

طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان یک سامانه فضایی در فاز طراحی مفهومی

حمیدرضا علی محمدی^۱ و حسن ناصح^۲

۱- دکتر، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران، hataf1353@gmail.com
۲- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران، hnaseh@ari.ac.ir

چکیده

دستیابی به فناوری‌های نوین با قابلیت اطمینان بالا، همراه با کاهش هزینه و زمان چرخه طراحی، یکی از مهمترین چالش‌های صنایع پیچیده می‌باشد. در این مقاله به طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان یک سامانه فضایی در فاز طراحی مفهومی پرداخته می‌شود. بطور معمول در طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، هشت گام وجود دارد، اولین گام، طرح‌ریزی و هفت گام بعدی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان موتور سوخت مایع الکتروپمپ عبارتند از: تعیین مدهای شکست؛ مدل سازی قابلیت اطمینان؛ تخصیص قابلیت اطمینان؛ انتشار عدم قطعیت؛ پیاده‌سازی روش انتخابی در تحلیل قابلیت اطمینان؛ پیش‌بینی قابلیت اطمینان و ارزیابی قابلیت اطمینان می‌باشد. از این رو در این پژوهش نحوه تحقق و گام‌های پیاده‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان در فاز طراحی مفهومی یک سامانه فضایی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: محصولات پیچیده، سامانه فضایی، قابلیت اطمینان، گام‌های پیاده‌سازی، طراحی مفهومی.

نحوه تحقق و پیاده‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان

مقدمه

همان‌طور که در شکل (۱) گام‌های پیاده‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان در فاز طراحی مفهومی نشان داده شده است. بطور معمول در بهینه‌سازی بر مبنای قابلیت اطمینان، هشت گام وجود دارد اولین گام، طرح‌ریزی و هفت گام بعدی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان موتور سوخت مایع الکتروپمپ عبارتند از: تعیین مدهای شکست؛ مدل سازی قابلیت اطمینان؛ تخصیص قابلیت اطمینان؛ انتشار عدم قطعیت؛ پیاده‌سازی روش انتخابی در تحلیل قابلیت اطمینان؛ پیش‌بینی قابلیت اطمینان و ارزیابی قابلیت اطمینان می‌باشد. در ادامه، به معرفی گام‌ها پرداخته می‌شود.

از رویکردهای نوین موثر بر طراحی محصولات پیچیده، می‌توان به مهندسی سیستم‌ها، بهینه‌سازی چند موضوعی، طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، کاهش هزینه و رویکرد هیبریدی که خود دربرگیرنده رویکردهای دیگر است، اشاره داشت [۱]. از منظر دیگر، دستیابی به فناوری‌های نوین با قابلیت اطمینان بالا، همراه با کاهش هزینه و زمان چرخه طراحی، یکی از مهمترین چالش‌های صنایع پیچیده می‌باشد [۳و۲].

در طراحی سنتی به موضوع قابلیت اطمینان در فازهای ساخت به بعد آن هم با رویکرد تکنیک محور پرداخته شده است. این در حالی است که در طراحی مدرن از فاز طراحی مفهومی به موضوع قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. در این پژوهش، گام‌های پیاده‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان در فاز طراحی مفهومی آورده شده است.

FMEA زمان اجرای آن است. این تکنیک برای آن طرح‌ریزی شده که یک اقدام قبل از واقعه باشد، نه یک تمرین بعد از آشکار شدن مشکلات. به بیانی دیگر، یکی از تفاوت‌های اساسی FMEA با سایر تکنیک‌های کیفی این است که FMEA یک اقدام کنشی و پیشگیرانه است، نه واکنشی. در بسیاری از موارد وقتی با مشکلی مواجه می‌شویم، ممکن است برای حذف آن اقدامات اصلاحی تعریف و اجرا شود. این اقدامات، واکنشی در برابر آنچه اتفاق افتاده است. در چنین مواردی حذف همیشگی مشکل، به هزینه و منابع زیاد نیاز دارد، زیرا حرکت از وضعیت موجود به سمت شرایط بهینه اینرسی زیادی خواهد داشت، اما در اجرای FMEA با پیش‌بینی مشکلات بالقوه و محاسبه میزان ریسک‌پذیری آن‌ها، اقداماتی در جهت حذف و یا کاهش میزان وقوع آن‌ها تعریف و اجرا می‌شود. این برخورد پیشگیرانه کنشی است در برابر آنچه ممکن است در آینده رخ دهد و مسلماً اعمال اقدامات اصلاحی در مراحل اولیه طراحی محصول یا فرایند، هزینه و زمان بسیار کمتری در بر خواهد داشت. از جمله کاربردهای FMEA در حین فرایند طراحی سیستمی جدید، محصولی جدید و یا فرایندی جدید.

