

System readiness level estimation for the electrical system of the ejection seat in a fighter using Design Structure Matrix (DSM) and Integration Readiness Level (IRL)

(Document Type: Research Paper)

Mahdi Karbasian*

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran, mkarbasi@mut-es.ac.ir

Ali Mozafari

M.Sc student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran, alimozafari664@yahoo.com

Sahand Pourkhazaei

M.Sc student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran, pourkhazaei.sahand@gmail.com

Purpose: The Technology readiness level (TRL) measure is a scale for calculating the maturity of a unique technology according to operational application in the environment of a system. when the TRL from level 1 of unique technology is transferred to the context of the system, a more comprehensive set of communications may establish. Similarly, the consideration of integration, interoperability, and stability from the perspective of the system in an operational environment is important. To alleviate the concerns of the operating system level, the dynamic measure of system readiness level (SRL) is studied, which includes both TRL and integration readiness level (IRL), simultaneously.

Design/methodology/approach: Since SRL is a mathematical combination of TRL and IRL and is a criterion for Improvement evaluation in the development of the main-system and infrastructure, in this paper uses the error mean method and utilization of TRL and IRL have been used and the level of readiness of the electric system of an ejection seat of a fighter has been examined and estimated. To facilitate the calculation, the design structure matrix (DSM) has been used to visualize the components and perform the necessary calculations.

Findings: According to the estimated value of the readiness level of the system (3.95), it is concluded that the system under study is at the entrance of the construction development stage, and stabilization at this phase is achieved by performing various and frequent tests of the system. The system meets the needs of the mission by achieving the ability to be operational.

Research limitations/implications: The most important limitation of this paper is the lack of accurate access to tests and experiments performed to evaluate system performance and components within the system (to check how the connections work, establish a common language, ability to control, etc.). Therefore, to determine the levels of readiness at each level, considerable time should

* Corresponding author

Copyright © 2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

be spent to explain the requirements to the industry and to receive information from the engineers in the industry. This in turn can affect the accuracy of the work to some extent.

Practical implications: One of the most important applications of this paper is that it can provide some of the information needed for the managers of authorized or sanctioned institutions so that a project can move to the next stage of development in a step-by-step process through specific review gates. Also, industry managers can increase the speed of achieving the design and development of their desired products by formulating the requirements for readiness and maturity (management) of the required technologies.

Social implications: The results of this study can determine the level of readiness of a system. In addition to avoiding the very high costs (human and financial) resulting from the failure of operations, as expected from the designed system, by the application of the proposed approach, the managers and designers can be informed about the current state of the project. This enables them to plan the next steps of their project.

Originality/value: This paper aims to propose a relatively new method for estimating the level of readiness of a system based on understanding the level of readiness and maturity of the system designed to be used in a specific mission using the error mean method, block diagram, and DSM. This study contributes to the examination of the level of readiness of a simple subsystem of the main system, i.e. ejection seat. Also, in this paper, the exact design structure matrices have been used which were obtained from the previous study of the authors. Similar to the previous research work, the symmetric matrix was not studied for simplicity. Therefore, the findings are more valid than the earlier study.

Keywords: Technology Readiness Level (TRL), Integration Readiness Level (IRL), System Readiness Level (SRL), Block Diagram (BD), Design Structure Matrix (DSM), Ejection seat

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۱، شماره ۲، پیاپی ۲۱، تابستان ۱۳۹۹

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۴

صص: ۴۴-۲۷ (نوع مقاله: پژوهشی)

برآورد سطح آمادگی سیستم در سامانه برقی صندلی پران یک جنگنده با استفاده از ماتریس ساختار طراحی و سطح آمادگی یکپارچه سازی

مهدی کرباسیان^{۱*}، علی مظفری^۲، سهند پورخزائی^۳

۱- دانشیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، mkarbasi@mut-es.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، alimozafari664@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، pourkhazaei.sahand@gmail.com

چکیده: در سال ۱۹۸۰، ناسا از سطح آمادگی تکنولوژی (TRL) به عنوان ابزاری برای ارزیابی بلوغ یک فناوری خاص و مقیاسی برای مقایسه فناوری‌ها استفاده کرد. مقیاس TRL اندازه‌گیری بلوغ یک فناوری منحصربه‌فرد با توجه به کاربرد عملیاتی در محیط یک سیستم است. مجموعه جامع‌تر از ارتباطات هنگامی برقرار می‌شود که این ارزیابی از فناوری‌ای منحصربه‌فرد به بستر یک سیستم منتقل شود که ممکن است باعث تعامل بین چندین فناوری شود. از آنجا که سطح آمادگی سیستم (SRL)، ترکیبی ریاضی از TRL و سطح آمادگی یکپارچه‌سازی (IRL) است و معیاری برای ارزیابی بهبود در توسعه سیستم‌های اصلی و زیرساختی است، این پژوهش با استفاده از روش میانگین خطا و بهره‌گیری از TRL و IRL سطح آمادگی سیستم برقی یک صندلی پران از یک جنگنده را بررسی و برآورد می‌کند. برای تسهیل در محاسبه، از ماتریس ساختار طراحی (DSM) برای تجسم مؤلفه‌ها و انجام دادن محاسبات ضروری استفاده می‌شود. درانتها، با توجه به مقدار تخمین زده شده از سطح آمادگی سیستم (۳/۹۵)، این نتیجه به دست آمد که سیستم مدنظر در ورودی مرحله توسعه ساخت است و با انجام دادن آزمایش‌های متنوع و مکرر سیستم در این فاز تثبیت می‌شود و با دستیابی به توانایی و قابلیت عملیاتی شدن، نیازهای مأموریت را برآورده می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سطح آمادگی تکنولوژی، سطح آمادگی یکپارچه‌سازی، سطح آمادگی سیستم، بلوک دیاگرام، ماتریس ساختار طراحی، صندلی پران

