# توسعه روشی به‌منظور تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم‌های یک ماهواره مکعبی با رویکرد سطح آمادگی تأمین‌کنندگان

**زهرا جمالی**
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران zahrajamali7123@gmail.com
**مهدی کرباسیان***
(نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران
mkarbasian@yahoo.com
**کریم آتشگر**
دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران atashgar@iust.ac.ir

**چکیده**: محصولات پروژه‌های فناورانه وابستگی شدیدی به داشتن فناوری‌های جدید و پیشرفته دارد. یکی از راهبردهای اساسی برای تسریع در اجرای پروژه‌های سیستم‌های پیچیده و کاهش هزینه‌های آن، استفاده از شبکه تأمین‌کنندگان بیرونی به منظور اکتساب فناوری‌های مورد نیاز است. تخصیص قابلیت اطمینان یک مفهوم مهم از مهندسی قابلیت اطمینان است؛ که در فاز طراحی مفهومی انجام می شود. در این پژوهش تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم های یک ماهواره مکعبی با هدف دستیابی به قابلیت اطمینان ۷۳درصد؛ با استفاده از توسعه روش امکان پذیری هدف، انجام شده است. روش امکان‌پذیری‌هدف به‌عنوان یک روش کارا در محاسبه تخصیص قابلیت اطمینان شناخته شده است که شامل چهار فاکتور ورودی می‌باشد؛ یکی از این فاکتورهای ورودی، حالت فناوری جدید می باشد؛ همچنین در هیچ کدام از پژوهش‌های انجام شده در حوزه تخصیص قابلیت اطمینان روشی یافت نشد که لزوم توجه به معیار تأمین‌کنندگان را در محاسبه فاکتور فناوری مورد بحث قرار داده باشد. از این رو تمرکز مطالعه حاضر بر محاسبه دقیق فاکتور فناوری جدید می باشد. به منظور براورد این فاکتور، به مفاهیمی تحت عنوان ارزیابی آمادگی فناوری و سطح توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان پرداخته شد و مدلی به منظور تلفیق دو مفهوم ذکر شده، ارائه گردید. در پایان سه معیار دیگر ورودی روش امکان‌پذیری هدف محاسبه گردید و تخصیص قابلیت اطمینان انجام گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تخصیص قابلیت اطمینان با این روش دقیق‌تر است و نیز به شناسایی زیرسیستم‌های بحرانی به لحاظ لزوم توجه بیشتر به آن‌ها در مرحله طراحی کمک می‌نماید.

**واژگان کلیدی:** مهندسی سیستم، مهندسی قابلیت اطمینان، تخصیص قابلیت اطمینان، محصول پیچیده، فناوری، ماتریس ساختار طراحی.

## ۱- مقدمه

روند توسعه و گسترش صنایع پیشرفته در عصر حاضر، با انبوهی از حجم تولیدات صنعتی؛ نیاز هر چه بیشتر به اجرای روش‌های پیشگویانه در مقابله با وقوع خرابی‌های احتمالی را آشکار می‌سازد [۱]. تلاش بشریت در فضا پیشرفت چشمگیری داشته به‌طوری که در دهه‌های اخیر استفاده از ماهواره‌های کوچک در مدارهای نزدیک به زمین افزایش یافته است و امروزه ماهواره‌ها با محموله‌های علمی و کاربردهای گوناگون در مدارهای متفاوت قرار گرفته و خدماتی از قبیل پخش صدا و تصویر، مخابرات و سایر موارد، ارائه می‌دهند. [۲] خلق یک سیستم جدید از یک ایده خام فرایند پیچیده‌ای است که توسعه سیستم[1](SDP) نامیده می‌شود.

تاریخ دریافت:۱۳۹۹/۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸
دوره ۱۰/ شماره ۲
صفحات: ۱۰۳-۱۱۹

[1] System Development Process

*(Corresponding author) bostadi@modares.ac.ir،

چرخه عمر دارای فازهای مختلفی می‌باشد و در پایان هر فاز،کنترل لازم صورت می‌گیرد. مجموعه ابزار قابلیت اطمینان و بهبود آن که در طی چرخه عمر استفاده می گردند به صورت خلاصه در شکل ۱ آورده شده است [۳]. همان‌طورکه مشاهده می‌شود تخصیص قابلیت اطمینان روشی برمبنای قابلیت اطمینان در فاز طراحی مفهومی است.

**شکل۱:** ابزار قابلیت اطمینان در چرخه عمر (کرباسیان و محمدحسنی؛ ۱۳۹۸)

تخصیص قابلیت اطمینان یک مرحله بحرانی و مهم در فرایند توسعه محصول برای تعیین اهداف قابلیت اطمینان با اجزای انفرادی [۴] و یک ابزار تحلیلی مهم است که می تواند به بهبود قابلیت اطمینان سیستم کمک کند [۵]؛ و اغلب توسط چندین تأمین‌کننده یا تیم طراحی توسعه داده می‌شوند. هدف از تخصیص قابلیت اطمینان، نه تنها رسیدن به اهداف قابلیت اطمینان؛ بلکه یافتن فرصت‌های بهبود بر اساس پتانسیل‌های واقعی است [۴]. ابتدا قابلیت اطمینان زیر سیستم‌ها یا تجهیزات خاص تخصیص داده شده، تکمیل می‌شود؛ سپس کل قابلیت اطمینان یک سیستم خاص، به‌دست می‌آید [۶].

رویکرد اصلی در پژوهش‌های تخصیص قابلیت اطمینان حرکت به سمت حداقل نمودن هزینه است. این مسئله به ویژه برای سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و... مطرح است [۷]. هدف از این وظیفه پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم جهت برآورده‌سازی الزامات قابلیت اطمینان است. پیش‌بینی قابلیت اطمینان باید در همان مرحله اولیه طراحی آغاز شده و همزمان با پیشرفت روند طراحی یا تغییر داده‌ها به روز شود و نتایج آن به صورت بازخوردهای مدیریتی و نیز برای طراحان، به‌منظور بررسی امکان‌پذیر بودن تولید محصول و تدارکات پشتیبانی، بر اساس الزامات قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار گیرند [۸]. منظور از تخصیص قابلیت اطمینان حل نامعادله زیر است [۹].

$$f(\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots \hat{R}_n) \geq R^* \qquad (۲-۱)$$

به‌طوری‌که،

$\hat{R}_i$: پارامتر قابلیت اطمینان تخصیص یافته به i امین زیر سیستم.

$R^*$: پارامتر قابلیت اطمینان مطلوب سیستم.

به طور کلی فرایند تخصیص قابلیت اطمینان یک تقریب است و پارامترهای قابلیت اطمینان تخصیص یافته به هر زیرمجموعه باید به‌عنوان رهنمود[۲] در فرایند امکان‌سنجی طراحی مورد استفاده قرار گیرد. اگر پارامتر قابلیت اطمینان تخصیص‌یافته به یک زیرمجموعه خاص با استفاده از فناوری و امکانات موجود قابل دسترسی نباشد، سیستم طراحی شده باید اصلاح شده و مجددا فرایند تخصیص قابلیت اطمینان انجام گیرد. این سیکل تا زمانی که پارامترهای تخصیص‌یافته هم الزامات قابلیت اطمینان را برآورده کرده و هم با امکانات فنی موجود قابل دسترسی باشد، ادامه پیدا می‌کند [۹].

به طور کلی هدف از تخصیص قابلیت اطمینان این است که در پایان فاز طراحی مفهومی بدانیم؛ آیا با توانمندی‌های موجود در دست، امکان ساخت و نهایی شدن چنین محصولی با الزامات مورد نظر وجود دارد یا خیر؟ طی مرور پیشینه پژوهش، مطالعه‌ای یافت نشد که ارتباط تأمین‌کنندگان و مسئله تخصیص قابلیت اطمینان را مورد بررسی قرارداده باشد؛ لذا توجه به اهمیت تأمین‌کنندگان قطعات در مرحله طراحی مهندسی و ساخت، به دلیل نیاز به کیفیت قطعات مورد استفاده، امری ضروری است. در این پژوهش ارتباط بین مسئله تخصیص و تأمین‌کنندگان قطعات، در نظر گرفته شده است؛ که منجر به ارائه سنجه‌ای واقعی‌تر به‌منظور تخصیص قابلیت اطمینان می‌شود.

### ۲-۲-۱-روش FOO

روش‌های زیادی برای تخصیص قابلیت اطمینان در ادبیات معرفی شده است؛ که این روش‌ها، هر کدام نقاط قوت و ضعفی دارند؛ همچنین نقاط ضعف در اکثر روش‌های موجود، به نبود ارتباط هدفمند و مؤثر با طراحی سیستم‌های مهندسی بر

[2] Guidelines

می‌گردد [۵]. برای رفع این مشکل و عملیاتی کردن تخصیص قابلیت اطمینان و ارتباط مؤثر بین طراحی و تخصیص سیستم‌های پیچیده، از روش FOO به‌عنوان یک روش کارآمد در حوزه محصولات پیچیده به جهت مبنای روش پژوهش حاضر استفاده می‌شود؛ همچنین این روش برای تمام مهندسان طراح قابل فهم است که این امر باعث درک مشترکی از مبحث مهندسی قابلیت اطمینان بین همه مهندسان می‌شود و این خود باعث بهبود طراحی‌ها در مرحله بعدی می‌شود [۱]. با به‌کارگیری روش FOO، فاکتور تخصیص زیرسیستم به صورت تابعی از نرخ اسمی از سیستم‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود: پیچیدگی ،(I)[۳] حالت تکنولوژی جدید (S)[۴] ، زمان اجرا(P)[۵] و محیط(E)[۶]. هر کدام از نرخ ها مبتنی بر مقیاس ۱ تا ۱۰ و به وسیله طراحی مهندسی و توافق‌های تخصصی، تخمین زده می‌شود؛ سپس در هم ضرب می‌شوند. بنا بر این در محصول نهایی، نتیجه مقداری بین ۱ تا ۱۰۰۰۰ است. برای فاکتور I کمترین و بیشترین پیچیدگی سیستم به ترتیب می‌تواند ۱ و ۱۰ باشد. برای فاکتور S کمترین توسعه با مقدار ۱۰ و بیشترین توسعه با مقدار۱ نشان داده می‌شود؛ برای فاکتور P عامل اپراتور برای کل زمان مأموریت با مقدار ۱۰ و عامل اپراتور در کمترین طول زمان با مقدار ۱ و برای فاکتور E عوامل مورد انتظار جهت آزمون‌های خشن و محیط‌های خیلی سخت در طول عملیات‌اشان با مقدار ۱۰ و انتظار آن‌ها جهت رویارویی با کمترین سختی محیطی، با مقدار ۱ عددگذاری می‌شود. اگر یک سیستم از ترکیب N زیرسیستم باشد و $\lambda s$ نرخ شکست سیستم، Tطول عمر و $\lambda k$ نرخ شکست تخصیص برای k امین زیرسیستم، $c_k^{'}$ پیچیدگی k امین زیرسیستم و $w_k^{'}$ نرخ وزن برای k امین زیرسیستم باشد، تخصیص وزن به وسیله فرمول‌های زیر است [۶].