پیش‌بینی مدهای شکست با استفاده از قیود طراحی

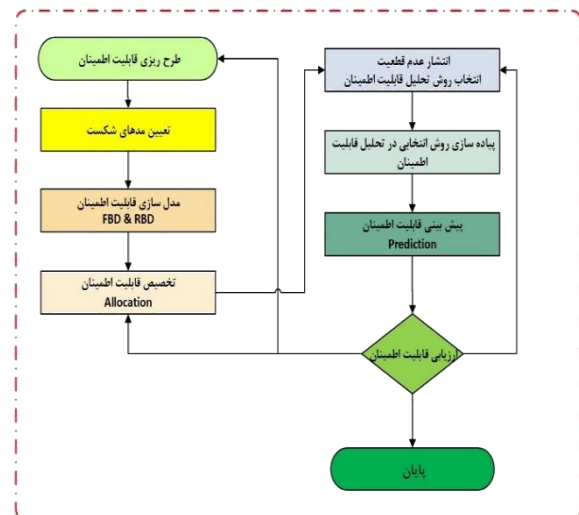
رویکرد دوم در شناسایی مدهای شکست در فاز طراحی مفهومی، شناسایی قیود طراحی است. قیودا توابعی هستند که روابط میان متغیرها را نشان می‌دهد و از این طریق، مقادیر مجاز برای متغیرها مشخص می‌شود. به عنوان نمونه در فرایند تولید، مقدار منابع مصرف شده نمی‌تواند از مقدار منابع در دسترس فراتر برود. در طراحی هر سامانه‌ای تعداد و سختی قیود به فاز طراحی و پیشرفت آن بستگی دارد. با پیشرفت فرایند طراحی، طراح با قیود سخت‌گیرانه‌تری مواجه خواهد شد. در مرحله طراحی مفهومی تنها قیود مهم در نظر گرفته مهم در نظر گرفته می‌شود و با پیشرفت تدریجی طرح، سایر قیود نیز وارد مسئله می‌شود. برخی از مهم‌ترین قیودی که برای پیش‌رانش می‌تواند در نظر گرفته شود، عبارتند از: هزینه، هندسه و سازه.

گام سوم: مدل‌سازی قابلیت اطمینان الکترونی

در این گام ابتدا به معرفی بلوک دیاگرام عملکردی و مزیت آن پرداخته و در ادامه، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان الکترونی را معرفی می‌کنیم.

بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان الکترونی

سامانه پیش‌ران الکترونی که از هشت زیر مجموعه تشکیل شده است؛ برای کارکرد درست، بایستی کلیه زیرمجموعه‌ها مأموریت خود



شکل ۱: الگوریتم طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان پیش‌رانش الکترونی

گام اول: طرح‌ریزی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان

اولین گام در طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، طرح ریزی قابلیت اطمینان می‌باشد. بطور معمول در این گام، گام‌های بعدی فرآیند، طرح ریزی می‌شود. همچنین در این گام فعالیت‌هایی نظیر: تشخیص نوع عدم قطعیت در متغیرها، نوع متغیر و نوع توزیع انجام شود.

در طراحی موتور سوخت مایع الکترونی، منابع متعددی از عدم قطعیت‌ها وجود دارد و طبقه بندی این منابع متفاوت هستند. در زمینه ی مدل‌سازی موتور سوخت مایع الکترونی، عدم قطعیت‌ها می‌تواند به دو نوع عدم قطعیت تصادفی و شناختی تقسیم شوند.

گام دوم: تعیین مدهای شکست

برای شناسایی مدهای شکست یک سیستم رویکرد‌های مختلفی وجود دارد. رویکرد بهره‌گیری از تکنیک FMEA، رویکرد شناسایی قیود طراحی، رویکرد بهره‌گیری از بانک درس آموخته‌ها، رویکرد بهره‌گیری از تجربیات خبرگان، ... در این پژوهش ضمن معرفی تکنیک FMEA، با توجه به فاز طراحی مفهومی، از رویکرد شناسایی قیود طراحی استفاده شده است.

پیش‌بینی مدهای شکست با استفاده از FMEA^۱

تحلیل FMEA ابزاری است که با کمترین ریسک، برای پیش‌بینی مدهای شکست در مراحل طراحی و توسعه محصولات، فرایندها و خدمات در سازمان به کار گرفته می‌شود. یکی از عوامل موفقیت

^۱Failure Modes & Effects Analysis

شدن کلیه الزامات سیستمی مورد نظر اطمینان حاصل نماید. بطور معمول برای تخصیص قابلیت اطمینان سه روش پیشنهاد شده است: تخصیص مساوی؛ تخصیص وزنی و تخصیص مبتنی بر بهینه سازی هزینه. در ادامه، به بررسی هر یک از روش ها می پردازیم:

تخصیص مساوی: در بین این سه روش، ساده ترین حالت تخصیص مساوی قابلیت اطمینان است. بطوری که قابلیت اطمینان را به طور یکنواخت بین همه زیر سیستم ها توزیع می کند. به عنوان مثال، فرض کنید یک سیستم با پنج جزء به صورت سری برای قابلیت اطمینان ۹۰٪ هدف گذاری شده است. تخصیص یکنواخت قابلیت اطمینان به همه اجزا مستلزم آن است که هر جزء دارای قابلیت اطمینان ۹۸٪ باشد. با وجود این که محاسبه این روش تخصیص آسان است، اما معمولاً بهترین راه برای تخصیص قابلیت اطمینان برای یک سیستم نیست.

