

## ارزیابی سطح بلوغ فناوری و برآورد هزینه‌های مرتبط با آن

### در زیردریایی کلاس سبک

ام‌البنین یوسفی<sup>۱\*</sup>

مهدی قاسمیان<sup>۲</sup>

ندا حاج‌حیدری<sup>۳</sup>

#### چکیده

فرایند تعیین و اندازه‌گیری سطح بلوغ فناوری و برآورد هزینه توسعه آن برای سازمان‌های پیشرو در تحقیق و توسعه، امری مهم تلقی می‌شود. در این رابطه نیاز است تا رویکردهای بومی متناسب با شرایط حاکم بر فضای کشور، ایجاد شده و توسعه داده شوند. این پژوهش، به دنبال ایجاد و توسعه چنین رویکردی برای دستیابی به فناوری‌های دومانظوره در یک زیردریایی کلاس سبک انجام شد. فناوری مذکور، نتیجه تحقیق و توسعه داخلی در بازه سال‌های ۹۷-۹۶ در یکی از صنایع نظامی بوده است. بدین منظور، ابتدا با استفاده از دو ماتریس خانه کیفیت، خواسته‌های اصلی مشتریان و الزامات کارکردی-عملکردی تشریح و سطح فناوری مشخص شد. سپس، به تعیین و تجزیه و تحلیل شکاف موجود در سطح فناوری فعلی پرداخته شد و با استفاده از مشخصه‌های فنی فناوری، آمادگی آن به صورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، با تعیین سطح آمادگی فناوری، هزینه‌های موجود فناوری حاضر، توسط تکنیک هزینه بر مبنای فعالیت محاسبه شد. نتایج نشان داد که فناوری مذکور سطح ۴ را به پایان رسانده و اکنون در سطح ۵ قرار دارد. رویکرد ارائه‌شده را می‌توان به‌عنوان راهنمایی برای بخش تحقیق و توسعه سازمان‌ها مورد استفاده قرار داد.

#### واژه‌های کلیدی:

توسعه فناوری، بلوغ فناوری، ارزیابی آمادگی فناوری، سطوح آمادگی فناوری.

۱. عضو هیئت علمی، مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: yousefi\_1302@yahoo.com

۲. کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان.

۳. کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان.

## مقدمه

انتخاب و اکتساب فناوری‌های پیچیده و نوظهور، برای سازمان‌های صنعتی یا نظامی دارای اهمیت راهبردی است. اغلب سازمان‌های صنعتی برای حفظ جایگاه خود در عرصه رقابت داخلی و جهانی و کسب بازار بیش‌تر از فناوری‌های جدید استفاده می‌کنند. صنایع نظامی نیز به‌منظور بالا بردن توان امنیتی و دفاعی کشور و افزایش استقلال و اقتدار درصدد دستیابی به جدیدترین و کارآمدترین فناوری‌ها می‌باشند (صادق‌عمل‌نیک، ۱۳۸۴).

در سازمان‌های صنعتی ایران به دلایل مختلف (فرهنگی، تاریخی، تحریم و غیره)، اکتساب فناوری‌ها اغلب به شکل انتقال فناوری از خارج (البته با تأخیر زمانی زیاد) صورت می‌گیرد. استفاده از این رویکرد برای صنایع دفاعی امکان‌پذیر نبوده و این صنایع برای حفظ و ارتقای قدرت بازدارندگی دفاعی (با توجه به تهدیدهای روزافزون در حوزه فناوری‌های نظامی)، ناگزیر به انتخاب رویکرد اکتساب فناوری‌های نوظهور از طریق شیوه‌هایی مانند تحقیق و توسعه هستند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

اکتساب فناوری از طریق تحقیق و توسعه، به‌طور معمول چالش‌های متعددی را پیش روی سازمان‌ها قرار می‌دهد. از جمله این موارد، هزینه‌های سنگین و زمان‌بر بودن آن‌ها است. بر اساس اسناد منتشره ناسا، به‌طور میانگین توسعه یک فناوری جدید (از ابتدا تا زمانی که بتوان آن را مورد استفاده قرار داد) ۱۲ سال به طول می‌انجامد (فولادی و نیوری‌زاده، ۱۳۹۱). از دیگر چالش‌های اکتساب از طریق تحقیق و توسعه، مسئله انتخاب مناسب‌ترین فناوری با توجه به اهداف حال و آینده سازمان است. تصمیم نادرست می‌تواند فاجعه‌بار باشد. چراکه علاوه بر صرف زمان و اعتبارها، به خارج شدن از گردونه رقابت یا سلب فرصت پاسخ به تهدیدها نیز منجر خواهد شد. در این میان، داشتن ارزیابی درست از وضعیت بلوغ فناوری و کسب اطمینان از امکان‌پذیری توسعه آن در داخل سازمان یا کشور و نیز وجود برآورد واقع‌بینانه از هزینه‌های توسعه، دو فاکتور اساسی در تحلیل موضوعات یاد شده است. نکته قابل توجه این است که با توجه به تحقیقات انجام‌شده در مطالعه‌های داخلی و خارجی، مسائل بسیاری چه از نظر ساختاری و چه از نظر سازمان‌دهی در مواجهه با ارزیابی فناوری ایجاد می‌شود؛ بنابراین، استفاده از یک سیستم اندازه‌گیری مناسب برای تخمین وضعیت آمادگی فناوری امری ضروری تلقی می‌شود. علاوه بر این، در بیش‌تر موارد به‌منظور ارزیابی یک فناوری تنها عوامل فنی را اندازه‌گیری می‌کنند و به جنبه‌های دیگر برنامه نظیر هزینه و سایر موارد نمی‌پردازند (منکینس، ۲۰۰۹). در صنایع و

مراکز تحقیقاتی ایران برخلاف سایر کشورها (که فعالیت‌های تحقیق و توسعه آن‌ها بر پایه اصول فرآیند مهندسی سیستم انجام می‌شود) ادبیات یکسانی در امر تحقیق و توسعه وجود نداشته و کلیه این فعالیت‌ها بر اساس ذهنیات یا تجربه‌های مشابه انجام می‌شود. همچنین در کشورهای پیشرفته، جغرافیای ارزیابی فناوری کل جهان است؛ به این معنی که ممکن است یک فناوری در کشورهای دیگر بالغ شده باشد، اما برای کشوری نظیر ایران به علت شرایط حاکم بر آن (اعم از تحریم‌ها و فشارهای جهانی) در دسترس نباشد (فولادی و نپوری‌زاده، ۱۳۹۱).

با توجه به مسائل مطرح‌شده فوق و مسائلی که سازمان‌های فناوری محور دنبال می‌کنند، بحث بومی‌سازی و اکتساب فناوری در اولویت قرار می‌گیرد. لذا، سیر و توسعه فناوری‌های برتر، بلوغ فناوری و همچنین دسته‌بندی و برآورد هزینه‌های فناوری مورد نظر از مباحث مهم در صنایع فناوری محور است. سازمان دفاعی، از جمله صناعی است که برخلاف سایر صنایع برای توسعه محصولات خود نیازمند اکتساب فناوری‌های نوظهور است. از طرف دیگر، در بیش‌تر موارد پروژه‌های کاربردی و صنعتی از فناوری‌های بالغ شده در سطح دنیا استفاده می‌کنند و معمولاً با فناوری‌هایی که موجود نیستند و یا باید به وجود بیایند، سروکار ندارند. محصولی که در این پژوهش مورد بررسی گرفته است، از جمله این فناوری‌ها است. این فناوری در نوع خود نوظهور، زیرساختی و با کاربردی دومنظوره (تجاری-نظامی) است. محققان این سازمان موفق شده‌اند طی چندین سال تلاش و در شرایط تحریم همه‌جانبه، نمونه‌ای آزمایشگاهی و اولیه از این محصول را ساخته و امکان‌پذیری فنی طراحی و ساخت داخلی این فناوری پیشرفته را تا حد زیادی به اثبات برسانند. آنچه در تحقیق حاضر به‌عنوان سؤال اصلی مطرح می‌شود این است که؛ «چگونه می‌توان به‌صورت تقریبی سطح آمادگی فعلی برای این فناوری نوظهور را شناسایی و تعیین کرد» و «چگونه می‌توان برآورد هزینه دستیابی به سطح بلوغ فناوری را به همراه تجزیه‌وتحلیل و دسته‌بندی هزینه‌ها انجام داد؟».

در ادامه تحقیق حاضر، ابتدا مروری بر پیشینه تحقیق انجام می‌شود. سپس مراحل انجام تحقیق تشریح شده و پس‌از آن، یافته‌های تحقیق به‌صورت گام‌به‌گام تجزیه‌وتحلیل شده‌اند. درنهایت نیز نتایج حاصل از انجام پژوهش و محدودیت‌های آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

### تعیین سطح فناوری

بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط وهاب و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۲)، فناوری همواره با دستیابی به نتایج خاص، حل برخی از مشکل‌ها و انجام برخی از وظایف همراه بوده و در این زمینه از مهارت‌های خاص، دانش و دارایی‌ها استفاده می‌کند. از طرف دیگر، فناوری را می‌توان متشکل از دو مؤلفه اصلی در نظر گرفت: مؤلفه فیزیکی که شامل مواردی مانند محصولات، ابزار، تجهیزات، طرح‌ها، تکنیک‌ها و فرایندهاست و مؤلفه اطلاعاتی که شامل مهارت در مدیریت، بازاریابی، تولید، کنترل کیفیت، قابلیت اطمینان و زمینه‌های کارکردی است.

مطابق با نظر لزاما نیکولاس و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸)، استفاده از فناوری‌های جدید دارای پتانسیل رقابتی زیادی هستند. از این رو، همواره خطرهای زیادی در این زمینه وجود دارد. به‌منظور تعیین میزان موفقیت یک فناوری، می‌توان بلوغ آن فناوری<sup>۳</sup> را مورد بررسی قرار داد. ارزیابی بلوغ فناوری و تجزیه و تحلیل‌های مربوط به آن نشان می‌دهد که آیا توسعه یک فناوری می‌تواند وظیفه مورد انتظار را برآورده سازد یا خیر؟ بلوغ فناوری، عملکرد فعلی و فرضی فناوری را در بر می‌گیرد. عملکرد فناوری بر اساس پارامترهای عملکردی خاص آن فناوری و در طی دوره بلوغ آن تعیین می‌شوند. این پارامترها در طول یک منحنی S شکل از سطح بسیار پایین به سمت حداکثر عملکرد توسعه می‌یابند (آلبرت<sup>۴</sup>، ۲۰۱۶). لیلجاندنر و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۶)، ارزیابی آمادگی فناوری<sup>۶</sup> را فرایندی نظام‌مند در نظر می‌گیرند. این فرایند به ارزیابی و اندازه‌گیری بلوغ فناوری‌های معینی که در سامانه‌ها یا محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد، کمک می‌کند. یکی از روش‌هایی که به کمک آن می‌توان بلوغ یک فناوری را ارزیابی نمود، مدل سطح آمادگی فناوری (TRL)<sup>۷</sup> است. مدل سطح آمادگی فناوری، با هدف ارزیابی سطح بلوغ یک فناوری خاص برای اولین بار توسط سازمان ناسا<sup>۸</sup> مطرح گردید و تحت عنوان سیستم

1 . Wahab et al.

2 . Lezama-Nicolas et al.

3 . Technology Maturity

4 . Albert

5 . Liljander et al.

6 . Technology Readiness of Assessment

7 . Technology Readiness Level (TRL)

8 . National Aeronautics and Space Administration (NASA)

اندازه‌گیری در نظر گرفته شد (آلتونک و ککمک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰). کنلی و الخوری<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، این مدل را به‌عنوان ابزاری در نظر می‌گیرند که می‌تواند به تعیین سطح مشخصی از وضعیت خاص یک سیستم پرداخته و به‌عنوان استاندارد مفید و کوتاه برای ارزیابی و طبقه‌بندی بلوغ فناوری (در چرخه عمر) استفاده شود. مطابق با نظر این نویسندگان، گسترش این مدل به‌صورت گسترده به ایجاد یک استاندارد عمومی منجر خواهد شد که می‌تواند به مدل‌های سه‌بعدی مرتبط شود.

باچنر و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۸)، نیز سطح آمادگی فناوری را به‌عنوان یک مفهوم رایج در ارزیابی بلوغ تحقیق و توسعه در نظر گرفته‌اند که بر مبنای اطلاعات موجود بلوغ فناوری را اندازه‌گیری می‌نماید و در پروژه‌های تحقیق و توسعه صنعتی، دانشگاهی و دولتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نظر آنان تعیین معیارهای یکسان برای جمع‌آوری اطلاعات سطوح مختلف فناوری در صنایع گوناگون اشتباه رایجی است. از این‌رو، باید برای هر صنعت معیارهای خاصی در نظر گرفت (معیارهایی که برای هر صنعت بومی‌سازی شده‌اند) و اطلاعات موجود برای تجزیه و تحلیل بلوغ فناوری در این صنعت را مطابق با این معیارها جمع‌آوری نمود. بر اساس نظر منکینس<sup>۴</sup> (۱۹۹۵)، مقیاس سطح آمادگی فناوری یک‌باره ظاهر نشد، بلکه در طی سه مرحله ظهور یافت و به همین ترتیب در طول چند دهه در جامعه مدیریت هوافضا و سیستم‌های پیشرفته فناوری مورد پذیرش قرار گرفت. سطح آمادگی فناوری، برای اولین بار در دهه ۸۰ میلادی مطرح گردید. در این زمان، سطوح آمادگی فناوری شامل هفت سطح بود و توسط سادین و همکاران<sup>۵</sup> تعریف شده بود (نولت<sup>۶</sup>، ۲۰۰۸). پس‌از آن، این سطوح توسط منکینس (۲۰۰۲) تا نه سطح افزایش یافت. مطابق جدول ۱ هر یک از این سطوح دارای تعاریف مشخصی می‌باشند.

مطابق با تحقیقات صورت گرفته توسط شنسی و همکاران<sup>۷</sup> (۱۹۹۹)، سازمان حسابداری آمریکا (گائو)<sup>۸</sup> بررسی گسترده‌ای در خصوص استفاده از سطح آمادگی فناوری در پروژه‌ها و طرح‌های تحقیقاتی دفاعی انجام داده و در نهایت به وزارت دفاع آمریکا پیشنهاد کرده است که از این ابزار در ارزیابی بلوغ فناوری برنامه‌های دفاعی خود استفاده کند. سازمان مذکور، در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیده

1 . Altunok & Cakmak

2 . Kenley & El-Khoury

3 . Buchner et al.

4 . Mankins

5 . Sadin et al.

6 . Nolte

7 . Schinasi et al.

8 . Government Accountability Office (GAO)

است که هرچه فناوری در شروع بالغ تر باشد موفقیت برنامه در دستیابی به اهدافش محتمل تر است و استفاده از فناوری‌های نابالغ در توسعه یک محصول باعث افزایش قیمت و تأخیر در برنامه خواهد شد. بررسی پروژه‌های مختلف دفاعی و غیر دفاعی توسط بخش‌های مختلف سازمان دفاع آمریکا نشان داده است که چنانچه سطح آمادگی یک فناوری پایین تر از سطح شش یا هفت باشد احتمال بروز خطر در پروژه بالا خواهد بود اما پس از گذر از این سطح به شدت کاهش می‌یابد.

جدول ۱: توصیف سطوح نه‌گانه آمادگی فناوری توسط ناسا (منکینس، ۲۰۰۲)

ردیف	سطح آمادگی فناوری	توصیف
۱	اصول پایه مشاهده و گزارش شد	این سطح، پایین‌ترین سطح بلوغ فناوری است. در این سطح تحقیقات علمی پایه انجام می‌گردد و به‌عنوان مبنایی برای تحقیقات و توسعه‌های کاربردی در نظر گرفته می‌شود.
۲	شکل‌گیری مفهوم / کاربرد فناوری	در این سطح، می‌توان کاربردهای عملی مشخصه‌های فناوری مورد نظر را شناسایی کرد. گفتنی است که در این سطح، کاربردها هنوز ذهنی و گمانی هستند و تجزیه و تحلیل مفصل در خصوص اثبات آن‌ها صورت نگرفته است.
۳	اثبات مفهومی مشخصه‌های کلیدی به‌صورت نظری و تجربی	این سطح با فرایند بلوغ تحقیق و توسعه فعال شروع می‌شود. فعالیت‌های تحقیق و توسعه باید شامل مطالعه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی باشند و نتایج حاصل از مفاهیم و کاربردهای فرموله شده در سطح ۲ را به اثبات برسانند.
۴	تأیید مؤلفه / نمونه تابلویی <sup>۱</sup> در محیط آزمایشگاه	در این سطح، مؤلفه‌های اصلی فناوری مورد نظر یکپارچه شده و اثبات می‌شود که اجزا با یکدیگر کار کرده و عملکرد مورد نظر را در محیط آزمایشگاه مهیا می‌سازند. به‌عبارت‌دیگر، در این سطح اجزا به‌صورت دستی، موقت و مجزا بر روی میز آزمایشگاه به هم وصل شده‌اند.
۵	تأیید مؤلفه / نمونه تابلویی در محیط مرتبط با کاربرد	در این سطح، مؤلفه‌های اصلی فناوری بر عناصر واقعی متکی شده و می‌توان در یک محیط شبیه‌سازی شده کاربردها را در سطح مؤلفه، زیرسامانه و سامانه آزمون نمود.
۶	نمایش مدل سامانه / زیرسامانه یا نمونه در محیط مرتبط با کاربرد	در این سطح، مدلی از سامانه یا نمونه اولیه از آن در یک محیط مرتبط آزمون می‌شود. در صورتی که محیط مرتبط یک محیط فضایی باشد می‌بایست مدل یا نمونه در فضا به نمایش گذاشته شود.

ردیف	سطح آمادگی فناوری	توصیف
۷	نمایش نمونه سامانه در محیط عملیاتی	در این سطح، نمونه‌ای از سامانه واقعی در محیط واقعی به نمایش گذاشته می‌شود. این نمونه باید نزدیک به سامانه عملیاتی اصلی یا در مقیاس همانند آن بوده و در محیط عملیاتی مورد آزمایش قرار گیرد.
۸	بررسی کیفیت سامانه واقعی کامل شده از طریق آزمون و نمایش	این سطح، پایان فرایند توسعه فناوری را نشان می‌دهد. در این حالت فناوری جدید با سامانه موجود یکپارچه می‌شود.
۹	اثبات عملکرد سامانه واقعی در مأموریت‌های عملیاتی	در این سطح، عیب و ایرادهای احتمالی برطرف می‌گردد.

در جدول فوق، منظور از نمونه آزمایشگاهی<sup>۱</sup> عبارت است از اجزای یکپارچه‌ای که نمایشی از یک سیستم/ زیرسیستم را ارائه کرده و می‌تواند برای تعیین شدنی بودن سیستم و توسعه داده‌های فنی، مورد استفاده قرار گیرد. معمولاً چنین نمونه‌ای برای استفاده‌های آزمایشگاهی طراحی می‌شود تا کارکردها و اصول فنی را بدون توجه به شکل و اندازه، در معرض نمایش قرار دهد. این نمونه، شباهتی به محصول نهایی ندارد اما در کارایی همانند سیستم/ زیرسیستم نهایی عمل می‌کند.

نمونه اولیه<sup>۲</sup> کارایی محصول نهایی را نشان می‌دهد و از نظر شکل و اندازه باید در مقیاسی باشد که بتوان موارد حیاتی مورد نیاز در محصول نهایی را بررسی کرد. این نمونه را می‌توان به‌عنوان اولین نمونه مهندسی در نظر گرفت.

محیط عملیاتی<sup>۳</sup>، محیطی است که دارای تمام نیازمندی‌های عملیاتی و مشخصه‌های مورد نیاز برای سیستم نهایی بوده و قرار است محصول نهایی در آن به کار گرفته شود. محیط مرتبط<sup>۴</sup>، محیطی برای آزمون کردن است که جنبه‌های کلیدی محیط عملیاتی، مانند مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی را شبیه‌سازی می‌کند. محیط آزمایشگاهی<sup>۵</sup> نیز محیطی است که برای آزمون مفاهیم اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد و شباهتی به محیط عملیاتی ندارد (فولادی و نپوری زاده، ۱۳۹۱).

1 . Breadboard

2 . Prototype

3 . Operational Environment

4 . Relevant Environment

5 . Laboratory Environment

مطابق با نظر گریتنجر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۲)، به منظور تعیین سطح فناوری مورد نظر می توان از ابزار محاسبه کننده سطح آمادگی فناوری<sup>۲</sup> استفاده کرد. این ابزار به منظور ارزیابی فناوری از مجموعه سؤال هایی در نرم افزار اکسل استفاده می کند. با پاسخ به این سؤال ها (به صورت بله / خیر) می توان سطح آمادگی فناوری را تعیین کرد. لازم به ذکر است که این سؤال ها استاندارد بوده و می توانند برای هر فناوری در حال توسعه ای، اعم از سخت افزاری و نرم افزاری مورد استفاده قرار گیرند. نسخه اصلی محاسبه کننده مدل سطح آمادگی فناوری توسط دپارتمان انرژی<sup>۳</sup> (۲۰۰۷) ارائه شده و محدود به سؤال هایی تا TRL۶ است؛ زیرا هدف اصلی مرکز تحقیقات نیروی هوایی ایالت متحده رسیدن فناوری به TRL۶ بوده است. این در حالی است که در نسخه کامل آن که در ویرایش ۲،۲<sup>۴</sup> AFRL ارائه شده، سؤال های مربوط به سطوح نه گانه فناوری آورده شده است. مطابق این ویرایش تعداد سؤال های TRL۱ تا TRL۹ به ترتیب عبارت است از: ۱۲، ۲۶، ۳۱، ۴۴، ۴۷، ۴۶، ۲۹، ۲۲ و ۱۴ عدد.

نکته حائز اهمیت این است که این سؤال ها دارای دسته بندی خاصی نمی باشند و این مسئله خودارزیابی فناوری را دچار مشکل می کند. مطابق با تحقیقات انجام شده در این پژوهش در گزارش شرکت نیکسوز (در خروجی یکی از جداول آن) به دسته بندی سؤال های مدل سطح آمادگی فناوری اشاره شده است. این دسته بندی، بر اساس معیارهای ارائه شده در جدول ۲ صورت گرفته است (گزارش رولین<sup>۵</sup>، ۲۰۱۴).

- 
- 1 . Graettinger et al.
  - 2 . Technology Readiness Level Calculator
  - 3 . Department of Energy
  - 4 . Air Force Research Laboratory (AFRL)
  - 5 . Rolin



جدول ۲: معیارهای دسته‌بندی سؤال‌های مدل سطح آمادگی فناوری (گزارش رولین، ۲۰۱۴)

ردیف	معیارهای دسته‌بندی سؤال‌های مدل سطح آمادگی فناوری	توضیحات
۱	نیازهای مشتری و بازار	متولی فناوری، خواسته‌های مشتری و نماینده مشتری در توسعه فناوری، تعیین نقاط عطف کنترل، دسترسی به زمان‌بندی مشخص شده و ...
۲	طراحی و توسعه	فرضیه‌های پژوهش، زمان و مکان پژوهش، اجزا و سیستم‌ها، توسعه استراتژی اولیه به‌منظور دستیابی به TRL۶، تشخیص و تخمین ویژگی‌های عملکردی و اندازه‌گیری، نمونه مهندسی، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تعیین محرک‌های هزینه، مستندسازی، طراحی مبسوط و ...
۳	آزمون و تأیید	تشخیص اجزای فناوری به‌صورت جزئی، آزمون اجزای فناوری، مطالعه‌های تحلیلی و آزمایشی، آزمون اجزای زیرسیستم‌ها در محیط آزمایشگاهی، آزمون سیستم در محیط مربوطه و ...
۴	یکپارچه‌سازی	بخش‌های بحرانی فناوری، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، مونتاژ مقیاس آزمایشگاهی، تشخیص الزامات ارتباط سیستم، یکپارچه‌سازی در محیط مقیاس الگو، ارتباط بین مجموعه سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها در مقیاس مهندسی، تکمیل طراحی‌های اولیه و ...
۵	محیطی و ایمنی	شناسایی فرآیندهای اصلی خطر، شناسایی و ارزیابی خطرهای اولیه، شناسایی محدوده مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی، تهیه لیست نهایی از خطرهای شناسایی شده و راهکارهای مقابله با آن‌ها و ...
۶	ساخت و معیار پذیری	انجام مطالعه‌های مقیاس‌پذیری، قابلیت ساخت‌پذیری، شناسایی فرایندهای تولید و ارزیابی در محیط آزمایشگاهی، چگونگی ارتقا از محیط آزمایشگاهی به محیط‌های دیگر، تعیین تکنیک‌های ساخت، بلوغ فرایندها و زیرساخت‌های تولید و ...

### برآورد هزینه‌های فناوری

فرآیند ارزیابی فناوری و به‌تبع آن مدل سطح آمادگی فناوری و سطوح نه‌گانه آن دارای هزینه‌هایی می‌باشند که باید برآورد شوند. مطابق با بررسی‌های صورت گرفته توسط اسموکر و اسمیت<sup>۱</sup> (۲۰۰۷)، در وزارت دفاع، ناسا و نیروی هوایی (ایالات متحده) تخمین هزینه‌ها در چرخه بلوغ فناوری، بسیار

زودتر از آنچه باید، صورت می‌گیرد. در فاصله بین TRL<sup>۳</sup> تا TRL<sup>۵</sup> که دانش لازم برای فناوری به حد بلوغ می‌رسد، مهندسان و افرادی که وظیفه تخمین هزینه را بر عهده دارند، دید روشن‌تری نسبت به هزینه‌های واقعی فناوری پیدا می‌کنند. بررسی گزارش‌های منتخب به دست آمده (SAR)<sup>۱</sup> از نیروی هوایی و وزارت دفاع (ایالات متحده) در این پژوهش نیز گواه همین مطلب است. مطابق این گزارش‌ها، به دلیل این که تا TRL<sup>۳</sup> و سطوح پایین‌تر از آن، هنوز فناوری به سطح آمادگی مطلوب نرسیده است، پیش‌بینی هزینه‌ها برای اولین بار از TRL<sup>۴</sup> آغاز و به TRL<sup>۹</sup> ختم می‌شود.

محدوده مدل سطح آمادگی فناوری بین TRL<sup>۵</sup> تا TRL<sup>۷</sup> به‌عنوان «دره مرگ» شناخته می‌شود، زیرا پیشرفت فناوری‌ها در این سطوح مشکل است. علت بارز این مشکل وجود فناوری‌هایی است که تا TRL<sup>۲</sup>، TRL<sup>۳</sup>، TRL<sup>۴</sup> و در موارد محدودی تا TRL<sup>۵</sup> (قبل از آزمایش نمونه اولیه) در داخل دانشگاه‌ها پیشرفت می‌کنند اما توسط صنعت مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. علاوه بر این، فقدان سرمایه‌گذار برای تأمین مالی در TRL<sup>۵</sup> تا TRL<sup>۷</sup> و افزایش شدید بودجه مورد نیاز نسبت به سرمایه‌گذاری در سطوح قبلی، از عوامل دیگری هستند که به نام‌گذاری سطوح TRL<sup>۴</sup>، TRL<sup>۵</sup> و TRL<sup>۶</sup> به نام دره مرگ منجر خواهند شد (تریله و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵).

یکی از روش‌های تخمین هزینه، تکنیک هزینه‌های مبتنی بر فعالیت (ABC)<sup>۳</sup> است. کانایا<sup>۴</sup> (۲۰۱۵)، تکنیک هزینه‌های مبتنی بر فعالیت را به‌عنوان روشی معرفی می‌کند که فعالیت‌های یک سازمان را مشخص کرده و به هر یک از آن‌ها هزینه‌ای اختصاص می‌دهد. به کمک این تکنیک هزینه‌ها بر اساس منابع مورد نیاز متمایز می‌شوند. اغلب سازمان‌هایی که مدیریت مبتنی بر فعالیت دارند از این روش استفاده می‌کنند. در این گونه از سازمان‌ها تکنیک هزینه‌های مبتنی بر فعالیت به تصمیم‌گیری مناسب برای قیمت‌گذاری، اضافه یا حذف موارد از سبد محصول، انتخاب بین برون‌سپاری و تولید داخلی و ارزیابی طرح‌های بهبود فرایند کمک می‌کند. استفاده از این روش، ابزار حسابداری در یک سازمان را به سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریت تغییر داده و اطلاعاتی فراهم می‌کند که ضمن کمک به تصمیم‌های عملیاتی، تاکتیکی و استراتژیک کنترل هزینه‌های شرکت را نیز بهبود می‌بخشد. در این روش، محرک‌های هزینه با توجه به سربارهای مربوط به فعالیت‌های تولیدی خاص ایجاد

1 . Selected Acquisition Reports, Various Programs, 1970 to 2003

2 . Terrile et al.

3 . Activity Based Cost (ABC)

4 . Kannaiah

می‌شود (بریمسون<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸).

هزینه برآورد شده برای یک محصول جدید می‌تواند بر اساس مصرف محصولات در این فعالیت‌ها تعیین شود (ژانگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶). تعداد فعالیت‌هایی مورد نیاز و اینکه از کدام یک از محرک‌های هزینه باید استفاده شود، از جمله مشکل‌های اصلی کاربران در پیاده‌سازی تکنیک هزینه‌های مبتنی بر فعالیت است. جواب ساده‌ای برای این سؤال‌ها وجود ندارد. مطابق با نظر لکس<sup>۳</sup> (۲۰۰۹)، پاسخ این سؤال‌ها به تعداد محصولات، مجموعه هزینه فعالیت‌ها، تنوع اندازه بسته‌های محصولات و سهولت در دسترسی به داده‌های محرک هزینه‌ها وابسته است.

هر کدام از این عوامل در مورد سازمان‌های مختلف، متفاوت خواهد بود؛ بنابراین، راه‌حل انتخاب‌شده برای یک سازمان با راه‌حل یک سازمان دیگر متفاوت است. سیستم هزینه‌های مبتنی بر فعالیت وابسته به جزئیات فعالیت‌ها و محرک هزینه‌های منتخب است. محرک هزینه‌ها می‌تواند به صورت مستقیم و از طریق مشاهده عملکرد فرایند یا به صورت غیرمستقیم و از طریق بررسی و مصاحبه با کارکنان به دست آید. کوپر<sup>۴</sup> (۲۰۰۶)، به منظور افزایش درستی سیستم‌های هزینه‌های مبتنی بر فعالیت محرک هزینه فعالیت‌ها را به سه دسته تقسیم نموده است. این سه دسته عبارت‌اند از محرک تراکنش، محرک مدت‌زمان و محرک حجم. محرک تراکنش، زمانی محاسبه می‌شود که فعالیتی اتفاق بیفتد. محرک‌های تراکنش برجسته عبارت‌اند از: تعداد جایگزین‌سازی‌ها و تعداد سفارش‌ها. محرک مدت‌زمان، طول زمان فعالیت مورد نظر را ارائه می‌دهد. اگرچه اندازه‌گیری و ثبت این محرک نسبت به محرک تراکنش بسیار پرهزینه‌تر است ولی نتایج بسیار دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

خدارحمی (۱۳۹۳)، عوامل اصلی بهای تمام‌شده در روش هزینه‌های مبتنی بر فعالیت را به‌طور کلی در سه دسته طبقه‌بندی می‌نماید. دسته اول مواد اولیه هستند که به‌عنوان رکن اصلی تولید کالا و محصولات در نظر گرفته شده‌اند. این مواد به صورت مستقیم یا به صورت غیرمستقیم و به منظور تکمیل ساخت کالا (با مصرف ناچیز) مورد استفاده قرار می‌گیرند. دسته دوم هزینه‌های مربوط به دستمزد (کار) است. منظور از دستمزد، حقوق و حق‌الزحمه‌ای است که در جریان تولید و ساخت و برای تبدیل مواد به کالا به کارگران پرداخت می‌شود. دستمزد نیز به دو بخش تقسیم خواهد شد: دستمزد مستقیم

- 
- 1 . Brimson
  - 2 . Zhang et al.
  - 3 . Lelkes
  - 4 . Cooper

که بابت تبدیل مواد اولیه به کالای ساخته شده به افراد پرداخت می شود و دستمزد غیرمستقیم که به صورت مستقیم در ساخت و ترکیب کالای ساخته شده نقش نداشته است؛ مانند حقوق نگهبانان و سرکارگران کارخانه و غیره. نهایتاً دسته سوم تحت عنوان سایر هزینه ها (سربار خدمت) در نظر گرفته شده اند. این هزینه ها عبارتند از کلیه هزینه هایی که در جریان تولید اتفاق می افتد، ولیکن نمی توان آن ها را به طور مستقیم و مشخص به اقلامی از تولید یا محصولی خاص اختصاص داد. هزینه های مواد غیرمستقیم تولید، دستمزد غیرمستقیم، هزینه تعمیرات، هزینه های استهلاک ماشین آلات، هزینه بیمه و سایر موارد مشابه از جمله این هزینه ها هستند.

به منظور تعیین فعالیت ها در سیستم هزینه های مبتنی بر فعالیت، می توان از ساختار شکست کار (WBS)<sup>۱</sup> استفاده نمود. ساختار شکست کار، داده های مختلف را برای سطوح مدیریت خلاصه می کند و اطلاعات مناسب را در مورد وضعیت پیش بینی شده، واقعی و فعلی فعالیت ها فراهم می نماید. ساختار شکست کار وضعیت برنامه را به طور مداوم مشخص می نماید و در این صورت مدیر برنامه، می تواند تغییرهای لازم برای اطمینان از عملکرد مطلوب را شناسایی و اجرا کند. شناسایی و تعیین فعالیت ها به این شکل علاوه بر آن که محدوده پروژه را مشخص می سازد، مانع از قلم افتادگی فعالیت ها نیز می شود. علاوه بر تکنیک هزینه های مبتنی بر فعالیت، از تکنیک های دیگری نیز به منظور تخمین هزینه ها استفاده می شود. تکنیک پارامتری<sup>۲</sup>، تکنیک قیاس<sup>۳</sup>، تکنیک پایین به بالا<sup>۴</sup>، تکنیک رجوع به خبرگان<sup>۵</sup>، تکنیک مبتنی بر ویژگی و تکنیک مبتنی بر قانون<sup>۶</sup> از جمله این موارد می باشند.

### درک و شناسایی نیاز مشتری

همان گونه که در ابتدا گفته شد، شناسایی نیاز مشتری یکی از شرایط ورود به فناوری است. مطابق با نظر آتش سوز (۱۳۹۴)، رویکردهای مختلفی برای شناسایی نیازهای مشتریان وجود دارد. مدل زنجیره ارزش پورتر، مدل گسترش عملکرد کیفیت (QFD)<sup>۷</sup>، نقشه راه فناوری و رویکرد فرایند محور از جمله این رویکردهاست. گسترش عملکرد کیفیت تکنیکی پیشرفته و جالب برای طراحی محصول و خدمات

1 . Work Breakdown Structure (WBS)

2 . Parametric

3 . Analogy

4 . Bottoms-Up

5 . Expert Judgment

6 . Rule Based

7 . Quality Function Deployment (QFD)

است که با استفاده از آن کلیه خواسته‌ها و نیازهای مشتریان، شناسایی می‌شود. این روش با عناوین دیگری نظیر صدای مشتری (VOC)<sup>۱</sup> و خانه کیفیت نیز معرفی می‌شود. غالباً تکنیک گسترش عملکرد کیفیت به‌عنوان یک فعالیت مدیریتی و متناسب با دیدگاه مشتری‌گرا شناخته می‌شود و با یک روش تجزیه و تحلیل سامان‌مند قادر به انتقال خواسته‌های مشتریان به واحدهای مختلف بازاریابی و فروش، برنامه‌ریزی تولید و سایر بخش‌های سازمان است.

مطابق با نظر جیسوال<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، گسترش عملکرد کیفیت ابزاری کیفی است که به ترجمه صدای مشتری کمک کرده و به‌طور واقعی می‌تواند نیازهای آنان را تأمین کند. به‌عبارت‌دیگر، خواسته‌ها و نیازهای مشتریان در طراحی محصول جدید لحاظ شده و محصول نهایی مطابقت بیش‌تری با نظر آنان خواهد داشت. علاوه بر این درک بهتری از تمام عملیات ساخت و طراحی (از مرحله طراحی مفهومی تا تولید نهایی) فراهم آورده و با رفع مشکلات در اوایل مراحل طراحی به افزایش بهره‌وری منجر خواهد شد. این ابزار در اواخر دهه ۱۹۶۰ در ژاپن تکوین یافت و در سال ۱۹۸۳ به کشورهای آمریکا و اروپا معرفی شد.

شاهین (۲۰۰۵)، نیز پس از انجام مطالعه بر روی گسترش عملکرد کیفیت و مقایسه آن با سایر روش‌های کیفی اذعان می‌دارد که این روش مناسب‌ترین روش در طراحی و جلب رضایت مشتری بوده و بر مبنای مباحث کنترل کیفیت بنا شده است. مطابق با مطالعه‌های صورت گرفته در این مقاله روش گسترش عملکرد کیفیت رویکردی چهار مرحله‌ای است که با استفاده از دو ماتریس، فرآیند طراحی محصولات را پشتیبانی می‌کند. نتایج ماتریس اول به‌عنوان ورودی ماتریس دوم در نظر گرفته می‌شود. مطابق با ماتریس اول خانه کیفیت و طی دو مرحله، مجموعه‌ای از خواسته‌ها، انتظارات مشتریان و الزامات مشخص شده و اهمیت آن‌ها تعیین می‌گردد. در این روش به‌منظور تعیین میزان اهمیت اغلب از طیف ۱ و ۳ و ۹ یا ۱ و ۳ و ۵ استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، عدد ۵ نشان‌دهنده بیش‌ترین اهمیت و عدد ۱ نشان‌دهنده کم‌ترین اهمیت است. ماتریس دوم خانه کیفیت نیز طی مراحل سوم و چهارم و با استفاده از نتایج ماتریس اول خانه کیفیت به تعیین میزان اهمیت هر یک از تجهیزات/فرایندها/فعالیت‌ها/... می‌پردازد. به‌منظور تعیین ماتریس دوم خانه کیفیت می‌توان از ساختار شکست پروژه (PBS)<sup>۳</sup> استفاده کرد. ساختار شکست پروژه عبارت است از ساختار درختی حاصل از تجزیه

1 . Voice Of Customer (VOC)

2 . Jaiswal

3 . Project Breakdown Structure (PBS)

سلسله‌مراتبی و سطح به سطح اقلام یا موضوع‌های اصلی یک پروژه به اقلام قابل تحویل یا موضوع‌های تشکیل‌دهنده آن. در این ساختار اقلام در سطر اول و زیر اقلام در سطوح بعدی نمایش داده می‌شوند. به عبارت کلی، می‌توان گفت که گسترش عملکرد کیفیت روش کاملاً تثبیت‌شده‌ای است که برای طراحی و اصلاح محصولات، خدمات و یا فرایندها (که مطابق با آن‌ها محصولی تولید با خدمتی ارائه می‌شود) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی از موارد داده‌های مورد استفاده در این روش با استفاده از طیف لیکرت<sup>۱</sup> (۱): بسیار کم، (۳): کم، (۵): متوسط، (۷): زیاد و (۹): بسیار زیاد) تکمیل شده و مطابق با آن نظرات افراد به داده‌های کمی تبدیل می‌شود. (ایکبال و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷)

بر اساس تحقیقات صورت گرفته در پژوهش‌های داخلی و خارجی، این نتیجه حاصل شد که در بیش تر پژوهش‌ها به‌منظور ارزیابی بلوغ فناوری از سطح آمادگی فناوری نه سطحی یا هفت سطحی استفاده شده است. علاوه بر این تنها در برخی از سیستم‌ها نظیر سازمان نیروی هوایی آمریکا از محاسبه کننده سطح آمادگی فناوری بهره گرفته شده است. در اکثر این موارد تنها به تعیین سطح آمادگی فناوری پرداخته شده و تلاشی برای تخمین هزینه‌های مربوط به اکتساب فناوری آن‌هم با استفاده از روش هزینه‌های مبتنی بر فعالیت صورت نگرفته است. گفتنی است که در برخی از موارد به‌منظور تعیین هزینه‌های فرایند از روش‌هایی مانند دلفی استفاده می‌شود. روش دلفی حاصل تصورات ذهنی افراد بوده و به‌تبع آن‌ها احتمال بروز خطا در برآورد هزینه‌ها امری طبیعی است. پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن تمامی این موارد سعی در ارائه رویکردی دارد که با استفاده از بومی‌سازی ساختار شکست پروژه نه سطحی و ابزار محاسبه کننده سطح آمادگی فناوری به ارزیابی بلوغ یک فناوری اکتسابی پرداخته و هزینه‌های مربوط به آن را با استفاده از روش هزینه‌های مبتنی بر فعالیت تخمین می‌زند.

### روش‌شناسی پژوهش

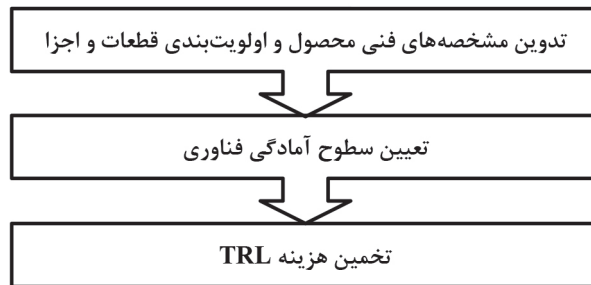
پژوهش حاضر، بر روی یک زیردریایی کلاس سبک انجام شده است. این محصول به‌عنوان یکی از محصولات صنایع نظامی در نظر گرفته شده و دارای ابعاد به نسبت کوچکی است. اغلب زیردریایی‌های کلاس سبک (برخلاف زیردریایی‌های کلاس سنگین) در آب‌های کم‌عمق مورد استفاده قرار می‌گیرند و دارای کاربردهای بسیار گسترده‌ای هستند. تاریخچه استفاده از این محصولات به بیش از نیم‌قرن پیش بازمی‌گردد اما تنها در طول دو دهه گذشته به‌عنوان سیستم‌های عملی مؤثر و ارزشمند معرفی

1 . Likert scales

2 . Iqbal et al.

گردیده‌اند. گفتنی است که به دلایل امنیتی نام محصول مورد مطالعه، تجهیزات و مشخصه‌های اصلی آن ذکر نشده است.

این پژوهش، به دلیل متمرکز بودن بر روی یک محصول از نظر هدف در زمره تحقیقات کاربردی قرار دارد. از نظر ماهیت نیز به دلیل توجه به آثار مشهود یک تحقیق توصیفی و از نظر جمع‌آوری داده‌ها از نوع پیمایشی- مقطعی است. مطابق شکل ۱ این پژوهش در طی سه مرحله انجام شده است.



شکل ۱: مراحل انجام پژوهش

بر اساس شکل ۱، در مرحله اول، ابتدا با استفاده از دو ماتریس استاندارد گسترش عملکرد کیفیت داده‌ها از طریق مصاحبه جمع‌آوری شده است. این مصاحبه‌ها به صورت نیمه ساختاریافته و با ۴ نفر از ۱۰ نفر دفتر طراحی صنعت مورد نظر انجام شده است. چهار نفر مذکور تحت عنوان گروه گسترش کیفی عملکرد معرفی شده و عبارت‌اند از: رئیس دفتر طراحی (کارشناس ارشد الکترونیک با ۱۸ سال سابقه کار)، طراح سیستم‌های الکتریکی (دکتری برق قدرت با ۱۵ سال سابقه کار)، کارشناس فناوری ساخت (کارشناس ارشد مکانیک با ۱۲ سال سابقه کار) و کارشناس دفتر مطالعات (کارشناس مهندس صنایع با ۱۰ سال سابقه کار). علت انتخاب این چهار نفر این است که همه آن‌ها در زمینه محصول مورد بررسی و فرایندهای مرتبط با آن دارای مطالعه‌های لازم و کافی بوده‌اند. هدف از جمع‌آوری این داده‌ها استخراج الزامات مربوط به محصول مورد نظر و تعیین سطوح آمادگی فناوری است. در مرحله دوم با مبنا قرار دادن سطح آمادگی فناوری ناسا که یک مدل و مقیاس استانداردسازی شده است، ابتدا تعاریف مربوطه بومی‌سازی و سپس بلوغ فناوری به صورت اولیه تعیین و ارزیابی شده است. سپس به منظور تخمین دقیق سطح آمادگی فناوری محصول مورد نظر، از ابزار محاسبه کننده سطح آمادگی فناوری استفاده شده و سؤال‌های مربوط به سطحی که بر اساس تخمین اولیه به دست آمده است در

اختیار خبرگان قرار می‌گیرد. در صورت پاسخگویی ناقص به سؤال‌های سطح مربوطه، سؤال‌های سطح پایین‌تر بررسی خواهد شد. در این مرحله مصاحبه‌ها و اسناد راهنما به‌عنوان منبع اصلی جمع‌آوری اطلاعات در نظر گرفته شده است. گفتنی است که مصاحبه‌ها در این مرحله نیز به‌صورت ساختاریافته و با ۷ نفر از کارشناسان موجود در گروه ساخت محصول مورد نظر انجام شده است. این افراد عبارت‌اند از: مدیر دفتر مطالعات راهبردی، کارشناس ارشد مدیریت فناوری، کارشناس ارشد مدیریت بازرگانی، کارشناس ارشد برق قدرت، کارشناس ارشد الکترونیک، کارشناس ارشد ساخت و سرپرست مرکز توسعه. تمامی این افراد به‌صورت مستقیم مسئول بلوغ فناوری محصول مورد نظر هستند و چندین سال درگیر مباحث مربوط به آن بوده‌اند. پس از آن، به‌منظور تعیین شکاف موجود برای گذار از سطح آمادگی فناوری تخمینی، مطابق با پیشینه تحقیق تعدادی معیار معرفی شده، سؤال‌های مربوط به آن دسته‌بندی گردیده و در جلسه‌ای با حضور خبرگان مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته است. سپس با استفاده از سند الزامات و تلفیق آن با سؤال‌هایی که دارای پاسخ منفی بوده‌اند شکاف‌های موجود شناسایی گردیده و با استفاده از طیف لیکرت مشخص شده است که فناوری مذکور چه مقدار از سطح مطلوب فاصله دارد. در این صورت، درک مشترکی از فعالیت‌های مربوط به تکمیل سطح آمادگی فناوری تخمینی مشخص خواهد شد. در مرحله سوم با استفاده از تکنیک هزینه‌های مبتنی بر فعالیت بهای تمام‌شده فناوری مربوطه در سطح مورد نظر تعیین گردیده است. در این مرحله نیز بخش عمده‌ای از داده‌ها از طریق مصاحبه گردآوری شده‌اند.

### تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در این قسمت مراحل پیشنهادی در شکل ۱، مدنظر قرار گرفته و داده‌ها و اطلاعات گردآوری شده به‌صورت مرحله‌به‌مرحله شرح داده شده است.

### مرحله اول: تدوین مشخصه‌های فنی محصول و اولویت‌بندی قطعات و اجزا

به‌منظور تدوین مشخصه‌های فنی محصول مورد مطالعه، در ابتدا مصاحبه‌هایی با گروه گسترش کیفی عملکرد انجام شده است. مطابق با مصاحبه‌های صورت گرفته با این افراد و همچنین مراجعه به مستندها در زمینه پیشنهادی رسیده، ندای مشتریان شنیده شده و مطابق با آن‌ها و بررسی‌های صورت گرفته توسط گروه خبرگان، ۶ نیاز (خواسته) از طرف آنان شناسایی شده است. این نیازها



عبارت‌اند از: سرعت، سطح ولتاژ شبکه قدرت، سروصدا، توانمندی ساخت، پایش و ترمز. سپس با استفاده از ماتریس مقایسات زوجی و طیف پنج نقطه‌ای لیکرت وزن هر یک از نیازها (مطابق با نظر خبرگان) مشخص گردیده است. گفتنی است که میزان نرخ ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی تکمیل شده برابر با ۰/۰۹ بوده و نشان‌دهنده سازگاری این ماتریس است.

پس از آن، با بهره‌گیری از استانداردهای سازمان و مطرح کردن موارد موجود با گروه گسترش کیفی عملکرد (گروه خبرگان)، ۹ الزام فنی و مهندسی مرتبط با خواسته‌های مشتریان شناسایی شده است. لازم به توضیح است که الزامات فنی و مهندسی مورد اشاره، همان خواسته‌های مشتریان است، زیرا که استاندارد خاصی در این حوزه در دسترس نبوده است. این الزامات عبارت‌اند از: توان خروجی نامی، محدوده ولتاژ، سرعت نامی، حداکثر سرعت، کلاس عایقی، برای چرخش، حداکثر گشتاور قابل تحمل در لحظه راه‌اندازی، راندمان کل در بار نامی و اختلال صوتی و ساختاری کم.

بر اساس خواسته‌های مشتریان و الزامات فنی استخراج‌شده ماتریس خانه کیفیت مطابق جدول ۳، ترسیم گردیده و الزامات فنی اولویت‌بندی شده‌اند. در این ماتریس میزان تأثیرگذاری هر یک از الزامات بر روی خواسته‌های مشتریان در قالب طیف ۵ نقطه‌ای لیکرت مشخص شده و وزن مطلق هر یک از الزامات مطابق با مجموع حاصل ضرب هر یک از خواسته‌های مشتریان در امتیاز کسب‌شده مربوط به آن ستون به دست آمده است. به‌عنوان مثال، در مورد الزام توان خروجی نامی وزن مطلق و وزن نسبی برابر است با (رابطه ۱ و ۲):

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{وزن مطلق} = (9 \times 0/27) + (7 \times 0/07) = 2/92$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{وزن نسبی} = (2/92 \div 10/09) = 0/29$$

جدول ۳: ماتریس خانه کیفیت اول برای اولویت بندی الزامات فنی

مجموع	برای چرخش	راندمان کل در بار نامی	نویز صوتی و ساختاری کم	سرعت نامی	محدوده ولتاژ (V)	توان خروجی نامی (kw)	وزن نسبی	الزامات فنی خواسته مشتری
-	-	-	-	-	-	۹	٪۲۷	سرعت
-	-	-	-	-	۷	-	٪۲۱	سطح ولتاژ شبکه قدرت
-	-	-	۷	۷	-	-	٪۲۳	اختلال
-	-	۹	۵	-	-	-	٪۱۳	توانمندی ساخت
-	۳	-	-	-	-	۷	٪۷	مانیتورینگ
-	۵	-	-	-	-	-	٪۹	ترمز
۱۰/۰۹	۰/۶۶	۱/۱۷	۲/۲۶	۱/۶۱	۱/۴۷	۲/۹۲	-	اوزان مطلق
۱	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۲۹	-	وزن نسبی
-	۶	۵	۲	۳	۴	۱	-	اولویت

پس از اولویت بندی الزامات، ساختار شکست فناوری بر حسب ارقام قابل تحویل (با استفاده از مستندها و همچنین برگزاری مصاحبه با خبرگان) ترسیم شده است. این ساختار، شامل پنج سیستم اصلی بوده که هر یک دارای تجهیزاتی می باشند. سیستم های اصلی عبارت اند از سازه، سیستم مکانیکی، سیستم الکتریکی، سیستم خنک کاری و تهویه و سیستم خودکارسازی. پس از آن، بر اساس نتایج حاصل از ماتریس خانه کیفیت اول و ساختار شکست پروژه ماتریس خانه کیفیت دوم تهیه شده است. در این ماتریس مشخصه هایی از اجزا و قطعات تشکیل دهنده محصول (که در دستیابی به انتظارات مشتریان کمک خواهد نمود) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و با استفاده از طیف لیکرت و نظرات خبرگان (گروه گسترش کیفی عملکرد) به بررسی ارتباط هر یک از مشخصه های کارکردی- عملکردی با تجهیزات فناوری مربوطه پرداخته شده است. به عنوان مثال، ماتریس خانه کیفیت دوم سیستم مورد مطالعه (سیستم سازه) که دارای دو تجهیز است در جدول ۴ نمایش داده

شده است. هر یک از تجهیزات دارای دو زیر تجهیز می‌باشند. لازم به توضیح است که شناسایی این روابط به ارزیابی سطح آمادگی فناوری به صورت کمی و از لحاظ فنی کمک خواهد کرد.

جدول ۴: ماتریس خانه کیفیت دوم برای اولویت‌بندی تجهیزات

مجموع با در نظر گرفتن همه سیستم‌ها	نام سیستم: سازه					الزامات فنی
	تجهیزات				وزن نسبی	
	۲		۱			
	۲-۲	۲-۱	۱-۲	۱-۱		
-	۱	۱	۱	۱	۰/۲۹	توان خروجی نامی (kW)
-	-	-	-	-	۰/۱۵	محدوده ولتاژ (V)
-	-	-	-	-	۰/۱۶	سرعت نامی
-	۵	۵	۵	۵	۰/۲۲	نویز صوتی و ساختاری کم
-	-	-	-	-	۰/۱۲	راندمان کل در بار نامی
-	-	-	-	-	۰/۰۷	برای چرخش
۱۳۶/۹۲	۰	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۳۹	-	وزن مطلق
۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	-	وزن نسبی

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، برخی از سلول‌های ماتریس خانه کیفیت دوم خالی است (با علامت - نشان داده شده است). دلیل این امر تأثیر نداشتن پارامترهای مربوطه بر زیر تجهیز مورد بررسی است. به عبارت دیگر، این زیر تجهیزات هیچ‌گونه ارتباطی با الزامات فنی تعریف شده در ستون اول ندارند. گفتنی است که ماتریس خانه کیفیت دوم نشان داده شده در جدول ۴ به‌عنوان نمونه تنها برای سیستم سازه ترسیم گردیده است و به دلیل مشابه بودن روند کار بقیه سیستم‌ها در این ماتریس آورده نشده‌اند. به همین دلیل، مجموع ردیف وزن نسبی در این جدول برابر با یک نیست و چنانچه همه سیستم‌ها در کنار یکدیگر در این ماتریس قرار بگیرند دارای مجموع وزن نسبی یک خواهند بود. به‌عنوان مثال، در این جدول نحوه محاسبه وزن مطلق الزام توان خروجی نامی برابر است

با (رابطه ۳):

$$\text{رابطه (۳)} \quad ۱/۳۹ = (۵ \times ۰/۲۲) + (۱ \times ۰/۲۹) = \text{وزن مطلق}$$

وزن نسبی این سیستم نیز با توجه به اینکه مجموع اوزان نسبی (همه سیستم‌ها) برابر است با ۱۳۶/۹۲ به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه (۴)} \quad ۰/۰۱ = (۱/۳۹ \div ۱۳۶/۹۲) = \text{وزن نسبی}$$

در ادامه، برای تعیین مشخصه‌های کامل محصول مورد مطالعه مصاحبه‌هایی با خبرگان (گروه گسترش کیفی عملکرد) صورت گرفته و مشخصه‌های نهایی تدوین شده‌اند. به صورت کلی، این مشخصه‌ها شامل مشخصه‌های کارکردی و عملکردی اصلی (الزامات فنی)، میزان مصرف، شرایط محیطی، چگونگی تعامل با زیرسامانه‌ها و تجهیزات دیگر، تأثیرهای نامطلوب متقابل، قابلیت نگهداری و تعمیرات و ملاحظه‌های ایمنی، بهداشت و امنیت و غیره می‌باشند.

### مرحله دوم: تعیین سطوح آمادگی فناوری

در این مرحله، تعاریف کلی مربوط به مدل آمادگی فناوری ناسا، مورد بازبینی قرار گرفته و بومی‌سازی گردیده است و از این رو، برای محصول مورد مطالعه قابل استفاده است. این امر به کارشناسان کمک می‌کند تا به راحتی بتوانند مصادیق هر سطح را در ذهن خود تداعی نمایند. لازم به ذکر است که پژوهش حاضر ماحصل یک پروژه کاربردی واقعی است و با توجه به نظرات کارشناسان در صنعت مربوطه، مفاهیم کلی فقط تا TRL۶ تدقیق گردیده و بیش‌تر از آن در یک پژوهش دیگر ادامه داده شده است. لذا در این پژوهش الزامی برای تهیه سایر سطوح نیست. این سطوح به همراه توضیحات در جدول ۵ ارائه گردیده است.

با استفاده از جدول شماره ۵ و معیارهایی همچون نمایش فناوری (نمونه تابلویی، پیش‌نمونه<sup>۱</sup> و ...)، توصیف فیزیکی (مقیاس، کارکرد و ...) و محیط آزمون؛ سطح آمادگی فناوری اولیه تخمین زده شده است. مطابق با نظر متخصصان و جدول ۶، این فناوری TRL۴ را پشت سر گذاشته و در حال حاضر در TRL۵ قرار دارد. چراکه نمونه اولیه (پیش‌نمونه) در مقیاس یک‌به‌یک ساخته شده است و در حال حاضر، تحت انجام آزمون در محیط مرتبط است.

جدول ۵: بازبینی و بومی‌سازی سطح آمادگی فناوری کلی

سطح آمادگی فناوری	توضیحات
۱	مطالعه و بررسی اسناد و منابع علمی و نظامی نشان می‌دهد که از سال ۲۰۰۰ میلادی استفاده از محصول مورد بررسی به دلیل مزایایی همچون چگالی گشتاور بالا، راندمان بالا، اختلال کم و قابلیت کنترل سرعت پیوسته نسبت به محصولات مشابه رو به افزایش است؛ بنابراین به کارگیری این نوع محصول امری معقول و منطقی است.
۲	مشخصه‌ها و قابلیت‌های مورد نظر می‌بایست در طراحی لحاظ شوند.
۳	برای طراحی و تحلیل این محصول، پارامترهایی همچون سطح ولتاژ، توان مورد نیاز و محدودیت‌های ابعادی تعیین و طراحی بر اساس این پارامترها صورت می‌پذیرد. پس از طراحی تحلیل‌های مورد نیاز به همراه شبیه‌سازی انجام می‌گیرد.
۴	برای امکان‌سنجی و اثبات قابلیت‌های کارکردی و عملکردی در ابتدا در محیط آزمایشگاه نمونه‌ای از محصول در حدود توان ۲۰ کیلووات طراحی و ساخته می‌شود.
۵	برای بررسی عملکرد محصول مورد نظر، یک نمونه یک‌به‌یک ساخته شده و آزمون‌های عملکردی و کارکردی در محیطی شبیه به محیط عملیاتی اجرا می‌گردند. علاوه بر این آزمون‌هایی نظیر رابط‌های الکترومغناطیسی، الزامات سازگاری، ارتعاش، محدودیت‌های شوک، محدودیت دما، الزامات ضربه و کجی نیز انجام خواهد شد.
۶	پس از بازطراحی و ساخت نمونه اولیه آزمون‌ها در محیط عملیاتی انجام می‌پذیرد. آزمون‌ها شامل آزمون‌های مرحله قبل به انضمام آزمون‌هایی است که در شرایط واقعی صورت می‌گیرد.

جدول ۶: تخمین اولیه سطح آمادگی فناوری

توصیف فیزیکی		محیط آزمون				نمایش (نمونه ساخته‌شده)					
کارکرد	اندازه واقعی	شکل واقعی	محیط عملیاتی	محیط واقعی	محیط مرتبط	محیط آزمایشگاه	نمونه عملیاتی	نمونه مهندسی	پروتوتایپ	بردپورس	بردبورد
	✓				✓				✓		

پس از تعیین اولیه سطح آمادگی فناوری و به منظور تخمین دقیق فناوری محصول مورد نظر، سؤال‌های جزئی‌تر TRL۵ از طریق مصاحبه مورد بررسی قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته بر روی ۴۷ سؤال (که مطابق با پیشینه تحقیق و به صورت مصاحبه با گروه کارشناسان انجام شده و دارای پاسخ‌هایی به صورت بله/خیر است) حاکی از آن بوده که اعتبارسنجی مشخصه‌های کارایی فناوری و نقشه طراحی محصول تقریباً کامل شده است. همچنین نمونه اولیه در محیط مرتبط، با درجه صحت بالا در حال آزمون بوده و اغلب سخت‌افزارهای مربوط به پیش تولید، در دسترس بوده‌اند. علاوه بر این مشخصه‌های سیستم فناوری کامل شده و ابزار و فرایندها به سطحی از بلوغ رسیده‌اند که قابلیت کاربردی شدن را دارند. نمایش یکپارچه‌سازی سیستم نیز تقریباً تکمیل گردیده است.

در ادامه به منظور تعیین شکاف و ضعف‌های موجود در حوزه‌های مختلف سطح آمادگی فناوری تخمین زده شده، سؤال‌های مربوط به این سطح آمادگی دسته‌بندی شده‌اند. دسته‌بندی مطابق با ۶ معیار ارائه شده در شرکت نیکسوز (که در جدول ۲ به آن اشاره شد) و پس از مشورت با کارشناسان و تأیید شباهت‌های لازم با محصول مربوطه انجام شده است. این معیارها عبارت‌اند از: نیازهای مشتری و بازار، طراحی و توسعه، آزمون و تأیید، یکپارچه‌سازی، محیط و ایمنی و ساخت و معیار پذیری. پس از آن، تعداد ۴۷ سؤال TRL۵ به تعداد ۱۲ سؤال تعدیل یافته و هر یک از سؤال‌ها در یکی از دسته‌بندی‌ها قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تعدیل سؤال‌ها به معنای حذف سؤال خاصی نبوده و نشان می‌دهد که سؤال‌های مذکور در دسته‌بندی جدید تمام سؤال‌های قبلی را پوشش داده است. این سؤال‌ها به همراه دسته‌بندی‌های انجام شده و پاسخ آن‌ها در جدول ۷ نمایش داده شده است.

## جدول ۷: پاسخگویی به سؤال‌های TRL۵ پس از دسته‌بندی آن‌ها

ردیف	معیارهای سطح آمادگی فناوری	سؤال‌ها	بله / خیر
۱	نیازهای مشتری و بازار	آیا تعریف تقاضاها/ الزامات در نقاط شروع اجرا/ عملکرد و اهداف برای طرح نهایی مقرر شده است؟	بله
۱-۲	طراحی و توسعه	آیا نمونه‌های مهندسی ساخته شده و طراحی مهندسی اولیه انجام شده است؟	بله
۲-۲		آیا طراحی‌های مبسوط برای حمایت از سیستم مقیاس مهندسی و توانایی در دستیابی به اجزا برای نمونه مهندسی نهایی کامل شده است؟	خیر
۳-۲		آیا هزینه‌های اولیه محصول تجاری تخمین زده شده است؟	خیر
۱-۳	آزمون و تأیید	آیا نیاز/ تقاضا برای تصدیق فناوری (شامل آزمون، اعتبارسنجی، عملکرد ایمنی) ایجاد شده است؟	خیر
۲-۳		آیا آزمون‌های مقیاس آزمایشگاهی در تکمیل نمونه مهندسی، معتبر ساختن نتایج طراحی و آماده بودن برای آزمون در محیط مربوط انجام گرفته است؟	خیر
۱-۴	یکپارچه‌سازی	آیا الزامات ارتباط سیستم و ارتباط بین سیستم‌های بزرگ و نوعی در مقیاس آزمایشگاهی با اجزا مشخص شده‌اند؟	خیر
۲-۴		آیا یکپارچه‌سازی مدل/ کاربردها در محیط مقیاس الگو توضیح داده شده‌اند؟	خیر
۵	محیطی و ایمنی	آیا محدوده مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی مربوطه در حد ممکن مشخص شده است؟	بله
۱-۶	ساخت و معیار پذیری	آیا موضوعات افزایش به نسبت ثابت از آزمایشگاه به مقیاس مهندسی درک و حل شده است؟	بله
۲-۶		آیا فرایندهای ساخت برای ایجاد اجزایی که جدید هستند از طریق آزمایشگاه ارزیابی شده‌اند؟	خیر
۳-۶		آیا تکنیک‌های ساخت برای مرحله نمونه مهندسی تعریف شده است؟	خیر

سپس سؤال‌هایی که دارای پاسخ منفی بوده‌اند مورد بررسی قرار گرفته، به یکی از مشخصه‌های فنی (مشخصه‌های کارکردی و عملکردی که در مرحله اول به‌صورت کلی تعیین شد) نسبت داده شده و شکاف مربوطه تعیین گردیده است. این مشخصه‌ها عبارت‌اند از: پارامترهای عملکردی، پارامترهای محیطی و ایمنی، پارامترهای فیزیکی، الزامات یکپارچگی و پارامترهای فنی. به‌عنوان مثال سؤال ۲-۲ دارای پاسخ منفی و مربوط به پارامترهای عملکردی راندمان و سرعت و پارامترهای فنی فشار، شکل موج و فرکانس است. لازم به ذکر است که هرچند میزان تحقق مواردی که دارای پاسخ منفی می‌باشند، در سند مشخصه‌های فنی و در محیط مربوطه به ۱۰۰ درصد نرسیده است، ولی این مطلب را می‌توان اذعان نمود که صفر درصد هم نیست؛ بنابراین پس از مشخص شدن ارتباط سؤال‌های TR15 و سند مشخصه‌های فنی با استفاده از نتایج به دست آمده در آزمون‌های انجام شده و طیف ۵ نقطه‌ای لیکرت ((۱): خیلی بد، (۳): بد، (۵): متوسط، (۷): خوب و (۹): مطلوب) درصد تحقق سؤال‌های منفی توسط خبرگان مشخص گردیده و بدین‌صورت داده‌های کیفی به کمی تبدیل شده است. به‌عنوان مثال، الزام فنی سرعت در شرایط فعلی برابر با ۱۶۰ تا ۱۸۰ rpm بوده است، این در حالی است که این الزام فنی در شرایط مطلوب باید برابر با ۲۰۰ rpm باشد. مطابق با نظر خبرگان و بر اساس طیف لیکرت الزام فنی سرعت در وضعیت خوب قرار داشته و برای رسیدن به وضعیت مطلوب نیازمند راهی دشوار و پرهزینه است. در خصوص پارامترهای محیطی و عملکردی نیز شرایط به نسبت خوب است (مطابق با مصاحبه‌هایی که با خبرگان انجام شده)، اما برای گذار از وضعیت خوب به مطلوب نیازمند ساخت یک محصول دیگر با مقیاس یک‌به‌یک یا اصلاح نمونه حاضر خواهیم بود.

### مرحله سوم: تعیین هزینه سطح آمادگی فناوری

همان‌گونه که پیش‌تر شرح داده شد، عوامل اصلی بهای تمام‌شده برای ایجاد یک فناوری شامل هزینه دستمزد مستقیم، هزینه مواد و تجهیزات و هزینه‌های سربار است. در مورد این فناوری هزینه دستمزد مستقیم عبارت است از هزینه‌های نیروی انسانی خارجی و هزینه‌هایی که به‌صورت قرارداد برون‌سپاری شده‌اند. هزینه مواد و تجهیزات نیز شامل هزینه‌های ساخت نمونه‌ها و زیرساخت‌های لازم و مواد اولیه بوده و هزینه‌های سربار هم از ۹ گروه هزینه نشئت گرفته است. لازم به ذکر است که هزینه دستمزد مستقیم و هزینه مواد و تجهیزات با استفاده از داده‌های ثبت‌شده در بخش حسابداری مشخص گردیده است. به‌منظور تعیین هزینه سربار نیز از روش هزینه‌یابی بر مبنای فعالیت استفاده



شده است. فعالیت‌های اصلی برای تولید این محصول عبارت‌اند از: مهندسی، حمل‌ونقل، مونتاژ، آزمون، تأمین و پشتیبانی.

۹ گروه هزینه‌های سربار نیز عبارت‌اند از:

- گروه حقوق و دستمزد شامل حقوق کارمندان، مزایای کارمندان و پاداش کارمندان
- گروه کالا شامل کالای اختصاصی پروژه، لوازم‌بدکی و وسایل ایمنی
- گروه اجاره، آب و برق شامل اجاره اماکن، آب و برق و سوخت و مخبرات
- گروه آموزش شامل هزینه سفر آموزشی، هزینه شرکت در هم‌اندیشی‌ها
- گروه کرایه ماشین شامل هزینه ایاب و ذهاب و کرایه وسایط نقلیه
- هزینه‌های اداری و تشکیلاتی شامل هزینه غذا، کتاب‌ها و نشریات و هزینه مأموریت
- گروه خدمات دریافتی شامل خدمات دریافتی از شرکت‌های وابسته و طراحی و مهندسی
- گروه سایر هزینه‌ها شامل هزینه تبلیغات و هزینه‌های حقوقی و ثبت
- گروه استهلاک شامل استهلاک خودرو، کامپیوتر و ساختمان

بررسی‌های صورت گرفته، نشان می‌دهد که انجام هر یک از فعالیت‌ها به ایجاد کدام یک از گروه‌های هزینه منجر خواهد شد. مطابق جدول ۸، به‌منظور نشان دادن این ارتباط از ماتریس وابستگی هزینه-فعالیت استفاده شده است. علامت «✓» در سلول i و j از این جدول بیانگر آن است که انجام فعالیت i به ایجاد هزینه در گروه j منجر خواهد شد.

جدول ۸: ماتریس وابستگی هزینه - فعالیت

سایر هزینه‌ها	اجاره، آب و برق	آموزش	کرایه ماشین	استهلاک	اداری و تشکیلاتی	خدمات دریافتی	کالا	حقوق و دستمزد	هزینه فعالیت
✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	مهندسی و طراحی
✓			✓	✓	✓	✓		✓	حمل و نقل
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	مونتاز
✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	آزمون
✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	تأمین
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	تنظیم و راه‌اندازی
✓	✓				✓	✓	✓	✓	پشتیبانی

پس از تعیین رابطه بین فعالیت و هزینه‌ها، تخصیص هزینه‌ها بر حسب هزینه‌یابی بر مبنای فعالیت مطابق جدول ۹ انجام شده است. به‌عنوان مثال، در مورد فعالیت مهندسی و طراحی مقدار هزینه‌یابی بر مبنای فعالیت به‌صورت زیر حاصل گردیده است:

$$(۶۲۶۷ \times ۰/۳) + (۱۹۴ \times ۰/۲) + (۴۲ \times ۰/۱) + (۸۰ \times ۰/۳) + (۳۵۹ \times ۰/۱) + (۱۰۶۹ \times ۰/۴)$$

$$+ (۵۰ \times ۰/۲) + (۴۲ \times ۰/۱) = ۲۴۲۴$$

جدول ۹: تخصیص هزینه‌ها به فعالیت‌ها

فعالیت	هزینه	حقوق و دستمزد	کالا	خدمات دریافتی	اداری و تشکیلاتی	استهلاک	کرایه ماشین	آموزش	اجاره، آب و برق	سایر هزینه‌ها	ABC (میلیون تومان)
مهندسی و طراحی	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۳		۰/۱	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۲۴۲۴
حمل و نقل	۰/۰۱			۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۳			۰/۱	۹۳۳
مونتاز	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۰/۰۸۵	۰/۳	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۲۶۸۰
آزمون	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۰۸۵		۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۲۲۰۸
تأمین	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۰/۰۳		۰/۲		۰/۱	۰/۱	۷۷۳
تنظیم و راه‌اندازی	۰/۰۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۵	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۲۲۵۵
پشتیبانی	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۳				۰/۱	۰/۲	۵۶۲
هزینه	۶۲۶۷	۱۹۴	۴۲	۸۰	۳۷۳۲	۳۵۹	۱۰۶۹	۵۰	۴۲	۱۱۸۳۵	

هزینه سربار (جدول ۹)، هزینه دستمزد مستقیم و هزینه مواد و تجهیزات (بر اساس داده‌های موجود در بخش حسابداری) در جدول ۱۰ قابل مشاهده است. با استفاده از این سه هزینه، بهای تمام‌شده برای پیاده‌سازی TRL۵ تا این زمان محاسبه گردیده است.

جدول ۱۰: بهای تمام‌شده تا TRL۵

ردیف	عنوان هزینه	هزینه (میلیون تومان)
۱	دستمزد مستقیم	۲۰۶۹۰
۲	مواد و تجهیزات	۳۱۶۰۰
۳	سربار	۱۱۸۳۵
	مجموع	۶۴۱۲۵

با توجه به بهای تمام‌شده فناوری (طبق جدول ۱۰) و مصاحبه انجام شده با خبرگان در خصوص

هزینه اتمام فناوری تا انتهای سطح بلوغ ۵، در جدول ۱۱، هزینه تکمیل سطح آمادگی فناوری ۵ به تفکیک حوزه مربوطه ارائه گردیده است.

جدول ۱۱: برآورد هزینه TRL۵

ردیف	عنوان هزینه	هزینه (میلیون تومان)
۱	دستمزد مستقیم	۱۰۰۰
۲	مواد و تجهیزات	۱۰۰۰۰
۳	سربار	۲۰۰۰
	مجموع	۱۳۰۰۰

در نهایت، با توجه به هزینه انجام شده و برآورد هزینه تکمیل TRL۵ می‌توان حدس زد که هزینه انجام سطح آمادگی فناوری ۵ برابر با ۷۷۱۲۵۰۰۰۰۰۰ تومان است.

### بحث

تحقیق حاضر به منظور ارزیابی سطح و برآورد هزینه‌های مربوط به سطح بلوغ فناوری یک زیردریایی کلاس سبک انجام گرفته است. در این زمینه پس از تعیین نیازها و الزامات محصول مورد مطالعه به منظور ارزیابی بلوغ فناوری از مدل سطح آمادگی فناوری نه سطحی استفاده شده است. سطح آمادگی فناوری روشی است که به کمک آن می‌توان میزان موفقیت یک فناوری را ارزیابی کرد. مطابق با تحقیقات صورت گرفته تا سال‌های اخیر حدود ۳۰ مدل بلوغ فناوری موجود است. در این زمینه هیچ‌گونه استانداردی برای انتخاب مدل بلوغ فناوری وجود نداشته و باید مدلی انتخاب شود که از یک رویکرد مدیریت استراتژیک برخوردار باشد و بتواند فناوری مورد نظر را به درستی ارزیابی کند. سطح آمادگی فناوری، امکان ارزیابی بلوغ فناوری را در مراحل توسعه محصول امکان‌پذیر ساخته و به صورت گسترده در سطح کشورهای پیشرفته کاربرد دارد. این مدل برخلاف سایر مدل‌ها، سطحی که فناوری در آن قرار دارد را به صورت کاربردی شناسایی می‌کند و برای ارزیابی فناوری‌ها، تخمین هزینه‌ها و لغو برنامه‌ها بسیار مفید است (فولادی و نیوری‌زاده، ۱۳۹۱). مطابق با پیشینه تحقیق منکینس (۱۹۹۵) در شرکت ناسا، سازمان حسابداری آمریکا (۱۹۹۹) در وزارت دفاع این کشور، اسمیت (۲۰۰۷) در وزارت

دفاع استرالیا و فولادی (۱۳۹۱) در وزارت دفاع ایران نیز به منظور ارزیابی سطح بلوغ فناوری از سطح آمادگی فناوری نه سطحی استفاده نموده‌اند. در اغلب این تحقیقات سطح فناوری با استفاده از سطح آمادگی فناوری تخمین زده شده و تحقیقات دقیق‌تری بر روی سطح فناوری تخمینی صورت نگرفته است. تحقیق حاضر با استفاده از ابزار محاسبه‌کننده سطح آمادگی فناوری سؤال‌های جزئی‌تر سطح تخمینی را همراه با دقت بیش‌تری مورد بررسی قرار داده است. این روش یکی از سخت‌گیرانه‌ترین روش‌ها به شمار می‌رود. مطابق با تحقیقات صورت گرفته، از این ابزار در هیچ‌یک از مطالعات داخلی استفاده نشده و تنها در نیروی هوایی و زمینی آمریکا برای فناوری‌های سخت و نرم دارای کاربرد بوده است. سپس به منظور تعیین شکاف موجود برای گذار از سطح آمادگی فناوری فعلی به تجزیه و تحلیل و دسته‌بندی سؤال‌های این سطح پرداخته شده است. مطابق با تحقیقات انجام شده در پژوهش‌های داخلی و خارجی هیچ‌گونه استاندارد خاصی در خصوص نحوه دسته‌بندی این سؤال‌ها وجود ندارد. از این رو مطابق با نظرات خبرگان و با توجه به شباهت‌های موجود، دسته‌بندی سؤال‌ها بر اساس معیارهای در نظر گرفته شده در شرکت نیکسوز انجام شده است. به کمک این معیارها و دسته‌بندی سؤال‌ها مطابق با آن‌ها درک مشترکی از فعالیت‌های تکمیلی سطح آمادگی فناوری تخمینی فراهم می‌آید. پس از تعیین سطح فناوری و شکاف‌های آن، هزینه‌های مربوط به سطح بلوغ فناوری با استفاده از روش ABC برآورد گردیده است. مطابق با تحقیقات انجام شده در پیشینه پژوهش در بیش‌تر پروژه‌ها از روش‌های سنتی و مبتنی بر تصورات ذهنی افراد استفاده می‌شود. این‌گونه از روش‌ها دارای نتایج دقیقی نبوده و ممکن است سبب ایجاد اشتباه شود. به‌عنوان مثال، تریله و همکاران (۲۰۱۵) هزینه‌های مؤثر بر سطح آمادگی فناوری مانند اندازه اولیه سرمایه، زمان انتظار راه‌اندازی، خطر، تأخیرها و غیره را مدنظر قرار داده و هزینه‌ها را پیش‌بینی کرده‌اند. این در حالی است که مطابق با نظر کوپر (۲۰۰۶)، بسیاری از سازمان‌ها تا زمان از دست رفتن سودآوری و قدرت رقابتی خود، تشخیص نمی‌دهند که سیستم‌های هزینه‌یابی سنتی اطلاعات غیرواقعی و نادرستی ارائه می‌دهد. به همین منظور در این پژوهش از روش ABC که یکی از روش‌های جدید بوده و به تصمیم‌گیری عملیاتی، تاکتیکی و استراتژیک کمک می‌کند استفاده شده است. این روش در هیچ‌یک از تحقیقات داخلی مربوط به سطح آمادگی فناوری کاربرد نداشته و برخلاف سایر مدل‌ها، هزینه‌یابی دقیق‌تری بر حسب فعالیت‌ها انجام می‌دهد. کلیه این موارد مطابق با رویکرد سه مرحله‌ای انجام و نتایج حاصل از آن به شرکت مذکور معرفی گردیده است.

## نتیجه‌گیری

در بازار رقابتی امروز، اکتساب فناوری‌های پیچیده دارای اهمیت زیادی است. از این رو، سازمان‌های بزرگ صنعتی و نظامی به منظور حفظ جایگاه خود همواره توجهات لازم را بدین مسئله مبذول داشته‌اند. در برخی از سازمان‌ها نظیر صنایع نظامی دستیابی به فناوری‌های نوظهور از طریق انتقال فناوری از خارج صورت نگرفته و با توجه به تهدیدهای روزافزون در حوزه فناوری‌های نظامی، ناگزیر به انتخاب رویکرد اکتساب فناوری از طریق تحقیق و توسعه هستند. ارزیابی وضعیت آمادگی فناوری چالش اساسی برای سازمان‌هایی به شمار می‌رود که از رویکرد اکتساب فناوری بهره می‌گیرند. بیش‌تر پروژه‌های کاربردی و صنعتی از فناوری‌های بالغ استفاده می‌کنند و با فناوری‌هایی که در سطح دنیا موجود نیستند و باید به وجود بیایند سروکار ندارند. از این رو، مدل‌ها و ادبیات مربوط به رویکرد اکتساب فناوری در مراکز دانشگاهی و صنعتی داخلی نهادینه نشده است.

هدف این پژوهش ارزیابی سطح فناوری یک محصول نظامی نوظهور و برآورد هزینه‌های دستیابی به سطح بلوغ فناوری این محصول است. در این زمینه با توجه به مطالعات انجام شده و مطابق با نظر کارشناسان به منظور ارزیابی سطح بلوغ فناوری از مدل سطح آمادگی فناوری استفاده شد. به همین منظور در مرحله اول پس از تعیین نیازها و با استفاده از دو ماتریس استاندارد خانه کیفیت (QFD) الزامات یا مشخصات فنی محصول تعیین و اولویت‌بندی گردید. پس از آن در مرحله دوم به کمک ابزار محاسبه‌کننده سطح آمادگی فناوری، سطح آمادگی فناوری محصول مورد بررسی تخمین زده شد. مطابق با این ابزار ابتدا برای هر یک از سطوح نه‌گانه سطح آمادگی فناوری سؤالی مطرح می‌شود. سپس از سطوح بالا آغاز شده و اولین سطحی که در مصاحبه با کارشناسان دارای پاسخ مثبت است به عنوان سطح آمادگی فناوری فعلی در نظر گرفته می‌شود. بعد از آن، به سؤال‌های جزئی‌تر این سطح پرداخته می‌شود. به کمک این ابزار و با پاسخ خبرگان به سؤال‌های آن در نرم‌افزار اکسل سطح آمادگی فناوری به صورت دقیق تعیین می‌گردد. برای محصول مورد بررسی سطح  $TRL_4$  به پایان رسیده و فناوری در حال گذار از  $TRL_5$  به  $TRL_6$  است. این مورد با تخمین اولیه سطح آمادگی فناوری موجود که بر اساس تعاریف بومی‌سازی شده سطوح آمادگی فناوری انجام شده بود دارای سازگاری است. سپس به منظور تعیین شکاف موجود برای گذار از سطح آمادگی فناوری به تجزیه و تحلیل و دسته‌بندی سؤال‌های این سطح بر اساس معیارهای در نظر گرفته شده در شرکت نیکسوز پرداخته شد. پس از آن با استفاده از سند مشخصه‌های فنی و طیف لیکرت هر یک از پاسخ‌های کیفی به صورت کمی درآمده

و میزان مطلوبیت آن‌ها مشخص گردید. به عبارت دیگر، تعیین شد که فناوری مذکور چه مقدار از سطح مطلوب فاصله دارد و درک مشترکی از فعالیت‌هایی که باید انجام پذیرد تا سطح آمادگی فناوری مربوطه تکمیل گردد، به وجود آمد. در نهایت و در مرحله ۳، به منظور تخمین هزینه‌های سطح آمادگی فناوری محصول موجود از روش ABC استفاده شد. به کمک این روش هزینه انجام سطح آمادگی فناوری محصول مورد نظر برابر با ۷۷۱۲۵۰۰۰۰۰۰ تومان تخمین زده شد. از این رو، سازمان مذکور می‌تواند برنامه‌ریزی‌های مالی و عملیاتی لازم برای آن را انجام دهد. گفتنی است که برای پیاده‌سازی مدل پژوهش، از خبرگان مناسب در زمینه مهندسی سیستم، برآوردگر هزینه‌های فناوری و محققین برای ارزیابی و تعیین هزینه‌های توسعه فناوری استفاده شد. به منظور موفقیت سازمان در اکتساب فناوری مورد مطالعه، باید هزینه‌های محاسبه‌شده انجام پذیرد و برای مشتری برای استفاده از فناوری در محصولات مورد نظر اطمینان ایجاد گردد.

#### محدودیت‌های پژوهش

در این پژوهش، استفاده از ابزار مصاحبه به منظور جمع‌آوری اطلاعات هم در مرحله شناسایی و هم در مرحله وزن‌دهی الزامات کارکردی-عملکردی با پیچیدگی روبرو بود. علاوه بر این، در جمع‌آوری اطلاعات مربوط به سطح آمادگی فناوری با توجه به کوچک بودن جامعه آماری (افرادی که به مسائل بلوغ فناوری آشنا هستند) تسلط لازم در برخی از افراد وجود نداشت.

#### پیشنهاد‌های پژوهش

برآورد هزینه‌ها با استفاده از رویکرد نوآوری باز، برآورد هزینه بلوغ فناوری با توجه به دوره زمانی طراحی محصول اولیه و پرداختن به مواردی همچون قابلیت اطمینان در سطح آمادگی فناوری از جمله پیشنهاد‌های پژوهش حاضر است.

## منابع

- آتش سوز، علی، مزروعی نصرآبادی، اسماعیل و بردبار، ماندانا. (۱۳۹۴). طراحی محصول با استفاده از رویکرد تلفیقی تحلیل سلسله مراتبی و گسترش عملکرد کیفیت. *فصلنامه مدیریت صنعتی*. ۹(۲۷)، ۷۱-۸۲.
- خدارحمی، بهروز. (۱۳۹۳). بررسی ساده سازی سیستم هزینه یابی بر مبنای فعالیت مبتنی بر محرک زمان گرا. *فصلنامه علمی و پژوهشی دانش حسابداری و حسابرسی مدیریت*، ۳(۱۰)، ۱۶۵-۱۸۱.
- صادق عمل نیک، مرتضی. (۱۳۸۴). بررسی عوامل مؤثر و ابعاد مختلف مدیریت توسعه تکنولوژی در هزاره سوم. *فصلنامه توسعه تکنولوژی*، ۳(۷)، ۳۶-۵.
- فولادی، قاسم و نپوری زاده، بهنام. (۱۳۹۱). *ارزیابی و استفاده از سطوح آمادگی فناوری* [پایان نامه]. موسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی، مرکز آینده پژوهی علوم و فناوری های دفاعی.
- محمدی، مهدی، منطقی، منوچهر، الیاسی، مهدی، صابرفرد، علیرضا و سعدآبادی، علی اصغر. (۱۳۹۵). شناسایی شایستگی های عمومی مؤثر بر ارتقای ظرفیت جذب دانش فناورانه در صنایع پیشرفته دفاعی ج. ا. ایران. *فصلنامه راهبرد دفاعی*، ۴(۵۵)، ۱۹۳-۱۵۵.
- Albert, T. (2016). Measuring technology maturity: Theoretical aspects measuring technology maturity. In *Measuring Technology Maturity: Operationalizing Information from Patents, Scientific Publications, and the Web* (pp. 9-113). Springer Gabler, Wiesbaden.
- Altunok, T., & Cakmak, T. (2010). A technology readiness levels (TRLs) calculator software for systems engineering and technology management tool. *Advances in Engineering Software*, 41(5), 769-778.
- Brimson, J. A. (1998). Feature costing: Beyond ABC. *Journal of cost management*, 12, 6-13.
- Buchner, G. A., Zimmermann, A. W., Hohgraave, A. E., & Schomäcker, R. (2018). Techno-economic assessment framework for the chemical industry—Based on technology readiness levels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(25), 8502-8517.
- Cooper, R. G. (2006). Managing technology development projects. *Research Technology Management*, 49(46), 23-31.
- Graettinger, C. P., Garcia, S., Siviyy, J., Schenk, R. J., & Van Syckle, P. J. (2002). *Using the technology readiness levels scale to support technology management in the DOD's ATD/STO environments* (No. CMU/SEI-2002-



- SR-027). Carnegie- Mellon UNIV Pittsburgh PA Software Engineering Institute.
- 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.
  - Jaiswal, E. S. (2012). A case study on quality function deployment (QFD). *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 3(6), 27-35.
  - Kannaiyah, D. (2015). Activity based costing (ABC): Is it a tool for company to achieve competitive advantage?. *International Journal of Economics and Finance*, 7(12), 275-281.
  - Kenley, C. R., & El-Khoury, B. (2012). *An analysis of TRL-based cost and schedule models* (No. NPS-AM-12-C9P21R02-086). Massachusetts Institute of Technology Cambridge. 219-235.
  - Lelkes, A. M. T. (2009). *Simplifying activity-based costing* [Doctoral dissertation, Oklahoma State University].
  - Lezama-Nicolas, R., Rodríguez-Salvador, M., Río-Belver, R., & Bildosola, I. (2018). A bibliometric method for assessing technological maturity: The case of additive manufacturing. *Scientometrics*, 117(3), 1425- 1452.
  - Liljander, V., Gillberg, F., Gummerus, J., & Van Riel, A. (2006). Technology readiness and the evaluation and adoption of self-service technologies. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 13(3), 177-191.
  - Mankins, J. (1995). Technology Readiness Levels: A White Paper., *Office of Space Access and Technology NASA, Advanced Concepts Office*. Reaserch-Gate. <https://www.researchgate.net/publication/247705707>.
  - Mankins, J.C. (2002). Approaches to strategic research and technology (R&T) analysis and road mapping. *Acta Astronautica*, 51(1-9), 3-21.
  - Mankins, J. C. (2009). Technology readiness and risk assessments: A new approach. *Acta Astronautica*, 65(9-10), 1208-1215.
  - Nolte, W. L. (2008). *Did I ever tell you about the whale?: Or measuring technology maturity*. Information Age Publishing (IPA).
  - Rolin, J. F. (2014). NEXOS TRL Report-Work Package 3-Delivrable 3.1, *European Commission's 7th Framework Programme*.

- Shahin, A. (2005). Quality function deployment: A comprehensive review. *Department of Management, University of Isfahan, Isfahan, Iran*, 1-25.
- Schinasi, K. V., Rodrigues, L., & Francis, P. (1999). Better management of technology development can improve weapon system outcomes. *Government Accountability Office (GAO), Washington, DC*, 76.
- Smoker, R. E., & Smith, S. (2007). System cost growth associated with technology-readiness level. *Journal of Parametrics*, 26(1), 8-38.
- Terrile, R. J., Doumani, F. G., Ho, G. Y., & Jackson, B. L. (2015). Calibrating the technology readiness level (TRL) scale using NASA mission data. In *2015 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-9). IEEE.
- Wahab, S. A., Rose, R. C., & Osman, S. I. W. (2012). Defining the concepts of technology and technology transfer: A literature analysis. *International business research*, 5(1), 61-71.
- Zhang, Y. F., Fuh, J. Y., & Chan, W. T. (1996). Feature-based cost estimation for packaging products using neural networks. *Computers in Industry*, 32(1), 95-11.