Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329
Vol. 15, Issue 2, No. 37, Summer 2024
https://doi.org/10.22108/pom.2024.141490.1558

(Research paper)

Balancing Requirement Statements, Features and Technology Development Using QFD in Indigenous Macro Products in the Aviation Industry

Mahdi Googerdchian
Department of Industrial Engineering & Systems Center, Techno-Engineering Faculty and Research Center, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran, mahdigoogerdchi1402@gmail.com
Mohsen Asadi *
Department of Industrial Engineering & Systems Center, Techno-Engineering Faculty and Research Center, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran, asadimohsen304@gmail.com
Seyed Ziaodin Ghazizadeh Fard
Department of Industrial Engineering & Systems Center, Techno-Engineering Faculty and Research Center, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran, zia.ghazizadeh@gmail.com
Soheil Imamian
Department of Industrial Engineering & Systems Center, Techno-Engineering Faculty and Research Center, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran, emamyian@yahoo.com

Purpose: This study aims to create and develop an approach for the design and gradual delivery of the product in the shortest time and through the balance of the elements of technological readiness, the need statement document, and the characteristics of the product in large and complex air systems.

Design/methodology/approach: In this study, the balancing process has been carried out using three stages of the Quality Function Deployment (QFD). In the first stage, product specifications have been prioritized using customer needs. In the second stage, product specifications have been prioritized based on the specifications of the first stage. In the third stage, the required technologies have been prioritized using the specifications of the product in the second stage. To conduct the research, industry experts who were in the unit related to the desired product provided the necessary data. Out of the 10 experts in that unit, seven have collaborated in the design and implementation of the model

* Corresponding author, Orcid: 0009-0004-4347-5337 2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

and three have approved the model. Finally, the discussion model was approved by the company's high committee.

Findings: After extracting the priorities of technologies, the final meeting of the QFD group was held with the presence of expert designers and the operator's representative. In this meeting, the process of using QFD and the obtained results were discussed. Then, using the scores obtained for the technologies (priority value) level of technological readiness for each of the product technologies and the approaches of designing, producing and delivering the primary, intermediate and final products were determined. The results of product prioritization based on technology development were also approved by the high committee.

Research limitations/implications: In this research, the balance of technological readiness, a document of requirement statement, and product characteristics in the design management of macro systems of defence air base products were analyzed by QFD. There was a need to check if there were other tools for balancing. Also, the scope of this study was limited to product design, and it is necessary to extend the balance to the entire life cycle of the product. In this research, the researchers faced with challenges due to the lack of familiarity with the elites or complete and sufficient research and training of the elites and managers of the country's research and defence industries. Also, the lack of managerial approaches to system and standard design and the integration of the approaches communicated by the regulatory and standardization centres of the country on the system design of large and complex products were the other limitations of this research.

Practical implications: The model proposed in this research made it possible to produce large and complex products in the aviation industry due to the existence of restrictions. On the other hand, the gradual design, production, and delivery of big products made the products suitable for the user's scene to be designed and produced first. While maintaining the quality of the product, the time to obtain the products should also be reduced.

Social implications: Acquiring large and complex products in the country will accelerate the country's development.

Originality/value: The design and production of large and complex products based on technology development with a gradual product delivery approach using QFD is one of the innovations of this research. The application of the proposed approach will resolve some of the problems related to the design of large products in different areas.

Keywords: Technology development, Requirement statement, Product characteristics, Balance, Quality Function Deployment

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۵، شماره ۲، پیاپی ۳۷، تابستان ۱۴۰۳
دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲ ص ۸۳-۱۰۵
https://doi.org/10.22108/pom.2024.141490.1558

(مقالهٔ پژوهشی)

موازنهٔ بیانیه نیاز، ویژگی‌ها و توسعهٔ فناوری با استفاده از QFD در محصولات کلان بومی در صنعت هوایی

مهدی گوگردچیان[۱]، محسن اسدی*[۲]، سید ضیاءالدین قاضی زاده فرد[۳]، سهیل امامیان[۴]

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع و مرکز سیستم‌های دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران، mahdigoogerdchi1402@gmail.com
۲- استادیار گروه مهندسی صنایع و مرکز سیستم‌های دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران، asadimohsen304@gmail.com
۳- دانشیار گروه مهندسی صنایع و مرکز سیستم‌های دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران، zia.ghazizadeh@gmail.com
۴- استادیار گروه مهندسی صنایع و مرکز سیستم‌های دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران، emamyian@yahoo.com

چکیده: محصولات و سامانه‌های پیچیده، نقش حیاتی و روزافزونی در پیشرفت و توسعهٔ اقتصاد نوین در کشورها دارند و مزیت رقابتی آنها را شکل داده‌اند. از طرفی زمان‌بربودن طراحی و تولید این‌گونه محصولات، موجب شده است تا در بیشتر مواقع پس از تحویل، کارایی لازم را در صحنهٔ بهره‌بردار نداشته باشند. در این رابطه نیاز است تا رویکردهای بومی متناسب با شرایط حاکم با فضای هر کشور، ایجاد و توسعه داده شود. این پژوهش، به دنبال ایجاد و توسعهٔ چنین رویکردی برای طراحی و تحویل تدریجی محصول در کمترین زمان و ازطریق موازنهٔ عناصر آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی های محصول در سامانه‌های کلان و پیچیدهٔ هوایی است. فرایند موازنه با استفاده از سه مرحلهٔ تابع گسترش کیفیت، انجام شده است. در این پژوهش با توجه به صحنهٔ بهره‌بردار و الزامات مهندسی سیستم‌ها و نمودار وی (*Vee*)، در حداقل دو نقطه بازنگری فنی در طراحی و توسعه، تحویل تدریجی محصول پیشنهاد شده است. نتایج نشان داده است که به‌کارگیری موازنهٔ مذکور، تأثیر بسزایی در به‌کارگیری محصول در صحنهٔ بهره‌بردار داشته و مسیر طراحی و توسعهٔ محصولات کلان در کشور را با ارائهٔ یک نقشهٔ راه طراحی، هموار کرده است. رویکرد ارائه‌شده، راهنمایی برای بخش تحقیق و توسعهٔ سازمان‌هاست و به این منظور از آن استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توسعهٔ فناوری، بیانیهٔ نیاز، ویژگی‌های محصول، موازنه، تابع توسعهٔ کیفیت

* نویسنده مسئول، Orcid: 0009-0004-4347-5337

2981-0329 / © University of Isfahan

This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

فرتاش و همکاران[۱] (۲۰۲۳) معتقدند که ازجمله موارد مهم و اساسی در پروژه‌ها و محصولات پیچیده نظیر محصولات هوایی، طراحی و تولید محصول مطابق استانداردهای ملی و بین‌المللی است. همچنین شناخت، کنترل، ارزیابی آمادگی و به‌کارگیری فناوری و درنهایت مدیریت فناوری در تولید این محصولات کلان و پیچیده، بر شناسایی و کمینه‌کردن ریسک حاصل از یک فناوری جدید، بهره‌برداری از فرصت‌های فناورانه و طرح‌ریزی برای بالغ‌کردن فناوری متمرکز است که درنتیجه توجه به آن در طی چرخهٔ عمر پروژه، ریسک تأخیر ایجادشده از نابالغ‌بودن فناوری را کاهش می‌دهد. درواقع دلایل زیادی برای انحراف از زمان‌بندی، افزایش هزینه، فقدان کارایی و نبود کیفیت مورد انتظار و حتی شکست و تعطیلی پروژه‌های طراحی و توسعهٔ محصولات جدید و پیچیده وجود دارد که در بین آنها برابر تحقیقات انجام‌شدهٔ کشور، نبود تعریف کامل و درست الزامات و به‌کارگیری غیرهوشمند فناوری‌ها، به‌ویژه فناوری‌های نابالغ و غیر آماده، یکی از مهم‌ترین دلایل است. البته بیشتر این اتفاقات به عدم قطعیت‌ها و فقدان تصمیم‌گیری‌های مناسب در مراحل آغازین طراحی برمی‌گردد و عامل غالب در عدم قطعیت‌ها و کمبود اطلاعات دربارهٔ آمادگی و سطوح بلوغ فناوری‌های موردنیاز در اجابت الزامات و بررسی و فهم درست زمان و هزینه در رسیدن به اطمینان در بهره‌برداری از این فناوری‌ها، در نقطهٔ مطمئن و زمان استفادهٔ درست در پروژه‌ها و سیستم است.

سو[۲] (۱۹۹۰) معتقد است که از ویژگی‌های پروژه‌های طراحی محصولات هواپایهٔ زمان‌بری اجرا، هزینهٔ بسیار زیاد و تغییر مستمر فناوری و نیازمندی کاربر به‌واسطهٔ تغییر شرایط محیطی نظیر صحنهٔ بهره‌برداری است که باعث شده است تا تحقق کیفیت طراحی محصولات هوایی پس از یک زمان طولانی و صرف منابع ملاحظه‌شدنی، با نتایج غیر منطبق (یا حداقل کمتر منطبق) با نیاز روز کاربر و دارای فناوری‌های غیر روزآمد یا ناقص، تحقق یابد؛ درنتیجه خروجی محصول جدید، قدرت مناسب برای اجرای مأموریت‌های تعریف‌شده و دفاع در مواجهه با مأموریت‌های مدنظر را نداشته نباشد. از طرفی تسریع در انجام پروژه‌ها، یک نیاز اصلی است، اما تسریع در طراحی به از دست دادن کیفیت و کاهش ایمنی و تولید محصولی نامنطبق و یا با کارایی پایین و غیر روزآمد یا فاقد مشتری منجر می‌شود. ازجمله راهکارهای مؤثر که تأثیر زیادی در کاهش زمان طراحی و تولید محصول فناوری‌محور داشته است و ضمن حفظ کیفیت، مدیریت هزینه را نیز مدنظر قرار می‌دهد، فرایند ارتباط مؤثر با بهره‌بردار و تحویل تدریجی محصولاتی است که در صحنهٔ بهره‌بردار مؤثر و مأموریت‌محور است. بنابراین اهمیت به‌کارگیری الگو، روش و ابزارهای مدیریتی بومی که نتایج مناسب و پذیرفتنی را در هر زمان از فرآیند طراحی در این محیط و شرایط بین طراحان، بهره‌برداران و سیاست‌گذاران (حامیان و ذی‌نفعان پروژه‌ها) ایجاد می‌کند، نقش ویژه‌ای در توسعه و دستیابی به این محصولات دارد. روش موازنهٔ[۳] آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز[۴] و ویژگی‌های محصول[۵] در مدیریت طراحی سیستمی کلان[۶] محصولات هواپایهٔ بومی در فرایند چرخهٔ عمر محصول، بر آن است تا ضمن کاهش زمان و هزینه‌های طراحی، کیفیت فنی موردنیاز محصول و ویژگی‌های کلیدی آن را حفظ و علاوه بر برآوردن نیازهای فعلی بهره‌بردار، نیازهای آتی آن را با تحویل تدریجی محصول در بازنگری‌های برنامه‌ریزی‌شده محقق کند.

