Volume 12, Number 4, Winter 2020

Journal of

Science & Technology Policy

Innovation Process in Complex Product Systems in Iran's Aviation Industry: The Interaction of Reverse Engineering and Forward Engineering

Maryam Rozesara[1], Soroush Ghazinoori[2*], Manochehr Manteghi[3], Seyed Habibollah Tabatabaeian[2]

1- PhD Candidate in Technology Management, Department of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.
2- Faculty Member, Department of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.
3- Faculty Member, University Complex of Management and Soft Technology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Due to the different pattern of evolution of complex product systems in comparison with conventional innovation models, this paper examines the evolution of innovation in complex product systems in Iran's aviation industry using the concept of life cycle model in systems engineering. In this paper, a model for identifying and analyzing innovation stages in CoPS is developed with a focus on revealing the interaction of reverse and forward engineering. For this purpose, first, by reviewing the literature and life cycle models in CoPS, a conceptual framework was developed. Then, by chronological multiple case study of three CoPS in the aviation industry, a life cycle-based innovation process model in CoPS was developed. This model includes following stages: reverse engineering and design recovery (including data evaluation and analysis, technical data package generation, design verification, technical data package completion and design implementation), concept, development, production, operation, support and retirement. Our findings show several salient features of innovation process in CoPS in Iran's aviation industry as follows. This model is a complex system of processes which are concurrent, iterative, recursive and interdependent. During the product innovation process, reverse and forward engineering interact with each other. Also, this model provides a systematic and pragmatic framework for better management of the innovation process in complex product systems that are designed and produced based on ideas and technical data obtained from reverse engineering in intraction with forward engineering (direct design).

Keywords: Innovation Process, Complex Product Systems (CoPS), Reverse Engineering, Forward Engineering, Aviation Industry.

* Corresponding author: ghazinoori@atu.ac.ir

سال دوازدهم، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۹

فصلنامه علمی-پژوهشی

سیاست علم و فناوری

فرایند نوآوری سامانه‌های محصول‌پیچیده در صنعت هوانوردی ایران: برهم کنش مهندسی معکوس و مهندسی رو به جلو

مریم روضه‌سرا[۱]، سیدسروش قاضی‌نوری [۲*]، منوچهر منطقی[۳]، سیدحبیب الله طباطبائیان [۲]

۱- دانشجوی دکتری مدیریت تکنولوژی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران.

۲- عضو هیئت علمی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران.

۳- عضو هیئت علمی، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

چکیده

با توجه به الگوی متفاوت تکامل و توسعه سامانه‌های محصول‌پیچیده (CoPS) در مقایسه با مدل‌های نوآوری مرسوم، این مقاله به بررسی فرایند تطور و تکامل نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده در صنعت هوانوردی ایران با استفاده از مفهوم مدل چرخه عمر در مهندسی سیستم‌ها می‌پردازد. در این مقاله، مدلی برای شناسایی و تحلیل مراحل نوآوری محصول در CoPS با تمرکز بر آشکار کردن برهم کنش بین مهندسی معکوس و مهندسی روبه‌جلو توسعه می‌یابد. برای این منظور، ابتدا با مرور پیشینه و بررسی مدل‌های چرخه عمر CoPS در مهندسی سیستم، چارچوبی مفهومی برای مطالعه فرایند نوآوری در CoPS ایجاد شد. سپس، از طریق مطالعه چندموردی مبتنی‌بر تحلیل‌های توالی زمانی سه محصول پیچیده در صنعت هوانوردی، یک مدل فرایندی مبتنی‌بر چرخه عمر در CoPS توسعه یافت که شامل مراحل مهندسی معکوس و بازیابی طراحی (دربرگیرنده مراحل ارزشیابی و تحلیل داده‌ها، تولید بسته داده فنی، تصدیق طراحی، تکمیل بسته داده فنی و پیاده‌سازی طراحی)، مفهوم، توسعه، تولید، بهره‌برداری، پشتیبانی و کنارگذاری است. یافته‌های ما چندین ویژگی بارز را درخصوص مدل نوآوری CoPS در صنعت هوانوردی ایران به شرح زیر نشان می‌دهد. این مدل، سیستمی پیچیده از فرایندهایی است که دارای ویژگی‌های همزمانی، تکرارشوندگی، بازگشتی بودن و بهم وابستگی هستند. طی فرایند نوآوری محصول، مهندسی معکوس و مهندسی روبه‌جلو برهم تأثیر متقابل می‌گذارند. همچنین، این مدل چارچوبی نظام‌مند و کاربردی به منظور مدیریت بهتر فرایند نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده‌ای فراهم می‌کند که براساس ایده‌ها و داده‌های فنی حاصل از مهندسی معکوس در تعامل با مهندسی روبه‌جلو و طراحی مستقیم شکل می‌گیرند.

کلیدواژه‌ها: فرایند نوآوری، سامانه‌های محصول‌پیچیده، مهندسی معکوس، مهندسی رو به جلو، صنعت هوانوردی.

برای استنادات بعدی به این مقاله، قالب زیر به نویسندگان محترم مقالات پیشنهاد می‌شود:

Rozesara, M., Ghazinoori, S., Manteghi, M., & Tabatabaeian, S.H. (2020). **Innovation Process in Complex Product Systems in Iran's Aviation Industry: The Interaction of Reverse Engineering and Forward Engineering,** *Journal of Science & Technology Policy*, 12(4), 71-95. {In Persian}.
DOI: 10.22034/jstp.2020.12.4.1321

۱- مقدمه

برای توصیف درست یک محصول پیچیده، می‌توان یک ساختار سلسله‌مراتبی از زیرسیستم‌ها و اجزا تعریف کرد که به‌طور نه‌چندان ساده با هم در تعامل بوده و هر یک از زیرسیستم‌ها نیز خود به‌طور سلسله‌مراتبی، متشکل از اجزایی هستند [۱]. سامانه‌های محصول‌پیچیده (CoPS) کالاهایی سرمایه‌ای، با هزینه بالا، دارای سطح مهندسی بالا و وابسته به فناوری هستند که به‌طور سفارشی و پروژه‌ای یا در

DOI: 10.22034/ jstp.2020.12.4.1321

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Ghazinoori@atu.ac.ir

انباشته‌های کوچک برای یک مشتری خاص ساخته می‌شوند [۲-۳]. در بیش‌تر CoPS، نوآوری کاربر-محور[1] است و ممکن است حتی سال‌ها پس از تحویل محصول به کاربر و در مراحل پیاده‌سازی، نگهداری، ارتقا، بازطراحی یا بازسازی اتفاق بیفتد و فرایند نوآوری این گونه محصولات بیش‌تر از یک روند مبتنی‌بر کشش مشتری[2] پیروی می‌کند [۳-٤].

به دلیل ویژگی‌های متمایز این گونه محصولات، الگوی تطور و فرایند نوآوری در آن‌ها با محصولات صنایع تولید انبوه متفاوت است، بنابراین مدل‌های نوآوری مرسوم قادر به شرح فرایند نوآوری در CoPS نیستند [۲-۳، ۵]. از این‌رو، مطالعه و بررسی الگوهای نوآوری و ویژگی‌های آن در CoPS به‌مثابه یک زمینه مطالعاتی مجزا مورد توجه پژوهش‌گران بسیاری قرار گرفته است (به‌عنوان مثال [۳-۵]). هر چند، هنوز شکاف‌های پژوهشی مختلفی در بدنه دانشی موجود وجود دارد [٦].

صفدری رنجبر و همکاران [٦] با مطالعه‌ای که روی مقالات منتشر شده طی دو دهه اخیر در زمینه CoPS انجام دادند، زمینه‌های مطالعاتی در ادبیات CoPS را به هفت دسته تقسیم کرده‌اند: ویژگی‌های CoPS، روش‌ها و ابزار مدیریتی، قابلیت‌های کلیدی، ساختار سازمانی، نقش‌ها و سیاست‌های دولتی، عملکرد اقتصادی CoPS، و فرارسی توسط دیرآمده‌ها. تاکنون مطالعات ناچیزی در خصوص فرایند نوآوری و چرخه عمر در CoPS صورت گرفته‌است. به‌عنوان مثال، مطالعه دیویس [۵] با تمرکز بر چرخه عمر سامانه ارتباطات تلفن همراه، به گونه‌های مختلف نوآوری معماری، اجزا و سیستمی با هدف تفکیک مراحل مختلف نوآوری در چرخه عمر CoPS پرداخته است. بوناکورسی و گیوری[3] [۷] نیز مراحل تطور و تکامل چرخه عمر صنعت موتور توربوپراپ[4] را بررسی کرده و نشان دادند که این صنعت، دارای یک الگوی تکامل بلندمدت با حضور مستمر یک رهبر مسلط بدون خروج از بازار است. آن‌ها نشان دادند که تحلیل‌شان از تکامل این صنعت با پیش‌بینی‌های مدل چرخه عمر صنعت انطباق ندارد.

بررسی پیشینه موضوع نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی در خصوص جزئیات مراحل توسعه و چگونگی فرایند نوآوری و چرخه عمر در CoPS با استفاده از رویکرد مهندسی سیستم[5] صورت نگرفته است. همان‌گونه که آراستی [۸] نیز بیان می‌کند، در حوزه مدیریت فناوری و نوآوری، پژوهشگران معدودی هستند که به ادبیات مهندسی سیستم نیز پرداخته باشند، در صورتی که دو حوزه مهندسی سیستم و مدیریت نوآوری و فناوری در CoPS از اشتراکات بسیاری برخوردار هستند. مهندسی سیستم، رویکردی بین‌رشته‌ای بوده و به مثابه ابزاری برای طراحی و توسعه موفق در CoPS به‌کار می‌رود [۹] که بر تعریف نیازهای مشتری و کارکرد مورد نیاز در مراحل اولیه چرخه عمر محصول، مستند کردن الزامات و سپس پیشبرد طراحی و صحه‌گذاری سیستم با در نظر گرفتن تمامی جوانب و متغیرهای فنی-اجتماعی در طول چرخه عمر یک سامانه متمرکز است [۱۰].

محصولات صنعت هوانوردی[6] به‌دلیل دارا بودن بسیاری از ویژگی‌های بیان‌شده، جزء CoPS قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، هابدی [٤] وسایل پرنده، موتورهای وسایل پرنده، بالگردها[7]، هواناوها[8] و مانند این‌ها را جزء CoPS دسته‌بندی می‌کند.

صنعت هوانوردی ایران با توجه به قدمت چندین ساله در طراحی و ساخت سامانه‌های محصول‌پیچیده و تجربه‌های موفق ساخت چندین گونه از وسایل پرنده و زیرسیستم‌های آن، می‌تواند مطالعه موردی مناسبی در این زمینه باشد.

با توجه به موارد ذکرشده، تاکنون مطالعه‌ای با هدف شناخت مراحل فرایند نوآوری/چرخه عمر محصول و چگونگی برهم کنش‌های مراحل آن در جهت نوآوری در CoPS با استفاده از رویکرد مهندسی سیستم در کشور صورت نگرفته است. مشخص نیست فرایند نوآوری CoPS در صنعت هوانوردی کشور دقیقا دارای چه مراحلی است، چه تفاوتی با مراحل مدل‌های نوآوری مرسوم دارد، این مراحل چگونه و با چه توالی بروز می‌یابند و چه برهم کنش‌هایی بین هر یک از مراحل این فرایند رخ می‌دهد. پاسخ به این پرسش‌ها، افزون بر این‌که به تدوین راهبردهای بنگاهی و مدیریت فناوری و نوآوری کمک می‌کند، می‌تواند دستاوردهای نظری جدیدی

[1] User-driven innovation
[2] Customer-pull
[3] Bonaccorsi and Giuri
[4] Trboprop engine industry
[5] System engineering
[6] Aviation
[7] Helicopters
[8] Hovercraft

نیز برای شناخت و تحلیل فرایندهای نوآوری مبتنی‌بر چرخه عمر در صنایع دارای سامانه‌های محصول‌پیچیده به همراه داشته باشد. این مقاله حاصل یک مطالعه اکتشافی در زمینه چگونگی فرایند نوآوری مبتنی‌بر چرخه عمر و مراحل آن در CoPS است و می‌کوشد افزون بر شناسایی مراحل فرایند نوآوری در CoPS، چگونگی برهم کنش‌های بین مراحل آن را نیز با استفاده از مفهوم مدل چرخه عمر در مهندسی سیستم‌ها به‌ویژه در صنعت هوانوردی کشور، تبیین کرده و شرح دهد.

ساختار مقاله در پنج بخش به شرح زیر ارائه می‌شود. در بخش دوم مقاله، مبانی نظری و پیشینه موضوع بررسی می‌شود. بخش سوم به روش‌شناسی و پرسش‌های تحقیق اختصاص دارد. در بخش چهارم مطالعات موردی، داده‌های تجربی و یافته‌های پژوهش ارائه می‌شود. بخش پنجم نیز به بحث و نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱ فرایند نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده

تعاریف متفاوت بسیاری از فرایند نوآوری وجود دارد. اوشر[1] فرایند نوآوری را به‌صورت درکی از یک نیاز برآورده نشده، توجه به بینش در تعریف همه مراحل، بازنگری انتقادی و توسعه توصیف می‌کند ([۱۱]). نایت[2] [۱۲] و بسنت و تید[3] [۱۳] فرایند نوآوری را به‌صورت شناسایی نیاز به نوآوری، تولید نوآوری، پذیرش نوآوری و کاربرد آن تعریف می‌کنند. در تمامی مدل‌ها، مراحل و فعالیت‌های مشخصی برای فرایند نوآوری در نظر گرفته شده است. همزمان با توسعه مفهوم نوآوری و رشد منابع مدیریت نوآوری طی سال‌های اخیر، مدل‌های فرایندی مختلفی در زمینه نوآوری توسعه یافته است [۱٤-۱٦]. با این حال، هنوز درباره یک ساختار پایه از فرایند نوآوری اتفاق نظر وجود ندارد [۱۷].

در مقایسه‌ای که هابدی [٤] از سامانه‌های محصول‌پیچیده با دیدگاه مرسوم از نوآوری در صنایع تولید انبوه انجام داده است، تفاوت‌های این دو صنعت را از جنبه‌های مختلف بررسی و به چند ویژگی بارز فرایندهای نوآوری در CoPS اشاره می‌کند. از ویژگی‌های بارز و متمایز در CoPS، چرخه‌های عمر طولانی بوده که ممکن است نوآوری در آن ها در طول چرخه عمر محصول و حتی پس از تحویل به کاربر بروز یابد. همچنین، به دلیل درگیری مستقیم کاربر در فرایند نوآوری، سفارشی‌سازی و بروز مستمر نوآوری در محصول، بسیار رخ می‌دهد [۱۸]. در ادبیات مهندسی سیستم، هر سیستمی با هر نوع و اندازه، دچار تحولی ذاتی از مفهوم‌سازی اولیه تا کنارگذاری شده، و به تدریج تطور می‌یابد. بنابراین، ایجاد و استفاده از مدلی که بتواند این پیشرفت و هر مرحله از این تطور را نمایش دهد، به مدیریت نوآوری و تکامل سیستم کمک می‌کند. مدل‌هایی که با این هدف ساخته می‌شوند، مدل‌های چرخه عمر نام دارند [۱۹]. براساس نظریه‌های فرایندی تغییر و نوآوری نیز [۲۰]، یکی از گونه‌های آرمانی[4] که می‌توان از طریق آن فرایند نوآوری را در بافتار مورد نظر شرح داد، نظریه چرخه عمر است. ویژگی‌های مدل چرخه عمر به شرح زیر است: ۱- مراحل یا گام‌های تغییر، توالی واحدی دارند و بایستی با یک ترتیب تجویزی اتفاق بیفتند، ۲- مراحل تجمعی هستند یعنی ویژگی‌های به‌دست آمده در مراحل اول در مراحل پایانی نیز حفظ می‌شوند، ۳- هر مرحله عطف به مرحله قبل است[5] یعنی مراحل به گونه‌ای به هم مربوط هستند که همه از یک فرایند اساسی مشترک مشتق می شوند.