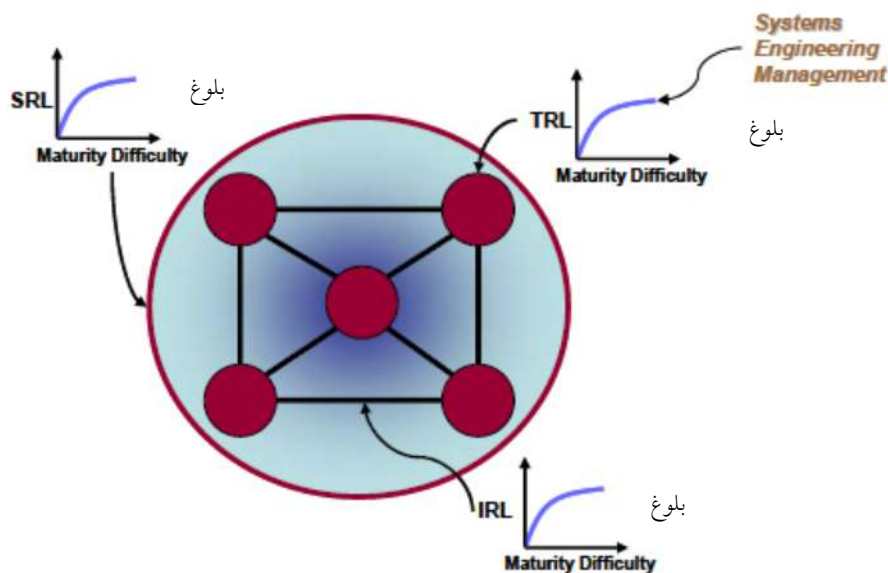
*نویسنده مسؤول

۱- مقدمه

مهم ترین ویژگی دنیای امروز را سرعت تحولات تکنولوژی دانسته اند که این موضوع با تغییر در قلمرو به کارگیری تکنولوژی همراه است (نخعی نژاد و صفاری، ۱۳۹۸). تکنولوژی به عنوان محرکی حیاتی، اهداف عملکردی و تصمیم گیری بهتر هر کسب و کار را در یک شکل بهنگام تسهیل می کند (انصاری و همکاران، ۱۳۹۵). درک مناسب از آمادگی تکنولوژی یا فناوری در تصمیم گیری هایی برای ورود، توسعه و ادغام فناوری های جدید در پروژه های مهندسی پیچیده، بسیار مهم است (سوزر و همکاران، ۲۰۰۸)^۱. پرکاربردترین ابزار برای ارزیابی آمادگی یک فناوری، مقیاس سطح آمادگی فناوری^۲ (TRL) است (باکی، ۲۰۱۷)^۳. در دهه ۱۹۸۰، ناسا برای ارزیابی خطرهای مرتبط با توسعه فناوری، سطح آمادگی فناوری (TRL) را در هفت سطح بیان کرد. در دهه ۱۹۹۰، این شاخص ارزیابی به نه سطح موجود امروزی تبدیل شد و به طور گسترده ای در سراسر ناسا به عنوان شاخص نظام مند اندازه گیری منظم به کار رفت تا بلوغ یک فناوری خاص را ارزیابی و امکان مقایسه مداوم بلوغ بین انواع مختلف فناوری ها را فراهم کند. با توجه به کاربردهای عملی این مفهوم، در سال ۱۹۹۹، وزارت دفاع امریکا (DOD) یک مفهوم TRL مشابه را برای خود در نظر گرفت. در حالی که استفاده از TRL هم در ناسا و هم در وزارت دفاع مشابه است، در تفسیر TRL در این دو سازمان، تفاوت اندکی وجود دارد؛ برای مثال، ناسا بیان می کند که فناوری ها باید تا 6 TRL و قبل از انجام دادن یک مأموریت، مسئولیت این فناوری را بر عهده بگیرند و به بلوغ برسند (شیشکو و همکاران، ۲۰۰۴)^۴ و وزارت دفاع ایالات متحده اعلام کرد که فناوری باید پیش از آنکه در یک برنامه سیستم تسلیحاتی گنجانده شوند، به 7 TRL دست یابند (سوزر و همکاران، ۲۰۰۶).

البته در مراجع مختلف بیان شده است که بین «آمادگی» سیستم و «بلوغ» سیستم باید تمایز قائل شد. براساس یکی از این پژوهش ها، در تمایز بین بلوغ و آمادگی، این نکته وجود دارد که سیستمی که در زمینه ای بالغ تلقی می شود، ممکن است آمادگی کافی برای عملکرد در یک محیط متفاوت را نداشته نباشد (اسمیت، ۲۰۰۵)^۵ و براساس پژوهشی دیگر، از «بلوغ» به عنوان بخشی از تعریف «آمادگی» استفاده می شود و از این رو، بین دو اصطلاح، ارتباط وجود دارد (کانگر و همکاران، ۲۰۱۵)^۶.

براساس مطالب بیان شده، وقتی TRL از سطح یک فناوری منحصر به فرد به بستر یک سیستم منتقل شود، ممکن است مجموعه ای از ارتباطات جامع تر شکل بگیرد و همچنین، ملاحظات مربوط به یکپارچه سازی، قابلیت همکاری و پایداری از منظر سیستم ها در یک محیط عملیاتی به همان اندازه مهم تلقی می شود. برای رفع نگرانی های مربوط به سطح سیستم عملیاتی، مفهوم سطح آمادگی سیستم^۷ (SRL) در اینجا ارائه شده است که شامل مفهوم فعلی مقیاس TRL و در عین حال، شامل مفهوم سطح آمادگی ادغام یا یکپارچه سازی^۸ (IRL) برای محاسبه پویای یک شاخص SRL است؛ بنابراین، از آنجا که TRL فقط به ارزیابی بلوغ یک فناوری خاص توجه می کند و اگر چند تکنولوژی در کنار هم، یک سیستم را به وجود بیاورد، دیگر TRL پاسخگو نیست، رویکرد جدیدی برای بررسی سطح بلوغ و آمادگی سیستم به نام SRL شکل گرفت؛ البته گفتنی است پیش نیاز SRL، سطح آمادگی یکپارچه سازی (IRL) است؛ زیرا تکنولوژی های منحصر به فرد با ادغام با یکدیگر، سیستم را تشکیل می دهد. شکل شماره ۱، این واقعیت را نشان می دهد که فناوری ها به صورت جداگانه وجود ندارند؛ بلکه با رابطه در معماری سیستم به یک متصل می شوند. در این پژوهش، در ابتدا، هر کدام از این شاخص ها معرفی مختصری شد و سپس با بهره گیری از پژوهش های قبلی (یاسری، ۲۰۱۳)^۹، فرایند برآورد SRL گسترش و توضیح داده شد؛ سپس با مطالعه ای موردی، سطح آمادگی سیستم برقی یک صندلی پران تخمین زده شد.



شکل ۱- ارتباط TRL, IRL و SRL (سوزر و همکاران، ۲۰۰۶)

۲- پیشینه پژوهش

تاکنون، روش‌های مختلفی برای محاسبه SRL بررسی شده است که برخی از مهم‌ترین آنها عبارتند از: ۱- روش SysDML (SSRL) (سوزر و همکاران ۲۰۰۸)؛ ۲- نظریه گراف GTSRL (گرت و همکاران ۲۰۱۱) و ۳- روش TASRL (مک کانکی و همکاران ۲۰۱۳).^{۱۱} روش SSRL از ضرب یک بردار TRL در یک ماتریس IRL به دست می‌آید. ابتدا، مقادیر TRL و IRL با تقسیم بر عدد ۹ از حالت گسسته به حالت پیوسته تبدیل می‌شود؛ سپس این مقادیر در هم ضرب می‌شود تا یک بردار جدید حاصل شود، یک عامل نرمال‌سازی K اعمال و در نهایت، SSRL با میانگین بردار حاصل محاسبه می‌شود. نقص روش SSRL این است که این روش، توانایی محاسبه گوشه‌های جهت‌دار یا حلقه‌های دارای رئوس به خود بازگشت (ارتباطات دوطرفه) را ندارد. روش GTSRL، بردار TRL و ماتریس IRL را به روش تقریباً یکسان با روش SSRL تولید می‌کند؛ ولی سه تفاوت دارد: ۱- تبدیل از حالت کیفی به کمی در این روش متفاوت است؛ ۲- ماتریس IRL در این روش با روش SSRL متفاوت است و ۳- این روش، توانایی محاسبه گوشه‌های جهت‌دار و راس‌های بازگشت به خود را ندارد (گرت و همکاران، ۲۰۱۱ و مک کانکی، ۲۰۱۳). روش TASRL به علت ضعف در محاسبات SSRL و GTSRL (ضرب ترتیبی ماتریس TRL و IRL محاسبات نادرستی از SRL نتیجه می‌دهد) به وجود آمده است. در این روش از مجموع جبر راسی و حداقل مقدار استفاده می‌شود. عملیات جمع جبری راسی، \otimes ، مجموعه معینی از اعداد است. عملیات حداقل مقدار، \oplus ، کمترین مقدار مجموعه‌ای از اعداد را نشان می‌دهد. با استفاده از این عملیات ریاضی، TASRL به روش مک کانکی و همکاران (۲۰۱۳) محاسبه می‌شود. فرم ریاضی محاسبات در جدول شماره ۱ آمده است. برای کسب اطلاعات بیشتر از چگونگی محاسبه روش‌های مذکور به مقالات ارجاع داده‌شده مراجعه شود.

