیطی برای سیستم آگاه باشد، به‌ویژه درمورد پیش‌بینی بهره‌برداری از سیستم در محیط‌های سردسیری و گرمسیری.

۲. ***رطوبت.*** گرما و رطوبت اغلب فاکتورهای مهمی در ایجاد کاهش در کارایی عملیاتی کارکنان است. انسان در هوای خشک دمای بیش‌تری را می‌تواند تحمل کند تا در هوای مرطوب. دمای بالا (به‌طور مثال ۹۰ درجه فارنهایت یا بالاتر)، همراه با رطوبت بالا (۹۰٪ یا بیش‌تر)، می‌تواند منجر به کاهش چشم‌گیر عملکرد انسان باشد.

۳. ***ارتعاش.*** این موضوع به حرکت متغیر بدن یا یک سطح نسبت به یک نقطه مرجع اطلاق می‌شود. بسیاری از وسایل نقلیه، ماشین‌ها، لوازم خانگی، ابزارآلات و غیره تا حدی ارتعاش دارند و درجه ارتعاش (یعنی بزرگی فرکانس ارتعاش به Hz) آثاری

مختلف بر فعالیت‌های گوناگون دارد. برای مثال، تعادل بدن انسان با ارتعاشی بین ۳۰ تا ۳۰۰ Hz تحت‌تاثیر قرار می‌گیرد، صحبت کردن فرد در ارتعاش ۱ تا ۲۰ MHz تغییر می‌کند، ارتعاش ۲۵ تا ۶۰ MHz درک عمق را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد و موارد دیگری از این قبیل. در هررخدادی، بهره‌وری فرد به جهت ارتعاش، روش‌های انجام کار انسان، شرایط جوی و دیگر فاکتورهای بیولوژیک بستگی دارد.

۴. ***سر و صدا.*** عواقب سر و صدا و اثر آن بر کارایی انسان پیش از این با عنوان شنوایی بحث شد. با این حال، این فاکتور دوباره فهرست شده است؛ زیرا پایداری زیاد یا سطوح بالای سرو صدای متناوب به‌شدت عملکرد انسان را کاهش می‌دهد.

۵. ***دیگر فاکتورها.*** فاکتورهای بسیار دیگری می‌توانند در بدن انسان ایجاد استرس کنند. این موارد شامل تشعشعات، موادی گازی یا سمی در هوا، گرد و غبار و غیره می‌شود.

فاکتورهای استرس خارجی که قبلا فهرست شد معمولا آثار منفی در فرد ایجاد می‌کنند. این آثار منفی به‌نوبه‌ی خود سیستم بدن انسان (سیستم گردش خون، سیستم هاضمه، سیستم عصبی، سیستم تنفسی و غیره) را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. شاخص‌های این آثار منفی عبارت‌اند از ضربان قلب، فشارخون، دمای بدن، مصرف اکسیژن و موارد مشابه آن.

۱۴-۱-۴ فاکتورهای روان‌شناسی

فاکتورهای روان‌شناسی به ذهن انسان و مجموعه‌ای از احساسات، ویژگی‌های و الگوهای رفتاری مربوط به عملکرد شغلی مربوط می‌شوند. همه‌ی شرایط دیگر از نقطه‌نظر انجام کار به‌صورت کارا باید بهینه باشند؛ با این حال، اگر فرد دارای قریحه، انگیزه، تعهد، اعتماد به نفس، مهارت‌های ارتباطی و غیره نباشد، احتمال انجام کار به‌صورت بهینه بسیار کم خواهد بود.

فاکتورهای روان‌شناسی به‌شدت تحت‌تاثیر فاکتورهای فیزیولوژی هستند. به‌طور معمول رفتار، قریحه، انگیزه و موارد دیگر به نیازها و انتظارات فرد بر می‌گردد. برآورده شدن این نیازها و انتظارات، تابعی از محیط سازمانی یک سازمان است. اگر کاربر درکی از فرصت رشد شغلی نداشته باشد، یا اگر نحوه‌ی رفتار مدیریتی سرپرست، به‌طور مستقیم حمایت کننده‌ی اهداف فرد نباشد، عملکرد شغلی تضعیف می‌شود. جنبه‌های روان‌شناسی عملکرد انسان بسیار زیاد و متنوع است و خواننده باید ادبیات موضوع در مورد علم رفتاری را مطالعه کرده تا دید مناسبی از روابط علت و اثر در حوزه عملکرد خوب در مقابل عملکرد ضعیف پیدا کند.

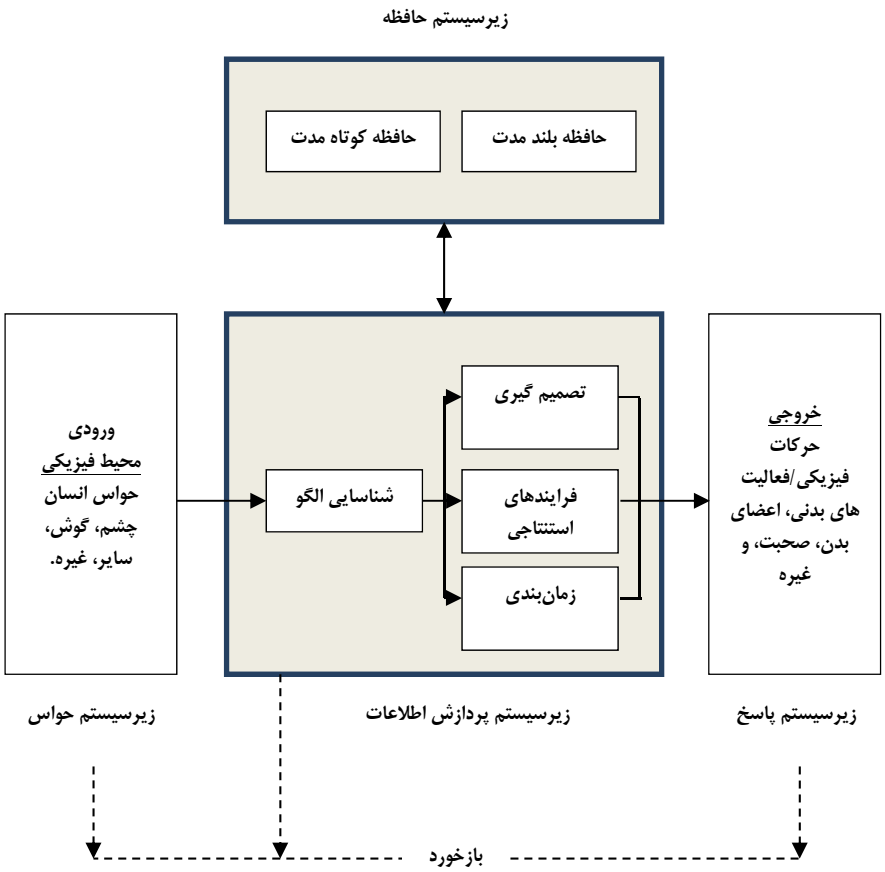
با در نظر گرفتن خصوصیاتی که در بالا بحث شد، اکنون باید به انسان به‌عنوان یک جزء از سیستم نگاه شود. موضوع کلیدی در این‌جا پردازش اطلاعات است. اطلاعات را می‌توان به‌صورت ایستا یا پویا (یعنی ثابت با زمان یا تغییر پیوسته با زمان) دسته‌بندی کرد. به‌علاوه، دسته‌های مختلفی از اطلاعات وجود دارند که عبارت‌اند از اطلاعات کمی، کیفی، اخطاری و سیگنالی، شناسایی، گرافیکی، حروفی و نمادی و غیره. طراح باید از نیازمندی‌های سیستم آگاه بوده و قابلیت‌های انسان در این حوزه را درک کند.

شکل ۱۴–۸ یک مدل پردازش اطلاعات را نمایش می‌دهد که دارای چهار زیرسیستم انسانی است. زیرسیستم احساس به انواع مشخصی از انرژی شناسایی شده توسط حواس پنج‌گانه انسان پاسخ می‌دهد. این موضوع محرکی برای انجام یک فعالیت را فراهم می‌کند. زیرسیستم *پردازش اطلاعات* ظرفیت انسان برای دریافت و پردازش اطلاعات را نشان می‌دهد. موضوع مورد توجه دیگر مقدار اطلاعاتی که فرد می‌تواند منتقل کند (که به‌صورت "بیت[1]" بیان می‌شود) و نرخ انتقال این اطلاعات می‌باشد. زیرسیستم *حافظه* به حافظه انسان و ظرفیت آن یا قابلیت بازیابی داده‌ها و تسهیل پردازش اطلاعات اطلاق می‌شود. درنهایت در زیرسیستم پاسخی وجود دارد که

1.Bit

به انجام تکلیف/وظیفه از طریق ترکیبی از حرکت‌های فیزیکی منجر می‌شود (خروجی مدل). بخش جدانشدنی از این مدل *بازخورد* است که اجازه می‌دهد پاسخ‌ها دقیق باشند.

به‌طور خلاصه، طراحی نه تنها باید خصوصیات تن‌سنجی، فاکتورهای حواس و آثار فاکتورهای خارجی بر انسان، بلکه قابلیت و توانمندی انسان نسبت به نیازمندی پردازش اطلاعات نشان داده شده در شکل ۱۴–۸ در نظر بگیرد.



شکل ۱۴– ۸– زیرسیستم پردازش اطلاعات انسان (ساده شده).

۱۴-۲- شاخص‌های فاکتورهای انسانی

هدف کلی، طراحی یک سیستم است که بتواند عملیات و نگه‌داری آن به‌صورتی اثربخش و کارا در طول چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده در پاسخ به نیازهای مشتری انجام شود. با مراجعه به شکل ۱۴-۹، جنبه *اثربخشی* به انجام وظایف عملیاتی و نگه‌داری و تعمیراتی سیستم به روشی مشخص، در چارچوب زمانی مطلوب بدون خطا در فرایند اطلاق می‌شود. هدف بیشینه کردن عملکرد، دسترسی‌پذیری قابلیت اتکا و هر هدف دیگر در سطح سیستم است که باید انجام شود. در همین زمان، *کارایی* یعنی وظایف در حداقل هزینه چرخه‌ی عمر انجام شوند. مانند قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، شاخص‌هایی که در این‌جا بررسی می‌شوند، می‌توانند شامل موارد زیر شوند:

۱. تعداد کارکنان موردنیاز برای عملیات سیستم و برای صورت پذیرفتن ماموریت آن. یک شاخص می‌تواند به‌صورت نفرساعت کاربر در هرساعت عملیات سیستم (OLH/OH)، یا نفرساعت کاربر در هر قسمت از ماموریت یا چرخه‌ی عملیات باشد. فاکتورها را می‌توان برای سطح مهارت کارکنان (پایین، متوسط، بالا) تنظیم کرد.
۲. تعداد کارکنان موردنیاز برای نگه‌داری و تعمیرات سیستم در دوره‌ی زمانی تعیین شده در قالب یک سناریوی ماموریت مشخص یا به‌صورت ساعات عملیات سیستم. یک شاخص رایج نفرساعت نگه‌داری و تعمیرات در هرساعت عملیات (MLH/OH) است. این فاکتورها می‌تواند برای سطوح مختلف کارکنان (پایین، میانی، بالا) تنظیم شود.
۳. زمان سپری شده که برای انجام یک ماموریت عملیاتی، بخشی از یک ماموریت، یا یک وظیفه عملیاتی نیاز است (زمان درهر وظیفه).
۴. زمانی که برای انجام وظیفه نگه‌داری و تعمیرات نیاز است (به قسمت ۱۳-۲ مراجعه کنید).

۵. تعداد خطاهای انسانی ایجاد شده توسط کاربر در هر ماموریت، سناریوی ماموریت، تکلیف/وظیفه کاربر، یا دوره‌ی زمان (به‌طور مثال خطاها در هر وظیفه).
۶. تعداد خطاهای انسانی ایجاد شده توسط کاربر نگه‌داری و تعمیرات در هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات، وظیفه نگه‌داری و تعمیرات یا یک دوره‌ی زمانی (به‌طور مثال خطاها درهر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات).
۷. نرخ آموزش کارکنان، یا تعداد کاربران و کارکنان نگه‌داری و تعمیرات آموزش داده شده در هر دوره‌ی زمانی.
۸. تعداد روزهای آموزش کارکنان در یک دوره‌ی زمانی مشخص (به‌طور مثال روزهای آموزش در ماه).
۹. هزینه‌ی کارکنان عملیات در هرساعت از عملیات سیستم، هر ماموریت یا هر بخش از ماموریت (به‌طور مثال $/OH).
۱۰. هزینه‌ی کارکنان نگه‌داری و تعمیرات در هر ساعت عملیات سیستم، هر ماموریت یا هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات (به‌طور مثال $/MA).
۱۱. هزینه‌ی آموزش هر فرد، هر سازمان یا در هر دوره‌ی زمانی (به‌طور مثال $/person، $/Month، $/Organization/Month).

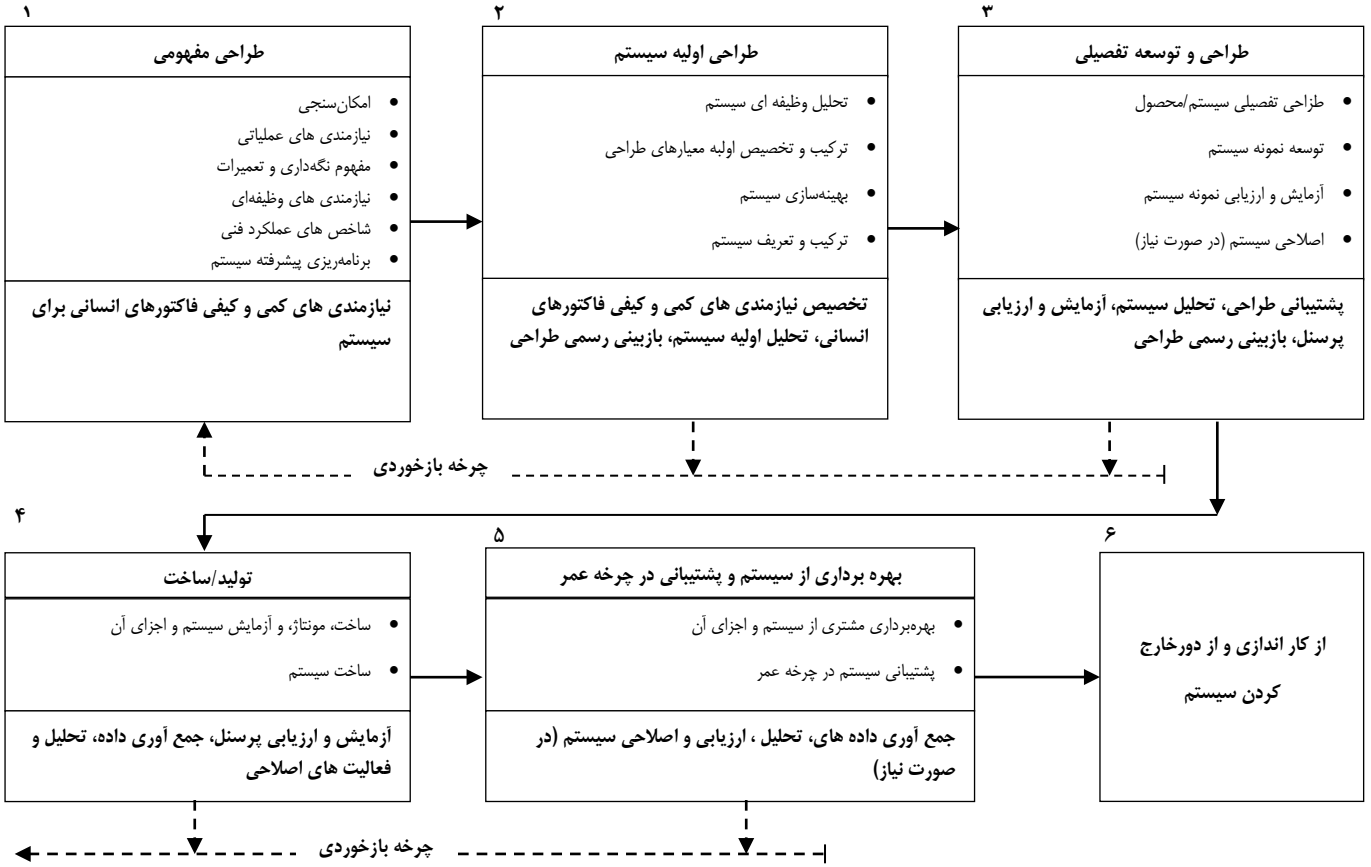
با این‌که تعداد شاخص‌های مختلف به نوع سیستم و طبیعت ماموریت بستگی دارند، موارد بالا برخی از رایج‌ترین آن‌ها را در بسیاری از موارد نشان می‌دهند.

۱۴-۳- فاکتورهای انسانی در چرخه‌ی عمر سیستم

فاکتورهای انسانی، مانند قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، باید یکی از ملاحظات ذاتی در فرایند مهندسی سیستم‌ها از ابتدای فاز طراحی مفهومی باشد. با مراجعه به شکل ۱۴-۹ (که تعمیمی از شکل ۲-۳ است)، نیازمندی‌های کمی و کیفی مربوط به انسان باید از طریق

توسعه‌ی نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهومی نگه‌داری و تعمیرات (قسمت‌های ۳-۴ و ۳-۵) و هم‌چنین شناسایی و اولویت‌بندی TPMها (قسمت ۳-۶) مشخص گردند. هنگامی که وظایف سطح بالا برای سیستم تعریف گردید، مطالعات موازنه با هدف شناسایی وظایف/تکالیف که باید ازطریق (۱) تنها توسط انسان، (۲) به‌صورت خودکارتوسط تجهیز و نرم‌افزار، یا (۳) ترکیبی از افراد، تجهیزات، نرم‌افزار، تسهیلات و مشابه آن انجام شود، صورت می‌گیرد. نیازمندی‌های افراد، به‌عنوان عناصر مهم سیستم، شناسایی و مشخص شده‌اند. این نیازمندی‌ها می‌توانند شاخص‌هایی را تشکیل دهند که در قسمت ۱۴-۲ بیان شد.

با داشتن مشخصات فنی نیازمندی‌ها برای فاکتورهای انسانی در بلوک ۱ شکل ۱۴-۹، (و هم‌چنین شامل مشخصات فنی سیستم – نوع A)، گام بعدی ترجمه‌ی این نیازمندی‌ها از تحلیل وظیفه‌ای در سطح سیستم (قسمت‌های ۳-۷-۱ و ۴-۳-۱) به زیرسیستم‌های مختلف و سطوح پایین‌تر از طریق فرایند تخصیص (قسمت ۴-۳-۲) است. فرایند تکرارشونده ترکیب، تحلیل و ارزیابی از طریق طراحی اولیه و تفصیلی و فازهای توسعه‌ای به‌صورتی پیوسته انجام می‌شود. این فرایند از طریق استفاده اثربخش از ابزارها و متدهای انتخاب شده مانند تحلیل تکالیف عملیاتی (OTA)، توسعه نمودارهای توالی عملیات (OSD)، تحلیل ایمنی/خطر، تحلیل تکالیف نگه‌داری و تعمیرات (MTA) در فصل ۱۳ و غیره تسهیل می‌شود. با پیشرفت طراحی و توسعه مدل‌های فیزیکی، یک ارزیابی پیوسته از طریق آزمایش و ارزیابی کارکنان که به‌عنوان بخشی از فعالیت آزمایش و ارزیابی کلی سیستم (فصل ۶) انجام می‌گردد، اتفاق می‌افتد. هدف کلی، ادغام درست و کامل سیستم‌های انسانی است.



شکل ۱۴- ۹- فاکتورهای انسانی در چرخه عمر سیستم

۱۴-۳-۱- نیازمندی‌های سیستم

انسان، به‌عنوان عنصری از سیستم، ابتدا طی تشریح اولیه نیاز و انجام امکان‌سنجی (قسمت‌های ۳-۱ و ۳-۳) در نظر می‌آید. مشتری (یا کاربر) نقش خود را به‌عنوان بخشی ذاتی در سیستم از ابتدا شناسایی می‌کند، چه مساله سیستم حمل و نقل باشد، چه سیستم پل عبوری از رودخانه، چه سیستم ارتباطی، سیستم سلامت و غیره باشد. از طریق توسعه تحلیل وظیفه‌ای و تکمیل موازنه طراحی (قسمت‌های ۳-۷ و ۴-۳)، وظایفی که باید توسط انسان انجام شود، بیش‌تر معین می‌شود. وظایف/تکالیف عملیاتی در ابتدا شناسایی شده و سپس منجر به تعریف وظایف/تکالیف عملیاتی می‌شود.

در مراحل ابتدایی طراحی، فرد باید برخی نیازمندی‌های طراحی برای عنصر انسان را در سیستم (به‌عنوان ورودی طراحی) در نظر بگیرد. این نیازمندی‌ها، که باید به‌عنوان بخشی از نیازمندی‌های سیستم مقرر شوند (قسمت‌های ۳-۳ تا ۳-۶)، باید شامل مشخصات فنی هر شاخص کاربردی باشد تا سیستم به‌راحتی، ایمن، اقتصادی و بدون ایجاد خطا عملیات را انجام داده و نگه‌داری شود. برای مثال، ممکن است بیان شود که *سیستم باید طوری طراحی گردد تا عملیات را با کم‌تر از* x *نفر کارکنان (بین ۹۵ درصد مردان و ۵ درصد زنان) با مهارت پایه‌ای که از سطح* y *تجاوز نمی‌کند و در زمان* z *و بدون خطا در فرایند انجام دهد.*

برخی از نیازمندی‌های کمی درنظر گرفته نشده باید از شاخص‌های نشان داده شده در قسمت ۱۴-۲ استخراج شوند. هنگامی که سطوح مهارت انسان تعریف می‌شود، سازماندهی کاربر باید به‌عنوان منبعی برای تعریف نیازمندی‌های مطلوب باشد. برای مثال، یک فرد در سطح مهارت پایه‌ای باید صلاحیت‌های زیر را دارا باشد:

۱.سن: ۱۸ تا ۲۱.

۲.تحصیلات: متوسطه.

۳.سطح خواندن و نوشتن عمومی: کلاس نهم.

۴.تجربه: هیچ تجربه کاری پیش از آموزش نیاز نیست.

۵.صلاحیت‌های عمومی: پس از مقدار محدودی (۴۰ ساعت) آموزش آشنایی با کار، به‌علاوه آموزش هنگام کار (OJT) (تکمیل ۳ ماموریت)، فرد می‌تواند وظایف عادی را انجام دهد که شامل راه‌اندازی سیستم، کنترل آن، ارتباطات و ثبت داده است. فرد می‌تواند به‌راحتی دستورالعمل‌هایی را که در آن تفسیر و تصمیم‌گیری وجود ندارد، دنبال کند. این فرد نیاز به نظارت مستقیم دارد.

تعریف سطوح بالاتر مهارت (یعنی سطوح میانی و سرپرستی) شامل نیازمندی‌های آموزشی بالاتر، آموزش بیش‌تر و تجربه بیش‌تر است. این سطوح مهارت و نیازمندی‌های مربوطه، برای عملیات و نگه‌داری سیستم تنظیم می‌گردد. هدف اصلی فاکتورهای انسانی، طراحی سیستمی است که به‌آسانی مورداستفاده قرار گیرد (عملیات و پشتیبانی) و توسط فردی با مهارت‌های پایه‌ای انجام شود و نیازمند آموزش زیاد نباشد.

۱۴-۳-۲- تخصیص نیازمندی‌ها

با داشتن نیازمندی‌های کلی سیستم، معیارهای کمی و کیفی مناسب طراحی برای عناصر مختلف سیستم استقرار می‌یابد؛ یعنی تجهیزات، نرم‌افزار و تسهیلات (شکل ۳-۲۵). خطوط راهنمای نمایش داده شده در شکل‌های ۱۴-۲ تا ۱۴-۷ مثال‌هایی را برای شروع کار فراهم کرده است. با مراجعه به شکل ۱۴-۴، در طراحی کنسول، معیارهای مشخص برای پوشش مکان اجزا بر پایه نیازمندی‌های عملیاتی و فاکتورهای تن‌سنجی و حواس مربوط به انسان مقرر می‌گردند. در طراحی پنل کنترل، خطوط راهنمای مشخصی مربوط نوع، توانایی و مکان سوییچ‌ها، دستگیره‌ها و

دیگر کنترل‌کننده‌ها، نوع گیج‌ها، صفحه نمایش‌ها، وسایل خواندن داده براساس طبیعت اطلاعات مطلوب، برچسب‌گذاری وکدگذاری رنگی، انتقال اطلاعات از طریق رادیو یا روش‌های بصری و غیره وجود دارد.

۱۴-۳-۳- بازبینی و ارزیابی طراحی

بازبینی طراحی برای مشارکت خصوصیات مهندسی انسان به‌عنوان بخشی از فرایند تشریح شده درقسمت ۳-۱۰، ۴-۸ و ۵۰۸ انجام می‌شود. خصوصیات سیستم (و عناصر آن) به‌صورت نیازمندی‌های اولیه و مشخص شده فاکتورهای انسانی برای سیستم ارزیابی می‌شوند. اگر نیازمندی‌ها برآورده شده باشند، طراحی تایید می‌شود. اگر نه، تغییرات مناسبی برای اصلاح آغاز می‌شود.

برای پشتیبانی بازبینی فاکتورهای انسانی، فرد باید یک چک‌لیست بازبینی طراحی را توسعه دهد که عبارت است از سوالاتی که مثال‌هایی از آن در زیر فهرست شده است. توجه شود که پاسخ همه این سوالات باید بله باشد:

۱. آیا نیازمندی‌های کمی و کیفی برای فاکتورهای انسانی در طراحی به حد کافی تعریف و مشخص شده است؟ آیا از بالا به پایین تخصیص داده شده است؟

۲. آیا یک تحلیل سیستم سطح بالا برای شناسایی آن وظایف که توسط انسان باید تکمیل شود، انجام شده است؟ آیا این وظایف به عملیات شغلی، تکالیف، زیرتکالیف و عناصر تکلیف تا حد ممکن شکسته شده است؟

۳. آیا واسطه‌های مناسب بین انسان و دیگر عناصر سیستم تعریف شده‌اند؟ (یعنی تجهیزات، نرم‌افزار، تسهیلات و عناصر پشتیبانی).

۴. آیا طراحی سیستم به حد کفایت ملاحظات فاکتورهای تن‌سنجی، حواس انسان، فیزیولوژی و روان‌شناسی را منعکس می‌کند؟

۵. آیا طراحی ملاحظات توانمندی‌ها قابلیت‌های انسان در مواجهه با نیازمندی‌های پردازش اطلاعات را منعکس می‌کند؟ (شکل ۱۴-۸).

۶. آیا آن تکالیف که باید توسط انسان انجام شود از طریق OTA توجیه شده‌اند؟ آیا می‌توان آن‌ها را درتحلیل وظیفه‌ای رهگیری کرد؟ (قسمت ۳-۷-۱ و ۴-۳-۱).

۷. آیا تعداد و سطوح مهارت کارکنان برای سیستم تعریف شده است؟ آیا سیستم طوری طراحی شده است که عملیات توسط فرد با مهارت پایه به‌صورت موفقیت‌آمیز انجام شود؟ آیا تعداد کارکنان عملیاتی تا حد ممکن بهینه شده است؟

۸. آیا واسطه‌های بین انسان و دیگر عناصر سیستم به‌درستی تعریف شده و توسط توسعه OSDها توجیه شده است؟ آیا OTA و OSDها انطباق دارند؟ آیا آن‌ها توسعه نیازمندی‌های آموزش را توجیه می‌کند؟

۹. آیا تحلیل ایمنی/ خطر انجام شده است؟ آیا با FMECA مطابقت دارد؟ (قسمت ۱۲-۴-۱).

۱۰. آیا یک تحلیل خطا صورت گرفته است؟ آیا نتایج بازخوردی به FMECA و تحلیل ایمنی/خطا داشته است؟ آیا نتایج به‌عنوان ورودی نیازمندی‌های آموزش کارکنان فراهم شده است؟

۱۱. آیا خصوصیات محیطی به حد کافی برای محلی که سیستم وظایف/تکالیف را توسط انسان انجام می‌دهد تعریف کرده است؟ آیا بهینه هستند؟

۱۲. آیا در طراحی پنل‌ها و صفحه‌های نمایش کنترل، کنترل‌ها استاندارد شده‌اند؟ آیا کنترل‌ها به‌صورت متوالی قرار داده شده‌اند؟ آیا براساس فراوانی یا حساسیت استفاده قرار داده شده‌اند؟ آیا برچسب‌گذاری کنترل کافی است؟ آیا روابط مناسب کنترل و نمایش در نظر گرفته شده‌اند؟ آیا سوییچ پنل‌های مناسب مورد استفاده قرار گرفته است؟ آیا نور پنل کنترل کافی است؟ آیا طراحی کلی توسط OSDها توجیه شده است؟

۱۳. در حوزه ایمنی، آیا خطرات سیستم/محصول از جنبه گرما، سرما، تغییرات دما، تغییر فشار، تغییر رطوبت، شوک، ارتعاش، نور، باکتری، فرسایش، بو، مواد شیمیایی، نفتی، روغن، حمل و نقل و جابه‌جایی و غیره حذف شده‌اند؟

۱۴. آیا تدارکات خرابی ایمن در طراحی مدنظر بوده است؟

یک بازبینی طراحی خوب باید انجام شود تا این موضوعات و موضوعات مرتبط دیگر را بررسی کند.

۱۴-۴- روش‌های تحلیل فاکتورهای انسانی

در زمینه تحلیل فاکتورهای انسانی (که به‌عنوان یک بخش تکرار شونده از ترکیب، تحلیل و ارزیابی سیستم انجام می‌شود)، تعدادی ابزار وجود دارد که می‌توانند به‌صورتی اثربخش در پشتیبانی از اهداف تشریح شده در این کتاب مورد استفاده قرار گیرند. روش‌هایی که در این‌جا مورد توجه است عبارت‌اند از تحلیل تکالیف کاربر (OTA)، توسعه نمودارهای توالی عملیات (OSD)، تحلیل خطا و تحلیل ایمنی/خطر سیستم است. روابط میان این فعالیت‌ها در شکل ۱۴-۱۰ نشان داده شده است.

۱۴-۴-۱- تحلیل تکالیف کاربر (OTA)

این شکل از تحلیل شامل یک مطالعه سیستمی از خصوصیات رفتاری انسان در ارتباط با تکمیل تکالیف سیستم است. در انجام تحلیل تکالیف کاربر (OTA)، گام‌های زیر اعمال شده و شکل ۱۴–۱۱ یک قالب از داده‌های نمونه را نشان می‌دهد که پیاده‌سازی تحلیل را تسهیل می‌کند:

۱. وظایف کاربر سیستم را شناسایی کرده و یک سلسله مراتب از این وظایف در قالب عملیات شغلی، خدمت، تکالیف، زیرتکالیف و عناصر تکلیف را همان‌طور که در قسمت ۱۴–۱ تشریح شده است، استقرار دهید.

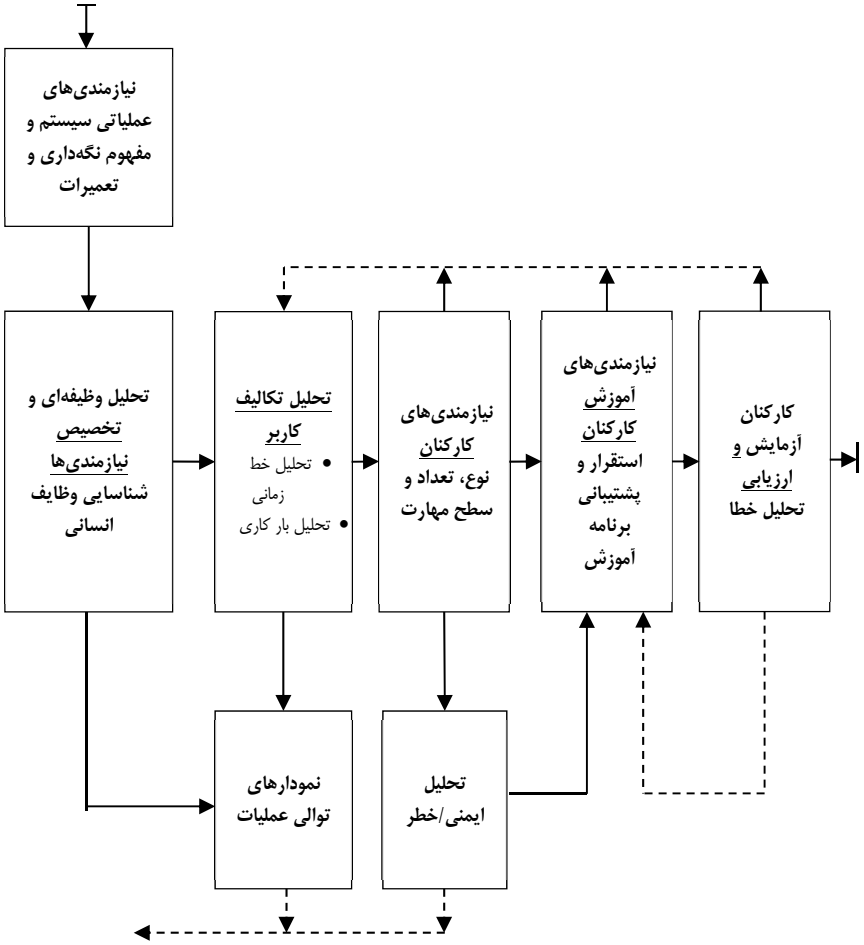
۲. برای هر وظیفه‌ای که شامل عنصر انسان است، اطلاعات لازم را برای تصمیم‌های کاربران تعیین کنید. چنین تصمیم‌هایی منجر به راه‌اندازی کنترل، پایش وضعیت سیستم یا موارد مشابه می‌شود. اطلاعات موردنیاز برای تصمیم‌گیری باید به شکل نمایش تصویری یا سیگنال‌ها صوتی ارائه شود.

۳. برای هر فعالیت، کفایت اطلاعات بازخوردی به انسان را به‌عنوان نتیجه کنترل، توالی عملیات وغیره تعیین کنید.

۴. نیازمندی‌های زمانی، فراوانی رخداد، نیازمندی‌های دقت و بحرانی بودن هر فعالیت را که توسط انسان انجام می‌شود، تعیین کنید.

۵. اثر محیطی فاکتورهای انسان را تعیین کرده ومحدودیت‌ها در فعالیت‌های انسانی را در آیتم ۱ شناسایی کنید.

۶. نیازمندی‌های سطح مهارت انسان برای همه فعالیت‌های کارکنان عملیاتی را تعیین کنید، تکالیف را گروه‌بندی کرده و به ایستگاه کاری معین تخصیص دهید و تعداد کل کارکنان و سطوح مهارت موردنیاز برای سیستم را مشخص کنید.



شکل ۱۴- ۱۰- کاربرد و روابط روش‌ها و ابزارهای مورد استفاده در طراحی فاکتورهای انسانی

با استفاده از قالب شکل ۱۴-۱۱، هر زیرتکلیف در ستون ۳ شناسایی شده است. این تکالیف می‌تواند شامل عملیات، بازرسی، تنظیم، عیب‌یابی، یا انجام فعالیت‌های مشابه باشد. محرک

فعالیت یا رخداد، که زیر فعالیت را به شروع کار خود وادار می‌کند در ستون ۴ نمایش داده شده است. این موضوع شامل یک دستور، نمایش علامت خارج از تلرانس بودن، یک نشانه خرابی یا مشابه آن است. فعالیت یا پاسخ موردنیاز در ستون ۵ مشخص شده است. ستون ۶ دسته‌بندی اولیه زیرتکلیف را براساس شباهت آن به دیگر زیرتکالیف‌شان می‌دهد و ستون ۸ برای وارد کردن منابع بالقوه خطای انسانی استفاده شده است. ستون ۹ به دو قسمت تقسیم شده است که شامل زمان مجاز که دوره‌ی زمانی است که تکلیف باید تکمیل شود و زمان لازم می‌باشد که دوره‌ی زمانی واقعی موردنیاز است. یک محدودیت زمانی را می‌تواند از طریق فرایند تخصیص که در قسمت ۱۴-۳-۲ بحث شد مشخص کرد. مکان جغرافیایی یا ایستگاه کاری که زیر تکلیف باید انجام شود در ستون ۱۰ ذکر شده است. در نهایت، سطح مهارت پیش‌بینی شده که برای تکمیل زیرتکلیف نیاز است در ستون ۱۱ ارائه شده است.

هدف از تحلیل تکلیف، حصول اطمینان از آن است که هر کدام از محرک‌ها به یک پاسخ مناسب مربوط شده باشند (و هرپاسخ به‌طورمستقیم مربوط به یک محرک باشد). به‌علاوه، حرکات انسانی فرد براساس نیازمندی‌های چابکی، مهارت‌های ذهنی و حرکتی، خصوصیات استرس در انجام تکلیف/زیرتکلیف توسط انسان، و غیره تحلیل می‌شود. هدف آن است که (۱) حوزه‌هایی از طراحی سیستم که در آن مسائل انسان- ماشین وجود دارد، شناسایی شوند، (۲) نیازمندی‌های تعداد و سطح مهارت کارکنان لازم برای انجام عملیات سیستم مشخص شوند، و (۳) نیازمندی‌های آموزش کارکنان شناسایی گردند. قالب OTA، همان‌طور که در شکل ۱۴-۱۱ نشان داده شده است، می‌تواند تعمیم داده شود تا شامل عملکرد تحلیل خط زمانی و تحلیل بار کاری شود. تحلیل خط زمانی آن تکالیفی را مورد بررسی قرار می‌دهد که می‌توانند به‌صورت ترتیبی یا موازی انجام شوند، و تحلیل بار کاری منجر به شناسایی تعداد کارکنان موردنیاز می‌شود.

وظیفه (۱)	انجام عملیات برق هواپیما و کنترل‌های سیستم								
تکلیف (۲)	کنترل عملیات موتور جت								
زیرتکلیف (۳)	محرک فعالیت (۴)	فعالیت موردنیاز (۵)	بازخورد (۶)	دسته‌بندی تکلیف (۷)	خطاهای بالقوه (۸)	زمان (۹)		ایستگاه کاری (۱۰)	سطح مهارت (۱۱)
						مجاز (۹a)	لازم (۹b)		
۳-۱ تنظیم دور موتورجت	۴-۱ سرعت سنج موتور	۵-۱ کاهش دور موتور	۶-۱ افزایش دردور موتور سرعت سنج	۷-۱ کاربر تکلیف: فرمان دهنده هواپیما	۸-۱ a. خواندن اشتباه سرعت سنج b. شکست در تنظیم دور موتور	۹a-۱ ۱۰ ثانیه	۹b-۱ ۷ ثانیه	۱۰-۱ فرمان دهنده هواپیما	۱۱-۱ پایین

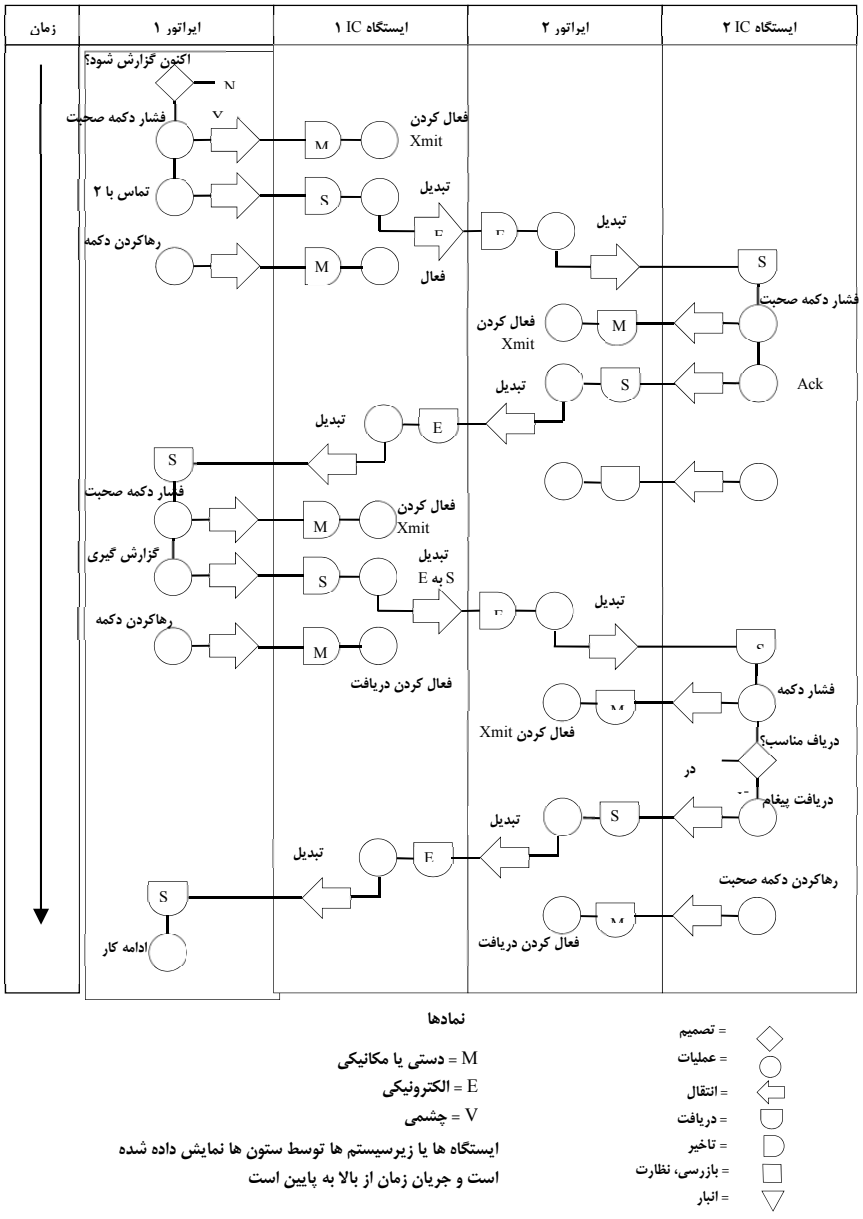
شکل ۱۴- ۱۱- قالب نمونه تحلیل و تخصیص تکلیف.

منبع: H.P. Van Cott andR.G. Kinkade, Human Engineering Guide to Equipment Design, reviseded. (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1972).

۱۴-۴-۲- نمودار توالی عملیات (OSD)

OSD را می‌توان برای کمک به ارزیابی جریان اطلاعات از زمانی مورد استفاده قرار داد که کاربر درگیر تکمیل ماموریت سیستم می‌شود. جریان اطلاعات در این مورد به تصمیم‌های کاربر، فعالیت‌های کنترلی کاربر و انتقال داده‌ها مربوط می‌شود. شکل ۱۴-۱۲ مثالی از یک OSD را فراهم کرده است.

با استفاده از تحلیل وظیفه‌ای و OTA، فعالیت‌های کاربر به‌صورت یک توالی از بالا به پایین که در شکل نشان داده شده است، شناسایی می‌شوند. در این نمونه، دو کاربر سیستم نیاز است که هر کدام به یک ایستگاه کاری اختصاص داده شده است. هدف نشان دادن چگونگی جریان اطلاعات بین این دو کاربر و ایستگاه‌های کاری مربوطه است که به‌صورت زمانی با پیشرفت یکی از بالا به پایین ارائه شده است. نمادگذاری در این شکل فعالیت‌هایی را که اتفاق می‌افتند، منعکس می‌کند. این موضوع به‌نوبه‌ی خود منجر به نیازمندی‌های طراحی برای انواع خاصی از نمایش، مشارکت روش‌های مکانیکی و الکترونیکی پردازش اطلاعات، مشارکت خودکارسازی و غیره می‌شود. از طریق ارزیابی توالی عملیات و در نظر گرفتن خصوصیات انسانی که در قسمت ۱۴-۱ تشریح شده، فرد می‌تواند کفایت طراحی در ارتباط با انسان و دیگر عناصر سیستم (یعنی طراحی پنل کنترلی در این نمونه) را ارزیابی کند. نتایج ایجاد OSDها می‌توانند در توسعه نیازمندی‌های آموزش کارکنان نیز به کار آیند.



شکل ۱۴- ۱۲- نمودار توالی عملیات (مثال). منبع: MIL-H-46855, Military Specification, Human Engineering Requiremnets for Military Systems, Equipment, and Facilities (Washington, DC: Department of Defense).

۱۴-۴-۳- تحلیل خطا

خطا هنگامی اتفاق می‌افتد که فعالیت انسانی از حدود مجاز تجاوزکند، به شرطی که حدود عملکرد مجاز تعریف شده باشد. خطاها را می‌توان به خطاهای غفلت، هنگامی که انسان نمی‌تواند تکلیف لازم را انجام دهد و خطای اجرایی تقسیم بندی کرد. علل ممکن خطا در ادامه آورده شده است:

۱. **فضا و چیدمان نامناسب محل کار:** طراحی ضعیف ایستگاه کاری در مورد محل نشستن، فضای در دسترس، توالی فعالیت‌ها و در دسترس بودن عناصر سیستم.

۲. **طراحی ضعیف تسهیلات، تجهیزات و پنل‌های کنترلی برای فاکتورهای انسانی:** نمایشگرها و دستگاه‌های خواندن اطلاعات نامناسب، چیدمان ضعیف کنترل‌ها و فقدان برچسب‌گذاری مناسب.

۳. **شرایط ضعیف محیطی:** نورپردازی غیرکافی، دمای بالا یا پایین و سطح سروصدای بالا.

۴. **آموزش، وسایل کمکی و دستورالعمل‌های ناکافی:** فقدان آموزش مناسب و نوشتار بد دستورالعمل‌های عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات.

۵. **نظارت ضعیف:** فقدان ارتباطات، عدم بازخورد و فقدان برنامه‌ریزی مناسب که منجر به اضافه کاری می‌شود.

تحلیل خطا می‌تواند به‌صورت تحلیلی همراه با OTA، MTA، طی توسعه OSD و به‌صورت فیزیکی به‌عنوان بخشی از آزمایش و ارزیابی سیستم که در فصل ۶ بحث شد، انجام شود. هدف، انتخاب یک فرد با مهارت و آموزش مناسب، شبیه‌سازی عملیات سیستم به‌صورت یک سری از تکالیف/وظایف و اندازه‌گیری تعداد خطاهایی است که در فرایند اتفاق می‌افتند. با استفاده از رویکرد نمودار علت و اثر ایشیکاوا، همان‌طور که در شکل ۱۲-۱۹ ترسیم شد، می‌توان به تعیین

علل خطاها کمک کرد (یعنی *چگونه یک خطا در سیستم رخ داده است؟*). به‌علاوه، مهم است که به آثار خطا بر دیگر عناصر سیستم، بر سیستم به‌عنوان یک کل و بر دیگر سیستم‌ها در ساختار SOS توجه شود. بنابراین، مهم است که تحلیل خطا در ادغام با FMECA و تحلیل ایمنی/خطر سیستم انجام گیرد که در ادامه بررسی می‌شود.

۱۴-۴-۴- تحلیل ایمنی/خطر

تحلیل ایمنی خطر بسیار نزدیک به FMECA می‌باشد که در قسمت ۱۲-۴-۱ تشریح شد. ایمنی به کارکنان و عناصر دیگر سیستم که کارکنان با آن‌ها در ارتباط هستند، مربوط می‌شود. تحلیل ایمنی/خطا عموما شامل اطلاعات زیر می‌باشد:

۱. ***تشریح خطر.*** نیازمندی‌های عملیات سیستم و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات سیستم بازبینی می‌شوند تا شرایط خطر شناسایی شود. تجربه گذشته در مورد سیستم‌های مشابه یا محصولات استفاده شده در محیط‌های قابل مقایسه، نقطه‌ی شروع مناسبی است. شرایط خطرناک می‌توانند شامل شوک‌های الکتریکی، واکنش‌های شیمیایی، انفجار و خطر، گرما و دما، تشعشعات، فشار، رطوبت، ارتعاش و نویز و مواد سمی باشند.

۲. ***علت خطر.*** علل ممکن خطر برای هر کدام از خطرات شناسایی شده تشریح شود. به عبارت دیگر، *کدام رخدادها ممکن است خطر ایجاد کنند؟*

۳. ***شناسایی آثار خطر.*** آثار هر کدام از خطرات شناسایی شده بر روی کارکنان و تجهیزات را تشریح کنید. آثار آن‌ها بر افراد شامل صدماتی مانند بریدگی، شکستگی استخوان، سوراخ شدن بدن، گرمازدگی و غیره بررسی شوند.

۴. ***دسته‌بندی خطر.*** خطرات را می‌توان براساس اثر آن بر کارکنان و تجهیزات به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

a. ***خطرات قابل اغماض (دسته I).*** شرایطی مانند محیط، خطای انسان، خصوصیات طراحی، خطاها در دستورالعمل، یا خرابی تجهیز که اثر قابل توجهی بر صدمه دیدن کارکنان یا آسیب دیدگی تجهیزات ندارد.

b. ***خطرات حاشیه‌ای (دسته II).*** شرایطی مانند محیط، خطای انسان، خصوصیات طراحی، خطاها در دستورالعمل، یا خرابی تجهیز که بدون ایجاد صدمه یا آسیب قابل کنترل هستند.

c. ***خطرات بحرانی (دسته III).*** شرایطی مانند محیط، خطای انسان، خصوصیات طراحی، خطاها در دستورالعمل، یا خرابی تجهیز که باعث صدمه به کارکنان یا آسیب جدی به سیستم شده یا نیاز به فعالیت اصلاحی فوری دارد تا کارکنان و تجهیزات سالم بمانند.

d. ***خطرات فاجعه بار (دسته IV).*** شرایطی مانند محیط، خطای انسان، خصوصیات طراحی، خطاها در دستورالعمل، یا خرابی تجهیز که باعث مرگ یا صدمات جدی شده یا باعث از بین رفتن کامل سیستم می‌شود.

۵. ***احتمال اتفاق افتادن خطر.*** به روش‌های آماری، احتمال اتفاق افتاده فراوانی پیش‌بینی شده خطرات را در قالب زمان تقویمی، چرخه‌های عملیات سیستم، ساعات عملیاتی تجهیزات و غیره را تعیین کنید.

۶. ***فعالیت‌های اصلاحی یا شاخص‌های پیشگیرانه.*** فعالیت‌هایی را تشریح کنید که می‌توان برای حذف یا حداقل کردن خطر از آن‌ها استفاده کرد. امید آن است که همه شرایط خطرناک حذف شود؛ با این حال، در برخی موارد تنها می‌توان سطح خرابی را از دسته IV به دسته‌های پایین‌تر کاهش داد.

تحلیل ایمنی خطا به‌عنوان یک ابزار کمکی در استقرار معیارهای طراحی و یک ابزار ارزیابی برای ارزیابی ایمنی طراحی مورد استفاده قرارگیرد. اگرچه قالب انجام آن می‌تواند تا حدی متغیر باشد، تحلیل ایمنی می‌تواند در پشتیبانی از نیازمندی‌های ایمنی صنعتی و ایمنی محصول/سیستم اعمال شود.

۱۵-۵- نیازمندی‌های کارکنان و آموزش

نیازمندی‌های کارکنان برای سیستم می‌توانند به‌صورت کارکنان عملیاتی و کارکنان نگه‌داری و تعمیرات دسته‌بندی شوند. نیازمندی‌های کارکنان عملیاتی از طریق تحلیل فاکتورهای انسانی، به ویژه از طریق تولید تحلیل تفصیلی تکلیف عملیات و نمودارهای توالی عملیات استخراج می‌شوند. نیازمندی‌های کارکنان نگه‌داری و تعمیرات از تحلیل قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، تحلیل قابلیت پشتیبانی و تحلیل تفصیلی تکالیف نگه‌داری و تعمیرات (MTA) تکامل می‌یابند.

در تعریف این نیازمندی‌ها برای سیستم، تعداد و سطوح مهارت کارکنان برای همه فعالیت‌های انسانی توسط وظایف، عملیات شغلی، خدمت، تکلیف و غیره تعیین می‌شون. این نیازمندی‌ها بر پایه شباهت‌ها و سطح پیچیدگی با هم ادغام می‌شوند. نیازمندی‌های سمت فرد شناسایی شده و برگه‌های کاری که مشخص‌کننده‌ی وظایف و تکالیفی است که باید توسط هر فرد انجام شود، مهیا می‌شوند. از این اطلاعات، نیازمندی‌های تعداد و سطح مهارت کارکنان برای سیستم به‌عنوان یک کل شناسایی خواهند شد.

با داشتن نیازمندی‌های کارکنان (در قالب سمت‌ها) برای سیستم، گام بعدی شناسایی منابع در دسترس و آن افرادی است که باید استخدام شوند تا عملیات سیستم را انجام داده و نگه‌داری و تعمیر شود. این افراد انتخاب شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا سطح مهارت فعلی آن‌ها و سطح مهارت لازم برای سیستم مقایسه شود. اختلاف بین آن نیاز برای آموزش را مشخص می‌کند.

فرض کنید که در نتیجه تحلیل فاکتورهای انسانی، سیستم نیازمند x نفر با سطح مهارت *پایه*، y نفر با سطح مهارت متوسط و z نفر با سطح مهارت بالا داشته و این سطوح مهارت به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

۱. ***سطح مهارت پایه.*** سطح مهارت پایه یعنی فرد باید بین ۱۸ تا ۲۱ سال سن داشته، کلاس نهم را گذرانده، مهارت خواندن و نوشتن عمومی را داشته باشد و هیچ سابقه‌ی کاری مورد نیاز نیست. پس از گذراندن زمان آموزش آشنایی با سیستم، این فرد می‌تواند وظایف عملیاتی ساده سیستم شامل راه‌اندازی، کنترل، ارتباطات و ثبت داده‌های سیستم را انجام دهد. فرد می‌تواند با دنبال کردن دستورالعمل‌های ارائه شده بدون نیاز به تفسیر و تصمیم‌گیری کار را انجام دهد. این فرد نیاز به نظارت مستقیم دارد.

۲. ***سطح مهارت میانی.*** سطح مهارت میانی عموما سنی بالای ۲۱ سال، دو سال تحصیلات دانشگاهی، دارای آموزش-های لازم در مورد سیستم‌های مشابه و دارای ۲-۵ سال سابقه کاری است. کارکنان در این دسته می‌تواند تکالیف نسبتا پیچیده را که ممکن است نیاز به تفسیر داده‌ها و تصمیم‌گیری داشته باشد، انجام دهند و برخی تکالیف نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه را بر عهده گیرند. این افراد نیازمند نظارت اندک هستند.

۳. ***سطح مهارت بالا.*** سطح مهارت بالا معمولا نیازمند ۲-۴ سال آموزش دانشگاهی و بیش از ۱۰ سال تجربه کار در سیستم‌های مشابه است. یک فرد با این مهارت برای آموزش و نظارت بر کارکنان سطوح پایه و میانی اختصاص داده می‌شود و در سمتی است که رویه‌ها را ترجمه کرده، تکالیف پیچیده را انجام داده و تصمیم‌هایی بگیرد که بر سیاست‌های عملیاتی سیستم تاثیرگذار باشد. علاوه‌بر این، این فرد برای انجام (یا نظارت) بر همه نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه سیستم صلاحیت دارد.

با داشتن نیازمندی‌های سیستم، فرض می‌شود که همه کارکنان در دسترس دارای صلاحیت لازم برای ورود به سطح مهارت پایه را دارند؛ یعنی آموزش عمومی آشنایی با سیستم را گذرانده و می‌توانند فعالیت‌های مربوط به سطح مهارت پایه را انجام دهند.

بر پایه این فرضیات، باید برنامه آموزشی توسعه داده شود تا:

۱. کارکنان جدید را بر پایه عملیات سیستم آموزش داده تا سمت‌های مربوط به سطح مهارت پایه را پر کنند.

۲. کارکنان ورودی که باید عملیات و نگه‌داری و تعمیرات را انجام دهند تا حدی آموزش دهید که نیازمندی‌های سطح مهارت میانی سیستم برآورده شود.

۳. کارکنان ورودی که باید عملیات و نگه‌داری و تعمیرات را انجام دهند تا حدی آموزش دهید که نیازمندی‌های سطح مهارت بالا سیستم برآورده شود.

آموزش می‌تواند از طریق ترکیبی از برنامه‌های ساختاریافته رسمی و OJT انجام شود. نیازمندی‌های آموزش شامل آموزش کارکنانی است که در سیستم فعالیت می‌کنند و هم‌چنین شامل آموزش کارکنانی می‌شود که باید طی چرخه‌ی عمر سیستم، جایگزین نیروی کار گردند. علاوه‌بر این، آموزش باید فعالیت‌های عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات را پوشش دهد. در طراحی برنامه آموزش، نیازمندی‌ها، بسته به پیچیدگی وظایف انسانی در انجام عملیات و نگه‌داری و تعمیرات می‌توانند بسیار متغیر باشند. سطح پیچیدگی تابعی از طراحی سیستم است که در قسمت‌های قبلی این فصل بحث شده است. اگر وظایف انسانی زیاد و با پیچیدگی بالا باشد، نیازمندی‌های آموزش بالا و پرهزینه خواهند بود. برعکس، اگر وظایفی که باید توسط انسان انجام شود نسبتا ساده باشد، نیازمندی‌های آموزش و هزینه مربوط به آن کم خواهند بود. در هر رخداد، باید یک برنامه‌ی آموزشی برای برآورده کردن نیازمندی‌های کارکنان سیستم طراحی و تنظیم

گردد. محتوای برنامه باید سطح مناسبی داشته باشد تا ابزارهای لازم در انجام وظایف مربوطه به‌صورت اثربخش و کارا توسط کارکنان عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات فراهم شود.

با در ذهن داشتن این هدف، یک برنامه‌ی آموزشی رسمی برای سیستم طی فاز طراحی تفصیلی سیستم/محصول توسعه می‌یابد. این برنامه باید شامل بیان اهداف آموزش، تشریح برنامه آموزش در قالب ماژول‌ها و محتوا، زمان‌بندی پیشنهادی آموزش، تشریح داده‌ها و ابزارهای کمکی مورد نیاز آموزش و تخمینی از هزینه‌های آموزش باشد. برنامه‌ی آموزشی باید به‌موقع پیاده‌سازی شود تا فعالیت‌های عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات سیستم را زمانی که سیستم برای بهره‌برداری توزیع می‌شود، پشتیبانی کند.

۱۴-۶- آزمایش و ارزیابی کارکنان

فصل ۶ نیازمندی‌های کلی آزمایش و ارزیابی سیستم به‌صورتی تقریبا کامل را پوشش داد. با مراجعه به شکل ۶-۲، تصدیق اعتبار سیستم با استفاده از مدل‌های تحلیل (به‌طور مثال شبیه‌سازی) و تعمیم آن از طریق آزمایش‌های نوع ۱ تا ۴ آغاز می‌شود. در این فاز آزمایش، عنصر انسان در سیستم به یک یا چند روش ارزیابی می‌شود. مدل‌های مهندسی (فیزیکی)، مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آموزش در ابتدا توسعه داده می‌شوند و آزمایش‌ها برای ارزیابی اشکال خاصی از عملیات و نگه‌داری و تعمیرات اجرا می‌شوند. انجام تکالیف گسسته فرد و نیازمندی‌های مربوط به انسان ارزیابی می‌شوند. به‌عنوان آزمایش‌های نوع ۲ و ۳ طی انجام آزمایش قابلیت اطمینان و نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، درجه خاصی از ارزیابی را می‌توان انجام داد. طی فازهای آزمایش نوع ۳ و ۴، ارزیابی سیستم به‌صورت یک واحد ادغامی انجام می‌شود و ممکن است برای کل سناریوهای ماموریت و همه‌ی عناصر سیستم ارزیابی صورت گیرد.

هنگامی که این آزمایش‌های متنوع اجرا می‌شود، هدف اصلی عبارتست از (۱) پایش عملکرد انسان در تکمیل همه نیازمندی‌های عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات؛ (۲) ارزیابی تکالیف عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات در قالب زمان سپری شده، توالی گام به گام، نیازمندی‌های چابکی، حوزه‌های دشوار و خطاهای انسانی؛ (۳) شناسایی حوزه‌های دارای مشکل و فراهم کردن پیشنهادهایی برای فعالیت اصلاحی؛ (۴) اصلاح نیازمندی‌های انتخاب و آموزش و در صورت نیاز مطابقت با هر گونه تغییر در سیستم. در هر رخدادی، فرایند تشریح شده در فصل ۶ دنبال می‌شود، اما در این‌جا تاکید بر انسان و واسطه‌های بین انسان و دیگر عناصر سیستم است.

۱۴-۷- خلاصه فصل

این فصل فاکتورهای انسانی و ملاحظات مربوطه را که باید طی فرایند طراحی بررسی شوند، فراهم می‌کند تا از پیاده‌سازی مناسب ادغام سیستم انسانی (HIS) اطمینان حاصل شود. محتوای فصل با برخی عبارات و تعاریف و تشریح برخی از خصوصیات انسانن که اهمیت بیش‌تری دارد (به‌طور مثال تن‌سنجی، حواس انسان، فیزیولوژی و فاکتورهای روان‌شناسی) آغاز می‌شود. موضوعات بعدی شاخص فاکتورهای انسانی است که درچرخه‌ی عمر سیستم، روش‌های تحلیل فاکتورهای انسانی، تحلیل ایمنی/خطا، نیازمندی‌های آموزش کارکنان و آزمایش و ارزیابی کارکنان را پوشش می‌دهند.

باید اضافه شود که هدف اصلی نه تنها طراحی برای قابلیت بهره‌برداری سیستم بلکه طراحی برای مقابله با استفاده‌های غلط و نادرست است. هنگامی که موضوع استفاده نادرست مطرح است، دسته‌بندی آن به‌عنوان نتیجه فعالیت عمدی و غیرعمدی مفید واقع می‌شود. تاکید زیادی بر مسائل غیرعمدی طی انجام وظایف عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات می‌شود که باعث خرابی سیستم و مسائل ایمنی سیستم می‌گردد. درحالی که وجود چنین مواردی بسیار مهم تلقی می‌شود،

چالش دیگری در دنیای امروز به آن اضافه شده است – مسائل عمدی و کارهای خرابکارانه (یا تروریسم).

بر این اساس، نیاز است که ابعاد دیگری در فرایند طراحی مطرح شوند؛ یعنی *طراحی برای امنیت*. اهداف زیر مدنظر هستند:

۱. توسعه و اجرای یک قابلیت اخطار امنیتی که حضور کارکنان متفرقه را شناسایی کرده و از انجام عملیات، نگه‌داری یا دسترسی به سیستم و عناصر آن جلوگیری می‌کند و قابلیتی که در نهایت منجر به ممانعت از ایجاد مشکلی که باعث صدمه یا از بین رفتن سیستم، توسط افراد خارج از سازمان می‌شود.

۲. استفاده از قابلیت "پایش مبتنی‌بر وضعیت" که فرد را برای بررسی وضعیت فعلی سیستم و عناصر آن به‌صورت مستمر توانمند می‌سازد. برای این کار نیاز است که حسگرهای مناسب، دستگاه‌های خواندن وضعیت سیستم، روش‌های بازرسی، و غیره مورد استفاده قرار گیرند تا تایید شود که سیستم و اجزای آن در وضعیت مطلوب بوده و روش‌های تشخیص خطای مناسب در دسترس هستند تا ابزارهای اصلاحی برای رفع هر نوع مشکلی فراهم باشد.

۳. مشارکت یک قابلیت درونی سیستم (مکانیسم) که هنگام بروز یک مشکل آن را شناسایی کرده و وجود مشکل را اخطار دهد. وجود یک قابلیت در طراحی که از زنجیره عکس‌العمل خرابی بعدی که منجر به آسیب و از بین رفتن سیستم می‌شود، ممانعت کند، مطلوب است.

طراح باید چنین موضوعاتی مانند ممانعت از دسترسی کارکنان متفرقه به سیستم، تعیین وضعیت واقعی سیستم در هر زمان و شناسایی و ممانعت از خرابی عمدی را که منجر به از بین

رفتن سیستم و مرگ کاربر می‌شود، مورد بررسی قرار دهد. مساله مربوط به طراحی برای امنیت می‌تواند تعمیم مناسبی از محتوای این فصل باشد و در قالب تحلیل ایمنی/خطر صورت گیرد.

هدف این فصل نمایش و تاکید بر اهمیت فاکتورهای انسانی در نیازمندی‌های سیستم و فعالیت‌هایی می‌باشد که برای برآورده کردن اهداف مهندسی سیستم الزامی است.

سوالات و مسائل

۱. فاکتورهای انسانی یعنی چه؟ چرا در نظر گرفتن فاکتورهای انسانی در طراحی مهم است؟ چه زمانی در چرخه‌ی عمر سیستم باید در نظر گرفته شود و چرا؟
۲. فرایندی را که منجر به شناسایی نیازمندی‌های وظیفه‌ای انسان در عملکرد عملیات و نگه‌داری و تعمیرات می‌شود، تشریح کنید.
۳. هر کدام از موارد زیر را به تفصیل تشریح کرده و مثالی از ارتباط آن به طراحی سیستم بیاورید:
   a. فاکتورهای تن‌سنجی
   b. فاکتورهای حواس انسان
   c. فاکتورهای فیزیولوژی
   d. فاکتورهای روان‌شناسی
۴. آثار ممکن فاکتورهای فیزیولوژی و روان‌شناسی درعملیات سیستم و تکمیل ماموریت تعریف شده را تشریح کنید. آثار ممکن بر یکدیگر تشریح کنید. مثال بزنید.
۵. چه آثاری ممکن است در عملکرد یک وظیفه در سیستم به‌وجود آید اگر کاربر برای انجام کارصلاحیت نداشته باشد؟ اگر توانمندی‌هایش بسیار بالاتر از کار تخصیص داده شده باشد چطور؟ چرا؟

۶. به شکل ۱۴–۸ مراجعه کنید. برخی از ملاحظات مربوط به انسان را که باید درطراحی یک سیستم بررسی شوند، تشریح کنید.

۷. برخی شاخص‌هایی را که به‌عنوان نیازمندی‌های طراحی برای عناصر انسانی سیستم اعمال می‌شود، شناسایی و تشریح کنید. یک سیستم به دلخواه انتخاب کرده، زیرسیستم‌های اصلی را شناسایی کنید و این نیازمندی‌ها را در سطح سیستم اعمال کنید.

۸. روابط میان نیازمندی‌های فاکتورهای انسانی (این فصل)، نیازمندی‌های قابلیت اطمینان (فصل ۱۲) و نیازمندی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (فصل ۱۳) را بیان کنید و آثار آن‌ها بر یکدیگر را شرح دهید. مثال بزنید.

۹. هر کدام از موارد زیر، هدف آن، کاربرد آن و اطلاعات به‌دست آمده از هر کدام را تشریح کنید:

a. OTA
b. OSD
c. تحلیل خطا
d. تحلیل ایمنی/خطر

۱۰. یک سیستم (یا یک عنصر ازآن) را به دلخواه انتخاب کرده و OTA را اجرا کنید. مثالی از تکامل از بالا به پایین OTA ازیک نمودار جریان وظیفه‌ای عملیات بیاورید و سپس یک مثال از OTA تعمیم داده شده ارائه کنید.

۱۱. از OTA تشریح شده در مساله۱۰، یک بخش خاص از سیستم را انتخاب کنید که در آن واسطه سخت‌افزار– انسان (به‌طور مثال پنل کنترل که نیازمند تعامل انسان– ماشین است) وجود دارد و یک OSD برای آن توسعه دهید.

۱۲. OTA چگونه با MTA ارتباط پیدا می‌کند؟

۱۳. تحلیل ایمنی/خطر چگونه با FMECAدر ارتباط است؟

۱۴. نیازمندی‌های تعداد و سطح مهارت کارکنان برای سیستم را بیان کنید؟ گام‌های تکاملی را شناسایی کنید.

۱۵. یک سازمان را که با آن آشنا هستید، انتخاب کنید، فرض کنید که باید نیازمندی‌های سطح ورود به سازمان را شناسایی کنید و یک شرح کار برای فردی در سطح مهارت پایه، میانی و نظارتی فراهم کنید.

۱۶. نیازمندی‌های آموزش کارکنان چگونه تعیین می‌شوند؟ داده‌های ورودی موردنیاز کدامند؟

۱۷. در طراحی برنامه‌ی آموزشی یک فرد چه گام‌هایی باید برداشته می‌شود؟ برای یک سازمان چطور؟

۱۸. اثربخشی یک برنامه‌ی آموزشی چگونه اندازه‌گیری می‌شود؟

۱۹. هدف از آزمایش و ارزیابی کارکنان چیست؟ چه زمانی نیازمندی‌ها برای آزمایش تعریف می‌شوند؟ چه زمانی از چرخه‌ی عمر سیستم فعالیت‌های آزمایش و ارزیابی کارکنان صورت می‌گیرد؟ مثال‌هایی را فراهم کنید که در آن طی آزمایش‌های مشخصی نیازمندی‌های فاکتورهای انسانی تصدیق اعتبار می‌شود.

۲۰. فعالیت آزمایش و ارزیابی کارکنان که در قسمت ۱۴–۶ تشریح شده چگونه با آزمایش قابلیت اطمینان (قسمت ۱۲–۵) و نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (قسمت ۱۳–۶) ارتباط پیدا می‌کند؟

۱۵

طراحی برای تدارکات و قابلیت پشتیبانی

سیستم‌های عمده‌یی که برنامه‌ریزی، طراحی، توسعه و ایجاد می‌شوند و استقرار می‌یابند، باید ملاحظات مربوط به تدارکات، نگه‌داری، تعمیرات و پایداری پشتیبانی در چرخه‌ی عمر آن‌ها مدنظر قرار گیرد. هنگامی که این فعالیت‌های ضروری بحث می‌شوند، باید پس از وقوع رخداد مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ یعنی، پس از آن‌که ساختار پایه طراحی سیستم استقرار می‌یابد. انجام تغییرات طراحی در این نقطه‌ی زمان، پرهزینه بوده، بیش‌تر به این علت است که توسعه زیر ساختار اثربخش و کارا پشتیبانی دیگر به‌راحتی در این مرحله انجام نمی‌شود.

با در نظر گرفتن این وضعیت، ضروری است که (۱) زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات به‌عنوان یک عنصر عمده سیستم در نظر گرفته شود؛ و (۲) این موضوع طی فرایند طراحی سیستم به‌درستی مورد بررسی قرار گیرد. اگر سیستم باید ماموریت خود را به‌صورت اثربخش و کارا انجام دهد، نیاز است که زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات قابل اتکا بوده و به‌صورت هم‌زمان در جای خود قرار گیرد. این کار باید از ابتدا و هم‌زمان با دیگر عناصر سیستم مورد طراحی انجام شود.

این فصل به تشریح مفاهیم و مدل‌های مفید در بررسی طراحی برای تدارکات و قابلیت پشتیبانی در ابتدای چرخه‌ی تولید می‌پردازد که منجر به ایجاد و توسعه یک زیرساختار پشتیبانی اثربخش و کارا برای سیستم می‌شود. این موضوع عبارت است از (۱) فعالیت‌های زنجیره‌ی تامین (SC) و تدارکات مربوط به تدارک و اکتساب، تولید، حمل و نقل و توزیع سیستم و عناصر آن به مکان عملیاتی مشتری (کاربر)؛ و (۲) پایداری بعدی پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات سیستم در طی چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده. این حوزه‌های پشتیبانی سیستم باید در طی فرایند مهندسی سیستم (همان‌طور که در شکل ۲-۴ ارائه شد) باید در نظر گرفته شوند.

هدف این فصل فراهم کردن درکی از تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات از نقطه‌نظر مهندسی و استفاده از رویکرد ادغامی و از طریق مطالعه فاکتورهای زیر است:

- تعریف و توضیح تدارکات و قابلیت پشتیبانی؛
- پشتیبانی تدارکات و سیستم در محیط سیستمی از سیستم‌ها (SOS)؛
- عناصر پشتیبانی تدارکات و سیستم؛
- شاخص‌های تدارکات و قابلیت پشتیبانی – زنجیره‌ی تامین، جریان خرید و مواد، حمل و نقل و بسته‌بندی، انبار و توزیع، سازماندهی نگه‌داری و تعمیرات، قطعات یدکی/تعمیری، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات، منابع رایانه‌ای و فاکتورهای داده‌های فنی؛
- تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات در چرخه‌ی عمر سیستم – نیازمندی‌های سیستم، تخصیص نیازمندی‌ها، مشارکت طراحی و بازبینی طراحی؛
- تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA)؛

- آزمایش و ارزیابی قابلیت پشتیبانی.

توسعه نیازمندی‌ها و برنامه‌های تدارکات و پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات سیستم به استفاده درست از قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی و اصول و مفاهیم مربوطه بستگی دارد که در فصول ۱۲ تا ۱۴ تشریح شدند. این کاربرد باید توسط موضوعات این فصل هدایت شود.

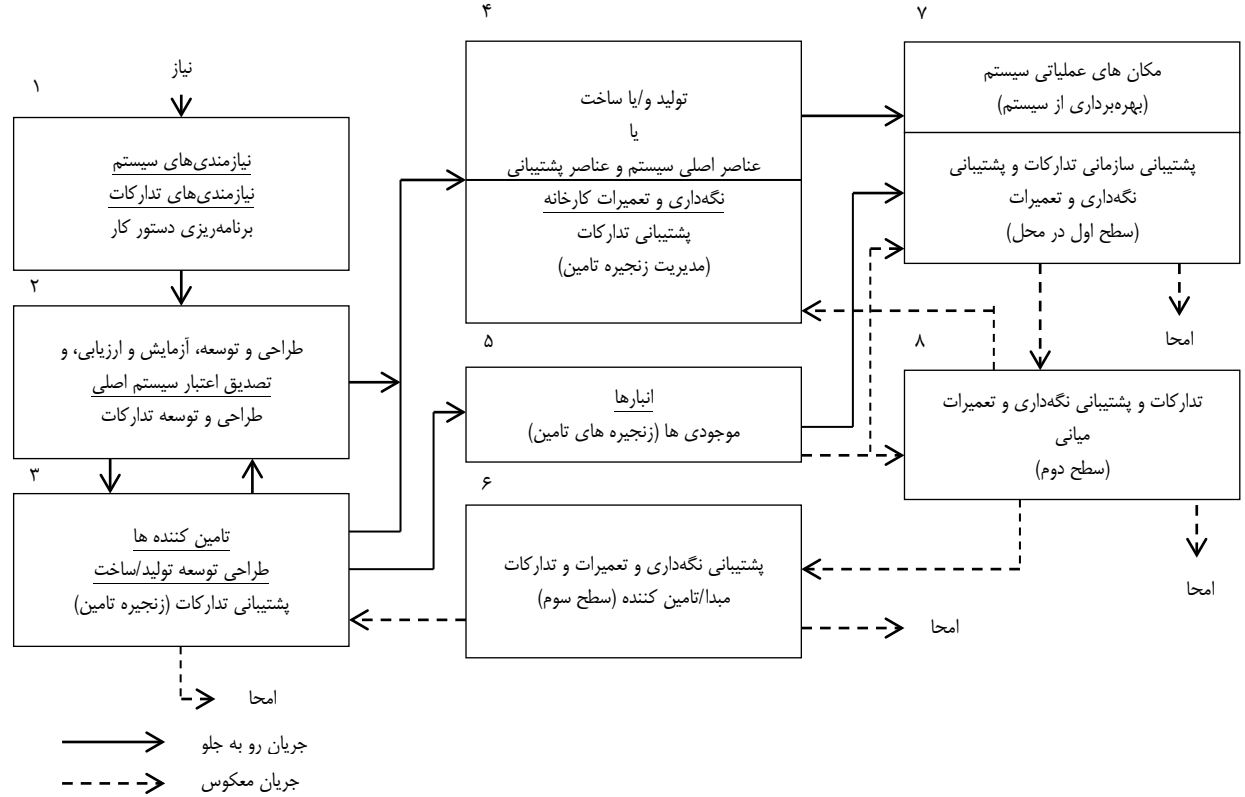
۱۵-۱- تعریف و توضیح تدارکات و قابلیت پشتیبانی

با مراجعه به شکل ۱۵-۱، بلوک‌های مختلف برخی از فعالیت‌های مربوط به توسعه، تولید/ساخت، عملیات، تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات سیستم را منعکس می‌کند. در ابتدا (و همان‌طور که در فصل ۳ تشریح شده است)، شناسایی یک نیاز، تعریف نیازمندی‌های سیستم و اجرای برخی فعالیت‌های برنامه‌ریزی ابتدایی (بلوک ۱) وجود دارد. این موضوع منجر به طراحی و توسعه شده که شامل توسعه‌دهنده‌ی سیستم و یک یا چند تامین‌کننده می‌شود (به‌ترتیب، بلوک‌های ۲ و ۳). با داشتن یک ساختار طراحی فرضی، فرایند تولید/ساخت آغاز می‌شود که شامل یک تولیدکننده اصلی و تعدادی تامین‌کننده مختلف می‌شود (به‌ترتیب، بلوک‌های ۴ و ۳). در ادامه، سیستم انتقال داده شده و در محیط عملیاتی مشتری/کاربر نصب می‌شود و اجزای مختلف سیستم به انبار یا به‌طورمستقیم به محل عملیاتی توزیع می‌شود (به‌ترتیب، بلوک‌های ۷ و ۵). در حقیقت، یک جریان رو به جلو (رو به خارج) از فعالیت‌ها وجود دارد؛ یعنی، جریان فعالیت‌ها از شناسایی یک نیاز ابتدایی به نقطه‌ای که سیستم در محیط کاربر عملیاتی می‌شود جریان دارد که در شکل ۱۵-۱ به‌صورت هاشور زده نشان داده شده است.

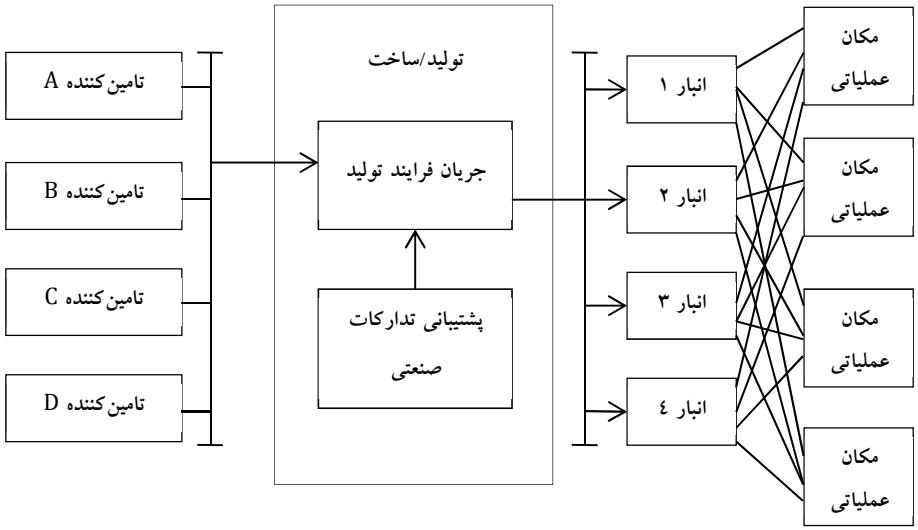
در این جریان رو به جلوی فعالیت‌ها (یعنی بلوک‌های ۲ تا ۵ و ۷ در شکل ۱۵-۱) وظایفی وجود دارد که در اصل مربوط به جنبه‌های مختلف زنجیره‌ی تامین تدارکات (SC) می‌شود که در

قسمت تجاری مورد تاکید است و عبارتست از (۱) تامین فیزیکی آیتم‌ها از منابع مختلف تامین به تولیدکننده؛ (۲) جابه‌جایی مواد، موجودی‌های مرتبط و جریان آیتم‌ها در فرایند تولید؛ و (۳) حمل و نقل و توزیع فیزیکی محصولات از تولیدکننده به مکان عملیاتی مشتری. تدارکات در این زمینه می‌تواند به‌عنوان بخشی از فرایند زنجیره‌ی تامین باشد که جریان و انبارش محصولات، خدمات و اطلاعات را که بین نقطه مبدا و نقطه‌ای که نیازمندی‌های مشتری برآورده می‌شود، به‌صورت کارا و اثربخش، برنامه‌ریزی، پیاده‌سازی و کنترل می‌کند. در گذشته تاکید بر جنبه‌های فیزیکی جریان مواد و جابه‌جایی آن داشته است که در شکل ۱۵–۲ نشان داده شده است. علاوه‌بر این، طیف فعالیت‌های درشکل به حالت پس از وقوع رخداد می‌باشند، در حالی‌که در این کتاب فعالیت‌های مربوط به طراحی را که به توسعه زنجیره‌ی تامین وابسته است، شامل می‌شود. به‌عبارت دیگر، آن فعالیت‌هایی که در شکل ۱۵–۲ نشان داده شده است باید در ابتدا در فرایند طراحی و توسعه نمایش داده شده توسط بلوک ۲ در شکل ۱۵–۱ مورد بررسی قرار گیرند.

طی دهه‌ی گذشته، حوزه تدارکات کسب و کار (یعنی تدارکات در بخش تجاری) به‌شدت گسترش یافته است تا روش‌های تجارت الکترونیکی (EC) ، فناوری اطلاعات (IT)، تبادل اطلاعات الکترونیکی (EDI)، و کاربرد فرایندهای کسب و کار در فعالیت‌های نشان داده شده در شکل ۱۵–۲ را شامل شود. به‌علاوه، روندها به سمت برون‌سپاری بیش‌تر، رقابت بیش‌تر در سطح بین‌المللی و افزایش جهانی شدن می‌باشد که منجر به ایجاد یک نیاز برای اتحاد شرکای صنعتی/دولتی در سرتاسر دنیا شده است. این موضوع منجر به توسعه‌ی مفاهیم فعلی زنجیره‌ی تامین (SC) و مدیریت زنجیره‌ی تامین (SCM) شده است. زنجیره‌ی تامین به گروهی از سازمان‌ها و فعالیت‌هایی که به جریان کلی مواد و خدمات از منابع تامین‌کننده به مشتری نهایی مربوط می‌شود، اطلاق می‌گردد.



شکل ۱۵- ۱- توسعه سیستم، تولید/ساخت، عملیات، تدارکات، و فعالیت‌های پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات



تامین فیزیکی

- پیشبینی نیازمندی ها
- انتخاب تامین‌کننده
- تدارک/خرید
- مدیریت موجودی
- حمل و نقل
- جریان اطلاعات

تولید

- برنامه‌ریزی تولید
- تدارک/خرید
- جابه‌جایی مواد
- مدیریت موجودی
- بسته بندی/حمل و نقل
- جریان اطلاعات

توزیع فیزیکی

- پردازش مواد
- مدیریت موجودی
- حمل و نقل
- نصب محصول
- خدمات مشتری
- جریان اطلاعات

مدیریت زنجیره تامین

- فرایند های کسب و کار
- جریان مالی
- تکنولوژی اطلاعات

شکل ۱۵- ۲- فعالیت‌های تدارکات و زنجیره‌ی تامین.

در اواخر دهه‌ی ۹۰ میلادی، گروهی از محققان در MIT تعریف زیر را برای SCM ارائه دادند: *یک رویکرد ادغامی فرایندگرا برای تدارک، تولید و ارائه محصولات و خدمات نهایی به مشتری که شامل زیرتامین‌کننده‌ها، تامین‌کننده‌ها، عملیات داخلی، مشتریان تجاری و کاربر نهایی می‌شود.* SCM *مدیریت جریان مواد، اطلاعات و بودجه را پوشش می‌دهد.*

در سال ۲۰۰۱، گروهی از دانشگاهیان مطالعه‌ی گسترده‌ای در این زمینه انجام دادند و ۶ تعریف از SCM را که اختلاف کمی باهم داشتند، شناسایی و دسته‌بندی کردند و در مورد تعریف زیر به اجماع رسیدند: *هماهنگی سیستمی و راهبردی وظایف متعارف کسب و کار در یک شرکت مشخص و در سرتاسر کسب و کارهای داخل زنجیره‌ی تامین، با هدف بهبود بلند مدت عملکرد هر کدام از شرکت‌ها و زنجیره‌ی تامین به‌عنوان یک کل.*

SCM به مدیریت زنجیره‌ی تامین، یا گروهی از زنجیره‌های تامین با هدف فراهم کردن خدمات موردنیاز مشتری، به‌صورت اثربخش و کارا مربوط می‌شود. SCM نیازمند یک رویکرد کاملا ادغام شده، به‌کارگیری منابع مناسب (به‌طورمثال حمل و نقل، انبار، کنترل موجودی و اطلاعات) و پیاده‌سازی فرایندهای کسب و کار لازم برای حصول اطمینان از رضایت مشتری است. انجمن خبرگان مدیریت زنجیره‌ی تامین (CSCMP) این تعریف را در آن زمان ارائه کرد.

علاوه بر جریان رو به جلو (رو به خارج) فعالیت‌ها در شکل ۱۵–۱، یک جریان معکوس (رو به عقب) نیز وجود دارد که پشتیبانی و نگه‌داری سیستم پس از نصب و عملیاتی شدن در محیط مشتری (کاربر) را پوشش می‌دهد. با مراجعه به شکل، این موضوع شامل همه فعالیت‌های مربوط به اجرای نگه‌داری و تعمیرات سازمانی (بلوک ۷)، نگه‌داری و تعمیرات در سطح میانی (بلوک ۸)، نگه‌داری و تعمیرات در سطح کارخانه و/یا مبدا (بلوک ۴ و ۶)، نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده (بلوک ۶)، و تامین مجدد مواد لازم برای پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات در همه سطوح (بلوک‌های ۳ تا ۵) می‌شود؛ برای مثال، قطعات یدکی/تعمیری و موجودی مربوطه، آزمایش و

پشتیبانی تجهیزات، کارکنان، تسهیلات، اطلاعات/داده‌ها و غیره. این وجه از فعالیت به‌عنوان بخشی از زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات توسط جریان عملیات و نگه‌داری و تعمیرات در شکل ۳-۱۴ منعکس شد.

با مراجعه به شکل ۳-۱۴، فعالیت‌های نشان داده شده شامل آن‌هایی می‌شوند که در طیف پشتیبانی ادغامی تدارکات (ILS) هستند که در بخش دفاع در میانه دهه‌ی ۶۰ میلادی توسعه یافته است. اصول و مفاهیم ILS در دهه‌های ۷۰، ۸۰، و ۹۰ میلادی بیش‌تر توسعه یافت و ILS به‌صورت روبرو تعریف شده است: *یک رویکرد عملی، یکپارچه و تکرار شونده برای فعالیت‌های فنی و مدیریتی لازم برای (۱) ادغام ملاحظات پشتیبانی در طراحی سیستم و تجهیزات؛ (۲) توسعه نیازمندی‌های پشتیبانی که مربوط به یکپارچگی اهداف می‌شود؛ (۳) دست‌یابی به پشتیبانی موردنیاز؛ و (۴) فراهم کردن پشتیبانی لازم طی فاز عملیات با کم‌ترین هزینه.*

اهداف در اعمال و پیاده‌سازی ILS عبارت‌اند از (۱) بررسی تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات از نقطه‌نظر کلی سیستم‌ها؛ (۲) نگاه به نیازمندی‌های مرتبط در کل چرخه‌ی عمر سیستم؛ و (۳) بررسی این نیازمندی‌های چرخه‌ی عمر سیستم در ابتدای فرایند طراحی و توسعه سیستم. پیاده‌سازی ILS شامل فعالیت‌های تدارکات کسب و کار (شکل ۱۵-۲) و فعالیت‌های پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات در چرخه‌ی عمر سیستم (شکل ۳-۱۴ و ۱۵-۱) می‌شود.

اخیرا، تاکید بیش‌تری بر تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات در فرایند طراحی و توسعه سیستم از طریق معرفی مفهوم *اکتساب تدارکات* می‌شود، یعنی *یک علم مدیریت فنی چند وظیفه‌ای که همراه است با طراحی، توسعه، آزمایش، تولید، پایداری و اصلاحات بهبودی سیستم‌های هزینه-اثربخش که به نیازمندی‌های کاربر در زمان صلح و جنگ دست پیدا می‌کند. اهداف بنیادین اکتساب تدارکات برای حصول اطمینان از آن است که ملاحظات پشتیبانی بخشی از نیازمندی‌های طراحی سیستم باشد، سیستم به‌صورت هزینه-اثربخش در چرخه‌ی عمر*

پشتیبانی شود، و عناصر لازم زیرساختار برای پشتیبانی عملیات سیستم شناسایی و توسعه داده شده و کسب شود.

تاکید بر بررسی تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات در فرایند طراحی بر پایه‌ی این حقیقت است که بخش عمده‌ای از هزینه چرخه‌ی عمر (LCC) می‌تواند به‌طورمستقیم به عملیات و پشتیبانی سیستم در میدان بوده و بیش‌تر این هزینه بر پایه طراحی و تصمیم‌های گرفته شده در مراحل اولیه‌ی توسعه سیستم خواهد بود. به‌عبارت دیگر، تصمیم‌های اولیه‌ی طراحی می‌توانند اثر بزرگی بر هزینه‌ی فعالیت‌های مربوط به عملیات و نگه‌داری سیستم داشته باشند. بنابراین، ضروری است که تدارکات و طراحی برای قابلیت پشتیبانی از ابتدا مورد بررسی قرار گیرد.

برای تاکید بیش‌تر بر این نیازمندی، وزارت دفاع ایالات متحده اخیرا مفهوم عملکرد بر پایه تدارکات (PBL) را معرفی کرده است. هدف تاکید بر اهمیت و نیاز به در نظر گرفتن زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات در طراحی (شکل ۳-۱۴ و ۱۵-۱) با استفاده از شاخص‌ها (یا متریک‌ها) و شامل شدن این نیازمندی‌های عملکردی کمی در طراحی همراه با مشخصات فنی مناسب است. چنین نیازمندی‌هایی می‌توانند در طیف نیازمندی‌های سطح سیستم (به‌طورمثال دسترسی‌پذیری عملیاتی (A_o)، اثربخشی سیستم و هزینه چرخه‌ی عمر) و/یا یک عنصر خاص از زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات (مانند اثربخشی کارکنان، اهداف کمی برای زمان‌ها و هزینه حمل و نقل، اثربخشی پشتیبانی تامین، بهره‌برداری و بازدهی تسهیلات، دسترسی و زمان پردازش اطلاعات و قابلیت اطمینان تجهیزات آزمایش) قرار داشته باشند. این فاکتورهای مربوط به پشتیبانی و تدارکات باید با فاکتورهای عملکردی سیستم سطح بالا ادغام شود، زیرا آن‌ها به ماموریت کلی سیستم مربوط هستند (به فرایند شناسایی و توسعه TPM که در قسمت ۳-۶ تشریح شد مراجعه کنید).

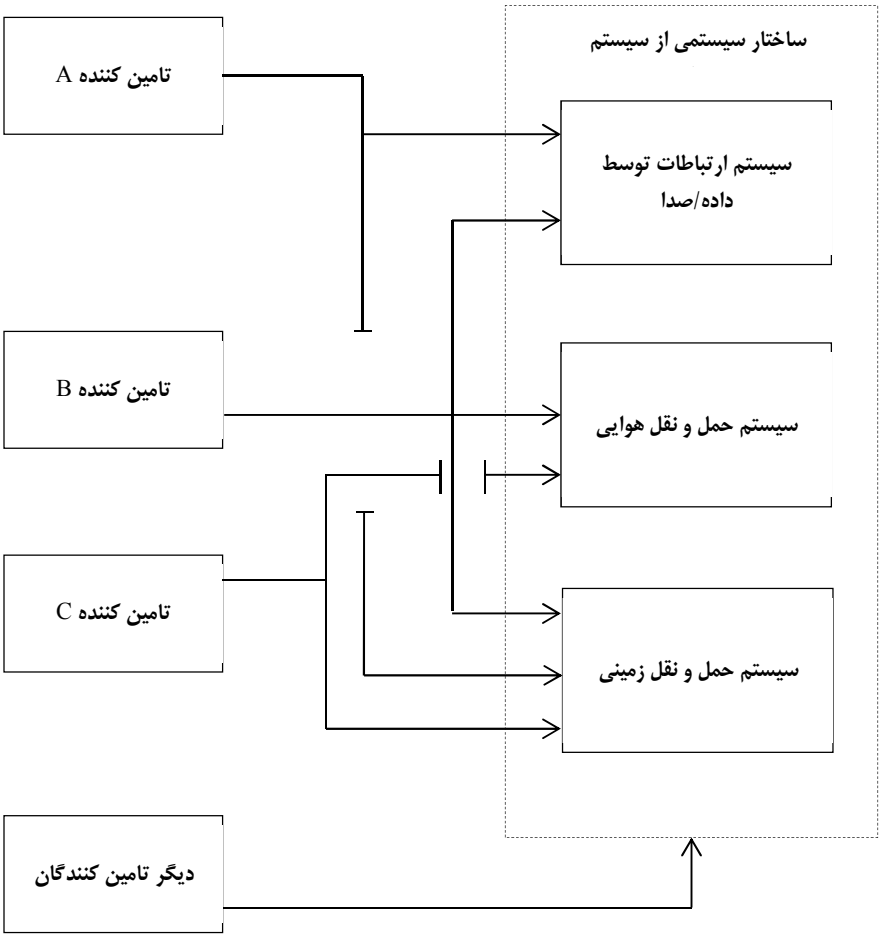
در پوشش زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات، فرد باید کل طیف فعالیت‌ها شامل رویکردهای تجاری و دفاعی (شکل‌های ۱۵–۱ و ۱۵–۲) را بر پایه چرخه‌ی عمر ادغامی در نظر بگیرد. تعاملات بین فعالیت‌های مختلف بسیار زیاد است، و پیشنهاد می‌شود که فرد درک درستی از جریان فعالیت‌ها از درک سیستم تا بهره‌برداری و برعکس داشته باشد. به‌علاوه، فرد باید این زیرساختار کلی را به‌عنوان عنصری از سیستم مدنظر قرار داده و این نیاز باید به‌عنوان بخشی تکمیلی از فرایند طراحی از ابتدا اجرا شود. به‌عنوان یک بخش ذاتی از فرایند مهندسی سیستم، فرد باید هم فرایندهای جریان داخلی در هر بلوک و هم جریان‌های خارجی بین بلوک‌ها را توسعه دهد تا اطمینان حاصل کند که نتایج نهایی منجر به اثر بخشی و کارایی قابلیت تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات می‌شود. هدف این فصل، بحث درباره‌ی همه‌ی این فعالیت‌ها در طیفی جامع از قابلیت پشتیبانی همراه با طراحی برای قابلیت پشتیبانی به‌عنوان یک هدف است. به‌عبارت دیگر، بررسی موضوع قابلیت پشتیبانی در فرایند مهندسی سیستم‌ها که در بخش دوم این کتاب تشریح شد، حیاتی است.

۱۵–۲– تدارکات در محیط سیستمی از سیستم‌ها (SOS)

هنگامی که یک سیستم جدید در شبکه SOS، مشابه آن‌چه در شکل ۳–۱۳ نشان داده شد، طراحی می‌شود، فرد باید اطمینان حاصل کند که (۱) زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات برای این سیستم جدید اثربخش و کارا باشد و کاملا پاسخ‌گوی نیازمندی‌های سیستم جدید باشد؛ و (۲) زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات توسعه داده شده انطباق داشته و با قابلیت‌های معادل دیگر سیستم‌ها در ساختار SOS مغایرت نداشته باشد. در این عصر که برون‌سپاری جهانی افزایش یافته است، ممکن است تامین‌کنندگان مختلفی وجود داشته باشند که از ملیت‌های مختلف باشند و بیش از یک سیستم را در یک شبکه مشخص پشتیبانی کنند. با مراجعه به شکل ۱۵–۱، زنجیره‌ی تامین پایه‌ای توسط بلوک‌های ۳ تا ۵ و ۷ نشان داده شده است

که در آن یک تامین‌کننده (به‌عنوان عنصر الزامی در زنجیره‌ی تامین) می‌تواند به‌طورمستقیم بیش‌تر از یک سیستم را پشتیبانی کند؛ برای مثال تامین‌کننده B به‌عنوان یک عنصر حیاتی زنجیره‌ی تامین برای هر سه سیستم در شکل خدمت‌دهی می‌کند.

با مراجعه به شکل، سیستم‌های تحت پشتیبانی (یعنی سیستم‌های ارتباطات و حمل و نقل هوایی و زمینی) می‌توانند مجموعه کاملا متفاوتی از نیازمندی‌های پشتیبانی تدارکات و سیستم داشته باشد و تامین‌کنندگانی که پشتیبان آن‌ها هستند، می‌توانند ملیت‌های مختلف با زبان، فرهنگ، و قابلیت‌های یکتای متفاوت باشند. محطی کاری (نیازمندی‌های نیروی کار، تعطیلات محلی و ملی، اخلاق کاری و غیره) در یک سازمان تامین‌کننده می‌تواند کاملا با دیگری متفاوت باشد. مواردی وجود دارد که در آن‌ها چنین تغییراتی منجر به تاخیرهای زیاد تدارکاتی، فراهم نشدن پشتیبانی به‌موقع هنگام نیاز و عدم کارایی در پاسخ‌گویی تدارکاتی شود. این موضوع به‌نوبه‌ی خود منجر به کاهش دسترسی‌پذیری عملیاتی و اثربخشی سیستم تحت پشتیبانی می‌شود. بنابراین، ضروری است که واسطه‌های متعدد در یک ساختار SOS، و نیازمندی‌های قابلیت تعامل سیستم، در ابتدای فرایند طراحی هنگامی که سیستم‌های جدید معرفی می‌شود، باید مورد بررسی قرار گیرند.



شکل ۱۵- ۳- روابط تامین‌کننده درساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS).

۱۵-۳- عناصر تدارکات و پشتیبانی سیستم

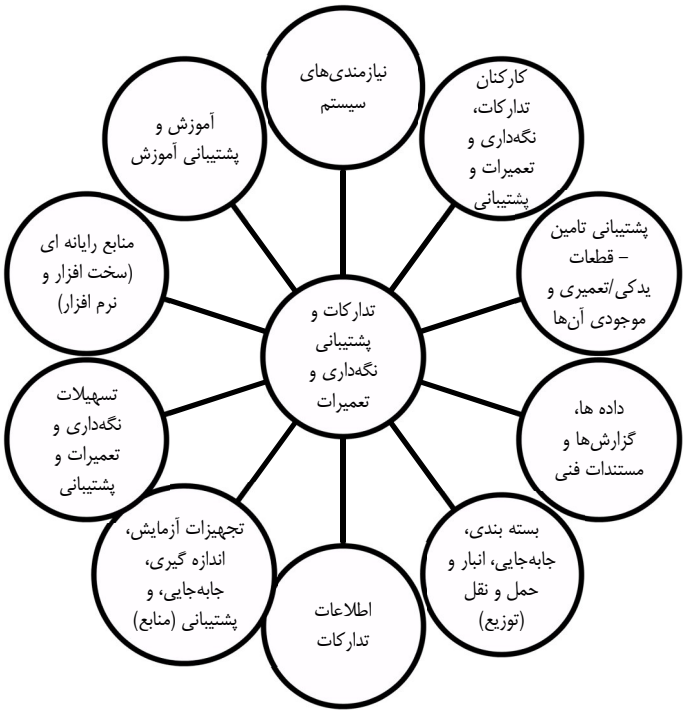
با مراجعه به جریان‌های روبه جلو و معکوس در شکل ۱۵-۱، مشاهده می‌شود که نیازمندی‌های منابع برای تدارکات سیستم و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات عبارت‌اند از کارکنان، حمل و نقل (زمینی، دریایی، و/یا هوایی)، قطعات یدکی/تعمیری و موجودی مربوطه، تجهیزات

آزمایش و پشتیبانی (نگه‌داری و تعمیرات، انبار)، اطلاعات/داده‌ها (مستندسازی)، نرم‌افزار رایانه‌ای، وترکیبات متنوع آن‌ها. در برنامه‌ریزی، طراحی و پیاده‌سازی اولیه زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات، لازم است اطمینان حاصل شود که این نیازمندی‌ها به‌طور کامل ادغام می‌شود (شکل ۱۵–۴) زیرا روابط میان این عناصر مختلف بسیار متعدد است. تشریح مختصری از فعالیت برنامه‌ریزی ضروری و هر کدام از عناصر در قسمت‌های بعدی ارائه شده است.

برنامه‌ریزی تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات. در دایره داخلی شکل ۱۵–۴، شامل فعالیت‌های تکرار شونده برنامه‌ریزی، سازماندهی و مدیریت می‌شود که برای حصول اطمینان از آن‌که نیازمندی‌های تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات برای هر سیستم مشخص از ابتدا به‌درستی تنظیم و پیاده‌سازی شده است لازم است. برنامه‌ریزی اولیه (طی فاز طراحی مفهومی) منجر به استقرار نیازمندی‌های پشتیبانی برای فعالیت‌های نشان داده شده در شکل ۱۵–۱ می‌شود (که در شکل ۱۳–۴ و ۱۵–۲ تعمیم داده شده است). این موارد عبارت‌اند از نیازمندی‌های *طراحی برای قابلیت پشتیبانی* (به‌عنوان ورودی فرایند طراحی سیستم) که نیازمندی‌های کلی سطح سیستم در برنامه مدیریت مهندسی سیستم (SEMP) تکمیل می‌کنند. با تکامل فرایند طراحی و توسعه سیستم (طی فازهای طراحی اولیه سیستم و طراحی و توسعه تفصیلی)، فعالیت برنامه‌ریزی منجر به توسعه یک برنامه نگه‌داری و تعمیرات تفصیلی می‌شود که نیازمندی‌های پایداری پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات سیستم سطحی چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده را پوشش می‌دهد.

تدارکات، نگه‌داری و تعمیرات، و کارکنان پشتیبانی. کارکنان موردنیاز برای انجام فعالیت‌های تدارکات و نگه‌داری و تعمیرات سیستم در این دسته قرار می‌گیرند. چنین فعالیت‌هایی مواردی را پوشش می‌دهند که عبارت‌اند از تدارکات و تهیه آیتم‌ها برای پشتیبانی سیستم، تدارکات مربوط به تولید و وظایف چرخه‌ی عمر که در شکل ۱۵–۲ نشان داده شده است، نصب و بررسی اولیه سیستم و عناصر آن در محیط عملیاتی کاربر، خدمات به مشتری و پشتیبانی موقت پیمانکار

تدارکات (CLS) طی مراحل اولیه عملیات سیستم، پایداری پشتیبانی سیستم در دوره‌ی برنامه‌ریزی شده بهره‌برداری، و آن فعالیت‌های موردنیاز برای از کاراندازی و بازیافت/امحای مواد در صورت نیاز. با مراجعه به شکل ۳-۱۶، کارکنان در همه سطوح نگه‌داری و تعمیرات در بر گرفته می‌شود. در ارزیابی یک سیستم مشخص (در ساختار SOS)، مهم است که تنها آن‌هایی مدنظر قرار گیرد که بتوانند با تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات آن سیستم در ارتباط باشند.



شکل ۱۵- ۴ عناصر اصلی تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات.

آموزش و پشتیبانی آموزش. همه کارکنان، مواد و تجهیزات، تسهیلات، داده‌ها، مستندسازی و منابع مربوط لازم برای آموزش کارکنان عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات، شامل آموزش‌های اولیه و جایگزینی، شامل این مورد می‌شود. تجهیزات آموزش (به‌طورمثال شبیه‌سازها، مدل‌های آزمایشگاهی، وسایل و صفحه نمایش‌های مخصوص)، دستورالعمل‌های آموزشی و منابع رایانه‌ای

(نرم‌افزار) در صورت لزوم برای پشیبانی آموزشی روزانه، آموزش از راه دور، کلاس‌های آموزشی و ترکیبی از آن‌ها توسعه داده شده و استفاده می‌شود.

پشتیبانی تامین: قطعات یدکی/تعمیری و موجودی مربوطه. این دسته عبارتست از همه قطعات یدکی (واحدها، مونتاژها و ماژول‌های قابل تعمیر)، قطعات تعمیری (اجزای غیرقابل تعمیر)، ماژول‌های نرم‌افزاری و موجودی‌های تکمیلی لازم برای پایداری عناصر مربوط به ماموریت اصلی سیستم و عناصر مختلف تدارکات و زیرساختار پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات در فاز بهره‌برداری عملیاتی و در صورت نیاز در فاز از کاراندازی و بازیافت/امحای مواد.

منابع رایانه‌ای: سخت افزار و نرم‌افزار. عبارتست از همه رایانه‌ها، نرم‌افزارهای مربوطه، اجزای اتصالی، شبکه‌ها، تسهیلات خاص و واسطه‌های لازم برای پشتیبانی جریان روزانه اطلاعات برای همه وظایف تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات طی چرخه‌ی عمر سیستم.

داده‌ها، گزارش‌ها و مستندات فنی. داده‌های فنی می‌تواند شامل رویه‌های نصب و بررسی، دستورالعمل‌های عملیات و نگه‌داری و تعمیرات، داده‌های تسهیلات، دستورالعمل‌های اصلاح سیستم، داده‌های طراحی مهندسی (مشخصات فنی، نقشه‌ها، فهرست مواد و قطعات، داده‌های CAD/CAM/CAS، و اطلاعات رایانه‌ای خاص)، داده‌های تهیه و تدارک، داده‌های تامین‌کننده، گزارش‌های رهگیری اجزای خاص، داده‌های عملیات و نگه‌داری و تعمیرات، و پایگاه‌های داده پشتیبانی. موارد موجود در این دسته عبارت‌اند از فرایند پیوسته و تکرار شونده جمع‌آوری، تحلیل و گزارش‌دهی داده در چرخه‌ی عمر سیستم (یعنی قابلیت جمع‌آوری و تحلیل داده‌های نگه‌داری و تعمیرات).

این تکالیف اکتساب داده‌های می‌توانند توسط معرفی و استفاده از فناوری‌های اطلاعات خودکار (AIT)، شناسایی فرکانس رادیوی غیرفعال (RFID)، روش‌های بارکد و فناوری GPS

تسهیل شوند. کاربرد RFID هم در بخش تجاری و هم حوزه دفاع باید تاثیر زیادی در ارتقای فرایندهای تدارکات و پشتیبانی داشته باشد که در این فصل تشریح شد.

تسهیلات پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات. این دسته همه‌ی تسهیلات ویژه‌ای را شامل می‌شوند که برای فعالیت‌های تدارکات و پشتیبانی در همه سطوح نیاز است (به شکل ۳-۱۴ و ۱۵-۲ مراجعه کنید). این دسته شامل کارخانه (به‌صورت فیزیکی)، ساختمان‌ها کانتینرهای قابل جابه‌جایی، کارگاه‌های نگه‌داری و تعمیرات، ساختمان‌های انبار، سازه‌های اسکان کارکنان، آزمایشگاه‌های کالیبره کردن و کارگاه‌های تعمیر ویژه می‌شوند. تجهیزات و تسهیلات سرمایه‌ای (گرما، برق، انرژی، کنترل‌های محیطی، ارتباطات، ایمنی و امنیت و غیره) عموما بخشی از این تسهیلات هستند.

بسته‌بندی، جابه‌جایی، انبار و حمل و نقل (توزیع).این دسته شامل همه مواد، تجهیزات، تدارکات خاص، کانتینرها و منابع موردنیاز برای پشتیبانی بسته‌بندی، ایمنی، امنیت، انبار، جابه‌جایی و/یا حمل و نقل عناصر مربوط به ماموریت اصلی سیستم و عناصر مختلف زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات در چرخه‌ی عمر سیستم می‌شوند. با مراجعه به شکل ۱۵-۱، همه‌ی وظایف حمل و نقل و جابه‌جایی توسط خطوط (روبه جلو و معکوس) بین بلوک‌ها نشان داده شده است. نیازمندی‌های مربوط به مدهای اصلی حمل و نقل (هوایی، جاده‌ای، خط آهن، مسیر آبی و از طریق لوله) باید مورد بررسی قرار گیرند.

تجهیزات آزمایش، جابه‌جایی و پشتیبانی. عبارتست از همه‌ی ابزارها، تجهیزات پایش وضعیت، تجهیزات بازرسی و کشف عیب، تجهیزات آزمایش ویژه، تجهیزات کالیبره کردن، گیره‌ها و جایگاه‌های نگه‌داری و تعمیرات و تجهیزات جابه‌جایی ویژه که برای پشتیبانی وظایف عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات طی چرخه‌ی عمر سیستم لازم است. این قسمت شامل تجهیزات آزمایش و پشتیبانی درهر سطح نگه‌داری و تعمیرات (شکل ۳-۱۴) و همه تجهیزات لازم برای پشتیبانی

تجهیزات نگه‌داری و تعمیرات و کالیبره کردن (یعنی استانداردهای فرعی موردنیاز، استانداردهای انتقال و عناصر لازم برای حصول اطمینان از برآورده شدن نیازمندی‌های قابلیت رهگیری) می‌شود.

اطلاعات تدارکات. این آیتم به منابع لازم برای حصول اطمینان از جریان اثربخش و کارایی اطلاعات تدارکات و نگه‌داری و تعمیرات طی چرخه‌ی عمر و همه سازمان‌های مسئول برای همه وظایف و فعالیت‌های منعکس شده در شکل ۱۵–۱ اطلاق می‌شود. این جریان عبارتست از ارتباطات لازم بین مشتری، تولیدکننده (پیمانکار اصلی)، پیمانکاران فرعی، تامین‌کنندگان و سازمان‌های پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات. همه فعالیت‌های زنجیره‌ی تامین و زیرساختارهای پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات باید همیشه در حلقه ارتباطی قرار داشته باشند. الزامی است که نوع و مقدار اطلاعات مناسبی با سازماندهی مطلوب عناصر، قالب مناسب، و به روشی قابل اتکا و به‌موقع همراه با امنیت لازم فراهم شود. یک جنبه‌ی مهم از این دسته استفاده از آخرین روش‌های تجارت الکترونیک (EC)، قابلیت‌های تبادل داده‌های الکترونیکی (EDI)، پست الکترونیکی و اینترنت است.

