

توسعه یک مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد با محدودیت‌های فازی و در نظر گرفتن ریسک شکست سیستم (مطالعه موردی: اتصالات بال یک سازه پروازی)

پژمان محمدی الاشتی^۱، مجید نوجوان^{۲*}، داود محمدی تبار^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رسید مقاله: ۷ دی ۱۳۹۹

پذیرش مقاله: ۲۲ خرداد ۱۴۰۰

چکیده

در مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد، هدف اصلی بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم با افزودن اجزای مازاد موازی و یا افزایش قابلیت اطمینان اجزای تشکیل دهنده است. در این مقاله تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم نیز به مدل اضافه شده و این مساله دو هدفه با در نظر گرفتن محدودیت‌های فازی هزینه، وزن و قابلیت اطمینان اجزاء، مدل‌سازی شده است. برای تعیین تابع هدف ریسک شکست سیستم از روش تحلیل اثرات و حالت شکست استفاده شده است که در آن عدد اولویت هر ریسک از حاصل ضرب مقادیر شدت، کشف و احتمال وقوع ریسک به دست آمده و احتمال وقوع هر ریسک نیز به صورت تابعی از تعداد و قابلیت اطمینان اجزای مازاد مرتبط با ریسک تعریف می‌گردد. با توجه به این که پیچیدگی حل مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد از نوع چندجمله‌ای سخت است، برای حل مدل، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده پیشنهاد شده و از آن در یک سیستم واقعی شامل اتصالات بال یک سازه پروازی تعمیرناپذیر استفاده شده است. نهایتاً صحت و کارایی مدل پیشنهادی و روش حل بررسی و تایید شده است.

کلمات کلیدی: مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد (RRAP)، محدودیت‌های فازی، ریسک شکست سیستم، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده.

۱ مقدمه

با توجه به پیچیدگی و گسترش ساختاری تجهیزات و سیستم‌ها و نیاز فزاینده به عملکرد مناسب آن‌ها، توجه به بهبود قابلیت اطمینان در سیستم‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است [۱]. یکی از روش‌های بهبود قابلیت اطمینان یک

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: mnojavan@azad.ac.ir

سیستم، استفاده از اجزای مازاد به صورت موازی است که تحت عنوان مساله‌ی تخصیص اجزای مازاد (RAP)^۱ شناخته می‌شود. در حالت کلی تخصیص اجزای مازاد به دو صورت فعال^۲ و یا ذخیره^۳ انجام می‌شود [۲]. اگر در مساله RAP قابلیت اطمینان اجزا از قبل مشخص نبوده و به‌عنوان یکی از متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شود، در این حالت مساله به‌عنوان مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد (RRAP)^۴ نامیده می‌شود. تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد در سیستم‌های حساس از جمله سازه‌های پروازی و فضایی معمولاً با استفاده از اتصالات مازاد انجام شده و در جلوگیری از شکست سازه‌ها اهمیت فراوانی دارد [۳].

پیچیدگی زمانی حل مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزاء مازاد از نوع چندجمله‌ای سخت (Np-hard) است و به دلیل وجود متغیرهای عدد صحیح و جملات غیرخطی در تابع هدف و محدودیت‌ها، در دسته مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی (MINLP) قرار می‌گیرد؛ از این رو برای حل آن‌ها معمولاً از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود [۴].

افونسو و همکاران [۵] در یک توربین گازی و با چهار طرح مختلف شامل سیستم‌های سری، سری-موازی، پل و حفاظت سرعت غیرمجاز از مدل RRAP استفاده کردند. آن‌ها مساله را با داده‌های قطعی و محدودیت‌های وزن، حجم و هزینه در نظر گرفته و برای حل آن از الگوریتم رقابت استعماری استفاده نمودند. گارج و شارما [۶] برای بهبود قابلیت اطمینان یک کارخانه داروسازی واقع در شمال هند، مساله RRAP فازی با دو تابع هدف قابلیت اطمینان و هزینه و سه محدودیت غیرخطی وزن، حجم و هزینه را در نظر گرفته و الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات را برای حل آن به کار بردند. ابویی اردکان و زینال همدانی [۷] یک مساله‌ی RRAP با داده‌های قطعی را که دارای تابع هدف قابلیت اطمینان و محدودیت‌های وزن، هزینه و حجم بود در سه حالت سری، سری-موازی و پل و با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده حل نمودند. گارگ و همکاران [۸] در مساله‌ی RRAP دو تابع هدف قابلیت اطمینان و هزینه و همچنین محدودیت‌های وزن و حداکثر قابلیت اطمینان اجزاء را در نظر گرفتند که در آن قابلیت اطمینان اجزاء به صورت مقادیر فازی مثلثی نشان داده شده بود. آن‌ها برای حل مدل در یک سیستم سری-موازی از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات استفاده کردند. روی و همکاران [۹] از مساله‌ی RRAP با داده‌های قطعی و دو تابع هدف قابلیت اطمینان و هزینه در یک کارخانه آستر سازی استفاده و این مساله را با کاربرد روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی حل نمودند. ژانگ و چن [۱۰] در یک مطالعه‌ی موردی مرتبط با مدیریت منابع آب از مدل RRAP با داده‌های بازه‌ای و در نظر گرفتن دو تابع هدف قابلیت اطمینان و هزینه استفاده و برای حل این مدل در یک سیستم سری-موازی، الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات را به کار بردند. گارگ [۱۱] در سیستم‌های سری-موازی، پل، سیستم حفاظت سرعت غیرمجاز و همچنین یک سیستم پیچیده از مدل RRAP با داده‌های قطعی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های هزینه، وزن و حجم استفاده و برای حل آن از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده کرد. هوانگ [۱۲] برای حل مساله‌ی RRAP با

¹ Redundancy Allocation Problem

² Active

³ Standby

⁴ Reliability-Redundancy Allocation Problem

داده‌های قطعی و تابع هدف قابلیت اطمینان و محدودیت‌های حجم، هزینه و وزن، الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات را به کار برده و از آن برای حل سه مساله‌ی سری، سری- موازی و پل استفاده نمود.

در مقالات [۱۳] تا [۲۶] نیز مساله‌ی RRAP در مثال‌ها و یا سیستم‌های کوچک و با توابع هدفی مانند: قابلیت اطمینان، وزن و هزینه سیستم و محدودیت‌هایی چون: حجم، تعداد، وزن و هزینه اجزا و استراتژی‌های مختلفی برای وضعیت اجزا توسعه داده شده است. همچنین در مقالات اخیر برای نشان دادن عدم قطعیت در پارامترهای مدل از اعداد فازی، فازی نوع ۲ و فازی شهودی استفاده و برای حل این مدل‌ها نیز روش‌های ابتکاری بر پایه جستجو و روش‌های فراابتکاری مانند: شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و چرخه آب توسعه داده شده است. روش‌های فراابتکاری در حل مسایل بهینه‌سازی پیچیده خصوصاً برای حل مسایل در ابعاد بزرگ کاربرد گسترده‌ای دارند [۳۱، ۳۲].

