فصلنامه مدیریت و پژوهش های دفاعی

۱۰۵
سال بیست و سوم
پاییز ۱۴۰۳

مدل مهندسی سیستم یکپارچه متناسب با مدیریت توسعه محصولات یک سازمان تحقیقاتی دفاعی

حسین پویا[۱]، مهرداد کازرونی[۲]، هادی زارع[۳]

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۳/۲۹
تاریخ پذیرش
۱۴۰۳/۰۷/۲۸
صص: ۴۱-۷۳

شاپا چاپی: ۶۱۲۱ - ۲۰۰۸
الکترونیکی: ۵۲۱۸ - ۲۶۴۵

چکیده

با توجه به پیشرفت و توسعه صنایع نظامی و افزایش پیچیدگی سامانه‌ها و محصولات دفاعی، پیچیدگی طراحی و ساخت این محصولات نیز افزایش یافته است؛ بنابراین، به‌منظور حفظ مزیت‌های رقابتی سازمان (شامل افزایش کیفیت، کاهش زمان، حفظ رویکردهای دانش‌محور و کاهش قیمت تمام شده محصولات)، مدیریت یکپارچه فرآیند توسعه محصول در طول چرخه عمر آن از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این تحقیق، طراحی یک مدل مهندسی سیستم یکپارچه و متناسب شده برای توسعه محصولات یک سازمان تحقیقاتی دفاعی و اجرای آن برای مدیریت چرخه عمر یک سامانه دفاعی پیچیده است. این مدل، متناسب با ویژگی‌های سازمان مورد نظر و نوع پروژه‌های آن، قالب و چارچوب خاصی را برای مراحل مختلف چرخه عمر محصول ارائه می‌دهد. مشخصات و محتویات کلیه مستندات و مدارک مربوط به هر مرحله، با استانداردهای مهندسی سیستم مطابقت دارد. یکی دیگر از ویژگی‌های مدل ارائه شده در این تحقیق، طراحی و اجرای یک سیستم سنجش اثربخشی با استفاده از شاخص‌های کلیدی عملکرد است. نتایج اجرای مدل مهندسی سیستم در فرآیند توسعه محصول، حاکی از بهبود نسبی شاخص‌های کلیدی عملکرد زمان تحقق پروژه (۹%) و هزینه (۶%) می‌باشد.

کلید واژه‌ها: چرخه عمر محصول، مهندسی سیستم، نظام محصولات دفاعی، روش دلفی.

۱. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. دانشگاه صنعتی شریف

بیان مسئله

سامانه‌های پدافندی یکی از پیچیده‌ترین محصولات دفاعی در حوزه‌ی هوافضا به شمار می‌روند. این دسته از محصولات معمولاً دارای تعداد بسیار زیادی قطعه و همچنین زیرسیستم‌های مختلف هستند. از سوی دیگر در توسعه آن‌ها یک طراحی چندتخصصی[1] استفاده می‌شود که نیازمند به‌کارگیری دانش و مهارت ویژه از حوزه‌های مختلف می‌باشد. همچنین به دلیل دارا بودن فناوری‌های خاص و انحصاری، اغلب محصولاتی راهبردی می‌باشند که با صرف هزینه‌های بالا و طی مدت زمان طولانی به‌صورت سفارشی و به تعداد محدودی ساخته می‌شوند. این‌گونه محصولات معمولاً نیازمند انواع مختلفی از آزمون‌ها و تجهیزات خاص برای درستی‌سنجی عملکردشان هستند. به‌منظور مدیریت طراحی و توسعه این سامانه‌های پیچیده در طول چرخه عمر آن‌ها، نیاز به استفاده از یک نظام جامع است که در تعریف کلان والدن (۲۰۱۵) مهندسی سیستم نام دارد.

در جنگ جهانی دوم، به دلیل ورود محصولات و فن‌آوری‌های پیچیده نظامی و نیاز به اتخاذ رویکرد سیستمی در توسعه این‌گونه محصولات، مهندسی سیستم به‌تدریج جایگاه خود را در صنایع مختلف پیدا کرد (کازیاکوف، ۲۰۱۱). در زمینه نظامی، اولین سازمانی که به‌صورت خاص و حرفه‌ای به این موضوع پرداخت، سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده[2] بود که هندبوک مهندسی سیستم‌ها را برای اولین بار منتشر کرد و پس از آن وزارت دفاع آمریکا[3] مفاهیم آن را گسترش داد. در سال‌های بعد، مؤسسات ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی مختلف همچون شورای بین‌المللی مهندسی سیستم[4] و سازمان اروپایی استانداردسازی فضایی[5]، استانداردها و هندبوک‌های کاربردی دیگری را برای مهندسی سیستم توسعه و ارائه دادند. همچنین در ایران، مرکز استاندارد دفاعی ایران نیز در زمینه استانداردسازی مهندسی سیستم در حوزه دفاعی گام‌های مؤثری در این زمینه برداشته است (منصوریان، ۱۳۹۴).

با توجه به نیازمندی سازمان‌های مختلف، پیاده‌سازی مهندسی سیستم و ارائه مدل توسعه محصولات

1. Multidisciplinary
2. National Aeronautics and Space Administration (NASA)
3. Department of Defense (DoD)
4. International Council on Systems Engineering (INCOSE)
5. European Cooperation for Space Standardization (ECSS)

برای سازمان‌ها و حتی پروژه‌های خاص، نیازمند متناسب‌سازی[1] می‌باشد. متناسب‌سازی مهندسی سیستم برای یک سازمان و یک محصول خاص به عوامل مختلفی همچون راهبرد، فرهنگ و سطح بلوغ سازمان، نوع و پیچیدگی محصولات و ... بستگی دارد. علاوه بر این، در پیاده‌سازی مهندسی سیستم ممکن است عمق و جنبه‌های متفاوتی از آن مدنظر باشد؛ بنابراین اجرای این پژوهش در سازمان مورد نظر که یکی از سازمان‌های تحقیقاتی وابسته به صنایع دفاعی کشور است و روی محصولات خاص آن برای اولین بار انجام می‌شود. زمینه کاری این سازمان در صنعت هوافضا بوده و با توجه به پیچیدگی محصولات، فاز تحقیقات و مهندسی گسترده و مدت زمان طولانی برای توسعه محصول، مشخصات یک سازمان مهندسی طبق سفارش[2] را به‌طور کامل دارا می‌باشد. پس از انجام فرآیند طراحی و ساخت نمونه مهندسی که بسته به نوع و ابعاد پروژه و همچنین سطح تکنولوژی، معمولاً بین یک تا چهار سال طول می‌کشد، دانش فنی محصول در قالب مستندات به‌منظور تولید انبوه به رده تولیدی واگذار می‌شود. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در سازمان، نیاز به پیاده‌سازی مهندسی سیستم به دلایل زیر کاملاً احساس شده است:

۱. امکان عدم شناسایی دقیق و تعریف شفاف نیاز در ابتدای پروژه وجود دارد؛ بنابراین احتمال اشتباه در فهم مسئله و در نظر نگرفتن همه جوانب آن و پیمودن مسیر اشتباه در فرآیند توسعه وجود دارد که می‌تواند منجر به دوباره‌کاری و صرف هزینه‌های گزاف و چه بسا شکست پروژه گردد.

۲. دومین مسئله، مربوط به فرآیند مدیریت الزامات می‌باشد. با توجه به عدم احصاء الزامات کلیه‌ی ذی‌نفعان پروژه و فقدان فرآیند شکست الزامات و پیگیری آن‌ها، احتمال اشتباه و یا نادیده گرفتن برخی از الزامات و خواسته‌های ذی‌نفعان وجود دارد.

۳. عدم وجود یک سامانه یکپارچه و استاندارد برای مدیریت اطلاعات و اسناد پروژه، باعث تولید انبوه اطلاعات نامنظم در گروه‌های فنی مختلف با نسخه‌های متعدد می‌شود. عدم یکپارچگی اطلاعات و مدیریت دانش مؤثر، منجر به اتلاف وقت و هزینه‌ی زیاد در بازیابی و استفاده مجدد از دانش تولید شده، عدم اشتراک به موقع و مطلوب، مدیریت نامناسب تغییرات مهندسی و امکان استفاده از اطلاعات اشتباه و به‌روز نشده می‌گردد.

---

1. Tailoring
2. Engineer To Order (ETO)

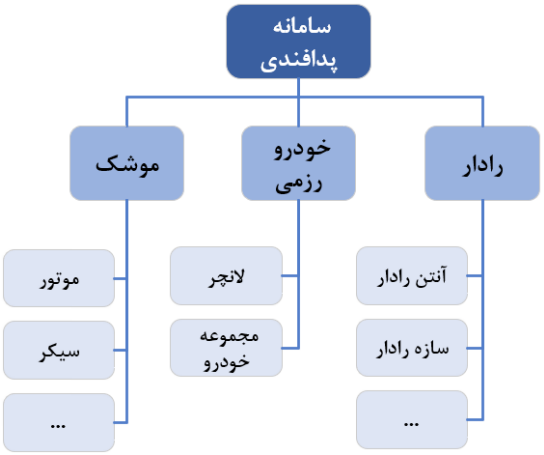
۴. به‌منظور ترسیم مسیر فرآیند توسعه محصول از ابتدا تا انتهای چرخه عمر، نیاز به طراحی یک مدل فرآیندی مطلوب، متناسب، بهینه و تکرارپذیر می‌باشد. در این صورت، تأثیرات مربوط به شرایط و سلیقه‌های مختلف به حداقل می‌رسد و علاوه بر کاهش هزینه و زمان پروژه‌ها و بهبود کیفیت محصولات، منجر به رضایت‌مندی مشتری خواهد گردید.

۵. عدم وجود سازوکاری به‌منظور سنجش مناسب عملکرد و پیشرفت پروژه و اصلاح مشکلات احتمالی نیز دیگر مسئله موجود می‌باشد. در هر سازمان، یک سامانه اندازه‌گیری کمّی عملکرد پروژه مورد نیاز است تا یک سری از سنجه‌ها و شاخص‌های کلیدی پروژه را مورد ارزیابی قرار داده و بازخوردهای آن را به نحو مقتضی اعمال کند.