هدف فراهم کردن تعادل درست منابع استفاده شده در زیرساختار پشتیبانی سیستم است که درشکل‌های ۳–۱۴ و ۱۵–۲ نشان داده شده است. یک رویکرد هزینه– اثربخش باید به‌دست آید که این کار نیازمند ترکیب مناسبی از بهترین ابزارهای تجاری همراه با آیتم‌های توسعه‌ای جدید (در صورت نیاز و توجیه) می‌باشد. با معرفی فناوری‌های جدید و بهبود فرایندهای کنونی، نیازمندی‌های منابع در هرسطح تا حدی تغییر می‌کند. برای مثال، نیاز برای موجودی بالای قطعات یدکی/تعمیری با کاهش زمان و هزینه حمل و نقل از بین خواهد رفت. علاوه‌بر این، کاربرد بیش‌تر فناوری‌های فعال و غیرفعال RFID از طریق قابلیت حسابرسی و قابلیت‌های ارتقا یافته انجام فرایندها، باید منجر به کاهش موجودی‌های قطعات یدکی/تعمیری شود. نیاز به

بسته‌های بزرگ اطلاعات (مانند نقشه‌ها و کتابچه‌های راهنمای فنی) در محل نگه‌داری و تعمیرات با استفاده از قالب و فرایندهای جدید EDI کاهش می‌یابد. توسعه سیستم‌های اطلاعات رایانه‌ای اطلاعات دقیق‌تر و سریع‌تری فراهم کرده و دید بهتری در مورد مکان و نوع دارایی‌های مختلف در هر نقطه زمانی را به‌دست می‌دهد. فرایندهای تصمیم‌گیری و ارتباطات می‌توانند در نتیجه‌ی استفاده از این ابزارها بهبود یابند. مطالعات موازی متعدی می‌توانند انجام شوند که شامل ترکیب‌های مختلفی از عناصر شناسایی شده در این‌جا باشند و این کار منجر به اثربخشی و کارایی طراحی و توسعه‌ی زیرساختار پشتیبانی می‌شوند.

۱۵-۴- شاخص‌های تدارکات و قابلیت پشتیبانی

در مورد شاخص‌های اثربخشی کلی سیستم و درجه‌ای از توانایی سیستم در انجام ماموریتش، شاخص‌هایی وجود دارند که مربوط به زیرساختار پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات (به‌عنوان یک عنصر اصلی سیستم) و دسترسی‌پذیری آن می‌شوند. بنابراین، بررسی این شاخص‌های تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات بر فرایند طراحی سیستم و نتایج نهایی اهمیت زیادی دارد.

فصول ۱۲ تا ۱۴ اصول و مفاهیم مربوط به قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات و فاکتورهای انسانی و برخی از شاخص‌های هرکدام، با تاکید بر اهمیت چنین مفاهیمی در طراحی نهایی یک سیستم را معرفی کردند. هدف در این قسمت، ادامه‌ی تعریف برخی شاخص‌های سیستم با تمرکز بر آن‌هایی است که به‌طورمستقیم مربوط به عناصر مختلف تدارکات (که در شکل ۱۵-۴ شناسایی شده است) می‌باشند.

۱۵-۴-۱- فاکتورهای زنجیره‌ی تامین

همان‌طور که در قسمت ۱۵-۱ تشریح شد، زنجیره‌ی تامین عبارتست از آن وظایفی که مربوط به فعالیت‌های جریان رو به جلو در شکل ۱۵-۱ که همراه با اکتساب اولیه (تدارک)

آیتم‌های منابع مختلف تامین، جریان مواد در فرایند تولید، حمل و نقل و توزیع محصولات از تولیدکننده به مشتری (کاربر)، پایداری خدمات درمحل مشتری و همه فرایندهای مربوط به کسب و کار که برای حصول اطمینان از اثربخشی و کارایی جریان کلی موردنیاز هستند. یک نمایش ساده شده از این جریان در شکل ۱۵–۵ نشان داده شده است (که تعمیمی از شکل ۱۵–۱ است). این شکل مسیرهای مختلفی را نشان می‌دهد که بسته به نیازمندی‌ها می‌تواند استفاده شود؛ یعنی، انتقال مواد به‌طورمستقیم از تامین‌کننده به تولیدکننده، از تامین‌کننده به مشتری، از تولیدکننده به مشتری و غیره. علاوه بر این، جریان معکوس مواد برگشتنی و نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات را نشان می‌دهد.

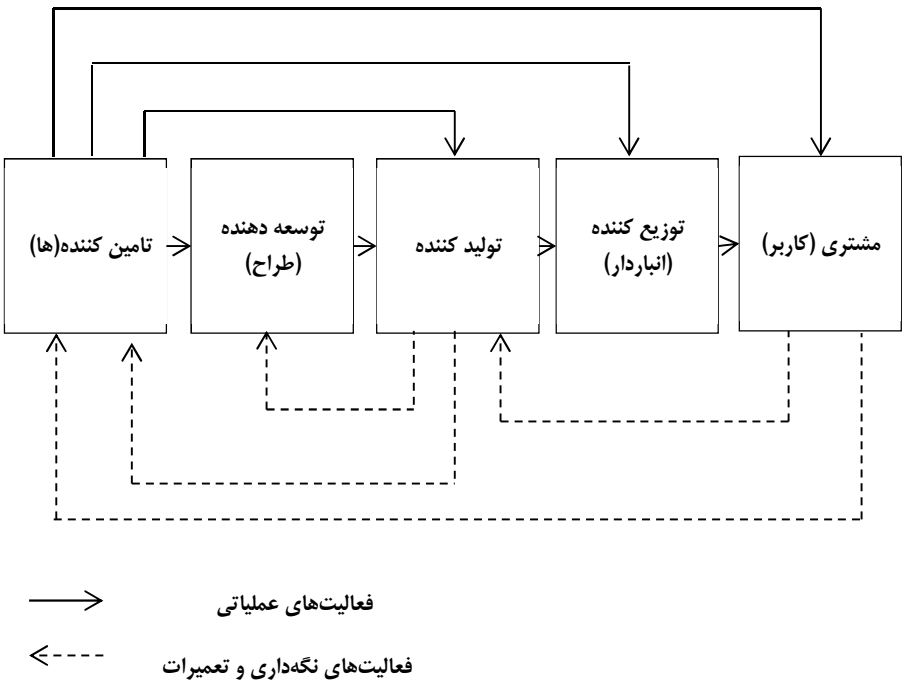
با توجه به شاخص‌های زنجیره‌ی تامین، بار دیگر دو جنبه از تعادل باید مدنظر قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۱۳–۹ نشان داده شده است، فاکتورهای فنی و اقتصادی اعمال می‌شوند. در سطح بالا، برای مثال، شاخص فنی اثربخشی را می‌تواند به‌صورت عبارات زیر یا حاصل‌ضرب آن‌ها بیان کرد:

۱. ***قابلیت***، یا توانایی انجام همه وظایف موردنیاز (به‌طورمثال خرید، جابه‌جایی مواد، حمل و نقل، انبار، و نگه‌داری و تعمیرات). این موضوع اساسا یک شاخص عملکردی از جریان کلی در شکل ۱۵–۵ است.

۲. ***دسترسی‌پذیری***، یا توانایی پاسخ به همه نیازمندی‌ها در هر نقطه زمانی که نیاز باشد. این موضوع به قابلیت اطمینان جریان شکل ۱۵–۵ بستگی داشته و می‌تواند در قالب *دسترسی‌پذیری عملیاتی* (A_o) نیز نمایش داده شود.

۳. ***کیفیت***، یا پاسخ‌دهی فرایند در قالب اهداف بیان شده مشتری (مانند عملکرد درست وظیفه، در محل درست، در زمان درست، با اطلاعات درست و با مقدار درست). این

عبارت می‌تواند به نرخ کیفیت (Q) مربوط شود که به‌عنوان یک شاخص در تعیین OEE برای قابلیت تولید استفاده می‌شود (به معادله ۱۳–۲۴ مراجعه کنید). برخی انتظارات وجود دارند که نیاز به درک رضایت‌مندی مشتری داشته و هر انحرافی در این‌جا یک خرابی در زیر سیستم را تشکیل می‌دهد.



شکل ۱۵– ۵– جریان فعالیت تدارکات (مواد، اطلاعات و پول).

برای تکمیل یک تعادل مناسب، فرد نیاز دارد با موضوع هزینه، مخصوصا LCC مربوط به زیرساختار نمایش داده شده در شکل ۱۵–۵ و آثار آن بر LCC کل سیستم مواجه شود. هزینه کل زیرساختار را می‌توان به‌صورت معادله ۱۵–۱ نشان داد:

هزینه + هزینه ایجاد عناصر تدارکات + =هزینه توسعه تدارکات(TLC)کل هزینه تدارکات
هزینه نگه‌داری و پشتیبانی + عملیات تدارکات

+ هزینه پردازش مواد (حمل و نقل مواد) + هزینه اکتساب مواد (خرید)= هزینه عملیات تدارکات
هزینه خدمات به مشتری + هزینه توزیع (حمل و نقل)

(۱-۱۵)

عبارت کیفیت به‌صورت جامع‌تری در این‌جا استفاده شده، در سطحی بالاتر اعمال شده و می‌تواند به درجه‌ای مربوط شود که می‌تواند نیازمندی‌های سیستم را به‌طور کامل برآورده کند. موضوعات حساس نه تنها شامل عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم بلکه شامل پاسخ‌دهی زیرساختار تدارکات و نگه‌داری و تعمیرت در برآورده کردن این نیازها می‌شود. برای مثال، مناسب است که برخی از اهداف طراحی خاص مانند موارد زیر استقرار یابند:

۱. زمان پاسخ (یعنی زمان واکنش پاسخ‌دهی به یک نیاز شناسایی شده) برای زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری وتعمیرات نباید بیش‌تر از ۴ ساعت باشد.

۲. کل زمان پردازش، از شناسایی یک نیاز برای یک محصول (خدمات) تا تحویل محصول به نقطه مصرف (یا تکمیل خدمت) نباید از ۲۴ ساعت تجاوز کند.

۳. کل هزینه پردازش یک آیتم در طی زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات (یعنی بسته‌بندی، حمل و نقل، جابه‌جایی و مستند سازی) نباید از x دلار در هر فعالیت تجاوز کند.

۴. زمان پردازش برای حذف یک آیتم منسوخ شده از موجودی نباید بیش‌تر از ۱۲ ساعت طول کشیده و هزینه هر آیتم پردازش شده نباید از x دلار تجاوز کند. نرخ خرابی در

قالب محصول تحویل داده شده (سرویس ارائه شده) نباید بیش از ۱٪ در بازه‌ی زمانی تعیین شده باشد.

با استقرار برخی اهداف مشخص طراحی، همراه با اهداف استقرار یافته قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (به فصول ۱۲ و ۱۳ مراجعه کنید) و با فراهم کردن الگوهایی برای اندازه‌گیری پاسخ به نیاز مشتری، فرد می‌تواند سیستم را در قالب برآورده شدن این اهداف اندازه‌گیری و ارزیابی کند. هر انحراف از الگوهای استقرار یافته باید به‌عنوان خطا دسته‌بندی شود.

۱۵-۴-۲- فاکتورهای خرید و جریان مواد

از منظر کلی زنجیره‌ی تامین، فعالیت‌های متنوع و گوناگونی وجود دارد که برای برآورده شدن موفق اهداف تدارکات حیاتی هستند. برخی از این موارد فاکتورهای هستند که مربوط به خرید و جریان مواد متعاقب آن طی تولید و مونتاژ محصولات می باشند (به بلوک ۳ و ۴ شکل ۱۵-۱ مراجعه کنید). در حوزه‌ی خرید، تعدادی شاخص مانند زیر وجود دارد:

۱. زمانی موردنیاز برای شروع و پردازش سفارش خرید.

۲. تعداد سفارش‌های خرید پردازش شده در یک دوره‌ی زمانی معین.

۳. کیفیت فرایند خرید.

استانداردهای زیر در مورد موضوع کیفیت قابل اعمال هستند:

۱. تحویل کامل – همه آیتم‌های تحویل شده به تعداد درخواست شده است.

۲. تحویل به‌موقع – استفاده از تعریف مشتری از تحویل به‌موقع.

۳. مستند سازی دقیق و کامل برای پشتیبانی سفارش.

۴. تحویل در شرایط عالی و با پیکربندی صحیح برای استفاده مشتری و نصب بدون خطا (در صورت امکان).

در مورد جریان مواد طی فرایند تولید و مونتاژ محصول، چنین شاخص‌هایی را می‌توان به‌صورت زیر تعیین کرد:

۱. تعداد مواد پردازش شده در کارخانه در یک زمان معین.

۲. زمان موردنیاز برای پردازش مواد.

۳. تعداد مواد پردازش شده.

۴. هزینه مواد پردازش شده.

درحوزه‌ی کیفیت تاکید بر پردازش به‌موقع مواد، در محل مطلوب، همراه با اطلاعات/داده‌های پشتیبانی لازم، و به شکل مناسب (یعنی در وضعیت بدون نقص بدون ایجاد آسیب) است.

۱۵-۴-۳- فاکتورهای حمل و نقل و بسته‌بندی

عنصر حمل و نقل، یک فعالیت اصلی را در ساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات تشکیل می‌دهد. اول این‌که، این عنصر یک عنصر کلیدی در زنجیره‌ی تامین و بخش تدارکات تجاری است (به جریان فعالیت بین بلوک‌ها در شکل ۱۵-۱ مراجعه کنید)؛ دوم این‌که، این عنصر یک عنصر کلیدی در پایداری فعالیت پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات در فاز بهره‌برداری از سیستم است (به شکل۱۳-۴ مراجعه کنید)؛ و سوم این‌که، برای فاز از کاراندازی سیستم و بازیافت/امحای مواد ضروری است.

نیازمندی‌های حمل و نقل عبارت‌اند از جابه‌جایی منابع انسانی و مواد، برای پشتیبانی فعالیت‌های عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات، از یک نقطه به نقطه دیگر. در ارزیابی اثربخشی حمل و نقل، فرد با فاکتورهای زیر سر و کار دارد:

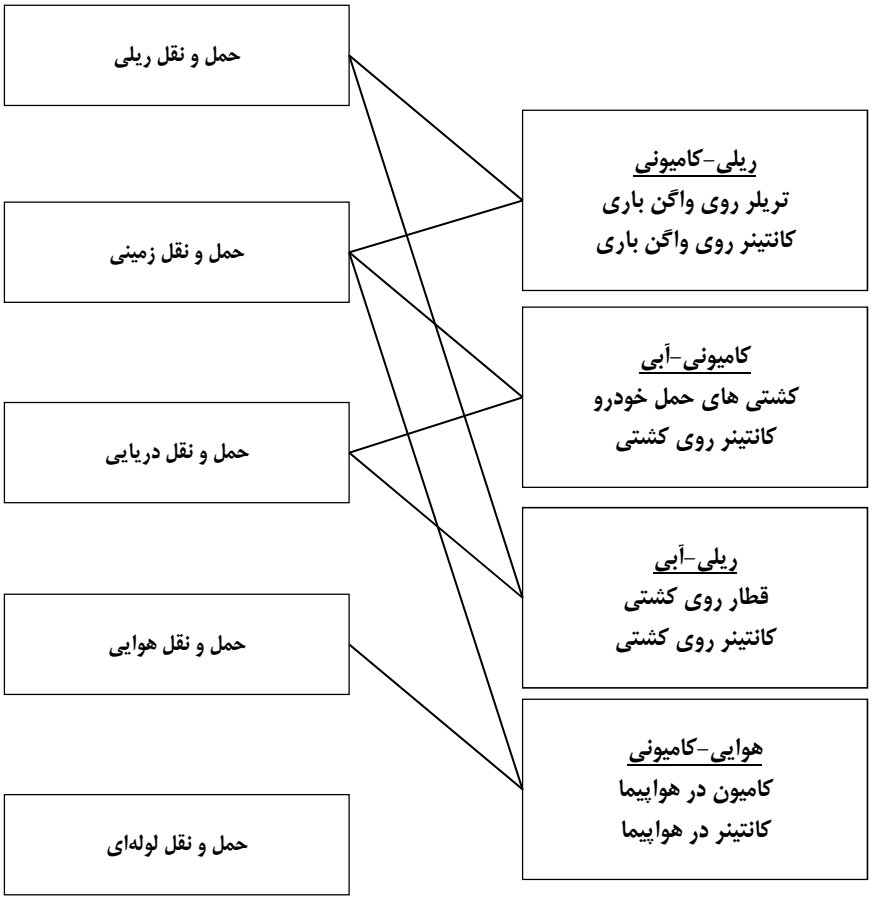
۱. مسیر حمل و نقل، داخلی و بین‌المللی (مسافت‌ها، تعداد ملیت‌ها، نیازمندی‌های سفارشی شده، فاکتورهای سیاسی و اجتماعی و غیره).

۲. قابلیت یا ظرفیت حمل و نقل (حجم کالاهای حمل شده، تعداد بارگیری‌ها، تن- مایل در هر سال، فراوانی حمل و نقل‌ها، اشکال حمل و نقل، فرم‌های قانونی و غیره).

۳. زمان حمل و نقل (حمل و نقل کوتاه‌مدت در مقابل حمل و نقل بلندمدت، میانگین زمان تحویل و غیره).

۴. هزینه حمل و نقل (هزینه هر ارسال، هزینه حمل و نقل در هر مایل/کیلومتر، هزینه بسته‌بندی و جابه‌جایی و غیره).

روش‌های اصلی حمل و نقل شامل ریلی، زمینی، آبی، هوایی و لوله‌ای می‌شود. به‌علاوه، ترکیب‌های مختلفی از این روش‌ها را می‌توان به‌صورت ترکیبی اجرا نمود که در شکل ۱۵-۶ نشان داده شده است. بسته به مکان جغرافیایی عناصر سیستم و تامین‌کنندگان (یعنی نیاز به حمل و نقل)، درجه ضرورت در قالب نیازمندی‌های زمان تحویل و غیره، نیازمندی‌های مسیریابی جایگزین را می‌توان شناسایی کرد. از طریق فرایند انجام موازنه با در نظر گرفتن فاکتورهای زمانی، روش‌های در دسترس و هزینه، یک مسیر حمل و نقل پیشنهادی استقرار می‌یابد. این موضوع می‌تواند شامل حمل ونقل توسط یک روش مشخص یا از طریق یک رویکرد چند روشی انجام گیرد.



شکل ۱۵- ۶- اشکال مختلف حمل و نقل.

با داشتن روش‌های ممکن حمل و نقل و مسیرهای پیشنهادی که برای پشتیبانی جریان رو به خارج و معکوس مربوط به فعالیت‌های عملیاتی و نگه‌داری و تعمیرات (به شکل ۱۵-۱ مراجعه کنید)، همراه با محیط‌های مختلفی که یک آیتم هنگام انتقال از یک محل به دیگری تجربه می‌کند، موضوع کلیدی طراحی بسته‌بندی، یا طراحی یک آیتم برای قابلیت حمل و نقل یا

جابه‌جایی خواهد بود. محصولاتی که باید منتقل شوند، باید طوری طراحی شوند که خسارت، استهلاک ممکن و غیره را حذف کنند. سوالات زیر مطرح است:

۱. آیا بسته (که آیتم در آن قرار داده شده است) دارای خصوصیات مطلوب مقاومت مواد هست؟

۲. آیا بسته در مقابل جابه‌جایی خشن یا انبارش بلند مدت مقاوم است؟

۳. آیا بسته حفاظت کافی را در مقابل شرایط محیطی مختلف مانند باران، دمای بالا و پایین، رطوبت، ارتعاش و شوک، گرد و غبار، پاشش ماسه فراهم می‌کند؟

۴. آیا بسته مطابق روش‌های حمل و نقل و جابه‌جایی موجود است؛ یعنی آیا برای رهگیری به‌سادگی شناسایی می‌شود و آیا در صورت نیاز قابل حذف یا تعویض هست؟

۵. آیا بسته برای ایمنی و امنیت طراحی شده است؛ یعنی، برای ممانعت از دستبرد، دزدی و/یا خرابکاری؟

در مورد شاخص‌های همراه با عنصر حمل و نقل، موضوعات کلیدی زیر باید مدنظر قرار گیرد:

۱. دسترسی‌پذیری حمل و نقل یا احتمال آن‌که قابلیت حمل و نقل مناسب هنگامی که نیاز است در دسترس باشد.

۲. قابلیت اطمینان حمل و نقل، یا با دانستن اینکه حمل و نقل مناسب هنگامی که نیاز در دسترس است، احتمال آن‌که ماموریت مطابق برنامه تکمیل شود.

۳. زمان که نیاز است تا یک محصول از یک نقطه به نقطه دیگر انتقال یابد.

۴. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات یک توانمندی حمل و نقلی مشخص، یا احتمال آن‌که توانمندی حمل و نقل در یک زمان مشخص و با منابعی مشخص هنگام خرابی تعمیر شود.

۵. هزینه حمل و نقل یا هزینه یک سفر یکطرفه.

۶. LCC برای یک توانمندی حمل و نقل مشخص در یک دوره‌ی زمانی معین (به سال).

۱۵-۴-۴- فاکتورهای انبار و توزیع

انبار، یک بخش تکمیلی هر قابلیت تدارکاتی است. وظایف اصلی انبارداری عبارت‌اند از جابه‌جایی، انبارش و انتقال اطلاعات. هدف اصلی فراهم کردن جریان ایده‌آل محصول و سطح قابل قبول خدمت بین تولیدکننده و مشتری توسط فراهم کردن انبارهایی در مکان‌های معین که براساس تقاضای محلی سطوح موجودی متغیری دارند. وظیفه جابه‌جایی را می‌توان به فعالیت‌های زیر شکست:

۱. **دریافت:** تخلیه محصولات از وسیله حمل کننده.

۲. **انتقال/کنارگذاری:** حرکت فیزیکی محصولات در انبار و تحرک لازم در محدوده‌هایی که فعالیت‌های ویژه مانند تثبیت و/یا حرکت مستقیم به سکوی بارگیری را انجام می‌دهند.

۳. **انتخاب برای سفارش:** انتخاب محصولات از انبار برای پاسخ‌گویی به نیاز/سفارش مشتری.

۴. **بارگیری:** انتقال محصولات به سکوی بارگیری بدون نیاز به فعالیت‌های کنارگذاری، انبارش یا انتخاب برای سفارش.

۵. **ارسال:** بسته‌بندی، بارگیری، و ارسال محصولات به مقصد مطلوب مشتری.

در سال‌های اخیر استفاده از اتصال متقابل[1] رایج شده و برای افزایش پاسخ‌دهی به نیاز مشتری از طریق تحویل محصول به مقصد مشتری با سرعت بیش‌تر و هزینه کم‌تر بدون نیاز به فعالیت‌های نگه‌داری، انبارش و برداشت سفارش مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیاده‌سازی چنین

1.Cross Docking

سیاستی به تعداد ارسال‌های موردنیاز، فاصله و مکان‌های جغرافیایی محل مشتری، نوع و راحتی جابه‌جایی محصول و غیره بستگی دارد.

وظیفه انبار می‌تواند به *انبار موقت* (انبار محصولاتی که فعالیت‌های جایگزینی کوتاه‌مدت را پشتیبانی می‌کنند) و *انبارش بلندمدت* (انبار محصولاتی که بیش از نیازمندی جایگزینی نرمال به‌منظور ایجاد موجودی ایمن مورد استفاده قرار می‌گیرد) تقسیم شود. تابع انتقال اطلاعات عبارتست از ارتباطات لازم، پایگاه داده‌ها و غیره، استفاده از روش‌های EC برای فراهم کردن اطلاعات به‌موقع مربوط به سفارش‌ها، مکان‌های نگه‌داری محصول، رهگیری محصول در حال انتقال، سطوح موجودی فعلی، ارسال ورودی‌ها و خروجی‌ها، استفاده از فضای تسهیل داده‌های مشتری و غیره.

دسته‌های اصلی انبارها شامل انبارهای خصوصی و عمومی می‌شوند. انبارهای خصوصی آن‌های هستند که مالکیت و انجام عملیات آن‌ها بر عهده سازمان‌های تولیدی بوده تا نیازمندی‌های تدارکات خود را پشتیبانی کنند. از سوی دیگر، دسته‌های مختلفی از انبارهای عمومی وجود دارند که نیازهای متفاوتی را برآورده می‌کنند؛ برای مثال، انبارهای عمومی تجار، انبارهای امانتی، انبارهایی با دمای کنترل شده و غیره. مانند حمل و نقل رایج، انبارهای عمومی نیز خدمات متنوعی را برای عموم فراهم می‌کنند. حیاتی‌ترین موضوعات در مورد شاخص‌های مربوط به انبارداری به‌صورت زیر است:

۱. *زمان* لازم برای ارسال یک محصول (از لحظه آگاه شدن از یک نیازمندی).
۲. هزینه ارسال هر محصول (از انبار تا تحویل در محل مشتری).
۳. هزینه نگه‌داری و مدیریت موجودی (برای کل انبار).
۴. *ارزش* محصولات ارسال شده/ارزش کل موجودی.

۵. درصد استفاده از فضا و هزینه استفاده از محل.

۶. حجم محصولات *جابه‌جا شده*، یا کل تعداد محصولات پردازش شده در سال.

۱۵-۴-۵- فاکتورهای سازمان نگه‌داری و تعمیرات

شاخص‌های مربوط به یک سازمان نگه‌داری و تعمیرات مشابه فاکتورهایی است که برای هر سازمان استفاده می‌شود. موارد مورد توجه در راستای پشتیبانی سیستم به‌صورت زیر هستند:

۱. زمان کار نیروی نگه‌داری و تعمیرات به‌طورمستقیم به هر دسته از کارکنان و سطح مهارت بستگی دارد که در عملکرد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات سیستم گسترده شده است. زمان نیرو کار می‌تواند شکسته شود تا نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده و زمان‌بندی نشده را به‌صورت جدا پوشش دهد. زمان نیروی کار می‌تواند به‌صورت زیر نمایش داده شود:

a. نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات برای هر ساعت عملیات سیستم (MLH/OH).

b. نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات برای هر چرخه ماموریت (یا قسمتی از یک ماموریت).

c. نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات در هر ماه (MLH/Mo).

d. نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات در هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات (MLH/MA).

۲. زمان نیروی کار غیر مستقیم که برای پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات سیستم لازم است (یعنی فاکتور بالاسری).

۳. نرخ انتقال کارکنان (درصد).

۴. نرخ آموزش کارکنان یا کارگر- روز آموزش رسمی در سال برای پشتیبانی و عملیات سیستم.

۵. تعداد سفارش‌های کار نگه‌داری و تعمیرات پردازش شده در واحد زمان (مانند هفته، ماه، سال) و میانگین زمان موردنیاز برای پردازش سفارش کار.

۶. میانگین زمان تاخیر اداری یا میانگین زمان از هنگامی که یک آیتم برای نگه‌داری و تعمیرات دریافت می‌شود تا هنگامی که نگه‌داری و تعمیرات فعال برای آیتم آغاز می‌گردد.

هنگامی که کل طیف نگه‌داری و تعمیرات سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد (طراحی برای قابلیت پشتیبانی)، عنصر سازمانی برای اثربخشی و پشتیبانی موفق سیستم در چرخه‌ی عمر حیاتی است. تعداد و سطح مهارت درست کارکنان هنگام نیاز باید در دسترس باشد و افراد تخصیص داده شده برای انجام کار باید به‌درستی آموزش دیده باشند و انگیزه لازم برای انجام کار را داشته باشند. مانند هر سازمانی، استقرار شاخص‌های اثربخشی و بهره‌وری سازمانی بسیار با اهمیت است.

۱۵-۴-۶- فاکتورهای قطعات یدکی، تعمیری و موجودی مربوطه

قطعات یدکی و تعمیری (و موجودی مربوطه) برای عملکرد همه فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده (اصلاحی) و زمان‌بندی شده، مورد نیاز هستند. نیازمندی‌های قطعات یدکی در ابتدا بر پایه مفهوم نگه‌داری و تعمیرات سیستم بوده و انواع و تعداد مشخص از آن‌ها برای هر سطح نگه‌داری و تعمیرات شناسایی می‌شوند (شکل ۳-۱۴). تعداد قطعات یدکی/تعمیری تابعی از نرخ‌های تقاضا بوده و شامل ملاحظات زیر می‌شود:

۱. قطعات برای آیتم‌هایی که در نتیجه فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه باید جایگزین شوند. قطعات یدکی برای جایگزینی قطعاتی به‌کار می‌روند که قابل تعمیر هستند.

۲. یک سطح موجودی اضافی از قطعات یدکی برای جبران آیتم‌های قابل تعمیر در فرایند نگه‌داری و تعمیرات در حال انجام مورد نیاز است. اگر یک پشتیبان برای آیتم‌ها در کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی یا مبدا/تولیدکننده وجود داشته باشد، این آیتم‌ها به‌عنوان قطعات یدکی بازیافت شده قابل استفاده نخواهند بود. بنابراین، موجودی بیش‌تر از حد انتظار کاهش می‌یابد یا منجر به وضعیت خارج از موجودی می‌شود. در بررسی این مشکل، مشخص می‌شود که قابلیت تجهیزات آزمایش، کارکنان و تسهیلات به‌طورمستقیم بر زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات و تعداد قطعات یدکی اضافی موردنیاز اثرگذار است.

۳. یک سطح موجودی اضافی برای جبران زمان تحویل تدارکات برای اکتساب آیتم مورد نیاز است. برای نمونه، داده‌های پیش‌بینی ممکن است مشخص کنند که ۱۰ فعالیت نگه‌داری و تعمیراتی که نیاز به جایگزینی آیتم خاصی دارند در یک دوره‌ی ۶ ماهه اتفاق می‌افتند و ۹ ماه زمان برای اکتساب نیازمندی از تامین‌کننده لازم است. می‌توان سوال کرد: چه مقدر قطعات تعمیری اضافی لازم است که تا نیازهای عملیاتی را برآورده کرده و هم‌چنین زمان تحویل طولانی تامین‌کننده را پوشش دهد؟ تعداد اضافه شده بسته به این‌که آیتم تعمیری است یا این‌که پس از خرابی دور انداخته می‌شود، متغیر است.

۴. یک سطح موجودی اضافی قطعات یدکی برای جبران اوراق شدن آیتم‌های قابل تعمیر موردنیاز است. آیتم‌های قابل تعمیر به کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی یا مبدا فرستاده می‌شوند و برخی اوقات اوراق می‌شوند (یعنی نمی‌توان آن‌ها را تعمیر کرد، زیر از طریق بازرسی تصمیم بر آن می‌شود که تعمیر آن از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. اوراق شدن بسته به استفاده از تجهیز، جابه‌جایی، محیط و قابلیت سازماندهی متغیر

است. افزایش نرخ اوراق شدن عموما در نتیجه افزایش نیازمندی‌های قطعات یدکی اتفاق می‌افتد.

در بازبینی ملاحظات بالا، موضوع مورد توجه تعیین نیازمندی قطعات یدکی در نتیجه جایگزینی آیتم در عملکرد نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی می‌باشد. فاکتورهای مهم در این فرایند عبارت‌اند از (۱) قابلیت اطمینان آیتم یدکی، (۲) تعداد آیتم‌های استفاده شده، (۳) احتمال آن‌که یک قطعه یدکی هنگامی که نیاز است در دسترس باشد، (۴) قابلیت کاربرد یک آیتم در یک ماموریت موفق، و (۵) هزینه. استفاده از فاکتورهای قابلیت اطمینان و فاکتورهای احتمالی در مثال‌های زیر نشان داده شده است:

احتمال موفقیت همراه با ملاحظات دسترسی‌پذیری قطعات یدکی. فرض کنید که یک جزء با قابلیت اطمینان ۰/۸ برای زمان t در یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد و یک قطعه یدکی برای آن جزء خریداری می‌شود. احتمال موفقیت سیستم با در دسترس بودن یک قطعه یدکی در زمان t را تعیین کنید (خرابی‌ها به‌صورت تصادفی و با تابع توزیع نمایی اتفاق می‌افتند).

این وضعیت قابل مقایسه با موردی است که جزء عملیاتی بوده و یک قطعه آماده به‌کار موازی (افزونگی آماده به‌کار) با آن همراه است که در قسمت ۱۲-۲ بحث شد. عبارت قابل استفاده به‌صورت زیر است

$$P = e^{-\lambda t} + (\lambda t)e^{-\lambda t} \qquad (۲-۱۵)$$

وقتی قابلیت اطمینان جزء ۰/۸ و مقدار λt برابر با ۰/۲۲۳ باشد، با جایگزینی این مقادیر در معادله ۱۵-۲ احتمال موفقیت به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$P = e^{-0.223} + (0.223)e^{-0.223}$$
$$= 0.8 + (0.223)(0.8) = 0.9784$$

اگر در ادامه فرض شود که جزء با دو قطعه یدکی پشتیبانی می‌شود (هر سه جزء قابل جابه‌جایی هستند)، احتمال موفقیت در طی زمان t به‌صورت زیر تعیین می‌شود

$$P = e^{-\lambda t} + (\lambda t)e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^2 e^{-\lambda t}}{2!}$$

یا

$$P = e^{-\lambda t}\left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!}\right] \qquad (۳-۱۵)$$

وقتی قابلیت اطمینان جزء ۰/۸و λt برابر با ۰/۲۲۳ باشد، احتمال موفقیت برابر است با

$$P = 0.8\left[1 + 0.223 + \frac{(0.223)^2}{(2)(1)}\right]$$
$$= 0.8(1.2479) = 0.9983$$

بنابراین، اضافه کردن یک جزء یدکی منجر به ایجاد یک عبارت پواسون دیگر می‌شود. اگر دو جزء یدکی اضافه شود، دو عبارت دیگر اضافه می‌شود و به همین منوال می‌توان ادامه داد.

احتمال موفقیت یک پیکربندی شامل دو جزء عملیاتی، که با دو قطعه یدکی پشتیبانی می‌شود، به‌صورت زیر قابل محاسبه است

$$P = e^{-2\lambda t}\left[1 + 2\lambda t + \frac{(2\lambda t)^2}{2!}\right] \qquad (۴-۱۵)$$

هنگامی که قابلیت اطمینان ۰/۸ و $\lambda t = 0.223$

$$P = e^{-0.446}\left[1 + 0.446 + \frac{(0.446)^2}{(2)(1)}\right]$$
$$= 0.6402\left[1 + 0.446 + 0.0995\right] = 0.9894$$

این مثال‌ها محاسبات مورد استفاده در تعیین موفقیت سیستم همراه با قطعات یدکی برای ۳ پیکربندی ساده را نشان می‌دهند. ترکیب‌های متنوعی از اجزای عملیاتی و قطعات یدکی می‌توانند فرض شوند و فاکتورهای موفقیت سیستم می‌تواند با استفاد از معادله زیر تعیین شوند

$$1 = e^{-\lambda t} + (\lambda t)e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^2 e^{-\lambda t}}{2!} + \frac{(\lambda t)^3 e^{-\lambda t}}{3!} + \cdots + \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$$

(۵–۱۵)

معادله ۱۵–۵ را می‌توان به‌صورت یک عبارت پواسون عمومی به‌صورت زیر ساده کرد:

$$f(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \qquad (۶–۱۵)$$

هدف تعیین احتمال آن است که x خرابی اتفاق افتد اگر یک آیتم عملیاتی در زمان t وجود داشته باشد، و هر خرابی اصلاح شود. هنگامی که n آیتم در سیستم باشد، تعداد خرابی‌ها در t برابر با $n\lambda t$ خواهد بود و جمله عمومی پواسون به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$f(x) = \frac{(n\lambda t)^x e^{-n\lambda t}}{x!} \qquad (۷–۱۵)$$

برای تسهیل محاسبات، یک گراف احتمالی پواسون در شکل ۱۵–۷ ارائه شده است که از معادله ۱۵–۷ استخراج شده است. مقدار مختصات را می‌توان به‌عنوان یک فاکتور اطمینان نگاه کرد. مثال‌های متعددی در شکل ۱۵–۷ نشان داده شده است.

احتمال تکمیل ماموریت. فرض کنید که فردی می‌خواهد احتمال آن‌که یک سیستم، ماموریتی ۳۰ ساعته را بدون خرابی انجام دهد (هنگامی که میانگین عمر سیستم ۱۰۰ ساعت باشد) تعیین کند. فرض کنید

λ = ۱ خرابی در ۱۰۰ ساعت یا ۰٫۰۱ خرابی در ساعت

t = ۳۰ ساعت

n = ۱ سیستم

$n\lambda t = (۱)(۰٫۰۱)(۳۰) =$ ۰٫۳

با $n\lambda t$ برابر ۰/۳ وارد شکل ۱۵–۷ شوید. رو به جلو حرکت کنید تا به محل تقاطعی که r برابر ۰ می‌شود جلو رفته و مختصات را بخوانید، که تقریبا برابر با ۰/۷۳ می‌شود. بنابراین، احتمال آن‌که ماموریت ۳۰ ساعته سیستم تکمیل شود ۰/۷۳ است.

فرض کنید که سیستم شناسایی در یک هواپیما نصب شده و ۱۰ هواپیما برای یک ماموریت ۱۵ساعته زمان‌بندی شده‌اند. احتمال آن‌که ۷ سیستم برای مدت ماموریت بدون خرابی کار کنند، تعیین کنید. فرض کنید

$$n\lambda t = (10)(0.01)(15) = 1.5$$

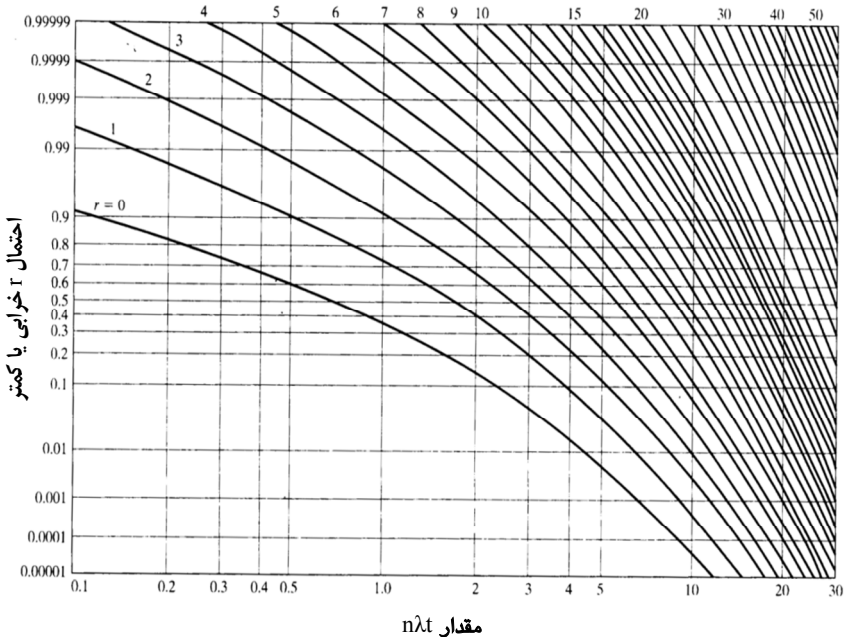
و

r = ۴ خرابی یا کم‌تر (مجاز)

با $n\lambda t$ برابر با ۱/۵ وارد شکل ۱۵–۷ شوید. تا محل تقاطع r با ۳ جلو رفته و مختصات را بخوانید که معادل مقداری تقریبا برابر ۰/۹۲ خواهد بود. بنابراین ۹۲٪ اطمینان وجود دارد که حداقل

۷ سیستم از ۱۰ سیستم با موفقیت عملیات را انجام دهند. اگر یک قابلیت اطمینان ۸۰٪ تعیین شده باشد (یعنی ۸ سیستم باید بدون خرابی کار کنند)، فاکتور اطمینان به ۸۲٪ کاهش می‌یابد.

اگرچه گراف شکل ۱۵–۷ یک راه‌حل ساده شده را فراهم می‌کند، استفاده از معادله ۱۵–۵ برای نتایج دقیق مطلوب خواهد بود. علاوه بر این، کتاب‌های زیادی وجود دارد که شامل جداولی هستند که بسط پواسون را پوشش می‌دهند.



شکل ۱۵–۷– تعیین قطعات یدکی با استفاده از احتمالات تجمعی پواسون.

منبع: NAVAIR 00-65-502/NAVORD OD 41146, Reliability Engineering Handbook (Washington DC: Naval Air Systems Command and Naval Ordnance Systems Command).

تعیین تعداد قطعات یدکی. تعیین تعداد قطعات یدکی، تابعی است از احتمال در دسترس بودن یک قطعه یدکی در صورت نیاز، قابلیت اطمینان آیتم موردنظر، تعداد آیتم‌های استفاده شده در

سیستم و غیره می‌باشد. یک عبارت اقتباس شده از توزیع پواسون، که برای تعیین تعداد قطعات یدکی مناسب است به‌صورت زیر بیان می‌شود

$$P = \sum_{n=0}^{n=s} \left[\frac{R\left(-\ln R\right)^n}{n!} \right] \qquad (۸-۱۵)$$

که در آن

P = احتمال در دسترس بودن یک قطعه یدکی یک آیتم مشخص هنگامی که نیاز است

S = تعداد قطعات یدکی در انبار

R = قابلیت اطمینان ترکیبی (احتمال بازمانی)؛ $R = e^{-K\lambda t}$

K = قطعات استفاده شده از یک نوع مشخص

Ln R = لگاریتم طبیعی R

در تعیین تعداد قطعات یدکی، فرد باید سطح حفاظت مطلوب (فاکتور ایمنی) را مدنظر قرار دهد. سطح حفاظت مقدار P در معادله ۱۵–۸ است. این موضوع احتمال در دسترس بودن یک قطعه یدکی در هنگامی است که موردنیاز می‌باشد. سطح بالاتر حفاظت نیازمند تعداد بیش‌تری از قطعات یدکی است. این موضوع منجر به هزینه بالاتری در تدارک آیتم و موجودی نگه‌داری و تعمیرات می‌شود. سطح حفاظت یا فاکتور ایمنی، یک محافظ در مقابل ریسک کمبود موجودی را در دسترس قرار می‌دهد.

هنگام تعیین تعداد قطعات یدکی، نیازمندی‌های سیستم باید در نظر گرفته شود (مانند اثربخشی سیستم، دسترسی‌پذیری) و سطح مناسب در هر مکانی که نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی

انجام می‌شود باید استقرار یابد. سطوح مختلف نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی می‌توانند برای آیتم‌های مختلف مناسب باشند. برای مثال قطعات یدکی موردنیاز برای پشتیبانی اجزای اصلی تجهیز برای موفقیت سیستم حیاتی هستند؛ نحوه‌ی مواجهه با آیتم‌های پرارزش یا پرهزینه با آیتم‌های کم‌هزینه متفاوت است و غیره. یک تعادل بهینه بین سطح موجودی و هزینه مطلوب است.

شکل ۱۵–۸ (الف) و ۱۵–۸ (ب) یک نموگراف را ارائه می‌دهد که تعیین تعداد قطعات یدکی با استفاده از معادله ۱۵–۸ را ساده می‌کند. نموگراف نه تنها جواب‌های سوالات دسترسی‌پذیری قطعات یدکی اصلی را ساده می‌کند، بلکه اطلاعاتی فراهم می‌کند که به رویکردهای ارزیابی گزینه‌های طراحی از منظر قطعات یدکی و تعیین چرخه‌های تدارکاتی کمک می‌کند. مثال‌های زیر استفاده از نموگراف را نشان می‌دهد.

فرض کنید یک قسمت از تجهیز شامل ۲۰ قطعه از یک نوع مشخص با نرخ خرابی ۰/۱ در هر ۱۰۰۰ ساعت عملیات باشد. تجهیز ۲۴ ساعت در روز کار می‌کند و قطعات یدکی در بازه‌های زمانی ۳ ماهه تهیه و انبار می‌شود. چه تعداد قطعه یدکی باید در موجودی انبار باشد تا ۹۵٪ شانس وجود داشته باشد که قطعه یدکی هنگام نیاز موجود باشد؟ فرض کنید

$$K = ۲۰ \text{ قطعه}$$

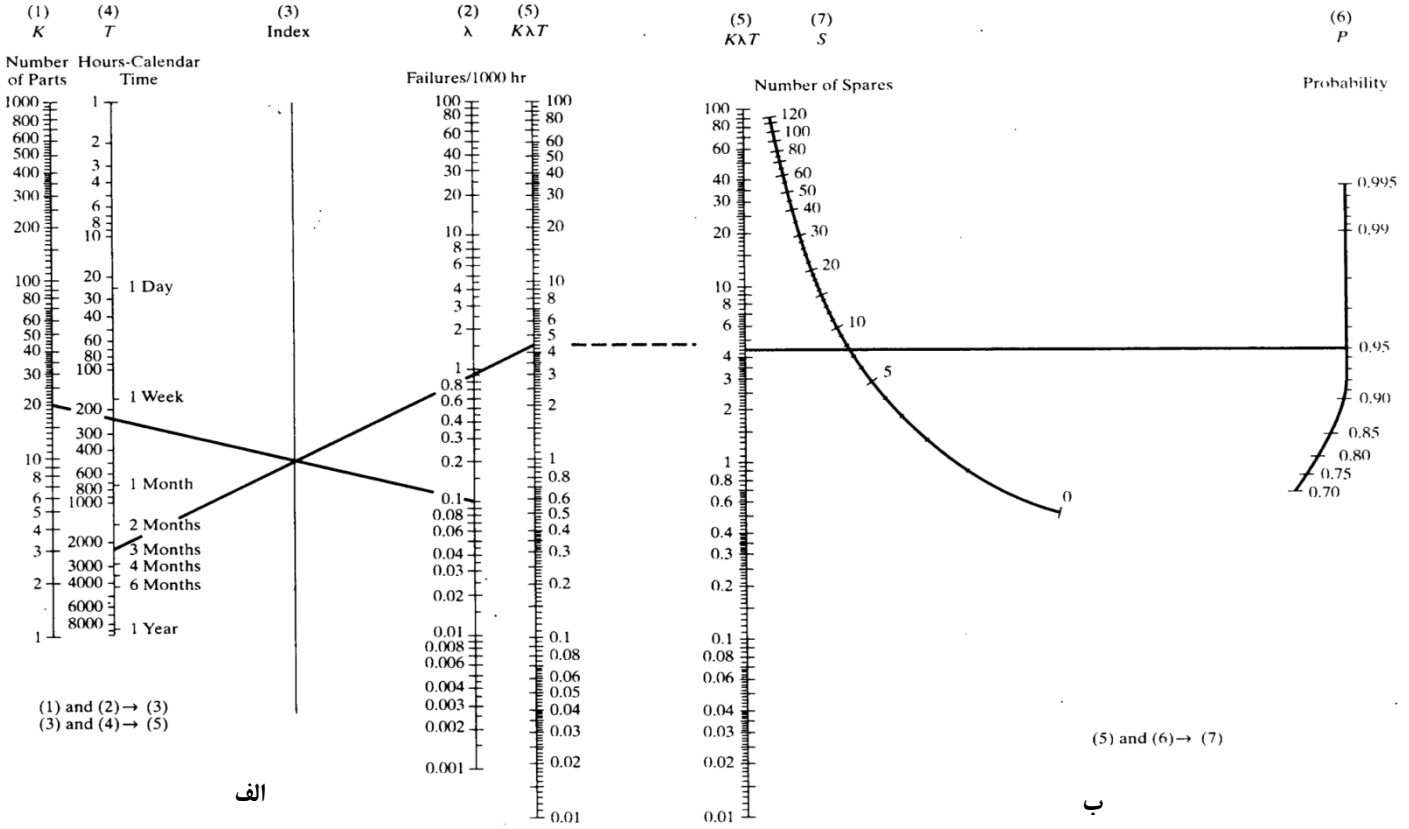
$$\lambda = ۰,۱ \text{ خرابی در هر } ۱۰۰۰ \text{ ساعت}$$

$$T = ۳ \text{ ماه}$$

$$K\lambda T = (۲۰)(۰,۰۰۰۱)(۲۴)(۳۰)(۳) = ۴,۳۲$$

$$P = ٪۹۵$$

بر اساس نموگراف شکل ۱۵–۸، تقریبا ۸ قطعه یدکی نیاز است.



شکل ۱۵- ۸- نموگراف نیازمندی قطعات یدکی

به‌عنوان دومین مثال، فرض کنید که یک قطعه خاص برای سه تجهیز (A تا C) مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعات یدکی هر ۱۸۰ روز یکبار تهیه می‌شوند. تعداد قطعات مورد استفاده، نرخ خرابی قطعه و ساعات کاری تجهیز در هر روز در جدول ۱۵–۱ ارائه شده است.

تعداد قطعات یدکی که باید در موجودی باشد تا با شانس ۹۰٪ یک قطعه یدکی هنگام خرابی در دسترس باشد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

۱. حاصلضرب K، λ و T را به‌صورت زیر تعیین کنید

$$A = (25)(0.0001)(180)(12) = 5.40$$

$$B = (8)(0.0001)(180)(15) = 5.29$$

$$C = (35)(0.0001)(180)(20) = 18.90$$

۲. مجموع مقادیر $K\lambda T$ را به‌صورت زیر تعیین کنید

$$\sum K\lambda T = 5.40 + 5.29 + 18.90 = 29.59$$

۳. با استفاده از نموگراف شکل ۱۵–۸ (ب)، خطی از مقدار $K\lambda T$ برابر با ۲۹/۵۹ به P برابر با ۰/۹۰ رسم کنید. تعداد تقریبی قطعات یدکی موردنیاز ۳۶ است.

جدول ۱۵–۱– داده‌ها برای فهرست قطعات یدکی

آیتم	K	خرابی‌ها در هر ۱۰۰ ساعت (λ)	ساعات عملیات در روز (T)
تجهیز A	۲۵	۰,۱۰	۱۲
تجهیز B	۲۸	۰,۰۷	۱۵
تجهیز C	۳۵	۰,۱۵	۲۰

ملاحظات سیستم موجودی. نیازمندی‌های کلی موجودی برای قطعات یدکی و تعمیری باید علاوه بر ارزیابی وضعیت‌های تقاضا مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه مقدار زیاد موجودی در دسترس پاسخ‌دهی به نیازمندی‌های تقاضا را افزایش می‌دهد، اما هزینه نگه‌داری این موجودی ممکن است بالا باشد. در مقابل مقدار کم موجودی ریسک خالی شدن انبار را افزایش می‌دهد و احتمال دارد که سیستم از حالت عملیاتی خارج شود و در نتیجه هزینه افزایش یابد. یک تعادل بهینه (نه خیلی زیاد نه خیلی کم) باید بین موجودی در دسترس، فراوانی تدارک و تعداد تدارک ایجاد شود.

هنگامی که موضوعات موجودی مورد بحث است، فرد نیاز دارد تا یک بازبینی در مورد تئوری و مفاهیم بحث شده در فصل ۹ را آغاز کند. شکل ۹–۱۱ مدل‌های موجودی قطعی را نشان می‌دهد که در آن تقاضا و زمان تحویل ثابت هستند. با مراجعه به این شکل، فاکتورهای متعارف سطح عملیات، موجودی ذخیره، چرخه تدارک، زمان تحویل، و غیره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌علاوه، توسعه مدل تعداد سفارش اقتصادی (EOQ) و روابط بین مقدار و هزینه موجود بحث شده و شکل ۹–۱۱ نمایش تئوریک از چرخه موجودی برای یک آیتم را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵–۹ یک وضعیت موجودی احتمالی را نشان می‌دهد که تقاضا و زمان تحویل تدارک متغیرهای تصادفی هستند. نیاز به موجودی ذخیره بدیهی است. وضعیت خالی شدن انبار ممکن است باعث غیرعملیاتی شدن سیستم شود که کاملا پرهزینه است. هدف کلی داشتن مقدار و نوع قطعات یدکی در دسترس با کم‌ترین هزینه کل سیستم است.

با مراجعه به فصل ۹، در حالی‌که مدل EOQ (در معادله ۹–۳۷) می‌تواند به‌صورت عمومی در مواردی استفاده شود که تعداد زیادی قطعات تعمیری استاندارد با تنوع محدود وجود دارد، اما بهتر است که مدل‌های دیگری برای تدارک آیتم‌های پر ارزش و/یا اجزای حیاتی در انجام ماموریت سیستم به‌کار روند. آیتم‌های پرارزش آن اجزایی هستند که هزینه تدارک بالایی داشته و باید یکی

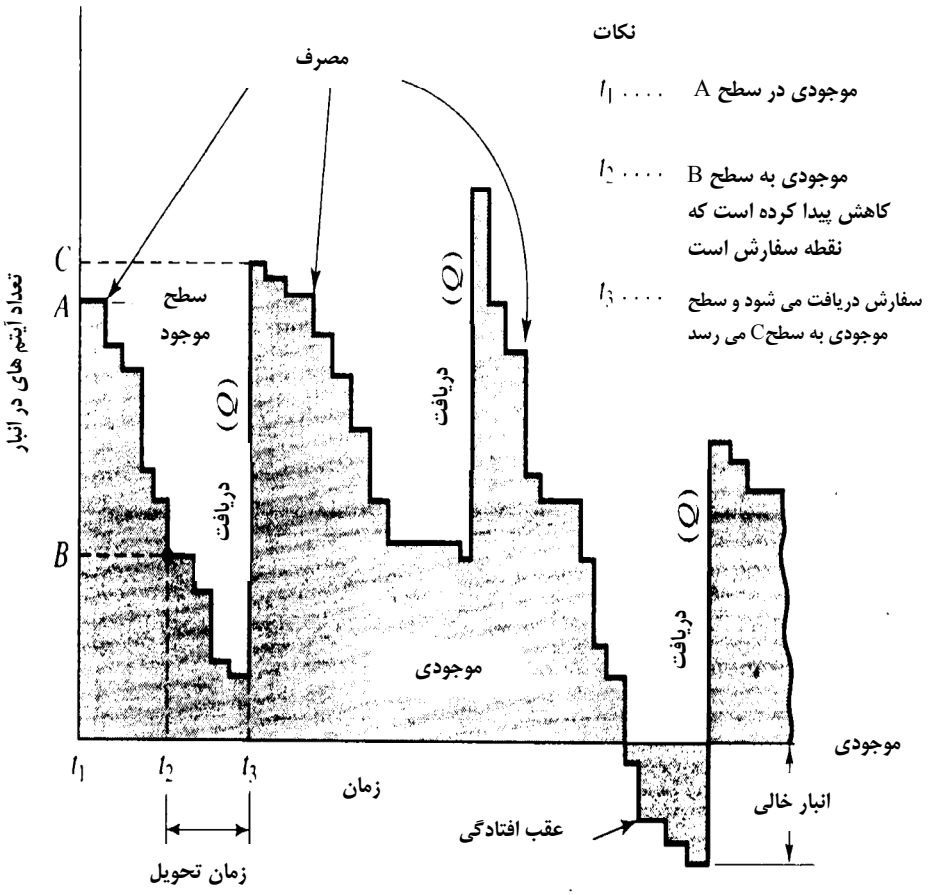
یکی خریداری شوند. ارزش دلار در این اجزا اغلب قابل توجه بوده و می‌تواند از ارزش کل صدها قطعه یدکی و تعمیری دیگر در انبار بیش‌تر باشد.

از نظر حیاتی بودن، برخی آیتم‌ها حیاتی‌تر از آیتم‌های دیگر در انجام موفقیت‌آمیز ماموریت سیستم هستند. برای مثال، فقدان یک آیتم ۱۰۰ دلاری ممکن است باعث عدم کارکرد سیستم شود، در حالی‌که فقدان یک آیتم ۱۰۰۰۰ دلاری ممکن است اثر چندانی بر سیستم نگذارد. حیاتی بودن یک آیتم عموما بر پایه وظیفه آن در سیستم است و لزوما ربطی به هزینه اکتساب آن ندارد. درجه بحرانی بودن می‌تواند از مد خرابی، آثار و تحلیل بحرانی بودن (FMECA) که در فصل ۱۲ بحث شد، به‌دست آید.

فرایند اکتساب قطعات یدکی می‌تواند تا حدی بین آیتم‌های مختلف متفاوت باشد اگر نرخ استفاده از آن‌ها (چرخه‌های کار) به مقدار قابل توجهی متفاوت باشد. آیتم‌هایی که مصرف سریعی دارند ممکن است به‌صورت محلی و در نقطه بهره‌برداری تهیه شوند (مانند کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی) در حالی‌که آیتم‌هایی که مصرف پایینی دارند در انبار ذخیره شده و از طریق تامین‌کننده تامین شوند.

۱۵-۴-۷- فاکتور تجهیزات آزمایش و پشتیبانی

دسته عمومی تجهیزات آزمایش و پشتیبانی می‌توان شامل طیف وسیعی از آیتم‌ها مانند تجهیزات آزمایش الکترونیکی دقیق، تجهیزات آزمایش مکانیکی، تجهیزات جابه‌جایی زمینی، جیگ و فیکسچرهای ویژه، و موارد مشابه باشد. این آیتم‌ها که در ترکیب و پیکربندی متفاوت هستند می‌توانند به سطوح مختلف نگه‌داری و تعمیرات در مکان‌های جغرافیایی پراکنده در یک کشور (یا جهان) تخصیص داده شود. با این حال، بدون توجه به طبیعت کاربردی، هدف فراهم کردن آیتم درست برای کار موردنظر، در زمان و مکان درست و به تعداد موردنیاز است.



شکل ۱۵- ۹- نمایش یک چرخه موجودی واقعی.

به‌علت پراکندگی احتمالی تجهیزات آزمایش و پشتیبانی برای یک سیستم معلوم، مشکل است که شاخص‌های کمی مشخص کرد که بتواند به‌صورت فراگیر اعمال شود. شاخص‌های مشخصی برای تجهیزات آزمایش الکترونیکی، شاخص‌های دیگری برای تجهیزات جابه‌جایی زمینی و غیره وجود دارد. به‌علاوه، مکان و کاربرد یک آیتم مشخص از تجهیزات آزمایشی می‌تواند شاخص‌های متفاوتی را ایجاد کند. برای نمونه، یک آیتم تجهیز آزمایشی الکترونیکی مورد استفاده در پشتیبانی

نگه‌داری و تعمیرات سازمانی نیازمندی‌های متفاوتی با همان آیتم در نگه‌داری و تعمیرات میانی در یک کارگاه دور دارد. اگرچه همه‌ی نیازمندی‌های تجهیزات آزمایش و پشتیبانی در هر سطح نگه‌داری و تعمیرات برای عملیات موفق سیستم مهم هستند، اما آزمایشگرها یا ایستگاه‌های آزمایش در تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات میانی و مبدا اهمیت بیش‌تری دارند زیرا این آیتم‌ها به احتمال زیاد برای پشتیبانی عناصر مختلف سیستم در مکان‌های مختلف مشتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک تسهیل نگه‌داری و تعمیرات میانی می‌تواند برای فراهم کردن پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی لازم برای تعداد زیادی از عناصر پراکنده سیستم در یک حوزه جغرافیایی وسیع تخصیص داده شود. این بدان معناست که آیتم‌های گوناگونی از مکان‌های عملیاتی مختلف در زمان‌های مختلف فراهم خواهند بود.

هنگام تعیین نیازمندی تجهیزات آزمایش برای یک کارگاه، فرد باید این موارد را تعریف کند: (۱) نوع آیتم که باید برای نگه‌داری وتعمیرات به کارگاه انتقال داده شود؛ (۲) وظایف آزمایشی که باید انجام شوند، شامل پارامترهای عملکرد که باید اندازه‌گیری شوند و هم‌چنین دقت و تلرانس موردنیاز برای هر آیتم؛ و (۳) فراوانی پیش‌بینی شده وظایف آزمایش در هر واحد زمانی. نوع و فراوانی بازگشت یک آیتم بر پایه مفهوم نگه‌داری و تعمیرات و داده‌های قابلیت اطمینان سیستم قرار دارد. توزیع زمان‌های ورود برای یک آیتم مشخص اغلب نمایی منفی است و تعداد آیتم‌های ورودی در یک دوره‌ی زمان مشخص از توزیع پواسون پیروی می‌کند. با ورود آیتم‌ها به کارگاه، ممکن است فورا پردازش شوند یا ممکن است در خط انتظار یا صف قرار گیرند که به دسترسی‌پذیری تجهیز آزمایش و کارکنانی بستگی دارد که وظایف نگه‌داری و تعمیرات را انجام می‌دهند.

هنگام ارزیابی خود فرایند آزمایش، فرد باید نیازمندی‌های استفاده از تجهیز آزمایش را محاسبه کند (یعنی مقدار زمان موردنیاز در هر روز، ماه، یا سال). این تخمین را می‌توان با در نظر گرفتن

توزیع زمان تعمیر برای آیتم‌های متنوع وارد شونده به کارگاه به‌دست آورد. با این حال، زمان‌های سپری شده نهایی می‌تواند بسته به روش‌های آزمایش دستی، نیمه خودکار و تمام خودکار که به‌کار می‌رود، به شدت تحت تاثیر قرار گیرد.

با داشتن نیازهای بهره‌برداری از تجهیزات آزمایش (از نقطه‌نظرکل زمان موردنیاز برای پردازش ورودی‌ها به کارگاه)، لازم است که دسترسی‌پذیری عملیاتی (A_o) پیکربندی تجهیزات آزمایش برای استفاده مدنظر قرار گیرد. همان‌طور که در معادله ۱۳-۱۶ تعریف شد، دسترسی‌پذیری تابعی از قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات است. بنابراین، فرد باید مقادیر MTBM و MDT را برای خود تجهیز آزمایش در نظر بگیرد. روشن است که پیکربندی تجهیز آزمایش باید قابل اطمینان‌تر از جزء سیستمی باشد که در حال آزمایش است. هم‌چنین، در مواردی که پیچیدگی تجهیز آزمایش بالاست، منابع تدارکاتی موردنیاز برای پشتیبانی تجهیز آزمایش ممکن است بیش از حد باشد (به‌طورمثال نیاز فراوان به کالیبره کردن یک آیتم از تجهیز آزمایش در مقابل استاندارد فرعی یا اصلی در محیط اتاق پاک). ممکن است یک نیازمندی برای تعیین زمانی وجود داشته باشد که تجهیز آزمایش برای انجام وظیفه موردنظر در دسترس است.

تعیین نهایی نیازمندی‌های تجهیز آزمایش در یک تسهیل نگه‌داری و تعمیرات از طریق تحلیل‌ترکیبات مختلف نرخ‌های ورود، طول صف، زمان پردازش ایستگاه آزمایش، یا تعداد ایستگاه‌های آزمایش انجام می‌شود. در حقیقت، فرد با یک ایستگاه تک کاناله یا چند کاناله مواجه است که برای حل آن از مدل‌های صف بحث شده در فصل ۱۰ استفاده خواهد کرد. با پیچیده‌تر شدن ساختار نگه‌داری و تعمیرات با متغیرهای متعدد (که برخی از آن‌ها احتمالی هستند)، تحلیل مونت کارلو می‌تواند مفید واقع شود. در هر رخدادی، تعدادی گزینه شدنی می‌تواند وجود داشته باشد و یک رویکرد ارجح جستجو می‌شود.

۱۵-۴-۸- فاکتور تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات

تسهیلات ویژه برای پشتیبانی همه فعالیت‌های مربوط به اجرای تکالیف نگه‌داری و تعمیرات فعال، انبار قطعات یدکی/تعمیری و تجهیزات لازم آزمایش و پشتیبانی برای نگه‌داری و تعمیرات، فضا و اسکان کارکنان فعالیت‌های اداری مربوطه و غیره، لازم است. با مراجعه به شکل ۳-۱۴، این موضوع در ابتدا شامل کارگاه‌های نگه‌داری و تعمیرات در سطوح نگه‌داری و تعمیرات میانی و تامین‌کننده/تولیدکننده/مبدا می‌شود. اگرچه شاخص‌های کمی مربوط به تسهیلات از یک سیستم به دیگری بسیار متفاوت است، اما فاکتورهای زیر در بیش‌تر موارد قابل استفاده است:

۱. زمان پردازش آیتم یا زمان بازگردانی (TAT)؛ یعنی زمان سپری شده لازم برای پردازش نگه‌داری و تعمیرات یک آیتم و بازگرداندن آن به حالت کاملا عملیاتی.

۲. بهره‌برداری از تسهیل؛ یعنی، نسبت زمان بهره‌برداری به زمان در دسترس برای استفاده، درصد بهره‌برداری در قالب فضای اشغال شده، و غیره.

۳. بهره‌برداری از انرژی در عملکرد نگه‌داری و تعمیرات؛ یعنی واحد مصرف انرژی در هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات، هزینه انرژی مصرف شده به گذشت زمان یا در هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات، و غیره.

۴. هزینه کل تسهیل برای عملیات و پشتیبانی سیستم؛ یعنی کل هزینه در ماه، هزینه برای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات، و غیره.

۱۵-۴-۹- فاکتورهای منابع رایانه‌ای و نرم‌افزارهای نگه‌داری و تعمیرات

در بسیار از سیستم‌ها، نرم‌افزارها تبدیل به یکی از عناصر اصلی سیستم شده‌اند. این موضوع به‌خصوص جایی که خودکارسازی، رایانه، پایگاه‌های داده دیجیتال و موارد مشابه وجود دارد در انجام وظایف تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزار می‌تواند

از نظر سطح زبان یا پیچیدگی، تعداد برنامه‌های کاربردی، طول برنامه بر پایه تعداد خطوط کدنویسی شده، هزینه هر زیر روتین نگه‌داری و تعمیرات، یا برخی از موارد مشابه ارزیابی شود.

مانند تجهیزات، قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات و کیفیت ملاحظات اصلی در توسعه نرم‌افزار هستند. اگرچه نرم‌افزار مانند تجهیزات مستهلک نمی‌شود، اما قابلیت اطمینان یک نرم‌افزار کماکان مهم است و باید اندازه‌گیری شود. مباحث زیادی در مورد اندازه‌گیری قابلیت اطمینان نرم‌افزار وجود دارد و هنوز توافق کاملی در مورد شاخص‌های مشخص یا سطوح عملکرد قابل قبول وجود ندارد؛ با این حال، یکی از تعاریف قابلیت اطمینان نرم‌افزار بدین صورت است: "احتمال انجام عملیات یک جزء نرم‌افزار یا سیستم در یک محیط مشخص در یک زمان معین بدون ایجاد هر گونه خرابی". یک خرابی به‌صورت انجام عملیات غیرمجاز و خارج از نیازمندی‌های برنامه تعریف می‌شود.

همیشه خطاهایی در توسعه اولیه نرم‌افزار رخ می‌دهد و قابلیت اطمینان نرم‌افزار تابعی از تعداد خطاهای موجود در نرم‌افزار که رفع نشده‌اند خواهد بود. چنین خطاهایی می‌تواند به‌عنوان منطق نادرست یا حذف شده، کامنت نگذاشتن، مشکلات ادغام، مشکلات محاسباتی، یا مشکلات عمومی مستندسازی دسته‌بندی شود. اغلب، شاخص کلی به‌صورت تعداد خطاها در هر ۱۰۰۰ خط کد نویسی شده محاسبه می‌شود. زبان‌های سطح بالاتر احتمالا خطاهای کم‌تری خواهند داشت، زیرا تعداد خطوط کد نویسی کم‌تری نیاز دارند (در مقایسه با زبان‌های برنامه نویسی سطح پایین). در مقابل، پیچیدگی زبانی در پردازش ممکن است اتفاق بیافتد.

در مشخصات فنی و توسعه نرم‌افزار سیستم، فاکتورهای اندازه‌گیری باید تعریف شده و سیستم باید هم از نظر پوشش فاکتورهای تجهیزات و کارکنان و از نظر فاکتورهای نرم‌افزار مورد ارزیابی قرار گیرد. نیازمندی‌های منابع پشتیبانی تدارکات برای کل سیستم شامل ملاحظات تجهیزات، کارکنان، تسهیلات، داده‌ها، موارد مصرفی و نرم‌افزارها می‌شود.

۱۵-۴-۱۰- فاکتورهای داده‌های فنی و سیستم اطلاعات

در سال‌های اخیر، زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات با ظهور رایانه و نرم‌افزارهای مربوطه، دسترسی به شبکه‌های اطلاعاتی (LAN و WAN)، ظهور تبادل الکترونیکی اطلاعات (EDI)، و روش‌های تجارت الکترونیک (EC)، و فناوری‌های مربوطه به طرز قابل توجهی تکامل یافته است. اهداف عبارت‌اند از (۱) ساده‌سازی وظیفه تولید و پردازش داده‌های فنی از طریق بسته‌بندی بهتر، حذف افزونگی‌ها، کاهش زمان‌های پردازش و در دسترس قرار دادن اطلاعات برای همه سازمان‌هایی که به اطلاعات نیاز دارند؛ (۲) فراهم کردن یک مکانیسم برای وضوح بیش‌تر دارایی‌های مربوط به رهگیری اجزای در حال انتقال و مکان آیتم‌ها در انبار؛ (۳) فراهم کردن روش‌های سریع برای معرفی تغییرات طراحی و پیاده‌سازی بهتر نیازمندی‌های ساختار مدیریت؛ و (۴) ایجاد ارتباطات سریع‌تر، دقیق‌تر، به موقع، و قابل اتکا بین چند نقطه به‌صورت هم‌زمان.

در حالی‌که بهبود فرایندهای ارتباطی از طریق جریان توزیع داده‌ها یک هدف است، اما باید دقت شود که از این اطلاعات در مقابل افرادی که نباید به آن‌ها دسترسی داشته باشند، حفاظت شود. به ویژه در بخش دفاع تاکید زیادی بر حفاظت اطلاعات وجود دارد که می‌توان بدین صورت آن را تعریف کرد "قابلیت فراهم کردن یک چارچوب برای تعامل کامل افراد که (۱) به همه افراد DOD و شرکا اجازه داده شود که اطلاعات موردنیاز را به اشتراک گذارند، و (۲) محافظت از اطلاعات درمقابل افرادی که نباید به آن‌ها دسترسی داشته باشند."

عصر اطلاعات اثر عمده‌ای بر تدارکات داشته و برخی شاخص‌های کاربردی شامل موارد زیر می‌شود:

۱. ***زمان پاسخ تدارکات:*** زمانی که از نقطه‌ای که یک نیازمندی پشتیبانی سیستم شناسایی می‌شود تا آن نیازمندی رفع شود، سپری می‌شود (این زمان می‌تواند شامل زمان موردنیاز برای تهیه و تدارک یک آیتم جدید، زمان ارسال آیتم از انبار به محل موردنیاز، زمان لازم برای اکتساب کارکنان یا تجهیزات آزمایش موردنیاز برای نگه‌داری و تعمیرات و غیره شود).

۲. ***زمان دسترسی به داده‌ها:*** زمان مکان‌یابی و دست‌یابی به عنصر اطلاعاتی/داده‌ای موردنیاز.

۳. ***زمان مکان‌یابی آیتم:*** زمان موردنیاز برای مکان‌یابی دارای، چه در حال استفاده باشد، چه در حال انتقال و چه در انبار باشد (پایش دارایی).

۴. ***زمان پردازش اطلاعات:*** زمان موردنیاز برای پردازش یک پیام.

۵. ***زمان پیاده‌سازی یک تغییر:*** زمان پردازش و پیاده‌سازی یک تغییر در طراحی.

۶. ***هزینه:*** هزینه انتقال یک بیت داده، هزینه هر اخلال در دست‌یابی به داده‌ها و غیره.

اخیرا تلاش زیادی در رابطه با قابلیت شناسایی، مکان‌یابی و رهگیری سریع عناصر سیستم و اجزای آن در زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات صورت گرفته است. این موضوع منجر به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های خودکار اطلاعات (AIT) و توسعه روش‌های بارکد کردن، شناسایی تگ فرکانس رادیویی فعال و غیرفعال (RFID)، و GPS شده است. هدف نهایی فراهم کردن اطلاعات لازم در مورد وضعیت فعلی یک آیتم به‌صورت قابل اتکا و به‌موقع و ساده‌سازی بیش‌تر فرایندهای پشتیبانی و تدارکات، همراه با افزایش اثربخشی و کارایی درتسهیل پشتیبانی چرخه‌ی عمر سیستم است. به ویژه، کاربرد فناوری‌های RFID در ۵ سال اخیر به‌صورتی نمایی افزایش یافته است.

۱۵-۵- تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری وتعمیرات در چرخه‌ی عمر سیستم

زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات عبارتست از آن عناصر و فعالیت‌های مربوطه که در قسمت ۱۵-۱ و شکل‌های ۳-۱۴، ۱۵-۱ و ۱۵-۲ تشریح شده است. این موضوع شامل تدارکات زنجیره‌ی تامین و پایداری پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات سیستم در چرخه‌ی عمر سیستم می‌شود. این وظایف باید به‌صورت یک واحد ادغام شده مورد بررسی قرار گیرد.

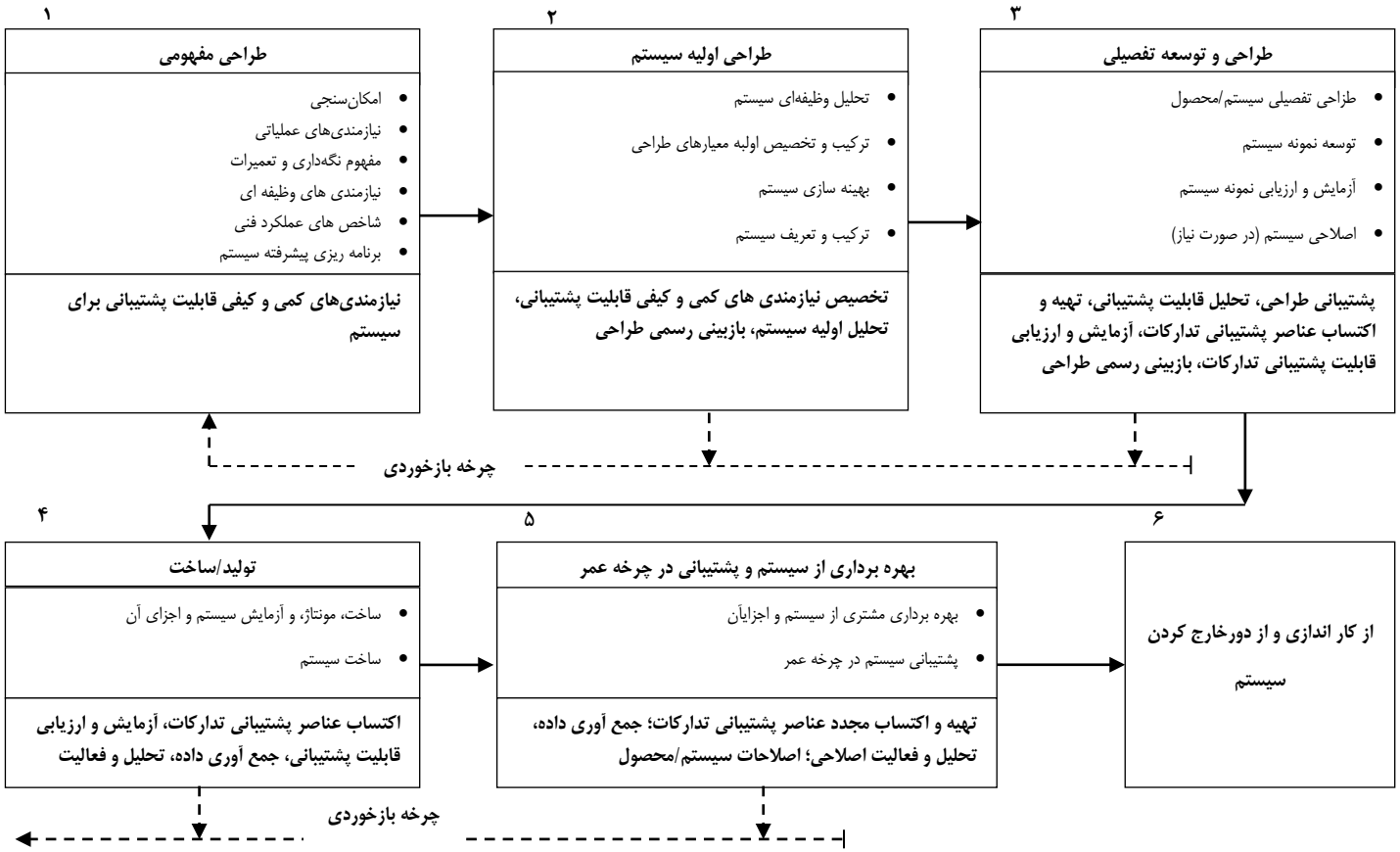
نیازمندی پایه‌ای زیرساختار از نیازمندی کلی سطح سیستم نشات می‌گیرد (قسمت‌های ۳-۳ تا ۳-۷) و باید طی فاز طراحی مفهومی توسعه یافته و در طراحی اولیه سیستم اختصاص یابد. در اینجا خصوصیاتی (صفاتی) وجود دارند که باید به این نیازمندی‌های سیستم پاسخ داده و به‌عنوان بخشی از طراحی مشارکت داشته باشند، نه تنها برای عناصر اصلی مربوط به ماموریت سیستم، بلکه برای همه‌ی عناصر زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات. به‌عبارت دیگر، نیازمندی‌های طراحی برای قابلیت پشتیبانی باید برای هر دوی این موارد قابل اعمال باشند: (۱) عناصر اصلی سیستم تا تضمین شود که می‌توانند به‌صورتی اثربخش و کارا پشتیبانی شوند، و (۲) جنبه‌های گوناگون و زیرساختار پشتیبانی برای حصول اطمینان از آن‌که می‌توانند نیازمندی‌های ضروری چرخه‌ی عمر را برای سیستم برآورده کنند.

با مراجعه به شکل ۱۵-۱۰، نیازمندی‌های مربوط به طراحی برای قابلیت پشتیبانی باید از ابتدا همراه با نیازمندی‌های قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی و ایمنی، قابلیت تولید، قابلیت حفاظت، قابلیت امحا و غیره مدنظر قرار گیرند. تحلیل‌های موازنه می‌تواند در میان این نیازمندی‌های متنوع طراحی انجام گیرد. با داشتن این نیازمندی‌های اصلی طراحی، ساختار نهایی سیستم از طریق فازهای طراحی اولیه سیستم و طراحی و توسعه تفصیلی تکامل می‌یابد. با شکل‌گیری ساختار طراحی، فرایند تکرار شونده تحلیل قابلیت پشتیبانی(SA) با این اهداف پیاده‌سازی می‌شود: (۱) شناسایی نیازمندی منابع تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات

برای سیستم؛ و (۲) ارزیابی طراحی کلی نسبت به درجه قابلیت پشتیبانی صفات قرار داده شده در طراحی. با تکامل فرایند طراحی، بازبینی‌های دوره‌ای طراحی صورت می‌گیرد. درنهایت، نیازمندی‌های قابلیت پشتیبانی برای سیستم از طریق آزمایش و ارزیابی کل سیستم که در فصل ۶ بحث شد، تصدیق اعتبار می‌شود.

۱۵-۵-۱- نیازمندی‌های سیستم

نیازمندی‌های سطح سیستم در ابتدا از طریق توسعه نیازمندی‌های عملیاتی سیستم (قسمت ۳-۴) و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات (قسمت ۳-۵) تعریف شد. از این نیازمندی‌های پایه‌ای، شاخص‌های عملکرد فنی(TPM) شناسایی و اولویت‌بندی گردد (قسمت ۳-۶). فاکتورهای کمی طراحی همراه با درجه اهمیت آن‌ها درطراحی تشریح گردید. در این فاکتورها، مواردی وجود دارند که مربوط به زیر ساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات هستند، در غیر این‌صورت به‌عنوان *فاکتورهای عملکردی تدارکات*(PBL) شناخته خواهند شد. این فاکتورهای PBL نیازمندی‌های طراحی برای پیاده‌سازی اهداف *طراحی برای قابلیت پشتیبانی* را نمایش می‌دهند.



شکل ۱۵- ۱۰- پشتیبانی تدارکات در چرخه‌ی عمر سیستم (به شکل ۲-۲ مراجعه کنید)

شکل ۱۵–۱۱ یک رابطه سلسله مراتبی را نشان می‌دهد که در آن نیازمندی‌ها در سطح سیستم به نیازمندی‌های زیرساختار پشتیبانی تبدیل شده که به‌نوبه‌ی خود منجر به نیازمندی‌های عناصر مختلف پشتیبانی می‌شود. در سطح سیستم (برای مثال)، چنین نیازمندی‌هایی شامل برخی شاخص‌ها مانند هزینه–*اثربخشی*، *اثربخشی سیستم*، *دسترسی‌پذیری عملیات* (A_o)، *زمان از کار افتادگی* (MDT)، و موارد مشابه می‌شود. برای برآورده شدن نیازمندی‌های کلی سیستم، باید برخی نیازمندی‌ها برای طراحی زیرساختار پشتیبانی وجود داشته باشد تا سیستم ماموریت کلی خود را به سرانجام برساند. با مراجعه به شکل ۱۳–۹، چنین نیازمندی‌هایی باید هم جنبه‌های فنی و هم جنبه‌های اقتصادی را پوشش دهد.

۱۵–۵–۲– تخصیص نیازمندی‌ها

با مراجعه به قسمت‌های ۳–۷–۲ و ۴–۳–۲، هدف از تخصیص، ترجمه نیازمندی‌های سطح سیستم به معیارهای طراحی در سطوح پایین‌تر است. با مراجعه به شکل ۱۵–۱۱، برای مثال، *اگر یک نیازمندی اثربخشی کمی تعیین شده‌ای برای زیر ساختار تدارکات و نگه‌داری و تعمیرات (به‌طورمثال پاسخ‌دهی تدارکات) وجود داشته باشد، چه چیزی باید برای عناصر مختلف پشتیبانی (یعنی قطعات یدکی، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، کارکنان نگه‌داری و تعمیرات، تسهیلات و غیره) در قالب فاکتورهای کمی طراحی مشخص گردد؟* باید تعدادی اهداف کمی طراحی تعیین شده باشد که وقتی اعمال می‌شود بتواند به برآورده شدن نیازمندی‌های کلی سطح سیستم کمک کند. اگرچه نیازمندی‌ها در این سطوح پایینی از یک مورد به دیگری می‌تواند بسیار متفاوت باشد، اما برخی مثال‌ها دراینجا ذکر شده است:

۱. بهره‌برداری از تجهیزات آزمایشی در کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی باید حداقل ۸۰٪ بوده و قابلیت اطمینان تجهیز آزمایش باید حداقل ۹۰٪ باشد.

۲. قابلیت خود آزمایشی سیستم باید ۹۵٪ یا بهتر باشد.
۳. سطوح مهارت کارکنان در سطح سازمانی نگه‌داری و تعمیرات باید در درجه x یا پایین‌تر باشد.
۴. تسهیل نگه‌داری و تعمیرات در سطح میانی باید برای حداقل ۷۵٪ کاربری طراحی شود.
۵. زمان حمل و نقل بین مکانی که نگه‌داری و تعمیرات سازمانی انجام می‌شود و کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی بیش از ۴ ساعت نباشد.
۶. زمان بازگردانی در کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی باید ۲ روز یا کم‌تر باشد و در تسهیل نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده/مبدا کم‌تر از ۱۰ روز باشد.
۷. احتمال دسترسی‌پذیری قطعات یدکی در سطح سازمانی نگه‌داری و تعمیرات باید حداقل ۹۵٪ باشد.

در شکل ۱۵–۱۱، بسیاری از شاخص‌های مربوط به عناصر پشتیبانی، که در قسمت ۱۵–۴ تشریح شد، به‌صورت خلاصه ارائه شده است. بسته به نوع سیستم، ساختار آن، و ماموریتش، فاکتورهای متنوعی قابل استفاده است.

شکل ۱۵- ۱۱- شاخص‌های عملکرد فنی منتخب برای زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات.

۱۵-۵-۳- بازبینی و ارزیابی طراحی

انجام یک بازبینی طراحی در مورد خصوصیات قابلیت پشتیبانی به‌عنوان بخشی از فرایند تشریح شده درقسمت‌های ۳-۱۰، ۴-۸، و ۵-۸ انجام می‌گیرد. چنین بازبینی‌هایی هم عناصر اصلی مرتبط با ماموریت سیستم برای حصول اطمینان از این‌که به‌صورت اثربخش و کارا قابل پشتیبانی طراحی می‌شوند و هم طراحی برای زیرساختار تدارکات و پشتیبانی سیستم برای حصول اطمینان از پاسخ مناسب در برآورده سازی همه نیازمندی‌های سیستم را پوشش می‌دهد. اگر نیازمندی‌ها برآورده شده باشد، طراحی تایید شده و به فاز بعدی وارد می شویم. اگرنه، تغییرات لازم در نظر گرفته شده و فعالیت‌های اصلاحی انجام می‌گیرند.

درانجام یک بازبینی قابلیت پشتیبانی، یک چک لیست را می‌توان توسعه داد تا فرایند بازبینی تسهیل شود. یک فهرست خلاصه در ادامه فراهم شده است. باید توجه شود که جواب همه سوالات باید *بله* باشد.

۱. آیا وظایف اصلی تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات برای کل چرخه‌ی عمر سیستم به حد کفایت تعریف شده است؟ این موضوع شامل یک رویکرد نمایش داده شده مانند شکل ۱۵-۱ می‌شود.
۲. آیا وظایف پایه‌ای زنجیره‌ی تامین به‌درستی شناسایی و تعریف شده است؟ (مشابه شکل ۱۵-۲).
۳. آیا مفهوم نگه‌داری و تعمیرات به حد کفایت تعریف شده است؟ این قسمت شامل یک تعریف از سطوح نگه‌داری و تعمیرات و وظایف اصلی که درهرسطح انجام می‌شود است (مشابه شکل ۳-۱۴).
۴. آیا شاخص‌های عملکرد فنی (TPM) مناسب درسطح سیستم معرفی شده است تا به‌طورمستقیم منجر به استقرار فاکتورهای PBL برای زیرساختار تدارکات و پشتیبانی

نگه‌داری و تعمیرات و عناصر مختلف آن شود؟ هدف فراهم کردن اهداف مناسب کمی طراحی برای وظایف تدارکات و وظایف پایداری پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات است.

۵. آیا یک تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA) از طریق فرایند طراحی و توسعه سیستم و استقرار اولیه نیازمندی‌های پشتیبانی سیستم طی فاز طراحی مفهومی انجام گرفته است؟ به قسمت ۱۵–۶ مراجعه کنید.

۶. آیا تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA) به‌طورمستقیم از مفهوم نگه‌داری و تعمیرات تکامل یافته است؟ این موضوع به قابلیت رهگیری از مفهوم نمایش داده شده در شکل ۳–۱۴ و تعمیم نیازمندی‌های نشان داده شده در این شکل اطلاق می‌شود.

۷. آیا بسته اطلاعاتی تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA)(یعنی اطلاعات مدیریت تدارکات (LMI)) طراحی برای قابلیت پشتیبانی سیستم را پشتیبانی می‌کند؟ این موضوع شامل نتایج مطالعات موازنه طراحی می‌شود که تصمیم‌های مربوط به قابلیت پشتیبانی پیاده‌سازی می‌شود.

۸. آیا تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA) به حد کفایت منجر به شناسایی و تعریف همه نیازمندی‌های منابع تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات برای چرخه‌ی عمر سیستم می‌شود (یعنی کارکنان نگه‌داری و تعمیرات، قطعات یدکی/تعمیری و موجودی‌های مربوطه، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات، آموزش و پشتیبانی آموزش، بسته‌بندی و حمل و نقل، منابع رایانه‌ای و نرم‌افزارهای نگه‌داری و تعمیرات، و داده‌های فنی و اطلاعات تدارکات)؟

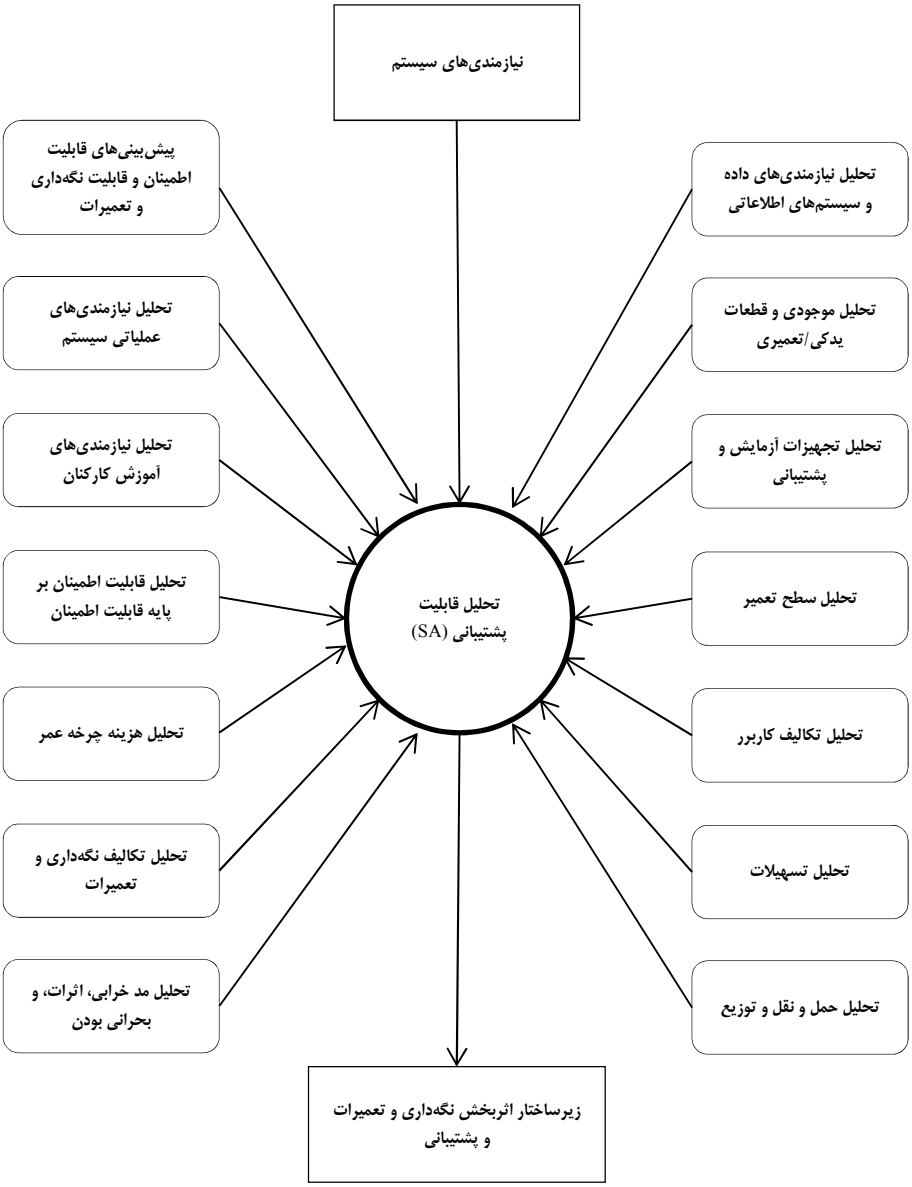
۹. آیا تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA) شامل ادغام مناسب مدل‌ها مختلف و تحلیل نتایج در تکمیل اهداف SA می‌شود؟ هدف حصول اطمینان از ادغام مناسب فعالیت‌های نشان داده شده در شکل ۱۵–۱۲ است.

۱۰. آیا نیازمندی‌ها از نظر نوع و تعداد برای هر سطح تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات برای موارد زیر تعریف شده است؟

a. کارکنان نگه‌داری و تعمیرات
b. قطعات یدکی/تعمیری و موجودی‌های مربوطه
c. تجهیزات آزمایش و پشتیبانی
d. تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات
e. آموزش و پشتیبانی آموزش
f. بسته‌بندی، جابه‌جایی و حمل و نقل
g. منابع رایانه‌ای و نرم‌افزارهای نگه‌داری و تعمیرات
h. داده‌های فنی و اطلاعات تدارکات

۱۱. آیا نیازمندی‌های مناسب برای طراحی (معیارها) برای زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات و عناصرش تعیین شده است؟ این موضوع به استقرار مناسب نیازمندی‌ها برای طراحی (فاکتورهای PBL) مربوط به تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات، بسته‌بندی و حمل و نقل و غیره بستگی دارد.

سوالات در اینجا نماینده حوزه‌های عمومی مربوط به طراحی برای قابلیت پشتیبانی است. برای سوالات دقیق‌تر درمورد بازبینی طراحی در این حوزه و حوزه‌های مربوطه به پیوست ب مراجعه کنید.



شکل ۱۵- ۱۲- تحلیل قابلیت پشتیبانی و تحلیل‌های تکمیلی.

۱۵-۶- تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA)

تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA)، ادغام و اعمال روش‌ها/تکنیک‌های تحلیلی مختلف برای حل مسائل گسترده‌ای را تشکیل می‌دهد. SA و کاربرد آن فرایندی است که به‌صورت تکرارشونده در سرتاسر طراحی و توسعه سیستم به‌کار رفته و موضوع قابلیت پشتیبانی را هم از نقطه‌نظر طراحی سیستم و هم از جهت منابع موردنیاز تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات برای پایداری پشتیبانی در چرخه‌ی عمر سیستم، مورد بررسی قرار می‌دهد. SA یک بخش مهم در فرایند مهندسی سیستم که در شکل ۲-۴ نشان داده شد است.

هدف فرایند تحلیل قابلیت پشتیبانی، که رویکرد کلی برای تحلیل سیستم (شکل ۳-۲۶) را دنبال می‌کند، عبارتست از (۱) تاثیر گذاری اولیه بر طراحی یک سیستم معلوم، و (۲) کمک به شناسایی منابع تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات بر پایه پیکربندی فرض شده برای طراحی. اهداف خاص SA عبارت‌اند از

۱. کمک به استقرار اولیه نیازمندی‌های قابلیت پشتیبانی طی طراحی مفهومی. در انتخاب رویکردهای ممکن فناورانه که به‌عنوان بخشی از تحلیل امکان‌سنجی (قسمت ۳-۳) انجام می‌شود، فاکتورهای مربوط به قابلیت پشتیبانی باید در فرایند تصمیم گیری مورد بررسی قرار گیرند. گزینه‌ها باید از نقطه‌نظر کل چرخه‌ی عمر مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲. کمک به استقرار اولیه معیارهای قابلیت پشتیبانی طراحی (به‌عنوان یک ورودی در فرایند طراحی) از طریق توسعه نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات، شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های عملکرد فنی (TPM و فاکتورهای PBL)، و انجام یک تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای (به قسمت‌های

۳-۴ تا ۳-۷ مراجعه کنید). چنین معیارهایی می‌تواند شامل نیازمندی‌های مشخصات فنی کمی (TPM و فاکتورهای PBL کاربردی) و کیفی (غیرکمی) باشد.

۳. کمک به فرایند ترکیب، تحلیل و بهینه‌سازی طراحی از طریق انجام مطالعات موازنه‌ای و ارزیابی گزینه‌های متعدد. این موضوع می‌تواند شامل ارزیابی مواد جایگزین، طرح‌های بسته‌بندی جایگزین، سیاست‌های تعمیری جایگزین، روش‌های دستی در مقابل خودکار، رویکردهای تشخیص خطا و آزمایش جایگزین، روش‌های بسته‌بندی و حمل و نقل جایگزین، و غیره باشد.

۴. کمک به ارزیابی ساختار یک طراحی مشخص در رابطه با تعیین نیازمندی‌های منابع تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات. هنگامی که نیازمندی‌های سیستم شناخته شوند و داده‌های طراحی در دسترس باشد (طی فازهای طراحی اولیه سیستم و طراحی و توسعه تفصیلی)، این امکان وجود دارد که نیازمندی‌های تدارکات و نگه‌داری و تعمیرات از جهت تعداد و سطوح مهارت کارکنان، آموزش کارکنان، قطعات یدکی/تعمیری و موجودی‌های مربوط، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات، بسته‌بندی و حمل و نقل، منابع رایانه‌ای و نرم‌افزارهای نگه‌داری و تعمیرات، و داده‌ها و اطلاعات فنی تعیین شوند. از طریق فرایند SA، کاندیدهای جایگزین برای پشتیبانی سیستم ارزیابی می‌شوند که منجر به توسعه یک پیکربندی از زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات می‌شود. نتایج عموما به‌صورت بسته اطلاعاتی *اطلاعات مدیریت تدارکات* (LMI) ادغام می‌شود.

۵. کمک به اندازه‌گیری و ارزیابی یک سیستم عملیاتی برای تعیین اثربخشی کلی و درجه‌ای که سیستم هنگام کار در محیط کاربر قابل پشتیبانی است. *با داشتن یک قابلیت عملیاتی کامل، آیا سیستم می‌تواند به‌صورت اثربخش و کارا طی چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده*

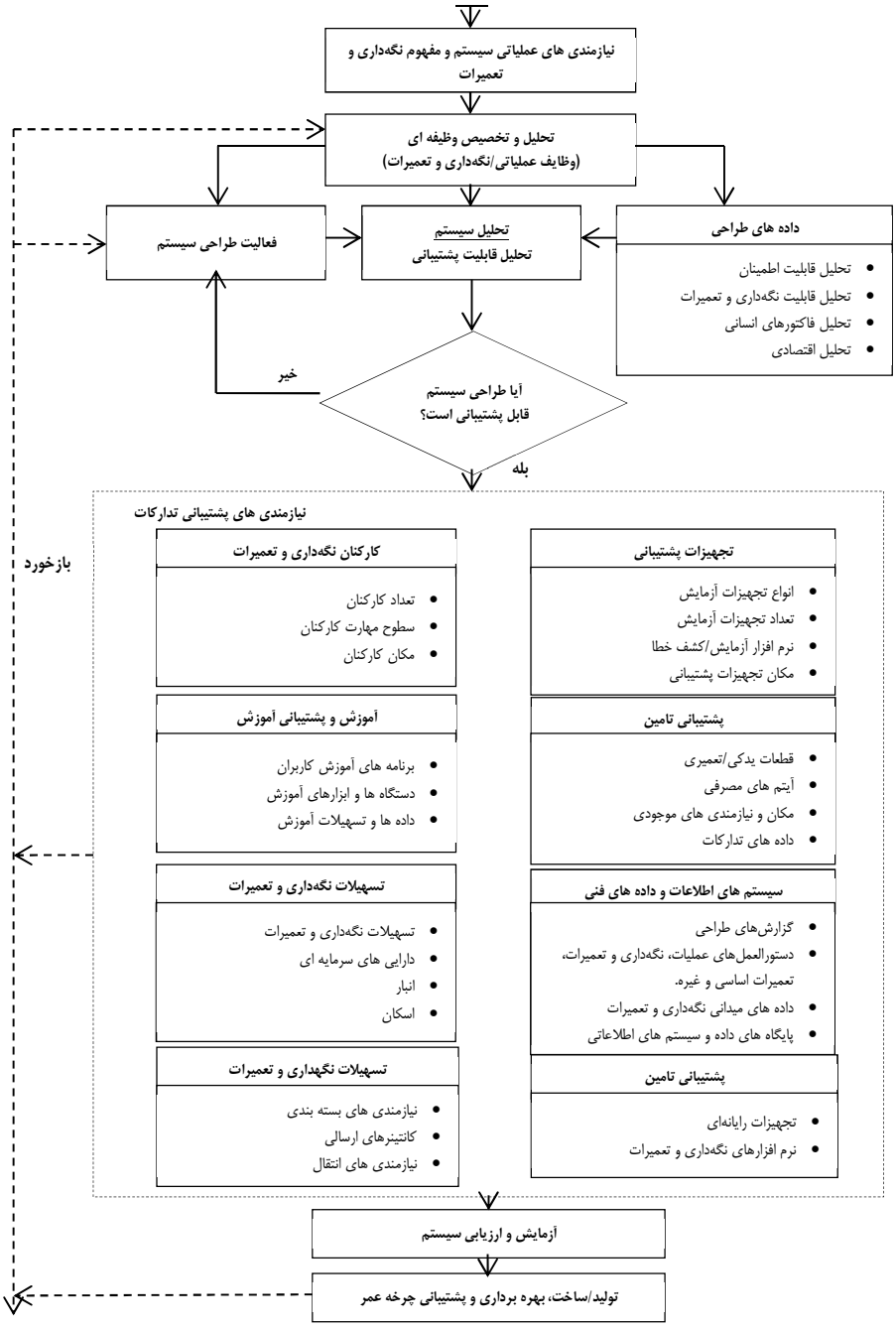
پشتیبانی شود؟ داده‌های میدانی جمع آوری و ارزیابی شده و نتایج تحلیل می‌شود و با نیازمندی‌هایی که از قبل برای سیستم تعیین شده‌اند، مقایسه می‌گردد. در این‌جا هدف، نه تنها تصدیق اعتبار این موضوع است که سیستم ماموریتش را موفقیت‌آمیز به انجام می‌رساند، بلکه شناسایی حوزه‌های پرریسک/پرهزینه و مشارکت هرگونه اصلاح الزامی به‌عنوان بخشی از بهبود مستمر *فرایند/محصول*(CPPI) است.

تکمیل موفقیت‌آمیز تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA) به استفاده از ابزارهای تحلیلی مختلف در انجام موازنه‌های طراحی و در توسعه بسته اطلاعاتی LMI برای سیستم مورد بررسی، بستگی دارد. شکل ۱۵–۱۲ برخی از نیازمندی‌های ورودی را نشان می‌دهد، اگرچه حد و عمق کاربرد باید بسته به نیازمندی‌های سیستم تنظیم شود. برای مثال، نتایج تحلیل‌های قابلیت اطمینان (پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان، FMECA، و FTA)، تحلیل‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (پیش‌بینی‌های قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، RCM، LORA، و MTA)، و تحلیل‌های فاکتورهای انسانی (OTA، OSD، ایمنی/خطر، و خطا)، همراه با تحلیل‌های اقتصادی و چرخه‌ی عمر (LCCA)، که در فصول ۱۲–۱۴ تشریح شد، ورودی‌های موردنیاز SA است. بار دیگر، تنظیم درست چنین روش‌هایی با عمق مناسب حیاتی است.

جریان فرایند تحلیل قابلیت پشتیبانی و نتایج در شکل ۱۵–۱۳ نشان داده شده است. این شکل بر خروجی‌ها از جهت نیازمندی‌های منابع مربوط به زیر ساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات تاکید دارد که همراه با نتایج تشریح شده در یک پایگاه داده LMI و مکان‌های مختلف توزیع شده است. در مورد بسته‌بندی و قالب‌بندی داده‌ها، نیازمندی‌ها بسته به برنامه، ساختار سازمانی، نیاز برای اطلاعات (نوع و مقدار اطلاعات، تعداد مکان‌هایی که داده باید توزیع شود، قالب خاص، فراوانی، داده‌های بهنگام، و غیره)، و نیازمندی‌های گزارش‌دهی برنامه، می‌تواند بسیار متفاوت باشد. هدف فراهم کردن اطلاعات درست، در مکان درست و زمان درست

است. این هدف به‌نوبه‌ی خود نیازمند توسعه یک پایگاه داده است که به‌راحتی قابل دسترس بوده که در آن داده‌ها برای همه اعضای تیم طراحی به‌صورت هم‌زمان در دسترس باشد.

در گذشته، توسعه و پردازش داده‌های مربوط به تدارکات و حجم زیاد داده‌های تولید شده که به‌موقع و در دسترس نبوده و پرهزینه بوده است، مشکل بزرگی محسوب می‌شد. در نتیجه، مفهوم اکتساب مستمر و پشتیبانی چرخه‌ی عمر (CALS) در دهه ۸۰ میلادی پیاده‌سازی شد. CALS به کاربرد فناوری‌های رایانه‌ای در توسعه و پردازش داده‌ها، در یک قالب دیجیتال، و با اهداف کاهش زمان‌های آماده‌سازی و پردازش، حذف موارد اضافه، کوتاه کردن فرایند اکتساب سیستم، و کاهش هزینه‌های کلی برنامه مربوط می‌شود. کاربردهای خاص شامل انتشار خودکارسازی فنی، تهیه یک بسته داده برای تهیه و تدارک قطعات یدکی/تعمیری و توسعه محصولات داده‌ای در یک قالب دیجیتال می‌شود. یکی از اهداف توسعه برخی پایگاه‌های داده ادغامی سیستم است برای (۱) خدمت‌دهی به‌عنوان یک مخزن برای همه داده‌های تدارکات و دیگر داده‌های مربوط که از تحلیل قابلیت پشتیبانی تکامل می‌یابد، و (۲) فراهم کردن اطلاعات الزامی در زمان مناسب و در قالب مناسب برای نیازمندی‌های گزارش‌دهی برنامه‌های خاص.



شکل ۱۵- ۱۳- توسعه نیازمندی‌های تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات از طریق تحلیل قابلیت پشتیبانی.

۱۵-۷- آزمایش و ارزیابی قابلیت پشتیبانی

با طراحی سیستم و زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات آن، گام بعدی تصدیق اعتبار است؛ یعنی اعتبارسنجی آن‌که ساختار حاصل، نیازمندی‌های از قبل تعیین شده را برآورده می‌کند. این فرایند اعتبارسنجی در زمینه قابلیت آزمایش و ارزیابی سیستم که در فصل ۶ تشریح شد، انجام می‌شود. با مراجعه به شکل ۶-۲، هدف حصول درجه‌ای از اطمینان است که نیازمندی‌های سیستم برآورده شده است. این اعتبارسنجی تا جایی انجام می‌شود که روش‌های تحلیل (مانند شبیه‌سازی)، آزمایش نوع ۱، نوع ۲ و غیره قابل استفاده باشد. از طرف دیگر، بخش عمده‌ای از اعتبارسنجی (از آن‌جا که به پشتیبانی تدارکات بستگی دارد) می‌تواند تنها از طریق آزمایش‌های نوع ۲ تا ۴ صورت گیرد.

به‌عنوان آزمایش نوع ۲، همراه با دسترسی‌پذیری تجهیز نمونه، نرم‌افزار و دیگر عناصر اصلی سیستم، آزمایش‌های زیر باید انجام شود تا اعتبار سیستم سنجیده شود:

۱. ***آزمایش صلاحیت قابلیت اطمینان:*** عناصر مختلف سیستم به خصوصیات محیطی که توسط کاربر تجربه خواهد شد و به سناریوهای ماموریت سیستم که توسط کارکنان با سطوح مهارتی که برای انجام عملیات در فاز عملیاتی پیشنهاد شده است، انجام می‌شود مربوط می‌شود. با پیشرفت آزمایش، خرابی‌ها مشاهده، تحلیل و ثبت می‌شود (همان‌طور که در قسمت ۱۲-۵ تشریح شد). پس از انجام تعمیر مناسب، آزمایش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که زمان کافی برای تصدیق اعتبار MTBF موردنیاز عنصر سیستم سپری شود. از نتایج این آزمایش، فرد باید بتواند فراوانی نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی، مدهای خرابی اصلی و آثار/علل آن‌ها، و منابع پشتیبانی موردنیاز برای فعالیت تعمیری مختلف را تصدیق اعتبار کند.

۲. ***نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات:*** هدف در اینجا (همان‌طور که در قسمت ۱۳–۶ تشریح شد) آزمایش عناصر منتخب در محیط عملیاتی می‌باشد (یعنی آیا با تنظیمات واقعی کاربر نصب شده و عملیاتی است، ثابت یا متحرک، در کوهستان یا دشت، با شرایط جوی مناسب، با تعداد و سطح مهارت پیشنهاد شده کارکنان، رویه‌های عملیاتی و داده‌های نگه‌داری و تعمیرات و غیره است). در طی آزمایش، تکالیف مختلف تدارکات و نگه‌داری و تعمیرات (و توالی تکالیف) با استفاده از رویه‌های تایید شده نگه‌داری و تعمیرات شبیه‌سازی شده، زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات ثبت شده و منابع موردنیاز برای انجام این تکالیف روشن می‌شود؛ یعنی تعداد و سطوح مهارت کارکنان، ابزارها و تجهیزات آزمایش، قطعات یدکی/تعمیری، نیازمندی‌های بسته‌بندی و حمل و نقل، و غیره. شبیه‌سازی نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده با تحمیل یک خرابی در سیستم آغاز می‌شود (زمانی که کاربر عملیاتی/نگه‌داری و تعمیرات خارج از محدوده باشد)؛ سپس سیستم تا زمانی که نشانه خرابی اتفاق افتد ادامه یافته و پس از آن فعالیت‌های اصلاحی لازم مطابق با رویه‌های پیشنهاد شده اجرا می‌شود (به چرخه نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی در شکل ۱۳–۱ مراجعه کنید). در شبیه‌سازی یک تکلیف نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده (پیشگیرانه)، گام‌های نشان داده شده در شکل ۱۳–۷ دنبال می‌شود. در هر دو مورد، آزمایش با استفاده از یک اندازه نمونه از قبل تعیین شده از تکالیف ادامه می‌یابد تا مقادیر موردنیاز $\bar{M}ct, \bar{M}pt, \bar{M}$، MLH/OH، و نیازمندی‌های منابع پشتیبانی تصدیق اعتبار شود. از نتایج این آزمایش، فرد نه تنها باید بتواند درجه خصوصیات قابلیت نگه‌داری و تعمیرات که در طراحی را ارزیابی کند، بلکه باید کفایت منابع تدارکات که برای پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات سیستم نیاز است را ارزیابی کند.

۳. ***آزمایش و ارزیابی کارکنان:*** هدف در این جا (همان‌طور که در قسمت ۱۴-۶ تشریح شد) تصدیق اعتبار آن است که نیازمندی‌های پیشنهاد شده کارکنان برای پشتیبانی عملیات و نگه‌داری و تعمیرات سیستم کافی است؛ یعنی تعداد، سطوح مهارت، و دسته‌بندی‌های مناسب. نیازمندی‌های کارکنان در ابتدا از طریق تحلیل تکالیف کاربر (OTA) برای کاربران عملیاتی و تحلیل تکالیف نگه‌داری و تعمیرات (MTA) برای کاربران نگه‌داری و تعمیرات پیشنهاد می‌شود. کارکنان انتخاب شده برای آزمایش که نماینده‌یاعضای سازمان هستند، شناسایی می‌گردند، آموزش‌های مناسب پیشنهاد شده به آن‌ها داده می‌شود و سپس برای انجام تکالیف عملیاتی و/یا نگه‌داری و تعمیرات با استفاده از رویه‌های تایید شده، زمان‌بندی می‌شوند. توالی تکالیف تایید شده، حوزه‌های دارای مشکل همراه با خطاهای ایجاد شده توسط کارکنان مشاهده می‌شود، و رویه‌های مورد استفاده تایید می‌شوند. اگرچه برخی از این نیازمندی‌ها را می‌توان از طریق آزمایش قابلیت اطمینان و نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات تایید کرد، اما تکالیف دیگری ممکن است وجود داشته باشد به‌خصوص آن‌هایی که به‌شدت پیچیده هستند) که باید ارزیابی شوند. از نتایج این آزمایش، فرد باید بتواند نیازمندی‌های کارکنان و آموزش را تصدیق اعتبار کند؛ یعنی تعداد و سطوح مهارت کارکنان و کفایت نیازمندی‌های آموزش.

