بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی برای عملیات در شرایط عدم قطعیت - به‌کارگیری مدل در طراحی یک سامانهٔ سنجش از دور راداری

مالک طهوری[1]، جعفر قیدر خلجانی[2]، محمد حسین کریمی گوارشکی[3]

۱ دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران

۲ استادیار، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، kheljani@mut.ac.ir

۳ استادیار، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

چکیده

همراه با توسعهٔ فناوری، سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی به‌مرور جایگزین سیستم‌های سنتی شده‌اند. از ویژگی‌های اصلی این سیستم‌ها می‌توان به انجام عملیات در شرایط محیطی متنوع و ناشناخته اشاره کرد. مخاطرات موجود در محیط‌های ناشناخته ارزش فراهم‌شده توسط سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی برای ذینفعان را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا توانمندسازی آنها برای عملیات در شرایط عدم قطعیت امری اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله اصول و قوانینی برای طراحی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی ارائه شده است که با به‌کارگیری آنها می‌توان به توسعهٔ سیستم‌هایی زیست‌پذیر در رویارویی با مخاطرات در شرایط ناشناخته پرداخت. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری میزان زیست‌پذیری سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی یک مدل هفت‌مرحله‌ای ارائه شده است که از ویژگی‌های کلیدی و متمایزکنندهٔ آن می‌توان به توصیف عدم قطعیت در محیط عملیاتی، تحلیل چگونگی تأثیر عدم قطعیت بر مشخصات کارکردی و فیزیکی محصول و نهایتاً مشخص‌نمودن قسمت‌هایی از ساختار سیستم که در شرایط عدم قطعیت بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند اشاره نمود. کاربردی بودن مفاهیم و مدل ارائه‌شده با استفاده از یک مثال موردی در خصوص یک سامانهٔ سنجش از دور راداری نشان داده و نتایج آن تحلیل شده است.

واژگان کلیدی

سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی، زیست‌پذیری، اصول طراحی، عدم قطعیت، سامانهٔ سنجش از دور راداری

۱. مقدمه

در توسعهٔ محصولات پیچیده به‌منظور مواجهه با اختلالات ناشی از عدم قطعیت نیاز است توانمندی آنها تا حد ممکن بهبود یابد. روشی که از طریق آن بتوان توانمندی یک سیستم در مواجهه با عدم قطعیت را بهبود داد وابسته به نوع و مشخصات آن سیستم

می‌باشد. سه روش عمومی در این‌خصوص عبارت‌اند از راحت‌کردن کار، کاهش عدم قطعیت و محافظت از سیستم [۱].

۱. راحت‌کردن کار عبارت است از محدودکردن گسترهٔ مشخصات فنی و عملیاتی یک سیستم یا محصول. به‌عنوان مثال کاهش محدودهٔ حرارتی عملکردی یک سیستم نوعی از این روش می‌باشد
۲. کاهش عدم قطعیت عبارت است از کاهش احتمال وقوع حوادث نامطلوب با به‌کارگیری استراتژی‌های کاهش عدم قطعیت همچون پیاده‌سازی مدیریت ریسک
۳. محافظت از سیستم: یک سیستم یا محصول می‌تواند به‌گونه‌ای طراحی شود که کمترین حساسیت را به ناشناخته‌های مختلف داشته باشد. محافظت از سیستم نه از جنبهٔ کاهش عدم قطعیت، که با کاهش تأثیر نهایی عدم قطعیت قابل دستیابی است

به‌طور کلی انتخاب یک روش به‌منظور بهبود توانمندی یک محصول در مواجهه با عدم قطعیت به دو دلیل محدود می‌شود: اول اینکه محدودکردن فعالیت و کار یک سیستم اصولاً بدون به خطر افتادن جذابیت یا ارزش آن امکان‌پذیر نیست. مثلاً برای یک محصول، تعدیل در مشخصات فنی آن منجر به از بین رفتن ارزش و متعاقباً بازار آن محصول می‌شود. دوم اینکه کاهش عدم قطعیت به‌عنوان یک رویکرد در بهبود توانمندی یک سیستم در مواجهه با عدم قطعیت، با این واقعیت که کاهش برخی از منابع عدم قطعیت غیرممکن و نشدنی است، محدود می‌شود [۲]. بنابراین واضح است که در اکثر مواقع، محافظت از سیستم از طریق توانمندسازی آن در مقابل آثار ناشی از عدم قطعیت به‌منظور بهبود توانمندی آن، شاید تنها پاسخ عملی در مواجهه با عدم قطعیت می‌باشد. در ادبیات تحقیق بالغ بر ۲۰۰ نوع شاخص همچون انعطاف پذیری، تغییر پذیری و جز این‌ها برای توانمندسازی و ارزیابی جنبه‌های مختلف سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است که اکثر آنها در مطالعهٔ آدامز گردآوری شده‌اند [۳]. با مروری بر گزارش ارائه‌شده توسط آدامز[۱] کاستی‌های ذیل در ارائهٔ شاخص و مدل‌های مربوط به ارزیابی توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی به‌وضوح دیده می‌شود:

۱. اتفاق نظر در خصوص تعاریف شاخص‌های مختلف در ادبیات تحقیق وجود ندارد و برای هر یک از آنها تعاریف متعددی ارائه شده است که بعضاً با هم در تناقض‌اند
۲. ارتباطات پیچیده‌ای بین شاخص‌های مختلف وجود دارد که می‌توان گفت این پیچیدگی مدلسازی آنها را اگر غیرممکن نساخته است، اما با دشواری بسیاری مواجه می‌کند
۳. اگرچه محققان مدل‌هایی برای کمی‌سازی برخی از این شاخص‌ها ارائه نموده‌اند، اما به‌منظور ارزیابی توانمندی کلی یک سیستم تحت شرایط عدم قطعیت معیار جامعی ارائه نشده است
۴. بسیاری از مدل‌های ارائه‌شده برای ارزیابی شاخص‌ها، مدل‌های کیفی می‌باشند که به‌شدت وابسته به قضاوت فردی هستند
۵. در مدل‌های ارائه‌شده ارتباط بین پارامترهای محیط عملیاتی (عدم قطعیت) با پارمترهای فیزیکی و کارکردی محصول در فرایند مدلسازی‌ها در نظر گرفته نشده است

با توجه به کاستی‌های فوق، در این مقاله نخست مطالعات تکمیلی به‌منظور انتخاب شاخصی واحد برای ارزیابی توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی تحت شرایط عدم قطعیت صورت پذیرفت. در نتیجه این بررسی مشخص شد که مکدکی[۲] در سال ۲۰۱۳ م مفاهیم بنیادی شاخص زیست‌پذیری را به‌عنوان مبنایی برای ارزیابی توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه نموده است [۴]. بر اساس تعریف وی زیست‌پذیری عبارت است از مقدار احتمال اینکه یک سیستم مهندسی ارزش مورد انتظار ذینفعان را در شرایط مختلف در طول چرخهٔ حیات برآورده نماید. در این پژوهش نیز زیست‌پذیری به‌عنوان شاخص ارزیابی توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی تحت شرایط عدم قطعیت انتخاب شده است. به‌منظور دستیابی به قابلیت زیست‌پذیری بیشتر در سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی دو فعالیت کلیدی باید صورت پذیرد:

۱. توسعه و تدوین اصول طراحی که با استفاده از آنها بتوان قابلیت بقای سیستم را نسبت به اختلالاتی که قابل پیشگیری نیستند افزایش داد
۲. ۲- توسعهٔ مدلی برای اندازه‌گیری میزان توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی در شرایط عدم قطعیت و

ارزیابی میزان اثر اصول طراحی و استراتژی‌های اتخاذشده جهت افزایش زیست‌پذیری سیستم

به‌منظور انجام این دو فعالیت کلیدی و برطرف نمودن شکاف‌های مطالعاتی ذکرشده، ادامهٔ این تحقیق به‌صورت ذیل ساختاردهی شده است:

در بخش دوم استراتژی‌های طراحی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی برای زیست‌پذیری ارائه شده است. این استراتژی‌ها به دو دستهٔ اصلی الگوهای طراحی و ابتکارات طراحی تقسیم‌بندی شده و پس از مرور ادبیات لیست جامعی از این الگوها و ابتکارات تدوین و ارائه شده است.

در بخش سوم مدلی برای اندازه‌گیری شاخص زیست‌پذیری ارائه شده است. مدل ارائه‌شده شامل ۷ مرحلهٔ اصلی به شرح ذیل می‌باشد. از گام‌های اصلی مدل ارائه‌شده می‌توان به شناسایی و توسعهٔ سناریوهایی جهت توصیف عدم قطعیت موجود در محیط عملیاتی، مدلسازی سیستم پیچدهٔ مهندسی و محاسبه و ارزیابی شاخص زیست‌پذیری سیستم اشاره نمود.

در ادامه، در بخش چهارم کاربردی‌بودن مفاهیم و مدل ارائه‌شده با استفاده از یک مثال کاربردی درخصوص یک ماهواره سار[۳] مورد آزمون قرار گرفته است. در این مرحله، در ابتدا سناریوهای محتمل عدم قطعیت پیش روی محصول به‌صورت خبرگی تعیین گردیده‌اند. سپس میزان زیست‌پذیری سیستم با استفاده از مدل هفت‌مرحله‌ای ارائه‌شده ارزیابی شد. با توجه به پایین‌بودن مقدار شاخص زیست‌پذیری سیستم مفروض، راه‌کارهای مختلفی به‌منظور بهینه‌سازی میزان زیست‌پذیری سیستم در معماری آن اعمال و مقدار شاخص زیست‌پذیری مجدداً مورد محاسبه قرار گرفت. در این بخش تحلیل کاملی روی نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل ارائه شده است.

نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه شده است. همچنین نوآوری‌های این تحقیق و تفاوت‌های کلیدی آن با مدل‌های موجود به‌صورت خلاصه در این بخش مرور شده است.

در انتها به‌صورت خلاصه دستاوردهای این تحقیق در ارزیابی توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی تحت شرایط عدم قطعیت نسبت به تحقیق‌های مشابه را می‌توان برشمرد:

۱. ارائهٔ یک شاخص یکتا و جامع به‌منظور ارزیابی
۲. ارائه مدل کمی که وابستگی کمتری به قضاوت‌های فردی دارد
۳. مدلسازی سه سطحی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی به‌منظور ارزیابی توانمندی آنها و مرتبطنمودن شرایط عدم قطعیت به ساختار محصول در فرایند مدلسازی

۲. الگوها و ابتکارات طراحی

همان‌گونه که در بخش قبل عنوان شد، چون سیستم‌های پیچیده در محیط‌های پویا به انجام عملیات می‌پردازند، طراحان باید راه‌کارهای مناسبی به‌منظور بهینه‌سازی طراحی آن‌ها برای عملیات در شرایط ناشناخته به‌کار گیرند. راهکارهای بهینه‌سازی طراحی برای زیست‌پذیری بیشتر سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی را بر اساس ماهیتشان می‌توان به دو دستهٔ اصلی الگوهای طراحی و راه‌کارهای ابتکاری تقسیم نمود. این دو دسته در ادامه به‌صورت مختصر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱. الگوهای طراحی راه‌کارهایی کلی در مقابل مسائل متداولی هستند که مهندسان از آنها برای بهینه‌سازی طراحی استفاده می‌نمایند [۵]. این دسته از راه‌کارها عموماً برای توانمندسازی سیستم در مقابل یک اختلال مفروض توسعه داده می‌شوند
۲. راه‌کارهای ابتکاری قوانین سرانگشتی و خطوط راهنمایی هستند که مخصوص یک نوع اختلال خاص نبوده، اما به‌کارگیری آنها در سیستم سبب افزایش احتمال زیست‌پذیری سیستم در شرایط ناشناخته می‌شود [۶]
۳. الگوها و ابتکارات طراحی قابل استفاده در سامانه‌های پیچیدهٔ مهندسی به‌ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ بررسی شده است

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، طراحان سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی با توجه به عملیات این سیستم‌ها در محیط‌های پویا و ناشناخته با عدم قطعیت بالا، ناچار به بهینه‌سازی طراحی آنها برای زیست‌پذیری بیشتر در مواجهه با شرایط عدم قطعیت با پیاده‌سازی استراتژی‌های بهینه‌سازی در سیستم می‌باشند. به‌منظور ارزیابی تأثیر این استراتژی‌ها بر توانمندی سیستم در مواجهه با عدم قطعیت نیاز به مدلی می‌باشد تا بتوان با استفاده از آن میزان شاخص زیست‌پذیری سیستم را اندازه‌گیری و تحلیل نمود. در بخش سوم به توصیف مدل پیشنهادی در این‌خصوص پرداخته شده است.

جدول ۱. الگوهای طراحی برای زیست‌پذیری سیستم های پیچیدهٔ مهندسی [۷]

ردیف	الگوی طراحی	مسئلهٔ مرتبط	راه‌کار / مثال
۱	حاشیه[۴]	اختلال موجب شود خروجی سیستم کافی نباشد	توانمندسازی سیستم برای تولید خروجی بیشتر. ظرفیت بیشتر جذب و ذخیرهٔ توان به‌منظور تصویربرداری با دقت بهتر یا زمان بیشتر
۲	تحرک[۵]	سیستم به‌صورت فیزیکی در معرض مستقیم اختلال باشد	سیستم به‌گونه‌ای قابلیت جابه‌جایی را داشته باشد تا بتواند مورد تأثیر اختلال قرار نگیرد. قابلیت مانور مداری در ماهواره به‌منظور جبران خطای مدار یا خطای پرتابگر
۳	پوشش[۶]	سیستم قابل شناسایی و ردیابی توسط منبع اختلال باشد	استفاده از روش‌های پوشش و یا استتار به‌گونه‌ای که قابلیت شناسایی سیستم کاهش یابد. استفاده از زیرسیستم‌های جمینگ به‌منظور جلوگیری از شناسایی سامانه
۴	محدودکردن[۷]	تجهیزاتی که به‌صورت فیزیکی با هم در ارتباطند و اختلالاتی که ماهیت آنها فیزیکی می‌باشد	استفاده از موانع فیزیکی، نرم‌افزاری و ... برای محدودکردن تأثیر بین دو جز سیستم. استفاده از صفحات حرارتی برای محدودکردن انتقال حرارت در سیستم
۵	تفکیک[۸]	اختلالات گسترش‌یافته از جزئی به جز دیگر ناشی از تأثیری که اجزا روی هم دارند	جانمایی تجهیزات سیستم پشت منطقهٔ نفوذ فیزیکی‌شان. رعایت فاصلهٔ لازم بین گشتاوردهنده و حسگرهای مغناطیسی جهت جلوگیری از ایجاد اختلال
۶	بازداری[۹]	نفوذ اختلال به داخل سیستم	استفاده از اجزای تکمیلی جهت شناسایی اختلال در خارج از مرز سیستم و جلوگیری از آن. استفاده از حسگرهای خاص مثل حسگر دما جهت شناسایی به موقع اختلال
۷	نگهداری[۱۰]	تجهیزات طبیعتاً بر اساس مرور زمان تنزل پیدا کرده و منابع مصرف می‌گردند	جایگزینی مصرف‌شدنی‌ها، اطمینان از اینکه تجهیزات در مدت زمان مورد نظر عملیاتی خواهند بود و تعمیر یا جایگزینی آنها اگر اینگونه نیستند
۸	ایمنی در مقابل شکست[۱۱]	سیستم زمان یا منابع کافی برای اتخاذ یک راه‌کار مناسب برای دفع اختلال را ندارد.	تغییر ماهیت شکست به‌گونه‌ای‌که با استفاده از راه‌کارهای غیرفعال بتوان بر اختلال مربوطه فائق آمد. در نظر گرفتن مد اضطراری برای سامانه جهت جلوگیری از ورود آسیب جدی توسط منبع اختلال تا زمان اتخاذ راهکار مناسب
۹	سختی[۱۲]	تأثیر فیزیکی اختلال روی سیستم	کیسینگ تجهیزات و مواد حساس به‌گونه‌ای که بتوانند در برابر اختلالات فیزیکی دوام آورند. استفاده از روش‌هایی چون آنودایز و ... برای پوشش تجهیزات حساس
۱۰	افزونگی فیزیکی[۱۳]	شکست یک جز که باعث می‌شود سیستم قابلیت لازم را نداشته باشد	درنظر گرفتن افزونگی برای تجهیز و اجازه استفاده از یدکی در مواقعی که تجهیز اصلی با شکست مواجه شده و یا قابلیت لازم را فراهم نمی‌کند.
۱۱	افزونگی کارکردی[۱۴]	ظرفیت مورد انتظار کاملا برآورده نمی‌شود	ظرفیت مشابه از طریق عملیات دیگر قابل دسترسی می‌باشد. در نظر گرفتن تغذیه[۱۵] چندگانه برای آنتن سار به‌منظور افزایش عرض نوار تصویر در صورت لزوم
۱۲	منحرف کردن[۱۶]	اختلال خارجی موجب مشکل در تجهیزات بحرانی می‌شود	منحرف‌کردن اختلال خارجی از المان‌های بحرانی. زمین‌کردن تجهیزات سامانه جهت جلوگیری از تخلیهٔ بار الکتریکی
۱۳	منتقل‌کردن[۱۷]	ظرفیت فراتر از حد برای یک سیستم داخلی.	فرستادن جریان به تجهیز یا سیستم دیگر که ظرفیت خالی دارد. کنترل جریان بر روی پروتکل TCP/IP
۱۴	مراقبت[۱۸]	یک جز در مرز سیستم یک فعالیت بدون مجوز انجام دهد	مانیتور دائمی سیستم جهت اطمینان از اینکه اجزای سیستم مفهوم عمالیات را نقض نمی‌کنند. در نظر گرفتن واحد ناظر در سامانه و استفاده از متغیرهای[۱۹] لازم برای انجام فعالیت‌ها
۱۵	احراز هویت[۲۰]	ارتباط سیستم‌های بیگانه (اختلال) با اجزای سیستم به عنوان جزئی از سیستم	احراز هویت اجزای سیستم قبل از اجازهٔ دسترسی به آنها در ارتباط با سایر اجزای سیستم. احراز هویت ایستگاه‌های زمینی با کدهای لازم در هنگام ارتباط با سامانه فضایی
۱۶	کنترل شدت[۲۱]	تعاملات ناخواسته بین اجزای سیستم که تعداد آنها می‌تواند سبب ایجاد مشکلات در اجزای سیستم شود	کنترل میزان خروجی اجزای تشکیل‌دهندهٔ سیستم. کاهش سرعت تنظیم کردن واحد پردازش مرکزی[۲۲] به‌منظور کاهش سطح حرارت سیستم

جدول۲. ابتکارات طراحی برای زیست‌پذیری سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی [۸]

ردیف	راهکار ابتکاری	توصیف/ مثال
۱	کاهش حالات خطا[۲۳]	حذف مخاطرات سیستم از طریق طراحی ذاتی/ جایگزینی عایق تفلون با فولاد ضد زنگ در مأموریت آپولو ۱۳
۲	دفاع چند لایه[۲۴]	استفادهٔ همزمان از بیش از یک استراتژی زیست‌پذیری در مواجهه با یک اختلال خاص استفاده همزمان از فایروال و کلمهٔ عبور برای تأمین امنیت حساب کاربری
۳	اجتناب از پیچیدگی[۲۵]	سیستم نباید بیش از اندازهٔ لازم پیچیده باشد./ قانون سادگی مورد استفاده در سیستم عامل unix
۴	مرور مستقل[۲۶]	داشتن متخصصانی برای مرور طراحی برای زیست‌پذیری که جزء ذینفعان و طراحان سیستم نباشند برد تخصصی ارزیابی ناسا که جز تیم مهندسی سیستم در طول عمر پروژه می‌باشد
۵	استراتژی حداقل امتیازات[۲۷]	اختصاص حداقل امتیاز به کاربران و اجزای سیستم تا بتوانند مفهوم عملیات را برآورده سازند حساب کاربری‌هایی که دسترسی و اختیارات مدیر را ندارند
۶	قابلیت انعطاف[۲۸]	اطمینان از اینکه شرایط چندگانه‌ای وجود دارد که سیستم می‌تواند در هنگام نیاز به آن وضعیت گذر نماید انتقال به مد تصویربرداری موزاییکی در صورت نیاز به عرض نوار تصویربرداری بیشتر
۷	قابلیت بازگشت[۲۹]	قبل از هرگونه انتقال اطمینان از این صورت پذیرد که بازگشت به وضعیت اصلی امکان پذیر است در نظر گرفتن شرایط لازم جهت بازگشت از مد اضطراری به مد نرمال در عملیات فضایی
۸	وضعیت پایدار میانی[۳۰]	در مواردی که انتقال‌های بزرگ به یکباره ممکن نمی‌باشد، قبل از هر انتقال بزرگ انتقال‌های کوچک به وضعیت‌های میانی پایدار صورت پذیرد. انتقال مداری با تراست‌های سطح پایین و اطمینان از صحت انجام عملیات قبل از تراست‌های بعدی در یک فرایند انتقال مداری
۹	برنامهٔ اقتضایی[۳۱]	وقتی بازگشت ممکن نمی‌باشد، اطمینان از اینکه یک طراحی جایگزین برای انتقال در مواقعی که طراحی اصلی پاسخگو نمی‌باشد وجود دارد. استفاده از فناوری بیم الکترونیکی برای تصویربرداری وقتی که جهت‌گیری توسط سامانه ممکن نمی‌باشد.

۳. مدل ارزیابی زیست‌پذیری

همان‌گونه که در بخش دوم اشاره شد، به‌منظور ارزیابی توانمندی یک سیستم پیچیدهٔ مهندسی در مواجهه با اختلالات ناشی از شرایط عدم قطعیت و همچنین تحلیل اثر استراتژی‌های اتخاذشده به‌منظور افزایش این توانمندی روی سیستم به توسعهٔ مدلی کمی نیاز است. بر اساس مفاهیم ارائه‌شده در بخش قبل این مدل باید دارای مشخصه‌های اصلی ذیل باشد:

۱. بتواند شرایط عدم قطعیت و اختلالات مربوط به آن در محیط عملیاتی را به‌صورت منطقی توصیف نماید [۹]
۲. الزامات کارکردی متناسب با هر سناریو را جهت فائق‌آمدن بر اختلالات ناشی از عدم قطعیت شناسایی نماید [۹]
۳. راه‌های اثرگذاری عدم قطعیت محیط عملیاتی بر جنبه‌های فیزیکی و کارکردی سیستم را از طریق ارتباط‌دهی الزامات کارکردی با فیزیک محصول تعیین نماید [۹–۱۱]
۴. میزان حساسیت هر پارامتر یا جز از سیستم را نسبت تغییر در سایر پارامترها تعیین نماید [۹–۱۱]
۵. بخش‌هایی از معماری سیستم که در شرایط عدم قطعیت بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند را به‌خوبی و با استفاده از روش‌های ریاضی مشخص نماید [۹–۱۰]
۶. شدت حساسیت هر بخش از سیستم را نسبت به سناریوهای عملیاتی به‌صورت کمی تعیین کند [۹–۱۱]
۷. توانمندی کل سیستم را تحت شرایط عدم قطعیت با استفاده از میزان حساسیت هریک از اجزای سیستم مشخص نماید [۹–۱۱]

در این بخش با در نظر گرفتن الزامات فوق، مدلی هفت‌مرحله‌ای به‌منظور کمی‌سازی زیست‌پذیری به‌عنوان شاخص ارزیابی توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده خواهد شد و کارایی آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مراحل کلی این روش در شکل ۱ نشان داده شده است.

مرحلهٔ ۱: هدف این مرحله توصیف عدم قطعیت و اختلالات مربوط به آن در محیط عملیاتی با استفاده از توسعهٔ سناریو است. به‌عبارت دیگر در این مرحله با هدف اطمینان از برآورده‌سازی کامل کارکردهای سیستم در محیط عملیاتی واقعی، مجموعه

سناریوهایی ایجاد می‌شود که تمرکز آنها بر مأموریت‌های متفاوت و وظایف عملیاتی سیستم می‌باشد. مجموعه این سناریوها به‌صورت رابطهٔ ۱ قابل ارائه است:

$$S = \{s_1, s_2, \dots\} \quad (۱)$$

که در آن S نشان‌دهندهٔ سناریو و i شمارندهٔ آن است. به‌منظور تحلیل اثر سناریوهای تعیین‌شده بر ساختار سیستم، هر سناریو باید بر اساس نظر خبرگان امر و نظرات مهندسی امتیازدهی شود. مشابه رتبه‌دهی ریسک‌های یک پروژه، امتیاز هر سناریو را با ضرب احتمال در شدت اثر هر یک از آنها می‌توان با استفاده از رابطهٔ ۲ محاسبه نمود.

$$s_{sc}^{i} = s_{likelihood}^{i} * s_{opportunity}^{i} \quad (۲)$$

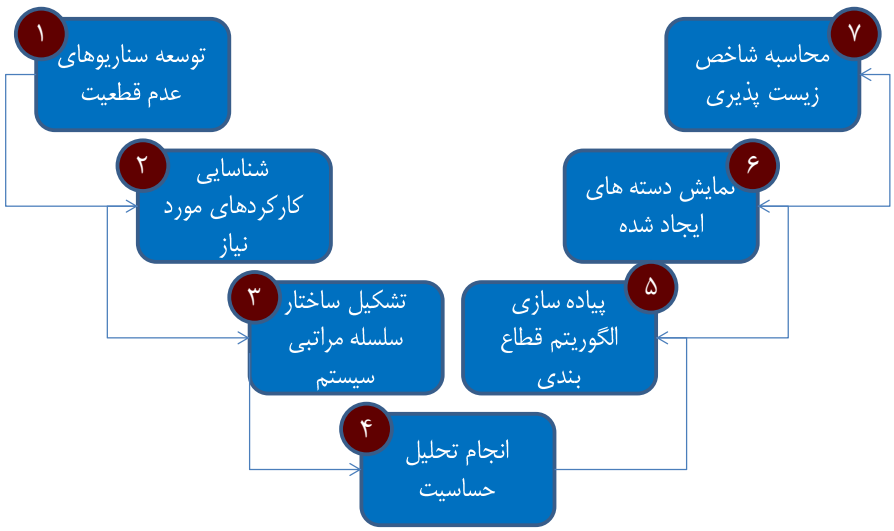
در این رابطه S_{sc} امتیاز سناریو، $S_{likelihood}$ احتمال وقوع سناریو، $S_{opportunity}$ اثر ناشی از وقوع سناریو و i شمارندهٔ سناریو می‌باشد. چون عموماً از محیط عملیاتی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی مجموعهٔ محدودی اطلاعات در دسترس می‌باشد، در این تحقیق از روال ارائه‌شده توسط پیرس مطابق جداول ۳ و ۴ به‌منظور امتیازدهی استفاده خواهد شد [۱۰].

مرحلهٔ ۲: این مرحله نیازمند تحلیل کارکردی سیستم به‌منظور تعیین کارکردهای دیگری است که سیستم به‌منظور انجام سناریوهای مأموریتی (در مواجهه با اختلالات ناشی از شرایط عدم قطعیت) تعیین‌شده در مرحلهٔ قبل نیاز دارد. در این مرحله از شاخصه‌های کلیدی یک سیستم به‌منظور نمایش مجموعه‌ای از الزامات کارکردی که یک عملکرد از سیستم را ایجاد می‌نمایند استفاده می‌شود. شاخصه‌های یک سیستم که اغلب پارامترهای کلیدی عملکرد نیز نامیده می‌شوند، در حقیقت آن چیزی هستند که برای کاربر سیستم اهمیت ویژه‌ای دارد. الزامات کارکردی و ارتباط آنها با شاخصه‌های سیستم به‌صورت رابطهٔ ۳ نشان داده می‌شوند:

$$\{FR_1^i, FR_2^i, \dots\} \in a_i \quad (۳)$$

در این رابطه مجموعهٔ FR نشان‌دهندهٔ الزامات کارکردی مرتبط با سناریوهای مختلف و i شمارندهٔ الزام کارکردی در مجموعه الزامات کارکردی مربوط به یک شاخص کلیدی عملکرد (a) می‌باشد.

مرحلهٔ ۳: هدف این مرحله ایجاد ارتباط لازم بین عدم قطعیت (اختلالات) و ملاحظات طراحی است. به‌عبارت دیگر مرحلهٔ سوم الزامات کارکردی را به پارمترهای فیزیکی و / یا متغیرهای طراحی تبدیل می‌کند. بدین‌منظور از ماتریس ساختار طراحی[۳۲] به‌عنوان تکنیک مدلسازی برای نمایش سیستم، نقاط تعامل و روابط بین اجزای استفاده خواهد شد. همچنین در این مرحله ارتباط بین متغیرهای درونی و بیرونی به‌منظور درک چگونگی تأثیر الزام کارکردی منتج از سناریوهای عملیاتی بر متغیرهای طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل کلی یک ماتریس ساختار طراحی برای یک سیستم با k متغیر طراحی و n مشخصهٔ کلیدی عملکرد به‌صورت شکل ۲ نمایش داده می‌شود. اعداد نمایش داده شده در این ماتریس بیانگر شدت ارتباط بین عناصر i و j می‌باشند [۱۲].



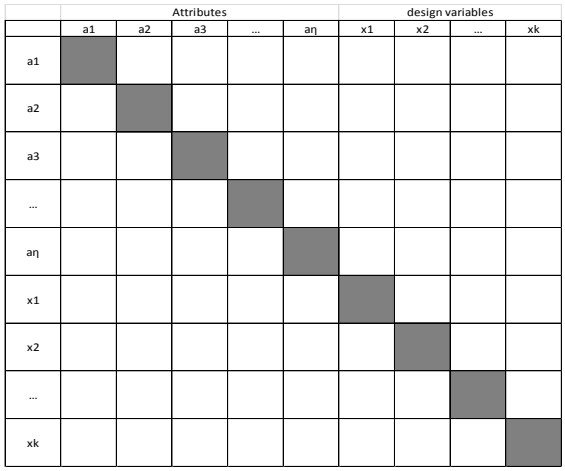
شکل ۱. نمونهٔ یک ماتریس ساختار

جدول ۳. امتیازدهی به احتمال وقوع سناریو

استراتژیک	ارزش سیستم	عملکرد	امتیاز
کمترین سطح اهمیت استراتژیک	هزینهٔ پایین / بازگشت بالا	عملکرد خیلی کم	۱
اهمیت استراتژیک محدود	هزینهٔ نسبتا کم / بازگشت نسبتا قابل توجه	عملکرد کوچک	۲
دارای سطح متوسط اهمیت استراژیک	هزینهٔ متوسط / ایجاد فناوری جدید	عملکرد متوسط	۳
جزئی مطلوب برای یک محیط عملیاتی بزرگتر	هزینهٔ بالا / اهمیت استراتژیک	عملکرد بالا	۴
جزئی لازم از یک محیط عملیاتی بزرگتر	هزینهٔ بسیار بالا / اهمیت استراتژیک بسیار زیاد	عملکرد بسیار بالا	۵

جدول ۴. امتیازدهی به شدت اثر سناریو

طول عمر	محیط عملیاتی	محیط ذینفعان	احتمال وقوع (درصد)	امتیاز
بسیار کوتاه	کاملا تعریف‌شده	ذینفع منفرد	۲۰–۰	۱
کوتاه	تعریف‌شده	ذینفعان یکپارچه	۴۰–۲۰	۲
متوسط	دارای مقداری عدم قطعیت	ذینفعان متمرکز	۶۰–۴۰	۳
طولانی	دارای عدم قطعیت بالا	ذینفعان غیرمتمرکز	۸۰–۶۰	۴
بسیار طولانی	محیط عملیاتی تعریف‌نشده و پیچیده	ذینفعان غیرمتمرکز بسیار گسترده	۱۰۰–۸۰	۵



شکل ۲. نمونهٔ یک ماتریس ساختار طراحی

مرحلهٔ ۴: در این مرحله با انجام تحلیل حساسیت ماتریس ساختار طراحی، به بررسی میزان حساسیت پارامترهای طراحی در برابر تغییرات صورت‌گرفته بر اثر اختلالات موجود در شرایط عدم قطعیت پرداخته خواهد شد. برای بردار طراحی X، sDSM[۳۳] یک ماتریس مربعی با k سطر و ستون خواهد بود که در آن مقادیر هر عنصر i و j بیانگر درصد تغییر در متغیر i متأثر از یک درصد تغییر در متغیر j می‌باشد. بنابراین میزان حساسیت متغیرهای طراحی به تغییر در الزامات کارکردی را می‌توان با استفاده از رابطه ۴ تعیین و ماتریس sDSM را تشکیل داد.

$$sDSM\ (i,j) = \left(dx_i^* / da_j\right)\left(a_j / x_i^*\right) \qquad (۴)$$

مرحلهٔ ۵: پس از اینکه ماتریس ساختار طراحی تکمیل شد، از یک الگوریتم قطاع‌بندی به‌منظور جداسازی المان‌های فیزیکی از سیستم که به‌واسطهٔ استفاده سیستم در محیط عملیاتی یا سناریوها تحت تأثیر قرار می‌گیرند استفاده خواهد شد. در این تحقیق از ترکیب دو مدل قطاع‌بندی به شرح ذیل استفاده می‌شود.

۱. استفاده از الگوریتم فازی به‌منظور قطاع‌بندی[۳۴] ماتریس ساختار طراحی توسعه‌یافته در مراحل قبل [۱۳]

۲. استفاده از تابع هدف مبتنی بر شاخص MDL [۳۵] به‌منظور بهینه‌سازی فرایند قطاع‌بندی [۱۴–۱۵]

این الگوریتم ترکیبی شامل چهار گام به شرح ذیل است:

در گام اول عضویت قطاع‌ها به‌صورت تصادفی صورت گرفته و سپس به‌گونه‌ای‌که مجموع عضویت یک عضو در کل قطاع‌ها یک شود، نرمال می‌شود. در گام دوم ارزش هر عضو در هر قطاع با استفاده از رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود.

$$PR(V_i) = (1-d) + d * \sum_{j=1}^{N} w_{ji} \frac{PR(V_j)}{\sum_{k=1}^{N} w_{jk}} \qquad (۵)$$

در این رابطه اوزان w_{ij} با مقیاس‌گذاری همسانی با مقادیر عضویت قطاع آنها و استفاده از رابطهٔ ۶ به‌دست می‌آید. همچنین d فاکتور تعدیل است که عموماً بین ۰/۸ و ۰/۹ معین می‌گردد.

$$w_{ij}^{m} = s_{ij} * p_i^m * p_j^m \qquad (۶)$$

که در آن w_{ij}^{m} وزن بین عنصر i و عنصر j در قطاع m، s_{ij} همسانی بین عنصر i و عنصر j و p_i^m و p_j^m ارزش نسبی عضویت عنصر i و عنصر j در قطاع m می‌باشد. برای مطالعهٔ بیشتر در خصوص محاسبهٔ همسانی بین عناصر و ارزش نسبی عضویت به مرجع [۱۳] رجوع شود. گام سوم شامل بروزرسانی ضریب ترکیب بر اساس مقادیر عضویت محاسبه شده در مرحلهٔ دوم بوده و نهایتاً چون تعداد قطاع‌های به‌دست آمده توسط سه مرحلهٔ فوق می‌تواند از یک تا Nn؛ یعنی تعداد عناصر در ماتریس ساختار طراحی، متغیر باشد مرحلهٔ چهارم به بهینه‌سازی تعداد قطاع‌ها می‌پردازد. این مرحله از یک تابع هدف بر اساس شاخص MDL برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند [۱۵]]. این رابطه را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} f_{DSM} = {} & (1-\alpha-\beta)(n_c \log n_n \\ & + \log n_n \sum_{i=1}^{n_c} cl_i) \\ & + \alpha([|S_1|(2\log n_n + 1)] \\ & + \beta([|S_2|(2\log n_n + 1)] \end{aligned} \qquad (۷)$$

که در آن n_c تعداد قطاع در ماتریس ساختار طراحی، n_n تعداد عناصر در ماتریس، cl_i تعداد عناصر قرار گرفته در قطاع i، و α و β عددی متغیر بین صفر و یک است. برای اطلاعات بیشتر در خصوص مدل قطاع‌بندی رجوع شود به منابع اشاره‌شده در توضیح مدل.

مرحلهٔ ۶: در این مرحله امتیازات مربوط به احتمال و اثر به‌دست آمده از مرحلهٔ ۱ با اطلاعات حساسیت به‌دست آمده در مرحلهٔ چهار در قالب ماتریس قطاع‌بندی شده ترکیب می‌شوند. این مرحله نگرشی جامع به نواحی در ساختار سیستم که تغییر یا الزامات کارکردی جدید بیشترین تأثیر را دارند ایجاد می‌نماید. شکل ۳ نمایی از ماتریس مذکور را نمایش می‌دهد.

مرحلهٔ ۷: در مرحلهٔ آخر شاخص زیست‌پذیری سیستم را می‌توان به‌صورت تفاضل حساسیت آن در شرایط عدم قطعیت از عدد یک و با استفاده از رابطهٔ ۸ محاسبه نمود.

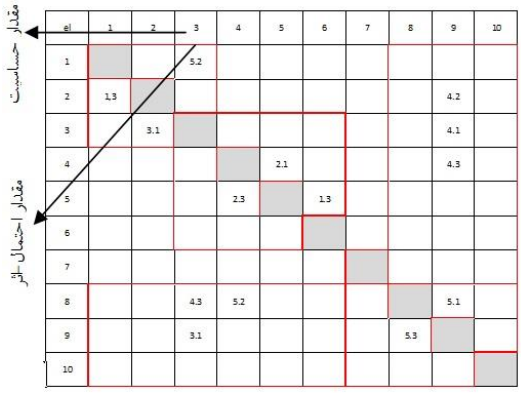
$$V = 1 - \frac{CSRV}{MSRV} \qquad (۸)$$

با توجه به اطلاعات کسب‌شده در مرحلهٔ ششم، حساسیت سیستم در شرایط عدم قطعیت را می‌توان از تقسیم حساسیت فعلی سیستم به حداکثر حساسیت امکان‌پذیر سیستم در مقابل سناریوهای عدم قطعیت محاسبه نمود. حساسیت فعلی سیستم از مجموع حاصلضرب مقادیر احتمال - اثر در مقدار حساسیت و از طرف دیگر حداکثر حساسیت امکان‌پذیر از جمع حاصلضرب حداکثر مقدار احتمال - اثر در حداکثر مقدار حساسیت برای المان‌های حساس به تغییرات و مطابق روابط ۹ و ۱۰ قابل محاسبه می‌باشند.

$$CSRV = \sum_{i=1}^{z} \sum_{j=1}^{z} L - O_{ij} * S_{ij} \qquad (۹)$$

$$MSRV = \max L - O * \max S * \#\ \text{sensitive elements} \qquad (۱۰)$$

که در آن $L\text{-}O_{ij}$ مقادیر احتمال – اثر مربوط به سطر i و ستون j و S_{ij} مقدار حساسیت المان i به المان j در ماتریس sDSM می باشند که در مراحل قبلی محاسبه شده‌اند.



شکل ۳. ترکیب امتیاز سناریوها با ماتریس sDSM

۴. مثال کاربردی

در این بخش کاربرد مدل ارائه‌شده با مثالی از یک ماهواره تصویربرداری با فناوری رادار روزنهٔ مصنوعی به‌عنوان یک سیستم

پیچیدهٔ مهندسی ارائه می‌شود. بدین‌منظور در ابتدا معماری یک ماهواره مفروض مدلسازی و میزان توانمندی آن در شرایط عدم قطعیت با استفاده از مدل ریاضی هفت‌مرحله‌ای ارائه‌شده اندازه‌گیری خواهد شد. سپس الگوها و ابتکارات مورد نظر جهت بهینه‌سازی طراحی بر اساس جداول ۱ و ۲ انتخاب و در معماری سیستم اعمال می‌گردد. شاخص زیست‌پذیری سیستم مجدداً بر اساس مدل ارائه‌شده محاسبه و کارایی استراتژی‌های اعمال‌شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

٤-١. مدلسازی یک ماهوارهٔ سار مفروض و ارزیابی شاخص زیست‌پذیری آن

در مرحلهٔ اول از مدلسازی سناریوی‌های مختلف مأموریتی به‌منظور توصیف عدم قطعیت سیستم مفروض در محیط عملیاتی مطابق جدول ۵ توسعه داده شده‌اند. سپس سناریوهای تعیین‌شده امتیازدهی شده و الزامات کارکردی برای هر سناریو تعیین شده است. نتایج مربوطه در شکل ۴ و جدول ۶ آورده شده است. حال می‌توان مجموعه‌ای از کارکردهای سیستم که بر مشخصات عملکردی سطح بالای سیستم مؤثر می‌باشند را با توصیف شاخص‌های کلیدی عملکرد تعیین نمود. هر سناریوی عملیاتی نیازمند یک یا چند مورد از مشخصه‌های سیستم به‌منظور پاسخگویی به نیازمندی‌های کارکردی جدید می‌باشد. به‌منظور ساده‌سازی، نیازمندی‌های کارکردی هر سناریو با مشخصهٔ سیستمی مرتبط با آن جایگزین و در جدول ۷ ارائه شده است.

در مرحلهٔ سوم ارتباط مشخصه‌های کلیدی عملکرد سیستم با متغیرهای طراحی تعیین و نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. سپس ماتریس توسعه‌یافته ساختار طراحی با استفاده از بلوک دیاگرام ماهواره مفروض مطابق شکل ۵ تشکیل شده است. به‌منظور دستیابی به داده‌های مورد نیاز جهت توسعهٔ این ماتریس پیاده‌سازی مرحلهٔ سوم و چهارم به‌صورت همزمان انجام شده است. در ابتدا یک فرایند تحلیل حساسیت با هدف کمی‌سازی میزان تغییر مورد نیاز در متغیرهای طراحی جهت تطابق با تغییر در الزامات کارکردی صورت پذیرفت. چون مدل یک ماهواره سار و روابط درون آن بسیار پیچیده می‌باشد، در این بخش فقط سه شاخص کلیدی عملکرد محموله تصویربرداری ماهواره برای تحلیل مد نظر قرارداده شده‌اند (سناریو ۲،۱ و ۳ که مؤثر بر شاخص‌های کلیدی عملکردی ۱، ۲ و ۵ می‌باشند). سپس ارتباط بین شاخص‌های کلیدی عملکرد با استفاده از رابطه‌های ریاضی و ارتباطات فیزیکی استخراج گردید. این ارتباطات، که در شکل ۶ نمایش داده شده، با استفاده از رابطهٔ ۴ در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته در خصوص هر یک از شاخصه‌های کلیدی عملکردی به‌ترتیب در جداول ۹، ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. در صورتی که مقادیر حساسیت‌های به‌دست آمده به‌ترتیب نزولی مرتب شده باشند، به بالاترین مقادیر آنها بیشترین امتیاز حساسیت (در این تحقیق مقدار ۲) و به آنهایی که در پایین لیست قرار می‌گیرند کمترین مقدار حساسیت (در این تحقیق مقدار ۰/۵) و به سایر موارد میانی نیز مقدار ۱ تعلق گرفته و از این امتیازات در راستای تکمیل ماتریس sDSM استفاده شده است. در مرحلهٔ پنجم، ماتریس sDSM حاصل با استفاده از مدل ترکیبی توضیح داده شده و نرم‌افزار متلب قطاع‌بندی شده است. در انجام فرایند قطاع‌بندی بر اساس پیشنهادات صورت گرفته در سوابق تحقیق مقدار ضرایب α و β برابر با یک‌سوم در نظر گرفته شده است [۱۶]. نتیجهٔ قطاع‌بندی در شکل ۷ قابل مشاهده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این ماتریس دارای ۱۰ قطاع است که از بین آنها قطاع ۴ و ۵ نواحی حساس به سناریوهای ماموریتی می‌باشند. چون قطاع ۹ هیچ متغیر طراحی و متعاقبا هیچ المان فیزیکی را در بر نگرفته است، بر اساس معماری سیستم می‌توان تفسیر نمود که سناریو ۳ هیچ تأثیری بر پارامترهای سیستم نداشته و عرض نوار تصویربرداری می‌تواند بدون ایجاد تغییر در مشخصه‌های فیزیکی سیستم در حین عملیات تغییر نماید. نهایتاً در مرحلهٔ ۶ و ۷ با ترکیب مقادیر احتمال – اثر به‌دست آمده در مرحله اول با اطلاعات حساسیت بدست آمده از مرحلهٔ ۴ روی ماتریس قطاع‌بندی شده حاصل در مرحلهٔ ۶، مقدار شاخص زیست‌پذیری سیستم مورد نظر با استفاده از رابطه ۸ مقدار ۰/۴۷ معین شد. این مقدار برای زیست‌پذیری سیستم نشان‌دهندهٔ این است که سیستم به اندازه قابل توجهی جهت عملیات در شرایط عدم قطعیت قدرتمند نبوده و مهندسان و طراحان مربوطه می‌توانند با به‌کارگیری اصول طراحی مناسب، به بهینه‌سازی معماری و طرح سیستم پرداخته تا مقدار شاخص زیست‌پذیری تا حد ممکن بهبود یابد. گفتنی است به‌منظور بهینه‌سازی معماری و طرح سیستم، محدودیت‌هایی همانند هزینه و زمان نیز باید در تابع هدف مد نظر قرار گیرند که از حیطهٔ موضوع این تحقیق خارج می‌باشد.

جدول ۵. سناریوهای شناسایی‌شدهٔ امتیادهی به آنها

ردیف	توصیف سناریو	احتمال	اثر	امتیاز
۱	درخواست دقت تفکیک مکانی بهتر تصویر	۵	۵	۲۵
۲	درخواست کیفیت بهتر تصویر	۱	۲	۲
۳	نیاز به عرض نوار تصویربرداری بیشتر	۳	۴	۱۲
۴	نیاز به طول زمان تصویربرداری بیشتر در هر مدار	۳	۳	۹

جدول ۶. الزامات کارکردی برای هر سناریو

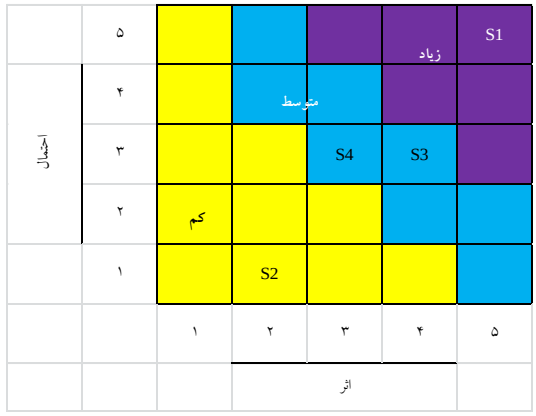
شمارهٔ سناریو	الزامات کارکردی مرتبط	کد الزام
۱	سامانه باید بتواند قابلیت مانور جهت انجام تصویربرداری به‌صورت spotlight را داشته باشد	[FR.1.1]
	زیرسیستم تأمین توان باید توان الکتریکی لازم را برای بهتر نمودن قدرت تفکیک مکانی تامین نماید	[FR.1.2]
	سیستم باید حافظه کافی جهت ذخیرسازی حجم داده حاصل از تصویربرداری را داشته باشد	[FR.1.3]
۳	بیم آنتن باید به منظور افزایش پهنای تصویربرداری افزایش یابد	[FR.3.1]
	سیستم توان باید بتواند انرژی الکتریکی مورد نیاز را در خصوص افزایش عرض نوار فراهم نماید	[FR.3.2]
۴	نرخ ارسال داده باید بتواند از حجم بالای داده تصویر ایجاد شده پشتیبانی نماید	[FR.4.1]
	تجهیزات ایستگاه های زمینی باید نرخ بالای داده را پشتیبانی نمایند	[FR.4.2]

جدول ۷. الزامات کارکردی برای هر سناریو

شاخص کلیدی عملکرد	شمارهٔ شاخص کلیدی عملکرد	الزام کارکردی	سناریو
رزولوشن برد	a1	FR.1.1, FR.1.2, FR.1.3	۱
نرخ پاسخ ضربه	a2		۲
به موقع بودن	a3	FR.4.1, FR.4.2	۳
موقعیت جغرافیایی	a4		۴
عرض نوار تصویر	a5	FR.3.1, FR.3.2	

جدول ۸. متغیرهای طراحی مرتبط با شاخص‌های کلیدی عملکرد

ردیف	شاخص کلیدی عملکرد	متغیرهای طراحی
۱	دقت تفکیک مکانی[۳۶]	پهنای باند، زاویه برخورد، توان، نرخ داده
۲	نرخ پاسخ ضربه[۳۷]	بهره آنتن، حداکثر نرخ لب جانبی[۳۸]، نرخ تجمیعی لب جانبی[۳۹]
۳	عرض نوار تصویر[۴۰]	زاویه برخورد [۴۱]، عرض آنتن، طول آنتن
۴	به موقع بودن[۴۲]	زمان بازدید مجدد[۴۳]، ارتفاع مداری، شیب مداری[۴۴]، دسترسی به ایستگاه‌های زمینی، نرخ ارسال داده، نوع آنتن، بهره آنتن
۵	موقعیت جغرافیایی[۴۵]	دقت نشانه‌روی[۴۶]



شکل ۴. ماتریس رتبه‌بندی سناریوهای تعیین‌شده

جدول ۹. تحلیل حساسیت برای دقت تفکیک مکانی

اولویت	قدرت تفکیک مکانی		مقدار پارامتر طراحی		پارامتر طراحی / شاخص کلیدی عملکرد
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	
۲	۵۶	۱۵	۸	۳۰	پهنای باند
۴	۶۶	۴۵	۲۰	۳۰	زاویه برخورد (درجه)
۳	۶۴	۳۲	۱۰۰	۲۰۰	توان (وات)
۱	۹۰	۳۰	۱۰۰	۳۰۰	نرخ داده (مگابیت بر ثانیه)

جدول ۱۰. تحلیل حساسیت برای عرض نوار تصویر

اولویت	عرض نوار تصویر		مقدار پارامتر طراحی		پارامتر طراحی / شاخص کلیدی عملکرد
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	
۱	۲۰	۲۵	۲۰	۳۰	زاویه برخورد
۱	۲۰	۲۵	۰،۹	۱،۱	عرض آنتن (متر)
۲	۱۸	۲۲،۷	۴۰۰	۵۰۰	ارتفاع (کیلومتر)

جدول ۱۱. تحلیل حساسیت برای کیفیت تصویر (نرخ پاسخ ضربه)

اولویت	کیفیت تصویر		مقدار پارامتر طراحی		پارامتر طراحی / شاخص کلیدی عملکرد
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	
۲	−۱۲۱،۴	−۱۱۹،۴	−۶،۷۵	۶،۳۸	حداکثر نرخ لب جانبی (dB)
۳	−۱۲۲،۴	−۱۲۱،۴	−۹،۹۵	−۹،۳	نرخ تجمعی لب جانبی (dB)
۱	−۱۲۴،۴	−۱۲۱،۴	۳۸	۴۱	بهره (dB)

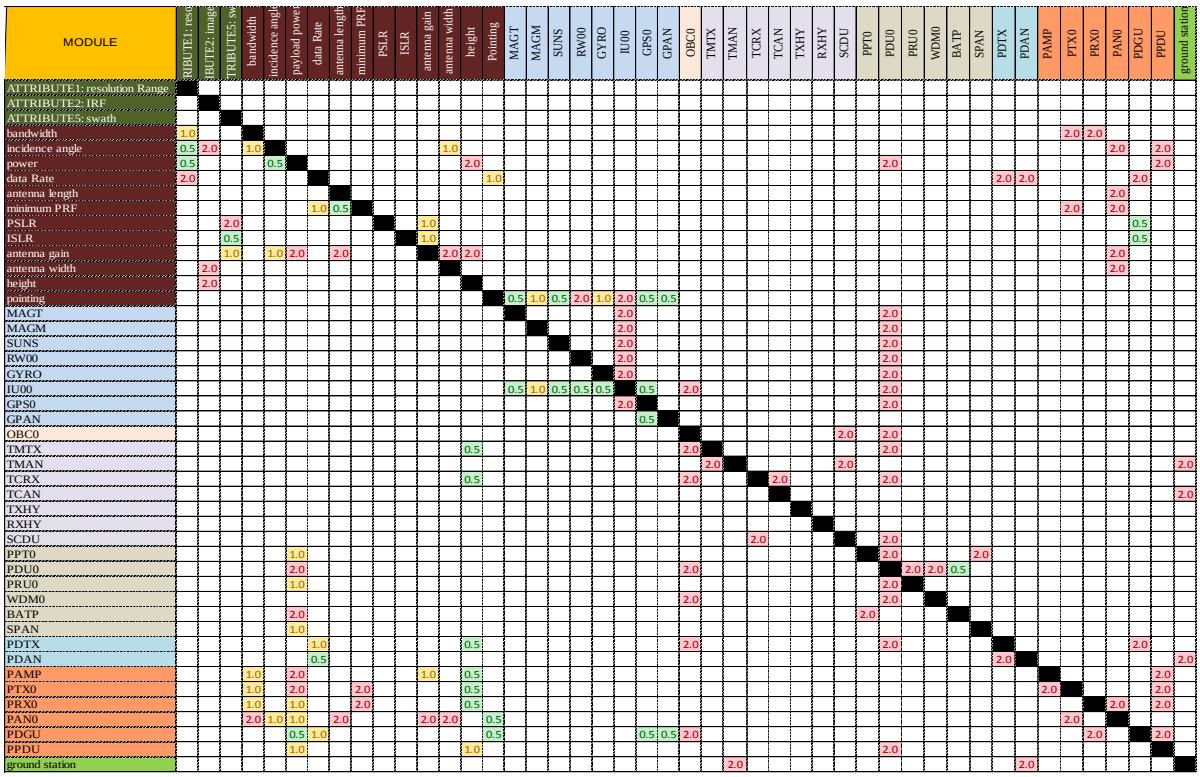
٤-۲. پیاده‌سازی راه‌کارها و ابتکارات طراحی

در این مرحله بر اساس ماتریس قطاع بندی‌شده حاصل از مرحلهٔ قبل و با استفاده از راه‌کارها و ابتکارات طراحی ارائه‌شده در جداول ۱ و ۲، گزینه‌های ذیل برای اعمال در معماری سیستم به‌منظور افزایش احتمال کارکرد مؤثر سیستم در مواجهه با اختلالات ناشی از شرایط عدم قطعیت انتخاب گردیدند. برای شاخص عملکردی شمارهٔ ۱ (تفکیک مکانی برد) که در ارتباط با سناریو اختلالات ۱ می‌باشد تصمیم گرفته شد تا:

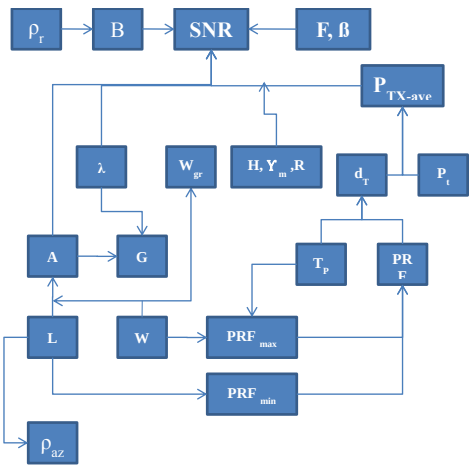
۱. پردازندهٔ واحد دیجیتال با یک پردازنده با بازدهی بالاتر (۳۰ درصد) جایگزین گردد
۲. بر اساس راه‌کار طراحی حاشیه، میزان حافظهٔ محموله تصویربرداری تا ۱۵۰ درصد افزایش یابد. این تغییر واحد دیجیتال محموله را قادر می‌سازد تا حجم بیشتری از اطلاعات را که ناشی از قدرت تفکیک مکانی بهتر می‌باشد ذخیره نماید
۳. افزایش قابلیت واحد ارسال داده محموله جهت ارسال حجم بیشتر اطلاعات به ایستگاه‌های زمینی

برای شاخص عملکردی ۲ (IRF) که در ارتباط با سناریوی ۲ می‌باشد تصمیم گرفته شد تا طراحی آنتن محموله به نوعی بهبود یابد که با افزایش سطح لوب جانبی قابلیت افزایش IRF فراهم گردد. پس از تعیین گزینه‌های لازم جهت اعمال در طراحی، به‌منظور ارزیابی تأثیر این راه‌کارها بر میزان توانمندی سیستم، مراحل ۳ تا ۷ مدل ارائه شده باید بر اساس ساختار جدید مجدداً تکرار شود. بدین‌منظور ماتریس ساختار طراحی بر اساس تغییرات در نظر گرفته شده اصلاح گردیده، فرایند تحلیل حساسیت مجدداً انجام شده و پس از انجام فرایند قطاع‌بندی شاخص زیست‌پذیری مجدداً مورد محاسبه قرار گرفته است. در این قسمت به‌منظور رعایت اختصار صرفاً به ارائه نتایج نهایی فرایند پرداخته شده و ماتریس قطاع‌بندی شده در شکل ۸ آورده شده است. پس از محاسبهٔ مجدد مقدار شاخص زیست‌پذیری نتایج نشان می‌دهد که

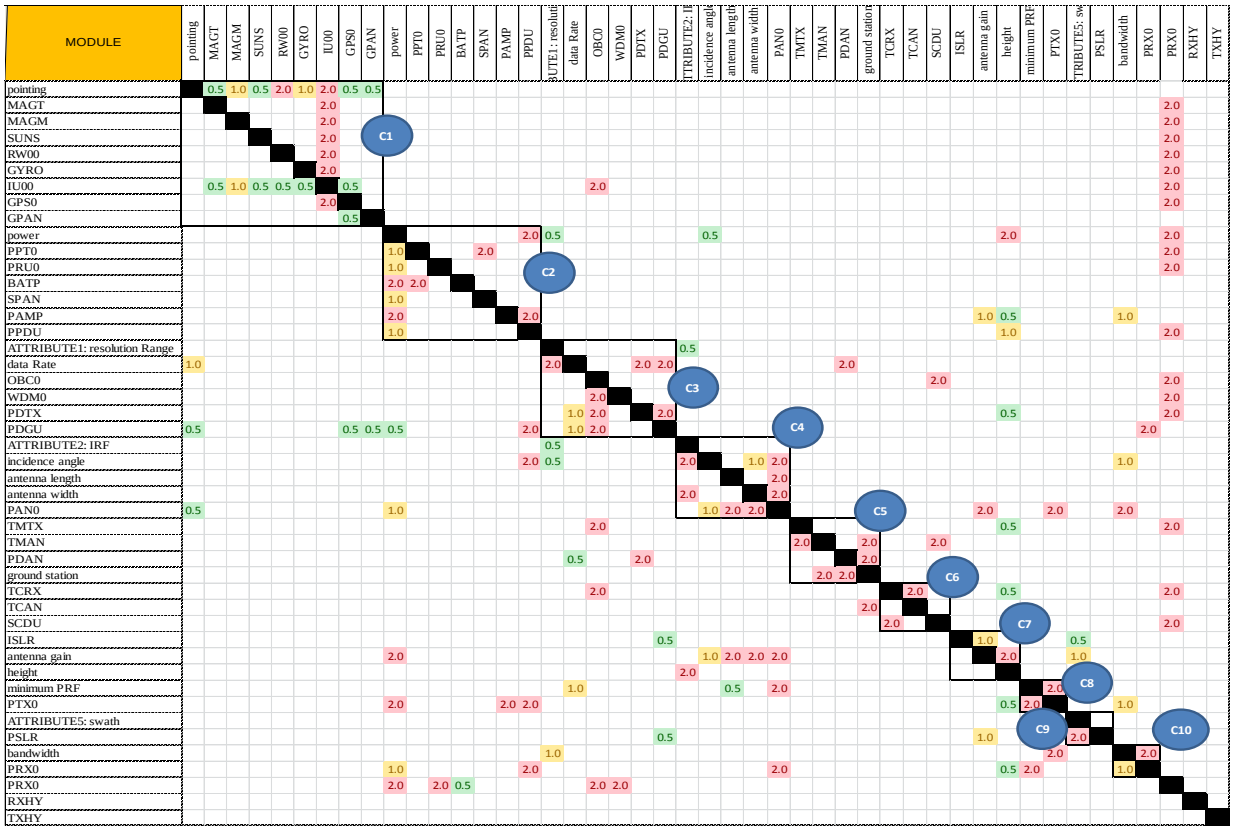
به‌دلیل اعمال راه‌کارهای درنظر گرفته شده در معماری سیستم، توانمندی سیستم در مواجهه با اختلالات از ۰/۴۷ به ۰/۵۵ افزایش یافته است که این امر نشان‌دهندهٔ اثربخشی راه‌کارهای در نظر گرفته شده می‌باشد. با مقایسهٔ ماتریس‌های قطاع‌بندی شده قبل و بعد از اعمال راه‌کارهای طراحی (شکل ۷ و ۸) می‌توان نتایج را بدین‌صورت ذیل تحلیل نمود که شاخص عملکردی ۱ به قطاع ۲ منتقل شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت پس از اعمال راه‌کارهای طراحی، وابستگی بین قدرت تفکیک در راستای برد و المان‌های موجود در قطاع ۳ وجود نخواهد داشت. از سوی دیگر قطاع ۲ در جدول ۷ نشان می‌دهد که برای توانمندی بیشتر سیستم که منتج از شاخص عملکردی ۱ می‌باشد، باید بر ارتباط بین قدرت تفکیک مکانی و پارامترهای تامین توان (انرژی) تمرکز نموده و راه‌کارها و ابتکارات مناسب را در این‌خصوص به سیستم اعمال نمود. قطاع ۴ در شکل ۷ نشان می‌دهد که هرچند بهبود در طراحی آنتن منجر به کاهش حساسیت سیستم به سناریو ۲ شده است، اما وابستگی بین شاخص عملکردی ۲ و المان های قطاع ۴ همچنان وجود دارد. لذا قابلیت سیستم مفروض همچنان می‌تواند با اعمال راه‌کارها و ابتکارات طراحی مناسب بهبود یابد.



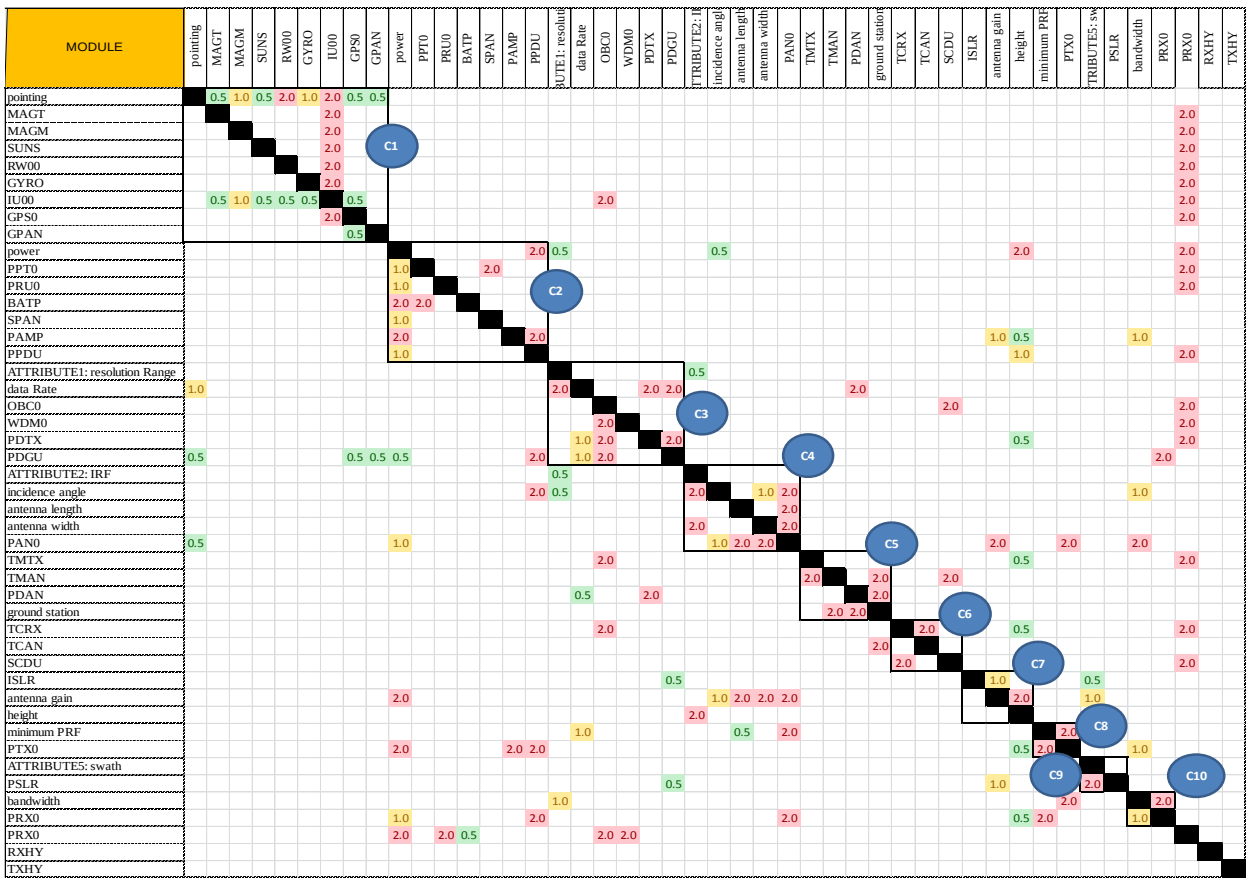
شکل ۵. ماتریس sDSM حاصل



شکل ۶. ارتباط بین پارامترهای طراحی



شکل ۷. ماتریس sDSM قطاع‌بندی شده برای ماهواره سار مفروض



شکل ۸. ماتریس sDSM قطاع بندی شده پس از اعمال راه‌کارهای طراحی

۵. نتیجه‌گیری

سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی عموماً در شرایط عدم قطعیت به‌کار گرفته می‌شوند و لذا با اختلالات گوناگونی مواجه‌اند. چون این اختلالات می‌تواند به‌شدت بر عملکرد سیستم‌ها تأثیر گذاشته و متعاقباً ارزش فراهم شده برای ذینفعانش را دستخوش تغییرات چشمگیر نماید، طراحان سیستم‌های پیچیده به‌دنبال راه‌کارهایی هستند که با استفاده از آنها بتوانند توانمندی سیستم جهت عملیات در شرایط عدم قطعیت را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهند. در این پژوهش پس از بررسی سوابق تحقیقات انجام‌شده در این‌خصوص، راه‌کارهای قابل استفاده به‌منظور افزایش توانمندی سیستم‌ها در مواجهه با اختلالات موجود در شرایط عدم قطعیت در دو قالب راه‌کارهای طراحی و ابتکارات طراحی ارائه شد. همچنین به‌منظور ارزیابی میزان این توانمندی و بررسی و تحلیل میزان اثر راه‌کارها و ابتکارات طراحی بر توانمندی سیستم‌ها یک مدل ریاضی هفت مرحله‌ای ارائه شد. مدل ارائه‌شده به تحلیل چگونگی تأثیر عدم قطعیت بر مشخصه‌های فیزیکی و عملکردی سیستم پرداخته و میزان توانمندی سیستم را با تعیین مناطقی از آن که بیشتر تحت تاثیر عدم قطعیت قرار می‌گیرند محاسبه می‌نماید. به‌منظور بررسی کاربردی بودن مدل پیشنهادی یک ماهواره سار به‌عنوان یک سیستم پیچیدهٔ مهندسی مدلسازی و میزان توانمندی آن در شرایط عدم قطعیت بر اساس سناریوهای تعیین شده محاسبه شد. سپس راه‌کارها و ابتکارات طراحی به‌منظور افزایش توانمندی سیستم در مواجهه با شرایط عدم قطعیت تعیین و در معماری سیستم اعمال گردید. با مدلسازی و محاسبهٔ مجدد توانمندی سیستم با معماری جدید مشخص شد که شاخص توانمندی سیستم به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و اثربخشی راه‌کارهای انتخابی مورد تأیید قرار گرفت. گفتنی است به‌منظور حصول اطمینان از منطقی بودن مدل تمامی ورودی‌ها، مراحل انجام فرایند، مدلسازی و محاسبات و همچنین خروجی‌های مدل توسط متخصصان مربوطه مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است. نوآوری‌های این پژوهش بر اساس موارد ارائه‌شده در قسمت‌های قبل را می‌توان به‌صورت ذیل برشمرد:

۱. معرفی زیست‌پذیری به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی توانمندی سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی تحت شرایط عدم قطعیت
۲. ارائهٔ یک مدل ریاضی برای اولین‌بار جهت اندازه‌گیری شاخص زیست‌پذیری و همچنین ارزیابی تغییرات مهندسی که به‌منظور بهبود عملکرد سیستم‌ها صورت می‌پذیرند
۳. توسعهٔ یک مدل سه سطحی از ماتریس ساختار طراحی و مرتبط نمودن عدم قطعیت به عملکرد و معماری یک سیستم پیچیدهٔ مهندسی

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود مدل پیشنهادی با استفاده از مثال‌های دیگری از سیستم‌های پیچیدهٔ مهندسی اجرا و نتایج حاصل بررسی شود.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله مراتب قدردانی خود را از همهٔ عزیزانی که ما را در انجام این تحقیق یاری دادند اعلام می‌داریم.

۵. مآخذ

[1] R. deNeufville, S. Scholtes, *Flexibility in Engineering Design*, Cambridge, MA: MIT Press, 2011.

[2] Y. Haimes, R*isk Modeling, Assessment and Management*, Vol. XIII, New York: Wiley, 1998.

[3] M. K.Adams, *Non-functional Requirements in Systems Analysis and Design*, Springer, 2015.

[4] B. Mekdeci, Managing the impact of change through survivability and pliability to achieve viable systems of systems, Doctor of Philosophy Dissertation, Engineering Systems Division, MIT, 2013.

[5] K. Beck, R. Crocker, G. Meszaros, J. Vlissides, J. Coplien, L. Dominick, Industrial experience with design patterns, t*he 8th international conference on Software engineering*, 1996.

[6] E. Rechtin, The art of systems architecting. Spectrum, *IEEE*, Vol. 29, No. 10, pp.66-69, 1992.

[7] M. G. Richards, Multi-Attribute Tradespace Exploration for Survivability, PhD Thesis, MIT, Cambridge, MA, 2009.

[8] S. Jackson, Resilience Principles for Human-Made Systems, Systems Engineering, (Draft submitted to the INCOSE Resilience Working Group), 2012.

[9] N. Ricci, E. M. Fitzgerald, M. A. Ross, H. D. Rhodes, Architecting Systems of Systems with Ilities: An Overview of the SAI Method, *Procedia Computer Science*, Vol. 28, pp. 322-331, 2014.

[10] G. J. Pierce, Designing flexible engineering systems utilizing embedded architecture options, PhD Thesis, Vanderbilt University, 2010.

[11] J. Bartolomei, Qualitative Knowledge Construction for Engineering Systems: Extending the Design Structure Matrix Methodology in Scope and Procedure, Engineering Systems. MIT: Cambridge, MA, 2007.

[12] R. E. Thebeau, System Design and Management Program. Knowledge management of system interfaces and interactions from product development processes, 2007.

[13] A. Skabar, K. Abdalgader, Clustering Sentence-Level Text Using a Novel Fuzzy Relational Clustering Algorithm, *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, Vol. 25, No.1, 2013.

[14] J. Rissanen, Modeling by shortest data description, *Automatica*, Vol. 14, No.5, pp. 465-471, 1978.

[15] P. D. Grünwald, J. Rissanen, *The Minimum Description Length Principle*, MIT Press. 2007.

[16] T. L. Yu, A. A. Yassine, D. E. Goldberg, An Information Theoretic Method for Developing Modular Architectures Using Genetic Algorithms, *Research in Engineering Design*, Vol. 18, No. 2, pp. 91-109, 2007.

پی‌نوشت

1. Adams
2. Mekdeci
3. synthetic aperture radar (SAR)
4. margin
5. mobility
6. camouflage
7. containment
8. separation
9. deterrence
10. maintenance
11. fail-safe
12. hardness
13. redundancy
14. functional redundancy
15. Feed
16. deflection
17. diversion
18. vigilance
19. flag
20. authentication
21. throttling
22. down-clock
23. failure mode reduction
24. layered defense
25. complexity avoidance
26. independent review
27. least privileges
28. pliability
29. reversion
30. stable intermediate instances
31. contingency
32. design structure matrix (DSM).
33. sensitivity DSM
34. clustering
35. minimum description length
36. resolution range
37. IRF
38. peak sidelobe ratio (PSLR)
39. integrated sidelobe ratio (ISLR)
40. Swath
41. incident angle
42. timeliness
43. revisit time
44. inclination
45. geo location
46. pointing accuracy