جدول ۱- روش محاسبه مدل SRL و فرم‌های معادله استاندارد

مدل SRL	فرم ریاضی استاندارد
SSRL	$SSRL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[K_{SSRL} \left[\frac{1}{9} * IRL_{SSRL}^{n*n} \right] * \left[\frac{1}{9} * TRL_{n-1} \right] \right]$
GTSRL	$GTSRL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[K_{GTSRL} \left[\frac{1}{9} * IRL_{GTSRL}^{n*n} \right] * \left[\frac{1}{9} * TRL_{n-1} \right] \right]$
TASRL	$TASRL = \oplus_{i=1}^n [(IRL_{i+1} \otimes TRL_1) \oplus \dots \oplus (IRL_{i+n} \otimes TRL_n)]$

در پژوهش‌های دیگر (یاسری، ۲۰۱۳ و یاسری و بهایی، ۲۰۱۸) ابتدا، روش میانگین خطا برای محاسبه SRL معرفی شد و سپس با یک رویکرد مهندسی سیستم و مطالعه‌ای موردی از یک سیستم زیر دریا بسط و گسترش پیدا کرد. پژوهش حاضر نیز از این روش (روش میانگین خطا) استفاده کرده است که بهترین روش شناخته شده تا بدین لحظه است و کمترین اختلاف را با مقدار واقعی SRL دارد؛ با این تفاوت که سیستم مدنظر، بسیار پیچیده تر است و همچنین، کلیه ارتباطات یک طرفه یا دوطرفه بین اجزای زیرسیستم‌ها با هم در نظر گرفته شده است؛ در حالی که در پژوهش‌های پیشین، برای سادگی کار فقط از ارتباطات یک طرفه بین اجزای مختلف استفاده شده بود.

۳- مبانی نظری

در این قسمت، مواردی از مبانی نظری پژوهش بررسی شده است. از جمله این موارد، مباحث مربوط به سطح آمادگی فناوری، سطح آمادگی یکپارچه‌سازی و سطح آمادگی سیستم است.

۳-۱- شاخص سطح آمادگی سیستم

مهندسی سیستم، فرایندی تلفیقی از توسعه و بهره‌برداری از یک سیستم در دنیای واقعی است که به شیوه‌ای تقریباً بهینه، طیف کاملی از نیازهای یک سیستم را برآورده می‌کند (یاسری و همکاران، ۲۰۱۸ الف و یاسری و همکاران ۲۰۱۸ ب). سطح آمادگی سیستم (SRL) شاخص بلوغ اعمال شده در مفهوم سطح سیستم با هدف مرتبط کردن این شاخص با مدیریت مهندسی سیستم‌های مرتبط است و نشان می‌دهد سیستم در کدام یک از فازهای توسعه، بهره‌برداری یا موارد دیگر قرار دارد. این ادعا وجود دارد که SRL یک سیستم معین، تابعی از TRL‌های منحصر به فرد و بلوغ ارتباطاتی بین آنهاست که براساس مقیاسی از سطوح آمادگی یکپارچه‌سازی تعریف می‌شود. برای درک پویایی SRL ابتدا، رابطه TRL و IRL و چگونگی استفاده از آنها برای تبدیل توصیف کیفی به سطوح بلوغ کمی معرفی می‌شود.

۳-۱-۱- سطح آمادگی فناوری

نکته اصلی درباره مقیاس TRL این است که فقط بلوغ یک فناوری را به صورت منحصر به فرد ارزیابی می‌کند. همانگونه که از تعاریف مختلف در جدول شماره ۲ مشخص است، TRL، یک فناوری را از اصول اولیه تا ارزیابی مفهوم از طریق اعتبارسنجی، سپس نمایش نمونه اولیه و درانتها، با انجام دادن عملیات و مأموریت موفقیت‌آمیز

بررسی می‌کند. این خصوصیات در توسعه فناوری بسیار مفید است؛ اما درباره چگونگی یکپارچه‌سازی این فناوری در یک سیستم کامل اطلاعاتی نمی‌دهد. ادعای ما این است که بیشتر سیستم‌های پیچیده در نقاط ادغام (یکپارچه‌سازی) شکست می‌خورند.

جدول ۲- روش اندازه‌گیری سطح بلوغ و آمادگی فناوری (حسینی مونس و کیا، ۱۳۹۵)

شرح	سطح آمادگی فناوری
کمترین سطح بلوغ فناوری. در این سطح، پژوهش‌های علمی به زبان تحقیق و توسعه کاربردی برگردانده می‌شود؛ به عبارت دیگر، یافته‌های علمی، جنبه کاربردی می‌یابد. (یک ایده خام)	۱- مشاهده و گزارش اصول اولیه
پس از مشاهده اصول فیزیکی اولیه، در سطح بعدی بلوغ، کاربردهای عملی آن ویژگی‌ها تدوین یا شناسایی می‌شود. در این سطح، کاربرد هنوز تا حد زیادی مبتنی بر حدس و گمانه‌زنی است؛ یعنی مدرک تجربی یا تحلیل دقیقی در حمایت از کاربرد تخمینی وجود ندارد. (تبدیل ایده به طرح)	۲- تدوین مفهوم یا کاربرد فناوری
روند تحقیق و توسعه فعال آغاز می‌شود که هم باید شامل انجام‌دادن مطالعات تحلیلی برای قراردادن فناوری در بافت مناسب خود و هم شامل انجام‌دادن مطالعات آزمایشگاهی برای صحت‌گذاری بر پیش‌بینی‌های تحلیلی باشد. (کوشش برای پیاده‌سازی)	۳- حمایت تحلیلی و تجربی مشخص از کاربرد و اثبات مفهوم
با یکپارچه‌سازی ارکان اصلی فناوری باید از تعامل اجزا با یکدیگر برای نیل به سطوح عملکردی مفهوم‌ساز اطمینان حاصل کرد. این صحت‌گذاری یا اعتبارسنجی باید با الزامات کاربردهای سیستمی بالقوه سازگار باشد. (پیاده‌سازی آزمایشگاهی)	۴- اعتبارسنجی اجزا یا نمونه‌ها در محیط آزمایشگاهی
وفاداری اجزا یا نمونه‌های مدنظر باید به‌طور معناداری افزایش یابد. مؤلفه‌های اصلی فناوری باید با مؤلفه‌های واقع‌گرایانه و پشتیبان یکپارچه شود تا مجموع کاربردها در محیطی شبیه‌سازی یا تا حدودی واقعی آزمایش شود. (نمونه اولیه)	۵- اعتبارسنجی اجزا یا نمونه‌ها در محیط مربوط
یک مدل نمونه یا سیستم اولیه در محیط مربوط آزمایش می‌شود. در این سطح، اگر فقط محیط مربوط، فضا باشد، آنگاه، مدل یا نمونه اولیه نیز باید در فضا نمایش داده شود. (نمونه کامل)	۶- نمایش مدل سیستم/ زیرسیستم یا نمونه اولیه در محیط مربوط (زمین یا فضا)
نمایش نمونه اولیه یک سیستم واقعی در یک محیط فضایی. نمونه اولیه باید نسبتاً یا کاملاً در مقیاس یک سیستم عملیاتی برنامه‌ریزی شده باشد و نمایش عملکرد باید در فضا رخ دهد. (ورود به دنیای واقعی)	۷- نمایش نمونه اولیه سیستم در یک محیط فضایی
مرحله پایانی توسعه سیستم برای اغلب مؤلفه‌های فناوری. این مرحله ممکن است شامل یکپارچه‌سازی یک فناوری جدید در یک سیستم موجود باشد. (تکمیل)	۸- تکمیل سیستم واقعی و بررسی کیفیت عملکرد فناوری
آخرین مرحله از فرایند رفع اشکال. اثبات عملکرد سامانه واقعی در مأموریت‌های عملیاتی. (تکرارپذیری)	۹- استفاده عملیاتی: سامانه نهایی آزمایش می‌شود و منافع فناوری به اثبات می‌رسد.

با بررسی جدول شماره ۱، یک مسیر توسعه سیستم مرحله‌ای (فازی) و تکامل TRL نیز تشخیص داده می‌شود؛ اما نکته مهم این است که ممکن است از حیث نظریه در توسعه فناوری و سیستم، مسیرها موازی باشد؛ اما مسیرهای یکپارچه‌ای نیست.

۲-۱-۳- سطح آمادگی یکپارچه‌سازی

در حالی که TRL معیاری برای توصیف وضعیت بلوغ مؤلفه‌ها و اجزا ارائه می‌دهد، هنوز باید به دنبال ابزاری برای توصیف یکپارچه‌سازی، یعنی چگونگی ارتباط مؤلفه‌ها با یکدیگر باشیم (یاسری و بهایی، ۲۰۱۸).^{۱۲} IRL به‌عنوان شاخص نظام‌مندی از روابط متقابل سازگار برای فناوری‌های مختلف و مقایسه مداوم بلوغ بین نقاط یکپارچه‌سازی TRL تعریف می‌شود. ما با استفاده از IRL، بلوغ یکپارچه‌سازی یک فناوری در حال توسعه را با یک فناوری دیگر در حال توسعه یا بالغ بررسی می‌کنیم. علاوه بر این، IRLها علاوه بر ایجاد امکان بررسی یک فناوری در مقیاس آمادگی یکپارچه‌سازی، مسیری را برای بهبود ادغام با سایر فناوری‌ها فراهم می‌کند. از آنجا که TRL برای ارزیابی خطر مرتبط با فناوری‌های در حال توسعه استفاده شده، IRL برای ارزیابی خطر ادغام و یکپارچه‌سازی طراحی شده است. این شاخص علاوه بر آنکه خصوصیات فیزیکی یکپارچه‌سازی، مانند رابط‌ها یا استانداردها را دربرمی‌گیرد، باید تعاملات، سازگاری، قابلیت اطمینان، قابلیت کنترل، کیفیت، عملکرد و... را در زمان ادغام دو قطعه نیز در نظر بگیرد. جدول شماره ۳، شامل فهرستی از شاخص‌های IRL و تعاریف مرتبط با آنهاست.

جدول ۳- سطوح آمادگی یکپارچه‌سازی (ادغام) (سوزر و همکاران، ۲۰۰۶)

IRL	تعریف
۱	یک رابط (به‌عنوان مثال اتصال فیزیکی) بین فناوری‌ها با جزئیات کافی شناسایی شده است تا بتوان ارتباط بین آنها را بیان کرد.
۲	برخی از ویژگی‌های خاص برای توصیف تعامل (یعنی توانایی نفوذ) بین فناوری‌ها با رابط آنها وجود دارد و تبیین‌پذیر است.
۳	سازگاری (یعنی زبان مشترک) بین فناوری‌ها برای ادغام کارا و مؤثر و اثر متقابل وجود دارد.
۴	جزئیات کافی در کیفیت و تضمین یکپارچگی بین فناوری‌ها وجود دارد.
۵	کنترل کافی بین فناوری‌های لازم برای ایجاد، مدیریت و خاتمه یکپارچه‌سازی وجود دارد.
۶	فناوری‌های یکپارچه، اطلاعات کاربردی مدنظر خود را انتخاب و ترجمه می‌کنند و ساختار می‌دهند.
۷	یکپارچه‌سازی فناوری‌ها با جزئیات کافی، تصدیق و صحه‌گذاری شده است تا عملی شود.

۳-۱-۳- سطح آمادگی سیستم

SRLها نشانه‌هایی در طول مسیر چرخه عمر دستیابی به هدف سیستم است که اطلاعات مفیدی را برای مدیران برنامه درباره پیشرفت آمادگی سیستم در سطح زیرسیستم یا کل سیستم فراهم می‌کند (لندن و همکاران، ۲۰۱۴).^{۱۳} جدول شماره ۴، مقیاس SRL را تعریف می‌کند که سطح بلوغ اجزا و قابلیت همکاری کل سیستم، از جمله ادغام با محیط را در درون خود دارد.

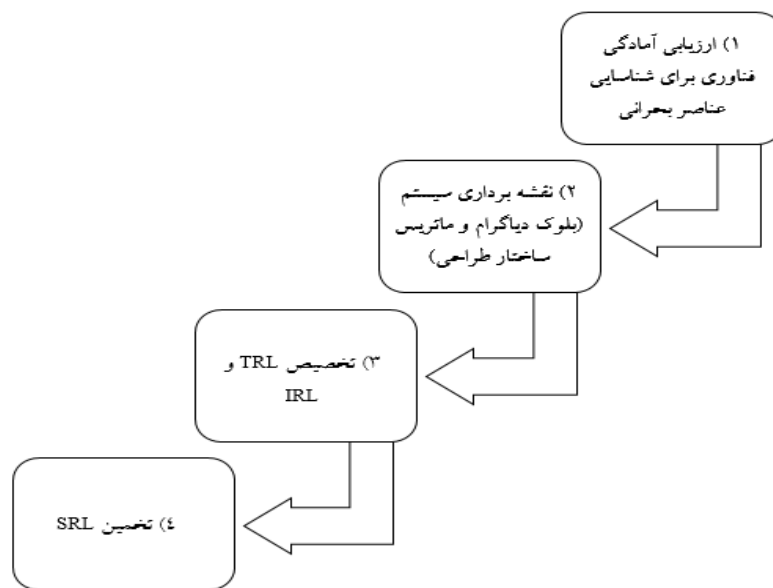
جدول ۴- سطوح آمادگی سیستم (لندن و همکاران، ۲۰۱۴)

SRL	مرحله	تعریف
۱	پایش مفهوم	اصلاح مفهوم اولیه. تدوین استراتژی توسعه سیستم/ فناوری
۲	توسعه فناوری	کاهش خطرهای فناوری و تعیین مجموعه مناسب فناوری‌ها برای ادغام در یک سیستم کامل.
۳	توسعه سیستم و اثبات	توسعه یک سیستم یا افزایش توانایی؛ کاهش یکپارچه‌سازی و ریسک تولید؛ اطمینان از پشتیبانی عملیاتی؛ کاهش ردپای تدارکات (آثار مخرب)؛ یکپارچه‌سازی سیستم‌های انسانی؛ طراحی برای تولید؛ تضمین اجابت و محافظت از اطلاعات مهم برنامه‌ها و نشان‌دادن یکپارچگی سیستم، قابلیت همکاری، ایمنی و مطلوبیت.
۴	توسعه ساخت	رسیدن به توانایی و قابلیت عملیاتی که نیازهای مأموریت را برآورده کند.
۵	پشتیبانی و عملیات	اجرای یک برنامه پشتیبانی که الزامات پشتیبانی عملیاتی را برآورده می‌کند و سیستم را در مقرون به‌صرفه‌ترین راه حل در طول چرخه عمر خود حفظ کند.

۴- روش شناسی پژوهش و معرفی مدل پیشنهادی

این پژوهش از لحاظ هدف، کاربردی و از نظر شیوه گردآوری اطلاعات از نوع عملیاتی و میدانی است؛ از این رو، جمع‌آوری اطلاعات و داده‌ها بعد از مراحل آزمایش و ارزیابی و از طریق آزمایش‌ها و عملیات‌های کاربردی حاصل شده است. برای تجزیه و تحلیل و توصیف بهتر اطلاعات گردآوری شده، روش‌های معماری سیستم (دو روش) بلوک دیاگرام و ماتریس ساختار طراحی به کار رفته است.

شکل شماره ۲، گام‌های مدل را برای تعیین سطح آمادگی سیستم برای سامانه نشان می‌دهد. در این مدل، ابتدا TRL بخش‌های بحرانی تعیین می‌شود؛ سپس براساس بلوک دیاگرام و ماتریس ساختار طراحی و تحلیل تبادلات، SRL سیستم محاسبه می‌شود.



شکل ۲- گام‌های مدل پیشنهادی

۴-۱- ارزیابی آمادگی فناوری برای شناسایی عناصر بحرانی

فرایند ارزیابی آمادگی فناوری^{۱۴} (TRA) برای شناسایی عناصر فناوری بحرانی^{۱۵} (CTEs) استفاده می‌شود. TRA، فرایندی نظام‌مند و مبتنی بر شواهد است (آستین و یورک، ۲۰۱۵)^{۱۶} که بلوغ CTE را ارزیابی می‌کند. مؤلفه فناوری، زمانی «بحرانی و حیاتی» است که سیستم به آن وابسته باشد تا نیازهای عملیاتی خود را برآورده کند؛ بنابراین، اگر سیستمی برای دستیابی به حداقل نیازهای عملیاتی، توسعه‌ای، تولید و بهره‌برداری، به فناوری‌های خاص بستگی داشته باشد و اگر آن فناوری جدید باشد، فناوری مذکور، عنصر فناوری بحرانی شناخته می‌شود. همچنین، همه مؤلفه‌ها با TRA ارزیابی دقیق نمی‌شود؛ از این رو، بین فناوری حیاتی و فناوری لازم، تمایز وجود دارد. درحقیقت، همه تجهیزات موجود در یک سیستم ضروری است؛ زیرا اگر اینگونه نبود، آنها از سیستم جداشدنی بودند. با وجود این، فقط چند قطعه از تجهیزات ممکن است حیاتی باشد؛ زیرا هیچ جایگزینی برای آنها وجود ندارد و بدون آنها سیستم مدنظر، عملکردی نخواهد داشت.

۲-۴- نقشه برداری سیستم

سیستم، مجموعه‌ای از اجزا و تجهیزات است که توانایی ساختن محصولاتی را برای دستیابی به هدفی معین دارد. براساس هدف کلی، یک سیستم به روش‌های مختلفی نقشه برداری می‌شود. این نقشه و نمودار به‌عنوان ابزاری تصویری برای بررسی TRL و IRL به کار می‌رود؛ بنابراین، برای تعیین هدف کلی و شناسایی اجزای یک سیستم باید نقشه‌ای ترسیم شود. نقشه، سیستم اجزا و قطعات به‌کاررفته در هر ماژول یا زیرسیستم از سیستم اصلی و چگونگی پیوند آنها را با یکدیگر نشان می‌دهد. روش‌های مختلفی برای نقشه برداری یک سیستم وجود دارد؛ به‌عنوان نمونه، یک نمودار شماتیک با استفاده از نمادهای گرافیکی انتزاعی، تصاویر واقع‌بینانه از سیستم مدنظر به دست می‌دهد. گفتنی است این نوع نمودار، بیشتر برای سیستم‌هایی با اجزای بزرگ به کار می‌رود؛ از این‌رو، برای سیستم مورد مطالعه در این پژوهش، که به سیستم برقی یک صندلی پران مربوط است، به کار نمی‌رود. اگر این پژوهش، کل سیستم یک صندلی پران (شکل شماره ۳) را بررسی می‌کرد، در آن صورت، نمودار شماتیکی، ابزار مفیدی بود؛ زیرا در یک مقیاس مناسب، زیرسیستم‌های الکتریکی، مکانیکی و ... به تفکیک نمایش داده می‌شد؛ اما درمقابل، دو ابزار محبوب بلوک دیاگرام^{۱۷} (BD) و ماتریس ساختار طراحی^{۱۸} (DSM)، معماری فیزیکی و کارکردی سیستم را در اختیار ما می‌گذارد که بسیار کاربردی است و در این پژوهش از آن استفاده شده است. در ادامه، توضیح کوتاهی درباره هر کدام داده می‌شود.

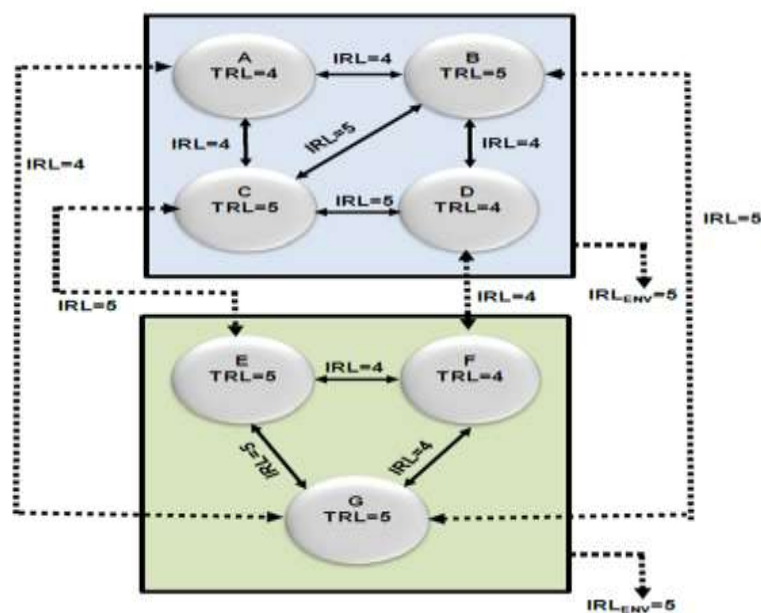
۱-۲-۴- بلوک دیاگرام

بلوک دیاگرام، روشی برای جلوگیری از بی‌نظمی‌های غیرضروری است. بلوک دیاگرام، نمایشی از سیستم است که در آن، کارکردها (یا قطعات یا تجهیزات) با بلوک‌های متصل به خطوطی نشان داده شده است که روابط بلوک‌ها را نشان می‌دهد. این روش در بحث‌های مربوط به تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و نمودارهای جریان فرایند نیز استفاده می‌شود. بلوک دیاگرام، جزئیات را نشان نمی‌دهد؛ بلکه معمولاً برای توصیف سطوح بالاتر با توضیحات کمتر و برای نشان دادن مفاهیم کلی بدون نگرانی از جزئیات برنامه در نظر گرفته می‌شود؛ از این‌رو، آنها دیدگاهی معتبر از یک سیستم برای شناسایی سریع نقاط مشکل‌دار ارائه می‌دهند.

شکل شماره ۴، بلوک دیاگرام یک سیستم ساده، متشکل از ۷ مؤلفه را نشان می‌دهد که در یک فاز بهبود از توسعه یک سیستم به ۲ ماژول گروه‌بندی شده است. بین اجزای هر ماژول یا زیرسیستم و اجزای دو ماژول با یکدیگر، ارتباط وجود دارد. رابط‌های بین دو مؤلفه با فلش‌های دو سر نشان داده شده است که بر این موضوع دلالت دارد که آمادگی دو مؤلفه برای یکپارچه‌سازی به هم وابسته است. فلش برای نشان دادن جهت جریان نیست؛ بلکه برای نشان دادن وابستگی یا ارتباط است. این تصویر، نمایشی ساده از یک معماری سیستم است که رابطه اجزای مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- تصویری از یک صندلی پران



شکل ۴- مثالی از یک سیستم متشکل از دو ماژول و هفت مؤلفه

۴-۲-۲- ماتریس ساختار طراحی

DSM ابزاری بصری است که نشان‌دهنده روابط و وابستگی اجزای یک سیستم است (برونینگ، ۲۰۱۵)^{۱۹}. همچنین ابزاری است که به تجزیه و ادغام سیستم‌ها از دو نظر، یکی به‌عنوان ابزار نمایش (مستندکردن تعاملات) و دیگری به‌عنوان ابزار تحلیل (با دسته‌بندی کردن) کمک می‌کند؛ به بیانی ساده‌تر، DSM، معماری یک محصول به‌صورت شبکه‌ای از اجزا و ارتباطات آنهاست.

چگونگی نمایش به‌صورت ماتریسی مربعی است با عناوین یکسان برای سطرها و ستون‌ها که یک علامت در خارج قطر اصلی ماتریس، نشان‌دهنده ارتباط و وابستگی یک جزء به‌جزء دیگر است (برونینگ، ۲۰۰۱). (جدول شماره ۵)

۳-۴- تخصیص TRL و IRL

تخصیص TRL های مربوط به هر آیتم و IRL های مربوط به هر دو مؤلفه در ارتباط با یکدیگر و هر ماژول با محیط در این مرحله انجام می شود. این مرحله پس از رسم ماتریس ساختار طراحی و خوشه بندی اجزا و ماژول ها توسط کارشناسان و با توجه به آزمایش ها و بررسی های میدانی انجام می شود؛ به عنوان نمونه، برای نمودار بلوک دیاگرام شکل شماره ۴ یک ماتریس DSM ترسیم می شود (جدول شماره ۵). TRL هر مؤلفه در یک ستون در سمت چپ اجزا نشان داده شده است و اعداد داخل ماتریس و اطراف قطر اصلی IRL، نشان دهنده ارتباط اجزا با یکدیگر است. تصمیم گیری درباره سطح جزئیات لازم برای نقشه سیستم به فناوری های در حال توسعه بستگی دارد. به طور کلی، تجزیه و تحلیل DSM فقط به روابط اجزا (در همان سطح) و نه درون مؤلفه ها نگاه می کند.

۴-۴- تخمین SRL

در نهایت، پس از انجام دادن گام های مذکور، با بهره گیری از معادلات مربوط به روش میانگین خطا، SRL برآورد می شود. گفتنی است در ستون آخر جدول شماره ۵، سطح آمادگی یکپارچه سازی بین هر ماژول با محیط پیرامون نمایش داده شده است.

جدول ۵- DSM مربوط به سیستم نشان داده شده در شکل شماره ۴، به همراه TRL و سطوح آمادگی یکپارچه سازی هر کدام از اجزا با

یکدیگر

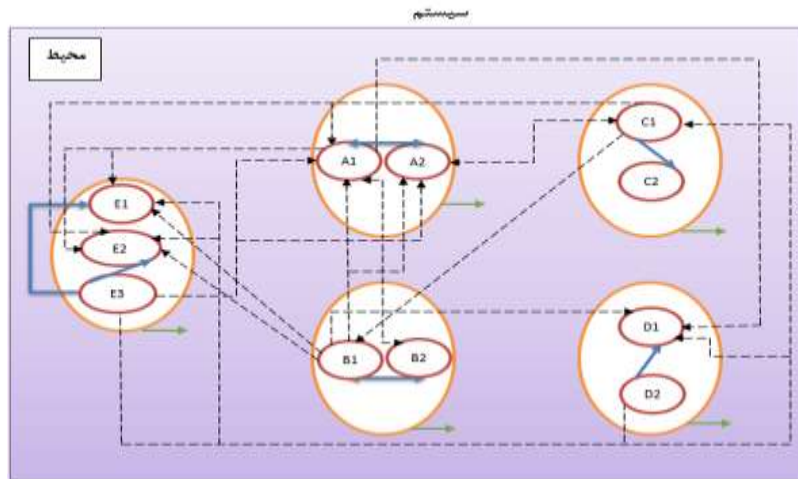
	TRL		A	B	C	D	E	F	G	ENV
M1	۴	A	A	۴	۴				۴	۴
	۵	B	۴	B	۵	۴			۵	
	۵	C	۴	۵	C	۵	۵			
	۴	D		۴	۵	D		۴		
M2	۵	E			۵		E	۴	۵	۴
	۴	F				۴	۴	F	۴	
	۵	G	۴	۵			۵	۴	G	
ENV										

۵- مطالعه کاربردی و یافته ها

شکل شماره ۵، معماری سیستم مدنظر این پژوهش را نشان می دهد که از پنج ماژول تشکیل شده است. در هر زیرسیستم، تعدادی مؤلفه یا جزء وجود دارد (مجموعاً یازده مؤلفه) که TRL ها مربوط به آنهاست و باید روی آنها اعمال شود (فلش های مشکی و آبی، ارتباطات یک سویه یا دوسویه بین مؤلفه ها و خطوط سبز، ارتباط هر ماژول را با محیط نشان می دهد).

پس از ارزیابی آمادگی فناوری برای شناسایی عناصر بحرانی به صورت شهودی توسط کارشناسان در عملیات های مربوط به تجهیزات خاص، مانند صندلی پران (سیستم برقی صندلی) مورد مطالعه در این پژوهش، هیچ زیرسیستم، بسته مونتاژی (یا اجزای بزرگ) از ارزیابی خارج نمی شود. در پژوهش های قبل در این حوزه (برآورد سطح آمادگی سیستم های مختلف) فرض بر این بوده است که دو مؤلفه در ارتباط با یکدیگر در یک TRL متفاوت است؛ اما برای سادگی کار، در بالاترین سطح سلسله مراتب سیستم فرض می کنند که همه وابستگی ها و ارتباطات،

یک رابطه دوطرفه است (یعنی هر دو مؤلفه در ارتباط با هم، IRL برابر دارد)؛ از این رو، یک ماتریس DSM متقارن به دست می‌آورد؛ در حالی که اگر چند مؤلفه برای ایجاد یک مجموعه ترکیب شود، ممکن است درجات مختلفی از ادغام وجود داشته باشد (که این پژوهش از این نوع است)؛ به ویژه جایی که ارتباط از نوع انرژی یا اطلاعات (فرمان، سیگنال) باشد. ارتباطات یا در سطر است یا در ستون. ارتباط در ستون نشان می‌دهد واحد ستون، پیش‌نیاز چه واحدهایی است و دنبال کردن ارتباطات سطری نشان می‌دهد آن واحد به چه اجزایی وابسته است.



شکل ۵- معماری سیستم (برقی) نمونه مدنظر (صندلی پران)

در ادامه، پیش از بیان جدول DSM مربوط به معماری سیستم (شکل شماره ۵)، گفتنی است با توجه به اینکه صندلی پران، مانند بسیاری دیگر از سیستم‌های پیچیده از زیرسیستم‌های مختلف (الکتریکی، مکانیکی و ...) تشکیل شده است و بررسی کل سیستم به صورت یکجا، بسیار پیچیده و دشوار می‌شود، ما فقط سیستم برقی این صندلی را بررسی کردیم. برای آگاهی بیشتر، راهنمای اتصالات صندلی پران، ماتریس ساختار طراحی سیستم برقی و ماتریس ساختار طراحی سیستم مکانیکی صندلی، به ترتیب در جدول‌های شماره ۶، ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۶- راهنمای اتصالات صندلی پران

		حرکتی		ارتباطات			
VK	کششی	CS	Signal				
VL	خطی	CC	Command				
VCH	چرخشی	EE	الکترونیک				
MCH	چسب	ECH	شوک	انرژی			
MR	رزوه	ET	گرمایی				
MP	پیچ	EV	ارتعاشی				
MG	جوش	EP	پنوماتیکی				
MPR	پرچ	EC	شیمیایی				
MPI	پین	EH	هیدرولیکی				
MK	کشویی	EMI	الکترومغناطیسی				
MDP	اتصال لاستیکی	EMS	مکانیکی فتری				
MC	اتصال هلالی	SC	نزدیکی			فضا	
MS	اتصال سوکتی	SCE	هم‌راستایی				

جدول ۱۰- ماتریس خوشه‌بندی‌شده ساختار طراحی سیستم برقی صندلی پُرآن به همراه TRL و IRL اجزا

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	
۲			اجزا																
۳			A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	E3	محیط					
۴		TRL	ماتریس IRL												Ave. IRL	TRL*(Ave. IRL)	SQRT	Module IRL	
۵	A1	۵	۵	۴	۶	۵							۴	۵	۴/۸	۲۴	۴/۸۹	۴/۸۲	
۶	A2	۵	۵	۴		۵							۴	۵	۴/۵	۲۲/۵	۴/۷۴		
۷	B1	۶			۶	۴								۵	۵	۳۰	۵/۴۷	۵/۴۸	
۸	B2	۵	۶		۶									۵	۶	۳۰	۵/۴۷		
۹	C1	۵		۵										۵	۵	۲۵	۵	۵/۲۴	
۱۰	C2	۵					۶							۵	۶	۳۰	۴/۴۷		
۱۱	D1	۶	۴		۴					۵				۵	۴/۵	۲۷	۵/۱۹	۳/۶۷	
۱۲	D2	۶												۵	-	-	-		
۱۳	E1	۵	۵		۵					۵			۴	۵	۴/۷۵	۲۳/۷۵	۴/۸۷	۳/۹۰	
۱۴	E2	۵	۴		۵		۴			۵			۴	۵	۴/۴	۲۲	۴/۶۹		
۱۵	E3	۵												۵	-	-	-		
۱۶																		SRL=۳/۹۵	

درباره جدول شماره ۹ و ارتباط آن با شکل شماره ۵ و جدول‌های شماره ۶، ۷ و ۱۰ بیان این نکته، مهم است که به واسطه قدرت اتصالات (حرکتی، مکانیکی، ارتباطی، انرژی و فضایی)، تعاملات پیچیده و محل قرارگیری برخی عناصر با یکدیگر در درون سیستم، این عناصر در دسته‌هایی دوتایی و سه‌تایی در کنار هم (در یک خوشه) قرار می‌گیرد که این مورد به شکل دقیق در بلوک دیاگرام رسم شده از سیستم (شکل شماره ۵) مشهود است؛ به‌طور مثال، دو مؤلفه ECM و FDR، که در شکل شماره ۵ و جدول شماره ۱۰ برای سهولت در نمایش با نماد C1 و C2 نشان داده شده است، در یک خوشه قرار می‌گیرد و در جدول شماره ۹، ارتباط سطری این مؤلفه‌ها با سایر عناصر با توجه به جدول شماره ۷ نشان داده شده است؛ مثلاً درباره ارتباط سطری مؤلفه ECM با مؤلفه کنترل پنل از

استفاده شده است که هر کدام از درایه‌ها درحقیقت، مطابق $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ انرژی فضایی یا حرکتی $\begin{bmatrix} \text{انرژی فضایی یا حرکتی} \\ \text{مکانیکی ارتباطات} \end{bmatrix}$ با اعداد ۰ و ۱

کدگذاری شده است؛ به این صورت که عدد ۱ اگر به جای هر کدام از درایه‌ها قرار بگیرد، نشان می‌دهد نوع اتصال از کدام شکل است.

هر ردیف از ستون «Average-IRL» در جدول شماره ۱۰، میانگین حسابی IRL‌های موجود در آن سطر است که با جمع همه IRL‌های مربوط به هر رابطه در ردیف و تقسیم آن بر تعداد روابط تعیین می‌شود؛ به‌عنوان مثال، برای ردیف اول، $(4/8 = (4+5+6+4)/5)$. ستون هفدهم، نتایج ضرب TRL هر مؤلفه را به میانگین حسابی IRL‌های آن (ستون شانزدهم) نشان می‌دهد؛ به‌عنوان مثال، برای ردیف اول، $(24 = 5 \times 4/8)$. ستون هجدهم، ریشه کامل (مجذور کامل) ستون هفدهم را نشان می‌دهد که درحقیقت، سطح آمادگی موجود در سیستم برای هر مؤلفه است. در آمار و کاربردهای آن، ریشه میانگین مربعات 20 (RMS) به‌عنوان میانگین حسابی مربع‌های یک مجموعه از اعداد تعریف می‌شود. RMS ستون هجدهم در ستون نوزدهم آورده شده است که SRL هر ماژول است (تخصیص شاخص آمادگی سیستم به هر ماژول مرکب از اجزا). برای زیرسیستم اول (یاسری، ۲۰۱۳):

$$M_{1-R} = \sqrt{\frac{24 + 22/5}{2}} = 4/82$$

عدد دو در مخرج تعداد مؤلفه‌های سیستم است، متعاقباً:

$$M_{1-R} = \sqrt{\frac{(4/89)^2 + (4/74)^2}{2}} = 4/82$$

تخمینی از سطح آمادگی سیستم نیز به صورت ذیل زده می‌شود (یاسری، ۲۰۱۳):

$$SRL_{estimate} = \sqrt{\frac{[5 \times (4/82)^2] + [5 \times (5/48)^2] + [5 \times (5/24)^2] + [5 \times (3/67)^2] + [5 \times (3/90)^2]}{7 \times 5}} = 3/95$$

در اینجا، عدد ۷، بیشترین امتیاز در رتبه‌بندی IRL در جدول شماره ۲ است. این عدد برای عادی‌سازی سطح آمادگی ادغام محیط با سیستم استفاده می‌شود که برای این مثال در همه ماژول‌ها یکسان است و از آن برای اهداف عادی استفاده می‌شود. درحقیقت، نشان می‌دهد کلیه مؤلفه‌ها، آمادگی نمایش عملکرد خود در فضای عملیاتی را دارد. همچنین، عدد ۵ در ضرب اعداد، نشان‌دهنده سطح آمادگی ادغام هر ماژول با محیط است و عدد ۵، مخرج تعداد ماژول‌ها را نمایش می‌دهد.

۶- بحث

با توجه به عدد محاسبه شده برای سطح آمادگی سیستم (۳/۹۵) و جدول شماره ۴، سیستم باید در ورودی مرحله (توسعه ساخت) باشد. اگر برنامه پروژه، سطح دیگری را بیان کند، باید به سراغ علل آن برویم. همچنین، روش پیشنهادی ارزیابی آمادگی سیستم (SRA)، اطلاعات دقیقی را درباره وضعیت جامع سیستم در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد و سطح یکپارچه‌سازی هر مؤلفه با مؤلفه دیگر را در طول توسعه سیستم، کمیت‌بخشی و به بهبود طراحی، ساخت و مدیریت نصب کمک می‌کند. پیاده‌سازی روش SRA به تصمیم‌گیری‌ها و شناسایی مناطق حساس و بحرانی کمک می‌کند. از نظر متریک، هم SRL تخمینی و هم SRL برای اندازه‌گیری موارد مشابه در یک مقیاس مشخص استفاده می‌شود؛ با این حال، SRL اصلی را کارشناسان و تیم مهندسی به کمک جدول شماره ۴ تعریف می‌کنند؛ در حالی که SRL تخمینی توسط همین گروه با تجمیع صفات تمام مؤلفه‌ها به دست می‌آید. برآورد آمادگی سیستم از کمترین حد به بیشترین حد خود می‌رسد؛ زیرا آمادگی سیستم را به‌عنوان یک کل و جدا از عناصر آن اندازه‌گیری می‌کند. اگر همه مؤلفه‌ها به‌طور هم‌زمان در امتداد یک مسیر به بلوغ برسند، آنگاه، SRL برآوردشده به SRL واقعی می‌رسد.

یاسری (۲۰۱۳) در پژوهش خود، دو معیار IRL و SRL را برای تکمیل مقیاس TRL تعریف کرد و سپس، سطح آمادگی سیستم را، که معیاری از آمادگی کل سیستم است، با ترکیب سطح آمادگی فناوری و IRL در یک شاخص آمادگی سیستم براساس روابط بیان شده در پژوهش قرار داد. این روش با افزودن یک چارچوب مهندسی سیستم پیرامون فرایند برای پیگیری پیشرفت توسعه سیستم فرعی، در پژوهش یاسری و بهایی (۲۰۱۸) گسترش می‌یابد. در پژوهش حاضر، فرایند تخمین SRL با استفاده از مطالعه‌ای موردی توصیف شده است که نسخه ساده‌ای از توسعه یک زیرسیستم واقعی از یک تجهیز بسیار حساس است. علاوه بر این، در پژوهش حاضر، عیناً از

ماتریس‌های ساختار طراحی به‌دست‌آمده از پژوهش‌های نویسندگان مقاله استفاده شده و مانند مقالات پیش برای سادگی کار به یک ماتریس قرینه تبدیل نشده است؛ از این‌رو، یافته‌های به‌دست‌آمده، اعتبار بیشتری نسبت به مطالعات پیشین پیدا می‌کند.