$$\lambda_s T = \overline{\lambda_k} T \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\overline{\lambda_k} = c_k^{'} \lambda_s \quad \forall k \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$W_k^{'} = I_k \times S_k \times P_k \times E_k \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$W^{'} = \sum_{k=1}^{N} W_k^{'} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$C_k^{'} = \frac{W_k^{'}}{W^{'}} \quad \text{(رابطه۵)}$$

$$R^*_k = (R^*)^c \quad \text{(رابطه۶)}$$

$$\mathbf{R^*=\Pi}(R^*_k) \quad \text{(رابطه۷)}$$

### ۳-۲-۱-سطح آمادگی فناورانه تأمین‌کنندگان

یکی از موضوعات اصلی و محوری در فرایند توسعه محصولات پیچیده، ارزیابی بلوغ فناوری‌های مورد استفاده در برنامه توسعه است. عموماً، یک فناوری هنگامی رشد یافته تلقی می‌شود که در یک نمونه مهندسی به کار گرفته شده باشد و در محیط عملیاتی یا شبه عملیاتی آزمایش و توانمندی خود را برای کاربرد مورد نظر، اثبات کرده باشد. این موضوع ایجاد معیاری برای اندازه‌گیری حد بلوغ یک فناوری را، ضروری می‌کند.

### ۱-۳-۲-۱-بلوغ فنی یک فناوری

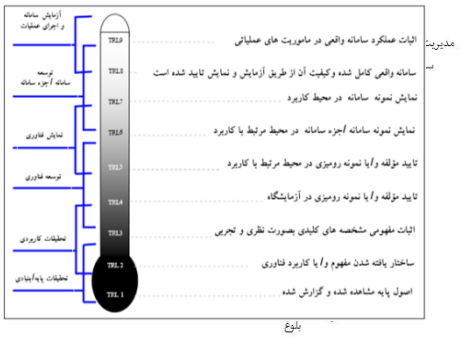
یک فناوری باید به یک نیاز پاسخ دهد. بلوغ فناوری عبارت است از: «استفاده موفقیت‌آمیز یک فناوری در یک محصول؛ یا فرایند و یا تبدیل شدن به یک سیستم یا محصول موفق». ارزیابی آمادگی فناوری (TRA)، یک ارزیابی بلوغ فناروی است؛ که طی توسعه فناوری‌های جدید، نظارت فنی بر پروژه‌های برون‌سپاری شده توسعه فناوری و تحویل‌گیری فنی آن‌ها انجام می‌گردد [۵] و [۱۰].

### سطح آمادگی فناوری (TRL)

ابزار سطوح آمادگی فناوری (TRL) برای اولین بار در دهه ۸۰ میلادی توسط سازمان ناسا[۷] مطرح شد. تعاریف اولیه شامل هفت سطح بود. در سال ۱۹۹۵میلادی منکینز[۸]، این سطوح را تا نه سطح افزایش داد. از آن سال به بعد سازمان ناسا از این ابزار در ارزیابی سطح آمادگی و بلوغ فناوری‌ها در برنامه‌های توسعه فناوری خود مطابق شکل ۲ استفاده نمود [۱۱].

[3] Intricacy
[4] State-Of-the-art
[5] Performance time
[6] Environment

[7] National Aeronautics and Space Administration
[8] Mankins



شکل۲: سطوح آمادگی فناوری ارائه شده توسط ناسا(فولادی؛۱۳۹۵).

در سال ۱۹۹۹میلادی سازمان حسابرسی کل آمریکا(GAO)[9]، بررسی گسترده‌ای در خصوص استفاده از این ابزار در طرح‌های تحقیقاتی دفاعی انجام داد و در نهایت به وزارت دفاع آمریکا[10](DoD) پیشنهاد کرد؛ تا از این ابزار در ارزیابی بلوغ فناوری‌های دفاعی، استفاده شود. در دهه ۲۰۰۰ میلادی مقیاس TRL در برنامه های فضایی در مناطق دیگر شامل اروپا و ژاپن؛ مورد استفاده قرارگرفت. درسال ۲۰۱۳ ایزو استاندار«تعریف سطوح آمادگی فناوری (TRL) در سیستم‌های فضایی و معیارهای ارزیابی آن‌ها» را منتشر کرد. این استاندارد توسط سازمان همکاری اروپا برای استانداردسازی[11](ECSS) در سال ۲۰۱۷ و درسطح بین المللی توسط اعضای کمیته بین‌المللی استانداردسازی[12](ISO) مطرح شد [۱۲]. در سال ۲۰۰۲ میلادی ویلیام نولت[13] در نیروی هوایی آمریکا نرم‌افزاری را تحت عنوان محاسبه‌گر سطوح آمادگی فناوری توسعه داد. سطوح آمادگی فناوری در وزارت دفاع انگلستان نیز برای اولین‌بار به‌عنوان ابزاری برای مدیریت ریسک فناوری به کار گرفته‌شد [۵].

باتوجه به تجربیات کشورهای دیگر در زمینه ارزیابی سطح بلوغ فناوری، ابزارTRL به ویژه در سازمان‌هایی که دارای محصولات سیستمی پیچیده هستند؛ از قبیل ناسا یا صنایع دفاعی کشورهایی مانند انگلستان و کانادا، مورد اقبال و استفاده گسترده، قرار گرفته است [۱۳].

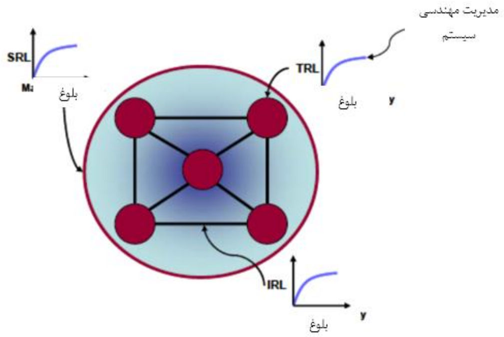
### ✓ سطح آمادگی ادغام(IRL)

پس از سال ۲۰۰۲میلادی مجموعه‌ای از نگرانی‌ها هنگامی که TRL از یک تکنولوژی منفرد فراتر می‌رود، نیازمند تعاملات پیچیده تکنولوژی‌ها است و شامل فعل و انفعالات متقابل بین فناوری‌های چندگانه باشد؛ به‌وجودآمد [۱۴]. معرفی مفهوم سطح آمادگی ادغام با این واقعیت قابل توجیه است که عدم موفقیت بسیاری از سیستم‌های فضایی به ادغام اجزاء آن مربوط می‌شود [۱۲]؛ همچنین با توجه به این‌که در یک محیط عملیاتی ملاحظات مربوط به مجتمع سازی، با هم کارکردن و پشتیبانی درباره فناوری‌های زیرمجموعه یک سیستم اهمیت زیادی دارد؛ نگاه تک بعدی فناوری (بدون در نظر گرفتن جایگاه آن در یک سیستم پیچیده)، قابل توجیه نیست. بر همین اساس، مفهوم سطوح آمادگی ادغام و سطح آمادگی سیستم مطرح شد [۱۴]. به‌منظور اندازه‌گیری سطح آمادگی ادغام، نیازمند شاخصی هستیم که نه‌تنها خصوصیات کلی ادغام مانند رابط‌ها؛ بلکه سازگاری قابلیت اطمینان و کیفیت عملکرد را در هنگام ادغام چند قطعه در نظر بگیرد [۱۵]. در سال ۲۰۱۳ یاسری در مقاله خود، تعریف مؤسسه نفت آمریکا[14](API) از IRL را در هشت سطح ارائه نمود [۱۶].

### ✓ سطح آمادگی سیستم

دو مقیاس TRL و SRL، درک ما را از سطح بلوغ فناوری سیستم افزایش می‌دهند؛ اما نیازمند مقیاسی هستیم که بتوانیم با ترکیب دو معیار گفته شده، سطح آمادگی سیستم را بسنجیم. شاخص SRL به‌عنوان تابعی از TRLهای فردی در یک سیستم و نقاط ادغام بعدی آن‌ها با سایر فناوری‌ها، طراحی شده است. این شاخص توسط DOD به وسیله پنج سطح معرفی شده‌اند [۱۷]. یاسری در مقاله خود، مقیاس هشت سطحی ارائه شده توسط API را ارائه داد [۱۶]. در شکل (۳) ارتباط بین سه مفهوم یاد شده؛ نمایش داده شده است.

[9] Government Acoountability Office
[10] Department of Defense
[11] European Cooperation for Space Standardization
[12] International Organization for Standardization
[13] William L. Nolte
[14] American Petroleum Institute



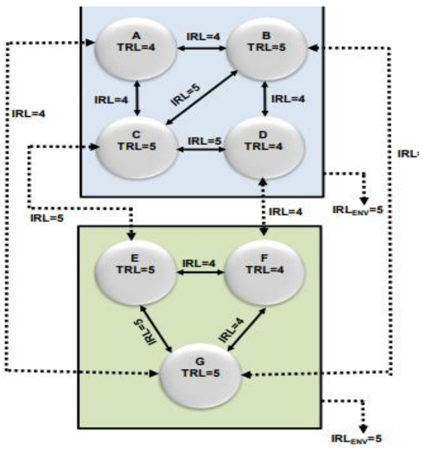

**شکل۳**: ارتباط بین TRL، IRL و SRL، [۱۴].

## ۱-۲-۳-۳- ماتریس ساختار طراحی(DSM)

ماتریس‌ساختارطراحی یک مدل تبادل اطلاعات است که تعاملات و فعل و انفعالات بین عناصر یک سیستم تجزیه شده یا محصول را نمایش می‌دهد. هدف از DSM نمایش ساختار معماری یا طراحی یک سیستم است. در این پژوهش از DSM به‌عنوان ابزاری برای تعیین روابط بین ماژول‌های سیستم، استفاده می‌شود.