۲- مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش

مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش در دو بخش ارائه شده است.

۲-۱ مبانی نظری پژوهش

در این بخش، تعاریف و مفاهیم مرتبط با این تحقیق ارائه شده است

- **فناوری:** آمیزه‌ای از دانش، ابزار و فن است که از تلاش‌های علمی و عملی به دست آمده است، همچنین در حوزهٔ طراحی، تحلیل‌های مهندسی، ساخت و مونتاژ نمونه‌های محصول، تعریف و تحلیل آزمون‌های تصدیق و صحه‌گذاری محصولات و خدمات، از آن استفاده شده است.
- **بلوغ و آمادگی فناوری:** امکان استفادهٔ موفقیت‌آمیز از یک فناوری در یک سامانه، محصول یا فرایند است.
- **سطح بلوغ و آمادگی فناوری:** یک ابزار تحلیلی برای سنجش و ارزیابی سطح بلوغ و آمادگی فناوری و مقدار خطرپذیری ناشی از استفادهٔ یک فناوری در توسعهٔ یک محصول است.
- **ارزیابی و انتخاب فناوری:** مجموعه فعالیت‌هایی است که در آن فناوری‌های شناسایی‌شده در داخل یا بیرون سازمان برای حال و آینده، با توجه به شاخص‌های مختلف بررسی و تحلیل و برای شناسایی فناوری‌های مناسب و انتخاب آنها اقدام شده است.
- **مدیریت الزامات:** مدیریت الزامات، یکی از حوزه‌های مهم در مهندسی سیستم‌ها، شناسایی دقیق نیازها، بیان آنها در قالب الزامات شفاف و اولویت‌بندی‌شده و درنهایت، تلاش در جهت تحقق آنها در یک بازهٔ زمانی مشخص است.

مهندسی سیستم‌ها : ناسا[۷] یک رویکرد چند رشته‌ای است که شامل کلیهٔ تلاش‌های تکنیکی بوده و در آن ارزیابی یکپارچگی و تعادل چرخهٔ عمر مجموعهٔ سیستم انسان‌ها، محصولات و فرآیند را برای تأمین نیازهای مشتری انجام داده است. چرخه عمر محصول یا سیستم، ۵ مرحله، ۱۴ مؤلفه، ۱۵ نقطهٔ بازنگری فنی و ۲ نقطهٔ تصمیم‌گیری کلیدی دارد. دو نقطه تصمیم‌گیری کلیدی، جایی است که موازنهٔ محصول انجام می‌شود.

- **ویژگی‌های محصول:** اسنادی هستند که به‌طور مشخص، برای تحقق و پشتیبانی محصول تهیه می‌شوند، الزامات و ویژگی‌های ضروری محصول و اجزای آن را به‌طور روشن و دقیق، شرح می‌دهند و معیارهایی را برای برآورده‌سازی الزامات تعیین‌شده، مشخص می‌کنند.
- **موازنهٔ محصول:** یکی از فرایندهای تحقق محصول در موتور مهندسی سیستم است که ساختار سیستم را می‌سازد. در این فرایند، محصولات سطح پایین‌تر سرهم‌بندی و به محصولات سطح بالاتر تبدیل می‌شود و برای حصول اطمینان از این بررسی می‌شوند که محصول یکپارچه‌سازی شده و به‌درستی عمل کرده است.
- **تابع گسترش کیفیت:** فرآیند و مجموعه‌ای از ابزارهاست که برای تعریف مؤثر نیازهای مشتری و تبدیل آنها به ویژگی‌ها و مشخصات مهندسی دقیق و برنامه‌ریزی برای تولید محصولات مورد نیاز، استفاده می‌شود.

۲-۲ پیشینهٔ پژوهش

موازنهٔ آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول در مدیریت طراحی سیستم‌های کلان محصولات هواپایه، با استفاده از تابع عملکرد کیفیت[۸] ، پنج مؤلفهٔ اصلی دارد.

۲-۲-۱ نیازمندی‌های ذی‌نفعان (سند بیانیهٔ نیاز)

یکی از مسائل مهم و اساسی برای محصولات کلان و پیچیده، درک درست از نیازهای پنهان و آشکار کاربران عملیاتی (ازجمله تحویل به‌موقع محصول) است.

مونس و کیا[۹] (۲۰۱۹)، بیان کردند که یکی از راه‌های درک درست نیازهای کاربران، انجام فرآیند بازگشتی و تکرارپذیر مدیریت الزامات است. در تحقیقی که بر پروژه‌های نیروی هوایی ایالات‌متحده انجام شد، مشخص شد که بیش از ۴۰٪ خطاهای رخ داده شده در پروژه‌ها، ناشی از خطا در الزامات و تنها ۳۰٪ این خطاها ناشی از طراحی بوده است. علاوه بر این، با توجه به اینکه فواید و اهمیت فرایندها و روش‌های مدیریت الزامات در تعامل با دیگر تخصص‌های درگیر در پروژه، مانند مدیریت پروژه، مدیریت پیکربندی، طراحی و معماری سیستم، خرید، مدیریت تأمین‌کنندگان، خدمات مشتری، توزیع، بازاریابی و مدیریت تست بررسی می‌شوند، اهمیت فرایند مدیریت الزامات، بیش از پیش آشکار می‌شود.

میرفخرالدینی و شعبانی[۱۰] (۲۰۱۷)، نقش مشارکت مشتری را در توسعهٔ محصولات جدید بررسی کرده‌اند. آنها هدف از انجام پژوهش خود را بررسی نقش مشارکت مشتری بر توسعهٔ محصول جدید دانسته‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق، رابطهٔ بین مشارکت مشتری بر توسعهٔ محصول جدید را مثبت و معنادار نشان داده است. همچنین نتیجهٔ تأثیر مشارکت مشتری بر توسعهٔ محصول جدید را مثبت و معنادار بیان کرده است.

لی و همکاران[۱۱] (۲۰۲۱)، تأثیرات نوآوری را بر مصرف‌کننده، با هدف خرید محصولات پایدار بیان کرده‌اند. آنها معتقد بودند که مفهوم نوآوری مصرف‌کننده (مشتری)، تمایل خرید و استفاده از محصولات جدید را در کوتاه‌ترین زمان و زودتر از دیگر رقبا را در بر داشته و این را یک ویژگی شاخص و مهم، ارزیابی کرده است.

۲-۲-۲ ویژگی‌های محصول و سامانه‌های پیچیده

شوال‌پور و طباطبایی جاوید[۱۲] (۲۰۲۰)، معتقدند که محصولات و سامانه‌های پیچیده[۱۳] (CoPS)، نقش حیاتی و روزافزونی در پیشرفت اقتصاد نوین دارند و مزیت رقابتی کشورها را شکل داده‌اند.

گوا و همکاران[۱۴] در سال (۲۰۲۱)، طراحی مفهوم انعطاف‌پذیری را با استفاده از تجزیهٔ عملکردی و برطرف‌کردن تناقض‌ها در فاز طراحی محصول ارائه کردند. آنها معتقد بودند که تولید مفهومی، نقش مهمی را در طراحی محصول ایفا کرده است، به‌ویژه در مرحلهٔ طراحی اولیه و در مواقعی که الزامات عملکردی نامشخص یا تا حدی شناخته شده داشت و برای جلوگیری از عدم قطعیت تحمیل‌شده در محیط کار متفاوت، طراحی انعطاف‌پذیر بیشتر برای افزایش ظرفیت سیستم ازنظر الزامات عملکردی استفاده شد.

جیائو و همکاران[۱۵] در سال (۲۰۲۱)، مهندسی طراحی را در عصر صنعت نسل ۴,۰ ارائه کردند. در این مقاله، «دیدگاهی انسانی- سایبری- فیزیکی از اکوسیستم تحقق سیستم‌ها» معرفی شد که «مهندسی طراحی نسل ۴,۰ (DE ۴/۰[۱۶])» نامیده‌شده را معرفی و چگونگی موازنهٔ فناوری‌های سایبری و فیزیکی را برای شناسایی و برآورده‌کردن نیازهای مشتری تعیین کرده‌اند.

وولف و همکاران[۱۷] در سال (۲۰۲۱)، مهندسی سیستم‌های[۱۸]چابک با سناریوهای پیچیده را ارائه کردند. این مقاله با تمرکز بر رابطهٔ بین فرآیند مهندسی سیستم‌ها (برای توسعهٔ محصول) و فرآیند مدیریت نوآوری (برای ایده‌پردازی و ایجاد نوآوری)، دربارهٔ آخرین یافته‌ها تحقیق و آنها را ادامه داده است.

۲-۲-۳ سطح آمادگی فناوری

میرباقری[۱۹] (۲۰۲۰) بیان کرده است که پروژه‌ها و طرح‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای در محصولات کلان و پیچیده، به‌ویژه حوزهٔ دفاعی، عمدتاً با فناوری‌های پیشرفته و نو سروکار دارند. یکی از اساسی‌ترین مراحل این‌گونه پروژه‌ها، در امکان‌سنجی، ارزیابی فناوری‌های مرتبط با پروژه یا طرح و نحوهٔ به‌کارگیری آن بوده است.

بیتس و کلاوزن[۲۰] (۲۰۲۰)، مروری بر سطح آمادگی فناوری[۲۱] را در توسعهٔ سیستم فرماندهی و کنترل برای عملیات دریایی ارائه کرده‌اند. در این مقاله سعی شده است تا تجربیات گذشته از نیروی دریایی ایالات‌متحده، در توسعهٔ طراحی پایگاه مشترک و امکان استفاده از سطح آمادگی فناوری در توسعهٔ سیستم فرماندهی و کنترل برای برنامه‌های کاربردی مبتنی بر فعالیت‌های دریایی، بیان شود.

ما[۲۲] (۲۰۲۱)، چارچوب پیش‌بینی‌های انتقال سطح آمادگی فناوری را برای توسعهٔ فناوری اولیه پیشنهاد داده است. اگرچه پیش‌بینیTRL ها در آینده به‌عنوان یک ابزار برنامه‌ریزی، مهم است، ولی نسبت‌به دیگر موضوعات مهم در TRL کمتر مطالعه و مطالعات قبلی عمدتاً در حوزهٔ تخصصی انجام شده است. چارچوب پیشنهادی، مبتنی بر داده و از تکنیک‌های مدل‌سازی ترکیبی و پیش‌بینی استفاده کرده است. نتیجهٔ مدل‌سازی ترکیبی نشان داد که دو متغیر پیش‌بینی‌کننده،TRL قبل از تحقیق و توسعه و هزینهٔ پروژه، ازنظر آماری برایTRLهای آینده معنادار بودند. همچنین، مدل‌های پیش‌بینی سازگار برازش داده و با شاخص‌های عملکرد مختلف، با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ برابری مقایسه شده‌اند. دو مدل پیش‌بینی انتخاب‌شده، رگرسیون خطی و مدل‌های ماشین‌برداری با کمترین خطای پیش‌بینی بوده‌اند.

زوتین و همکاران[۲۳] (۲۰۲۲)، سطوح آمادگی فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم را در ساخت هواپیما بررسی و چالش‌ها و روندهای آنها را بیان کرده‌اند. در این پژوهش، تحقیقات جدید در حیطهٔ کاربردهای فن‌آوری‌های صنعت نسل ۴,۰ (I۴/۰) را در بخش ساخت هواپیما و وضعیت بلوغ آنها را براساس مقیاس سطح آمادگی فناوری مرور کرده‌ایم.

میتال و گیلسپی[۲۴] در سال (۲۰۲۲)، استفاده از مهندسی سیستم‌های مبتنی بر مدل را برای جلوگیری از فناوری غیرضروری ناشی از الزامات دینامیکی ارائه کردند. در این تحقیق، دربارهٔ مهندسی سیستم‌های مبتنی بر مدل یا (MBSE[۲۵])، بیان شده است که مدیران مهندسی می‌توانند فناوری‌های غیرضروری را شناسایی کنند، طراحی را

به‌طور دقیق و سریع به‌روزرسانی و خطرات مرتبط با حذف فناوری غیرضروری را نیز ارزیابی کنند. در روش پیشنهادی، از نتیجهٔ MBSE برای شناسایی و کاهش «تکنولوژی به‌سبب فناوری» استفاده شده است.

۲-۲-۴ موازنهٔ آمادگی فناورانه، ویژگی محصول و نیازهای مشتری

ناسا[۲۶] (۲۰۱۷) بیان می‌کند که موازنهٔ محصول، یکی از فرایندهای تحقق محصول در مهندسی سیستم است که ساختار سیستم را ساخته است. هدف فرایند موازنه، تلفیق سیستماتیک محصولات از سطوح پایین یا زیرسیستم‌ها به سطوح بالاتر (مانند محصول، واحدها متعلقات، زیرسیستم‌ها یا وظایف کاربران)، اطمینان از عملکرد صحیح محصول موازنه‌شده و انتقال محصول بوده است. موازنهٔ محصول در هر سطحی از سلسله‌مراتب محصولی، مورد نیاز است. امکان موازنهٔ محصول در تمامی چرخهٔ عمر محصول، ممکن است. این فعالیت‌ها شامل تمامی گام‌های تدریجی و تست‌های مرتبط با هر سطح است که برای تکمیل مونتاژ هر محصول و ایجاد امکان تست محصول بالاتر ضروری است. فرایند موازنهٔ محصول شامل تحلیل و شبیه‌سازی است که در بیشتر مواقع نیز با آنها آغاز شده است. در هر ساخت متوالی، نمونه‌های اولیهٔ ساخته‌شده، ارزیابی می‌شوند، بهبود می‌یابند و بر مبنای دانش به دست آمده از فرایند ارزیابی، مجدداً ساخته شده‌اند. میزان نیاز به ساخت نمونه‌های اولیه به‌صورت مجازی و یا واقعی، به عاملیت[۲۷] ابزارهای طراحی و پیچیدگی محصول و ریسک‌های مرتبط با آن بستگی دارد. احتمال اینکه با این مدل موازنه‌شده و با موفقیت از فرایند تصدیق و صحه‌گذاری عبور کند، بالاست. آخرین مرحلهٔ موازنه برای برخی محصولات، هنگامی اتفاق افتاده است که محصول به سایت عملیاتی منتقل شده است. فرایند موازنهٔ محصول نه‌تنها بر سیستم‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری اعمال شده است، به راهکارهای خدمات‌محور، الزامات، مشخصات فنی، طرح‌ها و طرح‌های مفهومی نیز اعمال شده است. هدف نهایی فرایند موازنهٔ محصول، حصول اطمینان از این نکته است که تمامی الزامات و عناصر سیستم، یک کل باشند و این‌گونه عمل کنند.

دیمیتریف و میتروشکینا[۲۸] (۲۰۱۹)، بهبود کارایی طراحی محصولات هواپیمایی را براساس استانداردهای بین‌المللی و رویکردهای قوی ارائه کرد. این مقاله امکان استفاده از تابع گسترش کیفیت، طراحی قوی و دیگر رویکردهای پیشرفته را برای طراحی محصولات هوایی نوآورانه در نظر گرفته است.

یوسفی و همکاران[۲۹] (۲۰۱۸)، ارزیابی و نقش مهم سطح آمادگی فناوری و برآورد هزینه‌های مرتبط با آن را در زیردریایی کلاس سبک انجام دادند.

شوال‌پور و طباطبایی جاوید در سال ۲۰۲۰، گونه‌شناسی عوامل تأثیرگذار بر موفقیت موازنهٔ دانش را در پروژه‌های تولید و توسعهٔ محصولات و سیستم‌های پیچیده ارائه کردند. این محققان معتقد بودند که محصولات و سیستم‌های پیچیده، نقش حیاتی در فرایند توسعهٔ کشورها، به‌خصوص در اقتصادهای نوظهور دارند. یکی از مؤلفه‌های مهم و تأثیرگذار بر موفقیت پروژه‌های تولید و توسعهٔ محصولات و سیستم‌های پیچیده، توانمندی موازنهٔ دانش است.

یو و همکاران[۳۰] (۲۰۲۱) سطح آمادگی فناوری کل را برای تسریع در آمادگی فناوری برای طراحی هواپیما بیان کردند. این تحقیق تلاش کرد تا با استفاده از سه فناوری تحقیقاتی مشترک برای وضعیت ریبلت‌ها، پوشش‌های فوبی حشرات[۳۱] و کنترل فعال جریان[۳۲]، حالتی را برای سطح آمادگی فناوری کل پیشنهاد کند تا باعث موازنهٔ سطوح

آمادگی معمول شود و با دیگر عوامل کلیدی انعطاف‌پذیر، همانند مقرون‌به‌صرفه و تولیدشدنی‌بودن باشد، به‌طوری که در مراحل اولیهٔ توسعه، به عاملی برای انتقال فناوری تبدیل شود.

ویک و همکاران[۳۳] (۲۰۲۱)، ارزیابی سطح آمادگی متوازن را ابزاری برای کشف فناوری‌های جدید و نوظهور ارائه کردند. در این مقاله روشی برای ارزیابی آمادگی متوازن فناوری‌های جدید کشاورزی را توسعه و ارائه داده است. چتین و اوکلر[۳۴] (۲۰۲۳)، تحلیل و تجسم گرافیکی وابستگی پارامترهای کیفی بدنهٔ پهپاد را در شرایط ساخت افزودنی براساس تحلیل تابع عملکرد کیفیت ارائه کردند.

گوگردچیان و همکاران[۳۵] (۲۰۲۴)، مدل یکپارچه‌سازی آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول را در مدیریت طراحی سیستمی کلان محصولات هواپایهٔ بومی طراحی کردند. آنها دنبال آن بودند تا ضمن شناسایی نیازهای بهره‌بردار، ازطریق تحویل تدریجی، زمان تحویل محصول را کاهش دهند. مدل یکپارچه‌سازی آنها شامل ۳ مرحلهٔ اصلی آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول در مدیریت طراحی سیستم‌های کلان محصولات هواپایهٔ دفاعی بومی بود. ازجمله ویژگی‌های پژوهش آنها این است که ضمن رعایت الزامات فرایند مهندسی سیستم‌ها و مدل وی (Vee)، نسبت‌به تحویل محصول تدریجی در حداقل ۲ نقطهٔ بازنگری فنی، تصمیم‌گیری انجام شده است. مهم‌ترین ویژگی این تحقیق کاهش زمان تحویل محصول ازطریق زمان تحویل تدریجی محصول در تعامل با بهره‌بردار است.

۲-۲-۵ تابع عملکرد کیفیت

اقبال و همکاران[۳۶] (۲۰۱۷) معتقدند که یکی از روش‌های مرسوم و علمی برای شناسایی و استخراج نیازهای مشتری که ارتباط بین نیازهای مشتریان و ویژگی‌های محصول را به‌خوبی نشان می‌دهد، استفاده از تابع عملکرد کیفیت است که از بهترین و جامع‌ترین روش‌های موجود بوده است.

آشتیانی و علیپور[۳۷] (۲۰۱۶)، استفاده از روش طراحی اصل‌محور به‌منظور کاهش تکرارپذیری را در فرایند طراحی مفهومی یک سامانهٔ پیچیده ارائه کردند. فرایند طراحی یک سامانهٔ پیچیده، در بر دارندهٔ سه بخش طراحی مفهومی، طراحی اولیه و طراحی جزئیات در نظر گرفته شده است که نخستین و مهم‌ترین آن، فرایند طراحی مفهومی است. این تحقیق با بهره‌گیری از روش طراحی اصل‌محور در فرایند طراحی مفهومی، دم یک هواپیما بر آن است تا میزان کارایی این روش را در انتخاب پیکربندی مناسب، کاهش میزان تکرار و اجابت متوازن نیازمندی‌های هواپیما ارزیابی کند. در همین راستا برای تبدیل نیازمندی مشتری به شاخص‌های طراحی، از روش ارتقای تابع کیفیت نیز بهره گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که ترکیب روش ارتقای تابع کیفیت و طراحی اصل‌محور، تأثیر بسزایی بر افزایش خلاقیت، کاهش تکرارپذیری، شناسایی مناسب نیازهای مشتری و درنهایت انتخاب طرح دارد.

براساس تحقیقات انجام‌شدهٔ خارجی و داخلی، این نتیجه حاصل شد که گرچه نتایج این پژوهش‌ها، تحقیقات و الگوهای موجود بین‌المللی و حتی داخلی منتشرشده به‌صورت موردی و یا موضوعی مدل کلی بهبود، توصیه‌ها یا روش‌هایی گزینشی برای تحقق اهداف در موضوع پژوهش انجام شده است (مثل توصیهٔ الزام به موازنه بین مؤلفه‌های طراحی، محیط و فناوری‌ها و یا دیگر پارامترهای موردنیاز در فرآیند طراحی محصول جدید) و آنها را

ارائه کرده‌اند، اما این موضوعات منطق، چرایی و چگونگی انتخاب، انطباق با منابع و شرایط محیط اجرا، تشریح اقدام در سطوح پایین‌تر و ارتباط هم‌زمان فرآیندهای مدیریتی و فنی، به‌ویژه در مدل طراحی بومی موردنیاز کشور در طراحی کلان محصولات پیچیده و به‌ویژه محصولات دفاعی برای کلیهٔ ذی‌نفعان را بررسی نکرده‌اند؛ برای مثال در پاره‌ای از این مطالعات با استفاده از تعاریف و کلی‌گویی در ارکان و ابزار و روش‌های مدل‌سازی، مانند ابزار وی در ساختار فرآیند طراحی، الزام مدیریت فناوری و تحلیل ریسک‌ها و یا هوشمندی در انتخاب فناوری در مسیر تحقق محصول، توصیف و تذکر داده و لزوم توجه به انطباق خروجی فرآیند با نیاز کاربر و مشخصات اصلی محصول توصیف و گوشزد شده است. آنچه در این تحقیق مدنظر است، بیان الگوی کاربردی و اجرایی به‌منظور مدیریت توأم عناصر طراحی المان‌های آمادگی فناورانهٔ سیستم‌ها، مدیریت و رسیدگی به اجابت نیاز کاربر و تحقق تمام‌عیار کلیهٔ ویژگی‌های مدنظر در طراحی سیستمی کلان محصولات هواپایه با استفاده از QFD است تا در طراحی و تولید محصولات کلان در صحنهٔ بهره‌بردار نقش محوری و پیشرفت توأمان فناوری را هم ازطریق موازنه این عناصر داشته باشد.