محصولات ارائه شده توسط سازمان بر اساس کارکرد و مشخصات، دارای طبقه‌بندی‌های مختلفی می‌باشند. محصول مورد نظر، یک سامانه پدافند هوایی راهبردی است که فرآیند توسعه آن، از مرحله شناسایی نیاز تا مرحله ساخت و بهره‌برداری، در سازمان مورد نظر انجام می‌گیرد. این سامانه که نمونه آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود، قابلیت درگیری با انواعی از جنگنده‌ها، بمب‌افکن‌ها، پرنده‌های بدون سرنشین، بالگردها و سایر تهدیدات هوایی مشابه را دارد.

شکل ۱. نمای یک سامانه پدافند هوایی

بخشی از ساختار ریز محصول این سامانه که شامل زیرسیستم‌های اصلی آن است، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. ساختار ریز محصول سامانه پدافند هوایی

پرسش‌های پژوهشی

پرسش اصلی:

۱- مدل مهندسی سیستم مطلوب و متناسب برای توسعه محصولات سازمان به‌منظور رفع مسائل و چالش‌های احصا شده و بهبود شاخص‌های عملکرد پروژه چگونه است؟

پرسش‌های فرعی:

۱- چالش‌ها و مسائل موجود در روند توسعه محصولات سازمان مورد نظر چیست؟

۲- چگونه می‌توان میزان اثربخشی و کارایی مدل ارائه شده را اندازه‌گیری کرد؟

مبانی نظری

مهندسی سیستم

مهندسی سیستم چارچوب فنی برای انتقال توانمندی‌ها به کاربر ایجاد می‌کند. مهندسی سیستم

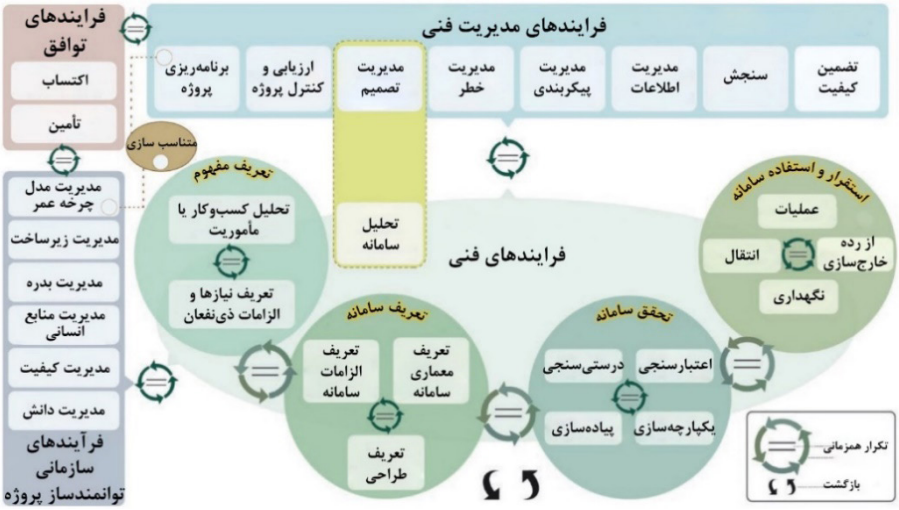
مبنایی فراهم می‌کند که بر اساس آن، هرچیز دیگری ساخته می‌شود و موفقیت برنامه پشتیبانی می‌شود. مهندسی سیستم توسعه کارآمد و تحویل توانمندی را از طریق پیاده‌سازی یک رویکرد متوازن نسبت به هزینه، زمان‌بندی، عملکرد و ریسک، با استفاده از مجموعه فرآیندها و فعالیت‌های یکپارچه منظم و سازگار خود بدون احتساب زمان ورود برنامه به چرخه‌ی عمر اکتساب، تضمین می‌کند. مهندسی سیستم همچنین به توسعه‌ی سامانه‌های انعطاف‌پذیر مهندسی کمک می‌کند که هرکدام قابل اطمینان، تضمین‌شده و به راحتی اصلاح‌پذیر (چابک) باشند (بیکیس، ۲۰۱۵).

شرکت‌ها و سازمان‌های مختلف در دنیا، به فراخور شرایط سازمان و ویژگی‌های محصولات، از مدل چرخه عمر، نظام فرایندی و اسنادی مختلفی در طراحی و مدیریت امور خود بهره می‌برند. این مدل ممکن است بر اساس یک استاندارد بین‌المللی مانند اینکوز (والدن، ۲۰۱۵)، منطقه‌ای مانند سازمان اروپایی استانداردسازی فضایی (ECSS، 2019)، ملی مانند وزارت دفاع ایالات متحده (DoD، 2001) و وزارت حمل و نقل ایالات متحده (DoT، 2007)، ایالتی مانند سازمان حمل و نقل ایالت فلوریدا (FDOT، 2005) و یا سازمانی مانند سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده (ناسا، ۲۰۰۷) و نیروی هوایی ایالات متحده (Force، 2005) باشد. مفاهیم مختلف مهندسی سیستم مانند سیستم، نیاز، الزام و طراحی، در این مراجع، دارای تعاریف گوناگونی است. علی‌رغم شباهت بسیار زیاد این تعاریف، ولی توجه به ظرافت‌های هر یک و پایبندی به یک تعریف مشخص، در کل سازمان طراحی امری اجتناب‌ناپذیر است.

هر یک از استانداردها ممکن است دارای ویژگی خاصی باشند. مثلاً در استاندارد سازمان اروپایی استانداردسازی فضایی، مباحث مربوط به مستندات مهندسی سیستم به خوبی بیان شده است. در این مرجع، فهرست اسناد و محتوای آن‌ها کاملاً تشریح گردیده است. همچنین استاندارد ناسا به شکل عمیق‌تر و به‌صورت مبسوط به موضوع فرآیندهای مهندسی سیستم پرداخته است.

البته به جز روش‌های استاندارد بین‌المللی، منطقه‌ای، ملی و سازمانی، مراجع متنوع کاربردی دیگری نیز وجود دارد که ممکن است دارای تعاریف مفهومی با اندکی اختلاف نسبت به روش‌های شاخص پذیرفته شده‌ی بین‌المللی باشند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بر اساس استاندارد ایزو ۱۵۲۸۸، فرآیندهای چرخه عمر سیستم به ۴ دسته کلی فرایندهای توافق، فرایندهای مدیریت فنی،

فرایندهای سازمانی توانمندساز پروژه و فرایندهای فنی تقسیم می‌شود و دید کامل‌تری از مجموعه فرآیندهای پروژه به دست می‌دهد. با دقت به شکل مشخص می‌شود که متناسب‌سازی، یکی از ارکان کلیدی است که می‌بایست بر روی خود مدل چرخه عمر، اعمال گردد. مراد از این متناسب‌سازی، وجود یا عدم وجود برخی فرایندها و همچنین عمق پرداختن به استانداردسازی آن‌ها می‌باشد.



شکل ۳. فرایندهای چرخه عمر سیستم بر اساس ایزو ۱۵۲۸۸ (والدن، ۲۰۲۳)

در ادامه این بخش، تعاریف فرآیندهای نشان داده شده در شکل ۳، به‌صورت مختصر بیان می‌گردد.

فرآیندهای توافق: فعالیت‌های ضروری برای عقد قرارداد مابین دو سازمان

فرآیند اکتساب: به‌منظور بدست آوردن یک محصول یا خدمت مطابق با الزامات اکتساب‌کننده

- فرآیند تأمین: به‌منظور تأمین یک محصول یا خدمت برای اکتساب‌کننده به‌گونه‌ای که الزامات توافق‌شده را برآورده کند.

فرآیندهای سازمانی توانمندساز پروژه: به‌منظور تضمین توانمندی سازمان در اکتساب و تأمین محصولات یا خدمات (تأمین‌کننده منابع و زیرساخت‌های لازم برای پشتیبانی پروژه)

- فرآیند مدیریت مدل چرخه عمر: به‌منظور تعریف، حفظ و تضمین در دسترس بودن خط مشی‌ها،

فرآیندهای چرخه عمر، مدل‌های چرخه عمر و رویّه‌ها برای استفاده سازمان

- فرآیند مدیریت زیرساخت‌ها: به‌منظور تأمین زیرساخت‌ها و خدماتی برای پروژه که اهداف سازمان و پروژه را در طول چرخه عمر پشتیبانی می‌کند.
- فرآیند مدیریت پورتفولیو: به‌منظور شروع و دنبال کردن پروژه‌های مناسب، کافی و ضروری است که اهداف راهبردی سازمان را تأمین می‌کند.
- فرآیند مدیریت منابع انسانی: به‌منظور تأمین منابع انسانی ضروری و حفظ صلاحیت آن‌ها مطابق با نیازهای کسب‌وکار برای سازمان
- فرآیند مدیریت کیفیت: به‌منظور تضمین آن که محصولات، خدمات و پیاده‌سازی فرآیند مدیریت کیفیت، اهداف کیفی پروژه و سازمان را برآورده کرده و رضایت مشتری را به همراه خواهد داشت.
- فرآیند مدیریت دانش: به‌منظور ایجاد توانمندی و اسباب مورد نیاز برای سازمان جهت به‌کارگیری مجدد دانش موجود

فرآیندهای مدیریت فنی: به‌منظور ایجاد و تکمیل طرح‌ها، اجرای طرح‌ها، ارزیابی پیشرفت‌ها و دستاوردهای عینی بر مبنای طرح‌ها و نیز کنترل اجرای پروژه

- فرآیند برنامه‌ریزی پروژه: به‌منظور تولید و هماهنگ‌سازی طرح‌های مفید و کارا
- فرآیند ارزیابی و کنترل پروژه: به‌منظور ارزیابی همنوایی و امکان‌پذیری طرح‌ها و همچنین تعیین وضعیت پروژه، عملکرد فنی و فرآیندی و نیز بررسی انطباق عملکرد با طرح‌ها و زمان‌بندی‌ها و بودجه‌های تخصیص داده شده جهت برآورده‌کردن اهداف فنی
- فرآیند مدیریت تصمیم: به‌منظور تأمین یک چارچوب تحلیلی و ساختاریافته برای شناسایی، تشخیص و ارزیابی عینی مجموعه بدیل‌ها برای یک تصمیم در هر نقطه از چرخه عمر و گزینش بهترین مورد
- فرآیند مدیریت خطر (ریسک): به‌منظور شناسایی، تحلیل، بهبود و پایش مستمر خطرها
- فرآیند مدیریت پیکربندی: به‌منظور مدیریت و کنترل اجزاء سیستم و پیکربندی‌ها در طول