## ۴-۳-۲-۱-تخصیص TRL و IRL

این مرحله پس از رسم ماتریس ساختار طراحی و خوشه‌بندی اجزاء و ماژول‌ها توسط کارشناسان صورت می‌گیرد. شکل (۴)




**شکل۴:** مثالی از یک نمودار بلوکی متشکل از دو ماژول و هفت مولفه.

بلوک دیاگرام یک سیستم ساده متشکل از هفت مؤلفه را که در یک فاز بهبود از توسعه به دو ماژول گروه‌بندی شده‌اند را نشان می‌دهد. برای نمودار بلوک دیاگرام شکل (۴) یک ماتریس DSM ترسیم می‌شود (جدول۱).

TRL هر مؤلفه در یک ستون در سمت چپ اجزاء نشان داده شده است و اعداد داخل ماتریس و اطراف قطر اصلی IRL ارتباط اجزاء با یکدیگر است [۱۸].

## ۵-۳-۲-۱-تخمین SRL

پس از انجام گام‌های بالا، با بهره‌گیری از معادلات مربوط به روش میانگین خطا که روش مورد استفاده این پژوهش است، به برآورد SRL پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که حروف بیانگر قطعات می‌باشد و ماژول‌ها با دو رنگ مختلف نشان داده شده‌اند؛ همچنین اعداد در جدول بیانگر سطح آمادگی ادغام بین قطعات، می‌باشد. لازم به ذکر است که در ستون آخر جدول (۱) سطح آمادگی ادغام بین هر ماژول با محیط پیرامون نمایش داده شده است.

| | 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 | | | | | | | | | | |

جدول ۱: DSM مربوط به سیستم نشان داده شده در شکل (۴)، به همراه TRL و سطح آمادگی ادغام(IRL) هر کدام از اجزاء با یکدیگر.

## ۱-۲-۳-۶- سنجش توانمندی فناورانه در سطح سازمانی

روش سطوح آمادگی فناوری صرفاً فرایند خلق یک فناوری خاص را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ تا وضعیت فناورانه یک سازمان. به همین دلیل می‌بایست روش‌هایی به‌منظور سنجش وضعیت فناورانه در سطح سازمان، مورد بررسی قرار گیرند. در این پژوهش از الگوی شریف به این منظور استفاده شده است.

براین‌اساس، الگوی چهار وجهی از فناوری ارائه می‌شود. مطابق این الگو، فناوری با جمع‌آمدن فن‌افزار، انسان‌افزار، اطلاعات‌افزار و سازمان‌افزار به سامان می‌رسد.

## ۳- پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش در این تحقیق در دو بخش تخصیص قابلیت اطمینان و سطح آمادگی فناوری، ارائه شده است.

### ۳-۱-پیشینه پژوهش تخصیص قابلیت اطمینان

شهائقی و همکاران در پژوهشی با عنوان"طراحی الگویی برای تخمین قابلیت اطمینان ماهواره بر به روش شبکه‌های بیزین" الگویی برای تخمین قابلیت اطمینان سازه ماهواره‌بر، به روش شبکه‌های بیزین ارائه دادند. آن‌ها ابتدا درخت خطای مربوط به شکست سازه یک ماهواره بر سوخت مایع را طراحی و سپس به شبکه بیزین تبدیل نمودند. در نهایت با استفاده از نظرات خبرگان سیستم و تخمین پارامترهای شرطی مدل، با استفاده از زنجیره مارکوف-مونت کارلو، قابلیت اطمینان کارکرد صحیح سازه‌ای یک ماهواره بر را تخمین زدند. در این روش با داشتن درخت خطای یک سیستم به راحتی می‌توان شبکه بیزین معادل را طراحی و سپس قابلیت اطمینان سیستم را به‌سادگی پیش‌بینی نمود [۱۹].

میرشمس و همکاران در تحقیقی با عنوان"تخصیص قابلیت اطمینان زیرسامانه‌های ماهواره‌بر با تحلیل سلسله مراتبی درفاز طراحی مفهومی،"متدولوژی جدیدی را برای تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم‌های ماهواره بر، ارائه دادند. در این روش، چهار فاکتور پیچیدگی، تکنولوژی، زمان عملیات و هزینه در نظر گرفته‌شده‌است. مزیت استفاده از این روش تخصیص قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماهواره‌بر در فاز طراحی مفهومی، ضمن در نظر گرفتن سازگاری زیرسیستم‌ها است [۲].

متاس[15] در مقاله‌ای با عنوان"تخصیص قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی آن در سیستم‌های پیچیده"، مدلی را به منظور تخصیص قابلیت اطمینان ارائه می‌دهد. این مدل شامل دو بخش است. بخش اول یک فرمول بندی برنامه‌ریزی غیرخطی برای مسئله تخصیص است؛ بخش دوم یک فرمول تابع هزینه است که در الگوریتم برنامه‌ریزی غیر خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک رفتار کلی از هزینه به‌عنوان تابعی از قابلیت اطمینان جزء فرض شده است؛ سپس هزینه سیستم با حل کردن یک قابلیت اطمینان جزء بهینه، کمینه می‌شود. پس از تخصیص قابلیت اطمینان برای هر جزء می‌توان تصمیم گرفت که آیا این قابلیت اطمینان را با خطای کم می‌توان به‌دست آورد یا خیر. این مدل بسیار انعطاف‌پذیر بوده و در نهایت مدل ارائه‌شده توسط یک برنامه رایانه‌ای توسعه داده شده است [۲۰].

پنگ و همکاران[16] در پژوهشی با عنوان"یک روش تخصیص قابلیت اطمینان با رویکرد AHP برای سیستم‌های پیچیده"، یک روش تخصیص قابلیت اطمینان را با استفاده از AHP، ارائه می‌دهد و اندیشه‌های اصلی و رویه‌های این روش را شرح داده است؛ سپس در یک مثال کاربردی آن را به‌کار برده است [۲۱].

فابیو و همکاران[17] (۲۰۱۰) در مقاله‌ای با عنوان"پیشنهاد یک روش جدید تخصیص قابلیت اطمینان: روش یکپارچه عوامل" رویه‌ها و تکنیک‌های اصلی تخصیص قابلیت اطمینان را مورد بررسی قرار داده‌اند و با استفاده از روش‌های شناخته‌شده روش جدیدی با رویکرد یکپارچه‌سازی عوامل مؤثر که تعیین‌کننده محدودیت‌های زیرسیستم‌ها برای تخصیص قابلیت اطمینان است؛ را ارائه می‌دهند. این یک روش پیشنهادی منطقی برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های پیچیده در طول مرحله پیش طراحی می‌باشد [۲۲].

کی یونگ می اُ کیما و همکاران[18] در پژوهشی با عنوان"وزن تخصیص قابلیت اطمینان جدید برای کاهش وقوع اثرات شکست شدید"، روشی جدید را برای تخصیص قابلیت اطمینان در سیستم بحرانی، با درنظرگرفتن تأثیر شکست ارائه دادند [۲۳].

پراکاش و ژانگ[19] در تحقیقی با عنوان"یک روش تخصیص قابلیت اطمینان عملی با توجه به عوامل انتقادی اصلاح‌شده" روشی به منظور بهره‌گیری مؤثر از پتانسیل بهبود و تأثیر تلاش‌های بهبود بر اثرات خرابی وزن‌های تخصیصی را با رویکرد جدیدی محاسبه می‌نمایند و محدودیت‌های رویکردهای موجود را مورد بررسی قرار می‌دهند و یک معیار اصلاح شده برای محاسبه وزن‌های تخصیصی ارائه می‌دهند. در نهایت

[15] Mettas

[16] PENG et.al
[17] Fabio et.al
[18] Kyungmee O. Kima et.al
[19] Prakash& Zhuang

اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی با استفاده از یک مطالعه موردی انجام شده است [۴].

## ۲-۳-۱-پیشینه پژوهش سطح آمادگی فناوری

نقی‌زاده در پژوهشی تحت عنوان"مدل ارتقای فناورانه در بخش ناوبری الکترونیک ایران"، ضمن بیان اهمیت صنعت هوایی، بخش ناوبری الکترونیک را در جایگاه ویژه این صنعت قرار می‌دهد. در این تحقیق روشی ترکیبی تبیینی، استفاده شده است؛ تا الگویی جامع جهت ارتقای توانمندی فناوری در بنگاه‌های بخش ناوبری الکترونیک به‌عنوان یکی از حوزه‌های فناوری‌های برتر و پیچیده در ایران ارائه شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ارتقای توانمندی فناورانه، وابسته به ارتقای قابلیت‌های درهم‌تنیده‌ای تحت عنوان توانمندی‌های پویا است [۲۴].

فرقانی و یاورزاده در پژوهشی تحت عنوان"روش تخمین زمانی پروژه‌های فضایی تا فاز طراحی با تأکید بر سطوح آمادگی تکنولوژی(TRL)"، از نظر تئوری و عملی به بررسی ریسک زمان‌بندی پروژه‌های با تکنولوژی بالا و اتخاذ روش‌های کاهش آن‌ها با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار بر زمان انجام پروژه‌ها پرداخته است. در این تحقیق مدلی احتمالی جهت تخمین زمان طراحی یک سیستم فضایی ارائه شده است که شامل زمان تخمین انجام پروژه کلیه زیرسیستم‌های یک ماهواره تا فاز طراحی و تحقیقاتی با توجه به سطح آمادگی تکنولوژی در سطح کشور، می‌باشد. نتایج نشان داده است که ریسک زمان‌بندی پروژه‌ها به شدت تحت تأثیر کاهش سطح آمادگی تکنولوژی و افزایش محموله‌های فضایی می‌باشد [۲۵].

جعفری خانشیر و همکاران در پژوهشی با عنوان"شناسایی سطوح آمادگی فناوری (TRL) بر اساس مستندات فنی"، به ارائه چارچوب و معیاری برای شناسایی و اثبات سطح آمادگی فناوری برون‌سپاری شده می‌پردازد. در این تحقیق از تجربیات متخصصان دفتر طراحی مرتبط با طراحی و توسعه سیستم‌های پیچیده و همچنین تعاریف موجود در زمینه سطح بلوغ فناوری و همچنین دیدگاه مهندسی سیستم، استفاده شده است [۱۳].

محمد جواد ارشادی در پژوهشی تحت عنوان "بهبود فرایندهای ارزیابی سطوح آمادگی فناوری (TRL) در پروژه‌های فناورانه: یک مطالعه موردی"، در قالب یک مطالعه موردی به شناسایی چالش‌های فرایندهای مربوط به ارزیابی TRLدر پروژه‌های فناوری پرداخته است. در این پژوهش، بر پایه متدولوژی‌های شناخته شده بهبود فرایندی، چالش‌ها و مشکلات این فرایندها شناسایی شده و راهکارهای بهبود این فرایندها ارائه شده است. توسعه راهکارهای مدیریت ریسک پروژه در زمان تعیین محدوده پروژه‌های فناوری، هوشمندسازی اجرای این فرایندها و به ویژه استفاده از تکنیک‌های BPMS از مهم‌ترین راهکارهای پیشنهادی در جهت توسعه فرایندهای ارزیابی سطح TRL شناخته شد [۲۶].