۴. ***انطباق تجهیزات آزمایش و پشتیبانی:*** ممکن است لازم باشد تا اطمینان حاصل شود که آیتم‌های مهم تجهیزات آزمایش و پشتیبانی وظایف موردنظر را به‌صورت اثربخش انجام دهند. برای این کار، آزمایش‌های خاص می‌تواند انجام شود تا انطباق بین تجهیزات آزمایش و عناصری از سیستم که باید پشتیبانی شوند، تایید گردد. این موضوع مخصوصا برای سیستم‌های الکترونیکی و ایستگاه‌های آزمایش بزرگ که برای

پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی/پیشگیرانه در کارگاه طراحی شده است مناسب است. از نتایج این آزمایش، فرد باید بتواند نیازمندی‌های عملکرد تجهیزات آزمایش، دقت آن‌ها، قابلیت اطمینان و واسطه‌های موردنیاز را تصدیق اعتبار کند. اگرچه برخی از این نیازمندی‌ها را می‌توان از طریق آزمایش قابلیت اطمینان و نمایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات تایید کرد، برخی تکالیف دیگری ممکن است وجود داشته باشد که باید ارزیابی شوند، مخصوصا در مورد رویه‌های آزمایش که پیچیده‌تر هستند.

۵. ***تصدیق اعتبار تدارکات:*** در طیف آزمایش‌های نوع ۲ و ۳، فرد می‌تواند فعالیت‌های منتخب (و توالی تکالیف) مربوط به خرید آیتم و جریان مواد، بسته‌بندی و حمل و نقل، و وظایف انبارش و کنترل موجودی را ارزیابی کند. اگرچه ارزیابی واقعی کل تدارکات (زنجیره‌ی تامین) و زیر ساختار پشتیبانی در این مرحله قابل انجام نیست، اما می‌توان یک نقطه شروع خوب در ارزیابی فرایند خرید؛ روش‌های مختلف برای بسته‌بندی، جابه‌جایی، و حمل و نقل؛ پردازش آیتم‌های منتخب برای انبارش؛ اثربخشی قابلیت داده/اطلاعاتی؛ و غیره را به‌دست آورد.

ارزیابی سیستم از طریق آزمایش نوع ۳ و ۴ ادامه پیدا می‌کند. با ادامه دادن آزمایش فرایند اعتبارسنجی معنادارتر می‌شود. برای نمونه، اولین فرصت برای یک ارزیابی خوب از زنجیره‌ی تامین تدارکات و زیرساختار پشتیبانی به‌عنوان یک کل، تا زمانی که فعالیت آزمایش نوع ۳ آغاز نشود اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه تنها تعدادی از فعالیت‌های تدارکات را می‌توان اجرا کرد. از طرف دیگر، یک اعتبارسنجی کامل از کل زیرساختار تدارکات و پشتیبانی می‌تواند تنها به‌عنوان بخشی از آزمایش نوع ۴ تکمیل می‌شود. در نهایت، به‌عنوان یک بخش تکمیلی از فرایند آزمایش و ارزیابی سیستم، فعالیت مستمر جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها و پیشنهادهای بعدی برای فعالیت اصلاحی هنگامی که یک نیازمندی خاص برآورده نشده است و/یا به منظور بهبود فرایند و/یا

محصول وجود خواهد داشت. حلقه ارزیابی و اصلاح سیستم در شکل ۶–۵ نشان داده شده و نیازمندی‌های اصلاح سیستم در قسمت ۶–۶ بحث شده است.

۱۵–۸– خلاصه فصل

این فصل موضوع تدارکات و قابلیت پشتیبانی را به‌صورت جامع در چرخه‌ی عمر سیستم مورد بررسی قرار می‌دهد؛ یعنی عبارت *مهندسی تدارکات و قابلیت پشتیبانی*. برای موفقیت در برآورده ساختن اهداف مهندسی سیستم‌ها که در سرتاسر این کتاب تشریح شده است، فرض آن است که فرد باید این دو مورد را مدنظر قرار دهد: (۱) وظایف مربوط به پشتیبانی در مورد ایجاد یک سیستم، و (۲) حفظ وظایف پشتیبانی در چرخه‌ی عمر سیستم پس از آن‌که سیستم عملیاتی شد. این موضوع هم به جریان رو به جلوی فعالیت‌ها در شکل ۱۵–۱ (برای شامل شدن فعالیت‌های لازم تدارکات و زنجیره‌ی تامین)، و هم جریان معکوس فعالیت‌ها مربوط به حفظ نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی سیستم طی دوره بهره‌برداری مربوط می‌شود.

همه نیازمندی‌های وظیفه‌ای باید در طی فرایند مهندسی سیستم به‌درستی بررسی شده و *طراحی برای قابلیت اطمینان* آن تلاش‌هایی را منعکس کند که برای حصول اطمینان از پوشش خصوصیات مناسب در ساختار نهایی طراحی سیستم در چرخه‌ی عمر موردنیاز است.

درگذشته وظایف تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات (که در شکل‌های ۳–۱۴ و ۱۵–۲ نشان داده شد) تا حدودی به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گرفتند. فعالیت‌های اولیه خرید و تامین به‌خوبی ادغام نمی‌شدند؛ وظایفی مانند جریان مواد در یک قابلیت تولیدی؛ حمل و نقل و انبار در اکثر موارد به‌صورت جدا مورد بررسی قرار می‌گرفتند؛ فعالیت‌های عمده زنجیره‌ی تامین مستقل از فعالیت‌های بعدی مربوط به حفظ نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی چرخه‌ی عمر در یک

سیستم مشخص؛ و بسیاری دیگر از وظایف به‌صورت عمل پس از وقوع برخورد می‌شد و در فرایند طراحی سیستم مدنظر قرار نمی‌گرفتند.

بر این اساس، این فعالیت‌های متنوع و متعدد از ابتدا به‌درستی ادغام نشده و با یک رویکرد سیستم به آن‌ها نگاه نمی‌شود و تصمیم‌های اصلی که اثر بزرگی بر زیرساختار بعدی تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات دارد، از ابتدا در طراحی بررسی نمی‌شوند. پیشنهاد می‌شود که (۱) وظایف و فعالیت‌های پوشش داده شده در این جا از یک نقطه‌نظر کلی و ادغامی سیستم پوشش داده شود؛ (۲) زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات به‌عنوان یک عنصر مهم از سیستمی که در حال توسعه است در نظر گرفته شود؛ و (۳) این زیرساختار در فرایند طراحی مهندسی سیستم از ابتدا بررسی شود (یعنی از طراحی مفهومی به بعد).

در نهایت، باید توجه شود که حجم زیادی از فعالیت‌های در حال افزایش تدارکات و پشتیبانی چرخه‌ی عمر سیستم وجود دارد، مخصوصا با افزایش جهانی شدن، برون‌سپاری و رقابت بین‌المللی. پیچیدگی بسیاری از سیستم‌هایی که امروزه معرفی می‌شوند در حال افزایش است، مخصوصا سیستم‌هایی که در یک ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS) قرار دارند. نیازمندی‌های تعامل و شبکه نسبت به گذشته بسیار بیش‌تر شده است. بنابراین، این موضوع که قواعد و مفاهیم تشریح شده در این کتاب بیش‌تر درک شده و به‌درستی پیاده شود بیش‌تر اهمیت پیدا می‌کند.

سوالات و مسائل

۱. تدارکات را چگونه تعریف می‌کنید؟ عناصر اصلی تدارکات کدامند؟

۲. تفاوت‌های اصلی بین تدارکات در حوزه تجارت و در حوزه دفاع کدامند؟ برخی وظایف/فعالیت‌هایی را که در هر دو بخش مشترک هستند، شناسایی کنید. برخی موارد اختلاف را ذکر کنید.

۳. منظور از زنجیره‌ی تامین (SC) و مدیریت زنجیره‌ی تامین (SCM) چیست و چه وظایف و فعالیت‌هایی در آن وجود دارد؟

۴. تدارکات چگونه با یک سیستم ارتباط پیدا می‌کند؟

۵. تدارکات چگونه در چرخه‌ی عمر سیستم قرار می‌گیرد؟

۶. متن به زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات رجوع می‌کند. این زیرساختار چیست و چه چیزهایی را شامل می‌شود؟

۷. منظور از طراحی برای قابلیت پشتیبانی چیست؟ چه زمانی از چرخه‌ی عمر سیستم باید مدنظر قرار گیرد؟ چرا این موضوع با اهمیت است؟

۸. توضیح دهید که چگونه طراحی برای قابلیت پشتیبانی به موضوعات زیر مرتبط می‌شود:
   a. طراحی برای قابلیت اطمینان
   b. طراحی برای قابلیت نگه‌داری و تعمیرات
   c. طراحی برای فاکتورهای انسانی

۹. چگونه تدارکات و طراحی برای قابلیت پشتیبانی با فرایند مهندسی سیستم ارتباط پیدا می‌کند؟

۱۰. حداقل سه شاخص قابل اعمال برای هر کدام از موارد زیر شناسایی کرده و آن را تشریح کنید:
   a. زنجیره‌ی تامین

b. خرید و جریان مواد
c. حمل و نقل و بسته‌بندی
d. انبارش و توزیع
e. سازمان نگه‌داری و تعمیرات
f. آموزش و پشتیبانی آموزش
g. قطعات یدکی، تعمیری و موجودی مربوطه
h. تجهیزات آزمایش و پشتیبانی
i. تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات
j. منابع رایانه‌ای و نرم‌افزارهای نگه‌داری و تعمیرات
k. داده‌های فنی و اطلاعات تدارکات

۱۱. چه فاکتورهایی در تعیین نیازمندی‌های پشتیبانی تامین، نیازمندی‌های تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، نیازمندی‌های کارکنان، نیازمندی‌های آموزش، نیازمندی‌های حمل و نقل و جابه‌جایی، نیازمندی‌های تسهیلات، و نیازمندی‌های داده‌های فنی، باید در نظر گرفته شود؟

۱۲. با فرض این‌که قابلیت اطمینان یک جزء در یک سیستم ۰/۸۵ بوده و یک قطعه یدکی پشتیبان برای آن مدنظر است، احتمال موفقیت سیستم با در دسترس بودن یک قطعه یدکی را در زمان t را به‌دست آورید.

۱۳. اگر در مساله ۱۲ فرض شود که قطعه اصلی با دو قطعه یدکی پشتیبانی می‌شود، احتمال موفقیت فرایند سیستم را به‌دست آورید.

۱۴. احتمال موفقیت سیستم با یک قطعه یدکی در دسترس برای یک ساختار شامل دو قطعه عملیاتی را که توسط دو قطعه یدکی پشتیبانی می‌شود، به‌دست آورید (قابلیت اطمینان هر قطعه عملیاتی و یدکی ۰/۸۷۵ است).

۱۵. ۱۰ سیستم در یک سایت برای انجام یک ماموریت ۲۰ ساعته زمان‌بندی شده‌اند. هر سیستم دارای MTBF برابر با ۱۰۰ ساعت است. با چه احتمالی حداقل ۸ سیستم در طی عملیات بدون خرابی عملیات خود را انجام می‌دهند؟

۱۶. یک تجهیز شامل ۳۰ قطعه مشابه است. فراوانی خرابی پیش‌بینی شده برای هر قطعه ۱۰۰۰۰ ساعت است. تجهیز ۲۴ ساعت در روز کار می‌کند و قطعات یدکی در بازه‌های ۹۰ روزه تدارک دیده می‌شوند. چه تعداد قطعه یدکی باید در انبار نگه‌داری شود تا احتمال موفقیت ۹۵٪ باشد؟

۱۷. تعداد سفارش اقتصادی (EOQ) برای دوباره پر کردن موجودی را به‌صورتی تعیین کنید که هزینه هر واحد ۱۰۰ دلار، هزینه آماده‌سازی برای ارسال و فرستادن یک کامیون به انبار ۲۵ دلار، هزینه تخمینی مدیریت یک آیتم در انبار ۲۵٪ ارزش موجودی انبار و تقاضای سالانه ۲۰۰ واحد باشد.

۱۸. کل هزینه دوره‌ای را هنگامی که تقاضا ۴ واحد، هزینه هر واحد ۱۲ دلار، هزینه تدارک ۱۶ دلار، و هزینه مدیریت موجودی ۲ دلار باشد، به‌دست آورید.

۱۹. ملاحظات عمده در تعیین تعداد سفارش اقتصادی (EOQ) کدامند؟ آیا قانون EOQ باید برای همه مواردی که قطعه یدکی/تعمیری برای آن نیاز است، اعمال شود؟ توضیح دهید.

۲۰. برخی قطعات یدکی اولویت (اهمیت) بیش‌تری نسبت به بقیه دارند. چه فاکتورهایی این اولویت را تعیین می‌کند؟ چه ملاحظاتی در تدارک این آیتم‌ها باید مورد بررسی قرار گیرد؟

۲۱. فرض کنید که یک کارگاه سطح میانی پر از تجهیزات آزمایش در اختیار دارید. چه گام-هایی باید دنبال شوند تا از کفایت این تجهیزات در گذر زمان اطمینان حاصل گردد؟

۲۲. نیازمندی‌های تجهیزات آزمایش و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات چگونه بر دسترسی‌پذیری عناصر اصلی سیستم اثر گذار است؟

۲۳. فرض کنید که از شما خواسته شده است که یک سازمان نگه‌داری و تعمیرات برای پشتیبانی سیستم را تنظیم کنید. چه فاکتورهایی را در نظر می گیرید؟ گام‌های موردنیاز را تشریح کنید. در ادامه این سازماندهی را از منظر اثربخشی چگونه ارزیابی می کنید (شاخص‌های مورد استفاده را شناسایی کنید)؟

۲۴. چه ملاحظاتی در انتخاب مد حمل و نقل (یاترکیبی از مدها) را مورد بررسی قرار می دهید؟

۲۵. چگونه طراحی بسته‌بندی بر قابلیت اطمینان سیستم اثرگذار است؟

۲۶. فرض کنید که شما مسئول طراحی و توسعه یک سیستم جدید هستید و این سیستم جدید در ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS) قرار دارد. برخی نیازمندی‌های طراحی در طراحی این سیستم جدید را ذکر کنید.

۲۷. برخی چالش‌ها در طراحی یک سیستم در ساختار سیستمی از سیستم‌ها (SOS) کدامند؟

۲۸. زیرساختار تدارکات و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات چگونه اعتبار سنجی می‌شود؟

۲۹. فناوری‌های جدید و کاربرد آن‌ها در ارتقای تدارکات و پشتیبانی سیستم را شناسایی کنید. مثال بزنید.

۱۶

طراحی برای قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت

قابلیت تولید و قابلیت امحا، پارامترهای وابسته به طراحی و مرتبط با هم هستند. این رابطه در ایجاد سیستم و از بین بردن آن تاثیر دارد. بین این دو حالت، موضوع قابلیت حفاظت وظایف و شکل سیستم در طی چرخه‌ی عمر و هم‌چنین قابلیت حفاظت محیطی که سیستم در آن کار می‌کند، مدنظر است.

خلق سیستم معادل دست‌یابی به درجه‌ای از سازماندهی و نظم است؛ متوقف کردن یک سیستم، بازگشت به حالت بی‌نظمی و نداشتن سازماندهی است، مانند مفهوم آنتروپی. درجه نظم نشان داده شده توسط سیستم مهندسی یک ظهور قابل توجه از طراحی سیستم است – طراحی که مسئول خروجی‌های مربوط به قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت است.

تولیدکنندگان عموما به قابلیت تولید بیش‌تر از قابلیت امحا و قابلیت حفاظت توجه می‌کنند زیرا قابلیت تولید از نظر ایجاد درآمد و تحت کنترل بودن سازمان بیش‌تر به چشم می‌آید. اما قابلیت امحا و قابلیت حفاظت بیش‌تر موضوعات مدنظر مشتری‌ها و قانون‌گذاران است. امحای سیستم و محصول، همراه با بازیافت ضایعات فرایندهای تولیدی یا ساخت، نیازمند توجه به طراحی محصول و فرایند هستند.

در این فصل، قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت به‌عنوان ملاحظات مهم طراحی ارائه شده‌اند که می‌توانند آثار قابل‌توجهی بر رضایت سهام‌داران و ذی‌نفعان داشته باشند. این خصوصیات در این فصل بیش‌تر به‌صورت توصیفی ارائه شده‌اند تا این‌که به‌صورت قاعده و قانون بیان گردند.

پس از اتمام این فصل، خواننده باید به درک درستی از فرصت‌های موجود در بررسی قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت پشتیبانی به‌عنوان جنبه‌های مهمی از مهندسی چرخه‌ی عمر سیستم دست یابد. موضوعات مورد بررسی در این فصل که باید مورد توجه قرار گرفته و درک شوند، شامل موارد زیر هستند:

- فاکتورهای فنی و اکولوژیکی برای ارتقای مهندسی سبز؛
- تولید برای کیفیت محیطی و اهمیت خدمات فنی و اکولوژیکی در دست‌یابی به مهندسی سبز و قابلیت حفاظت؛
- نقش طراحی و تولید آگاهانه محیطی (ECDM) در دست‌یابی به حفاظت محیطی؛
- تفاوت اثرها هنگامی که قابلیت تولید، امحا و حفاظت به‌صورت داخلی، خارجی یا هر دو در نظر گرفته می‌شود؛
- موضوعات تولید، بازتولید، بازیافت هنگامی که درطی چرخه‌ی عمر سیستم به‌وجود می‌آید، با تاکید بر ازکاراندازی، بازیافت، امحای زیر سیستم‌ها، اجزا و مواد؛
- برخی شاخص‌های کمی برای تولید و پیشرفت تولید و فاکتورهای در نظر گرفته شده در طراحی برای قابلیت تولید؛

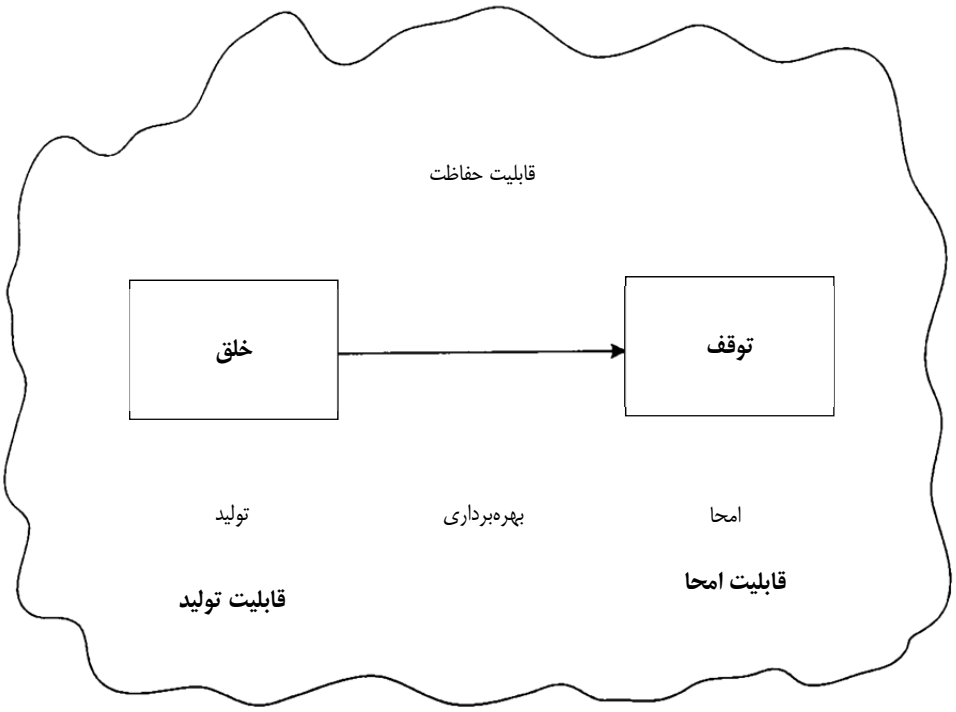
- منافع پیش‌بینی شده از ادغام قابلیت حفاظت در تولید، بهره‌برداری، از دور خارج کردن و امحا؛
- هزینه و درآمد چرخه‌ی عمر هنگامی که با ارزش کل سیستم مرتبط می‌شود، همراه با منابع پنهان درآمد و هزینه.

آخرین قسمت از این فصل خلاصه‌ای از مطالب ارائه شده در این فصل را ارائه می‌دهد و به جمع‌بندی موضوعات بحث شده می‌پردازد.

۱۶-۱- معرفی قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت

فرصت‌های بازار برای تولید (یا ساخت) کارای محصولات "سبز" یا "دوست محیط" در حال گسترش است. کلمه‌های کلیدی *کارا* و *سبز* هستند که الزام برای توجه به قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت به‌عنوان خصوصیات طراحی محصول را نیاز خواهد داشت. تولید یک موضوع داخلی برای تولیدکننده بوده و به‌طورمستقیم در دید مشتری نیست، اما قابلیت امحا و قابلیت حفاظت به‌طورمستقیم در دید جامعه قرار دارند.

شکل ۱۶-۱ تعاملات فراگیری را نشان می‌دهد که ایجاد، بهره‌برداری و توقف را شامل می‌شود. در همین زمان، نیاز برای قابلیت حفاظت سیستم که محصول (و خود سیستم) را تولید، پشتیبانی، حفظ و امحا کند، رو به افزایش است. بر این اساس، قابلیت حفاظت به‌صورت مفهومی به‌عنوان یک ملاحظه سطح بالا، شامل فرایندهای تولید، بهره‌برداری و امحا نشان داده شده است که آثار محیطی در آن مورد توجه است. اگرچه موضوعات محیطی مواردی خارجی برای تولیدکننده به حساب می‌آیند، توجه به این موضوعات برای جوامع جهانی رو به افزایش است.



شکل ۱۶- ۱- قابلیت پشتیبانی در چرخه‌ی عمر سیستم.

۱۶-۱-۱- خدمات فنی و اکولوژیکی

سیستم‌های فنی، منبع خدمات فنی هستند. این خدمات شامل جایگزین کردن انرژی به جای تلاش‌های انسانی است. این خدمات عبارت‌اند از تحویل مواد خوراکی مختلف مستقل از فصل و شرایط آب و هوایی محلی، تامین آب، اصلاح وضعیت هوای داخل ساختمان، ایجاد قابلیت‌های ارتباطی، خارج کردن مواد زائد و غیره. شهری شدن به‌خصوص در جوامع پیشرفته، زیرساختار وسیعی برای ارائه‌ی خدمات فنی را توسعه داده است که عبارت‌اند از تولید و توزیع برق، شبکه‌های ارتباطی، بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها، ساختمان‌های مسکونی و عمومی، مدیریت ضایعات و بسیاری موارد دیگر.

انسان‌ها هم‌چنین به خدمات اکوسیستم وابسته هستند. خدمات اکوسیستم شامل آن وظایفی از اکوسیستم‌ها می‌شوند که برای افراد مطلوب است که عبارت‌اند از حفظ تعادل جوی، کنترل مواد خوراکی، تولید مواد خوراکی و حفظ کیفیت هوا و آب. اگرچه این خدمات اغلب فراهم شده‌اند، افراد کم کم متوجه می‌شوند که بسیاری از وظایف سیستم‌های طبیعی غیرقابل تغییر نیستند. این سیستم‌ها تحت‌تاثیر فعالیت‌های انسانی و استفاده از فناوری‌های مختلف هستند.

تعریف یک خدمت اکوسیستمی موضوعی فردی و اجتماعی است؛ این موضوع به ارزیابی ذهنی بستگی دارد. با این حال، افرادی که با سیستم‌های طبیعی آشنا هستند در سمت‌های تصمیم‌گیری نیستند و با آن‌ها مشاوره صورت نمی‌پذیرد. ایجاد تعادل بین سیستم‌های مصنوعی و طبیعی به‌سختی به‌دست می‌آید، اما در صورتی که خصوصیات سیستم‌های طبیعی مانند جنبه‌های فیزیکی سیستم‌ها فنی شناخته شوند، ایجاد این تعادل تسهیل می‌شود.

برای پاسخ به نیازهای اجتماعی، عوامل قانون‌گذاری مانند آژانس حفاظت از محیط ایالات متحده، اداره کل غذا و دارو، و دیگر موارد مشابه توسط دولت شکل گرفته‌اند تا موضوعات کیفیت محیطی مورد ارزیابی قرار گیرند. از آن‌جا که تصمیم‌های قانونی یک اجبار برای در نظر گرفتن موضوعات خارجی در طراحی محصولات و خدمات است، این موضوعات آثار اقتصادی و اجتمالی دور از دسترسی دارند و باید با احتیاط و هوشمندانه تصمیم‌گیری شوند.

۱۶-۱-۲- فاکتورهای‌ترویج دهنده مهندسی سبز

از طریق تولید یا ساخت است که فناوری توسط انسان به‌کار گرفته می‌شود. اما سبز بودن هدفی نیست که به‌راحتی به‌دست آید. با این حال، این موضوع باید یکی از اهداف تولیدکننده برای کاهش مستمر آثار محیطی محصولات، عملیات تولیدی، بهره‌برداری و امحا باشد. بهبود محیطی اثربخش و پایدار نیازمند یک رویکرد چرخه‌ی عمر سیستم است تا تصمیم‌های طراحی و

سیاست‌های عملیاتی را هدایت کند. قابلیت حفاظت سیستم و محصولش، فرایند تولید و امحای سیستم و محصول فاکتورهایی هستند که ارزش خالص نهایی به آن‌ها وابسته است.

ارزش استفاده مجدد اجزا و مواد بازیابی شده از اکثر محصولات در هنگام امحا، اغلب رابطه‌ی کوچکی با هزینه‌ی اولیه تولید دارد. بر این اساس، ترغیب تولیدکننده و اولین خریدار به ایجاد تغییر در محصول برای بهبود محصول به منظور بازیابی آسان‌تر کار دشواری است. این موضوع وقتی سخت‌تر می‌شود که هزینه‌ی این تغییرات بالا باشد یا حتی اثر کوچکی بر عملکرد، کارکرد یا مقرون به‌صرفه بودن محصول داشته باشد.

اما این شرایط در حال تغییر است. شرکت‌های پیشرو شروع به بهبود عملکرد محیطی محصولات و فرایندهایشان کرده‌اند تا آثار نامطلوب را کاهش دهند. فاکتورهای زیر به‌عنوان محرک‌های اصلی برای تشویق به چنین تفکری شناخته شده‌اند:

۱. ***مزیت رقابتی:*** به‌طور سنتی تصمیم‌های بازار براساس عملکرد، کیفیت و قیمت محصول گرفته شده است. در دنیای رقابت، برخی فاکتورها غیر از قیمت در راهبرد رقابتی شرکت‌ها قرار گرفته‌اند. آثار محیطی به‌عنوان یکی از این فاکتورها از ابتدای دهه‌ی ۹۰ میلادی درسطح جهانی اهمیت بالایی پیدا کرده است.

۲. ***آگاهی مشتری:*** اکثر افراد بر این باورند که یک محیط طبیعی سالم، نه تنها کیفیت زندگی را ارتقا می‌دهد، بلکه تضمین می‌کند که کیفیت زندگی حفظ می‌شود. مشتریان روز به روز بیش‌تر به کیفیت محیطی محصولاتی که استفاده می‌کنند و هم‌چنین کیفیت محیطی که در آن زندگی می‌کنند، توجه می‌کنند. آگاهی مشتری از آسیب بالقوه به محیط توسط استفاده نادرست از فناوری باعث شده است که فشار بیش‌تری به تولید محصولات سبز و ایجاد فرایندهای تولیدی پاک وارد شود. قانون‌گذاران نیز به این تغییر

در رفتار مردم پاسخ داده و قوانینی وضع کرده‌اند تا موضوعات محیطی توسط تولیدکنندگان رعایت شود.

۳. ***فشارهای قانونی:*** قانون‌های محیطی محدودیت‌هایی مربوط به موضوعات محیطی را برای تولیدکنندگان محصولات مصرفی و صنعتی وضع می‌کند. برای در دستور کار قرار دادن مسائل محیطی از قوانینی که "آلوده کننده باید جریمه شود" الهام گرفته می‌شود. تولیدکنندگان مجبورهستند تا موضوع تولید محصولات سبز را در نظر بگیرند تا بتوانند در محیط رقابتی باقی بمانند. انگیزه این موضوع از قوانین محیطی و آگاهی محیطی مشتریان نشات می‌گیرد.

۴. ***بهبود سوددهی:*** یک رویکرد طراحی اکولوژیکی برای سیستم‌های مصنوعی می‌تواند اثر قابل توجهی بر سوددهی داشته باشد، این سوددهی از طریق صرفه‌جویی در تولید و دیگر هزینه‌های عملیاتی، با راهبردهای حذف ضایعات و از طریق افزایش سهم بازار انجام می‌شود و تمایل رو به رشد به سمت طراحی محصول و تولید ایمن برای فراهم کردن محیط کاری ایمن و سالم را مدنظر قرار می‌دهد.

۵. ***استانداردهای بین المللی:*** بسیاری از تولیدکنندگان در استقرار استانداردها برای نظارت بر محیط طی چرخه‌ی عمر سیستم و محصولش همراهی می‌کنند (که توسط سازمان بین المللی استانداردها (ISO) تنظیم می‌شود).

۱۶-۱-۳- تولید بر پایه اکولوژی

یکی از موضوعات مهم در طراحی برای قابلیت تولید، هماهنگی فعالیت‌های تولیدی با اکولوژی جهانی است. این موضوع مفهومی نسبتا جدید مربوط به یک سیستم تولید آگاهانه اکولوژیکی را معرفی می‌کند که سیستم تولید بر پایه اکولوژی نامیده می‌شود. نیازمندی‌های اصلی

تولید اکولوژیکی، مصرف پایین انرژی، استفاده محدود از منابع نادر طبیعی، بازیافت و استفاده مجدد است. یک تولید اکولوژیکی از طریق کاهش میل به آسیب به محیط، حفظ بهره‌وری، اقتصاد فرایند تولیدی و تولید محصولات با ارزش افزوده بالا توجیه می‌شود. در تولید اکولوژیکی، رویکرد سیستمی شامل یک فناوری طراحی محصول است که به طراحی و توسعه‌ی محصولات با کم‌ترین بار اکولوژیکی بوده و همراه با یک فناوری تولیدی است که آن هم بار اکولوژیکی کمی اعمال می‌کند. در برگرفتن یک رویکرد تولید اکولوژیکی می‌تواند منجر به پیاده‌سازی مفهوم طراحی ادغامی شود (یعنی طراحی محصولاتی که نه تنها مونتاژ و بهره‌برداری می‌شود بلکه به‌صورتی کاملا اثربخش دمونتاژ و بازیافت می‌شود). این کار متضمن آن است که یک تولید اکولوژیکی باید هم توسط معیارهای محیطی (اکولوژیکی) و هم توسط معیارهای متعارف مانند معیارهای اقتصادی، بهره‌وری، عملکردی و بازاریابی مورد ارزیابی قرار گیرد.

بارهای محیطی به‌ندرت در فعالیت‌های متعارف تولیدی مدنظر قرار می‌گیرند. یک سیستم تولیدی اکولوژیکی که به کاهش مصرف انرژی و منابع کمک کرده و در فرایندهای بازیافت مشارکت دارد در آینده کاملا مطلوب و الزامی خواهند بود.

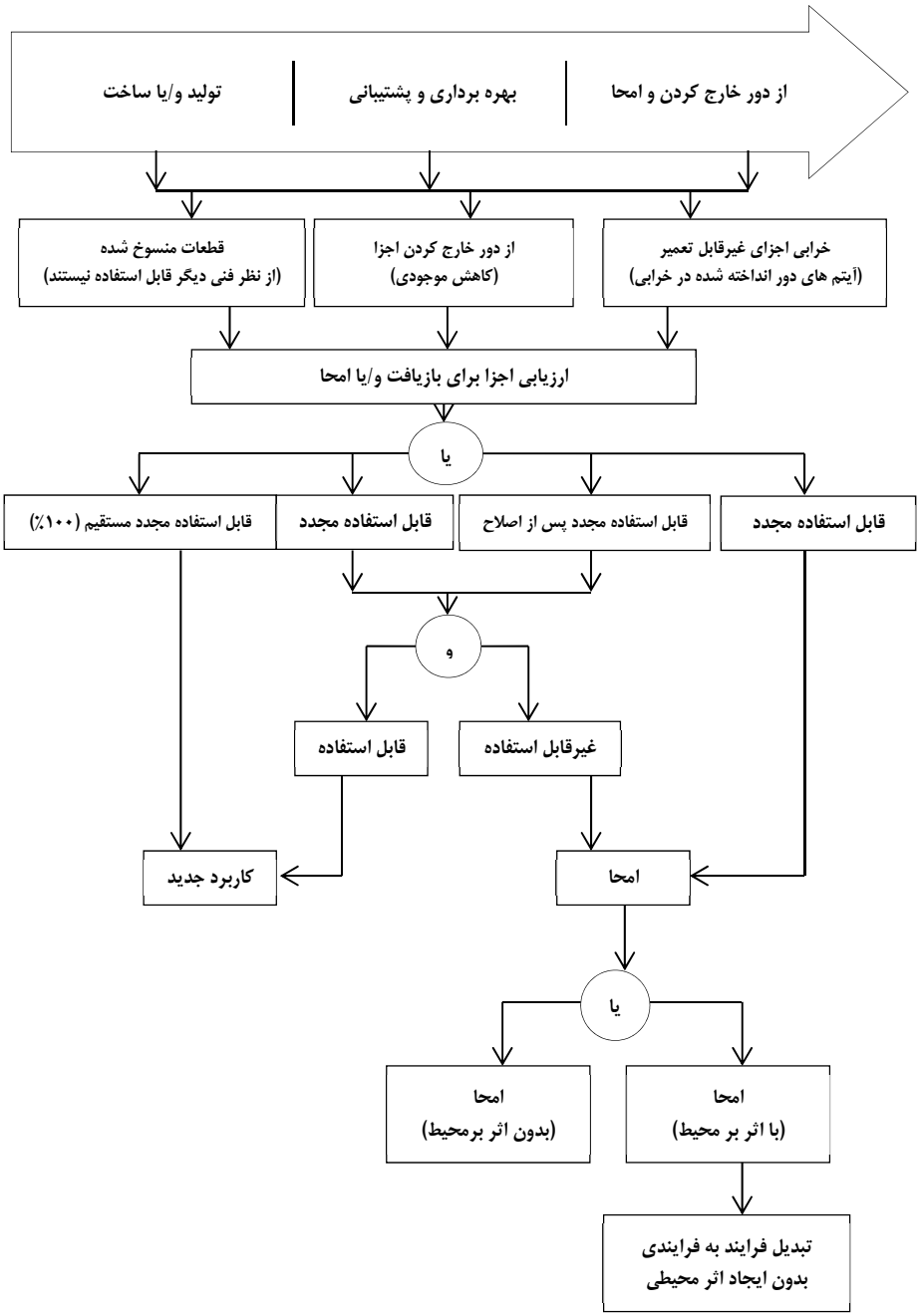
۱۶-۲- قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت در چرخه‌ی عمر

همان‌طور که در شکل‌های ۲-۱ و ۲-۲ ترسیم شد، *بهره‌برداری، استفاده مجدد، بازسازی و امحا* حوزه‌های اصلی طراحی محصول/ سیستم و پیاده‌سازی فرایند مهندسی سیستم‌ها را تشکیل می‌دهند. سیستمی که یک محصول را ایجاد می‌کند، همان سیستمی است که مسئول قابلیت تولید و قابلیت امحای محصول و هم‌چنین قابلیت حفاظت سیستم و محصول است. در نتیجه، مفاهیم چرخه‌ی عمر که در این فصل بحث می‌شود باید به همان صورتی اعمال شوند که در مورد قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، فاکتورهای انسانی و قابلیت پشتیبانی صورت پذیرفت (فصول ۱۲ تا ۱۵).

۱۶-۲-۱- روابط هم‌زمان چرخه‌ی عمر سیستم

چهار چرخه‌ی عمر هم‌زمان وجود دارد که یک سیستم را از منظر طراحی تشکیل می‌دهد. تاکید اولیه بر طراحی *محصول* برای قابلیت تولید و قابلیت امحا است که به‌عنوان فعالیت‌های سطح بالا اعمال می‌شود (یعنی چرخه‌ی عمر محصول در شکل ۲-۱). سپس واسطه‌های اصلی وجود دارند که شامل طراحی فرایند تولید یا ساخت (دومین چرخه‌ی عمر در شکل ۲-۲)، طراحی فرایندهای نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی (سومین چرخه‌ی عمر)، و طراحی قابلیت بازسازی/استفاده مجدد/امحا (چهارمین چرخه‌ی عمر) می‌شود. این چرخه‌های عمر سیستم باید به‌طور هم‌زمان از بالا به پایین، به روشی ادغامی و با بازخوردهای مناسب برای تسهیل بهبود مستمر در دستور کار قرار گیرد.

روابط چرخه‌ی عمر به‌صورتی که در مورد بازیافت و امحای اجزا و مواد سیستم اعمال می‌شود در شکل ۱۶-۲ نشان داده شده است. اجزا و مواد می‌توانند تحت یک رویه دسته‌بندی و تصمیم‌گیری قرار گیرد که بر خصوصیات طراحی تمرکز کند که قابلیت امحا را پشتیبانی می‌کند (یک پارامتر وابسته به طراحی). پس از پیاده‌سازی طراحی، این دسته‌بندی در پیاده‌سازی رویه‌های بازیافت و امحا یاری رسان خواهد بود.



شکل ۱۶- ۲- روابط از کار اندازی، از دور خارج کردن، بازیافت، و امحای اجزاء/مواد.

با مراجعه به شکل ۲–۳، نیازمندی‌های خاص طراحی باید در ابتدای فاز طراحی مفهومی در چرخه‌ی عمر استقرار یابد، تحلیل وظیفه‌ای و تخصیص نیازمندی‌ها در فاز طراحی اولیه اجرا شوند، موازنه‌ها و بهینه‌سازی طراحی اتفاق افتد و به همین منوال فرایند پیش رود. هدف، اثرگذاری بر طراحی به‌صورتی است که عناصر و اجزای سیستم را بتوان به‌صورتی اثربخش و کارا تولید کرده و هنگامی که از کار می افتند، به‌صورتی کارا امحا کرد و هیچ اثر نامناسبی بر محیط بر جا نگذارد. ظرفیت محیط حدی است که نباید از آن تجاوز شود.

در حوزه‌ی فعالیت چرخه‌ی عمر که در شکل ۱۶–۲ نشان داده شد، ترکیب، تحلیل و ارزیابی طراحی طی چرخه طراحی و توسعه محصول موردنیاز است (به شکل ۲–۹ مراجعه کنید). طی فرایند طراحی، تولیدکننده باید بتواند آثار محیطی محصولات و فرایندهای مختلف را پیش‌بینی و ارزیابی کند. اگر نیازمندی‌های محیطی محصول/ سیستم به‌خوبی مشخص شوند، گزینه‌های طراحی را در مقابل این نیازمندی‌ها و همراه با دیگر نیازمندی‌های سیستم مورد ارزیابی قرار داد. علاوه‌بر طراحی برای عملکرد، طراح به‌طور دائم با انتخاب اجزا، مواد و فرایندها مواجه بوده و در این کار خصوصیات مربوط به انتهای عمر مانند قابلیت بازیافت و قابلیت امحا همیشه مطرح هستند.

۱۶-۲-۲- طراحی و تولید آگاهانه از منظر موضوعات محیطی

در فعالیت طراحی چرخه‌ی عمر، یک الگوی طراحی تکاملی وجود دارد که با در نظر گرفتن آثار محیطی ایجاد شده توسط محصول و فرایندهای مرتبط با محصول طی فاز طراحی فرایند و محصول وجود دارد. این موضوع با عنوان *طراحی و تولید آگاهانه از منظر موضوعات محیطی* (EDCM) شناخته می‌شود. EDCM به‌صورت روز افزونی در دهه اخیر در حوزه جامع‌تر اکولوژی صنعتی شناخته می‌شود. کلمه قابلیت حفاظت اکنون بیش‌تر دیده می‌شود تا مقصود ECDM را هر چه بیش‌تر تاکید کند.

هدف نهایی ECDM طی چرخه‌ی عمر، کاهش آثار محیطی یا بهبود محصولات، فرایندها و فعالیت‌های مربوطه است تا هر چه بیش‌تر "دوست محیط" باشند. تفاوت زیادی بین ECDM و مدیریت ضایعات یا جلوگیری از آلودگی وجود دارد. ECDM رویکردی پیش فعال[1] است. هدف آن کاهش آثار محیطی در مراحل ابتدایی طراحی سیستم و محصول است. طراحان محصول و مهندسان تولید (وهم‌چنین مدیران) مسئول برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی عملیات تولید به‌صورت محیط ایمن و دوست محیط هستند. با تحلیل با دقت محصولات، طراحی آن‌ها، مواد استفاده شده و فرایندهای تولیدی عایدی‌های زیادی در این موضوع به‌دست می‌آید.

ECDM عموما به دو دسته تقسیم می‌شود: طراحی برای محیط (DFE) و مدیریت محیطی (EM). رویکرد DFE فعالیت پیش‌فعال است که به جلوگیری از آثار محیطی کمک می‌کند، درحالی‌که EM طبیعتی علاجی دارد. درنتیجه، ECDM و DFE در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و به‌عنوان یک راهبرد طراحی سیستم، در صورتی که در چرخه‌ی عمر پیاده‌سازی شود، بیش‌ترین اثربخشی را خواهند داشت.

۱۶-۳- شاخص‌های قابلیت تولید و پیشرفت تولید

قابلیت تولید[2] هم معنای قابلیت ساخت[3] نیست. قابلیت تولید عبارتی جامع‌تر است که نه تنها راحتی تولید را به‌عنوان یک هدف در نظر دارد، بلکه دارای قابلیت تولید، بسته‌بندی و ارسال برای مواردی است که طراحی شده است. قابلیت تولید، مانند قابلیت ساخت، یک خصوصیت طراحی است. این خصوصیت از طریق تصمیم‌های طراحی در مورد ملاحظات چرخه‌ی عمر قابل بهبود است.

1.Proactive
2.Producibility
3.Manufacturability

۱۶-۳-۱- شاخص‌های قابلیت تولید

بیان قابلیت تولید به‌صورت کلی یا به‌صورت عبارات کمی و با استفاده از شاخص‌های ریاضی کار دشواری است. با این حال، می‌توان مفهوم را در حوزه‌های قابل اندازه‌گیری ساخت از یک سو و بازاریابی از سوی دیگر تقسیم‌بندی کرد. در هر دوی این حوزه‌ها، موضوعات قابلیت حفاظت پیش می‌آید.

شاخص‌های قابلیت ساخت. هر چه یک محصول بیش‌تر قابل ساخت باشد، آن را می‌توان سریع‌تر و ارزان‌تر تولید کرد. بنابراین، قابلیت ساخت اغلب از طریق روش‌های مهندسی صنایع متعارف اندازه‌گیری می‌شود. به‌عنوان مثال زمان تحویل تولید (MLT) یا زمان موردنیاز برای انجام فرایند تولید یک محصول را می‌توان نام برد. برای مثال، یک محصول باید بر روی n_m ماشین و با میانگین زمان عملیاتی T_O بر روی هر ماشین پردازش شود. نیازمندی‌های آماده‌سازی برای این ماشین‌ها برابر با T_{SU} بوده و زمان غیرعملیاتی برای محصول معادل T_{NO} می‌باشد. اگر قرار باشد Q واحد در هر بسته تولیدی ساخته شود، آنگاه MLT به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\text{MLT} = \sum \left(T_{SUi} / Q_{TOi} + TO_i + T_{NOi} \right), \qquad i = 1 \text{to} \, n_m \tag{۱-۱۶}$$

برای یک اندازه‌گیری محصول‌گرا، یک شاخص رایج میانگین زمان تولید برای هر محصول، T_p، است که به‌سادگی با تقسیم زمان بسته تولیدی در هر ماشین بر تعداد واحدها در هر بسته محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های تعریف شده در بالا و در نظر گرفتن نرخ خرابی صفر، T_pبه‌صورت زیر بیان می‌شود

$$T_p = T_{SU} / Q + T_O \tag{۲-۱۶}$$

روش‌ها و فرایندهای ساخت مشخص خواهند کرد که با چه سرعتی محصول تولید می‌شود. با این حال، هزینه‌های فرایندها در این شاخص‌ها لحاظ نشده است؛ این هزینه‌ها نرخ‌های بالاسری

را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند و باید در تحلیل چرخه‌ی عمر (LCA) برای مطالعات موازنه‌ای طراحی فرایند در نظر گرفته شوند. یک فرایند می‌تواند دو برابر یک فرایند دیگر سرعت داشته باشد، اما هزینه‌ای برای هر محصول در هر ساعت کار تحمیل کند. اما مزیت پردازش سریع می‌تواند باعث بهبود قابلیت حفاظت با کاهش هدر رفتگی‌ها مانند اتلاف گرما توجیه شود.

این ملاحظات یک رویکرد سیستم‌ها در طراحی را شکل می‌دهد که در آن محصول و فرایندهای تولیدی در تسهیلات تولیدکننده بخشی از فرایند محاسبه خواهد بود. در مرحله توسعه از چرخه‌ی عمر سیستم، این مقادیر کاملا درحد تئوری هستند. هنگامی که تولید آغاز می‌شود، این مقادیر از منظر هزینه و درآمد با اهمیت می‌شوند. بهبود مستمر در فرایند تولید باید برای بهبود قابلیت ساخت محصول در نظر گرفته شود. این نوع از برنامه می‌تواند برنامه‌ریزی شده و مشابه برنامه افزایش قابلیت اطمینان برای ایجاد بهبودهایی در چرخه‌ی عمر صورت گیرد (به قسمت ۱۲–۴ مراجعه کنید). بنابراین، در نظر گرفتن قابلیت ساخت در طراحی (DFM) پیش از تکمیل طراحی فرایند مطلوب خواهد بود.

شاخص‌های ذهنی نیز برای تعیین قابلیت ساخت قابل استفاده هستند. روش‌های علمی در صنعت از مشاهده و مطالعه میدانی برای تعیین راحتی تولید استفاده می‌کند. برخی اوقات، فقدان قابلیت ساخت در طول زمان می‌تواند منجر به آسیب‌رسانی به کاربر شود. یک مثال رایج از چنین اتفاقی "سندروم تونل کارپ" است که در انجام فرایندهای مربوط به ماکیان و عملیات ورود داده‌ها ظاهر می‌شود.

شاخص‌های بازار. شاخص‌های بازاریابی که در اینجا تعریف شده‌اند در اصل به جریان کالاهای تکمیل شده (یعنی محصولات) از محل تولیدکننده به مصرف‌کننده نهایی اطلاق می‌شود (به جریان رو به خارج در شکل ۱۵–۱ مراجعه کنید). این جنبه از توزیع محصول که اغلب با طراحی برای قابلیت تولید رابطه نزدیکی دارد، به‌عنوان یک عنصر اصلی در پشتیبانی تدارکات

در نظر گرفته می‌شود (یعنی عناصر بسته‌بندی، جابه‌جایی، انبار، و حمل و نقل که در شکل ۱۵–۴ شناسایی شده است).

با مراجعه به قسمت‌های ۱۵–۳ و ۱۵–۴، شاخص‌های اصلی قابلیت تولید که در بازاریابی کاربرد دارد شامل موارد زیر می‌شود:

۱. زمانی که لازم است تا یک محصول از منبع تولیدی به مشتری نهایی (کاربر) انتقال داده شود. این موضوع شامل عناصر زمانی مربوط به بسته‌بندی، حمل و نقل و انبار می‌شود. با داشتن تقاضا برای محصول، چه مدت زمان طول می‌کشد تا محصول تحویل داده شده و نصب گردد؟ و آیا تحویل و نصب از نظر محیطی قابلیت حفاظت دارد؟

۲. هزینه پردازش یک محصول از محل تولید به مشتری. این هزینه شامل هزینه‌های بسته‌بندی، جابه‌جایی، انبارش، انرژی و حمل و نقل می‌باشد. با داشتن تقاضا برای یک محصول، هزینه مربوط به تحویل و نصب محصول چقدر خواهد بود؟ موضوعات قابلیت حفاظت و هزینه‌ها برای روش‌های جایگزین چقدر است؟

علاوه‌بر طراحی یک محصول برای قابلیت تولید، محصول باید طوری طراحی شود که به روشی اقتصادی بسته‌بندی شود (با استفاده از استاندارد و مواد متعارف)، به راحتی جابه‌جا شود (با استفاده از روش‌های استاندارد جابه‌جایی)، و قابل حمل و نقل باشد (با استفاده از روش‌های تجاری حمل و نقل) بدون اینکه هر گونه اثر منفی بر محصول یا محیط داشته باشد. بر این اساس، نیازمندی‌های قابلیت تولید باید با نیازمندی‌های تدارکات و قابلیت پشتیبانی که در فصل ۱۵ بحث شد، هماهنگ باشد.

۱۶-۳-۲- اندازه‌گیری پیشرفت تولید

تولید و عملیات مربوط به آن، نیازمند یک هماهنگی و ادغام در مجموعه‌ای از فعالیت‌ها است که اغلب در طول زمان تکرار می‌شوند. این تکرار ایجاد بهبود در فرایند تولید مانند کاهش زمان تولید یک واحد، افزایش نرخ فعالیت‌هایی که باعث افزایش تعداد تولید می‌شود، کاهش زمان کل فرایند، و کاهش هزینه هر واحد تولید شده، را ممکن می‌سازد.

یادگیری در یک فرد یا یک سازمان به صورت تابعی از تعداد دفعات تکرار یک تکلیف اتفاق می‌افتد. اغلب این موضوع مورد قبول است که زمان موردنیاز برای انجام یک تکلیف معین (یا تولید یک واحد محصول) با هر بار انجام تکلیف کاهش می‌یابد. زمان واحد با یک نرخ نزولی کاهش یافته و این کاهش زمان از یک الگوی قابل پیش‌بینی پیروی می‌کند.

شواهد تجربی که *منحنی یادگیری* را تایید می‌کند اولین بار در صنعت هوا و فضا مشاهده گردید. در این صنعت مشاهده گردید که کاهش نفرساعات مستقیم موردنیاز برای ساخت یک هواپیما قابل پیش‌بینی است. از آن زمان به بعد، منحنی یادگیری کاربردهای زیادی در دیگر صنایع پیدا کرد و به‌عنوان روشی برای تنظیم هزینه‌های مربوط به آیتم‌های تولید شده بعد از تولید نمونه‌های اولیه و برای تعیین نرخ بازدهی مورد استفاده قرار گرفت.

اکثر منحنی‌های یادگیری بر پایه این فرض است که نفرساعات مستقیم موردنیاز برای تولید یک واحد محصول، هر بار که تعداد تولید دو برابر می‌شود، با درصدی ثابت کاهش می‌یابد. یک نرخ معمول برای این بهبود در صنعت هوا فضا ۲۰٪ به ازای دو برابر شدن تعداد تولید است. این نرخ یک تابع یادگیری ۸۰٪ را تشکیل می‌دهد و بدین معنی است که نفرساعات مستقیم موردنیاز برای ساخت دومین هواپیما ۸۰٪ ساعاتی است که برای اولین هواپیما لازم بود. چهارمین هواپیما نیازمند ۸۰٪ زمانی است که برای دومین هواپیما لازم بود، هشتمین هواپیما نیازمند ۸۰٪ زمانی

است که برای هواپیمای چهارم لازم بود و بقیه نیز به همین منوال محاسبه می‌شود. این رابطه در جدول ۱۶–۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۶– ۱– نفرساعات مستقیم تجمعی و میانگین تجمعی نفرساعات مستقیم برای تابع بهبود ۸۰٪ با قرار دادن ۱۰۰ ساعت برای واحد ۱

شماره واحد	نفرساعات مستقیم برای واحد	نفرساعات مستقیم تجمعی	میانگین تجمعی نفر ساعات مستقیم
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲	۸۰	۱۸۰	۹۰
۴	۶۴	۳۱۴,۲۱	۷۸,۵۵
۸	۵۱,۲۰	۵۳۴,۵۹	۶۶,۸۲
۱۶	۴۰,۹۶	۸۹۲,۰۱	۵۵,۷۵
۳۲	۳۲,۷۷	۱۴۶۷,۸۶	۴۵,۸۷
۶۴	۲۶,۲۱	۲۳۹۲,۴۵	۳۷,۳۸

بیان تحلیلی منحنی یادگیری با در نظر گرفتن فرضیات قبلی قابل توسعه است. فرض کنید

x = شماره واحد؛

Y_x = تعداد نفرساعات مستقیم موردنیاز برای تولید xامین واحد؛

K = تعداد نفر ساعات مستقیم موردنیاز برای تولید اولین وحد؛

ϕ = پارامتر شیب منحنی یادگیری؛

با فرض درصد کاهش ثابت در نفرساعات مستقیم هنگام دو برابر شدن تعداد تولید،

$$Y_x = K\phi^0 \qquad x = 2^0 = 1$$
$$Y_x = K\phi^1 \qquad x = 2^1 = 2$$
$$Y_x = K\phi^2 \qquad x = 2^2 = 4$$
$$Y_x = K\phi^3 \qquad x = 2^3 = 8$$

بنابراین

$$Y_x = K\phi^d \qquad x = 2^d$$

با یک لگاریتم گیری ساده

$$\log Y_x = \log K + d \log \phi$$

که در آن

$$\log x = d \log 2$$

با حل d

$$d = \frac{\log Y_x - \log K}{\log \phi} \qquad d = \frac{\log x}{\log 2}$$

پس داریم

$$\frac{\log Y_x - \log K}{\log \phi} = \frac{\log x}{\log 2}$$
$$\log Y_x - \log K = \frac{\log x \left(\log \phi\right)}{\log 2}$$

فرض کنید

$$n = \frac{\log \phi}{\log 2}$$

بنابراین

$$\log Y_x - \log K = n \log x$$

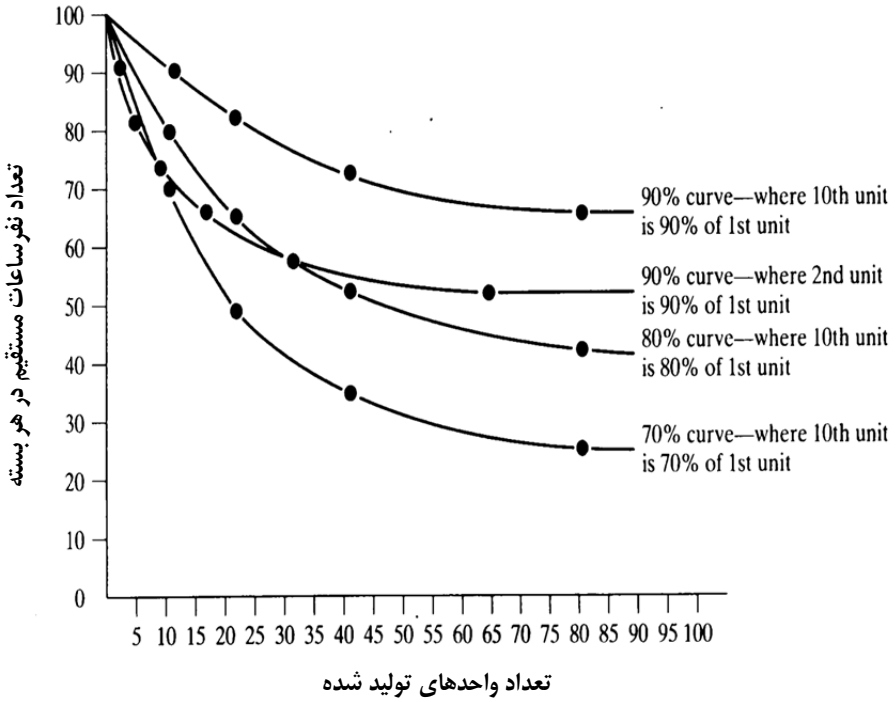
با استفاده از تابع معکوس لگاریتم برای هر دو طرف خواهیم داشت

$$\frac{Y_x}{K} = x^n \qquad (۳-۱۶)$$
$$Y_x = Kx^n$$

کاربرد معادله ۱۶-۳ را می‌توان از طریق مثال تابع پیشرفت ۸۰٪ نشان داد با این فرض که واحد ۱ نیاز به ۱۰۰ نفرساعت مستقیم دارد. با حل مساله برای Y_8، خواهیم دید که تعداد نفرساعات موردنیاز برای تکمیل ۸امین واحد برابر است با

$$Y_8 = 100(8)^{\log 0.8/\log 2}$$
$$= 100(8)^{-0.322}$$
$$= \frac{100}{1.9535} = 51.2$$

توابع پیشرفت برای نرخ‌های بهبود مختلف در شکل ۱۶-۳ نشان داده شده است. منحنی‌ها برای دو برابر شدن تعداد تولید با مبنای ۱ (منحنی ۹۰٪)، و برای دو برابر شدن تعداد تولید با مبنای ۱۰ (۹۰٪، ۸۰٪ و ۷۰٪) هستند. در مواردی که مبنا ۱۰ است، اندازه بسته ۱۰تایی مدنظر است. معادله ۱۶-۳ را می‌توان برای هر اندازه بسته‌ای اعمال کرد به شرطی که درصد کاهش برای کل دسته ثابت باشد.



شکل ۱۶- ۳- منحنی‌های یادگیری نمونه برای بسته‌های ۱۰ تایی.

اطلاعات حاصل از منحنی یادگیری می‌تواند برای تخمین هزینه‌های مربوط به نیروی کار از طریق ضرب نرخ نیروی کاری که استفاده می‌شود، تعمیم یابد. برای این کار تحلیل‌گر باید این موضوع را متوجه باشد که واحدهای بعدی ممکن است ماه‌ها یا سال‌ها بعد از تکمیل واحد اول تولید شوند. اصلاحات برای افزایش نرخ نیرو کار می‌تواند همراه با اصلاحات مربوط به یادگیری مدنظر قرار گیرد.

با داشتن روابط پیشین، منحنی‌های یادگیری در سال‌های اخیر کاربرد وسیعی در صنایعی که تعداد تولید بالا داشته یا در آن‌ها برخی تکالیف مانند نگه‌داری و تعمیرات که به‌صورت تکراری انجام می‌شود، پیدا کرده است. اگرچه فاکتور ۸۰٪ در صنایع هوا و فضا قابل استفاده است،

فاکتورهای دیگری برای صنایع دیگر می‌توان تصور کرد که این فاکتور به پیچیدگی‌های سیستم، فرایندهای تولید مورد استفاده و غیره بستگی دارد. برای مثال، یک منحنی یادگیری ۹۰٪ برای تولید یک تجهیز الکترونیک پیچیده قابل تصور است درحالی‌که منحنی یادگیری ۷۰٪ مناسب تولید یک قطعه مکانیکی است. بنابراین، منحنی‌های یادگیری برای شرایط مختلف توسعه داده شده و اعمال می‌شود و این منحنی‌ها در ادامه برای پیش‌بینی نرخ تولید، مصرف انرژی و هزینه تولید یک واحد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱۶-۴- طراحی برای قابلیت تولید

قابلیت تولید عبارتی پیچیده‌تر از قابلیت ساخت است. قابلیت تولید نه تنها سادگی در ساخت را شامل می‌شود (مفهومی که در قابلیت ساخت نیز وجود دارد)، بلکه توانمندی بسته‌بندی، حمل و نقل و تحویل در نقطه استفاده مشتری و در زمان مناسب را نیز شامل می‌شود. قابلیت تولید، مانند قابلیت ساخت، یک خصوصیت از طراحی است خود آیتم و هم‌چنین جنبه‌های مختلف زنجیره تامین را شامل می‌شود. این قابلیت از طریق تصمیم‌های طراحی که در ملاحظات چرخه‌ی عمر گرفته می‌شود، ارتقا می‌یابد.

۱۶-۴-۱- دسته‌بندی فرایندهای تولید

فرایندهای تولید عموما به ۵ دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که هر کدام دارای خصوصیات تولیدی مخصوص به خود هستند:

۱. ***فرایندهای شکل‌دهی.*** فرایندهایی که شکل اصلی محصول از یک حالت مایع یا گازی یا از ذرات جامد یک شکل تعریف نشده تشکیل می‌شوند.

۲. ***فرایندهای تغییرشکل.*** فرایندهایی که شکل اصلی یک جسم صلب را به شکل دیگری تغییر می‌دهند، بدون این که ترکیب ماده یا جرم آن تغییر کند.

۳. ***فرایندهای حذف.*** فرایندهایی که در آن حذف مقداری از مواد اتفاق می‌افتد.

۴. ***فرایندهای اتصال.*** فرایندهایی که اجزای جدا از هم یک زیرمونتاژ یا محصول نهایی را تشکیل می‌دهند.

۵. ***فرایندهای اصلاح ویژگی‌های مواد.*** فرایندهایی که در آن به‌صورت عمدی ویژگی‌های مواد یا یک قطعه کاری را تغییر داده تا خصوصیات مدنظر به‌دست آید، بدون این‌که شکل آن تغییر کند.

این دسته‌بندی‌ها برای مواد مهندسی مختلف قابل اعمال است که این مواد می‌تواند به‌صورت کلی به فلزات، سرامیک‌ها، پلاستیک‌ها (پلیمرها) و کامپوزیت‌ها دسته‌بندی شوند. انتخاب مواد به طراحی محصول بستگی دارد و ملاحظات محیطی و قابلیت حفاظت باید در آن‌ها مدنظر باشد. مواد پایدار و قابل بازیابی در طراحی تولید سبز همیشه انتخاب اول خواهند بود. فرایندهای مختلف برای مواد مختلفی اعمال می‌شوند که در جدول ۱۶-۲ خلاصه شده است.

جدول ۱۶- ۲- مواد و فرایندها

	فرایندها				
ماده	**شکل‌دهی**	**تغییرشکل**	**حذف**	**اتصال**	**اصلاح**
فلزات	استفاده گسترده	استفاده گسترده	استفاده گسترده	استفاده گسترده	استفاده گسترده
سرامیک	استفاده گسترده	عدم استفاده	به ندرت	عدم استفاده	عدم استفاده
پلیمر	استفاده گسترده	به ندرت	به ندرت	به ندرت	عدم استفاده
کامپوزیت	استفاده گسترده	عدم استفاده	به ندرت	به ندرت	عدم استفاده

انتخاب فرایند برای اعمال به یک ماده خاص تحت‌تاثیر فاکتورهای مختلفی است (به‌طور مثال اندازه اجزایی که باید ساخته شود و خصوصیات فیزیکی مواد) که بر صفات فرایند تاثیر گذار است (به‌طور مثال هزینه، نرخ تولید، انعطاف، و کیفیت قطعه). با این حال انتخاب باید کاملا تحت‌تاثیر بار محیطی که توسط فرایند تولید ایجاد می‌شود باشد. انتخاب فرایند مناسب اغلب به موازنه (تعادل) همه صفات فرایند (یا معیارها) شامل آثار بالقوه محیطی بستگی دارد. جدول ۱۶–۳ مثالی را فراهم آورده که بر پایه نیازمندی‌های مهندسی برای تولید یک محصول مطلوب به روشی کارا، اکولوژیکی و سودده می‌باشد.

جدول ۱۶- ۳- برخی خصوصیات فرایندهای تولید

فرایند					
اصلاح	**اتصال**	**حذف**	**تغییر شکل**	**شکل‌دهی**	**صفت**
سرمایه متوسط به بالا/هزینه اندک نیروی کار	سرمایه کم/ هزینه بالای نیروی کار	نیاز متوسط به ابزار / هزینه بالای نیروی کار	نیاز زیاد به ابزار / هزینه اندک نیروی کار	نیاز زیاد به ابزار / هزینه اندک نیروی کار	هزینه‌ها
قضاوت خبره	قضاوت خبره	قضاوت خبره	قضاوت خبره	قضاوت خبره	هزینه‌های محیطی
کم	متوسط (جوشکاری) به پایین (چسباندن)	متوسط (فرزکاری) به پایین (آسیاب کردن)	بالا	بالا	نرخ تولید

فرایند					
اصلاح	اتصال	حذف	تغییر شکل	شکل‌دهی	صفت
بالا	متوسط به بالا	متوسط به بالا	متوسط به پایین	متوسط به پایین	کیفیت قطعه
متوسط به بالا	بالا	بالا	پایین	پایین	انعطاف
ورودی‌ها / خروجی‌ها	ورودی‌ها / خروجی‌ها	ورودی‌ها / خروجی‌ها	ورودی‌ها / خروجی‌ها	ورودی‌ها / خروجی‌ها	فاکتورهای محیطی

۱۶-۴-۲- اصول قابلیت ساخت

تعداد اندکی اصول سطح بالای طراحی برای قابلیت تولید وجود دارد که متضمن قابلیت حفاظت نیز هستند. این اصول به شرح زیر هستند:

۱. ***استفاده از جاذبه.*** راحت است که اجزا سبک‌تر باشند، حرکات عمودی انجام شود، گیره‌ها دهنه‌ی عمودی داشته باشند و غیره. در برخی موارد جاذبه می‌تواند در انرژی انسان و انرژی‌های طبیعی صرفه‌جویی ایجاد کند.

۲. ***استفاده از قطعات کم‌تر.*** افزایش در تعداد قطعات به معنای افزایش در هزینه‌های طراحی و ساخت است. اجزایی که وجود ندارند هزینه‌ای در قبال خرید، مونتاژ، و آزمایش ایجاد نکرده و منبعی را مصرف نمی‌کنند.

۳. ***طراحی برای سادگی ساخت.*** قطعات را طوری طراحی کنید که (الف) تلرانس‌ها با روش مونتاژ استفاده شده منطبق باشد، و (ب) هزینه‌های ساخت با هزینه‌های در نظر گرفته

شده برای محصول مطابقت داشته باشد. این موضوع ضایعات حاصل از رد قطعه یا رد شدن مونتاژ به علت خارج از تلورانس بودن را حذف می‌کند.

۴. ***کاهش قطعات غیراستاندارد.*** استفاده از قطعات متداول و استاندارد هزینه‌های توسعه مربوط به طراحی و تولید را حذف کرده و بار محیطی را کاهش می‌دهد.

۵. ***قابلیت کاربرد هر قطعه را افزایش دهید.*** هدف انجام وظایف با استفاده از قطعات کم‌تر یا تخصیص وظایف بیش‌تر به هر قطعه است. این هدف، نیازمند تحلیل وظیفه‌ای و بسته‌بندی است که در قسمت ۴-۳ تشریح شد. نتیجه آن انجام کار بیش‌تر با قطعات کم‌تر است.

در مونتاژ، تعدادی خطوط راهنمای سطح بالا وجود دارد که با قابلیت حفاظت نیز در ارتباط است. این موارد به شرح زیر هستند:

۱. ***به‌کارگیری الحاق‌گر[1]های خودکار.*** قطعاتی را مشخص کنید که می‌توانند به‌صورت خودکار مرتب شده و با استفاده از الحاق‌گرهای DIP، یک دستگاه مرکزی متغیر (VCD)، الحاق‌گرهای قطعه محوری، یا بازوهای رباتی مونتاژی انتخاب‌گر (SCARA)، مونتاژ شوند.

۲. ***به‌کارگیری قطعات جهت‌دار شده.*** قطعاتی را که نمی‌توان به‌صورت جهت‌دار در قرقره‌ها، تیوب‌ها، یا ماتریس‌ها قرار داد تا فرایند الحاق ساده‌تر انجام شود نباید استفاده شوند تا زمان و انرژی به هدرنرود.

1.Inserter

۳. ***حداقل کردن تغییرجهت‌های ناگهانی و مکرر در مونتاژ.*** دنبال کردن یک توالی تک جهته در مونتاژ مانند طراحی برای مونتاژ از بالا به پایین، اغلب مطلوب‌ترین حالت از نقطه نظر انجام کار است.

۴. ***حداکثر کردن انطباق در فرایند.*** انطباق در فرایند عبارتست از طراحی با قطعات استاندارد، فرایندهای استاندارد، راحتی در مونتاژ و غیره. از فرایندهایی استفاده کنید که به راحتی نصب، نگه‌داری و حفظ شود.

۵. ***حداکثر کردن قابلیت دسترسی.*** طراحان باید امکانی را فراهم کنند تا دسترسی به قطعاتی که در آینده نیاز به تعمیر و جایگزینی دارند به‌راحتی به‌دست آیند و بتوان به‌راحتی قطعه را دمونتاژ کرد تا فرایند بازیافت تسهیل شود.

۶. ***حداقل کردن جابه‌جایی.*** در حداقل کردن جابه‌جایی و آثار محیطی آن دو جنبه وجود دارد: طراحی قطعاتی که به راحتی الحاق شوند و طراحی قطعاتی که به راحتی قابل کار و جهت‌دهی باشد.

خطوط راهنمای غیررسمی برای طراحی با در نظر گرفتن مونتاژ توسعه داده شده است. طراحی مکانیکی، پیش از انقلاب صنعتی، احتمالا دارای شناخته شده‌ترین خطوط راهنما است. برخی از این خطوط راهنما از قرار زیر است:

۱. ***مونتاژ به یک قطعه پایه.*** این روش به مونتاژ خودکار اجازه می‌دهد که با وصل کردن قطعات دیگر به قطعه پایه مونتاژ نهایی حاصل شود. قطعه پایه باید مناسب برای قرارگیری دقیق ماشین طراحی شود زیرا یک تلرانس بزرگ در محل قرارگیری قطعه اصلی به اجزای مونتاژ شده اضافه می‌گردد.

۲. ***مونتاژ با کم‌ترین محل مونتاژ ممکن.*** ماشین کاری تکراری هنگامی که تعداد اجزا کم‌تر باشد بیش‌تر قابل اطمینان است. قابلیت اطمینان تجهیزات تولید با افزایش قطعات کاهش می‌یابد. این کار هم‌چنین قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را افزایش می‌دهد.

۳. ***تعویض مستقل قطعات.*** زیر اجزای یک مونتاژ نباید نیازمند خارج کردن دیگر اجزا باشد. این کار باعث افزایش قابلیت نگه‌داری و تعمیرات و هم‌چنین صرفه‌جویی در انرژی می‌شود.

۴. ***ترتیب مونتاژ طوری باشد که قطعه با قابلیت اطمینان بیش‌تر، زودتر مونتاژ شود.*** این موضوع مربوط به آزمایش یک محصول پیش از تحویل است. اگر یک قطعه خاص، بخش بیش‌تری از آزمایش نهایی را به خود اختصاص دهد، زمان تولید که مربوط به عیب‌یابی است حداقل می‌شود.

۵. ***حفظ یکپارچگی در طراحی.*** یکپارچگی در طراحی تلاش دارد تا تعداد انواع زیر اجزای یک سیستم را کاهش دهد. هرچه یک محصول استانداردتر باشد، هزینه‌های بالاسری مربوط به پشتیبانی قطعات گوناگون پیش از مونتاژ کم‌تر خواهد بود. اگر گوناگونی ابزار مورد استفاده در مونتاژ این قطعات کاهش یابد، مشارکت خوبی در ایجاد قابلیت حفاظت ایجاد می‌شود.

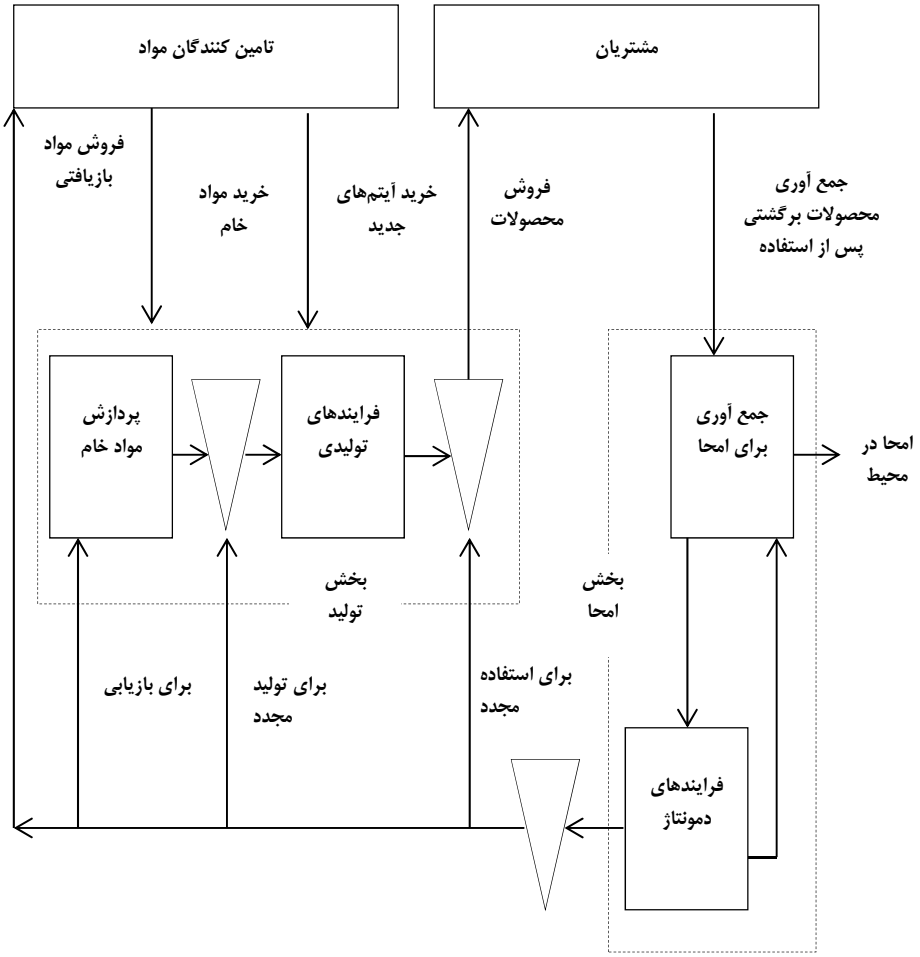
۱۶-۴-۳- موضوعات تولید و دمونتاژ

در یک سیستم تولید با قابلیت دمونتاژ، ساختار اصلی دمونتاژ از دو بخش عمده تشکیل می‌شود که در شکل ۱۶-۴ نشان داده شده است: بخش تولید و بخش امحا. در بخش تولید، یک تولیدکننده مواد خام یا اجزا را از تامین‌کننده‌ی خارجی خریداری کرده و سپس انواع محصولات را به مصرف‌کننده تولید، ارائه و توزیع می‌کند. بخش تولید به سه قسمت دسته‌بندی می‌شود: (۱)

محصولات قابل بازیافت برای تولید همان محصول داخل کارخانه، (۲) محصولات قابل بازیافت برای تولید انواع دیگری از محصولات داخل کارخانه، و (۳) ضایعاتی که باید دور ریخته شود. بر این اساس، یک سیستم تولید با قابلیت دمونتاژ شامل یک جریان حلقه بسته (برای دسته ۱)، حلقه باز (برای دسته دوم) یا هر دو در کارخانه است.

در یک فرایند توسعه محصول متداول، ساختار محصول طی طراحی مشخص می‌گردد. صفات محصول از طریق عملیات تولید در آن قرار داده می‌شود. محصولات برگشت داده شده (یا بازیافت شده) توسط عملیات دمونتاژ مورد پردازش قرار می‌گیرند. بازیافت یا دمونتاژ، که فعالیت‌های انتهایی محصول هستند، باید در فرایندهای چرخه‌ی عمر و طراحی ادغام شوند. نتایج ECDM بر فرایندهای برنامه‌ریزی محصول برای امحا در انتهای عمر محصول تاثیرگذار است.

اکنون مشخص شده است که دمونتاژ نقش مهمی در مفهوم محصول سبز دارد. شرکت‌های تولیدی به روش‌های مختلفی به فشارهای اجتماعی و قانونی در مورد موضوعات محیطی پاسخ می‌دهند. این پاسخ‌ها به سمت کاهش هزینه‌های امحا توسط دمونتاژ محصولات بازیافتی دریافت شده از مشتری و استفاده مجدد، تولید مجدد و بازیافت آن‌ها هدایت شده است. هم‌چنین، این پاسخ‌ها بر راهبرد شرکت در مورد طراحی و توسعه محصول سبز اثرگذار است. درنتیجه، جمع‌آوری، دمونتاژ، پردازش، بازیافت و امحای محصولات استفاده شده و بازیافت شده پس از بهره‌برداری چالش‌های اصلی طراحی و توسعه را برای عملیات تولید معمول ایجاد می‌کند.



شکل ۱۶- ۴- یک سیستم تولید همراه با دمونتاژ و امحا.

عملیات دمونتاژ با هدف استفاده مجدد، دمونتاژ، بازیابی و ارتقای قابلیت حفاظت فرایندهایی الزامی هستند. این موارد در ادامه تشریح شده‌اند:

۱. *استفاده مجدد* بالاترین شکل کاهش ضایعات است و دارای پتانسیل افزایش ارزش محصول در انتهای عمرش می‌باشد. استفاده مجدد در مورد اجزایی که هزینه تولید بالا،

چرخه‌ها یا زمان عمر ابداع طولانی و اثر اکولوژیکی بالا حین تولید دارند، به‌راحتی قابل توجیه است.

۲. *بازتولید*، شکل‌دهی مجدد یا ساخت جزئی یک محصول برگشت داده شده از مشتری در انتهای عمر آن با هدف ایجاد قابلیت در حد یک محصول جدید است. اگرچه بازتولید نیازمند دمونتاژی است که هزینه تحمیل می‌کند، این هزینه برای کاهش آثار اکولوژیکی پرداخت می‌شود.

۳. *بازیابی* محصول برای به‌دست آوردن مواد خام یا اجزای قابل استفاده روشی مهم در کاهش حجم امحا و هزینه مربوط به قابلیت حفظ محیط است.

مواردی که در بالا فهرست شده‌اند روش‌های مهمی در کاهش هزینه چرخه‌ی عمر محصول می‌باشد اگرچه این فعالیت‌ها، هزینه‌های دمونتاژ را تحمیل می‌کنند. هزینه‌های اصلی دمونتاژ در بازیافت و استفاده‌ی مجدد عبارت‌اند از هزینه‌های حصول مجدد، جداسازی، دمونتاژ، مرتب کردن، انبار، حمل و نقل، شناسایی، آزمایش، پردازش مجدد، و برچسب گذاری مجدد. ارزش محصول بازیافت شده یا دوباره تولید شده تابعی از ارزش اصلی قطعات/اجزا و مواد سازنده آن در مقابل هزینه بازیافت و امحای آن است.

هزینه‌های بازیافت و امحا می‌تواند به‌شدت تحت‌تاثیر تصمیم‌های طراحی محصول باشد. طراحی برای دمونتاژ، طراحی برای قابلیت خدمت دهی و/یا قابلیت پشتیبانی، و طراحی برای بازیافت اصول موردنیاز برای راهبردها و برنامه‌های اثربخش دمونتاژ و بازیافت هستند. فرایندها تولید و دمونتاژ تحت‌تاثیر تصمیم‌های محیطی هستند، مخصوصا زمانی که آثار محیطی که فرایندها ایجاد می‌کنند، در نظر گرفته شود. و فرایند ایجاد محصول توسط ماهیت ملاحظات

اقتصادی، تدارکاتی و محیطی پیچیده شده باشد. برای نمایش روابط بین ارزش و هزینه در یک چرخه‌ی عمر محصول، یک نمودار جریان هزینه/ارزش در قسمت ۱۶-۶ ارائه شده است.

۱۶-۵- طراحی برای قابلیت امحا

مثال‌هایی از محصولات سبز، فرایندهای پاک و تولید اکولوژیکی در پهنه وسیعی از صنایع با محرک انقلاب سبز در حال ظهور است. انقلاب سبز از اکولوژی صنعتی اقتباس شده است که در آن طراحی و تولید آگاهانه محیطی نقشی مرکزی در ساخت محصول سبز بازی می‌کند. از آن‌جا که طبیعت ایجاد یک محصول چند وظیفه‌ای است، تیم‌های چند رشته‌ای نیاز هستند تا فعالیت‌های طراحی، تولید، بهره‌برداری، پشتیبانی، و امحا/بازیافت را دنبال کنند.

۱۶-۵-۱- قابلیت امحا، قابلیت حفاظت و اکولوژی صنعتی

ضایعات و مایعات دفع شده در زنجیره تامین آثار جدی بر محیط به‌صورت محلی و جهانی خواهد داشت، مانند گرم شدن زمین و باران‌های اسیدی. در نتیجه، قابلیت دفع باید به‌عنوان یک پارامتر وابسته به طراحی در طراحی و توسعه محصول تحت الگوی ECDM شناخته شود. تصمیم‌های در مورد طراحی محصول، برنامه‌ریزی تولید، انتخاب فرایند، تدارکات، تخلیه موجودی، و بازیافت به علت ترجیحات مشتری و قوانین دولتی از اهمیت بیش‌تری برخوردار می‌شوند. رابطه‌ی بین زنجیره‌ی تامین و زنجیره‌ی محیطی در حوزه اکولوژی صنعتی قرار می‌گیرد که در آن شرکت‌های تولیدی راهبردهای محیطی را اجرا می‌کنند تا مسئولیت‌های خود را در قبال موضوعات حفاظت محیط انجام دهند. بنابراین، نیاز به پیاده‌سازی ایده‌های طراحی و تولید است تا از فرصت‌های کاهش آثار محیطی که زنجیره تامین ایجاد می‌کند، بهره برد (به قسمت‌های ۱۵-۳ و ۱۵-۴ در مورد زنجیره تامین مراجعه کنید).

یک محصول سبز را می‌توان به‌صورت محصولی تعریف کرد که در انتهای عمر مفیدش از فرایندهای دمونتاژ و دیگر فرایندهای احیا عبور می‌کند تا استفاده مجدد از مواد غیرمضر و تجدیدپذیر مهیا شود. با این حال، تلاش‌ها برای حفظ محیط منجر به ایجاد مسائل پیچیده‌ای می‌شود. الگوی ECDM عمومی نیازمند یک طراحی جدید و روش و متدولوژی تحلیل خاصی است تا از تصفیه در انتهای عمر به یک رویکرد طراحی ادغامی، چند رشته‌ای و پیش فعال تغییر روش دهد. اگرچه در نظر گرفتن صریح اهداف و محدودیت‌های محیطی در چرخه توسعه محصول منجر به یک فناوری سبز می‌شود، این سوال که چه چیزی سبز است به چگونگی تعریف مسائل محیطی و مرزهای سیستم بستگی دارد.

مفاهیم طراحی هم‌چنین برای محیط در طراحی فرایندهای تولیدی در تولید اکولوژیکی به‌کار می‌رود. تولید اکولوژیکی اساسا بر راهبردها و فناوری‌های تولید مختلف تمرکز دارد. تاکید عمده برای فناوری تولید بر سییستم‌های تولید، سیستم‌های بازگردانی و کنترل و ارزیابی می‌باشد. فناوری تولید اکولوژیکی می‌تواند حفاظت محیط و استفاده اثربخش از منابع طبیعی توسط صنعت را به‌دست دهد. در حقیقت، تولید اکولوژیکی به‌عنوان یک سیستم فیزیکی توسعه داده شده بر پایه یک رویکرد ECDM است تا مفهومی اکولوژی صنعتی را پیاده‌سازی کند. فناوری‌های مختلف در هر یک از این گروه‌ها در شکل ۱۶–۵ نشان داده شده است.

۱۶-۵-۲- تولید همراه با بازیافت

بازیافت اخیرا به‌عنوان یکی از اثربخش‌ترین روش‌ها برای حل مسائل محیطی شناخته شده است. بنابراین، در طراحی برای سیستم‌های تولیدی آتی، بازیافت مواد باید به‌عنوان یک هدف طراحی در نظرگرفته شود.

بازیافت محصولات برای دست‌یابی به مواد خام یا اجزایی که دوباره قابل استفاده باشند روشی مهم برای کاهش هزینه‌های امحا و افزایش ارزش کلی محصول است. در فرایندهای دمونتاژ، دمونتاژ شامل بازشکل‌دهی یا بازسازی جزئی یک محصول برگشت داده شده است. هدف، ایجاد یک محصول جدید است. این راهبرد توسط بسیاری از شرکت‌ها به‌عنوان منبعی برای صرفه‌جویی در هزینه و ایجاد مزیت رقابتی شناخته شده است. بازیافت و دمونتاژ اثربخش نیازمند آسان بودن بازیابی محصول از طریق جداسازی و دمونتاژ، عملکرد و بازار قابل قبول برای مواد و اجزای بازیافت شده، و امحای باقی‌مانده‌های غیرقابل بازیابی پس از بازیافت به‌طوری که از نظرمحیطی خطری ایجاد نکند (شکل ۱۶-۲ را ببینید).

فعالیت‌های بازیافت طی مرحله تولید اتفاق می‌افتد. یکی از ویژگی‌های فرایند تولید پلاستیک اکسترودی آن است که ضایعات ایجاد می‌شود، جمع‌آوری شده و با ماده خام پلاستیک برای چرخه‌های بعدی تولید مخلوط می‌شود. بازیافت این ضایعات به کاهش نیاز برای ماده خام پلاستیک می‌انجامد که بسیار گران‌قیمت‌تر است. یکی دیگر از فرصت‌های مورد توجه روز افزون استفاده مجدد از گرمای ایجاد شده در فرایند است.

استفاده مجدد، بهترین شکل کاهش ضایعات است و پتانسیل آن را دارد که هزینه‌های انتهای عمر محصول را کاهش دهد. استفاده مجدد می‌تواند در مواردی که اجزا هزینه‌های بالای تولید، چرخه‌های ابداع طولانی مدت و عمر طولانی دارند، به‌سادگی توجیه شود.

شکل ۱۶- ۵- برخی دسته‌بندی‌های فناوری برای تولید اکولوژیکی.

۱۶-۶- طراحی برای قابلیت حفاظت

براساس وزارت بازرگانی ایالات متحده، تولید دارای قابلیت حفاظت آن است که "ایجاد محصولات تولید شده‌ای کند که در آن فرایندهایی استفاده شود که غیرآلاینده بوده، انرژی و منابع طبیعی را حفظ کند و برای کارمندان و مصرف کنندگان ایمن و از نظر اقتصادی معقول باشد." این تعریف محدود به حوزه‌ی تولید است، اما می‌تواند به عملیات و امحا تعمیم داده شود.

چشم انداز مطرح شده توسط اسوانت آرهنیوس[1]، مدیر موسسه نوبل، را در نظر بگیرید که در سال ۱۹۲۶ مهندسان را فراخواند تا به طراحی موتور احتراق داخلی کاراتر با ظرفیت استفاده از

1.Svante Arrhenius

سوخت‌های جایگزین مانند الکل بپردازند و تحقیقات جدیدی در مورد باتری‌های برقی انجام دهند، موتورهای بادی و خورشیدی را مورد مطالعه قرار دهند تا انتشار CO_2 را کاهش دهند، نورپردازی با استفاده از مواد نفتی را با لامپ‌های برقی جایگزین کنند.

۱۶-۶-۱- قابلیت حفاظت داخلی و محیطی

با رشد سریع جمعیت و استفاده گسترده از منابع بر روی یک کره محدود، تولید ضایعات مربوط به تولید/ساخت، بهره‌برداری، و امحای کالا و خدمات نگرانی بزرگی ایجاد کرده است. این محصولات جانبی اندرکنش‌های بازار بر محیط اثر می‌گذارد. از دست رفتن کیفیت محیطی در نتیجه آلودگی هوا، آب و خاک توسط تولیدات بیش از حد یکی از مثال‌هاست. آلودگی صوتی حاصل از کارخانه‌ها، هواپیماها، کامیون‌ها و خودروها مثال دیگری است. مواردی نظیر هوا و رودخانه پاک، یا سر و صدا در دسیبل پایین را نمی‌توان در یک بازار خریداری کرد.

بازار طوری تنظیم شده است که نگرانی اندکی در آن در مورد کیفیت محیطی وجود دارد. این موضوع دو علت دارد. اول آن‌که از دست رفتن کیفیت محیط زمانی که اندرکنش‌ها اتفاق می افتد به‌موقع دیده نشده و درک نمی‌شود. دوم آن‌که این کاهش کیفیت در اندرکنش‌های یک بازار اغلب قابل توجه نیستند. چنین کاهش کیفیت‌هایی از آثار تجمعی تولید، بهره‌برداری و امحای محصولات حاصل می‌شود. زوال بلند مدت منابعی مانند آب و هوا در زمان حال به سختی قابل اندازه‌گیری است.

طراحان همیشه این فرصت را داشته‌اند که قابلیت حفاظت را در نظر بگیرند؛ قابلیت حفاظت سیستم/محصول درحال خدمت‌دهی و هم‌چنین قابلیت حفاظت محیط هنگامی که طی بهره‌برداری و پس از آن تحت‌تاثیر سیستم و محصول است. چنین موضوعاتی در بازار منعکس

می‌شود، جایی که بسیاری از محصولات تولید می‌شوند تا به‌کار روند، بازیافت شوند، تحت زوال بیولوژیکی قرار بگیرد و انتظار رود که مواد سمی از خود بجا نگذارند.

در گذشته، وجود آثار محیطی یا اعمال محدودیت‌هایی برای تولیدکننده یک موضوع اصلی در نظر طراحان نبوده است. این موضوع می‌تواند به‌علت بوده باشد که ضایعات و آلودگی ایجاد شده در فرایندهای تولیدی اغلب به‌عنوان محصولات جانبی تولید در نظر گرفته می شد و در نتیجه فرض می‌شد که اثری بر محیط و کیفیت آن ندارد. بنابراین، هزینه‌های ایجاد شده تبدیل به بخشی از هزینه‌های ثابت گردید که توسط تولیدکننده ایجاد می‌شود و به فرایند خلق محصول مربوط نمی‌شد. در نتیجه، مهندسان تلاش‌های اندکی در مورد قابلیت حفاظت محصول و سیستم از طریق ایجاد محصولات سبز و فرایندهای تولیدی دوستدار محیط مبذول می‌داشتند.

۱۶-۶-۲- شاخص‌های قابلیت حفاظت

شاخص‌های قابلیت حفاظت عموما در دسترس نیستند، اما ارزش زیادی در اندازه‌گیری پیشرفت در مهندسی سبز وجود دارد. تولیدکنندگان نیاز به معیارهای واضح و یکدست هستند تا به نیازمندی‌های قابلیت حفاظت پاسخ دهند و به‌طور روز افزون قوانین محدودکننده‌ی محیطی و بین‌المللی افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین، شاخص‌های ساده در ارتقای تغییرات طراحی محصول بی‌ارزش بوده و در طی چرخه‌ی عمر منجر به کاهش منابع، زوال محیط و آثار منفی بر انسان می‌شود.

اکثر شاخص‌هایی که امروزه استفاده می‌شود به‌صورت داوطلبانه بوده و مخصوص یک شرکت خاص بوده یا توسط یک دولت ابلاغ شده است. این شاخص‌ها، اکثرا یکدست نیستند. شاخص‌های مورد استفاده در یک بازار خاص یا یک کشور با دیگر بازارها یا کشورها متفاوت

است. با این حال، سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) هم اکنون در حال تحقیق، توسعه و انتشار شاخص‌های قابلیت حفاظت است. چارچوب مورد استفاده شامل موارد زیر می‌شود:

۱. ***منابع.*** شامل کاهش، زوال منابع و بهره‌برداری کارا می‌شود.
۲. ***محصول.*** شامل طراحی، عمر مفید، کیفیت و بسته‌بندی می‌شود.
۳. ***استخدام.*** شامل سلامت، ایمنی، امنیت و رضایت کارمند است.
۴. ***اقتصادی.*** شامل ارزش افزوده ایجاد شده توسط سرمایه‌گذاری و اخلاق تولیدی است.
۵. ***جامعه.*** شامل توسعه کارگروه‌ها و آثار اجتماعی می‌شود.
۶. ***محیط.*** شامل تولید ضایعات، مایعات و گازهای تولید شده، آلودگی‌های صوتی می‌شود.
۷. ***زیرساختار.*** شامل راحتی در حمل و نقل و ارتباطات می‌شود.

شاخص‌ها به‌صورت کلی به طراحی برای قابلیت حفاظت و به طراحی برای نیازمندی‌های قابلیت حفاظت تحت شرایط خاص کمک می‌کند. برخی حوزه‌های مورد توجه عبارت‌اند از (۱) کاهش مصرف انرژی، (۲) استفاده از مواد بازیافتی، (۳) افزایش عمر مفید، (۴) کیفیت، (۵) قابلیت تجدید پذیری، و (۶) طراحی برای بازیافت و استفاده مجدد. اگر لازم باشد قابلیت حفاظت به دیگر پارامترهای وابسته به طراحی ارتباط پیدا کند، شاخص‌ها وضعیت طراحی را در قبال برآورده شدن این نیازمندی نشان خواهند داد. پیشرفت در شاخص‌های قابلیت حفاظت اثر مثبتی بر توامندی‌های تولیدکننده داشته و آن را به‌عنوان یک الگو مطرح می‌کند.

۱۶-۷- نمودار ارزش- هزینه در چرخه‌ی عمر

رویکرد سیستمی برای دست‌یابی به یک تعادل در اکوسیستم صنعتی نیازمند آن است که طراحان طراحی، محصول اکولوژیکی و فرایندهای تولید اکولوژیکی را به‌صورت هم‌زمان در مراحل ابتدایی طراحی در نظر بگیرند. تحلیل چرخه‌ی عمر یک راهنما برای ارزیابی عواقب

محیطی یک محصول یا فرایند طی عمر آن محسوب می‌شود، از اکتساب مواد خام تا امحای نهایی. ارزیابی چرخه‌ی عمر در چارچوب‌های مفهومی و فنی دسته‌بندی شده است که می‌تواند برای ارزیابی عملکرد محیطی یک محصول، فرایند یا فعالیت طی چرخه‌ی عمر محصول، از اولین مرحله (تدارک مواد خام) تا آخرین مرحله (مدیریت ضایعات) مورد استفاده قرار گیرد. تحلیل بازیافت در یک سیستم حلقه‌ی بسته نیازمند اطلاعاتی در مورد دیگر فعالیت‌هاست، مانند تحلیل انتخاب مواد، تحلیل فرایندهای تولید و تحلیل بهره‌برداری از محصول.

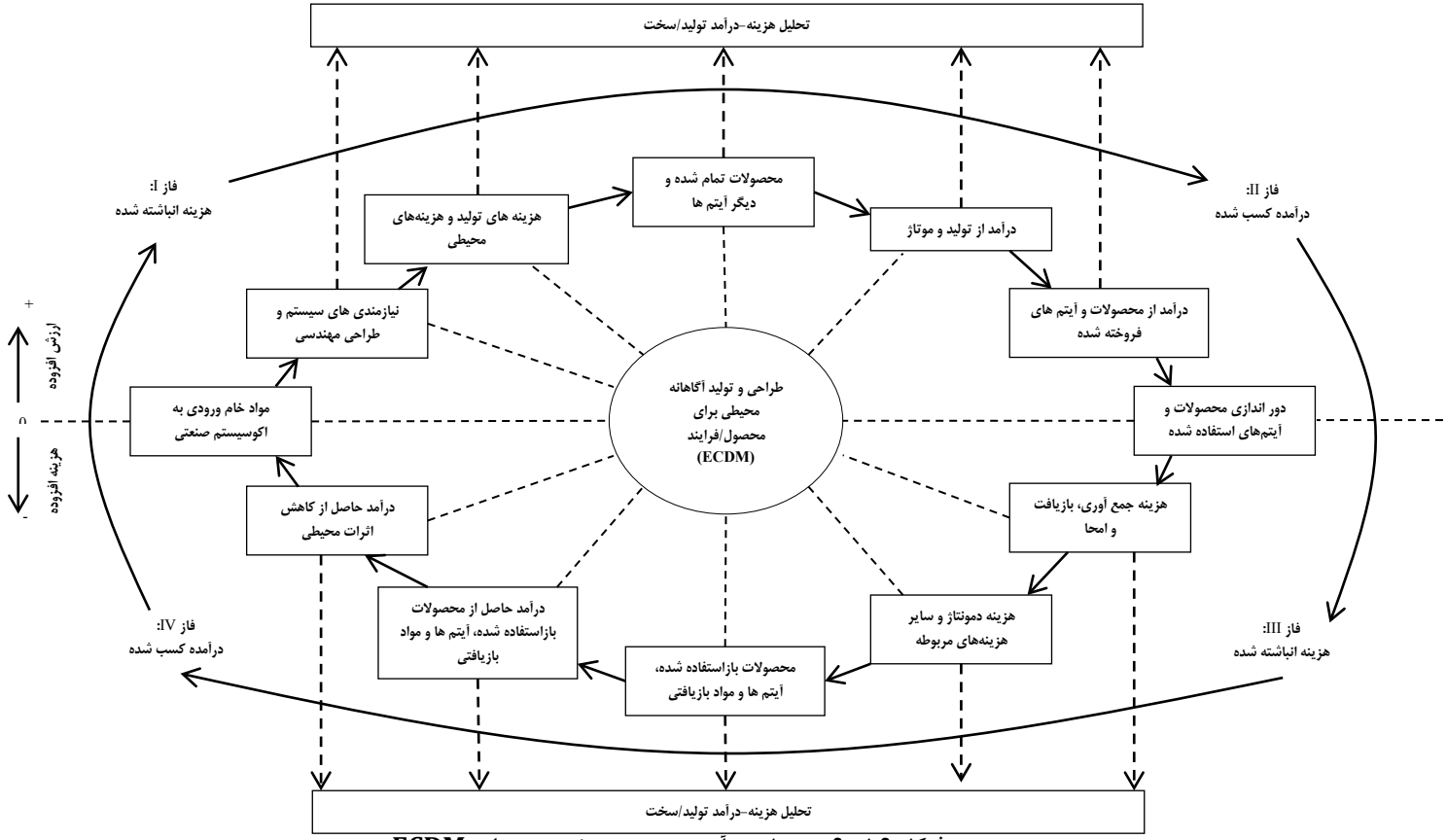
رویکردهای ادغام در ساخت یک مدل تحلیلی هزینه- درآمد موردنیاز است (شکل ۱۶-۶). یک نمودار جریان هزینه/ارزش مفاهیم پایه هزینه‌ها و ارزش‌ها را فراهم می‌کند که در طی چرخه‌ی عمر محصول تغییر می‌کند. هم‌چنین این نمودار یک جریان اقتصادی هزینه/ارزش را ترسیم می‌کند که پیچیدگی ملاحظات اقتصادی، تدارکاتی و محیطی را برای سیستم‌های تولیدی با ظرفیت دمونتاژ/ بازیافت توضیح می‌دهد.

در مهندسی تولید و تحلیل هزینه‌های چرخه‌ی عمر به روش سنتی، تحلیل هزینه- درآمد تولید/ساخت در فازهای۱و ۲ در شکل ۱۶-۶ به‌کارگرفته می‌شوند. هزینه‌ها طی تولید محصول و آیتم‌های مربوط (شامل هزین‌های محیطی) به آن پرداخت می‌شود (فاز ۱). ارزش هنگامی به محصول و آیتم‌های آن اضافه می‌شود که با استفاده از مواد خام شکل‌دهی شود. حد ارزش‌افزوده از طریق هزینه‌های تولیدی که توسط تجهیزات سرمایه‌ای، مهندسی طراحی، خریدها، نیروی انسانی، عملیات و فرایندها و غیره ایجاد می‌شود، تعیین می‌گردد. طی فاز ۲، یک درآمد که تنها از فروش محصولات یا آیتم‌های تکمیل شده به‌دست می‌آید، کسب می‌شود. ارزش محصول با گذشت زمان دچار کاهش می‌شود زیرا محصولات و آیتم‌ها طی عمر خود در اثر استفاده، فشارهای محیطی، یا رقابت با محصولات جدیدتر از نظر ارزش دچار استهلاک می‌شوند. درمورد محصولات سرمایه‌ای، مانند وسایل حمل و نقل، یک ارزش اسقاطی در نظر گرفته می‌شود. اما

اکثر آیتم‌های کوچک، ارزش اسقاطی خالص صفر بوده یا به‌علت وجود هزینه‌های حذف یا امحا دارای ارزش منفی هستند. بنابراین، چرخه‌ی عمر محصول و تحلیل سنتی هزینه- درآمد تولید این هزینه را به علت آثار محیطی و درآمد بالقوه از بازیافت، در نظر نمی‌گیرد.

یک چرخه اقتصادی کامل‌تر شامل نیمه پایینی نمودار جریان در شکل ۱۶-۶ می‌شود. محصولات و آیتم‌ها می‌توانند در شرایط اسقاطی بازیافت شوند. جمع‌آوری، مرتب‌سازی، دمونتاژ، حذف آلاینده، و بازیابی مواد طی فرایند بازیافت و دمونتاژ ضروری است. این فعالیت‌ها به هزینه‌ها اضافه می‌گردند، این درحالیست که ارزش خالص و واقعی محصول و آیتم‌های بازیافت شده به‌دست آمده از صنعت و مصرف‌کننده (فاز ۳) افزایش می‌یابد. در فاز ۴، آیتم‌های بازیافت شده و مواد بازیابی شده به مبدا یا دیگر تولیدکنندگان فروخته می‌شود. دیگر صرفه‌جویی‌ها در فاز چهارم از طریق استفاده مجدد از آیتم‌ها و مواد بازیافتی و هم‌چنین از طریق کاهش آثار محیطی (شامل صرفه‌جویی در انرژی مصرفی برای کاهش ضایعات) حاصل می‌شود.

هزینه‌های محیطی را نمی‌توان به‌سادگی تعیین کرد، اما به‌صورت هزینه‌های بار محیطی تحمیل شده، هزینه‌های امحا، هزینه‌های جابه‌جایی ضایعات و تعهدات محیطی خود را نشان می‌دهد. با این حال، بازیافت در بسیاری از موارد بدون توجه به عایدی‌های مربوط به موضوعات محیطی از نظر اقتصادی معقول است. در یک چرخه کامل اقتصادی، فرصت‌های بازیافت آیتم‌ها و مواد در طی فرایند طراحی فرایند و محصول باید مدنظر قرار گیرد. این ملاحظات باید تحت یک مدل ارزیابی تصمیم انجام شود که برای انتخاب گزینه‌های مختلف طراحی برای محصول و فرایند به‌کار می‌رود.



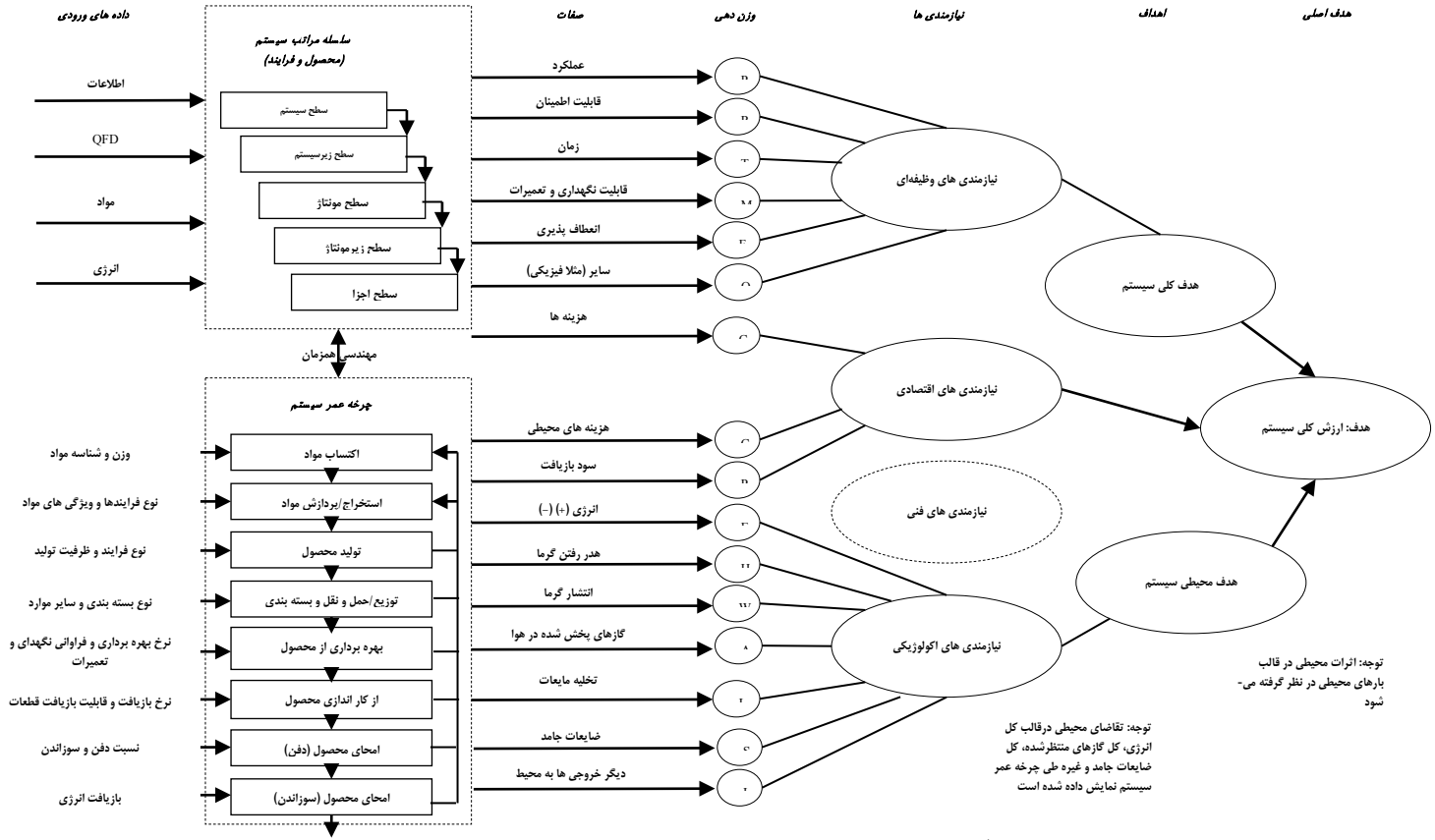
شکل ۱۶- ۶- جریان درآمد و هزینه چرخه عمر برای ECDM

۱۶-۸- خلاصه فصل

شکل ۱۶-۷ مسائل مربوط به ECDM را خلاصه می‌کند که در این فصل مورد بررسی قرار گرفت. ارزش کلی محصول، عموما یک هدف است. ارزیابی طراحی سیستم یا بهینه‌سازی طراحی یک رویه الزامی در توسعه محصول اکوسیستمی است تا ارزش کل محصول را بیشینه کند. در زمینه ECDM، ارزش کلی چرخه‌ی عمر محصول از فعالیت‌های تولیدی و دمونتاژ ایجاد می‌شود. تولید، دمونتاژ و حفاظت به شدت تحت‌تاثیر طراحی محصول و سیستم تولیدی می‌باشد که محصول را خلق می‌کند. همه‌ی این موارد می‌تواند ارزش یک محصول را افزایش یا کاهش دهد.

هم اکنون توجه زیادی به ادغام طراحی و تولید می‌شود. اما ادغام حفاظت و بازیافت با این موضوعات نیز به‌همان اندازه با اهمیت است. اثر موضوعات محیطی بر توسعه محصول شامل بازه‌ای از برنامه‌ریزی تولید و تولید محصول تا دمونتاژ و بازیافت محصول می‌شود و هر دو آن‌ها باید به‌صورت اکولوژیکی و با در نظر گرفتن موضوعات محیط زیست مدنظر قرار گیرند. با این حال، هیچکدام از موارد ذکر شده در طراحی چرخه‌ی عمر محصول و فرایند به طور کامل و جامع در نظر گرفته نمی‌شود. انواع مختلف مسائل و راه‌حل‌های قبلی بخشی از مساله کلی DFE است. نیاز است یک ملاحظات محیطی در مهندسی و طراحی چرخه‌ی عمر به‌صورت سیستمی ادغام شود.

توسعه محصولات اکولوژیکی محدود به تولید و بازار نمی‌شود. کل چرخه‌ی عمر محصول باید در نظر گرفته شود. ورای طراحی محصول سبز، تولیدکننده باید آثار محیطی فرایندهای مرتبط با محصول و پشتیبانی تدارکات را در نظر بگیرد. بنابراین، یک رویکرد ادغامی مطلوب است که سه عنصر محصول، فرایند و پشتیبانی تدارکات را طی چرخه‌ی عمر در نظر بگیرد و شامل فاز تجدید و بازیافت باشد.



شکل ۱۶- ۷- یک مدل جریان هدف گرا برای قابلیت تولید و قابلیت امحا

در زمینه‌ی طراحی اکولوژیکی محصولات و فرایندها، رویکرد ECDM به‌دنبال کشف ابداعاتی است که منجر به کاهش آثار مضر محیطی در همه مراحل چرخه‌ی عمر باشد و در کنار آن اهداف کیفیت، هزینه و عملکرد را برآورده کند. ECDM باید برای ایجاد تعادل در مقابل دیگر ملاحظات طراحی عمل کند تا بهترین طراحی به‌دست آید. برای پیاده‌سازی ECDM و ادغام اثربخش آن در فرایند توسعه محصول اکولوژیکی، این عناصر کلیدی در مراحل مختلف چرخه‌ی عمر موردنیاز هستند: ترکیب، تحلیل و ارزیابی چرخه‌ی عمر برای تعیین بهترین گزینه به منظور ایجاد تعادل بین ملاحظات مختلف طراحی.

از نقطه‌نظر طراحی محصول، ارزش کلی محصول توسط عملکرد، کیفیت، انطباق محیطی، و جنبه‌های اقتصادی آن تعیین می‌شود. از نقطه نظر فرایند تولید، هماهنگی در دمونتاژ و عملیات بازیافت، چه با هم و چه با دیگر تسهیلات تولیدی، کار پیچیده‌ای است. به نظر می‌آید که برخی مدل‌های تحلیلی نیاز است که دید مناسبی در مورد فرایندهای طراحی و تولید محصول که مربوط موضوعات محیطی است به طراحان و مهندسان بدهد. علاوه‌بر این، ارزیابی چرخه‌ی عمر توسعه داده شده و به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی مشکلات محیطی ایجاد شده توسط محصولات و فرایندهای تولیدی به‌کار می‌رود. نتایج LCA یک فاکتور مهم در ارزیابی آثار محیطی یک محصول و فرایند تولید آن است.

تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر (LCCA) استفاده می‌شود تا موضوعات محیطی از نقطه نظر اقتصادی ارزیابی شود. رویکرد چرخه‌ی عمر یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های چارچوب ECDM است. دیگر ویژگی‌های آن رویکردهای محصول/مواد گرا و رویکردهای سیستم‌گرا است. این رویکردها منجر به ادغام DFE، LCA، و LCCA در مفهوم ECDM است.

علاوه‌بر محتوای این فصل، دو کتاب در مورد اکولوژی صنعتی و قابلیت حفاظت وجود دارد که می‌تواند درک عمیق‌تری از مسائل طرح شده در این فصل فراهم کند. این کتاب‌ها عبارت‌اند از

T.E. Graedel and B.R. Allenby, Industrial Ecology, 2nd ed. (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003) .

P.Stansinopoulos, M.H. Smith, K. Hargroves, and C. Desha, Whole System Design: An Integrated Approach to Sustainable Engineering (London, UK and Sterling, VA, USA: Earthscan, 2009).

حوزه‌ی اکولوژی صنعتی در ابتدا در اواخر دهه ۹۰ میلادی از طریق ایجاد *مجله اکولوژی صنعتی*[1] شناخته شد. این مجله ۴ به‌صورت فصلنامه توسط انتشارات MIT منتشر شده و به ادراک و کاربرد این حوزه در حال ظهور می‌پردازد. خواننده علاقه‌مند می‌تواند برای اطلاعات بیش‌تر به سایت http://mitpress.mit.eduمراجعه کند.

یک انجمن بین المللی در حوزه اکولوژی صنعتی وجود دارد. در ژانویه ۲۰۰۰، گروهی از رهبران حوزه‌های مختلف در آکادمی علوم نیویورک گرد هم آمده و تصمیم به ایجاد انجمن بین‌المللی اکولوژی صنعتی گرفتند. برای اطلاعات بیش‌تر به وب‌سایت http://www.is4ie.org مراجعه کنید.

اخیرا مجمع بین المللی خبرگان، قابلیت حفاظت[2](ISSP) بنیاد نهاده شده است که به ایجاد استاندارد قابلیت حفاظت می‌پردازد. اطلاعات بیش‌تر در مورد این مجمع را می‌توانید در سایت http://sustainabilityprofessionals.org پیدا کنید.

1.Journal of Industrial Ecology

2.International Society of Sustainability Professionals

سوالات و مسائل

۱. یک توضیح کوتاه در مورد عبارت‌های "خلق" و "توقف"بنویسید که با مفهوم آنتروپی در ارتباط باشد.

۲. روابط بین قابلیت تولید، قابلیت امحا و قابلیت حفاظت را که در شکل ۱۶–۱ به تصویر کشیده شده است، تشریح کنید.

۳. وجود انسان توسط خدمات فناورانه و اکولوژیکی حفظ می‌شود. توضیح دهید.

۴. برخی فاکتورها و محرک‌های مهندسی سبز را فهرست کنید.

۵. طراحی و تولید آگاهانه محیطی را تعریف کرده و با مدیریت محیطی مقایسه کنید (شکل۱۶–۲).

۶. قابلیت تولید را تعریف کنید. اهمیت آن چیست؟ چه هنگامی از چرخه‌ی عمر سیستم در دستور کار قرار می‌گیرد؟

۷. برخی از شاخص‌های قابلیت تولید را شناسایی و تشریح کنید.

۸. قابلیت امحا را تعریف کنید. اهمیت آن چیست؟ چه هنگامی از چرخه‌ی عمر سیستم در دستور کار قرار می‌گیرد؟

۹. برخی از شاخص‌های قابلیت امحا را شناسایی و تشریح کنید.

۱۰. به زبان ساده توضیح دهید که چرا قابلیت تولید به‌صورت داخلی و قابلیت امحا به‌صورت خارجی در نظرگرفته می‌شود.

۱۱. چه محرک‌هایی وجود دارد که باعث می‌شود یک شرکت قابلیت امحا را به‌صورت داخلی صورت دهد.

۱۲. هنگامی که محرک‌های داخلی کافی نباشد، چه سیاست‌هایی توسط دولت باید در پیش گرفته شود تا قابلیت امحا به‌صورت داخلی در نظرگرفته شود؟

۱۳. کیفیت محیطی یعنی چه؟

۱۴. به زبان ساده بیان کنید که معنی *طراحی و تولید آگاهانه محیطی* چیست؟

۱۵. اثر نتایج تحلیل وظیفه‌ای بر قابلیت تولید چیست؟

۱۶. منظور از دمونتاژ در این فصل چیست؟ مثال بزنید.

۱۷. اگر هدف شما آن باشد که ضایعات را در فرایند تولید کاهش دهید، چه اهدافی برای طراحی محصولی که باید تولید شود، استقرار می‌یابد؟

۱۸. قابلیت تولید را چگونه با قابلیت حمل و نقل و تحرک پذیری مرتبط می‌کنید؟

۱۹. برخی فرایندهای تولیدی را شناسایی کنید که نیاز است برای ارتقای قابلیت تولید در دستور کار قرار گیرد (حداقل ۵ مورد).

۲۰. منحنی یادگیری را تشریح کنید. یک مثال ساده از منحنی یادگیری ۷۰٪ و ۸۰ درصد بزنید. تحت چه شرایطی منحنی‌های یادگیری قابل اعمال هستند؟

۲۱. تولید اکولوژیکی را تشریح کنید. عناصر آن چه چیزهایی باید باشد؟

۲۲. مهندسی سبز را تعریف کنید.

۲۳. فرض کنید که سازمان شما را برای توسعه برنامه از کاراندازی و امحای مواد اختصاص داده است. یک طرح کلی موضوعی از این برنامه را تهیه کنید (یعنی چه چیزهایی در این برنامه گنجانده می‌شود). یک فرایند جریان توسعه دهید که فعالیت‌های مربوط به پیاده‌سازی این برنامه را نشان می‌دهد.

۲۴. به وب‌سایت‌های ISIE و ISSP مراجعه کرده و شباهت‌ها و تفاوت‌ها در اهداف این انجمن‌ها را فهرست کنید.

۱۷

طراحی برای مقرون به‌صرفه بودن(هزینه چرخه‌ی عمر)

در طراحی، تولید، به‌کارگیری و عملیات بسیاری از سیستم‌ها به بحث مقرون به‌صرفه بودن و مجموع هزینه سیستم که به آن هزینه چرخه‌ی عمر (LCC) گفته می‌شود، توجه کمی می‌شود. جنبه‌ی فنی شکل ۲–۸ اغلب اول در نظر گرفته می‌شود و جنبه اقتصادی به بعد موکول می‌گردد.

فاکتورهای اقتصادی و هزینه‌ای که از فعالیت‌هایی مانند تحقیق، طراحی، تست، تولید یا ساخت، به‌کارگیری و پشتیبانی، توقیف و از کار انداختن ناشی می‌شوند، اغلب در چرخه‌ی عمر به‌صورت مستقل و پراکنده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

بر این اساس در این فصل فاکتورهای اقتصادی و هزینه‌ای با تاکید کلی بر مقرون به‌صرفه بودن بررسی می‌شوند. در ابتدا به معرفی هزینه چرخه‌ی عمر پرداخته و سپس هزینه‌هایی معرفی می‌شوند که طی چرخه‌ی عمر سیستم ایجاد می‌شوند. بعد از آن، به معرفی یک فرایند کلی ۱۲ مرحله‌ای هزینه چرخه‌ی عمر، به‌عنوان یک روش ارجح پرداخته می‌شود.

این روش در ابتدا برای یک نمونه از هزینه چرخه‌ی عمر براساس مدل‌سازی جریان پول به‌کار گرفته شده است. نمونه دوم از هزینه چرخه‌ی عمر برای نشان دادن کاربرد روش‌شناسی بر اساس مدل بهینه‌سازی اقتصادی عنوان می‌شود.

این فصل درک عمیق‌تری از جنبه‌ی اقتصادی مهندسی سیستم نسبت به مطالب عنوان شده در فصل ۸ درباره‌ی مدل ارزیابی اقتصادی فراهم می‌کند. موضوعات عنوان شده به‌منظور نگرش بهتر و فهم موضوعات زیر بیان می‌شوند:

- محیط اقتصادی و فنی، هم هزینه‌های پیش‌بینی شده و هم غیرقابل پیش‌بینی(غیرآشکار) را که در طی چرخه‌ی عمر سیستم تولید می‌شوند، افزایش می‌دهد.
- دسته‌های اصلی هزینه و عناصر زیرمجموعه آن که باید در فرایند طراحی چرخه‌ی عمر درنظر گرفته شوند.
- اصل و اثر هزینه‌های چرخه‌ی عمر که برخاسته از فعالیت‌های تولید، عملیات، پشتیبانی، نگه‌داری و توقیف هستند.
- هزینه چرخه‌ی عمر و منافع که مربوط به تعیین هزینه– منفعت و/یا هزینه– اثربخشی یک سیستم و/یا محصولات آن هستند.
- چگونگی به‌کارگیری ۱۲ مرحله در فرایند هزینه چرخه‌ی عمر، براساس مدل‌سازی جریان پول طبق معادله‌ی ۷–۱.
- چگونگی پیاده‌سازی مدل بهینه‌سازی اقتصادی طبق معادله‌ی ۷–۳ که توسط فرایند ۱۲ مرحله‌ای هزینه چرخه‌ی عمر هدایت می‌شوند.
- مزایا و معایب الگوی مدل‌سازی جریان پول و الگوی بهینه‌سازی اقتصادی؛

- منافعی که از به‌کارگیری هزینه چرخه‌ی عمر در فرایند ایجاد سیستم و محصول انتظار می‌رود.

آخرین فصل از بخش چهارم با خلاصه کردن کاربردها و منافع فراگیر که از هزینه چرخه‌ی عمر و تحلیل مقرون به‌صرفه بودن مشتق می‌شود، به پایان می‌رسد. در پایان فصل به تعدادی از منابع کلاسیک و آدرس وب سایت‌های انتخابی اشاره می‌شود.

۱۷-۱- معرفی هزینه چرخه‌ی عمر

به‌طور کلی، پیچیدگی سیستم‌ها در حال افزایش است و بسیاری از این سیستم‌های در حال استفاده به نیازهای مشتری(یعنی کاربر) در زمینه‌ی اجرا، اثربخشی و به‌طور کلی هزینه، پاسخ نمی‌دهند. فناوری‌های جدید به‌طور دائمی معرفی می‌شوند، در حالی که چرخه‌های انجام وظیفه بسیاری از سیستم‌ها در حال گسترش است. مدت زمانی که برای توسعه و گسترش یک سیستم جدید به‌کار می‌رود، باید کاهش یابد. زیرساخت صنعتی مدام در حال تغییر است و منابع در دسترس در حال کاهش است. این روند که با کاربردهای قبلی در طراحی و توسعه سیستم همراه است، معمولا باعث ناهماهنگی بین جنبه‌های اقتصادی و فنی سیستم می‌شود، چنان که در شکل ۱۷-۱ نشان داده شده است. این ناهماهنگی در حین توسعه ممکن است منجر به استقرار سیستمی شود که به اندازه‌ای که می‌تواند هزینه-اثربخش نیست.

با توجه به جنبه اقتصادی در شکل ۱۷-۱، تجربه نشان می‌دهد که نه تنها هزینه سیستم‌های جدید در حال افزایش است، بلکه هزینه عملیات و نگه‌داری سیستم در حال استفاده نیز به‌طور اساسی گسترش می‌یابد.

این مساله به‌طور عمده به دلیل آمیختن تورم و رشد هزینه است که دارای علت‌های متعددی می‌باشد:

۱. رشد هزینه‌ها در نتیجه‌ی تغییرات مهندسی در طول طراحی و توسعه یک سیستم یا محصول (با هدف بهبود عملکرد، افزایش قابلیت‌ها و غیره).

۲. رشد هزینه‌ها در نتیجه تغییر تامین‌کننده‌ها در تهیه اجزای سیستم.

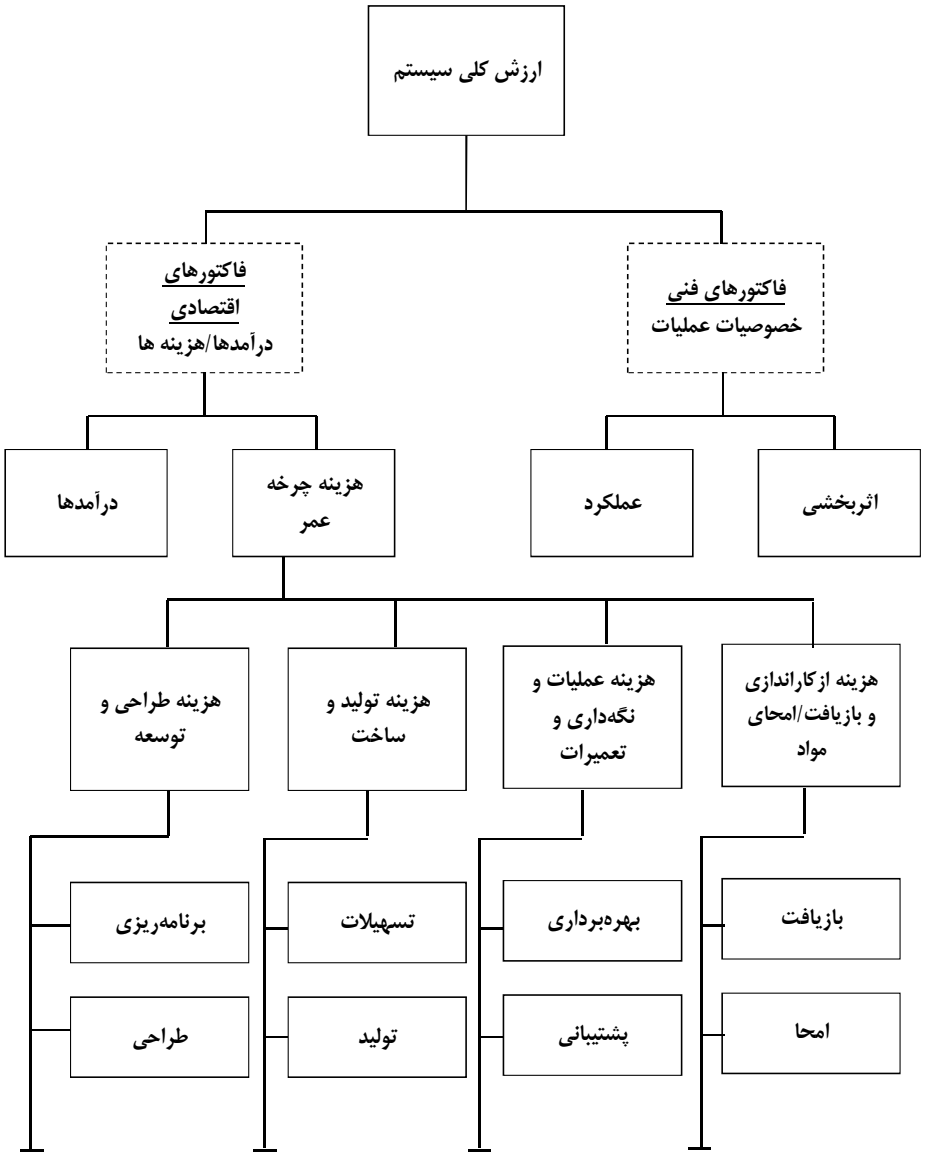
۳. رشد هزینه‌ها در نتیجه تولید سیستم یا تغییرات ساختاری.

۴. رشد هزینه‌ها در نتیجه تغییر قابلیت پشتیانی تدارکات.

۵. رشد هزینه‌ها در نتیجه تخمین‌های اولیه نادرست و تغییر در دستورالعمل تخمین.

۶. رشد هزینه‌ها در نتیجه مشکلات پیش‌بینی نشده.

زمانی که هزینه‌های اصلی افزایش می‌یابند، تخصیص بودجه برای بسیاری از سیستم‌ها سال به سال کاهش می‌یابد. نتیجه این است که پول کم‌تری برای کسب و انجام عملیات سیستم‌های جدید و هم‌چنین پشتیبانی و نگه‌داری سیستم‌هایی که در حال استفاده هستند، در دسترس می‌باشد. زمانی که تورم و رشد هزینه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند، سرمایه‌ی در دسترس برای پروژه‌ها(یعنی قدرت خرید) کم می‌شود.



شکل ۱۷ - ۱- فاکتورهای فنی و اقتصادی تشکیل دهنده‌ی ارزش کلی سیستم (هم‌چنین به شکل ۲-۸ مراجعه کنید).

وضعیت اقتصادی کنونی توسط برخی مشکلات دیگر که مربوط به تعیین هزینه‌ی واقعی محصول یا سیستم است، پیچیده‌تر می‌شود. برخی از این مشکلات عبارت‌اند از:

۱. کل هزینه سیستم معمولا قابل مشاهده نیست، به‌خصوص هزینه‌هایی که مربوط به پشتیبانی و نگه‌داری سیستم می‌شوند. مشکل دیده نشدن هزینه را می‌توان به "مفهوم کوه یخ" تشبیه کرد که در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است. بنابراین نباید تنها به هزینه‌ی اکتساب سیستم توجه کرد و هزینه‌های دیگر نیز باید مورد توجه قرار گیرند.

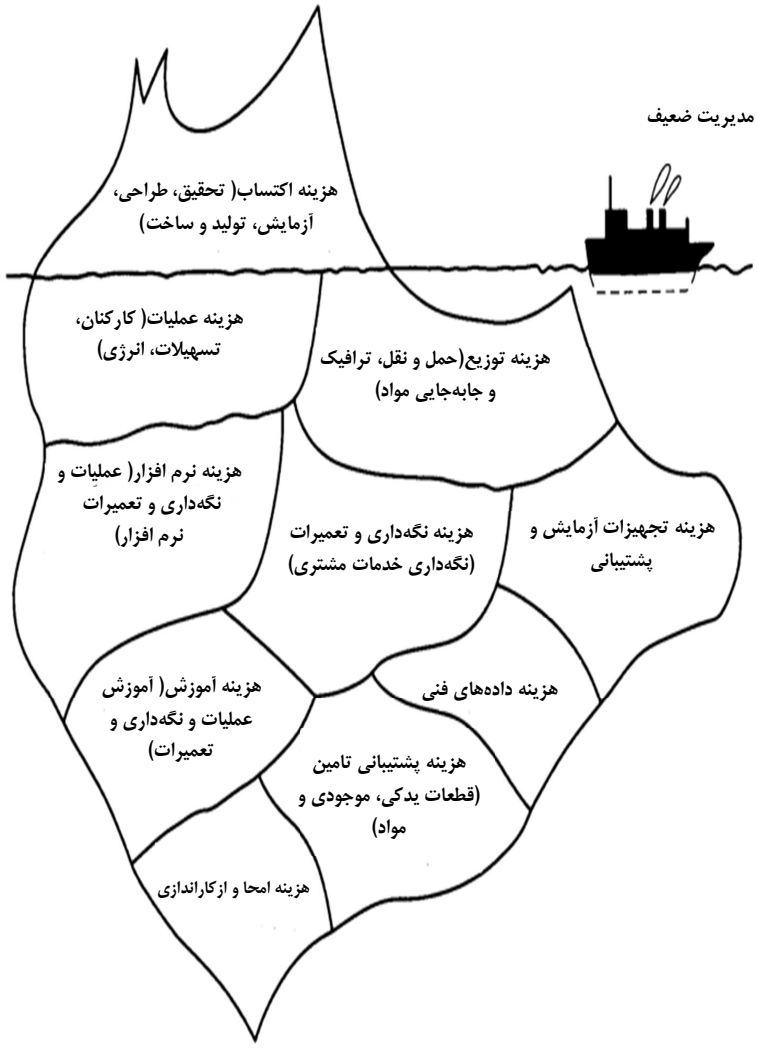
۲. فاکتورهای اقتصادی معمولا به صورت نامناسبی در تخمین هزینه به‌کار می‌روند. برای مثال هزینه‌ها معمولا به شکل نادرست تعریف شده و در دسته‌های اشتباه قرار می‌گیرند؛ هزینه‌های تغییرپذیر به‌عنوان هزینه‌های ثابت(یا برعکس) یا هزینه‌های غیرمستقیم به‌عنوان هزینه‌های مستقیم درنظر گرفته می‌شوند.

۳. دستورالعمل حسابداری همیشه یک ارزیابی واقعی و به‌موقع از هزینه ندارد. به علاوه، مشخص کردن هزینه‌ها براساس زیرساخت‌های وظیفه‌ای دشوار است (اگر ناممکن نباشد).

۴. کاربردهای بودجه‌ای معمولا در ارتباط با تغییر سرمایه از یک دسته به دسته دیگر و هم‌چنین سال به سال تغییرناپذیر است. تغییراتی که می‌توانند به توسعه در اکتساب و استفاده از سیستم کمک کنند.

۵. روند کنونی تورم و رشد هزینه، به همراه مشکلات بیان شده، باعث ایجاد عدم کارایی در استفاده از منابع کمیاب می‌شود. سیستم‌ها و محصولات به شکلی توسعه یافته‌اند که آن‌گونه که می‌توانند هزینه- اثربخش نیستند. به‌علاوه پیش‌بینی می‌شود تا زمانی که

درجه بالایی از آگاهی در فعالیت‌های روزمره به‌کار گرفته نشود، این وضعیت‌ها بدتر می‌شود.



شکل ۱۷- ۲- پدیداری عناصر هزینه کلی چرخه‌ی عمر.

هزینه چرخه‌ی عمر به کل هزینه‌های مربوط به سیستمی که در تعیین چرخه‌ی عمر به‌کار می‌روند، گفته می‌شود. چرخه‌ی عمر و وظایف اصلی مربوط به هر فاز در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. چرخه‌ی عمر سیستم اساس هزینه چرخه‌ی عمر را تشکیل می‌دهد. به‌طور کلی هزینه چرخه‌ی عمر شامل موارد زیر است:

۱. **هزینه تحقیق و توسعه:** طراحی ابتدایی، تحلیل بازار، مطالعات امکان‌پذیری، جستجوی محصول، طراحی مهندسی، طرح مستندسازی، نرم‌افزار، تست و ارزیابی مدل‌های مهندسی و مدیریت وظایف وابسته.

۲. **هزینه ساخت و تولید:** مهندسی تولید و تحلیل عملیات، تولید(ساخت، مونتاژ و آزمایش)، سهولت ساخت، فرایند توسعه، عملیات تولید، کنترل کیفیت، نیازمندی‌های ابتدایی پشتیبانی تدارکات (مانند پشتیبانی ابتدایی مصرف‌کننده، تولید قطعات یدکی، تولید تجهیزات پشتیبانی و آزمایش و غیره).

۳. **هزینه عملیات و پشتیبانی:** مشتری یا مصرف‌کننده عملیات سیستم، پخش‌کننده محصول(بازاریابی و فروش، حمل و مدیریت ترافیک) و حفظ پشتیبانی تدارکات در طول چرخه‌ی عمر محصول یا سیستم(مانند خدمات مشتری، فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیر، پشتیبانی تولید، تجهیزات پشتیبانی و آزمایش، حمل و نقل و جابه‌جایی، داده‌های فنی، امکانات، اصلاح سیستم و غیره).

۴. **هزینه‌های ازکاراندازی و امحا:** امحای موارد غیرقابل جبران در چرخه‌ی عمر، ازکاراندازی محصول/سیستم، بازیافت مواد و نیازمندی‌های قابل اجرای پشتیبانی تدارکات.

هزینه چرخه‌ی عمر با تعریف وظیفه قابل اجرا در هر مرحله از چرخه‌ی عمر، هزینه‌یوظایف، به‌کارگیری هزینه‌های درست در برنامه سالانه و در نهایت جمع کردن هزینه‌ها برای کل چرخه‌ی

عمر تعیین می‌شود. هزینه چرخه‌ی عمر شامل همه محصولات، تامین‌کننده، مشتری(کاربر)، نگه‌دارنده و هزینه‌های مربوطه.

۱۷-۲- بررسی هزینه در چرخه‌ی عمر سیستم

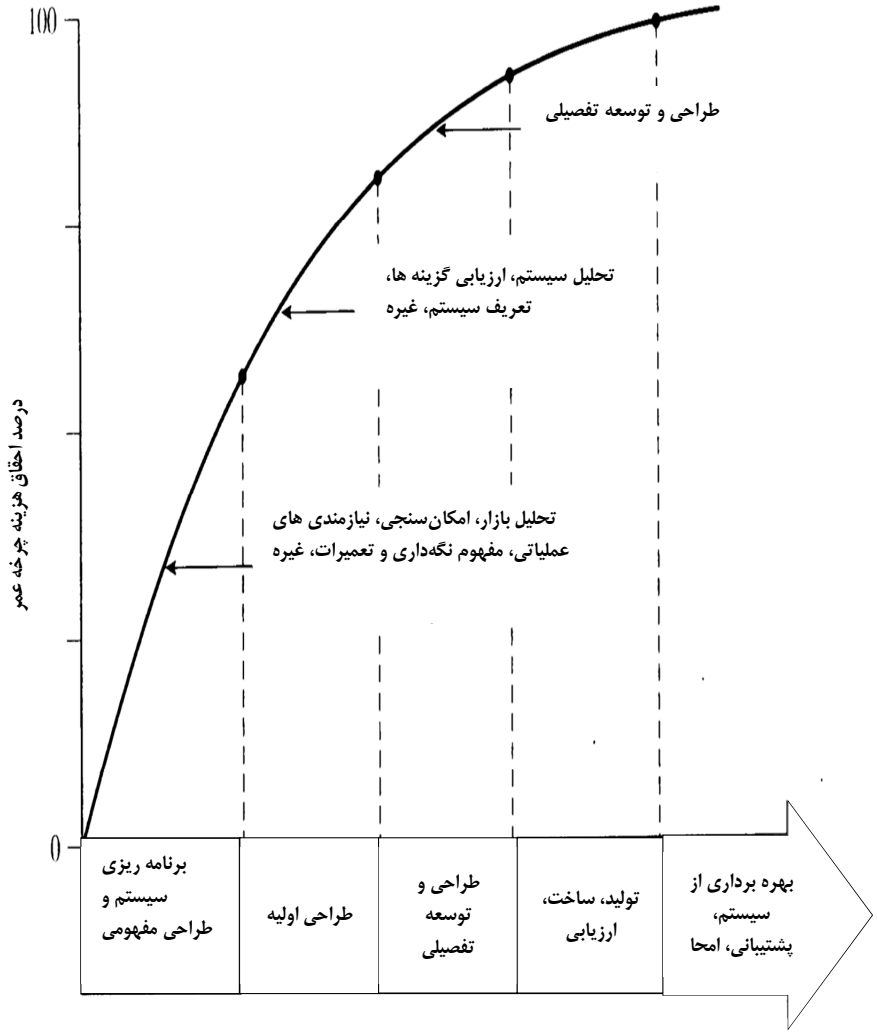
تجربه نشان می‌دهد که بخش بزرگی از کل هزینه‌ها برای بسیاری از سیستم‌ها، نتیجه‌ی مستقیم فعالیت‌های جاری مربوط به پشتیبانی و عملیات سیستم می‌باشد؛ در حالی‌که تعهدات این هزینه‌ها براساس تصمیم‌های مهندسی و مدیریتی است که در مراحل اولیه (مقدماتی و مفهومی) طراحی چرخه‌ی عمر گرفته می‌شوند.(به شکل ۲-۱۲ مراجعه شود). هزینه مربوط به فازهای مختلف چرخه‌ی عمر بهم وابسته هستند و تصمیم‌گیری در هر فاز می‌تواند تاثیراتی در فازهای دیگر داشته باشد. هم‌چنین هزینه‌های مربوط به فعالیت‌های مشتری، تولیدکننده و تامین‌کننده همه بهم وابسته هستند. بنابراین در برخورد با مسائل اقتصادی، باید به کل هزینه‌های مفهوم چرخه‌ی عمر(به شکل ۲-۳ مراجعه شود) و به‌خصوص به مراحل اولیه برنامه‌ریزی پیشرفته و طراحی مفهومی توجه کرد.

از آنجا که این مسئله با دیگر ویژگی‌های طراحی که در فصل قبل مطرح شد مرتبط است، هدف هزینه می‌تواند (۱) از ابتدا مختص به یک سیستم باشد(مانند شاخص طراحی اقتصادی)، (۲) مختص عناصر یا وظایف سطح پایین‌تر سیستم باشد و (۳) با هدف ارزیابی سیستم، هنگامی که چرخه‌ی عمر مشخص شود، اندازه‌گیری می‌شود. تاکید بیش‌تر باید بر کل هزینه چرخه‌ی عمر و نه بر عناصر اقتصادی جدا باشد. توجه به این مسئله ضروری است که ریسک ذاتی در تصمیم‌های عملیاتی و طراحی به صورت پیوسته مورد ارزیابی مناسب قرار گیرد.

شکل ۱۷-۳ منحنی مشخصات تعهد هزینه چرخه‌ی عمر را که در اثر حرکتی که در فازهای مختلف چرخه‌ی عمر اتفاق افتاده است، نشان می‌دهد(نسخه اقتصادی شکل ۲-۱۲). همان‌طور

که نشان داده شد، بیش‌تر از نصف هزینه‌ی عمر نشان داده شده با پایان فاز طراحی سیستم و طراحی مفهومی وارد عمل می‌شود. اگرچه هزینه واقعی طرح درحال حاضر تقریبا حداقل است، اما در یک نرخ افزایشی بالا می‌رود. کاهش فاصله بین هزینه تعهد یافته و هزینه واقعی مطلوب است.

گام اول در هزینه چرخه‌ی عمر، ایجاد هدف هزینه است که شامل یک یا چند ضریب شایستگی است که در آن سیستم یا محصول باید در یک فاصله زمانی مشخص طراحی، تولید(ساخته) و پشتیبانی شود. گام دوم اهداف هزینه به زیرسیستم‌های خاص و عناصر سیستم مانند ضوابط و محدودیت‌های طراحی، اختصاص داده شده است(به شکل ۴–۶ مراجعه شود). در طول پیشرفت طراحی، ساختار گزینه‌های ممکن باید با اهداف ارزیابی شوند و رویکرد ارجح انتخاب گردد. هم‌چنان که سیستم/محصول ادامه می‌یابد تا در مراحل مختلف پیشرفت توسعه یابد، ارزیابی هرینه چرخه‌ی عمر ساخته شده و نتایج آن با اهداف مشخص ابتدایی مقایسه می‌شود(به شکل ۵–۹ مراجعه شود). حوزه‌های غیرقابل قبول مورد توجه قرار گرفته و اعمال اصلاحی آغاز می‌شود. تاکید هزینه در سرتاسر سیستم/محصول چرخه‌ی عمر در شکل ۱۷–۴ مشخص شده و در فصل بعد توضیح داده می‌شود.

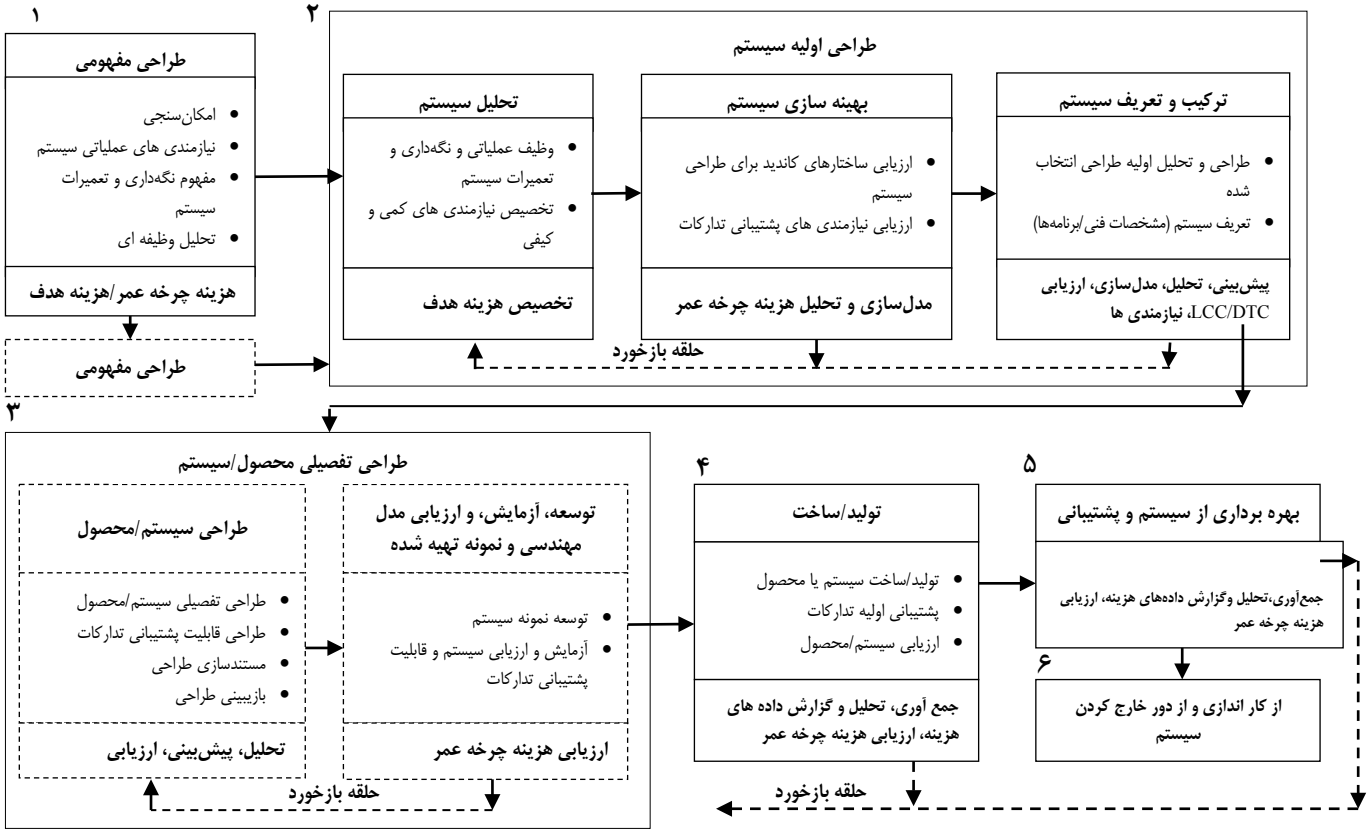


شکل ۱۷-۳- فعالیت‌های اثرگذاری بر چرخه‌ی عمر هزینه (به شکل ۲-۱۲ رجوع کنید).

۱۷-۲-۱- طراحی مفهومی(شکل ۱۷-۴، بلوک۱)

کاملا مشخص است که بخش بزرگی از هزینه چرخه‌ی عمر نمایش داده شده برای یک سیستم مشخص، توالی تصمیم‌هایی است که در طول معماری و برنامه‌ریزی اولیه به‌عنوان بخشی از طراحی مفهومی سیستم گرفته می‌شود. این تصمیم‌ها در ارتباط با نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، فاکتورهای اثربخشی و اجرا، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، ساختار سیستم(طرح‌های بسته‌بندی سیستم)، حجم تولید، فاکتورهای مصرف مشتری، خط‌مشی‌های پشتیبانی تدارکات، امحا و غیره است. تصمیم‌ها در نتیجه‌ی تحلیل بازار یا ارزیابی طراحی گرفته می‌شوند تا راهنمای طراحی و فعالیت‌های تولیدی بعدی، وظایف توزیع‌کننده، جنبه‌های مختلف پایداری پشتیبانی سیستم و ازکار افتادن باشد. بر این اساس، اگر هزینه چرخه‌ی عمر نهایی برای رسیدن به مقرون به‌صرفه‌بودن به حداقل رسانده شوند، ضروری است که درجه بالایی از تاکید بر هزینه، در مرحله اولیه پیشرفت سیستم به‌کارگرفته شود.

در مراحل اولیه برنامه‌ریزی و طراحی مفهومی، ضریب شایستگی کمی باید به‌عنوان نیازمندی‌هایی ایجاد شود که در آن سیستم یا محصول باید طراحی، آزمایش، تولید(ساخته)، اعمال، پشتیبانی و ازکاراندازی شود. یک طراحی برای هزینه(TPM) ممکن است به‌عنوان یک نیازمندی طراحی سیستم هم‌زمان با اجرا، اثربخشی، اعتبار، قابلیت نگه‌داری، قابلیت پشتیبانی، قابلیت تولید، قابلیت امحا و غیره ایجاد می‌شود(به بخش ۳-۶ مراجعه شود). در طی فرایند طراحی و توسعه، هزینه‌ها باید قبل از وقوع مورد بررسی قرار گیرند.



شکل ۱۷- ۴- هزینه چرخه‌ی عمر در فرایند چرخه‌ی عمر سیستم یا محصول (به شکل ۲-۳ مراجعه کنید)

ضریب شایستگی طراحی برای هزینه می‌تواند از نقطه‌نظر هزینه چرخه‌ی عمر در سطح سیستم مشخص شود. اگرچه نیازمندی‌های DTC در برخی مواقع در سطوح پایین‌تری ایجاد می‌شوند تا در معرض دید بودن هزینه‌های اصلاح شده را آسان‌تر کرده و آن را در طی چرخه‌ی عمر کنترل کند. برای مثال:

۱. **طراحی برای یکی کردن هزینه اکتساب:** فاکتوری که تنها شامل هزینه تحقیق و توسعه یا هزینه ساخت می‌شود.

۲. **طراحی برای یکی کردن هزینه عملیات و پشتیبانی:** فاکتوری که تنها شامل هزینه عملیات و پشتیبانی نگه‌داری می‌شود.

زمانی که تنها یک بخش از هزینه چرخه‌ی عمر درنظر گرفته می‌شود، باید مطمئن شد که تصمیم‌ها تنها بر اساس آن یک بخش گرفته نشود و تاثیرات کلی آن بر کل هزینه چرخه‌ی عمر نادیده گرفته شود. برای مثال ممکن است ساختار طراحی معلوم بر اساس یک واحد هزینه اکتساب پیشنهاد شود، اما هزینه عملیات و پشتیبانی(و هزینه چرخه‌ی عمر حاصله) مشخص شده برای آن ساختار ممکن است بیش‌تر از حد لزوم بالا درنظر گرفته شود. به صورت ایده‌آل هزینه‌ی اکتسابی نباید بدون درنظر گرفتن هزینه عملیات و پشتیبانی بررسی شود(و برعکس). هر دو بخش هزینه باید از نقطه‌نظر چرخه‌ی عمر دیده شود.

۱۷-۲-۲ طراحی سیستم اولیه(شکل ۱۷-۴، بلوک ۲)

با ایجاد نیازمندی‌های هزینه به صورت کمی، گام بعدی شامل فرایند تکرارشونده ترکیب، بهینه‌سازی و تعریف محصول/سیستم می‌شود. معیاری که در بلوک۱ مشخص شد، به صورت اولیه به بخش‌های مختلفی از سیستم اختصاص دارد تا راهنمایی برای طراحی یا تهیه عنصر/عناصر لازم ایجاد کند.

با مراجعه به شکل ۴-۶ تخصیص از سطح سیستم تا سطوح ضروری ایجاد می‌شود تا کنترل هزینه‌ای و تکنیکی مناسب را فراهم کند. فاکتورهای نشان داده شده هدف هزینه در هر واحد جداگانه را منعکس می‌کنند(یعنی یک سیستم یا یک محصول در تعداد) و براساس نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات سیستم و غیره قرار دارند.

همان‌طور که فرایند طراحی نشان می‌دهد، رویکردهای مختلفی برای رسیدن به پیکربندی ارجح سیستم وجود دارد. تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر با ارزیابی هر کاندیدای محتمل با هدف (۱) اطمینان از این‌که کاندیدای انتخابی با اهداف هزینه ایجاد شده سازگار باشد و (۲) مشخص شود که کدام یک از کاندیداهای موردنظر از نقطه‌نظر کلی اثربخشی هزینه برتری دارند. مطالعات اقتصادی زیادی انجام گرفته که از هزینه چرخه‌ی عمر به‌عنوان یک معیار ارزیابی استفاده کرده‌اند، تا پیکربندی طراحی ارجح انتخاب شود. این یک فرایند تکرارشونده است که از نظر ذاتی در مورفولوژی کلی که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده، با بازخورد ضروری و فعالیت اصلاحی انجام می‌گیرد که در بلوک ۲ شکل ۱۷-۴ نشان داده شده است.

۱۷-۲-۳- طراحی سیستم جزئی(شکل ۱۷-۴، بلوک ۳)

از آن جا که طراحی سیستم یا محصول بعدا تصحیح می‌شود، داده‌های طراحی بهتری در دسترس قرار خواهد داشت. تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر براساس ارزیابی ویژگی‌های طراحی خاص(همان‌طور که با مستندات طراحی و بینشی به مهندسی یا مدل‌های نمونه انعکاس می‌یابد)، پیش‌بینی فاکتورهای تولید هزینه، تخمین هزینه‌ها و طرح هزینه عمر به‌عنوان یک فرم هزینه صورت می‌گیرد. نتایج با نیازمندی اولیه مقایسه می‌شود و فعالیت اصلاحی درصورت نیاز انجام می‌گیرد.

مانند قبل این یک فرایند تکرارشونده است اما در یک سطح پایین‌تر از زمانی که در طراحی سیستم اولیه انجام می‌گرفت، به‌کار می‌رود. بنابراین این یک جزء اختصاصی در مقایسه با سیستم است که مورد توجه قرار گرفته است.

۱۷-۲-۴- تولید/ساخت، استفاده، پشتیبانی، ازکاراندازی و امحا(شکل ۱۷-۴، بلوک ۴-۶)

اهمیت هزینه در مرحله بعدی چرخه‌ی عمر سیستم/محصول نیازمند یک مجموعه داده، تحلیل و ارزیابی می‌باشد. در طی ارزیابی مناسب، باید مشارکت‌کننده‌های پرهزینه باید شناسایی شده و مورد توجه قرار گیرند. باید توجه داشت که اطلاعات ارزشمند به‌دست آمده برای بهبود محصول و هم‌چنین کاربردهای مشابه بعدی مورد استفاده قرار گیرند.

همان‌طور که چرخه‌ی عمر نشان می‌دهد، هزینه به‌عنوان یک پارامتر عمده در ارزیابی پیکربندی‌های طراحی دیگر و هم‌چنین در انتخاب رویکرد ارجح به‌کار می‌رود. سپس داده‌های هزینه براساس طراحی ایجاد شده و مشخصات محصول تولید می‌شوند و در توسعه طرح هزینه چرخه‌ی عمر استفاده می‌گردند. سپس طرح‌ها به منظور مشخص کردن درجه‌ی مقبولیت و ضرورت فعالیت اصلاح کننده با نیازمندی‌های اولیه مقایسه می‌شوند. در عمل هزینه چرخه‌ی عمر از یک سری ارزیابی اولیه به یک فرایند نسبتا پالایش شده در گذر زمان تکامل می‌یابد.

۱۷-۳- فرایند کلی هزینه چرخه‌ی عمر

در فعالیت‌های شناسایی شده در شکل ۱۷-۴ تصمیم‌های مدیریتی و طراحی مختلفی وجود دارند که هنگامی که این تصمیم‌ها گرفته شوند، اثر قابل‌توجهی بر هزینه چرخه‌ی عمر خواهند داشت. به ویژه، تصمیم‌های سطح سیستم که در فازهای طراحی مفهومی و اولیه گرفته می‌شوند اثر بزرگی بر فعالیت‌های و هزینه‌های عملیات سیستم، پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات و از کاراندازی و امحای مواد خواهند گذاشت (به شکل ۱۷-۳ مراجعه کنید). بنابراین، ضرورت دارد که

طراحان، کارکنان پشتیبانی، مدیران و دیگر تصمیم گیرندگان آثار پیش‌بینی شده فعالیت‌هایشان را در هزینه کلی چرخه‌ی عمر در نظر بگیرند.

در انجام یک تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر، گام‌های مشخصی وجود دارند که تحلیل‌گر باید برای رسیدن به خروجی مطلوب آن‌ها را دنبال کند. برای این منظور، شکل ۱۲ یک طرح ۱۲ گامی را فراهم کرده است که پایه و اساس مباحث این فصل خواهد بود.

۱۷-۳-۱- تعریف نیازمندی‌ها و TPMهای سیستم (گام ۱، شکل ۱۷-۵)

مستقل از طبیعت مساله، اولین گام تعریف یک خط مبنا در قالب انتظارات سیستم، نیازمندی‌های عملیات، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، وظایف اصلی که باید انجام شود و TPMهای کاربردی است. این گام یک چارچوب کلی را فراهم می‌کند که در آن می‌توان مساله را تعریف کرد. نیاز برای تعریف نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و یک ورودی لازم در تعیین هزینه‌های مربوط به فعالیت‌های سیستم در فاز بهره‌برداری و پشتیبانی در چرخه‌ی عمر است.

مفهوم نگه‌داری و تعمیرات وظایفی را شناسایی می‌کند که عبارت است از پیش‌بینی نگه‌داری و تعمیرات در هر سطح، نیازمندی‌های اثربخشی در قالب فراوانی و زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات، و عناصر اصلی پشتیبانی تدارکات که شامل سطوح مهارت کارکنان؛ تجهیزات آزمایش و پشتیبانی؛ نیازمندی‌های پشتیبانی تامین و تسهیلات می‌شود. این اطلاعات نه تنها به‌عنوان یک ورودی در فرایند طراحی سیستم نیاز است، بلکه به‌عنوان پایه و اساس تعیین هزینه‌های عملیات و پشتیبانی خدمت می‌کند.

۱. **نیازمندی‌ها و TPMهای سیستم را تعریف کنید.** نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات را تعریف کنید. شاخص های عملکرد فنی مناسب را شناسایی کرده و سیستم را در قالب وظایف تشریح کنید. برای این کار از تحلیل وظیفه‌ای در سطح سیستم استفاده کنید.

۲. **چرخه‌ی عمر سیستم را تعیین کرده و فعالیت‌های هر فاز را شناسایی کنید.** یک خط مبنا برای توسعه ساختار شکست هزینه (CBS) و برای تخمین هزینه سالانه در چرخه عمر ایجاد کنید. اطمینان حاصل کنید که فعالیت‌های چرخه عمر در آن قرار داده شده است.

۳. **یک ساختار شکست هزینه توسعه دهید.** یک ساختار هزینه بالا به پایین/پایین به بالا تهیه کنید. همه گروه‌ها مربوط به هزینه‌های اولیه تخصیص (بالا به پایین) و در ادامه جمع هزینه‌ها (پایین به بالا) به حساب آورید.

۴. **نیازمندی‌های داده‌های ورودی را شناسایی کنید.** همه نیازمندی‌های داده‌های ورودی و همه منابع ممکن برای داده‌های ورودی را شناسایی کنید. نوع و میزان داده‌ها به طبیعت مساله بستگی، فاز چرخه عمر، و عمق تحلیل بستگی دارد.

۵. **هزینه‌های مربوط به هر یک از گروه‌ها در CBS را مقرر کنید.** روابط مناسب برای تخمین هزینه را توسعه داده و هزینه های مربوط به هر یک از گروه‌های CBS به‌صورت سالانه طی چرخه عمر تخمین بزنید. مطمئن شوید که همه هزینه در نظر گرفته شده است.

۶. **یک مدل هزینه برای تحلیل و ارزیابی انتخاب کنید.** یک مدل ریاضی رایانه‌ای انتخاب کنید (یا توسعه دهید) تا فرایند سنجش هزینه چرخه‌ی عمر را تسهیل کند. مدل باید معتبر بوده و نسبت به خصوصیات سیستم حساسیت داشته باشد.

۷. **یک پروفایل هزینه توسعه دهید.** یک پروفایل هزینه تشکیل دهید که جریان هزینه‌ها را در چرخه‌ی عمر نشان دهد. خلاصه‌ای از هزینه‌های مربوط به هر دسته در CBS را بدست آورده و درصد مشارکت هر یک را در هزینه کل محاسبه کنید.

۸. **گروه‌های پرهزینه را شناسایی کرده و روابط علت و اثر را تشکیل دهید.** آن وظایف، عناصر سیستم، یا بخش هایی از فرایندها را شناسایی کنید که در آن‌ها فرصت بهبود طراحی و/یا کاهش هزینه وجود دارد.

۹. **یک تحلیل حساسیت انجام دهید.** مدل، روابط داده‌های ورودی–خروجی و نتایج تحلیل خط مبنا را ارزیابی کنید تا از معتبر بودن فرایند تحلیل LCC و ساختار درست خود مدل اطمینان حاصل کنید.

۱۰. **اولویت‌ها برای حل مشکلات شناسایی کنید.** یک نمودار پارتو ترسیم کرده و تحلیل پارتو را انجام دهید تا اولویت حل مشکلات شناسایی شوند (یعنی آن مشکلاتی که اثر بیشتری بر ارزش سیستم دارند، حذف آن‌ها اهمیت بیشتری خواهد داشت).

۱۱. **دیگر گزینه‌های ممکن را شناسایی کنید.** پس از توسعه یک رویکرد برای ارزیابی LCC مربوط به یک ساختار خط مبنای مشخص، مناسب است که تحلیل LCCرا به ارزیابی گزینه های مختلف طراحی تعمیم داد.

۱۲. **ارزیابی گزینه‌های شدنی و انتخاب یک رویکرد ارجح.** برای هر یک از گزینه های شدنی طراحی یک پروفایل هزینه تشکیل دهید، گزینه ها را بصورت یکسان مقایسه کنید، یک تحلیل نقطه سربه سر انجام دهید، و یک رویکرد طراحی ارجح را انتخاب کنید.

شکل ۱۷– ۵– دوازده گام اصلی در فرایند تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر.

۱۷-۳-۲- تشریح چرخه‌ی عمر سیستم و شناسایی فعالیت‌های هر فاز (گام ۲، شکل ۱۷-۵)

با معلوم بودن نیازمندی‌های عملیاتی به‌عنوان یک خط مبنا که در گام ۱ تعریف شد، گام بعدی تشریح چرخه‌ی عمر سیستم و شناسایی فعالیت‌های اصلی در هر فاز است. همه سیستم‌ها، فعالیت‌های اصلی و هزینه‌های *تحقیق و توسعه*، *تولید و ساخت*، *عملیات و پشتیبانی* و *از دور خارج کردن و امحا* را تجربه می‌کنند. این هزینه‌ها و فعالیت‌های مرتبط با آن‌ها در بخش ۱۷-۱ به‌صورت کامل‌تری تشریح شد. از آن‌جا که این هزینه‌ها و فعالیت‌ها از فعالیت‌ها و هزینه‌های زیردست زیادی تشکیل شده‌اند، یک سلسله مراتب از عناصر هزینه‌ای گام ۳ را تشکیل می‌دهد که به‌عنوان ساختار شکست هزینه (CBS) شناخته شده است.

۱۷-۳-۳- توسعه یک ساختار شکست هزینه (گام ۳، شکل ۱۷-۵)

با رجوع به شکل ۱۷-۱، سمت هزینه باید به گروه‌های خاصی از هزینه شکسته شود. شکل ۱۷-۶ یک CBS متداول را نشان می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب مورد استفاده قرار گیرد.

ساختار شکست هزینه اهداف و فعالیت‌ها را به منابع متصل کرده و یک تقسیم‌بندی منطقی از هزینه را تشکیل می‌دهد که توسط حوزه وظیفه‌ای فعالیت، عنصر اصلی یک سیستم و یک یا چند دسته با آیتم مشترک یا مشابه ساخته می‌شود. ساختار شکست هزینه که اغلب برای برآورده کردن نیاز هر کدام از برنامه‌ها اقتباس و تنظیم می‌شود، باید خصوصیات زیر را از خود نشان دهد:

۱. همه هزینه‌های چرخه‌ی عمر باید در ساختار CBS شناسایی شده و در نظر گرفته شود. این هزینه‌های عبارت‌اند از هزینه تحقیق و توسعه، هزینه تولید و ساخت، هزینه پشتیبانی عملیات و سیستم، هزینه ازکاراندازی و امحا.

۲. گروه‌های هزینه‌ای عموما همراه با یک وظیفه مهم، سطحی از فعالیت، یا یک آیتم اصلی از مواد شناسایی می‌شود. گروه‌های هزینه‌ای در ساختار CBS باید به‌خوبی تعریف شده و مدیران، مهندسان، حسابداران، و دیگر افراد باید درک مشترکی از یک گروه مشخص از هزینه‌ها داشته باشد و بدانند چه چیزی در آن گروه قرار دارد و چه چیزی در آن قرار نمی‌گیرد.

۳. هزینه‌ها باید تا سطح لازم شکسته شود تا دید لازم در ارزیابی اشکال مختلف طراحی و توسعه سیستم، تولید، بهره‌برداری عملیاتی و پشتیبانی برای مدیریت فراهم شود. مدیریت باید بتواند حوزه‌های پرهزینه و روابط علت و اثر را شناسایی کند.

۴. CBS و گروه‌های تعریف شده باید به روشی کدگذاری شوند که تحلیل حوزه‌های مورد توجه تسهیل شده و از دیگر حوزه‌ها به‌صورت مجازی صرف‌نظر شود. برای مثال، ممکن است تحلیل‌گر بخواد مستقل از دیگر جنبه‌های سیستم، هزینه‌های پشتیبانی تامین را به‌عنوان یک تابع از طراحی مهندسی، یا هزینه‌های توزیع را به‌عنوان تابعی از تولید، بررسی کند.

۵. CBS و گروه‌های تعریف شده باید طوری کدگذاری شوند که مجزا کردن هزینه‌های تولیدکننده، هزینه‌های تامین‌کننده، و هزینه‌های مشتری به سرعت قابل انجام باشد.

۶. هنگامی که یک برنامه خاص مدنظر است، ساختار هزینه باید به‌طورمستقیم با مستندات برنامه‌ریزی، ساختار شکست کار (WBS)، بسته‌های کاری، ساختار سازمانی، شبکه‌های زمان‌بندی PERT و PERT-COST، گانت چارت‌ها و غیره انطباق داشته باشد. هزینه‌های گزارش شده در سیستم‌های مختلف مدیریت اطلاعات باید با فاکتورهای هزینه‌ای که در CBS وجود دارد منطبق و یکدست باشد.

شکل ۱۷- ۶- یک ساختار شکست هزینه (CBS)متداول.

یک CBS شکست وظیفه‌ای هزینه‌ها را طی چرخه‌ی عمر نشان می‌دهد. این ساختار شامل همه هزینه‌ها مربوط به فعالیت‌های مشتری، پیمانکار، تامین‌کننده و مصرف‌کننده طی چرخه‌ی عمر می‌شود. هزینه‌های ثابت و متغیر، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم، هزینه‌های بازگشتی و غیربازگشتی، تورم و دیگر فاکتورهای رشد هزینه و موارد دیگر باید در آن قرار داده شود. CBS دید لازم را برای تصمیم‌های مهندسی و مدیریتی فراهم می‌کند. اگر چنین دیدی فراهم نشود، گروه‌های هزینه در CBS را می‌توان در صورت لزوم رو به پایین بیش‌تر شکست. در نهایت، CBS می‌تواند در ابتدا برای تخصیص از بالا به پایین هزینه‌ها مورد استفاده قرار گیرد و سپس به‌عنوان یک مکانیزم برای جمع‌بندی هزینه‌ها از پایین به بالا و برای ارزیابی به‌کار رود (به شکل ۱۷-۲ مراجعه کنید).

با مراجعه به شکل ۱۷-۶ گروه‌های هزینه شناسایی شده برای حصول اطمینان از قابلیت رهگیری، قابلیت حسابداری کردن و کنترل بیش از حد وسیع است. تحلیل‌گر نه می‌تواند به راحتی مشخص کند که چه چیزی شامل شده است و چه چیزی نشده، نه می‌تواند تصدیق کند که روابط مناسب پارامترها در تعیین فاکتورهای هزینه که به ورودی ساختار شکست هزینه هستند، مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، تحلیل‌گر نیاز دارد تا تشریح عمیق‌تری از هر یک از گروه‌های هزینه داشته باشد، روش‌های محاسبه هزینه در هر گروه را بیش‌تر مطالعه کند و فرضیاتی را که هزینه‌ها بر پایه آن‌ها قرار دارند، بیش‌تر مورد کند و کاو قرار دهد. در نتیجه، شکل ۱۷-۷ مثالی از تشریح سه گروه از هزینه‌هایی را که در CBS شناسایی شده‌اند، فراهم کرده است.

گروه هزینه (منبع: شکل شکل ۱۷-۱۰)	روش معین سازی (بیان کمی)	تشریح و توجیه گروه هزینه
هزینه‌های قطعات یدکی/تعمیری (C_{OLS})	$C_{OLS}=[C_{SO}+C_{SI}+C_{SD}+C_{SS}+C_{SD}]$ C_{SO} = هزینه سازمانی قطعات یدکی/تعمیری C_{SI} = هزینه میانی قطعات یدکی/تعمیری C_{SD} = هزینه مبدا قطعات یدکی/تعمیری C_{SS} = هزینه تامین‌کننده قطعات یدکی/تعمیری C_{SC} = هزینه قطعات و مواد مصرفی $C_{SO}=\sum_{N_{MS}}[(C_A)(Q_A)+\sum_{i=1}(C_{Mi})(Q_{Mi})+\sum_{i=1}(C_{Hi})(Q_{Hi})]$ C_A = میانگین هزینه سفارش خرید مواد (دلار در هر سفارش) Q_A = تعداد سفارشات خرید C_M = هزینه قطعه یدکی i Q_M = تعداد آیتم‌های i موردنیاز یا مورد تقاضا C_H = هزینه نگه‌داری قطعه یدکی i در انبار Q_H = تعداد آیتم‌های i در انبار N_{MS} = تعداد مکان‌های نگه‌داری و تعمیرات	هزینه‌های اولیه قطعات یدکی/تعمیری در C_{PL} پوشش داده شده است. این گروه شامل همه قطعات یدکی/تعمیری و مواد مصرفی (مثل روغن، روان کننده، سوخت، غیره) می‌شود که برای پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات در ارتباط با تجهیز اصلی، پشتیبانی عملیات و تجهیزات جابه‌جایی، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، و تجهیزات آموزش در هر سطح (سازمانی، میانی، مبدا، تامین‌کننده) نیاز است. این گروه هزینه خرید، هزینه واقعی خود مواد، و هزینه نگه‌داری آیتم‌ها در انبار را پوشش می‌دهد. نیازمندی کمی برای قطعات (Q_M) از تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA) به‌دست می‌آید که در فصل ۱۵ بحث شد. این

گروه هزینه (منبع: شکل شکل ۱۷-۱۰)	روش معین سازی (بیان کمی)	تشریح و توجیه گروه هزینه
	C_{SI}، C_{SD} و C_{SS} به‌صورت مشابه به‌دست می‌آید	نیازمندی‌ها بر پایه معیارهای تشریح شده در فصل ۳ قرار دارند. تعداد سفارشات خرید بهینه (Q_A) بر پایه معیار EOQ که در قسمت ۱۵-۳ تشریح شد به‌دست می‌آید. قطعات یدکی تجهیزات پشتیبانی بر پایه معیار مشابه با تعیین نیازمندی‌های قطعات یدکی برای تجهیز اصلی محاسبه می‌شود
هزینه‌های تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات (C_{OLM})	C_{OLM} = [(C_{PPM}+C_U)×(تخصیص%)(N_{MS})] C_{PPM} = هزینه پشتیبانی تسهیل نگه‌داری و تعمیرات (دلار در هر سایت) C_U = هزینه امکانات (دلار در هر سایت) N_{MS} = تعداد سایت‌های نگه‌داری و تعمیرات *رویکرد جایگزین* C_{OMF}= [(C_{PPO})(N_{MS})(S_O)]	هزینه اولیه اکتساب (ساخت) برای تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات در C_{PCM} قرار داده می‌شود. این گروه هزینه‌های سالانه مربوط به پشتیبانی و اجرای کارهای نگه‌داری و تعمیرات در همه سطوح در طی چرخه‌ی عمر سیستم را پوشش می‌دهد. در برخی شرایط، یک کارگاه نگه‌داری و تعمیرات بیش از یک سیستم را پشتیبانی کرده و در چنین

گروه هزینه (منبع: شکل شکل ۱۷-۱۰)	روش معین سازی (بیان کمی)	تشریح و توجیه گروه هزینه
	C_{PPO}= هزینه فضای تسهیل نگه‌داری و تعمیرات S_O = نیازمندی‌های فضای تسهیل (فوت مربع) برای هر رده نگه‌داری و تعمیرات C_{OMF} را تعیین کنید	مواردی هزینه‌های مربوطه به‌صورت نسبی به هر کدام از این سیستم‌ها اختصاص داده می‌شود.
طراحی مهندسی (C_{RE})	$C_{RE} = \sum_{i=1}^{N} C_{RE_i}$ C_{REi} = هزینه طراحی فعالیت i N = تعداد فعالیت‌های طراحی	عبارتست از همه فعالیت‌های اولیه طراحی مربوط به تعریف و توسعه سیستم/تجهیز. حوزه‌های خاص عبارت‌اند از مهندسی سیستم، مهندسی طراحی (برق، مکنیک)؛ قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، و فاکتورهای انسانی (فصول ۱۲، ۱۳ و ۱۴)؛ تحلیل و تخصیص وظایف (فصل ۴)؛ تحلیل قابلیت پشتیبانی (فصل ۱۵)؛ اجزا؛ قابلیت تولید؛ استانداردسازی؛ ایمنی؛ غیره. اصلاحات طراحی در C_{OLK} پوشش داده می‌شود.

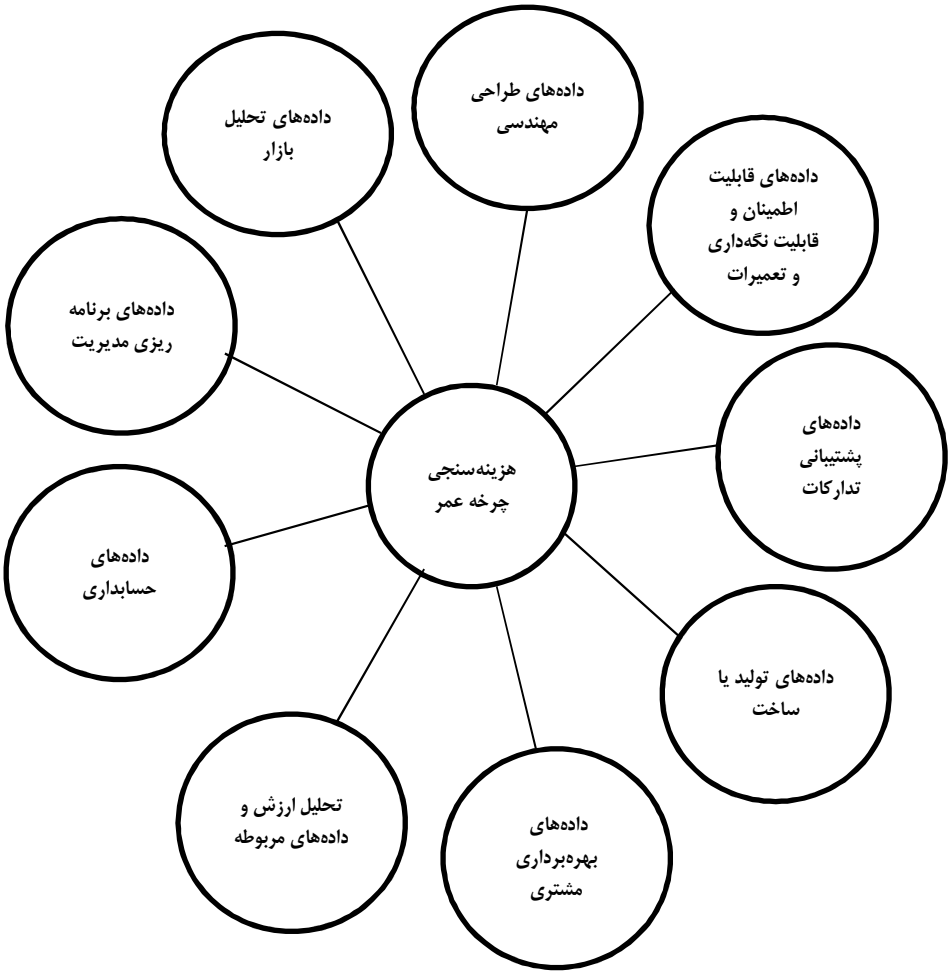
شکل ۱۷-۷- نمونه شکست گروه‌های هزینه و تخمین روابط آن‌ها

۱۷-۳-۴- شناسایی نیازمندی‌های داده‌های ورودی (گام ۴، شکل ۱۷-۵)

زمانی‌که پیش‌فرض اولیه این باشد که تکمیل تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر نیازمند حجم قابل‌توجهی از داده‌های ورودی باشد، نیازمندی‌های واقعی به فازی که در آن تحلیل LCC انجام شده و هم‌چنین به عمق این تحلیل بستگی دارد. یک تحلیل LCC را می‌توان در سطح سیستم (یا زیرسیستم) طی طراحی مفهومی و مقدار اندکی از داده‌های ورودی انجام داد. تحلیل‌گر با استفاده از تجربه و دانش گذشته و از طریق تخمین‌های مناسب به‌دقت کافی می‌تواند به هدف خود در این فاز برسد. درک کامل فرایند تحلیل LCC ضروری است (یعنی گام‌هایی که در آن وجود دارد و هدف انجام آن)، مقداری آگاهی از این‌که سیستم در محیط مشتری چگونه کار کرده و نگه‌داری می‌شود، داشتن دید نسبت به برخی روابط میان فعالیت‌ها و هزینه‌ها، و دانشی از روابط کاربردی تخمین هزینه (CER). بر این اساس، یک تحلیل‌گر که دارای تجربه در تحلیل تحلیل‌های LCC است و درک درستی از نیازمندی‌های سیستم دارد، می‌تواند وظیفه موردنظر را به‌صورت موفقیت‌آمیز و به‌موقع به انجام رساند.

با پیشروی در چرخه‌ی عمر و تعریف بهتر ساختار سیستم، تحلیل LCC با عمق بیش‌تری قابل انجام است (شکل ۱۷-۴، بلوک‌های ۲ و ۳). با مراجعه به ساختار CBS در شکل ۱۷-۶، تحلیل‌گر می‌تواند تخمینی از هزینه‌ها برای گروه‌های مختلف نشان داده شده داشته باشد و این کار را تا عمق موردنیاز می‌تواند ادامه دهد تا دید مطلوب را به‌دست آورد. در حوزه‌هایی که هزینه به نظر زیاد باشد، شناسایی هزینه با عمق بیش‌تری باید انجام شود. برای مثال، اگر سیستم مدنظر دارای حجم زیادی حمل و نقل باشد، آنگاه گروه C_{OD} باید به یک سطح پایین‌تر گسترش داده شود. این کار اغلب شامل یک فرایند تکرارشونده از تحلیل، بازخورد و تحلیل با عمق بیش‌تر است. این کار در نهایت حجم اطلاعات موردنیاز را مشخص خواهد کرد. با پیچیده‌تر شدن تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر، داده‌های موردنیاز گسترده‌تر می‌شود. برای مثال، در انجام ارزیابی ساختار یک

سیستم در حال کار (که هدف شناسایی حوزه‌های پرهزینه، تعیین روابط علت و اثر و فراهم کردن پیشنهادهایی برای بهبود طراحی است)، مناسب است که داده‌های موردنیاز از منابع متنوع که در شکل ۱۷–۸ نشان داده شده است استخراج شوند، تحلیل عمیق‌تری انجام شود، روابط بین عناصر/فعالیت‌های سیستم و هزینه‌ها مطالعه شود، و پیشنهادهایی از طریق یک بهبود مستمر فرایند/محصول توسعه داده شود.



شکل ۱۷–۸– منابع ممکن داده برای تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر.

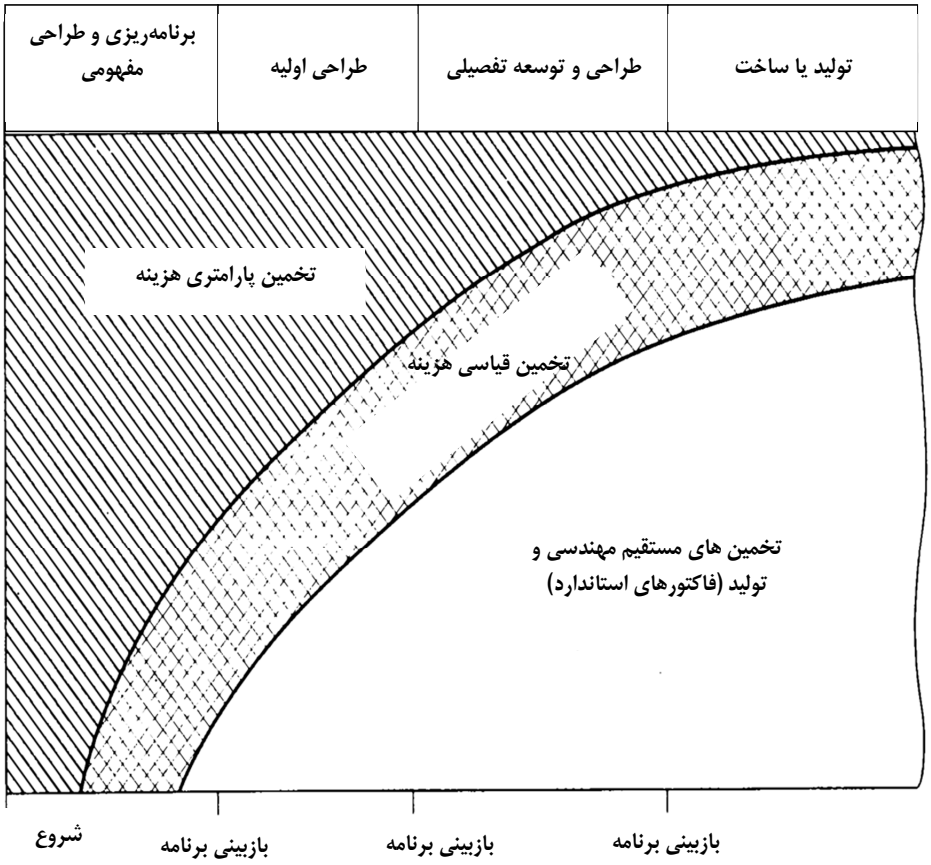
۱۷-۳-۵- استقرار هزینه‌ها برای هر گروه هزینه در CBS (گام ۵، شکل ۱۷-۵)

در انجام تحلیل LCC در فازهای اولیه پروژه (که بیش‌ترین اثر بر هزینه چرخه‌ی عمر دارد)، داده‌های در دسترس به علت فقدان تعریف طراحی تفصیلی ممکن است محدود باشد. بنابراین، تحلیل‌گر هزینه باید برای توسعه داده‌های مربوط به هزینه از تکنیک‌های مختلف تخمین هزینه استفاده کند که در شکل ۱۷-۹ نشان داده شده است.

با پیشرفت طراحی سیستم، اطلاعات کامل‌تری از طراحی در دسترس خواهد بود و تحلیل‌گر از طریق مقایسه خصوصیات سیستم با سیستم‌های مشابه که دارای داده‌های تاریخی ثبت شده هستند، می‌تواند هزینه‌ها را تخمین بزند. تولید داده‌های هزینه بر پایه روش‌های تخمین قیاسی قرار دارد. در نهایت، با شکل گرفتن ساختار طراحی سیستم، داده‌های طراحی (نقشه‌های و چیدمان‌ها، فهرست قطعات و مواد، مشخصات فنی، پیش‌بینی‌ها، غیره که در شکل ۱۷-۸ ترسیم شده است) ایجاد می‌شوند و تخمین مناسب هزینه‌های مهندسی و تولید را ممکن می‌سازد. به‌علاوه، نتایج مربوط به تحلیل‌های قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، قابلیت پشتیبانی، و قابلیت امحا را می‌توان استفاده کرد تا در پیش‌بینی هزینه‌های عملیات، پشتیبانی، از کار اندازی، و امحا/بازیافت مواد کمک کنند.

هزینه‌سنجی پارامتری. با مراجعه به شکل ۱۷-۹، عمومی‌ترین رویکرد برای تخمین هزینه طی فازهای اولیه، که در آن‌ها داده‌های ورودی مناسب کمیاب است، استفاده از روش‌های پارامتری است. روابط تخمین هزینه پارامتری اساسا "قانون انگشت شست" است که از تجربه گذشته توسعه یافته که فاکتورهای هزینه‌ای مختلف را به متغیرهای توضیحی مرتبط می‌کند. این متغیرهای توضیحی اغلب خصوصیات سیستم مانند عملکرد، فاکتورهای اثربخشی، ویژگی‌های فیزیکی، یا حتی دیگر عناصر هزینه‌ای را منعکس می‌کنند.

برای مثال، یک فاکتور هزینه می‌تواند در قالب یک واحد از سرعت برای یک وسیله نقلیه، یک مایل دامنه برای یک سیستم رادار، یک واحد حجم برای مواد یا مایعات، غیره باشد. روابط تخمین هزینه می‌تواند شکل‌های مختلفی گرفته (پیوسته یا ناپیوسته، ریاضی یا غیرریاضی، خطی یا غیرخطی و غیره) و باید به TPMهای مشخص شده یک سیستم معلوم ارتباط داده شود.



شکل ۱۷- ۹- تخمین هزینه در هر فاز.

هزینه‌سنجی بر پایه فعالیت (ABC). برای اثربخشی مدیریت هزینه (و انجام تحلیل‌های هزینه-اثربخشی)، نیاز است که همه‌ی هزینه‌ها قابل رهگیری به فعالیت‌ها، فرایندها یا

محصولاتی باشند که آن‌ها را تولید می‌کنند. در ساختارهای سنتی حسابداری که در بیش‌تر سازمان‌ها به‌کار گرفته می‌شود، درصد زیادی از کل هزینه قابل رهگیری به علل نیست. برای مثال، هزینه بالاسری یا غیرمستقیم بیش از ۵۰٪ هزینه‌ها شامل هزینه‌های مدیریتی، هزینه‌های سازمان پشتیبانی و دیگر هزینه‌ها است که رهگیری و اختصاص آن‌ها به یک چیز مشخص دشوار است. با تخصیص این هزینه‌ها بدون قابلیت رهگیری، غیرممکن است که بتوان علل واقعی را شناسایی کرده و بخش‌های پرهزینه را مشخص نمود. در نتیجه، مفهوم هزینه‌سنجی بر پایه‌ی فعالیت در سال‌های اخیر معرفی شده است.

هزینه‌سنجی بر پایه‌ی فعالیت یک متدولوژی هدایت شده به سمت تفصیل و تخصیص هزینه‌ها به فعالیت‌هایی است که موجب بروز آن‌ها شده است. هدف، ایجاد قابلیت رهگیری از همه هزینه‌ها به فرایند یا محصولی است که آن‌ها را تولید می‌کند. رویکرد ABC تخصیص اولیه این هزینه‌ها را ممکن ساخته و برای رفع کاستی‌های ساختار حسابداری سنتی که در آن فاکتورهای بالاسری زیادی بدون قابلیت رهگیری علت مدنظر قرار می‌گیرد توسعه داده شده است. اصول ABC به‌صورت زیر است:

۱. هزینه‌هایی که به‌طورمستقیم به‌وسیله‌ی فرایند، محصول یا موارد مرتبط دیگر ایجاد شده است، قابل رهگیری است. روابط علت و اثر بین یک فاکتور هزینه و یک فرایند یا فعالیت مشخص قابل استقرار است.

۲. هیچ تمایزی بین هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم (بالاسری) وجود ندارد.

۳. هزینه‌ها به‌راحتی بر یک پایه و اساس وظیفه‌ای قابل تخصیص هستند (یعنی وظایف شناسایی شده در قسمت‌های ۳-۷ و ۴-۳). توسعه روابط تخمین هزینه در قالب رابطه هزینه فعالیت‌ها به برخی شاخص‌های فعالیت‌ها نسبتا آسان است (هزینه هر واحد خروجی).

۴. تاکید ABC بر مصرف منبع است. فرایندها و محصولات، فعالیت‌ها را مصرف می‌کنند و فعالیت‌ها، منابع را. با هدف قرار دادن مصرف منبع، رویکرد ABC ارزیابی روزانه تصمیم‌ها در قالب آثار آن‌ها بر مصرف منابع پایین دست را تسهیل می‌کند.

۵. رویکرد ABC استقرار روابط علت و اثر را پرورش داده و شناسایی بخش‌های پرهزینه را ممکن می‌سازد. حوزه‌های ریسک را می‌توان برای برخی فعالیت‌های خاص و تصمیم‌هایی که برای آن‌ها گرفته می‌شود، شناسایی کرد.

۶. رویکرد ABC به حذف برخی تکرارها در هزینه گرایش دارد. این تکرار هزینه‌ها به علت ایجاد تمایز به‌وجود می‌آید، زمانی که تصمیم‌گیری می‌شود که یک هزینه باید مستقیم باشد یا غیرمستقیم. به عبارت دیگر برخی هزینه‌ها یکبار در هزینه‌های مستقیم و یکبار در هزینه‌های غیرمستقیم حساب می‌شود.

توسعه داده‌های هزینه. برای توسعه داده‌های هزینه برای یک تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر، تحلیل‌گر باید در ابتدا همه منابع داده را بررسی کند تا تعیین شود چه چیزهایی به‌طورمستقیم برای پشتیبانی اهداف تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر داده‌های موردنیاز در دسترس نباشد، استفاده از تکنیک‌های تخمین هزینه پارامتری می‌تواند مناسب باشد. با این حال، فرد در ابتدا باید تعیین کند که از بانک‌های داده، داده‌های برنامه‌ریزی اولیه سیستم، مستندات تامین‌کننده، پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، تحلیل‌های قابلیت پشتیبانی، داده‌های آزمایش، داده‌های میدانی و غیره، چه چیزی‌هایی قابل استخراج است. برخی از این منابع داده در اینجا بحث شده است:

۱. ***بانک داده‌های موجود.*** اطلاعات تاریخی واقعی از سیستم‌های موجود که در ساختار و آیتم‌های کارکردی مشابه هستند، می‌تواند در صورت امکان مورد استفاده قرار گیرد.

اغلب امکان به‌کارگیری این داده‌ها و اعمال فاکتورهای اصلاحی در صورت نیاز به منظور جبران تفاوت‌ها در فناوری، ساختار، محیط عملیاتی و چارچوب زمانی وجود دارد. در این دسته از داده‌های موجود، فاکتورهای استاندارد هزینه‌ای موجود است که از تجربه تاریخی استخراج شده و می‌تواند به وظایف یا فعالیت‌های خاصی اعمال شود. فاکتورهای استاندارد هزینه حوزه‌های زیر را پوشش می‌دهند:

- هزینه نیروی مهندسی – دلار در نفرساعت پرداخت شده برای رئیس بخش مهندسی، مهندس ارشد، تکنسین، و غیره.
- هزینه نیروی انسانی تولید در هر گروه – دلار در نفرساعت در هر گروه
- نرخ بالاسری – دلار در هزینه (یا درصد) نیروی انسانی مستقیم
- هزینه آموزش – دلار در یک هفته آموزش دانشجو
- هزینه ارسال – دلار در هر پوند در هر مایل
- هزینه سوخت – دلار در هر گالن
- هزینه نگه‌داری موجودی در انبار – درصد ارزش موجود در سال
- هزینه تسهیلات – دلار در هر فوت مکعب اشغال شده
- هزینه ماده x– دلار در هر پوند یا در هر فوت

این فاکتورها و دیگر فاکتورهای قابل مقایسه که ارزش‌های کمی واقعی دارند، از نرخ‌ها و هزینه‌های معلوم در بازار به‌دست آمده و یک ورودی مستقیم برای تحلیل هستند. با این حال، باید اطمینان حاصل شود که اصلاحات مربوط به تورم مثبت یا منفی به‌صورت سالانه در نظر گرفته می‌شود.

۲. ***داده‌های برنامه‌ریزی پیشرفته سیستم/محصول.*** داده‌های برنامه‌ریزی پیشرفته برای سیستم یا محصول مورد ارزیابی، اغلب عبارت است از داده‌های تحلیل بازار، تعریف

نیازمندی‌های عملیاتی و مفهومی نگه‌داری و تعمیرات سیستم، نتایج امکان‌سنجی و داده‌های مدیریت برنامه. تحلیل‌گر هزینه نیازمند اطلاعات مربوط به ساختار فیزیکی پیشنهادی و ویژگی‌های اصلی عملکردی سیستم، ماموریت پیش‌بینی شده و فاکتورهای بهره‌برداری مربوطه، پارامترهای اثربخشی سیستم، مکان جغرافیایی و جنبه‌های محیطی سیستم، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات و فلسفه پشتیبانی تدارکات، غیره می‌باشد. این اطلاعات به‌عنوان خط مبنایی خدمت‌دهی می‌کنند که همه فعالیت‌های بعدی برنامه از آن تکامل می‌یابد. اگر اطلاعات پایه‌ای وجود نداشته باشد، تحلیل‌گر باید فرضیاتی را در نظر گرفته و بر اساس آن کار را ادامه دهد. این فرضیات باید به‌طور کامل مستندسازی شوند.

۳. ***تخمین هزینه‌های، پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌ها.*** طی فازهای اولیه یک برنامه، تخمین هزینه‌ها تا حدودی به‌صورت پیوسته انجام می‌شود. این تخمین‌ها می‌تواند فعالیت‌های تحقیق و توسعه، فعالیت‌های تولید یا ساخت، یا فعالیت‌های عملیات و پشتیبانی سیستم را پوشش دهد. فعالیت‌های تحقیق و توسعه که به‌طورطبیعی تکرارشونده نیستند، اغلب از طریق تخمین هزینه‌های مهندسی پوشش داده می‌شوند. برخی از این پیش‌بینی‌ها به‌طوراساسی هزینه‌های نیروی کار را منعکس کرده و شامل فاکتورهای تورمی، رشد هزینه در نتیجه افزایش هزینه و غیره می‌شوند.

تخمین‌های هزینه تولید اغلب هم در قالب هزینه‌های تکرارشونده و هم هزینه‌های غیرتکرارشونده ارائه می‌شوند. با هزینه‌های غیرتکرارشونده مشابه هزینه‌های تحقیق و توسعه برخورد می‌شود. برعکس، هزینه‌های تکرارشونده بر پایه استانداردهای هزینه تولید، داده‌های مهندسی، استانداردهای مهندسی صنایع و غیره قرار دارد. در اکثر مواقع، فاکتورهای استاندارد هزینه که در تخمین هزینه‌های تولید تکرارشوند به‌کار می‌روند،

به‌صورت جدا مستندسازی شده و به‌صورت دوره‌ای اصلاح می‌شوند تا آثار تورمی نیروی کار و مواد، تغییرات قیمت تامین‌کننده، آثار یادگیری و غیره در آن‌ها لحاظ شود.

هزینه‌های عملیات و پشتیبانی سیستم بر پایه فعالیت‌هایی است که در فاز بهره‌برداری عملیاتی و پشتیبانی در چرخه‌ی عمر انجام شده و اغلب تخمین آن‌ها دشوار است. هزینه‌های عملیات تابعی است از نیازمندی‌های ماموریت سیستم یا محصول و فاکتورهای بهره‌برداری. هزینه‌های پشتیبانی به‌طوراساسی تابعی از خصوصیات قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات در طراحی سیستم و نیازمندی‌های تدارکات که برای پشتیبانی همه فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده و زمان‌بندی نشده طی چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده می‌باشد. نیازمندی‌های پشتیبانی تدارکات عبارتست از کارکنان نگه‌داری و تعمیرات و آموزش، پشتیبانی تامین (قطعات یدکی/تعمیری و موجودی مربوط به آن‌ها)، تجهیزات آزمایش و پشتیبانی، حمل و نقل و جابه‌جایی، تسهیلات، و داده‌های فنی. بنابراین، تخمین‌های هزینه عملیات و پشتیبانی براساس پیش‌بینی فراوانی نگه‌داری و تعمیرات یا فاکتور میانگین نگه‌داری و تعمیرات (MTBF) و براساس منابع موردنیاز پشتیبانی تدارکات هنگامی که فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات اتفاق می‌افتد، قرار دارد. این هزینه‌ها از داده‌های پیش‌بینی قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات (فصول ۱۲ و ۱۳)، داده‌های تحلیل قابلیت پشتیبانی (SA) (به فصل ۱۵ مراجعه کنید)، و دیگر اطلاعات پشتیبانی که همه آن‌ها بر پایه داده‌های طراحی مهندسی سیستم/محصول قرار دارد.

۴. ***مستندات تامین‌کننده.*** پروپوزال‌ها، کاتالوگ‌ها، داده‌های طراحی و گزارش‌های مربوط به مطالعات خاص انجام شده توسط تامین‌کننده می‌تواند به‌عنوان یک منبع داده مورد استفاده قرار گیرند. اکثر مواقع عناصر اصلی یک سیستم یا از بیرون تهیه شده یا از

طریق پیمانکار ساخته می‌شود. تامین‌کنندگان مختلف پروپوزال‌های خود را ارائه داده و این پروپوزال‌ها نه تنها برای اکتساب فاکتورهای هزینه مفید هستند بلکه (در برخی موارد) نمایانگر هزینه چرخه‌ی عمر هستند. اگر داده‌های هزینه تامین‌کننده مورد استفاده قرار گیرد، تحلیل‌گر هزینه باید کاملا بداند که چه چیزی در آن شامل شده است و چه چیزی در آن نیست. حذف یا تکرار یک هزینه نباید اتفاق افتد.

۵. ***داده‌های آزمایش مهندسی و داده‌های میدانی.*** طی فازهای آخر توسعه و تولید سیستم و هنگامی که سیستم یا محصول تحت آزمایش یا تحت بهره‌برداری عملیاتی است، تجربه به‌دست آمده بهترین منبع اطلاعات برای تحلیل و ارزیابی واقعی است (به قسمت ۶–۵ مراجعه کنید). چنین داده‌هایی جمع‌آوری شده و به‌عنوان ورودی در تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین، داده‌های میدانی تا حد ممکن در ارزیابی هزینه چرخه‌ی عمر که ممکن است تحت‌تاثیر هرگونه اصلاحات روی تجهیزات، نرم‌افزار یا عناصر اصلی پشتیبانی تدارکات باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این پنج منبع داده که در بالا برای هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر شناسایی شدند به‌صورت خلاصه و برای ایجاد یک دید کلی برای تحلیل‌گر هزینه ارائه شده است. با پیگیری بیش‌تر نیازمندی‌های داده، تحلیل‌گر تجربه زیادی در تعیین هزینه‌های تحقیق و توسعه و تولید/ساخت به‌دست می آورد. با این حال، در حال حاضر داده‌های هزینه تاریخی مربوط به عملیات و پشتیبانی اندک هستند. اما این فقدان اطلاعات با افزایش تاکید بر هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر بهبود خواهد یافت.

۱۷-۳-۶- انتخاب یک الگوی مدل‌سازی هزینه چرخه‌ی عمر (گام ۶، شکل ۱۷-۵)

پس از استقرار ساختار شکست هزینه، لازم است که یک مدل انتخاب و اقتباس شده تا فرایند ارزیابی هزینه چرخه‌ی عمر تسهیل شود. مدل می‌تواند مجموعه‌ای از زیرروتین‌های رایانه‌ای یا کاربرگ‌ها یا یک سری از عبارات ریاضی باشد که انتخاب از بین آن‌ها به فاز چرخه‌ی عمر سیستم و طبیعت مساله در دست بستگی دارد. اما در یک سطح عمومی، مدل بر پایه مدل‌سازی جریان پول یا مدل‌سازی بهینه‌سازی اقتصادی خواهد بود که در معادلات ۷-۱ (مدل‌سازی جریان اقتصادی)، ۷-۲ (مدل‌سازی بهینه کردن اقتصادی برای عملیات) یا ۷-۳ (مدل‌سازی بهینه کردن اقتصادی برای طراحی) ارائه شده است.

جدا از مدل هزینه‌سنجی و الگوی انتخاب شده، هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر عبارتست از گردآوری فاکتورهای هزینه که انواع مختلف فعالیت‌ها را منعکس می‌کند، همان‌طور که توسط CBS تعیین شده‌اند. هدف استفاده از یک مدل ارزیابی یک سیستم در قالب کل هزینه چرخه‌ی عمر و هم‌چنین هزینه بخش‌های مختلف است. زیرروتین‌های رایانه‌ای که بخش‌های هزینه را منعکس می‌کند بسته به عنصر پوشش داده شده سیستم می‌تواند به روش‌های مختلف ساختاربندی شود. برای نمونه، هزینه‌های پشتیبانی تامین می‌توان از طریق استفاده از فاکتورهای تقاضای قطعات یدکی و تعمیری و تکنیک‌های موجودی انبار که در فصل ۱۵ بحث شد، جمع‌آوری شود. این موضوع به‌نوبه‌ی خود نیازمند فاکتورهای استخراج شده از مدل قابلیت اطمینان است. از طرف دیگر، هزینه‌های طراحی مهندسی می‌توانند به‌طورمستقیم از پروپوزال یا مجموعه‌ای هزینه‌های مهندسی استخراج شود.

۱۷-۳-۷ - توسعه یک پروفایل هزینه (گام ۷، شکل ۱۷-۵)

در توسعه یک پروفایل هزینه، رویکردهای مختلفی را می‌توان دنبال کرد. با این حال، گام‌های پیشنهادی برای شروع کار در ادامه ارائه شده است:

۱. همه فعالیت‌هایی را که به شکلی در چرخه‌ی عمر ایجاد هزینه می‌کنند، شناسایی کنید. این کار شامل وظایف مربوط به برنامه‌ریزی، تحقیق و توسعه، آزمایش و ارزیابی، تولید یا ساخت، توزیع، بهره‌برداری و پشتیبانی سیستم و از کاراندازی و امحای مواد می‌شود (به شکل‌های ۲–۳ و ۱۷–۴ مراجعه کنید).

۲. هر فعالیت شناسایی شده در قسمت ۱ به یک وظیفه خاص مرتبط کرده (به تحلیل وظیفه‌ای در قسمت‌های ۳–۶ و ۴–۳ مراجعه کنید) و آن را به یک گروه هزینه در ساختار شکست هزینه ارتباط دهید (به شکل‌های ۱۷–۱ و ۱۷–۶ مراجعه کنید). همه وظایف و فعالیت‌ها باید در یک یا چند گروه از CBS قرار گرفته و باید نیازمندی‌ها از تحلیل وظیفه‌ای به CBS قابل رهگیری باشد.

۳. یک قالب برای ثبت هزینه‌ها برای هر فعالیت در CBS و برای هر سال از چرخه‌ی عمر توسعه دهید. شکل ۱۷–۱۰ یک قالب پایه‌ای را نشان می‌دهد که برای نشان دادن هزینه‌های سطح بالا به کار می‌رود.

۴. با استفاده از روش‌های تخمین هزینه که قبلا ارائه شد، هزینه‌ها را برای هر گروه CBS محاسبه کرده و در هر سال آن را مشخص کنید. ملاحظات مربوط به آثار منحنی‌های یادگیری، رشد هزینه به علت تغییرات قیمت تامین‌کننده و قراردادهای جدید، تغییرات در سطوح قیمت تدارک، تغییرات در فاکتورهای قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات که هزینه‌های پشتیبانی عملیات و نگه‌داری و تعمیرات اثر می‌گذارد و دیگر ملاحظات باید به‌درستی در دستور کار قرار گیرد. تحلیل‌گر کار را با تخمین پیش‌بینی سالانه هزینه‌ها در قالب دلار به ارزش روز کار را شروع می‌کند زیرا این کار مقایسه مستقیم سطوح مختلف فعالیت‌ها را از یک سال به سال دیگر ممکن می‌سازد. هم‌چنین، این کار یکپارچگی در انجام مطالعات مقایسه‌ای را تضمین می‌کند.

۵. در هر گروه در CBS، هر کدام از عناصر هزینه در نظر گرفته می‌شود تا فاکتورهای مناسب تورمی در آن‌ها قرار داده شود. مقادیر اصلاح شده یک جریان هزینه جدید را تشکیل داده و هزینه‌های واقع‌گرایانه را همان‌طور که برای هر سال پیش‌بینی شده است، منعکس می‌کند (هزینه‌های انتظاری ۲۰۱۵، ۲۰۱۶ و غیره). این جریان هزینه یک پروفایل بودجه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند برای تصمیم‌گیری مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.

۶. یک پروفایل سوم ایجاد کنید که ارزش زمانی پول یا نمایش هزینه‌ها در قالب معادل‌ها مانند مقدار معادل فعلی (PE) را در نظر بگیرد (قسمت ۸–۲ را ببینید). در هنگام ارزیابی دو یا چند گزینه از ساختار سیستم، هر کدام شامل سطوح مختلف فعالیت هستندکه در سال‌های مختلف، با رویکردهای طراحی مختلف و نیازمندی‌های مختلف پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات انجام می‌شوند. اگرچه همه گزینه‌های در نظر گرفته شده کاملا با نیازمندی‌های سیستم انطباق کامل دارد و هیچ دو گزینه‌ای از نظر ساختار اجزا، استفاده از مواد و غیره یکسان نیستند. هنگامی که هر کدام از پروفایل‌ها برای هر کدام از گزینه‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد، مقایسه باید با یک پایه معادل انجام شده و ارزش زمانی پول در آن قرار داده می‌شود (فصل ۸).

تعیین هزینه‌های تولید. هزینه‌های تولید به نیازمندی‌های عملیات سیستم که مربوط به ساختار آیتم‌ها در موجودی می‌باشد، بستگی دارند؛ یعنی تقاضا برای سیستم و عناصر آن توسط مشتری. هم‌چنین نرخ تولید و تعداد آیتم‌های موردنیاز بر هزینه تولید واحد اثرگذار است. اصول قابلیت تولید در قسمت‌های ۱۶–۳ و ۱۶–۴ شناسایی شد و مفاهیم هزینه‌های آن‌ها در هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر مورد توجه قرار می‌گیرد.

یک جنبه مهم از فعالیت‌های تولید و دیگر فعالیت‌های تکرار شونده، مانند فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات، آثار یادگیری است. یادگیری انسانی و سازمانی منجر به کاهش هزینه تولید آیتم‌های بعدی یا زمان انجام فعالیت‌ها بر اثر تکرار می‌شود. قسمت ۱۶-۳-۲ اصول مفهومی و تئوریک برای هزینه‌سنجی در مقابل یادگیری را مورد بحث قرار داده است. جایگاه نتایج هزینه‌ای در CBS به فازی از چرخه‌ی عمر بستگی دارد که فعالیت‌ها در حقیقت در آن انجام می‌شوند.

در نظر گرفتن تورم. هنگام توسعه پروفایل‌های هزینه وابسته به زمان، تورم باید برای هر کدام از سال‌های آتی در چرخه‌ی عمر مدنظر قرار گیرد. طی دهه‌های گذشته، تورم یک فاکتور اصلی در افزایش هزینه‌های محصولات و خدمات و کاهش قدرت خرید بوده است. تورم یک عبارت کلی است که افزایش عمومی هزینه یک واحد آیتم یا فعالیت را پوشش داده و به‌طوراساسی به هزینه‌های نیروی کار و مواد بستگی دارد:

۱. فاکتورهای تورم به علت افزایش حقوق و دستمزد، افزایش هزینه زندگی و افزایش نرخ‌های بالاسری به خاطر افزایش مزایای کارکنان، مزایای بازنشستگی، بیمه و غیره، به هزینه‌های نیروی کار اعمال می‌شود. فاکتورهای تورمی باید برای گروه‌های مختلف نیروی کار (مهندسی، تکنسین، تولید، ساخت، خدمات مشتری، مدیریت و غیره) تعیین شده و برای هر سال در چرخه‌ی عمر تخمین زده شود.

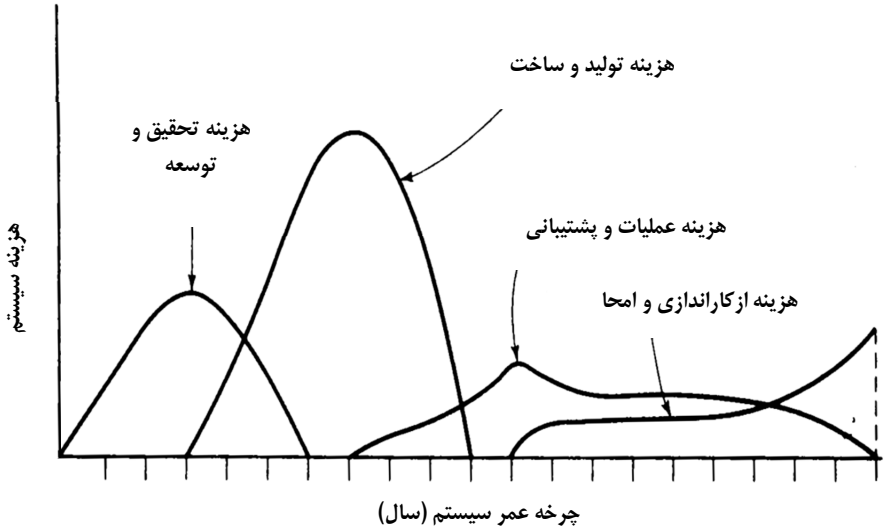
۲. فاکتورهای تورم که به هزینه‌ها اعمال می‌شوند حاصل دسترسی‌پذیری مواد (یا عدم دسترسی)، خصوصیات عرضه و تقاضا، افزایش هزینه‌های پردازش مواد و افزایش هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی مواد است. فاکتورهای تورم اغلب برای هر نوع از مواد متفاوت بوده و باید برای هر سال در چرخه‌ی عمر تخمین زده شود.

هزینه‌های افزاینده مربوط به طبیعت تورمی آن‌ها اغلب در نتیجه قرارداد جدید با تامین‌کننده، قراردادهای صنفی و توافقات با نیروی کار، اصلاحات در سیاست‌ها تدارک و خرید، تغییرات سطح بهره‌وری، تغییرات در تعداد آیتم‌ها، و دیگر دلایل مشابه اتفاق می‌افتد. هم‌چنین، فاکتورهای تورم تا حدی تحت‌تاثیر فاکتورهای جغرافیایی و رقابتی است. هنگام بازبینی علل تورم، فرد باید به شدت مراقب باشد تا از تخمین بیش از حد آثار تورمی دوری کند. برای نمونه، پروپوزال تامین‌کننده می‌تواند تورم مربوط به تدارکات نیز باشد، و زمانی که این حقیقت مورد توجه قرار نگیرد، این احتمال وجود دارد که تورم به علل دیگری در محاسبات به‌صورت تکراری اعمال شود.

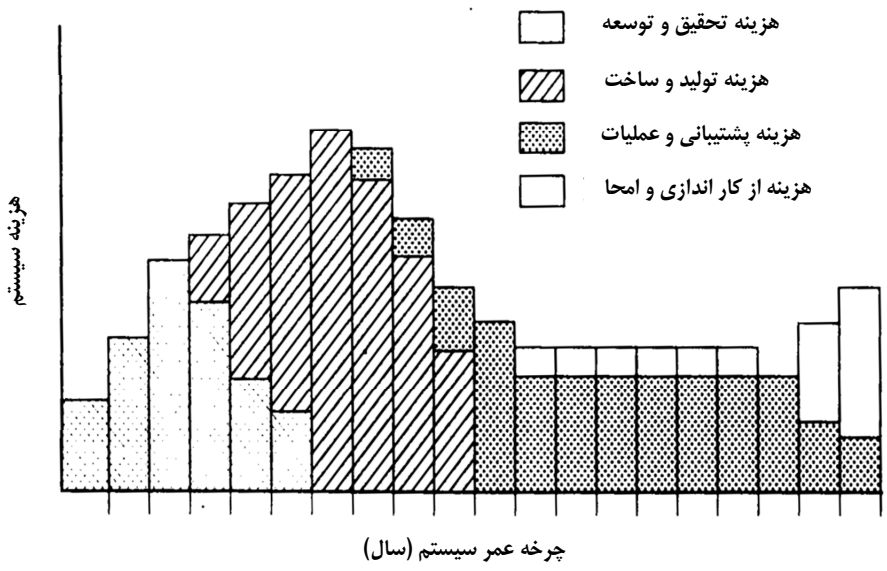
فاکتورهای تورمی باید به‌صورت سالانه تخمین زده شود. از آنجا که تخمین‌های تورم ممکن است تحت‌تاثیر تغییرات اقتصادی در سطح ملی باشد، تخمین‌های هزینه‌ها برای آینده باید حداقل به‌صورت سالانه مورد بازبینی قرار گیرد و اصلاح گردد. فاکتورهای تورمی را می‌توان با استفاده از اندیس‌های قیمت یا استفاده از نرخ افزایش یکپارچه مشخص کرد.

فعالیت	گروه هزینه	هزینه سال													کل هزینه (ثابت)	کل هزینه (واقعی)	کل هزینه (PE)	٪مشارکت
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳				
گزینه A ۱. تحقیق و توسعه a. مدیریت چرخه عمر b. برنامه‌ریزی محصول (۱) امکانسنجی (۲) برنامه‌ریزی ۲. ۳. سایر	C_R C_{RM} C_{RP} ---																	
کل هزینه (ثابت)																		
کل هزینه (واقعی)																		
کل هزینه (PE)																		
گزینه B ۱. تحقیق و توسعه	C_R	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

شکل ۱۷- ۱۰- کاربرگ جمع آوری هزینه



(a)



(b)

شکل ۱۷- ۱۱- پروفایل‌های نمونه از هزینه چرخه‌ی عمر.

نمایش هزینه‌های چرخه‌ی عمر. شکل ۱۷–۱۱ نتایج جمع‌آوری و خلاصه‌سازی هزینه‌های تعیین شده در شکل ۱۷–۱۰ را نشان می‌دهد. جریان هزینه می‌تواند بر پایه هزینه‌های واقعی تورم یافته (یا مربوطه به بودجه) در طی چرخه‌ی عمر نمایش داده شود. موضوع مهم شناسایی و بررسی همه حوزه‌هایی است که ممکن است در آن‌ها از سال اول به سال بعدی تغییرات قابل‌توجهی مشاهده شود. برعکس، اگر مقصود مقایسه پروفایل‌های مختلف باشد، آنگاه محاسبات مقادیر معادل باید به جریان‌های هزینه اعمال شود تا مقدار معادل فعلی تعیین شود و به‌عنوان مبنا برای یک انتخاب استفاده شود (قسمت ۸–۴ را ببینید).

۱۷–۳–۸ – شناسایی حوزه‌های پر هزینه و استقرار روابط علت و اثر (گام ۸، شکل ۱۷–۵)

قرار گرفتن بعضی از هزینه‌ها در دسته‌ی پرهزینه امری طبیعی است. هدف در این نقطه ایجاد توانمندی در تعیین برخی علل مربوط به این حوزه‌های پرهزینه است. برای مثال، اگر ۱۸٪ کل هزینه چرخه‌ی عمر در دسته‌ی هزینه‌های تکرار تولید قرار گیرد، آنگاه تحلیل‌گر باید به ساختار CBS رجوع کرده و فرضیات اصلی را مورد بازبینی قرار دهد. سوال تعیین این موضوع است که آیا فرضیه‌ای وجود دارد که مشکوک بوده یا غیرمعتبر باشد.

با فرض آنکه سطح مناسبی از رهگیری وجود دارد، تحلیل‌گر باید فاکتورهای پرهزینه در CBS را به وظایف خاصی که با انجام آن‌ها این هزینه‌ها ایجاد می‌شوند، مرتبط کند. این کار به‌نوبه‌ی خود به یک عنصر خاص از سیستم که به‌طورمتناوب خراب شده یا حجم زیادی از منابع برای نگه‌داری آن مصرف می‌شود، به یک فرایند که نیازمند افراد با سطح بالای مهارت است، یا به شناسایی یک روش حمل و نقل پرهزینه منجر می‌شود. هدف شناسایی خصوصیات مربوط به طراحی خاصی است که از نقطه‌نظر چرخه‌ی عمر محرک ایجاد هزینه است، چه عنصری اصلی در انجام ماموریت سیستم باشد و چه عنصری از زیرساختار پشتیبانی.

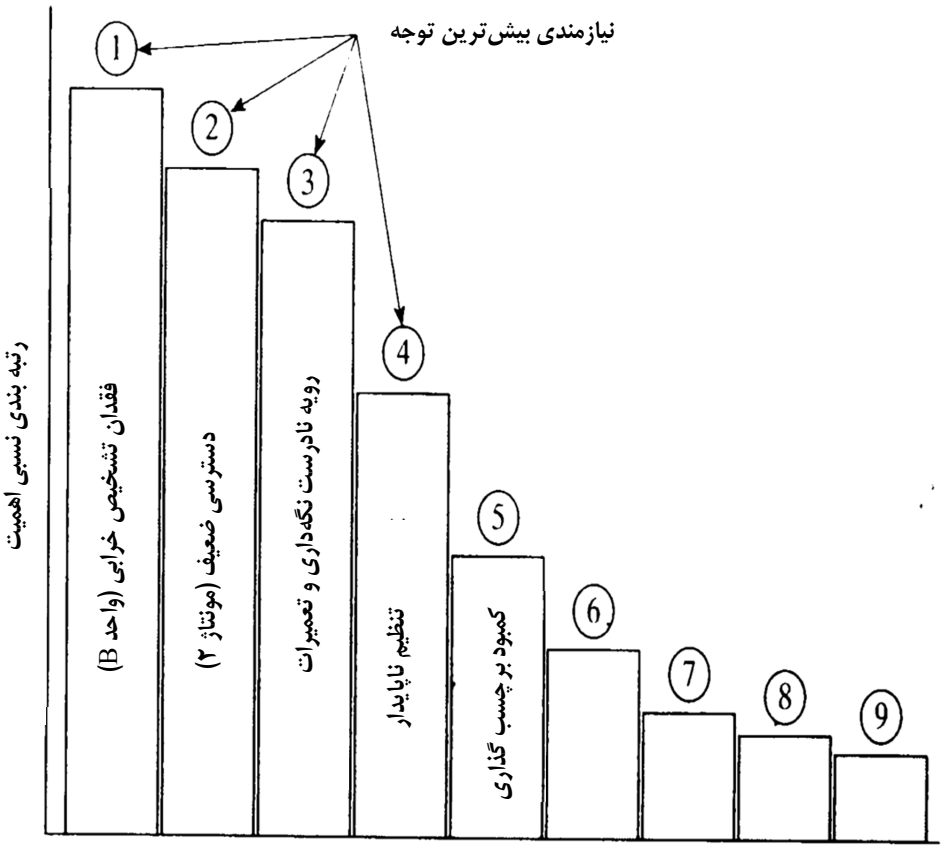
با شناسایی علل، سوال این خواهد بود: *آیا رویکرد طراحی سیستم جایگزینی وجود دارد که با استقرار آن بتوان سطح اثربخشی یکسان ولی هزینه کلی کم‌تری داشته باشد؟* راه‌حل‌های شدنی کاندید باید در قالب هزینه‌های چرخه‌ی عمر ارزیابی شده و حوزه‌های اصلی بهبود از طریق فرایند اصلاح که در قسمت ۶-۶ تشریح شد، انجام شود. این فرایند ارزیابی، شناسایی حوزه‌های پرهزینه، تعیین روابط علت و اثر و اصلاح سیستم برای بهبود باید به‌صورت مستمر صورت پذیرد.

۱۷-۳-۹- انجام تحلیل حساسیت (گام ۹، شکل ۱۷-۵)

در انجام تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر، ممکن است حوزه‌هایی وجود داشته باشد که در آن‌ها به علت عدم کفایت داده‌های ورودی، روش‌های پیش‌بینی ضعیف، فرضیات غیرمعتبر در ابتدای کار، و غیره، نتایج مشکوک باشند. سوالاتی هست که باید مورد بررسی قرار گیرد: *نتایج تحلیل تا* چه حد *به تغییرات فاکتورهای ورودی غیرمطمئن حساسیت دارد*؟ تا چه حد پارامترهای ورودی قطعی می‌توانند تغییر کنند به‌صورتی که باعث غیراقتصادی شدن ساختار مورد ارزیابی نشود؟

برای پاسخ به این سوالات، تحلیل‌گر باید حوزه‌های پرهزینه را انتخاب کرده (بیش از ۱۰٪ مشارکت در هزینه کل)، فاکتورهای ورودی حساس را که به‌طورمستقیم بر هزینه اثر می‌گذارند، شناسایی کند (گام ۸)، برخی از این فاکتورها را در مرحله ورود تغییر دهد، و تغییرات ایجاد شده در هزینه (به‌عنوان خروجی) را تعیین کند. چنین تغییراتی در ورودی می‌توانند در یک بازه‌ی معین، با در نظر گرفتن توزیع‌های مناسب و غیره انجام شوند. برای مثال، پارامتر ورودی کلیدی در تحلیل سیستم ارتباطی شامل زمان عملیات سیستم و MTBM است. با استفاده از مدل هزینه چرخه‌ی عمر (گام ۶)، تحلیل‌گر می‌تواند مقادیر مختلفی را به‌عنوان مقادیر زمان عملیات و MTBM در نظر گرفته و تغییرات هزینه مربوط به هر یک از این تغییرات را تعیین کند. با این کار، منحنی‌هایی به‌دست می‌آید که در ایجاد یک گزینه طراحی بهتر کمک کننده خواهد بود.

از طریق ارزیابی اطلاعات، بدیهی خواهد بود که تغییرات اندک در زمان عملیات و MTBM می‌تواند افزایش قابل‌توجهی بر هزینه‌ها داشته باشد. این کار نشانه‌ای از این موضوع است که ریسک زیادی در تصمیم‌گیری وجود دارد.



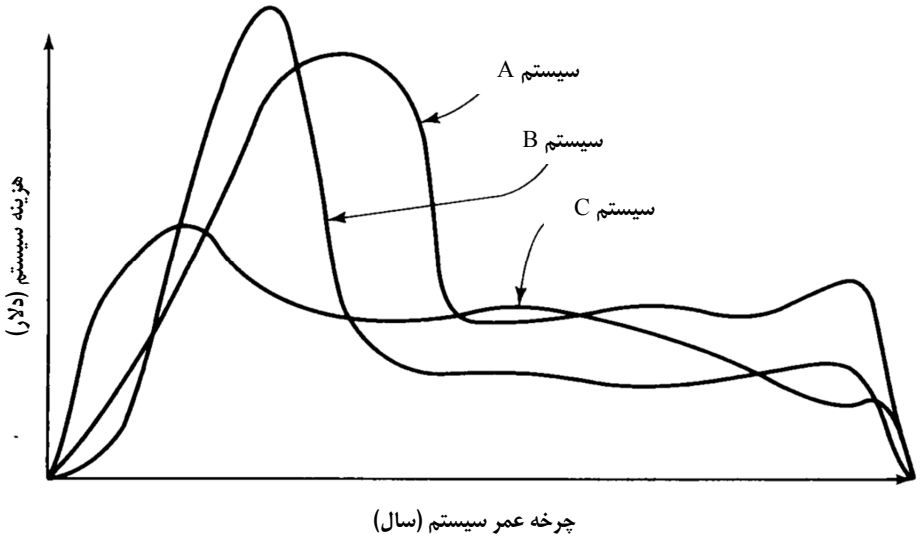
شکل ۱۷- ۱۲- رتبه‌بندی پارتو عمده حوزه‌های مشکل ساز.

در شناسایی حوزه‌های پرریسک (که براساس بزرگی تغییرات هزینه اندازه‌گیری می‌شود)، تحلیل‌گر باید تمام تلاش خود را برای کاهش این ریسک انجام دهد. این کار از طریق بهبود داده‌های ورودی تا سرحد ممکن انجام می‌شود. این موضوع به‌نوبه‌ی خود منجر به پیش‌بینی

اصلاح شده MTBM، تشریح عمیق‌تر نیازمندی‌های عملیاتی سیستم، تحلیل عمیق‌تر تکالیف نگه‌داری و تعمیرات (MTA)، و غیره می‌شود. مهم‌ترین چالش در این‌جا آن است که تحلیل‌گر باید با روابط داخلی پارامترهای مختلف، آثار آن‌ها بر هزینه، حساسیت مدل در شناسایی روابط علت و اثر، و حوزه‌های بالقوه ریسک در نتایج تحلیل LCC آشنا باشد.

۱۷-۳-۱۰ یک نمودار پارتو ساخته و اولویت‌های حل مساله را شناسایی کنید (گام ۱۰، شکل ۱۷-۵)

مسائل شناسایی شده در گام‌های ۸ و ۹ باید شناسایی و از نقطه‌نظر درجه اهمیت اولویت‌بندی شود. حوزه‌های پرهزینه/پرریسک باید بیش‌ترین توجه مدیریت به خود را داشته باشد. یک نمودار پارتو مشابه شکل ۱۷-۱۲ باید ساخته شود تا اهمیت نسبی موضوعات مختلف که هزینه‌های بالایی را (مستقیم یا غیرمستقیم) ایجاد می‌کنند، نشان دهد. فاکتورهای "اهمیت" نه تنها بر پایه حوزه‌های پرهزینه، بلکه بر پایه حساسیت و بحرانی بودن آن‌ها برای سیستم و قابلیت سیستم در انجام ماموریت معین شده قرار دارد.



شکل ۱۷- ۱۳- پروفایل‌های جایگزین هزینه چرخه‌ی عمر که برای ارزیابی در نظر گرفته شده‌اند.

۱۷-۳-۱۱- شناسایی گزینه‌های ممکن برای ارزیابی طراحی (گام ۱۱، شکل ۱۷-۵)

با دست‌یابی به دید لازم در مورد حساس‌ترین مسائل و علل آن‌ها، گام بعدی بررسی روش‌های ممکن است که توسط آن‌ها وظایف مختلف انجام می‌شود. موازنه‌های طراحی با هدف انتخاب تعداد محدودی کاندید برای ارزیابی بیش‌تر انجام می‌شود. هدف بهبود تعادل نشان داده شده در شکل ۱۷-۱ از طریق ادامه برآورده‌سازی نیازمندی‌های اثربخشی است، به‌طوری‌که به‌صورت هم‌زمان هزینه کلی چرخه‌ی عمر کاهش یابد. شکل ۱۷-۱۳ یک پروفایل هزینه چرخه‌ی عمر را برای هر سه گزینه طراحی سیستم که مدنظر قرار گرفته است، نشان می‌دهد.

۱۰ گام اول در شکل ۱۷-۵ رویکرد تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر را هنگامی که به یک ساختار سیستم اعمال می‌شود، مورد بررسی قرار می‌دهد. گام ۱۱ نیازمندی برای بررسی گزینه‌ها و ارزیابی هر کدام به‌صورت یکسان را در دستور کار قرار می‌دهد. اکنون مناسب است که تحلیل LCC را برای وضعیتی که چند گزینه مدنظر است، تعمیم داد.

برای هر کدام از مسائل خاص که در آن‌ها راه حل‌های متفاوت وجود داشته و نیاز به انتخاب یک رویکرد ارجح است، فرایند تحلیل کلی دنبال می‌شود، هم به‌صورت ذهنی و هم به‌صورت رسمی. این فرایند با رویکرد عمومی تحلیل که در شکل ۳-۲۶ نشان داده شد قابل مقایسه است. شناسایی تکنیک‌ها و ابزارهای تحلیلی مناسب و انتخاب الگوی مدل‌سازی که پاسخ‌گوی نیاز باشد، بخشی جدا نشدنی از این فرایند است.

۱۷-۴- هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر توسط مدل‌سازی جریان پول

فرایند هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر که در قسمت ۱۷-۳ تشریح شد، اکنون به یک سیستم مثالی با استفاده از مدل‌سازی جریان پول (به‌عنوان الگوی اساسی ارزیابی) اعمال می‌شود. این مثال فرضی توسط گام‌های ۱۲گانه شکل ۱۷-۵ هدایت شده و پیاده‌سازی می‌شود. اصول

تئوریک ارزیابی توسط مدل‌سازی جریان پول در معادله ۷–۱ ارائه شده، الگوی کاربردی جریان پول در شکل ۷–۱ به تصویر کشیده شده، و مدل‌های اقتصادی موردنیاز از فصل ۸ استخراج شده است.

۱۷-۴-۱- معرفی مثال

فرض کنید که مدیر یک حوزه‌ی کلان شهری در نظر دارد که قابلیت مکان‌یابی و ارتباط با واحدهای ایمنی و اورژانس متحرک را ارتقا دهد. مدیریت تصمیم گرفته است که یک نسل جدید از بسته‌های تجهیزات فعال را تدارک ببیند که وظایف مربوط به مکان‌یابی و ارتباطات را به‌طور هم‌زمان انجام دهد. توسعه سیستم مکان‌یابی/ارتباط (LCSys) توسط نصب بسته‌ها در هواپیماهای گشتی، بالگرد وسایل نقلیه زمینی، تسهیلات معین و یک تسهیل کنترل مرکزی صورت دهد. در دسته‌بندی‌های سیستم و محصول در قسمت ۲–۱–۲، LCSys یک سیستم جمعیتی چند واحدی است.

هم‌چنین LCSys یک سیستم شبکه مرکزی همراه با تسهیلات پشتیبانی و نگه‌داری و تعمیرات است که در شکل ۱۷–۱۴ نشان داده شده است. یک نیازمندی برای نصب ۸۰ بسته در شبکه وجود دارد. دو ساختار LCSys کاندید همراه با یک مشاور ارتباطات در نظر گرفته شده است. هدف تعریف نیازمندی‌های سیستم، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، و اطلاعات برنامه‌ریزی دستورکار است به‌صورتی که ساختار LCSys کم‌ترین هزینه چرخه‌ی عمر را داشته باشد.

اهداف عملیاتی LCSys. یک فعالیت برنامه‌ریزی همراه با مشاوره ۶ هدف عملیاتی را شناسایی می‌کند که باید توسط LCSys برآورده شود. اگرچه این اهداف به مقدار زیادی به بسته‌های تجهیزات مربوط می‌شود، سیستم شبکه از بسته‌ها، اتصالات بیسیم، و قابلیت پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات تشکیل شده است. شش هدف مدنظر به‌صورت زیر هستند:

۱. تجهیز باید در سه هواپیمای سبک کوتاه پرواز (یک بسته برای هر هواپیما) نصب شود تا ارتباط با بالگردهایی که در شعاع ۲۰۰ مایلی پرواز می‌کنند و با تسهیل کنترل مرکزی ممکن باشد. پیش‌بینی شده است که هر هواپیما ۱۵بار در ماه با میانگین ۳ ساعت پرواز کند. نیازمندی بهره‌برداری از تجهیز ۱/۱ ساعت در هر ساعت عملیات هواپیما است (زمان پرواز به علاوه زمانی که روی زمین است). بسته‌های تجهیز باید MTBMی کم‌تر از ۴۸۰ ساعت داشته و مقدار $\bar{M}ct$ از ۱۵ دقیقه تجاوز نکند.

۲. تجهیز باید در هر ۵ بالگرد نصب شود (یک بسته در هر بالگرد) تا بتواند با هواپیمای گشتی تا شعاع ۲۰۰ مایلی، با دیگر بالگردها تا شعاع ۵۰ مایلی و با مرکز کنترل ارتباط برقرار کند. پیش‌بینی می‌شود که هر بالگرد ۲۵ پرواز در ماه داشته باشد و میانگین زمان هر پرواز ۲ ساعت باشد. نیازمندی بهره‌برداری ۰/۹ ساعت عملیات تجهیز در هر ساعت پرواز بالگرد است. تجهیز باید نیازمندی MTBM ۵۰۰ ساعتی را برآورده کرده و دارای یک $\bar{M}ct$ ۱۵ دقیقه‌ای یا کم‌تر باشد.

۳. تجهیز باید در هر ۵۰ وسیله نقلیه گشتی نصب شود تا بتواند با همه وسایل نقلیه دیگر در شعاع ۲۵ مایلی یا کم‌تر ارتباط بر قرار کند. هر وسیله‌ی نقلیه به‌طور متوسط روزانه ۵ ساعت و ۵ روز در هفته عملیات خود را انجام خواهد داد و بهره‌برداری از آن در این زمان ۱۰۰٪ است. MTBM موردنیاز ۴۰۰ ساعت بوده و $\bar{M}ct$ نباید از ۳۰ دقیقه تجاوز کند.

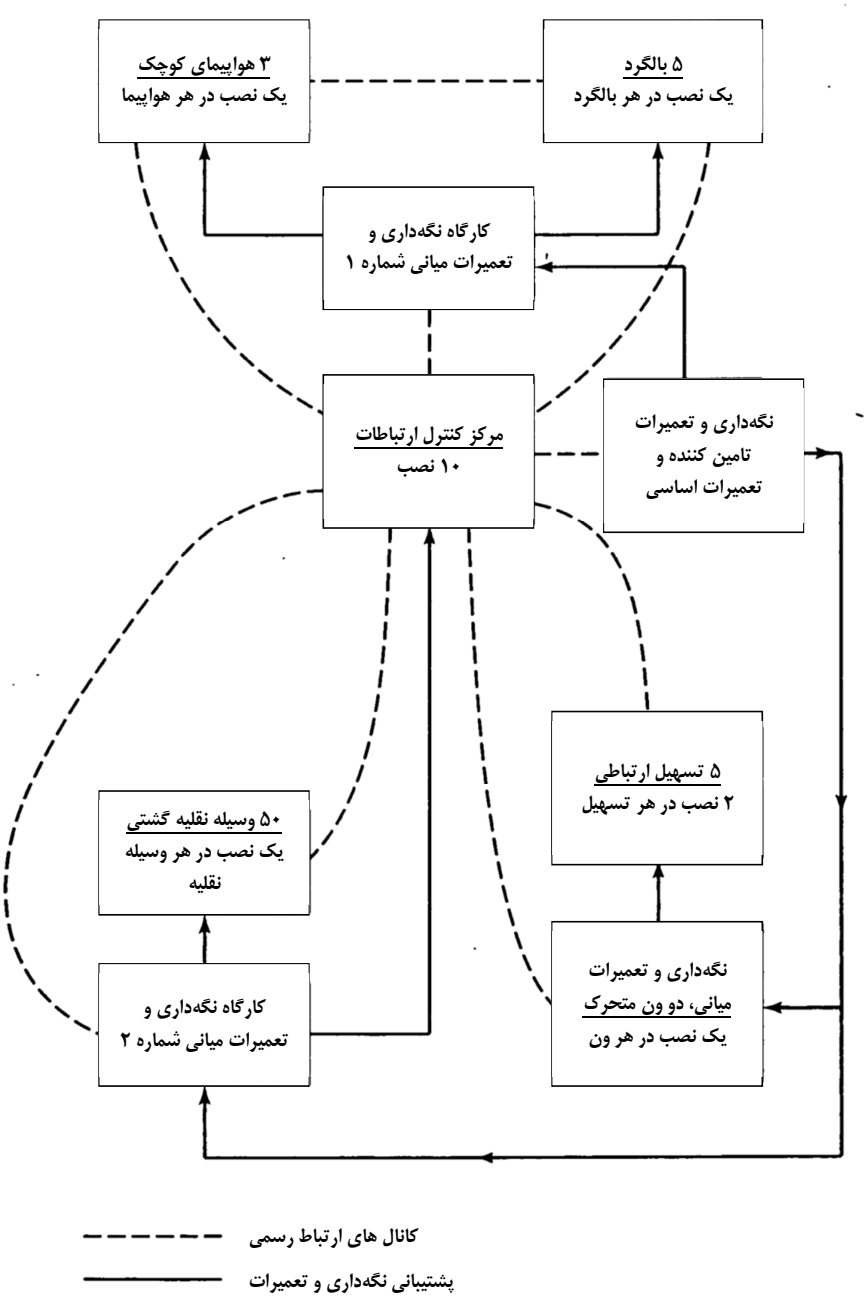
۴. در هر یک از ۵ تسهیل ثابت ارتباطی که به‌صورت راهبردی در حوزه‌ی کلان شهری مکان‌یابی شده است، باید دو بسته نصب شود. این کار ارتباط با وسایل نقلیه گشتی به شعاع ۲۵ مایل و ارتباط با مرکز کنترل با فاصله ۵۰ مایل را ممکن می‌سازد. نیازمندی

بهره‌برداری از تجهیز ۱۲۰ ساعت در هر ماه است، MTBM موردنیاز ۴۰۰ ساعت بوده و $\overline{M}ct$ نباید از ۶۰ دقیقه تجاوز کند.

۵. ۱۰ بسته باید در مرکز کنترل نصب شود تا قابلیت ارتباط با هواپیمای گشتی و بالگرد کند پرواز را در یک گستره ۴۰۰ مایلی، با وسایل نقلیه‌ی گشتی در شعاع ۵۰ مایلی و با تسهیلات ارتباطی در یک گستره ۵۰ مایلی ایجاد شود. به‌علاوه، هر بسته باید بتواند با تسهیلات میانی نگه‌داری و تعمیرات ارتباط بر قرار کند. نیازمندی بهره‌برداری متوسط تجهیز ۳ ساعت در روز برای ۳۶۰ روز در سال است. نیازمندی MTBM ۲۰۰ ساعت بوده و $\overline{M}ct$ نباید از ۴۵ دقیقه تجاوز کند.

۶. دو ون متحرک برای پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات در سطح میانی و کمک به عملیات ۵ تجهیز ثابت روی زمین مورد استفاده قرار خواهد گرفت. هر ون یک بسته خواهد داشت که به‌طور متوسط روزانه ۲ ساعت و برای ۳۶۰ روز در سال مورد استفاده قرار می‌گیرد. MTBM موردنیاز ۴۰۰ ساعت بوده و $\overline{M}ct$ نباید از ۱۵ دقیقه تجاوز کند.

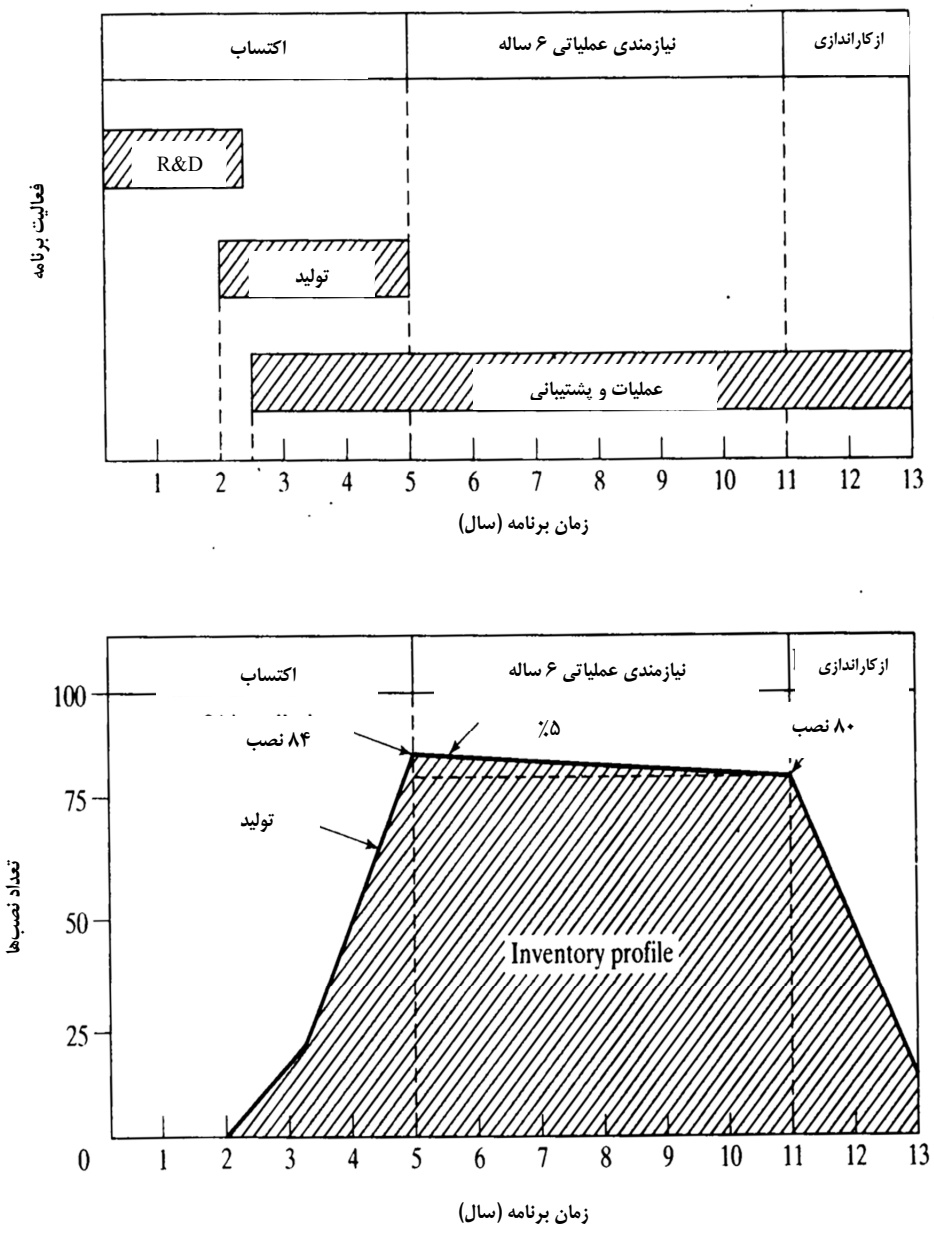
هیچ سیستم شناخته شده‌ای وجود ندارد که چنین نیازی را به‌طور کامل برآورده کند. با این حال، دو ساختار طراحی جدید توسط شرکت‌های پیمانکاری پیشنهاد شده است که می‌توانند همه اهداف طراحی را در حد کفایت برآورده کنند. هدف ارزیابی هر ساختار از نقطه‌نظر عملکرد و هزینه چرخه‌ی عمر و سپس پیشنهاد ساختار ارجح LCSys است.



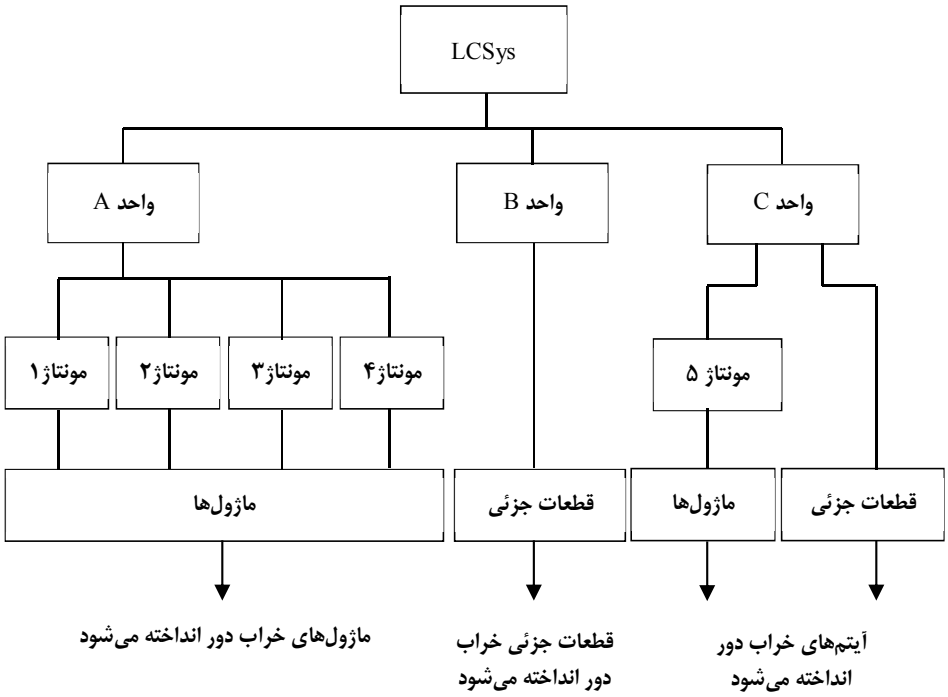
شکل ۱۷-۱۴- شبکه سیستم مکان‌یابی/ارتباطی (LCSys).

نیازمندی‌های عملکردی LCSys. برای دست‌یابی به اهداف عملیاتی، نیاز به اکتساب بسته‌های LCSys است که نیازمندی‌های عملکردی و اثربخشی مشخصی را برآورده کند (به‌طور مثال دقت مکان‌یابی، گستره‌ی انتقال صدا، وضوح پیام، سرعت انتقال داده و غیره) برآورده شود. مطالعه‌ی اولیه شاخص ادغامی عملکرد مشخص می‌کند که ساختار دوم (گزینه B) در یک مقیاس ۱ تا ۱۰ از گزینه A سبقت می‌گیرد. حداقل نمره قابل قبول برای عملکرد ۰/۸قرار داده شده است. به‌علاوه، محدودیت‌های بودجه این نیاز را ایجاد می‌کند که هزینه توسعه و تولید (در ۵ سال اول برنامه) از ۵۰۰۰۰۰۰ دلار تورم یافته تجاوز نکند. برنامه‌ریزی پیشرفته دستورکار مشخص می‌کند که یک بسته کامل باید برای ۵ سال پس از شروع برنامه عملیاتی باشد و بتوان آن را برای ۱۱ سال نگه‌داری کرد. مایلستون‌های مهم برنامه و تعداد بسته‌های عملیاتی مورد استفاده در شکل ۱۷–۱۵ نشان داده شده است. این کار پایه و اساسی برای تعریف چرخه‌ی عمر برنامه، وظایف عمده چرخه‌ی عمر و هزینه چرخه‌ی عمر فراهم می‌کند.

پیش از شناسایی ساختار شکست هزینه و توسعه عناصر هزینه، ساختار خط مبنا برای LCSys و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات آن باید به تفصیل تشریح شود. برای شروع، یک طرح بسته‌بندی فرضی مانند شکل ۱۷–۱۶ توسعه داده می‌شود. این ساختار (شامل واحدها، مونتاژها و ماژول‌ها) از ملاحظات طراحی مفهومی که نماینده هر کاندید در نظر گرفته شده است توسعه داده شده است.

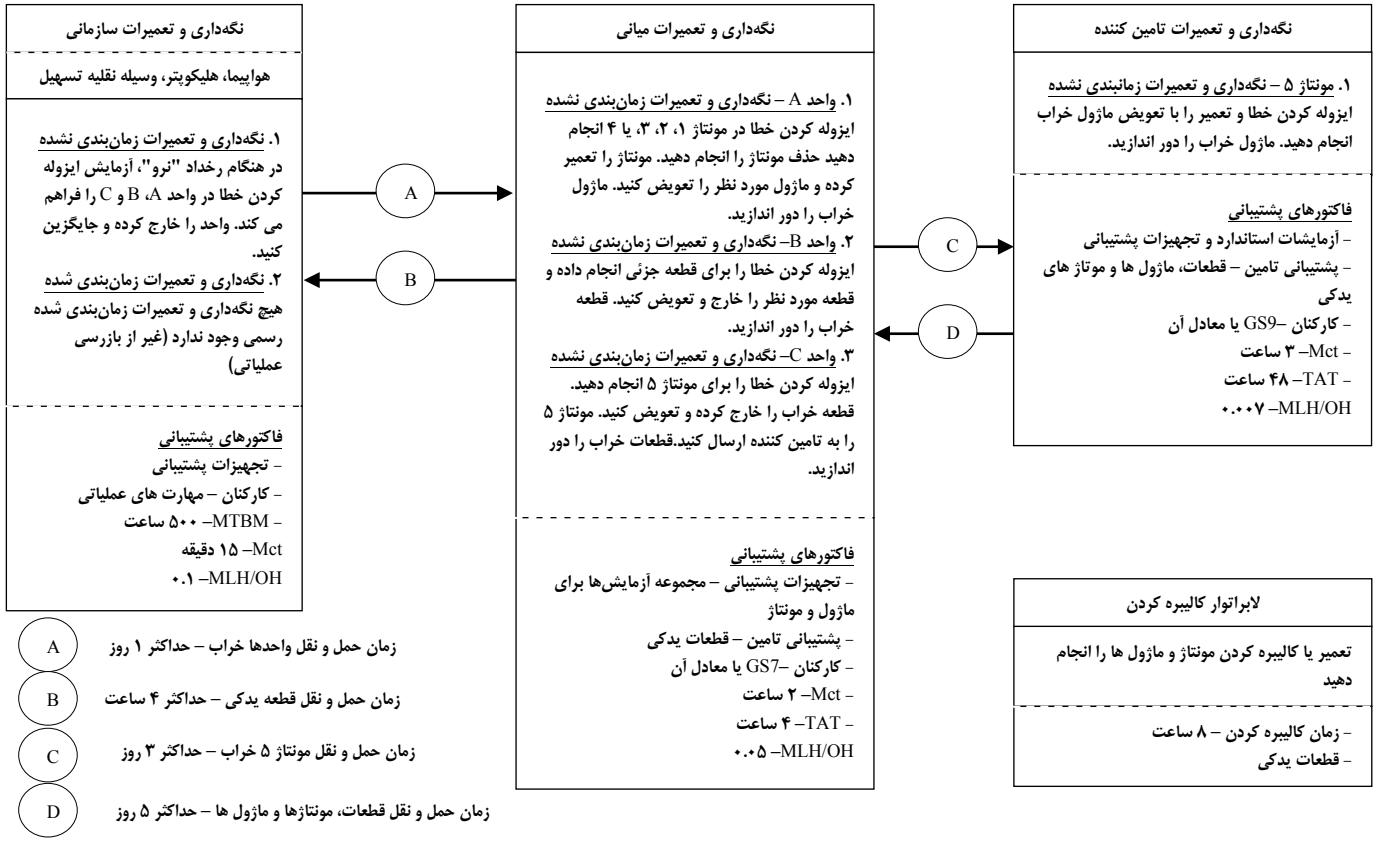


شکل ۱۷ – ۱۵ – برنامه LCSys و پروفایل چرخه‌ی عمر.



شکل ۱۷-۱۶- بسته‌بندی تجهیزات LCSys (ساختار خط مبنا).

مفهوم نگه‌داری و تعمیرات LCSys. مفهوم نگه‌داری و تعمیرات برای سیستم را می‌توان توسط عبارات و/یا تصاویری تعریف کرد که معیارهای سطوح مختلف نگه‌داری و تعمیرات، سیاست‌های پشتیبانی، فاکتورهای اثربخشی (به‌طور مثال محدودیت‌های زمان نگه‌داری و تعمیرات و زمان‌های حمل و نقل)، و نیازمندی‌های اساسی پشتیبانی تدارکات را شامل می‌شود. مفهوم نگه‌داری و تعمیرات یک ورودی طراحی سیستم و بسته است. یک برنامه تفصیلی نگه‌داری و تعمیرات نتایج طراحی را منعکس کرده و برای اکتساب عناصر پشتیبانی موردنیاز برای حفظ پشتیبانی چرخه‌ی عمر LCSys طی فاز بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مفهوم نگه‌داری و تعمیرات در شکل ۱۷-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۷- ۱۷- مفهوم نگه‌داری و تعمیرات LCSys و سیاست تعمیر

سه سطح از نگه‌داری و تعمیرات مدنظر است. نگه‌داری و تعمیرات سازمانی برای بالگرد، هواپیما، وسایل نقلیه گشتی یا تسهیلات روی زمین توسط کاربر انجام می‌شود. نگه‌داری و تعمیرات میانی یا سطح دوم نگه‌داری و تعمیرات در یک تسهیل فنی دور توسط کارکنان آموزش دیده که دارای سطح مهارت لازم هستند وظایف نگه‌داری و تعمیرات را انجام می‌دهد. نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده، بالاترین سطح نگه‌داری و تعمیرات، شامل تعمیر اجزای پیچیده در تسهیل تامین‌کننده توسط کارکنان با مهارت بالا انجام می‌شود.

وظایف خاصی برای انجام روی تجهیز در سطح نگه‌داری و تعمیرات ذکر شده زمان‌بندی شده است. هنگام خرابی، ایزوله کردن خرابی با استفاده از قابلیت خود آزمایش برای واحد موردنظر اجرا می‌شود (یعنی واحد A، B، یا C). واحدها در سطح سازمانی خارج شده و تعویض می‌شود و به تسهیل نگه‌داری و تعمیرات میانی فرستاده می‌شود تا نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی انجام شود. در این تسهیل، واحدها از طریق جایگزینی مونتاژها و/یا قطعات تعمیر شده و مونتاژها از طریق تعویض ماژول تعمیر می‌شوند. در مورد ایزوله کردن خرابی مونتاژ ۵ در واحد C، مونتاژ خراب به تامین‌کننده فرستاده می‌شود تا از طریق تعویض ماژول تعمیر شود.

مفهوم نگه‌داری و تعمیرات وظایفی را شناسایی می‌کند که برای هر سطح از نگه‌داری و تعمیرات، نیازمندی‌های اثربخشی در قالب فراوانی و زمان‌های نگه‌داری و تعمیرات و عناصر اصلی پشتیبانی تدارکات (شامل کارکنان با سطوح مختلف مهارت، نیازهای تجهیزات پشتیبانی و آزمایش، نیازمندی‌های پشتیبانی تامین و تسهیلات مربوطه) پیش‌بینی می‌شود. این اطلاعات نه تنها به‌عنوان ورودی فرایند طراحی سیستم نیاز است، بلکه پایه و اساس تعیین هزینه‌های عملیات و پشتیبانی است.

۱۷-۴-۲- تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر

با تعریف مساله (یا نیاز) و تشریح کامل نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، مناسب است که گام‌های خاصی در تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر برای هر کدام از ساختارهای پیشنهادی برداشته شود. این گام‌ها منجر به تولید داده‌های هزینه می‌شود و در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

توسعه ساختار شکست هزینه. CBS فرض شده برای این ارزیابی همان نسخه عمومی است که در شکل ۱۷-۶ نشان داده شده است. اگرچه همه گروه‌های هزینه کاملا مرتبط نیستند، اما CBS عمومی به‌عنوان یک نقطه شروع خوب به‌کار می‌آید. در ابتدا همه‌ی هزینه‌ها باید در نظر گرفته شود تا بتوان بر حوزه‌های پرهزینه تمرکز کرد. ارزیابی دو ساختار کاندید از بسته LCSys و انتخاب رویکرد ارجح مدنظر است. فعالیت‌هایی وجود دارد که عبارت است از برنامه‌ریزی، مدیریت، طراحی مهندسی، آزمایش و ارزیابی، تولید، توزیع، عملیات، نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی تدارکات و امحای تجهیزات. برای تمرکز بیش‌تر بر تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر، تحلیل‌گر باید گام‌های زیر را دنبال کند:

۱. برای هر گزینه مدنظر، همه‌ی فعالیت‌های پیش‌بینی شده برنامه را که در طی چرخه‌ی عمر ایجاد هزینه می‌کنند، شناسایی کنید.

۲. هر فعالیت را به یک گروه از هزینه‌ها در ساختار CBS ارتباط دهید. هر فعالیت باید در یک یا چند دسته قرار گیرد. اگر چنین چیزی ممکن نبود، CBS باید تعمیم داده شده یا اصلاح شود.

۳. یک برگه کار ماتریسی مانند شکل ۱۷-۱۰ یا یک برگه کار رایانه‌ای توسعه دهید تا هزینه‌های مربوط به هر سال در گروه هزینه مربوطه ثبت شود.

۴. داده هزینه‌ی ورودی برای هر فعالیت فهرست شده در ماتریس را تولید کرده و نتایج را در کاربرگ ثبت کنید.

برای سیستم LCSys، گروه‌های اصلی هزینه C_R، C_P، و C_O در ساختار CBS عمومی می‌باشند که در شکل ۱۷–۶ نشان داده شده است. پاراگراف‌های بعدی، فعالیت‌های عمده‌ای را که این گروه‌های هزینه را پشتیبانی می‌کند، به‌صورت کلی مورد بررسی قرار می‌دهد.

هزینه تحقیق و توسعه (CR). هزینه‌های تحقیق و توسعه شامل آن هزینه‌ها در ابتدای چرخه‌ی عمر می‌شود که توسط آژانس مسئول برای تدارک LCSys (یعنی مشتری) ایجاد شده و هم‌چنین آن هزینه‌هایی که توسط تامین‌کننده (یعنی پیمانکار) در توسعه سیستم تحمیل می‌شود. هزینه‌های متداول مربوط به مشتری وجود دارد که در ارتباط با هر دو گزینه است و شامل برنامه‌ریزی اولیه، امکان‌سنجی، توسعه نیازمندی‌های عملیاتی و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، تهیه مشخصات فنی در سطح سیستم و فعالیت‌های عمومی مدیریت می‌شود. هم‌چنین هزینه‌هایی مربوط به تامین‌کننده وجود دارد که مربوط به هر کدام از گزینه‌هاست و در پروپوزال تامین‌کننده ذکر می‌شود.

اگرچه تحلیل‌گر ممکن است در نهایت ارزیابی دلتا یا هزینه‌های افزایشی را انتخاب کند (یعنی آن‌ها هزینه‌هایی که به یک گزینه یا دیگری مربوط است)، رویکرد مورد استفاده در این‌جا کل هزینه چرخه‌ی عمر را در دستور کار قرار می‌دهد. در تعیین این هزینه‌ها، تحلیل‌گر می‌تواند از ترکیبی از هزینه‌های مشتری و پروپوزال‌های ارسال شده از هر تامین‌کننده به‌عنوان منبع داده برای تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر استفاده کند.

جدول ۱۷–۱ هزینه‌های تحقیق و توسعه را نشان می‌دهد. این هزینه‌ها به‌طور اساسی تکرارشونده نیستند. هزینه‌های نیروی انسانی از طریق طرح‌های کارکنانی که مشخص کننده دسته نیروی کار (مدیر، ناظر، مهندسی ارشد، مهندس، تکنسین و غیره) و نفرساعات موردنیاز در

هر دسته در هر ماه برای هر فعالیت است، توسعه داده می‌شوند. در ادامه نفرساعات در هر ماه با استفاده از فاکتورهای استاندارد هزینه تبدیل به دلار می‌شوند. همه هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم همراه با فاکتور تورم سالانه ۵٪ مدنظر قرار می‌گیرند. هزینه مواد در آزمایش و ارزیابی (گروه C_{RT}) قرار می‌گیرد، زیرا مدل‌های نمونه باید ایجاد شوند تا خصوصیات عملکرد، اثربخشی و قابلیت پشتیبانی تصدیق اعتبار شوند.

هزینه‌های تامین‌کننده برای گزینه‌های A و B در جدول ۱۷–۱ از پروپوزال‌های تامین‌کنندگان استخراج شده است. هزینه‌های مستقیم، هزینه‌های غیرمستقیم، فاکتورهای تورم برای نیروی کار و مواد، مخارج عمومی و اداری و پروفایل‌های تامین‌کننده در آن قرار داده شده است.

جدول ۱۷ – ۱ – هزینه تحقیق و توسعه

فعالیت	نماد گروه هزینه	هزینه در سال برنامه‌ریزی (دلار تورم یافته)			هزینه کل واقعی (دلار)
		سال ۱	سال ۲	سال ۳	
A. هزینه‌های مشتری:					
گزینه A					
۱. مدیریت سیستم/محصول	C_{RM}	۱۱۵۲۵۶	۱۲۱۰۱۹	۱۳۷۰۶۹	۳۷۳۳۴۴
۲. برنامه‌ریزی محصول	C_{RP}	۴۵۷۰۴	۰	۰	۴۵۷۰۴
۱. مدیریت سیستم/محصول	C_{RM}	۱۰۱۹۵۷	۱۰۷۰۵۵	۱۱۲۴۰۷	۳۲۱۴۱۹
۲. برنامه‌ریزی محصول	C_{RP}	۲۸۸۱۴	۳۰۲۵۵	۰	۵۹۰۶۹

فعالیت	نماد گروه هزینه	هزینه در سال برنامه‌ریزی (دلار تورم یافته)			هزینه کل واقعی (دلار)
		سال ۱	سال ۲	سال ۳	
۳. طراحی مهندسی	C_{RE}	۱۸۶۶۹۲	۲۲۱۸۸۷	۲۳۹۳۹۶	۶۴۷۹۷۵
۴. مستندسازی طراحی	C_{RD}	۲۸۹۵۱	۴۹۵۱۷	۵۲۷۰۷	۱۳۱۱۷۵
۵. آزمایش و ارزیابی سیستم	C_{RT}	۰	۰	۱۷۶۵۰۹	۱۷۶۵۰۹
کل هزینه تحقیق و توسعه گزینه A	C_R	۵۰۷۳۷۴	۵۲۹۷۳۳	۷۱۸۰۸۸	۱۷۵۵۱۹۵
A. هزینه‌های مشتری: گزینه B					
۱. مدیریت سیستم/محصول	C_{RM}	۱۱۵۲۵۶	۱۲۱۰۱۹	۱۳۷۰۶۹	۳۷۳۳۴۴
۲. برنامه‌ریزی محصول	C_{RP}	۴۵۷۰۴	۰	۰	۴۵۷۰۴
B. هزینه‌های تامین‌کننده: گزینه B					
۱. مدیریت سیستم/محصول	C_{RM}	۹۳۰۹۱	۹۷۷۴۶	۱۰۲۶۳۴	۲۹۳۴۷۱
۲. برنامه‌ریزی محصول	C_{RP}	۰	۰	۰	۰

فعالیت	نماد گروه هزینه	هزینه در سال برنامه‌ریزی (دلار تورم یافته)			هزینه کل واقعی (دلار)
		سال ۱	سال ۲	سال ۳	
۳. طراحی مهندسی	C_{RE}	۱۴۵۲۶۷	۱۵۲۵۳۰	۱۶۰۱۵۶	۴۵۷۹۵۳
۴. مستندسازی طراحی	C_{RD}	۳۴۹۷۶	۳۶۷۲۴	۳۹۹۲۱	۱۱۱۶۲۱
۵. آزمایش و ارزیابی سیستم	C_{RT}	۰	۰	۱۵۷۹۳۹	۱۵۷۹۳۹
کل هزینه تحقیق و توسعه گزینه B	C_R	۴۳۴۲۹۴	۴۰۸۰۱۹	۵۹۷۷۱۹	۱۴۴۰۰۳۲

جدول ۱۷ – ۲– هزینه تولید/ساخت

فعالیت	نماد گروه هزینه	هزینه در سال برنامه‌ریزی (دلار تورم یافته)				هزینه کل واقعی (دلار)
		سال ۲	سال ۳	سال ۴	سال ۵	
A. هزینه‌های مشتری: گزینه A						
۱. مدیریت سیستم/محصول	C_{RM}	۰	۰	۱۴۶۸۲۴	۱۵۴۰۸۰	۳۰۰۹۰۴
B. هزینه‌های تامین‌کننده: گزینه A						

فعالیت	نماد گروه هزینه	هزینه در سال برنامه‌ریزی (دلار تورم یافته)				هزینه کل واقعی (دلار)
		سال ۲	سال ۳	سال ۴	سال ۵	
۱. مهندسی صنایع و تحلیل عملیات	C_{PI}	۳۰۰۸۲	۵۱۶۷۹	۵۴۸۱۶	۵۷۵۲۵	۱۹۴۱۰۲
۲. تولید						
a. هزینه تکرار شونده	C_{PMR}	۰	۳۹۹۵۶۷	۶۲۰۷۹۰	۶۱۳۴۲۱	۱۷۳۳۷۷۸
b. هزینه غیرتکرارشونده	C_{PMN}	۱۴۷۱۰۰	۰	۰	۰	۱۴۷۱۰۰
۳. کنترل کیفیت	C_{PQ}	۰	۷۲۹۲۵	۷	۶۵۷۸	۷۴۷۸۲
۴. پشتیبانی اولیه تدارکات						
a. پشتیبانی تامین	C_{PLS}	۰	۳۳۳۵۰	۷۰۰۴۱	۷۳۵۰۳	۱۷۶۸۹۴
b. تجهیزات آزمایش و پشتیبانی	C_{PLT}	۱۶۵۴۵	۲۲۵۸۱۰	۰	۰	۲۴۲۳۵۵
c. داده‌های فنی	C_{PLD}	۱۶۸۷۶	۰	۰	۰	۱۶۸۷۶
d. آموزش کارکنان	C_{PLP}	۵۴۲۶۸	۵۲۱۱۰	۵۴۷۲۰	۰	۱۶۱۰۹۸
کل هزینه تولید و	C_P	۲۶۴۸۷۱	۹۳۵۴۴۱	۱۰۲۳۷۶۹	۹۷۳۳۱۱	۳۱۹۷۳۹۲

فعالیت	نماد گروه هزینه	هزینه در سال برنامه‌ریزی (دلار تورم یافته)				هزینه کل واقعی (دلار)
		سال ۲	سال ۳	سال ۴	سال ۵	
ساخت گزینه A						
A. هزینه‌های مشتری: گزینه B						
۱. مدیریت سیستم/محصول	C_{RM}	۰	۰	۱۴۶۸۲۴	۱۵۴۰۸۰	۳۰۰۹۰۴
B. هزینه‌های تامین‌کننده: گزینه B						
۱. مهندسی صنایع و تحلیل عملیات	C_{PI}	۴۵۱۲۳	۵۷۴۲۱	۶۰۲۹۸	۶۳۲۷۷	۲۲۶۱۱۹
۲. تولید						
a. هزینه تکرار شونده	C_{PMR}	۰	۴۷۹۴۶۹	۶۴۵۴۵۸	۶۶۶۷۶۲	۱۷۹۱۶۸۹
b. هزینه غیرتکرارشونده	C_{PMN}	۱۶۵۷۵۱	۰	۰	۰	۱۶۵۷۵۱
۳. کنترل کیفیت	C_{PQ}	۰	۵۶۸۴۷	۶۰۵۷۲	۸۱۲۹۳	۱۹۸۷۱۲
۴. پشتیبانی اولیه تدارکات						
a. پشتیبانی تامین	C_{PLS}	۰	۶۳۷۱۲	۷۰۵۵۴	۷۴۰۳۹	۲۰۸۳۰۵

فعالیت	نماد گروه هزینه	هزینه در سال برنامه‌ریزی (دلار تورم یافته)				هزینه کل واقعی (دلار)
		سال ۲	سال ۳	سال ۴	سال ۵	
b. تجهیزات آزمایش و پشتیبانی	C_{PLT}	۱۶۵۴۵	۲۲۵۸۱۰	۰	۰	۲۴۲۳۵۵
c. داده‌های فنی	C_{PLD}	۱۷۷۰۳	۰	۰	۰	۱۷۷۰۳
d. آموزش کارکنان	C_{PLP}	۵۴۲۶۸	۵۲۱۱۰	۵۴۷۲۰	۰	۱۶۱۰۹۸
کل هزینه تولید و ساخت گزینه A	C_P	۲۹۹۳۹۰	۹۳۵۳۶۹	۱۰۳۸۴۲۶	۱۰۳۹۴۵۱	۳۳۱۲۶۳۶

هزینه تولید و ساخت (C_P). این گروه عبارت است از هزینه‌های تکرارشونده و غیرتکرارشونده مربوط به تولید ۸۰ بسته عملیاتی موردنیاز به‌علاوه ۴ بسته اضافی برای جبران استهلاک ممکن. با مراجعه به شکل ۱۷–۱۵، پروفایل موجودی نیازمندی‌های تعداد تولید را نمایش می‌دهد. تحلیل‌گر باید طرح رشد جمعیت را به پروفایل تولید تبدیل کند تا به‌عنوان پایه و اساسی برای تعیین هزینه‌های تولید مورد استفاده قرار گیرد. اگر گزینه‌ی مربوطه مجاز باشد، هر تامین‌کننده‌ی بالقوه می‌تواند یک الگوی تولید کاملا متفاوت که کماکان نیازمندی موجودی مطلوب را برآورده می‌کند، پیشنهاد دهد. این موضوع تغییرات قابل‌توجهی در فاکتورهای برنامه‌ریزی و هزینه ایجاد می‌کنند. با این حال در این مثال برنامه تولید برای هر دوگزینه یکسان فرض شده است.

هزینه تولید و ساخت فاکتورهای مناسب را که در ساختار عمومی CBS در شکل ۱۷–۶ مشخص شده‌اند، در نظر می‌گیرد و نتایج در جدول ۱۷–۲ نشان داده شده است. توضیحات مربوط به این هزینه‌ها به‌صورت زیر است:

۱. هزینه *مدیریت سیستم یا محصول*(C_{RM}) فعالیت مداوم مدیریتی موردنیاز طی فاز تولید است. هزینه‌ها در این گروه جریان هزینه مستمر مدیریت سیستم یا محصول است که در خلاصه هزینه R&D در جدول ۱۷–۱ منعکس شده است.

۲. هزینه *مهندسی تولید و تحلیل عملیات* (C_{PI}) عبارتست از وظایف برنامه‌ریزی تولید، مهندسی تولید، مهندسی روش‌ها و غیره.

۳. هزینه *تکرارشونده تولید* (C_{PMR}) عبارتست از آن فعالیت‌هایی که به‌طورمستقیم در ارتباط با ساخت، مونتاژ، بازرسی و آزمایش ۸۴ بسته تولیدی هستند. هر کدام از دو تامین‌کننده بالقوه یک پروپوزال ارسال کرده‌اند که وظایفی را پوشش می‌دهد که با ساختار تولید نمایش داده شده در شکل ۱۷–۱۵ مطابقت داشته و به‌طورمستقیم از آن پشتیبانی می‌کند. از آنجا که عمده این فعالیت‌ها طبیعتی تکرارشونده دارند، هر تامین‌کننده هزینه بسته اول را تخمین زده و سپس یک منحنی یادگیری را ترسیم کرده اند که هزینه بسته‌های بعدی را مشخص می‌کند. در نتیجه، یادگیری برای هر گزینه مطابق با مدل بحث شده و اقتباس شده در قسمت ۱۶–۴ مدنظر قرار گرفته شده است. فرض آن است که هر تامین‌کننده نرخ مشابهی از یادگیری را طی تولید بسته‌های LCSys تجربه می‌کند.

۴. هزینه‌*های غیرتکرارشونده تولید* (C_{PMN}) عبارتست از همه هزینه‌های مربوط به اکتساب و نصب ابزارهای مخصوص، جیگ و فیکسچرها و تجهیزات آزمایشی. این هزینه‌ها، از پروپوزال تامین‌کننده، اساسا هزینه‌ای است که یکبار طی سال ۲ بر اساس پیش‌بینی تولید که در سال ۳ آغاز می‌شود، اتفاق می‌افتد.

۵. هزینه *کنترل کیفیت* (C_{PO}) شامل گروه تضمین کیفیت است. سطحی از پایداری فعالیت موردنیاز است تا اطمینان حاصل شود که کیفیت خوب محصول طی فرایند تولید حفظ شده و هم‌چنین گروه آزمایش کیفیت که سطح کیفیت آیتم‌های تولیدشده را ارزیابی می‌کند، در حد کفایت صورت می‌گیرد. هزینه مربوط به هر تامین‌کننده که در پروپوزال عنوان شده است، مدنظر قرار می‌گیرد.

۶. هزینه *اولیه قطعات یدکی و موجودی* (C_{PLS}) عبارتست از اکتساب واحدهای عمده برای پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات سازمانی و تعداد مونتاژ به‌علاوه قطعات برای فراهم آوردن پشتیبانی در سطح نگه‌داری و تعمیرات میانی. این آیتم‌ها موجودی ذخیره را نشان می‌دهد که در کارگاه‌های نگه‌داری و تعمیرات میانی و تسهیل نگه‌داری و تعمیرات قرار داده شده و در شکل ۱۷–۱۴ نشان داده شده است. قطعات یدکی برای حفظ پشتیبانی سیستم هنگام انجام عملیات در گروه (C_{OLS}) پوشش داده شده است. این گروه شامل تدارک محدود اولیه می‌شود درحالی‌که قطعات یدکی بر پایه مصرف و فاکتورهای تقاضا واقعی قرار دارد. فرضیات استفاده شده در تعیین هزینه‌ها برای هر گزینه به شرح زیر است:

a. گزینه A. یک مجموعه کامل از واحدها (واحدهای A تا C) به‌عنوان پشتیبان برای کارگاه ۱، کارگاه ۲، هر کدام از ون‌های متحرک و برای تسهیل تامین‌کننده موردنیاز است. قیمت اکتساب برای واحد A ۱۱۴۰۰ دلار، واحد B ۶۴۵۰ دلار و واحد C ۷۹۵۰ دلار است. پنج مجموعه معادل ۱۲۹۰۰۰ دلار است: ۲۵۸۰۰ دلار در سال ۳، ۵۱۶۰۰ دلار در سال ۴، و ۵۱۶۰۰دلار در سال ۵. هزینه مونتاژها و قطعات ۱۵۰۰۰ دلار است (۳۰۰۰ دلار در سال ۳، ۶۰۰۰ دلار در سال ۴ و ۶۰۰۰ دلار در سال ۵).

b. گزینه B. شش مجموعه از واحدها (واحدهای A تا C) موردنیاز است. واحد اضافی (بالا و پایین نیازمندی‌ها برای گزینه A) باید در کارگاه ۲ قرار داده شود تا افزایش پیش‌بینی شده در تعداد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات را پاسخگو باشد. قیمت اکتساب برای واحد A ۱۰۵۹۰دلار، برای واحد B ۶۱۸۰دلار و برای واحد C ۷۷۴۰دلار است. شش مجموعه معادل است با ۱۴۷۰۶۰دلار همراه با ۴۹۰۲۰ دلار در هر کدام از سال‌های ۳، ۴ و ۵. هزینه مونتاژها و قطعات ۲۴۰۰۰ دلار است (۶۰۰۰ دلار در سال ۳، ۹۰۰۰ دلار در سال ۴ و ۹۰۰۰ دلار در سال ۵).

۷. هزینه *اکتساب تجهیزات آزمایش و پشتیبانی*(C_{PLT}) عبارتست از مجموعه مونتاژ و ماژول آزمایش که در هر تسهیل نگه‌داری و تعمیرات میانی قرار داده شده و آیتم‌های مختلف از تجهیزات تجاری و استاندارد که در تسهیل تامین‌کننده قرار داده شده است تا نگه‌داری و تعمیرات در سطح مبدا را پشتیبانی کند (به شکل‌های ۱۷–۱۴ و ۱۷–۱۷ مراجعه کنید). هزینه طراحی مربوط به مجموعه آزمایش ۱۵۰۰۰ دلار است که در سال ۲ خرج می‌شود. قیمت اکتساب تولید هر مجموعه آزمایش ۴۵۰۰۰ دلار است و چهار مجموعه در کل نیاز است. براساس جدول ۱۷–۳، بسته‌هایی وجود دارد که برای انجام عملیات در سال ۳ در همه مکان‌ها معرفی می‌شود؛ بنابراین، چهار مجموعه آزمایش باید در سال ۳ در دسترس باشد. تجهیزات تجاری و استاندارد که برای نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده موردنیاز است، نیازمند هیچ طراحی اضافه‌ای نیست و می‌تواند با ۱۵۰۰۰ دلار اکتساب شود. بنابراین، هزینه‌ها برای سال ۳ ۱۹۵۰۰۰ دلار است. نیازمندی‌های تجهیزات آزمایش و پشتیبانی برای هر گزینه قابل مقایسه است. نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات و تدارکات سالانه برای هر تجهیز آزمایش در گروه هزینه (C_{OLE}) در نظر گرفته شده است.

۸. هزینه *داده‌های فنی* (C_{PLD}) عبارتست از تهیه و انتشار دستورالعمل‌های نصب و آزمایش، رویه‌های عملیاتی و رویه‌های نگه‌داری و تعمیرات. این داده‌ها نیاز است تا سیستم طی چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده عملیات خود را انجام داده و نگه‌داری شود. هزینه اکتساب این داده‌ها ۱۵۳۰۰ دلار برای گزینه A و ۱۶۰۵۰ دلار برای گزینه B است. این هزینه‌ها در سال ۲ اتفاق می‌افتد.

۹. هزینه *آموزش کارکنان* (C_{PLP}) عبارتست از هزینه اولیه آموزش کاربران عملیات و تکنسین‌های نگه‌داری و تعمیرات. برای آموزش کاربر، فرض آن است که ۲۰ کاربر در سال ۲، ۳۰ کاربر در سال ۳، و ۳۰ کاربر در سال ۴ آموزش می‌بینند. هزینه آموزش هر کاربر ۱۵۰۰ دلار است. در حوزه نگه‌داری و تعمیرات، آموزش رسمی به دو تکنسین که به هر کدام از چهار تسهیل نگه‌داری و تعمیرات میانی تخصیص داده شده‌اند، داده می‌شود. هزینه آموزش تکنسین‌های نگه‌داری و تعمیرات ۲۴۰۰ دلار به ازای هر دانشجو در هفته است. به عبارت دیگر این هزینه ۱۹۲۰۰ دلار در سال ۲ است.

هزینه عملیات و پشتیبانی (C_O). این گروه عبارتست از هزینه عملیات و پشتیبانی سیستم طی چرخه‌ی عمر پیش‌بینی شده. این هزینه‌ها به‌طوراساسی هزینه‌های کاربر است و بر پایه اطلاعات برنامه‌ریزی دستور کار که در شکل ۱۷–۱۵ نشان داده شده است، قرار دارد. پروفایل موجود نشان داده شده در جدول ۱۷–۳ تعمیم داده شده است تا تعداد بسته‌های در حال استفاده و کل زمان عملیات (به ساعت) برای همه دستگاه‌ها در هر سال از چرخه‌ی عمر مشخص گردد.

گروه	سال												
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
بسته‌های LCSys در حال استفاده	–	–	۲۰	۵۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۲۹	۱۰
۱. استفاده در هواپیما (۳)	–	–											
a. تعداد بسته‌ها	–	–	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱
b. زمان عملیات (ساعت)	–	–	۵۹۴	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۱۷۸۲	۵۹۳
۲. استفاده در هلیکوپتر (۳)													
a. تعداد بسته‌ها	–	–	۲	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۳
b. زمان عملیات (ساعت)			۱۰۸۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۱۶۲۰
۳. استفاده در گشتی (۵۰)													
a. تعداد بسته‌ها	–	–	۷	۲۲	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۱۰	۲
b. زمان عملیات (ساعت)			۹۱۰۰	۲۸۶۰۰	۶۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۲۶۰۰

۴. تسهیلات ارتباطی (۵)													
a. تعداد بسته‌ها	–	–	۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵	–
b. زمان عملیات (ساعت)	–	–	۷۲۰۰	۱۴۴۰۰	۱۴۴۰۰	۱۴۴۰۰	۱۴۴۰۰	۱۴۴۰۰	۱۴۴۰۰	۱۴۴۰۰	۱۴۴۰۰	۷۲۰۰	–
۵. ارتباطات مرکزی (۱)													
a. تعداد بسته‌ها	–	–	۴	۸	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۴	۳
b. زمان عملیات (ساعت)	–	–	۴۳۲۰	۸۶۴۰	۱۰۸۰۰	۱۰۸۰۰	۱۰۸۰۰	۱۰۸۰۰	۱۰۸۰۰	۱۰۸۰۰	۱۰۸۰۰	۵۴۰۰	۳۲۴۰
۶. ون‌های متحرک (۲)													
a. تعداد بسته‌ها	–	–	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱
b. زمان عملیات (ساعت)	–	–	۷۲۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۱۴۴۰	۷۲۰

جدول ۱۷- ۳- بسته‌های LCSys در حال استفاده و زمان‌های عملیات

بهره‌برداری از LCSys بر پایه زمان‌های عملیات قرار دارد که در اهداف تشریح شده به‌عنوان بخشی از تعریف مساله بیان شده و سپس با استفاده از معادلات ۱۷–۱ تا ۱۷–۶ به‌دست می‌آید:

زمان عملیات برای هواپیما (ساعت) (۱۷–۱)

= (تعداد واحدها در هواپیما)(۱۵پرواز در ماه)(۱۲) × (۳ساعت پرواز)(۱,۱)

زمان عملیات بالگرد (ساعت) (۱۷–۲)

=(تعداد واحدها در بالگرد)(۱۵پرواز در ماه)(۱۲) × (۳ساعت پرواز)(۱,۱)

زمان عملیات برای وسیله نقلیه گشتی(ساعت) (۱۷–۳)

=(تعداد واحدها در وسیله نقلیه گشتی)(۵ساعت در روز) × (۵روز در هفته)(۵۲هفته در سال)(۱,۰)

زمان عملیات تسهیل ارتباطی (ساعت) (۱۷–۴)

= (تعداد واحدها در تسهیلات)(۱۲۰ ساعت در ماه)(۱۲)

زمان عملیات برای کنترل مرکزی ارتباطات (ساعت) (۱۷–۵)

= (تعداد واحدها)(۳ساعت در روز)(۳۶۰روز در سال)

زمان عملیات برای ون‌های متحرک (ساعت) (۱۷–۶)

=(تعداد واحدها در ون)(۲ساعت در روز)(۳۶۰روز در سال)

اگرچه بهره‌برداری واقعی تجهیز از یک کاربر به کاربر دیگر، از سازمانی به سازمان دیگر، از یک حوزه‌ی جغرافیایی به حوزه‌ای دیگر، و غیره متفاوت است، فاکتورهای قرار داده شده در جدول ۱۷–۳ مقادیر میانگین هستند و به‌عنوان خط مبنا برای مثال به‌کارگرفته می‌شوند. هم‌چنین فرض

آن است که هر ساختار کاندید که مورد ارزیابی قرار گرفته است، به روشی مشابه عملیات را انجام می‌دهد.

هزینه‌های عملیات و پشتیبانی عبارتست از هزینه‌های عملیات، توزیع، و حفظ پشتیبانی تدارکات. هزینه‌های مهم که در LCSys قابل استفاده است به‌صورت زیر می‌باشد:

۱. هزینه *کارکنان عملیاتی* (C_{OOP}) کل هزینه‌های عملیات LCSys برای کاربری‌های مختلف را پوشش می‌دهد. از آنجا که کاربر مسئول وظایف مختلفی است، تنها بخشی از زمان اختصاص داده شده مورد محاسبه قرار می‌گیرد که مربوط به عملیات مستقیم سیستم ارتباطی باشد. هزینه کارکنان عملیات از معادله ۱۲–۷ و با استفاده از داده‌های جدول ۱۷–۳ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

C_{OOP} = (تعداد واحدها)(ساعات عملیات سیستم)(٪تخصیص)(هزینه نیروی انسانی

(۷–۱۷)

در تعیین هزینه‌های کاربر، نرخ‌های ساعتی مختلف برای کاربری‌های مختلف اعمال می‌شود (به‌طور مثال ۴۳٫۵۰ دلار در هر ساعت برای هواپیما و بالگرد، ۳۷٫۵۰ دلار در ساعت برای تسهیل و غیره) و فاکتورهای تخصیص متفاوتی اعمال می‌شود زیرا بارکاری کارکنان مختلف از یک کاربری به دیگری متفاوت است (به‌طور مثال ۱٪، ۲٪). هزینه‌های حاصل پس از اصلاح با تورم در جدول ۱۷–۴ ارائه شده است.

۲. هزینه *توزیع و حمل و نقل* (C_{ODT}) هزینه حمل و نقل و نصب اولیه را پوشش می‌دهد (یعنی بسته‌بندی و ارسال بسته‌ها از تسهیل تولیدی تامین‌کننده به نقطه نصب برای بهره‌برداری عملیاتی). معادله ۱۲–۸ برای تعیین کل هزینه در این گروه به کار می‌رود که در آن هزینه‌های حمل و نقل و بسته‌بندی بر پایه دلار در هر صد کیلوگرم قرار دارد

(cwt) (یعنی ۹۰دلار در هر cwt برای حمل و نقل و ۱۲۰ دلار در هر cwt برای بسته‌بندی)، و هزینه‌های نصب تابعی از هزینه نیروی کار به ازای هر نفر ساعت و تعداد نفرات می‌باشد:

$$C_{ODT} = (\text{هزینه بسته‌بندی}) + (\text{هزینه حمل و نقل}) + (\text{هزینه نصب سیستم}) \quad (۱۷-۸)$$

هزینه در این گروه بر اساس تعداد بسته‌های مشخص شده در جدول ۱۷–۳ و ساختار نرخ حمل و نقل محاسبه می‌شود. تحلیل‌گر باید آخرین سند کمیسیون تجاری بین ایالتی (ICC) را بازبینی کند تا نرخ‌های هزینه حمل و نقل را تعیین کند. اشکال استفاده شده در تحلیل این هزینه در جدول ۱۷–۴ ارائه شده است.

۳. هزینه *نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده* (C_{OLA}) هزینه فعالیت‌های کارکنان مربوط به نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده یا اصلاحی بر روی LCSys را پوشش می‌دهد. به ویژه، این قسمت شامل هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم انجام فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات (تابعی از نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات و هزینه هر نفر ساعت)، هزینه جابه‌جایی مواد مربوط به فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات، و هزینه مستندسازی برای هرکدام از فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات می‌شود. این هزینه‌ها برای دو ساختار سیستم کاندید مورد ارزیابی در جدول ۱۷–۵ خلاصه شده است. تعیین هزینه نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده به پیش‌بینی تعداد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات که ممکن است طی چرخه‌ی عمر اتفاق افتد بستگی دارد (یعنی فراوانی انتظاری نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده). از آنجا که هیچ نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده‌ای در این مثال مجاز نیست، فاکتور MTBM مستقیم معادل فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده است. فراوانی نگه‌داری و تعمیرات اغلب بر پایه نرخ‌های خرابی هر جزء از سیستم قرار دارد و از داده‌های پیش‌بینی قابلیت اطمینان، داده‌های پیش‌بینی

قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، داده‌های تحلیل پشتیبانی تدارکات، یا ترکیبی از آن‌ها استخراج می‌شود.

بازبینی اهداف در تعریف مساله مشخص می‌کند که نیازمندی‌های MTBM از یک کاربری به دیگری متفاوت است. از آنجا که هدف، طراحی یک ساختار واحد برای استفاده در همه کاربری‌ها (هواپیما، بالگرد و غیره) می‌باشد، باید سخت‌گیرانه‌ترین شرایط درنظر گرفته شود. بنابراین، سیستم جدید نیاز دارد که MTBM برابر یا بیش‌تر از ۵۰۰ ساعت را از خود نشان دهد. پاسخ این نیازمندی توسط تامین‌کنندگان در شکل ۱۷–۱۸ به تصویر کشیده شده است. توجه کنید که MTBM پیش‌بینی شده برای گزینه A ۶۵۰ ساعت و برای گزینه B ۵۲۵ ساعت است. این مقادیر تا سطح واحد شکسته شده است و با طرح بسته‌بندی تجهیز در شکل ۱۷–۱۶ و مفهوم نگه‌داری و تعمیرات در شکل ۱۷–۱۷ مطابقت دارد. اگرچه خرابی‌ها به‌صورت تصادفی توزیع شده است، این مقادیر برای تعیین فاکتور میانگین مربوط به فراوانی نگه‌داری و تعمیرات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شکل ۱۷–۱۸ نتایج نهایی فرایند تکرار شونده طراحی است که هزینه چرخه‌ی عمر سیستم و MTBM آن را موازنه می‌کند. MTBMهای نشان داده شده مقادیر بهینه هستند. با استفاده از اطلاعات شکل ۱۷–۸، گام بعدی محاسبه میانگین تعداد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات در هر ساختار در هر سال طی چرخه‌ی عمر است. این کار با تقسیم زمان عملیات در جدول ۱۷–۳ بر MTBM انجام می‌شود. نتایج (که به نزدیک‌ترین دلار گرد شده است) در جدول ۱۷–۵ ارائه شده است.

هزینه نیروی کار که انجام نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده را پوشش می‌دهد تابعی از نفرساعات نگه‌داری و تعمیرات و هزینه هر نفرساعت است. فاکتورهای نفرساعت و هزینه– نفر نگه‌داری و تعمیرات در این مثال بر پایه تعداد تکنسین‌های تخصیص داده

شده به فعالیت نگه‌داری و تعمیرات و زمانی که تکنسین برای انجام کار تخصیص می‌دهد، قرار دارد. فاکتورهای فرض شده به‌صورت زیر هستند:

نگه‌داری و تعمیرات سازمانی: ۰/۲۵ MLH به ازای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات با هزینه ۳۳ دلار در هر MLH

نگه‌داری و تعمیرات میانی: ۳ MLH به ازای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات با هزینه ۳۹ دلار در هر MLH

نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده: ۴ MLH به ازای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات با هزینه ۴۵ دلار در هر MLH

فاکتورهای نفرساعت استفاده شده با نیازمندی‌های کارکنان برای نگه‌داری و تعمیرات مستقیم در ارتباط است که در آن زمان‌های سپری شده توسط مقادیر $\bar{M}ct$ مشخص می‌شود. نرخ‌های ساعتی شامل دلارهای مستقیم به‌علاوه نرخ بالاسری می‌شود. محاسبات نفر ساعت، هزینه کارکنان، هزینه جابه‌جایی مواد (یعنی ۳۰ دلار در هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات)، و هزینه مستندسازی (یعنی ۳۰ دلار در هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات در سطح مبدا، ۶۰ دلار در سطح میانی، و ۳۰ دلار در سطح سازمانی) در جدول ۱۷–۵ برای هر کدام از ساختارهای مورد ارزیابی ذکر شده است. فاکتورهای کل هزینه در جدول ۱۷–۴ قرار داده شده است.

۴. هزینه *تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات* (C_{OLM}) بر پایه اشغال بودن تسهیل، بهره‌برداری از آن، و هزینه نگه‌داری و تعمیرات تسهیل که در سیستم ارتباطات سرشکن شده است، قرار دارد. هزینه تسهیلات در این مورد اساسا مربوط به نگه‌داری و تعمیرات در سطح میانی است.

جدول ۱۷- ۴- هزینه عملیات و پشتیبانی

فعالیت	گروه هزینه	هزینه در هر سال												کل هزینه سالانه
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	
A. گزینه A															
۱. کارکنان عملیاتی	C_{OOP}	-	-	۲۹۹۰	۹۴۲۳	۹۸۹۴	۱۰۳۸۸	۱۰۹۰۸	۱۱۴۵۳	۱۲۰۲۶	۱۲۶۲۷	۱۳۲۵۸	۱۳۲۹۱	۴۸۷۱	۱۱۱۷۵۹
۲.حمل و نقل	C_{ODT}	-	-	۲۷۷۸۳	۷۲۹۳۰	۱۲۲۵۲۳	۱۲۸۶۴۹	۱۳۵۰۸۲	۱۴۱۸۱۷	۱۴۸۹۲۷	۱۵۶۳۷۴	۱۶۴۱۹۲	۳۶۰۰۰	۶۳۶۴	۱۱۴۰۶۴۱
۳.نگه‌داری و تعمیرات زمان-بندی نشده	C_{PLA}	-	-	۱۲۹۰۲	۳۲۴۰۳	۵۶۹۳۹	۵۹۷۸۶	۶۲۷۷۵	۶۵۹۱۴	۶۹۲۰۹	۷۲۶۷۱	۷۶۳۰۳	۲۶۳۷۷	۸۶۸۹	۵۴۳۹۶۸
۴. تسهیلات نگه‌داری و	C_{OLM}	-	-	۴۸۳	۱۲۱۸	۲۱۴۰	۲۲۴۷	۲۳۶۰	۲۴۷۸	۲۶۰۲	۲۷۳۲	۲۸۶۸	۹۹۱	۳۱۷	۲۰۴۳۶

تعمیرات																
۵. پشتیبانی تامین	C_{OLS}	-	-	۲۳۱۷۰	۷۷۸۹۰	۱۳۶۹۱۹	۱۴۳۷۶۵	۱۵۰۹۵۴	۱۵۸۵۰۱	۱۶۶۴۲۶	۱۷۴۷۴۸	۱۸۳۴۸۵	۶۳۳۵۸	۲۰۳۶۵	۱۲۹۹۵۸۱
۶.آموزش کارکنان نگهداری و تعمیرات	C_{OLT}	-	-	۰	۰	۴۹۷۸	۵۲۲۶	۵۴۸۸	۵۷۶۲	۶۰۵۰	۶۳۵۳	۶۶۷۰	۰	۰	۴۰۵۲۷
۷.تجهیزات آزمایش و پشتیبانی	C_{OLE}	-	-	۱۱۲۹۱	۱۱۸۵۶	۱۲۴۴۳	۱۳۰۶۶	۱۳۷۱۹	۱۴۴۰۵	۱۵۱۲۵	۱۵۸۸۲	۱۶۶۷۶	۱۷۵۱۹	۱۸۱۹۴	۱۶۰۱۶۷
۸. حمل و نقل/جابجایی	C_{OLH}	-	-	۵۸۴	۱۳۷۸	۲۴۱۲	۲۵۳۳	۲۶۵۹	۲۷۹۲	۲۹۳۲	۳۰۷۹	۳۲۳۳	۱۱۳۱	۸۷۰	۲۳۶۰۳
کل هزینه عملیات و پشتیبانی گزینه A	C_O	-	-	۷۹۲۰۳	۲۰۷۰۹۸	۳۴۸۲۴۸	۳۵۶۶۶۰	۳۸۳۹۴۵	۴۰۳۱۲۲	۴۲۳۲۹۷	۴۴۴۴۶۶	۴۶۶۶۸۵	۱۵۹۲۸۸	۵۹۶۷۰	۳۳۴۰۶۸۲

B. گزینه B															
۱. کارکنان عملیاتی	C_{OOP}	-	-	۲۹۹۰	۹۴۲۳	۹۸۹۴	۱۰۳۸۸	۱۰۹۰۸	۱۱۴۵۳	۱۲۰۲۶	۱۲۶۲۷	۱۳۲۵۸	۱۳۹۲۱	۴۸۷۱	۱۱۱۷۵۹
۲.حمل و نقل	C_{ODT}	-	-	۲۷۷۸۳	۷۲۹۳۰	۱۲۲۵۲۳	۱۲۸۴۶۹	۱۳۵۰۸۲	۱۴۱۸۱۷	۱۴۸۹۲۷	۱۵۶۳۷۴	۱۶۴۱۹۲	۳۶۰۰۰	۶۳۶۴	۱۱۴۰۶۴۱
۳.نگهداری و تعمیرات زمانبندی نشده	C_{PLA}	-	-	۱۶۳۵۵	۳۹۶۷۸	۷۰۱۵۲	۷۳۶۶۰	۷۷۳۴۳	۸۱۲۱۰	۸۵۲۷۰	۸۹۵۳۴	۹۴۰۱۰	۳۲۷۴۰	۱۰۲۵۱	۶۷۰۲۰۳
۴. تسهیلات نگهداری و تعمیرات	C_{OLM}	-	-	۵۸۷	۱۴۹۱	۲۶۴۲	۲۷۷۴	۲۹۱۳	۳۰۵۸	۳۲۱۱	۳۳۷۲	۳۵۴۰	۱۲۳۴	۳۸۵	۲۵۲۰۷
۵. پشتیبانی تامین	C_{OLS}	-	-	۳۷۵۰۷	۹۵۳۹۳	۱۶۹۰۸۱	۱۷۷۵۳۶	۱۸۶۴۱۳	۱۹۵۷۳۳	۲۰۵۵۲۰	۲۱۵۷۹۶	۲۲۶۵۸۶	۷۸۸۷۴	۲۴۴۳۸	۱۶۱۲۸۷۷
۶.آموزش	C_{OLT}	-	-	۰	۰	۴۹۷۸	۵۲۲۶	۵۴۸۸	۵۷۶۲	۶۰۵۰	۶۳۵۳	۶۶۷۰	۰	۰	۴۰۵۲۷

کارکنان نگهداری و تعمیرات ۷.تجهیزات آزمایش و پشتیبانی	C_{OLE}	-	-	۱۶۹۳۶	۱۷۷۸۴	۱۸۶۶۲	۱۹۵۹۸	۲۰۵۷۷	۲۱۶۰۱	۲۲۶۸۳	۲۳۸۲۴	۲۵۰۰۹	۲۶۲۶۷	۲۷۲۹۰	۲۴۰۲۳۱
۸. حمل و نقل/جابجایی	C_{OLH}	-	-	۷۳۰	۱۶۸۴	۲۸۹۵	۳۰۳۹	۳۱۹۲	۳۳۵۱	۳۵۱۹	۳۶۹۵	۳۸۷۹	۱۳۵۸	۴۷۵	۲۷۸۱۷
کل هزینه عملیات و پشتیبانی گزینه B	C_O	-	-	۱۰۲۸۸۸	۲۳۸۳۸۳	۴۰۰۸۲۷	۴۲۰۸۷۰	۴۴۱۹۱۶	۴۶۳۹۸۵	۴۸۷۲۰۶	۵۱۱۵۷۵	۵۳۷۱۴۴	۱۹۰۳۹۴	۷۴۰۷۴	۳۸۶۹۲۶۲

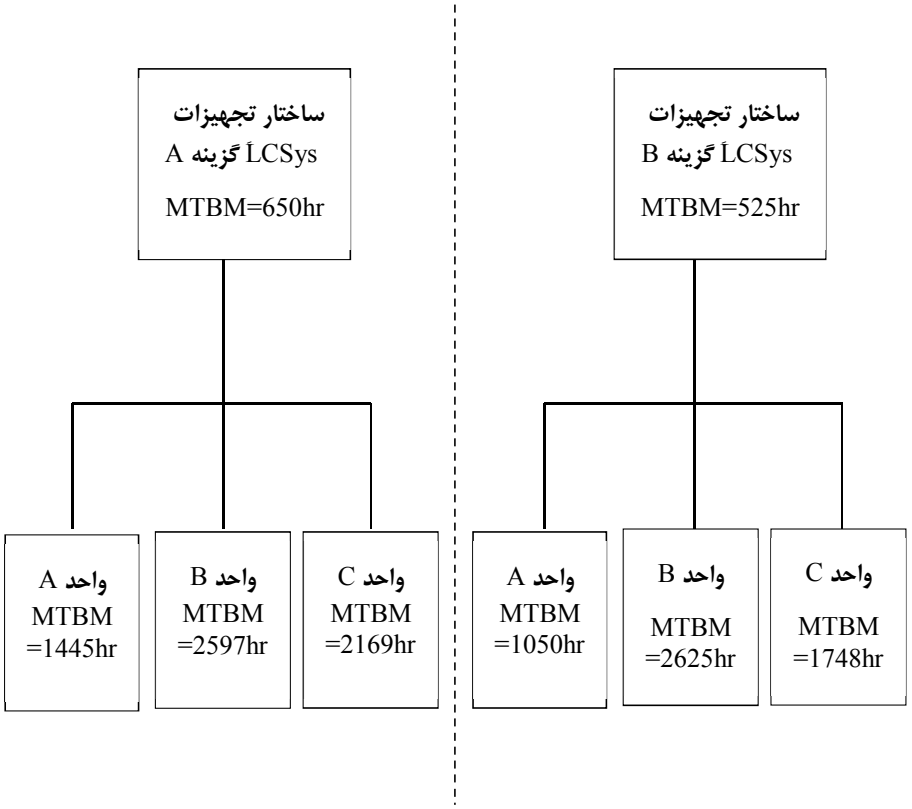
جدول ۱۷- ۵- هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده

فعالیت برنامه		سال برنامه											
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
A.گزینه A														
	کل نفرساعات	–	–	۹,۲۵	۲۲,۲۵	۳۷,۳۵	۳۷,۳۵	۳۷,۳۵	۳۷,۳۵	۳۷,۳۵	۳۷,۳۵	۳۷,۳۵	۱۲,۲۵	۳,۷۵
۱.نگه‌داری و	هزینه کارکنان	–	–	۳۰۶	۷۳۵	۱۲۳۰	۱۲۳۰	۱۲۳۰	۱۲۳۰	۱۲۳۰	۱۲۳۰	۱۲۳۰	۴۰۵	۱۲۳
تعمیرات	هزینه	–	–	۱۱۱۰	۲۶۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۱۴۷۰	۴۵۰
سازمانی	جابجایی مواد													
	هزینه مستندسازی	–	–	۱۱۱۰	۲۶۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۱۴۷۰	۴۵۰
۲. نگه‌داری و	کل نفرساعات	–	–	۱۱۱	۲۶۷	۴۴۷	۴۴۷	۴۴۷	۴۴۷	۴۴۷	۴۴۷	۴۴۷	۱۴۷	۴۵
تعمیرات میانی	هزینه کارکنان	–	–	۴۳۲۹	۱۱	۱۱۲۲۳	۱۷۴۳۳	۱۷۴۳۳	۱۷۴۳۳	۱۷۴۳۳	۱۷۴۳۳	۱۷۴۳۳	۵۷۳۳	۱۷۵۵

	هزینه جابجایی مواد	–	–	۱۱۱۰	۲۶۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۴۴۷۰	۱۴۷۰	۴۵۰
	هزینه مستندسازی	–	–	۲۲۲۰	۵۳۴۰	۸۹۴۰	۸۹۴۰	۸۹۴۰	۸۹۴۰	۸۹۴۰	۸۹۴۰	۸۹۴۰	۲۹۴۰	۹۰۰
۳.نگهداری و تعمیرات تامین کننده	کل نفرساعات	–	–	۱۶	۳۶	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۲۰	۸
	هزینه کارکنان	–	–	۷۲۰	۱۶۲۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰	۹۰۰	۳۶۰
	هزینه جابجایی مواد	–	–	۱۲۰	۲۷۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۱۵۰	۶۰
	هزینه مستندسازی	–	–	۱۲۰	۲۷۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۱۵۰	۶۰
کل هزینه نگهداری و تعمیرات زمانبندی نشده		–	–	۱۱۱۴۵	۲۷۴۶۸	۴۴۶۱۳	۴۴۶۱۳	۴۴۶۱۳	۴۴۶۱۳	۴۴۶۱۳	۴۴۶۱۳	۴۴۶۱۳	۱۴۶۸۸	۴۶۰۸
کل هزینه (اصلاح شده با تورم)		–	–	۱۲۹۰۶	۳۳۴۰۱	۵۶۹۲۶	۵۹۷۸۱	۶۲۷۷۰	۶۵۸۹۳	۶۹۱۹۵	۷۲۶۷۵	۷۶۲۸۸	۲۶۳۸۰	۸۵۹۹

B.گزینه B		–	–										
۱.نگهداری و تعمیرات سازمانی	کل نفرساعات	–	–	۱۱,۲۵	۲۷۲۵	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶	۱۵۲۵	۴,۵
	هزینه کارکنان	–	–	۳۷۲	۹۰۰	۱۵۱۸	۱۵۱۸	۱۵۱۸	۱۵۱۸	۱۵۱۸	۱۵۱۸	۵۰۴	۱۵۰
	هزینه جابجایی مواد	–	–	۱۳۵۰	۳۲۷۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۱۸۳۰	۵۴۰
	هزینه مستندسازی	–	–	۱۳۵۰	۳۲۷۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۱۸۳۰	۵۴۰
۲. نگهداری و تعمیرات میانی	کل نفرساعات	–	–	۱۳۵	۳۲۷	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۵۵۲	۱۸۳	۵۴
	هزینه کارکنان	–	–	۵۲۶۵	۱۲۷۵۳	۲۱۵۲۸	۲۱۵۲۸	۲۱۵۲۸	۲۱۵۲۸	۲۱۵۲۸	۲۱۵۲۸	۷۱۳۷	۲۱۰۶
	هزینه جابجایی مواد	–	–	۱۳۵۰	۳۲۷۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۵۵۲۰	۱۸۳۰	۵۴۰
	هزینه مستندسازی	–	–	۲۷۰۰	۶۵۴۰	۱۱۰۴۰	۱۱۰۴۰	۱۱۰۴۰	۱۱۰۴۰	۱۱۰۴۰	۱۱۰۴۰	۳۶۶۰	۱۰۸۰

۳.نگهداری و تعمیرات تامین کننده	کل نفرساعات	–	–	۲۰	۴۴	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	۲۴	۸
	هزینه کارکنان	–	–	۹۰۰	۱۹۸۰	۳۲۴۰	۳۲۴۰	۳۲۴۰	۳۲۴۰	۳۲۴۰	۳۲۴۰	۳۲۴۰	۳۲۴۰	۱۰۸۰	۳۶۰
	هزینه جابجایی مواد	–	–	۱۵۰	۳۳۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۱۸۰	۶۰
	هزینه مستندسازی	–	–	۱۵۰	۳۳۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۵۴۰	۱۸۰	۶۰
کل هزینه نگهداری و تعمیرات زمانبندی نشده		–	–	۱۳۵۸۷	۳۲۶۴۳	۵۴۹۶۶	۵۴۹۶۶	۵۴۹۶۶	۵۴۹۶۶	۵۴۹۶۶	۵۴۹۶۶	۵۴۹۶۶	۵۴۹۶۶	۱۸۲۳۱	۵۴۳۶
کل هزینه (اصلاح شده با تورم)		–	–	۱۵۷۳۴	۳۹۶۹۴	۷۰۱۳۷	۷۳۶۵۴	۷۷۳۳۷	۸۱۱۸۵	۸۲۲۵۲	۸۹۵۴۰	۹۳۹۹۲	۳۲۷۴۳	۱۰۱۴۴	



نکته: ممکن است استفاده از فاکتورهای فراوانی مناسب‌تر از مقادیر MTBM باشد

شکل ۱۷-۱۸- فاکتورهای نگه‌داری و تعمیرات تجهیزات LCSys.

۵. هزینه *پشتیبانی تامین* (C_{OLS}) عبارتست از هزینه قطعات یدکی موردنیاز هنگامی که بسته خراب می‌شود؛ قطعات یدکی موردنیاز برای پر کردن خطوط تدارکات برای جبران تاخیر در زمان تعمیر، زمان بازگشت، و زمان تحویل تامین‌کننده؛ قطعات یدکی موردنیاز برای تعویض آیتم‌هایی که به دلیلی از دور خارج شده‌اند (به‌طور مثال آن آیتم‌هایی که بیش از حد آسیب دیده‌اند و تعمیر آن‌ها از نظر اقتصادی شدنی به‌صرفه نیست) و هزینه نگه‌داری موجودی طی دوره پشتیبانی.

با مراجعه به مفهوم نگه‌داری و تعمیرات که در شکل ۱۷–۱۷ ترسیم شده است، واحدهای یدکی در کارگاه‌های نگه‌داری و تعمیرات میانی نیاز است تا تعویض واحدها را در سطح سازمانی پشتیبانی کند. مونتاژها، ماژول‌ها، و قطعات معین یدکی، برای پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات میانی موردنیاز است، و برخی مونتاژها و قطعات برای پشتیبانی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده یا مبدا نیاز است. در حقیقت، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات نوع قطعات یدکی موردنیاز در هر سطح نگه‌داری و تعمیرات را مشخص می‌کند، و شبکه سیستم در شکل ۱۷–۱۴ (همراه با مکان‌های جغرافیایی خاص که تعریف شده است) کیفیت تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات را که پشتیبانی کلی سیستم فراهم می‌آورد، ترسیم می‌کند. یک تحلیل پشتیبانی تدارکات انجام می‌شود داده‌های بیش‌تری در مورد نگه‌داری و تعمیرات فراهم کند.

گام بعدی تعیین تعداد قطعات یدکی موردنیاز در هر مکان است. حجم زیادی از قطعات یدکی، یا موجودی زیاد، می‌تواند از نقطه‌نظر سرمایه‌گذاری و موجودی نگه‌داری و تعمیرات کاملا پرهزینه باشد. از طرف دیگر، عدم کفایت قطعات یدکی باعث ایجاد شرایط کمبود موجودی شده که باعث از کار افتادن سیستم می‌شود؛ درنتیجه اهداف تعیین شده شبکه ارتباطات برآورده نمی‌شود. این شرایط می‌تواند پرهزینه نیز باشد. هدف تحلیل نیازمندی‌های موجودی و به‌دست آوردن یک تعادل بین هزینه اکتساب قطعات یدکی و هزینه نگه‌داری موجودی است. فاکتور بحرانی تقاضای

مصرف و احتمال در دسترس داشتن نوع درست قطعات یدکی هنگام نیاز است. برای این تحلیل، نرخ‌های تقاضا تابعی از واحد، مونتاژ، ماژول یا قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود.

موضوع دیگری که مدنظر است زمان بازگشت (TAT[1]) و زمان حمل و نقل بین تسهیلات برای آیتم قابل تعمیر (یعنی کل زمان از نقطه خرابی تا زمانی که آیتم تعمیر شده، به موجودی برگشته و آماده استفاده می‌شود، یا زمانی که برای اکتساب یک آیتم از منبع تامین لازم است). این فاکتورهای زمانی، که در شکل ۱۷–۱۷ شناسایی شده است، اثر قابل‌توجهی بر نیازمندی‌های قطعات یدکی خواهد داشت.

فرایند تعیین هزینه‌های مربوط به پشتیبانی تامین تا حدی وسیع و گسترده است و گام‌های تفصیلی که در این تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد در اینجا بحث نمی‌شود. با این حال، مفاهیم مورد استفاده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حقیقت نیازمندی‌های موجودی در دو دسته پوشش داده می‌شود. تدارک اولیه واحدها و مونتاژهای اولیه که اساس ذخیره موجودی را نمایش می‌دهد تحت هزینه اولیه پشتیبانی تدارکات منعکس می‌شود (یعنی گروه C_{PLS}). قطعات یدکی موردنیاز برای حفظ پشتیبانی که شامل آیتم‌های قابل تعمیر و غیرقابل تعمیر می‌شود، در این دسته پوشش داده می‌شود. این آیتم‌ها به‌طورمستقیم با مصرف و تعداد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده در جدول ۱۷–۶ در ارتباط است. هزینه‌های مربوطه عبارت‌اند از هزینه‌ها مواد و هزینه نگه‌داری موجودی. هزینه نگه‌داری موجودی سالانه برابر با ۲۰٪ ارزش موجودی فرض می‌شود.

۶. هزینه *آموزش کارکنان نگه‌داری و تعمیرات* (C_{OLT}) در دو دسته پوشش داده می‌شود. هنگامی که سیستم در ابتدا معرفی می‌شود، یک نیازمندی برای آموزش کاربرها و تکنسین‌های نگه‌داری و تعمیرات وجود خواهد داشت. هزینه برای این آموزش اولیه در

1.Turnover time

گروه C_{PLP} قرار داده شده است. پس از آن، هزینه آموزش مربوط به کارکنان فعلی و کاربران و تکنسین‌های نگه‌داری و تعمیرات جدید می‌شود. هزینه سالانه ای معادل با ۲۶۰۰ دلار برای حفظ آموزش رسمی تا زمانی که از کارافتادگی سیستم آغاز شود در نظر گرفته شده است.

۷. هزینه *تجهیزات آزمایش و پشتیبانی* (C_{OLE}) در دو دسته ارائه شده است. گروه C_{PLT} شامل طراحی و اکتساب تجهیزات آزمایش و پشتیبانی می‌شود که برای نگه‌داری و تعمیرات میانی و تامین‌کننده موردنیاز است. این گروه عبارتست از حفظ پشتیبانی این آیتم‌ها به‌صورت سالانه (یعنی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده و زمان‌بندی نشده تجهیزات آزمایش). نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده تابعی از بهره‌برداری تجهیز است که مربوط به فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده در جدول ۱۷–۶ می‌شود. به‌علاوه، خصوصیات قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات تجهیزات آزمایش به‌طور قابل‌توجهی بر هزینه پشتیبانی تجهیزات آزمایش اثرگذار است. نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی شده کالیبره کردن دوره‌ای (هر ۱۸۰ روز یکبار) برخی آیتم‌های خاص تجهیز آزمایش در لابراتوار کالیبره کردن را تشکیل می‌دهد (به شکل ۱۷–۴ مراجعه کنید).

جدول ۱۷- ۶- تعداد فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات زمان‌بندی نشده

گزینه	کاربری	تجهیز یا واحد	سال برنامه												
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
گزینه A	هواپیما	سیستم	–	–	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱
		واحدA	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
		واحدB	–	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	–
		واحدC	–	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	–
	بالگرد	سیستم	–	–	۲	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۳
		واحدA	–	–	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱
		واحدB	–	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	–
		واحدC	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	گشتی	سیستم	–	–	۱۴	۴۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	۴
		واحدA	–	–	۶	۲۰	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۹	۲

	واحدB	–	–	۴	۱۱	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۵	۱
	واحدC	–	–	۴	۱۳	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۶	۱
تسهیل ارتباطی	سیستم	–	–	۱۱	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۱۱	–
	واحدA	–	–	۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۵	–
	واحدB	–	–	۲	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۲	–
	واحدC	–	–	۴	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۴	–
تسهیل مرکزی	سیستم	–	–	۷	۱۳	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷	۸	۵
	واحدA	–	–	۳	۶	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۴	۲
	واحدB	–	–	۲	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲	۱
	واحدC	–	–	۲	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۲	۲
ون متحرک	سیستم	–	–	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲
	واحدA	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	واحدB	–	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	–
	واحدC	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

گزینه B	هواپیما	سیستم	–	–	۲	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲
		واحدA	–	–	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱
		واحدB	–	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	–
		واحدC	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	بالگرد	سیستم	–	–	۲	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۳
		واحدA	–	–	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱
		واحدB	–	–	–	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱
		واحدC	–	–	۱۷	۵۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۲۵	۱۲۴	۵
	گشتی	سیستم	–	–	۹	۲۷	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۱۲	۶۲	۲
		واحدA	–	–	۳	۱۱	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۵	۲۵	۱
		واحدB	–	–	۳	۱۶	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۸	۳۷	۲
		واحدC	–	–	۱۴	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۱۴	۲۷	–
	تسهیل ارتباطی	سیستم	–	–	۷	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۷	۱۴	–
		واحدA	–	–	۳	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۳	۵	–

	واحدB	–	–	۴	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۴	–
	واحدC	–	–	۸	۱۶	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۱۰	۶
تسهیل مرکزی	سیستم	–	–	۴	۸	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۵	۳
	واحدA	–	–	۲	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۲	۱
	واحدB	–	–	۲	۵	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۳	۲
	واحدC	–	–	۲	۵	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۳	۲
ون متحرک	سیستم	–	–	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲
	واحدA	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	واحدB	–	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	–
	واحدC	–	–	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

هزینه‌های مربوط به نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی تدارکات برای تجهیز را می‌توان از تحلیل دقیق پشتیبانی تدارکات استخراج کرد (در فصل ۱۵ تشریح شده است). با این حال، اندازه این مقادیر برای تجهیز آزمایش در این مورد نسبت به دیگر سیستم‌ها تا حدی اندک است. بر پایه تجربیات گذشته، فاکتور ۵٪ هزینه اکتساب (۹۷۵۰ دلار) برای هزینه سالانه نگه‌داری و تعمیرات و تدارکات تجهیز آزمایش در گزینه A در نظر گرفته شده است. این مقدار برای گزینه B ۷/۵٪ (۱۴۶۲۵ دلار) در نظر گرفته شده است زیر نیازمندی‌های بهره‌برداری از تجهیز بیش‌تر است.

۸. *هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی* (C_{OLH}) عبارتست از هزینه‌های سالانه مربوط به جابه‌جایی مواد بین سطوح نگه‌داری و تعمیرات سازمانی، میانی و مبدا. این هزینه علاوه بر هزینه‌های توزیع اولیه و نصب سیستم که در گروه C_{ODT} پوشش داده شده است، می‌باشد. با این حال، ارسال مواد بین تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات میانی و نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده یا مبدا قابل توجه بوده و می‌توان آن را از معادله ۱۷–۹ تعیین کرد

$$C_{OLH} = (\text{هزینه بسته‌بندی}) + (\text{هزینه حمل و نقل}) \times (\text{تعداد ارسالات یکطرفه})$$

که در آن هزینه‌های حمل و نقل و بسته‌بندی به ترتیب برابر است با ۹۰ دلار در هر cwt و ۱۲۰ دلار در هر cwt. مواد جابه‌جا شده بین تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات میانی و تامین‌کننده شامل مونتاژ ۵ و واحد C می‌شود (شکل ۱۷–۱۴). تعداد پیش‌بینی شده سفرهای یک‌طرفه در جدول ۱۷–۷ ارائه شده است.

جدول ۱۷–۷– سفرها بین تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات و تامین‌کننده

	گزینه A	گزینه B
سال ۳	۸	۱۰
سال ۴	۱۸	۲۲
سال ۵–۱۱	۳۰ در هر سال	۳۶ در هر سال
سال ۱۲	۱۰	۱۲
سال ۱۳	۴	۴

۱۷–۴–۳– ارزیابی گزینه‌ها

ارزیابی نیازمند انتخاب گزینه ارجح بر پایه معادل کنونی هزینه چرخه‌ی عمر تحت محدودیت‌های موجود است. از آنجا که این مساله در شرایط تصمیم‌گیری چند معیاره است، نمی‌توان گزینه‌های A و B را تنها براساس هزینه چرخه‌ی عمر مقایسه کرد. این هزینه‌ها در جدول ۱۷–۸ خلاصه شده است. هزینه‌ها برای گروه‌های اصلی هزینه در ساختار CBS فهرست شده و حوزه‌های پرهزینه و درصد مشارکت آن‌ها نسبت به کل هزینه ارائه شده است.

هنگام ارزیابی دو یا چند گزینه، تخمین هزینه‌های آتی برای هر گزینه باید تبدیل به مقادیر معادل کنونی شود. هزینه‌های معادل کنونی برای گزینه‌های A و B در جدول ۱۷–۹ نشان داده شده است و پروفایل‌های هزینه در شکل ۱۷–۱۹ و بر پایه نرخ بهره ۱۰٪ ترسیم شده است. معادل کنونی هزینه برای گزینه A به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$PE = 507734\overset{P/F,10,1}{(0.9091)} + 794604\overset{P/F,10,2}{(0.8265)} + \cdots + 59670\overset{P/F,10,13}{(0.2897)} = 5255036$$

این مقدار برای گزینه B به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$PE = 434294\overset{P/F,10,1}{(0.9091)} + 707409\overset{P/F,10,2}{(0.8265)} + \cdots + 74074\overset{P/F,10,13}{(0.2897)} = 5329999$$

بهترین روش نمایش گزینه‌های تصمیم‌گیری و داده‌های مربوط به آن استفاده از نمایش ارزیابی تصمیم در قالب آنچه که در قسمت ۷–۵ تشریح شد، می‌باشد. چالش در اینجا تعیین آن است که آیا گزینه‌ها نیازمندی‌های مشخص شده را برآورده می‌کند یا نه (یعنی عملکرد ۰/۸، محدودیت بودجه ۵ میلیون دلار، MTBM ۵۰۰ ساعت و غیره). نمایش ارزیابی تصمیم از هزینه و دیگر معیارها توسعه داده شده و در شکل ۱۷–۲۰ نشان داده شده است. در این مثال، هر دو گزینه همه معیارها را برآورده می‌کنند. در نتیجه، گزینه A که دارای هزینه چرخه‌ی عمر کم‌تری است انتخاب می‌شود مگر آنکه از طریق دیگری گزینه B توجیه شود. ممکن است گزینه B که هزینه چرخه‌ی عمر بیش‌تری دارد انتخاب شود تا از امتیاز عملکردی بهتر آن یعنی ۰/۹۲ در مقابل ۰/۸۴ در گزینه A بهره برد. تنها مشتری (مدیریت کلان‌شهر) می‌تواند چنین تصمیمی بگیرید.

جدول ۱۷–۸– شکست هزینه چرخه‌ی عمر

گروه هزینه	گزینه A		گزینه B	
	هزینه	درصد	هزینه	درصد
۱.هزینه تحقیق و توسعه				
(C_R)				
مدیریت سیستم/محصول (C_{RM})	۵۷۳۳۹۲	۱۱,۰	۵۵۰۲۹۶	۱۰,۴
(C_{RE})برنامه‌ریزی تولید	۹۲۷۴۸	۱,۸	۴۱۵۴۹	۰,۸
(C_{RE})طراحی مهندسی	۵۳۲۹۵۹	۱۰,۱	۳۷۸۴۴۶	۷,۱
(C_{RD})داده‌های طراحی	۱۰۶۸۴۱	۲,۰	۹۲۱۴۰	۱,۷
آزمایش و ارزیابی سیستم	۱۳۲۶۱۴	۲,۵	۱۱۸۶۶۲	۲,۲

گروه هزینه	Aگزینه		Bگزینه	
	هزینه	درصد	هزینه	درصد
(C_{RT})				
مجموع گروه	۱۴۳۸۵۵۵	۲۷,۴	۱۱۸۱۰۹۴	۲۲,۲
۲.هزینه تولید و ساخت				
(CP)				
مدیریت سیستم/محصول (C_{RM})	۱۹۵۹۵۴	۳,۷	۱۹۵۹۵۴	۳,۷
مهندسی سیستم‌ها و تحلیل عملیات(C_{PI})	۱۳۶۸۴۷	۲,۶	۱۶۰۹۰۷	۳,۰
تولید – تکرار شونده(C_{PMR})	۱۱۸۰۲۲۶	۲۲,۵	۱۲۱۵۰۹۵	۲۲,۸
تولید – غیرتکرار شونده (C_{PMN})	۱۲۱۵۷۰	۲,۳	۱۳۶۹۸۴	۲,۶
کنترل کیفیت(C_{PQ})	۱۵۳۵۲۷	۲,۹	۱۳۴۵۵۸	۲,۵
پشتیبانی اولیه تدارکات(C_{PLS})				
پشتیبانی تامین – اولیه(C_{PLS})	۱۱۸۵۳۵	۲,۳	۱۴۲۰۳۰	۲,۷
تجهیزات آزمایش و پشتیبانی (C_{PLT})	۱۸۳۳۲۸	۳,۵	۱۸۳۳۲۸	۳,۴
تجهیزات آزمایش و پشتیبانی (C_{PLD})	۱۳۹۴۷	۰,۳	۱۴۶۳۱	۰,۳
آموزش کارکنان(C_{PLP})	۱۲۱۳۷۵	۲,۳	۱۲۱۳۷۵	۲,۳
مجموع گروه	۲۲۲۵۳۱۰	۴۲,۳	۲۳۰۴۸۶۲	۴۳,۲

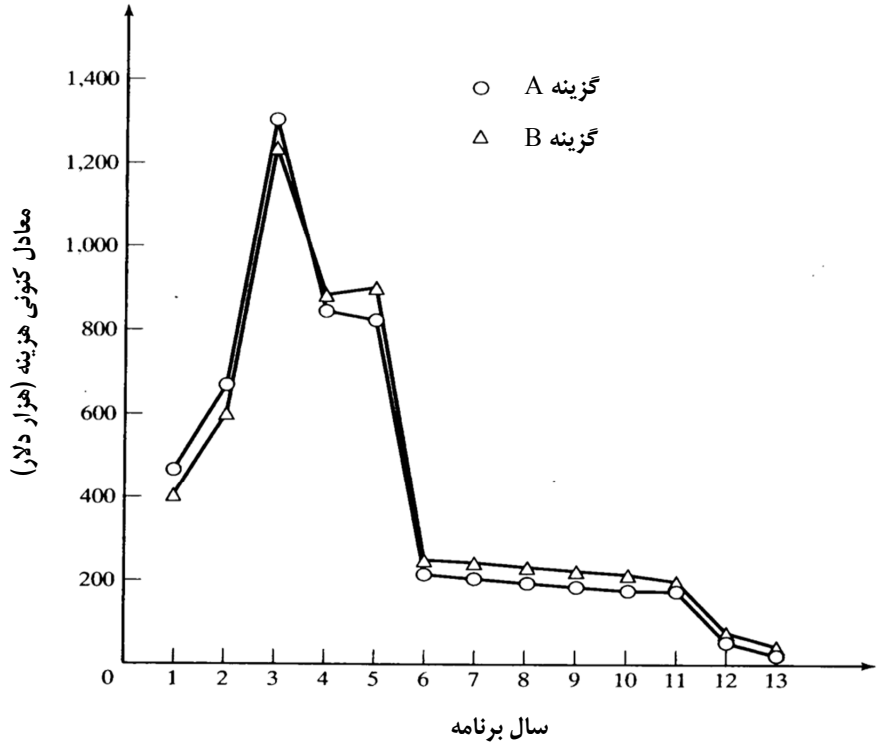
گروه هزینه	Aگزینه		Bگزینه	
	هزینه	درصد	هزینه	درصد
۳.هزینه عملیات و پشتیبانی				
کارکنان عملیات (C_{OOP})	۵۲۰۹۲	۱,۰	۵۲۰۹۲	۱,۰
توزیع – حمل و نقل (C_{ODT})	۵۴۹۱۷۰	۱۰,۵	۵۴۹۱۷۰	۱۰,۳
بندی نگه‌داری و تعمیرات زمان نشده (C_{OLA})	۲۵۸۹۲۴	۴,۹	۳۱۹۱۳۴	۶,۰
تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات (C_{OLM})	۹۷۲۹	۰,۲	۱۱۹۹۴	۰,۲
پشتیبانی تامین (C_{OLS})	۶۱۶۵۳۲	۱۱,۷	۷۶۷۴۹۲	۱۴,۴
آموزش کارکنان نگه‌داری و تعمیرات (C_{OLT})	۱۸۸۹۸	۰,۴	۱۸۸۹۸	۰,۴
تجهیزات آزمایش و پشتیبانی (C_{PLE})	۷۴۶۷۴	۱,۴	۱۱۲۰۰۲	۲,۱
حمل و نقل و جابه‌جایی (C_{OLH})	۱۱۱۵۰	۰,۲	۱۳۲۶۰	۰,۲
مجموع گروه	۱۵۹۱۱۷۰	۳۰,۳	۱۸۴۴۰۴۲	۳۴,۶
مجموع کل	۵۲۵۵۰۳۶	۱۰۰,۰	۵۳۲۹۹۹۹	۱۰۰,۰

جدول ۱۷- ۹- تخصیص هزینه به سال‌های مختلف برنامه

فعالیت برنامه	گروه هزینه	هزینه در سال برنامه													کل هزینه
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	
A.گزینه A															
۱. تحقیق و	C_R	۵۰۷۳	۵۲۹	۷۱۸۰											۱۷۵۵۱۹۵
توسعه		۷۴	۷۳۳	۸۸											
۲.تولید و ساخت	C_P		۲۶۴	۹۳۵۴	۱۰۲۳	۹۷۳۳									۳۱۹۷۳۹۲
			۸۷۱	۴۱	۷۶۹	۱۱									
۳.عملیات و	C_O			۷۹۲۰	۲۰۷۰	۳۴۸۲	۳۶۵۶	۳۸۳۹	۴۰۳۱	۴۲۳۲	۴۴۴۴	۴۸۳۳	۱۵۹۲	۵۹۶۷	۳۳۴۰۶۸۲
پشتیبانی				۳	۹۸	۴۸	۶۰	۴۵	۲۲	۹۷	۶۶	۵۵	۸۸	۰	
کل هزینه	C	۵۰۷	۷۹۴	۱۷۳۲	۱۲۳۰	۱۳۲۱	۳۶۵۶	۳۸۳۹	۴۰۳۱	۴۲۳۲	۴۴۴۴	۴۸۳۳	۱۵۹۲	۵۹۶۷	۸۲۹۳۲۶۹
واقعی		۳۷۴	۶۰۴	۷۳۲	۸۶۷	۵۵۹	۶۰	۴۵	۲۲	۹۷	۶۶	۵۵	۸۸	۰	
کل هزینه	C(10%)	۴۶۱۲	۶۵۶	۱۳۰۱	۸۴۰۶	۸۲۰۵	۲۰۶۴	۱۹۷۰	۱۸۸۰	۱۷۹۵	۱۷۱۳	۱۶۳۵	۵۰۷۴	۱۷۲۸	۵۲۵۵۰۳۶
کنونی		۵۴	۷۴۰	۸۰۲	۸۲	۵۶	۱۵	۴۱	۵۶	۲۰	۸۶	۷۳	۹	۶	

PC تجمعی		۴۶۱۲ ۵۴	۱۱۱ ۷۹۹ ۴	۲۴۱۹ ۷۹۶	۳۲۶۰ ۴۷۸	۴۰۸۱ ۴۴۹	۴۲۸۷ ۴۴۹	۴۴۸۴ ۴۹۰	۴۶۷۲ ۵۴۶	۴۸۵۲ ۰۶۶	۵۰۲۳ ۴۵۲	۵۱۸۷ ۰۲۵	۵۲۳۷ ۷۷۴	۵۲۵۵ ۰۳۶	۵۲۵۵۰۳۶
B.گزینه B															
۱. تحقیق و توسعه	C_R	۴۳۴۲ ۹۴	۴۰۸ ۰۱۹	۵۹۷۷ ۱۹											۱۴۴۰۰۳۲
۲.تولید و ساخت	C_P		۲۹۹ ۳۹۰	۹۳۵۳ ۶۹	۱۰۳۸ ۴۲۶	۱۰۳۹ ۴۵۱									۳۳۱۲۶۳۶
۳.عملیات و پشتیبانی	C_O			۱۰۲۸ ۸۸	۲۳۸۳ ۸۳	۴۰۰۸ ۲۷	۴۲۰۸ ۷۰	۴۴۱۹ ۱۶	۴۶۳۹ ۸۵	۴۸۷۲ ۰۶	۵۱۱۵ ۷۵	۵۳۷۱ ۴۴	۱۹۰۳ ۹۴	۷۴۰۷ ۴	۳۸۶۹۲۶۲
کل هزینه واقعی	C	۴۳۴۲ ۹۴	۷۰۷ ۴۰۹	۱۶۳۵ ۹۷۶	۱۲۷۶ ۸۰۹	۱۴۴۰ ۲۷۸	۴۲۰۸ ۷۰	۴۴۱۹ ۱۶	۴۶۳۹ ۸۵	۴۸۷۲ ۰۶	۵۱۱۵ ۷۵	۵۳۷۱ ۴۴	۱۹۰۳ ۹۴	۷۴۰۷ ۴	۸۶۲۱۹۳۰
کل هزینه کنونی	C(10%)	۳۹۴۸ ۱۷	۵۸۴ ۶۷۴	۱۲۲۹ ۱۰۹	۸۷۲۰ ۶۱	۸۹۴۲ ۶۹	۲۳۷۵ ۸۱	۲۲۶۷ ۹۱	۲۱۶۴ ۴۹	۲۰۶۶ ۲۴	۱۹۷۲ ۶۳	۱۸۸۲ ۶۹	۶۰۶۶ ۰	۲۱۴۵ ۹	۵۳۲۹۹۹۹
PC تجمعی		۳۹۴۸ ۱۷	۹۷۹ ۴۹۱	۲۲۰۸ ۶۰۰	۳۰۸۰ ۶۶۱	۳۹۷۴ ۹۳۰	۴۲۱۲ ۵۱۱	۴۴۳۹ ۳۰۲	۴۶۵۵ ۷۵۱	۴۸۶۲ ۳۷۵	۵۰۵۹ ۶۳۸	۵۲۴۷ ۹۰۷	۵۳۰۸ ۵۶۷	۵۳۲۹ ۹۹۹	۵۳۲۹۹۹۹

نتایج این تحلیل از ارجح بودن ساختار گزینه A بر پایه هزینه چرخه‌ی عمر حمایت می‌کند زیرا همه معیارهای دیگر برآورده شده است. مشاهده می‌شود که هزینه تحقیق و توسعه (R&D) تا حدی در گزینه A بیش‌تر است، هر چند کل هزینه چرخه‌ی عمر گزینه A کم‌تر است. این موضوع به علت آن است که هزینه عملیات و پشتیبانی (O&S) به مقدار قابل‌توجهی در گزینه A کم‌تر است. این بدان معناست که طراحی قابلیت اطمینان در گزینه A تا حدی بهتر است. اگرچه این افزایش در قابلیت اطمینان منجر به افزایش هزینه‌های R&D شده است، اما تعدا فعالیت‌های پیش‌بینی شده نگه‌داری و تعمیرات را کاهش داده و منجر به کاهش هزینه O&S شده است. این تفکر باید به مشتری منتقل گردد.



شکل ۱۷-۱۹- پروفایل هزینه چرخه‌ی عمر برای گزینه‌های طراحی LCSys.

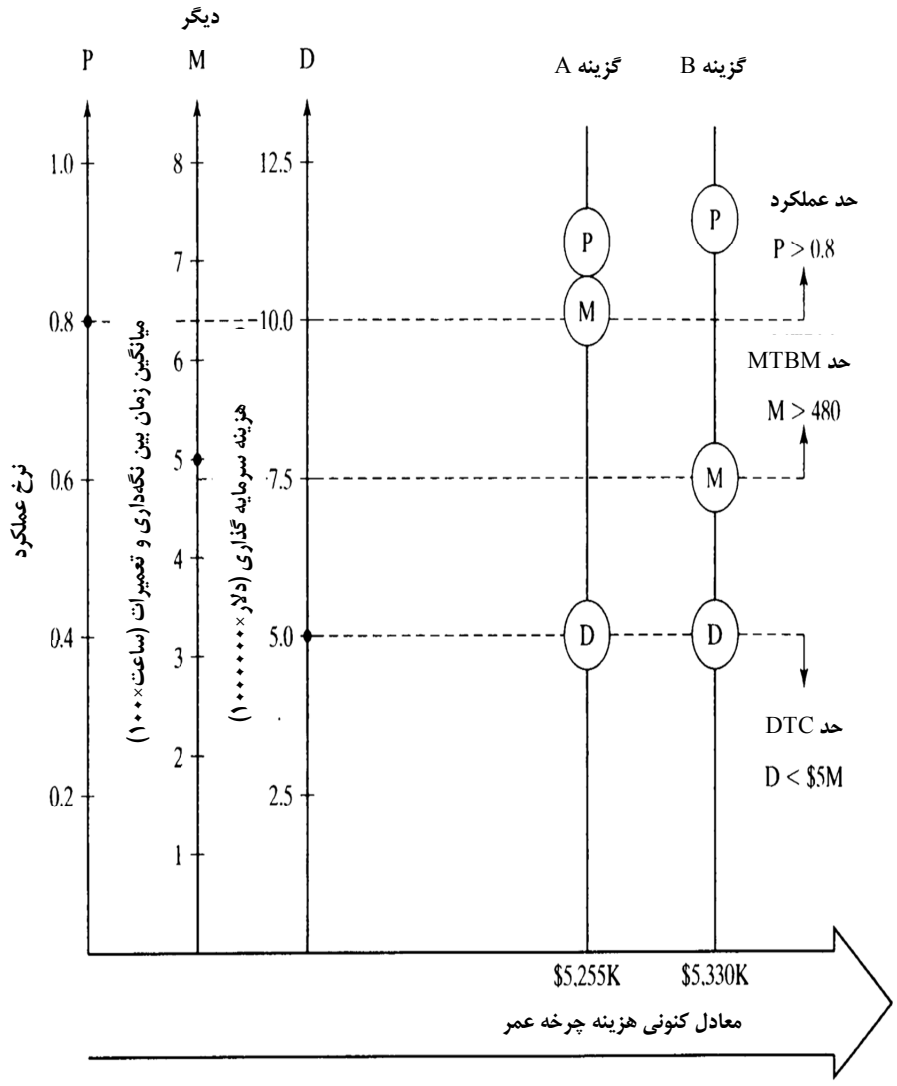
۱۷-۴-۴- نقطه سر به سر و تحلیل حساسیت

پیش از تصمیم‌گیری نهایی برای انتخاب گزینه، تحلیل‌گر باید تحلیل نقطه سر به سر را انجام دهد تا مشخص شود چه زمانی گزینه A اقتصادی‌تر از گزینه B می‌شود. شکل ۱۷-۲۱ نشان می‌دهد که نقطه سر به سر، یا نقطه‌ای که گزینه A از نظر هزینه بهتر می‌شود، تقریبا ۴ سال و ۳ ماه پس از شروع برنامه است. این نقطه به حد کافی به شروع چرخه‌ی عمر نزدیک است تا بتواند تصمیم‌گیری را پشتیبانی کند. اگر نقطه تقاطع دیرتر اتفاق می‌افتاد، تصمیم به انتخاب گزینه A زیر سوال می‌رفت.

مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن نتایج تحلیل که دلتای معادل کنونی هزینه دو گزینه ۷۴۹۶۳ دلار است (به جدول ۱۷-۹ مراجعه کنید)، و پروفایل‌های هزینه نسبتا به هم نزدیک هستند (به شکل ۱۷-۱۹ مراجعه کنید). این فاکتورها به‌صورت واضح از تصمیم برای انتخاب گزینه A بدون وجود ریسک پشتیبانی نمی‌کند. از نقطه‌نظر بی‌دقتی ممکن مربوط به داده‌های ورودی، تحلیل‌گر می‌تواند یک تحلیل حساسیت انجام دهد تا آثار تغییر در ورودی‌ها بر معادل کنونی هزینه چرخه‌ی عمر را تعیین کند. تحلیل‌گر باید مشخص کند که تا چه حد تغییرات قابل تحمل است پیش از آنکه گزینه B تبدیل به گزینه ارجح شود.

با مراجعه به جدول ۱۷-۸، تحلیل‌گر باید حوزه‌های پر هزینه را انتخاب کند (آن‌هایی که مشارکتی بیش‌تر از ۱۰٪ هزینه کل دارند)، روابط علت و اثر را تعیین کند، و فاکتورهای داده ورودی مختلف را که به‌طورمستقیم بر هزینه اثر دارند، شناسایی کند. در مواردی که چنین فاکتورهایی بر پایه تکنیک‌های سوال برانگیز قرار دارد، تحلیل‌گر باید این فاکتورها را در بازه مقادیر محتمل تغییر دهد و نتایج را ارزیابی کند. برای نمونه، پارامتر کلیدی در این تحلیل زمان عملیات سیستم و فاکتور MTBM است. با استفاده از مدل هزینه چرخه‌ی عمر، تحلیل‌گر مقادیر

مختلف ممکن برای زمان عملیات و MTBM را اعمال کرده و دلتای هزینه در هر تغییر مقدار را تعیین می‌کند. با این کار منحنی‌هایی به‌دست می‌آید که روند تغییرات را نشان می‌دهد.



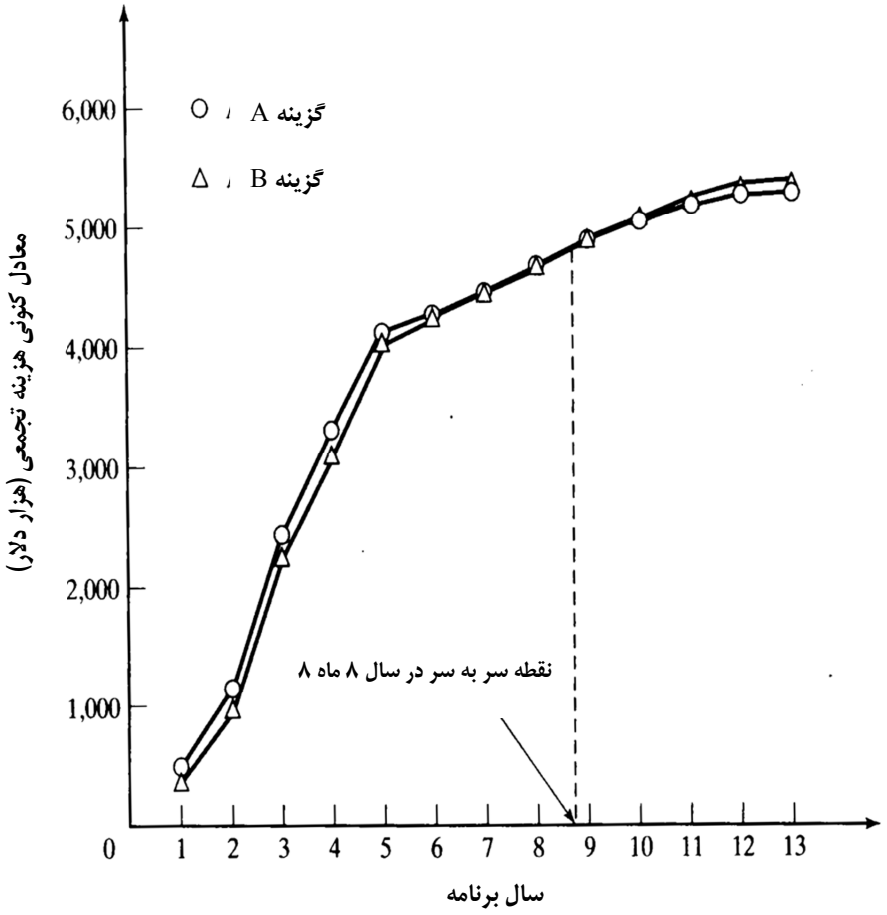
شکل ۱۷- ۲۰- نمایش ارزیابی تصمیم برای LCSys.

تغییر اندکی در زمان عملیات و/یا MTBM می‌تواند باعث تغییر تصمیم از گزینه A به گزینه B شود. این بدان معنی است که درجه بالایی از ریسک همراه یک تصمیم اشتباه خواهد بود. بنابراین تحلیل‌گر باید تلاش زیادی در کاهش ریسک داشته باشد. این کار از طریق بهبود داده‌های ورودی تا سر حد ممکن انجام می‌گیرد. هم‌چنین، نتایج نسبتا به هم نزدیک هستند و اندازه ریسک مربوط به تصمیم‌گیری باید تعیین شود.

حوزه دیگری که در تصمیم‌گیری مورد توجه است تغییر پارامترهای مستقل از طراحی مانند نرخ بهره، نرخ تورم، و غیره است. برای مثال، هر تغییری در نرخ بهره هر دوساختار مورد مطالعه را تغییر می‌دهد، اما بزرگی اثر آن بر هر ساختار متفاوت است و به طبیعت جریان‌های پولی بستگی دارد. شکل ۱۷–۲۲ تغییرات هزینه چرخه‌ی عمر برای گزینه A و B را نشان می‌دهد. در نرخ بهره ٪۱۶٫۹ LCC برای دو گزینه برابر خواهد شد.

فرایند هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر که در قسمت ۱۷–۳ مطرح شد با استفاده از بهینه‌سازی اقتصادی یک مثال نوعی را به‌عنوان الگوی ارزیابی هدایت می‌کند. این مثال مربوط به یک جمعیت محدود از تجهیزات قابل تعمیر است که برای برآورده کردن یک تقاضا به‌کار می‌رود (REPS). در دسته‌بندی سیستم و محصول در قسمت ۲–۱–۲، REPS یک سیستم جمعیت چند واحدی محسوب می‌شود.

۱۲ گام نمایش داده شده در شکل ۱۷–۵ به‌طور کامل این مثال را پوشش نمی‌دهد. اساس تئوری ارزیابی بر پایه معادلات ۷–۲ و ۷–۳ قرار دارد که برای الگوی جریان پول که در شکل ۷–۱ نشان داده شده است قابل اعمال بوده و مدل‌های موردنیاز برای این کار در فصل ۸ (ارزیابی اقتصادی)، فصل ۹ (بهینه‌سازی طراحی)، و فصل ۱۰ (جمعیت صف محدود) قابل بازیابی است.



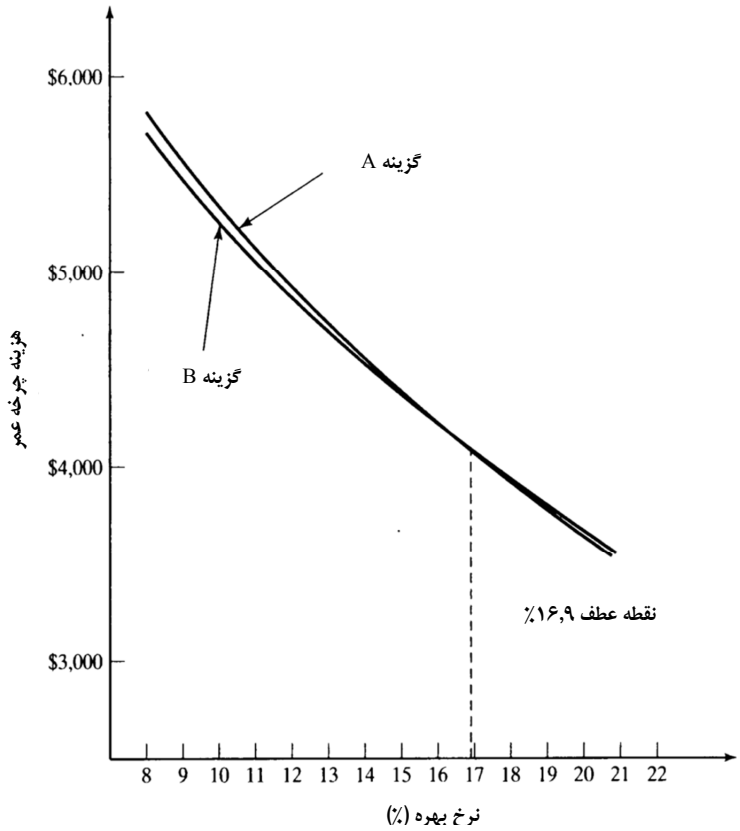
شکل ۱۷- ۲۱- تحلیل نقطه سر به سر برای گزینه‌های طراحی LCSys.

۱۷-۵- هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر توسط بهینه‌سازی اقتصادی

۱۷-۵-۱- معرفی مثال

فرض کنید که یک جمعیت محدود از تجهیزات قابل تعمیر باید تدارک دیده شده و در حالت عملیاتی حفظ شود تا تقاضا یا نیاز برآورده شود. هنگامی که واحدهای قابل تعمیر خراب شده یا از سرویس خارج می‌شود، تعمیر می‌شوند و به سرویس باز می‌گردند. با افزایش عمر آن‌ها، واحدهای

قدیمی از سیستم خارج شده و با واحدهای جدید تعویض می‌شود. مساله طراحی سیستم عبارتست از تعیین اندازه جمعیت، عمر تعویض واحدها، تعداد کانال‌های تعمیر، میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBM)، و میانگین زمان تا تعمیر (MTTR) به‌صورتی که نیازمندی‌های‌های طراحی با کم‌ترین هزینه چرخه‌ی عمر برآورده شود.



شکل ۱۷- ۲۲- تحلیل حساسیت LCSys نسبت به تغییرات نرخ بهره.

هردوی خطوط هوایی تجاری و نظامی هواپیما را با خصوصیات جمعیت محدود اکتساب کرده، استفاده کرده، و نگه‌داری می‌کنند. در حمل و نقل زمینی، وسایل نقلیه مانند تاکسی، اتومبیل‌های کرایه، و کامیون‌ها جمعیت تجهیزات قابل تعمیر را تشکیل می‌دهند. انواع تجهیزات تولید مانند

ابزارهای ماشینی، دستگاه‌های نساجی و مخازن جوش به‌عنوان جمعیت تجهیزات تولیدی شناخته می‌شوند.

دو نسخه از مساله در این مثال بررسی می‌شود. مساله اول اندازه جمعیت، عمر تعویض واحدها، و تعداد کانال‌های تعمیر را تعیین می‌کند به‌طوریکه هزینه‌های چرخه‌ی عمر سیستم حداقل شود. این یک مساله بهینه‌سازی عملیات است و آن را مساله REPS-I می‌نامیم. مساله دوم مربوط به ارزیابی طراحی‌های کاندید برای سیستم با استفاده از میانگین زمان بین خرابی‌ها و میانگین زمان تا تعمیر (که تابعی از واحد هزینه است) و هم‌چنین اندازه جمعیت، عمر تعویض واحدها، و تعداد کانال‌های تعمیر مربوط می‌شود. این مساله یک مساله طراحی است و مساله REPS-II نامیده می‌شود.

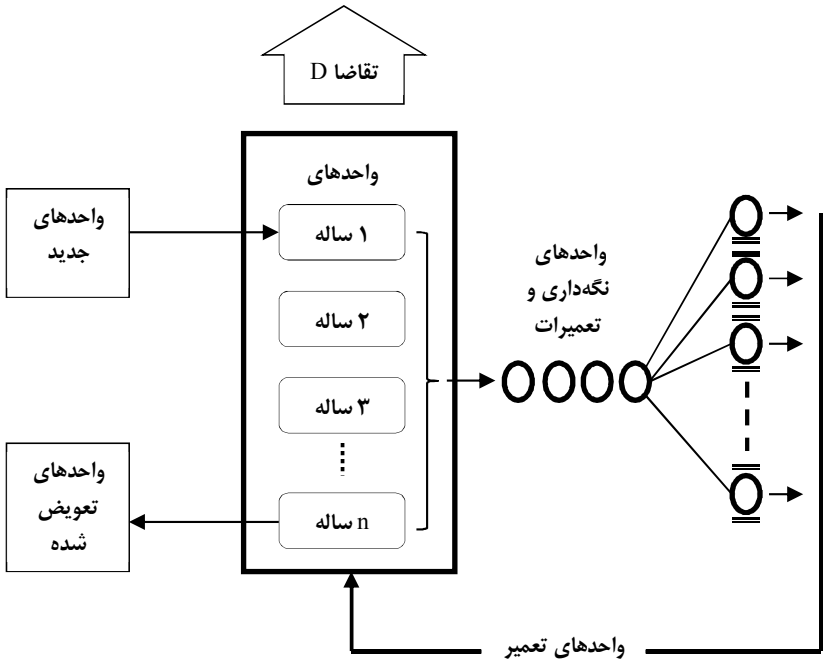
۱۷-۵-۲- سیستم عملیاتی

سیستم جمعیت قابل تعمیر تجهیزات که در شکل ۱۷-۲۳ نشان داده شده است برای برآورده کردن نیازی برابر با D طراحی شده است. واحدهای داخل سیستم را می‌توان به دو گروه دسته‌بندی کرد: آن‌هایی که عملیاتی بوده و برای برآورده کردن تقاضا در دسترس هستند و آن‌هایی که خارج از عملیات بوده و برای برآورده کردن تقاضا در دسترس نیستند. فرض شده است که واحدها هنگام خرابی دورانداخته نمی‌شوند، بلکه تعمیر شده و به خدمت‌دهی خود باز می‌گردند.

واحدها با افزایش عمر، کم‌تر قابل اتکا بوده و هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات آن‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه، تعیین عمر تعویض بهینه مساله مهمی است. فرض شده است که تعداد واحدهای جدید تهیه شده در هر سال ثابت بوده و تعداد واحدها در هر گروه سنی برابر است با نسبت کل تعداد موردنیاز در جمعیت به تعداد مطلوب در گروه‌های سنی. اگرچه تحلیل‌گر با

چرخه‌ی عمر واحدها سر و کار دارد، هدف بهینه کردن کل سیستمی است که واحدها بخشی از آن هستند.

در مساله RESP-I، فرایند تصمیم‌گیری شامل مشخص کردن تعداد واحدها، تعداد کانال‌های نگه‌داری و تعمیرات، و زمابندی تعویض برای اضافه کردن واحدهای جدید بجای واحدهای قدیمی در سیستم است. در مساله RESP-II، فرایند تصمیم‌گیری تعمیم داده می‌شود تا خصوصیات قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات را شامل شود. در هر دو مورد، سیستم باید طوری طراحی شود که تقاضای تجهیزات به صورت بهینه برآورده شود.



شکل ۱۷-۲۳- سیستم جمعیت تجهیزات قابل تعمیر (REPS).

هدف و فرضیات. سیستم‌های جمعیت تجهیزات قابل تعمیر معمولا طی فاز ناپایدار ساخت به‌وجود می‌آیند. این سیستم سپس در یک بازه‌ی چند ساله در حالت پایدار عملیات خود را انجام داده و سپس وارد دوره‌ی از کاراندازی می‌شود. در این‌جا تنها فاز حالت پایدار عملیات در نظر گرفته شده است.

فرضیات زیر در توسعه مدل و الگوریتم ریاضی REPS در نظر گرفته شده است:

۱. زمان‌های بین ورود که دارای توزیع نمایی هستند.
۲. زمان‌های تعمیر که دارای توزیع نمایی هستند.
۳. تعداد واحدها در جمعیت کوچک است تا فرمول‌های صف مربوط به جمعیت محدود مورد استفاده قرار گیرد.
۴. زمان‌های بین ورود از نظر آماری مستقل از زمان‌های تعمیر هستند.
۵. کانال‌های تعمیر موازی بوده و هر کدام عملکرد مشابهی با دیگری دارد.
۶. اندازه جمعیت همیشه بزرگ‌تر یا مساوی تعداد کانال‌های خدمت‌دهی است.
۷. هر کانال در یک نقطه زمانی تنها به یک واحد خدمت‌دهی می‌کند.
۸. مقادیر MTBF و MTTR برای هر گروه سنی متفاوت است مقدار انتظاری این متغیرها برای هر گروه سنی نمایش داده شده است.
۹. واحدهایی که تعمیر شده‌اند به حالت عملیاتی برگشته و خصوصیات عملیاتی مشابهی با دیگر اعضای گروه سنی خواهند داشت.

ارزیابی طراحی سیستم. ارزیابی RESP-I بر پایه تابع ارزیابی تصمیم در معادله ۷–۲ انجام می‌شود. هدف در این‌جا یافتن مقادیر بهینه برای متغیرهای قابل کنترل طراحی در مقابل پارامترهای غیرقابل کنترل سیستم است. در RESP-II، تابع ارزیابی تصمیم در معادله ۷–۳ استفاده می‌شود تا بهترین کاندید سیستم جستجو شود. این کار از طریق استقرار مقادیر پارامترهای وابسته

به طراحی در مقابل پارامترهای مستقل از طراحی و مقادیر بهینه برای متغیرهای طراحی صورت می‌گیرد.

سه متغیر طراحی در سیستم جمعیت تجهیزات قابل تعمیر شناسایی شده است. این متغیرهای قابل کنترل تعداد واحدهای استقرار یافته، عمر تعویض واحدها، و تعداد کانال‌های تعمیر است. مقادیر بهینه برای این متغیرها به‌صورتی جستجو شده است که همه هزینه‌های مربوط به سیستم جمعیت تجهیزات قابل تعمیر حداقل شود.

در مساله طراحی I، تمرکز کاملا بر بهینه‌سازی متغیرهای طراحی به‌عنوان تنها فاکتورهای قابل کنترل است. این وضعیت هنگامی به‌وجود می‌آید که سیستم وجود داشته باشد و هدف بهینه کردن عملیات آن در مقابل پارامترهای غیرقابل کنترل سیستم باشد. در مساله طراحی II تمرکز به جستجوی بهترین طراحی سیستم عوض می‌شود. در این فعالیت، مقادیر بهینه برای متغیرهای طراحی موضوع فرعی است. این مقادیر برای مقایسه طراحی‌های کاندید سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس، هنگامی که بهترین طراحی سیستم شناسایی شد، این مقادیر پیاده‌سازی می‌شود تا اطمینان حاصل شود عملیات سیستم هنگام بهره‌برداری در حالت بهینه است.

تقاضا محرک اصلی سیستم جمعیت تجهیزات قابل تعمیر و توجیه وجود سیستم است. این پارامتر غیرقابل کنترل سیستم با گذشت زمان ثابت باقی می‌ماند. دیگر پارامترهای غیرقابل کنترل سیستم طبیعتی اقتصادی دارند. این پارامترها عبارت‌اند از هزینه‌ی جریمه کمبود (هنگامی که واحدهای کافی برای برآورده کردن تقاضا عملیاتی نباشند)، هزینه ایجاد قابلیت تعمیر، و ارزش زمانی پول برای پول سرمایه گذاری شده.

برخی از پارامترهای سیستم در مساله REPS-I غیرقابل کنترل بوده در حالی که در مساله RESP-II قابل کنترل هستند. این پارامترها عبارت‌اند از MTBF، MTTR، بازدهی انرژی

تجهیزات، عمر واحدها، و هزینه اولیه و ارزش اسقاطی این واحدها. از طریق این پارامترهای وابسته به طراحی سیستم است که سیستم بهینه شناسایی می‌شود.

۱۷-۵-۳ فرمول‌بندی تابع ارزیابی

می‌توان با استفاده از تابع ارزیابی معادله ۷-۲ یک مدل ریاضی برای ارزیابی طراحی سیستم فرمول‌بندی کرد. مدل از معادل کنونی هزینه چرخه‌ی عمر به‌عنوان شاخص ارزیابی استفاده می‌کند:

$$AELCC = PC + OC + RC + SC \qquad (۱۰-۱۷)$$

که در آن

AELCC = معادل سالانه هزینه چرخه‌ی عمر

PC = معادل سالانه هزینه جمعیت

OC = هزینه سالانه عملیات

RC = هزینه سالانه تسهیلات تعمیر

SC = هزینه سالانه جریمه کمبود

معادل سالانه هزینه جمعیت. معادل سالانه هزینه جمعیت N واحدی از تجهیزات که استقرار یافته است برابر است با

$$PC = C_i N$$

که در آن

$$C_i = P\left(\right)^{A/P,i,n} - B\left(\right)^{A/F,i,n} \qquad (۱۱-۱۷)$$

به‌صورت جایگزین، می‌توان از $(P-B)\left(\ \right)^{A/P,i,n}+Bi$ استفاده کرد.

ارزش دفتری، B، در معادله ۱۷–۱۱ برای نمایش ارزش اصلی یک واحد منهای استهلاک انباشته در یک نقطه از زمان مورد استفاده قرار گرفته است. استهلاک یک واحد طی عمر آن توسط روش خط مستقیم مقدار ارزش دفتری زیر را حاصل می‌کند

$$B = P - n\frac{P-F}{L} \qquad (۱۲–۱۷)$$

به‌طوری‌که

C_i = معادل سالانه هزینه یک واحد

P = هزینه اولیه یا اکتساب یک واحد

F = ارزش اسقاطی پیش‌بینی شده یک واحد

B = ارزش دفتری یک واحد در انتهای سال n

L = عمر تخمینی طراحی یک واحد

N = تعداد واحدها در جمعیت

n = عمر ازکارافتادگی واحدها n>1

i = نرخ بهره سالانه

هزینه سالانه عملیات. هزینه سالانه عملیات یک جمعیت N واحدی از تجهیزات استقرار یافته برابر است با

$$OC = \left(EC + LC + PMC + \text{other}\right)N \qquad (۱۳–۱۷)$$

که در آن

EC = هزینه سالانه انرژی مصرف شده

LC = هزینه سالانه نیروی کار عملیاتی

PMC = هزینه سالانه نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه

دیگر هزینه‌های سالانه عملیات ممکن است ایجاد شود. این هزینه‌ها عبارت‌اند از همه هزینه‌های سالانه تکرارشونده برای حفظ خدمت‌دهی جمعیت تجهیزات مانند هزینه انبار، هزینه بیمه، و مالیات.

هزینه سالانه تعمیر تسهیل. هزینه سالانه فراهم کردن تسهیل تعمیر برای تعمیر تجهیزات خراب شده برابر است با

$$RC = C_r M \qquad (۱۴-۱۷)$$

که در آن

C_r = هزینه ثابت و متغیر سالانه برای تعمیر در یک کانال تعمیر

M = تعداد کانال‌های تعمیر

اگر تعدادی از اجزای کانال تعمیر عمر تخمینی متفاوتی داشته باشند، آنگاه C_r مجموع هزینه سالانه آن‌ها خواهد بود. برخی آیتم‌های هزینه تسهیل تعمیر که می‌تواند در هزینه ساخت، پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات، تجهیزات آزمایش و غیره قرار گیرد برای هر کدام از کانال‌ها بیان می‌شود. نیروی انسانی اداری و نگه‌داری و تعمیرات و دیگر هزینه‌های بالاسری به‌صورت سالانه و برای هر کانال محاسبه می‌شود.

هزینه سالانه جریمه کمبود. هنگامی که تجهیز خراب شود، باعث می‌شود تعداد واحدهای در حال عملیات پایین‌تر از مقدار مورد تقاضا قرار گیرد و ایجاد هزینه کمبود کند. هزینه سالانه کمبود برابر است با حاصلضرب هزینه کمبود یک واحد در سال در تعداد انتظاری کمبود واحدها:

$$SC = C_S\left[E\left(S\right)\right] \qquad (۱۵-۱۷)$$

تعداد انتظاری کمبود واحدها از توزیع احتمالی کمبود n واحد، P_n، به‌دست می‌آید که در معادلات ۱۰–۳۸ و ۱۰–۳۹ در قسمت ۱۰–۶ توسعه داده شده‌اند. N-D را به‌عنوان تعداد واحدهای اضافی که در جمعیت نگه داشته شده است تعریف کنید. برای n=0,1,2,...,N-D هیچ کمبودی اتفاق نمی‌افتد. با این حال هنگامی که

n = N-D+1، یک واحد کمبود وجود دارد

n = N-D+2، دو واحد کمبود وجود دارد

⋮

n = N، D واحد کمبود وجود دارد

جدول ۱۷- ۱۰- پارامترهای سیستم برای مساله بهینه‌سازی REPS

پارامتر		مقدار
هزینه اکتساب واحد		۵۲۰۰۰ دلار
عمر طراحی واحد		۶ سال
ارزش اسقاطی واحد در انتهای عمر طراحی		۷۰۰۰ دلار
هزینه عملیات واحد		
انرژی و سوخت		۵۰۰دلار
نیروی کار برای عملیات		۴۵۰ دلار
نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه		۴۰۰ دلار
دیگر هزینه‌های عملیاتی		۴۰۰ دلار
هزینه سالانه کانال تعمیر		۴۵۰۰۰ دلار
هزینه سالانه کمبود		۷۳۰۰۰ دلار
نرخ بهره سالانه		٪۱۰
گروه سنی	MTBF	MTTR
۱-۰	۰,۲	۰,۰۳
۲-۱	۰,۲۴	۰,۰۴
۳-۲	۰,۲۹	۰,۰۵
۴-۳	۰,۲۹	۰,۰۵
۵-۴	۰,۲۶	۰,۰۶
۶-۵	۰,۲۲	۰,۰۷

تعداد انتظاری کمبود واحدها، E(S)، را می‌توان با ضرب تعداد کمبود واحدها در احتمال اتفاق آن به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$E(S)=\sum_{j=1}^{D} jP_{(N-D+j)} \qquad (۱۶-۱۷)$$

۱۷-۵-۴- مساله بهینه‌سازی REPS

در مساله REPS-I، تصمیم گیرنده کنترلی بر پارامترهای سیستم ندارد و تنها می‌تواند تعداد تجهیزات برای تدارک و استقرار، عمری که باید واحدها تعویض شوند، و تعداد کانال‌های تعمیر در تسهیل تعمیر را انتخاب کند.

فرض کنید که تقاضا D ۱۵ واحد تجهیز مشابه است. جدول ۱۷-۱۰ پارامترهای سیستم را برای این مثال فراهم کرده است.

جدول ۱۷-۱۱ مجموعه‌ای از متغیرهای طراحی برای مثال مدنظر را نشان می‌دهد. محاسبات در ادامه بر پایه این متغیرها و پارامترهای سیستم قرار دارد که در جدول ۱۷-۱۰ نشان داده شد.

معادل سالانه هزینه جمعیت. ابتدا ارزش دفتری B واحدها را پس از چهار سال با استفاده از معادله ۱۷-۱۲ به‌صورت زیر به‌دست آورید.

$$52000-4\left(\frac{52000-7000}{6}\right)=22000$$

جدول ۱۷- ۱۱- متغیرهای طراحی برای REPS-II

جمعیت N	کانال‌های تعمیر M	عمر از کار افتادگی
۱۹	۳	۴

$$C_i = 52000\left[\frac{0.10(1.10)^4}{(1.10)^4-1}\right] - 22000\left[\frac{0.10}{(1.10)^4-1}\right]$$
$$= 16404 - 4740 = 11664$$

که از آن معادل سالانه هزینه جمعیت برابر خواهد بود با

$$PC = 11644(19) = 221616$$

هزینه سالانه عملیات. هزینه سالانه عملیات برای جمعیت استقرار یافته از معادله ۱۷-۱۳ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$OC = (500 + 450 + 400 + 400)(19) = 33250$$

هزینه سالانه تجهیز تعمیر. معادل سالانه هزینه کانال تعمیر برای سه کانال از معادله ۱۷-۱۴ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$RC = 45000(3) = 135000$$

هزینه سالانه کمبود. محاسبه هزینه کمبود بر پایه مقادیر MTBF و MTTR از جدول ۱۷–۱۰ برای سال‌های ۱ تا ۴ قرار دارد. از این مقادیر، میانگین MTBF و MTTR برای جمعیت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\text{MTBF} = (1/4)(0.20 + 0.24 + 0.29 + 0.29) = 0.2550$$
$$\text{MTTR} = (1/4)(0.03 + 0.04 + 0.05 + 0.05) = 0.0425$$

نرخ خرابی یک آیتم و نرخ تعمیر در کانال تعمیر به‌صورت زیر است

$$\lambda = (1/\text{MTBF}) = (1/0.2550) = 3.9215$$
$$\mu = (1/\text{MTTR}) = (1/0.0425) = 23.5294$$

که از آن $\left(\frac{\lambda}{\text{M}}\right) = 1/6$. سپس C_n را برای n=0,1,...,3 از معادله ۱۰–۳۹ به‌دست آورید

$$C_0 = \frac{19!(1/6)^0}{19!0!} = 1$$
$$C_1 = \frac{19!(1/6)^1}{18!1!} = 3.1665$$
$$C_2 = \frac{19!(1/6)^2}{17!2!} = 4.7496$$
$$C_3 = \frac{19!(1/6)^3}{16!3!} = 4.4856$$
$$\vdots$$

با استفاده از معادله ۱۰–۳۹ مقادیر C_n را برای n=4,...,19 به‌دست می آوریم

$$C_4 = \frac{19!(1/6)^4}{15!3!3^1} = 3.9813$$
$$C_5 = \frac{19!(1/6)^5}{14!3!3^2} = 3.3224$$
$$C_6 = \frac{19!(1/6)^6}{13!3!3^3} = 2.5840$$
$$\vdots$$
$$C_{18} = \frac{19!(1/6)^{18}}{1!3!5^{15}} = 0.0000$$
$$C_{19} = \frac{19!(1/6)^{19}}{0!3!3^{16}} = 0.0000$$

در نتیجه

$$\sum_{n=0}^{19} C_n = 27.9390$$

و از معادله ۱۰–۳۸

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{19} C_n} = 0.0358$$

حال P_n را برای $n=1,2,...,N$ با استفاده از رابطه $P_n=P_0C_n=(0.0358)C_n$ به‌صورت زیر به‌دست می آوریم

$$P_0 = 0.0358 \times 1 = 0.0358$$
$$P_1 = 0.0358 \times 3.1665 = 0.1134$$
$$\vdots$$
$$P_5 = 0.0358 \times 3.3224 = 0.1189$$
$$P_6 = 0.0359 \times 2.5840 = 0.0925$$
$$\vdots$$
$$P_{18} = 0.0358 \times 0.0000 = 0.0000$$
$$P_{19} = 0.0358 \times 0.0000 = 0.0000$$

حال تعداد انتظاری کمبود واحدها را از معادله ۱۷-۱۶ به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم

$$E(S) = \sum_{j=1}^{D} jP_{(N-D+j)} = \sum_{j=1}^{15} jP_{(4+j)}$$
$$= 1(0.1189) + 2(0.0925) + \cdots + 15(0.0000)$$
$$= 1.00663$$

جدول ۱۷-۱۲- نقاط در حوزه بهینه

سن از کارافتادگی n	تعداد واحدها N	تعداد کانال‌های تعمیر M		
		۲	۳	۴
۳	۱۹	۵۹۸۳۹۵	۴۶۵۹۸۵	۴۶۹۱۳۰
	۱۸	۵۹۲۹۲۰	۴۶۴۷۷۰	۴۶۵۷۵۵
۴	۱۹	۶۰۰۷۲۰	۴۶۳۳۵۰	۴۶۴۲۹۵
	۲۰	۶۱۰۷۷۵	۴۶۶۶۱۰	۴۶۸۷۵۵
۵	۱۹	۶۴۳۰۵۰	۴۸۰۳۷۵	۴۶۷۷۳۵

که از آن هزینه سالانه کمبود به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$SC = C_S\left[E\left(S\right)\right]$$
$$= 73000\left(1.00663\right) = 73484$$

معادل سالانه کل هزینه سیستم را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد

$$TC = PC + OC + RC + SC$$
$$221616 + 33250 + 135000 + 73484 = 463350$$

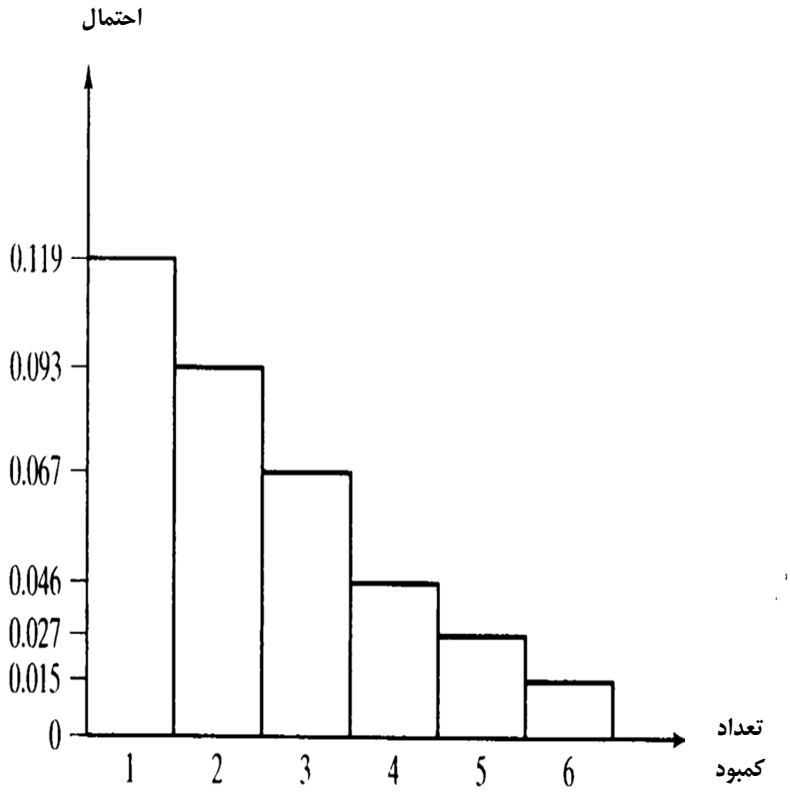
همان‌طور که از جدول ۱۷-۱۲ پیداست، این جواب در حقیقت جواب بهینه در نزدیکی نقاط داده شده برای N، M و n است.

توزیع کمبود را می‌توان از مقادیر P_n به‌دست آورده و هیستوگرام مربوط به $\Pr\left(S = N - D + s\right)$ را رسم کرد. در این مثال $\Pr\left(S = s\right) = P_{4+s}$

$$\Pr\left(S = 0\right) = 0.622$$
$$\Pr\left(S = 1\right) = 0.119$$
$$\Pr\left(S = 2\right) = 0.093$$
$$\Pr\left(S = 3\right) = 0.067$$
$$\Pr\left(S = 4\right) = 0.046$$
$$\Pr\left(S = 5\right) = 0.027$$
$$\Pr\left(S = 6\right) = 0.015$$
$$\Pr\left(S = 7\right) = 0.008$$
$$\Pr\left(S = 8\right) = 0.003$$

هیستوگرام احتمال کمبود برای این مثال در شکل ۱۷–۲۴ رسم شده است.

در قسمت ۱۷–۵–۵ کفایت این "خط مبنا" برای طراحی در مقابل نیازمندی‌های طراحی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌علاوه، گزینه‌های کاندید سیستم مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.



شکل۱۷–۲۴– هیستوگرام احتمال کمبود.

۱۶–۵–۵ – مساله طراحی RESP

در مساله RESP-II تصمیم گیرنده علاوه بر مجموعه متغیرهای طراحی بر مجموعه‌ای از پارامترهای وابسته به سیستم کنترل دارد. در نتیجه، تابع ارزیابی سیستم معادله ۷–۳ اعمال خواهد

شد. در این قسمت، پارامترهای وابسته به طراحی به‌صورت متناوب تغییرداده می‌شود تا یک کاندیدREPS به‌دست آید که نسبت به خط مبنای طراحی کاربردی‌تر است.

در نظر گرفتن نیازمندی‌های طراحی. هنگام عدم وجود نیازمندی‌های طراحی، خط مبنای طراحی قابل قبول است. با این حال، فرض کنید که این خط مبنا به‌علت وجود نیازمندی‌های زیر قابل قبول نیست:

۱. هزینه اولیه استقرار جمعیت نباید از ۹۰۰۰۰۰ دلار تجاوز کند.
۲. احتمال آن‌که کمبودی ایجاد نشود باید حداقل ۷۰٪ باشد.
۳. میانگین MTBF برای واحد طی عمر آن باید حداقل ۰,۲۰ سال باشد.
۴. یک واحد نباید بیش از ۴ سال در سرویس نگه داشته شود.

توجه کنید که خط مبنای طراحی نیازمندی‌های ۱ و ۲ را برآورده نمی‌کند اما نیازمندی‌های ۳ و ۴ را برآورده کرده است. هم‌چنین، معادل سالانه هزینه چرخه‌ی عمر ۴۶۳۳۵۰ است. شکل ۱۷–۲۵ یک نمایش ارزیابی طراحی برای این وضعیت (همراه با خط مبنای طراحی) را فراهم کرده است. با این حال، از آنجا که همه نیازمندی‌های طراحی برآورده نشده است، یک یا دو کاندید دیگر باید طراحی شود که همه نیازمندی‌های را در بازه قابل قبول هزینه چرخه‌ی عمر برآورده کند.

تولید سیستم‌های کاندید. فرض کنید که دو کاندید طراحی سیستم در مقابل تقاضای ۱۵واحدی تجهیزات و پارامترهای مستقل از طراحی ذکر شده در جدول ۱۷–۱۰ تولید شده است. پارامترهای وابسته به طراحی برای این کاندیدها در جدول ۱۷–۱۳ داده شده است.

بهینه‌سازی متغیرهای طراحی برای هر مجموعه از پارامترهای وابسته به طراحی (هر کاندید) نتایج ارائه شده در جدول ۱۷-۱۴ را به‌دست می‌دهد. هم‌چنین نتایج بهینه خط مبنای طراحی در آن قرار داده شده است. مشاهدات زیر به‌دست آمده است:

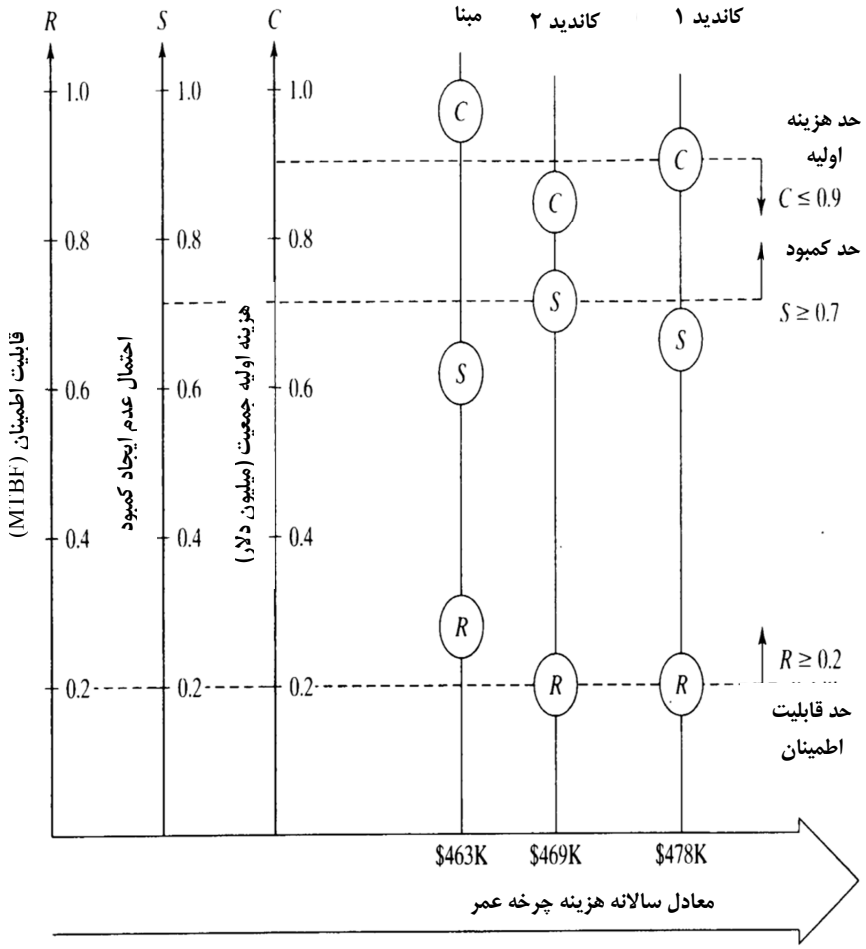
۱. تنها سیستم کاندید ۲ همه نیازمندی‌های طراحی را برآورده می‌کند.

۲. سیستم کاندید ۲ کم‌ترین هزینه برای هر واحد را داشته و در نتیجه کم‌ترین هزینه سرمایه گذاری برای استقرار جمعیت را داراست.

۳. سیستم کاندید ۲ بیش‌ترین احتمال برآورده کردن تقاضای ۱۵ واحد تجهیز در حال سرویس را دارد.

۴. سیستم کاندید ۲ بیش‌تری انرژی را مصرف می‌کند و نیازمند بیش‌ترین مخارج برای نیروی کار عملیاتی می‌باشد.

۵. سیستم کاندید ۲ معادل سالانه هزینه جریمه برابر با ۴۶۸۸۲۵ دلار دارد که ۵۴۷۵ دلار بیش‌تر از خط مبنای طراحی است، اما هزینه سرمایه گذاری کم‌تری نسبت به سیستم کاندید ۱ دارد.



شکل ۱۷-۲۵- نمایش ارزیابی تصمیم طراحی برای REPS

جدول ۱۷-۱۳- پارامترهای وابسته به طراحی برای سیستم‌های کاندید

پارامتر	کاندید ۱		کاندید ۲	
هزینه اکتساب واحد	۴۵۰۰۰		۴۳۰۰۰	
عمر طراحی واحد	۶ سال		۶ سال	
ارزش اسقاطی واحد در انتهای عمر	۶۰۰		۸۰۰	
هزینه عملیاتی واحد				
انرژی و سوخت	۶۰۰		۸۰۰	
نیروی کار عملیاتی	۵۰۰		۷۰۰	
نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه	۴۰۰		۴۰۰	
دیگر هزینه‌های عملیاتی	۴۰۰		۴۰۰	
گروه سنی	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR
۱-۰	۰,۱۶	۰,۰۴	۰,۱۸	۰,۰۴
۲-۱	۰,۲۱	۰,۰۴	۰,۲۱	۰,۰۴
۳-۲	۰,۲۶	۰,۰۵	۰,۲۵	۰,۰۵
۴-۳	۰,۲۶	۰,۰۶	۰,۲۵	۰,۰۵
۵-۴	۰,۲۶	۰,۰۶	۰,۲۳	۰,۰۶
۶-۵	۰,۲۴	۰,۰۶	۰,۲۰	۰,۰۶

جدول ۱۷-۱۴- خلاصه ارزیابی کاندیدهای REPS

	طراحی خط مبنا	کاندید سیستم ۱	کاندید سیستم ۲
تعداد واحدهای مستقر N	۱۹	۲۰	۲۰
کانال‌های تعمیر، M	۳	۴	۴
سن از کار افتادگی n	۴	۳	۴
هزینه واحد P	۵۲۰۰۰	۴۵۰۰۰	۴۳۰۰۰
میانگین MTBF	۰,۲۶	۰,۲۱	۰,۲۲
احتمال عدم کمبود	۰,۶۲۲	۰,۷۱	۰,۷۳۰
معادل سالانه هزینه چرخه‌ی عمر	۴۶۳۳۵۰	۴۷۷۶۳۵	۴۶۸۸۲۵

ممکن است کاندیدهای دیگر طراحی سیستم وجود داشته باشد که همه نیازمندی‌های طراحی را برآورده کرده و هزینه‌های چرخه‌ی عمر برابر یا کم‌تر از سیستم کاندید ۲ داشته باشد. هدف مساله REPS رسمی کردن ارزیابی کاندیدهاست، به‌صورتی که هر کاندید از طریق مقادیر پارامترهای وابسته به طراحی شناخته می‌شود؛ مقایسه کاندیدها تنها پس از مشخص شدن مقادیر بهینه هزینه چرخه‌ی عمر انجام می‌شود. این موضوع با مفهوم معادلات ۷-۱ و ۷-۳ هماهنگ است.

۱۷-۶- کاربردها و مزایای هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر

فرایند تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر در شکل ۱۷-۵ به‌عنوان یک ابزار کمکی در بررسی وضعیت‌های مختلف ارزیابی طراحی قابل استفاده است. با این حال، این فرایند گام‌هایی را منعکس می‌کند که باید برای مساله در دست به درستی تنظیم شود. فرد می‌تواند تحلیل LCC در یک سطح کلی انجام داده یا می‌تواند به‌صورت عمیق آن را انجام دهد. نتایج چنین تحلیلی باید عمق مناسبی داشته باشد، به موقع صورت گیرد و باید پاسخگوی *تفکر تحلیل اقتصادی* و *تفکر چرخه‌ی عمر* باشد.

با مراجعه به شکل ۱۷-۴ (تعمیمی از شکل ۲-۳)، کاربردهای مختلفی برای تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر وجود دارد. به ویژه، تحلیل LCC را می‌توان در ارزیابی موارد زیر مورد استفاده قرار داد:

۱. رویکردهای جایگزین فناوری در انجام امکان‌سنجی (به قسمت ۳-۳ مراجعه کنید).

۲. پروفایل‌های جایگزین عملیاتی سیستم یا سناریوهای ماموریتی (به قسمت ۳-۴ مراجعه کنید).

۳. مفاهیم جایگزین نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی تدارکات (به قسمت ۳-۵ مراجعه کنید).

۴. رویکردهای جایگزین در روش‌های مختلف طراحی در پاسخ به تحلیل وظیفه‌ای (یعنی موازنه‌های مربوط به انجام وظایف توسط انسان یا از طریق خودکارسازی، انتخاب آیتم‌های COTS در مقابل آیتم‌های جدید طراحی، ترکیب مناسب سخت افزار در مقابل نرم‌افزار، و غیره) (به قسمت‌های ۳-۷ و ۴-۳ مراجعه کنید).

۵. ساختارهای جایگزین طراحی سیستم در ارتباط با طرح‌های بسته‌بندی، سطوح تعمیر، روتین‌های کشف خطا، آزمایش‌های خارجی در مقابل خود آزمایش، انتخاب و استاندارد کردن اجزا، قابلیت اطمینان در مقابل قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، و غیره.

۶. منابع جایگزین تامین و تدارکات.

۷. رویکردهای جایگزین تولید (یعنی تولید پیوسته در مقابل تولید گسسته، تولید داخلی در مقابل برون‌سپاری، تعداد خطوط تولید، تعداد نقاط و سطوح موجودی، گزینه‌های بازرسی و آزمایش، غیره).

۸. کانال‌های توزیع تولید، روش‌های بسته‌بندی، رویکردهای حمل و نقل و جابه‌جایی، انبارش و مکان‌یابی انبار، و غیره (به فصل ۱۵ مراجعه کنید).

۹. سیاست‌های جایگزین نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی تدارکات (یعنی سطوح نگه‌داری و تعمیرات، نگه‌داری و تعمیرات داخلی در مقابل پیمانکاری، سیاست‌های جایگزین ضمانت و خدمات پس از فروش، غیره) (به قسمت ۳–۵ و فصل ۱۵ مراجعه کنید).

۱۰. سیاست‌های جایگزین امحا و بازیافت محصول (یعنی درجات مختلف قابلیت امحا/بازیافت، ساختارهای جایگزین پشتیبانی تدارکات برای وظایف امحا یا بازیافت) (به فصل ۱۶ مراجعه کنید).

اگرچه هیچ نوآوری در بررسی مسائل بالا هنگام توسعه سیستم‌های جدید (و مهندسی مجدد سیستم‌های موجود) وجود ندارد، اما تاکید در این‌جا، انجام تحلیل و ارزیابی لازم بر پایه‌ی ملاحظات اقتصادی طی چرخه‌ی عمر است، نه اینکه تنها هزینه‌های کوتاه‌مدت مربوط به فعالیت‌های طراحی و تدارکات مدنظر قرار گیرد. مزایای زیادی از طریق استفاده از روش‌های هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر در ارزیابی و بهبود سیستم‌هایی که وجود داشته و در حال عملیات

هستند، کسب می‌شود. شناسایی حوزه‌های پر هزینه و متعاقب آن اصلاح سیستم برای بهبود (ایجاد یک کاهش در هزینه چرخه‌ی عمر) که به‌صورت پیوسته و تکرار شونده پیاده‌سازی می‌شود، می‌تواند منافع زیادی را برای سیستمی ایجاد کند که منابع محدود داشته و در رقابت جهانی شرکت دارد. در این حوزه، موفقیت شدیدا به دسترسی‌پذیری داده‌های تاریخی مناسب و داشتن دید لازم برای پیاده‌سازی بهبود مستمر محصول/فرایند بستگی دارد.

اگرچه منافع زیادی در این تحلیل وجود دارد، اما موانع عمده‌ای نیز در آن وجود دارد. در حال حاضر چرخه‌های بودجه، اهداف سازمانی و فعالیت‌هایی که بر پایه‌ی سیاست‌گذاری‌های سازمان انجام می‌شود، بیش‌تر کوتاه‌مدت هستند. موفقیت در این حوزه،ه نیازمند آن است که محیط سازمانی مناسبی فراهم شود که انجام این تحلیل تسهیل شود. باید به تفکر چرخه‌ی عمر از بالا به پایین تعهد داشت؛ نوع درست داده باید جمع‌آوری شده و در دسترس باشد؛ و تحلیل‌گر باید به همه حوزه‌های کاربردی در مورد فعالیت‌ها دسترسی داشته باشد. باید فرایند درک شده، بر یک واحد شناخته شده اعمال شده و نتایج ارزیابی شود و برخی روابط تخمین هزینه که می‌توانند در تحلیل‌های بعدی LCC مورد استفاده قرار گیرند، تنظیم شود.

هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر پایه و اساسی برای در نظر گرفتن مقرون به‌صرفه بودن توسط مشتری را فراهم می‌کند. علاوه بر این تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر شامل موارد زیراست:

۱. برنامه‌ریزی بلندمدت را در مقابل تفکر کوتاه‌مدت و تصمیم‌گیری سنتی اجبار می‌کند.

۲. یک دید در مورد کل هزینه ایجاد کرده و عناصر، تجهیزات، فرایندها و دیگر حوزه‌های پر هزینه سیستم را شناسایی می‌کند.

۳. فهم بهتری از روابط بین عناصر مختلف سیستم و گروه‌های هزینه ایجاد می‌کند. آثار تعاملی از طریق تحلیل حساسیت هزینه چرخه‌ی عمر فراهم می‌شود.

۴. در شناسایی اولیه حوزه‌های پرریسک، مقدار آن‌ها، و حذف علل ممکن این ریسک‌ها کمک کننده است.

۵. مدیریت بهتری بر منابع ایجاد می‌کند، زیرا یک دید بلندمدت را فراهم می‌کند.

۱۷-۷- خلاصه فصل

هزینه‌سنجی در ابتدا در فصل ۲ در ارتباط با مهندسی محصول رقابتی مطرح شد. سپس، ارزش کل سیستم در شکل ۲-۸ نشان داده شد تا هزینه چرخه‌ی عمر و اثربخشی را به‌طورمستقیم به‌هم وابسته کند. سپس در بخش دوم هزینه به‌عنوان یکی از ملاحظات طراحی در توسعه و نمایش فرایند طراحی سیستم در نظر گرفته است. با این حال، توضیح عمومی و شالوده مدل برای هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر تا فصل ۷ ظاهر نگردید. در قسمت ۷-۳، تئوری ارزیابی تصمیم، ارزیابی توسط مدل‌سازی جریان پول و ارزیابی توسط مدل‌سازی بهینه کردن اقتصادی تشریح گردید.

مباحث هزینه چرخه‌ی عمر در بخش سوم و در ارتباط با تحلیل و سیستم‌ها و ارزیابی طراحی مورد بررسی قرار گرفت. در قسمت ۸-۵، دو گزینه فرضی طراحی توسط مدل‌سازی جریان پول ارزیابی شدند تا مفهوم معادل اقتصادی روشن شود. معادل اقتصادی در بهینه‌سازی اقتصادی در قسمت ۹-۲ نشان داده شد که در آن بهینه‌سازی هزینه اولیه پل انجام گردید. معکوس شدن تصمیم در مورد طراحی در این مثال هنگامی رخ می‌داد که هزینه چرخه‌ی عمر نسبت به هزینه اولیه، اولویت پیدا می‌کرد. مثال دیگری از ارزش بهینه‌سازی اقتصادی چرخه‌ی عمر شامل موضوع عمر اقتصادی در انتخاب تجهیزات بود. در ادامه و در بخش چهارم، در قسمت امکان‌سنجی عملیاتی طراحی، ملاحظات طراحی مربوط به قابلیت اطمینان، قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، قابلیت

بهره‌برداری و قابلیت پشتیبانی فرصت‌های زیادی برای بررسی هزینه چرخه‌ی عمر و تصمیم‌گیری در مورد طراحی ایجاد کردند.

این فصل مفاهیم، مدل‌ها و روش‌های هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر که در فصول قبل معرفی شد، توسعه داده است. پس از بحث در مورد اهمیت و جایگاه طراحی برای مقرون به‌صرفه بودن در مهندسی و تحلیل سیستم‌ها، این فصل فرایند کلی هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر را بررسی می‌کند. این فرایند بر پایه ۱۲ گام است که برای اکثر وضعیت‌های هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر قابل تنظیم است. اگر فرایند ۱۲ گامی به‌طور کامل و به‌درستی اجرا شود، جنبه‌های مهم تحلیل چرخه‌ی عمر از قلم نخواهد افتاد. در نتیجه، این فرایند عمومی هسته این فصل است. این فرایند راهنمای با ارزش هزینه‌سنجی مناسب چرخه‌ی عمر خواهد بود.

دو مثال جامع از طراحی برای مقرون به‌صرفه بودن بر پایه هزینه چرخه‌ی عمر فرایند ۱۲ گامی عمومی را دنبال می‌کند که در شکل ۱۷–۵ نشان داده شده است. این مثال‌ها مشابه هستند. هر دو دارای جمعیتی از واحدهای قابل تعمیر هستند. مثال اول شامل بسته‌های قابل تعمیر هستند که سیستم ارتباطی/مکان‌یابی را تشکیل می‌دهد (LCSys). مثال دوم یک سیستم از جمعیت تجهیزات قابل تعمیر است که RESP نامیده شد.

مثال اول (در قسمت ۱۷–۴) فرایند ۱۲ گامی را به‌طور کامل پیاده‌سازی کرده و از الگوی تحلیلی مدل‌سازی جریان پول استفاده می‌کند. این کار نیازمند ساختار شکست هزینه و ثبت تخمین هزینه‌ها به‌صورت سلسله مراتبی است. رویکرد جریان پول (۱) ورود و خروج واحدهای قابل تعمیر، (۲) تصمیم‌های مربوط به سطح تعمیر، و (۳) ورودی‌های هزینه در سطوح پایین به‌صورت تفصیلی را مجاز می‌داند. این رویکرد (۴) نرخ‌های خرابی و نگه‌داری وتعمیرات غیرپایدار، (۵) در نظر گرفتن هزینه جریمه کمبود، و (۳) تعیین اندازه‌ی بهینه جمعیت، عمر اقتصادی واحدهای مستقر شده، و ظرفیت بهینه تسهیل تعمیر را مجاز نمی‌داند. مثال دوم (در قسمت

۱۷–۵) تنها توسط فرایند ۱۲ گامی هدایت می‌شود. این مثال بر الگوی بهینه‌سازی اقتصادی تکیه دارد و نیازمند فرمول‌بندی یک سری از توابع ریاضی هزینه‌سنجی است که در ادامه ادغام شده و یک تابع ارزیابی برای بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهد. در این مثال در نظر گرفتن (۱) تا (۳) که در بالا ذکر شد مجاز نیست ولی موارد (۴) تا (۶) مجاز است. بر این اساس، هر الگوی ارزیابی نشان داده شده مزیت‌ها و معایب خود را دارد.

هر کدام از مثال‌ها ورودی‌ها و محاسبات خاص خود را نیاز دارد. در نتیجه، یک مدل رایانه‌ای برای هر کدام در دسترس است که فایل‌های مربوط به داده‌های ورودی مربوط به خود را دارند که در قسمت‌های ۱۷–۴ و ۱۷–۵ نشان داده شده است. این مدل‌ها در وب‌سایت http://www.a2i2.com در دسترس است. پیشنهاد می‌شود که مدل‌ها برای مثال‌های ارائه شده در قسمت‌های ۱۷–۴ و ۱۷–۵ دانلود، مطالعه و استفاده شود. برای مطالعه بیش‌تر در زمینه محتوای این فصل دو منبع در زیر ارائه شده است:

1. Hendricks, H.H., and G.M. Taylor, Program Budgeting and Benefit-Cost Analysis, Goodyear Publishing Co, Inc, Pacific Palisades, CA, 1969.

2. Fisher, G.H., Cost Consideration in System Analysis, American Elsevier Publishing Co, Inc, New York, NY, 1971.

سوالات و مسائل

۱. هزینه چرخه‌ی عمر را به زبان ساده تعریف کنید. چه چیزهایی در آن قرار دارد و چه چیزهای در آن نیست؟

۲. منظور از DTC چیست؟ چه هنگام چرخه‌ی عمر سیستم باید اعمال شود؟ چگونه به TPMهای شناسایی شده در قسمت ۳–۵ مربوط می‌شود؟

۳. چرا هزینه‌سنجی چرخه‌ی عمر مهم است؟

۴. منظور از هزینه‌سنجی وظیفه‌ای چیست؟ چگونه با تحلیل وظیفه‌ای تشریح شده در قسمت‌های ۳–۶ و ۴–۱ مرتبط می‌شود؟

۵. گام‌های تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر را تشریح کنید.

۶. ساختار شکست هزینه چیست؟ هدف آن چیست؟ چه چیزهایی در آن قرار دارد (ندارد)؟ این ساختار چگونه با ساختار شکست کار مرتبط می‌شود؟

۷. چگونه CBS به تحلیل وظیفه‌ای مرتبط می‌شود؟

۸. برخی از روش‌های متداول تخمین هزینه را نام ببرید. تحت چه شرایطی باید اعمال شوند؟ مثال بزنید.

۹. هزینه‌سنجی بر پایه فعالیت چیست؟ چرا مهم است؟ برخی از تفاوت‌ها بین این روش هزینه‌سنجی و برخی دیگر از رویکردهای متداول را نام ببرید.

۱۰. به شکل ۱۷–۹ مراجعه کنید. تحت چه شرایطی درآمدها باید به‌صورت یک عنصر هزینه در نظر گرفته شود؟

۱۱. به شکل ۱۷–۱۰ مراجعه کنید. آیا CBS در شکل برای همه کاربردهایی که در آن‌ها تحلیل LCC نیاز است کافی است؟

۱۲. به شکل ۱۷–۱۳ مراجعه کنید. منظور از تخمین هزینه پارامتری چیست؟ چگونه روابط تخمین هزینه را توسعه می‌دهید؟

۱۳. منحنی یادگیری را تشریح کنید. چگونه توسعه داده می‌شود؟ چگونه به‌کار می‌رود؟ برخی از مواردی که در اعمال منحنی یادگیری باید رعایت شوند کدامند؟

۱۴. در این فصل، سه پروفایل مختلف هزینه شناسایی شد. این پروفایل‌ها کدامند؟ هر کدام تحت چه شرایطی اعمال می‌شوند؟

۱۵. به جدول ۱۷–۱ مراجعه کنید. چرا برخی اوقات مفید است که تحلیل LCC در این قالب انجام شود؟

۱۶. منظور از تحلیل حساسیت چیست؟ چه نوع اطلاعاتی از آن به‌دست می‌آید؟ چرا انجام آن مهم است؟

۱۷. تحلیل پارتو چیست؟ چه مزایایی دارد؟

۱۸. هزینه چرخه‌ی عمر برای خودروی شخصی خود را محاسبه کنید.

۱۹. با مراجعه به جدول زیر، چه ساختاری باید انتخاب شود؟ چرا؟

	ساختار A		ساختار B	
گروه هزینه	هزینه	درصد	هزینه	درصد
تحقیق و توسعه	۷۰۲۱۹	۷٫۸	۵۳۲۴۶	۴٫۲
مدیریت	۹۳۷۴	۱٫۱	۹۲۵۲	۰٫۸
طراحی مهندسی	۴۵۵۵۲	۵٫۰	۲۸۷۳۱	۲٫۳
آزمایش و ارزیابی	۱۲۱۷۶	۱٫۴	۱۲۱۵۳	۰٫۹
داده‌های فنی	۳۱۱۷	۰٫۳	۳۱۱۰	۰٫۲
تولید	۴۰۷۸۱۴	۴۵٫۳	۳۳۰۸۸۵	۲۶٫۱

گروه هزینه	ساختار A		ساختار B	
	هزینه	درصد	هزینه	درصد
ساخت	۴۵۵۵۳	۵,۱	۴۳۲۲۷	۳,۴
تولید	۳۶۲۲۶۱	۴۰,۲	۲۸۷۶۵۸	۲۲,۷
عملیات و نگه‌داری وتعمیرات	۴۲۲۲۱۷	۴۶,۷	۸۸۳۶۲۹	۶۹,۴
عملیات	۳۷۸۱۱	۴,۲	۳۹۳۰۱	۳,۱
نگه‌داری وتعمیرات	۳۸۲۱۰۶	۴۲,۵	۸۴۱۱۰۸	۶۶,۳
کارکنان نگه‌داری و تعمیرات	۲۱۰۶۵۹	۲۳,۴	۴۰۷۲۱۹	۳۲,۲
قطعات یدکی تعمیری	۱۰۳۵۲۰	۱۱,۵	۲۲۸۹۲۶	۱۸,۱
تجهیزات آزمایش	۴۷۷۱۳	۵,۳	۱۳۱۷۴۷	۱۰,۴
حمل و نقل	۱۴۴۰۴	۱,۶	۵۱۸۳۸	۴,۱
آموزش نگه‌داری و تعمیرات	۱۸۰۸	۰,۲	۲۱۲۵	۰,۱
تسهیلات	۹۰۰	۰,۱	۱۰۲۱	–
داده‌های میدانی	۳۱۰۲	۰,۴	۱۸۲۳۲	۱,۴
ازدور خارج کردن و امحا	۲۳۰۰	۰,۲	۳۲۲۰	۰,۳
مجموع کل	**۹۰۰۲۵۰**	**۱۰۰**	**۱۲۶۷۷۶۰**	**۱۰۰**

۲۰. با مراجعه به جدول مساله ۱۹، اثر احتمالی بر LCC چگونه خواهد بود اگر

a. MTBF سیستم کاهش یابد
b. Mct افزایش یابد
c. MLH/OH افزایش یابد
d. بهره‌برداری از سیستم افزایش یابد
e. قابلیت ایزوله سازی خطا در سیستم کفایت نداشته باشد

چه گام‌هایی برای کاهش این هزینه‌ها باید برداشته شود؟

۲۱. شرکت BAF امکان معرفی محصول Y را به بازار بررسی می‌کند. تحلیل‌گر بازار مشخص کرده است که شرکت باید همه محصولات خود را به قسمت ۲۰۰ دلار در ۱۰سال آینده به فروش برساند. محصول قابل تعمیر نیست و هنگام خرابی دور انداخته می‌شود.

برای تولید محصول، شرکت نیاز دارد که برای خرید تجهیزات سرمایه‌ای، سرمایه‌گذاری کند. بر پایه مطالعات انجام شده بر منابع بالقوه، سه گزینه ممکن برای برآورده کردن نیاز در نظر گرفته شده است:

a. ساختار A شامل یک ماشین نیمه خودکار است (نیازمند یک کاربر نیمه وقت است) و ۳۹۵ محصول در سال تولید کرده و هزینه خرید آن ۱۵۰۰۰ دلار است. قابلیت اطمینان انتظاری (MTBF) این ماشین ۱۶۵ بوده و هزینه هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرت اصلاح ۲۰۰ دلار است. هزینه عملیات ماشین ۳ دلار در ساعت و ارزش اسقاطی آن پس از ۱۰ سال ۱۰۰۰ دلار است.

b. ساختار B شامل یک ماشین خودکار است که ۵۲۵ محصول در سال تولید کرده و با قیمت ۲۸۰۰۰ دلار خریداری می‌شود. قابلیت اطمینان انتظاری (MTBF) برابر با ۲۷۰ است و هزینه هر نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی ۳۰۰ دلار است. این ماشین هر ۶ ماه یکبار نیازمند نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه بوده که هزینه آن ۲۵۰ دلار است. میانگین هزینه عملیات ماشین ۰٫۶۰ دلار در ساعت بوده و ارزش اسقاطی آن پس از ۱۰ سال ۲۵۰۰ دلار است.

c. ساختار C یک ماشین خودکار است که ۵۰۰ محصول در سال تولید می‌کند و به قیمت ۲۳۰۰۰ دلار قابل خرید است. قابلیت اطمینان (MTBF) ماشین ۱۹۵ و هزینه هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی ۲۲۵دلار است. نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه هر ۹۰ روز نیاز بوده و هزینه آن ۲۰۰ دلار است. میانگین هزینه عملیات ماشین در هر ساعت ۰٫۵ دلار بوده و ارزش اسقاطی آن پس از ۱۰ سال ۲۲۰۰ دلار تخمین زده می‌شود.

بهره‌برداری از ماشین ۸ ساعت در روز برای ۲۷۰ روز در سال پیش‌بینی می‌شود. خروجی ماشین طی سال اول ۰٫۵ بوده و پس از ۲ سال به ظرفیت کامل می‌رسد. هزینه تولید (مواد و نیروی کار مربوط به تدارکات مواد، جابه‌جایی مواد، کنترل کیفیت، بازرسی و آزمایش و بسته‌بندی) برای محصول Y ۵۰ دلار توسط ماشین A، ۳۰ دلار توسط ماشین B، و ۴۰ دلار برای ماشین C است. هزینه توزیع (حمل و نقل، انبار و غیره) ۱۰ دلار برای هر آیتم است. نرخ بهره را ۱۰٪ فرض کنید.

کدام ساختار باید استفاده شود و چرا؟

۲۲. نیازی برای اضافه کردن یک سیستم ارتباطی جدید به سیستم حمل و نقل زمینی معرفی شده است. این قابلیت جدید ارتباطی، سیستم XYZ، باید توسعه داده شود

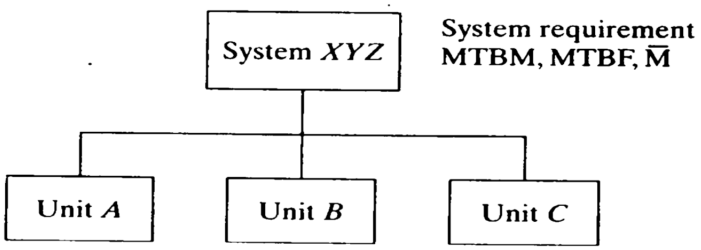
و دو تامین‌کننده مختلف برای تدارک سیستم در نظر گرفته شده است. بر پایه اطلاعات داده شده، (a) هزینه چرخه‌ی عمر را برای هر دو ساختار به‌دست آورید؛ (b) جریان هزینه را رسم کنید؛ (c) تحلیل نقطه سر به سر را انجام دهید؛ و (d) رویکرد ارجح را انتخاب کنید. در حل این مساله، همه فرضیات را واضح و دقیق بیان کنید.

سیستم XYZ در وسیله نقلیه حمل و نقل نصب می‌شود و کل تعداد سیستم‌های عملیاتی برای هر سال در چرخه‌ی عمر مشخص شده است. فرض شده است که وسایل نقلیه بین ۱۲ سیستم در حوزه A و سپس بین ۱۲ سیستم در حوزه B و ... توزیع خواهد شد.

شماره سال									
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۰	۱۰	۲۰	۴۰	۶۰	۶۰	۶۰	۳۵	۲۵

فرض شده است که هر سیستم XYZ به‌طور متوسط ۴ ساعت در روز، ۳۶۵ روز در سال کار می‌کند. کاربر وسیله نقلیه برای انجام عملیات سیستم‌های مختلف طی انجام یک ماموریت تخصیص داده شده و فرض شده است که ۱٪ از زمان او به سیستم XYZ تخصیص داده شده است

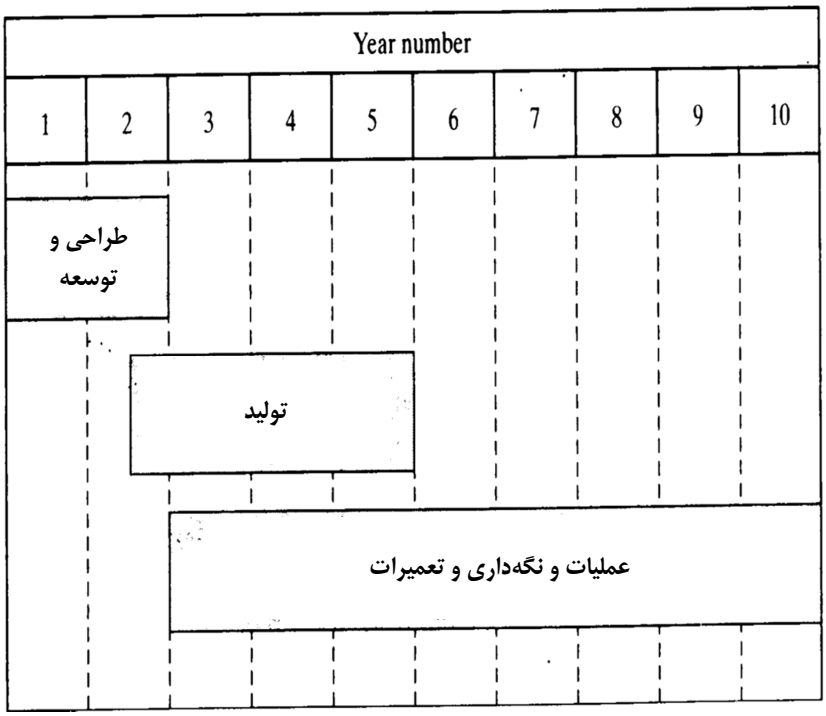
سیستم XYZ یک واحد است که جدیدا طراحی شده و هر دو ساختار کاندید دارای واحدهای A تا C به صورت زیر هستند



فاکتورهای پیش‌بینی شده قابلیت اطمینان و قابلیت نگه‌داری و تعمیرات مربوط به هر دو ساختار کاندید در جدول زیر ذکر شده است. در ارتباط با مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، دو سطح نگه‌داری و تعمیرات مدنظر است (همراه با یک کارگاه سطح میانی در هر ۵ حوزه جغرافیایی). هر ساختار دارای قابلیت خود آزمایش است که بازرسی و ایزوله کردن سریع خطا در سطح واحد را فراهم می‌کند. هیچ تجهیز پشتیبانی خارجی برای نگه‌داری وتعمیرات سازمانی برای وسیله نقلیه لازم نیست. در شرایط "نرو"، ایزوله کردن خطا برای واحد انجام شده و واحد خارج شده، با واحد یدکی تعویض می‌شود، و واحد خراب به نگه‌داری و تعمیرات میانی برای تعمیر فرستاده می‌شود. تعمیر واحد از طریق تعویض ماژول انجام می‌شود و ماژول خراب دور انداخته می‌شود (یعنی ماژول‌ها غیرقابل تعمیرند). نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه (زمان‌بندی شده) برای ساختار A و ساختار B، که در جدول داده شده است، هر ۶ ماه یکبار در کارگاه سطح میانی انجام می‌گیرد. سطح نگه‌داری و تعمیرات تامین‌کننده موردنیاز نیست؛ با این حال، تامین‌کننده وظایف پشتیبانی را هنگام نیاز فراهم می‌کند.

پارامتر	ساختار A	ساختار B
سطح سیستم (نگه‌داری و تعمیرات سازمانی)		
MTBM	۱۹۵ ساعت	۲۴۹ ساعت
$MTBM_u$ (یا MTBF)	۲۶۷ ساعت	۲۷۷ ساعت
M	۳۰ دقیقه	۳۰ دقیقه
سطح واحد (نگه‌داری و تعمیرات میانی)		
واحد A		
MTBM	۳۸۲ ساعت	۸۰۰ ساعت
$MTBM_u$	۸۰۰ ساعت	۸۰۰ ساعت
$MTBM_s$	۷۳۰ ساعت	–
Mct	۵ ساعت	۵ ساعت
Mct	۱۶ ساعت	۵ ساعت
واحد B		
MTBM	۵۰۰ ساعت	۴۲۲ ساعت
$MTBM_u$	۵۰۰ ساعت	۱۰۰۰ ساعت
$MTBM_s$		۷۳۰ ساعت
Mct	۴ ساعت	۵ ساعت
Mct	–	۱۲ ساعت
واحد C		
MTBM	۲۰۰۰ ساعت	۲۵۰۰ ساعت
Mct	۲ ساعت	۳ ساعت

نیازمندی‌های سیستم XYZ پروفایل برنامه در شکل زیر را دیکته می‌کند. فرض کنید که هزینه‌های چرخه‌ی عمر به سه دسته که در شکل نشان داده شده است شکسته می‌شود (یعنی طراحی و توسعه، تولید، و عملیات و نگه‌داری و تعمیرات).



برای ساده کردن مساله، فاکتورهای زیر فرض شده‌اند:

الف. هزینه‌های طراحی و توسعه سیستم XYZ (با در نظر گرفتن مواد و نیروی کار):

ساختار A = ۸۰۰۰۰ دلار (۵۰۰۰۰ دلار سال اول و ۳۰۰۰۰ دلار سال دوم)

ساختار B = ۱۰۰۰۰۰ دلار (۷۰۰۰۰ دلار سال اول و ۳۰۰۰۰ دلار سال دوم)

ب. هزینه‌های طراحی و توسعه برای تجهیزات پشتیبانی در سطح نگه‌داری و تعمیرات میانی:

ساختار A = ۳۰۰۰۰ دلار (۲۰۰۰۰ دلار سال اول و ۱۰۰۰۰ دلار سال دوم)

ساختار B = ۲۳۰۰۰ دلار (۱۷۰۰۰ دلار سال اول و ۶۰۰۰ دلار سال دوم)

پ. مدل‌های سیستم XYZ برای بهره‌برداری عملیاتی تولید شده و در یک سال پیش از سالی که نیاز است تحویل داده می‌شود (یعنی ۱۰ مدل تولید شده و در سال ۲ تحویل داده می‌شود، ...). هزینه‌های تولید هر سیستم XYZ (واحدهای A تا C) برابر است با

ساختار A = ۲۱۰۰۰ دلار

ساختار B = ۲۳۰۰۰ دلار

ت. تجهیزات پشتیبانی در کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی (برای نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی واحدها) در ابتدای سال هنگامی که مدل‌های عملیاتی سیستم XYZ توزیع شد (یعنی حوزه A در ابتدای سال ۳) موردنیاز است. به‌علاوه، یک مجموعه پشتیبان از تجهیزات پشتیبانی در محل تامین‌کننده نیاز است. تجهیزات پشتیبانی با هزینه زیر تولید و تحویل داده می‌شود

تجهیزات پشتیبانی ساختار A = ۱۳۰۰۰ دلار

تجهیزات پشتیبانی ساختار B = ۱۲۰۰۰ دلار

ث. واحدهای یدکی در هر کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی هنگام فعال‌سازی نیاز است. فرض کنید که یک واحد A، یک واحد B و یک واحد C مجموعه قطعات یدکی را تشکیل داده و هزینه آن معادل هزینه تولید سیستم است (یعنی ۲۱۰۰۰ دلار برای ساختار A و ۲۳۰۰۰ دلار برای ساختار B). هم‌چنین فرض کنید که یک مجموعه از قطعات یدکی در تسهیل تامین‌کننده هنگام فعال‌سازی کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی ذخیره شده باشد.

قطعات یدکی اضافی شامل اجزا می‌شود (یعنی مونتاژها، ماژول‌ها، قطعات، غیره). فرض کنید هزینه مواد ۲۵۰ دلار برای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی بوده و هزینه هر نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه ۱۰۰ دلار باشد. فاکتورهای هزینه شامل هزینه‌های موجودی مستهلک شده است.

ج. تسهیلات نگه‌داری و تعمیرات که در اینجا تعریف شده‌اند عبارت است از منابع پشتیبانی موردنیاز برای سیستم XYZ (یعنی در کارگاه نگه‌داری و تعمیرات میانی)، موجودی‌ها/قطعات یدکی، کارکنان، و داده‌ها. هزینه‌ای معادل ۱ دلار به ازای هر نفر ساعت نگه‌داری و تعمیرات برای تجهیزات اصلی فرض شده است.

چ. داده‌های نگه‌داری و تعمیرات شامل گزارشات تهیه و توزیع نگه‌داری و تعمیرات، گزارش‌های خرابی و داده‌های مرتبط با هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات است. هزینه‌های داده‌های نگه‌داری و تعمیرات معادل ۲۵ دلار به ازای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات است.

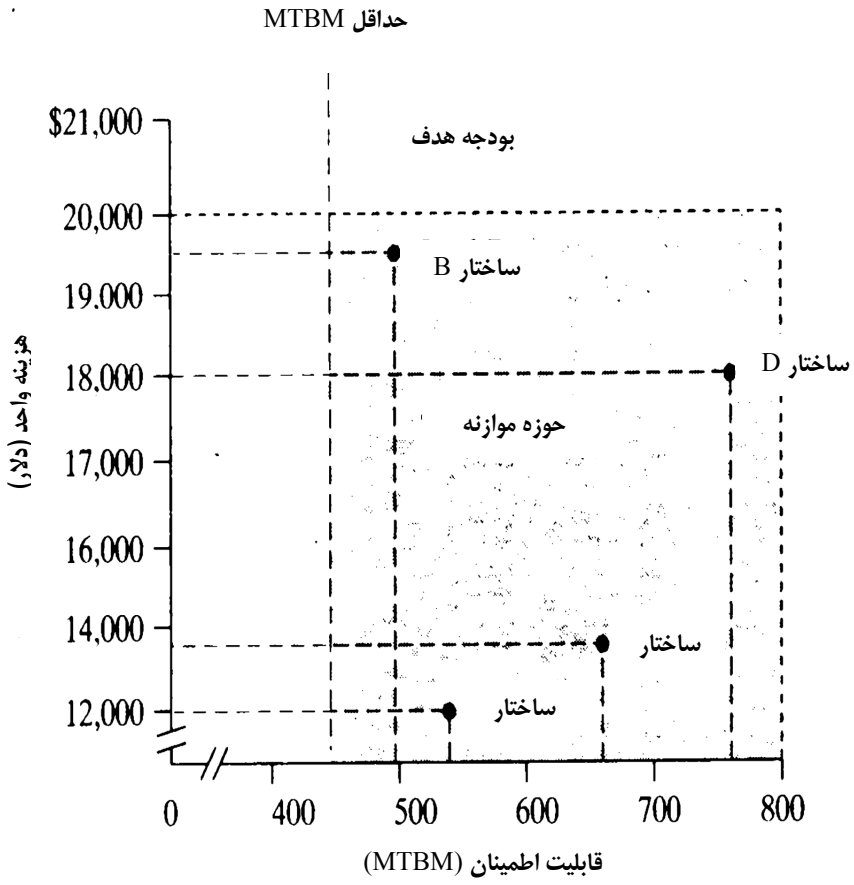
ح. برای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات در سطح سیستم، یک تکنسین با مهارت پایین با هزینه ۲۰ دلار به ازای هر نفر ساعت (تمام وقت) نیاز است. فرض شده است که این مقدار میانگین طی چرخه‌ی عمر اعمال شده و شامل فاکتورهای مستقیم، غیرمستقیم، و تورمی می‌شود. M برای هر دو ساختار ۳۰ دقیقه است.

خ. برای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی شامل واحد A، B، و C دو تکنسین به‌صورت تمام وقت نیاز است. یک تکنسین دارای مهارت پایین و با هزینه ۲۰ دلار برای هر ساعت بوده و یک تکنسین ۳۰ دلار در هر ساعت نیاز دارد. فاکتورهای مستقیم، غیرمستقیم و تورمی در این مقدار میانگین لحاظ شده است.

د. برای هر فعالیت نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه یک تکنسین با مهارت بالا و با هزینه ۳۰ دلار در ساعت به‌صورت تمام وقت نیاز است.

ذ. برای عملیات سیستم XYZ، هزینه تخصیص داده شده مربوط به کاربر ۴۰ دلار در ساعت است.

۲۳. با مراجعه به شکل، چهار ساختار ممکن شناسایی شده است. کدامیک را انتخاب می‌کنید؟ چرا؟



۲۴. شکلی که نتایج تحلیل نقطه سر به سر را دنبال می‌کند تحت‌تاثیر یک تحلیل حساسیت است. چه گام‌هایی برای کاهش ریسک شناسایی شده بر می‌دارید؟

۲۵. یک سیستم ساده به دلخواه انتخاب کرده و تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر را برای آن انجام دهید.

۲۶. مزایای تحلیل چرخه‌ی عمر را ذکر کنید. چه موانعی در انجام آن وجود دارد؟ چگونه برخی از این موانع را می‌توان رفع کرد؟

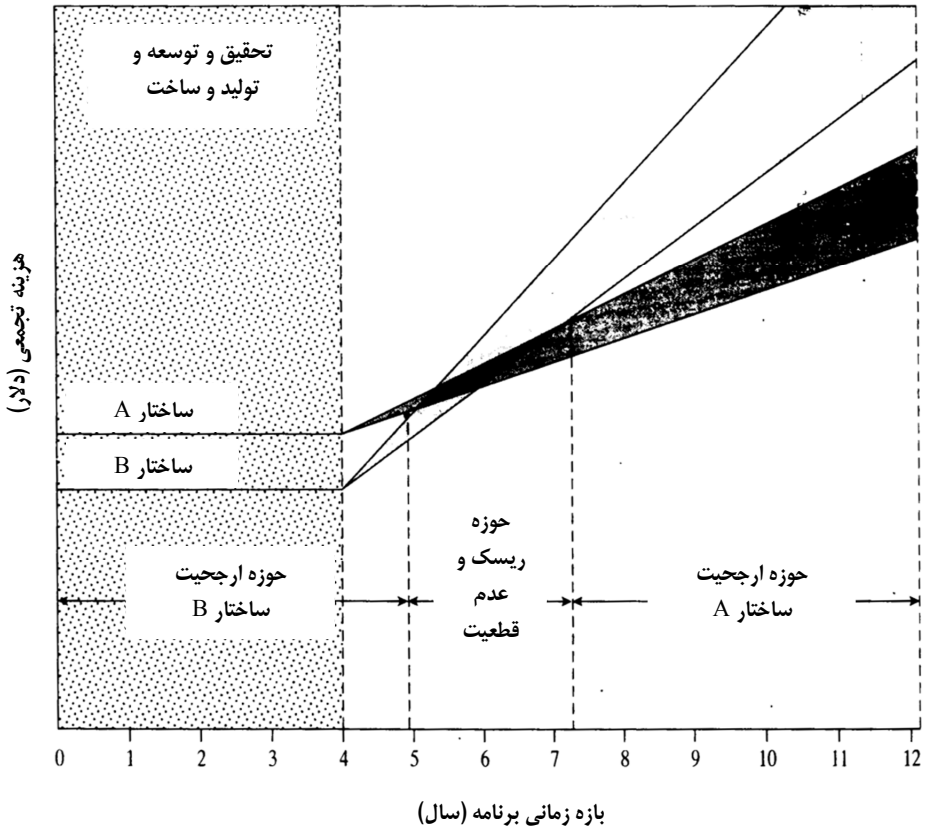
۲۷. از معادله ۷–۲ استفاده کرده و جنبه‌های الزامی در ارزیابی مساله بهینه‌سازی REPS زا بحث کنید.

۲۸. از معادله ۷–۳ استفاده کرده و جنبه‌های الزامی در ارزیابی مساله بهینه‌سازی REPS زا بحث کنید.

۲۹. محاسباتی انجام دهید که تایید کند که معادل سالانه هزینه چرخه‌ی عمر برای سیستم کاندید ۲ در جدول ۱۷–۱۴ به درستی ۴۶۸۸۲۵ محاسبه می‌شود.

۳۰. نشان دهید احتمال ایجاد کمبود یک واحدی یا بیش‌تر برای سیستم کاندید ۲ در جدول ۱۷–۱۴ حقیقتا ۰/۲۷ است.

۳۱. Life-Cycle Cost Calculator را دانلود کرده هر گزینه در قسمت ۱۷–۴ را به‌صورت گرافیکی نشان دهید.



۳۲. Life-Cycle Cost Calculator را دانلود کرده و تحلیل حساسیت را بر روی متغیرهای مستقل از طراحی و با یک نرخ بهره متفاوت برای مثال قسمت ۱۷–۴ اجرا کنید.

۳۳. REPS را دانلود کرده و از آن برای تولید و ارزیابی یک گزینه طراحی دیگر برای مثال قسمت ۱۷–۵ استفاده کنید.

بخش پنجم- مدیریت مهندسی سیستم‌ها

پیاده‌سازی موفق مفاهیم، اصول، مدل‌ها و روش‌های مهندسی و تحلیل سیستم‌ها نیازمند تنظیم بسیاری از جنبه‌های مدیریتی و فنی است. ۱۷ فصل در بخش‌های اول تا چهارم این کتاب بر حوزه‌های فنی مهندسی سیستم‌ها تمرکز داشت، در حالی‌که قسمت پنجم (که از دو فصل تشکیل شده است) موضوعات برنامه‌ریزی، سازماندهی و مدیریت را در دستور کار قرار داده است. اگرچه حوزه‌های فنی بر حوزه‌های مدیریتی غالب است، اما موفقیت فنی بدون مدیریت درست ممکن نیست.

مهندسی سیستم‌ها در ظاهر برای پاسخ‌گویی به یک نیاز است. با این حال، بهترین رویکرد فنی بدون مدیریت صحیح محقق نمی‌شود، هر چقدر هم که از روش‌های مناسب مهندسی سیستم‌ها استفاده شود. پیاده‌سازی اثربخش و کارای برنامه نیازمند برنامه‌ریزی به‌موقع، استقرار ساختارهای سازمانی مناسب، محیط مهندسی تعاملی و کنترل‌های پیوسته مدیریتی است. برای حصول اطمینان از تحقق خروجی‌های برنامه که انتظارات مشتری را برآورده می‌کنند، ترکیب مناسبی از موضوعات فنی و مدیریتی موردنیاز است.

همان‌طور که در شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ نشان داده شده است، پیاده‌سازی درست مهندسی سیستم‌ها با استقرار نیازمندی‌ها از طریق فرایند برنامه‌ریزی آغاز می‌گردد که طی فاز طراحی مفهومی پایه‌گذاری می‌شود. این برنامه‌ریزی شامل شناسایی و زمان‌بندی وظایف و تکالیف مهندسی سیستم‌ها، توسعه ساختار سازمانی اثربخش و استقرار قابلیت کنترل می‌شود. بازخورد به‌موقع در ارتباط با وضعیت برنامه الزامی است. برنامه‌ریزی در ابتدای کار شروع شده و با توسعه برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) توسعه می‌یابد و این اطمینان را ایجاد می‌کند که فرایند مهندسی سیستم‌ها به‌صورت اثربخش پیشرفت کرده و خروجی‌های مطلوب را تولید می‌کند.

هدف بخش پنجم فراهم کرد یک دید کلی در مورد وظایف مدیریت است که مربوط به پیاده‌سازی جامع برنامه مهندسی سیستم‌ها می‌شود. این موضوعات در دو فصل بررسی می‌شوند. فصل ۱۸ به استقرار سازماندهی و برنامه‌ریزی مهندسی سیستم‌ها پرداخته و بر حفظ فعالیت‌های مدیریت، کنترل و ارزیابی تاکید دارد. این فعالیت‌ها برای پیاده‌سازی اثربخش مدیریت مهندسی سیستم‌ها حیاتی هستند. این فصول در کنار یکدیگر مفهوم پیدا کرده و باید با هم مورد مطالعه قرار گیرند.

۱۸

برنامه‌ریزی و سازمان مهندسی سیستم‌ها

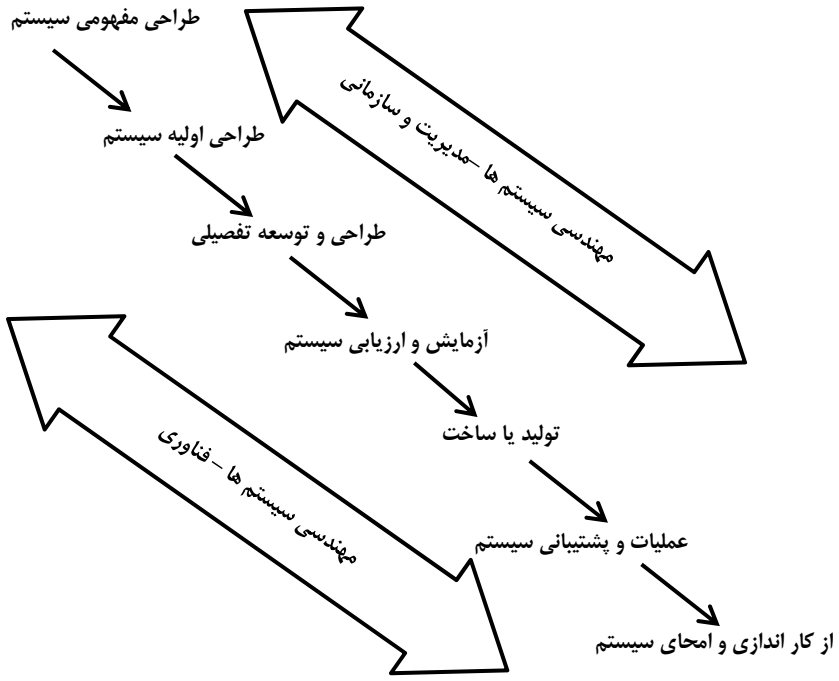
همان‌طور که در مقدمه بخش پنجم آورده شد، پیاده‌سازی موفق فرایند مهندسی سیستم‌ها و نیازمندی‌های مرتبط شرح داده شده در ۱۷ فصل گذشته‌ی کتاب نه تنها به فناوری بلکه هم‌چنین به روش مدیریت و سازماندهی، به‌شدت وابسته است. همان‌طور که در شکل ۱۸–۱ نشان داده شده است، ترکیب تکرار و ادغام در هر دو سو لازم است. این فصل، اولین فصلی است که به جنبه‌های مدیریتی و سازمانی مرتبط با مهندسی سیستم‌ها می‌پردازد.

یک گام ابتدایی در مدیریت فرایند مهندسی سیستم‌ها، توسعه یک برنامه پیاده‌سازی و یک ساختار سازمانی است که پاسخ‌گوی نیازهای برنامه باشد. با توجه به شکل ۲–۴، برنامه‌ریزی مهندسی سیستم‌ها با شناسایی نیاز یک مشتری و تعریف نیازهای برنامه (پروژه) برای طراحی، توسعه، تولید و تحویل سیستمی شروع می‌شود که جوابگو بوده و از نظر هزینه قابل اجرا باشد. گرچه هر برنامه به گونه‌ای متفاوت است، ولی برنامه‌ریزی کلی آن‌ها معمولا از طریق یک برنامه مدیریت دستورکار (PMP) یا مشابه آن انتشار می‌یابد. از این برنامه‌ی سطح بالا، برنامه‌ی مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) یا برنامه‌ی مهندسی سیستم‌ها (SEP) مشتق می‌شود تا پیاده‌سازی فعالیت‌های فنی شرح داده شده در فصل‌های پیشین این کتاب را هدایت کند.

SEMP که بایستی در طول فاز طراحی مفهومی آماده شده باشد، راهنمایی‌های لازم برای بسیاری از برنامه‌های مدیریت و طراحی یک دستورکار داده شده را تامین می‌کند. در درون SEMP شناسایی وظایف دستورکار مهندسی سیستم‌ها، ساختار شکست کار (WBS)، زمان‌بندی وظیفه و هزینه‌های لازم و ساختار سازمانی موردنیاز برای پیاده‌سازی دستورکار گنجانده شده است. در توسعه یک روش سازمانی، ضروری است محیطی استقرار یابد که ظرفیت تنظیم بهینه و موثر علوم پشتیبان و مهندسی مختلف را که در فرایند طراحی سیستم نهایی مشارکت دارند، داشته باشد. هم‌چنین مدیریت مناسب نیز بایستی وجود داشته باشد تا ارتباطات خوب بین خطوط سازمانی بهبود یافته و رویکرد بین رشته‌ای صحیحی برای طراحی و گسترش سیستم پرورش یابد.

هدف اولیه‌ی مدیریت مهندسی سیستم‌ها، تسهیل تصمیم‌گیری‌های طراحی متعدد (ارجاع به شکل ۲-۶) در یک سیستم فعال است که برای مشتری ارزش بالایی دارند. بر این اساس، هدف این فصل ارائه‌ی درکی از نیازهای سازمانی و برنامه‌ریزی مهندسی سیستم‌ها برای یک دستورکار معمولی از طریق در نظر گرفتن فاکتورهای زیر است:

- نیازهای برنامه‌ریزی دستورکار مهندسی سیستم‌ها،
- توسعه یک برنامه مهندسی سیستم‌ها (SEMP)- بیان کار (SOW)، وظایف دستورکار مهندسی سیستم‌ها، ساختار شکست کار (WBS)، زمان‌بندی وظایف، به تصویر کشیدن هزینه‌ها برای وظایف دستورکار و واسطه‌گری با سایر فعالیت‌های برنامه‌ریزی،
- سازمان مهندسی سیستم‌ها – توسعه‌ی ساختار سازمانی، روابط مشتری/تولیدکننده/ تامین‌کننده، سازمان و وظایف مشتری، سازمان و وظایف تولیدکننده، سازمان و وظایف تامین‌کننده و استخدام افراد سازمان (نیازمندی‌های منابع انسانی).



شکل ۱۸- ۱- مدیریت و فناوری به‌کار گرفته شده در فرایند مهندسی سیستم‌ها.

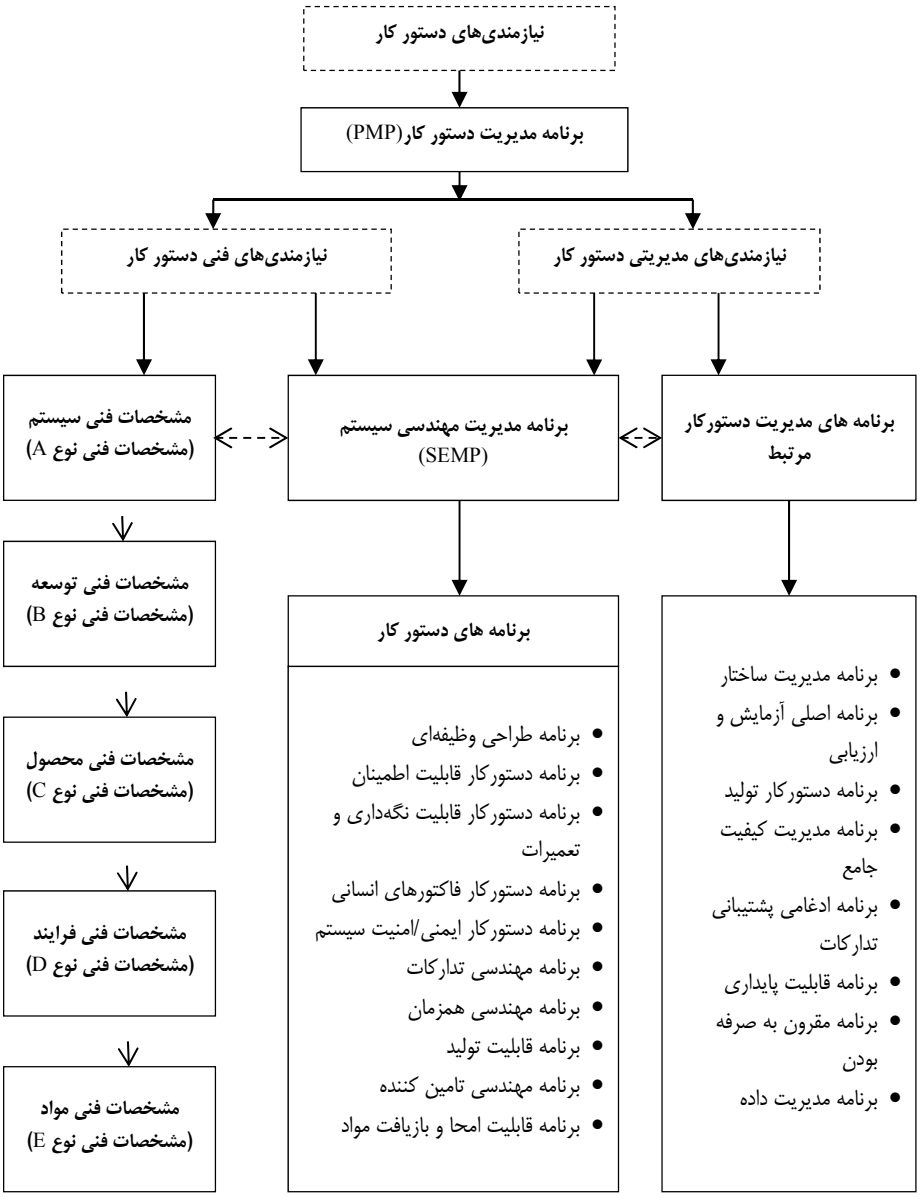
۱۸-۱- برنامه‌ریزی دستورکار مهندسی سیستم‌ها

هنگامی که نیاز برای یک سیستم جدید (یا بازمهندسی شده) شناسایی می‌شود، برنامه‌ریزی ابتدایی با تهیه برنامه‌ی مدیریت دستورکار (PMP) آغاز می‌شود که به‌نوبه‌ی خود منجر به توسعه‌ی برنامه‌ی مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) می‌شود. این برنامه‌ریزی اولیه‌ی سیستم، که در بخش ۳-۲ شرح داده شده است، منجر به توضیح وظایفی می‌شود که برای خلق سیستم باید انجام شوند و هم‌چنین زمان‌بندی‌های قابل اعمال، نیازمندی‌های منابع دستورکار و روش سازمانی است. این برنامه‌ریزی ابتدایی با شناسایی نیازمندی‌های مرتبط با مدیریت برای فاز طراحی سیستم شروع می‌شود. در ادامه نیازمندی‌های قابل اعمال برای فاز طراحی سیستم شناسایی خواهد شد و به همین

ترتیب ادامه خواهد یافت. این نیازمندی‌ها نه تنها باید شامل آن‌هایی باشند که مربوط به سیستم جدید تحت طراحی است بلکه بایستی باید شامل نیازمندی‌های واسطهای با سایر سیستم‌هایی باشند که ممکن است در یک زیرسیستم (SOS) به‌کار رفته باشند.

هنگامی که دستورکار در فاز طراحی مفهومی تکامل می‌یابد، نیازمندی‌های فنی سیستم به‌وسیله‌ی تعریف نیازمندی‌های عملیاتی، نگه‌داری و پشتیبانی، شناسایی و اولویت‌بندی معیارهای کارایی فنی (TPM)، تحلیل وظیفه‌ای و اختصاص معیارهای طراحی از سطح سیستم و به سطوح پایین‌تر زیرسیستم‌های اصلی و سایر عناصر سیستم مشخص می‌شوند. سپس این نیازمندی‌های سطح سیستم در یک مشخصات فنی سیستم (نوع A) گنجانده می‌شوند. با ارجاع به شکل ۳–۱ و ۳–۲۷ دیده می‌شود که این مشخصات سطح بالا، پایه‌های تمامی مشخصات سطح پایین را پی‌ریزی می‌کنند (برای مثال انواع مشخصات B، C، D و E).

در هنگام تهیه هر دوی برنامه‌ها و مشخصات، مهم است که روابط مناسب بین این دو مشخص شوند و اطمینان حاصل شود که مستندسازی برنامه‌ریزی، مشخصات مناسب را برگرداند (و برعکس). به زبان ساده‌تر، هر دو محدوده‌ی عمل (مستندسازی) باید با یکدیگر تعامل داشته و به‌صورت دو طرفه یکدیگر را تایید و حمایت کنند. شکل ۱۸–۲ (که تعمیمی از شکل ۳–۱ است) این روابط را با تاکید بر جنبه‌ی برنامه‌ریزی طیف نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- ۲- برنامه‌های دستورکار و مشخصات فنی.

۱۸-۲- برنامه‌ریزی مدیریت مهندسی سیستم‌ها

SEMP کلید سند مدیریت است که فعالیت‌ها، مایلستون، سازماندهی و نیازمندی‌های منابع موردنیاز برای دست‌یابی به وظایف/تکالیف بحث شده در خلال این متن را پوشش می‌دهد. اهداف SEMP که معمولا در طول فاز طراحی مفهومی توسعه می‌یابد، تامین ساختار، سیاست‌ها و فرایندهایی است که ادغام فعالیت‌های مهندسی و پشتیبانی موردنیاز را برای طراحی سیستم و توسعه آن به‌کار می‌برد. با ارجاع به شکل ۱۸-۲ دریافته می‌شود که SEMP ادغام تمامی برنامه‌های طراحی محور را به‌کار می‌گیرد و اتصالات ارتباطی موردنیاز با سایر فعالیت‌های برنامه‌ریزی کلیدی (برای مثال برنامه‌ی مدیریت ساختار، برنامه‌ی مدیریت کیفیت نهایی، برنامه‌ی قابلیت پایداری و برنامه‌ی مدیریت داده) را تامین می‌کند.

در توسعهSEMP، فرمت به‌کار رفته ممکن است به نوعی تغییر کند و وابسته به نوع و ماهیت سیستم موردنظر و روش ارجح سازمانی است. در هر رخداد، برنامه بایستی به شکل متناسب با بزرگی رخداد پیش‌بینی شده تنظیم شود. دو مثال برای فرمت قالب SEMP در شکل‌های ۱۸-۳ و ۱۸-۴ نشان داده شده‌اند.

با ارجاع به شکل ۱۸-۴ بخش یک (که توسط نویسنده ترجیح داده می‌شود)، توضیحی از نیازهای دستورکار، SOW، WBS، توضیح تکالیف مهندسی سیستم‌ها، نمایش هزینه‌ها و زمان‌بندی‌های مربوطه، ساختار سازمانی و تمامی وظایف مدیریتی موردنیاز برای انجام یک دستورکار موفق در پاسخ‌گویی به اهداف مهندسی سیستم‌ها آمده است. بخش دو به پوشش فرایند مهندسی سیستم‌ها اختصاص دارد که در فصل‌های ۲ تا ۶ شرح داده شده است. هدف، شرح فرایندی است که باید برنامه‌ریزی و مدیریت شود و یا پایه‌ای برای تمام نیازمندی‌های مدیریت و برنامه‌ریزی دستورکار باشد. بخش چهار به پوشش ادغام اصول کلیدی مهندسی مناسب می‌پردازد که برای پیاده‌سازی فرایند شرح داده شده در بخش دو لازم است و شامل ادغام فعالیت‌های

برنامه‌ریزی مرتبط با مهندسی قابلیت اطمینان(فصل۱۲)، مهندسی قابلیت نگه‌داری و تعمیرات(فصل۱۳)، مهندسی امنیت و عناصر انسانی(فصل ۱۴)، قابلیت پشتیبانی و تدارکات (فصل۱۵) و سایر اصول مهندسی قابل اعمال می‌باشد. بنابراین، SEMP پیشنهاد شده شامل توضیحی برای نیازمندی‌های مدیریت برای دستورکار داده شده، فعالیت‌هایی که باید مدیریت شوند، واسطهایی که بایستی حفظ شوند و منابع موردنیاز برای پیاده‌سازی دستورکار است.

۱۸-۲-۱- شرح کار

SOW یک توضیح روایی از کار موردنیاز در یک پروژه داده شده است. SEMP بایستی از SOW کلی پروژه شرح داده شده در PMP توسعه یابد و بایستی موارد زیر را شامل شود:

۱. اظهار خلاصه‌ای از تکالیفی که باید انجام شوند.

۲. شناسایی نیازمندی‌های ورودی از تکالیف دیگر. این ممکن است شامل نتایجی از سایر تکالیف انجام شده درون پروژه، وظایف انجام شده توسط مشتری یا وظایف انجام شده توسط تامین‌کننده باشد.

۳. ارجاعاتی به مشخصات قابل اعمال (برای در برگرفتن مشخصات سیستم نوع A)، استانداردها، فرایندها و مستندسازی مرتبط موردنیاز برای تکمیل حوزه شرح داده شده‌ی کار. این ارجاعات بایستی به‌عنوان نیازمندی‌های کلیدی در درخت مستندسازی شرح داده شده در شکل ۴-۱ شناخته شوند.

۴. توضیحی از نتایج مشخصی که باید به‌دست آید. این ممکن است شامل تجهیزات قابل تحویل، نرم‌افزار، اطلاعات طراحی، گزارش‌ها یا مستندسازی مرتبط به همراه زمان‌بندی پیشنهادی تحویل باشد.

در تهیهSOW، خطوط راهنمای عمومی زیر مناسب به نظر می‌رسند:

۱. SOW بایستی به‌طور مناسبی کوتاه و دقیق باشد (بیش‌تر از دو صفحه نشود) و باید به‌صورت شفاف و دقیق نوشته شود.

۲. از هیچ تلاشی برای جلوگیری از ابهام و احتمال سوءبرداشت توسط خواننده مضایقه نشود.

۳. نیازمندی‌ها را با جزئیات کافی شرح دهید تا از شفافیت اطمینان حاصل شود و به هر دو جنبه‌ی کاربرد عملی و برداشت‌های حقوقی ممکن توجه گردد. بیش از اندازه یا کم‌تر از مقدار لازم توضیح ندهید.

۴. از تکرارهای غیرلازم و داخل کردن موارد فرعی و نیازمندی‌ها بپرهیزید. این کار ممکن است منجر به افزایش بیهوده هزینه شود.

۵. نیازمندی‌ها و مشخصاتی را که به آن‌ها در مستندسازی ارجاع شده، تکرار نکنید.

SOW توسط افراد بسیاری با پیش‌زمینه‌های متفاوت خوانده خواهد شد (برای مثال مهندسان، حسابداران، مدیران قرارداد، برنامه‌ریزان و وکلا)، هیچ سوال بی‌پاسخی نبایستی برای حوزه کار موردنظر وجود داشته باشد و باید این پایه‌ای برای تعریف و هزینه‌های تکالیف شرح داده شده برای تشکیل نیازمندی‌های پیمانکاران، پشتیبانان و غیره را شکل دهد.

برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها

(INCOS: "Systems Engineering and Management")

۱. صفحه‌ی عنوان، فهرست، طرح کلی، مستندات کاربردی

۲. فرایند مهندسی سیستم‌ها

۲-۱. برنامه‌ریزی فرایند مهندسی سیستم‌ها: برنامه‌ریزی پایگاه داده تصمیم، ورودی‌های فرایند، اهداف فنی، ساختار شکست کار، آموزش، استانداردها و رویه‌ها، تخصیص منابع، محدودیت‌ها و تصدیق اعتبار.

۲-۲. تحلیل نیازمندی‌ها: قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری؛ قابلیت نگه‌داری و تعمیرات، قابلیت پشتیبانی، و پشتیبانی ادغامی تدارکات (ILS)؛ انطباق الکترومغناطیسی؛ ادغام مهندسی فاکتورهای انسانی و سیستم‌های انسانی؛ ایمنی، خطرات سلامت و آثار محیطی؛ امنیت سیستم؛ قابلیت تولید؛ آزمایش و ارزیابی؛ قابلیت آزمایش و کشف خطای ادغامی؛ منابع رایانه‌ای؛ قابلیت حمل و نقل؛ پشتیبانی زیرساختار و دیگر تخصص‌های مهندسی.

۲-۳. تحلیل وظیفه‌ای: طرح کلی، رویکرد، روش‌ها، رویه‌ها و ابزار (نمودار بلوکی وظیفه‌ای سطح سیستم).

۲-۴. ترکیب: رویکردها و روش‌های تبدیل معماری وظیفه‌ای به معماری فیزیکی، تعریف مفاهیم سیستم جایگزین، تعریف واسطه‌های فیزیکی و انتخاب محصول و فرایند ارجح.

۲-۵. تحلیل و کنترل سیستم: مطالعات موازنه، تحلیل‌های اثربخشی سیستم/هزینه، مدیریت ریسک، مدیریت ساختار، مدیریت واسطه، مدیریت داده، زمان‌بندی اصلی مهندسی سیستم‌ها (SEMS)، مدیریت عملکرد فنی (TPM)، بازبینی‌های فنی (بازبینی‌های طراحی)، کنترل تامین‌کننده و قابلیت رهگیری نیازمندی‌ها.

۳. گذار به فناوری‌های حیاتی: فعالیت‌ها، ریسک‌ها، معیارها برای انتخاب فناوری‌ها و گذار به این

فناوری‌ها

۴. **ادغام مهندسی سیستم‌ها**:سازماندهی تیمی، تصدیق اعتبار فناوری، تایید فرایند، آزمایش مهندسی تولید، آزمایش و ارزیابی، پیاده‌سازی طراحی‌های نرم‌افزار برای آیتم‌های نهایی سیستم، مهندسی پایداری و پشتیبانی راه‌حل مساله و دیگر تکالیف پیاده‌سازی مهندسی سیستم‌ها.

۵. **فعالیت‌های اضافه شده مهندسی سیستم‌ها:** آیتم‌های دیر تحویل، ابزارهای مهندسی، طراحی برای هزینه به‌عنوان یک متغیر مستقل، مهندسی ارزش، برنامه ادغام سیستم، قابلیت انطباق با فعالیت‌های پشتیبان و دیگر برنامه‌ها و کنترل‌ها.

۶. **زمان‌بندی مهندسی سیستم‌ها:** زمان‌بندی اصلی مهندسی سیستم‌ها (SEMP)، زمان‌بندی تفصیلی مهندسی سیستم‌ها (SEDS)

۷. **شاخص‌های فرایند مهندسی سیستم‌ها:** هزینه و زمان‌بندی مدیریت عملکرد و دیگر تکنیک‌های کنترل فرایند (چارت‌های کنترلی).

۸. **نقش و وظیفه بازبینی‌ها و ممیزی‌ها.**

۹. **یادداشت‌ها و پیوست‌ها.**

شکل ۱۸- ۳- طرح کلی برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP).

منبع: INCOSE-TP-2003-016-02, Systems Engineering Handbook (San Diego, CA: International Council on Systems Engineering, June 2004).

شکل ۱۸- ۴- برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP)- یک رویکرد کلی.

منبع: *Systems Engineering Management Guide,* Systems Engineering Management College, 1990

۱۸-۲-۲- وظایف دستورکار مهندسی سیستم‌ها

همان‌طور که قبلا شرح داده شد، مهندسی سیستم‌ها، طیف وسیعی از فعالیت‌ها را پوشش می‌دهد. حتی ممکن است این‌گونه به نظر آید که مهندسی سیستم‌ها یا سازماندهی مهندسی سیستم‌ها تمام کارها را انجام می‌دهد. هرچند که نه قصد آن را دارد و نه در عمل چنین است، کامل کردن اهداف مهندسی سیستم‌ها نیاز به درگیر شدن مستقیم یا غیرمستقیم در تقریبا تمامی صورت‌های فعالیت‌های دستورکار دارد. چالش در شناسایی وظایف (یا تکالیفی) است که با مجموع سیستم به‌عنوان یک شی سروکار دارند و هنگامی که کاملا به انجام رسیدند، تاثیر مثبتی بر بسیاری از تکالیف مرتبط یا تکالیف زیرین دارند که بایستی به انجام برسند. اگرچه هر دستورکاری نسبت به سایر دستورکارها تفاوت دارد، اما تکالیف زیر در سازماندهی مهندسی سیستم‌ها توصیه می‌شود:

۱. تحلیل نیازها و امکان‌سنجی آن‌ها (رجوع شود به بخش ۳-۱ و ۳-۳). این عملیات‌ها بایستی جزو وظایف سازمانی مهندسی سیستم‌ها قرار گیرند، زیرا با سیستم به‌عنوان یک شی برخورد می‌کنند و در تعریف اولیه و متعاقبا تعریف نیازمندی‌های سیستم نقش بنیادی دارند. یک واسط قوی و ارتباطات خوب با مشتری/کاربر موردنیاز است.

۲. نیازمندی‌های عملیاتی سیستم و مفهوم نگه‌داری تعریف و شناسایی شوند و معیارهای کارایی فنی اولویت‌بندی گردند. (رجوع شود به بخش ۳-۴ تا ۳-۶). نتایج این فعالیت‌ها در تعریف نهایی نیازمندی‌های سطح سیستم گنجانده می‌شوند و بنیان طراحی سیستم از بالا به پایین می‌باشند. مطالعات موازنه انجام شده و به یک درک عالی از واسطهای سیستم و اهداف مشتری/کاربر نیاز است.

۳. یک تحلیل وظیفه‌ای در سطح سیستم انجام شده و به نیازمندی‌های سطح پایین‌تر نسبت داده می‌شوند (ارجاع به بخش ۳-۷). ضروری است که یک خط مبنای وظیفه‌ای

خوب تعریف شود که از آن بتوان نیازمندی‌های منابع مشخص را شناسایی کرد. این خط مبنا به‌عنوان یک قالب مشترک منابع استفاده شده و به‌عنوان منابع ورودی برای بسیاری از فعالیت‌های مهندسی و پشتیبانی که در آینده انجام خواهد شد، استفاده می‌شود. اگرچه سازمان مهندسی سیستم‌ها، تحلیل وظیفه‌ای را به‌طور کامل انجام نمی‌دهد، یک نقش رهبری مقتدر برای تامین بنیان لازم در سطح سیستم ضروری است.

۴. مشخصات فنی سیستم نوع A (رجوع شود به بخش ۳–۹) آماده شوند. این مشخصات نشان دهنده‌ی سطح بالاترین سند فنی برای طراحی می‌باشند و بنیان توسعه‌ی تمامی مشخصات فنی زیردستی خواهند بود. سازمان مهندسی سیستم‌ها، مسئول تهیه این سند سطح بالا بوده و باید تضمین کند که تمامی مشخصات فنی زیردستی رهگیری شده و به‌صورت دو طرفه یکدیگر را تایید و حمایت می‌کنند.

۵. برنامه‌ی اصلی تست و ارزش‌گذاری آماده شود (TEMP: رجوع شود به بخش ۶–۳). زیرا این سند، روش تایید سیستم را بازتاب می‌دهد. سازمان مهندسی سیستم‌ها باید یک نقش رهبری را در نظر بگیرد که ارتباط بین PTMهای اولویت‌بندی شده، سطوح پیچیدگی طراحی، ریسک مربوط به پیش رفتن با روش‌های داده شده طراحی و غیره را تضمین کند. از آن‌جا که نیازمندی‌های کمی مشخص در ابتدا تعریف شده‌اند، یک برنامه‌ی قابل اتکا بایستی برای تایید این نیازمندی‌ها برپا شود. سازمان مهندسی سیستم‌ها بایستی تضمین کند که یک تست ادغام شده بتواند با ارزش‌گذاری مشخصات فنی سیستم، SEMP و سایر برنامه‌های طراحی تعامل موثر داشته باشد.

۶. برنامه‌ی مدیریت مهندسی سیستم‌ها تهیه شود (SEMP). این برنامه شامل سند مهندسی ادغام سطح بالایی است که تضمین می‌کند اهداف مهندسی سیستم‌ها برآورده

شده است و چنان‌چه لازم است بازبینی و تحت رهبری سازمان مهندسی سیستم‌ها، پیاده‌سازی شود (رجوع شود به شکل‌های ۱۸–۲ و ۱۸–۴).

۷. سنتز، تحلیل و ارزش‌گذاری انجام شود (رجوع شود به بخش ۲–۵ و ۳–۸). اگرچه این محدوده در بین جامعه‌ی طراحی فعالیت ممتد و گسترده دارد، سازمان مهندسی سیستم‌ها باید یک تابع "از نظر افتادن" را تامین کند تا بتواند تصمیم‌های اصلی را به روز و همگام با مشخصات سیستم نگه‌دارد، هم‌چنین باید نتایج مطالعات موازنه‌ای را به‌خوبی مستندسازی کنند و ریسک‌های طراحی را شناسایی و مشخص نمایند.

۸. برنامه‌ریزی، تنظیم و اجرای ملاقات‌های بررسی طراحی رسمی (رجوع شود به بخش ۳–۱۰، ۴–۸ و ۵–۸). اجرای بررسی‌های طراحی رسمی برای تضمین این‌که فرایند مهندسی سیستم‌ها به‌صورت مناسب پیاده‌سازی می‌شود، خطوط مبنای وظیفه‌ای به‌خوبی تعریف شده‌اند (رجوع شود به شکل ۲–۴)، مدیریت ساختار به‌طور مناسب پیاده‌سازی شده است و تمامی اعضای تیم طراحی، مبنای تصمیم‌های قبلی را درک کرده‌اند و همان پایگاه داده طراحی را رهگیری می‌کنند که لازم است. سازمان مهندسی سیستم‌ها یا نماینده‌ی آن، بایستی نشست‌هایی را برای بررسی طراحی رسمی برگزار نمایند.

۹. تحت نظر گرفتن و بررسی فعالیت‌های تست سیستم و ارزش‌گذاری (رجوع شود به ۶–۶). لازم است که تابع "از نظر افتادن" سازمان مهندسی سیستم‌ها به بررسی نتایج تست و ارزش‌گذاری (و طبعا تایید) بپردازد تا مطمئن شود که نیازمندی‌های سیستم تامین شده است. اگر چنین نبود، باید به سرعت مشکل شناسایی شده و با پیاده‌سازی اعمال تصحیح کننده‌ی مناسب تعقیب شود.

۱۰. تنظیم و بررسی تمامی تغییرات و اصلاحات طراحی رسمی در جهت بهبود (رجوع شود به بخش ۵–۹ و شکل ۵–۱۱). سازمان مهندسی سیستم‌ها یا نماینده‌ی مشخص آن، بایستی نشست‌های هیات کنترل تغییرات (CCB) را که در شکل ۵–۱۱ مشخص شده‌اند، برگزار کند تا مطمئن شود که (۱) در صورت اعمال یک تغییر آیا نیازهای سیستم (برای مثال تمامی TPMها) هم‌چنان برآورده می‌شود و (۲) تمامی تغییرات پیشنهادی با بررسی دقیق اهمیتشان برای ماموریت، تاثیر بر سیستم، هزینه چرخه‌ی عمر(LCC) و فاکتورهای محیطی مورد ارزیابی قرار بگیرند. (۳) تغییرات جامع و برنامه‌ریزی‌های دوباره‌کاری توسعه یابند و (۴) تغییرات اعمال شده به‌صورت موثر و متناسب با زمان همکاری می‌کنند. به‌کار بردن مدیریت ساختار خوب در این‌جا ضروری است.

۱۱. آغاز و راه‌اندازی فعالیت‌های ارتباطی جاری موردنیاز در طول فازهای تولید/ ساخت، به‌کارگیری و پایداری پشتیبانی و بازنشسته کردن و دور ریختن جنس (رجوع شود به فصل ۱۵ و ۱۶). سازمان مهندسی سیستم‌ها باید نظارت بر فعالیت‌های تولید/ساخت را حفظ کند تا اطمینان حاصل شود که سیستم همان‌طوری که طراحی شده است، تولید/ساخت را انجام می‌دهد. علاوه‌بر این، یک سطح نظارت دائمی بر کاربری میدانی مصرف‌کننده/کاربر نیز برای تامین بازخورد در جهت تایید سیستم ضروری است.

این ۱۱ تکلیف ابتدایی یک مثال از آن‌چه را که برای یک دستورکار معمولی در ابعاد بزرگ مناسب به نظر می‌رسد، شامل می‌شود. اگرچه نیازمندی‌های دقیق ممکن است از یک مثال به دیگری تغییر کنند. هدف، شناسایی تکالیفی است که با گرایش به سیستم و برای دست‌یابی به نیازمندی‌های شرح داده شده در فصل‌های قبل ضروری است. اهداف نهایی تضمین این دو نکته است که (۱) نیازمندی‌های سیستم از ابتدا به‌خوبی تعریف شده‌اند. (۲) خصیصه‌ها و مشخصات

مناسبی برای طراحی به‌کار رفته‌اند و (۳) سیستم با توجه به نیازمندی‌های مشخص شده در ابتدا، مورد تایید بوده است.

۱۸-۲-۳- ساختار شکست کار

یکی از اولین گام‌ها در فرایند برنامه‌ریزی دستورکار، پس از تولید SOW گسترش یک WBS است. WBS یک درخت محصول‌گرا است که منجر به شناسایی وظایف، فعالیت‌ها، تکالیف، زیرتکالیف، بسته‌های کاری و غیره می‌شود که بایستی برای کامل کردن یک دستورکار انجام پذیرند. WBS سیستمی (یا محصولی) را نشان می‌دهد که قرار است گسترش یابد، تولید شود، به‌کار گرفته شود یا پشتیبانی شود. بنابراین باید تمامی عناصر کاری را که باید به انجام برسند، به تصویر بکشد. WBS یک چارت سازمانی با استفاده از وظایف و تکالیف کارکنان پروژه نیست اما سازمان بسته کاری آماده شده برای دلایل طراحی دستورکار، بودجه‌بندی، قرارداد و گزارش دادن را نشان می‌دهد.

شکل ۱۸–۵ روشی را برای گسترش یک WBS به تصویر می‌کشد. در طول مراحل اولیه‌ی برنامه‌ریزی، یک ساختار شکست کار خلاصه از (SWBS) بایستی آماده شود که شامل تمامی عناصر فعالیت در طول چرخه‌ی عمر سیستم را نشان دهد که در حال کار از بالا به پایین است. SWBS اغلب تنها شامل فعالیت‌های اکتسابی سیستم است و روش پیشنهاد شده در این‌جا قرار است تمامی فعالیت‌ها (طراحی و گسترش، تولید، به‌کارگیری و پشتیبانی) را شامل شود، زیرا پیاده‌سازی اصول مهندسی سیستم‌ها و مفاهیم نیازمند آن است که تمامی چرخه‌ی عمر و تمامی وظایفی که در طول آن لازم الاجرا هستند، در نظر گرفته شوند.

با ارجاع به شکل، SWBS عموما شامل سه سطح فعالیت زیر است:

۱. **سطح یک:** تمامی حوزه‌ی پیش‌بینی شده‌ی کار مرتبط با طراحی و گسترش، تولید، توزیع، عملیات، پشتیبانی و بازنشستگی از سیستم را شناسایی می‌کند.

۲. **سطح دو:** پروژه‌ها یا مقوله‌های مختلف فعالیت را که می‌بایستی در پاسخ به نیازمندی‌های دستورکار به انجام برسند، شناسایی می‌کند. هم‌چنین ممکن است عناصری اصلی از سیستم یا فعالیت‌های اساسی پروژه را شامل شود (برای مثال زیرسیستم‌ها، تجهیزات، نرم‌افزار، تسهیلات، داده‌ها، عناصر پشتیبانی، مدیریت دستورکار و غیره). بودجه‌های دستورکار معمولا در این سطح تهیه می‌شوند.

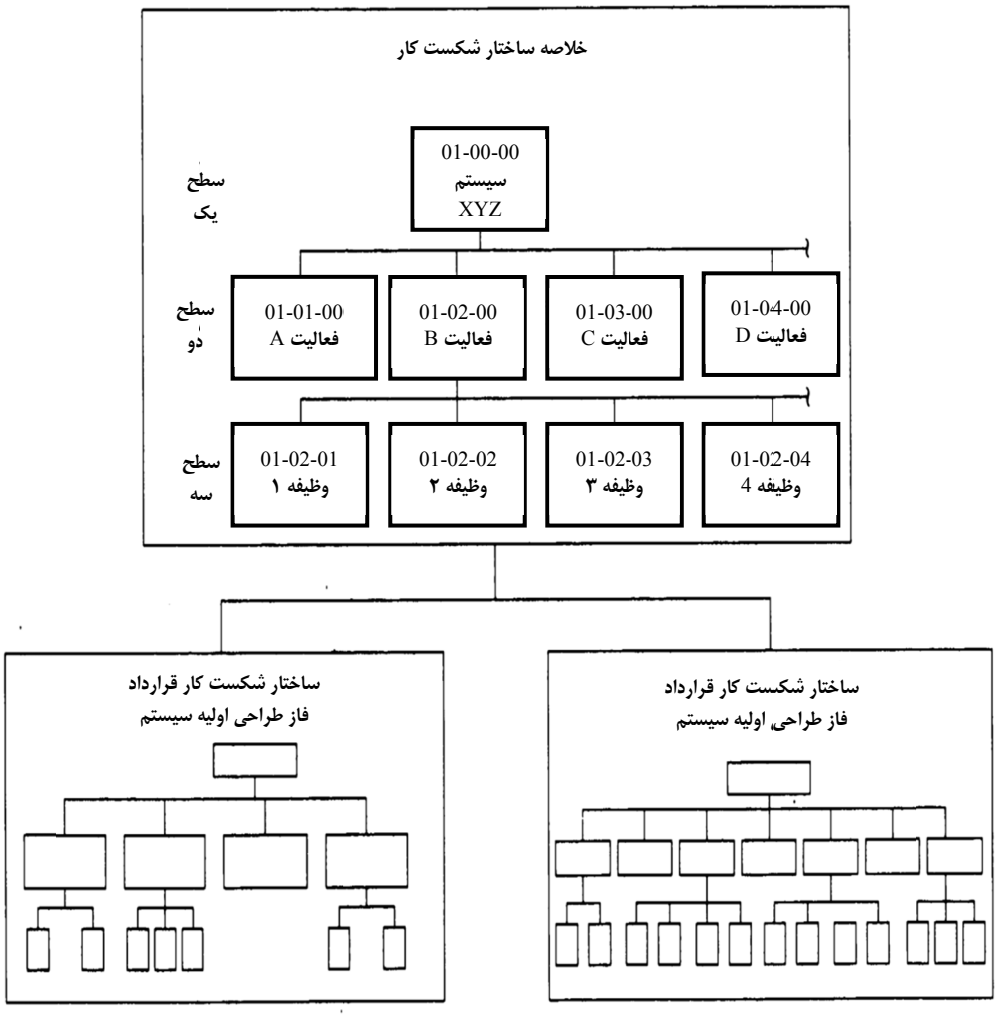
۳. **سطح سه:** وظایف، فعالیت‌ها، تکالیف اصلی یا اجزایی از سیستم را که به‌طورمستقیم زیردست آیتم‌های سطح ۲ هستند، شناسایی می‌کنند. زمان‌بندی‌های برنامه در این سطح آماده می‌شوند.

هرچه برنامه‌ریزی دستورکار پیشروی می‌کند و چانه‌زنی‌های فردی تحلیل می‌روند، SWBS ممکن است گسترده‌تر شده و در یک قرارداد خاص، فعالیت تدارکاتی به‌کار گرفته شود و منجر به ساختار شکست کار قرارداد (CWBS) شود. با ارجاع به شکل ۱۸–۵، SWBS می‌تواند به این شکل شکسته شود. یک CWBS برای عناصر کار در فاز طراحی سیستم ابتدایی، یک CWBS دیگر برای بازتاب عناصر کار در فاز گسترش و طراحی جزئیات و الی آخر.

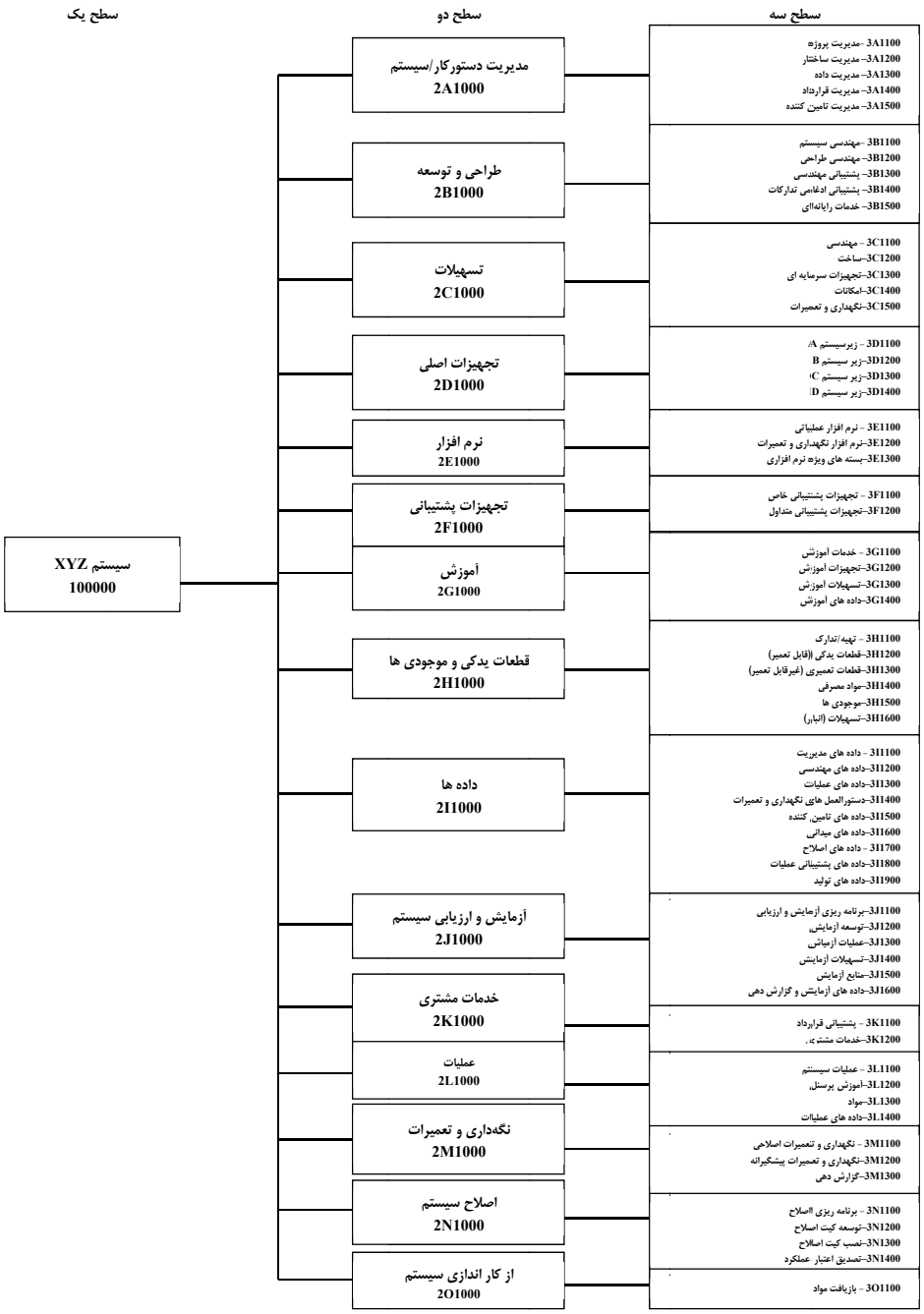
شکل ۱۸–۶ یک SWBS نمونه را نشان می‌دهد که تمام سطوح کار پیش‌بینی شده را در طول چرخه‌ی عمر سیستم XYZ نشان می‌دهد. فعالیت‌های مهندسی سیستم تحت مقوله3B1100 و یک عنصر گسترش و طراحی (2B1000) نشان داده شده‌اند. اگرچه چنین فعالیت‌هایی در طول همه‌ی فازهای چرخه‌ی عمر به‌دست آمده‌اند و فعالیت‌های مهندسی

سیستم‌ها از میان بسیاری مقوله‌های دیگر میان‌بر زده است، این مقوله به‌عنوان نقطه‌ی کانونی برای برپایی نیازمندی‌های بودجه‌بندی اولیه برای تکالیف مهندسی سیستم‌ها و پس از آن برای جمع کردن هزینه‌ی منتج از تکلیف انجام شده به‌کار می‌رود. به‌عنوان گام اولیه، ۱۱ تکلیف مهندسی سیستم‌ها بحث شده در بخش قبل می‌توانند درون مقوله3B1100 این SWBS گنجانده شوند و سپس همان‌طور که در شکل ۱۸–۷ نشان داده شده است می‌توانند تقویت یا تنظیم شوند تا نیازمندی‌های دستورکار مشخصی را در طول توسعه‌ی یک CWBS تامین کنند.

به‌طور خلاصه، WBS مکانیسمی برای اهداف بودجه‌بندی دستورکار اولیه و درنتیجه برای تجمیع هزینه و گزارش پیشرفت برای بسته‌های کاری مشخص تامین می‌کند. هم‌چنین شامل ابزاری عالی برای مدیریت دستورکار است و برای شرایط مدیریت دستورکار زیادی به‌کار می‌رود.



شکل ۱۸- ۵- توسعه ساختار شکست کار (WBS).

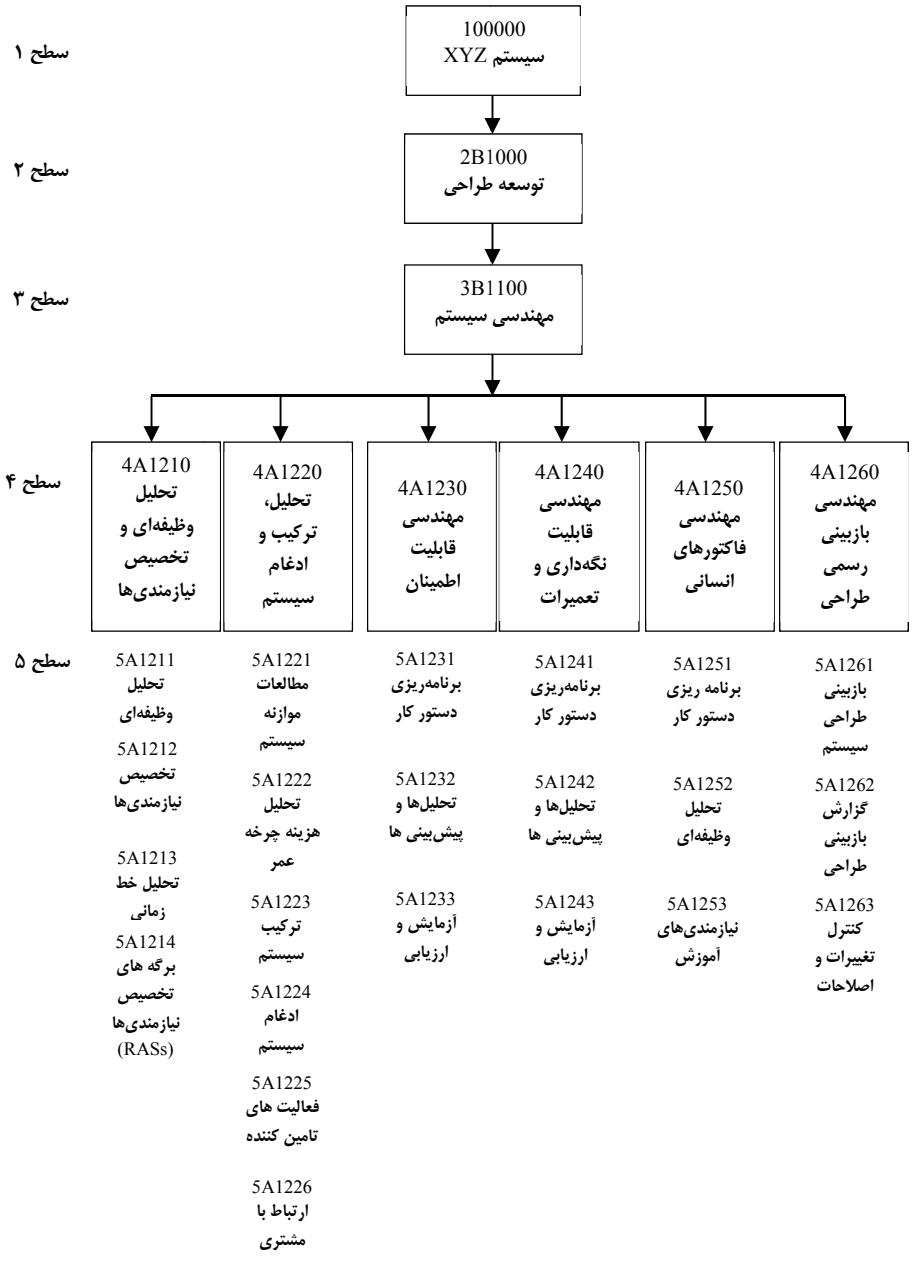


شکل ۱۸- ۶- خلاصه ساختار شکست کار (SWBS) برای سیستم XYZ.

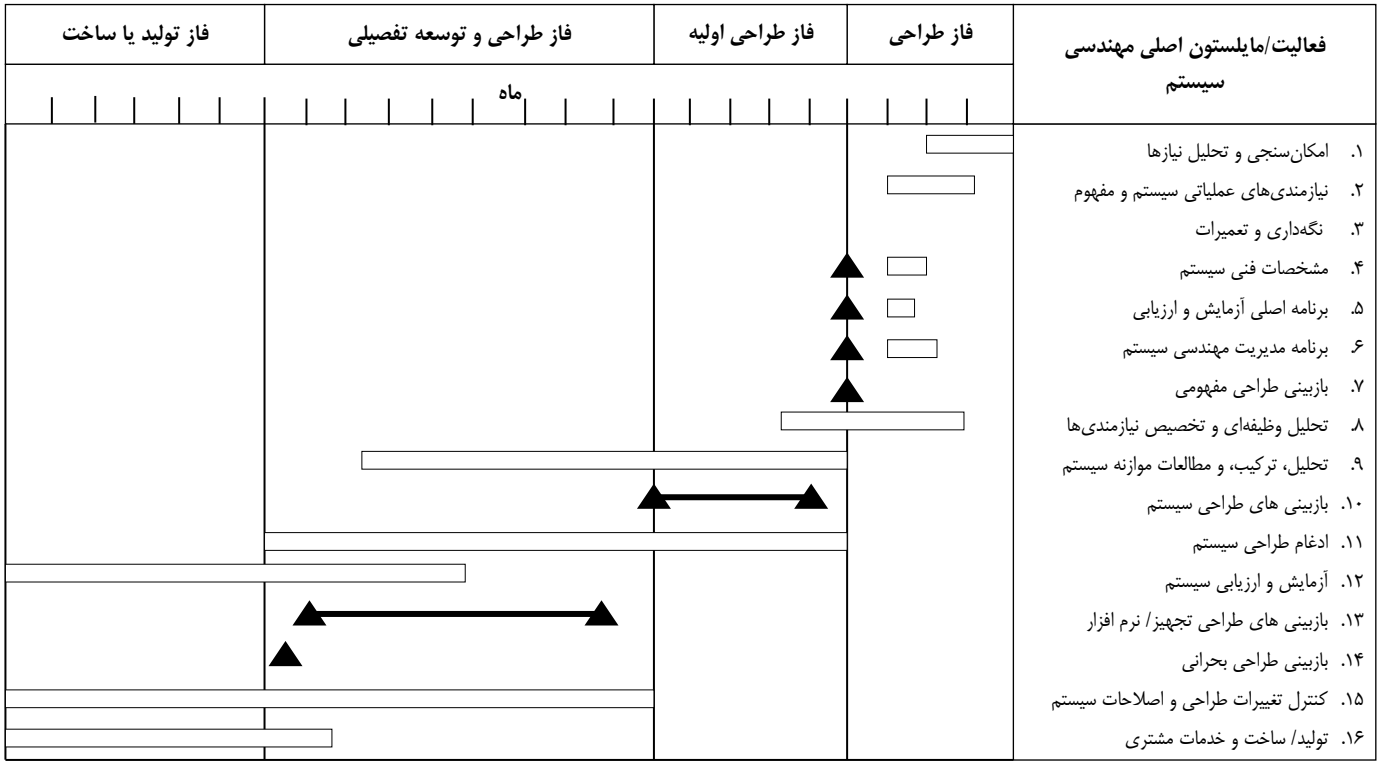
۱۸-۲-۴- زمان‌بندی تکالیف

روش‌های زمان‌بندی موجود شامل استفاده از چارت میله‌ای، چارت مایلستون، چارت گانت، شبکه‌های دستورکار و البته ترکیب‌های متفاوت است. انتخاب یک تکنیک خاص وابسته به روش(های) استفاده شده در PMP نهایی برای یک دستورکار مشخص و ماهیت فعالیت‌ها و فاز دستورکار مشخص است (طراحی مفهومی، طراحی جزئیات و توسعه و تولید). برای شروع، شکل ۱۸-۸ بعضی از فعالیت‌های مهندسی سیستم‌ها اصلی را شناسایی می‌کند که در قالب چارت ترکیبی میله‌ای/مایلستون نشان داده شده است.

اگرچه به‌کار بردن چارت‌های سنتی مایلستون یا ستونی محبوب است، اما اغلب به سختی می‌توان از مناسب بودن واسطهای اشاره شده در پیشرفت رهگیری‌های مدیر دستورکار در مقابل هریک از ۱۵ تکلیف نشان داده شده مطمئن بود. به زبان دیگر، ممکن است تلاش شود ارزیابی پیشرفت برای تکلیف ۱۰ ادغام طراحی سیستم براساس زمان‌بندی انجام شود. به هر حال، برای انجام فعالیت‌های مهندسی سیستم‌ها، ممکن است ورودی‌های متعددی از منابع مختلفی وجود داشته باشد که نیاز دارند این وظیفه را به روش قابل قبولی به انجام برسانند. از این رو، اگر این روش زمان‌بندی استفاده شده است، باید اطمینان حاصل شود که تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها به‌خوبی تعریف شده و به شکل مناسبی ارزیابی شوند.



شکل ۱۸– ۷- تعمیم CWBS برای نمایش فعالیت‌های مهندسی سیستم‌ها در فاز طراحی اولیه.



شکل ۱۸- ۸- فعالیت‌ها و مایلستون‌های اصلی مهندسی سیستم

یک روش برگزیده برای زمان‌بندی استفاده از شبکه‌های دستورکار مانند PERT، روش مسیر بحرانی (CPM) یا ترکیب‌هایی متفاوت از این دو است. PERT و CPM به‌صورت ایده‌آل برای برنامه‌ریزی اولیه و هنگامی که واسطه‌های زیادی (برای مثال منابعی که ورودی را بخش‌های مختلف جهان تامین می‌کنند) وجود دارند، داده‌های زمانی وظیفه به‌صورت دقیق در دسترس نیستند و طیف‌های احتمال برای کمک به تعریف ریسک مربوط به تصمیم‌های فراوان طراحی روزمره معرفی شده‌اند، مناسب است.

در کاربرد روش زمان‌بندی PERT/CPM برای یک پروژه، بایستی در ابتدا تمامی وابستگی‌های بین فعالیت‌ها و رخدادها برای هر فاز اعمال شده در پروژه شناسایی شود. فعالیت‌هایی که به سطوح پیوسته‌ای از تلاش‌ها اشاره می‌کنند و رخدادها متناسب با تاریخ‌های مایلستون دستورکار مبتنی بر اهداف مدیریت هستند. مدیران و برنامه‌ریزان با سازمان مهندسی کار می‌کنند تا این اهداف را تعریف کرده و تکالیف و زیرتکالیف را شناسایی کنند.

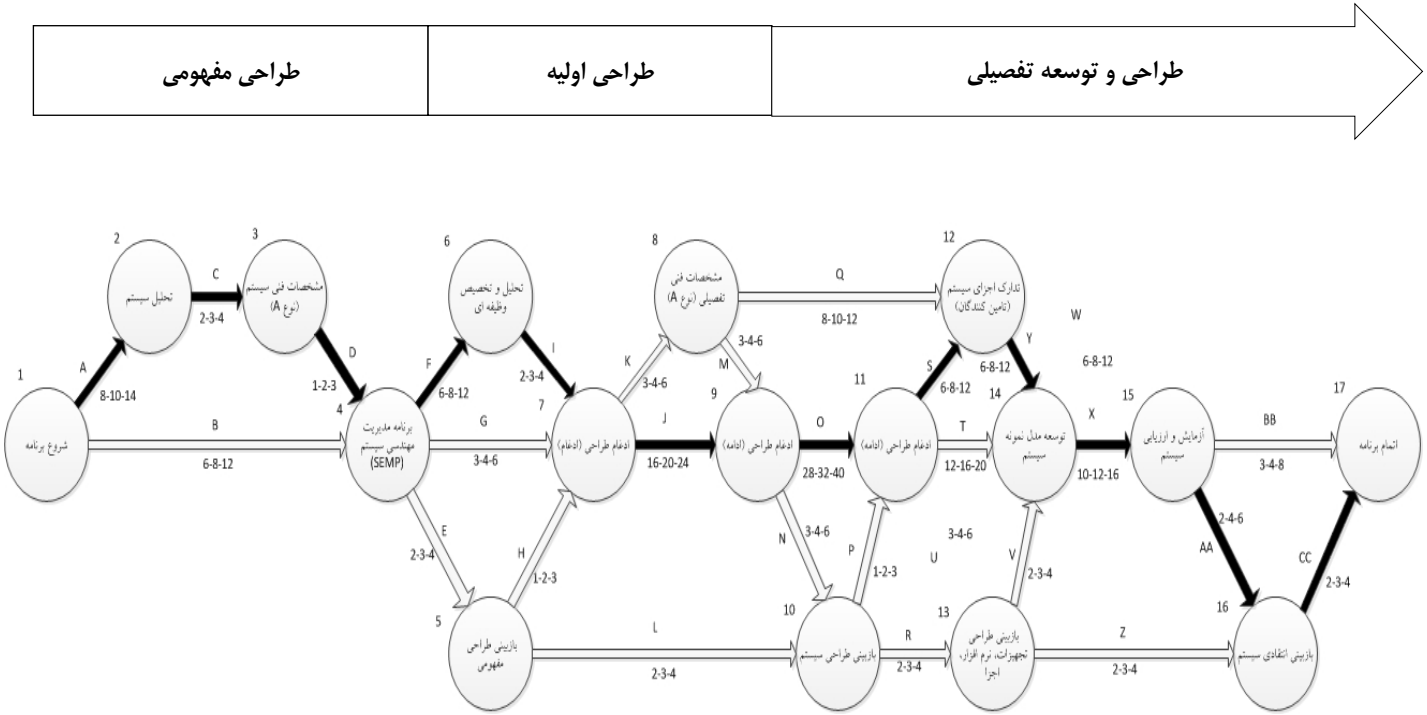
هنگامی که به سطح جزئیات موردنیاز دست یافته شد، شبکه‌ها با شروع از یک شبکه خلاصه که به پوشش فعالیت‌های کلیدی مهندسی سیستم‌ها مشخص شده در WBSمی‌پردازد، توسعه می‌یابند. در شکل ۱۸–۹ یک مثال آورده شده است. شکل ۱۸–۱۰ فعالیت‌هایی را فهرست کرده است که توسط خطوط درون شبکه بازتابانیده شده‌اند و شکل ۱۸–۱۱ مثالی از محاسبات شبکه دستورکار را نشان می‌دهد.

در هنگام ساخت شبکه‌ها، از نقطه‌ی هدف (برای مثال سیستم به مشتری تحویل داده شده است) شروع شده و عمل معکوس تا رسیدن به نقطه‌ی شروع یا شناسایی رخداد آغازین ادامه می‌یابد. هر رخدادی برچسب خورده، کد شده و با قالب زمانی دستورکار چک می‌شود. سپس فعالیت‌ها شناسایی شده و چک می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که به شکل مناسبی مرتب شده‌اند. زمان فعالیت‌ها تخمین زده شده و این زمان‌ها براساس احتمال رخ دادنشان

اظهار می‌شوند. بعضی فعالیت‌ها می‌توانند بر پایه موازی انجام گیرند، اما بقیه باید به ترتیب انجام شوند. برای هر شبکه کامل شده، یک رخداد شروع و یک نقطه‌ی پایان وجود دارد و تمامی فعالیت‌ها به نقطه‌ی پایانی ختم می‌شوند. درنهایت، شبکه خلاصه می‌تواند بسط یافته یا به شبکه‌های سطح پایین‌تر بشکند (برای مثال یک شبکه برای دستورکار مهندسی قابلیت اتکا، و شبکه‌ای دیگر برای دستورکار قابلیت نگه‌داری و الی آخر).

کاربرد زمان‌بندی شبکه برای هر دو حالت پروژه‌های با اندازه‌ی بزرگ و کوچک مناسب است و ارزش بالایی برای تلاش در توسعه یک سیستم منحصر به فرد که وابستگی‌های متعددی دارد یا برای آن دستورکارهایی که که تکالیف تکراری ارجحیت ندارند، خواهد داشت. شبکه به‌سادگی برای پیشبرد برنامه‌ریزی قابل به‌کارگیری است و تعریف دقیق تکالیف، توالی تکالیف، و روابط بین تکالیف را اعمال می‌کند.

این تکنیک به مدیریت و مهندسی این قابلیت را می‌دهد که زمان احتمالی مصرف شده برای رسیدن به یک هدف را با درجه‌ای از قطعیت تخمین بزند. هم‌چنین امکان ارزیابی سریع پیشرفت و شناسایی مشکلات و تاخیرها را ایجاد می‌کند و به‌طور خاص در روش‌های رایانه‌ای قابل استفاده است. کاربرد زمان‌بندی PERT/CPM به‌طور خاص برای مهندسی سیستم‌هایی مناسب است که فعالیت‌های مختلف و زیادی وجود دارند که باید متناسب با زمان ادغام شوند و جاهایی که شناسایی زودهنگام حوزه‌های بالقوه ریسک ضروری است.



مسیر بحرانی: ۱-۲-۳-۴-۶-۷-۹-۱۱-۱۲-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷

شکل ۱۸- ۹- شبکه زمان‌بندی برنامه مهندسی سیستم

۱۸-۲-۵- نمایش هزینه برای تکالیف دستورکار

WBS به‌عنوان پایه‌ای برای شناسایی اولیه‌ی توابع، فعالیت‌ها، تکالیف و گروه‌بندی تکالیف در بسته‌های کاری به‌کار می‌رود. علاوه‌بر این، WBS چارچوبی معین می‌کند که براساس آن نمایش هزینه‌ها انجام شده و بودجه‌های پروژه گسترش می‌یابند. سپس شناسایی بعدی برای منابع انسانی و منابع مواد موردنیاز برای انجام تکالیف و بر مبنای نیازمندی‌های زمان‌بندی پروژه صورت می‌پذیرد.

تشریح دستورکار برنامه	فعالیت	تشریح دستورکار برنامه	فعالیت
تامین‌کنندگان مناسب اجزای سیستم را شناسایی کنید، نیازمندی‌های مشخصات فنی را از طریق قراردادها اعمال کنید، و بر فعالیت‌های تامین‌کننده نظارت داشته باشید.	Q	تحلیل نیازها، امکان‌سنجی و تحلیل سیستم‌ها را انجام دهید. (نیازمندی‌های عملیاتی، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، و تعریف وظیفه‌ای سیستم).	A
برنامه‌ریزی و تدارک لازم برای بازبینی طراحی تجهیزات/نرم‌افزار/اجزا انجام دهید (ممکن است یک سری بازبینی‌های طراحی انجام شود تا اجزای مختلف سیستم پوشش داده شود)	R	برنامه‌ریزی پیشرفته انجام داده، وظایف اولیه مدیریت اجرا کنید، و برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) را تکمیل کنید.	B
داده‌های تفصیلی طراحی برای پشتیبانی عملیات تامین‌کننده را فراهم کنید.	S	مشخصات فنی سیستم (نوع A)را تهیه کنید.	C
یک مدل نمونه با پشتیبانی مربوطه برای آزمایش و ارزیابی سیستم توسعه دهید.	T	نیازمندی‌های فنی سطح سیستم را برای برنامه مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) توسعه دهید.	D

تشریح دستورکار برنامه	فعالیت	تشریح دستورکار برنامه	فعالیت
داده‌های طراحی و موارد پشتیبانی برای بازبینی‌های طراحی	U	داده‌های طراحی سطح سیستم و موارد لازم برای بازبینی طراحی مفهومی را تهیه کنید.	E
تجهیزات/نرم‌افزار/اجزا تهیه کنید نتایج بازبینی‌های طراحی تجهیزات/نرم‌افزار/اجزا را برای مدل نمونه ترجمه کنید. مدل نمونه که در آزمایش و ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد باید ساختار طراحی را منعکس کند	V	تحلیل وظیفه‌ای و تخصیص نیازمندی‌های کلی سیستم به سطح زیر سیستم و پایین‌تر از آن را انجام دهید.	F
اجزای تامین‌کننده را همراه با داده‌های پشتیبانی برای توسعه نمونه سیستم که در فعالیت‌های آزمایش و ارزیابی استفاده می‌شود، فراهم کنید.	W	سازمان لازم و زیرساختار مربوطه در آماده‌سازی انجام تکالیف ادغامی طراحی دستورکار موردنیاز را توسعه دهید.	G
آزمایش و ارزیابی سیستم آماده و انجام دهید (نیازمندی‌های برنامه اصلی آزمایش و ارزیابی سیستم را پیاده‌سازی کنید).	X	نتایج بازبینی طراحی مفهومی را به فعالیت‌های مناسب طراحی ترجمه کنید (یعنی داده‌های تایید شده طراحی،پیشنهادهایی برای بهبود/فعالیت‌های اصلاحی)	H
داده‌های آزمایش و پشتیبانی تدارکات را از تامین‌کنندگان سیستم طی فاز آزمایش و ارزیابی سیستم، تهیه کنید. داده‌های آزمایش برای پوشش آزمایش‌های انجام شده در تسهیلات تامین‌کننده و پشتیبانی تدارکات لازم است (یعنی قطعات یدکی/تعمیری، تجهیزات آزمایش، غیره)	Y	نتایج تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای را به معیارهای طراحی که به‌عنوان ورودی فرایند ادغام طراحی لازم است، ترجمه کنید	I

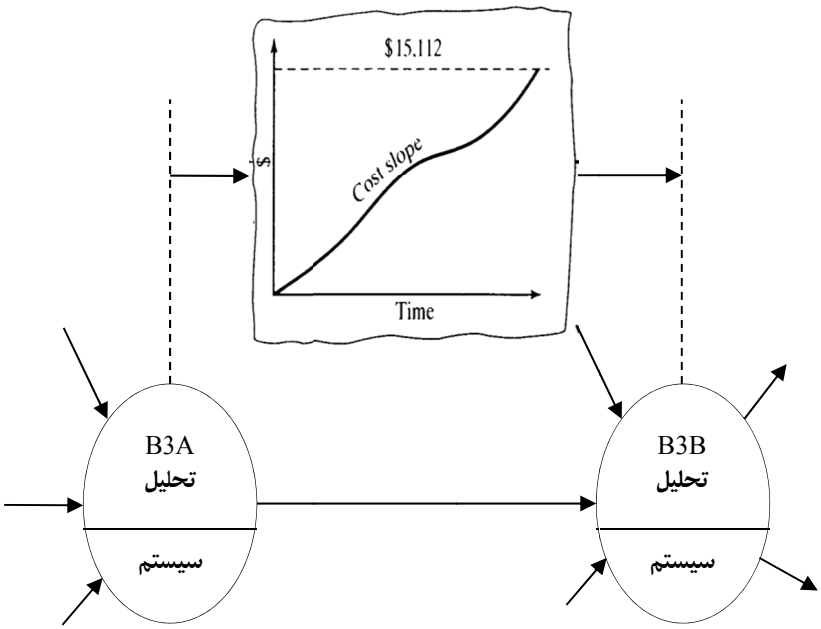
تشریح دستورکار برنامه	فعالیت	تشریح دستورکار برنامه	فعالیت
برنامه‌ریزی لازم را برای بازبینی طراحی انتقادی انجام دهید نتایج آزمایش در قالب تصدیق اعتبار طراحی یا پیشنهادهایی برای اصلاح/فعالیت‌های اصلاحی به‌عنوان ورودی بازبینی انتقادی طراحی فراهم شده است. گزارش آزمایش و ارزیابی سیستم را فراهم کنید. نتایج را از بازبینی انتقادی طراحی به ساختار نهایی سیستم پیش از ورود به فاز تولید یا ساخت برنامه ترجمه کنید	Z AA BB CC	طراحی اولیه و فعالیت‌های ادغامی طراحی مربوطه را انجام دهید. نتایج را از طراحی سطح سیستم به نیازمندی‌ها در سطح زیرسیستم و پایین تر ترجمه کنید. مشخصات فنی توسعه، فرایند، محصول و مواد را در صورت نیاز تهیه کنید برنامه‌ریزی لازم را انجام داده و بازبینی طراحی سیستم را اجرا کنید. نیازمندی‌های درون مشخصات فنی مختلف را به معیار طراحی موردنیاز به‌عنوان ورودی فرایند ادغام طراحی ترجمه کنید. داده‌های طراحی و موارد پشتیبان برای بازبینی طراحی سیستم را تهیه کنید طراحی تفصیلی و فعالیت‌های ادغام طراحی مربوطه را انجام دهید. نتایج را از بازبینی طراحی سیستم به فعالیت‌های مناسب طراحی ترجمه کنید (یعنی داده‌های تایید شده طراحی، پیشنهادهایی برای بهبود/فعالیت‌های اصلاحی)	J K L M N O P

شکل ۱۸- ۱۰- لیست فعالیت‌ها برای شبکه زمان‌بندی دستورکار.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
شماره رخداد	رخداد قبلی	t_a	t_b	t_c	t_e	s^2	TE	TL	TS	TC	احتمال (٪)
۱۷	۱۶ ۱۵	۲ ۳	۳ ۴	۴ ۸	۳ ۴٫۵	۰٫۱۱۱ ۰٫۶۹۴	۱۱۵٫۲ ۱۱۲٫۱	۱۱۵٫۲ ۱۱۵٫۲	۰ ۳٫۱	۱۱۰ ۱۱۵	۶٫۴ ۴۷٫۹
۱۶	۱۵ ۱۳	۲ ۲	۴ ۳	۶ ۴	۴ ۳	۰٫۴۴۴ ۰٫۱۱۱	۱۱۲٫۱ ۸۶٫۵	۱۱۲٫۲ ۱۱۲٫۲	۰ ۲۵٫۷	۱۲۰	۹۱٫۹
۱۵	۱۴ ۱۲	۱۰ ۶	۱۲ ۸	۱۶ ۱۲	۱۲٫۳ ۸٫۳	۱ ۱	۱۰۸٫۲ ۹۵٫۹	۱۰۸٫۲ ۱۰۸٫۲	۰ ۱۲٫۳	۰	
۱۴	۱۳ ۱۲ ۱۱	۲ ۶ ۱۲	۳ ۸ ۱۶	۴ ۱۲ ۲۰	۳ ۸ ۱۶	۰٫۱۱۱ ۱ ۱٫۷۷۸	۸۶٫۵ ۹۵٫۹ ۹۵٫۳	۹۵٫۹ ۹۵٫۹ ۹۵٫۹	۹٫۴ ۰ ۰٫۶		
۱۳	۱۱ ۱۰	۳ ۲	۴ ۳	۶ ۴	۴٫۲ ۳	۰٫۲۵ ۰٫۱۱۱	۸۳٫۵ ۵۳٫۸		۱۳٫۶ ۴۲٫۱		
۱۲	۱۱ ۸	۱۱ ۸	۸ ۱۰	۱۲ ۱۲	۸٫۳ ۱۰	۱ ۰٫۴۴۴	۸۷٫۶ ۶۰٫۸	۸۷٫۶ ۸۷٫۶	۰ ۲۶٫۸		
۱۱	۱۰ ۹	۱ ۲۸	۲ ۳۲	۳ ۴۰	۲ ۳۲٫۷	۰٫۱۱۱ ۴	۵۲٫۸ ۷۹٫۳	۷۹٫۳ ۷۹٫۳	۲۶٫۵ ۰		
۱۰	۹ ۵	۳ ۲	۴ ۳	۶ ۴	۴٫۲ ۳	۰٫۲۵ ۰٫۱۱۱	۵۰٫۸ ۲۱٫۳		۳۰٫۷ ۵۹		

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
شماره رخداد	رخداد قبلی	t_a	t_b	t_c	t_e	s^2	TE	TL	TS	TC	احتمال (٪)
۹	۸	۳	۴	۶	۴,۲	۰,۲۵	۳۵	۴۶,۶	۱۱,۶		
	۷	۱۶	۲۰	۲۴	۲۰	۱,۷۷۸	۴۶,۶	۴۶,۶	۰		
۸	۷	۳	۴	۶	۴,۲	۰,۲۵	۳۰,۸		۱۵,۸		
۷	۶	۲	۳	۴	۳	۰,۱۱۱	۲۶,۶	۲۶,۶	۰		
	۵	۱	۲	۳	۲	۰,۱۱۱	۲۰,۳	۲۶,۶	۶,۳		
	۴	۳	۴	۶	۴,۲	۰,۲۵	۱۹,۵	۲۶,۶	۷,۱		
۶	۴	۶	۸	۱۲	۸,۳	۱	۲۳,۶	۲۳,۶	۰		
۵	۴	۲	۳	۴	۳	۰,۱۱۱	۱۸,۳		۹,۳		
۴	۳	۱	۲	۳	۲	۰,۱۱۱	۱۵,۳	۱۵,۳	۰		
	۱	۶	۸	۱۲	۸,۳	۱	۸,۳	۱۵,۳	۷		
۳	۲	۲	۳	۴	۳	۰,۱۱۱	۱۳,۳	۱۳	۰		
۲	۱	۸	۱۰	۱۴	۱۰,۳	۱	۱۰,۳	۱۰,۳	۰		

شکل ۱۸- ۱۱- مثالی از محاسبات زمان‌بندی شبکه دستورکار.



شکل ۱۸- ۱۲- تابع فعالیت- هزینه.

شکل ۱۸-۹، با تاکید بر عنصر زمان نشان می‌دهد که می‌توان یک شبکه هزینه را بر روی شبکهPERT/CPM و توسط تخمین هزینه‌ی نهایی و توابع هزینه برای هر خط فعالیت اضافه کرد. شکل ۱۸-۱۲ یک تابع هزینه فعالیت نمونه را نشان می‌دهد. چنین توابعی را می‌توان برای تمام شبکه تولید کرد.

هنگام استفاده از این روش، یک انتخاب زمان- هزینه وجود دارد که این امکان را به مدیریت می‌دهد که جایگزین‌ها را با توجه به اختصاص منابع برای تکمیل فعالیت‌ها ارزش‌گذاری کند. جایگزین‌های زمان و هزینه با هدف انتخاب کم هزینه‌ترین روش در بهترین محدوده زمانی مجاز ارزش‌گذاری می‌شوند.

۱۸-۲-۶ - واسطه‌گری با سایر فعالیت‌های برنامه‌ریزی

برای موفقیت، مهندسی سیستم‌ها نیاز به تلاش ادغام شده‌ی دقیق دارد هم در درون و هم با فعالیت‌های برنامه‌ریزی دستورکارهای بسیار دیگر خارجی. در شکل ۱۸-۲ تعدادی برنامه طراحی جداگانه آمده است که بایستی به‌طور مستقیم موفقیت فعالیت‌های مهندسی سیستم‌ها (برای مثال برنامه طراحی مهندسی برق، برنامه‌ی دستورکار قابلیت اتکا، برنامه‌ی دستورکار نگه‌داری و برنامه مهندسی هم‌زمان) را حمایت کند. و بسیاری برنامه‌های سطح بالاتر دیگر نیز وجود دارد که آن‌ها نیز بایستی حمایت کننده باشند (برای مثال برنامه مدیریت ساختار، برنامه مدیریت تولید، برنامه مدیریت کیفیت نهایی، برنامه پشتیبانی تدارکات ادغام شده و برنامه قابلیت پایداری). SEMP بایستی به گونه‌ای توسعه یابد که ارتباطات اطلاعات مناسب (برای مثال مسیر ارتباطات) با برنامه‌های مختلف خارجی را نشان دهد. این برنامه‌های دیگر بایستی اهداف مشخص شده در SEMP را بازتاب داده و حمایت کنند. در آماده‌سازی این برنامه‌های خارجی، لازم است که تمامی تکالیف قابل اعمال، تکالیف زمان‌بندی شده و اطلاعات هزینه با محتوای مشخص شده در SEMP هم‌خوانی داشته باشد.

۱۸-۳- سازمان برای مهندسی سیستم‌ها

یک گام ابتدایی در توسعه هر نوع از یک ساختار سازمانی، تصمیم‌گیری در مورد اهداف شرکت/آژانس/موسسه درگیر و هم‌چنین توابع و تکالیفی است که بایستی به انجام برسد. بسته به پیچیدگی و اندازه‌ی دستورکارها، ساختار ممکن است یک مدل عملیاتی خالص، یک گرایش پروژه، یک ماتریس روش یا ترکیبی از اینها را در نظر بگیرد. پس از آن با تغییر تلاش توسعه‌ی سیستم از فاز طراحی مفهمومی به طراحی سیستم اولیه، توسعه و طراحی جزئیات، تولید و غیره، ساختار ممکن است در محتوا تغییرات کند.

با توجه به مهندسی سیستم‌ها، یک هدف اصلی در طول مراحل اولیه طراحی مفهومی اطمینان حاصل کردن از توسعه‌ی مناسب نیازمندی‌های سطح سیستم است(برای مثال معماری سیستم و شش تکلیف اولیه توضیح داده شده در بخش ۱۸-۲-۲). این فعالیت‌ها به شدت بر روی مشتری/مصرف‌کننده متمرکز شده و به‌عنوان یک موجودیت به سیستم هدایت می‌شوند و دست‌یابی به این مساله الزاما به سازمان بزرگی نیاز ندارد. به هرحال، انتخاب تعداد کمی از کارکنان کلیدی با تخصص‌های مناسب، سابقه‌ی کار و سطوحی از تجربه ضروری است.

هنگامی که دستورکار به فازهای طراحی و توسعه‌ی اولیه و مشروح نزدیک می‌شود، تعداد کارکنان مامور شده ممکن است زیاد شود زیرا نیازمندی‌های طراحی در سطح زیرسیستم (و پاین‌تر) جذب کردن متخصصین بیش‌تری از علوم طراحی مختف را می‌طلبد (برای مثال قابلیت اتکا، نگه‌داری، مولفه‌های انسانی و تدارکات). در این زمینه، ساختار سازمانی ممکن است از یک ساختار پروژه خالص به یک روش مختلط ماتریس یا پروژه‌ی عملیاتی تغییر وضعیت بدهد. هنگامی که سیستم و اجزای آن وارد فاز تولید/ساخت می‌شوند، ساختار برنامه‌ریزی ممکن است دوباره تغییر کند.

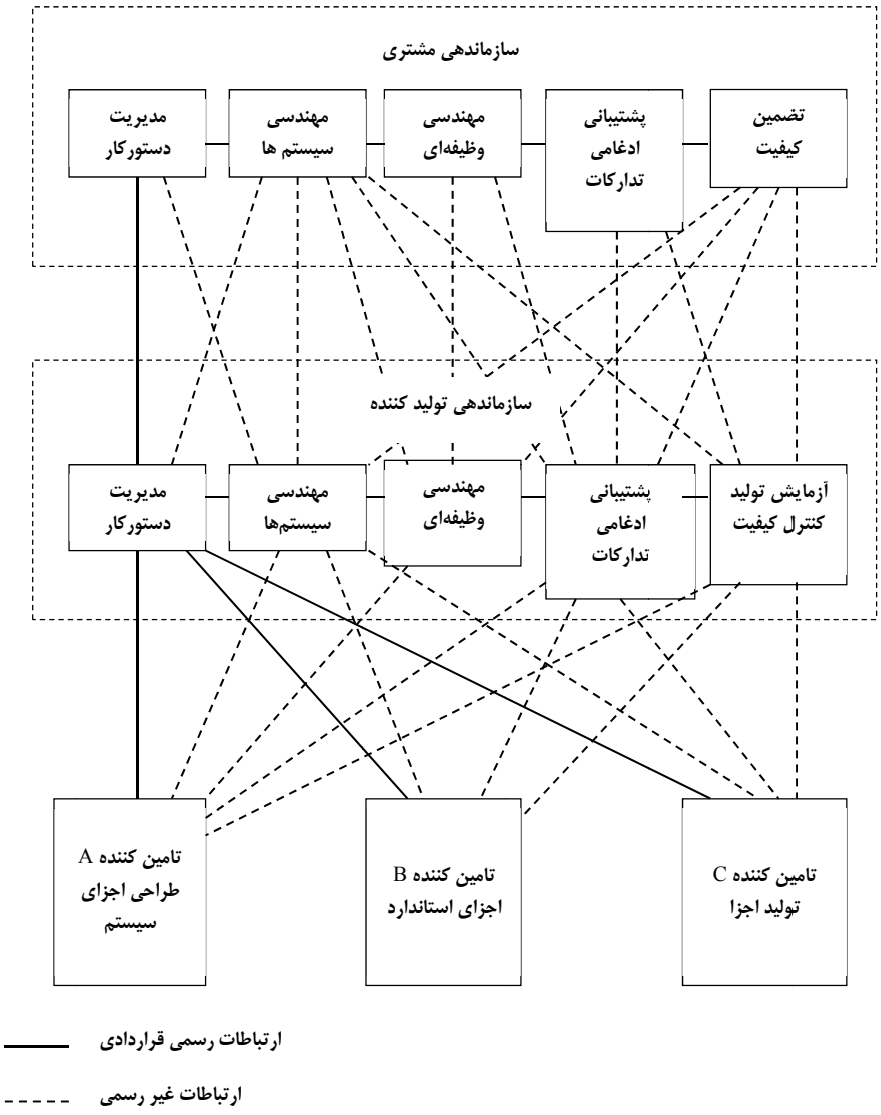
جهت اشاره دقیق به مشکل کلی سازمان، تمرکز بر روی تکالیف مختلف و متعدد شرح داده شده در بخش ۱۸-۲-۲ قرار می‌گیرد که عناصر سازمان (دپارتمان، بخش یا گروهی از کارکنان) کار را مستقل از آن به انجام می‌رسانند. تجربه نشان داده است که دپارتمان‌های سازمان یا گروه‌هایی در درون شرکت‌های صنعتی یا آژانس‌های دولتی تحت عنوان مهندسی سیستم‌ها وجود دارند و مسئولیت‌های مرتبطی برعهده دارند اما تکالیف موردنیاز را انجام نمی‌دهند. برعکس، عناصر سازمان با هویت‌های مختلف وجود دارند که وظایف خواسته شده را به‌طور بهینه و موثر انجام می‌دهند.

برای پروژه‌های کوچکی که شخص باید قوانین مختلفی را در نظر بگیرد، مسئولیت‌های مهندسی سیستم‌ها می‌تواند توسط مهندس ارشد، یک مهندس برق، یک مهندس مکانیک یا شخص مشابهی انجام پذیرد. از سوی دیگر ممکن است گروهی از افراد انتخاب شده انجام تکالیف را به‌عهده بگیرند. هدف، رسیدن به سطح مناسبی از تلاش برای به‌کارگیری منابع از موجودیت‌های سازمان بیرون از مرز است.

۱۸-۳-۱- روابط مشتری، تولیدکننده و تامین‌کننده

برای پرداختن مناسب به موضوع سازمان مهندسی سیستم‌ها، بایستی محیطی که وظایف مهندسی سیستم‌ها در آن به انجام می‌رسند، درک شود. اگرچه ممکن است این مساله بسته به اندازه‌ی پروژه، سطح طراحی و گسترش آن تغییر کند، این بحث بر روی خصیصه‌های عملیات یک پروژه‌ی بزرگ متمرکز شده است که در بسیاری از سیستم‌های بزرگ اکتساب می‌شوند. پرداختن به پروژه‌های بزرگ با این هدف انجام می‌شود که درک بهتری از نقش مهندسی سیستم‌ها در محیط‌هایی که به گونه‌ای پیچیده است، به‌دست آید. البته خواننده باید برای دستورکار خود روشی را ساخته و به‌کار بندد.

برای یک پروژه به نسبت بزرگ، وظیفه‌ی مهندسی سیستم‌ها ممکن است در چند سطح نشان داده شده در شکل ۱۸-۱۳ ظاهر شود. نیازمندی‌های مهندسی سیستم‌ها و مسئولیت برای پیاده‌سازی ۱۱ تکلیف شرح داده شده در بخش ۱۸-۲-۲ بستگی به مشتری(یا کاربر) دارد زیرا در این سطح است که سیستم برای اولین بار به‌عنوان یک موجودیت مشخص می‌گردد. ممکن است مشتری یک سازمان مهندسی سیستم‌ها برای انجام تکالیف موردنیاز به راه بیاندازد یا این وظایف ممکن است از طریق نوعی از توافق قراردادی (به کلی یا بخشی از آن) به تولیدکننده محول شود. در هر رخدادی، مسئولیت و اختیارات برای انجام وظایف مهندسی سیستم‌ها به روشنی تعریف گردد.



شکل ۱۸-۱۳- روابط سازمانی مشتری، تولیدکننده و تامین‌کننده.

در بعضی تمونه‌ها، مشتری ممکن است کل مسئولیت را برای کلیه طراحی و توسعه، تولید، ادغام و راه‌اندازی سیستم برای استفاده عملیاتی برعهده بگیرد. تحلیل نیازها، تکمیل مطالعات

امکان‌سنجی، تعریف نیازمندی‌های عملیاتی و نگه‌داری مفهوم، شناسایی و اولویت‌بندی TPMها، آماده‌سازی مشخصات سیستم (نوع A)، آماده‌سازی SEMP و غیره در درون سازمان مشتری به‌دست می‌آیند. وظایف سطح بالا تعریف شده و نیازمندی‌های دستورکار مشخص (یا وظایف) به تولیدکننده‌های خاص، پیمانکاران جزء و تامین‌کنندگان اجزا منتسب می‌شوند.

در حالات دیگر، اگرچه تولیدکننده راهنمایی کلی را به شکل صادر کردن یک اظهار کار کلی (SOW) یا یک سند قراردادی با ارزش یکسان تامین می‌کند، تولیدکننده (یا طرف قرارداد اصلی) مسئول کلیه‌ی تلاش‌های طراحی و توسعه‌ی سیستم و تکمیل ۱۱ تکلیف شرح داده شده در بخش ۱۸-۲-۲ است. اگرچه هم مشتری و هم تولیدکننده سازمان‌های مهندسی سیستم‌ها را ایجاد کرده‌اند(همان‌طور که در شکل ۱۸-۱۳ نشان داده شده است)، وظیفه‌ی اولیه برای تکمیل وظایف و دست‌یابی به اهداف شرح داده شده در این متن به سازمان تولیدکننده مرتبط می‌شود و تکالیف پشتیبانی باید توسط تامین‌کننده مشخص به انجام برسد. برای دست‌یابی به این حالت، مشتری نه تنها باید سطح مناسبی از مسئولیت‌پذیری را برای تکمیل وظایف مشخص شده نمایندگی کند بلکه اختیار موردنیاز را نیز باید داشته باشد. علاوه‌بر این، مشتری باید تمامی داده‌های ورودی موردنیاز تولیدکننده برای تکمیل موفق وظایف طراحی مفهومی که پیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند در دسترس قرار دهد.

با ارجاع به شکل ۱۸-۱۳، توجه کنید که مقدار قابل افزایشی از ارتباطات لازم است که نه تنها درون هر یک از سازمان‌های مشتری و تولید و تولیدکننده بلکه بین سازمان مشتری‌ها، تولیدکننده‌ها و تامین‌کننده‌های مختلفی وجود داشته باشد. اگرچه خط‌های پررنگ در درجه اول به مسیر مدیریت دستورکار رسمی و ماهیت قراردادی وابسته هستند، خطوط ارتباطی غیررسمی بسیاری باید وجود داشته باشند که تضمین کنند گفتگوی دو سویه مناسبی بین موجودیت‌های مختلف و متعدد درگیر در تلاش توسعه‌ی سیستم برقرار است. برقراری این کانال‌های ارتباطی

به‌طور خاص هنگامی مهم هستند که دستورکار با تامین‌کنندگان اصلی سر و کار دارد که در مکان‌های بین‌المللی قرار دارند و هنگامی تامین‌کنندگانی که انواع مختلفی از سرویس‌ها را به‌عنوان جزئی از یک شبکه‌ی سیستم به سیستم (SOS) فراهم می‌کنند. در چنین حالاتی، فرایند ارتباط ممکن است به نوعی پیچیده شده و تاکید مدیریتی بیش‌تری برای تضمین موفقیت لازم شود. پیاده‌سازی موفق کار تیمی یا روش شراکتی به همراه پرورش اصول مهندسی هم‌زمان که پیش‌تر بحث شده‌اند، به شدت وابسته به ارتباطات خوب (در هر دو جهت روبه بالا و رو به پایین) از ابتدا است.

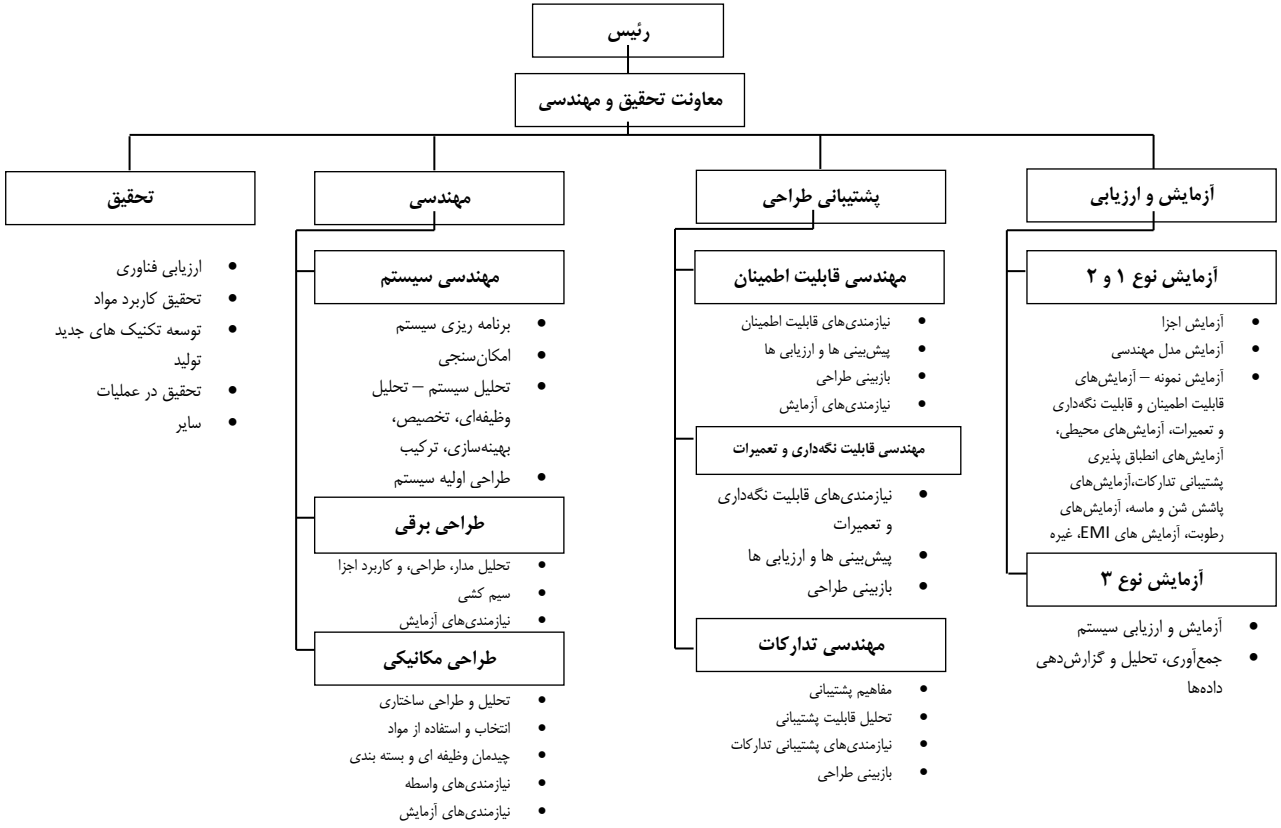
۱۸-۳-۲- سازمان و وظایف تولیدکننده

یک بلوک سازه ابتدایی برای اکثر الگوهای سازمان، روش وظیفه‌ای است که شامل گروه‌بندی ویژگی‌ها یا اصول وظیفه‌ای در موجودیت‌های قابل شناسایی جداگانه است. هدف، انجام کار مشابه در درون یک جز از سازمان است. در ساختار وظیفه‌ای خالص، تمامی مسئولیت کار مهندسی بر عهده یک مجری است، تمامی مسئولیت تلاش برای ساخت بر عهده یک مجری دیگر است و به همین ترتیب. در این حالت بر مبنای هم‌زمانی، هر گروه سازمان همان نوع کار را برای تمامی پروژه‌های در حال اجرا انجام می‌دهد.

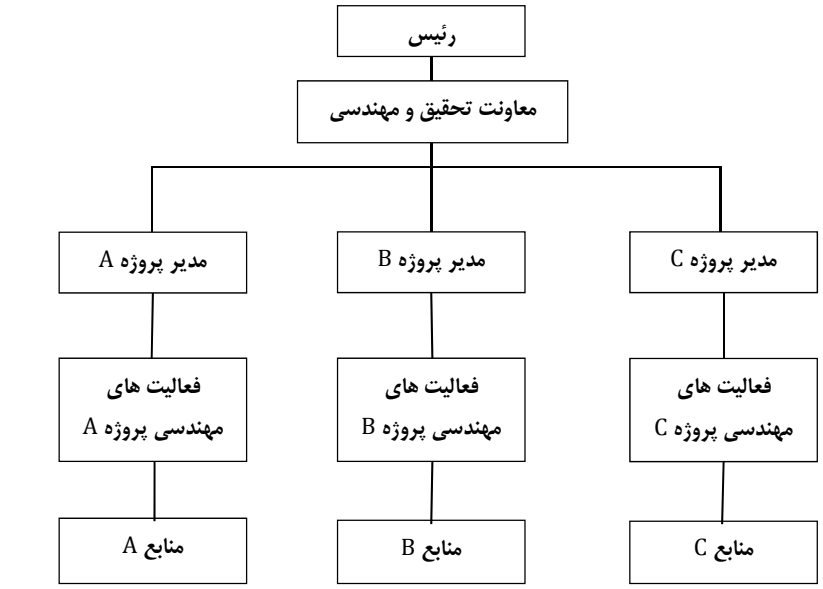
سازمان وظیفه‌ای جزئی، شامل شناسایی بسته‌های کار اصلی، در شکل ۱۸-۱۴ به تصویر کشیده شده است. تابع مهندسی سیستم‌ها در درون سازمان مهندسی کلی آمده و شامل وظایف شرح داده شده در ۱۸-۲-۲ می‌شود . سازمان مسئول تکمیل این وظایف است زیرا به تمام پروژه اعمال می‌شوند. این روش معمولا برای شرکت‌ها یا آژانس‌های کوچک مطلوب است زیرا مدیریت یک گروه یکنواخت از وظایف مشابه و کارکنان با پیش‌زمینه‌های تقریبا یکسان بدین طریق ساده‌تر است. هم‌چنین دوباره کاری به حداقل می‌رسد. از سوی دیگر، برای عملیات‌های بزرگ به دلیل تمرکز وظایف غیرعملی، لزوما این روش مطلوب نیست. از این رو، برای شرکت‌های بزرگ چند

محصولی، روش وظیفه‌ای خالص می‌تواند به نوعی تغییر کند و به شکل پروژه‌های جداگانه با معرفی مناسب بعضی فعالیت‌های بین رشته‌ای دربیاید.

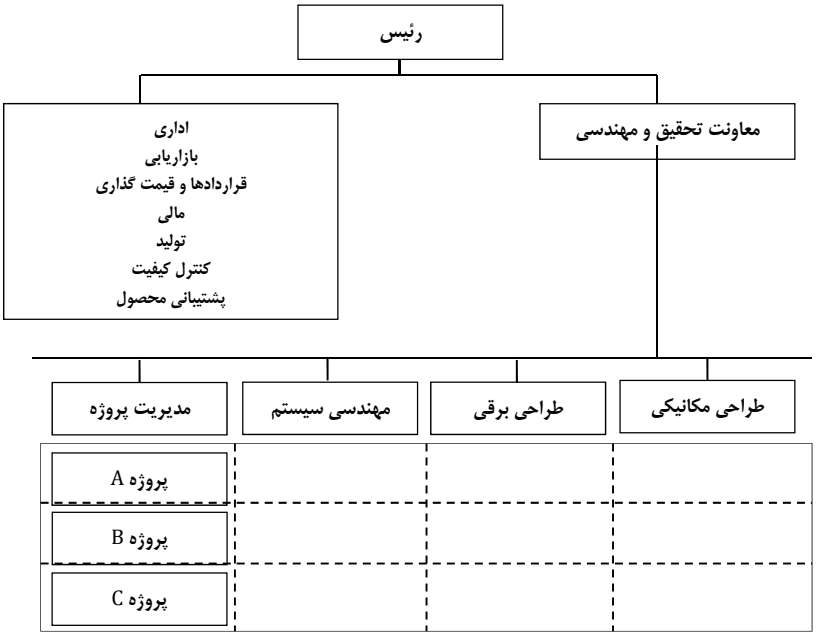
شکل ۱۸–۱۵ یک سازمان دستورکار خالص را که به تنهایی مسئول برنامه‌ریزی، طراحی و توسعه، تولید، استفاده عملیاتی و پشتیبانی برای یک سیستم تنها یا یکتا است، نشان می‌دهد. این سازمان محدود به زمان است و تعهد توانایی‌های مختلف و منابع موردنیاز با قصد به انجام رساندن تکالیف مرتبط با سیستم مشخصی است که در حال توسعه است. هر سازمان پروژه‌ای عملیات مهندسی، عملیات آزمون و عملیات پشتیبانی مخصوص به خود را شامل خواهد شد. بنابراین، یک گروه مهندسی سیستم‌ها برای پروژهA، و گروهی دیگر برای پروژهB و الی آخر خواهد بود. هر گروه همان تکالیف ابتدایی شرح داده شده در بخش ۱۸–۲–۲ را انجام خواهد داد. با این که سازمان پروژه خالص از نظر وظیفه پاسخ‌گویی به یک مشتری خاص منافعی را تامین می‌کند، ممکن است مقداری اضافه کاری در درون کمپانی/آژانس مورد بحث وجود داشته باشد که به دلیل تعدد منابع در طول خطوط پروژه‌های مختلف است.



شکل ۱۸- ۱۴- سازمان وظیفه‌ای



شکل ۱۸- ۱۵- سازمان ساده شده پروژه.

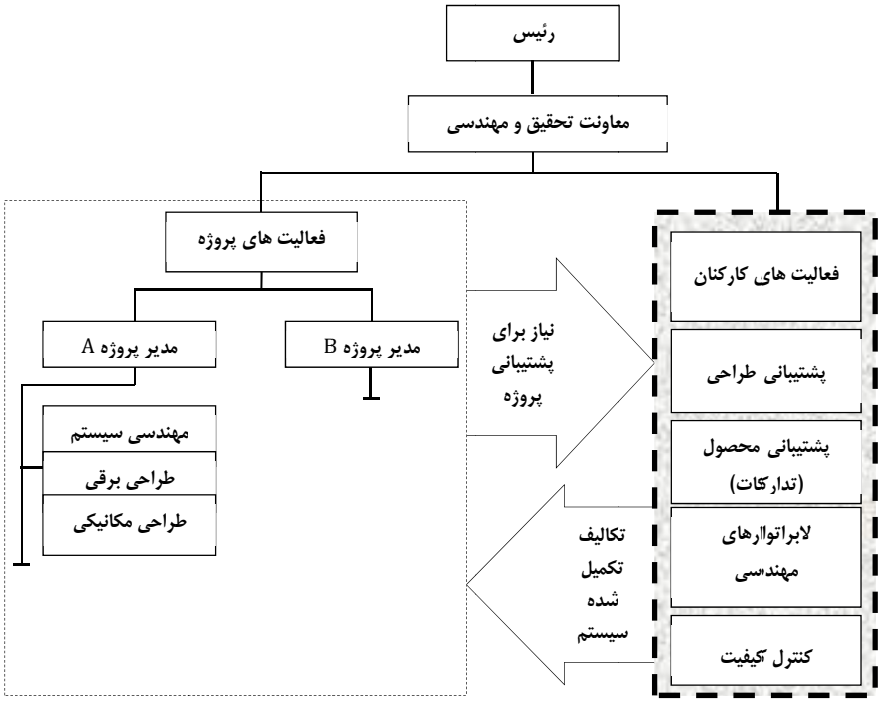


شکل ۱۸- ۱۶- ماتریس سازمان‌دهی.

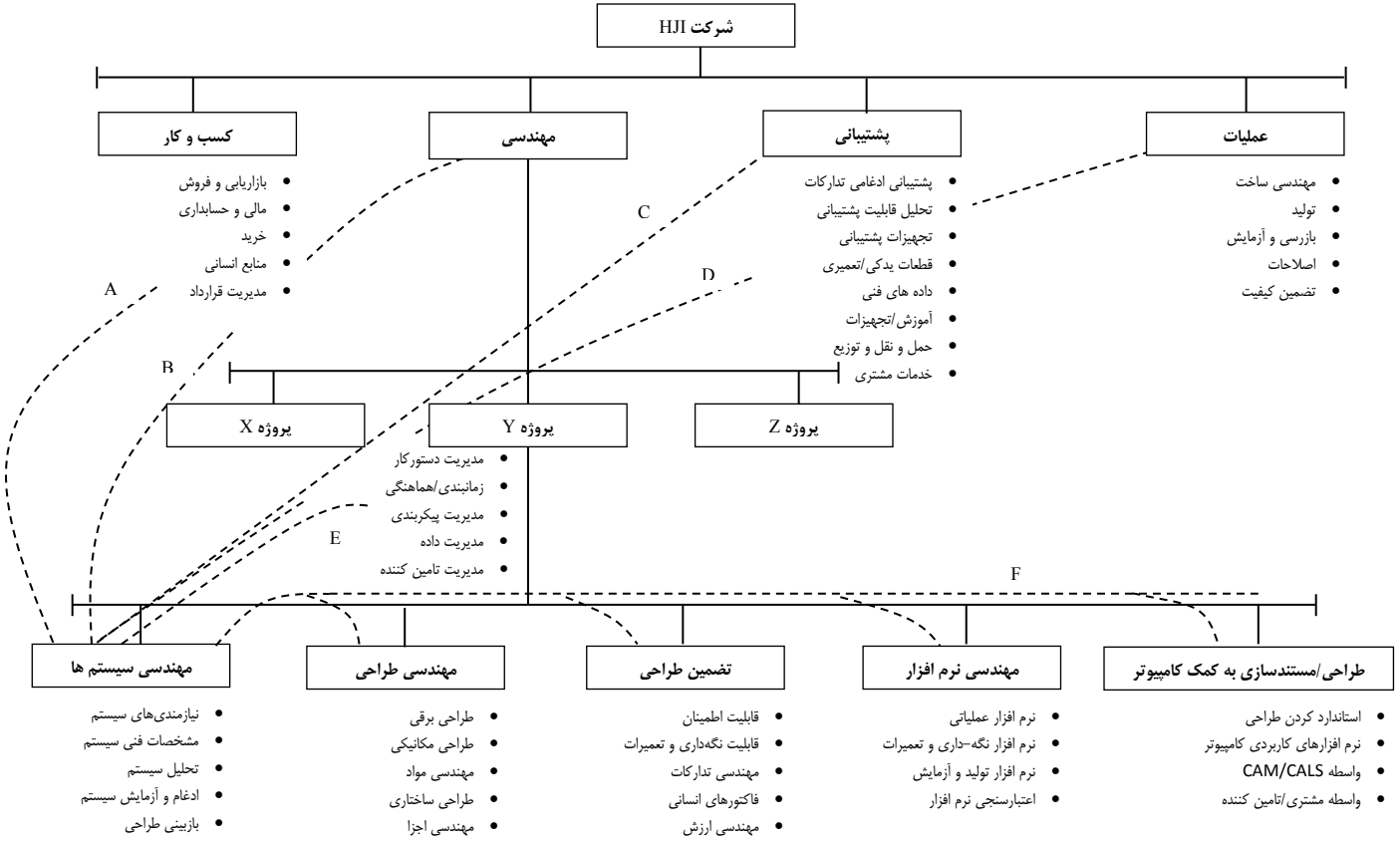
شکل ۱۸–۱۶ یک ماتریس ساختار را با ترکیبی از سازمان وظیفه‌ای خالص نشان داده شده در شکل ۱۸–۱۴ و سازمان پروژه نشان داده شده در شکل ۱۸–۱۵ نشان می‌دهد. برای دست‌یابی به سیستم‌های تکی بزرگ که در آن‌ها حوزه‌ی کار و تامین اعتبار کافی است، ساختار پروژه ممکن است روش مطلوب باشد. به هر حال، اگر پروژه‌های داخل سازمانی زیادی وجود داشته باشند که هر یک به تنهایی نتوانند سازمان پروژه جدایی را توجیه کنند، ساختار ماتریسی ممکن است مطلوب باشد. در این مثال، ممکن است مناسب باشد که بعضی وظایف از طریق ساختار پروژه به انجام برسد در حالی که بقیه توسط گروه‌های نیروی کار متخصص انجام می‌شود. در این مثال، تکالیف مهندسی سیستم‌ها از طریق نیروی کاری که پروژه‌های متفاوتی را بر مبنای حضور در صورت نیاز پشتیبانی می‌کنند، انجام می‌شود . اگرچه منابع در این حالت در درون ساختار وظیفه‌ای ترکیب شده‌اند، درگیری مستقیم در فعالیت‌های روزمره پروژه ممکن است ممنوع باشد، زیرا فعالیت مهندسی سیستم‌ها در واقع بخشی از سازمان پروژه نیست.

شکل ۱۸–۱۷ نگارشی با تفاوت جزئی از یک ساختار سازمان نیروی کار پروژه عادی را نشان می‌دهد. در این مثال، هر پروژه شامل یک گروه مهندسی سیستم‌هاست در حالی‌که بسیاری از فعالیت‌های پشتیبانی مهندسی بر مبنای تکلیف به تکلیف و از طریق وظایف مختلف نیروی کار تامین می‌شود . از آن‌جا که اکثر تکالیف شرح داده شده در بخش ۱۸–۲–۲ بایستی به‌عنوان یک بخش ادغام شده از فرایند طراحی و توسعه‌ی سیستم به انجام برسد و از ترکیب با این واقعیت که فعالیت مهندسی سیستم‌ها باید یک نقش رهبری را از دیدگاه فنی تعریف کند، مطلوب است که چنین وظیفه‌ای یک بخش ذاتی از سازمان پروژه باشد. علاوه‌بر این، نوع سازمان پروژه از فرایندهای ارتباطی بین مشتری و تولیدکننده بهره می‌برد. فعالیت مهندسی سیستم‌ها بایستی برای پرورش این ارتباط تامین کند.

همان‌طور که پیش‌تر بررسی شد، واسطهای بین گروه‌های مهندسی سیستم‌ها و بخش‌های دیگر سازمان تولیدکننده متعدد هستند مخصوصا هنگامی که درگیر دست‌یابی به یک سیستم بزرگ هستیم. با ارجاع به شکل ۱۸–۱۸ گروه‌های مهندسی سیستم‌ها برای پروژهY توسط این حقیقت که فعالیت‌های بسیار دیگری بر مبنای روزمره برای انجام دادن وجود دارند به چالش کشیده می‌شوند. نیاز به تاسیس اتصال ارتباطی خوب با پروژه‌های داخلی متعدد تاکید شد و منظور مهندسی طراحی، مهندسی نرم‌افزار، واحد تجاری، سازمان‌های دیگر پروژه، وظیفه‌ی پشتیبانی تدارکات، عملیات‌های تولید و غیره است. یک مثال از شبکه ارتباطی موردنیاز در شکل ۱۸–۱۹ به تصویر کشده شده است (که در آن نقطه‌چین‌های شکل ۱۸–۱۸ توضیح داده شده است).



شکل ۱۸– ۱۷– سازمان متداول پروژه– نیروی کار.



شکل ۱۸-۱۸- ارتباطات اصلی مهندسی سیستم‌ها

سازمان پشتیبانی (نیازمندی‌های واسطه)	کانال ارتباطی (شکل ۱۸-۱۸)
۱. بازاریابی و فروش – برای اکتساب و حفظ ارتباطات لازم با مشتری. اطلاعات تکمیلی مربوط به نیازمندی‌های مشتری، نیازمندی‌های عملیات سیستم و پشتیبانی نگه‌داری و تعمیرات، تغییرات در نیازمندی‌ها، رقابت بیرونی و غیره موردنیاز است. این موضوع فراتر از کانال ارتباطی قرار داد است. **۲. حسابداری** – اکتساب داده‌های بودجه و هزینه برای پشتیبانی تحلیل اقتصادی (یعنی تحلیل هزینه چرخه عمر). **۳. خرید** – برای کمک به شناسایی، ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان اجزا از نقطه نظر فنی، کیفی و هزینه چرخه‌ی عمر. **۴. منابع انسانی** - برای کمک به استخدام و به‌کارگیری کارکنان با صلاحیت پروژه به منظور مهندسی سیستم و آموزش و حفظ سطح مهارت کارکنان در ادامه کار. برای انجام برنامه‌های آموزش برای همه کارکنان پروژه مربوط به مفاهیم مهندسی سیستم، اهداف و پیاده‌سازی نیازمندی‌های برنامه. **۵. مدیریت قرارداد** – برای حفظ دوجانبه نیازمندی‌های قرارداد بین مشتری و پیمانکار. برای حصول اطمینان از روابط مناسب با تامین‌کننده در ارتباط با براورده کردن نیازهای فنی طراحی و توسعه سیستم.	A
برای استقرار و حفظ ارتباط نزدیک با دیگر پروژه‌ها با هدف انتقال دانشی که ممکن است برای پروژهY مفید باشد. برای کمک‌گیری از دپارتمان‌ها و لابراتورهای مهندسی برای به‌کارگیری فناوری‌های جدید به منظور	B

سازمان پشتیبانی (نیازمندی‌های واسطه)	کانال ارتباطی (شکل ۱۸-۱۸)
پشتیبانی طراحی و توسعه سیستم	
برای فراهم کردن یک ورودی مربوط به نیازمندی‌های پروژه به منظور پشتیبانی سیستم و کمک به جنبه‌های وظیفه‌ای طراحی، توسعه، آزمایش و ارزیابی، تولید و حفظ نگه‌داری و تعمیرات طی چرخه‌ی عمر برنامه‌ریزی شده سیستم.	C
فراهم کردن یک ورودی مربوط به نیازمندی‌های پروژه به‌منظور تولید و کمک به طراحی برای قابلیت تولید و استقرار نیازمندی‌های مهندسی کیفیت برای پشتیبانی طراحی و توسعه سیستم.	D
برای استقرار و حفظ روابط نزدیک با فعالیت‌های پروژه مانند زمان‌بندی (پایش فعالیت‌های بحرانی شبکه زمان‌بندی)؛ مدیریت ساختار (تعریف خطوط مبنای ساختار مختلف و نظارت و کنترل بر تغییرات/اصلاحات)؛ مدیریت داده (نظارت، بازبینی و ارزیابی بسته‌های اطلاعاتی مختلف به منظور حصول اطمینان از انطباق‌پذیری و تخمین افزونگی‌های غیرضروری) و مدیریت تامین‌کننده (برای نظارت بر پیشرفت و حصول اطمینان از ادغام مناسب فعالیت‌های تامین‌کننده).	E
برای فراهم کردن ورودی برای نیازمندی‌های طراحی سطح سیستم، و به منظور نظارت، بازبینی، ارزیابی و حصول اطمینان از ادغام مناسب فعالیت‌های طراحی سیستم. این موضوع عبارتست از یک رهبری فنی در تعریف نیازمندی‌های سیستم، انجام تحلیل وظیفه‌ای، اجرای موازنه‌های سطح سیستم و دیگر تکالیف پروژه.	F

شکل ۱۸- ۱۹- تشریح نیازمندی‌های اصلی برای واسطه پروژه.

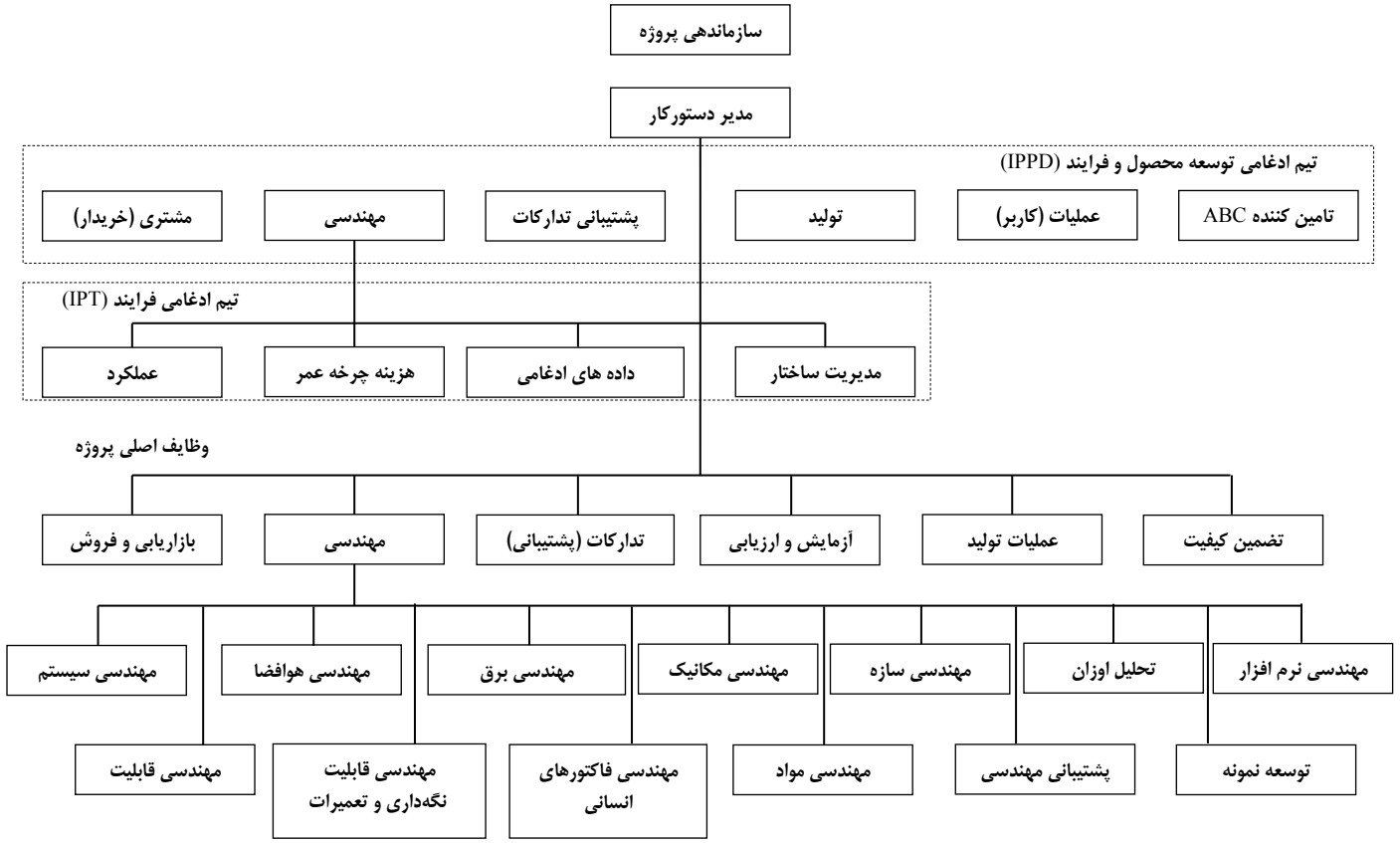
هدف نهایی در طراحی و توسعه هر سیستمی راه‌اندازی یک روش تیمی با ارتباطات مناسب است که به وسیله‌ی آن می‌توان استفاده از روش‌های مهندسی هم‌زمان را امکان‌پذیر کرد. به هرحال، اغلب مشکلاتی در هنگام کار با دستورکارهای بزرگ وجود دارد که واحدهای سازمانی وظیفه‌ای مختلف درگیر آن‌ها هستند. حصارها با این نیت توسعه یافته‌اند که روابط کاری روزمره لازم، جابه جایی زمانی اطلاعات موردنیاز و ارتباطاتی را که پیش‌تر بحث شد، ممنوع کنند. از آن‌جا که کمپانی‌های بسیاری وجود دارند که به شکل قاطعانه بر محور خطوط وظیفه‌ای سازمان شده‌اند (برعکس ساختار نیروی کار پروژه نشان داده شده در شکل ۱۸–۱۸)، نیاز است اطمینان حاصل شود که سطح مناسبی از ارتباط بین تمامی واحدهای سازمانی به‌کار گرفته شده، بدون توجه به اینکه مکان ثابت آن‌ها در ساختار کلی کمپانی کجاست، یا این که خارج از کمپانی هستند، حفظ شود.

برای دست‌یابی به این هدف، وزارت دفاع (DOD) مفهوم توسعه ادغامی محصول و فرایند (IPPD) را در اوایل دهه ۹۰ آغاز کرد. IPPD را می‌توان به‌صورت "تکنیک مدیریتی که به‌طور هم‌زمان تمامی فعالیت‌های به‌دست آمده را با استفاده از تیم‌های چند رشته‌ای و با هدف بهینه‌سازی فرایند طراحی، ساخت و قابلیت پشتیبانی ادغام می‌کند". این مفهوم، ارتباطات و ادغام حوزه‌های وظیفه‌ای کلیدی را در حالی که به فازهای مختلف فعالیت دستورکار اعمال شده‌اند، ارتقا می‌بخشد. اگرچه ماهیت خاص فعالیت‌های جاری و درجهت نشان داده شده با تکامل تلاش طراحی و توسعه‌ی سیستم به گونه‌ای تغییر می‌کند که ساختار بررسی شده در شکل ۱۸–۲۰ از طریق پرورش ارتباطات موردنیاز بین خطوط مدیریت وظیفه‌ای سنتی حفظ گردد. در این رابطه، مفهوم IPPD به‌طورمستقیم در راستای اهداف مهندسی سیستم‌ها است.

در مفهوم IPPD برپایی تیم‌های محصول ادغام شده (IPT)، با هدف مشخص کردن مشکلات طراحی شده، ضروری می‌باشد. احتمالا IPT که شامل تیم‌های منتخبی از افراد با تخصص‌های مناسب می‌باشد، برای یافتن راه‌حلی برای مشکلات طراحی که اثر بزرگی بر TPM

با اولویت بالا دارند، ایجاد شده است. هدف، ساختن تیمی از افراد دارای صلاحیت است که بتوانند به‌طور موثر با یکدیگر کار کرده و پاسخی برای نیازمندی‌های داده شده بیابند. علاوه‌بر این، ممکن است تیم‌های دیگری نیز برای حل کردن مشکلاتی در سطوح مختلف ساختار سلسله مراتبی سیستم (برای مثال مشکلات در سطح سیستم، زیر سیستم یا اجزا) تشکیل شوند. با ارجاع به شکل ۱۸–۲۰، IPT ممکن است برای تمرکز بر آن دسته از فعالیت‌هایی که به‌طور موثر پاسخی برای نیازمندی‌های کارایی، هزینه‌های مالکیت، داده ادغام شده و مدیریت ساختار دارند، برپا شده باشد. هم‌چنین ممکن است IPT دیگری برای رهگیری نیازمندهای طراحی یک تامین‌کننده وجود داشته باشد. هدف، تامین دقت موردنیاز در حوزه‌های بحرانی و بهره‌گیری از منافع روش تیمی برای رسیدن به بهترین جواب ممکن است.

اغلب IPTها توسط مدیر دستورکار یا توسط یک مسئول سطح بالا در یک سازمان برپا می‌شوند. نماینده‌های اعضای تیم بایستی در حوزه‌ی تخصصی خود بسیار با کیفیت باشند و دارای قدرت کافی تصمیم‌گیری، فعال در رابطه با مشارکت تیمی، موفقیت‌گرا و در حل مساله توانا باشند. مدیر دستورکار باید اهداف و انتظاراتی را که به‌عنوان نتیجه از یک تیم انتظار می‌رود، به روشنی تعریف کند و اعضای تیم باید یک کانال ارتباطی برخط دائمی را حفظ کنند. مدت زمان IPT بستگی به ماهیت مشکل و موثر بودن تیم در رسیدن به اهدافش دارد.



شکل ۱۸- ۲۰- سازمان وظایف با فعالیت‌های IPPD/IPT

بایستی دقت شود که از برپایی تیم‌های اضافی جلوگیری شود زیرا ارتباطات فرایندها و واسطها هنگامی که تعداد تیم‌ها زیاد شود، بسیار پیچیده می‌شود. علاوه‌بر این، اغلب در مساله‌های مهم و این که کدام مساله پاسخ موازنه است، تداخل پیش می‌آید. هم‌چنین، هنگامی که تیمی در رسیدن به اهدافش غیرموثر می‌شود، بایستی منحل شود. تیم مستقر شده‌ای که بتواند مفید بودنش را حفظ کرده و باقی بماند، می‌تواند سازنده باشد.

۱۸-۳-۳- استخدام برای سازمان مهندسی سیستم‌ها

برای شروع، مهم است که مساله‌ی فرهنگ را در طراحی و توسعه‌ی توانایی یک سازمان و نیازمندی‌های منابع انسانی، خصیصه‌های رهبری، استخدام، فاکتورهای انگیزه‌بخشی، توسعه‌ی کارکنان و غیره درک کرد و مدنظر داشت. فرهنگ به شخصیت، محیط، جو و سایر مسائل مشابه در یک سازمان وابسته است. فرهنگ یک سازمان، رفتار و ارزش‌های مناسب در یک سازمان را تعریف می‌کند، می‌تواند به افراد انگیزه بدهد، بر نحوه‌ی پردازش اطلاعات اثر بگذارد و با روابط و ارزش‌های درونی و بیرونی سر و کار دارد و می‌تواند مثبت و یا منفی باشد.

با ارجاع به مهندسی سیستم‌ها، دست‌یابی موفق به اهداف و تکالیفی مشخص شده که پیش‌تر تعریف شد، به‌شدت بستگی به فرهنگ، توانایی‌های کلی و محیطی دارد که برای سازمان فراهم شده است. مثال‌های متعددی وجود دارند که سازمان‌هایی برپا شده‌اند و تحت عنوان دپارتمان مهندسی سیستم‌ها یا گروه مهندسی سیستم‌ها طراحی شده‌اند اما در آن‌ها نیازمندی‌های ابتدایی هم برطرف نشده است. از سوی دیگر، مثال‌های بسیار دیگری نیز از چنین سازمان‌هایی وجود دارد که بسیار موفق بوده‌اند. نکته کلیدی در این است که ساختار و فرایندهایش را راه‌اندازی کنیم و محیط مثبتی بسازیم. این امر نیاز به بهبود ارتباطات موثر از طریق ساختار دستورکار/پروژه مشخص، اکتساب اعتبار لازم از نظر ظرفیت فنی، در نظر گرفتن نقش رهبری برای دستورکار، توانایی اثرگذاری طراحی سیستم و فرایند توسعه بر مبنای ثابت دارد. این ممکن است به نوعی

چالش برانگیز باشد، زیرا سازمان مهندسی سیستم‌ها بایستی تقریبا بدون داشتن کنترل مستقیم تمامی منابع موردنیاز برای انجام کار به انجام برسد. برای تکمیل وظایف به‌طور موفق، بایستی بتوان به‌صورت موثر و بهینه با سازمان‌های خارجی متفاوت و متنوعی که اغلب در جهان خارجی قرار دارند، کار کرد.

با دانستن ماهیت سازمان مهندسی سیستم‌ها، نیاز به در نظر گرفتن خصیصه‌های زیر در توسعه‌ی ساختار مناسب ضروری است:

۱. در حالت عمومی کارکنان انتخاب شده برای گروه مهندسی سیستم‌ها باید افراد بسیار حرفه‌ای و سطح بالا با پیش‌زمینه‌های متفاوت و گستردگی دانش باشند- برای مثال، درک به‌کارگیری تحقیقات، طراحی و توسعه، ساخت، به‌کارگیری سیستم و پشتیبانی، بازیافت ماده و معدوم کردن آن. تاکید بر روی طراحی سطح سیستم کلی و به‌کارگیری فناوری، با دانش عملیات‌های کاربر و در خاطر داشتن نگه‌داری در چرخه‌ی حیات و پشتیبانی.

۲. کارکنان انتخاب شده بایستی به اندازه‌ی کافی در فناوری‌های مربوط به طراحی و کاربرد خاص آن‌ها و در طول فرایند طراحی و توسعه‌ی سیستم متبحر باشند. برای مثال، درکی کلی از بعضی اصول و مفاهیم قابلیت اتکا، نگه‌داری، مولفه‌های انسانی، امنیت و ایمنی، تدارکات و قابلیت پشتیبانی، کیفیت، مهندسی ارزش و غیره برای به‌کار بردن در چرخه‌ی حیات سیستم داشته باشند.

۳. گروه مهندسی سیستم‌ها بایستی دید و خلاقیت در انتخاب فناوری برای طراحی، ساخت و اعمال پشتیبانی داشته باشند. کارکنان گروه باید به‌طور مداوم به دنبال

فرصت‌های جدید گشته و نوآور باشند و تحقیقات کاربردی اغلب برای حل مشکلات فنی خاص موردنیاز است.

۴. روش کار تیمی باید در گروه مهندسی سیستم‌ها آغاز شود. کارکنان موظف، بایستی به اهداف سازمان متعهد باشند. تا حدودی استقلال لازم است و بایستی اعتماد و احترام متقابل وجود داشته باشد.

۵. درجه‌ی بالایی از ارتباط بایستی به‌دست بیاید هم درون گروه مهندسی سیستم‌ها و هم با وظایفی بسیار زیادی که مربوط به یک پروژه مربوط هستند (به شکل ۱۸–۱۸ مراجعه شود). ارتباطات یک فرایند دو طرفه است و ممکن است با روش‌های نوشتاری، کلامی و/یا غیرکلامی به‌دست آید. ارتباطات خوب ابتدا بایستی درون سازمان مهندسی سیستم‌ها وجود داشته باشد. با استقرار یافتن آن، سپس نیاز است که ارتباطات دوسویه خارجی با استفاده از کانال‌های عمودی و افقی مطابق نیاز توسعه داده شوند.

کلمه"محیط" اشاره به (۱) محیط کار درون خود گروه مهندسی سیستم‌ها در وهله اول، (۲) محیط کار خارجی نسبت به سازمان مهندسی سیستم‌ها ولی درون ساختار سازمانی کلی تولیدکننده و (۳) محیط کار مرتبط با سازمان‌های خارجی مستقر در نقاط مختلف با فاصله دارد. تولید یک محیط دلخواه درون سازمان باید از بالا شروع شود. رئیس یا مدیر کل بایستی ابتدا اعتقاد داشته و متعاقبا از مفاهیم و اهداف مهندسی سیستم‌ها حمایت کند. علاوه‌بر این، سطح مناسبی از مسئولیت و اختیار و منابع لازم باید از بالا اختصاص یافته و به پایین و مدیر گروه مهندسی سیستم‌ها محول شود.

برای بهره‌گیری بیش‌تر از اهداف شرح داده شده در این‌جا، خصیصه‌ها و مدل مدیریتی مدیر گروه مهندسی سیستم‌ها بهتر است متمایل به مدل دموکراتیک و مشارکتی رهبری و در مقابل

روش استبدادی و دیکتاتوری باشد. بایستی محیطی فراهم شود که به افراد اجازه نوآوری، خلاقیت، انعطاف‌پذیری، رشد فردی و غیره بدهد. مدیر بایستی همان‌طور که تحکم را حفظ می‌کند و مسیرهای لازم را مشخص کرده و موثر و بهینه بودن سازمان برای رسیدن به اهداف تعریف شده را کنترل می‌کند، می‌تواند کارهایی را تعریف کند که به‌طور روزمره مستقیما مدل رهبری دموکراتیک و کار تیمی را حمایت می‌کند. برای مثال، از طریق درخواست برای تلاش افراد که منجر به رشد نهایی سازمانی می‌شود، معرفی برنامه‌های شناسایی و تقدیر از کارکنان، پیاده‌سازی روش‌های خوب ارتقای کارکنان و غیره انجام گیرد.

با اینکه گسترش ترکیب صحیح منابع انسانی و ساختن محیط کار خوب از ابتدا ضروری است، چالش این است که با ادامه‌ی رشد سازمان و پاسخ‌گویی‌اش به نیازمندی‌های مختلف، بتوان این شرایط را در طول زمان حفظ کرد. اغلب برای یک سازمان (و مدیریتش) ساده است که خودخواهی پیشه کرده و در این شرایط متوقف شود. به هر حال، برای ادامه‌ی تاثیر و بهینگی در رسیدن به اهداف مهندسی سیستم‌ها، سازمان بایستی به‌صورت ذاتی پویا باشد. کارکنان موظف برای انجام چنین وظایفی بایستی به شدت و با بهبود دانش مربوطه از طریق تعقیب سیر یادگیریشان (یا روش مشابه)، بهبود توانایی کار و فرایندهای ارتباطی و غیره انگیزه بگیرند. تجربه کردن موفقیت در عمل (در درازمدت) نه تنها نیاز به استخدام و توسعه‌ی مناسب ساختار سازمانی دارد بلکه نگه‌داری آن نیز به همین اندازه مهم است.

۱۸-۴- خلاصه فصل

این فصل روش‌های سازماندهی و برنامه‌ریزی ضروری را در تمامی طیف مدیریت مهندسی سیستم‌ها معرفی کرد. با دانستن این که ۱۷ فصل اول این کتاب وقف وابستگی مشکلات فنی مهندسی سیستم‌ها، فرایند مهندسی سیستم‌ها، اصول طراحی انتخاب شده، روش‌ها و ابزار تحلیلی و غیره شده بود، هدف، نشان دادن مهندسی سیستم‌ها از زاویه‌ی دید مدیریتی بود. یک شرکت

ممکن است بهترین مدل فنی ممکن را توسعه دهد، اما به‌کارگیری آن در عمل موثر و بهینه نخواهد بود مگر این‌که روش مدیریتی مناسب به‌صورت هم‌زمان پیاده شود. این فصل، اولین فصل از دو فصلی است که به مدیریت مهندسی سیستم‌ها می‌پردازد. فصل بعدی که باید آن را به‌صورت مکمل دید، در ادامه و با نام "مدیریت، کنترل و ارزش‌گذاری دستورکار" آمده است.

در این فصل توسعه یک برنامه‌ی مدیریت مهندسی سیستم‌ها (SEMP) است که شامل شناسایی تکالیف مهندسی سیستم‌ها، یک ساختار شکست کار (WBS) نمونه، چند روش برای زمان‌بندی تکالیف، یک نمایش هزینه‌ی دستورکار و واسطهای اصلی با سایر فعالیت‌های بحرانی دستورکار می‌باشد. به‌دنبال فعالیت‌های ابتدایی برنامه‌ریزی، توسعه‌ی سازمان مهندسی سیستم‌هاست. انواعی از ساختارهای سازمان برای دربرگرفتن مهندسی سیستم‌ها درون محتوای یک ساختار وطیفه‌ای رسمی، یک ساختار پروژه‌ای خالص، یک ساختار ماتریسی و یک ساختار پروژه‌ای- وظیفه‌ای مرکب نشان داده شده‌اند. صورت اصلی روش IPPD/IPT نیز بحث شده است. در نهایت، مباحثی بر روی نیازمندی‌های خاص و استخدام یک سازمان مهندسی سیستم‌ها (دپارتمان یا گروه) مطرح شده است.

در این‌جا بایستی تاکید شود که مهندسی سیستم‌ها بیش‌تر یک فلسفه، یک فرایند تفکر و یک روش مبتنی بر چرخه‌ی حیات است که برای طراحی و توسعه‌ی سیستم‌ها پیشنهاد شده است. نباید مهندسی سیستم‌ها را تنها به‌عنوان یکی دیگر از علوم مهندسی یا حوزه‌ی فنی مانند مهندسی برق، مهندسی مکانیک، مهندسی قابلیت اتکا، مهندسی کیفیت و امثال آن دید. مهندسی خوب سیستم‌ها روشی اصولی و در عین حال بین رشته ایست که با ادغام مناسب و منطبق بر زمان فعالیت‌های طراحی مختلف(و متعاقبا اعتبارسنجی و پشتیبانی) اعمال می‌شود. هدف آن تامین محصول خروجی موثر و بهینه در پاسخ به بعضی نیازهای معلوم مشتری است و به شدت بین رشته‌ای است و خطوط سازمانی متفاوت بسیاری را قطع می‌کند.

برای رسیدن به اهداف مهندسی سیستم‌ها، الزاما به ساختار سازمانی بزرگی نیاز نیست بلکه به تعداد اندکی از کارکنان با ارزش و با تجربه‌ی مناسب و با سطحی از تخصص نیاز است. علاوه‌بر این، اصول و مفاهیم مهندسی سیستم‌ها می‌تواند از درون هر نوع ساختار سازمانی، هرچند وظیفه‌ای، پروژه‌ی خالص، ماتریس یا ترکیبی از آنان باشد، آغاز شود. تنها نیاز به هدایت خوب از بالا به پایین (از دید سازمانی)، سبک مدیریت صحیح و ارتباطات خوب در سازمان فنی است.

با اینکه به‌کارگیری مهندسی سیستم‌ها نیم قرن یا بیش‌تر به عقب برمی‌گردد، امروزه این اصول و مفاهیم در سطح جهانی پیاده‌سازی نشده‌اند. یکی از دلایل این مساله به کمبود درک عمومی و پذیرش در بسیاری از سازمان‌ها برمی‌گردد. اگرچه منافع مشتق شده می‌توانند بسیار باشند، هنوز اکراه شدیدی برای تفکر بر مبنای سیستم‌ها، تفکر بین رشته‌ای و تفکر راجع به سیستم با محتوای کل چرخه‌ی حیات وجود دارد و این ریشه در بنیان آموزش ابتدایی ما دارد که تاکید بر روی بازه‌ی زمانی کوتاه، تفکر درباره‌ی محصولات تکی (و نه سیستم‌ها) و به شدت تخصصی شدن در یک علم خاص یا حوزه‌ی مهندسی دارد. چالش آتی گسترش تفکر فرد برای یک روش جامع‌تر از طریق تحصیلات رسمی و تمرین است– روش پیشنهاد شده و بحث شده در این کتاب مهندسی سیستم‌ها.

وب سایت‌های زیر اطلاعات جاری و محتوای مفیدی را تامین می‌کنند:

۱- انجمن مدیریت آمریکا (AMA)– http://www.amanet.org

۲- موسسه مدیریت پروژه (PMI)– http://www.pmi.org

۳- انجمن مدیریت قرارداد ملی (NCMA)– http://www.ncmahq.org

مطالب مدیریت سیستم‌ها، مدیریت دستورکار، مدیریت پروژه و حوزه‌های مختلف آن‌ها، شامل حوزه‌ی مطالعه گسترده‌ای است. تنها ملزومات ضروری، که به مدیریت سیستم‌ها مربوط می‌شوند،

در این فصل گنجانده شده‌اند. هدف، تامین دید جهت تصمیم‌گیری برای به‌کار بستن اصول و مفاهیم مهندسی سیستم‌ها برای شرایط واقعی است.

سوالات و مسائل

۱- برنامه‌ریزی مهندسی سیستم‌ها در چه زمانی از چرخه‌ی حیات بایستی آغاز شود؟ چه چیزی در آن گنجانده می‌شود ؟ چرا این مساله مهم است؟

۲- فایدهSEMP چیست؟ در چه زمانی از چرخه‌ی حیات بایستی توسعه یابد؟ با هرکدام از گزینه‌های زیر چه رابطه‌ای دارد: (الف) PMP (ب) برنامه‌ی دستورکار قابلیت اتکا (ج) برنامه‌ی پشتیبانی تدارکات ادغام شده ILSP (د) برنامه‌ی مدیریت ساختار (ه) برنامه‌ی کلی ارزش‌گذاری و آزمون TEMP و برنامه‌ی مهندسی پشتیبان؟

۳- ارتباط SEMP با مشخصات فنی سیستم نوع A (در صورت وجود) چیست؟

۴- سیستمی را به انتخاب خود در نظر بگیرید و چارچوب مشروحی از SEMP برای سیستم خود بنویسید.

۵- تکالیفی را که بایستی در پیاده‌سازی دستورکار مهندسی سیستم‌ها گنجانده شوند، بنویسید.

۶- فایدهWBS چیست؟ تفاوت بین SWBS و CWBS چیست؟ اگر با کمبود منابع مواجه باشید و مسئول مشخص کردن نیازمندی‌های کار برای تامین‌کننده باشید از کدام یک استفاده می‌کنید؟

۷- اگر شما موظف به مدیریت یک دستورکار مدیریت سیستم‌ها و توسعه یک زمان‌بندی اصلی برای کار و تکالیفی باشید که باید انجام شود، از کدام روش زمان‌بندی برای تصمیم‌گیری وضعیت استفاده می‌کنید؟ چرا از این روش استفاده می‌کنید؟

۸- فرض کنید که موظف شده‌اید تا یک SEMP را برای یک سیستم دلخواه توسعه دهید. تکالیف/وظایفی را که بایستی به انجام برسانید، مشخص کنید و شرح دهید. سپس شبکه‌ای (PERT/CPM) برای دستورکار بسازید و مسیر بحرانی را مشخص کنید.

۹- برای شبکه‌ی توسعه یافته در مساله۸، یک نمایش هزینه را توسعه دهید و هزینه‌ها را با هر یک از فعالیت‌های زمان‌بندی شده مرتبط کنید.

۱۰- فرض کنید که در ارزش‌گذاری وضعیت دستورکار در مساله۸، کشف کنید که یک فعالیت در طول مسیر بحرانی از زمان بندی عقب افتاده است. برای اصلاح این شرایط چه گام‌هایی برمی‌دارید؟

۱۱- بعضی اهداف کلیدی را در سازمان برای مهندسی سیستم‌ها برشمرید.

۱۲- با در نظر داشتن مهندسی سیستم‌ها، بعضی خوبی‌ها و بدی‌های ساختار سازمان وظیفه‌ای خالص، ساختار سازمان پروژه‌ای خالص و ساختار سازمانی ماتریس را شرح دهید.

۱۳- فرض کنید که موظف شده‌اید که یک ظرفیت مهندسی سیستم‌ها جدید در شرکت خود توسعه دهید. یک چارت سازمانی فرضی برای شرکت بسازید و عناصر سازمانی مسئول برای انجام تکالیف مهندسی سیستم‌ها را مشخص کنید و روابط واسط را با گروهای سازمانی حیاتی دیگر شرح دهید.

۱۴- اگر شما مسئول استخدام یک سازمان مهندسی سیستم‌ها بودید، چه نوع اشخاصی را استخدام می‌کردید؟ انتظارات در مورد پیش‌زمینه و تجربه، ویژگی‌های شخصیتی و مهارت‌های دلخواه مشخص را شرح دهید.

۱۵- به‌عنوان یک مدیر مهندسی سیستم‌ها، برای دست‌یابی موثر به اهدافتان تلاش میکنید چه نوع محیط سازمانی را خلق کنید؟

۱۶- هدف مفهوم IPPD چیست؟ IPT چیست و اهدافش چیست؟

۱۷- با ارجاع به شکل ۱۸-۱۸، فرض کنید که به‌عنوان مدیر سازمان مهندسی سیستم‌ها منصوب شده‌اید و فرایندهای ارتباطی نشان داده شده با خطوط نقطه چین به‌خوبی کار نمی‌کنند. چه گام‌هایی برای تقویت این اتصالات ارتباطی برمی‌دارید؟

۱۸- فرض کنید که شما مدیر یک سازمان مهندسی سیستم‌ها تازه تاسیس هستید و برای تکمیل وظایف موردنیازتان بایستی با تعداد زیادی سازمان خارجی سر و کار داشته باشید که در مکان‌های ملی و بین المللی قرار دارند. بعضی از نیازمندی‌هایی را که پیاده‌سازی خواهید کرد و شما را از دست‌یابی موفقیت‌آمیز به اهدافتان مطمئن خواهد کرد، شرح دهید.

۱۹

مدیریت، کنترل و ارزیابی دستورکار

با در دست داشتن برنامه‌ی جامع مهندسی سیستم و یک ساختار سازمانی که در فصل ۱۸ تشریح شد، چالش بعدی، پیاده‌سازی است. در فصل قبل مثال‌های زیادی ارائه شد که در آن‌ها برنامه‌ریزی مناسب و به‌موقع انجام شده، اما پس از آن، برنامه به حال خود رها می‌شود. درنتیجه، برنامه به‌علت سهل‌انگاری تضعیف شده است. برای انجام موفقیت‌آمیز مهندسی سیستم‌ها، یک رویکرد مدیریتی دو گامی پیشنهاد می‌شود. ابتدا برنامه‌ریزی و سازمان‌دهی مهندسی سیستم همان‌طور که در فصل قبل ارائه شد، باید تکمیل شود. سپس، پیرو آن مدیریت دستورکار، پیاده‌سازی، کنترل و ارزیابی فعالیت‌ها که در این فصل بحث می‌شوند، باید آغاز شود.

با مراجعه به قسمت ۱۸-۲، SEMP نیازمندی‌های پیاده‌سازی دستورکار مهندسی سیستم‌ها را با هدف طراحی، توسعه و خلق یک سیستم جدید (یا مهندسی مجدد) تعریف می‌کند. اهداف دستورکار، تکالیف موردنیاز مهندسی سیستم‌ها، ساختار شکست کار (WBS)، زمان‌بندی تکالیف و هزینه‌ها باید در SEMP قرار داده شوند. به‌علاوه، یک رویکرد سازمانی همراه با نیازمندی‌های واسطه ساختاری و سازمانی تشریح شده است. SEMP همراه با مشخصات فنی سیستم (نوع A) اساسا نیازمندی‌های "چه" را از نقطه‌نظر دستورکار کلی در دستورکار قرار می‌دهد.

با داشتن نیازمندی‌های "*چه*" به‌عنوان ورودی، گام اساسی بعدی پیاده‌سازی برنامه است. براین اساس، اهداف این فصل پاسخ‌دهی به نیازمندی‌ها SEMP توسط تشریح "*چگونه*"*های* مربوط به پیاده‌سازی برنامه می‌باشد. با مطالعه‌ی محتوای بخش پنجم، خواننده فهم مناسبی از نیازمندی‌های مهندسی سیستم که در فصل ۱۸ ارائه شد، پیدا کرده و دید خوبی در مورد نیازمندی‌های روزانه مدیریت، کنترل و ارزیابی دستورکار که در این فصل تشریح شده است، پیدا می‌کند. موضوعات باقی مانده که باید مطالعه شوند، به‌صورت زیر هستند:

- استقرار اهداف سازمانی؛
- نیازمندی‌های برون‌سپاری و شناسایی تامین‌کنندگان؛
- فراهم کردن رهبری و مدیریت دستورکار روزانه؛
- پیاده‌سازی ارزیابی دستورکار و قابلیت بازخورد؛
- انجام تحلیل ریسک.

موضوع مورد توجه در این فصل یک رویکرد در اجرای ارزیابی عملکرد سازمان مهندسی سیستم است که شامل تعیین سطح بلوغ سازمان می‌شود. این نوع از ارزیابی سازمانی برای پاسخ به نیاز برای قابلیت حسابداری است که اکنون در همه حوزه‌های فعالیت‌های انسانی وجود دارد.

۱۹-۱- اهداف سازمانی

مقصود سازمان که در زمینه مهندسی سیستم‌ها در نظر گرفته شده است، برآورده کردن نیازهای تشریح شده در SEMP و مشخصات فنی سیستم (نوع A) است. هدف سازمان در این راستا تنظیم شده و به دو سطح از فعالیت مربوط می‌شود: (۱) اهداف مشخص شده توسط TPMها که در قسمت ۳-۶ بحث شد و DDPها را کمی می‌کنند؛ و (۲) اهداف سازمان مربوط به

انجام فعالیت‌های لازم برای حصول اطمینان از دست‌یابی به اهداف اولیه. سوال اساسی این است که *عملکرد سازمان در دست‌یابی به هدف اول تا چه حد اثربخش و کاراست؟*

در این مورد، سوال بالا را می‌توان در رابطه با سازمان مهندسی سیستم‌ها به‌صورت (۱) اثر آن بر خود ساختار طراحی سیستم/محصول؛ و (۲) اثربخشی و کارایی در انجام ۱۱ وظیفه‌ی تشریح شده در قسمت ۱۸-۲-۲، را در دستورکار قرار داد. غیرمتداول نیست که تنها هدف دوم مورد بررسی قرار می‌گیرند، با این باور که انجام وظایف شناسایی شده به‌خوبی انجام می‌شوند و در همین زمان سازمان به هیچ وجه تحت تاثیر طراحی نباشد. بنابراین، هنگامی که ارزیابی قابلیت‌های سازمانی پس و پیش انجام می‌شوند، هدف دوم ابتدا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در ارتباط با موضوع ساختار سازمانی، که نقطه تاکید فصل ۱۸ است، هدف، توسعه‌ی یک قابلیت کامل مهندسی سیستم‌هاست که توانایی انجام ۱۱ تکلیف را به‌صورتی کارا برآورده کند. این موضوع به‌نوبه‌ی خود نیازمندی (۱) استقرار مجموعه‌ای از شاخص‌ها برای ارزیابی تکالیف؛ (۲) توسعه فرایندهای لازم برای انجام این تکالیف؛ و (۳) جمع‌آوری اطلاعاتی است که مدیریت را برای رهگیری عملکرد و تعیین چگونگی کارکرد کلی سازمان توانمند می‌کند. هدف سازمانی استقرار یک رویکرد اصولی برای انجام این تکالیف و استقرار اهداف قابل اندازه‌گیری است که می‌توانند به‌صورت کمی بیان و کنترل شوند و فرایند بهبود مستمر را فراهم آورند.

هنگامی که تکالیف مهندسی سیستم‌ها، به همراه شاخص‌های مربوط شناسایی شده باشند، مدیریت باید وضعیت فعلی سازمان را ارزیابی کند. در همین زمان، مناسب است که نتایج با دیگر واحدهای قابل مقایسه، تطبیق داده شود. یک رویکرد الگوبرداری را می‌توان برای کمک به توسعه اهداف آتی استفاده کرد. الگوبرداری می‌تواند به‌صورت یک فعالیت پیوسته مقایسه فرایند، محصول یا خدمات خود با بهترین فعالیت‌ها مشابه شناخته شده تعریف کرد به‌صورتی که اهداف چالش‌برانگیز ولی قابل دست‌یابی تعیین شده و مجموعه‌ای از فعالیت‌های پیاده‌سازی شود تا در یک دوره‌ی زمانی

معقول تبدیل به بهترین بهترین‌ها شده و در آن حالت باقی بماند. سوالات نهایی عبارت‌اند از *ما الان کجایی؟ چگونه محصول، فرایند و/یا سازمان خود را با دیگران مقایسه می کنیم؟ در آینده کجا خواهیم بود؟*

اهداف سازمانی باید در ابتدا برای پاسخ به نیازمندی‌های عملیاتی سیستم استقرار یافته و TPMهای توسعه داده شده برای سیستم (قسمت ۳-۶) تدوین شود. سپس، اهداف دیگری را می‌توان برای خود سازمان مهندسی سیستم‌ها استقرار داد. با استفاده از الگوبرداری، اهداف آتی قابل شناسایی است و برنامه رشد سازمانی قابل توسعه است که هنگام پیاده‌سازی می‌تواند به دست‌یابی اهداف مطلوب کمک کند.

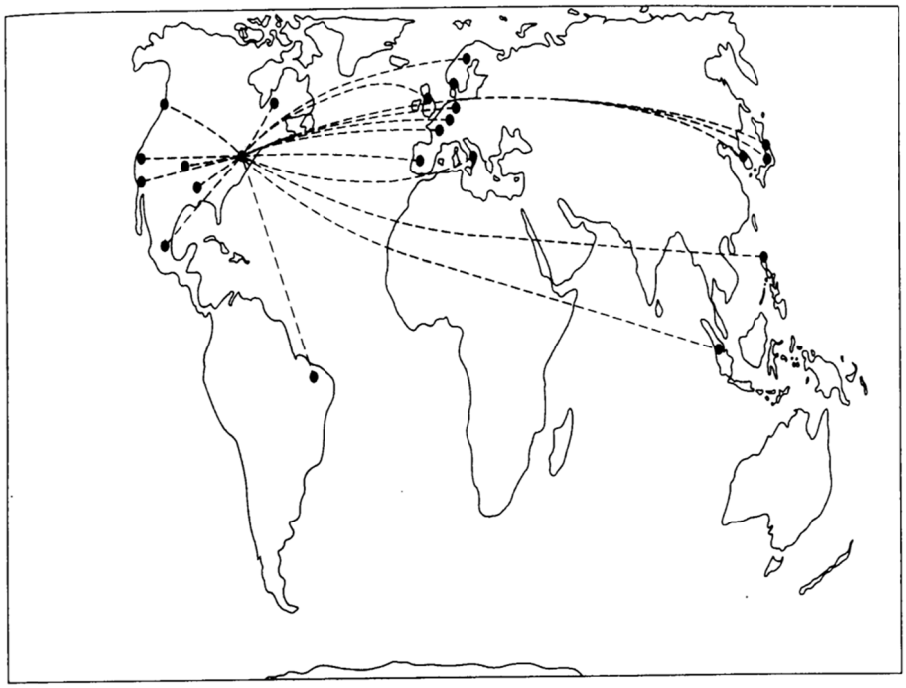
۱۹-۲- برون‌سپاری و شناسایی تامین‌کنندگان

در نتیجه‌ی روند افزایش تقاضای سیستم/محصول در زمان کم‌تر و در هزینه کم‌تر و در یک بازار جهانی شدیدا رقابتی، تاکید زیادی بر موضوع برون‌سپاری شده است. واژه برون‌سپاری به شناسایی، انتخاب و عقد قرارداد با یک یا چند تامین‌کننده خارجی برای تدارک و/یا اکتساب مواد و خدمات یک سیستم مشخص اطلاق می‌شود. واژه‌ی تامین‌کننده به مفهومی فراتر از سازمان‌های خارجی که محصولات، اجزا، مواد و/یا خدمات را برای تولیدکننده فراهم می‌کنند، اطلاق می‌شود (شکل ۱۸-۱۳). این موضوع بازه‌ای از طراحی و تحویل زیرسیستم‌ها یا آیتم‌های ساختاریافته عمده تا اجزای کوچک را پوشش می‌دهد. به‌ویژه، تامین‌کنندگان می‌توانند خدماتی فراهم کنند که عبارت‌اند از (۱) طراحی، توسعه و تولید یک عنصر اصلی سیستم؛ (۲) تولید و توزیع محصولاتی که طراحی شده‌اند؛ ۰۳) توزیع اجزا و قطعات استاندارد و تجاری از یک انبار استقرار یافته که به‌عنوان یک انبار که منبع تامین است، خدمت‌دهی می‌کند؛ و/یا (۴) فراهم کردن یک خدمت از طریق پیاده‌سازی یک فرایند در پاسخ به برخی نیازمندی‌های وظیفه‌ای.

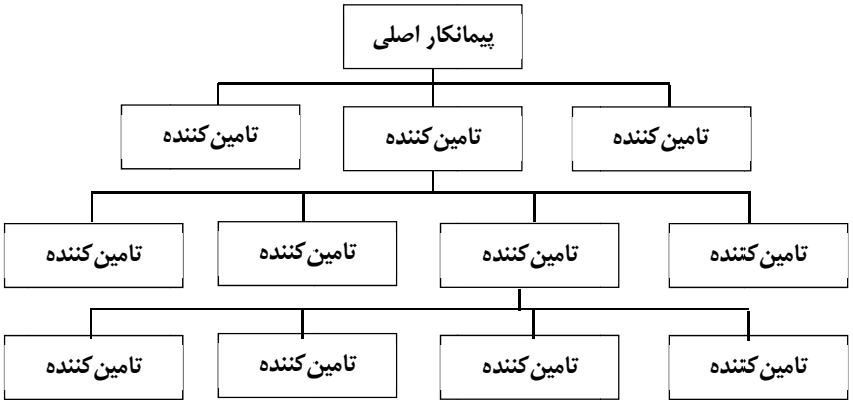
برای بسیاری از سیستم‌های امروزی، تامین‌کنندگان تعداد زیادی از عناصر این سیستم‌ها و هم‌چنین آیتم‌های موردنیاز برای حفظ نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی سیستم را فراهم می‌کنند. با داشتن روندهای مرتبط با افزایش جهانی شدن و رقابت بیش‌تر بین‌المللی، تامین‌کنندگانی که با برنامه‌ها در مقیاس نسبتا بزرگ درگیر هستند، از نظر جغرافیای می‌توانند در سرتاسر دنیا پخش شده باشند و در نتیجه یک محیط کاری جهانی را تشکیل دهند. این موضوع در شکل ۱۹–۱ نشان داده شده است. علاوه‌براین، هنگامی که تامین‌کنندگان اصلی انتخاب می‌شوند، مخصوصا برای طراحی و توسعه عناصر سیستم‌های بزرگ، این احتمال وجود دارد که اجزای کوچک‌تر که زیرسیستم‌های مختلف را تشکیل می‌دهند، توسط تامین‌کنندگان دیگری برای این تامین‌کنندگان اصلی تهیه شود. در همین زمان، بسیاری از تامین‌کنندگان ممکن است تعداد زیادی از سیستم‌های مختلف با اهداف ماموریتی مختلف را به‌صورت هم‌زمان پشتیبانی کنند (شکل ۱۵–۳). بنابراین، فرد ممکن است با لایه‌های مختلفی از تامین‌کنندگان سر و کار داشته باشد که هر کدام اهداف عملیاتی مختلفی داشته باشند. این موضوع در شکل ۱۹–۲ نشان داده شده است. با مراجعه به قسمت ۱۹–۱، هنگامی که SEMP و مشخصات فنی سیستم نیازمندی‌ها را برای پیاده‌سازی یک دستورکار مهندسی سیستم‌ها بیان می‌کند (به‌عنوان چه‌ها)، این مسئولیت تولیدکننده است که روشی را مشخص کند که این نیازمندی‌ها برآورده شود (یعنی *چگونه‌ها*). از طریق تحلیل وظیفه‌ای، نیازمندی‌های منابع شناسایی شده (یعنی تجهیزات، نرم‌افزار، تسهیلات، داده‌ها و غیره) و گام بعدی، شناسایی منابع ممکن برای تامین آن‌هاست. *آیا طراحی یا تولید یک آیتم از یک تجهیز، توسعه یک بسته نرم‌افزاری، یا تکمیل یک فرایند انجام شده باید داخل سازمان تولیدکننده و توسط تسهیلات او انجام شود یا باید از یک منبع خارجی برای تامین آن استفاده کرد؟* هدف استقرار نیازمندی‌ها در تعیین منبع تامین است تا نیازهای شناسایی شده مربوط به منابع موردنیاز پاسخ داده شود.

در بسیاری از سازمان‌های صنعتی، کمیته خرید یا تولید، یا فعالیت مشابه آن در سازمان تولیدکننده استقرار داده می‌شود. در این فعالیت مدیریت دستورکار، مهندسی، تولید، تدارکات، تضمین کیفیت، خرید و دیگر فعالیت‌های پشتیبانی سازمانی قرار داده می‌شوند. مشارکت مهندسی باید شامل گروه مهندسی سیستم‌ها و رشته‌های مناسب مربوط به طراحی باشد. تصمیم‌ها بر پایه ارزیابی ترکیبی از فاکتورها مانند بحرانی بودن و زمان اتفاق افتادن نیاز، پیچیدگی آیتم، قابلیت‌های داخلی دسترسی‌پذیری و منابع موردنیاز، فاکتورهای اجتماعی و سیاسی مربوطه، موضوعاتی مانند زبان و فرهنگ، تعطیلات رسمی، نیازمندی‌های بسته‌بندی و حمل و نقل، قوانین و غیره قرار داشته و باید در فرایند کلی ارزیابی و انتخاب تامین‌کننده در دستورکار قرار گیرد.

از نقطه‌نظر مهندسی سیستم‌ها، آیتم‌هایی که نسبتا پیچیده هستند و دارای فناوری‌های جدید هستند و آن‌هایی که برای توسعه کلی سیستم حیاتی است باید در صورت امکان به‌صورت داخلی تامین شوند. این فعالیت‌ها نیازمند نظارت متناوب و کنترل سخت‌گیرانه است (هم مدیریتی و هم فنی). دشوار است که چنین نظارتی بر تامین‌کننده‌ای انجام شود که در جای دوری قرار دارد.



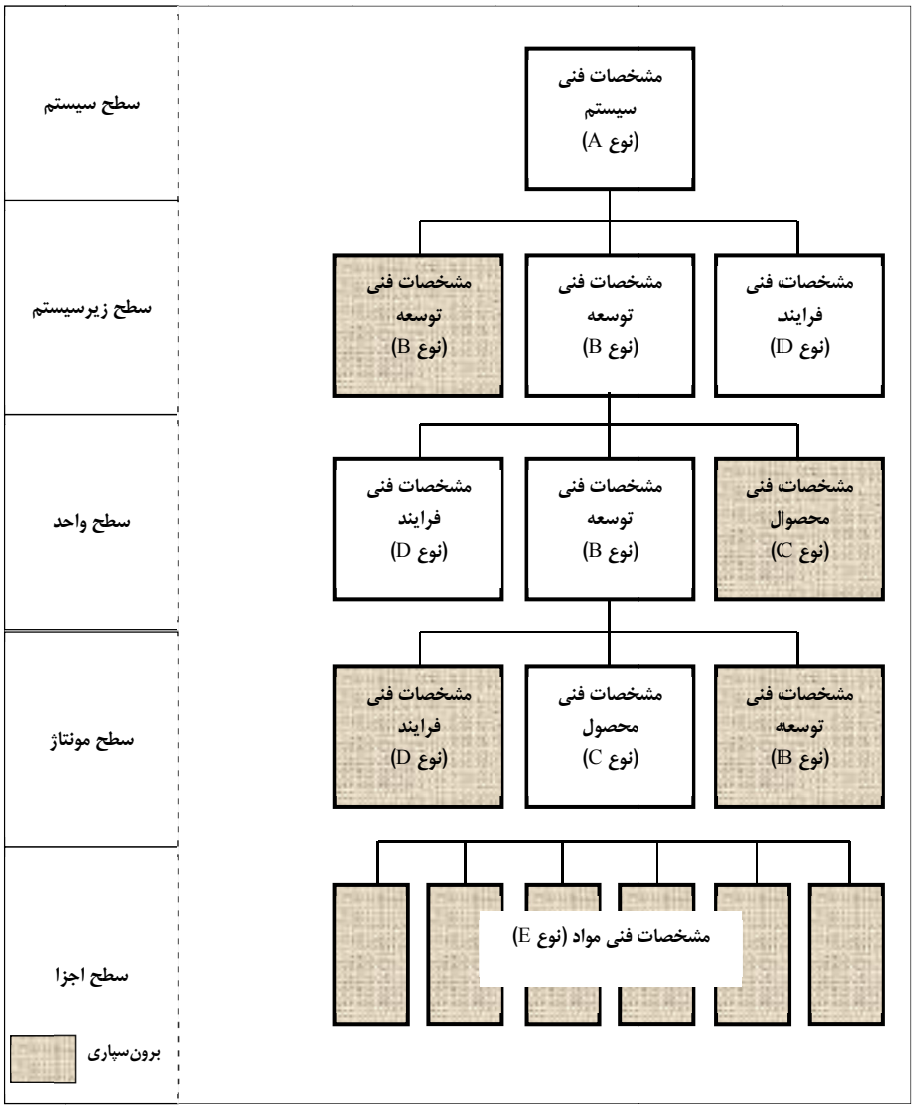
شکل ۱۹- ۱- تامین‌کنندگان بالقوه برای سیستم XYZ.



شکل ۱۹- ۲- یک ساختار متداول از لایه‌بندی تامین‌کنندگان.

نتیجه‌ی سنجش کمیته خرید یا تولید منجر به پیشنهادهای مشخصی می‌شود که تعیین می‌کند منابع بالقوه تامین برای برآورده کردن نیازمندی‌های وظیفه‌ای در توسعه یک سیستم معلوم کدامند. تامین‌کنندگان بالقوه خارجی شناسایی شده‌اند و این موضوع به‌نوبه‌ی خود منجر به فراهم شدن مشخصات فنی (نوع B تا E) و توسعه یک درخواست برای پروپوزال (RFP)، دعوت به مناقصه (IFB) یا موارد مشابه می‌شود. یک ترکیب تولیدکننده- تامین‌کننده از نیازمندی‌ها می‌تواند مطابق شکل ۱۹-۳ تکامل یابد. تامین‌کنندگان راغب و با صلاحیت، پروپوزال فنی و مدیریتی خود را برای پاسخ به مشخصات فنی و نیازمندی‌های RFP/IFB ارسال می‌کنند. تولیدکننده سپس همه پروپوزال‌ها را بررسی و ارزیابی کرده و بر پایه نتایج با تامین‌کنندگان مذاکره کرده و قراردادهای مناسب پیاده‌سازی می‌شوند.

در ارزیابی پروپوزال‌های تامین‌کنندگان، موضوعات مختلفی در شکل ۱۹-۴ شناسایی شده است که باید مورد بررسی قرار گیرند. مهم‌ترین این موضوعات عبارت‌اند از (۱) پاسخ تامین‌کننده به نیازمندی‌های تولیدکننده به‌صورت کلی، (۲) مشخصات فنی TPMها و قابلیت رهگیری این نیازمندی‌ها از نیازمندی‌های سطح بالای سیستم، (۳) شناخت تامین‌کننده از نیاز و اهمیت مهندسی سیستم‌ها، و (۴) تکالیف خاصی که تامین‌کننده پیشنهاد داده است که به‌نوبه‌ی خود و به‌طور مستقیم پشتیبان انجام فعالیت‌های مهندسی سیستم‌ها برای توسعه کلی سیستم است. انگیزه‌ی تامین‌کننده در راستای آغاز و حفظ ارتباطات خوب باید به سادگی قابل رویت باشد. چک‌لیست‌هایی از سوالات مربوط به ارزیابی یک تامین‌کننده در پیوست ب ارائه شده است.



شکل ۱۹- ۳- درخت مشخصات فنی نشان دهنده نیازمندی‌های برون‌سپاری.

چک لیست ارزیابی تامین‌کننده
D–۱. معیارهای کلی
D–۲. خصوصیات طراحی محصول
D–۲–۱ شاخص‌های عملکرد فنی
D–۲–۲ فناوری‌های کاربردی
D–۲–۳ خصوصیات فیزیکی
D–۲–۴ فاکتورهای اثربخشی
۱. قابلیت اطمینان
۲. قابلیت نگه‌داری و تعمیرات
۳. فاکتورهای انسانی
۴. فاکتورهای ایمنی
۵. قابلیت پشتیبانی/قابلیت خدمت‌دهی
۶. فاکتورهای کیفیت
D–۲–۵ فاکتورهای قابلیت تولید
D–۲–۶ فاکتورهای قابلیت امحا
D–۲–۷ فاکتورهای قابلیت حفاظت
D–۲–۸ فاکتورهای اقتصادی
D–۳. زیرساختار نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی محصول
D–۳–۱ نیازمندی‌های نگه‌داری و تعمیرات و پشتیبانی
D–۳–۲ داده‌ها/مستندات
D–۳–۳ خدمات پس از فروش/ضمانت

چک لیست ارزیابی تامین‌کننده
D–۳–۴ خدمات مشتری
D–۳–۵ فاکتورهای اقتصادی
D–۴. کفایت تامین‌کننده
D–۴–۱ برنامه‌ریزی/رویه‌ها
D–۴–۲ فاکتورهای سازمانی
D–۴–۳ کارکنان و منابع در دسترس
D–۴–۴ رویکرد طراحی
D–۴–۵ قابلیت تولید و ساخت
D–۴–۶ رویکرد آزمایش و ارزیابی
D–۴–۷ کنترل‌های مدیریتی
D–۴–۸ فاکتورهای تجربی
D–۴–۹ عملکرد گذشته
D–۴–۱۰ بلوغ
D–۴–۱۱ فاکتورهای اقتصادی
D–۴–۱۲ فاکتورهای اجتماعی/فرهنگی

شکل ۱۹- ۴- چک لیست ارزیابی تامین‌کننده (مثال).

۱۹-۳- رهبری و هدایت دستورکار

با مراجعه به قسمت ۱۸-۲-۲، برای انجام موفقیت‌آمیز ۱۱ تکلیف فهرست شده، نیاز است که سازمان مهندسی سیستم‌ها دارای یک نقش رهبری قوی برای دستورکار/پروژه داشته باشد. مدیر مهندسی سیستم‌ها باید رهبری ابتدایی در تعریف اولیه نیازمندی‌های سیستم، تهیه مشخصات فنی سیستم (نوع A) و SEMP، انجام تحلیل وظیفه‌ای در سطح سیستم، تهیه TEMP، انجام بازبینی‌های رسمی طراحی، نظارت و کنترل بر تغییرات طراحی و اصلاحات سیستم و غیره را بر عهده گیرد.

مدیر همه‌ی این تکالیف را خود انجام نمی‌دهد، بلکه نقش رهبری باید در هدایت و جهت‌دهی این فعالیت‌ها و فعالیت‌های مربوط به آن‌ها در نظر گرفته شود. علاوه‌بر این، مدیر باید قابلیت رهبری خود را ابتدا در تعریف و سپس در نظارت بر فعالیت‌های تامین‌کننده (فعالیت‌هایی که به مهندسی سیستم‌ها مربوط است) نشان دهد. به‌عنوان یک هدف، مدیر مهندسی سیستم‌ها باید خصوصیات رهبری زیر را به‌عنوان حداقل‌ها از خود نشان دهد:

۱. ***مقبولیت:*** دارای احترام و مقبولیت در بین افراد دیگر سازمان باشد.

۲. ***مهارت‌های اجرایی و اداری:*** کارهای خود و زیردستان را سازمان‌دهی کند؛ تفویض اختیار و مسئولیت کند؛ فعالیت‌های سمت‌های مختلف را اندازه‌گیری، ارزیابی و کنترل کند.

۳. ***رفتار:*** اشتیاق؛ خوش‌بینی؛ وفاداری به بالادستان، همکاران و سازمان.

۴. ***ارتباطات:*** از ارتباطات خوبی بین همه‌ی عناصر سازمان برخوردار باشد.

۵. ***خلاقیت:*** دارای ذهن خلاق باشد؛ ایده‌های بدیع داشته باشد؛ رویکردهای جدیدی در حل مسائل مطرح کند.

۶. ***قدرت تصمیم‌گیری:*** هنگام نیاز تصمیم‌های سریع اتخاذ کند.

۷. ***انعطاف پذیری:*** به سرعت با تغییر شرایط وفق پیدا کند؛ بتواند موضوعات غیرمترقبه را حل و فصل کند.

۸. ***روابط انسانی:*** تعاملات کارکنان را درک کرده و نسبت به آن‌ها حساس باشد؛ نسبت به افراد "حس" داشته و مشکلات آنان را به سرعت درک کند؛ دیگران را در نظر داشته باشد؛ بتواند به دیگران انگیزه داده و آنان را وادار به کار کند.

۹. ***فعال:*** دارای خود انگیزشی؛ در جستجوی فرصت‌های جدید؛ درجه بالایی از انرژی برای کار نشان دهد؛ به‌راحتی انگیزه خود را از دست ندهد؛ در انجام کارها سریع باشد.

۱۰. ***دانش:*** دارای دانش گسترده و عمیق در مورد مهارت‌های وظیفه‌ای موردنیاز در انجام نیازمندهای مقام خود باشد؛ از اطلاعات و مفاهیم دیگر علوم مرتبط آگاه باشد؛ دارای دید کلی نگر باشد.

۱۱. ***واقعیت نگری:*** دارای ذهن باز بوده و تصمیم‌ها را بدون تاثیرپذیری از کارکنان و به‌دور از احساس بگیرد.

۱۲. ***خودانگیزشی:*** دارای اهداف برنامه‌ریزی شده باشد؛ راغب به قبول مسئولیت‌های بزرگ‌تر باشد؛ واقع‌گرا باشد؛ برای بهبود مستمر خود کوشا باشد.

۱۳. ***اجتماعی بودن:*** سریع دوست شود؛ با دیگران کار کند؛ به افراد احترام بگذارد.

۱۴. ***قابلیت سخن وری:*** توسط افراد در سطوح مختلف سازمانی به راحتی درک شود.

۱۵. ***تصور:*** دارای حس پیش‌بینی باشد: بتواند روندها و فرصت‌های جدید را ببیند؛ رخدادهای آتی را پیش‌بینی کند؛ در سنت محدود نشده باشد.

مدیر مهندسی سیستم‌ها باید مهارت‌های رهبری را از ابتدا در تکمیل تکالیف ابتدایی مربوط به تعریف نیازمندی‌های سیستم و معماری آن، از خود نشان دهد (تحلیل نیازها و امکان‌سنجی، نیازمندی‌های عملیات، مفهوم نگه‌داری و تعمیرات، شناسایی و اولویت‌بندی فاکتورهای TPM، و تحلیل و تخصیص وظیفه‌ای در سطح سیستم). تکالیف کلیدی بعدی که در آن‌ها مدیر مهندسی سیستم‌ها باید نقش رهبری را ایفا کند، عبارت‌اند از پیاده‌سازی بازبینی‌های دستورکار و بازبینی‌های طراحی رسمی باشد، گزارش‌دهی و فعالیت‌های اصلاحی در صورت نیاز و فعالیت‌های مربوطه که ارزیابی پیوسته عملکرد سازمان مهندسی سیستم‌ها در دست‌یابی به اهداف دستورکار را ممکن می‌سازد.

۱۹-۴- ارزیابی دستورکار و بازخورد

فعالیت‌های بازبینی و ارزیابی دستورکار به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود. اول، وظایف بازبینی و ارزیابی است که به‌طورمستقیم در ارتباط با تکالیف مهندسی سیستم‌ها هستند (فعالیت‌هایی که برای پاسخ به نیازمندی‌های پروژه/دستورکار انجام می‌شوند که عبارت‌اند از طراحی و توسعه یک سیستم جدید یا مهندسی شده). دوم، نیازمندی‌های بازبینی و ارزیابی می‌باشند که مربوط به سازمان مهندسی سیستم‌ها است و مسئول تکالیفی است که باید تکمیل شود. این دو حوزه در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

۱۹-۴-۱- بازبینی و ارزیابی دستورکار

بازبینی دوره‌ای مدیریت برنامه کار اغلب در طی فرایند طراحی و توسعه سیستم انجام می‌شود. طبیعت و فراوانی این بازبینی‌ها بستگی به دستورکار داشته تابعی از پیچیدگی طراحی، تعداد و مکان‌های جغرافیایی تامین‌کنندگان، تعداد مسائلی که با آن مواجه است و غیره می‌شود. سیستم‌های در حال توسعه که دارای فناوری‌های جدید هستند و ریسک بالاتری در آن‌ها وجود دارد نیازمند بازبینی‌های بیش‌تری هستند.

هدف از این بازبینی‌های مدیریتی عبارت است از تعیین وضعیت تکالیف منتخب دستورکار، ارزیابی درجه پیشرفت از نظر برآورده شدن نیازمندی‌های قرارداد، بازبینی داده‌های هزینه‌ای و زمان‌بندی دستورکار، بازبینی فعالیت‌های تامین‌کننده و تنظیم نتایج بازبینی‌های طراحی فنی (به قسمت‌های ۳–۱۰، ۴–۸ و ۵–۸ مراجعه کنید). این بازبینی‌ها به سمت موضوعاتی که دارای طبیعت "دستورکار" هستند، هدایت می‌شوند و قصدی برای تکرار فرایند رسمی بازبینی طراحی که دارای طبیعتی "فنی" هستند، ندارند. با این حال، در هر دو TPMهای حیاتی که در شکل ۵–۹ وجود دارد رهگیری می‌شود.

قابلیت داده‌های مدیریت دستورکار که شامل اطلاعات موردنیاز برای این بازبینی‌های دستور می‌شود باید به‌صورتی طراحی شود که نوع درست اطلاعات، برای مکان‌های انتخاب شده و در قالب مناسب، در زمان مناسب، با فراوانی مطلوب، با درجه مناسب قابلیت اطمینان و با هزینه معقول فراهم شود. طبیعت و محتوای داده‌ها بر پایه تعدادی از فاکتورها قرار دارد که هم جنبه فنی (TPM) و هم جنبه دستورکار (به‌طور مثال تامین‌کنندگان) را دارا هستند. غیرمتداول نیست که فرد تعداد زیادی سیستم اطلاعات مدیریت (MIS) رایانه‌ای را توسعه دهد، اما این سیستم‌ها ایجاد پیچیدگی زیاد می‌کنند، هنگامی که نوع داده‌ها درست نباشد، کار نمی‌کنند و بسیار پرهزینه خواهند بود. چنین قابلیتی باید بر اساس شرایط و نیازهای پروژه تنظیم گردد.

در ارتباط با نیازمندی‌های متداول‌تر گزارش‌دهی، شکل ۱۹–۵ نتایج شبکه PERT/CPM را ارائه می‌کند و شکل ۱۹–۶ یک جریان هزینه چرخه‌ی عمر را ترسیم کرده است. با این‌که شکل‌ها تنها دو مثال را نشان می‌دهند، داده‌ها از سیستم اطلاعات مدیریت (MIS) باید حوزه‌های مسائل موجود را به‌سادگی نشان دهند. هم‌چنین، حوزه‌های بالقوه که در آن‌ها احتمال اتفاق افتادن یک مشکل وجود دارد، اگر برنامه همان‌طور که برنامه‌ریزی شده است کار کند، باید قابل رویت باشد. برای حل این شرایط، یک رویه اصلاحی باید انجام شود که شامل موارد زیر می‌شود:

۱. مسائل شناسایی شده و براساس اهمیت رتبه‌بندی می‌شود.

۲. هر مساله بر پایه رتبه ارزیابی می‌شود، مهم‌ترین مساله اول بررسی می‌شود. گزینه‌های ممکن برای فعالیت اصلاحی از جهت موضوعات روبرو در نظر گرفته می‌شود: (الف) آثار بر زمان‌بندی و هزینه دستورکار، (ب) آثار بر عملکرد و اثربخشی سیستم، و (پ) ریسک‌های مربوط به تصمیم‌گیری که آیا فعالیت اصلاحی باید انجام شود یا نه.

۳. هنگامی که تصمیم به انجام فعالیت اصلاحی گرفته می‌شود، برنامه‌ریزی آغاز می‌شود تا گام‌های لازم برای حل مساله مشخص شود. این موضوع می‌تواند به شکل سیاست مدیریت تغییر، یک تغییر قراردادی، یک تغییر سازمانی یا یک تغییر در ساختار سیستم/تجهیز انجام شود (به قسمت ۵–۹ مراجعه کنید (ECPها)).

۴. پس از پیاده‌سازی فعالیت اصلاحی، فعالیت‌هایی پیرو آن نیاز است تا (الف) اطمینان حاصل شود که تغییرات ایجاد شده مساله را حل کرده است؛ و (ب) دیگر جنبه‌های دستورکار را بررسی کند تا اطمینان حاصل شود که مشکلات دیگری پس از ایجاد تغییرات به‌وجود نیامده است.

شکل ۱۹–۷ سه حوزه را که نیاز به توجه دارد را به‌عنوان بازبینی دستورکار M1 شناسایی می‌کند.

۱۹-۴-۲- ارزیابی سازمان مهندسی سیستم‌ها

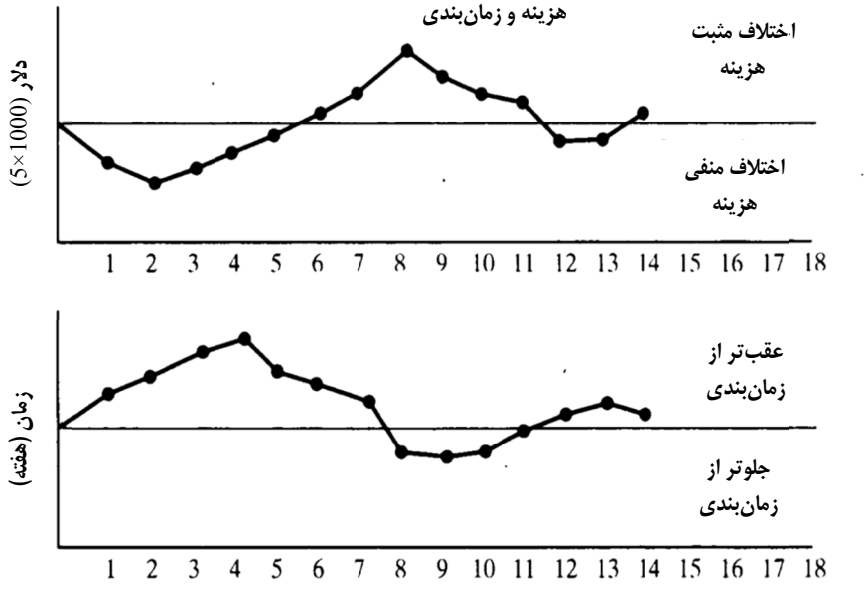
با استقرار اهداف دستورکار/پروژه، گام بعدی تعیین آن است که تا چه حد سازمان مهندسی سیستم‌ها در دست‌یابی به این اهداف پیشرفت کرده است، یعنی اندازه‌گیری قابلیت سازمانی در دست‌یابی به سطح عملکردی مطلوب. با معلوم بودن اهداف مهندسی سیستم‌ها و تکالیف پیشنهادی که باید انجام شود، برخی سوالات وجود دارند که باید در دستورکار قرار گیرند: *تا* چه حد

سازمان این تکالیف را به‌صورت اثربخش و کارا تکمیل کرده است؟ آیا مدیریت، اصول و مفاهیم مهندسی سیستم‌ها را درک می‌کند؟ آیا یک تعهد از بالا به پایین در مورد پیاده‌سازی فرایند مهندسی سیستم‌ها وجود دارد؟ اگر جواب بله است، چه سیاست‌هایی در حال حاضر برای پشتیبانی آن پیاده‌سازی شده است؟ آیا استانداردها، اهداف قابل اندازه‌گیری و فرایندهای مناسب برای موفقیت در دست‌یابی به اهداف مهندسی سیستم‌ها استقرار یافته است؟ آیا سازمان یک برنامه بهبود مستمر دارد؟

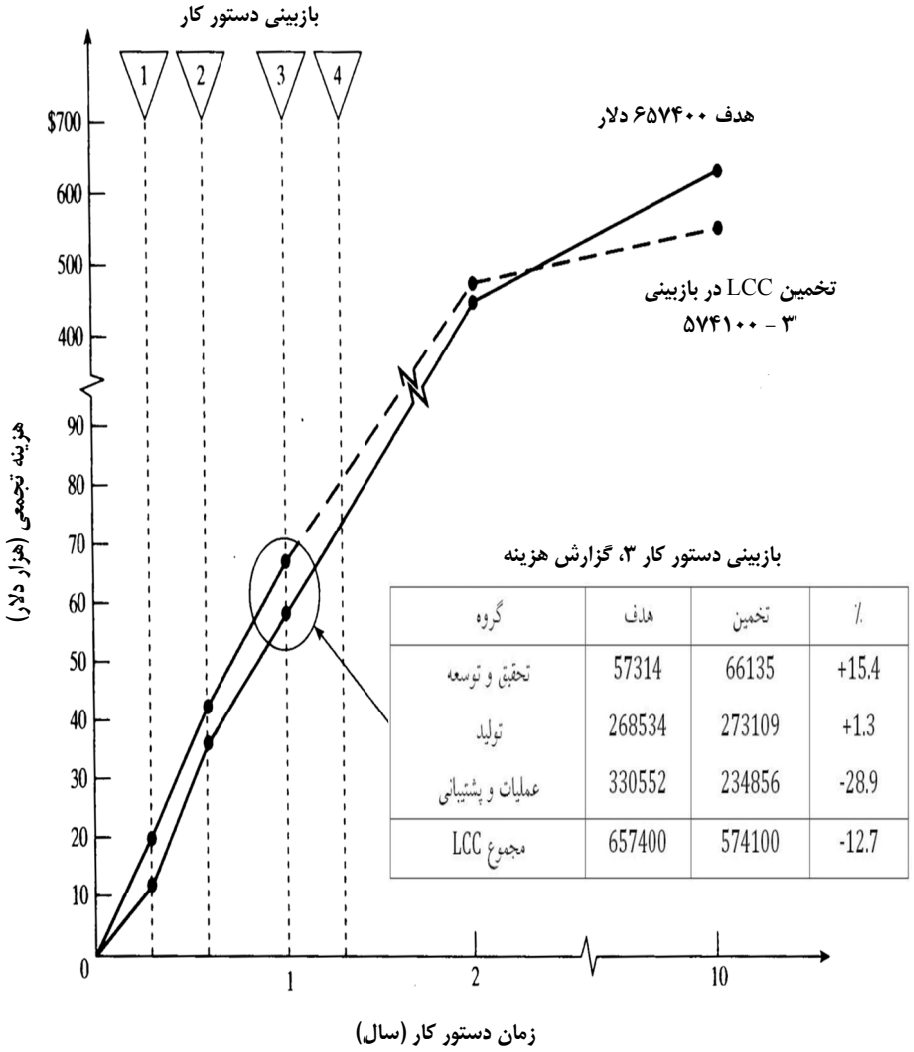
اگرچه سوالات متعدد دیگری در این زمینه مطرح است، هدف تعیین سطح بلوغ سازمانی است. در حقیقت، نیاز برای توسعه یک مدل وجود دارد تا در ارزیابی قابلیت کنونی سازمان کمک کننده باشد.

تاریخ گزارش: 8/15/05				**شماره قرارداد: 6BSB-1002**				**پروژه: سیستمXYZ**				
وضعیت فعلی هزینه				**وضعیت فعلی زمان**				**آیتم/شناسه**				
اختلاف مثبت(اختلاف منفی)	آخرین اصلاح تخمین	هزینه واقعی	تخمین هزینه	تاریخ واقعی خاتمه	شناوری D_L-D_E	دیرترین زمان خاتمه D_L	زودترین زمان خاتمه D_E	زمان سپری شده	رخداد خاتمه	رخداد شروع	هزینه	شماره WBS
(250)	2250	2250	2500	4/4/05	11.6	4/11/05	3/4/05	4.2	9	8	3310	4A1210

تاریخ گزارش: 8/15/05				شماره قرارداد: 6BSB-1002				پروژه: سیستمXYZ			
وضعیت فعلی هزینه				وضعیت فعلی زمان				آیتم/شناسه			
500	5000	4650	4500		-3.3	4/28/05	5/15/05	3.0	R102	R100	3762	4A1230
0	6750	5150	6750		0	8/3/05	6/20/05	20.0	9	7	3521	5A1224



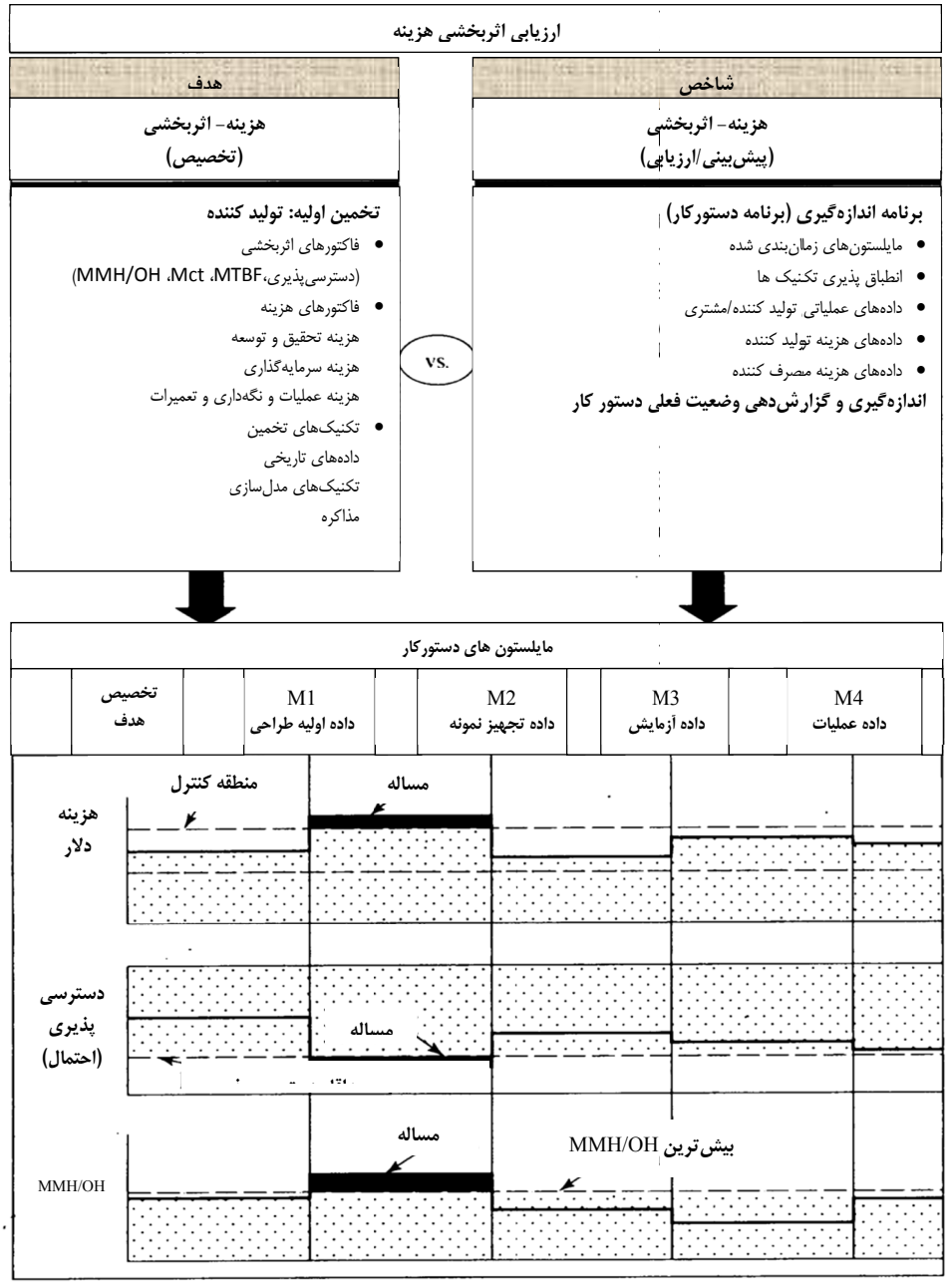
شکل ۱۹-۵- گزارش وضعیت فعلی مربوط به هزینه یک شبکه PERT/CMP و یک CWBS (مثال).



بازبینی دستور کار ۳، گزارش هزینه

گروه	هدف	تخمین	٪
تحقیق و توسعه	57314	66135	+15.4
تولید	268534	273109	+1.3
عملیات و پشتیبانی	330552	234856	-28.9
مجموع LCC	657400	574100	-12.7

شکل ۱۹- ۶- نمایش هزینه چرخه‌ی عمر در یک نقطه بازبینی اصلی.



شکل ۱۹- ۷- اندازه‌گیری و ارزیابی عملکرد فنی.

در پاسخ، تلاشی پیوسته از اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی برای توسعه یک مدل انجام شده است که موضوع ارزیابی سازمانی را مورد بررسی قرار دهد. اگرچه مدل‌های متعدد و متفاوتی در طی این سال‌ها وجود داشته است، یک سری از مدل‌هایی که اخیرا توسعه داده شده است قابل ذکر هستند. از طریق تلاش‌های اولیه موسسه مهندسی نرم‌افزار (SEI) در دانشگاه Carnegie Mellon، یک مدل بهبود فرایند با گرایش به توسعه نرم‌افزار منجر به معرفی مدل بلوغ قابلیت نرم‌افزار (SW-CMM) در اوایل سال ۱۹۸۹ گردید. در نتیجه کسب تجربه و به روزرسانی مستمر، و از طریق تلاش‌های هم‌زمان صنعتی، دولتی و دانشگاهی، مدل بلوغ قابلیت سیستم (SE-CMM) توسعه داده شد و در سال ۱۹۹۴ معرفی گردید. در همین زمان و با همکاری و پشتیبانی INCOSE، مدل ارزیابی قابلیت مهندسی سیستم‌ها (SECAM) در سال ۱۹۹۴ عرضه گردید. این مدل تا نسخه 1.50a به روزرسانی شد و در ژوئن ۱۹۹۶ عرضه شد. این دو مدل در EIA/IS-731 در سال ۱۹۹۸ ادغام گردید.

پس از عرضه اولیه EIA/IS-731، تلاش‌هایی برای توسعه‌ی مدل‌های قابل مقایسه با این مدل برای مقاصد متفاوت صورت گرفت. علاوه‌بر مدل‌هایی که توسعه نرم‌افزار و مهندسی سیستم‌ها را پوشش می‌دهند، تلاش برای توسعه یک مدل برای *توسعه ادغامی فرایند و محصول* (IPPD) صورت گرفت. به‌علاوه، تلاش‌هایی برای بررسی دیگر حوزه‌های مهم که در آن‌ها اندازه‌گیری بلوغ سازمانی مطلوب است، انجام گرفته است. با معلوم بودن روند نسبی توسعه مدل‌های مختلف برای اهداف خاص، در سال ۱۹۹۸ امکان‌سنجی توسعه یک مدل جامع که یک رویکرد ادغامی را ارائه داده و قابلیت‌های همه مدل‌های قبلی را ترکیب کند انجام گرفت. نتیجه این کار CMMI بود که ابزار نهایی اندازه‌گیری در حوزه‌های مختلف است.

در این نقطه مناسب است که مدل قابلیت مهندسی سیستم‌ها (SECM) که در EIA/IS-731 بحث شده است، در نظر گرفته شود. یکی ازگام‌های ابتدایی در توسعه‌ی آن تعریف اهداف

یک سازمان مهندسی سیستم‌هاست. با انجام این کار، تکالیف مدیریت و مهندسی سیستم‌ها که یک سازمان باید انجام دهد تا اطمینان حاصل کند که یک تلاش موفق در شناسایی سه گروه اصلی حوزه‌های تمرکز انجام شده است. یعنی حوزه تمرکز گروه فنی، حوزه تمرکز گروه مدیریت، و حوزه تمرکز گروه محیط.

با معلوم بودن کاربری مطلوب، گام بعدی شناسایی سطوح مختلف قابلیت (سطوح بلوغ) یا درجه‌ای از قابلیت می‌باشد که در یک سازمان باید برآورده شود و نشان‌دهنده‌ی رشد بالقوه است.

گروه‌های حوزه تمرکز		
محیط	**مدیریت**	**فنی**
• تعریف و بهبود فرایند مهندسی سیستم‌ها • مدیریت شایستگی • مدیریت فناوری • مدیریت پشتیبانی محیطی مهندسی سیستم‌ها	• برنامه‌ریزی و سازمان‌دهی • نظارت و کنترل • ادغام علوم طراحی • هماهنگی با تامین‌کنندگان • مدیریت ریسک • مدیریت داده • مدیریت ساختارها • تضمین کیفیت	• تعریف ذی‌نفع و نیازمندی‌های سطح سیستم • تعریف فنی مساله • تعریف راه‌حل • ارزیابی و انتخاب • ادغام سیستم • تایید سیستم • تصدیق اعتبار سیستم

شکل ۱۹- ۸- حوزه‌های تمرکز و گروه‌های SECM(EIA/IS-731)

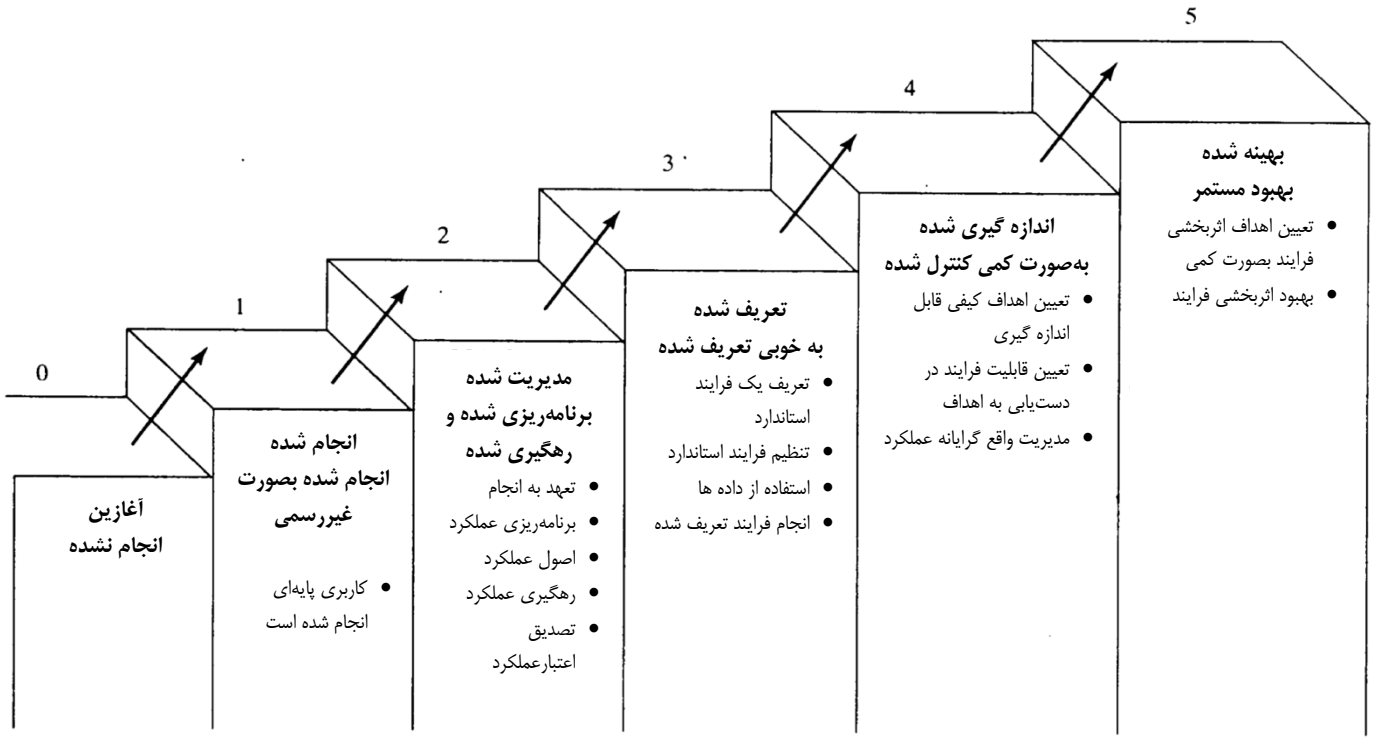
شش سطح قابلیت استقرار یافته و به حوزه‌های تمرکز مرتبط شد. یک حوزه‌ی تمرکز عبارتست از یک فهرست از کاربری‌ها که فعالیت‌هایی را تشریح می‌کند که سازمان باید به‌صورت موفق آن‌ها را انجام دهد. در شکل ۱۹-۹، سطوح قابلیت (از سطح ۰ تا ۵) به‌صورت *ابتدایی، انجام شده، مدیریت شده، تعریف شده، اندازه‌گیری شده، و بهینه شده* شناسایی گردیده است. این سطوح توسط یک تفسیر از کاربری‌های خاص که برای برآورده کردن نیازمندی‌ها در یک سطح معلوم مطلوب است، پشتیبانی می‌شود. هدف دست‌یابی به سطح ۵ است.

در اجرای این مدل برای ارزیابی قابلیت یک سازمان، فازهای مختلفی وجود دارد: *پیش ارزیابی، ارزیابی در محل و پس ارزیابی*. طی فاز پیش ارزیابی، لازم است که پشتیبانی مدیریتی درخواست شده تا سازمان ارزیابی شود و فرایند برای ارزیابی توسعه یابد. در این فاز توسعه پرسشنامه‌ها قرار دارد (که شامل سوالات متعددی در نیازمندی‌های EIA/IS-731 است، حداقل ۴۰ سوال برای سطح ۱، ۹۱ سوال برای سطح ۲، ۱۵۶ سوال برای سطح ۳، ۵۶ سوال برای سطح ۴ و ۸۳ سوال برای سطح ۵). فاز ارزیابی در محل از این گام‌ها تشکیل شده است: تقسیم پرسشنامه‌ها، تحلیل نتایج، توسعه برخی سوالات تشریحی اضافی، انجام مصاحبه، تحلیل داده‌های تشریحی، خلاصه کردن نتایج و ایجاد هماهنگی با مدیریت و تهیه گزارش نهایی ارزیابی. این فاز اغلب طی یک هفته و توسط تیمی ۳ تا ۵ نفره از دپارتمان مدیریت، رهبران پروژه، و نیروی کار انجام شده و نتایج به سرعت بازخورد داده شده و هر گونه اثر بر پروژه‌های داخلی و کار زمان‌بندی شده روزانه را حداقل می‌کند. فاز پس ارزیابی شامل برنامه‌ریزی برای فعالیت‌ها در آینده در صورت نیاز می‌شود.

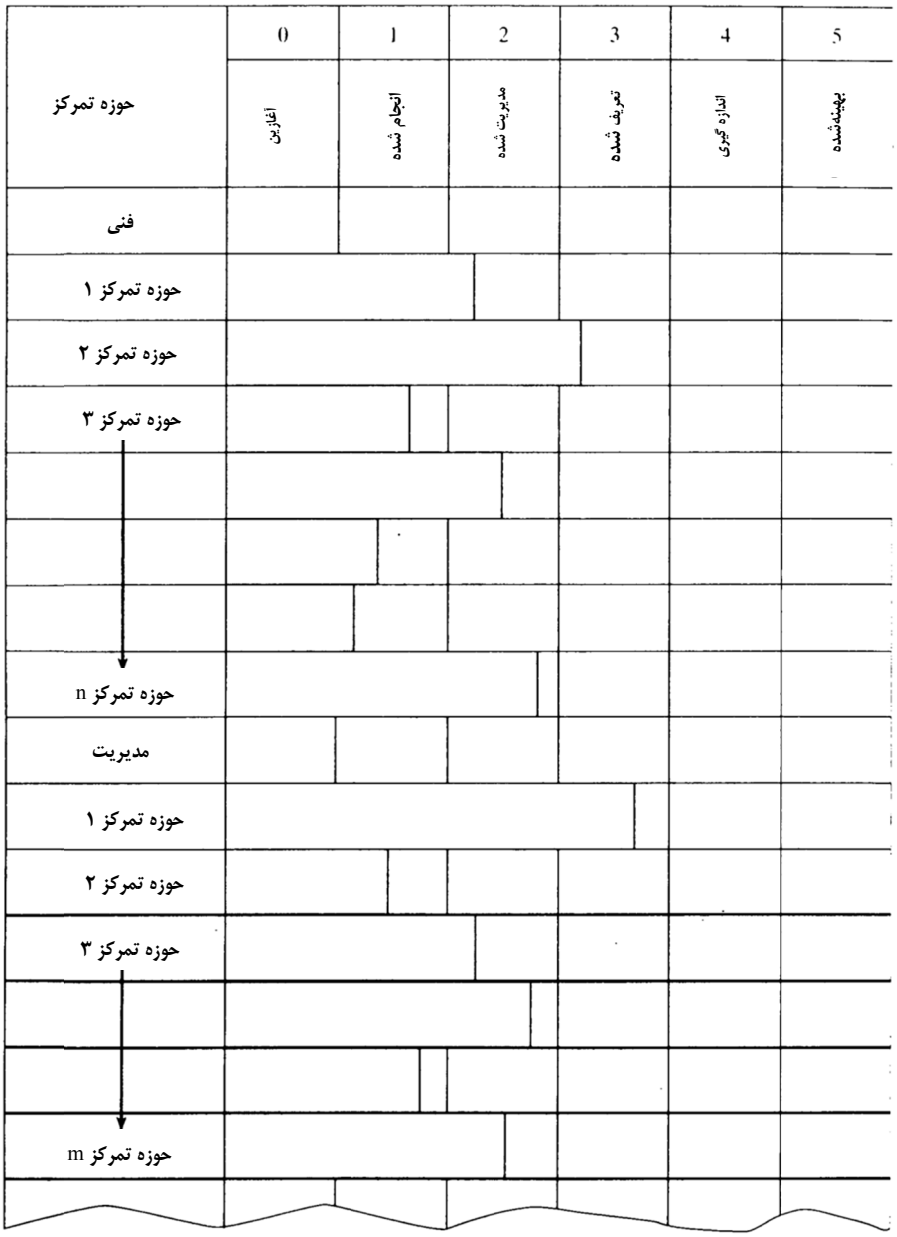
نتایج ارزیابی، با استفاده از SECM، باید شامل یک چارت خلاصه باشد که حوزه‌های تمرکز مختلف و درجه‌های دست‌یابی به سطح قابلیت مشخصی را نشان دهد. در شکل ۱۹-۱۰، می‌توان دید که حوزه‌ی تمرکز ۱ در گروه مدیریت به قابلیت سطح ۳ رسیده است و حوزه‌ی تمرکز ۲ (در

همان گروه) تنها به سطح ۱ دست یافته است. با داشتن این نتایج، گزارش نهایی ارزیابی (و برنامه برای فعالیت‌های آتی) باید شامل برخی پیشنهادها برای بهبود باشد، مخصوصا در حوزه ۲. هم‌چنین فعالیت‌هایی که نیاز است تا به سطوح بالاتر پیشرفت کنیم باید تدوین شود. البته هدف پیشرفت در همه حوزه‌های تمرکز است به‌صورتی که یک هماهنگی در پیشرفت به‌صورت کلی پدید آید.

تفسیر پیشین تنها یک ایده خام را فراهم می‌کند. برای پوشش عمیق تر موضوع، یک بازبینی تفصیلی از EAI/IS-731 پیشنهاد می‌شود. در مقایسه SECM با CMMI، واضح است که معماری کلی هر دو کاملا یکی است. SECM دارای حوزه‌های تمرکز و گروه‌های مربوطه است؛ CMMI همین رویکرد پایه‌ای را به‌کار می‌گیرد، اگرچه برخی موضوعات و نمادگذاری‌ها متفاوت است. در شکل ۱۹–۱۱، چهار گروه حوزه فرایند وجود دارد: *مدیریت فرایند، مدیریت پروژه، مهندسی، و پشتیبانی*. در هر کدام از این گروه‌ها، تعدادی حوزه فرایند وجود دارد که برای هر کدام سوالاتی تفصیلی تهیه شده تا ارزیابی انجام شود. توجه کنید که فعالیت‌های درون CMMI بسیار جامع تر از SECM هستند. از نقطه‌نظر سطوح قابلیت، CMMI دارای ۶ سطح است (یعنی ۰ تا ۵) که عبارت‌اند از: *ناقص، انجام شده، مدیریت شده، تعریف شده، به‌صورت کمی مدیریت شده و بهینه شده.*



شکل ۱۹- ۹- مسیر بهبود برای قابلیت فرایند مهندسی سیستم‌ها



شکل ۱۹- ۱۰- ارزیابی قابلیت حوزه تمرکز.

گروه‌های حوزه فرایند			
پشتیبانی	**مهندسی**	**مدیریت پروژه**	**مدیریت فرایند**
• مدیریت ساختار • تضمین کیفیت فرایند و محصول • اندازه‌گیری و تحلیل • تحلیل تصمیم و نتیجه‌گیری • تحلیل علی و نتیجه‌گیری	• مدیریت نیازمندی‌ها • توسعه نیازمندی‌ها • راه‌حل فنی • ادغام محصول • تایید • تصدیق اعتبار	• برنامه‌ریزی پروژه • مدیریت و کنترل پروژه • مدیریت تامین‌کننده • مدیریت ادغامی پروژه • مدیریت ریسک • مدیریت کمی پروژه	• تمرکز فرایند سازمانی • تعریف فرایند سازمانی • ابتکار و استقرار سازمانی

شکل ۱۹- ۱۱- حوزه‌های فرایند CMMIو گروه‌ها.

منبع: I.Minnich, "EIA/IS-731 Compared to CMMI SE/SW" Systems Engineering. The journal of the Internationa Council on Systems Engineering. Vol. 5. No. 1 (2002). Table II. (Published bu John Wiley&Sons, Inc.)

به‌منظور ارزیابی، روش ارزیابی استاندارد CMMI برای بهبود فرایند (SCAMPI) از طریق استفاده از پرسشنامه، مصاحبه و موارد مشابه انجام می‌شود. قوانین امتیازدهی خاصی برای هر سطح استفاده شده است و بیش‌ترین امتیاز نشان‌دهنده‌ی دست‌یابی به سطح قابلیت برای حوزه‌ی

فرایند مورد ارزیابی است. در هر حالتی، رویکرد کلی در این‌جا مشابه‌ی آن است که پیش از این در SECM تشریح شد.

به‌طور خلاصه، باید تاکید شود که بحث ارائه شده در این قسمت (قسمت ۱۹-۴-۲) تنها مربوط به رویکرد رهبری در ارزیابی سازمان مهندسی سیستم‌ها است. ممکن است تعداد متفاوتی از رویکردهای توسعه داده شده و مطلوب‌تر وجود داشته باشد و برای مقاصد مختلف مورد استفاده قرار گیرد. هدف در این‌جا معرفی نیازمندی، تشریح آنچه که باید در این عنصر انجام شود تا برنامه‌ریزی دستورکار اثربخش باشد، مدیریت و کنترل است. ارزیابی درست سازمان مهندسی سیستم‌ها، از هر رویکردی که استفاده می‌شود، الزامی است.

۱۹-۵- مدیریت ریسک

در هر فعالیت رسمی دستورکار نوعی از ریسک وجود دارد. ریسک احتمال آن است که در نتیجه یک یا یک سری از رخدادها، مشکلی پیش آید. یک برنامه‌ی مدیریت ریسک باید به‌عنوان بخشی اصلی از SEMP و برای هر دستورکاری در نظر گرفته شود (به شکل ۱۸-۴ مراجعه کنید). چهار گروه اصلی ریسک وجود دارد که در شکل ۱۹-۱۲ نیز ذکر شده است:

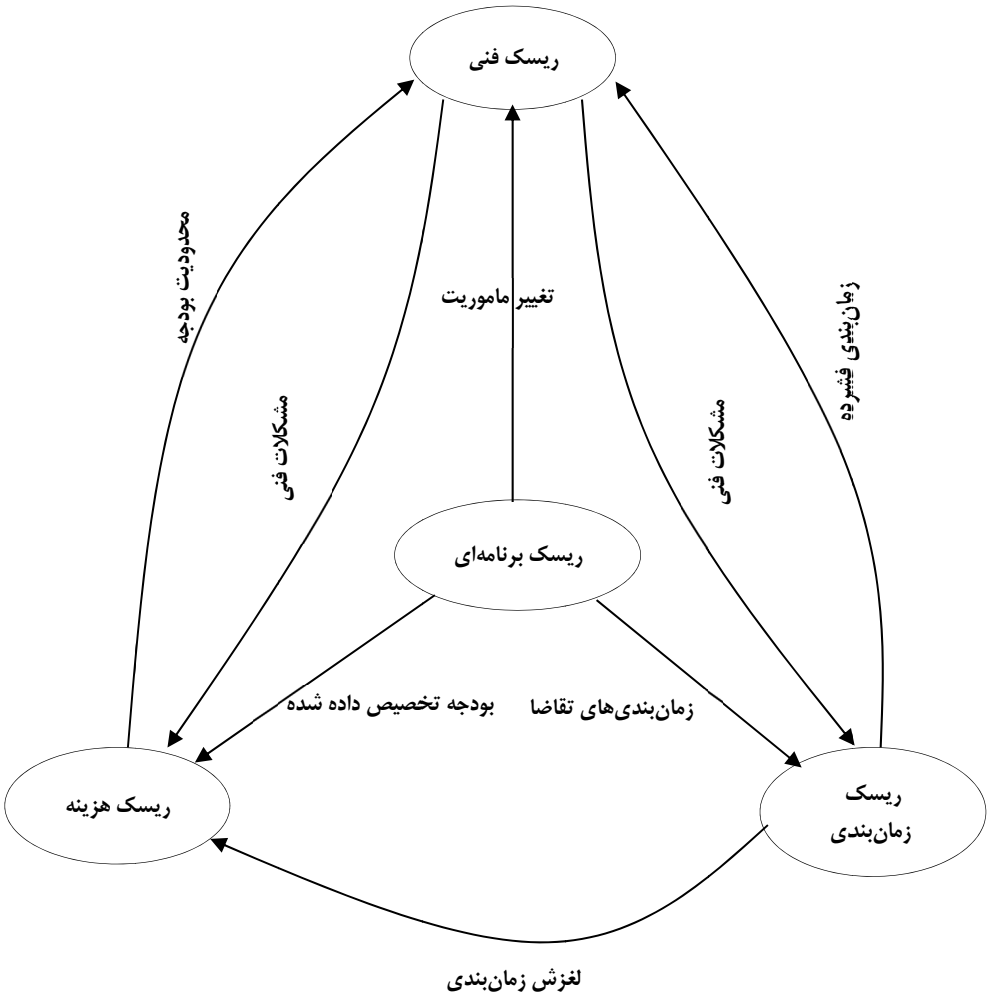
۱. ***ریسک فنی:*** احتمال آن‌که یک نیازمندی فنی سیستم برآورده نشود. ریسک فنی هنگامی در فرایند طراحی و توسعه سیستم وجود دارد که سیستم نتواند هدف فنی سیستم را برآورده کند، مانند یک یا چند TPM که در شکل ۳-۶ شناسایی شده است (قسمت ۳-۶).

۲. ***ریسک هزینه:*** احتمال آن‌که هزینه از بودجه تخصیص داده شده تجاوز کند. با اینکه به‌صورت کلی تمرکز بر بودجه اکتساب پروژه/دستورکار است (یعنی منابع اولیه پروژه برای طراحی و توسعه یک سیستم شناخته شده)، توجه به هزینه‌ها طی چرخه‌ی عمر

سیستم نیز مهم است. بنابراین گروه ریسک هزینه باید هم برای بودجه اولیه پروژه و هم‌چنین هزینه‌های متعاقب چرخه‌ی عمر برای سیستم مدنظر قرار گیرد.

۳. ***ریسک زمان‌بندی:*** احتمال آن‌که پروژه نتواند به مایلستون‌های زمان‌بندی شده برسد، مانند مواردی که در شکل‌های ۱۸–۹ و ۱۸–۸ نشان داده شد. ریسک زمان‌بندی زمانی ممکن است اتفاق افتد که زمان‌بندی کلی دستورکار برآورده نشود یا هر تکلیف سطح پایین از زمان‌بندی عقب افتاده باشد. موضوع مهم در این‌جا تکالیفی است که در مسیر بحرانی قرار دارد (شکل ۱۸–۹).

۴. ***ریسک برنامه‌ای:*** احتمال رخداد اتفاق‌های تاثیرگذار خارجی. تصمیم‌گیری‌ها در سطوح بالای سازمانی، تاخیر در تامین بودجه، آثار محیطی و غیره از نقطه‌نظر فنی، هزینه و زمان‌بندی اثر قابل توجهی بر کل پروژه/دستورکار می‌گذارند.



شکل ۱۹- ۱۲- روابط متداول میان گروه‌های ریسک.

منبع: INCOSE TP-2003-016-02, Systems Engineering Handbook (San Diego, CA: International Council on Systems Engineering (INCOSE), 2004), Figure 6-2, p.61

همان‌طور که در شکل ۱۹–۱۲ نشان داده شده است، همه این گروه‌های ریسک با یکدیگر در تعامل هستند. ریسک بالقوه با افزایش پیچیدگی و معرفی فناوری‌های جدید در طراحی سیستم‌ها افزایش پیدا می‌کند. به‌علاوه، احتمال ایجاد ریسک با افزایش برنامه‌های برون‌سپاری رشد پیدا می‌کند. بنابراین، مهم است که مدیریت جامع ریسک در طرح کلی دستورکار مدیریت مهندسی سیستم قرار گیرد.

مدیریت ریسک یک فرایند تکرار شونده را تشکیل می‌دهد که شامل گام‌های زیر است:

۱. *برنامه‌ریزی ریسک* عبارتست از توسعه برنامه مدیریت ریسک برای یک دستورکار معلوم. با مراجعه به شکل ۱۸–۴، برنامه باید در SEMP قرار داده شود.

۲. *شناسایی ریسک* عبارتست از پایش همه نیازمندی‌ها (فنی، هزینه، زمان‌بندی و برنامه‌ای) و شناسایی آن‌هایی که ممکن است برآورده نشود. شکل ۵–۹ و ۱۹–۷ مثال‌هایی از نیازمندی‌های TPM که ممکن است تا زمانی که یک فعالیت اصلاحی به سرعت اجرا نشود، برآورده نگردد.

۳. *ارزیابی ریسک* مربوط به تعیین احتمال شکست در برآورده کردن یک نیازمندی خاص و احتمال آن‌که خروجی‌ها نیازمندی‌ها را برآورده نکند. این موضوع هم به احتمال اتفاق افتادن و هم به بزرگی تخمینی ریسک مربوط می‌شود.

۴. *تحلیل ریسک* انجام می‌شود تا روش‌هایی برای حذف یا حداقل کردن ریسک تعیین شود. راه‌حل‌های ممکن از طریق انجام موازنه‌های طراحی، استفاده از برخی روش‌های تحلیل که در بخش سوم تشریح شد و ارائه پیشنهادهایی برای تغییرات مهندسی صورت می‌گیرد.

۵. *کنترل ریسک* عبارتست از فعالیت‌های مربوط به ایجاد تغییرات و انجام اصلاحات سیستم (محصولات و/یا فرایندها). هدف در این‌جا حصول اطمینان از خاتمه فرایند کاهش ریسک به‌عنوان یک هدف نهایی است.

پیاده‌سازی یک برنامه مدیریت ریسک رسمی شده برای موفقیت در دست‌یابی به اهداف مهندسی سیستم‌ها حیاتی است. چه در سازمان مهندسی سیستم‌ها انجام شود یا نه، نیازمندی‌ها برای چنین موضوعاتی بسیار مهم است – بنابراین، سازمان مهندسی سیستم‌ها باید یک نقش کلیدی در چنین فعالیت‌هایی داشته باشد.

۱۹-۶- خلاصه فصل

این فصل دومین قسمت از مدیریت مهندسی سیستم‌ها را فراهم می‌کند. با داشتن برنامه‌ریزی اولیه مهندسی سیستم‌ها و نیازمندی‌های سازمان برای یک دستورکار متداول در فصل ۱۸، این فصل به خلاصه‌ای از اهداف سازمانی، نیازمندی‌های برون‌سپاری و شناسایی تامین‌کنندگان، رهبری و هدایت دستورکار، ارزیابی فعالیت‌های پروژ و عملکرد سازمان مهندسی سیستم‌ها و اهمیت مدیریت ریسک در زمینه مدیریت مهندسی سیستم‌ها می‌پردازد. فصول ۱۸ و ۱۹ تکمیل کننده یکدیگر هستند و باید به‌صورت یک موضوع واحد و مرتبط باهم به آن نگاه شود.

در این فصل یک رویکرد برای انجام ارزیابی عملکرد یک سازمان مهندسی سیستم‌ها بحث شد، از مدل‌های SECM و CMMI استفاده شد تا فرایند ارزیابی تسهیل شود. فرایند عبارتست از شناسایی گروه‌های فعالیت‌ها، حوزه‌های تمرکز و ارزیابی قابلیت کنون سازمانی و سطح بلوغ. در این نقطه، باید توجه شود که توسعه CMMI و مدل‌های مربوطه یک فرایند پیوسته و تکرار شونده را تشکیل می‌دهند. فعالیت‌های اخیر به توسعه چهار مدل CMMI مختلف منجر شده است که اساسا به این موضوعات می‌پردازد: (۱) مهندسی نرم‌افزار، (۲) مهندسی سیستم‌ها و مهندسی

نرم‌افزار؛ (۳) مهندسی سیستم‌ها، مهندسی نرم‌افزار و توسعه ادغامی محصول و فرایند (IPPD)؛ و (۴) مهندسی سیستم‌ها، مهندسی نرم‌افزار، IPPD، و تامین‌کننده. توسعه این مدل‌ها و مدل‌های مربوط به‌عنوان یک علم جدید مطرح است.

باید تاکید شود که فرایند تشریح شده برای ارزیابی یک سازمان مهندسی سیستم‌ها با استفاده از مدل‌های SECM و CMMI تنها یک رویکرد است. رویکردها و روش‌های ارزیابی دیگری می‌توان به جز این موارد در نظر گرفت و به‌کار برد. هدف تشویق به ارزیابی فعالیت‌های دستورکار و تشویق سازمان مسئول برای انجام تکالیف مرتبط به این موضوعات است.

دومین حوزه‌ای که نیاز به تاکید دارد توسعه و پیاده‌سازی قابلیت مدیریت ریسک است. در فرایند مهندسی سیستم‌ها، تصمیم‌های زیاد و مختلفی وجود دارد که طی فازهای اولیه طراحی مفهومی و اولیه سیستم گرفته شده و آثار قابل‌توجهی بر دستورکار و ساختار نهایی سیستم خواهد گذاشت. به‌علاوه، طی یک برنامه معلوم، چالش‌های زیادی در برآورده کردن نیازمندی‌های مربوط به توسعه‌ی یک سیستم در شبکه سیستمی از سیستم‌ها، در پیاده‌سازی گزینه‌های مختلف زنجیره تامین در یک محیط جهانی و غیره وجود دارد. بنابراین، یک فعالیت بحرانی در مدیریت مهندسی سیستم‌ها استقرار قابلیت مدیریت ریسک و توسعه رسمی برنامه مدیریت ریسک در ابتدای کار است. هدف استقرار یک ابزار در ابتدای چرخه‌ی عمر برای شناسایی حوزه‌های بالقوه مشکل‌ساز است تا فعالیت‌های اصلاحی موردنیاز در مراحل ابتدایی طراحی و توسعه سیستم صورت گیرد.

به‌طور خلاصه، اهداف اصلی در پیاده‌سازی مهندسی سیستم‌ها عبارتست از برنامه‌ریزی اولیه به‌موقع، رهبری سازمانی اثربخش و یک رویکرد ادغام شده شامل علوم مختلف مربوط به طراحی سیستم. ارتباطات مناسب رو به بالا و رو به پایین در سطح سازمانی، یک ضرورت است. با دانستن این موضوع که برون‌سپاری و استفاده از تامین‌کنندگان خارجی، جهانی شدن و رقابت بین‌المللی به‌سرعت در حال رشد است، چالش‌های مربوط به پیاده‌سازی مهندسی سیستم‌ها بیش از پیش

شده است. توسعه یک SEMP خوب و مشخصات فنی سیستم (نوع A)، شناسایی و انتخاب تامین‌کنندگان درست برای انجام تکالیف و وظایف موردنیاز، استقرار یک رویکرد تیمی اثربخش همراه با تعهد تولیدکننده و تامین‌کننده و ادغام فعالیت‌ها و مدیریت و کنترل پیوسته فعالیت‌ها حیاتی هستند، به ویژه هنگامی که وظایف طراحی و توسعه سیستم‌های مختلف از نظر جغرافیایی پراکنده بوده و در سرتاسر جهان گسترده شده باشد. بر این اساس، این موضوع اهمیت دارد که این چالش‌ها مربوط به مدیریت مهندسی سیستم‌ها در مراحل ابتدایی و از بالا به پایین انجام شود و همان‌طور که در شکل ۱۸–۱۳ نشان داده شده است از مشتری آغاز گردد.

سوالات و مسائل

۱. فرض کنید که شما هم اکنون برای توسعه یک سازمان مهندسی سیستم‌ها اختصاص داده شده‌اید. چه گام‌هایی باید بردارید تا اهداف را برای این سازمان توسعه دهید؟ چه چیزهایی را در آن قرار می دهید؟ مثال بزنید.

۲. الگوبرداری را توضیح دهید. برای سازمان خود، گام‌هایی را که باید برای استقرار الگوهای مناسب برداشته شود، تشریح کنید. مثال بزنید.

۳. فرض کنید که در استقرار الگوها برای سازمان شما مشاهده شده است که سازمان شما در برخی حوزه‌های حیاتی دچار نقص است. چه گام‌هایی برای اصلاح این وضعیت انجام می‌دهید؟

۴. به‌عنوان یک مدیر که به تازگی یک سازمان مهندسی سیستم‌ها را استقرار داده‌اید، لازم است که سیستم اطلاعات مدیریت (MIS) توسعه داده شود تا دید لازم برای مدیریت درست سازمان به‌صورت روزانه برای شما فراهم شود. گام‌های لازم برای دست‌یابی به این هدف را بیان کنید. چه اطلاعاتی در آن قرار می‌گیرد (نوع، قالب، فراوانی و غیره)؟ چه گزارش‌هایی و با چه فراوانی و برای چه شخصی باید تهیه شوند؟

۵. چه فاکتورهایی (معیارهایی) باید برای شناسایی نیازمندی‌های برون‌سپاری در نظر گرفته شوند؟ یک مثال بزنید (یک وضعیت خاص را تشریح کنید).

۶. فرض کنید که تصمیم گرفته شده است که برون‌سپاری انجام شود و نیاز به درخواست برای پروپوزال وجود دارد. چه اطلاعاتی باید در RFP باشد؟ (یک طرح کلی تفصیلی تهیه کنید)

۷. چرا توسعه درخت مشخصات فنی مهم است؟

۸. با مراجعه به شکل ۱۹–۳، چگونه TPMهای خاص را که باید در هر یک از مشخصات فنی ذکر شود، تعیین می‌کنید؟

۹. فرض کنید که در پاسخ به یک RFP، تعدادی تامین‌کننده مختلف وجود دارند که هرکدام یک پروپوزال ارسال کرده‌اند. چه فاکتورهایی (معیارهایی) باید در انتخاب یک تامین‌کننده در نظر گرفته شوند؟ یک فهرست از فاکتورها (به ترتیب اهمیت) تهیه کنید.

۱۰. به شکل ۱۹–۴ مراجعه کنید. یک چک لیست تامین‌کننده تنظیم شده برای نیازهای خود توسعه دهید (چک لیست حداقل باید ۲ سطح داشته باشد)

۱۱. فرض کنید که شما مسئول فعالیت‌های تامین‌کنندگان متعدد مختلفی هستید که در سرتاسر دنیا گسترده شده‌اند. چه گام‌هایی بر می‌دارید تا از سطح مناسب کار انجام شده (و ادغام شده) اطمینان حاصل کنید؟

۱۲. با مراجعه به شکل ۱۹–۵، فرض کنید که یک فعالیت در مسیر بحرانی مشخص می‌کند که تکلیف از زمان‌بندی عقب است. چه گام‌هایی برای اصلاح این وضعیت لازم است؟

۱۳. به نمایش هزینه در شکل ۱۹–۶ مراجعه کنید. اگرچه تخمین کلی هزینه چرخه‌ی عمر در ظاهر مناسب است، نتایج بازبینی ۳ نامطلوب است. برای آن که اطمینان حاصل

کنید که نمایش نهایی هزینه‌ها واقع‌گرایانه است و باید حفظ شود چه کارهایی انجام می‌دهید؟

۱۴. با مراجعه به شکل ۱۹–۷، سه حوزه دارای مشکل ذکر شده است چه گام‌هایی برای اصلاح (یعنی حذف) هر کدام از این مشکلات بر می‌دارید؟

۱۵. فرض کنید که شما مدیر یک دپارتمان مهندسی سیستم‌ها هستید. برای تعیین این‌که عملکرد سازمان شما چگونه است (یعنی ارزیابی قابلیت سازمانی) چه کارهایی انجام می‌دهید؟

۱۶. یک مدل ارزیابی را که برای سازمان شما تنظیم شده است، توسعه دهید. گروه‌های فعالیت مناسب را شناسایی کنید و حوزه‌های تمرکز هر گروه را مشخص نمایید. حداقل ۳ سوال مطرح کنید که در ارزیابی هر یک از حوزه‌های تمرکز باید بررسی شوند.

۱۷. به شکل ۱۹–۱۰ مراجعه کنید. فرض کنید که نتایج ارزیابی سازمان شما مشابه آنچه نمایش داده شده است، می‌باشد. به‌عنوان مدیر سازمان، شما می‌خواهد نشان دهید که در یک سال رشد ایجاد کنید. چه گام‌هایی برای شروع کار بر می‌دارید؟ چه گام‌هایی در ادامه باید برداشته شوند تا این رشد در سال‌های بعدی حفظ شود؟

۱۸. منظور از ریسک چیست؟ چگونه اندازه‌گیری می‌شود؟ چه جنبه‌هایی از ریسک برای مدیر مهندسی سیستم‌ها مهم است؟ مثال بزنید.

۱۹. یک طرح کلی تفصیلی برای برنامه مدیریت ریسک توسعه دهید. این برنامه چه ارتباطی با SEMP دارد؟

۲۰. چرا توسعه قابلیت مدیریت ریسک مهم است؟

پیوست الف

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 FFBDها.

الف-۱- نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای

نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای (FFBD) برای تشریح سیستم و عناصر آن به‌صورت 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 سلسله مراتبی 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 آن‌که 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 به‌صورت یک مستطیل بسته نشان داده شود. هر وظیفه می‌تواند کلی یا با جزئیات موردنیاز در سطح مناسب نمودار وظیفه‌ای نمایش داده شود. باید توجه شود که یک وظیفه باید یک فعالیت محدود و گسسته باشد به‌صورتی 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 هرسطح باید به‌صورتی 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 به‌صورت 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 به‌صورت 3.0، سطح ۲ به‌صورت 3.1، سطح بعدی 3.1.1 و بقیه نیز به همین منوال نام‌گذاری می‌شود. وظایفی که در یک سطح قرار دارند به‌صورت ترتیبی شماره‌گذاری می‌شود تا پیوستگی وظیفه حفظ شود. برای مثال، اگر بیش از یک وظیفه برای وظیفه 3.0 مدنظر باشد بدین صورت نام‌گذاری می شود: 3.1، 3.2،...، 3.n. برای تعمیم وظیفه 3.3 در سطح دوم بدین صورت عمل می شود: 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 به‌عنوان 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 به‌هم متصل می‌کنند تنها توسط جریان وظیفه‌ای مشخص شده و نباید به‌عنوان زمان سپری شده یا یک فعالیت میانی نشان داده شود. خطوط افقی و عموی 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 بایدطوری 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 $\overline{G}$ به ترتیب برای نشان دادن برو و نرو استفاده می‌شود. نمادها در کنار خطوط قرار داده می‌شود.

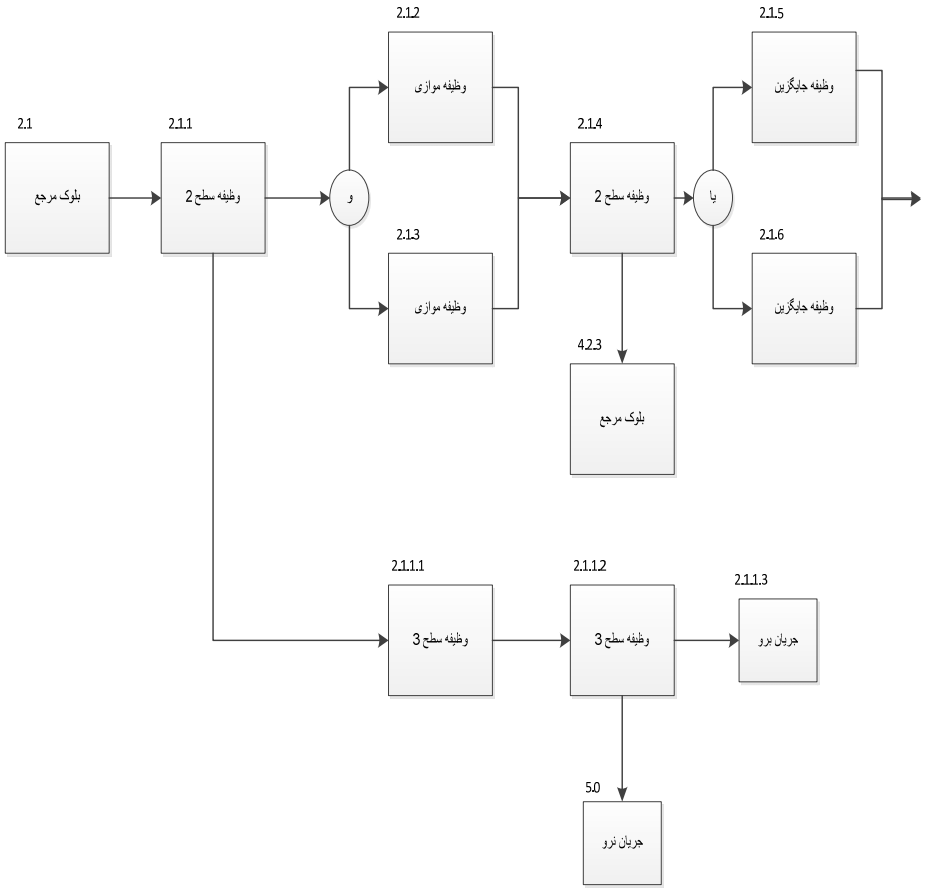
۸. *رویه شماره گذاری هنگامی ایجاد تغییرات.* وظایف اضافه شده به داده‌های موجود باید توسط یک وظیفه جدید در یک مکان اصلاحی بدون توجه به توالی شماره‌گذاری قرار داده شود. این وظیفه جدید باید با استفاده از یک شماره استفاده نشده در نمودار شماره‌گذاری شود.

الف-۲- دو مثال کاربردی

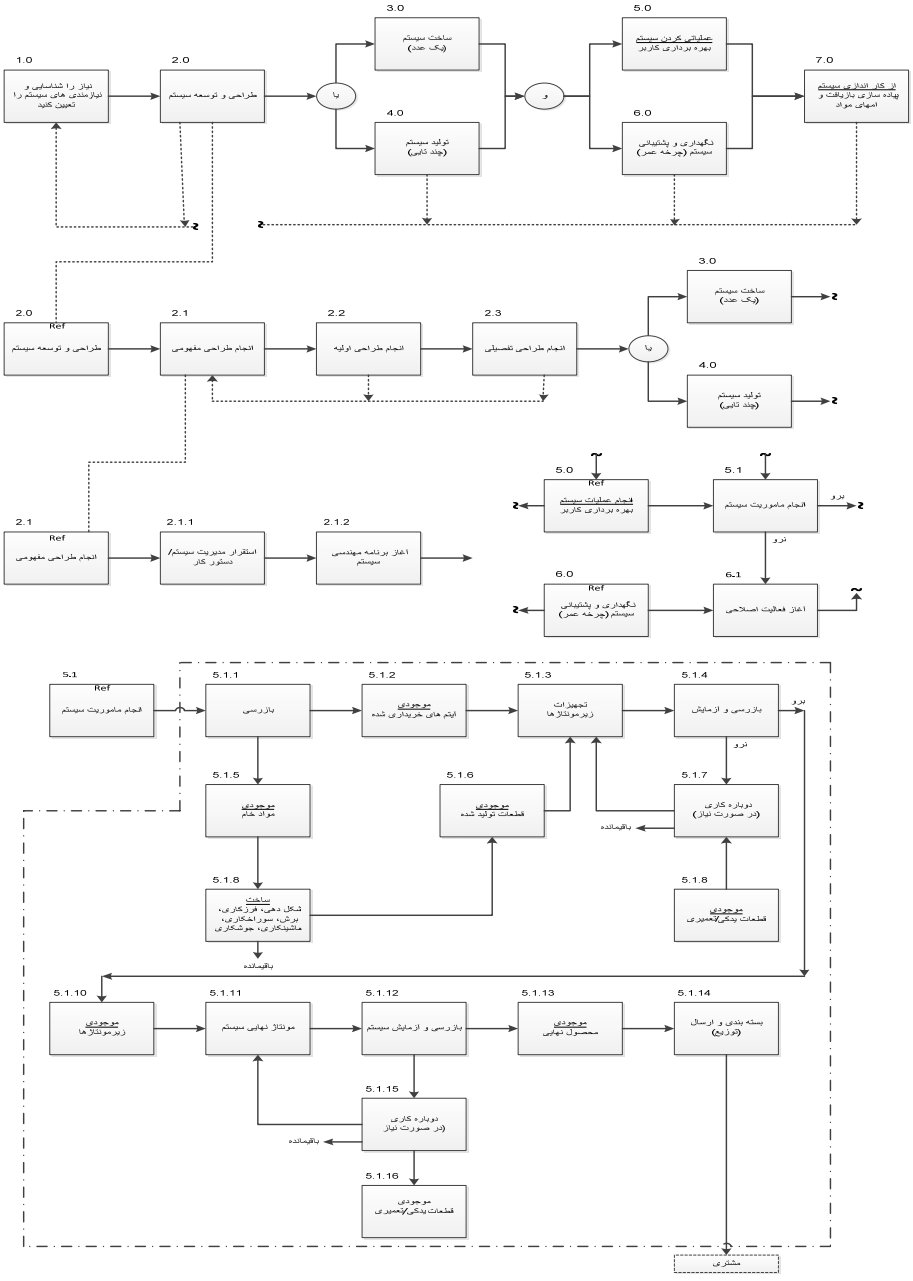
در این قسمت دو نمونه نمودار وظیفه‌ای برای مثال نشان داده شده است. شکل‌های الف-۱، الف-۲ این مثال‌ها را تشکیل می‌دهند.

۱. شکل الف-۱ مثالی از قالب اصلی استفاده شده در توسعه نمودارهای بلوکی جریان وظیفه‌ای به‌صورت 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.

پیوست ب

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 به دست‌یابی به هدف ذکر شده کمک خواهد کرد. چک‌لیست می‌تواند شامل هر تعداد آیتم،

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 آیتم 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 دریچه ورودی برای نگه‌داری و تعمیرات حداقل ۷/۹ در ۷/۲ اینچ است؟ آیا دریچه 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 این‌که 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 آن‌که ممکن است تعداد زیادی تامین‌کننده برای اکتساب یک سیستم بزرگ وجود داشته باشد و با دانستن این‌که 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 به‌عنوان مثال فراهم شده است. بار دیگر، سوالات چک‌لیست باید برای یک دستورکار خاص تنظیم شود.

۱۲-۰ بسته‌بندی و سوار کردن

۱۲-۱ آیا بسته‌بندی از نقطه نظر مشتری جذاب است (رنگ، شکل، اندازه)

۱۲-۲ 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؟

۱۲-۳ 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 نسبتا کم هزینه باشند. این موضوعات هنگامی که ماژول قابل امحا است، نیاز نیستند.

۱۲-۴ 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 نسبتا دارای قابلیت اطمینان بالا و هزینه اندک باشد. آیا این موضوعات تا سرحد ممکن اجرایی شده است؟

۱۲-۵ 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)؟

۱۲-۶ آیا سطح دسترسی به ماژول‌ها کفایت لازم را دارد؟

۱۲-۷ آیا ماژول‌ها و قطعات طوری سوار شده‌اند که خارج کردن یک آیتم برای نگه‌داری

و تعمیرات نیاز به خارج کردن دیگر آیتم‌ها نداشته باشد؟

۱۲–۸ 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؟

۱۲–۹ 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.

۱۲–۱۰ زمانی که نیازمندی‌های شوک و ارتعاش وجود دارد، آیا موضوعات مربوط به کاهش شوک و ارتعاش اجرایی شده است؟

۱۲–۱۱ 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.

۱۲–۱۳ آیا از ابزارهای کمکی برای تسهیل نصب ماژول فراهم شده اند؟

۱۲–۱۴ آیا ماژول‌ها و اجزا برچسب گذاری شده است؟

۱۲–۱۵ آیا برچسب ماژول‌ها و اجزا طوری قرار داده شده است که براحتی قابل رویت باشد؟

۱۲–۱۶ 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.

۱۲–۱۷ 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 بازبینی 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 نقطه‌نظر 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 ایا 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؟

۲-۰قابلیت 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؟

۲-۶ 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.

۲-۷ آیا نقاط آزمایش قابل دسترسی هستند؟ قابلیت دسترسی باید مطابق با گستره‌ی نگه‌داری و تعمیرات انجام شده باشد. نقاط آزمایش بر وری پنل جلوی اپراتور در فعالیت نگه‌داری و تعمیرات مبدا نیاز نیست.

۲-۸ آیا نقاط آزمایش از نظر عملکردی و راحتی طوری گروه بندی شده است تا آزمایشات ترتیبی به‌صورت اثربخش و کار انجام شود؟

۲-۹ آیا این نقاط آزمایش برای یک آزمایش مستقیم (برای همه آیتم‌های قابل تعویض) فراهم شده است؟

۲-۱۰ آیا نقاط آزمایش به حد کفایت برچسب‌گذاری شده است؟ هر نقطه آزمایش باید به‌صورت یکتا شماره‌گذاری شود و سیگنال مناسب یا خروجی اندازی‌گیری شده مورد انتظار باید بر روی برچسب به وضوح ذکر شود.

۲-۱۱ آیا نورپردازی برچسب در نقاط آزمایش کفایت لازم را دارد تا تکنسین به راحتی بتواند شماره و مقدار سیگنال را ببیند؟

۲-۱۲ 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.

۲-۱۳ آیا نرم افزار نگه‌داری و تعمیرات که پیش تر تشریح شد اطلاعات کشف خطای کافی را فراهم می کند؟

شکل ب- ۲- سوالات متداول بازبینی طراحی (ادامه).

چک‌لیست بازبینی تامین‌کننده
۱. آیا پروپوزال تامین‌کننده پاسخ دهنده‌ی نیازهای مشخص شده در RFP تامین‌کننده است؟
۲. آیا پروپوزال تامین‌کننده مستقیما 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 معنی‌دار، قابل اندازه‌گیری، و از نیازمندی‌های سطح سیستم قابل رهگیری است؟
۴. هنگامی که یک طراحی جدید نیاز است، آیا فرایند طراحی در سازمان تامین‌کننده به خوبی تعریف شده است؟ آیا فرایند به کار رفته از ابزارهای رایانه‌ای استفاده می‌کند (CAD، CAM، CAS)؟ آیا فرایند مستقیما فرایند طراحی توسعه‌دهنده‌ی سیستم را پشتیبانی می کند)؟
۵. آیا طراحی تامین‌کننده 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 تامین‌کننده 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 تامین‌کننده 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 بازبینی 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	شاخص های 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 خرابی ها
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 امریکا
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 رایانه‌ای
CSC	Computer Software Component	اجزای نرم افزار رایانه‌ای

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

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
	Symposium	نگه‌داری و تعمیرات
RIAC	Reliability Information Analysis Center	مرکز تحلیل اطلاعات قابلیت اطمینان
SRE	Society of Reliability Engineers	انجمن مهندسان قابلیت اطمینان
MTTR	Mean Time to Repair	میانگین زمان تا تعمیر
LDT	Logistics Delay Time	زمان تاخیر تدارکات
ADT	Administrative Delay Time	تاخیرات سازمانی
SE	System Effectiveness	اثربخشی سیستم
CE	Cost-Effectiveness	هزینه- اثربخشی
R&D	Research & Development	تحقیق و توسعه
O&M	Operation & Maintenance	عملیات و نگه‌داری و تعمیرات
CBS	Cost Breakdown Structure	ساختار شکست هزینه
OEE	Overall Equipment Effectiveness	اثربخشی کلی تجهیز
SC	Supply Chain	زنجیره تامین
HIS	Human Systems Integration	ادغام سیستم‌های انسانی
OTA	Operator Task Analysis	تحلیل تکالیف اپراتور
OJT	On-Job Training	آموزش هنگام کار
SA	Supportability Analysis	تحلیل قابلیت پشتیبانی
EC	Electronic Commerce	تجارت الکترونیک

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	فناوری‌های 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 بین المللی حرفه‌ای های 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

اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
	Development	
IPT	Integrated Product Team	تیم محصول ادغام شده
RFP	Request for Proposal	درخواست برای پروپوزال
IFB	Invitation for Bid	دعوت به مناقصه
MIS	Management Information System	سیستم اطلاعات مدیریت
SECAM	Systems Engineering Capability Assessment Model	مدل ارزیابی قابلیت مهندسی سیستم‌ها
CMMI	Capability Maturity Model Integration	ادغام مدل بلوغ قابلیت

واژه‌نامه

Accessibility	قابلیت دسترسی
Achieved Availability	دسترسی پذیری بدست آمده
Acquisition	اکتساب
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 به‌صرفه 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	دستورکار

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 تعمیری
Specifications	مشخصات فنی
Statistical	آماری
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

کتاب‌شناسی

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 (DAIJ) 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 (El A). Arlington. VA, August 2002.

17. GEIA EIA-731-2, *Systems Engineering Capability Model Appraisal Method.* Electronic Industries Alliance (El 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

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 W'ley & 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

51. Saddle River, NJ, 1981. .

52. Eisner, H., *Computer-Based Systems Engineering,* Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1989.

53. IEEE/EIA-12207. *Information Technology: Software Life-Cycle Processes.* Defense Automated Printing Services, Philadelphia, PA.

54. ISO/IEC 15939, *Software Engineering: Software Measurement Process,* 2002.

55. Jones, C., *Software Assessments, Benchmarks, and Best Practices.* Addison Wesley Longman, Reading, M A, 2000.

56. Moore, J.W., *The Roadmap to Software Engineering: A Standards-Based Guide,* Wiley IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 2006.

57. Pfleeger, S. L. and J. M. Atlee, *Software Engineering: Theory and Practice,* 4th ed., Pearson Prentice- Hall, Upper Saddle River, NJ, 2009.

58. Pressman, R. S., *Software Engineering: A Practitioner's Approach,* 7th ed., McGraw- Hill, New York, NY, 2009.

59. 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),/£££ *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. M1L-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. M A. 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. Wilev-lnterscience. Hoboken.

99. NJ, 2003.

100. Bridger, R.S., Introduction to Ergonomics. 3rd ed., CRC. Boca Ralon. 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 Ecomomic 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 El A 649-A, *National Consensus Standard for Configuration Management,* Electronic Industries Alliance (ElA), 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 CM MI: 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.