تخصیص وزنی: در این روش به هر زیر سیستم وزنی را تخصیص می دهیم. البته به زیر سیستمی که اهمیت بالاتری دارد، وزن بیشتر اختصاص داده می شود، بطوری که مجموع وزن ها همانند رابطه ی زیر، برابر با یک باشد

$$R_{sys} = \sum_{i=1}^m w_i(x) \cdot R_i(x) = w^T(x) \cdot R(x) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m w_i(x) = 1$$

تخصیص مبتنی بر بهینه سازی هزینه: روش بهینه تخصیص قابلیت اطمینان، هزینه یا پیچیدگی نسبی زیرسیستم ها برای بهبود قابلیت اطمینان را در نظر می گیرد. فرآیند بهینه سازی بر مبنای قابلیت اطمینان با توسعه مدلی که عملکرد کل سیستم را نشان می دهد، آغاز می شود. این فرآیند، با ایجاد یک بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم که روابط قابلیت اطمینان اجزای سیستم را نشان می دهد، شروع می شود. از این مدل می توان قابلیت اطمینان سیستم در اثر تغییرات زیر سیستم های مختلف را در کنار هزینه هایی که در فرآیند ایجاد آن اصلاحات متحمل می شود، تخمین زد و در نظر گرفت.

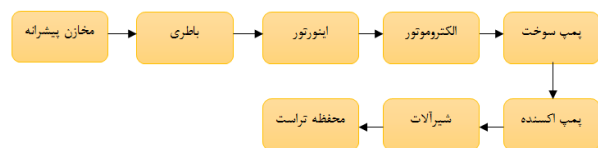
در این پژوهش، از روش نخست برای تخصیص قابلیت اطمینان به زیر سیستم ها استفاده شده است. شاخص های تخصیصی قابلیت اطمینان به زیر سیستم ها مطابق با جدول (۱) می باشد. با توجه به سری بودن عملکرد زیر سیستم ها در سامانه پیشران الکتروپمپ، قابلیت اطمینان کل سامانه، مطابق (۲) از حاصل ضرب کل اجزا حاصل می شود.

$$R_{epfs} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot R_7 \cdot R_8 \quad (2)$$

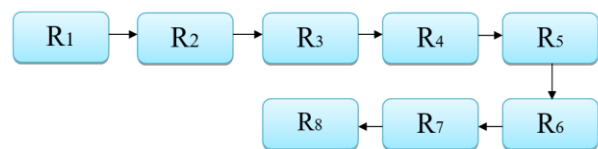
از طرفی، با توجه به این که حامل فضایی مورد نظر، از منظر کلاس در دسته سبک قرار دارد؛ لذا، در جدول (۲) قابلیت اطمینان ۱۰ ماهواره

را به درستی انجام دهند. اگر مأموریت هر یک از زیر مجموعه با شکست مواجه شود، مأموریت موتور با شکست مواجه خواهد شد. بنابراین، در تشریح نمودار جعبه ای قابلیت اطمینان سامانه پیشران الکتروپمپ زیرمجموعه ها باید به صورت سری در کنار هم قرار بگیرند. مدل ریاضی قابلیت اطمینان سیستم مینا از حاصل ضرب قابلیت اطمینان ۸ زیر سیستم اصلی حاصل می شود.

زیرسیستم های اصلی در سامانه پیشران الکتروپمپ عبارتند از: مخازن سوخت و اکسنده، محفظه احتراق، پمپ های سوخت و اکسیدکننده، شیرآلات، باتری، اینورتر و الکترو موتور. برای کار کردن بدون عیب سامانه پیشران الکتروپمپ می بایستی تمامی زیر سیستم ها مأموریت شان را با موفقیت انجام دهند و اختلال در عملکرد یک زیر سیستم موجب شکست مأموریت می شود. شکل ۱، بلوک دیاگرام عملکردی سامانه پیشران الکتروپمپ را نشان می دهد بنابراین بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سامانه پیشران الکتروپمپ به شرح ارائه شده در شکل (۲) می باشد



شکل ۱: بلوک دیاگرام سامانه پیشران الکتروپمپ



شکل ۲: بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سامانه پیشران الکتروپمپ

گام چهارم: تخصیص قابلیت اطمینان الکتروپمپ

در این گام ابتدا به معرفی تخصیص قابلیت اطمینان و روش های مختلف آن پرداخته و در ادامه، تخصیص قابلیت اطمینان الکتروپمپ را معرفی می کنیم.