مقایسه مقدار تقریبی SRL و مقادیر موجود در جدول SRL، که در این مقاله آورده شده است، سطح آمادگی سیستم را نشان می‌دهد. این شاخص، بخشی از اطلاعات لازم را برای مدیران نهادهای مجاز و یا تحت تحریم فراهم می‌کند تا یک پروژه با گیت‌های بررسی مشخص به مرحله بعدی توسعه، در یک فرایند مرحله‌ای حرکت کند. توسعه فناوری، ادغام و توسعه سیستم‌ها از مسیرهای تکامل (یا بلوغ) مشابه پیروی می‌کند؛ از این‌رو، مدیران صنایع با تدوین الزامات آمادگی و بلوغ (مدیریتی) فناوری‌های ضروری، سرعت دستیابی به طراحی و توسعه محصولات مدنظر خود را افزایش می‌دهند.

۷- نتیجه‌گیری

باید بین سطح آمادگی مؤلفه و سطح آمادگی سیستم تمایز قائل شد؛ به‌عنوان مثال، به یک مؤلفه در صورت دستیابی به TRL6 (البته در صنایع مختلف متفاوت است) توجه می‌شود. این پژوهش در چارچوب سیستم مدنظر در محیط خود است؛ اما تمرکز بر هر مؤلفه، منحصر به فرد است و کل سیستم را دربرنمی‌گیرد. این شاخص در صورت عقب‌افتادگی سیستم از برنامه‌های تعریف‌شده برای آن، زمان و مکان مداخله در کار را به مدیریت نشان می‌دهد. ورود در هر سطح مشخص می‌کند کدام مؤلفه‌ها به مدیریت بیشتری نیاز دارد. یک پروژه کاملاً کنترل‌شده تضمین می‌کند که TRL، IRL و SRL به موازات یکدیگر حرکت کند. همچنین این پژوهش، آمادگی را از بلوغ متمایز می‌کند. اگر یک فناوری در یک سیستم استفاده شود، بالغ می‌شود (بالغ به حساب می‌آید)؛ اما تا زمانی که این موضوع اثبات نشده باشد، برای سیستم در حال توسعه آماده نیست؛ بنابراین، یک تکنولوژی بالغ در بهترین حالت در TRL5 یا 6 وارد سیستم جدید می‌شود.

مهم‌ترین محدودیت این پژوهش، دسترسی دقیق نداشتن به آزمایش‌های انجام‌شده برای ارزیابی عملکرد سیستم و مؤلفه‌های درون سیستم (برای بررسی نحوه عملکرد اتصالات، برقراری زبان مشترک، قابلیت کنترل و ...) است؛ از این‌رو، برای تعیین سطوح آمادگی در هر سطح باید زمان مهمی برای تبیین موارد خواسته‌شده به صنعت و دریافت اطلاعات از مهندسان صنعت صرف می‌شد که این موضوع، خود تا حدودی بر دقت کار تأثیر می‌گذاشت.

سطوح TRL، IRL و SRL با استفاده از مفهوم Fit-For-Purpose یعنی آماده استفاده (مناسب برای هدف)، با شواهد جمع‌آوری‌شده از طریق تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی‌ها، آزمایش‌های استاندارد و تجربیات به‌دست‌آمده، ضمن آزمایش‌های میدانی قضاوت می‌شود و استفاده از مدل‌های مختلف مهندسی سیستم چرخه عمر برای سیستم‌های گوناگون، رویکرد صنعتی استاندارد برای مدیریت فازهای مختلف یک پروژه مهندسی در اختیار ما قرار می‌دهد (از فاز شبیه‌سازی تا آزمایش‌های میدانی و ...)؛ از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از این مدل‌ها در محاسبه سطوح آمادگی استفاده شود تا علاوه بر تفکیک دقیق‌تر جدول‌های مربوط به سطوح آمادگی با جزئیات بیشتری از محل قرارگیری این سطوح آگاه شویم که زمینه ساز افزایش کیفیت مدیریت سیستم و توسعه بهتر سیستم می‌شود.

References

- Ansari, R., Abedi Sharabiani, A., and Khayyat khoshdooz, M. (2016). "Impact of Technology Management on Agility Capabilities, Case Study in Kashan Steel Factory". *Journal of Production and Operations Management*, 7(1): 191-214. (in Persian).
- Austin, M.F., and York, D M.(2015). "System Readiness Assessment (SRA) an illustrative example". *Procedia Computer Science*, 44: 486-496 .
- Bakke, K. (2017). *Technology readiness levels use and understanding*. Master's thesis. University College South-East Norway.
- Browning, T.R. (2001). "Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions". *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3): 292-306.
- Browning, T.R. (2015). "Design structure matrix extensions and innovations: a survey and new opportunities". *IEEE Transactions on Engineering Management*, 63(1): 27-52.
- Garrett Jr, R.K., Anderson, S., Baron, N.T., and Moreland Jr, J.D. (2011). "Managing the interstitials, a system of systems framework suited for the ballistic missile defense system". *Systems Engineering*, 14(1): 87-109.
- Knaggs, M., Ramsey, J., Unione, A., Harkreader, D., Oelfke, J., Keairns, D., and Bender, W. (2015). "Application of systems readiness level methods in advanced fossil energy applications". *Procedia Computer Science*, 44: 497-506.
- Hosseini Moones, S., and Kia, A. (2016). *Systems Engineering*. Tehran: Defence Industries Training and Research Institute. (in Persian).
- London, M.A., Holzer, T.H., Eveleigh, T.J., and Sarkani, S. (2014). "Incidence matrix approach for calculating readiness levels". *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 23(4): 377-403.
- Nakhaeinejad, M., and Safari, M. (2019). "Identification and ranking of technology risks in the field of natural gas energy distribution by the integrative approach of FMEA and TOPSIS The Case of Chaharmahal and Bakhtiari Province Gas Compan". *Journal of Production and Operations Management* ,10(19): 143-159. (in Persian).
- McConkie, E., Mazzuchi, T.A., Sarkani, S., and Marchette, D. (2013). "Mathematical properties of system readiness levels". *Systems Engineering*, 16(4): 391-400.
- Sauser, B., Verma, D., Ramirez-Marquez, J., and Gove, R. (2006). "From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels". In *Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA* (pp. 1-10).
- Sauser, B.J., Ramirez-Marquez, J.E., Henry, D., and DiMarzio, D. (2008). "A system maturity index for the systems engineering life cycle". *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 3(6): 673.
- Shishko, R., Ebbeler, D.H., and Fox, G. (2004). "NASA technology assessment using real options valuation". *Systems Engineering*, 7(1): 1-13.
- Smith, J.D. (2005). "An alternative to technology readiness levels for non-developmental item (NDI) software". *Paper presented at the Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. (pp. 315a-315a).
- Yasseri, S. (2013). "Subsea system readiness level assessment". *Underwater Technology*, 31(2): 77-92.
- Yasseri, S., and Bahai, H. (2018). "System Readiness Level Estimation of Oil and Gas Production Systems". *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 2(2): 31-44 .
- Yasseri, S., Bahai, H., and Yasseri, R. (2018 a). "Reliability Assurance of Subsea Production Systems: A Systems Engineering Framework". *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 2(1): 1-19.
- Yasseri, S.F., Bahai, H., and Yasseri, R.F. (2018 b). "A Systems Engineering Framework for Delivering Reliable Subsea Equipment". *Paper presented at the The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference*. 222-230.

1. Sauser et al.
2. Technology Readiness Level
3. Bakke
4. Shishko et al.
5. Smith
6. Knaggs et al.
7. System Readiness Level
8. Integration Readiness Level
9. Yasseri
10. Garrett et al.
11. McConkie et al.
12. Yasseri and Bahai
13. London et al
14. Technology Readiness Assessment
15. Critical Technological Elements
16. Austin and York
17. Block Diagram
18. Design Structural Matrix
19. Browning
20. Root-Mean-Square