با بررسی تحقیقات قبلی در مسایل چندهدفه RRAP مشخص می‌گردد که تاکنون از معیار ریسک به‌عنوان تابع هدف در این مسایل استفاده نشده است. با توجه به اهمیت فراوان کنترل ریسک در طراحی سیستم‌های پیچیده، در این مقاله برای مساله RRAP با محدودیت‌های فازی هزینه، وزن و قابلیت اطمینان اجزا، علاوه بر تابع هدف پیشینه‌سازی قابلیت اطمینان، تابع هدف دوم کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم نیز در نظر گرفته شده است. همچنین برای ارزیابی ریسک‌های سیستم از روش تحلیل اثرات و حالت شکست (FMEA)^۱ استفاده شده که در آن احتمال وقوع هر ریسک به صورت تابعی از تعداد و قابلیت اطمینان اجزای مازاد مرتبط با آن ریسک تعریف شده است. علاوه بر این با توجه به این که پیچیدگی مدل از نوع Np-hard است، برای حل آن الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده پیشنهاد و نهایتاً از این مدل برای بهبود قابلیت اطمینان و ریسک در یک سیستم واقعی شامل اتصالات بال یک سازه پروازی تعمیرناپذیر استفاده شده است.

ساختار مقاله به این صورت است که ابتدا در بخش ۲، مدل RRAP با محدودیت‌های فازی تشریح و پس از بیان نحوه محاسبه تابع هدف ریسک شکست سیستم، مدل RRAP با این تابع هدف جدید به صورت دوهدفه توسعه داده شده است. سپس در بخش ۳ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته‌ی اصلاح شده به‌عنوان روش حل مدل پیشنهادی تشریح شده است. نهایتاً در بخش ۴ مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد دو هدفه با محدودیت‌های فازی وزن، هزینه و حداکثر قابلیت اطمینان اجزا برای اتصالات بال یک سازه‌ی پروازی به‌عنوان مطالعه موردی استفاده و این مساله با استفاده از دو روش الگوریتم فراابتکاری فاخته‌ی اصلاح شده و نرم‌افزار GAMS حل و نتایج با هم مقایسه شده است. در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

¹ Failure Mode and Effects Analysis

۲ مدل سازی مساله RRAP با محدودیت‌های فازی و تابع هدف کمیته‌سازی ریسک شکست

سیستم

در مساله‌ی تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد (RRAP) برای بهبود و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، اجزاء مازاد به صورت موازی به سیستم اضافه می‌شوند که در آن قابلیت اطمینان اجزا از قبل مشخص نبوده و به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. مفروضات مدل RRAP پیشنهاد شده در این مقاله عبارت‌اند از:

- سیستم دو حالتی بوده و اجزای آن فقط در یکی از دو حالت کاملاً سالم یا کاملاً خراب قرار دارند.
- خصوصیات اجزای مازاد از قبیل هزینه و وزن مشخص است.
- اجزای مازاد به مقدار نامحدود در دسترس هستند.
- خرابی یک جز تأثیری بر عملکرد سایر اجزا ندارد.
- اجزا و سیستم تعمیر پذیر نمی‌باشند.
- اجزای مازاد به صورت موازی با اجزای اصلی قرار می‌گیرند.
- همه اجزای اصلی و پشتیبان در ابتدای شروع به کار سیستم در حال کار کردن هستند.
- تخصیص اجزای مازاد به سیستم به صورت فعال است.

با توجه به مفروضات بالا، قابلیت اطمینان مجموعه‌ای از اجزای مازاد با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$R_i = 1 - (1 - r_i)^{n_i} \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

که در رابطه بالا اندیس i شماره‌دهنده‌ی مجموعه، متغیر R_i قابلیت اطمینان کلی اجزای مازاد مجموعه‌ی i ، متغیر r_i قابلیت اطمینان هر جزء مازاد در مجموعه‌ی i و نهایتاً متغیر n_i تعداد اجزاء مازاد به کار گرفته در مجموعه‌ی i است.

در مدل RRAP پیشنهادی دو تابع هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم و کمیته‌سازی ریسک شکست سیستم و سه محدودیت فازی وزن، هزینه و حد بالای قابلیت اطمینان اجزا مازاد در نظر گرفته شده است.

برای تعریف مقادیر فازی هر یک از محدودیت‌ها، برای سمت راست هر محدودیت یک مقدار معمول و حداکثر میزان تغییر در نظر گرفته شده و تابع درجه عضویت مقادیر فازی به صورت خطی بین مقادیر حداقل و حداکثر تعریف می‌شود، سپس با استفاده از برش‌های α مقادیر فازی به صورت قطعی تبدیل می‌گردد [۱۶]. در این حالت مدل RRAP پیشنهادی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} \max R &= f_1(n_1, \dots, n_m; r_1, \dots, r_m) \\ \min S &= f_2(n_1, \dots, n_m; r_1, \dots, r_m) \\ \text{s.t.} \\ g_c(n_i; r_i) &\leq c_i + (1 - \alpha)d_c \quad i = 1, \dots, m \\ g_w(n_i; r_i) &\leq w_i + (1 - \alpha)d_w \quad i = 1, \dots, m \\ r_i &\leq r_i + (1 - \alpha)d_r \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه بالا R قابلیت اطمینان سیستم، k ریسک شکست سیستم، g_c و g_w به ترتیب تابع هزینه و وزن سیستم، c و w و r به ترتیب مقادیر معمول هزینه سیستم، وزن سیستم و درجه اطمینان هر جزء، d_c ، d_w و d_r به ترتیب حداکثر مقدار افزایش در مقادیر معمول هزینه، وزن و قابلیت اطمینان هر جزء و α میزان برش در مقادیر فازی سمت راست محدودیت‌ها می‌باشد.

برای افزودن تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم به مدل RRAP، باید تابع ریسک برحسب متغیرهای قابلیت اطمینان و تعداد اجزاء مازاد به کاررفته فرموله شود. برای این کار از روش‌های درخت تحلیل خطا (FTA^۱) و تحلیل اثرات و حالت شکست استفاده شده است. گام‌های موردنیاز برای استفاده از این رویکرد در ادامه تشریح شده است [۲۷]:

گام ۱: تعیین ریسک‌های سیستم با استفاده از روش FTA

در اولین گام به منظور استخراج رویدادها، مخاطرات و ریسک‌های اصلی سیستم، از روش درخت تحلیل خطا (FTA) استفاده می‌شود.

گام ۲: تعیین ضرایب شدت، کشف و احتمال وقوع هر ریسک

در این گام ابتدا ضرایب شدت (اثرگذاری) و ضریب کشف (امکان شناسایی و آشکارسازی) هر ریسک توسط خبرگان مشخص می‌شود. سپس با توجه به وابستگی احتمال وقوع هر ریسک به درجه اطمینان و تعداد اجزای مازاد مرتبط با آن ریسک و با در نظر گرفتن منطق دودویی حاصل از اجرای روش FTA، مقدار احتمال برای هر ریسک به صورت یک تابع مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه ضرایب شدت و کشف ریسک مطابق جداول کیفی و به صورت اعداد صحیح در بازه [۱۰-۱] تعریف می‌شوند و به دلیل مقیاس متفاوت تابع احتمال که در بازه [۰-۱] قرار دارد، باید مقدار این تابع در عدد ۱۰ ضرب گردد تا تابع ضریب احتمال محاسبه شود.

گام ۳: محاسبه‌ی تابع عدد اولویت هر ریسک

در گام سوم با ضرب مقادیر ضرایب شدت، ضریب کشف و تابع احتمال هر ریسک در همدیگر، عدد اولویت ریسک (RPN) برای هر یک از ریسک‌ها به صورت یک تابع مشخص می‌گردد.

گام ۴: تعیین تابع ریسک کلی سیستم

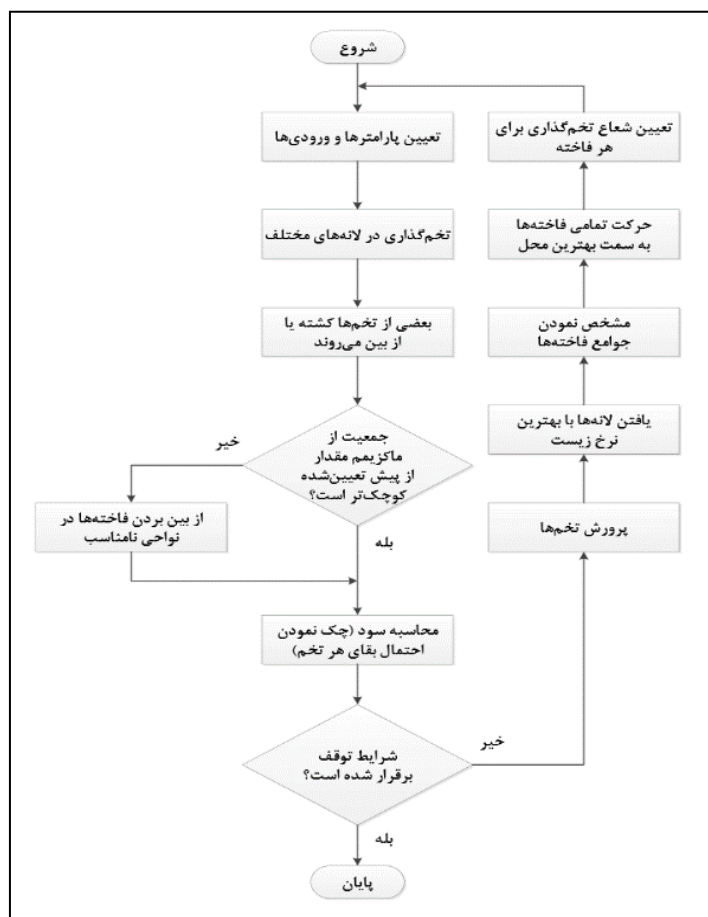
در این گام با استفاده از RPN‌های به‌دست آمده برای هر ریسک و با فرض استقلال ریسک‌ها، تابع کلی ریسک شکست سیستم از جمع اعداد اولویت همه ریسک‌ها محاسبه می‌گردد.

۳ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده

همان‌طور که قبلاً بیان شد مدل RRAP در دسته مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی (MINLP) قرار داشته و پیچیدگی زمانی حل آن از نوع چند جمله‌ای سخت (Np-hard) می‌باشد و از این رو برای حل این مساله در ابعاد بزرگ معمولاً از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. یکی از جدیدترین و قوی‌ترین الگوریتم‌های

¹ Fault Tree Analysis

فراابتکاری تکاملی، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته است که با ترکیب چندین عملگر توانایی زیادی در جستجوی محلی در حین جستجوی کلی داشته و به جواب‌های دقیق‌تر، قابل‌اعتمادتر و سریع‌تر دست می‌یابد [۲۸]. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته توسط یانگ و دب [۲۹] ارایه و سپس توسط رجبیون [۳۰] توسعه داده شده است. روندنمای کلی این الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. روندنمای الگوریتم فراابتکاری فاخته اصلاح شده [۳۰]

گام‌های استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در ادامه تشریح شده است.

گام ۱: تعیین پارامترهای الگوریتم

در گام اول پارامترهای الگوریتم فاخته شامل: مقدار اولیه و بیشینه تعداد فاخته‌ها، حداقل و حداکثر تعداد تخم‌های هر فاخته، تعداد گروه فاخته‌ها و تعداد تکرارهای الگوریتم مشخص می‌گردد.

گام ۲: ایجاد جمعیت اولیه

در این گام به صورت تصادفی یک جمعیت اولیه برای مساله ایجاد و به صورت یک ماتریس نشان داده می‌شود که هر سطر آن یک جواب است. تعداد سطرهای ماتریس جواب‌ها برابر تعداد اولیه فاخته‌ها و تعداد ستون‌ها برابر تعداد متغیرها است.

گام ۳: ایجاد یک جواب تصادفی به عنوان نقطه‌ی هدف

در گام سوم با ایجاد یک جواب تصادفی، این نقطه به عنوان هدف برای دیگر جواب‌ها در نظر گرفته می‌شود.

گام ۴: مشخص کردن تعداد تخم‌ها برای هر فاخته

در این گام تعداد تخم‌های هر فاخته به صورت تصادفی بین حداقل و حداکثر تعداد تخم‌های مجاز ایجاد می‌شود.

گام ۵: تعیین شعاع تخم‌گذاری برای هر فاخته

در گام پنجم با توجه به این که مقادیر متغیرها بین صفر و یک تعریف شده‌اند، شعاع تخم‌گذاری هر فاخته مشخص می‌شود.

گام ۶: تخم‌گذاری فاخته‌ها در محدوده‌ی تخم‌گذاری

در این گام هر فاخته در داخل دایره‌ای به شعاع مشخص حرکت و در این محدوده به صورت تصادفی و به تعداد تخم‌های از قبل مشخص شده جواب جدید ایجاد می‌کند.

گام ۷: حذف تخم‌های مازاد از یک لانه

در گام هفتم پس از تخم‌گذاری همه‌ی فاخته‌ها، لانه‌هایی که بیش از یک تخم در آن قرار گرفته است مشخص و تخم‌های مازاد در این لانه حذف می‌شود.

گام ۸: ارزیابی موقعیت تخم‌ها

در این گام با محاسبه‌ی مقدار تابع هدف برای هر تخم، میزان مناسب بودن آن مکان برای پرورش تخم مشخص می‌شود.

گام ۹: بررسی حداکثر جمعیت فاخته‌ها

در گام نهم تعداد کل تخم‌های باقی مانده محاسبه و اگر تعداد کل تخم‌ها از حداکثر تعداد فاخته‌ها در هر تکرار بیشتر باشد، به ترتیب تخم‌هایی که در بدترین موقعیت قرار گرفته و مقدار تابع هدف کمتری دارند حذف می‌شوند تا تعداد کل تخم‌ها به حداکثر تعداد فاخته‌ها برسد.

گام ۱۰: گروه‌بندی فاخته‌ها

در این گام فاخته‌ها با استفاده از روش K-means و بر اساس کمترین فاصله هر داده از میانگین یک گروه، خوشه‌بندی و به تعداد از قبل تعیین شده گروه‌های فاخته تشکیل می‌گردند.

گام ۱۱: تعیین گروه هدف

در گام یازدهم با تعیین مقدار تابع هدف متوسط برای همه‌ی گروه‌ها، بهترین گروه به عنوان هدف در نظر گرفته شده و اگر بهترین موقعیت در آن گروه از نقطه‌ی هدف قبلی بهتر باشد، این نقطه به عنوان نقطه هدف جدید در نظر گرفته می‌شود.

گام ۱۲: مهاجرت فاخته‌ها به سمت بهترین گروه موجود

در این گام تمامی جواب‌های موجود در گروه‌های غیر از گروه هدف، به سمت بهترین گروه موجود حرکت می‌کنند.

گام ۱۳: بازگشت به گام ۴ و بررسی شرط توقف

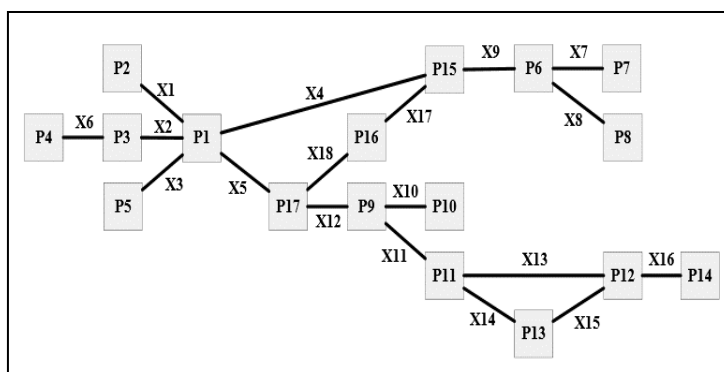
نهایتاً تا زمانی که تعداد تکرارهای الگوریتم به حداکثر تکرار از قبل تعیین شده برسد، این فرآیند از گام چهارم ادامه می‌یابد.

۴ مطالعه‌ی موردی

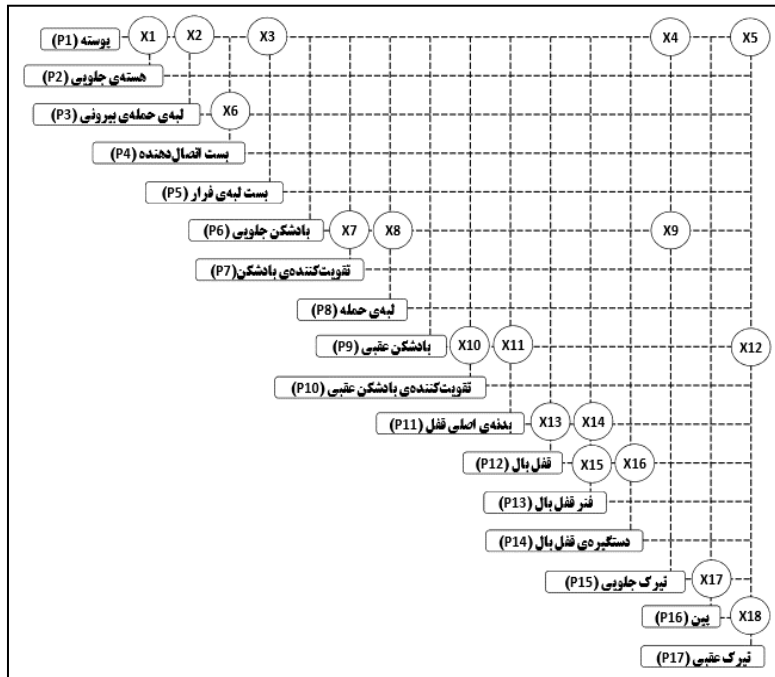
سازه‌های پروازی و اجزای آنها به دلیل اهمیت کاربردی و وجود زیرسیستم‌های متنوع و پیچیده، باید قابلیت اطمینان بسیار بالا و ریسک شکست پایینی داشته باشند. در این مقاله از مدل پیشنهادی در تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد در یک سیستم واقعی شامل اتصالات بال یک سازه پروازی تعمیرناپذیر استفاده شده است. مراحل این کار در ادامه تشریح شده است.

۴-۱ شناخت سیستم

در محصولات صنعتی جهت اتصال و مونتاژ زیرسیستم‌ها و قطعات به یکدیگر از روش‌های مختلفی مانند پیچ و مهره، یا پرچ و جوش استفاده می‌شود؛ اما در اتصالات بال سازه پروازی، به دلیل تعمیرناپذیر بودن، تنها از جوش‌های خاص جهت اتصال قطعات به یکدیگر استفاده می‌گردد. سیستم بال سازه پروازی مورد بررسی شامل ۱۷ قطعه مختلف است ($P_j, j=1, \dots, 17$) که از ۱۸ نقطه به هم متصل می‌شوند ($X_i, i=1, \dots, 18$). نحوه اتصال قطعات بال سازه پروازی به صورت نمودار شبکه‌ای اتصالات در شکل ۲ و ماتریس اتصالات در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار شبکه‌ای سیستم اتصالات بال سازه پروازی



شکل ۳. ماتریس سیستم اتصالات بال سازه پروازی

۴-۲ مدل سازی مساله

برای مدل سازی مساله در سیستم اتصالات سازه پروازی باید متغیرها، توابع هدف و نیز محدودیت های مساله مشخص شوند که هر یک از آنها در ادامه تشریح شده اند.

۴-۲-۱ تعریف متغیرها

با توجه به این که در سیستم اتصالات بال تعداد ۱۸ محل اتصال وجود دارد و هدف تعیین تعداد نقاط جوش و قابلیت اطمینان آنها در هر یک از این ۱۸ محل اتصال است، بنابراین مساله دارای ۳۶ متغیر، شامل ۱۸ متغیر برای قابلیت اطمینان نقطه جوش در هر محل اتصال (r_1, \dots, r_{18}) و ۱۸ متغیر به منظور تعیین تعداد نقاط جوش در هر محل اتصال (n_1, \dots, n_{18}) می باشد.

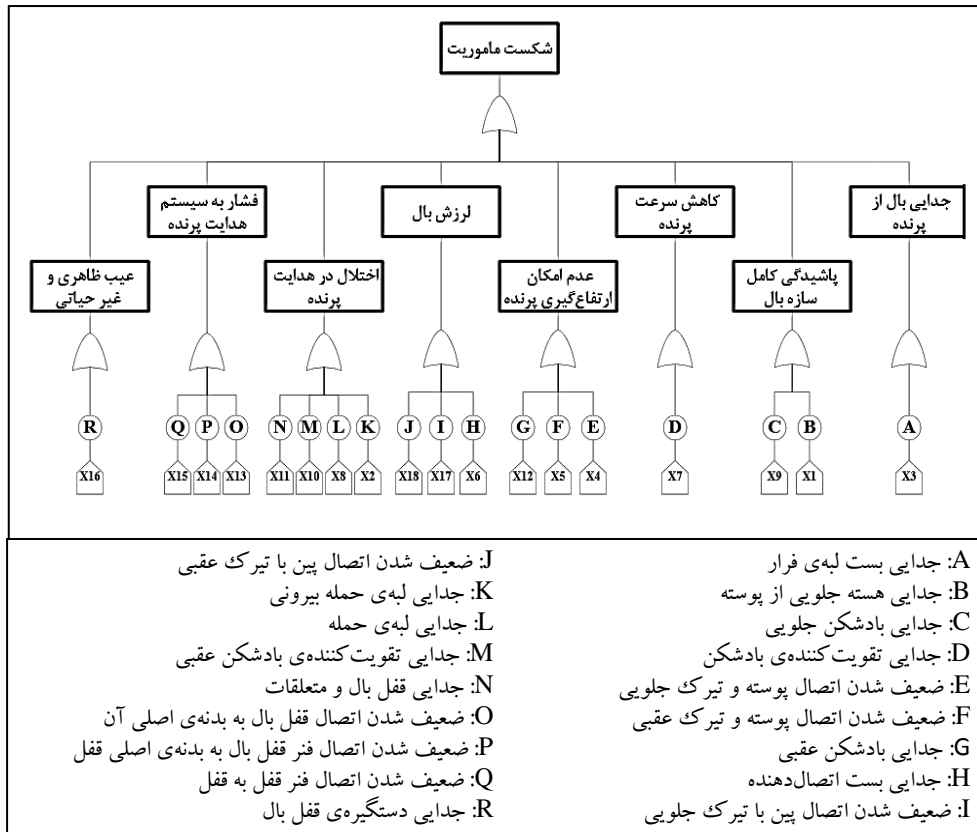
۴-۲-۲ تعیین توابع هدف

در مدل پیشنهادی برای مساله RRAP دو تابع هدف بیشینه سازی قابلیت اطمینان و کمینه سازی ریسک شکست سیستم در نظر گرفته شده است که با توجه به نحوه اتصالات سازه پروازی باید این توابع هدف مشخص گردند.

الف) تابع هدف بیشینه سازی قابلیت اطمینان سیستم

برای تعیین تابع قابلیت اطمینان در سیستم اتصالات بال سازه پروازی، باید ابتدا نمودار بلوکی قابلیت اطمینان^۱ برای این سیستم مشخص شود و بدین منظور باید تعریف مشخصی برای شکست کل سیستم ارائه گردد. با توجه به تنش های وارده بر سیستم بال، شکست اتصالات هنگامی اتفاق می افتد که حتی یک قطعه به صورت کامل از

¹ Reliability Block Diagram



شکل ۵. درخت تحلیل خطا در اتصالات بال سازه پروازی

مطابق شکل ۵ تعداد ۸ ریسک مهم مرتبط با شکست اجزای مختلف اتصالات بال سازه پروازی توسط خبرگان مشخص و برای هر ریسک، اتصالات مؤثر بر ایجاد آن ریسک نیز تعیین شده است.

گام ۲: تعیین ضرایب شدت، کشف و احتمال وقوع هر ریسک

در این گام ابتدا ضریب شدت و ضریب کشف برای هر ریسک توسط خبرگان و در بازه [۱-۱۰] مشخص می‌شوند. سپس با توجه به این اصل که احتمال وقوع هر شکست متمم قابلیت اطمینان آن است [۲۷]، ابتدا احتمال شکست هر اتصال (pr_i) به صورت زیر مشخص می‌گردد:

$$pr_i = 1 - R_i = (1 - r_i)^{n_i} \quad i = 1, \dots, 18 \quad (5)$$

سپس با توجه به این که در نمودار FTA اتصالات، رابطه بین اتصالات مرتبط با هر ریسک از نوع یا (OR) می‌باشد، تابع احتمال وقوع هر ریسک (Pr_k) از رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$Pr_k = 1 - \prod_{i \in Risk(k)} (1 - pr_i) = 1 - \prod_{i \in Risk(k)} [1 - (1 - r_i)^{n_i}] \quad k = 1, \dots, 8 \quad (6)$$

همچنین برای یکسان‌سازی مقیاس ضریب احتمال با مقیاس ضرایب شدت و کشف ریسک، تابع احتمال در عدد ۱۰ ضرب شده است. ضرایب شدت، کشف و تابع احتمال وقوع برای هر ریسک در جدول ۱ نشان داده شده است.

گام ۳: محاسبه تابع عدد اولویت هر ریسک

در گام سوم تابع عدد اولویت (RPN) هر ریسک از حاصل ضرب، ضرایب شدت، کشف و تابع احتمال وقوع هر ریسک محاسبه و مقدار آن به صورت یک تابع در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. ضرایب شدت، کشف و تابع احتمال وقوع هر ریسک در سیستم اتصالات بال سازه پروازی

کشف	احتمال	شدت	نوع ریسک
۹	$1 - [1 - (1 - r_r)^{n_r}]$	۱۰	جدایی بال از سازه پروازی
۴	$1 - [1 - (1 - r_i)^{n_i}] [1 - (1 - r_q)^{n_q}]$	۱۰	پاشیدگی کامل بال
۳	$1 - [1 - (1 - r_v)^{n_v}]$	۸	کاهش سرعت سازه پروازی
۴	$1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] [1 - (1 - r_d)^{n_d}] [1 - (1 - r_{1r})^{n_{1r}}]$	۸	عدم امکان ارتفاع‌گیری سازه پروازی
۶	$1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] [1 - (1 - r_v)^{n_v}] [1 - (1 - r_{1a})^{n_{1a}}]$	۶	لرزش بال
۳	$1 - [1 - (1 - r_r)^{n_r}] [1 - (1 - r_a)^{n_a}] [1 - (1 - r_{1c})^{n_{1c}}] [1 - (1 - r_{1i})^{n_{1i}}]$	۶	اختلال در هدایت سازه پروازی
۵	$1 - [1 - (1 - r_r)^{n_r}] [1 - (1 - r_{1f})^{n_{1f}}] [1 - (1 - r_{1d})^{n_{1d}}]$	۴	فشار به سیستم هدایت سازه پروازی
۸	$1 - [1 - (1 - r_{1e})^{n_{1e}}]$	۲	عیوب ظاهری و غیر حیاتی

جدول ۲. تابع عدد اولویت هر ریسک در سیستم اتصالات بال سازه پروازی

RPN	نوع ریسک
$900 \cdot (1 - [1 - (1 - r_r)^{n_r}])$	جدایی بال از سازه پروازی
$400 \cdot (1 - [1 - (1 - r_i)^{n_i}] [1 - (1 - r_q)^{n_q}])$	پاشیدگی کامل بال
$240 \cdot (1 - [1 - (1 - r_v)^{n_v}])$	کاهش سرعت سازه پروازی
$320 \cdot (1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] [1 - (1 - r_d)^{n_d}] [1 - (1 - r_{1r})^{n_{1r}}])$	عدم امکان ارتفاع‌گیری سازه پروازی
$360 \cdot (1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] [1 - (1 - r_v)^{n_v}] [1 - (1 - r_{1a})^{n_{1a}}])$	لرزش بال
$180 \cdot (1 - [1 - (1 - r_r)^{n_r}] [1 - (1 - r_a)^{n_a}] [1 - (1 - r_{1c})^{n_{1c}}] [1 - (1 - r_{1i})^{n_{1i}}])$	اختلال در هدایت سازه پروازی
$200 \cdot (1 - [1 - (1 - r_r)^{n_r}] [1 - (1 - r_{1f})^{n_{1f}}] [1 - (1 - r_{1d})^{n_{1d}}])$	فشار به سیستم هدایت سازه پروازی
$160 \cdot (1 - [1 - (1 - r_{1e})^{n_{1e}}])$	عیوب ظاهری و غیر حیاتی

گام ۴: تعیین تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم

در این گام با توجه به مقادیر RPN به دست آمده برای هر ریسک و با فرض استقلال ریسک‌ها، تابع ریسک کلی سیستم از جمع توابع همه ریسک‌ها محاسبه و تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم (S) به صورت زیر فرموله می‌گردد:

$$\min S = 900 \cdot (1 - [1 - (1 - r_r)^{n_r}]) + 400 \cdot (1 - [1 - (1 - r_i)^{n_i}] [1 - (1 - r_q)^{n_q}]) + 240 \cdot (1 - [1 - (1 - r_v)^{n_v}]) + 320 \cdot (1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] [1 - (1 - r_d)^{n_d}] [1 - (1 - r_{1r})^{n_{1r}}]) \quad (V)$$

$$\begin{aligned}
& + 360 \left(1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] \cdot [1 - (1 - r_{iv})^{n_{iv}}] [1 - (1 - r_{ia})^{n_{ia}}] \right) \\
& + 180 \left(1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] [1 - (1 - r_a)^{n_a}] \cdot [1 - (1 - r_s)^{n_s}] [1 - (1 - r_{iv})^{n_{iv}}] \right) \\
& + 200 \left(1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] [1 - (1 - r_v)^{n_v}] \cdot [1 - (1 - r_{is})^{n_{is}}] \right) + 160 \left(1 - [1 - (1 - r_f)^{n_f}] \right)
\end{aligned}$$

۴-۲-۳ تعریف محدودیت‌ها

در مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد برای سیستم اتصالات بال سازه پروازی، دو محدودیت فازی وزن و هزینه نقاط جوش در سیستم اتصالات و همچنین محدودیت فازی بیشینه قابلیت اطمینان هر نقطه جوش در نظر گرفته شده که نحوه تعیین آن‌ها در ادامه تشریح شده است.

الف) محدودیت فازی وزن سیستم

به دلیل تاثیر گذاری وزن سیستم اتصالات در مرکز ثقل و آشفته‌گی هدایت و کنترل سازه پروازی لازم است وزن این سیستم (نقاط جوش) محدود گردد. برای تعیین محدودیت وزن باید برای هر محل اتصال، تابع وزن هر نقطه جوش برحسب قابلیت اطمینان تعیین گردد که برای این کار از داده‌های به دست آمده از بررسی یک نمونه ۱۰۰۰ تایی از نقاط جوش در اتصالات مختلف بال سازه‌های پروازی استفاده شده است. برای تعیین این تابع ابتدا با فرض توزیع وایبول برای زمان شکست یک نقطه جوش و با شبیه‌سازی کشش نقطه جوش در شرایط کاربردی سیستم، مدت زمان دوام نقطه جوش محاسبه و از تقسیم این مقدار بر عمر مورد نیاز سیستم اصلی، قابلیت اطمینان هر نقطه جوش محاسبه شده است. سپس وزن هر نقطه جوش (برحسب گرم) اندازه‌گیری و با تحلیل آماری این مجموعه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab، رابطه وزن یک نقطه جوش برحسب قابلیت اطمینان به صورت زیر مشخص شده است:

$$w_i = 12/35 e^{6/7(r_i)} \quad i = 1, \dots, 18 \quad (8)$$

که در رابطه بالا w_i و r_i به ترتیب قابلیت اطمینان و وزن یک نقطه جوش در اتصال i ($i=1, \dots, 18$) را نشان می‌دهند.

با فرض تشابه نقاط جوش در هر محل اتصال، وزن نقاط جوش در هر محل اتصال از حاصل ضرب وزن یک نقطه جوش در تعداد نقاط جوش به دست می‌آید. همچنین با توجه به محاسبات و نظرات خبرگان، حداکثر وزن سیستم اتصالات به طور معمول برابر ۵۸۵۲ گرم در نظر گرفته شده است که می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد. بنابراین برش α برای محدودیت فازی وزن نقاط جوش در اتصالات سازه پروازی به صورت زیر مشخص می‌گردد:

$$\sum_{i=1}^{18} 12/35 n_i e^{6/7(r_i)} \leq 5852 + 5852(1 - \alpha) \quad (9)$$

ب) محدودیت فازی هزینه سیستم

افزودن اجزای مازاد به سیستم اتصالات، نیازمند صرف هزینه برای ایجاد هر نقطه جوش بوده و این هزینه با توجه به قیمت تمام شده و بودجه از قبل تعیین شده برای سیستم اتصالات محدود است. برای تعیین محدودیت هزینه نیز از بررسی نمونه ۱۰۰۰ تایی از نقاط جوش در اتصالات مختلف بال سازه‌های پروازی استفاده شده و پس از تعیین قابلیت اطمینان هر نقطه جوش، هزینه تمام شده آن نقطه جوش (برحسب دلار) توسط خبرگان تعیین و با استفاده از نرم افزار Minitab، رابطه هزینه یک نقطه جوش برحسب قابلیت اطمینان به صورت زیر مشخص شده است:

$$c_i = 4/3 \left(\frac{-1000}{2/6 \ln(r_i)} \right)^{0.3} \quad i = 1, \dots, 18 \quad (10)$$

با فرض تشابه نقاط جوش در هر محل اتصال، هزینه جوش در هر محل اتصال از حاصل ضرب تعداد نقاط جوش در هزینه هر نقطه جوش محاسبه می گردد. همچنین با توجه به محاسبات نقطه سر به سر، مقدار هزینه معمول سیستم اتصالات برابر ۶۶۷۱ دلار در نظر گرفته شده که حداکثر می تواند تا دو برابر افزایش یابد. با توجه به موارد بالا، برش α محدودیت فازی هزینه‌ی نقاط جوش در سیستم اتصالات به صورت زیر تعیین می گردد:

$$\sum_{i=1}^{18} 4/3 n_i \left(\frac{-1000}{2/6 \ln(r_i)} \right)^{0.3} \leq 6671 + 6671(1-\alpha) \quad (11)$$

ج) محدودیت فازی قابلیت اطمینان هر نقطه جوش

با توجه به نظر خبرگان و آزمایش‌های انجام شده و به علت محدودیت فن آوری موجود جوشکاری، قابلیت اطمینان نقاط جوش به صورت معمول مقدار ۰/۲۷۳ بوده و حداکثر می تواند تا دو برابر افزایش یابد. بنابراین برش α محدودیت‌های فازی در رابطه با بیشینه قابلیت اطمینان هر نقطه جوش به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$r_i \leq 0/273 + 0/273(1-\alpha) \quad i = 1, \dots, 18 \quad (12)$$

۴-۳ حل مدل

برای حل مدل دو هدفه تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد پیشنهادی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده باید دو تابع هدف مساله به یک تابع هدف کمینه‌سازی تبدیل و باهم ادغام گردند. برای این کار تابع هدف قابلیت اطمینان (R) در منفی یک ضرب و سپس هر دو تابع هدف بی‌مقیاس و مطابق رابطه زیر به صورت موزون خطی باهم ترکیب می شوند:

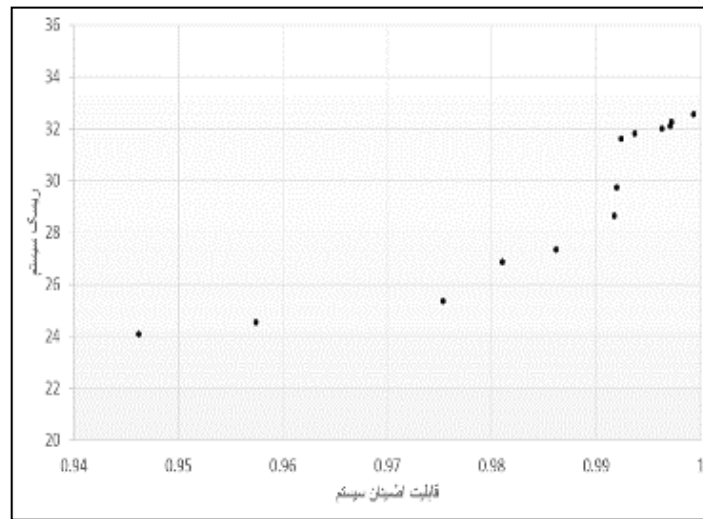
$$\min Z = -\lambda R + (1-\lambda) \left(\frac{S-1}{2700-1} \right) \quad (13)$$

برای استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده باید ابتدا مقادیر پارامترهای این الگوریتم تعیین گردند. مقادیر این پارامترها از طریق آزمون مقادیر مختلف و استفاده از پارامترهای مورد استفاده در مقالات مشابه مشخص و در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده

پارامتر	مقدار
تعداد اولیه‌ی فاخته‌ها	۵۰
حداقل تعداد تخم برای هر فاخته	۲
حداکثر تعداد تخم برای هر فاخته	۵
تعداد تکرار	۵۰۰
تعداد گروه فاخته‌ها	۳
حداکثر تعداد فاخته‌ها	۸۰

همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است ماتریس جمعیت اولیه، ماتریسی با ابعاد (۵۰×۳۶) بوده که در آن ۵۰ تعداد اولیه جمعیت فاخته‌ها و ۳۶ تعداد متغیرهای مساله شامل تعداد و قابلیت اطمینان اجزای مازاد است. همچنین تعداد تخم‌ها برای هر فاخته نیز یک عدد تصادفی صحیح بین $[۲-۵]$ در نظر گرفته شده است. برای کد نویسی الگوریتم فرا ابتکاری فاخته اصلاح شده از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. مساله برای هر مقدار برش α بین $[۰-۱]$ با استفاده از ضرایب مختلف λ در فاصله $[۰-۱]$ حل شده و به ازای هر برش α جواب‌های پارتو از میان جواب‌های به دست آمده مشخص شده است. شکل ۶ مقادیر توابع هدف را در جواب‌های پارتوی مساله به ازای برش $\alpha=۱$ نشان می‌دهد.



شکل ۶. مقادیر توابع هدف در جواب‌های پارتوی سیستم اتصالات بال سازه پروازی ($\alpha=۱$)

برای بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مساله، عملی بودن^۱ جواب‌های به دست آمده از این الگوریتم با توجه به محدودیت‌های مساله بررسی و صحت جواب‌ها و عدم نقض محدودیت‌ها تایید شده است. همچنین به منظور بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده، جواب‌های به دست آمده از این الگوریتم با جواب‌های حاصل از حل مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS (BARON solver) مقایسه شده است. جدول ۴ مقادیر متغیرهای تصمیم، توابع هدف و زمان پردازش را برای جواب به دست آمده در دو روش به ازای مقادیر $\lambda=۰/۶$ و برش $\alpha=۰/۵$ نشان می‌دهد.

^۱ feasibility

جدول ۴. جواب مساله در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح شده و نرم‌افزار GAMS ($\alpha=0/5$ و $\lambda=0/6$)

الگوریتم فاخته اصلاح شده (n_i, r_i)	GAMS (n_i, r_i)	شماره اتصال
(۳۰,۰/۱۲۰)	(۴۰,۰/۱۹۴)	۱
(۴۰,۰/۱۶۳)	(۳۸,۰/۱۸۸)	۲
(۴۰,۰/۱۶۳)	(۴۵,۰/۱۶۸)	۳
(۱۴,۰/۱۴۰)	(۱۱,۰/۱۲۷)	۴
(۳۶,۰/۱۶۱)	(۱۲,۰/۲۴۶)	۵
(۴۱,۰/۱۵۳)	(۳۱,۰/۱۴۷)	۶
(۳۹,۰/۱۲۰)	(۴۳,۰/۱۰۹)	۷
(۴۱,۰/۱۱۷)	(۳۷,۰/۱۱۲)	۸
(۴۷,۰/۱۶۲)	(۳۰,۰/۲۵۲)	۹
(۴۶,۰/۱۶۲)	(۲۲,۰/۲۶۹)	۱۰
(۳۲,۰/۱۶۲)	(۲۲,۰/۱۹۳)	۱۱
(۳۲,۰/۱۵۹)	(۲۹,۰/۱۶۲)	۱۲
(۳۸,۰/۱۴۷)	(۳۲,۰/۱۵۴)	۱۳
(۲۹,۰/۱۵۹)	(۱۵,۰/۱۷۹)	۱۴
(۴۲,۰/۱۶۰)	(۱۵,۰/۲۵۵)	۱۵
(۴۱,۰/۱۰۹)	(۴۱,۰/۱۰۸)	۱۶
(۴۶,۰/۱۶۰)	(۱۴,۰/۲۱۹)	۱۷
(۴۸,۰/۱۵۱)	(۴۰,۰/۲۱۲)	۱۸
۰/۹۷۷۲	۰/۹۹۰۲	قابلیت اطمینان (R)
۳۸/۳۴۵	۲۹/۳۴۱	ریسک (S)
۶/۷	۳۶۱/۶	زمان پردازش (ثانیه)

مقایسه نتایج حاصل از این دو روش نشان می‌دهد که اگرچه در این حالت جواب به دست آمده از نرم‌افزار GAMS اندکی از جواب به دست آمده از الگوریتم فاخته اصلاح شده بهتر است اما نرم‌افزار GAMS برای رسیدن به این جواب به زمان بسیار طولانی‌تر (حدود ۶۰ برابر) نسبت به الگوریتم فاخته اصلاح شده نیاز دارد. بنابراین با توجه به Np-hard بودن مدل RRAP پیشنهادی عملاً امکان حل مسایل بزرگ با استفاده از نرم‌افزار GAMS وجود ندارد و باید از رویکرد پیشنهادی الگوریتم فاخته اصلاح شده برای این منظور استفاده گردد.

۴-۳-۱ انتخاب جواب رضایت بخش

برای انتخاب جواب رضایت بخش در سیستم اتصالات بال سازه پروازی، نظرات خبرگان در مورد درجه اهمیت توابع هدف بررسی شده است. با توجه به این نظرات مقدار $\lambda=0/6$ در نظر گرفته شده و جواب‌های بهینه به ازای مقادیر مختلف برش α محاسبه و در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. مقادیر توابع هدف در جواب‌های بهینه مساله به ازای $\lambda=0/6$ و مقادیر مختلف برش α

α	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۱
R	۰/۹۹۲۴	۰/۹۹۲۶	۰/۹۹۳۰	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۰۲	۰/۹۹۴۶	۰/۹۹۷۰	۰/۹۹۳۵	۰/۹۹۱۵	۰/۹۹۸۷
S	۲۷/۲۹۱	۲۷/۷۷۲	۲۸/۶۷۰	۲۸/۱۰۹	۲۸/۶۴۲	۲۹/۳۴۱	۲۹/۲۳۵	۲۹/۹۴۱	۲۹/۷۶۵	۳۰/۹۵۱	۳۰/۷۵۶

نهایتاً از میان این جواب‌ها، خبرگان جواب به‌دست‌آمده به ازای برش $\alpha=0/5$ را برای کاربرد در عمل و به‌عنوان جواب رضایت‌بخش انتخاب کرده‌اند که در آن، مقدار مطلوب افزایش در وزن، هزینه و قابلیت اطمینان هر نقطه‌جوش تا ۵۰ درصد مقدار معمول در نظر گرفته شده است. با توجه به جواب رضایت‌بخش انتخاب‌شده توسط خبرگان و برای بررسی میزان بهبود حاصل از کاربرد مدل پیشنهادی، مقادیر توابع هدف در وضعیت موجود سیستم محاسبه و با مقادیر توابع هدف حاصل با $\lambda=0/6$ و $\alpha=0/5$ مقایسه و نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. مقادیر توابع هدف جواب بهینه مدل پیشنهادی و وضعیت موجود ($\alpha=0/5$ و $\lambda=0/6$)

ریسک	قابلیت اطمینان	روش
۲۹/۳۴۱	۰/۹۹۰۲	مدل پیشنهادی
۳۱/۸۸۷	۰/۹۶۵۴	وضعیت موجود
-۲/۵۴۶	۰/۰۲۴۸	میزان تغییر
۸/۶۸	۲/۵۶	درصد بهبود

همان‌طور که در جدول ۶ دیده می‌شود استفاده از جواب به‌دست‌آمده از حل مدل پیشنهادی باعث افزایش قابلیت اطمینان به اندازه ۲/۵ درصد و کاهش ریسک سیستم به اندازه ۸/۶۸ درصد نسبت به وضعیت موجود شده است و از این‌رو خبرگان استفاده از این جواب را در اتصالات سیستم بال سازه پروازی تایید کرده‌اند.

۵ نتیجه‌گیری

ریسک شاخصی است که نقش مهمی در طراحی سیستم‌های پیچیده دارد و مقدار آن تابعی از تعداد و قابلیت اطمینان اجزا سیستم است. در این مقاله یک مدل دو هدفه بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی ریسک سیستم در مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد (RRAP) توسعه داده شده است که در آن وزن، هزینه و حداکثر قابلیت اطمینان اجزاء به‌صورت فازی در نظر گرفته شده است. برای تعیین تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم از روش تحلیل اثرات و حالت شکست استفاده شده است که در آن عدد اولویت هر ریسک از حاصل ضرب مقادیر شدت، کشف و احتمال وقوع ریسک به‌دست آمده و احتمال وقوع هر ریسک نیز به صورت تابعی از تعداد و قابلیت اطمینان اجزای مازاد مرتبط با ریسک تعریف شده است. همچنین با توجه به پیچیدگی زمانی حل مدل پیشنهادی، برای حل آن از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، از این مدل در تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد اتصالات بال یک سازه پروازی استفاده و جواب‌های پارتو این مساله مشخص شده است. با مقایسه وضعیت موجود با یکی از جواب‌های پارتو به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی (به‌عنوان جواب رضایت‌بخش)، افزایش تقریباً دو درصدی در قابلیت اطمینان و کاهش تقریباً سه درصدی در ریسک نسبت به وضعیت موجود حاصل شده است. همچنین برای بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده در حل مساله، جواب‌های حاصل از این الگوریتم با نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار GAMS مقایسه و مناسب بودن نتایج الگوریتم پیشنهادی مشخص شده است. با توجه به این نتایج استفاده

از مدل پیشنهادی و روش حل آن در مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد، می‌تواند در بهبود عملکرد سیستم‌های پیچیده مؤثر باشد و از این رو کاربرد آن توصیه می‌گردد.

منابع

- [1] Hoang, P. (2003). Handbook of Reliability Engineering, 2nd Edition, Springer, London.
- [2] Hongzhou, W., Hoang P. (2006). Reliability and Optimal Maintenance, 1nd Edition, Springer, London.
- [3] Coit Dawid, W. (2003). Maximization of system reliability with a choice of redundancy strategies, IIE Transactions. 35(6), 535-544.
- [4] Kuo, W., Prasad, R. (2000). An annotated overview of system reliability optimization, IEEE Transactions on Reliability, 49(2), 176-187.
- [5] Afonso, L.D., Mariani, V.C., Coelho L.S. (2013). Modified imperialist competitive algorithm based on attraction and repulsion concepts for reliability redundancy optimization, Expert Systems with Applications, 40, 3794-3802.
- [6] Garg, H., Sharma, S.P. (2013). Multi-objective reliability redundancy allocation problem using particle swarm optimization, Computers & Industrial Engineering, 64: 247-255.
- [7] Abouei Ardakan, M., Zeinal Hamadani, A. (2014). Reliability-redundancy allocation problem with cold-standby redundancy strategy, Simulation Modelling Practice and Theory, 42, 107-118.
- [8] Garg, H., Rani, M., Sharma, S.P., Vishwakarma, Y. (2014). Bi-objective optimization of the reliability-redundancy allocation problem for series-parallel system, Journal of Manufacturing Systems, 53, 13-26.
- [9] Roy, P., Mahapatra, B.S., Mahapatra, G.S., Roy P.K. (2014). Entropy based region reducing genetic algorithm for reliability redundancy allocation in interval environment, Expert Systems with Applications, 41, 1-14.
- [10] Zhang E., Chen, Q. (2015). Multi-objective reliability allocation in an interval environment using particle swarm optimization, Reliability Engineering and System Safety, 141, 1-25.
- [11] Garg, H. (2015). An approach for solving constrained reliability redundancy allocation problems using cuckoo search algorithm, Journal of Basic Applied Sciences, 4, 14-25.
- [12] Huang, C.L. (2015). A particle based simplified swarm optimization algorithm for reliability redundancy allocation problems, Reliability Engineering and System Safety, 142, 221-230.
- [13] Caserta, M., Vob, S. (2015). An exact algorithm for the reliability redundancy allocation problem, European Journal of Operational Research, 239(3), 1-17.
- [14] Huang, C.L. (2015). A particle-based simplified swarm optimization algorithm for reliability redundancy allocation problems, Reliability Engineering and System Safety, 142: 221-230.
- [15] Akbarzade Khorshidi, H., Gunawan, I., Yousef, I. (2016). A value-driven approach for optimizing reliability-redundancy allocation problem in multi-state weighted k-out-of-n system, Journal of Manufacturing Systems, 40, 54-62.
- [16] Yeh, C.T., Fiondella, L. (2016). Optimal redundancy allocation to maximize multi-state computer network reliability subject to correlated failures, Reliability Engineering and System Safety, 12, 131-143.
- [17] Xiang, Q., Shaukat A., Tao, Y., Li Z., (2017) Reliability-redundancy location allocation with maximum reliability and minimum cost using search techniques, Information and Software Technology, 82, 36-54
- [18] Abouei Ardakan, M., Rezvan, M.T., (2018) Multi-objective optimization of reliability-redundancy allocation problem with cold-standby strategy using NSGA-II, Reliability Engineering & System Safety, 172, 225-238.
- [19] Pranab, K., Muhuri, Zubair Ashraf, Q.M. Danish Lohani, (2018) Multi objective reliability-redundancy allocation problem with interval type-2 fuzzy uncertainty, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 26(3), 1339-1355

- [20] Ouyang, Z., Liu, Y., Ruan, S.J., Jiang, T., (2019) An improved particle swarm optimization algorithm for reliability-redundancy allocation problem with mixed redundancy strategy and heterogeneous components, *Reliability Engineering & System Safety*, 181, 62-74.
- [21] Shojaei, M., Mahani, A., (2019) Efficient reliability-redundancy allocation with uniform importance measure in presence of correlated failure, *International Journal of Computers and Applications* , 41(5), 378-391.
- [22] Ashraf, Z., Muhuri, P.K., Lohani, Q.M.D., Roy, M.L. (2019) Type-2 fuzzy reliability–redundancy allocation problem and its solution using particle-swarm optimization algorithm, *Granular Computing*, 4(2), 145-166.
- [23] Srivastava, V.K., Spinello, D. (2019) Multi objective reliability redundancy allocation problem with interval type-2 fuzzy uncertainty, *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*,13(8), 173-178.
- [24] Taghiyeh, S., Mahmoudi, M., Fadaie, S. Tohidi, H. (2020) Fuzzy reliability-redundancy allocation problem of the over speed protection system, *Engineering Reports*, 2(8), 1-15.
- [25] Mahdavi-Nasab, N., Abouei Ardakan, M., Mohammadi, M., (2020) Water cycle algorithm for solving the reliability-redundancy allocation problem with a choice of redundancy strategies, *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 49(11), 2728-2748.
- [26] Gupta S., Deep K., Assad A. (2020) Reliability–Redundancy Allocation Using Random Walk Gray Wolf Optimizer, *Soft Computing for Problem Solving*, 1048, 941-959.
- [27] Steve, R. (2004) *Construction safety management system*, 2nd edition, Spon Press, California.
- [28] Huang, D.Y., Wang, C.H. (2009). Optimal multi-level thresholding using a two stage optimization approach, *Pattern Recognition Letters*, 30(3), 275–284.
- [29] Yong, X., Deb, S. (2009). Cuckoo search via levy flights, *Applied Soft Computing*, 14, 210-218.
- [30] Rajabioun, R. (2011). Cuckoo optimization algorithm, *Applied Soft Computing*, 11(8), 5508-5518.
- [31] Salahi F, Radfar R, Toloie Shlaghi A, Alborzi M. (2019) Design of multi-objective model for disruption risk assessment of supply chain using combined genetic algorithm and simulated annealing, *Journal of Operational Rsearch in its Applications*,16 (4), 89-108.
- [32] Nazri, A., Khakzar Befrouie, M. (2016) A fuzzy supplier selection and order allocation model with considering risk and using MOPSO algorithm, *Journal of Operational Rsearch in its Applications*, 13 (1), 1-14.