تخصیص قابلیت اطمینان

در فرآیند طراحی و توسعه یک محصول جدید اغلب، مهندسين با طراحی سیستمی مواجه می شود که می بایستی با مجموعه ای از الزامات قابلیت اطمینان تطبیق داشته باشد. معمولاً به طراحان الزامات داده می شود، آنها بایستی محصولی را بسازند که به قابلیت اطمینان خواسته شده دست یافته و مأموریت مورد نظر سیستم را با حداقل هزینه انجام دهد. این فرآیند بایستی بگونه ای انجام شود تا بتواند در تخصیص قابلیت اطمینان به اجزای سیستم جهت برآوردن هدف نهایی قابلیت اطمینان توازن برقرار کرده و در عین حال از برآورده

محموله فضایی. در این حالت هم کلیه زیر سیستم ها سری هستند. لذا، قابلیت اطمینان مرحله دوم حاصل ضرب شش زیر سیستم اصلی می باشد.

در نتیجه قابلیت اطمینان تخصیص داده شده به سامانه پیشرانس الکتروپمپ ۰,۹۹۷ است. یعنی:

$$R_{\text{epfs}} = 0.997 \quad (4)$$

گام پنجم: انتشار عدم قطعیت

گام پنجم در طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان موتور سوخت مایع الکتروپمپ، انتشار عدم قطعیت است. هدف انتشار عدم قطعیت، محاسبه ی عدم قطعیت در متغیرهای تصادفی (به نقش تصادفی معروفند)، با توجه به عدم قطعیت متغیرها (معروف به متغیرهای ورودی) که در آن نقشها وجود دارند می باشد. این بخش چهار نگرش برای انتشار عدم قطعیت معرفی می شوند:

روش های نمونه برداری؛

روش های تحلیلی نظیر، روش (FORM) و (SORM)؛

تخمین چند اسمی با استفاده از تیلور؛

روش های پیشرفته مانند گسترش تصادفی.

روش های نمونه برداری

در انتخاب بهترین رویکرد برای انتشار عدم قطعیت معیارهایی وجود دارد، که متناسب با شرایط مساله می بایستی از آن بهره گرفت. از جمله معیارها عبارتند از: خطی یا غیر خطی بودن، نواحی شکست، تعداد متغیرها، تعداد فراخوانی (زمان تحلیل شکست)، ... هر یک از این رویکردها، دارای ویژگی های خاص خود می باشند. بعنوان نمونه، روش مونت کارلو دارای این ویژگیها می باشد: محدودیتی در خطی یا غیر خطی بودن متغیرها و توابع هدف وجود ندارد؛ محدودیتی در نواحی شکست وجود ندارد؛ محدودیتی در تعداد متغیرهای مساله وجود ندارد؛ با توجه به تعداد بالای آزمون ها، روش دقیقی است؛ شدت زمان بر است. معمولا از این روش برای صحنه گذاری دیگر روش ها استفاده می شود. دامنه کاربرد رویکردهای مختلف انتشار عدم قطعیت در جدول (نشان داده شده است. با بررسی روش های پیشنهادی در انتشار عدم قطعیت، در این پژوهش از نگرش های اول و دوم استفاده شده است.

جدول ۳: دامنه کاربرد رویکردهای مختلف انتشار عدم قطعیت

| ws Approach | Non-linearity | Failure domains | No. Parameters | No. solver runs |
|------------------------------|---------------|-----------------|----------------|--|
| Monte Carlo Simulation | arbitrary | arbitrary | many | $>10^4(3 \text{ sigma})$ $>10^7(5 \text{ sigma})$ |
| Directional Sampling | arbitrary | arbitrary | ≤ 10 | 1000-5000 |
| Adaptive Importance Sampling | arbitrary | One dominant | ≤ 10 | 500-1000 |
| FORM, SORM | monotonic | One dominant | ≤ 20 | 200-500 |
| ISPUD | monotonic | One dominant | ≤ 20 | 200-500 |
| ARSM-DS | continuous | few dominant | ≤ 20 | 200-500 |

بر مطرح دنیا بر اساس تعداد مأموریتها، میزان شکست و موفقیت مورد بررسی قرار گرفته است.