چرخه عمر برای مدیریت سازگاری میان محصول و پیکربندی‌های تعریف‌شده مربوطه

- فرآیند مدیریت اطلاعات: به‌منظور تولید، اکتساب، تأیید، تبدیل، ذخیره، بازیابی، صدور و حذف اطلاعات برای ذی‌نفعان مشخص
- فرآیند سنجش: به‌منظور جمع‌آوری، تحلیل و گزارش داده‌ها و اطلاعات عینی برای پشتیبانی مدیریت کارآمد و نمایش کیفیت محصولات، خدمات و فرآیندها
- فرآیند تضمین کیفیت: به‌منظور کمک به حصول اطمینان از کاربرد مفید مدیریت کیفیت سازمان در پروژه

فرآیندهای فنی: به‌منظور تعریف الزامات یک سیستم، تبدیل الزامات به محصول کارآمد، میسر شدن بازتولید محصول در صورت لزوم، به‌کارگیری محصول در راستای خدمات مورد نیاز، استمرار تأمین این خدمات و در نهایت کنارگذاشتن محصول در هنگام بازنشستگی از خدمت

- فرآیند تحلیل کسب‌وکار یا مأموریت: به‌منظور تعریف مسأله مأموریت یا کسب‌وکار و نیز مشخص کردن فضای راه حل و تعیین دسته‌های مختلف راهکارهای بالقوه برای مسأله
- فرآیند تعریف نیازها و الزامات ذی‌نفعان: به‌منظور تعریف الزامات ذی‌نفعان برای سیستم برای تأمین توانمندی‌های مورد نیاز کاربران و دیگر ذی‌نفعان در فضای تعریف‌شده
- فرآیند تعریف الزامات سیستم: به‌منظور تبدیل توانمندی‌های مطلوب ذی‌نفعان از منظر کاربر به راهکارهای فنی که نیازهای عملیاتی کاربر را برآورده کند.
- فرآیند تعریف معماری: به‌منظور تولید بدیل‌های معماری سیستم تا بتوان بهترین (های) آن را که با ملاحظات ذی‌نفعان سازگار باشد و از سوی دیگر الزامات سیستم را برآورده کند، انتخاب کرد؛ و نیز به‌منظور بیان جمع‌بندی در قالب یک مجموعه نظرات سازگار
- فرآیند تعریف طراحی: به‌منظور تأمین اطلاعات کافی درباره سیستم و اجزاء آن برای شروع پیاده‌سازی و سازگار با معماری (تعریف شده در مدل‌ها و مناظر معماری سیستم)
- فرآیند تحلیل سیستم: به‌منظور تأمین مبنایی مستحکم از اطلاعات و داده برای درک فنی برای کمک به تصمیم‌گیری‌ها در طول چرخه عمر است.

- فرآیند پیاده‌سازی: به‌منظور تحقق اجزاء معین سیستم
- فرآیند یکپارچه‌سازی: به‌منظور ساخت اجزاء سیستم به‌صورت سیستم (محصول یا خدمت) محقق شده که الزامات، معماری و طراحی سیستم را برآورده می‌کند.
- فرآیند درستی‌سنجی: به‌منظور تأمین شاهدی عینی از برآورده‌کردن الزامات و مشخصات به وسیله سیستم یا اجزاء آن
- فرآیند انتقال: به‌منظور ایجاد توانمندی در سیستم برای ارائه خدماتی که توسط الزامات ذی‌نفعان در فضای عملیاتی مشخص شده است؛ همچنین ایجاد امکان گذار به فضای عملیات به‌منظور ایفای توانمندی‌های متوقع و نیز واگذاری مسئولیت پشتیبانی سیستم از یک سازمان (سازمان توسعه) به سازمانی دیگر (سازمان به‌کارگیرنده/ مشتری)
- فرآیند اعتبارسنجی: به‌منظور تأمین شاهدی عینی از برآورده‌کردن اهداف مأموریت یا کسب‌وکار و الزامات ذی‌نفعان به وسیله سیستم یا اجزاء آن و نیز ارائه کارکرد متوقع در فضای عملیاتی مورد نظر
- فرآیند عملیات: به‌منظور استفاده از سیستم برای ارائه خدماتش
- فرآیند نگهداری: به‌منظور حفظ توانمندی‌های سیستم برای ارائه خدمات است.
- فرآیند از رده خارج‌سازی: به‌منظور پایان دادن به موجودیت یک سیستم یا اجزاء آن برای کاربرد مورد انتظار (والدن، ۲۰۲۳)

سنجش اثربخشی مدل توسعه محصول از طریق شاخص‌های کلیدی عملکرد

در پروژه‌های بزرگ و پیچیده، ارزیابی عملکرد از طریق تعیین معیارهای مناسب، اندازه‌گیری، گزارش‌دهی و اصلاح مسیر پروژه از اهمیت بسزایی برخوردار است. این معیارهای مناسب، شاخص‌های کلیدی عملکرد[1] (KPI) نامیده می‌شود (موناقان، ۲۰۱۳). یک شاخص کلیدی عملکرد، در واقع سنجه‌ای است که نشان می‌دهد یک فرد یا یک سازمان یک فعالیت عملیاتی، اجرایی یا راهبردی ضروری برای موفقیت فعلی و آتی سازمان را تا چه حد خوب انجام می‌دهد (اکرسون، ۲۰۱۰). شاخص‌های کلیدی عملکرد، یک ابزار راهبری حیاتی مورد استفاده مدیران است که به آن‌ها نشان می‌دهد که کسب‌وکار آن‌ها

1. Key Performance Indicator

در مسیر موفقیت است یا از مسیر موفقیت منحرف شده است. مجموعه مناسبی از شاخص‌ها موجب شفاف شدن عملکرد شده و حوزه‌هایی را که نیاز به توجه دارند را مشخص خواهد کرد (مار، ۲۰۱۴). نیاز به دست‌یابی به اهداف درازمدت، قوانین و رفتارهای منتج به نتایج برنامه‌ریزی شده، شاخص‌ها را زیر ذره‌بین ذی‌نفعان سازمان قرار می‌دهد (فرانچسکینی و همکاران، ۲۰۱۹). شاخص‌ها می‌بایست قابل پیش‌بینی، قابل اندازه‌گیری، قابل پیگیری، مرتبط، خودکار و کم‌تعداد باشند (مک گرین، ۲۰۲۰).

انتخاب شاخص کلیدی عملکرد آسان است، اما انتخاب شاخص کلیدی عملکرد درست، دشوار می‌باشد. ماهیت پروژه همراه با تعریف توافق شده‌ای از موفقیت و همچنین عوامل کلیدی موفقیت، تعیین می‌کنند که از چه شاخص‌های کلیدی عملکردی استفاده شود. در محیط پروژه‌ای، انتخاب یک سنجه به‌عنوان یک شاخص کلیدی عملکرد به دلیل اهمیت نسبی آن برای مدیر پروژه، کارفرما یا ذی‌نفعان می‌باشد (کرزنر، ۲۰۱۷).

نتایج مورد انتظار از پیاده‌سازی مهندسی سیستم

امروزه در خصوص این موضوع که پیاده‌سازی مهندسی سیستم، منجر به بهبود فرآیند توسعه محصولات پیچیده می‌گردد، تردیدی وجود ندارد. پیاده‌سازی مهندسی سیستم منجر به تولید ارزش افزوده فراوانی در توسعه سیستم‌های پیچیده می‌شود (آنر، ۲۰۰۴). مهندسی سیستم از طریق روش‌های ابتکاری توسط متخصصان مربوط به حوزه‌های کاری مختلف، به فرآیند توسعه آن حوزه کاری کمک می‌کند. این روش‌ها برای هر مورد متفاوت است. با توجه به وجود درک متفاوت از این روش‌ها، کمّی کردن ارزش افزوده مهندسی سیستم در پروژه‌ها بسیار دشوار است. با این حال مؤسسات و پژوهشگران مختلف تلاش نموده‌اند تا با استفاده از روش‌های آماری و طی مطالعات درازمدت اثرات پیاده‌سازی مهندسی سیستم را روی پارامترهایی مانند زمان و هزینه پروژه بررسی کنند (شرد و همکاران، ۲۰۰۰).

اریک آنر با مقایسه رویکرد سنتی توسعه با رویکرد مبتنی بر مهندسی سیستم، نتیجه نهایی پیاده‌سازی مهندسی سیستم را صرفه‌جویی در زمان و هزینه، همراه با کیفیت بالاتر محصول می‌داند. آنر طی تحقیقات خود، اطلاعات مربوط به پژوهش‌های تئوری و آماری مختلف را بررسی کرده و به این نتیجه رسید که فعالیت‌های مهندسی سیستم، اثرات مثبتی روی تحقق هزینه و زمان‌بندی و کیفیت پروژه‌ها دارد (آنر، ۲۰۰۴).

پیشینهٔ پژوهش

در زمینه تدوین نظام مهندسی سیستم برای یک سازمان یا پروژه، تاکنون مطالعات و پژوهش‌های فراوانی انجام گرفته است. دورنبوس و همکاران (۲۰۰۴)، چگونگی استفاده از روش‌های مهندسی سیستم در مطالعه طراحی مفهومی برای یک وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین را تشریح کردند. هدف آن‌ها نشان دادن اصول مهندسی سیستم برای توسعه پلتفرم پهپاد است. آن‌ها تلویحاً به ضرورت متناسب‌سازی فرایندهای مهندسی سیستم برای محصولات خاص، تأکید نمودند. امیرحسین کوفی‌گر و همکاران (۱۳۹۱)، با بررسی تاریخچه مهندسی سیستم و نمونه‌هایی از اجرای آن در صنایع بزرگ، یک مدل اجرایی برای پیاده‌سازی مهندسی سیستم در صنایع هوایی را پیشنهاد دادند. این مدل شامل چرخه عمر پیشنهادی پروژه‌های صنایع هوایی و نیز بازنگری‌های مربوطه در طی آن می‌باشد. کورالو و همکاران (۲۰۱۴)، با توجه به نیاز شرکت خود، به مطالعه و تهیه یک راهنمای مرجع مدیریت چرخه عمر که شامل اجزای سازمانی و فنی باشد، به بررسی و تحلیل سیستمی مدل‌ها و چارچوب‌های موجود در مقالات و وب‌سایت‌ها پرداختند. آن‌ها مدل‌ها و چهارچوب‌ها را در سه گروه مدل‌های آکادمیک، مدل‌های تجاری و چهارچوب‌های معماری سازمان دسته‌بندی نموده و به‌طور کامل تحلیل و بررسی کردند. یک شرکت انگلیسی دریایی متخصص در زمینه مهندسی، طراحی، تولید و تعمیرات اساسی کشتی‌های جنگی پیچیده، به‌منظور پیاده‌سازی مدیریت چرخه عمر جهت نیل به اهداف سازمانی، یک قرارداد همکاری با دانشگاه استراتکلاید[1] منعقد کرد (مک‌کندری، ۲۰۱۵). این دانشگاه طی یک مطالعه و بررسی اجمالی بر روی مدیریت چرخه عمر، با در نظر گرفتن چالش‌های پیاده‌سازی آن روی محصولات سفارشی، یک مدل یکپارچه برای لیست قطعات[2] محصول ارائه نمود. فرید منصوریان و همکاران (۱۳۹۴)، ضمن مطالعه و بررسی مراجع مهندسی سیستم و الگوریتم طراحی یکی از محصولات پیچیده دفاعی، یک مدل اجرایی به‌منظور پیاده‌سازی مهندسی سیستم در طراحی سیستمی آن محصول ارائه دادند. هاردی و همکاران (۲۰۱۶)، در پروژه تلسکوپ غول پیکر ماژلان، برای تسهیل و پیاده‌سازی فرآیندهای مهندسی سیستم مانند توسعه مفهوم عملیاتی، توسعه و مدیریت الزامات، مدیریت واسط (اینترفیس)، تحلیل حالت‌ها و اثرات شکست، تجزیه و تحلیل خطر و درستی‌سنجی،