سوزر ومارکز[20] در تحقیقی با عنوان"مفهوم سطح آمادگی سیستم"، ابزار TRL برای ارزیابی سطح فناوری را کارا ندانست و دو مفهوم سطح آمادگی ادغام (IRL) و سطح آمادگی سیستم (STL) را معرفی نمود و آن‌ها را برای ارزیابی سطح فناوری ضروری دانست [۱۴].

سوزر و همکاران[21] در تحقیقی با عنوان"اندازه‌گیری بلوغ ادغام: توسعه سطح آمادگی ادغام"، برای بهینه‌سازی فرایند یکپارچه‌سازی سیستم‌های پیچیده، یک چارچوب برای اندازه‌گیری آن ارائه داده‌اند [۲۷].

فلپ و فرنچ[22] در پژوهشی با عنوان "شفاف‌سازی بلوغ سیستم، آمادگی سیستم و آمادگی توانایی از طریق یک مطالعه موردی"، مفاهیم کلیدی بلوغ سیستم، آمادگی سیستم و آمادگی توانایی و تعاریف آن‌ها را اصلاح نموده‌اند. نویسندگان با تجزیه و تحلیل سه پروژه دفاعی پرفروش به‌عنوان مطالعات موردی به این مهم دست‌یافته‌اند [۲۸].

رایو و بایئون[23] در پژوهشی تحت عنوان"روش ارزیابی سطح تکنولوژی با استفاده از منحنی رشد آن"، با استفاده از روش دلفی و همچنین کاربرد مدل گوردون و مانسون، به سنجش سطح فناوری در کشور کره‌جنوبی و مقایسه آن با کشورهای برتر پرداخته‌اند. آن‌ها نشان می‌دهند؛ که وضعیت کره‌جنوبی در منحنی رشد فناوری در کجا قرار دارد و همچنین فاصله زمانی و فناورانه آن با کشورهای برتری (از لحاظ فناوری)؛ چون ژاپن و آمریکا در چه حد است [۲۹].

[20] Sauser & Marquez
[21] Sauser et.al
[22] FIAP & FREng
[23] Ryu and Byeon

زنلی[۲۴] در مقاله خود با عنوان" تکنولوژی بالا و موانع نوآوری: از جهانی شدن به سمت بومی‌سازی"، به منظور سنجش سطح فناوری در سطح سازمانی، فناوری را به ابعاد تشکیل‌دهنده آن تقسیم نمود؛ به این ترتیب، به‌جای این‌که کل مفهوم فناوری مورد سنجش واقع شود، ابعاد آن سنجیده می‌شود و سپس یک ارزیابی کلی به‌عنوان وضعیت فناوری در یک سازمان به‌عمل می‌آید. او در مقاله خود اجزای فناوری را به چهار بخش سخت‌افزار، نرم‌افزار، مغزافزار و شبکه پشتیبانی از فناوری تقسیم‌بندی نمود [۳۰].

طلوعی و متین[۲۵] در مقاله‌ای با عنوان"سنجش سطح فناوری و توانایی صنایع در آذربایجان شرقی و ارائه راهکارهای مناسب برای بهبود و ارتقاء فناوری"، برپایه مدل رایو و بایئون و البته با استفاده از روش AHP، به سنجش سطح فناوری برای صنایع نفت، تولید و معدن در سطح استان آذربایجان شرقی پرداخته‌اند. آن‌ها با محاسبه امتیازات هر یک از ابعاد فناوری، در نهایت به تفسیر یافته‌ها و ارائه پیشنهاداتی در رابطه با سیاست‌گذاری استراتژیک در مورد صنایع استان، پرداختند [۳۱].

یاسری[۲۶] در پژوهشی با عنوان" ارزیابی سطح آمادگی سیستم"، ضمن تأکید بر استفاده از روشTRL در ارزیابی سطح فناوری، یک رویکرد مبتنی بر سیستم برای مدیریت توسعه سیستم‌های زیرساختی پیشنهاد می‌دهد. وی پیشنهاد ترکیب مقیاس TRL و IRL را می‌دهد. همچنین روشی برای سنجش سطح SRL ارائه و در نهایت آن را با یک مطالعه موردی نشان می‌دهد [۱۶].

آستین و یورک[۲۷] در تحقیقی با عنوان" ارزیابی آمادگی سیستم (SRA)، برای یک مثال قابل تصور"، نمونه‌ای گویا از فرایند آمادگی سیستم‌ها را ارائه می‌دهد. پیاده‌سازی فرایند SRA می‌تواند به بهبود مدیریت عملکرد برای سیستم‌ها و تصمیم‌گیرندگان در شناسایی حوزه‌های برنامه‌ریزی فنی کمک کند. معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در اجرای یک ارزیابی توضیح داده می‌شوند و محاسبات نمونه ارائه می‌شود. مجموعه‌ای از دستورالعمل‌ها نیز برای پیاده‌سازی مؤثر و استفاده از فرایند SRA ارائه می‌شوند. هدف این مقاله آن است که خواننده درکی اساسی از نحوه انجام یک SRA پیدا کند [۳۲].

نگز و همکاران[۲۸] در تحقیقی با عنوان"کاربرد روش‌های سطوح آمادگی سیستم‌ها در کاربردهای پیشرفته انرژی فسیلی"، ضمن یادآوری اهمیت سطوح آمادگی فناوری در بخش انرژی فسیلی، به چالش‌های این بخش، می‌پردازد و این بخش را نیازمند ادغام چندین فناوری نوظهور معرفی می‌نماید. این پژوهش، برای تخمین سطح آمادگی یک سیستم متشکل از تکنولوژی‌های نوظهور چندگانه، روشSRL را پیشنهاد می‌دهد. سپس یک روش جبر ماتریسی برای تخمین سطح کلی آمادگی سیستم‌ها برای سیستم مورد مطالعه را پیشنهاد می‌دهد [۳۳].

انیماه و شفیعی[۲۹] در پژوهشی با عنوان "چارچوب ارزیابی سطح آمادگی فناوری (TRL) و راهنمای تجاری آمادگی (CRI) در پایان عمر دارایی"، یک چارچوب سیستماتیک متشکل از شش فرایند مختلف برای کمک به مدیران به منظور ارزیابی TRL ارائه می‌دهد. در این پژوهش از یک توربین بادی به منظور نمایش مدل، استفاده شده است و در نهایت به‌این نتیجه رسیده است که ارزیابی با استفاده از TRL به‌عنوان وسیله‌ای برای تصمیم‌گیری مدیریت ریسک محسوب می‌شود [۳۴]

یاسری و بهائی[۳۰] در پژوهشی تحت عنوان"تخمین سطح آمادگی سیستم برای تولیدات گاز و نفت"، به سیرتکامل سطوح آمادگی می‌پردازد و روشی را برای سنجش سطح آمادگی سیستم متشکل از سطح آمادگی فناوری و سطح آمادگی ادغام و با استفاده از روابط ریاضی و ماتریس ساختار طراحی (DSM) معرفی می‌نماید [۱۸].

سوزر و فربز[۳۱] در پژوهشی با عنوان"تعیین سطح آمادگی ادغام برای خرید دفاعی"، به ارائه سطح آمادگی ادغام پرداختند و آن‌را به منظور توسعه روشTRL، ضروری دانستند آن‌ها IRL را ابزاری معرفی کردند که چارچوب آمادگی فناوری پیشرفته وزارت دفاع را تکمیل می‌کند. این مقاله با هدف ارائه یک ارزیابی معتبر و پشتیبانی از معیارهای اصلی بلوغ، این‌کار را گسترش می‌دهد و یک راهنما برای کاربرد اصول IRL، در صنایع دفاع ارائه می‌دهد [۳۵].

[24] Zeleny
[25] Toloui & Matin
[26] Yasseri
[27] Austin & York
[28] Knaggs,et,al
[29] Animah & Shafiee
[30] Yasseri & Bahai
[31] Sauser & Ferbes

## ۲-روش تحقیق

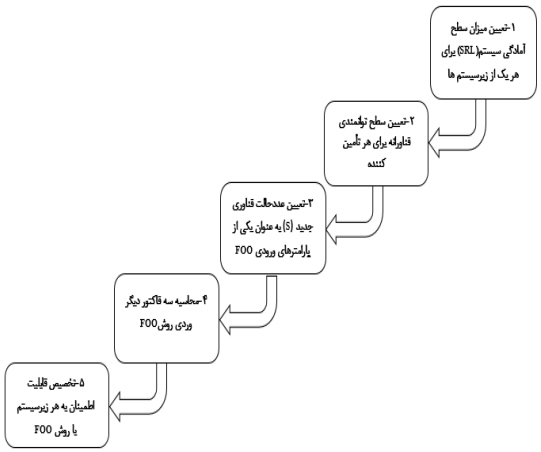
### ۲-۱-جامعه آماری

جامعه آماری پژوهش،کلیه افراد متخصص در موضوع مورد مطالعه می‌باشد. در این پژوهش به منظور جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز، از نظرات جامعه نمونه استفاده شده است که شامل: دوزاده تن از کارشناسان ارشد شرکت‌کننده در گروه ماهواره مکعبی در حوزه‌های هوافضا، برق، مکانیک وکامپیوتر که مسئولیت طراحی و تولید محصول مذکور را برعهده داشتند؛ می‌باشد. همچنین به منظور اعتبارسنجی داده‌ها از نظرات دو تن از خبرگان صنعت فضایی مستقر در سازمان فضایی ایران و نیز ۱۰ تن از اساتید خبره مرتبط با صنعت مورد بررسی، بهره گرفته شد.

## مراحل پژوهش

### ۲-۲-روش پژوهش

مراحل انجام پژوهش حاضر مطابق شکل ۵ است. مطابق شکل، پنج گام پیموده می‌شود که توضیحات هر گام، در ادامه آورده شده است.