در پیشینهٔ تحقیق ارائه‌شده، بیان شد که از طرفی مشتری در طراحی و توسعهٔ محصول نقش محوری داشته است و نیاز شفاف مشتری نیز، تأثیر بیش از حدی در طراحی دارد. از سوی دیگر در طراحی محصولات و سامانه‌های پیچیده، طراحی مفهومی و مهندسی سیستم‌های چابک و درنهایت طراحی انعطاف‌پذیر، تأثیر بسازی داشته است. همچنین یکی از عوامل تأثیرگذار در توسعهٔ محصولات کلان، ارزیابی فناوری‌های مرتبط با پروژه، ازطریق سنجش سطح آمادگی فناوری است. از طرفی در پژوهش گوگردچیان و همکاران (۲۰۲۴)، مؤلفه‌های موازنه برای تحویل تدریجی محصولات و سامانه‌های پیچیده و کلان را آمادگی فناورانه، نیاز مشتری و ویژگی‌های محصول دانسته و نقاط موازنه را هم حداقل ۲ نقطه از ۱۷ نقطه از تصمیم‌گیری‌های فنی در مهندسی سیستم‌ها در نظر گرفته‌اند.

یافته‌های تحقیق، موارد جزئی بین حداکثر دو مؤلفه از سه مؤلفهٔ تحقیق را برای موازنهٔ محصول در طول چرخهٔ عمر محصول نشان داده است. رویکرد و اهداف موازنه در این پژوهش‌ها، بیشتر به‌منظور انسجام در طراحی تکمیلی و ساخت محصول براساس مهندسی سیستم‌ها، برآورده‌کردن هزینه‌های مرتبط با فناوری با استفاده از تابع گسترش کیفیت، موازنهٔ دانش، محاسبهٔ سطح آمادگی کل و کشف فناوری‌های جدید بوده است. پژوهشی با هدف تحویل تدریجی محصولات کلان بین سه مؤلفهٔ تحقیق انجام شده است، ولی با استفاده از ابزارهای علمی و کاربردی مانند QFD انجام نگرفته است. بر این اساس نیاز به پژوهش برای موازنه بین سه مؤلفهٔ آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول در مدیریت طراحی سیستمی کلان، با استفاده از QFD لازم است و ضرورت دارد.

۳ - روش انجام

در این تحقیق تلاش شده است تا موازنهٔ آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول در مدیریت طراحی بر یک محصول هوایی پرنده در یک سازمان هوایی، با استفاده از تابع گسترش کیفیت و مطابق با مراحل بیان‌شده در شکل ۱ اجرا شد.

شکل ۱- مراحل اجرایی تابع گسترش کیفیت

Fig. 1-. Implementation steps of the Quality Function Deployment

برای موازنه و استخراج فناوری‌های مورد نیاز و درنهایت تحویل تدریجی محصول در حداقل دو نقطهٔ بازنگری فنی متناسب با چرخهٔ عمر محصول در طراحی محصولات و گاهی تحویل به‌صورت گام به گام محصول (تدریجی) مطابق تصمیمات بهره‌بردار، حداقل سه بار از خانهٔ کیفیت استفاده شده است.

در اولین و دومین ماتریس خانهٔ کیفیت، اولویت‌بندی و اهمیت ویژگی‌های فنی محصول در دو سطح استخراج و در خانهٔ کیفیت سوم، فناوری‌های مورد نیاز براساس اهمیت آنها اولویت‌بندی شده است.

۱. گردآوری اطلاعات

اولین مرحله برای اجرای تابع گسترش کیفیت، گردآوری اطلاعات در چهار بخش زیر است:

- ✓ دریافت نیازهای بهره‌بردار؛
- ✓ تعیین ویژگی‌های سطح اول (پیشنهادی) برای محصول؛
- ✓ تعیین ویژگی‌های سطح دوم (پیشنهادی) برای محصول؛
- ✓ تعیین فناوری‌های پیشنهادی برای تولید محصول.

در ادامه، روش پیشنهادی برای محصول هوایی پرنده در یک شرکت هوایی، تشریح می‌شود. بر این اساس، ابتدا نیازهای بهره‌بردار مطابق اسناد و دستورالعمل‌های مربوطه دریافت شده است.

نیازهای بهره‌بردار در سه بخش تصریحی یا قراردادی، مذاکره با مشتری و استانداردها به شرح جدول ۱ فهرست شد. این نیازها پس از چندین جلسهٔ مشترک بین نمایندگان بهره‌بردار و طراحان خبرهٔ شرکت و گروه QFD که متخصص این حوزه بودند، استخراج و هم‌زمان نیز اولویت‌بندی شد.

جدول ۱- نیازهای مشتریان همراه با اولویت آنها برای یک محصول

Table 1- Customer needs along with their preference for a product

ردیف			نیازهای مشتری	اولویت	ردیف			نیازهای مشتری	اولویت
۱	نیازمندی‌های عملیاتی	با استفاده از قرارداد	سرعت کروز ۷۰۰ کیلومتر در ساعت	۱۳	۹	نیازمندی‌های عملیاتی	مذاکره با مشتری	استقامت ۴۰ دقیقه	۹
۲			ارتفاع کروز ۱۵۰۰۰Alt فوت	۱۲	۱۰			برد ۴۰۰ کیلومتر	۸
۳			برد لینک پرندهٔ بیش از ۵۰ کیلومتر	۶	۱۱			بازیابی با چتر نجات	۱۱
۴			RCS کمتر از۲/۴ متر مربع در باندX	۴	۱۲		استانداردها	نصب موتور در موقعیت ایمن	۷
۵			حمل و نقل آسان	۵	۱۳			ضریب بار ۶ gs	۶
۶		مذاکره با مشتری	مدت‌زمان راه‌اندازی کمتر از یک ساعت	۱۴	۱۴			TATحداکثر ۱ ساعت	۳
۷			قابلیت حمل بار با ۱۰۰ کیلوگرم	۱۰	۱۵			در دسترس بودن بالا	۲
۸			حداکثر سرعت ۸۰۰ کیلومتر بر ساعت	۱۴	۱۶			کم‌هزینه	۱

همچنین ویژگی‌های فنی محصول، شامل چهار دستهٔ کارایی، سیستمی و ساختاری، مواد و عملیات است که نیازهای مشتری را پوشش می‌دهد. ویژگی‌های قطعات در سطح دوم و فناوری‌های مورد نیاز پیشنهادی که برای تحقق این محصول مورد نیاز بود نیز، با استفاده از نظرهای خبرگان و گروه QFD، شناسایی شد. لیست ویژگی‌های سطح اول و دوم و فناوری‌های مورد نیاز در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. در این مرحله برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به ویژگی‌های فنی در سطح اول، سطح دوم و لیست فناوری‌های مورد نیاز ازطریق مصاحبه جمع‌آوری شده است. این مصاحبه‌ها به‌صورت نیمه‌ساختاریافته و با ۷ نفر از ۱۰ نفر دفتر طراحی محصول مدنظر انجام شده است. ۷ نفر مذکور با عنوان گروه گسترش کیفی عملکرد معرفی شدند و عبارت بودند از رئیس دفتر طراحی با ۲۵ سال سابقهٔ کار و دارای مدرک کارشناسی ارشد مکانیک، جانشین رئیس‌دفتر طراحی با ۲۰ سال سابقهٔ کار و دارای مدرک کارشناس ارشد فناوری، دو نفر کارشناس دفتر طراحی دارای مدرک کارشناس ارشد هوافضا با ۱۰ سال سابقهٔ کار، دو نفر کارشناس ارشد اویونیک با ۱۵ سال سابقهٔ کار و یک نفر دکتری صنایع دارای ۲۰ سال سابقهٔ خدمت و مطلع از نحوهٔ کار با تابع گسترش کیفیت. نتایج این مدل علاوه بر تأیید ۳ نفر دیگر از واحد مربوطه، در کمیتهٔ عالی شرکت نیز ارائه و تأیید شد. علت انتخاب گروه ۷ نفره این است که همهٔ آنها در زمینهٔ محصول بررسی‌شده و فرآیندهای مرتبط با آن، مطالعات لازم و کافی داشته‌اند. در ابتدا هم آموزش‌های لازم برای هماهنگی و آشنایی با تابع گسترش کیفیت داده شد. هدف از جمع‌آوری داده‌ها، استخراج نمودار طراحی و تحویل تدریجی محصول شکل ۶ بود.

جدول ۲- ویژگی‌های محصول

Table 2- Product characteristics

ردیف	ویژگی‌های محصول		ردیف		ویژگی‌های محصول
۱	وزن برخاست پرنده		۸	سیستمی و	نسبت نیروی پیشرانه به وزن پرنده
۲	نسبت وزن به سطح مقطع بال پرنده		۹	ساختاری	میزان مصرف سوخت
۳	نسبت نیروی برآیهٔ نیروی پسای پرنده		۱۰	مواد	استحکام مخصوص متریال
۴	بیشترین مقدار ضریب برآی پرنده	کارایی	۱۱		ارزش چرخهٔ عمر
۵	مقدار ضریب پسا		۱۲	عملیات	میانگین مدت‌زمان انتظار تعمیرات سیستم
۶	نسبت ضریب منظری		۱۳		میانگین مدت‌زمان خرابی سیستم
۷	پایداری				

جدول۳- ویژگی‌های قطعات در سطح دوم

Table 3- Specifications of parts in the second level

ردیف	ویژگی‌های قطعات در سطح دوم	ردیف	ویژگی‌های قطعات در سطح دوم	ردیف	ویژگی‌های قطعات در سطح دوم
۱.	درصد ضخامت ایرفویل (ماهیواره)	۲.	طراحی دهانهٔ ورودی هوا	۳.	سیستم هوا
۴.	زاویهٔ عقب‌رفتگی بال	۵.	سیستم‌های سطوح کنترل	۶.	دهانهٔ ورودی هوا
۷.	ایلرون	۸.	سیستم‌های بازیابی با چتر	۹.	خنک‌کاری موتور
۱۰.	فلپ‌های لبهٔ فراربال	۱۱.	سیستم‌های پرتاب	۱۲.	دریچه‌های دسترسی موتور
۱۳.	الویتور – بالابر	۱۴.	سیستم‌های کنترل پرواز	۱۵.	قابلیت تغییرات
۱۶.	قسمت عقب پرنده (دم‌های عمودی و افقی)	۱۷.	سیستم‌های ناوبری	۱۸.	استحکام سازه
۱۹.	ضریب خوش‌منظری بدنه	۲۰.	سیستم تبادل داده و لینک ارتباطی	۲۱.	دریچه‌های دسترسی
۲۲.	تعداد موتورها	۲۳.	سیستم بازیابی ایربگ – کیسه هوا	۲۴.	ماژولاریتی و تکه‌پذیری
۲۵.	نوع موتورها	۲۶.	سیستم سوخت	۲۷.	ارزش چرخهٔ عمر