1. Strathclyde University
2. Bill of Material (BoM)

برای اطمینان از قابلیت ردیابی در پروژه به تدوین نظام مهندسی سیستم با رویکرد متناسب‌سازی پرداختند. در یک پروژه پایانی کارشناسی ارشد در دانشگاه آپسالا[1] در سال ۲۰۱۹، ارائه یک مدل برای مدیریت اطلاعات محصولات شرکت ABB Mine Hoist به‌عنوان یک نمونه مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از ارائه این مدل، اشتراک اطلاعات محصول و استفاده در سایر شرکت‌ها و همچنین یکپارچه‌سازی عملیات‌های مختلف کاری در طول کل چرخه عمر محصول می‌باشد (ژانگ، ۲۰۱۹). در همین راستا وارد و همکاران (۲۰۱۸)، به طراحی نظام مهندسی سیستم بر اساس ایزو ۱۵۲۸۸ (۲۰۱۵) و ایزو ۲۹۱۴۸ (۲۰۱۸) پرداختند. آن‌ها در مسیر نیل به طراحی چارچوب فرآیندهای توسعه محصول (PDP) سامانه‌های پیچیده، «ماتریس فرآیندهای فنی» را برای پروژه خود، ارائه کردند. کوسل (۲۰۲۲) به متناسب‌سازی فرآیندهای مهندسی سیستم با تمرکز بر بهبود ارزش و کارایی، اقدام نمود. راهبردهای وی جهت متناسب‌سازی شامل سفارشی‌سازی فرآیند برای ویژگی‌های منحصربه‌فرد پروژه و بهینه‌سازی فرآیند با شناسایی عناصر فرآیند با ارزش بالا و تمرکز تلاش مهندسی سیستم بر روی این فعالیت‌های با ارزش بالا بود.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش، تحقیقات کتابخانه‌ای و روش‌های میدانی را با هدف طراحی یک مدل مهندسی سیستم یکپارچه متناسب با یک سازمان تحقیقات دفاعی به کار می‌گیرد. به‌منظور جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات، این مطالعه از روش دلفی (یک تکنیک ارتباطی ساختاریافته) برای دستیابی به اجماع بین متخصصان در مورد اجزا و فرآیندهای کلیدی مدل استفاده می‌کند. این رویکرد، ادغام نظرات کارشناسان مختلف را تضمین کرده و قابلیت اطمینان نتایج تحقیق را افزایش می‌دهد. روش دلفی به دلیل اثربخشی آن در استخراج قضاوت‌های متخصص در مورد مسائل پیچیده که دانش ذهنی و پراکنده ضروری است، انتخاب شده است. پیاده‌سازی شامل چندین مرحله حیاتی است:

ابتدا، کارشناسان مورد نظر، بر اساس تجربه و تخصص گسترده آن‌ها در مهندسی سیستم، توسعه محصولات دفاعی و مدیریت چرخه عمر انتخاب شدند. این پنل متشکل از ۲۰ کارشناس، از جمله دانشگاهیان، متخصصان صنعت و مهندسان ارشد از رشته‌های مرتبط بود.

1. Uppsala University

در مرحله بعد، یک پرسشنامه اولیه برای شناسایی مسائل و چالش‌های حیاتی در فرآیندهای توسعه محصولات فعلی سازمان ایجاد گردید. این پرسشنامه شامل سؤالات باز بود تا طیف وسیعی از دیدگاه‌ها را به تصویر بکشد و به‌صورت آزمایشی با گروه کوچکی از متخصصان آزمون شد تا سؤالات برای وضوح و جامعیت اصلاح شود. در دور اول نظرسنجی دلفی، پرسشنامه پالایش شده از طریق ایمیل در اختیار پنل متخصصین قرار گرفت. کارشناسان پاسخ‌های خود را ارائه داده، مسائل اولیه را برجسته نموده و بهبودهای بالقوه را پیشنهاد کردند. پاسخ‌های این دور برای شناسایی مضامین مشترک و دیدگاه‌های متفاوت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. گزارش خلاصه‌ای از یافته‌ها تهیه و با پنل به اشتراک گذاشته شد که شامل پاسخ‌های ناشناس برای حفظ محرمانگی بود.

بر اساس بازخورد دور اول، پرسشنامه برای دور دوم تجدید نظر شد تا بر موضوعات خاص و راه‌حل‌های پیشنهادی تمرکز کند. از کارشناسان خواسته شد که اهمیت و امکان‌سنجی این راه‌حل‌ها را ارزیابی نمایند و بینش‌های بیشتری را ارائه دهند. این فرآیند تکراری بازخورد و پالایش در چندین دور ادامه یافت تا اینکه در مورد اجزا و فرآیندهای حیاتی مدل مهندسی سیستم به اجماع رسید.

طراحی مدل یکپارچه، کل چرخه عمر محصول را در بر گرفته و به مراحل شناسایی نیاز، امکان‌سنجی، تعریف اولیه، تعریف تفصیلی، صلاحیت‌سنجی و پساتوسعه تقسیم می‌شود. مدل فرآیندی توسعه محصول، کلیه فرآیندهای مورد استفاده در هر یک از مراحل را تشریح نموده و مدل داده‌ای توسعه محصول شامل مشخصات و محتویات کلیه اسناد مربوط به هر مرحله است که با استانداردهای بین‌المللی هم‌راستا می‌باشد.

برای اعتبارسنجی مدل، پرسشنامه‌ای جامع با ۳۵ گویه برای ارزیابی تأثیر مدل پیشنهادی بر حل مسائل موجود تهیه شد. کارشناسان اثربخشی مدل را در پرداختن به چالش‌های شناسایی شده ارزیابی کردند و پایایی و روایی پرسشنامه از طریق تجزیه و تحلیل آماری آزمایش گردید.

سپس این مدل در یک پروژه آزمایشی شامل توسعه یک سامانه پدافند هوایی راهبردی پیاده‌سازی شد. شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) مانند شاخص عملکرد زمانی و شاخص عملکرد هزینه برای ارزیابی اثربخشی مدل مورد بررسی قرار گرفتند.

استفاده از روش دلفی یک رویکرد ساختاریافته و سیستماتیک را برای جمع‌آوری نظرات متخصص

تسهیل کرد که منجر به یک مدل مهندسی سیستم قوی و اجماع‌محور گردید. ماهیت تکراری فرآیند دلفی تضمین می‌کند که این مدل به‌طور مداوم اصلاح و اعتبار می‌شود و آن را به خوبی با نیازها و چالش‌های سازمان تحقیقات دفاعی سازگار می‌کند.

یافته‌های پژوهش

با توجه به مشخصات محصولات سازمان و مجموعه فعالیت‌هایی که در قالب مراحل توسعه این محصولات صورت می‌گیرد و همچنین ماهیت و اهمیت هر یک از این مراحل، نتیجه متناسب‌سازی استانداردهای چرخه عمر مهندسی سیستم در ادامه ارائه می‌گردد.

اولین گام به‌منظور ارائه راهکار مهندسی سیستم برای حل مسائل و مشکلات موجود در روند توسعه محصولات سازمان، شناسایی و ایجاد اجماع در خصوص کم و کیف این مشکلات با استفاده از روش دلفی می‌باشد. در بخش نخست به کمک خبرگان سازمان، فهرست اولیه‌ای از چالش‌ها و مسائل موجود تهیه گردیده و از آن‌ها خواسته شد تا با انتخاب یکی از گزینه‌های موجود در قالب طیف‌بندی لیکرت (از خیلی موافقم تا اصلاً موافق نیستم) نظر خود را اعلام کنند. این فرآیند طی سه مرحله تکرار شده و در هر مرحله از ایشان خواسته شد اگر مورد دیگری را دخیل می‌دانند، به موارد قبلی اضافه نمایند. طی این سه مرحله هیچ موردی حذف نشد و تنها در انتهای مرحله سوم، موضوعاتی که میانگین امتیاز آن‌ها زیر عدد ۳ بود حذف گردید. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با احتساب ۳ مورد اضافه شده در مرحله دوم، در نهایت پنج مسئله از مجموع ۱۲ مسئله، مورد توافق قرار گرفت.

جدول ۱. خلاصه نتایج روش دلفی برای شناسایی مسائل و مشکلات موجود در توسعه محصولات سازمان

مرحله	ردیف	مسئله	میانگین مرحله اول	میانگین مرحله دوم	میانگین مرحله سوم	نتیجه
اول	۱	ضعف در تخصص و بنیه علمی پرسنل	۱٫۸	۱٫۷۵	۱٫۷۵	مردود
	۲	ضعف در مدیریت دانش فنی پروژه‌ها	۴٫۲	۳٫۹	۳٫۸	قبول
	۳	عدم تخصیص بودجه کافی و به‌موقع به پروژه‌ها	۲٫۱۵	۲٫۱	۱٫۸۵	مردود
	۴	اشکالات سیستم اداری و بروکراسی	۲٫۱۵	۲٫۲۵	۲٫۰۵	مردود
	۵	عدم انگیزه کافی پرسنل	۲٫۶۵	۲٫۵۵	۲٫۶	مردود
	۶	عدم تعریف دقیق و جامع و مانع صورت مسئله	۳٫۵	۳٫۴	۳٫۳۵	قبول
	۷	ناکارآمدی سیستم سنجش عملکرد پروژه	۳٫۸۵	۳٫۸۵	۳٫۷۵	قبول
	۸	ناکارآمدی سیستم تشویق و تنبیه	۲٫۵	۲٫۴۵	۲٫۷	مردود
	۹	استاندارد نبودن فرآیند توسعه و اعمال سلیقه شخصی	۴٫۱	۴٫۱	۳٫۹	قبول
دوم	۱۰	ضعف در مدیریت الزامات پروژه		۳٫۰	۳٫۲۵	قبول
	۱۱	مشکلات عقیدتی پرسنل		۱٫۷	۱٫۷	مردود
	۱۲	مشکلات صیانتی و حفاظتی		۱٫۷۵	۱٫۶۵	مردود

برای تصمیم‌گیری درباره توقف یا ادامه مراحل دلفی، دو معیار آماری ملاک عمل قرار می‌گیرد. اولین معیار، اتفاق نظری قوی میان اعضای پنل است که براساس مقدار ضریب هماهنگی کندال تعیین می‌شود. در صورت نبود چنین اتفاق نظری، ثابت ماندن این ضریب یا رشد ناچیز آن در دو دور متوالی نشان می‌دهد که افزایشی در توافق صورت نگرفته است و فرایند نظرخواهی باید متوقف شود. تغییر اندک ضریب کندال در دور سوم نسبت به دور دوم، نشان‌دهنده این است که فرایند دلفی در این مرحله می‌تواند متوقف گردد.

همان‌گونه که در بخش مبانی نظری تحقیق بیان گردید، شرکت‌ها و سازمان‌های مختلف در دنیا، به فراخور شرایط سازمان و ویژگی‌های محصولاتشان، از مدل چرخه عمر، نظام فرایندی و اسنادی مختلفی در طراحی و مدیریت امور خود بهره می‌برند. به‌منظور متناسب‌سازی این سه بخش از مدل مهندسی سیستم برای سازمان مورد نظر نیز از روش دلفی و ایجاد اجماع در خصوص عناصر آن‌ها استفاده گردید.

در حوزه چرخه عمر توسعه محصولات سازمان، پس از به اشتراک‌گذاری استانداردهای مختلف در این زمینه به همراه پیشینه پژوهش موجود با پنل خبرگان و تطبیق آن با روند توسعه محصولات سازمان، در نهایت یک مدل متناسب شده، مطلوب و مورد اجماع طراحی شده و مقبولیت آن با استفاده روش دلفی بررسی گردید.

در حوزه مدل فرآیندی نیز فرآیندهای توسعه محصول استاندارد ایزو ۱۵۲۸۸ که در بخش مبانی نظری تحقیق بیان گردید با پنل خبرگان به اشتراک گذاشته شده و پس از بحث و بررسی و تطبیق آن با روند توسعه محصولات سازمان، یک مدل فرآیندی متناسب به دست آمد. اعتبار این مدل فرآیندی که به‌صورت یک گردش‌کار در طول زمان توسعه محصول ارائه گردید نیز از طریق روش دلفی آزمون گردید. البته به‌منظور رعایت اختصار، در این مقاله تنها عناوین و فعالیت‌های ۱۳ فرآیند حاصل از مجموع ۳۰ فرآیند اولیه ارائه شده است.

همچنین در حوزه مستندات توسعه محصولات، پس از به اشتراک‌گذاری عناوین اسناد و محتوای آن‌ها با پنل خبرگان، از میان آن‌ها در نهایت روی عنوان و محتوای ۲۱ سند مهم و مؤثر از طریق روش دلفی اجماع حاصل گردید. در این مدل داده‌ای، جایگاه ایجاد، به‌روزرسانی و ارائه هر یک از این اسناد در طول زمان توسعه محصول مشخص گردیده است. به‌عنوان مثال برای هر یک از اسناد پروژه مشخص شده است که سند مذکور خروجی کدام فرآیند در گردش‌کار توسعه محصولات می‌باشد.

مدل چرخه عمر محصولات

چرخه عمر توسعه محصولات در مدل ارائه شده مشتمل بر پنج فاز اصلی می‌باشد که در دو سطح راهبرد و راه‌کنش و همچنین عملیات دسته‌بندی شده است. هر یک از فازهای اصلی شامل دو یا چند بازنگری (مرور یا بازبینی) هستند. همچنین در سه نقطه از چرخه عمر، نقطه کلیدی تصمیم قرار دارد که

در آن نقاط، ذی‌نفعان اصلی، نسبت به توقف و یا ادامه پروژه تصمیم‌گیری می‌نمایند. این نقاط کلیدی تصمیم، به ترتیب پس از بازنگری‌های تعریف مأموریت، تصویب پروژه و پذیرش (موفقیت محصول) قرار دارد. مدل مذکور شامل فازهای ذیل می‌باشد.

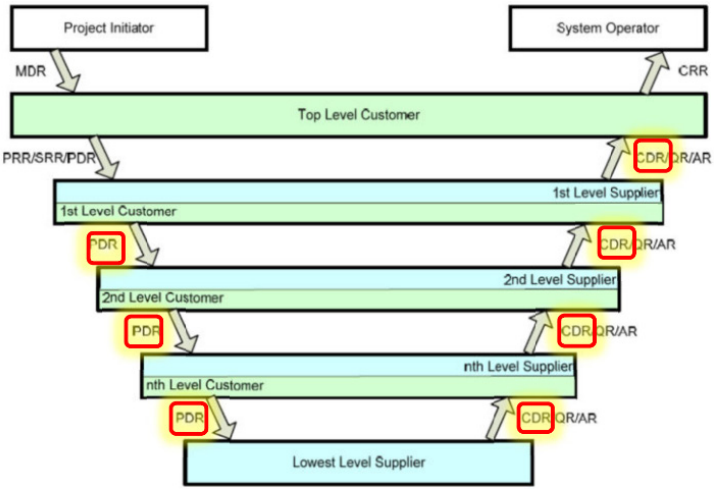
فاز صفر: شناسایی نیاز - تحلیل مأموریت: در اولین فاز از مراحل چرخه عمر محصول که در سطح راهبرد و راه‌کنش می‌باشد، نیاز عملیاتی موجود به‌صورت کامل شناسایی شده و مأموریت متناسب با این نیاز تعریف می‌گردد. این فاز شامل دو بازنگری می‌باشد که عبارتند از شناسایی نیازهای مأموریت[1] و تعریف مأموریت (MDR).

فاز یک: امکان‌سنجی: در این فاز، پس از شفاف کردن انتظارات ذی‌نفعان پروژه و تعریف الزامات آن، فرآیند تصویب پروژه و عقد قرارداد بالادستی انجام می‌شود.

فاز دو: تعریف اولیه: در این فاز، طراحی سیستمی (مفهومی) سامانه در بازنگری الزامات سیستم (SRR) و طراحی اولیه سیستم در بازنگری طراحی اولیه (PDR) انجام می‌گیرد.

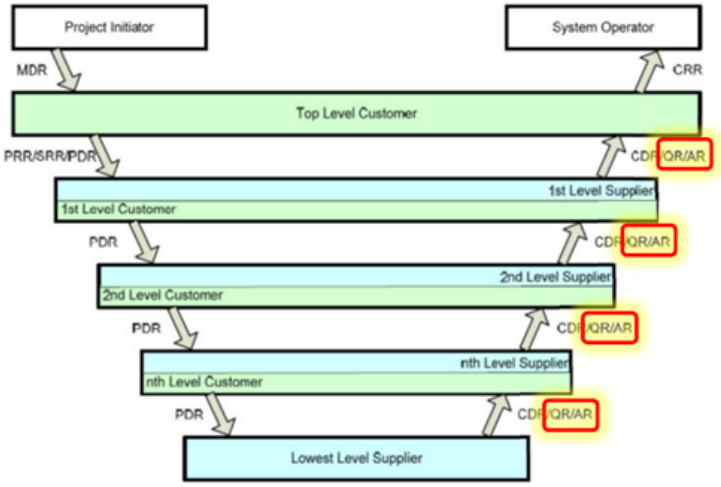
فاز سه: تعریف تفصیلی: روند اصلی طراحی محصول در این فاز انجام می‌شود که شامل بازنگری طراحی تفصیلی (CDR) می‌باشد. در انتهای این فاز، کلیه اجزای سیستم تا آخرین سطح اقلام پیکربندی، برای ساخت/خرید/مونتاژ آماده خواهند بود. البته همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این فاز، خود به نوعی دربرگیرنده بازنگری طراحی اولیه و تفصیلی سطوح پایین‌تر سیستم نیز می‌باشد. این ترکیب، برگرفته از بازنگری‌های سطح‌بندی‌شده بر اساس مدل وی (V) استاندارد فضایی اروپا (ECSS) می‌باشد که البته به‌صورت ضمنی در استانداردهای دیگر مهندسی سیستم نیز تعریف می‌شود.

1. Mission Needs



شکل ۴. بازنگری‌های سطح‌بندی شده بر اساس مدل وی (در فاز سوم پروژه)

فاز چهار: صلاحیت‌سنجی: در فاز شماره چهار، کلیه فعالیت‌های مربوط به خرید، ساخت و مونتاژ همه اجزای سیستم در کلیه سطوح انجام گرفته و در نهایت، عملکرد سیستم طی آزمون عملیاتی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در صورت موفقیت آزمون عملیاتی و با تأیید ذی‌نفعان اصلی پروژه، فرآیند توسعه محصول تکمیل شده و امکان ورود به فاز پساتوسعه وجود خواهد داشت. این فاز شامل دو بازنگری درستی‌سنجی سیستم (QRs و ARs) و صلاحیت‌سنجی آزمون عملیاتی (QR) در سطح عملیات و یک بازنگری پذیرش و موفقیت محصول (AR) در سطح راهبرد و راهکنش می‌باشد. نکته مهمی که در این فاز وجود دارد، انجام بازنگری‌های QR و AR به ترتیب مربوط به صلاحیت‌سنجی و پذیریش سطوح پایین‌تر سیستم، به ترتیب از نازل‌ترین سطح تا عالی‌ترین سطح می‌باشد. این ترکیب، در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. بازنگری‌های سطح‌بندی‌شده بر اساس مدل وی V (در فاز چهارم پروژه)

فاز پساتوسعه: آخرین فاز از چرخه عمر محصول، به فعالیت‌هایی اختصاص یافته است که پس از فرآیند توسعه محصول در سازمان تحقیقاتی انجام می‌گیرد. این فعالیت‌ها از انتقال دانش فنی محصول به رده تولیدی به‌منظور تولید انبوه آغاز شده و تا زمان وارهایی و از رده خارج کردن محصول ادامه می‌یابد. این فاز شامل یک بازنگری (بازنگری انتقال سیستم) و یک مرحله (مرحله بهینه‌سازی محصول) می‌باشد.

هر یک از فازهای فوق که به‌صورت خلاصه مطرح گردید فعالیت‌ها، فرآیندها و مستندات مهندسی سیستم مربوط به خود را داراست که در بخش‌های بعد به آن‌ها اشاره خواهد شد. مجموعه‌ی مراحل فوق در شکل ۶ به‌صورت شماتیک مشاهده می‌شود.

شکل ۶. چرخه عمر محصولات سازمان

مدل فرآیندی

پس از بیان مدل چرخه عمر، فرآیندهای مورد استفاده در مدل توسعه محصولات سازمان، معرفی می‌گردد. در هر یک از این فرآیندها، فعالیت‌هایی صورت می‌پذیرد که حاصل آن، تبدیل ورودی‌های آن فرآیند به یک سری خروجی‌ها و اسناد مورد نظر می‌باشد. عناوین این فرایندها و فعالیت‌های کلیدی هر یک از آن‌ها، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. فهرست فرآیندهای توسعه محصول

ردیف	نام فرآیند	فعالیت‌های فرآیند
۱	تعریف انتظارات ذی‌نفعان	استخراج انتظارات ذی‌نفعان استنباط توقعات ذی‌نفعان تدوین الزامات ذی‌نفعان تحلیل خواسته‌های ذی‌نفعان تدوین سند الزامات ذی‌نفعان اخذ تأییدیه ذی‌نفعان نسبت به سند الزامات ایجاد خط‌مبنای انتظارات ذی‌نفعان
۲	تعریف الزامات سیستم	تعریف قیود طراحی و محصول تعریف انتظارات کارکردی و رفتاری به‌صورت عبارات فنی تعریف الزامات عملکردی برای هر یک از انتظارات کارکردی و رفتاری تعریف الزامات سیستم در قالب عبارت‌های «باید» ی تعریف معیارهای عملکرد برای هر یک از معیارهای اثربخشی تعریف معیارهای عملکرد فنی اعتبارسنجی الزامات سیستم ایجاد خط‌مبنای الزامات سیستم
۳	تعریف معماری	تعریف یک یا چند مدل شکست منطقی تخصیص الزامات فنی به اجزای شکست منطقی بررسی فنی معماری و برطرف کردن تناقضات احتمالی الزامات انجام تحلیل مصالحه‌ای و انتخاب راه‌حل ارجح اعتبارسنجی مجموعه الزامات فنی ایجاد خط‌مبنای الزامات فنی برای هر یک از اجزاء

۴	تعریف طراحی	تعریف مسئله طراحی ارائه راه‌حل (های) طراحی تجزیه و تحلیل هر یک از راه‌حل‌ها، انجام تحلیل مصالحه‌ای و انتخاب راه‌حل ارجح پیاده‌سازی و توصیف کامل راه‌حل طراحی منتخب درستی‌سنجی طراحی به‌روزرسانی و خط‌مبنا کردن الزامات و مشخصات طراحی بررسی موارد راه‌انداز سیستم و رفع نواقص احتمالی آغاز توسعه محصولات سطح بعدی
۵	پیاده‌سازی	آماده‌سازی جهت پیاده‌سازی خرید/ساخت/استفاده مجدد محصول جمع‌آوری مستندات محصول
۶	یکپارچه‌سازی	آمادگی جهت انجام یکپارچه‌سازی آماده‌سازی و اعتبارسنجی محصولات سطح پایین‌تر یکپارچه‌سازی و مونتاژ محصولات تهیه مستندات محصول و فرآیند
۷	درستی‌سنجی	برنامه‌ریزی و آماده‌سازی جهت انجام درستی‌سنجی انجام درستی‌سنجی محصول تحلیل نتایج و تهیه گزارش تهیه مستندات فرآیند درستی‌سنجی
۸	اعتبارسنجی	برنامه‌ریزی و آماده‌سازی جهت انجام اعتبارسنجی انجام اعتبارسنجی محصول تحلیل نتایج و تهیه گزارش تهیه مستندات فرآیند اعتبارسنجی
۹	مدیریت الزامات	برنامه‌ریزی و آماده‌سازی جهت انجام مدیریت الزامات دریافت و سازماندهی الزامات اجرای مدیریت الزامات تهیه مستندات و ثبت درس‌آموخته‌ها

۱۰	برنامه‌ریزی پروژه	آماده‌سازی برای برنامه‌ریزی پروژه برنامه‌ریزی زیرساخت توسعه برنامه‌ریزی، سازمان‌دهی و تخمین هزینه فعالیت‌های فنی آماده‌سازی طرح مهندسی سیستم و سایر طرح‌های مورد نیاز اخذ تعهد ذی‌نفعان نسبت به طرح‌های فنی صدور راهنمای فعالیت‌های فنی مستندسازی خروجی‌های فرآیند طرح‌ریزی فنی
۱۱	مدیریت پیکربندی و اطلاعات	آماده‌سازی و برنامه‌ریزی برای مدیریت پیکربندی و داده شناسایی اقلام پیکربندی و داده‌های فنی مربوطه شناسایی، مدیریت و کنترل واسط ها (اینترفیس‌ها) جمع‌آوری، ذخیره و نگهداری از داده‌های فنی مورد نیاز مدیریت تغییرات پیکربندی و داده بررسی، تأیید و ارائه اقلام پیکربندی و داده برای گروه‌های تأیید شده
۱۲	سنجش	تدوین راهبرد انجام ارزیابی‌های فنی و برنامه‌ای ارزیابی پیشرفت برنامه ارزیابی کیفیت محصولات فنی انجام بازنگری‌های فنی پروژه
۱۳	عقد قرارداد	شناسایی و انتخاب نهاد مجری ارائه درخواست برای ارائه پیشنهاد و ارزیابی آن توسط مجری تنظیم پیشنهادیه توسط مجری و تدوین پیوست فنی عقد قرارداد

البته جدول فوق تنها بیانگر عناوین فعالیت‌های هر یک از فرآیندهاست و هر یک از این فعالیت‌ها دارای ظرائف و عمق مخصوص به خود می‌باشد. به‌عنوان مثال، در مورد فرآیند تعریف طراحی، یکی از فعالیت‌های اساسی، تعریف ماتریس ساختار طراحی (DSM) و انجام فرایند بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی (MDO) با استفاده از DSM به‌منظور اندازه‌گذاری[1] موضوع طراحی است. این مرحله،

1. Sizing

برای هر یک از اجزای ساختار ریز محصول و برای هر یک از بازنگری‌های طراحی، به‌صورت جداگانه و با درجات مختلف عمق و اعتبار، انجام می‌شود. به‌عنوان مثال DSM نوعی طراحی موشک برای فاز تعریف اولیه (بازنگری طراحی مفهومی)، در شکل ۷ نشان داده شده است.

	پیشرانش	هندسه	مشخصات جرمی	دینامیک پرواز	سازه (استاتیکی)	آیروالاستیسیته	آیرودینامیک
پیشرانش		x	x	x			
هندسه			x		x	x	x
مشخصات جرمی				x			
دینامیک پرواز					x	x	
سازه (استاتیکی)				x			
آیروالاستیسیته				x			
آیرودینامیک				x	x		

شکل ۷. ماتریس ساختار طراحی DSM نوعی برای یک موشک پدافندی

مدل داده

همچنین در جدول ۳، فهرست مستندات مهندسی سیستم که در چرخه عمر توسعه محصول تولید می‌شوند، به همراه توضیح مختصری از محتوای آن آورده شده است.

جدول ۳. فهرست اقلام اطلاعات توسعه محصول

ردیف	عنوان سند	مفاد سند
۱	مشخصه الزامات ذی‌نفعان	الزامات مدیریت سازمان، الزامات عملیاتی سیستم، الزامات کاربر، مفاهیم دقیق چرخه عمر سیستم پیشنهادی، قیود پروژه
۲	سند بیان نیاز	سابقه، کمبودها و توانمندی‌های مورد نیاز، مطالبات کلیدی، نقش عملیاتی، تهدیدات احتمالی بر علیه سیستم، محدودیت‌ها و قیود سیستم، برنامه‌ها، پروژه‌ها و فعالیت‌های مرتبط، راه‌حل‌های پیشنهادی
۳	مشخصه الزامات سیستم	هدف سیستم، گستره سیستم، الزامات سیستم شامل الزامات کارکردی، الزامات قابلیت استفاده، الزامات عملکردی، الزامات واسط (اینترفیس)، روش درستی‌سنجی هر یک از الزامات
۴	مشخصه الزامات نرم‌افزار	شبیه به مشخصه الزامات سیستم
۵	طرح مدیریت پروژه و مهندسی سیستم	اهداف و قیود پروژه (شامل فازها، بازنگری‌ها و برنامه‌ریزی توسعه محصول)، سازمان پروژه، ساختارهای ریز پروژه (شامل محصول، کار، سازمان و ...)، مدیریت مهندسی (شامل شکست پروژه به شاخه‌های مهندسی مختلف و روابط میان آن‌ها)، رویکرد طراحی سیستم (شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها، مسئولیت‌ها و سازمان)، طرح‌های پیاده‌سازی و موارد مرتبط، تضمین کیفیت، اتکاپذیری، ایمنی، مواد و فرایندها، تضمین محصول نرم‌افزاری، مدیریت پیکربندی، اطلاعات و مستندات، مدیریت هزینه و زمان‌بندی، مدیریت آماد یکپارچه، مدیریت ریسک، مدیریت ارزیابی فنی و برنامه‌ای (شامل تعیین شاخص‌های کلیدی عملکرد فنی و برنامه‌ای به وسیله فرآیند ارزیابی فنی و برنامه‌ای)
۶	پیوست فنی	مشخصه‌های عمومی فنی و عملیاتی محصول، فهرست اسناد و مدارک پروژه، رویکرد کنترل کیفیت و بازرسی، برنامه زمان‌بندی و ...
۷	قرارداد	معرفی طرفین قرارداد، موضوع قرارداد، مدت زمان و مراحل اجرای قرارداد، مبلغ قرارداد و نحوه پرداخت، تعهدات مجری و تعهدات کارفرما، نتایج قرارداد، تعیین تضمینات، خسارت تأخیر، موارد فسخ و مرجع حل اختلاف، حق مالکیت اسناد و مدارک و تعهد عدم افشا و انتقال موضوع به غیر، تحویل موقت، دوره ارزیابی و گارانتی محصول، ...