اما، عموماً مدل‌های مرسوم چرخه عمر نوآوری/ محصول (مانند مدل‌های آتربک و آبرناتی[6]، [۲۱-۲۲]) از تبیین مشخصه‌های چرخه عمر در CoPS ناتوان هستند. زیرا براساس مدل‌های مرسوم، چرخه عمر محصولات و فناوری‌ها از یک وضعیت نابالغ سیال به سمت بلوغ در حال تطور بوده و پس از ظهور طرح غالب یا استاندارد، نوآوری در محصول کاهش یافته و نوآوری در فرایند عامل رقابتی بین بنگاه‌ها می‌باشد. اما CoPS با باقی ماندن در مرحله سیال از چرخه عمر خود، نرخ بالایی از نوآوری در محصول را از خود بروز داده و به‌ندرت به عنوان کالاهایی استاندارد در حجم بالا تولید می شوند [٤]، [٥]. همچنین، با توجه به طولانی بودن چرخه عمر و روند مستمر تولید نوآوری و سفارشی‌سازی در

[1] Usher
[2] Knight
[3] Bessant and Tidd
[4] Ideal-type
[5] Conjunctive
[6] Abernathy and Utterback

طول چرخه عمر آن [۱۸]،، بایستی مدل‌های چرخه عمر دیگری را جست که با اقتضائات CoPS سازگاری بیش‌تری داشته باشند و بتوانند تطور نوآوری در CoPS را در طول چرخه عمر آن از شروع تولید ایده و مفهوم تا مرحله کنارگذاری پیگیری کنند.

در مهندسی سیستم، چرخه عمر یک سامانه با هدف ایجاد چارچوبی برای برآورده کردن نیازهای ذی‌نفعان با یک روش نظام‌مند و کارآمد در سرتاسر چرخه عمر تعریف می شود. این چارچوب به طور معمول با استفاده از مراحل چرخه عمر و دروازه‌های تصمیم[1] برای نمایش آمادگی پیش‌روی از یک مرحله به مرحله بعدی تعیین می‌شود. با بهره‌گیری از این منطق، می‌توان فرایند نوآوری در CoPS براساس مدل چرخه عمر را اینگونه تعریف نمود: فرایند نوآوری یک سامانه محصول پیچیده شامل فعالیت‌هایی است که در طول یک برنامه توسعه محصول انجام می‌شوند و می‌توان آن‌ها را به مراحل مختلفی تقسیم کرد [۱۰]. با این تعریف، مدل‌های چرخه عمر مختلفی برای CoPS در ادبیات مهندسی سیستم‌ها وجود دارد که مقایسه برخی از مهم‌ترین آن ها در شکل ۱ ارائه شده است.

۲-۲ نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده صنعت هوانوردی

پژوهش‌گران بسیاری پیرامون ویژگی‌های نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده سخن گفته‌اند (مانند [٤]، [٥]، [١٨]). براساس بررسی صفدری رنجبر و همکاران [٦] بیش‌تر مطالعات صورت گرفته در این زمینه با رویکرد مطالعات موردی صنایع مختلف CoPS انجام شده است. از اولین مقالات منتشر شده درخصوص ویژگی‌های نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده در صنعت هوانوردی، مطالعه موردی یک شبیه‌ساز پروازی توسط میلر و همکاران [۱۸] است. آن‌ها با یک مطالعه موردی عمیق و مفصل درخصوص الگوهای تاریخی نوآوری و تحول صنعتی در محصول نشان دادند که فرایند نوآوری در شبیه‌ساز پروازی با اقتضائات کلی سایر سامانه‌های پیچیده سازگار بوده و برخلاف محصولات تولید انبوه از الگوهای چرخه عمر معمول پیروی نمی‌کند.

مطالعه دیگری که توسط پرنسیپ[2] [۲۷] انجام شده، به شایستگی‌های فناورانه و پویایی‌های تکامل محصول در صنعت موتور هوایی می‌پردازد و استدلال می‌کند که ویژگی‌های متمایز این محصولات مستلزم دیدگاه جدیدی به هسته، روابط و فناوری‌های پیرامونی است، و دیدگاه‌هایی مانند شایستگی‌های محوری را در خصوص برون‌سپاری تولید و یا توسعه فناوری‌های اجزا یا زیرسیستم‌ها رد می‌کند. مطالعه دیگر او [۲۸] که درباره وسعت و عمق قابلیت‌های فناورانه در سامانه کنترل موتور هوایی صورت گرفته، تکامل قابلیت‌های فناورانه سازندگان محصول را بررسی می‌کند. مطالعه او نشان می‌دهد که سازندگان موتور گستره و عمقی از قابلیت‌ها را به‌طور داخلی توسعه داده و برقرار می‌کنند تا بتوانند قابلیت‌های خود را در زمینه یکپارچه‌سازی سیستم در طول زمان حفظ کنند. برخی از مطالعات صورت گرفته و یافته‌های آن‌ها در صنعت هوانوردی، به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۳ نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده در ایران

مطالعات موردی مختلفی با محوریت سامانه‌های محصول‌پیچیده در بافتار ایران در زمینه‌های فرارسی فناورانه، انباشت قابلیت‌های فناورانه و یادگیری صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، طهماسبی و همکاران [۳۲] با بررسی مراحل شکل‌گیری و توسعه قابلیت‌های فناورانه یک سازمان صنعتی دریایی سه گام ۱) سرمایه‌گذاری و ایجاد زیرساخت‌های پایه، ۲) ارتقای قابلیت‌ها از طریق مهندسی معکوس با همکاری محدود و ۳) مهندسی معکوس محصولات پیچیده‌تر و گسترش طراحی و نوآوری را شناسایی کردند. کیامهر و همکاران [۳۳] با مطالعه یک شرکت در صنعت برقابی ایران، نشان دادند که مراحل طراحی و نصب محصول پیروی کرده و با شروع از مرحله میانی (یعنی مهندسی و تحقق محصول) به مرحله پایانی (یعنی عملیات و عیب‌یابی) می‌رسد و دوباره به مرحله اول (یعنی مفهوم‌سازی و طراحی محصول) برمی‌گردد. مجیدپور [٣٤] به بررسی ویژگی‌های متمایز فرارسی فناورانه در شرکت مپنا پرداخته و نشان می‌دهد که مدل فرارسی فناورانه در مپنا مبتنی‌بر دنباله‌روی مسیر است.

[1] Decision gates

[2] Prencipe

برنامه ناسا/چرخه عمر پروژه [۲۳]

پیاده‌سازی برنامه			فرمولاسیون برنامه		پیش فرمولاسیون برنامه
مرحله F: اتمام	مرحله E: عملیات و پایداری	مرحله D: مونتاژ سیستم، یکپارچه‌سازی و آزمون، راه‌اندازی	مرحله C: طراحی نهایی و ساخت	مرحله B: طراحی اولیه و تکامل فناوری	مرحله A: توسعه مفهوم و فناوری	پیش‌مرحله A: مطالعات مفهوم

مراحل عمومی چرخه عمر [۲۴]

کنارگذاری	پشتیبانی	بهره‌برداری	تولید	توسعه	مفهوم
• نگهداری، بایگانی، یا وارهایی سیستم	• فراهم کردن قابلیت سیستم پایدار	• به‌کارگیری سیستم به منظور برآوردن نیازهای کاربران	• تولید سیستم‌ها • بازرسی و صحه‌گذاری	• تعریف/پالودن الزامات سیستم • ایجاد توصیفی از راه‌کارها- معماری و طراحی • پیاده‌سازی سیستم اولیه • یکپارچه‌سازی، صحه‌گذاری و تصدیق سیستم	• تعریف فضای مسأله ○ پژوهش اکتشافی ○ گزینش مفهوم • تعیین ویژگی‌های فضای راه‌کارها • شناسایی نیازهای ذی‌نفعان • جستجوی ایده‌ها و فناوری‌ها • پالودن نیازهای ذی‌نفعان • جستجوی مفاهیم ممکن • پیشنهاد راه‌کارهای مناسب

نمونه‌ای از یک یکپارچه‌ساز سیستم‌های تجاری با فناوری‌های پیشرفته [۲۵]

دوره عملیات			دوره پیاده‌سازی			دوره مطالعه			
مرحله غیرفعالسازی و وارهایی	مرحله عملیات/نگهداری یا فروش/پشتیبانی	مرحله استقرار یا تولید	مرحله صحه‌گذاری	مرحله توسعه	مرحله گزینش منبع	مرحله طرح‌ریزی اکتساب	مرحله تعیین مشخصات سیستم	مرحله تعریف مفهوم	مرحله تعریف الزامات کاربر

نمونه‌ای از یک سازنده تجاری با فناوری‌های پیشرفته [۲۵]

دوره عملیات			دوره پیاده‌سازی			دوره مطالعه		
مرحله غیرفعالسازی	مرحله ساخت، فروش و پشتیبانی	مرحله تولید با مقیاس بالا	مرحله آزمون بیرونی	مرحله آزمون درونی	مرحله مدل مهندسی	مرحله توسعه محصول	مرحله تعریف محصول	مرحله الزامات محصول

فرایند چرخه عمر اکتساب، فناوری، و لجستیک دفاعی [۲۶]

• مرحله عملیات و پشتیبانی • پایداری • وارهایی	• مرحله استقرار و تولید • آزمون عملیاتی و ارزشیابی (OT&E)	مرحله توسعه مهندسی و ساخت	مرحله بلوغ فناوری و کاهش ریسک	مرحله تحلیل راه‌کارهای تجهیزاتی

شکل ۱) مقایسه مدل‌های چرخه عمر (نوآوری) CoPS در مهندسی سیستم

جدول ۱) برخی مطالعات کلیدی درباره ویژگی‌های نوآوری در CoPS در صنعت هوانوردی

مطالعه موردی	تمرکز اصلی	یافته‌ها	مرجع
شبیه‌ساز پروازی	نوآوری در صنایع CoPS	• تفاوت ویژگی‌های نوآوری در محصول با مدل‌های نوآوری مرسوم، • هماهنگی نوآوری در محصول از طریق یک ساختار نهادی متشکل از ذی‌نفعان، • مذاکره درخصوص طرح‌های جدید قبل از توسعه محصول، • پایداری بلندمدت سازندگان در بازار، • کاربرد نداشتن مفاهیم طرح غالب، رقابت بر سر حجم تولید و نوآوری در فرایند، • تمرکز راهبردهای رقابتی بر طراحی، مهندسی و توسعه نمونه اولیه، • در حال تکامل بودن فرایند نوآوری محصول به منظور برآورده شدن الزامات ذی‌نفعان • اهمیت ایمنی و نیاز به استانداردهای ملی و بین‌المللی	[۱۸]
موتور هوایی	شایستگی‌های فناورانه	• استفاده از یک منطق جدید برای ادغام عمودی، برون‌سپاری و راهبردهای تحقیق و توسعه • کاربرد نداشتن دیدگاه شایستگی محوری درخصوص برون‌سپاری تولید و یا توسعه فناوری‌های اجزا • توسعه و حفظ قابلیت طراحی کلی و یکپارچه‌سازی سیستم در بنگاه	[۲۷]
سامانه کنترل موتور هوایی	قابلیت فناورانه یکپارچه‌ساز	• توسعه داخلی و حفظ گستره و عمقی از قابلیت‌ها توسط بنگاه به منظور توسعه قابلیت پویا • توسعه گستره قابلیت‌ها از طریق سرمایه‌گذاری‌های داخلی و ارتباط با دانشگاه‌ها و تأمین‌کنندگان تخصصی • توسعه عمق قابلیت‌ها در زمینه معماری محصول و توسعه فناوری‌های اجزا • نبود هم‌پوشانی کامل بین مرزهای فناورانه و مرزهای تولید بنگاه	[۲۸]
سامانه‌های کنترل موتور هوایی	تخصصی‌سازی دانش، شبکه‌سازی و قابلیت فناورانه یکپارچه‌ساز	• افزایش دانش تخصصی بنگاه‌ها به منظور حفظ قابلیت یکپارچه‌سازی سیستم • استفاده از شبکه‌ها و برون‌سپاری طراحی تفصیلی و ساخت به تأمین‌کنندگان تخصصی • حفظ قابلیت‌های طراحی مفهومی و یکپارچه‌سازی سیستم • شبکه‌سازی به منظور بهره‌برداری همزمان از یکپارچه‌سازی و تخصصی‌سازی	[۲۹]
صنعت هوایی نظامی	یادگیری فناورانه و توسعه قابلیت سازمانی	• هم راستایی سیاست "خرید" با قابلیت‌های تولید و تمرکز سیاست "ساخت" بر پژوهش‌های بنیادین و دانش فناورانه • تغییر توالی یادگیری از دانش فناورانه به دانش تولید و برعکس با توجه به سیاست صنعتی کشورها • نقش فعال شرکای خارجی و همکاری‌های مشترک در تولید و توسعه • نقش غیرفعال شرکای خارجی و استفاده از مهندسی معکوس	[۳۰]
هواپیمای IR-150	قابلیت فناورانه یکپارچه‌ساز	• شناسایی دو چالش ساختار و سازوکارهای یکپارچه‌سازی در شبکه نوآوری، و قابلیت‌های مورد نیاز برای یکپارچه‌سازی • منحصر به فرد بودن چالش‌های یکپارچه‌سازی پروژه • درهم تنیدگی مسائل و چالش‌های یکپارچه‌سازی • وابستگی ساختار یکپارچه‌سازی پروژه به چرخه عمر محصول	[۳۱]

فرارسی پرش از مرحله فقط در فناوری‌های محدودی ممکن بوده و خلق مسیر نیز تقریبا در صنعت CoPS ناممکن است. صفدری رنجبر و همکاران [۳۵] نیز با مطالعه نظام نوآوری بخشی یک صنعت تولیدکننده توربین‌های گازی به توصیف مسیر شکل‌گیری و انباشت قابلیت فناوری، شناسایی سیاست‌ها و نهادهای تأثیرگذار، تشریح شرایط بازار و تقاضا در این صنعت پرداختند. در مطالعه دیگری نقی‌زاده و همکاران [۳۱] به بررسی تجربه یکپارچه‌سازی هواپیمای IR-150 پرداخته و دو چالش مهم ساختار و سازوکارهای یکپارچه‌سازی در شبکه نوآوری، و توانمندی‌های مورد نیاز برای یکپارچه‌سازی را در پروژه بررسی و بر اهمیت مدیریت یکپارچه‌سازی در پروژه‌های CoPS تأکید کردند. مرور پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای با هدف شناخت مراحل فرایند نوآوری مبتنی بر چرخه عمر و چگونگی برهم کنش‌های مراحل آن در CoPS در کشور صورت نگرفته است. البته در مدل‌های چرخه عمر موجود اشتراکاتی وجود دارد، اما در هر برنامه CoPS، مراحل و سایر ویژگی‌های مربوط به برنامه، متفاوت بوده و به محصول، ویژگی‌های آن و بافتار توسعه‌دهنده بستگی دارد [۲۴].

٤-۲ چارچوب مفهومی اولیه پژوهش

با توجه به شکل ۱، از بین مدل‌های چرخه عمر ارائه شده، مدل چرخه عمر استاندارد ISO/IEC/IEEE15288[1] که مدل مرجع هندبوک مهندسی سیستم شورای بین‌المللی مهندسی سیستم[2] نیز می‌باشد، برای تحلیل‌های بعدی این مقاله انتخاب می‌شود. این مدل یک مدل عمومی بوده و بیش‌ترین تناسب را با صنایع تجاری دارد. همچنین، این مدل با طیف وسیعی از سامانه‌های ساخته بشر شامل سامانه‌های تک نوع[3]، سامانه‌های تولید انبوه[4] و سامانه‌های سفارشی تطبیق‌پذیر[5] سازگاری دارد [٢٤]. از این رو، چارچوب مفهومی اولیه‌ای (شکل ۲) برای پژوهش ترسیم شد که براساس منطق مهندسی رو به جلو توسعه یافته و راهنمای مناسبی برای بررسی و تحلیل فرایند نوآوری مطالعات موردی پژوهش، از طریق گردآوری شواهد درباره جزئیات مراحل فرایند نوآوری، ترتیب و توالی و همزمانی مراحل، نحوه برهم کنش‌های رخ داده بین مراحل، بازخوردهای هر مرحله به مراحل قبلی در طول چرخه عمر محصول فراهم می‌کند.

۳- روش‌شناسی

سوال اصلی پژوهش عبارت است از این که مدل فرایند نوآوری سامانه‌های محصول‌پیچیده در صنعت هوانوردی کشور چگونه است؟

بر این اساس پرسش‌های فرعی به این صورت قابل طرح هستند: این مدل از چه مراحلی تشکیل شده است؟ این مراحل از نظر زمان‌بندی چه ترتیب و توالی دارند و چگونه با هم در ارتباط و تعامل هستند؟

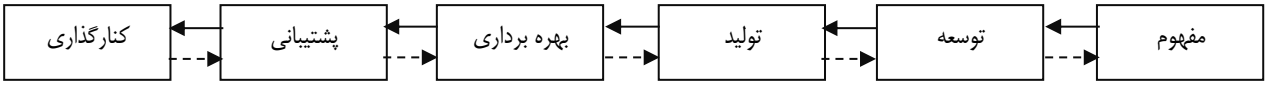
با توجه به پرسش‌های مطرح‌شده، این پژوهش با رویکرد اکتشافی به دنبال درک ابعاد و مسیر بروز نوآوری در سامانه‌های محصول‌پیچیده می‌باشد. بنابراین، واحد تحلیل این پژوهش، فرایند نوآوری در یک سامانه محصول پیچیده است. یعنی سعی داریم که مفاهیم و مدل‌های موجود را به شواهد گردآوری شده مرتبط کرده تا به‌صورت استقرایی مفاهیم و روندهای جدیدی را شناسایی و آن ها را دوباره به زمینه‌های نظری مرتبط سازیم. با توجه به هدف این پژوهش جهت ارائه مدل فرایند نوآوری در CoPS و برای پاسخ به پرسش‌های این پژوهش، طرح پژوهش کیفی با استفاده از مطالعه چندموردی انتخاب شد زیرا تکرار فرایند پژوهش در مورد محصولات مورد مطالعه می‌تواند به گردآوری شواهد قانع‌کننده برای ترسیم این فرایند کمک کرده و موجب قوت[6] بیش‌تر نتایج پژوهش شود [٣٦]. درنتیجه، این پژوهش از نوع مطالعه چندموردی با یک واحد تحلیل است و در دسته‌بندی ین [٣٦] از مطالعه موردی نوع سوم (مطالعه‌ی چندموردی و کلی دارای یک واحد تحلیل) است. معیارهایی به شرح زیر در انتخاب مطالعات موردی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت: ۱- همه محصولات از بین سامانه‌های محصول‌پیچیده (CoPS) صنعت هوانوردی باشند، ۲- برحسب تعریف، محصولات از درجه‌های پیچیدگی متفاوتی برخوردار باشند. براین اساس سه سامانه محصول پیچیده به ترتیب پیچیدگی شامل موتور هواپیما، بالگرد و هواپیمای دوزیست انتخاب شدند. نقطه شروع تحلیل‌ها از زمان شروع هر پروژه CoPS و نقطه پایانی تحلیل‌ها براساس پیشرفت پروژه در طول چرخه عمر محصول تعیین شده است.

۳-۱ گردآوری داده‌ها

داده‌های این مقاله از چهار منبع مختلف گردآوری شد: ۱- مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با مدیران پروژه، کاربران، تأمین‌کنندگان و نهادهای حاکمیتی درگیر در پروژه و بررسی روایت‌های مختلف آن‌ها، ۲- بررسی داده‌های بایگانی، مستندات و گزارش‌ها، ۳- مشاهدات مستقیم پژوهشگران از روند شکل‌گیری و توسعه پروژه‌ها. پیش از اجرای مطالعات موردی، دستورالعمل پژوهش و فهرستی از مصاحبه‌شوندگان براساس چهار دسته‌بندی کنش‌گران اصلی درگیر در فرایند نوآوری تهیه شد. چهار پروتکل مجزا برای مصاحبه با هر دسته از مصاحبه‌شوندگان با توجه به نقش اصلی آن ها در فرایند طراحی شد.

[1] ISO/IEC/IEEE 15288
"مهندسی سیستم و نرم‌افزار-فرایندهای چرخه عمر سیستم" یک استاندارد بین‌المللی است که چارچوبی مشترک را برای توصیف چرخه عمر سامانه‌های توسعه‌یافته توسط انسان، ایجاد و مجموعه‌ای از فرایندها و واژگان مرتبط را تعریف و تعیین می‌کند.

[2] International Council on Systems Engineering (INCOSE)
[3] One-of-a-kind systems
[4] Mass-produced systems
[5] Customized, adaptable systems
[6] Robustness



شکل ۲) چارچوب مفهومی اولیه پژوهش مبتنی‌بر مدل چرخه عمر [۲۴]

انتخاب هر مصاحبه‌شونده براساس نقش او در پروژه، تجربه و خبرگی صورت گرفت. هر پروتکل مصاحبه شامل چهار بخش بود: اول، توصیف مختصری از زمینه‌های کاری مصاحبه‌شونده، در ادامه شرحی از روایت چگونگی و چرایی شروع پروژه، در بخش سوم، توصیف چگونگی فرایند، مراحل و گام‌های اجرای هر پروژه، و در نهایت چگونگی ارتباط هر مرحله به مراحل قبلی یا بعدی خود و بازخوردهای مراحل به یکدیگر در هر پروژه. دانش و خبرگی مصاحبه‌کننده از صنایع تولیدکننده و تجربه او در پروژه‌های قبلی به طراحی پرسش‌های مناسب، بهبود روند مصاحبه‌ها و درکی درست از پاسخ‌ها کمک بسیاری کرد. هر مصاحبه به‌طور متوسط ۹۰ دقیقه الی ۱۲۰ دقیقه به طول انجامید. مصاحبه‌های جانبی با سایر خبرگان صنعتی نیز این امکان را داد که داده‌ها و اطلاعات به دست آمده از کنش‌گران اصلی هر پروژه اعتبارسنجی شود. تمامی مصاحبه‌های انجام شده ضبط و پیاده‌سازی شد و با ادبیات موجود تطبیق داده شد، بنابراین روند گردآوری داده‌ها با یک روش تکرارشونده انجام شد. همچنین اعتبارسنجی داده‌ها از طریق تکنیک سه‌سویه‌سازی و مقایسه داده‌های بدست آمده از مصاحبه و بررسی روایت‌ها، بررسی داده‌های بایگانی انجام شد. روایی بیرونی نیز به کمک مطالعه چند موردی و مقایسه نتایج آن، صورت گرفته و بررسی‌ها به صورت رفت و برگشتی در هر مطالعه موردی انجام شد.

۳-۲ روش تحلیل داده‌ها

به منظور تحلیل داده‌ها در این پژوهش، از راهبرد استخراج نظریه مبتنی‌بر داده‌ها[1] استفاده شد. داده‌های گردآوری شده اساسا در دو مرحله تحلیل شدند: تحلیل درون‌موردی و مقایسه‌های بین‌موردی. اساسا تحلیل‌های درون‌موردی به پدیدار شدن الگویی واحد برای داده‌ها و درنتیجه ایجاد بینش به پژوهش‌گر کمک می‌کنند. سپس، پژوهش‌گر می‌تواند با استفاده از دیدگاهی ساختاریافته به داده‌ها، با مقایسه‌های بین‌موردی الگوهای داده‌ای را بین مطالعات موردی مختلف جستجو نماید و به یافته‌های تازه‌ای در تناسب با داده‌های تحقیق دست یابد [۳۷]. رهیافت مورد استفاده در این پژوهش برای تحلیل بین موردی براساس ریجن[2] [۳۸] موردمحور[3] است، زیرا اشتراکات موجود در موردهای مطالعاتی متعدد می‌تواند به تعمیم‌پذیری نتایج کمک کند و پژوهشگر می‌تواند نشان دهد که نتایج در موردهای منتخب به اندازه کافی یکسان هستند. از این رو، پرسش محوری در این رهیافت این است که موردهای مطالعاتی از چه لحاظ به یکدیگر شباهت دارند. [۳۹].

روش تحلیل داده‌ها مبتنی‌بر تحلیل‌های ترتیب و توالی زمانی[4] است [۳۶]. به منظور تحلیل‌های تاریخی در تحلیل‌های درون‌موردی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با استفاده از تکنیک نگاشت دیداری[5] که توسط فورد[6] و همکاران [۴۰] توسعه یافته است، تکمیل شد. فرایند نگاشت به کشف دیدگاه‌های پنهان مصاحبه‌شوندگان، به‌ویژه در زمینه روابط و همزمانی بین مراحل در هر پروژه کمک بسیاری کرد.

پس از آن، از تحلیل‌های روایی برای تحلیل داده‌های گردآوری‌شده، شامل متون پیاده‌سازی‌شده حاصل از مصاحبه‌ها و مستندات و گزارش‌ها استفاده شد. با استفاده از تکنیک داستان‌سرایی[7] روایت‌ها ایجاد و ترتیب زمانی فعالیت‌ها براساس ترتیب رویدادهای رخ داده، توصیف شدند. سپس به‌صورت مدل فرایند نوآوری هر یک از مطالعات موردی در شکل‌های ۳، ٤ و ۵ نمایش داده شدند. پس از آن، براساس تحلیل‌ها و مقایسه‌های بین‌موردی مدل نهایی فرایند نوآوری سامانه‌های محصول‌پیچیده در صنعت هوانوردی به صورت شکل ٦ ارائه شد. به منظور نمایش تحلیل‌های بین‌موردی نیز از تکنیک‌هایی مانند جداول ماتریسی و نمودار برای ارائه داده‌های کیفی استفاده می‌شود. استفاده از ماتریس‌ها به خلاصه‌کردن شواهد و نتایج مربوط به هر مطالعه

[1] Working your data from the “ground up”

[2] Ragin
[3] Case-oriented research
[4] Chronological sequences analysis
[5] Visual mapping
[6] Ford
[7] Storytelling

موردی (تحلیل‌های درون‌موردی) کمک کرده و شباهت‌ها و تفاوت‌های بین آن‌ها را به تصویر می‌کشد [۳۹]. درنهایت، روایت‌ها و تحلیل‌های انجام شده و نیز مدل نهایی، توسط ۳ نفر از متخصصین و مصاحبه‌شوندگان اعتبارسنجی شد.

٤- تحلیل یافته‌ها

در این بخش، خلاصه‌ای از تحلیل شماتیک روایت‌ها برای هر مطالعه موردی در خصوص چگونگی فرایند نوآوری هر یک از CoPS، به‌صورت مراحل مختلف فرایند نوآوری محصول، ترتیب زمانی هر یک از مراحل و فعالیت‌ها و چگونگی ارتباطات آن‌ها با هم ارائه می‌شود. با توجه به ثبت شواهد و فعالیت‌هایی قبل از مرحله مفهوم برای انجام تحلیل‌های روایی، به‌طور موقت مرحله‌ای به نام پیش- مفهوم تعریف می‌کنیم. سپس، در تحلیل‌های بعدی درباره مشاهدات و داده‌های ثبت شده از فرایند نوآوری در این مرحله برای هر سه CoPS مورد مطالعه، بحث می‌کنیم.

٤-١ مطالعه موردی محصول اول

مطالعه موردی اول، موتوری از خانواده موتورهای توربوفن با نسبت کنارگذر بالا[1] در رده هواپیماهای مسافربری است. این موتور در چهار نوع اصلی، یکی از پرکاربردترین موتورهای هواپیمای توربوفن در جهان است. پروژه توسعه این موتور با هدف نگهداری و تعمیر وسایل پرنده موجود، پشتیبانی و تأمین قطعات با عمر محدود (LLP)[2] و بحرانی آن‌ها انجام شد و تاکنون نیز ادامه دارد. فرایند بازطراحی موتور و اجزای آن از ابتدای پروژه در دستور کار قرار گرفت، زیرا عمر بسیاری از اجزا و قطعات به پایان رسیده و به دلیل تحریم‌های موجود، امکان تأمین آن‌ها از شرکت‌های سازنده اصلی وجود ندارد. فرایند بازطراحی موتور و اجزای آن موجب تغییرات فنی متعددی در طراحی برخی از ماژول‌ها و طراحی معماری کل موتور شد (طبق جدول ۲). به عنوان مثال مدیر پروژه درباره بازطراحی موتور و اجزای آن می‌گوید:

"بعدها فهمیدیم که سیستم‌های استاتیکی را ممکن است که بشود عینش را ساخت مثل یک پاشنه‌کش. پس برای سیستم‌های استاتیکی شاید تا حدی موضوعات شبیه‌سازی معنی پیدا می‌کند اما در سیستم زنده یا دینامیک یا یک سیستم پیچیده که قرار است یک فانکشن را از خودش بروز دهد مثل موتور مثل هواپیما و ..... آن سیستم یک هدف‌گذاری ماورایی دارد .... در اصل انتظار می رود از آن سیستم خروجی داشته باشد. حالا بعضی از نکاتی وجود دارد که نه تنها خود سیستم یک فانکشن دارد بلکه ساب سیستم هم یک فانکشن دارد بعضا پارت هم یک فانکشن دارد، ما اینجا دیزاین میکنیم....".

"دفتر طراحی ایجاد کردیم...اولین کاری که کردم آمدم اینجا یک دفتر طراحی راه انداختم. و به این دفتر طراحی اول گفتم خودتان بروید موتور را بشناسید.... بعد همان آدم ها که شناخته بودند من دسته بندی کردم و هر کسی را گذاشتم برود طراحی یک بخشی اش را انجام دهد".

مدل فرایند نوآوری موتور و اجزای آن به صورت شکل ۳ می‌باشد. براساس آن، فرایند تکامل و نوآوری موتور و اجزای آن به سه دوره زمانی تقسیم می‌شود: ۱- دوره پیش‌مفهوم (از ۱۳۹۳ تا اواسط ۱۳۹٦)، ۲- دوره ادامه پیش‌مفهوم، بخش اول مفهوم، بخش اول توسعه (از اواسط ۱۳۹٦ تا ۱۳۹۹)، ۳- دوره اتمام پیش‌مفهوم، ادامه مفهوم و توسعه، بخشی از تولید، و بخشی از بهره‌برداری و پشتیبانی (از ۱۳۹۹ تاکنون).

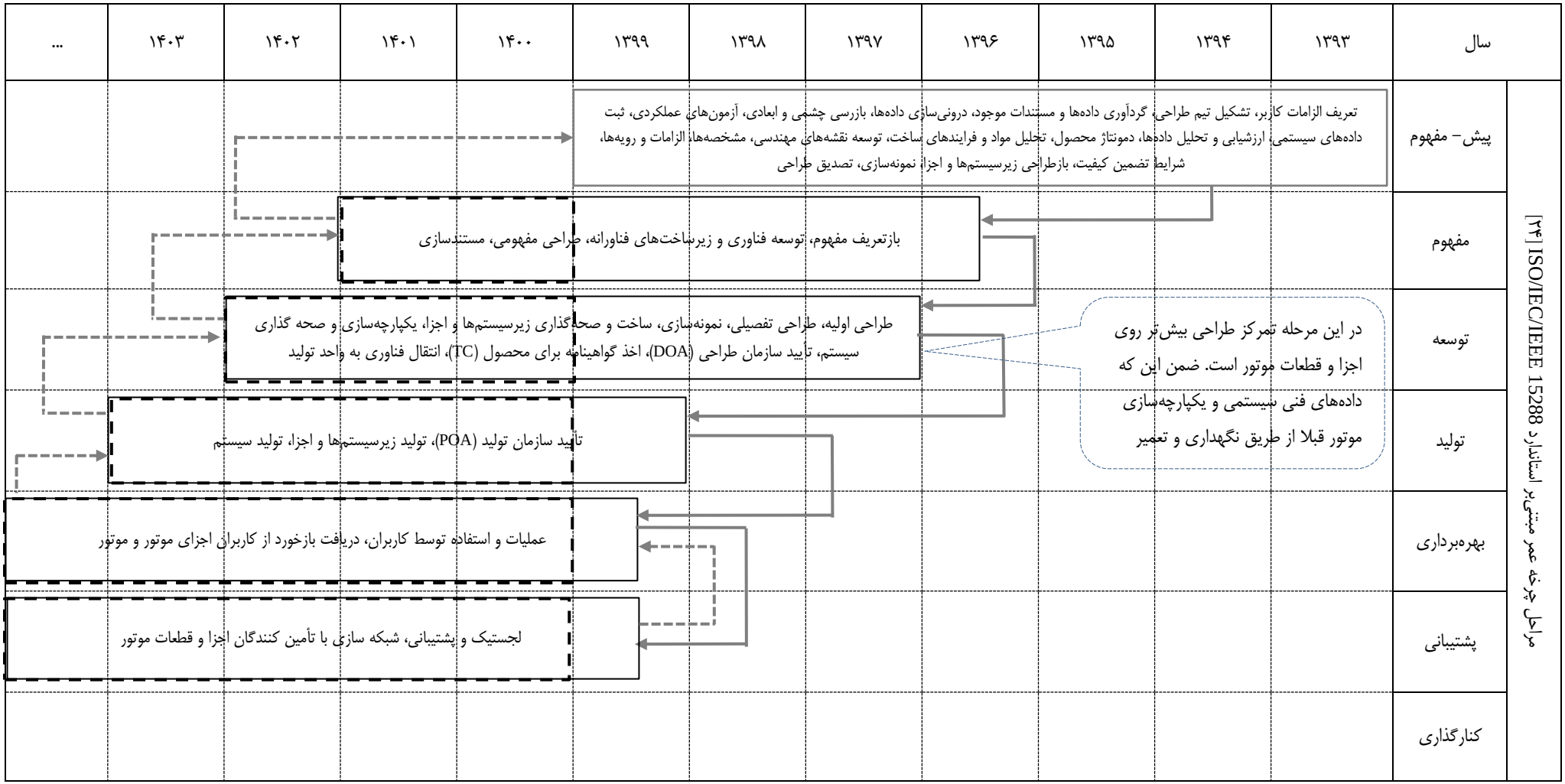
قابل ذکر است که درحال حاضر، برنامه توسعه و تحقق خودِ موتور با کاربرد تجاری تا پایان سال ١٤٠٣ ادامه دارد.

یادآوری این نکته حائز اهمیت است که فرایند نوآوری موتور براساس برنامه زمان‌بندی کاربرد تجاری آن به صورت شکل ۳ ترسیم شده است. اما روند تولید و بهره‌برداری از آن با کاربرد غیرتجاری انجام شده است.

جدول ۲) خلاصه‌ای از تغییرات فنی و نوآوری صورت‌گرفته در موتور هواپیما

تغییرات فنی صورت‌گرفته (Major changes)	شرح
بازطراحی اجزا و ماژول های موتور مانند پره های کمپرسور، شبکه کابل‌ها، شبکه سوخت، فن و قطعات LLP و بحرانی، تغییر در مواد، بازطراحی موتور، نیاز به ارزیابی مجدد براساس استانداردهای صلاحیت پروازی و اخذ TC جدید	با توجه به تعدد و سطح تغییرات فنی صورت گرفته در اجزا و پیکره‌بندی موتور، واسط ها و ارتباطات بین اجزا، براساس چارچوب طبقه بندی انواع نوآوری در مقاله هندرسون و کلارک [۴۱]، ابتدا نوآوری ماژولار و سپس نوآوری در معماری روی داده است. (به دلیل سطح بالای تغییرات در اجزا و قطعات و تمرکز بر بازطراحی اجزای موتور، نوآوری ماژولار منجر به نوآوری در معماری شده است.)

[1] High-bypass turbofan engine
[2] Life-Limited Parts



شکل ۳) فرایند نوآوری موتور هواپیما

الف) دوره اول (۱۳۹۳ تا اواسط ۱۳۹۶)

براساس مصاحبه‌ها، در ابتدای فرایند توسعه، و پس از شکل گرفتن تیم طراحی، تمامی استانداردها، بولتن‌ها، هندبوک‌ها، کتابچه‌های راهنما، برگه‌های آزمون[1]، و سایر مستندات مربوط به این موتور و سایر موتورهای مشابه گردآوری و مطالعه شد.در این مرحله، تمامی مقررات و استانداردهای هوایی مربوط به طراحی، ساخت و صلاحیت پروازی موتور مانند[2] CS-E engines توسط تیم طراحی به دقت بررسی شد. همزمان مطالعه و پیاده‌سازی استانداردها و مقررات سیستمی مانند EASA Part-21[3] و EASA Part-145[4] نیز انجام گرفت. پس از گردآوری و مدون کردن داده‌ها و اطلاعات موجود، درونی‌سازی دانش فنی به‌دست‌آمده از مستندات و سایر داده‌ها انجام گرفت. یکی از مهم‌ترین اقدامات در این دوره، شروع اندازه‌گیری‌ها، ثبت اطلاعات سیستمی موتور، تعیین و تدوین معیارهای پذیرش آن، ساخت و تأمین زیرساخت‌ها و ابزارآلات مورد نیاز برای دمونتاژ آن بود. از فعالیت‌های مهم بعدی در این مرحله دمونتاژ موتور بود که به‌ترتیب از ماژول‌های اصلی، تا اجزا و قطعات براساس ساختار شکست آن پیش رفت. ثبت داده‌ها و اطلاعات تا آخرین مراحل جداسازی انجام شده است. بنابراین، در این مرحله، بخش مهمی از بسته داده فنی[5] (TDP) مورد نیاز به منظور طراحی و ساخت اجزای موتور تولید شد. با توجه به پیچیدگی موتور و اولویت طراحی و ساخت قطعات LLP و بحرانی، برنامه‌ریزی برای ثبت داده‌ها، تصدیق طراحی، بازیابی طراحی[6] و نمونه‌سازی اولیه[7] حتی‌الامکان براین اساس انجام گرفت و داده‌های تولیدشده در این مرحله به‌طور رفت‌وبرگشتی اصلاح و تکمیل شدند و قسمتی از دانش فنی طراحی و ساخت محصول و اجزای آن به‌دست آمد. در انتهای این مرحله، مفاهیم استخراج‌شده، داده‌های فنی، مدارک، مستندات و نمونه‌های اولیه ساخته‌شده به واحد طراحی منتقل شدند.

ب) دوره دوم (از اواسط ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۹)

در این مرحله، بازتعریف و اصلاح مفهوم بازیابی شده، طراحی مفهومی و توسعه فناوری‌های لازم برای دستیابی به اهداف پروژه انجام و بخشی از فرایند بازطراحی موتور و کل فرایند بازطراحی اجزای آن نیز به‌طور همزمان انجام می‌شوند. بسته داده فنی تولیدشده در مرحله قبل تکمیل‌تر شده، ضمن این‌که همزمان نمونه‌سازی اولیه اجزا، تصدیق و صحه‌گذاری[8] داده‌ها و نمونه‌های ساخته شده از قطعات و اجزا و بنابراین، بازیابی طراحی نیز در جریان است. پس از توسعه اجزای موتور، انتقال فناوری‌های استخراج‌شده، داده‌های فنی، و مستندات طراحی و ساخت آن‌ها به بخش تولید انجام می‌شود. همچنین فرایند بازیابی طراحی سیستمی موتور نیزتمام می‌شود.

ج) دوره سوم (از ۱۳۹۹ تاکنون)

این دوره با توجه شکل ۳، با فرایند تولید آغاز می‌شود. هر چند، سایر فرایندهای قبلی چرخه عمر موتور نیز همچنان ادامه دارند. در این مرحله، تولید برخی از اجزا و قطعات LLP آغاز شده و فرایند پشتیبانی و نگهداری و تعمیر موتورهای خراب موجود از سرگرفته می‌شود. لازم به ذکر است که فرایند بازطراحی برخی از اجزای این محصول همچنان ادامه دارد و بهره‌برداری و پشتیبانی از قطعات تولیدشده، طبق زمان‌بندی قرارداد با کاربران اجرا خواهد شد. طبق برنامه زمان‌بندی پروژه، طراحی و ساخت هسته موتور تا سال ۱۴۰۰ برای کاربردهای غیرتجاری و تا پایان سال ۱۴۰۳ برای کاربردهای تجاری (به همراه اخذ گواهی‌نامه‌های DOA[9]، TC[10] و POA[11]) صورت خواهد گرفت. با توجه به این که هنوز در طول چرخه عمر موتور و اجزای آن،

[1] Test sheets
[2] Certification Specification for Small Rotorcraft
[3] European Aviation Safety Agency (EASA)
[4] European Aviation Safety Agency (EASA)
[5] Technical Data Package
[6] Design recovery
[7] Prototyping

[8] Verification and demonstration
[9] Design Organization Approval (DOA)
تأییدیه سازمان طراحی، سندی است که نشان می‌دهد یک سازمان طراحی با الزامات استانداردی انطباق دارد که دارای شرایط خاصی برای نظام تضمین طراحی، کارکنان، ابزار، تجهیزات و داده‌های طراحی است.

[10] Type Certificate (TC)
گواهی‌نامه نوع سندی است که مرجع صلاحیت‌دار، آن را صادر کرده و نشان می‌دهد که متقاضی دارنده آن، انطباق طراحی نوع محصول را با تمامی الزامات قابل کاربرد اثبات کرده است.

[11] Production Organization Approval (POA)
تأییدیه سازمان تولید، سندی است که نشان می‌دهد یک سازمان تولید با الزامات استانداردی انطباق دارد که شرایطی را برای انطباق محصولات و قطعات آن سازمان با داده‌های تأییدشده طراحی، تعیین می‌کند. از این داده‌های تأییدشده برای ایجاد داده‌های تولید استفاده می‌شود.

کنارگذاری اتفاق نیافتاده است، هیچ گونه فعالیتی در این مرحله ثبت نشده است.

٤-٢ مطالعه موردی محصول دوم

مطالعه موردی دوم، یک بالگرد چندمنظوره، سبک و دوپره‌ای[1] است که توانایی حمل ٤ سرنشین به همراه یک نفر خدمه را دارد. دارای یک موتور آلیسون 250-C20 با حداکثر سرعت ۱۳۰ نات و مأموریت اصلی آن، شناسایی است. این بالگرد هم کاربرد نظامی و هم تجاری دارد. پروژه توسعه این بالگرد با هدف برآورده کردن نیاز کاربران به یک بالگرد سبک و همچنین پشتیبانی و تأمین ناوگان عملیاتی موجود انجام پذیرفت و ۱۰ سال به طول انجامید. فرایند بازطراحی بالگرد از همان ابتدا در دستور کار تیم پروژه قرار گرفت. درگیر شدن سازنده در فرایند طراحی از ابتدای پروژه، به این دلیل بود که هویت مستقلی برای بالگرد خود درنظر گیرد تا بتواند برای آن TC اخذ نماید و این موضوع در صنعت هوانوردی به این معناست که طراحی بالگرد دستخوش تغییرات فنی متعددی در برخی از ماژول‌ها و معماری محصول شد (طبق جدول ۳). از این رو، بالگرد تولید شده یک محصول نوآورانه از نظر معماری و ماژولار با ویژگی‌های جدید بوده و مالکیت فکری آن متعلق به شرکت سازنده داخلی می‌باشد.

در این باره یکی از مصاحبه‌شوندگان می‌گوید:

" *یک مثال حل شده خوب را مبنای کار گذاشتیم و گفتیم چون این مثال در کشور زیرساختهایش موجود هست اگر ما طرحی را بر مبنای این پیاده کنیم که بتواند طرح ما پشتیبانی لجستیکی محصول موجود در کشور را داشته باشد طرح موفقی خواهد بود. ولی آمدیم کلوتینگ آن را تغییر دادیم، پیکره‌بندیش را مطابق پیکره بندی روز قرار دادیم و سامانه-هایش را سامانه‌های بهینه سازی شده قرار دادیم برای این که بحثهای رویالیتیش هم حفظ بشود یک تغییرات ماهیتی در کلیت پرنده هم دادیم.... سطوح کنترلش را هم متناسب با طرح خودمان کردیم*"

مدیر پروژه در این باره چنین گفته است:

"*این هلیکوپتر از نظر شکل و ترکیب مختص به خودش هست بدنه فول کامپوزیت دارد و در آن زمان در بالگردها یک همچنین چیزی نداشتیم کاملا مبنای طراحی داشت و روتور سیستمش کاملا یک سیستم متعلق به خودش است و از این چیزها تویش زیاد دارد و بعضی بخش هاش هم مهندس معکوس بود و از آنچه بود استفاده کردیم ولی همانها را هم ما آمدیم هوشمندانه ارتقا دادیم*".

همچنین، استفاده حداکثری از استانداردهای شرکتی سازندگان بالگرد در دنیا و توجه به ظرفیت‌ها و قابلیت‌های ایجاد شده داخلی در نتیجه بهره‌برداری از ناوگان بالگرد عملیاتی موجود و سازگاری و تناسب با زیرساخت‌های موجود نیز به عنوان یک اصل اساسی مدنظر تیم طراحی و ساخت بالگرد بود. هرچند، پیچیدگی‌های طراحی و مهندسی این بالگرد مستلزم قابلیت‌ها و زیرساخت‌های فناورانه، و همچنین دانش فنی تیم پروژه بود، اما وجود مستندات، نقشه‌های مهندسی، کتابچه‌های راهنمای کاربری، نگهداری و تعمیر، بازخوردهای عملیاتی کاربران، و سایر اسناد موجود به توسعه و بازطراحی محصول کمک بسیاری کرد.

مدل فرایند نوآوری مبتنی‌بر چرخه عمر بالگرد به صورت شکل ٤ می‌باشد. براساس آن فرایند نوآوری بالگرد مورد مطالعه به سه دوره زمانی تقسیم می‌شود: ۱- دوره پیش‌مفهوم (از ۱۳۷۲ تا اواسط ۱۳۷۹)، ۲- دوره ادامه پیش‌مفهوم، مفهوم و توسعه (اواسط ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳)، ۳- دوره تولید و بخشی از مراحل بهره‌برداری و پشتیبانی (۱۳۹۳ تاکنون).

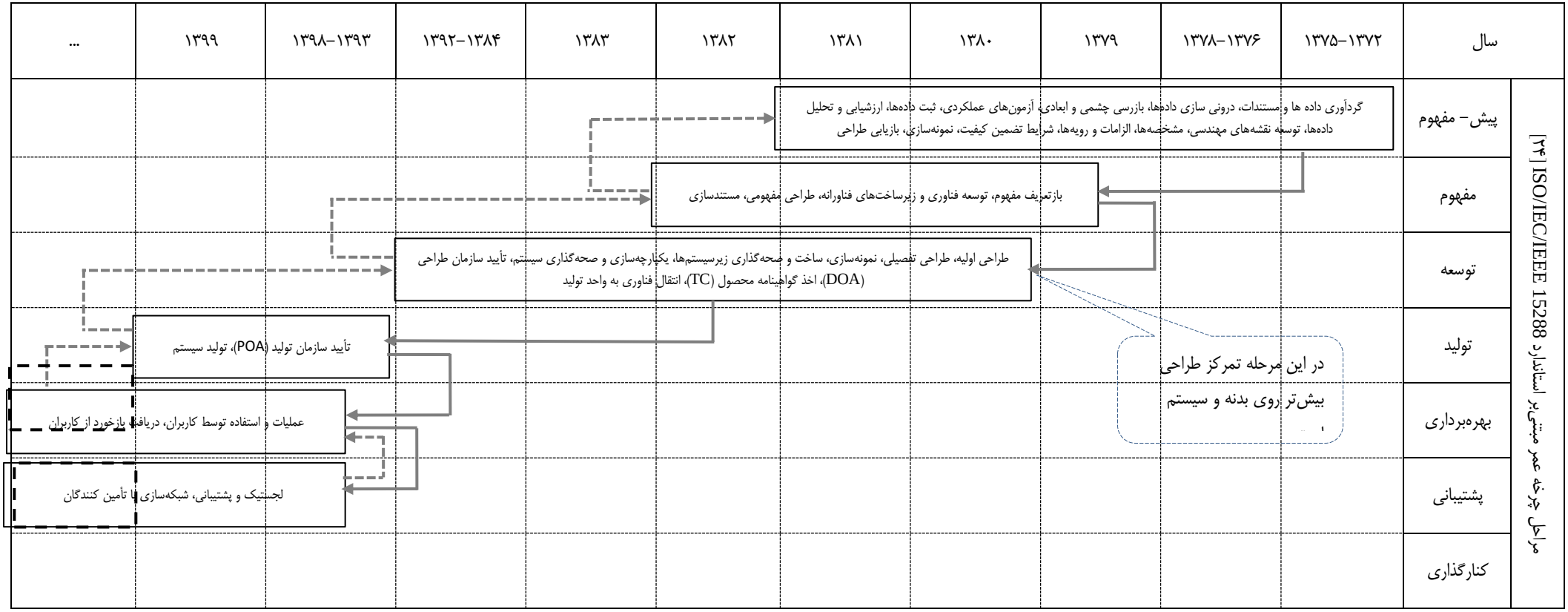
جدول ۳) خلاصه‌ای از تغییرات فنی و نوآوری صورت‌گرفته در بالگرد

تغییرات فنی صورت گرفته (Major changes)	شرح
تغییر بدنه بالگرد از فلزی به کامپوزیتی، تغییر در برخی از اجزا و ماژول ها مانند سیستم پیشرانه، گیربکس، روتور، سطوح کنترلی، اکچویتور، سیستم فرامین و انتقال قدرت و سایر، بازطراحی کل بالگرد، نیاز به ارزیابی مجدد براساس استانداردهای صلاحیت پروازی و اخذ TC جدید	با توجه به تعدد و سطح تغییرات فنی صورت گرفته در اجزا و پیکره‌بندی بالگرد، واسط ها و ارتباطات بین اجزا، براساس چارچوب طبقه بندی انواع نوآوری در مقاله هندرسون و کلارک [۴۱]، نوآوری در معماری روی داده است. هر چند، در ابتدا، به دلیل سطح بالای تغییرات در اجزا، نوآوری ماژولار منجر به نوآوری در معماری شده است.

الف) دوره اول (۱۳۷۲ تا اواسط ۱۳۷۹)

در ابتدای فرایند و پس از شکل گرفتن تیم طراحی بالگرد، استانداردها، بولتن‌ها و هندبوک‌های مربوط به طراحی و

1 Blade



شکل ٤) فرایند نوآوری بالگرد

ساخت بالگردها مانند سری هندبوک‌های AMCP[1] و همچنین استانداردهای شرکتی سازندگان برجسته بالگرد در دنیا مانند بل تکسترون[2] و هلیکوپترسازی میل مسکو توسط تیم طراحی مطالعه و بررسی شد. براساس مصاحبه‌ها، در این مرحله تیم طراحی تمامی مقررات و استانداردهای هوایی مربوط به طراحی، ساخت و صلاحیت پروازی روتورکرافت‌های کوچک[3] را نیز مانند JAR/FAR 27[4،5]، BCAR PART[6] 29، EASA Part-21[7]، CS-27[8] و... به دقت بررسی کرده و الزامات آن‌ها را درنظر گرفتند. در این دوره، پس از گردآوری و مدون کردن داده‌ها و اطلاعات موجود و در دسترس، درونی‌سازی دانش فنی بدست آمده از مستندات و سایر داده‌ها و اطلاعات محصول اصلی صورت پذیرفت. افزون بر این، با تدوین و توسعه برخی از نقشه‌های مهندسی، ابعاد و تلورانس‌ها، مشخصه‌ها و همچنین برخی از مستندات طراحی بالگرد، بخش مهمی از بسته داده فنی (TDP) تولید شد. در این مرحله، نمونه‌سازی اولیه، آزمون، انتقال بخشی از مفهوم و داده‌های فنی بازیابی شده به واحد طراحی نیز انجام می‌شوند.

ب) دوره دوم (از اواسط ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳)

شکل ٤ نشان می‌دهد که یکی از مشخصه‌های بارز در این مرحله همزمانی رویداد چندین فرایند با یکدیگر است که در واقع، مفهوم مهندسی همزمان را به نمایش می‌گذارد. جایی که فعالیت‌های تولید، تکمیل و تصویب داده‌های فنی، تصدیق و صحه‌گذاری طراحی، ادامه انتقال مفهوم و داده‌های فنی بازیابی شده به واحد طراحی، تعریف و اصلاح مفهوم، فرایند طراحی و بازطراحی محصول به‌طور همزمان انجام می‌شوند. در این دوره، بسته داده فنی در هر مرحله تکمیل‌تر شده و فرایند توسعه و بازطراحی بالگرد به اتمام می‌رسد. همچنین، یک گذار از طراحی به تولید در مرحله توسعه روی می‌دهد که نوعی انتقال داده‌های فنی، مستندات و فناوری ساخت محصول از مرحله توسعه به تولید می‌باشد. یادآوری این نکته مهم است که با توجه به مقررات سازمان بین‌المللی هوانوردی (ICAO[9]) و به پیروی از آن، مقررات سازمان هواپیمایی کشوری ایران[10]، اخذ گواهی‌نامه نوع (TC) در این مرحله ضرورت دارد.

ج) دوره سوم (۱۳۹۳ تاکنون)

در این دوره نیز با توجه شکل ٤، فرایندهای تولید، بهره‌برداری و پشتیبانی انجام می‌شوند. در این مرحله، پس از گذار از بازطراحی بالگرد و انتقال فناوری ساخت آن به واحد تولید و اخذ گواهی‌نامه سازمان تولید (POA) از سازمان هواپیمایی کشوری براساس مقررات، تولید و تحویل‌دهی به کاربران براساس قراردادهای موجود و نیاز کاربران صورت گرفت. همزمان با بهره‌برداری کاربر از بالگرد، دوره پشتیبانی از محصول نیز آغاز شده است. با توجه به این‌که براساس مصاحبه‌ها، این بالگرد هنوز در طول دوره چرخه عمر خود به مرحله کنارگذاری نرسیده، در این مرحله هیچ گونه فعالیتی ثبت نشده است.

٤- ۳ مطالعه موردی محصول سوم

مطالعه موردی سوم، یک هواپیمای دوزیست شش سرنشین است که برای گشت‌های دریایی سبک طراحی شده است. طراحی و توسعه این هواپیما به منظور برآورده کردن نیاز کاربران به یک هواپیمای دوزیست برای گشت‌زنی در جزایر مختلف، مأموریت شناسایی، کاربردهای تفریحی و مانند این‌ها انجام شد و ۷ سال به طول انجامید. فرایند بازطراحی و اخذ TC براساس مقررات هوانوردی از سازمان هواپیمایی کشوری برای این وسیله پرنده از همان ابتدا در دستور کار تیم پروژه طراحی و ساخت قرار گرفت. با توجه به تغییرات فنی متعدد در بازطراحی این وسیله پرنده، محصول جدید از نظر معماری و ماژولار به صورت متفاوت از محصول مشابه اصلی ارائه شد (طبق جدول ٤). ضمن این که طراحی و ساخت این گونه از هواپیما در کشور برای اولین بار انجام گرفته است. به عنوان مثال مدیر پروژه درخصوص نوآورانه بودن این هواپیما چنین می‌گوید: "*کاربری می‌گوید من یک چیزی شبیه این یا همین را می خواهم. ما رفتیم شروع کردیم به خلق این. چیزی که نداریم نه قالبش را داریم نه قطعه ش را داریم هیچ چیزی نداریم یک شکلی داریم یک سه بعدی داریم حالا می*

[1] Army Materiel Command Pamphlet
[2] Bell Textron
[3] Small Rotorcraft
[4] Joint Aviation Requirements
[5] Federal Aviation Regulations
[6] British civil airworthiness requirements
[7] European Aviation Safety Agency (EASA)
[8] مشخصه فنی قابل صدور گواهی‌نامه برای روتورکرافت‌های کوچک
[9] International Civil Aviation Organization
[10] Civil Aviation Organization of Iran

رویم از اینجا شروع می کنیم مأموریتش را هم در کتاب نوشته می گوید این این کار را می کند. کاربر می گوید درست است که این مأموریتش این است ولی من بهتر می خواهم من می خواهم که این مثلا از چهار نفره بشود شش نفره از شش نفره بشود هشت نفره پس یک چیز جدید شد."

استفاده حداکثری از استانداردهای شرکتی سازندگان این گونه وسایل پرنده در دنیا و توجه به ظرفیت‌ها و قابلیت‌های ایجاد شده داخلی به‌عنوان یک اصل اساسی مدنظر تیم پروژه بود. بهره‌مندی از مهندسی همزمان در طراحی و ساخت این وسیله پرنده توسط تیم طراحی نقش موثری داشت.

مدل فرایند نوآوری مبتنی‌بر چرخه عمر این هواپیما به صورت شکل ۵ می‌باشد. براساس آن فرایند نوآوری این وسیله پرنده به سه دوره زمانی تقسیم می‌شود: ۱- دوره پیش-مفهوم (از ۱۳۹۰ تا اواسط ۱۳۹۲)، ۲- دوره ادامه پیش‌مفهوم، مفهوم، و توسعه (از اواسط ۱۳۹۲ تا اوایل ۱۳۹۹)، ۳- دوره تولید (از اوایل ۱۳۹۹ تاکنون).

یادآوری این نکته مهم است که فرایند نوآوری هواپیمای دوزیست براساس برنامه زمان‌بندی کاربرد تجاری آن به صورت شکل ۵ ترسیم شده، اما روند تولید و بهره‌برداری از آن با کاربرد غیرتجاری انجام شده و در جریان است.

جدول ٤) خلاصه‌ای از تغییرات فنی و نوآوری صورت گرفته در هواپیمای دوزیست

تغییرات فنی صورت‌گرفته (Major changes)	شرح
تغییر پرنده از فلزی به کامپوزیتی، افزایش تعداد صندلی ها، تغییر موتور، تغییر طراحی و بازطراحی برخی از اجزا و ماژول ها مانند لندیگ گیر و ...، نیاز به ارزیابی مجدد براساس استانداردهای صلاحیت پروازی و اخذ TC جدید	با توجه به تعدد و سطح تغییرات فنی صورت گرفته در اجزا و پیکره‌بندی بالگرد، واسط ها و ارتباطات بین اجزا، براساس چارچوب طبقه بندی انواع نوآوری در مقاله هندرسون و کلارک [۴۱]، نوآوری در معماری روی داده است. هر چند، در ابتدا، به دلیل سطح بالای تغییرات در اجزا، نوآوری ماژولار منجر به نوآوری در معماری شده است.

الف) دوره اول (از ۱۳۹۰ تا اواسط ۱۳۹۲)

در ابتدا، تیم طراحی تمامی مقررات و استانداردهای هوایی مربوط به طراحی، ساخت و صلاحیت پروازی دسته هواپیماهای معمولی ایروباتیک مسافربری[1] را به دقت بررسی کرده و الزامات آن‌ها را درنظر گرفتند. در این دوره، پس از گردآوری، مدون کردن و درونی‌سازی داده‌ها و اطلاعات موجود و در دسترس و دمونتاژ وسیله پرنده، نقشه‌ها، مشخصه‌ها و برخی از مستندات آن تدوین شدند. براساس مصاحبه‌ها، دمونتاژ وسیله پرنده موجب شکل‌گیری ایده‌های بازطراحی این وسیله پرنده شد.

در این مرحله، بخش عمده‌ای از بسته داده فنی تولید شده و قسمتی از فرایند بازیابی طراحی پرنده صورت گرفت. در انتهای این دوره، ضمن نهایی‌سازی و تصویب بخشی از داده‌های فنی، انتقال بخشی از بسته داده فنی، مفهوم و فناوری‌های استخراج‌شده به واحد طراحی به منظور اصلاح و تولید مفاهیم جدید و توسعه یک محصول نوآورانه اتفاق می‌افتد.

ب) دوره دوم (از اواسط ۱۳۹۲ تا اوایل ۱۳۹۹)

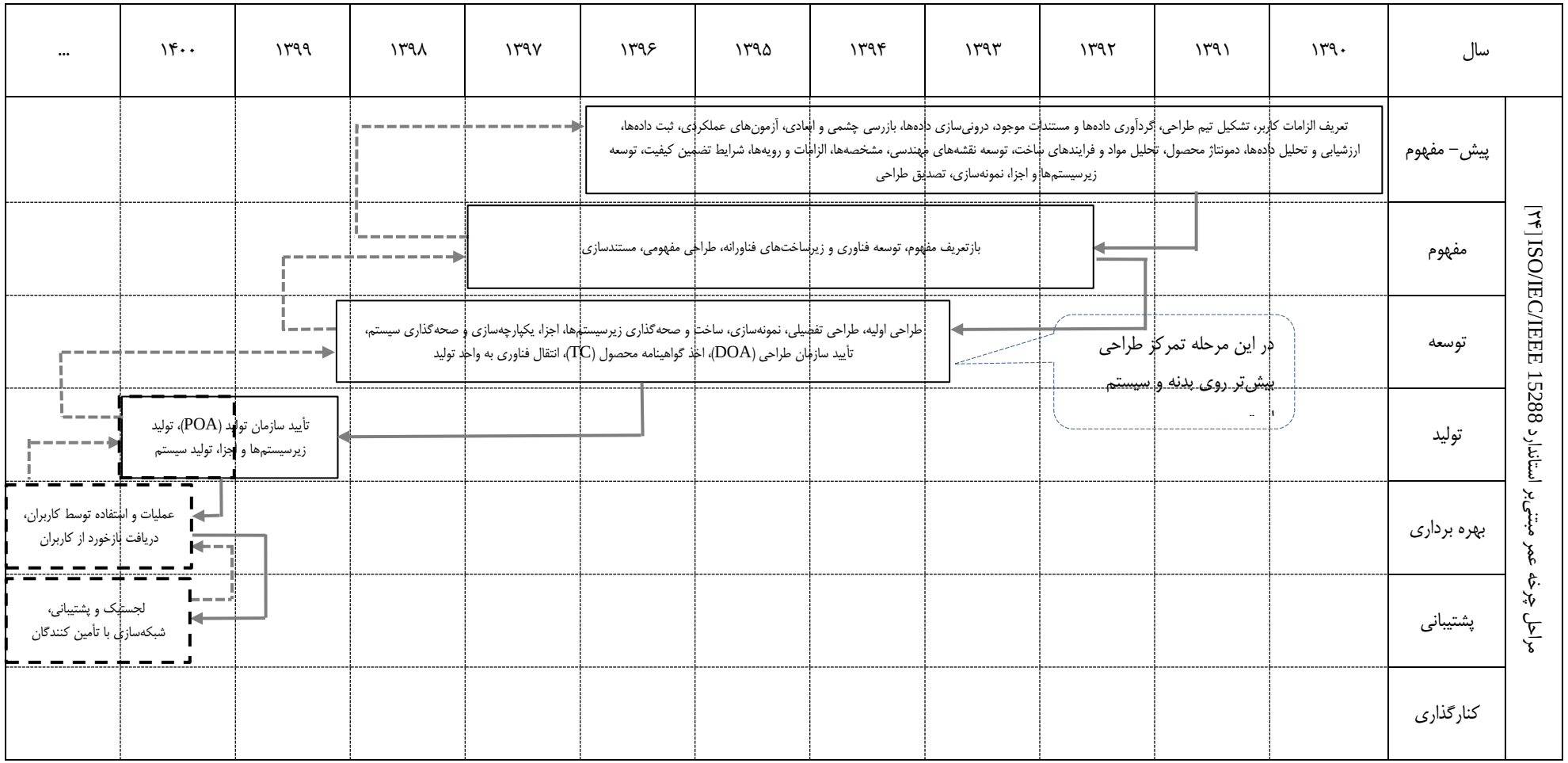
در این مرحله، بسته داده فنی محصول تکمیل شده و فرایند بازیابی طراحی و بازطراحی وسیله پرنده به اتمام می‌رسد. براساس مصاحبه‌ها، این دوره شامل نمونه‌سازی اولیه، نهایی‌سازی داده‌های فنی، تصدیق طراحی و انتقال همه مفاهیم تولید شده به واحد طراحی بوده، و به‌طور همزمان مراحل مفهوم و توسعه به انجام می‌رسد. یادآوری این نکته مهم است که با توجه به ضرورت اخذ گواهی‌نامه نوع در پایان این مرحله براساس مقررات سازمان بین‌المللی هوانوردی و همچنین سازمان هواپیمایی کشوری ایران، وسیله پرنده دوزیست مورد مطالعه با الزامات بندهای سند CS-23[2] انطباق یافته و TC خود را از سازمان هواپیمایی کشوری دریافت کرده است.

ج) دوره سوم (از اوایل ۱۳۹۹ تا کنون)

دوره سوم مربوط به مراحل تولید، بهره‌برداری و پشتیبانی در چرخه عمر محصول است، با توجه به این‌که تولید و عملیات (غیرتجاری) محصول به تازگی شروع شده، هنوز پشتیبانی از آن آغاز نشده است. همچنین، این وسیله پرنده هنوز در طول دوره چرخه عمر خود به مرحله کنارگذاری نرسیده، بنابراین، در این مرحله هیچ‌گونه فعالیتی ثبت نشده است.

[1] Normal, utility, aerobatic and commuter category aeroplanes

[2] مشخصه صدور گواهی‌نامه، شامل رویه‌های صلاحیت پروازی و روش‌های قابل‌قبول انطباق برای دسته هواپیماهای معمولی ایروباتیک مسافربری.



شکل ۵) فرایند نوآوری هواپیمای دوزیست

٤-٤ مطالعه بین‌موردی

تحلیل‌های ارائه شده در شکل‌های ۳، ٤ و ۵، نشان می‌دهد که در تمامی فرایندهای نوآوری ترسیم شده از سه CoPS مورد مطالعه، قبل و همزمان با شروع مرحله مفهوم، مرحله‌ای وجود دارد که ما آن را پیش‌مفهوم نام نهادیم. براساس مشاهدات و مصاحبه‌ها، در این مرحله که در مقاطعی از زمان به‌صورت کاملا همزمان با سایر مراحل نوآوری انجام می‌شود، فرایند مهندسی معکوس CoPS در جریان است. همان‌گونه که در شکل‌های ۳، ٤ و ۵ مشهود است، بخش عمده‌ای از داده فنی مورد نیاز برای طراحی و ساخت هر سه CoPS در این مرحله تولید و تصدیق می‌شود. با توجه به این‌که مدل‌های مرسوم نوآوری در CoPS (شکل ۱)، و مدل مرجع این مقاله (مدل عمومی چرخه عمر [٢٤])، براساس منطق مهندسی رو به جلو توسعه یافته‌اند، در جزئیات مراحل آن‌ها اشاره‌ای به توسعه محصول از طریق مهندسی معکوس نشده است. یافته‌های ما نشان می‌دهد که این مرحله بخش مهمی از فرایند نوآوری در هر سه محصول بوده، از این‌رو، لازم است تا درخصوص روند و چگونگی ارتباط آن با سایر مراحل چرخه عمر بررسی بیش‌تری صورت گیرد. براین اساس، پیش از ارائه هر تحلیلی، مفهوم مهندسی معکوس را تعریف می‌کنیم. جریان غالب، مهندسی معکوس را "فرایند توسعه مجموعه‌ای از داده‌ها، دانش فنی و مشخصه‌ها برای بازیابی طراحی[1] یک سامانه موجود تعریف می‌کند که به‌وسیله بررسی‌ها، اندازه‌گیری‌ها و آزمایش‌های منظمی از نمونه‌های موجود آن سامانه انجام می‌شود [٤٢-٤٣]. هر چند در راهنمای فراسکاتی[2]، فعالیت‌های انجام شده از طریق مهندسی معکوس از تحقیق و توسعه مستثنی شده‌اند، اما دانش کسب شده طی فرایند بازیابی طراحی در مهندسی معکوس می‌تواند به‌عنوان ورودی برای مهندسی رو به جلو و فعالیت‌های تحقیق و توسعه قرار گرفته و موجب افزایش خروجی نوآوری شود [٤٤]. در تحقیقات پیشین، فرایند مهندسی معکوس شامل چندین ویژگی بارز است: ۱- مبتنی بر سخت‌افزار یا نرم‌افزار و یا هر دو می‌باشد، ۲- فرایندمحور است، ۳- مستلزم اتخاذ یک دیدگاه نظام مند است، ٤- توسعه داده فنی و مستندسازی یکی از مهم ترین مراحل آن است، ۵- بازیابی طراحی نتیجه فرایند مهندسی معکوس است و ٦- بین مهندسی معکوس و مهندسی رو به جلو (طراحی مستقیم/ بازطراحی) رابطه تنگاتنگی وجود دارد ([٤٢]، [٤٣]، [٤٥]).

بر اساس تحلیل بین‌موردی، جدول۵ ترتیب و توالی مراحل فرایند نوآوری را به تفکیک هر محصول به همراه دوره‌های زمانی اکتساب آن‌ها در مقایسه با هم نشان می‌دهد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد با وجود این‌که مراحل ثبت شده در هر دوره زمانی برای موتور هواپیما با دو محصول دیگر متفاوت است، و همچنین با وجود همزمانی بسیاری از مراحل با یکدیگر در برخی از مقاطع زمانی، ترتیب و توالی فرایند چرخه عمر در هر سه محصول یکسان بوده است. همچنین، مقایسه بین تحلیل‌های هر سه محصول نشان می‌دهد، با توجه به پیچیدگی سیستمی بیش‌تر موتور هواپیما نسبت به دو محصول دیگر، همزمانی مراحل در دوره دوم و سوم چرخه عمر مطابق با جدول ۵ و شکل های ۳، ٤ و ۵ بیش‌تر از بقیه است، زیرا به‌طور همزمان هم اجزای سیستم و هم خود سیستم طراحی شده و توسعه می‌یابند. ضمن این‌که در این شرایط، تکرارشوندگی[3] و بازگشت‌پذیری[4] بین مراحل نیز با شدت بیش‌تری اتفاق می‌افتد.

بررسی دقیق‌تر فرایند نوآوری هر سه محصول، دیدگاه‌های جدیدی را در خصوص چگونگی ارتباط بین مهندسی معکوس و مهندسی روبه جلو فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، مدیر پروژه موتور در این باره می گوید "*مهندسی معکوس یک نوع طراحی معکوس است. در روش طراحی مستقیم طراح می‌آید معیارهای طراحیش را می‌گیرد بر این اساس شروع می‌کند آیتم به آیتم پارامتر به پارامتر حل می‌کند می‌رود جلو و هی می‌رود در سیستم فیدبک می‌گیرد و تکرار می‌کند. در روش طراحی معکوس در اصل معیارهای طراح خیلی بسته می‌شود ... باید درک کنی که تو اگر جای طراح بودی آیا به همین ارتفاع می‌رسیدی یا نه. پس طراحی معکوس استخراج معیارها و منطق طراحی یک طراح است از یک محصول موجود. یعنی یک محصول موجود را دیدی باید بشکافیش تا ببینی که طراح چطوری فکر می‌کرده و کشف*

[1] Design recovery
[2] Frascati Manual
[3] Iteration
[4] Recursiveness

کنی.... با چه پارامترهایی و با چه محدودیت‌هایی داشته این طرح را قلم می‌زده..... از اینجا به بعد گفتیم که خب حالا ما می‌خواهیم طراحی مفهومی کنیم ..... رفتیم کامل سند امکان‌سنجی را استخراج کردیم کاملا فرض کردیم من طراحم و می‌خواهم یک موتور طراحی کنم ... چون موتور را شناختیم دیگه راحت می‌توانستیم در موردش حرف بزنیم رفتیم بازار را شناسایی کردیم و .....یک سند کامل و جامع امکان‌سنجی را کشیدیم بیرون، بعد رفتیم فاز طراحی مفهومی. طراحی صفربعدی موتور را خودمان پیاده کردیم... برای همه اجزا این مسیر را طی می‌کنیم صفر بعدی را طی کردیم یک بعدی را طی کردیم .... شروع کردیم ساختن با ورژن اول طراحی‌مان.

مدیر پروژه بالگرد می‌گوید: *"ما استفاده از ظرفیت‌های در اختیارمان را به عنوان یک اصل مبنا قرار دادیم و این که این پرنده خودش یک هویت حقوقی که متعلق به ما باشد هم به آن به‌عنوان یک اصل توجه کردیم لذا از ابتدا وارد حوزه طراحی شدیم..... همه شرکت‌های دنیا هم این کار را می‌کنند. وقتی می‌خواهند یک محصول جدید ایجاد کنند همه چیش جدید نیست... ما می‌گفتیم طراحی معکوس. طراحی معکوس از بین چیزهایی که آماده داری! ولی باید تطبیق بدهی.... باید به تمامی مبانی طراحی و عملکردی مسلط باشید و به این سادگی نیست.*

همچنین مدیر پروژه هواپیمای دوزیست می‌گوید: *"یک روش، ایده گرفتن از طرح هست. ممکن است بروید دمونتاژ کنید محصول را که فقط ببینید چکار کرده است نه این که کپی کنید. مبنا را می‌گذارید مانند مبنای اول عین طراحی محض و فقط راه را کوتاه می‌کنید. ...اول آمدیم دمونتاژ کردیم اول ببینیم چیست دوم آمدیم خودمان از ابتدا طراحی کردیم با مواد جدید وقتی شما مواد رو عوض می‌کنید از فلز می‌آیید به کامپوزیت اصلا دیگه دنیا عوض میشه".*

یکی از خبرگان پروژه‌ها می‌گوید: *"در مهندسی معکوس داده‌های فنی از نمونه‌های موجود استخراج می‌شود. اما در طراحی مستقیم مهم‌ترین عامل رسیدن به تلورانس‌های نهایی و تطابق زیرسیستم‌ها با هم است که داده‌ها برای آن از همون TDP اول در اختیار قرار می‌گیرد."*

در جدول ٦ به‌طور خلاصه فعالیت‌های کلیدی در هر مرحله از فرایند نوآوری محصولات مورد مطالعه، با درنظرگرفتن تعاملات بین فرایند مهندسی معکوس و مهندسی رو به جلو ارائه شده است. داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها و مشاهده‌های پژوهش‌گران نشان داد که فرایند نوآوری هر سه محصول مورد مطالعه در صنعت هوانوردی براساس مهندسی معکوس شکل گرفته و فرایند مهندسی معکوس در آن‌ها دارای تعاملی نزدیک و پیچیده با طراحی و تحقیق‌وتوسعه می‌باشد. روند تاریخی شکل‌گیری فرایند نوآوری در شکل‌های ٣، ٤ و ٥ نشان می‌دهد که هر چه محصول پیچیده‌تر باشد نیاز به فرایند طراحی و مهندسی رو به جلو بیش‌تر است. همچنین، برخی از فعالیت‌ها در مهندسی معکوس و مهندسی روبه جلو به‌طور همزمان و موازی انجام می‌شوند.

٤-٥ فرایند نوآوری سامانه‌های محصول‌پیچیده در صنعت هوانوردی

براساس نتایج و تحلیل‌های انجام‌شده حاصل از سه مطالعه موردی در این پژوهش، مدل فرایند نوآوری CoPS در صنعت هوانوردی به صورت شکل ٦ ارائه می‌شود. این مدل تبیین‌کننده فرایند نوآوری هر سه محصول پیچیده مورد مطالعه در صنعت هوانوردی کشور به‌ویژه آن دسته از محصولاتی است که براساس مفاهیم و داده‌های فنی حاصل از مهندسی معکوس شکل می‌گیرند. به‌ویژه، درنظرگرفتن مراحل مدل فرایندی پیشنهادی، به ایجاد بینشی واقع‌گرایانه نسبت به فرایند نوآوری CoPS کمک کرده و تعامل پیچیده و مبهم بین فرایند مهندسی معکوس و مهندسی رو به جلو را نیز تا اندازه‌ای روشن می‌کند. فرایند واقعی، خطی نبوده و هر مرحله لزوماً از نظر توالی زمانی پس از مرحله دیگر رخ نمی‌دهد، بنابراین، همان‌طور که در تحلیل‌های هر محصول مشاهده کردیم، این فرایند ذاتاً می‌تواند پیچیده‌تر، پویاتر و تکرارشونده‌تر باشد و مراحل در عمل بهم وابسته بوده و هم‌پوشان هستند. با توجه به این‌که، نمایش‌های خطی از فرایند نوآوری یک سامانه پیچیده به‌خوبی نمی‌توانند ماهیت تدریجی، همزمانی و بازگشت‌پذیری فرایندهای چرخه عمر آن را نشان دهند [١٠]، فرایند نوآوری به صورت شکل ٦ ترسیم شد که بتوان تا اندازه‌ای ماهیت این فرایند را به تصویر کشید.

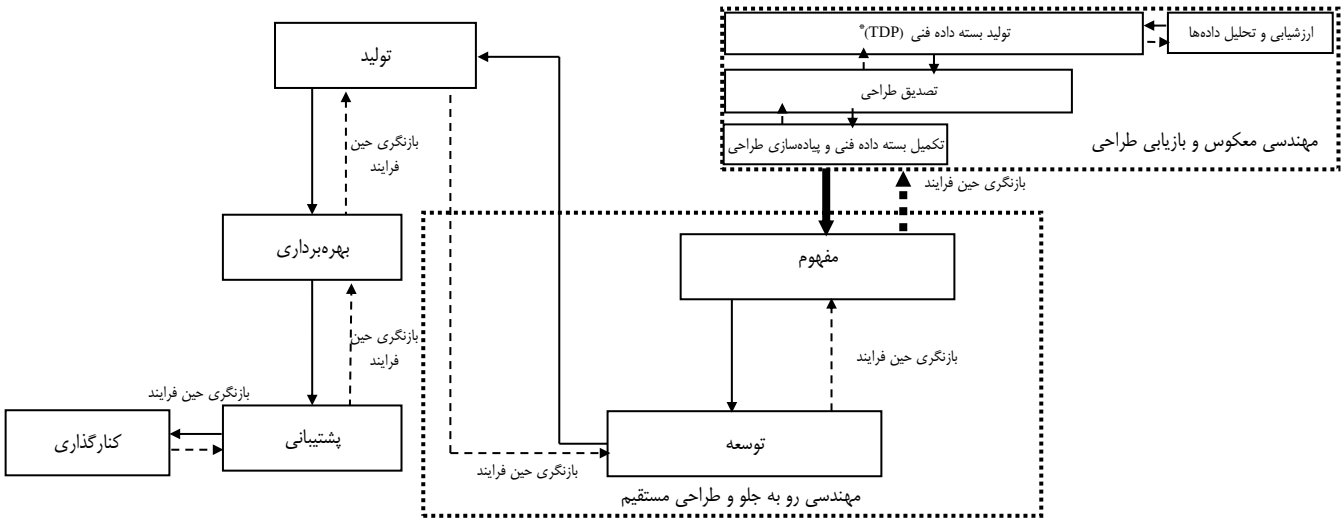
جدول ۵) ترتیب، توالی و همزمانی مراحل فرایند نوآوری سامانه‌های محصول‌پیچیده مورد مطالعه

مطالعه موردی	مراحل فرایند نوآوری مبتنی‌بر چرخه عمر محصول		
	دوره اول (۱۳۹۳- اواسط ۱۳۹۶)	دوره دوم (اواسط ۱۳۹۶-۱۳۹۹)	دوره سوم (۱۳۹۹-تاکنون)
۱- موتور هواپیما	مهندسی معکوس ①	ادامه مهندسی معکوس ② مفهوم ③ توسعه	ادامه مهندسی معکوس ادامه مفهوم ادامه توسعه ④ تولید ⑤ بهره‌برداری ⑥ پشتیبانی
۲- بالگرد	مهندسی معکوس ①	ادامه مهندسی معکوس ② مفهوم ③ توسعه	④ تولید ⑤ بهره‌برداری ⑥ پشتیبانی
۳- هواپیمای دوزیست	مهندسی معکوس ①	ادامه مهندسی معکوس ② مفهوم ③ توسعه	④ تولید ⑤ بهره‌برداری ⑥ پشتیبانی

جدول ٦) فعالیت‌های کلیدی و مراحل چرخه عمر CoPS براساس مطالعات موردی انجام شده

مراحل چرخه عمر بر اساس استاندارد ISO/IEC/IEEE [۲٤]15288	گام‌ها و فعالیت‌های اصلی در هر مرحله بر اساس استاندارد ISO/IEC/IEEE [۲٤]15288	فعالیت‌های انجام شده در مراحل چرخه عمر مطالعات موردی	فعالیت‌های پیشنهادی برای هر مرحله از چرخه عمر CoPS براساس نتایج تحلیل‌ها
مرحله‌ای در استاندارد و سایر مراجع پیشنهاد نشده است.	هیچ فعالیتی در استاندارد و سایر مراجع پیشنهاد نشده است.	• تعریف الزامات کاربر (۱، ۲، ۳) • تشکیل تیم طراحی (۱، ۲، ۳) • درگیر کردن کاربران در تیم طراحی (۲، ۳) • ایجاد پایگاه داده برای ثبت داده‌های حاصل از RE (۱، ۲ و ۳) • گردآوری داده‌ها و مستندات (مانند استانداردها، هندبوک‌ها، کتابچه‌های راهنما، نقشه‌های مهندسی، داده‌های حاصل از بهره‌برداری و نگهداری و تعمیر و ...) (۱، ۲، ۳) • ارزشیابی داده‌ها (۱، ۲، ۳) • درونی‌سازی داده‌ها (۱، ۲، ۳) • بازرسی چشمی و ابعادی (۱، ۲، ۳) • آزمون عملکردی نمونه(ها) (۱، ۲، ۳) • ثبت داده‌های سیستمی (۱، ۲، ۳) • تحلیل شکاف داده‌ها (۱، ۲، ۳) • توسعه ابزارهای خاص (۱، ۲، ۳) • دمونتاژ سیستم (۱، ۲، ۳)	• تعریف الزامات کاربر • تشکیل تیم چندرشته‌ای برای طراحی شامل کاربر • ایجاد پایگاه داده برای RE • گردآوری و ارزشیابی داده‌ها، اطلاعات و مستندات دردسترس • درونی‌سازی داده‌ها، اطلاعات و دانش فنی • بازرسی چشمی و ابعادی سیستم • آزمون عملکردی نمونه(ها) • ثبت اطلاعات سیستمی • تحلیل شکاف داده‌ها • توسعه ابزارهای خاص برای دمونتاژ/مونتاژ • دمونتاژ سیستم و زیرسیستم‌ها • بازرسی چشمی و ابعادی اجزای سیستم • تحلیل مواد • تحلیل روش‌ها و فرایندهای ساخت • آزمون عملیاتی اجزای سیستم

مراحل چرخه عمر بر اساس استاندارد ISO/IEC/IEEE [۲۴]15288	گام‌ها و فعالیت‌های اصلی در هر مرحله بر اساس استاندارد ISO/IEC/IEEE [۲۴]15288	فعالیت‌های انجام شده در مراحل چرخه عمر مطالعات موردی	فعالیت‌های پیشنهادی برای هر مرحله از چرخه عمر CoPS براساس نتایج تحلیل‌ها
		• تحلیل مواد و فرایندهای ساخت (۱، ۳) • آزمون عملیاتی اجزا (۱، ۲، ۳) • چک کردن سیستمی ابعاد (۱، ۳) • تدوین و توسعه رویه‌های دمونتاژ/ مونتاژ (۱، ۳) • تعیین ابعاد، مواد، تلورانس ها، و واسط ها (۱، ۲، ۳) • توسعه نقشه‌های مهندسی و مشخصه‌ها (۱، ۲، ۳) • تدوین الزامات آزمون، و شرایط تضمین کیفیت (۱، ۲، ۳) • تدوین و توسعه مستندات موردنیاز مقررات و استانداردها (۱، ۲، ۳) • توسعه و آزمون زیرسیستم‌ها و اجزا (۱، ۲، ۳) • نمونه‌سازی اولیه و ساخت (۱، ۲، ۳) • آزمون و ارزشیابی (۱، ۲، ۳) • تحلیل شکست نمونه‌ها و بازطراحی (۱، ۲، ۳) • توسعه معیارهای بازرسی و تضمین کیفیت (۱، ۲، ۳) • بازنگری بسته داده فنی (شامل طرح، نقشه‌ها، الزامات، مشخصه‌ها و ...) و تصدیق آن‌ها (۱، ۲، ۳) • تعریف الزامات تأمین و تدارکات (۲، ۳) • تکمیل و نهایی‌سازی داده‌ها و ورودی به طراحی (۱، ۲، ۳)	• مونتاژ و چک کردن سیستمی ابعاد • توسعه رویه‌های دمونتاژ/مونتاژ • تحلیل شکاف داده و تعیین کاستی‌ها و نواقص داده‌ای • تعیین ابعاد، مواد، تلورانس‌ها و واسط‌ها • توسعه نقشه‌ها و مستندات • شرایط تضمین کیفیت (استانداردها، آزمون و ارزشیابی و ...) • توسعه اجزای سیستم (در صورت نیاز) • شبیه‌سازی و آزمون اجزای سیستم • ارزشیابی اجزای سیستم (درصورت نیاز) • تحلیل شکست اجزای سیستم و بازطراحی (درصورت نیاز) • نمونه‌سازی اولیه و ساخت سیستم • آزمون و ارزشیابی • تحلیل شکست نمونه اولیه (سیستم) و بازطراحی (درصورت نیاز) • توسعه معیارهای بازرسی و تضمین کیفیت • بازنگری داده طراحی و تصدیق داده ها • تعریف الزامات تأمین و تدارکات • تکمیل و نهایی‌سازی بسته داده فنی (TDP) و ورودی به طراحی
مفهوم	• تعریف فضای مسأله ۱. پژوهش اکتشافی ۲. گزینش مفهوم • تعیین ویژگی‌های فضای راه‌کارها • شناسایی نیازهای ذی‌نفعان • جستجوی ایده‌ها و فناوری‌ها • پالودن نیازهای ذی‌نفعان • جستجوی مفاهیم ممکن • پیشنهاد راه‌کارهای مناسب	• پالودن نیازهای ذی‌نفعان (۱، ۲، ۳) • استفاده از مفهوم طراحی بدست آمده از RE (۱، ۲، ۳) • بازتعریف مفهوم طراحی بدست آمده از RE (۲، ۳) • توسعه فناوری‌های زیرساختی (۱، ۲، ۳) • طراحی مفهومی (۱، ۲، ۳) • مستندسازی (۱، ۲، ۳)	• پالودن نیازهای ذی‌نفعان • استفاده و پالودن بسته داده فنی (TDP) و مفاهیم طراحی بدست آمده از RE • طراحی مفهومی • جستجو و توسعه فناوری‌ها و زیرساخت‌ها • مستندسازی و تکمیل بسته داده فنی
توسعه	• تعریف/پالودن الزامات سیستم • ایجاد توصیفی از راه‌کارها- معماری و طراحی • پیاده‌سازی سیستم اولیه • یکپارچه‌سازی، صحه‌گذاری و تصدیق سیستم	• طراحی اولیه (۱، ۲، ۳) • طراحی تفصیلی (۱، ۲، ۳) • توسعه ابزارها و فناوری‌های خاص (۱، ۲، ۳) • توسعه زیرسیستم‌ها و اجزا (۱، ۲، ۳) • شبیه‌سازی و آزمون زیرسیستم‌ها و اجزا (۱، ۲، ۳) • نمونه‌سازی اولیه و ساخت (۱، ۲، ۳) • یکپارچه‌سازی سیستم (۲، ۳) • تأیید سازمان طراحی (DOA) (۱، ۲، ۳) • اخذ گواهی‌نامه (TC) (۲، ۳) • تصدیق و صحه‌گذاری (۱، ۲، ۳) • مستندسازی (۱، ۲، ۳) • انتقال فناوری به واحد تولید (۱، ۲، ۳)	• استفاده و پالودن بسته داده فنی (TDP) منتقل شده از مراحل قبلی • طراحی اولیه و تفصیلی • توسعه ابزارها و فناوری‌های خاص • توسعه اجزای سیستم • شبیه‌سازی و آزمون اجزای سیستم • نمونه‌سازی اولیه سیستم و ساخت • یکپارچه‌سازی، تصدیق و صحه‌گذاری سیستم • انطباق با مقررات و استانداردها و اخذ گواهی نامه های مورد نیاز • مستندسازی و تکمیل بسته داده فنی • انتقال فناوری به واحد تولید
تولید	• تولید سیستم‌ها • بازرسی و تصدیق	• دریافت و استفاده از داده‌های فنی منتقل شده از واحد طراحی (۱، ۲، ۳) • تأیید سازمان تولید (POA) (۱، ۲، ۳) • تولید سیستم و اجزای سیستم (۱، ۲، ۳) • آزمون و تصدیق (۱، ۲، ۳)	• استفاده از بسته داده فنی (TDP) برای تولید • انطباق با مقررات و استانداردها و اخذ گواهی‌نامه‌های مورد نیاز • تولید اجزای سیستم و سیستم براساس TDP • یکپارچه‌سازی و تصدیق سیستم • تحویل سیستم و مستندات همراه به کاربر
بهره‌برداری	• به‌کارگیری سیستم به منظور برآوردن نیازهای کاربران	• عملیات و بکارگیری توسط کابران (۱، ۲، ۳) • دریافت بازخورد از کاربران (۱، ۲، ۳) • ارسال بازخورد به واحد طراحی و تولید (۱، ۲، ۳)	• عملیات و بکارگیری توسط کاربر مطابق با مستندات فنی همراه محصول • دریافت بازخورد از کاربر و ارسال آن به سازنده
پشتیبانی	• فراهم کردن قابلیت سیستم پایدار	• پشتیبانی‌های لازم از چرخه عمر محصول (۲، ۳) • خدمات نگهداری و تعمیر (۲، ۳) • شبکه‌سازی با تأمین‌کنندگان اجزا و قطعات (۱، ۲، ۳)	• پشتیبانی از چرخه عمر و ایجاد قابلیت پایداری در آن • دریافت بازخورد و ارسال به سازنده
کنارگذاری	• انبار کردن، بایگانی، یا وارهایی سیستم	تاکنون، هیچ یک از محصولات مورد مطالعه در چرخه عمر خود به این مرحله نرسیده اند، بنابراین، داده‌ای برای این مرحله ثبت نشده است.	انبار کردن، بایگانی، یا وارهایی سیستم



شکل ٦) فرایند نوآوری در CoPS براساس برهم کنش مهندسی معکوس و مهندسی رو به جلو

همان‌گونه که در شکل مشخص است، این فرایند غیرخطی، دارای ویژگی بازگشتی به مراحل قبلی است. از طرفی این فرایند به طور واقع‌بینانه و براساس داده‌های واقعی فرایند نوآوری در CoPS مورد مطالعه ترسیم شده و در واقع مدل چرخه عمر نوآوری/محصول در بخش هوانوردی تجاری کشور است. مدل‌های چرخه عمر قبلی مبتنی بر مهندسی روبه جلو و (به خاطر سادگی) عموماً به صورت خطی ترسیم شده و بدون درنظر گرفتن اقتضائات مراحل اولیه چرخه عمر محصولات هوانوردی کشور هستند. ضخامت پیکان جریان و بازخورد داده و اطلاعات بین مراحل مهندسی معکوس و رو به جلو نشان دهنده شدت جریان و بازخورد داده‌های فنی بین این مراحل به دلیل پیچیدگی بالا و تعدد پارامترهای سیستمی در CoPS است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از مطالعه چندموردی فرایندهای نوآوری مبتنی بر چرخه عمر سامانه‌های محصول‌پیچیده در صنعت هوانوردی، مدلی برای فرایند نوآوری و برهم کنش‌های مراحل آن در CoPS توسعه یافت. ابتدا با بررسی مدل‌های چرخه عمر CoPS در ادبیات مهندسی سیستم‌ها، چارچوبی مفهومی به‌منظور تحلیل‌های بعدی شکل گرفت، سپس، فرایند نوآوری مبتنی بر چرخه عمر هر محصول مبتنی‌بر شواهد و یافته‌های موجود ترسیم گردید. مطالعه بین‌موردی نشان داد با وجود تفاوت‌هایی که در مدت زمان هر مرحله و همزمانی مراحل چرخه عمر وجود دارد، ترتیب و توالی این مراحل در هر سه محصول، یکسان است. مراحل اصلی این فرایند بدین شرح است: مهندسی معکوس و بازیابی طراحی (شامل مراحل ارزشیابی و تحلیل داده‌ها، تولید بسته داده فنی، تصدیق طراحی، تکمیل بسته داده فنی و پیاده‌سازی طراحی)، مفهوم، توسعه، تولید، بهره‌برداری، و پشتیبانی.

مطالعات موردی ما چندین ویژگی بارز را درخصوص مدل نوآوری CoPS در صنعت هوانوردی ایران نشان می‌دهد: اول این‌که این مدل، سیستمی پیچیده از فرایندهایی است که دارای ویژگی‌های همزمانی، تکرارشوندگی، بازگشتی بودن و بهم وابستگی هستند. درنتیجه، مدل واقعی فرایند نوآوری می‌تواند پیچیده‌تر باشد. مدل ارائه شده در شکل٦، برآورد مناسبی از فرایندهای نوآوری در آن دسته از سامانه‌های پیچیده‌ای است که براساس ایده‌ها و داده‌های فنی حاصل از مهندسی معکوس و بازیابی طراحی شکل می‌گیرند و اصولاً حاصل تحقیق‌وتوسعه بنیادین نیستند. این مدل در مقایسه با مدل‌های چرخه عمر محصول موجود (مانند [٢٤])، که چارچوبی مشترک برای توصیف چرخه عمر CoPS توسعه داده‌اند، در وهله اول غیرخطی و واقع‌بینانه‌تر بوده و ویژگی‌های همزمانی و بازگشتی بودن را براساس داده‌های واقعی نشان می‌دهد، ضمن این‌که با کاربرد مدل مفهومی در یک بافتار مشخص، تناسب بیش‌تری با توسعه سامانه‌های پیچیده مبتنی‌بر مهندسی معکوس داشته و قابل کاربردتر است و برای اولین بار با ترکیب فرایندهای مهندسی معکوس و رو

به جلو، رویکردهای صرف فنی و ناقص مدل‌های مهندسی معکوس پیشین مانند رکاف [٤٢] و اینگل [٤٣] را نیز کامل کرده و با اتخاذ رویکردی مدیریتی و بین‌رشته‌ای، مدل نوآوری تازه‌ای مبتنی‌بر چرخه عمر برای اکتساب آن دسته از محصولات پیچیده توسعه داده که تاکنون در منابع به آن‌ها پرداخته نشده بود. نکته دیگر این‌که، مهندسی معکوس به‌عنوان روشی مهم در اکتساب فناوری‌ها و جزئی مهم از چرخه عمر محصولات پیچیده هوانوردی کشور است. مهندسی معکوس، درواقع، فعالیت استخراج دانش یا اطلاعات طراحی از محصولات یا فرایندها نامیده می‌شود، و براساس راهنمای اسلو در دسته‌بندی فعالیت‌های نوآورانه مهندسی و طراحی قرار می‌گیرد و یک فعالیت نوآورانه محسوب می‌شود که مستلزم مطالعه و یادگیری بسیار است، و از این نظر مهندسی معکوس بسیار شبیه تحقیق‌وتوسعه است [٤٧]. درونی‌سازی فناوری‌های بیرونی مانند فناوری‌های تعبیه شده در محصولات از طریق مهندسی معکوس، به‌طور قابل‌توجهی وابسته به توسعه توانمندی های نوآوری و تحقیق و توسعه داخلی هستند [٤٤] که مبنای "مهندسی روبه جلو" را شکل می‌دهد [٤٨]. طی فرایند نوآوری از این طریق، مهندسی معکوس و مهندسی روبه‌جلو باهم در تعامل هستند و برهم تأثیر متقابل می‌گذارند [٤٩]. در نتیجه، می توان گفت مهندسی معکوس بخشی اساسی از فرایند نوآوری محصول را تشکیل می دهد [٥٠].این موضوعات پیامدهای مهمی را به دنبال دارد. اول این‌که، با توجه به مصاحبه‌های انجام شده، استفاده از مهندسی معکوس در تعامل با مهندسی رو به جلو موجب کاهش زمان توسعه محصولات مورد مطالعه شده است که این موضوع با یافته‌های شارپلز[1] [٥١] نیز سازگار است. او در پژوهش خود نشان داد که چگونه مهندسی معکوس موجب کاهش زمان اکتساب زیردریایی بدون سرنشین ORCA XI توسط تیم MIT ORCA، شناورهای دریایی چینی و رآکتورهای هسته‌ای فرانسوی و درنتیجه، افزایش کارایی طراحی و توسعه آن‌ها شده است. با توجه به ماهیت پیچیده CoPS، تعامل متقابل مهندسی معکوس و مهندسی روبه جلو در فرایند نوآوری اهمیت بیش‌تری می‌یابد، زیرا به دلیل ساختار سلسله‌مراتبی محصول و تعدد روابط داخلی بین اجزا، پارامترهای بسیاری بایستی ثبت، بازتولید و بازطراحی شوند.

نکته مهم دیگر در طی فرایند نوآوری مبتنی‌بر مهندسی معکوس در CoPS، تولید، انتقال و تکامل بسته داده فنی (TDP) است. براساس استاندارد نظامی ایالات متحده آمریکا [٤٦]، تولید بسته داده فنی در سه سطح صورت می‌گیرد. هر سطح در TDP بیانگر یک پیشرفت ذاتی در طراحی از نقطه شروع آن تا تولید محصول است. سطح اول TDP معرف طراحی مفهومی، سطح دوم معرف توسعه یا ساخت نمونه اولیه، و سطح سوم معرف طرح تولید محصول می‌باشد. در مهندسی معکوس برخلاف طراحی مستقیم (مهندسی رو به جلو) توالی شکل‌گیری و تکامل TDP از سطح سوم به سطح اول صورت می‌گیرد. تکامل داده‌های فنی در هر مرحله از مهندسی معکوس منجر به تکامل دانش فنی و تحقق یک سطح از TDP از پایین به بالا می‌شود. ضمن این‌که داده‌های فنی در تمامی مراحل مهندسی معکوس طی یک روال تکرارشونده توسعه یافته و تکامل می‌یابند ([٤٢]، [٤٣]). دستیابی به سطح سوم TDP از طریق مهندسی معکوس، موجب شکل‌گیری بخشی از داده‌ها و اطلاعات ساخت و تولید محصول شده و در صورتی که فرایند در این‌جا متوقف شود، نتیجه آن در مهندسی معکوس، فقط کپی‌سازی است، بدون این‌که بتوان به دانش اصلی طراحی و توسعه محصول دست یافت. با پیشرفت در مهندسی معکوس و تکامل بیش‌تر داده‌های فنی، سطح دوم TDP محقق می‌شود. در این مرحله تیم مهندسی معکوس با استفاده از بسته داده‌های فنی ایجاد شده، تا اندازه‌ای قادر است شکست‌ها و موفقیت‌های خود را در آزمون‌های عملیاتی نمونه‌های اولیه محصول، تحلیل کرده و حتی راه حل ارائه دهد. پیشرفت تا سطح اول TDP نیز به‌منزله دستیابی به دانش طراحی محصول و بازیابی طراحی به‌طور کامل است. در این مرحله تیم مهندسی معکوس، قابلیت بازطراحی محصول و درنتیجه، خلق یک محصول نوآورانه را دارد. دستیابی به این مرحله از مهندسی معکوس به‌ویژه در سامانه‌های محصول‌پیچیده به‌طور قطع در تعامل با مهندسی رو به جلو قابل انجام است. لازم به ذکر است که در هر سه محصول موردمطالعه، دستیابی به داده‌های سطح مفهومی از طریق برهم کنش‌های همزمان و تکرارشونده بین

[1] Sharples

مهندسی معکوس و مهندسی روبه جلو امکان‌پذیر شده، از این رو قابلیت بازطراحی محصولات (طراحی نوآورانه) در هر سه محصول به دست آمده است. شکل ۷ هر یک از سطوح TDP و ارتباط آن را با هر مرحله از مهندسی معکوس به‌صورت شماتیک در هر سه محصول مورد مطالعه نشان می‌دهد. شکل ۷ نشان می‌دهد که تکامل بسته داده فنی و شکل‌گیری مفاهیم محصول مستلزم تعامل و برهم کنش مهندسی معکوس و مهندسی رو به جلو طی فرایند نوآوری محصول می‌باشد. با افزایش پیچیدگی محصول شدت جریان داده‌های فنی (مهندسی معکوس (بازیابی طراحی) و مهندسی رو به جلو) بین مراحل بیش‌تر می‌شود.

مدل پیشنهادی برای CoPS (شکل ٦) از یک طرف، در مقایسه با فرایندهای مهندسی معکوس موجود (مانند [٤٢]، [٤٣]، [٤٥])، دیدگاهی جامع‌تر، کاربردی‌تر و سیستماتیک‌تر دارد، زیرا اولا با فرایند نوآوری و چرخه عمر CoPS سازگارتر است و دوم، با توجه به پیچیدگی سیستمی و تعدد اجزا در CoPS، و با درنظرگرفتن این که در مرحله تولید بسته داده فنی دستیابی به دانش فنی پیکره‌بندی طراحی و الزامات واسطه‌ای[1] بین اجزای CoPS مستلزم دستیابی به داده‌های سطح مفهومی و ایده طراح است [٤٦]، ارتباط متقابل و همزمان با طراحی و تحقیق‌وتوسعه را به منظور توسعه یک محصول نوآورانه در نظر می‌گیرد. به عنوان مثال، هر چند فرایند مهندسی معکوس ارائه شده توسط رکاف [٤٢] دیدگاهی نظام مند به مهندسی معکوس دارد، اما ارتباط بین آن را با مهندسی رو به جلو در نظر نمی‌گیرد. فرایند اینگل [٤٣] تاحدودی این موضوع را بررسی می کند، اما هدف آن بیشتر بازیابی طراحی برای رسیدن به یک محصول مشابه بوده و فاقد دیدگاه یکپارچه بین مهندسی معکوس و رو به جلو در فرایند نوآوری به ویژه در مورد محصولات پیچیده است. از طرف دیگر، این مدل در مقایسه با مدل‌های چرخه عمر محصول موجود (مانند استاندارد ISO/IEC/IEEE 15288 ([٢٤]))، که چارچوبی مشترک برای توصیف چرخه عمر CoPS توسعه داده است، تناسب بیش‌تری با توسعه سامانه‌های پیچیده مبتنی‌بر مهندسی معکوس در صنعت هوانوردی کشور دارد و قابل کاربردتر است. همچنین، یافته‌های ما با نتایج پژوهش‌های میلر و همکاران [۱۸] درخصوص ویژگی‌های نوآوری در CoPS در صنعت هوانوردی، و نیز یافته‌های پرنسیپ [۲۷] و [۲۸] درخصوص حفظ قابلیت‌های یکپارچه‌سازی سیستم در بنگاه، و نیز یافته‌های لی و یون [۳۰] درخصوص استفاده از مهندسی معکوس در زمان نقش غیرفعال شرکای خارجی سازگاری دارد (به جدول ۱ رجوع کنید).

یادآوری این نکته مهم است که مدل فرایندی پیشنهادی، بینش جدیدی را درزمینه اکتساب CoPS فراهم می‌کند که می‌تواند برای مدیریت نوآوری CoPS در اقتصادهای نوظهور مفید و کاربردی باشد. به‌ویژه برای آن دسته از سازمان‌هایی که از مهندسی معکوس به‌عنوان ابزاری برای تولید ایده، داده و دانش فنی برای کاهش زمان و هزینه‌های اکتساب در CoPS، استفاده می‌کنند، می‌تواند بسیار سودمند باشد و به مدیریت زمان و هزینه‌های چرخه عمر محصول کمک کند.

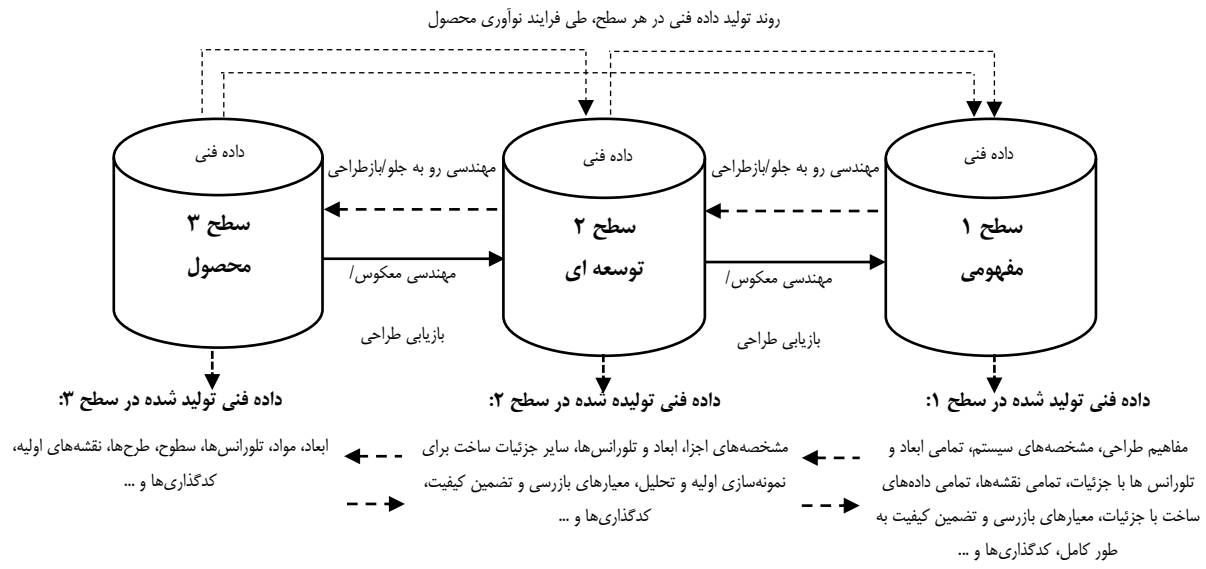
از محدودیت‌های این پژوهش، عدم دسترسی به داده‌های مراحل پشتیبانی از چرخه عمر محصول مورد مطالعه اول (موتور توربوفن) و مورد مطالعه سوم (هواپیمای دوزیست) است که به دلیل برنامه پیشرفت پروژه، هنوز به این مراحل نرسیده‌اند. همچنین، با توجه به تسلط دانش فنی و اشراف اطلاعاتی مورد نیاز در هر پروژه، مصاحبه‌ها براساس نمونه‌گیری هدفمند انجام شد، از این رو، تعداد افراد مصاحبه‌شونده در هر پروژه محدود بود.

همچنین، این مطالعه تنها با تمرکز بر فرایندهای فنی (مراحل و مدل چرخه عمر) رویکرد مهندسی سیستم انجام شد و سعی کرد به مفاهیم مشترک فرایند نوآوری و چرخه عمر CoPS در بافتار مدیریت نوآوری و مهندسی سیستم بپردازد. با توجه به این که فرایندهای چرخه عمر سیستم در رویکرد مهندسی سیستم افزون‌بر فرایندهای فنی، شامل فرایندهای مدیریت فنی[2] و توافق[3] نیز می‌باشند [٢٤]، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی با تمرکز بر این موضوعات، دیدگاه‌های گسترده‌تری درخصوص مفاهیم و فرایندهای مشترک بین مهندسی سیستم و مدیریت نوآوری شناسایی شود.

[1] Interface requirements

[2] Technical management processes

[3] Agreement processes



شکل ۷) روند تطور بسته داده فنی طی فرایند مهندسی معکوس و مهندسی رو به جلو

منابع References

[1] Simon, H.A. (1962). **The architecture of complexity.** Proceedings of the American Philosophical Society, 106(6), 467-482.

[2] Hobday, M., Rush, H., & Joe, T. (2000). **Innovation in complex products and systems**. *Research policy*, 29(7-8), 793-804.

[3] Davies, A., & Hobday, M. (2005).**The business of projects: managing innovation in complex products and systems.** Cambridge University Press.

[4] Hobday, M. (1998). **Product complexity, innovation and industrial organisation**. *Research policy*, 26(6), 689-710.

[5] Davies, A. (1997). **The life cycle of a complex product system.** *International Journal of Innovation Management*, 1(03), 229-256.

[6] Safdari Ranjbar, M., Park, T. Y., & Kiamehr, M. (2018). **What happened to complex product systems literature over the last two decades: progresses so far and path ahead.** *Technology Analysis & Strategic Management*, 30(8), 948-966.

[7] Bonaccorsi, A., & Giuri, P. (2000**). When shakeout doesn't occur: the evolution of the turboprop engine industry.** *Research Policy*, 29(7-8), 847-870.

[8] Arasti, Mohammad Reza (2021). **Guest Editor: About this special issue and complex product systems (SAMP).** *Science and Technology Policy*, 13 (4), 1-1. {In Persian}.

[9] Bhise, V. D. (2013). **Designing complex products with systems engineering processes and techniques**. CRC Press.

[10] INCOSE, B. (2015). **Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities.** San Diego, US-CA: International Council on Systems Engineering.

[11] Usher, A. P. (1955). **Technical change and capital formation. In Capital formation and economic growth** (pp. 523-550). Princeton University Press.

[12] Knight, K. (1967). **A descriptive model of the intra-firm innovation process**. *The Journal of Business*, 40(4), 478–496.

[13] Bessant, J., & Tidd, J. (2007). **Innovation and entrepreneurship.** *Chichester: John Wiley*.

[14] Rothwell, R., (1994). **Towards the fifth-generation innovation production process**. *Overseasmarketing* Rev. 11 (1), 7–31.

[15] Rogers, E.M., (1995). **Diffusion of Innovations.fourth ed.** The Free Press, New York.

[16] Galanakis, K. (2006). **Innovation process. Make sense using systems thinking** .*Technovation*, 26(11), 1222-1232.

[17] Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., ... & Karol, R. (2001**). New concept development model: Providing clarity and a common language to the "fuzzy front end".** *Research-Technology Management*, 44(2), 46-55.

[18] Miller, R., Hobday, M., Leroux-Demers, T., & Olleros, X. (1995). **Innovation in complex systems industries: the case of flight simulation**. *Industrial and corporate change*, 4(2), 363-400.

[19] ISO/IEC TS 24748-1, 2016. Standard ISO/IEC TS 24748-1:2016 Systems and software engineering — Life cycle management, part 1: guidelines for life cycle management.

[20] Van de Ven, A. H., & Poole, M. S. (1995). **Explaining development and change in organizations**. *Academy of management review*, 20(3), 510-540.

[21] Utterback, J. M., & Abernathy, W. J. (1975). **A dynamic model of process and product innovation**. *Omega*, 3(6), 639-656.

[22] Abernathy, W. J., & Utterback, J. M. (1978). **Patterns of industrial innovation.** *Technology review*, 80(7), 40-47.

[23] Hirshorn, S. R., Voss, L. D., & Bromley, L. K. (2017). **Nasa systems engineering handbook**.

[24] ISO/IEC/IEEE, 2015. Standard ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering — System life cycle processes.

[25] Forsberg, K., Mooz, H., & Cotterman, H. (2005). **Visualizing project management: models and frameworks for mastering complex systems.** John Wiley & Sons.
[26] Instruction, 5000.02, Operation of the defense acquisition system, 7 January 2015. U.S. Department of Defense, Washington, DC, 2015.
[27] Prencipe, A. (1997). **Technological competencies and product's evolutionary dynamics a case study from the aero-engine industry**. *Research policy*, 25(8), 1261-1276.
[28] Prencipe, A. (2000). **Breadth and depth of technological capabilities in CoPS: the case of the aircraft engine control system.** *Research policy*, 29(7-8), 895-911.
[29] Brusoni, S., Prencipe, A., & Pavitt, K. (2001). **Knowledge specialization, organizational coupling, and the boundaries of the firm: why do firms know more than they make?**. *Administrative science quarterly*, 46(4), 597-621.
[30] Lee, J. J., & Yoon, H. (2015). **A comparative study of technological learning and organizational capability development in complex products systems: Distinctive paths of three latecomers in military aircraft industry**. *Research policy*, 44(7), 1296-1313.
[31] Naghizadeh, M., Manteghi, M., Ranga, M., & Naghizadeh, R. (2017). **Managing integration in complex product systems: The experience of the IR-150 aircraft design program.** *Technological forecasting and social change*, 122, 253-261.
[32] Tahmasebi, S., Fartookzadeh, H., Bushehri, A., Tabaian, K., & Khelejani, J. G. (2017). **The Stages of Formation and Development of Technological Capabilities; Case study: An marine Industry Organization.** *Journal of Science and Technology Policy*, 8(4).{In Persian}.
[33] Kiamehr, M. (2017). **Paths of technological capability building in complex capital goods: The case of hydro electricity generation systems in Iran**. *Technological Forecasting and Social Change*, 122, 215-230.
[34] Majidpour, M. (2016).**Technological catch-up in complex product systems**. *Journal of Engineering and Technology Management*, 41, 92-105.
[35] Safdari, R. M., Rahmanseresht, H., Manteghi, M., & Ghazinoori, S. (2018). **Sectoral Innovation System of a Complex Product System Industry: Gas Turbine.** *Journal of Science and Technology Policy* {In Persian}.
[36] Yin, R. K. (2017). **Case study research and applications: Design and methods**. *Sage publications*.
[37] Eisenhardt, K. M. (1989). **Building theories from case study research**. *Academy of management review*, 14(4), 532-550.
[38] Ragin, C. C. (1987). **The comparative method: Moving beyond qualitative and quantitative strategies.** *Univ of California Press.*
[39] Miles, M.B., Huberman, A.M. and Saldaña, J., 2018. **Qualitative data analysis: A methods sourcebook**. *Sage publications.*
[40] Ford, S.J., Routley, M., Phaal, R., O'Sullivan, E., Probert, D.R., (2011). **Expert Scan: Guidance For Interview-Based Mapping Of Historical Industrial Emergence, Evolution, Development And Change.** Institute for Manufacturing, Cambridge.
[41] Henderson, R. M., & Clark, K. B. (1990). **Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms.** *Administrative science quarterly*, 9-30.
[42] Rekoff, M. G. (1985). On reverse engineering. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, (2), 244-252.
[43] Ingle, K. A. (1994). **Reverse engineering.** McGraw-Hill Professional Publishing.
[44] Zhang, G. and Zhou, J., (2016). **The effects of forward and reverse engineering on firm innovation performance in the stages of technology catch-up: An empirical study of China.** *Technological forecasting and social change*, *104*, pp.212-222.
[45] Otto, K.N. and Wood, K.L.(1998). **Product evolution: a reverse engineering and redesign methodology**. *Research in engineering design*, *10*(4), pp.226-243.
[46] MIL-STD-31000B, 2018. MILITARY STANDARD: TECHNICAL DATA PACKAGE (TDP) (31-OCT-2018).
[47] Nelson, R. R. (Ed.). (1993). **National innovation systems: a comparative analysis.** Oxford University Press on Demand.
[48] Lu, Q., 2011. **China's leap into the information age: innovation and organization in the computer industr**. *Oxford University Press*.
[49] Chikofsky, E. J., & Cross, J. H. (1990). **Reverse engineering and design recovery: A taxonomy.** IEEE software, 7(1), 13-17.
[50] Trott, P. and Hoecht, A., (2007). **Product counterfeiting, non-consensual acquisition of technology and new product development**. *European Journal of Innovation Management*.
[51] Sharples, R. E. (2010). The efficiency of reverse engineering in the design of the ORCA XI autonomous underwater vehicle by Rachel E. Sharples (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).