شکل۵: مراحل انجام پژوهش

**۲-۲-۱-گاوم اول:**تعیین سطح آمادگی سیستم (SRL) برای هر یک زیرسیستم‌ها

این گام شامل سه مرحله تعیین میزان سطح آمادگی فناوری(TRL) برای هر یک از قطعات، طراحی و تشکیل ماتریس ساختار طراحی(DSM) به منظور تعین سطح آمادگی ادغام(IRL) و تعیین عدد سطح آمادگی سیستم(SRL) برای هر زیرسیستم، می‌باشد. به منظور تعیین میزان سطح آمادگی فناوری برای هر یک از زیرسیستم‌ها ابتدا با مرور ادبیات انجام شده و استخراج معیارهای مورد نیاز برای احراز هر سطح، پرسشنامه‌ای هفت سطحی مطابق با مقیاس API طراحی شد و از افراد و خبرگان خواسته شد، به پرسشنامه پاسخ دهند؛ در پایان عدد صحیحی بین صفر و هفت به‌عنوان سطح آمادگی فناوری برای هر یک از قطعات، اختصاص یافت. در مرحله دوم به منظور تعیین سطح آمادگی ادغام، یک ماتریس مربعی با عنوان ماتریس ساختار طراحی، تهیه شد که قطعات در سطر و ستون ماتریس قراردارند. از طریق این ماتریس، میزان تعاملات و یکپارچگی اجزاء با یکدیگر در محیط عملیاتی بر اساس نظرات افراد و خبرگان توسط پرسشنامه طراحی شده بر حسب مقیاس API متشکل از هفت سطح برآورد می‌شود در نهایت میزان تعامل هر زیرسیستم با محیط عملیاتی نیز مشخص، گردیده‌است. میانگین اعداد حاصل از سطر مربوط به هر قطعه، بیانگر سطح آمادگی ادغام قطعه مورد نظر است.

درمرحله سوم به منظور تعیین سطح آمادگی سیستم با استفاده از گام‌های توضیح داده شده، اقدام به محاسبه سطح آمادگی سیستم برای هر زیرسیستم شده است. تعیین میزان سطح آمادگی سیستم برای هر زیرسیستم، نیازمند دو عدد (TRL) و (IRL) می‌باشد. در نهایت با استفاده از رابطه ۳ [۱۶]، میزان سطح آمادگی سیستم برای هر زیرسیستم به دست آمده است.

$$SRL = \sqrt{\left(\frac{(\text{AVERAGE(SQRT)})^2 \times \text{ENV}}{7}\right)} \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

به‌عنوان نمونه محاسبات مربوط به تعیین سطح آمادگی سیستم مربوط به زیرسیستم کنترل حرارت، در زیر آورده شده است. زیرسیستم کنترل حرارت متشکل از دو قطعه کلی سنسور و هیتر است.

| قطعه | TRL | ENV | AVERAGE IRL | AVERAGE IRL.TRL | SQRT | AVERAGE SQRT | SRL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سنسورها | ۷ | ۵ | ۳/۹۷۲۹۷۳ | ۲۷/۸۱۰۷۹ | ۵/۲۷۳۵۹۵ | ۵/۲۵۵۵۹۵ | ۴/۴۴۱۷۹۳ |
| هیترها | ۷ | | ۳/۹۱۸۹۱۹ | ۲۷/۴۳۲۴۴ | ۵/۲۳۷۸۹۵ | | |

جدول۲: تعیین SRL برای زیرسیستم کنترل حرارت.

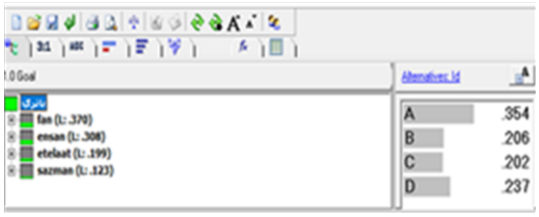
میزان SRL بدست آمده برای سایر زیرسیستم‌ها در جدول۳ آورده شده است.

| زیرسیستم | SRL | زیرسیستم | SRL | زیرسیستم | SRL |
|---|---|---|---|---|---|
| توان | ۳/۸۲۴۹۹۳ | سازه | ۴/۵۴۰۳۷۲ | داده و فرامین ترافیک هوایی | ۴/۸۸۳۸۷۷ |
| مخابرات | ۴/۹۶۰۵۴۸ | داده و فرامین گامالینک | ۴/۸۵۳۸۱۶ | داده و فرامین تعین وضعیت | ۵/۰۳۹۶۰۹ |
| تعیین وضعیت | ۵/۲۰۸۷۴۷ | داده و فرامین تصویربرداری | ۴/۶۸۷۷۹۸ | گامالینک | ۴/۶۱۵۴۳ |
| تصویربرداری | ۴/۹۹۰۳۳ | داده و فرامین مخابرات | ۵/۲۶۰۶۸۶ | ترافیک هوایی | ۵/۰۳۰۳۶ |

جدول۳: SRL بدست آمده برای زیرسیستم‌ها

**۲-۲-۲-گام دوم:** تعیین سطح توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان برای کلیه زیرسیستم‌ها.

به این منظور مراحل زیر در این فاز پیموده‌شده‌است.
ابتدا با مطالعه ادبیات تحقیق، معیارها و زیرمعیارهای مورد نیاز جهت ارزیابی توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان استخراج گردید. بدین منظور، از معیارهای ارائه‌شده توسط الگوی شریف، استفاده‌شد؛ همچنین ۴۴ زیرمعیار مشخص شدند [۲۴]. چهار تأمین‌کننده نیز به‌عنوان گزینه‌ها شناسایی شدند؛ سپس وزن هر یک از معیارها و زیرمعیارها مشخص شد. به این منظور از جامعه نمونه پژوهش، خواسته شد؛ ماتریس مقایسات زوجی معیارها و زیرمعیارها را برحسب طیف ساعتی، تکمیل نمایند. ماتریس تکمیل شده توسط نرم‌افزار Expert Choice تجزیه و تحلیل و در نهایت وزن هر یک از معیارها و زیرمعیارها مشخص شد.
در مرحله آخر مربوط به این گام، برای تمام قطعات عملیاتی تشکیل‌دهنده ماهواره مکعبی، پس از مصاحبه با مهندسان ارشد و تکمیل پرسشنامه طراحی شده؛ ماتریس مقایسات زوجی برای تمام زیرمعیارها و برای هرچهار تأمین‌کننده تشکیل‌شده‌است و میزان توانمندی فناورانه هر تأمین‌کننده توسط نرم‌افزار Expert Choice به دست‌آورده شده است. از آن‌جایی که یکی از اهداف تخصیص قابلیت اطمینان مورد نظر این پژوهش، محاسبه تخصیص قابلیت اطمینان با کمترین و بیشترین این توانمندی است؛ برای هر قطعه این اعداد استخراج شده‌اند و برای محاسبه حالت فناوری جدید(S) به‌کارگرفته‌شده‌است.
به‌عنوان نمونه، خروجی نرم‌افزار Expert Choice برای قطعه باتری در شکل۶ آورده‌شده‌است. در شکل، وزن معیارها و همچنین عدد قابلیت اطمینان هر چهار تأمین‌کننده برای قطعه باتری، مشخص شده است.




شکل۶: خروجی نرم فزار Expert Choice به منظور تعیین سطح فناورانه تأمین‌کنندگان.

به منظور محاسبه توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان در هر دو حالت بیشترین و کمترین، میانگین اعداد حاصله محاسبه شده و برای هر زیرسیستم لحاظ گردیده است .**خروجی این گام، بیشترین و کمترین عدد توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان برای هر یک از قطعات است.**

**۲-۲-۳-گام سوم پژوهش:** تعیین عدد حالت فناوری جدید (S) به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی FOO.

ابتدا حاصل ضرب سطح آمادگی سیستم (SRL) حاصل آمده برای تمام زیرسیستم‌ها در فاز اول و توانمندی فناورانه به دست آورده شده حاصل از فاز دوم، در هر دو حالت بیشترین و کمترین، محاسبه شده است. از آن‌جایی که ماکزیمم حاصل‌ضرب SRL و توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان می‌تواند عدد ۷ باشد و از آنجایی که در بحث تخصیص قابلیت اطمینان با روش FOO بهترین حالت فناورانه جدید می‌بایست منجر به بیشترین قابلیت اطمینان تخصیصی شود و نیز به دلیل خاصیت نمایی بودن رابطه ۶، نیاز به کم نمودن عدد حاصل شده از ۷ بوده است. خروجی این مرحله تعیین ضریب فاکتور فناوری در دو حالت بیشترین و کمترین می‌باشد که در جدول ۶ آورده شده است.
برای نمونه محاسبات مربوط به تعیین ضریب سطح آمادگی فناورانه تأمین‌کنندگان در حالت بیشترین توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان برای زیرسیستم کنترل حرارت در جدول۴ آورده شده است.

| قطعه | ماکزیمم توانمندی فناورانه تأمین کننده | ماکزیمم توانمندی فناورانه تأمین کننده زیرسیستم | SRLماکزیمم توانمندی فناورانه تأمین کننده زیرسیستم | ماکزیمم توانمندی فناورانه تأمین کننده -۷ | ضریب |
|---|---|---|---|---|---|
| منسورها | ۰/۲۱۹ | ۰/۳۰۲ | ۱/۲۴۱۴۲۱۴۸۶ | ۵/۶۵۸۵۷۸۵۱۴ | ۰/۰۸۰۴۷۷ |
| هیترها | ۰/۲۸۵ | | | | |

جدول۴: تعیین ضریب فناوری در حالت ماکزیمم زیرسیستم کنترل حرارت.

### ۴-۲-۲-گام چهارم پژوهش

تعیین سه فاکتور دیگر ورودی مورد نیاز روش FOO .

#### تعیین میزان ضریب پیچیدگی (I) مربوط به هر زیرسیستم.

به‌منظور محاسبه این فاکتور، از دو معیار میزان درگیری زیرسیستم‌ها با یکدیگر ($I_s$) و تعداد بلوک‌ها ($N_b$) استفاده‌شده است. میزان درگیری زیرسیستم‌ها در حالت عملیاتی توسط مهندسان ارشد و مسئول سیستم و خبرگان صنعت مربوطه، تعیین شده است. همچنین میزان بلوک‌ها بیانگر تعداد قطعات عملیاتی زیرسیستم‌ها می‌باشد. در نهایت با استفاده از حاصل‌ضرب ضریب تعداد بلوک‌ها ($N_b$) و میزان درگیری زیرسیستم‌ها، ($I_s$)، ضریب پیچیدگی (I) به‌دست آورده شده‌اند. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

#### تعیین میزان ضریب زمان عملکرد(p) و شرایط محیطی(E) مربوط به هر زیرسیستم

در این مرحله به توضیح نحوه محاسبه ضریب زمان عملکرد(P) و ضریب شرایط محیطی مربوط به تمام زیرسیستم‌ها به‌عنوان فاکتورهای سوم و چهارم مورد نیاز روشFOO پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا زمان عملکرد مورد نیاز در طول مأموریت ماهواره برای تمام قطعات توسط مهندسان ارشد و مسئول سیستم برآورد شده‌است. قطعه با کمترین طول عمر عملیاتی با عدد ۱ و قطعه با بیشترین طول عمر عملیاتی با عدد ۱۰نشان داده شده‌است.

پس از آن برای هر زیرسیستم بیشترین عدد طول عمر عملیاتی قطعات به منظور تخصیص قابلیت اطمینان انتخاب شده‌است. در گام بعد، ضریب شرایط محیطی توسط مهندسان ارشد و مسئول سیستم بر حسب مقیاس ۱تا ۱۰ برآورد شده‌است؛ به این صورت که قطعه با بیشترین درجه سختی محیطی با عدد ۱۰ و قطعه با کمترین میزان درجه سختی محیطی با عدد ۱ نشان داده شده‌است.

در نهایت میانگین شرایط سختی محیطی قطعات برای زیرسیستم‌ها تعیین شده و ضریب شرایط محیطی برای کلیه زیرسیستم‌ها محاسبه‌شده‌است. زمان عملکرد و شرایط محیطی برای زیرسامانه توان در جدول۵ آورده شده است. ستون‌های سوم و چهارم جدول۷ بیانگر محاسبات مربوط به این مرحله می‌باشد.

| زیرسیستم i | تعداد بلوکها | ضریب تعداد بلوکها $N_b$ | میزان درگیری $I_s$ | $I_s.N_b$ | ضریب پیچیدگی(I) |
|---|---|---|---|---|---|
| توان | ۱۶ | ۰۱۵۸۴۱۶ | ۶٫۸۳۳۳۳ | ۱٫۰۸۲۵۰۹ | ۰۱۳۷۴۵۴ |
| کنترل حرارت | ۷ | ۰۰۶۹۳۰۷ | ۵٫۹۱۶۶۶ | ۰۴۱۰۰۶۶ | ۰۰۵۲۰۶۹ |
| تعیین و کنترل وضعیت | ۱۳ | ۰۱۲۸۷۱۳ | ۸٫۵۸۳۳۳ | ۱٫۱۰۴۷۸۶ | ۰۱۴۰۲۸۳ |
| مخابرات | ۱۴ | ۰۱۳۸۶۱۴ | ۷٫۵ | ۱٫۰۳۹۶۰۵ | ۰۱۳۲۰۰۶ |
| تصویربرداری | ۴ | ۰۰۳۹۶۰۴ | ۶٫۱۶۶۶۶ | ۰۲۴۴۲۲۴ | ۰۰۳۱۰۱۱ |
| سازه و مکانیزم | ۴ | ۰۰۳۹۶۰۴ | ۷٫۱۶۶۶۷ | ۰۲۸۳۸۲۹ | ۰۰۳۶۰۴ |
| داده و قرامین برای محموله گامالینک | ۴ | ۰۰۳۹۶۰۴ | ۵٫۵ | ۰۲۱۷۸۲۲ | ۰۰۲۷۶۵۸ |
| داده و قرامین تصویربرداری | ۴ | ۰۰۳۹۶۰۴ | ۶٫۳۳۳۳۳ | ۰۲۵۰۸۲۵ | ۰۰۳۱۸۴۹ |
| داده و قرامین مخابرات | ۴ | ۰۰۳۹۶۰۴ | ۶٫۲۵ | ۰۲۴۷۵۲۵ | ۰۰۳۱۴۳ |
| داده و قرامین ترافیک هوایی | ۴ | ۰۰۳۹۶۰۴ | ۶٫۳۳۳۳۳ | ۰۲۵۰۸۲۵ | ۰۰۳۱۸۴۹ |
| داده و قرامین تعیین و کنترل وضعیت | ۴ | ۰۰۳۹۶۰۴ | ۷٫۷۵ | ۰۲۹۷۰۳ | ۰۰۳۷۷۱۶ |
| گامالینک | ۱۴ | ۰۱۳۸۶۱۴ | ۷٫۴۱۶۶۶۷ | ۱٫۰۲۸۰۵۴ | ۰۱۳۰۵۴ |
| ترافیک هوایی | ۹ | ۰۰۸۹۱۰۹ | ۷٫۵۸۳۳۳۳ | ۶۷۵۷۴۳ | ۰۰۸۵۸۰۴ |

جدول ۵- تعیین ضریب پیچیدگی زیرسیستم‌ها

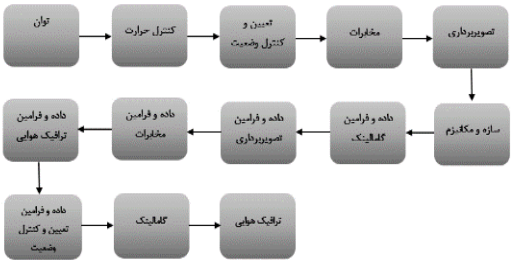
| توان | زمان عملکرد | بیشترین زمان عملکرد | شرایط محیطی | میانگین شرایط محیطی |
|---|---|---|---|---|
| باتری ها | ۸ | ۸ | ۵ | ۵ |
| پنل های خورشیدی | ۸ | | ۵ | |
| بردPCDU | ۷ | | ۵ | |

جدول۶: تعیین ضریب زمان عملکرد و شرایط محیطی زیرسیستم توان.

۶-۲-۵-**گام پنجم پژوهش**: تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم‌ها با روشFOO.

این گام شامل دو مرحله است؛ ابتدا

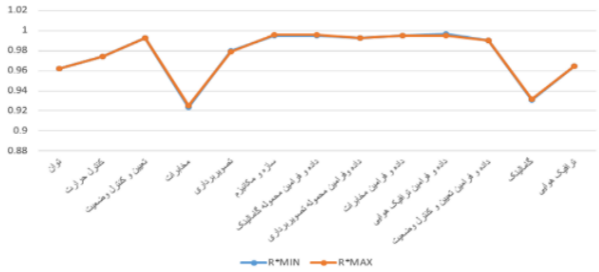
با استفاده از رابطه ۴ میزان $W'_i$ برای تمام زیرسیستم‌ها در دو حالت فناوری جدید (S) با کمترین و بیشترین توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان محاسبه شده است؛ سپس مقدار $C'_i$ برای زیرسیستم‌ها مطابق رابطه۵ تعیین‌شده‌است. در نهایت با استفاده از رابطه ۶، تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم‌ها با توجه به قابلیت اطمینان هدف ۷۳ درصد برای ماهواره که مورد نظر کارفرمای پروژه بوده است؛ در دو حالت ذکر شده انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی تخصیص قابلیت اطمینان انجام شده، از رابطه ۷ استفاده شده است. لازم به ذکر است به دلیل ماهیت پژوهش از بعد مدل‌سازی و در نظرگیری حالت سختگیرانه، بلوک دیاگرام کلی ماهواره به صورت سری در نظرگرفته شده است (شکل۷). نتایج در جدول ۷ آورده شده است.



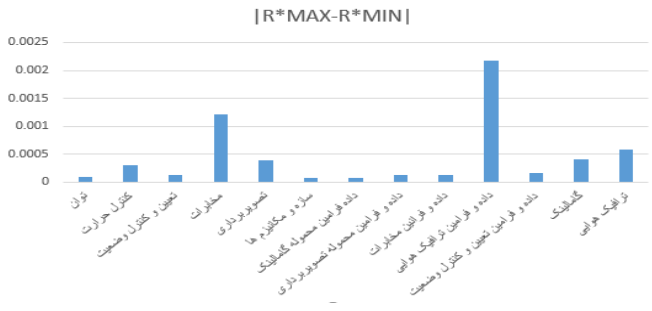

شکل۷:بلوک دیاگرام ماهواره مکعبی

## ۳- آنالیز داده‌ها

آنالیز نتایج مدل ارائه شده می‌تواند به تشخیص درجه بحرانی بودن هر یک از زیرسیستم‌ها کمک نماید. در برخی از زیرسیستم‌ها علت کمبود مقدار تخصیصی قابلیت اطمینان بحث فناوری بوده است و در برخی علت، فاکتورهای دیگر بوده است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده می‌تواند به لزوم توجه به هر یک از فاکتورهای روشFOO بینجامد. مقادیر قابلیت اطمینان تخصیصی به‌دست‌آمده در دو حالت کمترین و بیشترین توانمندی فناورانه تأمین‌کننده مطابق شکل ۸ رسم گردید. می‌توان از این نمودار، متوجه شد که حداقل قابلیت اطمینان در بخش‌های مخابرات، و گامالینک است.




به منظور دقیق‌تر بررسی‌کردن تفاوت دو مقدار تخصیص شکل ۹ رسم گردید.



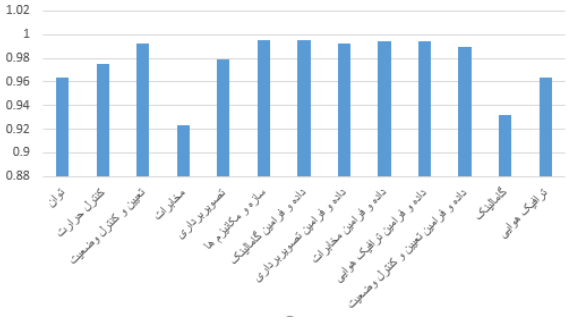

شکل ۸- نمودار قابلیت اطمینان تخصیصی به هر زیرسیستم در دو حالت کمترین و بیشترین قابلیت توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان

شکل ۹- تفاوت مقدار تخصیصی قابلیت اطمینان در دو حالت.

با استفاده از این نمودارها می‌توان دریافت که به جز بخش‌های داده و فرامین ترافیک هوایی و مخابرات، تفاوت چندانی بین دو روش، نبوده است و بحث تأمین‌کنندگان در زیرسیستم داده و فرامین ترافیک هوایی به لحاظ ناهمگنی در دوحالت توانمندی، اهمیت بیشتری دارد. در دو زیر سیستم گامالینک و مخابرات می‌بایست بررسی‌کرد که آیا واقعاً بحث آمادگی تأمین‌کنندگان در تخصیص قابیت اطمینان کمتر به این دو زیرسیستم مؤثر بوده است یا خیر؟ به جهت بررسی این مورد، تخصیص قابلیت اطمینان بدون درنظرگیری فاکتور توسعه داده شده، مطابق شکل ۱۰ رسم گردید.

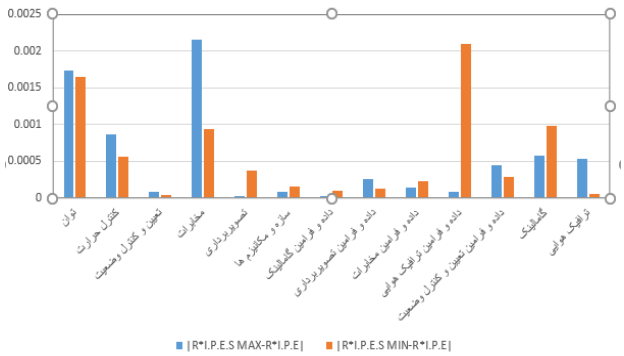
| زیرسیستم | ضریب پیچیدگی | ضریب زمان عملکرد | ضریب شرایط محیطی | ضریب توانمندی فناورانه تأمین کنندگان(MAX) | ضریب توانمندی فناورانه تأمین کنندگان(MIN) | $W'_{i\ MAX}$ | $W'_{i\ MIN}$ | $C'_{i\ MAX}$ | $C'_{i\ MIN}$ | $R^*_{i\ MAX}$ | $R^*_{i\ MIN}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| توان | ۰/۱۳۷۴۵۴ | ۰/۰۶۱۷۲۸ | ۰/۰۷۵۴۷۲ | ۰/۰۸۰۹۵ | ۰/۰۷۹۷۴۵ | ۰/۰۰۰۰۵۳ | ۰/۰۰۰۰۵۱ | ۰/۱۳۳۵۱۵۴۴ | ۰/۰۱۲۳۱۸۸ | ۰/۹۶۱۸۷۴ | ۰/۹۶۱۹۷۳ |
| کنترل حرارت | ۰/۰۵۲۰۶۹ | ۰/۰۹۸۷۶۵ | ۰/۰۸۴۹۰۶ | ۰/۰۸۰۴۷۷ | ۰/۰۷۷۲۳۶ | ۰/۰۰۰۰۳۵ | ۰/۰۰۰۰۳۴ | ۰/۰۸۳۱۳۵۳۹ | ۰/۰۸۲۱۲۶ | ۰/۹۷۴۱۷۶ | ۰/۹۷۴۴۸۵ |
| تعیین و کنترل وضعیت | ۰/۰۱۴۰۰۲۸ | ۰/۰۹۸۷۶۵ | ۰/۰۹۴۳۴ | ۰/۰۷۳۴۲۳ | ۰/۰۷۷۲۱۳ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۲۳۷۵۲۹۷ | ۰/۰۲۴۱۵۵ | ۰/۹۹۲۵۵۳ | ۰/۹۹۲۴۲۷ |
| مخابرات | ۰/۱۳۲۰۰۶ | ۰/۱۲۳۴۵۷ | ۰/۰۸۴۹۰۶ | ۰/۰۷۵۵۴۴ | ۰/۰۷۵۵۰۸ | ۰/۰۰۰۱۰۴ | ۰/۰۰۰۱۰۴ | ۰/۲۴۷۰۳۰۸۸ | ۰/۲۵۱۲۰۸ | ۰/۹۲۵۲۰۲ | ۰/۹۲۳۹۸۷ |
| تصویربرداری | ۰/۰۳۱۰۱۱ | ۰/۱۲۳۴۵۷ | ۰/۰۹۴۳۴ | ۰/۰۷۷۷۳ | ۰/۰۷۶۰۰۵ | ۰/۰۰۰۰۲۸ | ۰/۰۰۰۰۲۷ | ۰/۰۶۶۵۰۸۳۱ | ۰/۰۶۵۲۱۷ | ۰/۹۷۹۲۸۷ | ۰/۹۷۹۱۴ |
| سازه و مکانیزم | ۰/۰۳۶۰۴ | ۰/۰۳۷۰۳۷ | ۰/۰۵۶۰۴ | ۰/۰۷۶۴۲۱ | ۰/۰۷۸۱۰۷ | ۰/۰۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۰۶ | ۰/۰۱۴۳۵۱۷۸ | ۰/۰۱۴۴۹۳ | ۰/۰۹۹۵۵۲۳ | ۰/۹۷۹۶۸۵ |
| داده و فرامین محموله گامالینک | ۰/۰۲۷۶۵۸ | ۰/۰۴۹۳۸۳ | ۰/۰۵۶۰۴ | ۰/۰۷۶۶۱۹ | ۰/۰۷۶۸۳۸ | ۰/۰۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۰۶ | ۰/۰۱۴۳۵۱۷۸ | ۰/۰۱۴۴۹۳ | ۰/۹۹۵۵۲۵ | ۰/۹۹۵۴۴۹ |
| داده و فرامین مجموله تصویربرداری | ۰/۰۳۱۸۴۹ | ۰/۰۴۹۳۸۳ | ۰/۰۸۴۹۰۶ | ۰/۰۷۷۴۰۳ | ۰/۰۷۷۲۸۶ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۲۳۷۵۲۹۷ | ۰/۰۲۴۱۵۵ | ۰/۰۹۹۲۵۵۳ | ۰/۹۹۵۴۴۹ |
| داده و فرامین مخابرات | ۰/۰۳۱۴۳ | ۰/۰۴۹۳۸۳ | ۰/۰۵۶۰۴ | ۰/۰۷۴۶۹۶ | ۰/۰۷۵۷۴ | ۰/۰۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۰۷ | ۰/۰۱۶۶۲۷۰۸ | ۰/۰۱۶۹۰۸ | ۰/۹۹۴۷۸۱ | ۰/۹۹۲۴۲۷ |
| داده و فرامین ترافیک هوایی | ۰/۰۳۱۸۴۹ | ۰/۰۴۹۳۸۳ | ۰/۰۵۶۰۴ | ۰/۰۷۵۷۴۱ | ۰/۰۷۶۷۵۷ | ۰/۰۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۰۴ | ۰/۰۱۶۶۲۷۰۸ | ۰/۰۰۹۶۲ | ۰/۹۹۴۷۸۱ | ۰/۹۹۶۹۶۴ |
| داده و فرامین تعیین و کنترل وضعیت | ۰/۰۳۷۷۱۶ | ۰/۰۴۹۳۸۳ | ۰/۰۹۴۳۴ | ۰/۰۷۵۷۴۱ | ۰/۰۷۶۳۳۷ | ۰/۰۰۰۰۱۳ | ۰/۰۰۰۰۱۳ | ۰/۰۳۰۸۷۸۸۶ | ۰/۰۳۱۴۰۱ | ۰/۹۹۰۳۲۹ | ۰/۹۹۰۱۶۶ |
| گامالینک | ۰/۱۳۰۵۴ | ۰/۰۹۸۷۶۵ | ۰/۰۹۴۳۴ | ۰/۰۷۸۴۸ | ۰/۰۷۷۱۴۹ | ۰/۰۰۰۰۹۵ | ۰/۰۰۰۰۹۴ | ۰/۲۲۵۶۵۳۲۱ | ۰/۲۲۷۰۵۳ | ۰/۹۳۱۴۴۷ | ۰/۹۳۱۰۳۷ |
| ترافیک هوایی | ۰/۰۸۵۸۰۴ | ۰/۱۱۱۱۱ | ۰/۰۶۶۰۳۸ | ۰/۰۷۶۰۹۸ | ۰/۰۷۶۰۷۹ | ۰/۰۰۰۰۴۸ | ۰/۰۰۰۰۴۸ | ۰/۱۱۴۰۱۴۲۵ | ۰/۱۱۵۹۴۲ | ۰/۹۶۴۷۵۵ | ۰/۹۶۴۱۶۹ |
| | | | | | | $\Sigma W'_i$ =۰/۰۰۰۴۲۱ | $W'_i$=۰/۰۰۰۴۱۴ Σ = | ۱ | ۱ | R*=۰/۷۳ | R*=۰/۷۳ |

جدول ۷: محاسبات تخصیص قابلیت اطمینان با روش FOO




شکل۱۰- تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم‌های ماهواره مکعبی بدون درنظر گیری فاکتور توسعه داده شده.

این شکل نشان می‌دهد که دو بخش عنوان‌شده باز هم کمترین تخصیص را دارا می‌باشند؛ این موضوع نشان می دهد که فاکتور توسعه داده‌شده حالت فناوری جدید(S)، با سایر فاکتورها هم‌خوانی دارد و این دو بخش از درجه بحرانی بودن بیشتری در سایر مراحل طراحی و توسعه محصول، برخوردارند. به منظور بررسی نمودن این موضوع که بحث آمادگی تأمین‌کنندگان به ترتیب در کدام زیرسیستم‌ها حائز اهمیت است؛ مطابق شکل ۱۱ تفاوت مقادیر تخصیص قابلیت اطمینان در دوحالت تخصیص قابلیت اطمینان بدون نظرگیری فاکتور حالت فناوری جدید(S) و تخصیص قابلیت اطمینان با در نظر گیری فاکتور حالت فناوری جدید(S)، در هر دو حالت بیشترین و کمترین توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان، انجام شد.




شکل ۱۱- تفاوت مقادیر تخصیص قابلیت اطمینان بدون در نظرگیری فاکتور(S) با مقادیر تخصیص داده شده در دو حالت کمترین و بیشترین توانمندی تأمین‌کنندگان.

در شکل ۱۱ تفاوت مقادیر تخصیص قابلیت اطمینان بین تخصیص قابلیت اطمینان بدون نظرگیری فاکتور حالت فناوری جدید (S) و تخصیص قابلیت اطمینان با در نظرگیری فاکتور حالت فناوری جدید (S)، در هر دو حالت بیشترین و کمترین توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان انجام گردید. می‌توان از این نمودار، دریافت که در سه بخش داده و فرامین ترافیک هوایی، مخابرات و توان عملاً بحث تأمین‌کنندگان مهم بوده است. در بخش مخابرات، تخصیص قابلیت اطمینان در حالت بیشترین توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان و در بخش داده و فرامین ترافیک هوایی، در حالت کمترین توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان، باعث تفاوت زیاد مقادیر تخصیصی بین دو صورت حالت فناوری جدید(S)، شده‌است.

## ۴-نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است سیستم‌های بحرانی را شناسایی نماید و نیز قادر به شناسایی این موضوع است که زیرسیستم در کدام یک از چهار فاکتور نیازمند بررسی بیشتر است. بدیهی است که در این پژوهش تفکیک بین فاکتور فناوری و سه فاکتور دیگر صورت‌گرفته‌است و به جهت بررسی بیشتر می‌بایست سه فاکتور دیگر نیز توسعه داده‌شوند.

## ۵-محدودیت‌های پژوهش

- این پژوهش محدود به چهار فاکتور:پیچیدگی(I)، حالت فناوری جدید(S)، شرایط محیطی(E) و زمان عملکرد(P) بوده است؛ که در یک حوزه خاص فضایی به‌کار گرفته‌شده‌است.
- نتایج این تحقیق فقط برای ماهواره مکعبی مورد بررسی قابل استناد است و در سایر سیستم‌ها نمی‌تواند به‌کار رود.
- به منظور جمع‌آوری نظرات خبرگان در صنعت فضایی تنها از نظر دو تن از آن‌ها در این تحقیق استفاده شده است.

## ۶-پیشنهادها

- در بحث ارزیابی آمادگی فناوری(TRA) چه در تمام مراحل و چه در قسمتی از آن، با توجه به اختلاف نظر بین جامعه خبرگان پژوهش در برخی از بخش‌های سیستم به خصوص در تدوین ماتریس ساختار طراحی (DSM) که نحوه ارتباط قطعات و زیرسیستم‌ها اهمیت داشتند، پیشنهاد می‌گردد اعداد به صورت فازی در نظرگرفته شود.
- در بحث توانمندی فناورانه تأمین‌کنندگان پیشنهاد می‌شود الگوی دیگری به جهت استخراج معیارها و زیرمعیارها و نهایتاً تدوین پرسشنامه، استفاده گردد و یا الگویی به این منظور ابداع گردد. همچنین معیارها و زیرمعیارها متناسب با شرایط کنونی کشور، گسترش‌داده شوند.
- توسعه هر یک از فاکتورهای ضریب پیچیدگی (I)، ضریب زمان عملکرد (P)، ضریب شرایط محیطی (E) در روشFOO را در پژوهش‌های خود در نظر گیرند.
- با در نظرگرفتن این پژوهش به‌عنوان مبنا، روش ارائه شده به لحاظ مدیریتی و نیز ارائه راهکارهای ترکیبی دیگر توسعه‌یابد.
- از ابزارهای مدیریت کیفیت جامع[۳۲](TQM) به منظور گسترش بعد مدیرتی پژوهش در تحقیقات آتی بهره گیرند.
- پس از توسعه سایر فاکتورهای روش FOO می توانند نرم‌افزاری به منظور تخصیص قابلیت اطمینان توسعه دهند.
- با توجه به بحرانی بودن فاکتور آمادگی فناوری تأمین‌کنندگان در برخی زیرسیستم‌ها، می‌توانند بر روی ساخت ماژول‌ها متمرکز شوند؛ اگرچه با هزینه بیشتر اینکار انجام گیرد می‌توان در این حالت با تحلیل ریسک، حالت بهینه را بیابند.
- به منظور ارزیابی سطح آمادگی تأمین‌کنندگان چه از لحاظ ارزیابی آمادگی فناوری(TRA) و چه از لحاظ توانمندی فناوانه تأمین‌کنندگان با گردآوری تمام اطلاعات موجود در ادبیات تحقیق و نیز متناسب با کلیه حوزه‌های صنعت منبع استواری در این زمینه را ارائه نمایند. منبع ارائه شده می‌تواند بومی‌سازی شود.

[32] Total Quality Managemant

## منابع


[۱] موحدی، یزدان.؛ دولت‌خواه، مهدی. و راستی، وحید. (۱۳۹۲). طراحی و توسعه الگویی جهت تخصیص قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده به روش شبکه‌های بیزین (مطالعه موردی: شاتر یک دوربین high-tech). نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، شماره۴، جلد۲۴، ص ۴۴۸-۴۳۸.

[۲] میرشمس، مهران.؛ ایرانی، سعید.؛ اخلاقی، امیرمهدی و ناصح، حسین. (۱۳۹۱). تخصیص قابلیت اطمینان زیرسامانه‌های ماهواره بر با تحلیل سلسله مراتبی در فاز طراحی مفهومی JSST، جلد ۵(شماره ۲)، (۱۳۹۱) ص۴۹-۵۷

[۳] کرباسیان، مهدی.؛ محمدحسنی، فاطمه. (۱۳۹۸). مدیریت قابلیت اطمینان در چرخه عمر سیستم‌ها.

[4] Prakash, O., Yadav. and Xing, Z. (2014). A practical reliability allocation method considering modified criticality factors, of Industrial and Manufacturing Engineering North Dakota Sate University, Fargo, ND 58108.

[5] Yung, C. C., Kuei-H. C, and Thing, Y. C. (2011). ”ME-OWA based DEMATEL reliability apportionment method. Expert Systems with Applications. 38(2011) 9713-9723.

[۶] کرباسیان،مهدی و مهدوی،آرزو و فروزنده، محمد، (۱۳۹۵)، روش‌های پیشرفته تخصیص قابلیت اطمینان در طراحی و زنجیره تأمین،انتشارات نخبگان شریف،چاپ اول.

[۷] خشنود، قویم. (۱۳۸۵). ارائه الگوی طرح برنامه قابلیت اطمینان در محصولات هوافضایی، ششمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[۸] محمدی، مریم. (۱۳۹۵). تخصیص قابلیت اطمینان سیستم کنترلی الکترواپتیکی با در نظر گرفتن همزمان عوامل امکان‌پذیری، بحرانی بودن و وابستگی زیرسیستم‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

[۹] مهدوی، آرزو.(۱۳۹۳). طراحی مدل ریاضی تلفیقی از آنتروپی بیزین و روش دیمتل فازی برای تخصیص قابلیت اطمینان(مطالعه موردی:ماسوره مکانیکی گلوله۲۳ میلیمتری مهمات‌سازی اصفهان)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

[10] Gao (2016). Technology Readines Assessment Guide. Us. Government Account Ability Office.

[۱۱] فولادی، قاسم. (۱۳۹۵). ارزیابی و استفاده از سطوح آمادگی فناوری، انتشارات موسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع چاپ دوم.

[12] Gabriel T. J, Milton F. C. (2018). ”Integration Readiness levels Evaluation and Systems Architecture: A Literature Review. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS), Vol-5, Issue-4.

[۱۳] . جعفری خانشیر، سعید.؛ خانفلی، محسن. و زمانی، مجید. (۱۳۹۴). شناسایی سطوح آمادگی فناوری (TRL) بر اساس مستندات فنی، فصلنامه علمی- ترویجی، مدیریت استاندارد و کیفیت، سال پنجم- شماره ۲ پیاپی ۱۶.

[14] Sauser, B., Marquez, J, R. (2006). "From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels" Conference on Systems Engineering Research.

[۱۵] کرباسیان، مهدی. و اسکندری، فاطمه. (۱۳۹۷). مهندسی سیستم و تعامل‌پذیری، انتشارات نخبگان شریف،چاپ اول.

[16] Yasseri, S. (2013). "Subsea system readiness level assessment", International Journal of the Society for Underwater Technology, Vol 31, No 2, pp 77–92.

[۱۷] کیا، علی. و حسینی مونس، سید احمد. (۱۳۹۵). مهندسی سیستم, موسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی تهران.

[18] Yasseri, S. F., & Bahai, H. (2019). "System Readiness Level Estimation Of Oil And Gas Production Systems". International Journal Of Coastal & Offshore Engineering. Ijcoe Vol.2/No. 2/ (31-44)

[۱۹] شهائقی، کامران. و شریفی، سیدمحمدمهدی. و غلامی، حسین. و کرباسیان، مهدی. (۱۳۹۰). طراحی الگویی برای تخمین قابلیت اطمینان سازه ماهواره بر به روش شبکه‌های بیزین، دومین کنفرانس مهندسی قابلیت اطمینان.

[20] Mettas, A .(2000). "Reliability allocation and optimization for complex systems", Annual **Reliability and Maintainability Symposium. International Symposium on** Product **Quality and Integrity (Cat. No. 00CH37055)**, Los Angeles.

[21] PENG, B.; ZHAO, J. and SUN, Q. (2005). "Reliability allocation method for complex system using AHP "Electronic Product Reliability and Environmental Testing", School of Information System & Management, National University of Defense Technology, Hunan, Changsha 410073, China.

[22] Fabio, D. F., Gianpaolo, D. B. Domenico, F. Alessandro, S. (2010). Proposal of a new reliability allocation methodology: the Integrated Factors Metho", Article in International Journal of Operations and Quantitative Management. University of Cassino Department of Industrial Engineering 03043 Cassino (FR)-Italy.

[23] Kyungmee O. K, Yoonjung Y, Ming J. Z. (2013) A new reliability allocation weight for reducing the occurrence of severe failure effects. Reliability Engineering and System Safety.

[۲۴] نقی‌زاده. (۱۳۹۱). مدل ارتقای توانمندی فناورانه در بنگاه‌های بخش ناوبری الکترونیک ایران.رساله دکتری رشته مدیریت تکنولوژی دانشگاه علاوه طباطبایی دانشکده حسابداری و مدیریت.

[۲۵] فرقانی، محمدعلی. یاورزاده، سعید. (۱۳۹۳). روش تخمین زمانی پروژه‌های فضای تا فاز طراحی با تأکید بر سطوح آمادگی تکنولوژی (TRL)، چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی انجمن هوافضای ایران.

[۲۶] ارشادی، محمدجواد. (۱۳۹۸). بهبود فرایندهای ارزیابی سطح آمادگی فناوری (TRL) در پروژه‌های فناورانه: یک مطالعه موردی پنجمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع و سیستم‌ها.

[27] Sause.B, Gove.R, Forbes.E, and Marque. R.E .(2010),"Integration maturity metrics: Development of an integration readiness level".Information Knowledge Systems Management

[28] FIAP, A. T. and FREng, P. J. (2010)." Clarifying the Concepts of System Maturity, System Readiness and Capability Readiness through Case Studies". 8th Annual Conference on Systems Engineering Research

[29] .Ryu, J. & Byeon, S. C. (2011). "Technology level evaluation methodology based on the technology growth curve". Technological Forecasting & Social Change, 1049-1059.

[30] Zeleny, M. (2012). "High Technology and Barriers to Innovation: From Globalization to Relocalization". International Journal of

Information Technology & Decision Making, 441-456.

[31] Toloui, A. & Matin, Y. A. (2012). " Measuring Technological Level and Capability of the Industries in East Azerbaijan and Providing Proper Strategies for Improvement and Promotion of Technology". Journal of Basic and Applied Scientific Research, 3664-366.

[32] Austin.M.F, York.D.M,(2015). "System Readiness Assessment (SRA) An Illustrative Example "Conference on Systems Engineering Research. Procedia Computer.

[33] Knaggs, M.,et,al(2015). "Application of systems readiness level methods in advanced fossil energy applications. Conference on Systems Engineering Research. Procedia Computer Science 44, 497 – 506.

[34] Animah & M. Shafiee.(2018)."A framework for assessment of Technological Readiness Level (TRL) and Commerical Readiness Index (CRI) of asset end-of-life strategies". Cranfield University, Bedford, Bedfordshire, UK. Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World.

[35] Sauser.B.J, & Forbes.E,.(2019). "Defining an Integration Readiness Level for Defense Acquisition". Published and used by INCOSE with permission.