جدول ۴- فناوری‌های مورد نیاز

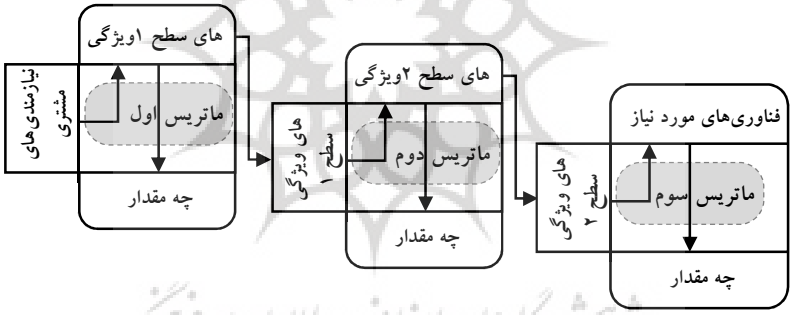
Table 4- Required technologies

فناوری	TRL	فناوری	TRL	فناوری	TRL	فناوری	TRL
دیتالینک	۲	بوستر	۲	مکانیزم حرکتی سطوح	۳	سیستم بازکنندهٔ در	۲
مقابله با خوردگی	۲	لانچر زیرو	۱	ایستگاه زمینی	۳	تسمه‌ها و اتصالات	۳
سیستم سوخت‌رسانی	۳	طراحی اتوپایلوت	۲	آب‌بندی	۲	ناوبری	۲
ورقکاری	۲	طراحی دهانه	۱	طراحی فیکسچر	۳	سیستم ریلیز	۱
خنک‌کاری موتور	۳	داده‌برداری تونل باد	۲	سخت‌افزار در حلقه HIL	۲	کیسه‌های ایربگ	۱
وایرینگ	۳	تحلیل‌های عددی	۳	ماشین‌کاری قطعات	۳	سیستم شارژ	۲
نصب موتور	۲	غلاف و اتصالات بوستر	۱	باکس توزیع توان	۲	لوله‌ها و اتصالات	۲
چتر	۱	طراحی مدل تونل باد	۲	سرورها	۳	طراحی قالب	۳
کنترل موتور	۲	ادوات استارت زمینی موتور	۱				

۲. اجرایی QFD

در این پژوهش از سه ماتریس تابع گسترش کیفیت مطابق شکل ۲ استفاده شد.

- ماتریس اول، اولویت‌بندی نیازهای مشتری و ویژگی سطح اول محصول؛
- ماتریس دوم، اولویت‌بندی ویژگی سطح اول محصول و ویژگی سطح دوم محصول؛
- ماتریس سوم، اولویت‌بندی ویژگی سطح دوم محصول و فناوری‌های مورد نیاز برای طراحی و تولید محصول.



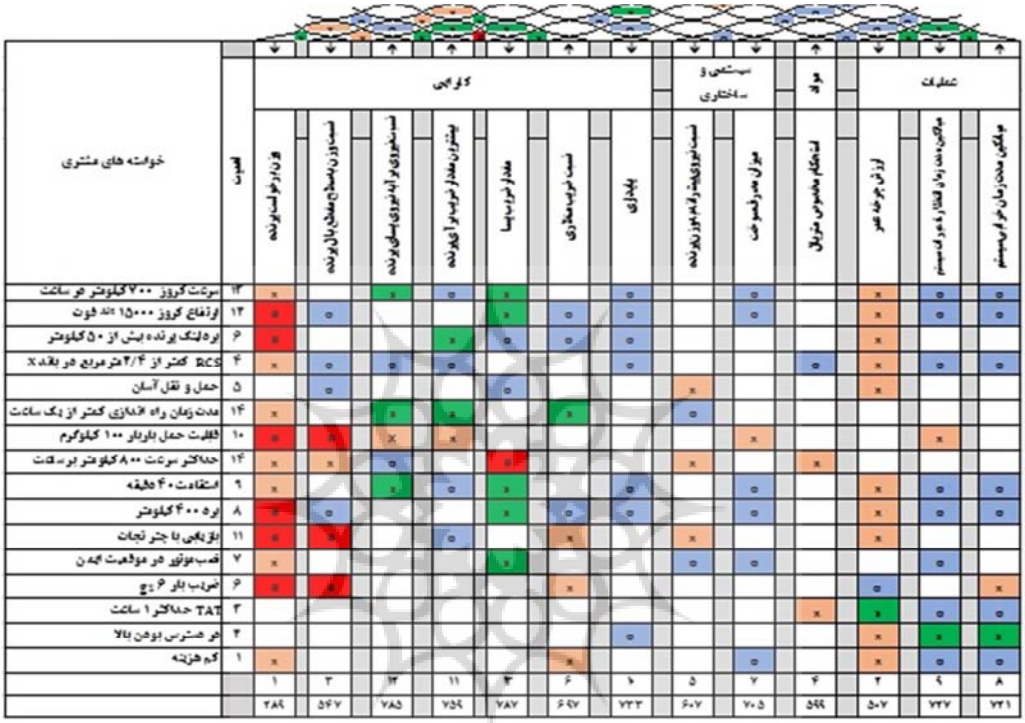
شکل ۲- سه ماتریس از تابع گسترش کیفیت

Fig. 2- Three matrices of quality expansion function

به‌طور کلی، تابع گسترش عملکرد کیفیت، روش تثبیت‌شده‌ای است که برای طراحی و اصلاح محصولات، خدمات و یا فرآیندها (که مطابق با آنها محصولی تولید یا خدمتی ارائه می‌شود) به کار رفته است. در بیشتر موارد برای اولویت‌بندی و یا میزان اهمیت هریک از ویژگی‌های محصول در تابع گسترش کیفیت، از طیف ۱، ۳ و ۹ یا ۱، ۳ و ۵ استفاده شده است؛ برای مثال، عدد ۵ بیشترین اهمیت و عدد ۱ کم‌ترین اهمیت را نشان داده است. در این ماتریس از ساختار شکست پروژه (PBS[۳۸]) نیز استفاده می‌شد. ساختار شکست پروژه شامل درختی حاصل از تجزیهٔ سلسه‌مراتبی و سطح اقلام یا موضوع‌های اصلی یک پروژه به اقلام تحویل یا موضوع‌های تشکیل‌دهندهٔ آن است. در این ساختار، اقلام در سطر اول و زیراقلام در سطوح بعدی نمایش داده می‌شوند. در برخی از موارد هم برای گردآوری داده‌ها از طیف لیکرت[۳۹] (۱)، بسیار کم، (۳)، کم، (۵)، متوسط، (۷)، زیاد و (۹)، بسیار زیاد برای تکمیل ماتریس گسترش کیفیت استفاده می‌شود (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۸).

در این پژوهش، با توجه به تفکیک‌پذیری بیشتر نظرهای خبرگان، از طیف لیکرد استفاده شده است. به‌منظور تعیین میزان اهمیت و تأثیرگذاری هریک از ویژگی‌های محصول (جدول ۲)، برای برآورده‌کردن نیازهای مشتری (جدول ۱)، از اولین ماتریس تابع گسترش کیفیت مطابق شکل ۳ استفاده شد که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است. در دومین استفاده از تابع گسترش کیفیت (شکل۴)، میزان تأثیر و اهمیت ویژگی‌های سطح دوم محصول (جدول ۳) برای برآورده‌شدن ویژگی‌های سطح اول، استخراج شد که در جدول ۶ نشان داده شده است.

در سومین استفاده از ماتریس تابع گسترش کیفیت (شکل۵)، میزان تأثیر و اهمیت فناوری‌های پیشنهادی (جدول۴)، برای برآورده‌شدن ویژگی‌های سطح دوم محصول (جدول ۳)، استخراج شد.



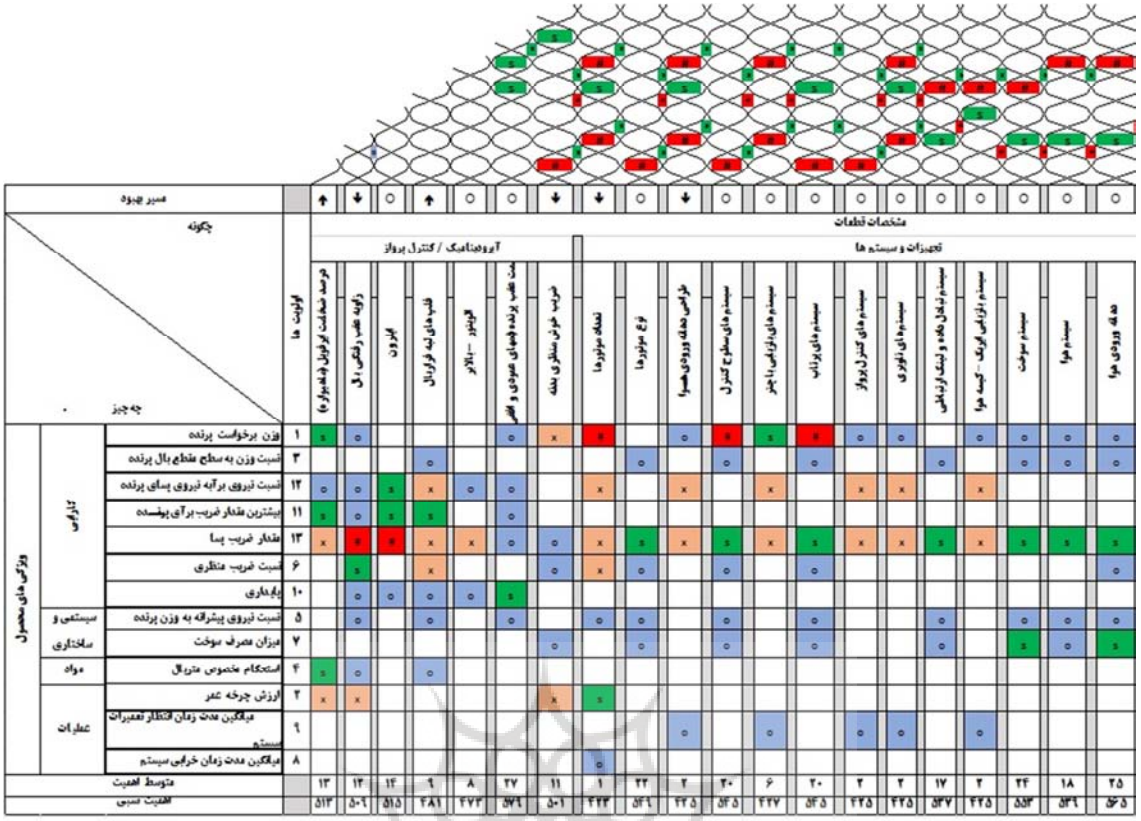
شکل۳- تابع گسترش کیفیت، نیازهای مشتریان و ویژگی‌های محصول

Fig. 3- The Quality Function Deployment, customer needs - product characteristics

جدول ۵- نتایج اولویت‌بندی ویژگی‌های محصول سطح اول

Table 5- Prioritization of product features

ردیف	ویژگی‌های محصول	اولویت	ردیف	ویژگی‌های محصول	اولویت
۱.	وزن برخاست پرنده	۱	۸.	نسبت نیروی پیشرانه به وزن پرنده	۵
۲.	نسبت وزن به سطح مقطع بال پرنده	۳	۹.	میزان مصرف سوخت	۷
۳.	نسبت نیروی برآ به نیروی پسای پرنده	۱۲	۱۰.	استحکام مخصوص مواد اولیه	۴
۴.	بیشترین مقدار ضریب برآی پرنده	۱۱	۱۱.	ارزش چرخه عمر	۲
۵.	مقدار ضریب پسا	۱۳	۱۲.	میانگین مدت‌زمان انتظار تعمیرات سیستم	۹
۶.	نسبت ضریب منظری	۶	۱۳.	میانگین مدت‌زمان خرابی سیستم	۸
۷.	پایداری	۱۰			



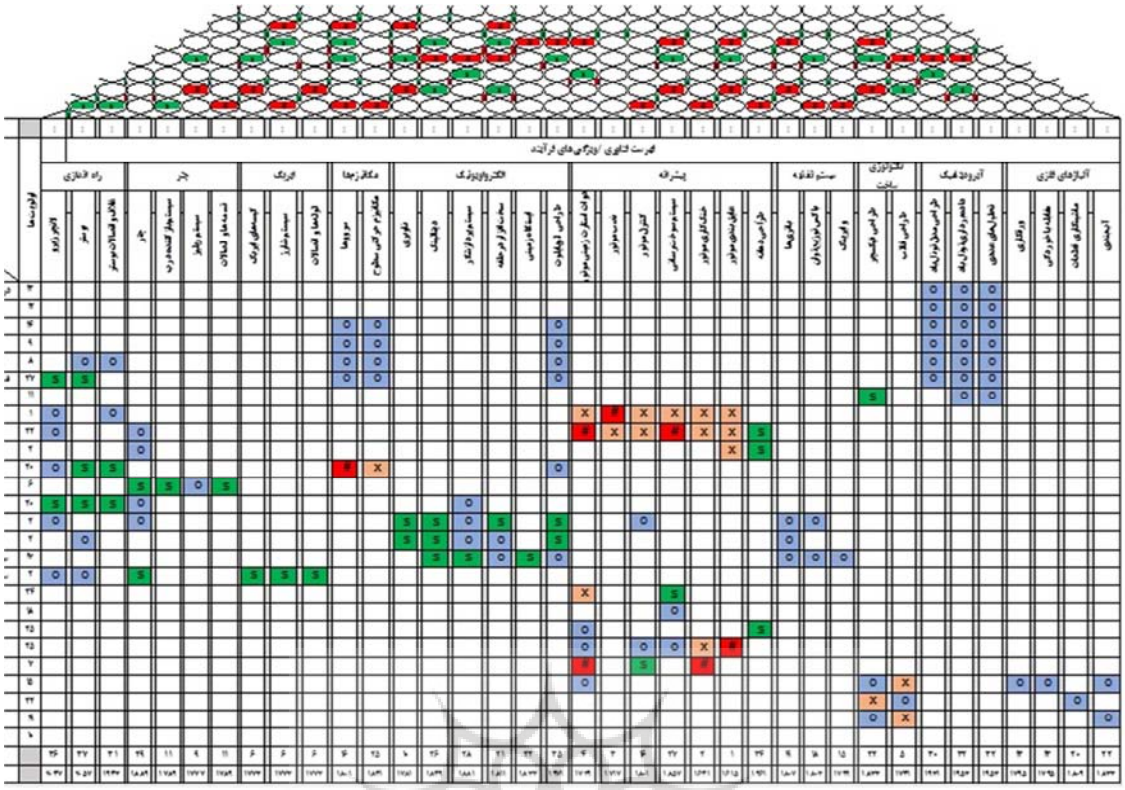
شکل ۴- تابع گسترش کیفیت، ویژگی‌های محصول و ویژگی‌های قطعات در سطح دوم

Fig. 4- Function to expand quality, product features and parts specifications at the second level

جدول ۶- نتایج اولویت‌بندی ویژگی‌های قطعات در سطح دوم

Table 6- Specifications of parts in the second level along with their priority

ردیف	ویژگی‌های قطعات در سطح دوم	اولویت‌ها	ردیف	ویژگی‌های قطعات در سطح دوم	اولویت‌ها
۱.	درصد ضخامت ایرفویل (ماهیواره)	۱۳	۲.	سیستم‌های ناوبری	۲
۳.	زاویهٔ عقب‌رفتگی بال	۱۲	۴.	سیستم تبادل داده و لینک ارتباطی	۱۷
۵.	ایلرون	۱۴	۶.	سیستم بازیابی ایربگ – کیسه هوا	۲
۷.	فلپ‌های لبهٔ فراربال	۹	۸.	سیستم سوخت	۲۴
۹.	الویتور – بالابر	۸	۱۰.	سیستم هوا	۱۸
۱۱.	قسمت عقب پرنده (دم‌های عمودی و افقی)	۲۷	۱۲.	دهانهٔ ورودی هوا	۲۵
۱۳.	ضریب خوش‌منظری بدنه	۱۱	۱۴.	خنک‌کاری موتور	۲۵
۱۵.	تعداد موتورها	۱	۱۶.	دریچه‌های دسترسی موتور	۷
۱۷.	نوع موتورها	۲۲	۱۸.	قابلیت تغییرات	۱۵
۱۹.	طراحی دهانه ورودی هوا	۲	۲۰.	استحکام سازه	۱۵
۲۱.	سیستم‌های سطوح کنترل	۲۰	۲۲.	دریچه‌های دسترسی	۲۲
۲۳.	سیستم‌های بازیابی با چتر	۶	۲۴.	ماژولاریتی و تکه‌پذیری	۱۹
۲۵.	سیستم‌های پرتاب	۲۰	۲۶.	ارزش چرخهٔ عمر	۱۰
۲۷.	سیستم‌های کنترل پرواز	۲			



شکل ۵- تابع گسترش کیفیت ویژگی‌های قطعات در سطح دوم و اولویت‌بندی فناوری‌ها

Fig.5- The Quality Function Deployment of parts specifications at the second level and prioritization of technologies.

نتایج اولویت‌بندی ماتریس سوم در جدول ۷ نشان داده شده است.نتایج به دست آمده از اولین ماتریس گسترش کیفیت، نشان داده است که از میان ویژگی‌های محصول، پارمترهایی همچون «مقدار ضریب پسا» و «نسبت نیروی برآ به نیروی پسای پرنده»، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بودند و ویژگی همچون «وزن برخاست پرنده» اولویت کمتری نسبت‌به دیگر ویژگی‌ها داشتند.

جدول ۷ – نتایج اولویت‌بندی فناوری‌های مورد برای طراحی و تولید محصول

Table 7- Required technologies along with their prioritization

TRL	اولویت	فناوری‌ها	TRL	اولویت	فناوری‌ها	TRL	اولویت	فناوری‌ها
۲	۳۷	بوستر	۳	۲۴	مکانیزم حرکتی سطوح	۲	۱۲	سیستم بازکنندهٔ در
۱	۳۶	لانچر زیرو	۳	۲۱	ایستگاه زمینی	۳	۱۲	تسمه‌ها و اتصالات
۲	۳۵	طراحی اتوپایلوت	۲	۲۱	آب‌بندی	۲	۱۱	ناوبری
۱	۳۴	طراحی دهانه	۳	۲۷	طراحی فیکسچر	۱	۱۰	سیستم ریلیز
۲	۳۲	داده‌برداری تونل باد	۲	۱۹	سخت‌افزار در حلقهٔ HIL	۱	۷	کیسه‌های ایربگ
۳	۳۲	تحلیل‌های عددی	۳	۲۳	ماشین‌کاری قطعات	۲	۷	سیستم شارژ
۱	۳۱	غلاف و اتصالات بوستر	۲	۱۷	باکس توزیع توان	۲	۷	لوله‌ها و اتصالات
۲	۳۰	طراحی مدل تونل باد	۳	۱۵	سروووها	۳	۶	طراحی قالب
۱	۲۹	چتر	۲	۱۵	کنترل موتور	۱	۴	ادوات استارت زمینی موتور
۳	۲۸	سیستم پردازشگر	۳	۱۴	وایرینگ	۲	۳	نصب موتور
۳	۲۶	سیستم سوخت‌رسانی	۲	۲۰	ورق‌کاری	۳	۲	خنک‌کاری موتور
۲	۲۵	دیتالینک	۲	۲	مقابله با خوردگی	۲	۱	عایق‌بندی موتور

همچنین نتایج دومین ماتریس گسترش کیفیت نشان داده است که «قسمت عقب پرنده (دم‌های عمودی و افقی)» و «دهانهٔ ورودی هوا» از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بودند و «تعداد موتورها» اولویت بسیار کمی داشتند. سومین ماتریس گسترش کیفیت نیز، اولویت هریک از فناوری‌های مورد نیاز با ویژگی‌های قطعات سطح دوم را تعیین کرد. علاوه بر اولویت‌بندی فناوری‌ها، تعیین سطح آمادگی فناوری هریک از فناوری‌ها برای توسعهٔ محصول ضروری است. در این تحقیق، سطح آمادگی فناوری با استفاده از استانداردهای ناسا و ازطریق گروه QFD تخمین و ارزیابی شد.

لیست فناوری‌های اولویت‌بندی‌شده همراه با سطح آمادگی فناوری، در جدول ۷ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان داده است که فناوری‌های «بوستر» و«لانچر زیرو»، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده و فناوری «عایق‌بندی موتور»، اولویت بسیار کمتری نسبت‌به دیگر فناوری‌های مورد نیاز برای محصول پرنده داشته است.

۴ - بحث

در فرآیند طراحی و تدوین مدل موازنهٔ آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول در مدیریت طراحی سیستمی کلان محصولات هواپایهٔ دفاعی، علاوه بر اینکه بهره‌برداری لازم از مدل‌ها و الگوهای موازنه در پیشینهٔ تحقیق انجام شد، تجربیات خبرگان و نیز ساختار سازمانی، محدودیت‌ها، شرایط محیطی و الزامات حاکم بر طراحی و توسعهٔ سامانه‌های هوایی پیچیده در ایران نیز، در نظر گرفته شده است. هدف از موازنهٔ ارائه‌شده برای محصولات کلان هواپایه، دستیابی به مدل یا الگویی بوده است که ضمن برآورده‌شدن نیازهای حال و آیندهٔ بهره‌بردار، زمان دستیابی به محصول را ازطریق تحویل تدریجی، کوتاه‌تر کند.

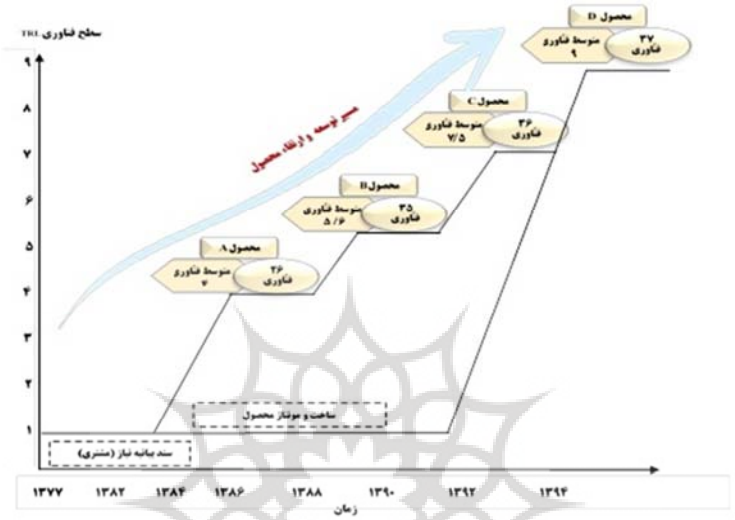
در این مدل ابتدا خواستهٔ بهره‌بردار دریافت و سپس ویژگی‌های فنی محصول از طرف گروه طراحان تعیین شد. نکتهٔ درخور توجه در این تعامل، بین خواسته‌ها و ویژگی‌های فنی آن بود که گروه طراح مطمئن شود تا چه اندازه ویژگی‌های محصول، خواسته‌های بهره‌بردار را پوشش داده است و از آن بااهمیت‌تر آنکه کدام ویژگی، تأثیر بیشتری برای خواسته‌ها و یا نیازها دارد. همچنین در صورت تشخیص صحیح و درست ویژگی‌ها، ویژگی‌های سطح دوم همراه با اولویت و اهمیت آنها کدام‌اند و درنهایت فناوری‌های مورد نیاز محصول و اولویت دستیابی به آنها چیست؟

در این تحقیق، از سه ماتریس تابع گسترش کیفیت استفاده شد. در ماتریس اول، ویژگی‌های فنی و در ماتریس دوم ویژگی‌های سطح دوم اولویت‌بندی شدند. در ماتریس سوم، لیست فناوری‌های مورد نیاز همراه با اولویت دستیابی به آنها تعیین شد.

۵ - مرحلهٔ سوم: توسعهٔ محصول مبتنی بر توسعهٔ فناوری (تحلیل)

شرکت هوایی بحث‌شده در این تحقیق، متعهد شده بود که محصول نهایی را پس از ۱۵ سال تحویل دهد. در شرایط عادی و نبود هرگونه عوامل خارجی، بهره‌بردار باید ۱۵ سال منتظر تحویل محصول نهایی باشد. با توجه به صحنهٔ بهره‌بردار، زمان طولانی تحویل محصول، مسئله‌ای بود که تحویل نهایی و یک‌باره محصول را تهدید می‌کرد. نکتهٔ مهم‌تر آن بود که با توجه به تغییر شرایط محیطی بهره‌بردار، ممکن بود محصول نهایی تحویل‌شده، بهره‌وری

لازم را نداشته باشد. بر این اساس یکی از راه‌های جایگزین برای بهره‌بردار، امکان خرید و یا روش‌های جایگزین ازجمله واردات بود که با توجه به موانع موجود، تقریباً غیرممکن به نظر می‌رسید. با این فرض، زمان طولانی تحویل محصول، تهدیدهای جدی را برای بهره‌بردار در صحنهٔ استفاده به‌همراه داشت. با استفاده از الگوی پیشنهادی (شکل۶) در این تحقیق و اجرای فرآیند تحویل تدریجی محصول، اولین موازنه در جلسهٔ بازنگری اولیهٔ محصول با بهره‌بردار انجام شد. در این جلسه که پس از دستیابی به ۲۵ فناوری از ۳۷ فناوری تشکیل شد، مشتری ضمن درخواست ادامهٔ طراحی و ساخت محصول، محصول اولیه را تأیید کرد و تحویل گرفت. ازجمله برتری‌های دیگر این مدل، مشخص‌شدن ویژگی‌های مهم و با بیشترین تأثیر برای بهره‌بردار است.



شکل۶- نمودار ساختار طراحی و تولید تدریجی محصولات کلان با تحویل تدریجی

Fig.6- Diagram of the design structure and gradual production of macro products with gradual delivery

مطابق الگوی پیشنهادی، سه خواستهٔ بهره‌بردار شامل فناوری‌های «صفر راه‌اندازی»، «حداکثر سرعت ۸۰۰ کیلومتر بر ساعت» و «کروز (کم) سرعت ۷۰۰ کیلومتر در ساعت» از اهمیت بیشتری برای این محصول برخوردار بود.

پس از اجرای اولین ماتریس از تابع گسترش کیفیت (شکل۳)، مهم‌ترین ویژگی‌های فنی سطح اول که بیشترین تأثیر را در برآورده‌شدن خواسته‌های بهره‌بردار در برداشت، دو ویژگی «مقدار ضریب پسا» و «نسبت نیروی برآ به نیروی پسای پرنده» بود که به ترتیب اولویت ۱۳ و ۱۲ داشتند. در ماتریس دوم از تابع گسترش کیفیت، سه ویژگی «عقب پرنده»، «دهانهٔ ورودی هوا» و «خنک‌کاری موتور»، مهم‌ترین ویژگی فنی سطح دوم بودند که ویژگی‌های کلان قبلی را برآورده می‌کردند و به ترتیب دارای اولویت‌های ۲۷، ۲۵ و ۲۵ شده بودند. درنهایت با استفاده از تابع گسترش کیفیت در ماتریس سوم، فناوری‌های اصلی و ضروری شناسایی و استخراج شد که برای طراحی و ساخت محصول نیاز بود. در این ماتریس، فناوری‌های «بوستر»، «لانچرزیرو» و «طراحی اتوماتیک»، ازجمله سه فناوری ضروری بودند که به ترتیب اولویت‌های ۳۷، ۳۶ و۳۵ را داشتند.

در ماتریس سوم گسترش کیفیت، پس از استخراج اولویت‌بندی فناوری‌ها، جلسهٔ نهایی گروه QFD با حضور طراحان خبره و نمایندهٔ بهره‌بردار تشکیل شد. در این جلسه ابتدا فرآیند به‌کارگیری QFD و نتایج به دست آمده

بحث و بررسی شد، سپس با استفاده از نمرهٔ به دست آمده برای فناوری‌ها (عدد اولویت) و سطح آمادگی فناوری برای هریک از فناوری‌های محصول، تحویل محصولات اولیه، میانی و نهایی تعیین شد. فناورهای مورد نیاز برای تولید محصولات تدریجی A، B،C و نهایی در جدول ۸ و شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج اولویت‌بندی محصول مبتنی بر توسعهٔ فناوری ازطریق کمیتهٔ عالی نیز تأیید شد.

جدول ۸- توسعهٔ سطح TRL با تولید محصولات میانی

Table 8- Development of TRL level with the production of intermediate products

عنوان فناوری‌ها	اولویت	TRL	محصول			
			A	B	C	نهایی
بوستر	۳۷	۲		۷	۸	۹
لانچر زیرو	۳۶	۱		۷	۸	۹
طراحی اتوپایلوت	۳۵	۲	۵	۷	۸	۹
طراحی دهانه	۳۴	۱	۴	۶	۷	۹
داده‌برداری تونل باد	۳۲	۲	۴	۸	۹	۹
تحلیل‌های عددی	۳۲	۳	۵	۸	۹	۹
غلاف و اتصالات بوستر	۳۱	۱		۸	۹	۹
طراحی مدل تونل باد	۳۰	۲	۵	۸	۹	۹
چتر	۲۹	۱		۸	۹	۹
سیستم پردازشگر	۲۸	۳		۸	۹	۹
سیستم سوخت‌رسانی	۲۶	۳	۵	۸	۹	۹
دیتالینک	۲۵	۲			۸	۹
مکانیزم حرکتی سطوح	۲۴	۳	۵	۸	۹	۹
ایستگاه زمینی	۲۱	۳	۴	۷	۸	۹
آب‌بندی	۲۱	۲	۵	۸	۹	۹
طراحی فیکسچر	۲۷	۳	۵	۸	۹	۹
سخت‌افزار در حلقهٔ HIL	۱۹	۲				۹
ماشین‌کاری قطعات	۲۳	۳	۴	۸	۹	۹
باتری‌ها	۱۸	۲	۴	۸	۹	۹

عنوان فناوری‌ها	اولویت	TRL	محصول			
			A	B	C	نهایی
باکس توزیع توان	۱۷	۲	۴	۸	۹	۹
سروووها	۱۵	۳	۴	۸	۹	۹
کنترل موتور	۱۵	۲	۴	۸	۹	۹
وایرینگ	۱۴	۳	۴	۸	۹	۹
ورق‌کاری	۲۰	۲	۴	۸	۹	۹
مقابله با خوردگی	۵	۲	۴	۸	۹	۹
سیستم بازکنندهٔ در	۱۲	۲	۴	۸	۹	۹
تسمه‌ها و اتصالات	۱۲	۳		۸	۹	۹
ناوبری	۱۱	۲	۳	۷	۸	۹
سیستم ریلیز	۱۰	۱		۸	۹	۹
کیسه‌های ایربگ	۷	۱		۸	۹	۹
سیستم شارژ	۷	۲		۸	۹	۹
لوله‌ها و اتصالات	۷	۲	۳	۸	۹	۹
طراحی قالب	۶	۳	۳	۸	۹	۹
ادوات استارت زمینی موتور	۴	۱	۳	۸	۹	۹
نصب موتور	۳	۲	۳	۸	۹	۹
خنک‌کاری موتور	۲	۳	۴	۸	۹	
عایق‌بندی موتور	۱	۲	۴	۸	۹	

۶ نتیجه‌گیری

همواره به توسعهٔ دانش‌های کاربردی توجه شده است که بتواند نحوهٔ دستیابی به محصولات جدید را در حوزه‌های مختلف تسهیل کند. یکی از این مدل‌ها و روش‌ها، نحوهٔ موازنهٔ تحویل تدریجی محصولات مأموریت‌محورند که در این تحقیق، نحوهٔ انجام موازنهٔ آن با استفاده از تابع گسترش کیفیت ارائه شد. موازنه در حداقل دو بازنگری فنی از ۱۷ بازنگری در مهندسی سیستم‌ها و در دو نقطهٔ خاص از مدل وی، با عناوین بازنگری طراحی اولیه و بازنگری طراحی بحرانی/ خاص انجام شد. در این نقاط با استفاده از ترتیبات برنامه‌ریزی‌شدهٔ قبلی و

تعاملات اولیه بین بهره‌بردار و گروه طراحان خبرهٔ شرکت، طراحی و تحویل تدریجی محصول انجام شد. گام‌های ذیل با استفاده از تابع گسترش کیفیت، به‌منظور موازنه انجام شد و یا باید انجام شود.

۱. نیاز مشتری (سند بیانیهٔ نیاز) بین ذی‌نفعان (بهره‌بردار و طراحان) تهیه شود. این سند شامل خواسته‌های کامل و جامع مشتری، همراه با درجهٔ اهمیت آنهاست (جدول ۱)؛

۲. ویژگی‌های محصول که نیازهای مشتری را پوشش می‌دهد و در یک یا دو سطح و فناوری‌های مورد نیاز، از سوی گروه طراحان پیشنهاد می‌شود (جداول ۲،۳،۴)؛

۳. اولین ماتریس گسترش کیفیت باید اجرا شود. خروجی این ماتریس، لیست ویژگی‌های محصول است که متناسب با اهمیت نیازهای بهره‌بردار اولویت‌بندی شده‌اند (شکل ۳)؛

۴. دومین ماتریس گسترش کیفیت نیز باید اجرا شود. خروجی این ماتریس، لیست ویژگی‌های سطح دوم محصول است که متناسب با ویژگی‌های سطح اول اولویت‌بندی شده‌اند (شکل ۴)؛

۵.سومین ماتریس گسترش کیفیت تهیه شود. خروجی این ماتریس لیست فناورهای مورد نیاز همراه با اولویت‌بندی میزان اهمیت آنهاست (شکل ۵).

۶.با توجه به اولویت‌بندی‌های انجام‌شده بین خواسته‌های بهره‌بردار، ویژگی‌های محصول و فناوری‌های مورد نیاز که در حداقل دو بازنگری فنی است، نمودار تحویل تدریجی محصول، مطابق شکل ۶ تهیه شود.

براساس این مدل، برای تحویل تدریجی محصولات کلان، قبل از شروع طراحی، باید بستهٔ کامل و جامعی شامل ۶ گام بیان‌شده، از سوی گروه طراحان تهیه شود. ازجمله مزایای این مدل عبارت‌اند از:

- ✓ در بیشتر مدل‌ها، در مقالات و منابع موجود، موازنه برای دو عامل بررسی شده و گاهی برای محصولات کلان نیز به کار نرفته است؛
- ✓ با توجه به نیاز بهره‌بردار به محصولات کلان مأموریت‌محور در صحنهٔ نبرد و دسترسی‌نداشتن به این محصولات (از خارج)، طراحی و تولید بومی آنها، به‌ویژه به‌صورت تحویل تدریجی، عامل اساسی برای استقلال و خودکفایی محسوب می‌شود؛
- ✓ با توجه به وجود تحریم‌ها و نداشتن تجربهٔ کافی در طراحی و تولید محصولات کلان و پیچیده، تاکنون الگوهای مناسبی برای موازنه انجام نشده است؛
- ✓ برخی از مؤلفه‌های به کار رفته در مدل موازنه، مانند آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول، در منابع علمی تکرار شده است که اهمیت این مؤلفه‌ها را نشان می‌دهد؛
- ✓ نقاط تصمیم و بازنگری‌ها، اهمیت بسزایی در فرآیند طراحی و توسعه دارند و مانع انحراف پروژه از مسیر مطلوب و تحقق نیاز مشتری می‌شوند. همچنین در این تحقیق، از همین نقاط برای موازنه استفاده شده است؛
- ✓ اگر تناقض یا تضادی بین ویژگی‌های محصول باشد، در هر بار استفاده از ماتریس گسترش کیفیت، این تناقض شناسایی می‌شود.

این مدل برای توسعهٔ محصولات کلان متعدد تجاری و یا غیرتجاری و حتی برای طراحی اولیهٔ محصولات کوچک و جدید به کار می‌رود.

پیشنهادهای پژوهش

در این پژوهش، موازنهٔ آمادگی فناورانه، سند بیانیهٔ نیاز و ویژگی‌های محصول در مدیریت طراحی سیستم‌های کلان محصولات هواپایهٔ دفاعی با QFD بیان شد. نیاز است تا بررسی شود ابزارهای دیگری نیز برای موازنه وجود دارد. همچنین این تحقیق فقط در محدودهٔ طراحی محصول انجام شد؛ پس نیاز است تا موازنه به کل چرخهٔ عمر محصول تسری داده شود.

محدودیت‌های پژوهش

در این پژوهش با ناآشنایی و اشراف و تحقیق و آموزش کامل و کافی نخبگان و مدیران رده‌های تحقیقاتی و صنایع دفاعی کشور با این مدل‌ها روبه‌رو بودیم. علاوه بر این، نبود رویکردهای مدیریتی طراحی سیستمی و استاندارد و یکپارچگی رویکردهای ابلاغی مراکز نظارتی و استانداردی ناظر کشور بر طراحی سیستمی محصولات کلان و پیچیده نیز، ازجمله محدودیت‌های دیگر این تحقیق بودند.

References

Ashtiany, M.S., & Alipour, A. (2016). Integration Axiomatic Design with Quality Function Deployment and Sustainable design for the satisfaction of an airplane tail stakeholders. *Procedia CIRP*, *53*, 142-150. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.102

Bates, C. A., & Clausen, C. (2020). Engineering readiness: How the TRL Figure of Merit coordinates technology development. *Engineering studies*,*12*(1), 9-38. https://doi.org/10.1080/19378629.2020.1728282

Çetin, A. Y., & Ucler, C. (2023). Customer-focused aircraft seat design: a case study with AHP-QFD. *Aviation*, *27*(4), 225–233-225–233. https://doi.org/10.3846/aviation.2023.2021

Dmitriev, A., & Mitroshkina, T. (2019). Improving the efficiency of aviation products design based on international standards and robust approaches. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 476(1), 012009. IOP Publishing. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/476/1/012009

Fartash, K., Mohseni Kiasari, M., & Sadabadi, A. (2023). The Role of Technology Management Capability in Defense New Product Development Process (The Empirical Findings). *Innovation Management Journal*, *5*(2), 135-162. https://civilica.com/doc/1895444/

Googerdchian, M., Asadi, M., Ghazizade Fard, Z., & Emamian, S. (2024). Technology readiness level, mission need statement and product specification balance pattern in macro system design management of native defense aviation products. *Journal of Quality Engineering and Management*, *13*(1), 73-94. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23221305.1401.13.1.5.8

Guo, X., Liu, Y., Zhao, W., Wang, J., & Chen, L. (2021). Supporting resilient conceptual design using functional decomposition and conflict resolution. *Advanced Engineering Informatics*, *48*, 101262. https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101262.

Jiao, R., Commuri, S., Panchal, J., Milisavljevic-Syed, J., Allen, J. K., Mistree, F., & Schaefer, D. (2021). Design engineering in the age of industry 4.0. *Journal of Mechanical Design*, *143*(7), 070801. https://doi.org/10.1115/1.4051041

Li, L., Wang, Z., Li, Y., & Liao, A. (2021). Impacts of consumer innovativeness on the intention to purchase sustainable products. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 774-786. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.002

Iqbal, Z., Grigg, N. P., & Govindaraju, K. (2017). Performing competitive analysis in QFD studies using state multipole moments and bootstrap sampling. *Quality Engineering*, *29*(2), 311-321.https://doi.org/10.1080/08982112.2016.1181181

Ma, J. (2021). Data-driven TRL Transition Predictions for Early Technology Development in Defence. *Defence* Science *Journal*, *71*(6), 730. https://doi.org/10.14429/dsj.71.16771

Mirbaqeri, S. M., Rafiyi Atani, A., & Dashti, R. (2020). Introducing a Model for Methodology, Evaluation and Selection of Technology in Projects of Military Research and Development (Case Study: One of the Military Research Centers). *Defense Strategy, 17*(68), 149-179. SID. https://sid.ir/paper/377814/en

Mirfakhredini, S. H., & Shabani, A. (2017). Customer involvement in new product development. *Journal of Business Administration Research, 8*(16), 121-140. SID. https://sid.ir/paper/197135/en

Mittal, V., & Gillespie, S. (2022). Using Model-Based Systems Engineering to Avoid Unnecessary Technology Resulting From Dynamic Requirements. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *71*, 2660-2671. https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3181268

Mones, H., & Kia, A. (2019). Systems Engineering. *Defense Industries Educational and Research Institute publication* . Suh, N. P. (1990). *The principles of design.* Oxford university press. Press. https://www.amazon.com/Principles-Design-Oxford-Advanced-Manufacturing/dp/0195043456.

NASA, N. (2017). Systems Engineering Handbook: NASA. *Sp-2016-6105 Rev2–Full Color Version, 12th Media Services.*https://dorl.net/dor/20.1001.1.23221305.1401.13.1.5.8

Shawalpour, S., & Tayyabi Javid, E. (2020). Typology of factors affecting the success of knowledge integration in production and development projects of complex products and systems (case study: Iran's aviation industry*). Journal of Technology Development Management*, *8*(1), 93-126https://sid.ir/paper/401892/en

Vik, J., Melås, A. M., Stræte, E. P., & Søraa, R. A. (2021). Balanced readiness level assessment (BRLa): A tool for exploring new and emerging technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, *169*, 120854. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120854

Wolff, C., Tendyra, P., & Wiecher, C. (2021). Agile Systems Engineering in Complex Scenarios. *2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, *1*, 323-328.https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9661020

Yousefi, O., Ghasemian, M., & Haj Heydari, N. (2018). Evaluation of technology readiness level and estimation of costs related to it in light class submarine. Evaluation of technology readiness level and estimation of costs related to it. *Technology Development Management Quarterly, 7(4),29-62*. https://sid.ir/paper/391125/fa

Yu, J. C., Walls, R. A., Asker, B. M., Lahey, L. T., Akiyama, D. J., Drake, M. L., & Christensen, D. P. (2021). Total Technology Readiness Level: Accelerating technology Readiness for Aircraft Design. *AIAA Aviation Association 2021 Forum AIAA* Journal, 2454. https://doi.org/10.2514/6.2021-2454

Zutin, G. C., Barbosa, G. F., de Barros, P. C., Tiburtino, E. B., Kawano, F. L. F., & Shiki, S. B. (2022). Readiness levels of Industry 4.0 technologies applied to aircraft manufacturing—a review, challenges and trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *120*(1-2), 927-943. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08769-1

[1] Fartash et al.
[2] Suh
[3] Balancing
[4] Mission Need Statement
[5] product specification
[6] macro system design management
[7] Nasa
[8] Quality Function Deployment
[9] Mones and Kia
[10] MirFakhredini & Shabani

[11] Li et al.
[12] Shawalpour & Tayyabi Javid
[13] Complex Product and Systems
[14] Guo et al.
[15] Jiao et al.
[16] Design Engineering 4.0
[17] Wolff et al.
[18] Systems Engineering
[19] Mirbaqeri
[20] Bates & Clausen
[21] Technology readiness level (TRL)
[22] Ma
[23] Zutin et al.
[24] Mittal& Gillespie
[25] Model based systems engineering
[26] NASA
[27] Functionality
[28] Dmitriev & Mitroshkina
[29] Yousefi et al.
[30] Yu et al.
[31] bug phobic coatings
[32] Active flow control
[33] Vik et al.
[34] Çetin & Ucler
[35] Googerdchian et al.
[36] Iqbal et al.
[37] Ashtiany & Alipour
[38] Projct Breakdown Structure
[39] Likert scals

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی