شناسایی سطوح آمادگی فناوری (TRL) براساس مستندات فنی

سعید جعفری خانشیر
محسن خانقلی
مجید زمانی

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۱۲
تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۲۱

چکیده:

توسعه‌ی محصول جدید به‌عنوان رویکردی نوین برای مواجه با تغییرات محیطی به‌کار می‌رود و مقدمه‌ای برای ورود به فضای رقابتی و کسب مزیت رقابتی است. اهمیت فرایند توسعه‌ی محصول جدید در محصولات پیچیده دوچندان است. اجرای موفقیت‌آمیز پروژه‌های توسعه‌ی این محصولات وابستگی شدیدی به، در اختیار داشتن فناوری‌های جدید و پیشرفته (برای بهره‌گیری در زیرسامانه‌های محصول نهایی) دارد. از طرفی اکتساب فناوری‌های پیشرفته دارای ریسک‌های مالی و زمانی بالایی است و یکی از راهبردهای اساسی برای تسریع در اجرای پروژه‌های سامانه‌ای پیچیده و کاهش هزینه‌های آن، استفاده از شبکه‌ی تأمین‌کنندگان بیرونی در قالب شرکت‌های دانش‌بنیان به‌منظور اکتساب و انتقال (به درون) فناوری‌های مورد نیاز در سامانه و دستیابی به دانش فنی آن‌هاست. نظارت بر گام‌های توسعه‌ی فناوری و تحویل‌گیری فنی یکی از دغدغه های سازمان متولی سامانه‌های پیچیده در فضای کار شبکه‌ای و مواجهه با پیمانکاران دانش‌بنیان است. هدف این مقاله ارائه‌ی چارچوب و معیاری برای شناسایی و اثبات سطح آمادگی فناوری برون‌سپاری‌شده است تا کارفرمای پروژه‌ی فناوری (که طراح و مسئول سامانه‌ی اصلی است) براساس این معیار، سطح آمادگی فناوری را تأیید کند. این تحقیق از نوع توصیفی پیمایشی است که از تجربیات متخصصین دفتر طراحی مرتبط با طراحی و توسعه‌ی سامانه‌های پیچیده و همچنین تعاریف موجود درزمینه‌ی سطح بلوغ فناوری و همچنین دیدگاه‌های مهندسی سیستم استفاده‌شده است و بعد از مرور ادبیات موجود درباره‌ی چگونگی ارزیابی و تعیین سطح آمادگی فناوری، از تحلیل خبرگی و همچنین اسناد و تجربیات کارشناسان دفتر طراحی درزمینه‌ی مهندسی سیستم و مهندسی ساخت استفاده شد و همچنین ابزار «سطوح آمادگی فناوری» (TRL) برای ارزیابی آمادگی فناوری انتخاب شد و به تناسب هریک از سطوح آمادگی فناوری، مدارک و مستندات فنی متعارف به‌عنوان معیار تأیید سطح آمادگی فناوری از طریق نظرات خبرگی شناسایی شد.

واژگان کلیدی:

توسعه‌ی محصول جدید، سامانه‌ی پیچیده (CoPS)، سطوح آمادگی فناوری (TRL)

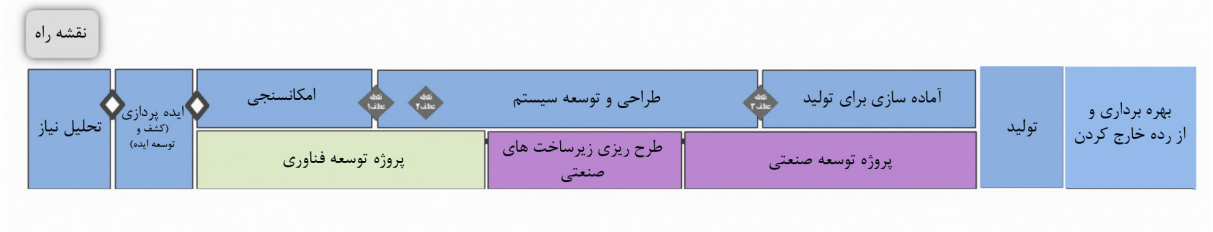
۱. مقدمه

سالیان متمادی مزیت رقابتی سازمان‌ها در فرایند تولید نهفته بود، اما امروزه توانمندی در توسعه‌ی محصول جدید، یکی از قابلیت‌های مزیت‌آفرین محسوب می‌شود، به‌گونه‌ای که بسیاری از سازندگان تراز اول جهانی با برون‌سپاری امر ساخت و معطوف‌شدن بر مدیریت طراحی و توسعه‌ی محصول و خدمات، رقابت در عرصه‌ی جهانی را پیش می‌برند.[۱] توسعه‌ی محصول جدید به‌عنوان رویکردی نوین برای پاسخ‌گویی به تغییرات محیطی به‌کار می‌رود و مقدمه‌ای برای ورود به فضای رقابتی و کسب مزیت رقابتی در جهان پویای امروز است. در سال ۱۹۸۱ از ۷۰۰ شرکت آمریکایی، حدود یک سوم از سود این شرکت‌ها به واسطه‌ی محصولات جدیدی بود که عرضه کرده‌اند. درحالی‌که در سال ۱۹۷۰، این مقدار یک پنجم بود. [۲] طبق آماری که در اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ به‌دست آمد، از هر ۱۱ پروژه‌ی توسعه‌ی محصول جدید، تنها یک مورد به موفقیت ختم شد.[۷] نقش نوآوری در خلق محصولات جدید آشکار است. با بررسی اجمالی مدل‌های نوآوری مشاهده می‌شود که سیر تکوینی این مدل‌ها از فضای محدود و یکسویه (فشار علم و تکنولوژی و یا کشش بازار) به‌سمت فضای تعاملی و کار شبکه‌ای حرکت‌کرده است و رویکرد جدید مدل نوآوری، بهره‌گیری از توانمندی‌ها و منابع بیرونی و همچنین تشریک مساعی در قالب کار شبکه‌ای برای تحقق نوآوری است. در این دیدگاه با اشاره به اینکه

در شرایط رقابتی کنونی، دیگر دسترسی به ابزارهای فنی یک مزیت رقابتی جدی به حساب نمی‌آید، ادعا می‌شود که دسترسی‌های ارتباطی و شبکه‌های همکاری هستند که برای بنگاه‌ها و سایر بازیگران ایجاد مزیت رقابتی می‌کنند.[۱۳] از طرفی بهره‌وری عناصر یک شبکه به‌شرط وجود روابط سامانمند می‌تواند بالاتر باشد. به‌عبارت دیگر، بهره‌وری بنگاه‌ها و سایر بازیگران به کمیت (تعداد) و کیفیت (شدت و عمق) تعاملات و ارتباطات آن‌ها وابسته است.[۳] اهمیت این رویکرد نوین به‌ویژه در محصولات پیچیده (CoPS: Complex Products and Systems) که فناوری‌محور و دانش‌بنیان بوده، دوچندان است. ویژگی این نوع محصولات (پیچیده) به‌شرح زیر است:[۱۱]

- از تکنولوژی‌های پیشرفته تشکیل شده‌اند،
- نیاز به یکپارچگی بالایی در میان زیر سیستم‌هایش دارد،
- منحصربه‌فرد هستند و دارای هزینه و عدم قطعیت تکنولوژیک بالا هستند،
- متشکل از تعداد زیادی از اقلام و زیرمجموعه‌ها هستند،
- دارای مشتری خاص و اغلب سفارشی است و در محیط نوآورانه توسعه می‌یابد.

در طراحی و توسعه‌ی این‌گونه محصولات، همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، پروژه‌ی توسعه‌ی سیستمی از پروژه‌های توسعه‌ی فناوری مجزاست و شروع پروژه‌ی اصلی (توسعه‌ی سامانه) با مراحل پایان پروژه‌ی توسعه‌ی فناوری‌های مورد نیاز سامانه هم‌زمان است. در نتیجه برای توسعه‌ی محصولات پیچیده به‌دلیل وابستگی به فناوری‌های متعدد و جدید، زمینه‌های متعددی از تخصص و دانش فنی لازم است و بسترسازی و کسب قابلیت در تمامی این زمینه‌ها برای یک بنگاه امکان‌پذیر است و برای این‌گونه سازمان‌ها، بهره‌گیری از منابع بیرونی دانش و فناوری در قالب شبکه و مدیریت روابط داخلی شبکه یکی از ضرورت‌های کلیدی است و در مدل‌های جدید نوآوری که تأکید زیادی به بهره‌گیری از توانمندی‌های بیرونی و شبکه دارد، مفهوم نوآوری باز معرفی‌شده است. از طرفی فرایند توسعه‌ی محصولات پیچیده عمدتاً در قالب طرح‌های توسعه‌ی محصولات جدید انجام می‌شود و به‌منظور موفقیت آن‌ها لازم است علاوه‌بر قابلیت‌هایی که برای اجرای طرح لازم است، سازمان قابلیت‌های جدیدی داشته باشد تا بتواند با استفاده از شبکه‌ی همکاری فنی طرح‌های توسعه‌ی محصولات را با موفقیت اجرا کند. [۱۳]



شکل (۱) چرخه‌ی عمر تحقق محصول سامانه‌های پیچیده [۴]

در زمینه‌ی شبکه، مطالعات متعددی انجام‌شده است و مباحث جدیدی مطرح‌شده است. در تحقیقات اخیر انجام‌شده درزمینه‌ی نوآوری باز و بهره‌گیری از شبکه اکثر تحقیقات درزمینه‌های ساختارهای شبکه، روابط بین اعضا و نتایج مورد انتظار انجام‌شده است و مسئله‌ی قابلیت‌های مختلف درون‌سازمانی در مقایسه با آن‌ها با کم‌توجهی روبروشده است.[۱۵] همچنین تحقیقات اندکی درزمینه‌ی توانمندی و قابلیت‌های درون‌سازمانی برای کار در فضای نوآوری باز انجام‌شده است. گستردگی تنوع و پیچیدگی‌های دانش فنی و فناوری‌های مورد نیاز برای خلق محصولات پیچیده، به‌قدری است که امکان سرمایه‌گذاری و ورود به تمامی حوزه‌های فناوری‌ها وجود ندارد و توسعه‌ی شبکه و بهره‌گیری از توانمندی‌های فناورانه و نوآورانه‌ی بیرونی ضرورتی جدی و حیاتی است. از طرفی این ضرورت با توجه به پیامدهای مثبت بهره‌گیری از توانمندی‌های بیرونی از قبیل کاهش هزینه و زمان، عدم قطعیت تکنولوژیک و افزایش دسترسی به فناوری‌های جدید

دوچنـدان می‌شـود و بالطّبـع، لازمـه‌ی اتخـاذ رویکـرد جدیـد نـوآوری بـاز، شناسـایی و ایجـاد توانمندی‌هـای درون‌سـازمانی متناسـب بـا ایـن رویکـرد اسـت. از طـرف دیگـر براسـاس آسیب‌شناسـی انجام‌شـده در صنعـت محصـولات پیچیـده، نگرانـی هایـی از قبیـل تعامـل بـا منابـع بیرونـی، توسـعه‌ی متـوازن شـبکه، انتقـال دانـش فنـی بـه درون سـازمان، جلوگیـری از نشـر اطلاعـات دارای طبقه‌بنـدی، نگهداشـت نخبـگان، مدیریـت بـر دارایی‌هـای معنـوی، تسـهیل‌گری منابـع مالـی، ترغیـب شـبکه بـه رابطـه‌ی بلندمـدت، نظـارت بـر همـکاران داخـل شـبکه و ... بـرای کار در فضـای نـوآوری بـاز مشاهده‌شـده اسـت کـه بـرای رویارویـی بـا ایـن دغدغـه هـا، قابلیت‌هـای درون‌سـازمانی ضـروری اسـت .[۴]

یکـی از قابلیت‌هـای جدیـد بـرای کار در محیـط شـبکه‌ای و بهره‌گیـری از توانمندی‌هـای بیرونـی در توسـعه‌ی فناوری‌هـای جدیـد نظـارت فنـی بـر پروژه‌هـای برون‌سپاری‌شـده‌ی توسـعه‌ی فنـاوری و تحویل‌گیـری فنـی آن‌هاسـت. بـا توجـه بـه تجربیـات کشـورهای دیگـر درزمینـه‌ی ارزیابـی سـطح بلـوغ فنـاوری، همان‌گونـه کـه در بخـش مـرور ادبیـات آمـده اسـت، ابـزار(Technology Readiness Levels) TRL بـه یـک ابـزار مفیـد بـرای ارزیابـی سـطح آمادگـی فنـاوری مطـرح اسـت و اقبـال گسـترده‌ی جهانـی نسـبت بـه آن وجـود دارد. به‌ویـژه اینکـه در صنایعـی کـه دارای محصـولات سـامانه‌ی پیچیـده از قبیـل ناسـا یـا صنایـع دفاعـی کشـورهایی ماننـد انگلسـتان و کانـادا ایـن ابـزار اسـتفاده می‌شـود.[۶] درنتیجـه بـا توجـه بـه تناسـب ابـزار TRL بـا محصـولات مـورد مطالعـه ایـن تحقیـق (سـامانه‌های پیچیـده) ایـن ابـزار به‌عنـوان ابـزار اندازه‌گیـری سـطح آمادگـی فنـاوری انتخـاب شـد. ایـن ابـزار نُـه سـطح آمادگـی فنـاوری را معرفـی می‌کنـد. تعییـن سـطح بلـوغ یـک فنـاوری (کـه در مسـیر بلـوغ و کامل‌شـدن قـرار دارد) کار سـختی نیسـت. بلکـه سـازمانی کـه متولـی توسـعه‌ی یـک سـامانه‌ی پیچیـده اسـت و بایـد بـر تعـداد زیـادی پیمانـکار (کـه درزمینـه‌ی توسـعه‌ی فناوری‌هـای زیرمجموعـه‌ی سـامانه‌ی فعالیـت می‌کننـد) نظـارت و مدیریـت فنـی کنـد نمی‌توانـد به‌صـرف ادعـای پیمانـکار در مـورد رسـیدن به‌سـطح مشـخصی از آمادگـی فنـاوری اطمینـان حاصـل کنـد و لازم اسـت مسـتندات و مـدارک فنـی معتبـر ایـن ادعـا را اثبـات کنـد. لـذا بـا توجـه بـه چالـش پیـش‌رو بـرای تفسـیر و اثبـات هریـک از مراحـل TRL در ارزیابـی فناوری‌هـای برون‌سپاری‌شـده، ضـروری اسـت کـه بـرای هریـک از مراحـل TRL معیارهایـی را داشـته باشـیم. درنتیجـه در ایـن تحقیـق از تجربیـات سـازمانی موجـود در مطالعـه‌ی مـوردی و دیـدگاه مهندسـی سیسـتم به‌عنـوان ابـزار مهـم و تأثیرگـذار در مدیریـت فنـی پروژه‌هـای سـامانه‌ای بـزرگ و پیچیـده و همچنیـن دیـدگاه مهندسـی سـاخت به‌عنـوان واسـطه‌ی انتقـال از تحقیقـات بـه تولیـد، استفاده‌شـده اسـت. براسـاس دیـدگاه سـازمان‌های پیـش‌رو و فعـال درزمینـه‌ی مهندسـی سیسـتم و تجربیـات درون‌سـازمانی موجـود در مطالعـه مـورد ایـن تحقیـق، هـدف اصلـی مهندسـی سیسـتم بـه کمینه‌رسـاندن خطاهـای طراحـی در دسـتیابی بـه محصولـی منطبـق بـا الزامـات و ویژگی‌هـای تعریف‌شـده بـا کمینـه هزینـه و کمینـه زمـان اسـت. خطاهـای طراحـی می‌توانـد ناشـی از عـدم تعریـف درسـت نیازهـا و الزامـات، ضعـف در تطابـق فیزیکـی و کارکـردی اجـزا و زیرمجموعه‌هـا، ناتوانـی در مدیریـت روابـط و داده‌هـای طراحـی، ضعـف در شناسـایی و ارزیابـی ریسـک‌های طراحـی و ... باشـد. مهندسـی سیسـتم، مدیریـت مؤثـر و یکپارچـه‌ی فراینـد طراحـی اسـت و اسـتقرار و پیاده‌سـازی الزامـات نظـام مهندسـی سیسـتم بـرای هـر دفتـر طراحـی، یکـی از ضرورت‌هـای مهـم در مدیریـت فنـی پروژه‌هـای طراحـی و توسـعه اسـت. ایـن نظـام شـامل فرایندهایـی از قبیـل، مدیریـت الزامـات و نیازهـای ذی‌نفعـان (بهره‌بـردار، سـازمان بالادسـتی و ...) مدیریـت چرخـه‌ی عمـر طراحـی، مدیریـت پیکره‌بنـدی، مدیریـت تصدیـق و تأییـد طراحـی، مدیریـت تسـت و ارزیابـی، مدیریـت ریسـک طراحـی، مدیریـت بازنگـری، مدیریـت تأمیـن، مدیریـت داده‌هـای طراحـی، مدیریـت یکپارچگـی طراحـی و مدیریـت فرایندهـای طراحـی اسـت. [۱۶] درنتیجـه، روش مسـتندات فنـی بـرای تطبیـق بـا سـطح آمادگـی فنـاوری استفاده‌شـده اسـت و بـا اسـتفاده از نظـر خبرگـی کارشناسـان یـک دفتـر طراحی و توسـعه‌ی سـامانه‌های پیچیـده، لیسـتی از مسـتندات لازم بـرای

اثبات هریک از مراحل TRL تعیین و ارائه شده‌است.

۲- پیشینه‌ی پژوهش

۲-۱ تاریخچه‌ی شکل‌گیری مفهوم سطوح آمادگی فناوری

یکی از معیارهایی که جهت سنجش آمادگی و بلوغ فناوری‌ها مورد استفاده قرارگرفته است، سطوح آمادگی (بلوغ) فناوری یا به‌طور اختصار TRL است. این سطوح برای اولین‌بار در دهه‌ی ۸۰ میلادی توسط سازمان ناسا مطرح شد. تعاریف اولیه شامل هفت سطح بود که توسط سادین و همکارانش در سال ۱۹۸۹ میلادی ارائه شد.[۱۲] در سال ۱۹۹۵ میلادی، منکینز این سطوح را تا نُه سطح افزایش داد و هرکدام از سطوح را توصیف کرد.[۱۴] از آن سال به بعد سازمان ناسا از این ابزار در ارزیابی سطح آمادگی و بلوغ فناوری‌ها در برنامه‌های توسعه‌ی فناوری خود استفاده کرد. در سال ۱۹۹۹ میلادی، سازمان حسابرسی کل آمریکا بررسی گسترده‌ای درخصوص استفاده از این ابزار در پروژه‌ها و طرح‌های تحقیقاتی دفاعی انجام داد و درنهایت به وزارت دفاع آمریکا پیشنهاد کرد تا از این ابزار در ارزیابی بلوغ فناوری برنامه‌های دفاعی استفاده کند.[۲۲] در سال ۲۰۰۲ میلادی ویلیام نولت در نیروی هوایی آمریکا نرم‌افزاری را تحت عنوان محاسبه‌گر سطوح آمادگی فناوری توسعه داد. در این نرم‌افزار براساس ویژگی‌هایی که هریک از سطوح دارند، سؤالاتی را مطرح‌کرده است که باید به آن‌ها جواب داد. نتیجه‌ی این جواب‌ها نشان خواهد داد که فناوری مورد نظر در چه سطحی از آمادگی قرار دارد.[۱۷]،[۱۸] سطوح آمادگی فناوری در وزارت دفاع انگلستان نیز برای اولین‌بار به‌عنوان ابزاری برای مدیریت ریسک فناوری به‌کار گرفته شد. در سال ۲۰۰۱ میلادی پیش‌نویس راهنمای سیستم مدیریت تأمین در خصوص TRL منتشر شد و از آن به بعد تعدادی از تیم‌های پروژه یکپارچه استفاده از TRL را شروع کرده‌اند. از طرف دیگر، به‌منظور بهبود مدیریت فناوری و کاهش تأخیر برنامه‌ها، استفاده گسترده از TRL در برنامه‌های تأمین، توسط رئیس مشاورین علمی و رئیس تدارکات دفاعی وزارت دفاع انگلستان تأکید شد و درحال‌حاضر استفاده از آن الزامی‌شده است. تعاریفی که وزارت دفاع انگلستان از سطوح نُه‌گانه‌ی آمادگی فناوری ارائه‌داده است با تغییر بسیار اندک، همان تعریفی است که وزارت دفاع آمریکا از سطوح مذکور بیان‌کرده است [۲۰]. وزارت دفاع انگلستان سطوح آمادگی فناوری را به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی فناوری‌ها به‌طور مجزا درنظر گرفته و لذا از آن برای فناوری‌های زیرسیستم‌ها استفاده می‌شود و یک سیستم کامل را در برنمی‌گیرد. درواقع، سطوح آمادگی فناوری درارتباط با ساخت و تولید، یکپارچه‌کردن سیستم، به‌کارگیری سیستم و ... اظهار نظر نمی‌کند. به‌همین‌دلیل، از این سطوح در ارزیابی ریسک فناوری استفاده‌شده و برای ارزیابی ریسک فنی، که در سطح سیستم است، از سطوح آمادگی سیستم (SRL: System Readiness Levels) که توسط وزارت دفاع انگلستان ارائه شد، استفاده می‌شود.[۲۱]

همچنین با توجه به اینکه در یک محیط عملیاتی ملاحظات مربوط به مجتمع‌سازی، با هم کارکردن و پشتیبانی درباره‌ی فناوری‌های زیرمجموعه‌ی یک سامانه اهمیت زیادی دارد، نگاه تک‌بعدی فناوری (بدون درنظر گرفتن جایگاه آن در یک سامانه‌ی پیچیده) قابل توجیه نیست و ضروری است که به مباحث مهندسی سیستم در روند توسعه‌ی یک فناوری و توجه به نقش آن در طرح توسعه‌ی یک سامانه توجه کرد و برهمین اساس مفهوم سطوح آمادگی سیستم مطرح شد .[۵]

در سال ۲۰۰۳ میلادی، سازمان تدارکات دفاعی وزارت دفاع استرالیا استفاده از سطوح آمادگی فناوری را در پروژه‌های دفاعی توصیه کرد و متذکر شد که سازمان علوم و فناوری دفاعی باید این توانایی را پیدا کند تا از این متدولوژی برای ارزیابی ریسک فنی پروژه‌های دفاعی استفاده کند.[۱۹] همچنین تلاش‌های مختلفی برای انطباق سطوح آمادگی فناوری بر چرخه‌ی تحقیق و توسعه‌ی توسط سازمان ناسا، وزارت دفاع آمریکا و بر خی شرکت‌های دیگر نظیر بوییننگ صورت پذیرفت. این انطباق برای سازمان ناسا و وزارت دفاع آمریکا تأییدشده است. همچنین مشاهده شد؛

سطوح آمادگی فناوری از فاز مفهوم یا مطالعات و پیشرفته شروع می‌شود و تا یک نمونه‌ی عملیاتی ادامه می‌یابد.[۱۸]

در سال ۲۰۰۶ میلادی وزارت دفاع کانادا در طی گزارشی استفاده از سطوح آمادگی فناوری را مورد بررسی قرار داد. نتیجه‌ی این تحقیق آن بود که سطوح آمادگی فناوری به‌تنهایی برای ارزیابی بلوغ یک فناوری کافی نیست و باید مسائل دیگری نظیر ملاحظات برنامه‌ای، ساخت و تولید نیز درنظر گرفته شوند. به‌همین‌دلیل ابزار سطح بلوغ فناوری (TMLs: TechnologyMaturity Levels) را برای ارزیابی بلوغ فناوری معرفی کرد.[۸]

مطالعه روی سطوح آمادگی فناوری در وزارت دفاع ایران، در سال ۱۳۸۱ شروع شد. بررسی‌های اولیه نشان داد که از این روش می‌توان در انجام پروژه‌های تحقیقاتی و توسعه‌ی صنعتی استفاده کرد [۶].

۲-۲ تعریف سطوح آمادگی فناوری

در این تحقیق سطوح آمادگی فناوری (TRL)براساس دیدگاه ناسا و تجربیات درون‌سازمانی مطالعه‌ی موردی به‌شرح زیر درنظر گرفته‌شده که دارای نُه سطح است:[۱۰]

سطح اول: در این سطح پژوهش‌های علمی جهت تبدیل‌شدن به پژوهش‌های کاربردی و توسعه‌ای شروع می‌شود.

سطح دوم: در این سطح کاربرد عملی صرفاً به‌طور فرضی مشخص‌شده است، اما هیچ تحلیل تفصیلی یا دلیل تجربی برای پشتیبانی فرضیه در دسترس نیست.

سطح سوم: در این سطح تحقیق و توسعه‌ی فعال شروع‌شده است. این مورد شامل مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی، برای اعتبارسنجی واقعی (فیزیکی) پیش‌بینی‌های تحلیلی جهت عناصر مجزای فناوری است. در این مرحله شبیه‌سازی و مدل‌سازی‌ها، پیش‌بینی‌های تحلیلی را اثبات می‌کند.

سطح چهارم: در این سطح اجزای اساسی فناوری تلفیق شده‌اند تا نشان دهند که در تعامل خوبی با یکدیگرند. در این مرحله سیستم به‌صورت رومیزی ساخته‌شده است و شاکله‌ی فناوری از نظر جلب اطمینان در درجه‌ی پایینی قرار دارد و صرفاً جهت نمایش عملکردهای اساسی و تست‌های محیطی بحرانی ارائه‌شده است. عملکرد مذکور متناسب با شرایط محیطی نهایی تعریف می‌شود.

سطح پنجم: در این سطح، صحت فناوری روی میز (TRL4) به‌طور مشهودی ارتقا یافته است. اجزای اساسی فناوری با اجزای پشتیبان واقعی به‌صورت منطقی تلفیق‌شده‌اند، لذا می‌توانند در محیط عملیاتی شبیه‌سازی‌شده تست شود.

سطح ششم: در این سطح، فناوری با صحت بالا به‌طور منحصربه‌فرد تمام الزامات اساسی کمی مورد نظر را در شرایط محیطی بحرانی عملیاتی به‌خوبی برآورده می‌سازد. در این مرحله سیستم به‌اندازه‌ی کافی از مرحله (TRL5) جلوتر است و نمایانگر یک گام اساسی در ارتقای آمادگی فناوری است.

سطح هفتم: در این سطح، نمونه در سامانه طراحی‌شده، یا سامانه‌ی شبیه‌سازی‌شده قرارگرفته و با صحت بالا به‌طور منحصربه‌فرد تمام الزامات اساسی کمی مورد نظر را در شرایط محیطی بحرانی عملیاتی به‌خوبی برآورده می‌سازد. در این مرحله فناوری به‌اندازه‌ی کافی از مرحله (TRL6) جلوتر رفته و نمایانگر یک گام اساسی در ارتقای آمادگی فناوری است. در پایان این سطح، نقش‌آفرینی فناوری به‌صورت یکپارچه با دیگر بخش‌های زیرسامانه مورد ارزیابی قرارمی‌گیرد.

سطح هشتم: در این سطح، فناوری در شکل پایانی خود و تحت شرایط کارکرد مورد انتظار به اثبات رسیده است. در اغلب موارد این مرحله آمادگی فناوری بیانگر توسعه‌ی زیرسامانه‌ی واقعی است. مثال‌ها شامل توسعه‌ی تست و ارزیابی زیرسامانه در سامانه‌ی اصلی مورد نظر به‌منظور انطباق زیرسامانه با مشخصات طراحی است. مستندسازی طراحی، ساخت و تمامی فرایندهای پشتیبان (ساخت و تولید) و تست و نگهداری و تعمیرات باید تهیه‌شده باشد.

سطح نهم: در این سطح، کاربرد واقعی فناوری در شکل نهایی خودش و تحت شرایط مأموریتی، مثل شرایطی که در تست‌های عملکردی قرار دارد، اثبات می‌شود. مثال‌ها شامل استفاده‌ی زیرسامانه‌ی تحت شرایط مأموریتی عملکردی است.

۲-۳ کاربرد سطوح آمادگی فناوری

مهم‌ترین هدف استفاده از این شاخص، سطح‌بندی و پیاده‌سازی آمادگی فناوری برای کمک به مدیریت در پروژه‌های فناوری و حمایت از تصمیم‌گیرندگان این پروژه‌ها در امور زیر است:[۶]

- ارائه‌ی یک سیستم نشان‌دهنده‌ی وضعیت عمومی و سطح فناوری (ابزار بصری مونیتورینگ بلوغ فناوری)
- مدیریت ریسک و ابزاری برای محاسبه‌ی ریسک در پروژه‌های فناوری،
- ابزاری برای تصمیم‌گیری در مورد نحوه‌ی سرمایه‌گذاری در پروژه‌های فناوری،
- ابزاری برای کمک به انتقال فناوری و تعیین زمان مناسب برای اجرای آن،
- پیاده‌سازی مدیریت سیستم و مهندسی سیستم در حوزه‌ی فناوری.

۲-۴ موانع استفاده از سطوح آمادگی فناوری و نواقص آن

با وجود کاربردهایی که برای سطوح آمادگی فناوری بیان شد، به‌نظر می‌رسد ابهاماتی در ارتباط با استفاده از این سطوح در مدیریت پروژه‌های تحقیقاتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مطالعات دولینگ و پاردو که نواقصی را به مفهوم TRL نسبت می‌دهد، اشاره کرد:[۹]

- ضرورت توجه به فناوری از دیدگاه مهندسی سیستم و یکپارچگی فناوری با سامانه‌ی اصلی وجود دارد.
- سطوح آمادگی فناوری، دید یک‌بعدی از بلوغ فناوری ارائه می‌دهد و همه‌ی موارد را درباره‌ی مدیریت یک برنامه‌ی توسعه‌ی فناوری به ما نمی‌گوید و تنها به عوامل فنی فناوری توجه دارد و به سایر ابعاد طرح توسعه‌ی فناوری (از قبیل زمان و هزینه) توجهی ندارد.
- ضرورت توجه به فناوری از دیدگاه مهندسی سیستم و یکپارچگی فناوری با سامانه‌ی اصلی وجود دارد.
- سطوح آمادگی فناوری توانایی ارزیابی ریسک فنی یک سامانه‌ی کامل را ندارد و تنها برای ارزیابی ریسک ناشی از یک فناوری منفرد مناسب است.
- عدم پرداختن به عدم قطعیت در طول فرایند توسعه‌ی فناوری مشاهده می‌شود.
- سطوح آمادگی فناوری در کشورهای پیشرفته با فناوری‌های نو و بدیع (در دنیا) که قبلاً سابقه نداشته و یا استفاده جدید از فناوری‌های موجود مرتبط است.
- در کشورهای پیشرفته، جغرافیای ارزیابی سطح آمادگی فناوری، کل جهان است. به بیان دیگر، وقتی یک فناوری در جایی از دنیا به بلوغ رسیده باشد، برای کشورهای مذکور نیز بالغ‌شده محسوب می‌شود. زیرا معمولاً به‌راحتی در دسترشان قرار می‌گیرد. اما برای کشوری نظیر کشور ما این امر صادق نیست. ممکن است یک فناوری در کشورهای دیگر بالغ‌شده باشد، اما به‌علت شرایط حاکم بر کشور ما (تحریم‌ها و فشارهای جهانی) به‌سادگی در دسترس ما نیست. به‌گونه‌ای که در بسیاری از موارد ناچار به توسعه‌ی آن در داخل می‌شویم.
- پروژه‌های دفاعی کشور (کاربردی و توسعه‌ی صنعتی) عمدتاً از فناوری‌های بالغ‌شده در سطح دنیا استفاده می‌کنند و معمولاً با فناوری‌هایی که در دنیا موجود نیستند و باید به‌وجود آیند، سروکار ندارند. پس چگونه می‌توان از سطوح آمادگی فناوری در این گونه پروژه‌ها استفاده کرد؟
- با اینکه استفاده از سطوح آمادگی فناوری در توسعه‌ی فناوری مفید است، اما درباره‌ی اینکه چگونه فناوری با دیگر اجزای یک سامانه تلفیق می‌شود، چیزی نمی‌گوید.

۲-۴ ارزیابی سطوح آمادگی فناوری

برای شناسایی سطح آمادگی فناوری روش‌های مختلفی ارائه‌شده است. در بعضی از روش‌های ساده، سطح آمادگی فناوری به‌راحتی از طریق یک ماتریس تعیین می‌شود. درحالی‌که استفاده از سطوح آمادگی فناوری در پروژه‌های تحقیقاتی نیازمند جزئیات دقیق‌تری از هریک از سطوح است و روش‌های ساده برای ارزیابی سریع سطح آمادگی فناوری در ابتدای پروژه مناسب است ولی در خلال اجرای پروژه که نیازمند ارزیابی دقیق‌تر سطح آمادگی یک فناوری است، لازم است از یک چک‌لیست استفاده کرد. این چک‌لیست شامل ویژگی‌هایی است که هرسطح آمادگی باید دارا باشد.[۶]

در تعاریف اولیه که توسط سازمان ناسا و وزارت دفاع آمریکا ارائه‌شده، اشاره‌ی بسیار خلاصه به این ویژگی‌ها شده است و به‌همین دلیل، فعالیت‌های فراوانی برای توصیف این سطوح انجام‌شده است. مهم‌ترین فعالیت در این زمینه، توسعه‌ی نرم‌افزار محاسبه‌گر TRL است که توسط ویلیام نولت در نیروی هوایی آمریکا در سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ توسعه یافت. در این نرم‌افزار براساس ویژگی‌هایی که هریک از سطوح دارند سؤالاتی مطرح‌شده است که باید به آن‌ها جواب داد. نتیجه‌ی این جواب‌ها نشان خواهد داد که فناوری مورد بررسی در چه سطحی از آمادگی قرار دارد. این چک‌لیست براساس فرایندی که در مهندسی سیستم حاکم است تهیه‌شده است. در این نرم‌افزار موارد مطرح‌شده در سه دسته ملاحظات طبقه‌بندی شده‌اند که عبارت‌اند از:

۱) ملاحظات فناورانه،

۲) ملاحظات ساخت و تولید،

۳) ملاحظات مدیریتی و برنامه‌ای.

همچنین، برنامه می‌تواند هم برای سخت‌افزار و هم نرم‌افزار یا ترکیب آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه‌ی این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که در جریان توسعه‌ی یک فناوری، چند عامل و مشخصه هم‌زمان با هم رشد می‌کنند. اهم این عوامل و مشخصه‌ها شامل، مفاهیم و تئوری‌های علمی، طراحی، محیطی که فناوری به نمایش درمی‌آید، تست و ارزیابی، تلفیق فناوری با اجزای دیگر، ساخت و تولید، هزینه‌ها، و مواد است. به‌همین علت، هنگام ارزیابی سطح آمادگی یک فناوری باید این عوامل را مورد ارزیابی قرار داد. به زبان ساده، توسعه‌ی یک فناوری چیزی نیست جز رشد و بلوغ هم‌زمان این عوامل در طی اجرای پروژه‌ی توسعه‌ی فناوری. درصورتی‌که در طی انجام پروژه به یک یا چند عامل از عوامل فوق توجهی نشود و یا درجا بزنند، پروژه به سرانجام نهایی خود نخواهد رسید؛ زیرا اصول اولیه‌ی توسعه‌ی فناوری نقض می‌شوند. برای نمونه، فرض کنیم که مستندات پروژه همگام با پروژه رشد نکنند و تهیه‌ی آن‌ها به آخر پروژه محول شود. در این صورت، معمولاً اعضای گروه پروژه بعد از اتمام ظاهری پروژه یا مطالب از ذهنشان رفته است، یا با بی‌حوصله‌گی مستندات را آماده می‌کنند که قطعاً ناقص خواهند بود و یا به‌کار دیگری مشغول شده‌اند و دیگران به مستندسازی می‌پردازند. در هر صورت، مستندات کاملی تولید نمی‌شود؛ و این امر اصل تکرارپذیری را نقض می‌کند زیرا با مستندات ناقص نمی‌توان فناوری یا سامانه‌ی مشابه دیگری تولید کرد [۱۷]،[۱۸].

در سال ۲۰۰۹ هندبوک TRL برای کاربردهای فضایی منتشر شد که در آن بعد از معرفی TRL ، سئوالات کلیدی را که در هریک از سطوح باید پاسخ‌داده شود (یا به تعبیری اهداف مهمی که در هر سطح باید محقق شوند) مطرح کرد که این سئوالات با کار انجام‌شده توسط نولت اشتراک زیادی داشت و جمع‌بندی این دو نظر به‌شرح زیر است:[۶]،[۱۷]، [۱۸]

۲-۴-۱ سطح آمادگی فناوری اول

- آیا اصول علمی مشخص شده‌اند و مطالعات نظری این اصول را تأیید کرده‌اند؟
- آیا حامیان و سرمایه‌گذاران توسعه‌ی فناوری مشخص است؟
- آیا محققان و محل تحقیقات مشخص شده‌اند؟

۲-۴-۲ سطح آمادگی فناوری دوم

- آیا مشتری و کاربر و مطالبات اولیه توسط آن‌ها مشخص شده‌اند؟
- آیا مطالعات، امکان کاربردی‌شدن فناوری را نشان داده‌اند؟
- آیا اجزای اولیه فناوری مشخص شده‌اند؟
- آیا تحلیل‌های اولیه، کارکردهای (Functions) اصلی مورد نیازی را که فناوری باید ارائه دهد، نشان‌داده است؟
- آیا مطالعات تحلیلی تفصیلی، اصول پایه را تأیید کرده‌اند؟
- آیا تجربیات و آزمایش‌های مورد نیازی که باید انجام شوند، مشخص شده‌اند؟

۲-۴-۳ سطح آمادگی فناوری سوم

- آیا محیط به شکل یک محیط آکادمیکی تبدیل‌شده

است؟

• آیا مطالعات تحلیلی، پیش‌بینی‌های مراحل قبل را تأییدکرده است؟

• آیا قابلیت پیش‌بینی‌شده برای فناوری از طریق مدل‌سازی و شبیه سازی تأییدشده است؟

• آیا کاربردی‌بودن فناوری از طریق تجربیات و آزمایش‌های آزمایشگاهی تأییدشده است؟

• آیا قابلیت پیش‌بینی‌شده برای فناوری از طریق تجربیات و آزمایش‌های آزمایشگاهی تأییدشده است؟

• آیا روش‌ها و تکنیک‌های طراحی شناسایی/ ایجاد شده‌اند؟

• یا مطالعات مفهومی نشان داده‌اند که فناوری با دیگر اجزای سامانه، همان‌طورکه انتظار می‌رفت، کار می‌کند؟

۲-۴-۴ سطح آمادگی فناوری چهارم

• آیا مؤلفه‌های موقتی یا آزمایشگاهی فناوری ساخته یا تهیه شده‌اند؟

• آیا مؤلفه‌های موقتی یا آزمایشگاهی در آزمایشگاه تست شده‌اند؟

• آیا از مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای شبیه‌سازی برخی از این مؤلفه‌ها و ارتباط بین مؤلفه‌ها استفاده‌شده است؟

• آیا نمونه‌ی آزمایشگاهی یا رومیزی ساخته‌شده است؟

• آیا آزمایش‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که این مؤلفه‌ها در کنار هم کار می‌کنند؟

• آیا کارکردهای پایه‌ی فناوری در آزمایشگاه به نمایش گذاشته‌شده و تلفیق‌سازی فناوری با سامانه شروع‌شده است؟

• آیا فرایندهای کلیدی ساخت، شناسایی و در آزمایشگاه ارزیابی شده‌اند؟

• آیا تلفیق اولیه بین فناوری و سامانه در محیط آزمایشگاه انجام‌شده است؟

• آیا طرحی برای برطرف‌کردن مشکلات ساخت و تولید ارائه‌شده است؟

۲-۴-۵ سطح آمادگی فناوری پنجم

• آیا فناوری از نمونه‌ی آزمایشگاهی به یک نمونه‌ی مشابه با نمونه‌ی واقعی تبدیل‌شده است؟

• آیا سخت‌افزار پیش‌تولید در دسترس است؟

• آیا ارتباط‌ها و اتصالات فناوری با سامانه مشخص شده‌اند؟

• آیا محیط آزمایشگاهی به یک محیط تقریباً عملیاتی (شبه عملیاتی) تبدیل‌شده است؟

• آیا نقشه‌های طراحی تفصیلی کامل‌شده است؟

۲-۴-۶ سطح آمادگی فناوری ششم

• آیا سطح کیفیت و قابلیت اطمینان تدوین‌شده است؟

• آیا عملکرد فناوری در سامانه در یک محیط عملیاتی شبیه‌سازی شده ارزیابی‌شده است؟

• آیا تست پذیرش کارخانه‌ای سامانه‌ی نمونه انجام‌شده است؟

• آیا فناوری از لحاظ کارکردی با سامانه‌ی عملیاتی سازگارشده است؟

• آیا تلفیق کامل فناوری و سامانه به نمایش گذاشته‌شده است؟

• آیا گزارش فنی نهایی تهیه‌شده است؟

• آیا مسائل و دغدغه‌های تولید، شناسایی و مهم‌ترین آن‌ها برطرف‌شده است؟

• آیا فرایند و ابزار ساخت و تولید به بلوغ رسیده‌اند؟

• آیا امکان پذیری مهندسی به‌طورکامل به نمایش گذاشته‌شده است؟

۲-۴-۷ سطح آمادگی فناوری هفتم

• آیا مواد، فرایندها، و تکنیک‌های طراحی شناسایی شده‌اند؟

• آیا مواد و فرایند ساخت به‌صورت ابتدایی به نمایش در آمده‌اند؟

• آیا فرایند شکل‌دهی و ابزار تست و کنترل کیفیت در محیط تولید،کاملاً نمایش داده‌شده است؟

• آیا تغییرات مورد نیاز در طراحی به‌طور قابل ملاحضه‌ای کاهش‌یافته است؟

• آیا محیط تست‌ها به محیط عملیاتی تبدیل‌شده است؟

• آیا پیش‌نویس نقشه‌های طراحی کامل‌شده است؟

• آیا مواد، فرایندها، و تکنیک‌های طراحی به‌طور

مناسب توسعه‌یافته و تأیید شده‌اند؟

- آیا توانایی نمونه‌ی پیش‌تولید در حد محدود ایجاد و طرح تولید کامل‌شده است؟
- آیا پروتاتیپ تلفیق‌شده‌ی کامل در محیط عملیاتی واقعی یا شبیه‌سازی‌شده به نمایش گذاشته‌شده است؟
- آیا پروتوتایپ از تست‌های میدانی موفق بیرون آمده است؟
- آیا شرایط برای تولید اولیه در حجم پایین آماده است؟

۲-۴-۸ سطح آمادگی فناوری هشتم

- آیا مؤلفه‌ها از نظر شکل، و اندازه و کارکرد با سیستم عملیاتی سازگار هستند؟
- آیا شکل، اندازه و کارکرد سیستم روی طرح واقعی یا سامانه به نمایش گذاشته‌شده است؟
- آیا بیشتر مستندات آموزشی و نیز تعمیر و نگهداری کامل شده‌اند؟
- آیا فرایندهای ساخت در خط پایلوت، خط تولید با حجم پایین به نمایش گذاشته شده‌اند؟
- آیا تمام کارکردهای سیستم در محیط عملیاتی نمایش‌داده شده‌اند؟
- آیا تمام قطعات و مؤلفه‌ها در دست تولید بوده و در دسترس هستند؟
- آیا کیفیت سیستم روی طرح واقعی تست و ارزیابی و تأییدشده است؟
- آیا اطلاعات مربوط به تعمیر و نگهداری، قابلیت اطمینان، و پشتیبانی‌پذیری کامل‌شده است؟
- آیا سیستم مشخصه‌های مورد انتظار را برآورده ساخته و آیا همه چیز برای تولید انبوه آماده است؟

۲-۴-۹ سطح آمادگی فناوری نهم

- آیا طراحی به‌حالت پایدار رسیده است و نیازی به تغییرات مجدد نیست؟
- آیا سیستم روی طرح، نصب و مورد بهره‌برداری قرارگرفته شده است؟
- آیا طرح آموزش کامل‌شده است و قابل پیاده‌سازی است؟
- آیا سیستم در یک مأموریت عملیاتی واقعی با موفقیت عمل‌کرده است؟
- آیا مستندسازی کامل‌شده است؟

در هندبوک TRL که در بالا به آن اشاره شد، علاوه‌بر سؤالات کلیدی هرسطح از TRL، شواهد و محتوای مدارکی که در هرسطح باید تهیه شود تا بتواند به سؤالات مطرح‌شده پاسخ دهد، معرفی‌شده است و در این تحقیق به‌دلیل اینکه تأیید TRLهای بالاتر از پنج برای فناوری‌های مورد نیاز در پروژه‌های توسعه‌ی سامانه‌ی پیچیده، اهمیت بیشتری دارد صرفاً به شواهد و مستندات آن‌ها در زیر ارائه‌شده است:[۱۰]

جدول ۱: مستندات و شواهد مورد نیاز برای هر سطح [۱]

TRL	محتوای مورد انتظار از اسناد و مدارک
a.5	تشریح تکنولوژی جدید شامل؛ طرح معرفی (نمایش) شده از فناوری و تشریح اینکه تست‌های محیطی چگونه مطابق با محیط عملیاتی مورد انتظار می باشد.
b.5	مستنداتی که کاربردهای عملکردی مشتری را معرفی می‌کند و به مقادیر کمی پارامترهای کارکردی که برای انتخاب تکنولوژی استفاده شده است منتهی می‌شود تعریف مفهوم مناسب از عملیات و محیط عملیاتی برای دید کلی از کاربردهای تکنولوژی را در بر می گیرد.
c.5	شناسایی و تشریح تفصیلی بخشی یا همه نمایش‌ها یا مطالعات تحلیلی که درباره امکانسنجی هر یک از اجزاء تکنولوژی انجام شده است. تشریح یک یا همه مراجع مستند سازی شده درباره نتایج و تحلیل مدلسازی انجام شده به گونه ای که در هر گزارش امکانسنجی فنی یا اقتصادی مورد انتظار است .
d.5	استدلال‌های متقن که به نوعی ارتباطات میان نمایش‌های ارائه شده از اجزاء و نمونه کارکردی (برد بوری) آن فناوری در محیط مقتضی خود را از یک سو و نمایش نحوه یکپارچگی آن فناوری با سطوح بالاتر (سیستمی) خود در محیط مقتضی یا عملیاتی که به تازگی ارائه شده است از سوی دیگر را نشان می‌دهد. یک ارزیابی از ریسک فنی و تلاش‌های مورد نیاز برای ارتقاء تکنولوژی به سطوح بعدی TRL را در بر می گیرد.
a.6	a.۵ مشابه
b.6	مدارکی که جزئیات کاملی از الزامات کارکردی و محیطی که انتظار می رود یک تکنولوژی جدید بتواند آنها (الزامات) را در زمینه کاربردی مربوط محقق و برآورده نماید تشریح می کند.
c.6	c.۵ مشابه
a.6	a.۵ مشابه
d.6	استدلال‌های متقنی که به نوعی ارتباطات میان نمایش زیر مجموعه (Subsystem) یا سیستم ارائه شده در محیط مرتبط را از یک سو و نمایش نحوه یکپارچگی آن فناوری با سطوح بالاتر (سیستمی) خود در محیط مقتضی یا عملیاتی که به تازگی ارائه شده است از سوی دیگر را نشان می‌دهد. یک ارزیابی از ریسک فنی و تلاش‌های مورد نیاز برای ارتقاء تکنولوژی به سطوح بعدی TRL را در بر می گیرد.
a.7	تشریح شفاف و جامع از تکنولوژی جدید شامل طرح معرفی (نمایش) شده از فناوری و تشریح اینکه تست‌های محیطی چگونه مطابق با محیط عملیاتی مورد انتظار می باشد.
b.7	b.۶ مشابه
c.7	شناسایی یک یا همه نمایش‌ها و یا مطالعات تحلیلی و نتایج ارائه شده که حاکی از پذیرش الزامات مستند شده کاربر است. تشریح یک یا همه مراجع مستند سازی شده درباره نتایج و تحلیل مدل سازی انجام شده به گونه ای که در هر گزارش امکانسنجی فنی یا اقتصادی مورد انتظار است .
d.7	d.۶ مشابه
a.8	تشریح شفافی از بخش تولید (نمونه تولیدی) و از اینکه نمونه تولیدی چگونه ساخته خواهد شد، چگونه عملیات انجام خواهد داد، چگونه در سیستم مصرف کننده یا در زیر سامانه مربوطه یکپارچه خواهد شد.
b.8	مدارکی که جزئیات کاملی از الزامات سیستم کابر و الزامات محیطی که انتظار می رود یک تکنولوژی جدید بتواند آنها (الزامات) را در زمینه کاربردی مربوط محقق و برآورده نماید تشریح می کند. این مستندات باید شواهد روشنی از پذیرش نتایج توسط کاربر را دارا باشد.
c.8	توصیف شفاف از نتایج تست‌های انجام شده روی نمونه تولیدی که تعیین کننده‌ی چگونگی صلاحیت نتایج آزمایش‌ها و تست‌های محیطی بر اساس الزامات عملکردی مورد انتظار می باشد. تشریح یک یا همه مراجع مستند سازی شده درباره نتایج و تحلیل مدل سازی انجام شده، طراحی‌های سیستم، تست‌ها انجام شده به گونه ای که در هر گزارش امکانسنجی فنی یا اقتصادی مربوط توسعه یک سیستم (یا محصول نهایی) مورد انتظار است.

d.8	مستندات امکانسنجی عملکردهای ماموریتی برنامه ریزی شده و بکار رفته در توسعه محصول جهت دستیابی به اهداف ماموریتی. یک ارزیابی از ریسک فنی و تلاش‌های مورد نیاز برای ارتقاء تکنولوژی به سطوح بعدی TRL را در بر می گیرد.
a.9	تشریح تولید نمونه، چگونگی ساخت و یکپارچه سازی با سیستم‌های مشتری و یا سیستم اصلی که می‌تواند مستندات روشنی در زمینه تایید نتایج تست طبق نظری مشتری را در بر گیرد.
b.9	مدارکی که جزئیات کاملی از راه اندازی سیستم و کارکردهای برنامه ریزی شده از میان نیازهای محیطی و مفهوم عملیات را تشریح می کند که پیچیدگی‌های تکنولوژیکی و الزامات و محیط مربوط به عملیات واقعی را بر می گیرد.
c.9	تعریف رویکرد به کار رفته در خصوص تصدیق عملیاتی، مشخصات تست‌های انجام شده و استدلال‌های متقن نشان دهنده ارتباطات بین اجزاء سطوح زیر سیستم و تست‌های انجام شده قبلی که شامل عملیات سیستم نیز می گردد. تشریح یک یا همه مراجع مستند سازی شده درباره نتایج ارزیابی عملیات، تحلیل و مدل سازی آزمون شده به گونه ای که توانایی سیستم جهت شروع عملیات و هر تکنولوژی جدید بکار رفته را اثبات می‌کند.
d.9	مستنداتی مربوط به هرگونه خطای تحلیلی (در صورت نیاز) شامل جزئیات مشکلات تکنولوژی و محیط واقعی شرح هرگونه تحلیل یا ارتباط عملکردی جهت شناسایی مراحل توسعه برای بهبود همه عملکردهای سیستم (در صورت نیاز) ارزیابی ریسک فنی و تلاش‌های مورد نیاز جهت تولید تکرار پذیر (یا ارتقاء یافته) تکنولوژی کسب شده مرتبط با دانش فنی ساخت

براساس مرور ادبیات ارائه‌شده در بالا، سؤالات ارائه‌شده برای هریک از مراحل توسعه‌ی فناوری و سطوح فناوری و همچنین محتوایی مدارک و اسناد معرفی‌شده توسط هندبوک TRL در اختیار کارشناسان یک دفتر طراحی قرار گرفت و براساس تجربیات دفتر طراحی در پروژه‌های برون‌سپاری درزمینه‌ی توسعه‌ی فناوری، از نظر محتوایی با اسناد و مدارک فنی متعارف و موجود در حوزه‌ی دانش فنی و نوع ارتباط و بده‌بستان بین کارفرمای پروژه‌ی توسعه‌ی فناوری و پیمانکار آن مقایسه و تطبیق‌داده شد. در این مقایسه، دیدگاه‌ها و الزامات مهندسی ساخت (که مأموریت اصلی آن انتقال دانش فنی از بخش تحقیقات به بخش تولید است) و مهندسی سیستم در نظر گرفته شد و درنهایت براساس تحلیل خبرگی لیستی از مدارک فنی تعیین شد که در جدول (۲) ارائه‌شده است. این مدارک و مستندات می‌توانند به‌عنوان معیار اثبات هریک سطوح آمادگی فناوری در ارتباط بین کارفرمای پروژه‌ی توسعه‌ی فناوری و پیمانکار آن استفاده شود. در این جدول برای سطوح یک تا سه تعداد پنج مدرک فنی مشخص‌شده است. در پروژه‌های توسعه‌ی فناوری در اغلب مواقع، وقتی کارفرما از میان شرکت‌های دانش‌بنیان (منابع بیرونی توسعه‌ی فناوری) مناسب‌ترین منبع را جست‌وجو می‌کند، فرض بر این است که این اسناد در شروع بررسی توانمندی پیمانکاران (برای انتخاب نهایی) موجود است که شامل موارد زیر است:

۱- ساختار سلسله مراتبی الزامات فنی،

۲- پیوست فنی (شامل الزامات فنی و مقادیر کمی مورد پذیرش، شرایط تست و تحویل‌گیری و تعهدات فنی در زمینه‌های انتقال مستندات و دانش فنی و آموزش و حقوق مالکیت فکری)،

۳- مطالعات آینده‌پژوهی و روند تغییرات فنی در حوزه‌ی فناوری مورد نظر (بررسی روندها و جهش‌های تکنولوژیک و پیش‌بینی جهت‌گیری‌های فناورانه درزمینه‌ی فناوری)،

۴- گزارش امکان‌سنجی و طراحی مفهومی،

۵- پیش‌گویی قابلیت اطمینان.

برای سطوح چهار تا نه تعداد ۳۱ سند و مدرک فنی شناسایی‌شده است که بعضی از اسناد در سطوح اولیه تهیه و در سطوح بعدی براساس پیشرفت پروژه‌ی توسعه‌ی فناوری و مشخص‌شدن ابعاد فنی جدید، به‌روزرسانی می‌شوند. این مدارک طیف جامعی از مستندات طراحی، مستندات مهندسی سیستم و مهندسی ساخت را شامل می‌شوند.

جدول (۲): مدارک و مستندات فنی مورد نیاز برای تأیید سطوح آمادگی فناوری (UD: به‌روزرسانی)

ردیف	مدرک	TRL4	TRL5	TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
۱	بلوک دیاگرام منطقی	✓	UD	UD	UD		
۲	طرح پیکره بندی فناوری	✓	UD	UD	UD		
۳	تحلیل کارکردی در داخل فناوری (کارکرد پایین تر از ضرایب طراحی و مقادیر ایده آل)	✓					
۴	تحلیل کارکردی در داخل فناوری (کارکرد مطابق ضرایب طراحی و مقادیر ایده آل)		✓	UD	UD		
۵	ماتریس تعاملات فنی بین اجزای زیر مجموعه فناوری (I*I)	✓	UD	UD	UD		
۶	گزارش تحلیل و آزمون روش طراحی و محاسبات مهندسی	✓	UD	UD	UD		
۷	گزارش شبیه سازی از نتایج طراحی	✓	UD	UD	UD	UD	
۸	لیست اقلام و مواد بکار رفته در فناوری و مشخصات فنی	✓	UD	UD	UD	UD	
۹	تاییدیه فنی نمونه	✓	✓	✓	✓	✓	
۱۰	نقشه‌های شماتیک الکتریکال و مکانیکال	✓	UD	UD	UD	UD	
۱۱	تعریف تست‌های اجزا و پارامترها و شرایط تست	✓	UD	UD	UD	UD	
۱۲	لیست تجهیزات تست و دفترچه‌ها و دستورالعمل‌های تست	✓	UD	UD	UD	UD	
۱۳	گزارش نتایج تست و لاگ‌های کنترل کیفی		✓	✓	✓	✓	✓
۱۴	گزارش تصویری (عکس و فیلم) از آزمون و تست	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۵	بازنگری فنی (بررسی میزان تحقق الزامات و محدودیتهای موجود و راهکارهای رفع آن)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
۱۶	امضای سند الزامات بازنگری شده با کارفرما (در صورت ضرورت تغییر الزامات اولیه)	✓	✓	✓	✓		
۱۷	اسناد طراحی و ساخت تسترهای اختصاصی و دستورالعمل بهره برداری		✓	UD	UD	UD	
۱۸	گزارش محاسبات قابلیت اطمینان و FMEA و FTA		✓	✓	✓	✓	✓
۱۹	گزارش ساخت پذیری		✓	UD	UD	UD	
۲۰	دستورالعمل مونتاژ نمونه		✓	UD	UD	UD	
۲۱	گزارش استاندارد سازی (مطابق با الزامات سازمانی و ...)			✓	UD	UD	
۲۲	طرح تست اجزا نمونه صلاحیت با مقادیر بحرانی			✓	UD		
۲۳	ماتریس تعاملات فنی بین فناوری و سایر اجزای سیستم(I*I)				✓	UD	
۲۴	تعریف تست‌های سیستمی و پارامترها و شرایط تست				✓	✓	✓
۲۵	برگه فرایند ساخت و مونتاژ (Proccess Sheet)			✓	UD	UD	
۲۶	طرح تست و دفترچه‌ها و دستورالعمل‌های تست المانها و مواد اولیه		✓	UD	UD	UD	
۲۷	دستورالعمل ایمنی، انبارداری و جابجایی فناوری					✓	
۲۸	تعمیر پذیری			✓	UD		
۲۹	رده‌های تعمیراتی میانی و نهایی و آموزش‌های مربوط					✓	
۳۰	آموزش بهره بردار (مونتاژ و تست)					✓	
۳۱	دستورالعمل‌های اورهال، عمر دهی و وارهایی فناوری						✓

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضمن پرداختن به ماهیت پروژه‌های توسعه‌ی سامانه‌ای پیچیده، ضرورت بهره‌گیری از شبکه‌ی توانمند بیرونی در توسعه‌ی فناوری‌های مورد نیاز در سامانه مطرح شد و در ادامه به مفهوم سطوح آمادگی فناوری به‌عنوان یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری وضعیت بلوغ فناوری اشاره شد و مطالعات انجام‌شده درخصوص این مفهوم و مفاهیم مشابه و مرتبط از قبیل سطوح آمادگی سیستمی ارائه شد. مطالعات انجام‌شده توسط ویلیام نولت و هند بوک TRL به‌خوبی به گام‌های مهمی که در هریک از سطوح آمادگی یا توسعه‌ی فناوری باید برداشته شود، پرداخته‌اند. البته یک شرایط کاملاً ایدئال فرض‌شده است و در بعضی از موارد نیز به مفاهیم کلی اشاره‌کرده و درمجموع سعی‌کرده با طرح گستره‌ی وسیعی از سؤالات، به مفاهیم لازم و ضروری به‌ویژه مهندسی سیستم و مهندسی ساخت تأکید کند. در تحقیقات مذکور وجود فضای کار شبکه‌ای و اینکه فناوری‌ها توسط یک پیمانکار مستقل توسعه‌داده می‌شود درنظر گرفته‌نشده است. در این تحقیق، مبانی نظری و دانش و تجربه‌ی دیگران از یکسو و دانش و تجربه‌ی واقعی رسوخ‌یافته در یکی از دفاتر طراحی و توسعه‌ی سامانه‌های پیچیده از سوی دیگر تقابل داده شد که نتایج به‌دست آمده حاکی از هم‌پوشانی زیادی بین این دو است. ضمن اینکه سعی‌شده است با هدف تبدیل مفاهیم و مؤلفه‌های معرفی‌شده توسط تحقیقات مذکور به لیست شناخته‌شده‌ای از مستندات فنی مرتبط با طراحی و تولید، به صراحت، بر مستندات فنی متعارفی تأکید شود که از فضای ایدئال و آکادمیک به‌سمت فضای واقعی موجود در صنعت نزدیک شود.

در این تحقیق، نقایص و ضعف‌های مربوط به مفهوم TRL (مطالعات دولینگ و پاردو) مرور شد. کاستی مطرح‌شده درزمینه‌ی مهندسی سیستم و ضرورت یکپارچه‌سازی فناوری در سامانه‌ی اصلی، منطقی، معقول و قابل پذیرش است و در این مقاله سعی‌شده است دیدگاه مهندسی سیستم و تسری آن در طول فرایند توسعه‌ی فناوری، به‌عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی سطح آمادگی فناوری در داخل یک سامانه مورد توجه قرار گیرد. در مورد نقصی که به نادیده‌گرفتن ابعاد غیر فنی طرح توسعه‌ی فناوری از قبیل زمان و هزینه اشاره دارد می‌توان گفت براساس تجربیات موجود در این گونه پروژه‌ها ضروری است که یک بنگاه، قبل از اینکه یک طرح توسعه‌ی فناوری (چه به‌صورت درون‌زا و چه به‌صورت برون‌زا و یا هر روش دیگر) را شروع کند، مطالعات کافی در این زمینه انجام دهد و امکان‌سنجی و پیش‌بینی ریسک کند و وقتی تصمیم نهایی برای شروع پروژه‌ی توسعه‌ی فناوری اتخاذ شد باید مسیر توسعه‌ی فناوری را به‌طور کامل طی کند (مگر در موارد خیلی نادر که به‌لحاظ فنی، توسعه‌ی فناوری امکان‌پذیر نباشد). برای جبران ضعف ذکرشده درزمینه‌ی عدم توجه به عدم قطعیت، موضوعات قابلیت اطمینان و تحلیل خطا و شکست (FMEA , FTA) در این مقاله مطرح‌شده است. درنهایت به نظر می‌رسد ضعف اشاره‌شده درزمینه‌ی عدم پرداختن به ریسک فنی صرفاً یک ویژگی ذاتی TRL است و مابقی نواقص نیز شرایطی هستند که در دنیای واقعی وجود دارد و ناگزیر از آن هستیم و تا حدودی ارتباطی با مفهوم TRL ندارد. براساس نتایج این تحقیق روی اسنادی که در روابط حقوقی فنی بین کارفرما و پیمانکار یک پروژه توسعه‌ی فناوری نقش مهمی دارد، تأکیدشده است. به‌عنوان مثال می‌توان به صدور و ارائه‌ی تأییدیه‌ی فنی برای نمونه یا مدل‌های واقعی و عملکردی از فناوری توسط پیمانکار، انجام تحلیل‌های کارکردی بین فناوری و سامانه‌ی مادر و یا به بازنگری‌های فنی و کنترل الزامات فنی که در مراحل مختلف اجرای پروژه توسعه‌ی فناوری باید انجام شود و دخالت و مشارکت کارفرما در این فعالیت‌ها و حضور اجباری او در مراحل پیشرفت پروژه (برای اطمینان از نظارت کامل و مناسب) اشاره کرد. همچنین روی مسائلی از قبیل قابلیت اطمینان و همچنین آینده‌پژوهی و رصد فناوری و نیز بررسی روند و مسیر توسعه‌ی کلاس فناوری مربوط و مقایسه با فناوری‌های جایگزین و جدید و پیداش فناوری‌های

نوظهـور (کـه در مجمـوع در جهت‌گیـری بـرای توسـعه‌ی فنـاوری تأثیرگـزاری راهبـردی دارد) تاکیـد شـد. در مجمـوع بـا پرهیـز از شـاخ‌وبرگ دادن بـه تنـوع مسـتندات و مدارکـی کـه در مسـیر ارزیابـی و نظـارت بـر یـک پـروژه‌ی توسـعه‌ی فنـاوری توسـط کارفرمـا می‌توانـد اسـتفاده شـود، تعـداد ایـن اسـناد را محدودکـرده و مسـتندات متعـارف و شـناخته و بومی‌شـده در صنایـع تولیدکننـده‌ی محصـولات پیچیـده را بـه هریـک از سـطوح آمادگـی و توسـعه‌ی فنـاوری ارتبـاط دهـد. ضمـن اینکـه تأکیـد بـر ایـن اسـت کـه ایـن اسـناد به‌عنـوان یـک موجـود زنـده، مراحـل تکامـل خـود را بـا رعایـت اصـل "مدیریـت تمامـی تغییـرات فنـی" بایـد طـی کنـد و به‌طـور مرتـب و نظام‌منـد به‌روزرسـانی شـود.

مراجع

[۱] اخباری محسن، تقوی فرد، محمد تقی (۱۳۸۶)، فرایند توسعه‌ی محصولات جدید، تدبیر، شماره ۱۸۴، ص ۵۸-۵۴.

[۲] سـید حسـینی، سـید محمـد، و دیگـران (۱۳۸۶)، ایجـاد مزیـت رقابتـی در صنعـت بـا رویکـرد عوامـل کلیـدی موفقیـت، پژوهش‌نامـه بازرگانـی، شـماره‌ی ۴۵، ص ۱۷۸ ۱۴۷-.

[۳] شـجاعی، سـعید، بـی تعـب علـی، منجـم‌زاده ،سـید سـعید (۱۳۹۰)، تبییـن نظام‌منـد توانمنـدی نـوآوری در سـطح ملـی، فصلنامـه‌ی توسـعه تکنولـوژی صنعتـی، شـماره‌ی ۱۷، ص ۴۳-۳۳.

[۴] جعفـری خانشـیر، سـعید، (۱۳۹۱) شناسـایی و رتبه‌بنـدی عوامـل کلیـدی موفقیـت در پروژه‌هـای توسـعه‌ی سـامانه‌های پیچیـده (پایان‌نامـه‌ی کارشناسـی ارشـد، دانشـگاه آزاد اسـلامی- واحـد علـوم تحقیقـات.

]۵[رهبر ناصر، مبانی و چارچوب توسعه، ارزیابی و صحه‌گذاری سطوح آمادگی سیستمی (۱۳۹۰)، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت فناوری.

[۶] فـولادی قاسـم، (۱۳۸۷)، ارزیابـی و اسـتفاده از سـطوح آمادگـی فنـاوری، تهـران، مرکـز آینده‌پژوهـی علـوم و فنـاوری دفاعـی مؤسسـه‌ی آموزشـی و تحقیقاتـی صنایـع دفاعـی.

[۷] مدرس، عبدالحمید، عوامل اثرگذار بر سازماندهی تیم توسعه‌ی محصول (۱۳۸۷)، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت.

[8] Brent Hobson, (2006), A Technology Maturity Measurement System for the Department of National Defense, Defense R&D Canada-Atlantic.

[9] Dowling, T., and T. Pardoe. (2005), Timpa-Technology Insertion Metrics, Volume 1." Edited by Ministry of Defense: QinetiQ.

[10] EESA. (2009), Technology Readiness Levels Handbook for Space Applications, TEC-SHS/5551/MG/ap.

[11] Elfving. S., (2007). Managing collaborative product development. Department of innovation design and product development, Malardalen University Press Dissertations, v 45, p 57-63.

[12] James W. Bilbro,(2001 Technology Readiness & Road Mapping, NASA.

[13] Legrand L., chatrie I., (1999), Business Networks And The Knowledge, Driven Economy.

[14] Mankins John C., (1995) Technology Readiness Levels: A White Paper, NASA, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office.

[15] Mu Jifeng, Di Benedetto Anthony, (2012). Networking Capability and New Product development, IEEE transaction on engineering management, v 59 (NO. 1), p. 4-19.

[16] NASA/SP, (2007), REV 1, Nasa Systems Engineering Handbook.

[17] Nolte William L., (2003), Technology Readiness Level Calculator, U.S Air Force Research Laboratory, NDIA Systems Engineering Conference.

[18]] Nolte William L., (2005), Technology Readiness Level Calculator, U.S Air Force Research Laboratory, Assessing Technology Readiness &Development Seminar.

[19] Smith Jim, Egglestone Graeme, (2004), Technical Risk Assessment of Australian defense Projects, Australian defense Systems Analysis Division, Information Sciences Laboratory, DSTO-TR-1656.

[20] UK MOD, AMS Guidance on Technology Readiness Levels (TRLs), 2005.

[21] UK MOD, System Readiness Levels (SRLs) Guidance, ISSUE 4.0, 2006.

[22] U.S GAO, (1999), Best Practices: Better Management of Technology Can Improve Weapon System Outcomes, GAO/NSIAD, p99-162.