۸	سند طراحی مفهومی	تشریح مسئله طراحی (شامل کارکردهای اصلی سیستم و عملکردهای مرتبط، سیستم‌های دارای واسط (اینترفیس) در محیط عملیاتی و تعریف واسط های خارجی، قیود طراحی، الزامات مدون طراحی در قالب جدول الزامات، ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله طراحی)، مدل‌سازی سیستم و رویکرد طراحی (تعیین رویکرد حل مسئله و تدوین فلوچارت طراحی، مدل‌سازی سیستم از جمله مدل‌های تحلیل سیستم و مدل شبیه‌سازی ۶ درجه آزادی، اعتبارسنجی مدل‌ها و رویکردها)، پیاده‌سازی روند طراحی (تعریف معماری سیستم شامل ساختار ریز منطقی و تشریح معماری فیزیکی، محاسبات و تحلیل‌های طراحی، تحلیل‌های مصالحه‌ای، پارامترهای نهایی طراحی شامل تعیین متغیرها، ویژگی‌ها و سایر مشخصات فنی محصول)، تشریح نتایج طراحی (شامل مشخصه‌های فنی سیستم و زیرسیستم‌ها و در صورت نیاز الزامات سطوح پایین‌تر)، درستی‌سنجی طراحی (به معنی ارزیابی میزان انطباق نتایج طراحی با الزامات فنی و تعیین میزان انحراف)
۹	سند طراحی اولیه	
۱۰	سند طراحی تفصیلی	
۱۱	مدل سه‌بعدی	قالب استاندارد مدل سه‌بعدی (شامل دارای درخت طراحی، کدگذاری فایل‌ها بر طبق ساختار ریز محصول، قطعات استاندارد، مراحل مختلف فرآیند ساخت قطعات، ...)، الزامات نرم‌افزار مدل‌سازی
۱۲	نقشه دوبعدی	بر اساس استاندارد نقشه‌کشی سازمان
۱۳	گزارش بازنگری پروژه	شناسنامه گزارش، گزارش وضعیت و روند عملکرد پروژه، اقدامات اصلاحی، درس‌آموخته‌ها
۱۴	رویه آزمون	موضوع آزمون، نگاشت الزامات نسبت به مشخصات آزمون، ابزار آزمون، تجهیزات پشتیبانی مورد نیاز، شرایط، تنظیمات و قیود آزمون، مشارکت‌کنندگان، رویه گام‌به‌گام، مستندسازی
۱۵	طرح مونتاژ، یکپارچه‌سازی و آزمون	معرفی محصول، برنامه مونتاژ، یکپارچه‌سازی و آزمون، تجهیزات، مستندات، سازمان و مدیریت، زمان‌بندی
۱۶	راهنمای کاربری محصول	تعریف کارکرد محصول (شامل کارکردهای مورد انتظار، قیود کارکردی و فازهای چرخه عمر محصول)، تشریح محصول (شامل مشخصات، پیکربندی‌ها، بودجه‌ها، واسط‌ها، نحوه استفاده، انبارداری، نصب، عملیات‌ها، نگهداری و وارهایی محصول)، اجزای محصول (شامل خلاصه کارکرد، مشخصات، نرم‌افزار، عملکرد، عملیات‌ها و داده‌های اجزای محصول)

۱۷	گزارش درستی‌سنجی	نتایج درستی‌سنجی و تحلیل‌های مربوطه
۱۸	گزارش آزمون	نتایج آزمون، موارد انحراف و عدم انطباق
۱۹	طرح انتقال محصول	اهداف و قیود پروژه انتقال محصول، سازمان پروژه انتقال محصول، معرفی موارد انتقال
۲۰	گزارش خاتمه یافتگی	مشخصات کلی طرح، تأیید سازمان تحقیقاتی، تأیید رده عملیاتی، تأیید رده آماد و پشتیبانی، نظر بالاترین مقام ارگان مربوطه
۲۱	پیشنهادیه تغییر مهندسی	مشخصات محصول/مجموعه/قطعه، مشخصات درخواست کننده، موضوع تغییر، تشریح وضعیت موجود و دلیل درخواست، ارائه راه‌حل پیشنهادی، فواید حاصل از اجرای تغییر، نظر بخش طراحی

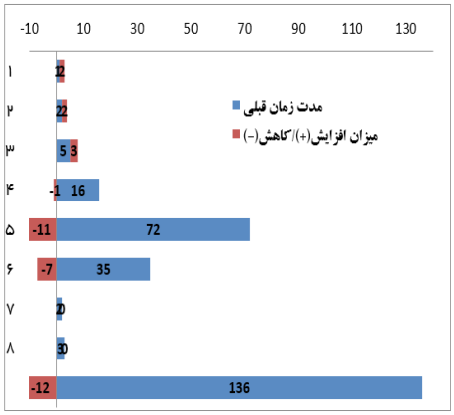
نظام سنجش کارایی و اثربخشی

یکی از ویژگی‌های مدل ارائه شده در این پژوهش، طراحی و تعبیه سازوکاری جهت اندازه‌گیری، گزارش‌دهی، ثبت و بهره‌برداری از بازخوردهای مربوط به شاخص‌های کلیدی عملکرد در فرآیند توسعه محصول می‌باشد. بر طبق مطالعات انجام شده در خصوص شاخص‌های کلیدی عملکرد، به‌منظور سنجش میزان اثربخشی پیاده‌سازی مهندسی سیستم در پروژه‌ها، سه شاخص زمان، هزینه و کیفیت از اهمیت بالایی برخوردارند و می‌تواند به‌عنوان معیار مورد پایش قرار گیرند؛ بنابراین سه شاخص متناظر، با عناوین «شاخص عملکرد زمان» و «شاخص عملکرد هزینه» و «شاخص کیفیت» تعریف شده است. در مدل چرخه عمر ارائه شده، شاخص‌های کلیدی عملکرد می‌بایست در زمان مناسب انتخاب و در طول فرآیند توسعه محصول، مورد پایش و ارزیابی قرار گیرند. بدین منظور، در تدوین طرح مدیریت پروژه و مهندسی سیستم که از فعالیت‌های فرآیند برنامه‌ریزی پروژه است، این شاخص‌ها تعیین شده و در سند مربوطه درج می‌گردد.

پایش منظم و دوره‌ای این شاخص‌ها، ارائه گزارشات و بازخوردها و همچنین ارزیابی، استخراج روندها و تعیین میزان انحراف از برنامه و کیفیت محصولات فنی (انطباق با الزامات فنی عملکردی)، در فرآیند ارزیابی فنی و برنامه‌ای صورت می‌گیرد. این فرآیند در انتهای کلیه بازنگری‌های پروژه در نظر گرفته شده است و نتایج آن در قالب گزارش بازنگری پروژه ارائه می‌گردد. به‌منظور سنجش کیفیت محصول، بازخوردهای عملیاتی از طریق گزارشات دوره‌ای یا موردی رده‌ی عملیاتی ثبت و تحلیل می‌شود. این

گزارشات ممکن است به‌صورت معمول و یا در هنگام تعمیرات جزئی یا اساسی تهیه شود. علاوه بر این، به‌صورت دوره‌ای نظرات و پیشنهادات کاربران سیستم اخذ و در اختیار رده تحقیقاتی قرار می‌گیرد. ثبت و تحلیل مجموعه اطلاعات جمع‌آوری شده فوق، منجر به مشاهده و پایش دقیق عملکرد کیفی محصولات در طول چرخه عمر و شناسایی و رفع ایرادات فنی موجود خواهد شد.

به‌منظور اندازه‌گیری، گزارش‌دهی، ثبت و بهره‌برداری از بازخوردهای مربوط به شاخص‌های کلیدی عملکرد در طول فرآیند توسعه محصول، در انتهای هر یک از بازنگری‌ها، شاخص عملکرد زمانی از نمودار گانت چارت و شاخص هزینه از ساختار شکست هزینه استخراج شده و در داشبورد مربوطه نمایش داده می‌شود. همچنین در انتهای پروژه نیز شاخص عملکرد زمانی و شاخص هزینه پروژه، به تفکیک بازنگری‌های آن ارائه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال در شکل ۸، نمونه داشبورد مربوط به شاخص عملکرد زمانی پروژه دیده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین تأثیر مثبت پیاده‌سازی نظام مهندسی سیستم، مربوط به فازهای طراحی و ساخت محصول بوده است.



شماره فاز	شماره مرور	عنوان مرور	محاسبه زمان: مدت زمان قبلی (هفته)	محاسبه زمان: میزان افزایش(+)/کاهش(-) (هفته)	محاسبه زمان: میزان افزایش(+)/کاهش(-) (درصد)
		مرورهای پروژه			
۰	۱	تعریف مأموریت	۱	۲	۲۰۰/۰
۱	۲	امکان‌سنجی	۲	۲	۱۰۰/۰
۲	۳	طراحی سیستمی	۵	۳	۶۰/۰
	۴	طراحی اولیه	۱۶	-۱	-۶/۳
۳	۵	طراحی تفصیلی	۷۲	-۱۱	-۱۵/۳
۴	۶	درستی‌سنجی سامانه	۳۵	-۷	-۲۰/۰
	۷	صلاحیت‌سنجی	۲	۰	۰/۰
۵	۸	انتقال دانش فنی	۳	۰	۰/۰
		کل پروژه	۱۳۶	-۱۲	-۸/۸

شکل ۸. نمونه گزارش مربوط به شاخص عملکرد زمانی پروژه

خلاصه نتایج پیاده‌سازی مدل مهندسی سیستم در فرآیند توسعه محصول مورد نظر که در جدول ۴ آورده شده است، حاکی از بهبود نسبی شاخص‌های کلیدی عملکرد (زمان و هزینه) می‌باشد.

جدول ۴. میزان تأثیر پیاده‌سازی مدل پیشنهادی روی شاخص‌های کلیدی پروژه

ردیف	شاخص کلیدی عملکرد	میزان تأثیر مثبت (درصد کاهش)
۱	زمان	۹
۲	هزینه	۶

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف از این پژوهش، طراحی یک مدل یکپارچه و متناسب شده مهندسی سیستم برای یک سازمان تحقیقاتی و سپس پیاده‌سازی آن برای مدیریت چرخه عمر یک سامانه پیچیده دفاعی بود. بدین منظور در گام نخست (در پاسخ به سؤال فرعی اول پژوهش) از طریق بحث و بررسی مسائل و مشکلات موجود در روند توسعه محصولات توسط پنل خبرگان و با استفاده از تکنیک دافی، روی ۵ مسئله مهم‌تر اجماع به عمل آمد. در مراحل بعد نیز (در پاسخ به سؤال اصلی پژوهش) در خصوص مدل چرخه عمر، مدل فرآیندی و مدل داده مهندسی سیستم از طریق پرسشنامه‌ای با ۳۵ سؤال به ۲۰ نفر از خبرگان سازمان در این حوزه مراجعه شده و در شناسایی مسائل موجود و طراحی مدل مهندسی سیستم از نظر آن‌ها استفاده شد. در این مدل که متناسب با مشخصات سازمان مورد نظر و نوع پروژه‌های آن طراحی شده است، یک قالب و چارچوب مشخص برای مراحل مختلف چرخه عمر محصولات ارائه گردید. همچنین فهرست، مشخصات و محتویات تمامی اسناد و مدارک مربوط به هر مرحله، مطابق با استانداردهای مهندسی سیستم مشخص شد. از دیگر ویژگی‌های مدل ارائه شده در این پژوهش، طراحی و تعبیه نظام سنجش اثربخشی به کمک شاخص‌های کلیدی عملکرد بود. در نهایت (در پاسخ به سؤال فرعی دوم پژوهش) به‌منظور درستی‌سنجی مدل پیشنهادی، نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی مدل مهندسی سیستم، با نتایج قبلی مقایسه گردید. این نتایج حاکی از موفقیت پیاده‌سازی (زمان: ۹% و هزینه: ۶%) می‌باشد. البته این میزان اثرگذاری اگرچه مطلوب است، ولی کمتر از حد انتظار می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند به خاطر تازگی موضوع برای نیروی انسانی سازمان، کم‌تجربگی و بروز برخی خطاها، نبود زیرساخت‌های لازم، مقاومت و سوگیری برخی کارکنان و مدیران و سایر دلایل باشد که به مرور زمان و در پروژه‌های آتی بهبود خواهد یافت.

در پایان باید به این نکته اشاره کرد که پیاده‌سازی مهندسی سیستم در یک سازمان تحقیقاتی که محصولات مهندسی پیچیده را بر مبنای سفارشات صنایع دفاعی تولید می‌کند، امری است که می‌بایست به‌صورت تدریجی و در طول زمان نسبتاً طولانی انجام گیرد. رویکردهای رادیکال منجر به عدم همکاری مسئولین پروژه و سازمان و تیم‌های فنی با تیم مهندسی سیستم شده و در نهایت موجب شکست آن خواهد گردید. از طرف دیگر، مهندسی سیستم دارای جنبه‌های مختلف و بسیار گسترده و متنوع است که هر کدام به نحوی، فرآیندها و روندهای توسعه محصول در یک سازمان را بهبود می‌بخشند. در مدل ارائه شده در این پژوهش تلاش گردید به جنبه‌هایی پرداخته شود که از اهمیت و اولویت بیشتری برخوردار بوده و تأثیر بیشتری روی بهینه‌سازی روند توسعه محصول دارد. با توجه به مطالب گفته شده، آنچه در این پروژه ارائه گردید، آغاز این مسیر بوده و رسیدن به یک سطح بلوغ مناسب در سازمان، مستلزم فعالیت‌های فراوان و مستمر می‌باشد که هر یک از این فعالیت‌ها می‌تواند زمینه پژوهش‌های نظری و عملی آینده قرار گیرد. یکی از این فعالیت‌ها، توسعه یک پایگاه داده جامع در قالب برنامه‌ریزی منابع سازمانی و استقرار نظام داده‌های این مدل در بستر این شبکه می‌باشد. با اتصال آمار و اطلاعات مربوط به پروژه‌های توسعه محصول به سیستم‌های مالی، آماد و پشتیبانی، نیروی انسانی و ... سازمان، بسیاری از امور مربوط به بودجه‌ریزی، زمان‌بندی، درخواست، سفارش‌گذاری، خرید و سایر مسائل مربوط به پروژه در بستر اتوماسیون سازمانی و به‌صورت بهینه و فرآیندمحور انجام خواهد گردید. پیشنهاد دیگری که برای ادامه این پژوهش می‌توان مطرح کرد، عمق بخشیدن به بخش فنی مدل ارائه شده می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌هایی که در طراحی محصول مورد نظر وجود دارد، تیم‌های فنی مختلف در ممکن است مسیرهای متفاوتی را برای رسیدن به یک محصول واحد طی نمایند. در صنایع و محصولات غیرنظامی و عمومی مانند خودروسازی، کتاب‌ها و هندبوک‌های متعددی در زمینه طراحی این محصولات نوشته شده و در دسترس همگان قرار دارد، ولی در خصوص نوع محصولات مدنظر این پژوهش، منابع موجود بسیار محدود و ناکافی است؛ بنابراین، یکی از پژوهش‌های جذاب دیگر، می‌تواند در زمینه چگونگی طراحی چنین محصولاتی از منظرهای مختلف فنی و مهندسی باشد.

کتابنامه

الف: منابع فارسی

۱. کوفی‌گر امیرحسین، گوگردچیان مهدی، کرباسیان مهدی، نیلی‌پور اکبر، خیام‌باشی بیژن، (۱۳۹۱)، ارائه مدل اجرایی مهندسی سیستم در مدیریت بهینه پروژه‌های تحقیقاتی کلان و پیچیده دفاعی- مطالعه موردی: صنایع هوایی. نهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع.

۲. منصوریان فرید، (۱۳۹۴)، ارائه مدل پیاده‌سازی مهندسی سیستم چرخه حیات یک محصول دفاعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما علی‌محمد احمدوند، دانشگاه امام حسین علیه‌السلام، رشته مهندسی صتایع.

۳. منصوریان فرید، احمدوند علی‌محمد، عمویی مهدی، (۱۳۹۴)، ارائه مدل پیاده‌سازی مهندسی سیستم در چرخه حیات طراحی یک محصول دفاعی. کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین پژوهشی در مهندسی صنایع و مکانیک.

ب: منابع خارجی

1. BKCASE (2015). Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) v. 1.5.

2. Corallo, A., Lazoi, M., Lettera, S., Marra, M., & Verardi, S. (2014). Reviewing product lifecycle management models for complex sectors: a proposal. Universal Journal of Industrial and Business Management, 2, 52-60..

3. DoD (2001). DoD Systems Engineering Fundamentals.

4. Doornbos, J., Jesse, E., & Wijnhoven, I. (2004, June). 2.3. 2 Tailoring Systems Engineering for UAV platform development. In INCOSE International Symposium (Vol. 14, No. 1, pp. 301-311).

5. DoT (2007). Systems engineering for intelligent transportation systems.

6. Eckerson, W. W. (2010). Performance dashboards: measuring, monitoring, and managing your business. John Wiley & Sons.

7. ECSS (2009). ECSS-E-ST-10C: System engineering general requirements.

8. FDOT (2005). Florida's Statewide Systems Engineering Management Plan – Version 2.

9. Force, U. A.. Systems Engineering Primer & Handbook.

10. Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Neely, A. D. (2019). Designing performance measurement systems. Management for professionals.

11. Hardie, K., Trancho, G., & Miles, J. W. (2016, July). Designing a systems engineering process and toolset for the Giant Magellan Telescope. In INCOSE International Symposium (Vol. 26, No. 1, pp. 848-861).

12. Honour, E. C. (2004, June). 6.2. 3 Understanding the value of systems engineering. In INCOSE international symposium (Vol. 14, No. 1, pp. 1207-1222).

13. ISO. (2015). ISO/IEC 15288:2015 - Systems and software engineering–software life cycle processes, ISO (International Organization for Standardization).

14. ISO (2018). ISO/IEC/IEEE 29148:2018-Systems and software engineering - Requirements engineering.

15. ISO, I. (2011). ISO/IEC/IEEE 29148:2011-Systems and software engineering-Requirements engineering, Technical report.

16. Kerzner, H. (2022). Project management metrics, KPIs, and dashboards: a guide to measuring and monitoring project performance. John wiley & sons.

17. Kossiakoff, A., et al. (2011). Systems engineering principles and practice, John Wiley & Sons.

18. Kusel, T. W. (2022). MeerKAT systems engineering: tailoring the process for value and efficiency. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 8(1), 011009-011009.

19. Marr, B. (2014). 25 Need-To-Know Key Performance Indicators: 25 Need-To-Know Key Performance Indicators. Pearson UK.

20. McGrane, M. T. (2020). Improving Convention Center Management Using Business Analytics and Key Performance Indicators, Volume I: Focusing on Fundamentals.

Business Expert Press.

21. McKendry, D. A., Whitfield, R. I., & Duffy, A. H. B. (2015, September). Business and information management architectures for delivering Product Lifecycle Management (PLM) in Engineer To Order (ETO) products. In International Conference in Compuer Applications for Shipbuilding. Bremen: RINA Conference Proceedings.

22. Monaghan, M. W., & Henry, R. J. (2013). Development of hybrid product breakdown structure for NASA ground systems. In AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition (p. 5404).

23. NASA (2007). NASA Systems Engineering Handbook.

24. NASA (2012). MSFC-HDBK-3173-B: Project Management And Systems Engineering Handbook.

25. Sheard, S., & Miller, C. L. (2000, July). The Shangri-La of ROI. In INCOSE International Symposium (pp. 685-692).

26. Walden, D., et al. (2015). INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, John Wiley & Sons.

27. Walden , D. D., et al. (2023). INCOSE Systems Engineering Handbook, 5th Edition, John Wiley & Sons.

28. Ward, D., Rossi, M., Sullivan, B., & Pichika, H. V. (2018). Assessment and Tailoring of Technical Processes: A practitioners experience. In CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS (Vol. 2248, pp. N-A).

29. Zhang, S. (2019). Product structure modeling for ETO system product considering the product lifecycle: A case study of ABB Mine Hoist.