ملاحظه می شود، قابلیت اطمینان میانگین ماهواره برها ی منتخب جهان ۹۴ درصد است

جدول ۱: شاخص های تخصیصی قابلیت اطمینان به زیر سیستمها

| ردیف | نام زیر سیستم | شاخص تخصیصی |
|------|--------------------------|----------------|
| ۱ | مخازن سوخت و اکسید کننده | R ₁ |
| ۲ | باتری | R ₂ |
| ۳ | اینورتور | R ₃ |
| ۴ | الکتروموتور | R ₄ |
| ۵ | پمپ سوخت | R ₅ |
| ۶ | پمپ اکسید کننده | R ₆ |
| ۷ | شیرآلات | R ₇ |
| ۸ | محفظه تراست | R ₈ |

جدول ۲: قابلیت اطمینان ماهواره برهای کلاس سبک

(وزن محموله تا ۲۰۰۰ کیلوگرم) [۵]

| نام حامل فضایی | تعداد پرتاب های موفق | تعداد پرتاب های ناموفق | قابلیت اطمینان |
|------------------|----------------------|------------------------|----------------|
| Athena 1 and 2 | ۵ | ۲ | ۷۱,۴ |
| Kosmos | ۴۰۰ | ۲۳ | ۹۴ |
| Molniya | ۲۶۶ | ۱۹ | ۹۳ |
| Pegasus XL | ۳۲ | ۳ | ۹۱,۴ |
| Rocket | ۲۷ | ۲ | ۹۳,۱ |
| Start-1 | ۵ | ۱ | ۸۳,۳ |
| Taurus | ۵ | ۱ | ۸۳,۳ |
| Titan 2 | ۱۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| Shavitt (Israel) | ۳ | ۱ | ۷۵ |
| Stella (Russia) | ۱ | ۰ | ۱۰۰ |

زیر سیستم های اصلی در حامل فضایی عبارتند از سامانه پیشرانس (شامل موتور و مخازن)، هدایت، کنترل و ناوبری، سیستم جدایش و محموله. با توجه به این که حامل فضایی مورد نظر دو مرحله ای می باشد.

$$R_{LV} = R_{St1} \cdot R_{St} \quad (3)$$

با توجه به سری بودن دو مرحله در حامل فضایی و فرض قابلیت اطمینان ۰,۹۷ با هدف قابلیت رقابت و تجاری سازی با دیگر ماهواره برها برای حامل فضایی مورد نظر، قابلیت اطمینان مرحله دوم عدد ۰,۹۸۴ می باشد. زیر سیستم های در مرحله دوم، عبارتند از سامانه پیشرانس الکتروپمپ، هدایت، کنترل، ناوبری، سیستم جدایش و

انتشار عدم قطعیت در موتور الکتروپمپ

برای بسیاری از کاربردهای عملی، تابع حالت حدی $g(x)$ تابع غیر خطی از x و دارای تعداد زیادی متغیر تصادفی است. در این حالت، انتگرال گیری عددی و دقیق کار بسیار مشکلی خواهد بود. چرا که بدست آوردن تابع $f_x(x)$ کار مشکلی است. با این حال، یک رویکرد ممکن با دقت مطلوب استفاده از شبیه سازی مونت کارلو با تعداد اجراهای زیاد است. از آنجاییکه شبیه سازی مونت کارلو زمان بر است، لذا همواره تمایل به سمت روش های تحلیلی تقریبی مانند ARSM-DS وجود دارد. در پژوهش حاضر، هدف محاسبه قابلیت اطمینان الکتروپمپ می باشد. بنابراین، توابع حدی به صورت زیر تعریف می شوند.

$$g_1(x) = I_{spreq} - I_{spcal} \quad (5)$$

$$g_2(x) = \left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{req} - \left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{cal} \quad (6)$$

در روابط فوق، I_{spcal} ایمپالس ویژه محاسباتی و I_{spreq} ایمپالس ویژه واقعی همچنین $\left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{cal}$ نسبت جرم محاسباتی و $\left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{req}$ نسبت جرم واقعی می باشند. شایان ذکر است مقادیر محاسباتی خروجی فاز بهینه سازی و مقادیر واقعی الزام ماموریتی می باشد.

توابع حدی در موتور الکتروپمپ

همان طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، احتمال شکست در الکتروپمپ به صورت $P_f = prob[g(x) \leq 0]$ می باشد؛ نشان دادیم که I_{spcal} و $\left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{cal}$ تابعی از مشخصات هندسی و عملکردی الکتروپمپ می باشد. لذا توابع حدی بصورت ذیل تعریف می شوند:

$$g_1(x) = I_{spreq} - I_{spcal} \geq 0 = I_{spreq} \geq 316.4 \quad (7)$$

$$g_2(x) = \left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{req} - \left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{cal} \leq 0 = \left(\frac{M_0}{M_f}\right)_{req} \leq 0.066 \quad (8)$$

از طرفی همان طور که پیش تر نیز اشاره شد، متغیرهای طراحی موتور الکتروپمپ عبارتند از: نسبت مصارف، ضریب حجمی مخازن، فشار اولیه مخازن فشارگذاری، فشار محفظه احتراق، چگالی انرژی باطری، راندمان اینورتور، راندمان پمپ سوخت، راندمان پمپ اکسید کننده و زمان سوزش. از میان متغیرهای اشاره شده، سه متغیر نسبت مصارف، فشار محفظه احتراق و چگالی انرژی باطری بعنوان متغیرهای تصادفی انتخاب شده اند. مقادیر انحراف معیار متغیرهای طراحی بر اساس دانش متخصصان یا از بانک داده ها بدست می آید. مقادیر پارامترهای طراحی در هنگام بهینه سازی تغییر نمی کنند.

گام ششم: پیاده سازی روش انتخابی در انتشار عدم قطعیت

گام ششم در طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان موتور سوخت مایع الکتروپمپ، پیاده سازی روش انتخابی در انتشار عدم قطعیت است. این گام که پس از انتخاب روش مناسب در انتشار عدم قطعیت انجام می شود؛ می بایستی بدرستی انجام شود تا خطای ناشی از اجرای روش بحداقل برسد. جدول (۴ تا ۶) پارامترهای اصلی مورد نیاز برای پیاده سازی روش های MCS، FORM و ARSM-DS را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، برای پیاده سازی روش MCS حداقل نیاز به دو پارامتر یا در روش FORM حداقل نیاز به تنظیم شش پارامتر در دو بخش نوع الگوریتم و تنظیمات الگوریتم می باشیم. نوع الگوریتم بهینه سازی، دقت مورد انتظار، نوع مشتق گیری، اندازه گام در شیوه مشتق گیری، حداکثر تعداد فراخوان ها و تعداد پردازش های موازی از جمله مهمترین پارامترها در پیاده سازی روش FORM می باشند. تنظیم پارامترها در روش ARSM-DS در جدول (۱) نشان داده شده است. همان طور که پیش تر اشاره شد، این روش تلفیق شبه مدل و قابلیت اطمینان می باشد. لذا، پارامترهای اصلی نظیر، تعداد جهت ها، تعداد نقاط پشتیبان در گام اول، ضریب بزرگنمایی در گام نخست، تعداد نقاط پشتیبان در گام های بعدی و تعداد گام ها؛ پارامترهایی هستند که از هر دو رویکرد در روش مذکور انتخاب شده اند.

جدول ۱: تنظیم پارامترها در روش MCS

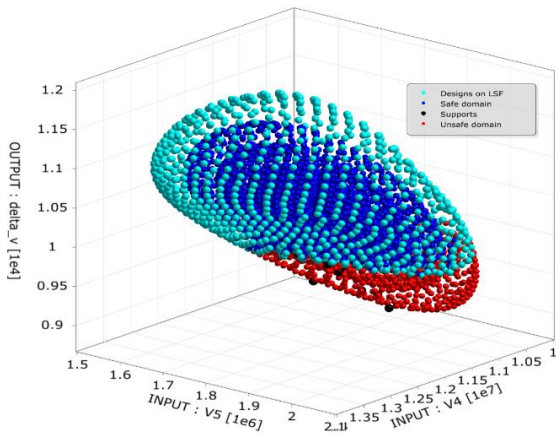
| | |
|-------------------------------------|------|
| Total number of samples: | 1000 |
| Samples to be computed in parallel: | 3 |

جدول ۵: تنظیم پارامترها در روش FORM

| | |
|-----------------------------------|---------|
| 1. Optimization algorithm | |
| Optimization algorithm used: | NLPQL |
| 2. Optimizer settings | |
| Desired accuracy: | 0.0005 |
| Differentiation scheme: | Central |
| Differentiation step size: | 0.01 |
| Maximum number of solvers runs: | 10000 |
| Number of parallel line searches: | 1 |

جدول ۶: تنظیم پارامترها در روش ARSM-DS

| | |
|---------------------------------|------|
| 1. Directional sampling | |
| Number of directions: | 1000 |
| 2. metamodel | |
| Number of supports in 1st step: | 200 |
| Scaling factor in 1st step: | 3 |
| Number of supports in per step: | 50 |
| Number of steps: | 3 |



شکل ۴: ارتباط فشار محفظه و چگالی انرژی باتری با تابع هدف سرعت نهایی در ابر نقاط قابلیت اطمینان در سیستم تغذیه الکتروپمپی

گام هفتم: پیش بینی قابلیت اطمینان الکتروپمپ

در حالت کلی، روش های پیش بینی قابلیت اطمینان به دو دسته تقسیم می شوند: روش اول، مبتنی بر مدل سازی نرخ خرابی سیستم و روش دوم، مبتنی بر شبیه سازی احتمال شکست از طریق تابع تجمعی چگالی احتمال. از مهم ترین روش های احتمالاتی می توان به روش های ذیل اشاره نمود:

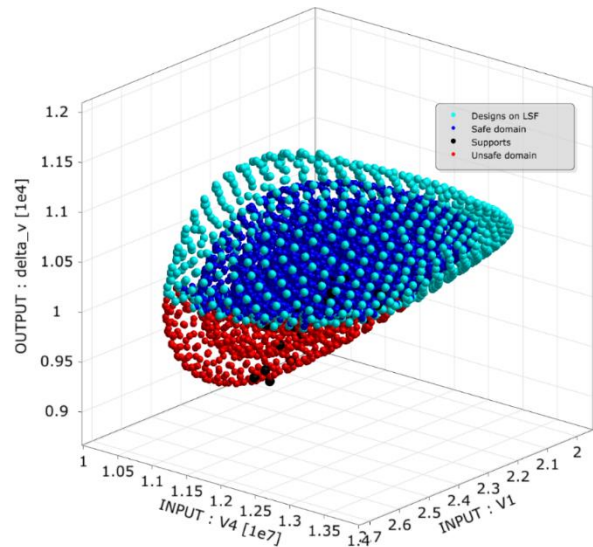
روش تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه ۱ و ۲، روش شبیه سازی یا نمونه برداری، مدل های جایگزین (شبه مدل ها) و روش های ترکیبی. همان طور که پیش تر ملاحظه شد؛ در این پژوهش از چند روش احتمالاتی برای پیش بینی قابلیت اطمینان در فاز طراحی مفهومی مورد استفاده قرار گرفته است.

گام هشتم: ارزیابی قابلیت اطمینان^۱

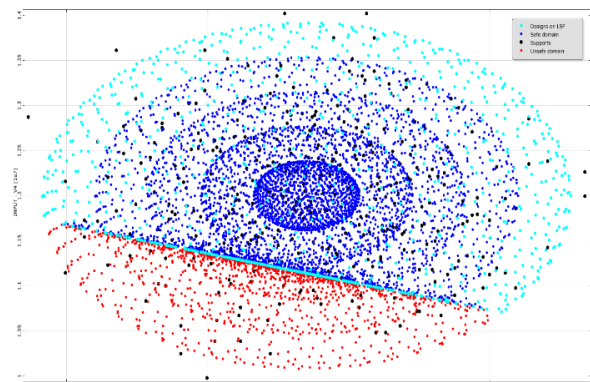
ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم های پیچیده، تخمین کمی از شاخص های مختلف قابلیت اطمینان سیستم نظیر قابلیت اطمینان سیستم، دسترس بودن سیستم و میانگین زمان خرابی سیستم بر اساس یک روش احتمالی با استفاده از داده های قابلیت اطمینان است. ارزیابی قابلیت اطمینان در فاز طراحی بدین مفهوم است که آیا قابلیت اطمینان سیستم با الزامات طراحی مطابقت دارد؟ به طوری که، بتوان برای بهبود محصول پیشنهادات موثری را ارائه نمود.

از طرفی ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم، از مراحل اولیه طراحی یعنی فاز طراحی مفهومی شروع و تا انتهای چرخه عمر یعنی نظارت بر عملکرد سیستم ادامه دارد. ارزیابی کمی قابلیت اطمینان از مهمترین وظایف تحلیلگر قابلیت اطمینان است.

شکل های (۲) تا (۴)، خروجی روش قابلیت اطمینان مورد ارزیابی واقع شده است. در شکل (۲)، نمودار ابر نقاط قابلیت اطمینان برای فشار محفظه در مقابل نسبت مصارف برای توابع هدف نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، نواحی تحلیل به سه بخش failed، unsafe و safe تقسیم شده است. در شکل (۳)، احتمال شکست برای روش مورد نظر نشان داده شده است. قابلیت اطمینان برای این روش عدد تخمین زده می شود. شکل (۴)، رتباط فشار محفظه و چگالی انرژی باتری با تابع هدف سرعت نهایی در ابر نقاط قابلیت اطمینان در سیستم تغذیه الکتروپمپی را نشان می دهد.



شکل ۲: ارتباط فشار محفظه و نسبت مصارف با تابع هدف سرعت نهایی در ابر نقاط قابلیت اطمینان در سیستم تغذیه الکتروپمپی



شکل ۳: تفکیک ناحیه شکست و ایمن در سیستم تغذیه الکتروپمپی با دو متغیر فشار محفظه و نسبت مصارف

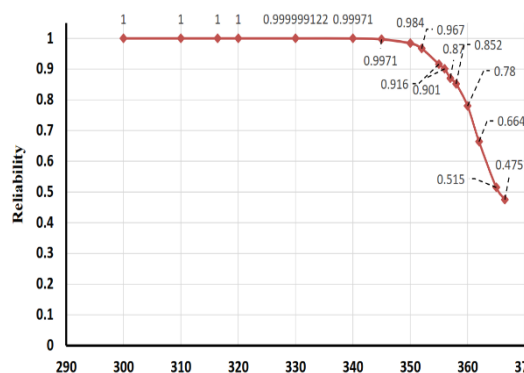
^۱Reliability assessment

- ملاحظه می‌شود تا زمانی که ایمپالس ویژه موتور ۳۲۰ ثانیه است، قابلیت اطمینان یک است. با افزایش ایمپالس ویژه تا ۳۴۳ قابلیت اطمینان به عدد ۰,۹۹۹۷, تغییر پیدا می‌کند. با افزایش ۳,۵ درصدی ایمپالس ویژه، قابلیت اطمینان تا عدد ۰/۹۶۷ کاهش می‌یابد.
- با افزایش سرعت نهایی از ۹۶۵۰ تا ۱۰۱۰۰ متر بر ثانیه، قابلیت اطمینان از ۰,۹۸۴ تا ۰,۴۷۵ کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش محسوس نزدیک شدن نقطه شکست به نقطه بهینه (ماکزیمم ایمپالس ویژه و مینیمم نسبت جرم) می‌باشد.
- با افزایش ۷ درصدی سرعت نهایی، یعنی تغییر سرعت نهایی از ۹۰۰۰ به ۹۶۵۰ متر بر ثانیه، قابلیت اطمینان تا ۰,۹۸۴ تغییر می‌کند.
- در صورتی که سرعت نهایی بین ۸۰۰۰ تا ۹۰۰۰ متر بر ثانیه تغییر کند، احتمال شکست نزدیک به صفر می‌باشد.

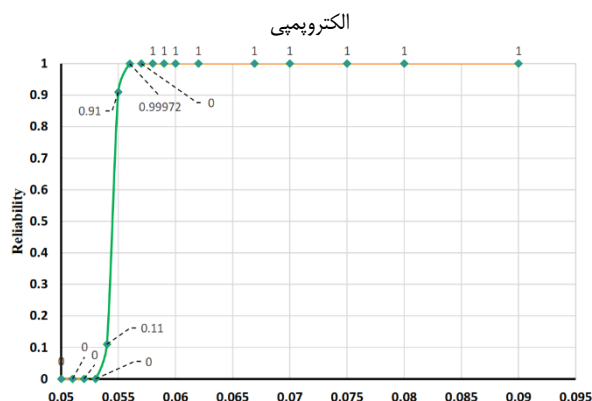
مراجع

- [۱] ج. روشنیان و. م. هاشمی "طراحی چند موضوعی ماهواره بر سوخت مایع بر اساس قابلیت اطمینان به روش تئوری مجموعه های فازی" پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، تهران، ۱۳۹۲.
- [۲] ح. علی محمدی، ح. ناصح و ف. امی "رویکرد نوین در طراحی محصولات پیچیده" پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی دانشگاه شیراز، ایران ۱۳۹۷.
- [3] INCOSE, INCOSE Systems Engineering Handbook, International Council on Systems Engineering (INCOSE), 2000.
- [۴] ح. ر. علی محمدی، ح. ناصح و ف. امی "طراحی و بهینه سازی چند موضوعی موتورهای سوخت مایع الکتروپمپ با توجه به قابلیت اطمینان" پایان نامه دکتری، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ۱۴۰۰.
- [۵] ح. ر. علی محمدی، ح. ناصح و ف. امی "افزایش قابلیت اطمینان ماهواره بر های کشور با جایگزینی نسل جدیدی از موتورها" پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی، دانشگاه شیراز، ایران، ۱۳۹۷.

تحلیل قابلیت اطمینان الکتروپمپ در روش ARSM-DS با توابع حدی ایمپالس ویژه و نسبت جرم و هر دو تابع حدی بترتیب در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود تا زمانی که ایمپالس ویژه موتور ۳۲۰ ثانیه است، قابلیت اطمینان یک است. با افزایش ایمپالس ویژه تا ۳۴۳ قابلیت اطمینان به عدد ۰,۹۹۹۷ تغییر پیدا می‌کند. با افزایش ۳,۵ درصدی ایمپالس ویژه، قابلیت اطمینان تا عدد ۰/۹۶۷ کاهش می‌یابد. در ادامه، با افزایش ۴ درصدی ایمپالس ویژه و رسیدن به حداکثر ایمپالس ویژه یعنی ۳۶۶/۵ ثانیه، سرعت نهایی به میزان ۴ درصد افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۵: ارتباط شاخص ایمپالس ویژه و قابلیت اطمینان در سیستم تغذیه



شکل ۶: ارتباط شاخص نسبت جرم و قابلیت اطمینان در سیستم تغذیه الکتروپمپی

نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش نحوه تحقق و گام‌های پیاده‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان در فاز طراحی مفهومی یک سامانه فضایی پرداخته شد. هشت گام های طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان، شامل: اولین گام، طرح ریزی و هفت گام بعدی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان موتور سوخت مایع الکتروپمپ عبارتند از: تعیین مدهای شکست؛ مدل سازی قابلیت اطمینان؛ تخصیص قابلیت اطمینان؛ انتشار عدم قطعیت؛ پیاده سازی روش انتخابی در تحلیل قابلیت اطمینان؛ پیش بینی قابلیت اطمینان و ارزیابی قابلیت اطمینان می‌باشد. برخی از نتایج گام هشتم عبارتند از: