مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال نوزدهم، شماره سوم (پیاپی ۷۴)، پاییز ۰۱، ص ص ۱۳۱-۱۱۳
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

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- دانش‌آموخته 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 بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم با افزودن اجزای مازاد موازی و یا افزایش قابلیت اطمینان اجزای تشکیل‌دهنده 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 حاصل‌ضرب 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 می‌گردد. با توجه به این‌که پیچیدگی حل مساله تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد از نوع چندجمله‌ای سخت است، برای حل مدل، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده پیشنهاد شده و از آن در یک سیستم واقعی شامل اتصالات بال یک سازه‌ی 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 اصلاح‌شده.

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

سیستم، استفاده از اجزای مازاد به‌صورت موازی است که تحت عنوان مساله‌ی تخصیص اجزای مازاد (RAP)[1] شناخته می‌شود. در حالت کلی تخصیص اجزای مازاد به دو صورت فعال[2] و یا ذخیره[3] 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)[4] نامیده می‌شود. تخصیص قابلیت اطمینان-اجزای مازاد در سیستم‌های حساس ازجمله سازه‌های پروازی و فضایی معمولاً با استفاده از اتصالات مازاد انجام‌شده 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 اصلاح‌شده 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 به‌صورت مقادیر فازی مثلثی نشان داده‌شده 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 آسترسازی 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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

داده‌های قطعی و تابع هدف قابلیت اطمینان و محدودیت‌های حجم، هزینه و وزن، الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات را به‌کاربرده 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، بهینه سازی ازدحام ذرات و چرخه آب توسعه داده شده است. روش‌های فراابتکاری در حل مسایل بهینه‌سازی پیچیده خصوصا 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 بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان، تابع هدف دوم کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم نیز در نظر گرفته‌شده است. همچنین برای ارزیابی ریسک‌های سیستم از روش تحلیل اثرات و حالت شکست (FMEA[1]) 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 این‌که پیچیدگی مدل از نوع Np-hard است، برای حل آن الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده 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 به‌صورت دوهدفه توسعه داده شده است. سپس در بخش ۳ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته‌ی اصلاح‌شده 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 سازه‌ای پروازی به‌عنوان مطالعه موردی استفاده و این مساله با استفاده از دو روش الگوریتم فراابتکاری فاخته‌ی اصلاح‌شده و نرم‌افزار GAMS حل و نتایج با هم مقایسه شده است. در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری ارایه شده است.

[1] Failure Mode and Effects Analysis

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

۲ مدل‌سازی مساله RRAP با محدودیت‌های فازی و تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم

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

- سیستم دو حالته 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 تعمیرپذیر نمی‌باشند.
- اجزای مازاد به‌صورت موازی با اجزای اصلی قرار می‌گیرند.
- همه اجزای اصلی و پشتیبان در ابتدای شروع به کار سیستم در حال کارکردن 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]:

$$R_i = 1-(1-r_i)^{n_i} \qquad i=1,\ldots,m \tag{1}$$

که در رابطه بالا اندیس i شمارنده‌ی مجموعه، متغیر R_i قابلیت اطمینان کلی اجزای مازاد مجموعه‌ی i، متغیر r_i قابلیت اطمینان هر جزء مازاد در مجموعه‌ی i و نهایتا متغیر n_i تعداد اجزاء مازاد به‌کاررفته در مجموعه‌ی i است.

در مدل RRAP پیشنهادی دو تابع هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم و کمینه‌سازی 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 به‌صورت قطعی تبدیل می‌گردد [۱۶]. در این حالت مدل RRAP پیشنهادی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned}
&max\, R = f_1(n_1,\ldots,n_m\,;r_1,\ldots,r_m)\\
&min\; S = f_2(n_1,\ldots,n_m\,;r_1,\ldots,r_m)\\
&\text{s.t.}\\
&g_C(n_i\,;r_i) \le c_0 + (1-\alpha)d_c \qquad i=1,\ldots,m\\
&g_w(n_i\,;r_i) \le w_0 + (1-\alpha)d_w \qquad i=1,\ldots,m\\
&r_i \le r_0 + (1-\alpha)d_r \qquad i=1,\ldots,m
\end{aligned} \tag{2}$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

در رابطه بالا R قابلیت اطمینان سیستم، S 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 به‌کاررفته فرموله شود. برای این کار از روش‌های درخت تحلیل خطا (FTA[1]) 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 به‌منظور 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 ضریب 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 به‌صورت یک تابع مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه ضرایب شدت و کشف ریسک مطابق جداول کیفی و به‌صورت اعداد صحیح در بازه [۱۰-۱] تعریف می‌شوند و به دلیل مقیاس متفاوت تابع احتمال که در بازه [۱-۰] 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 ضریب شدت، ضریب کشف و تابع ضریب احتمال هر ریسک در همدیگر، عدد اولویت ریسک (RPN) برای هر یک از ریسک‌ها به صورت یک تابع مشخص می‌گردد.

گام ٤: تعیین تابع ریسک کلی سیستم

در این گام با استفاده از RPN های به‌دست‌آمده 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 اصلاح‌شده

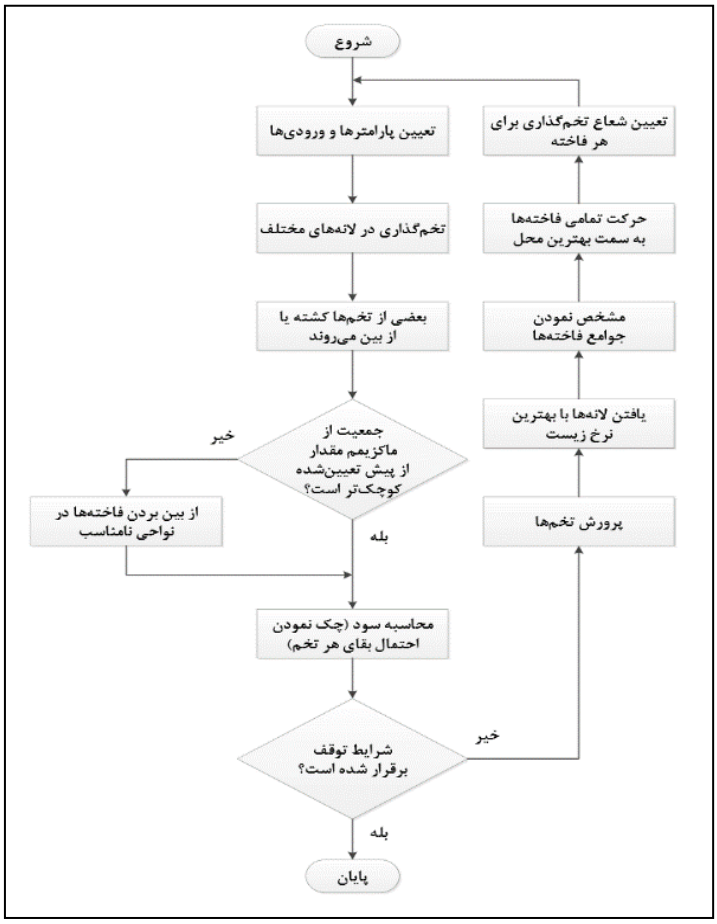
همان‌طور که قبلاً بیان شد مدل RRAP در دسته مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی (MINLP) قرار داشته و پیچیدگی زمانی حل آن از نوع چند جمله‌ای سخت (Np-hard) می‌باشد و از این رو برای حل این مساله در ابعاد بزرگ معمولاً از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. یکی از جدیدترین و قوی‌ترین الگوریتم‌های

[1] Fault Tree Analysis

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

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 داده‌شده است. روندنمای کلی این الگوریتم در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱. روندنمای الگوریتم فرا ابتکاری فاخته اصلاح‌شده [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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

گام ۳: ایجاد یک جواب تصادفی به‌عنوان نقطه‌ی هدف

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

گام ٤: مشخص کردن تعداد تخم‌ها برای هر فاخته

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

گام ٥: تعیین شعاع تخم‌گذاری برای هر فاخته

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

گام ٦: تخم‌گذاری فاخته‌ها در محدوده‌ی تخم‌گذاری

در این گام هر فاخته در داخل دایره‌ای به شعاع مشخص حرکت و در این محدوده به‌صورت تصادفی و به تعداد تخم‌های از قبل مشخص‌شده 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 قرارگرفته 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 باقی‌مانده محاسبه و اگر تعداد کل تخم‌ها از حداکثر تعداد فاخته‌ها در هر تکرار بیشتر باشد، به ترتیب تخم‌هایی که در بدترین موقعیت قرارگرفته 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 تعیین‌شده گروه‌های فاخته تشکیل می‌گردند.

گام ۱۱: تعیین گروه هدف

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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

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 ٤ و بررسی شرط توقف

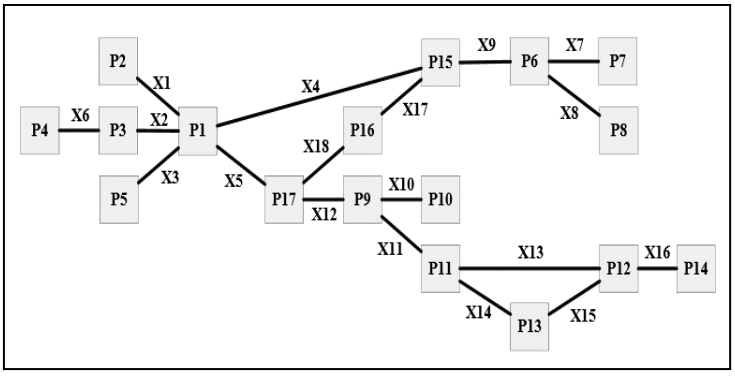
نهایتاً تا زمانی که تعداد تکرارهای الگوریتم به حداکثر تکرار از قبل تعیین‌شده برسد، این فرآیند از گام چهارم ادامه می‌یابد.

٤ 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 استفاده‌شده است. مراحل این کار در ادامه تشریح شده است.

٤-۱ شناخت سیستم

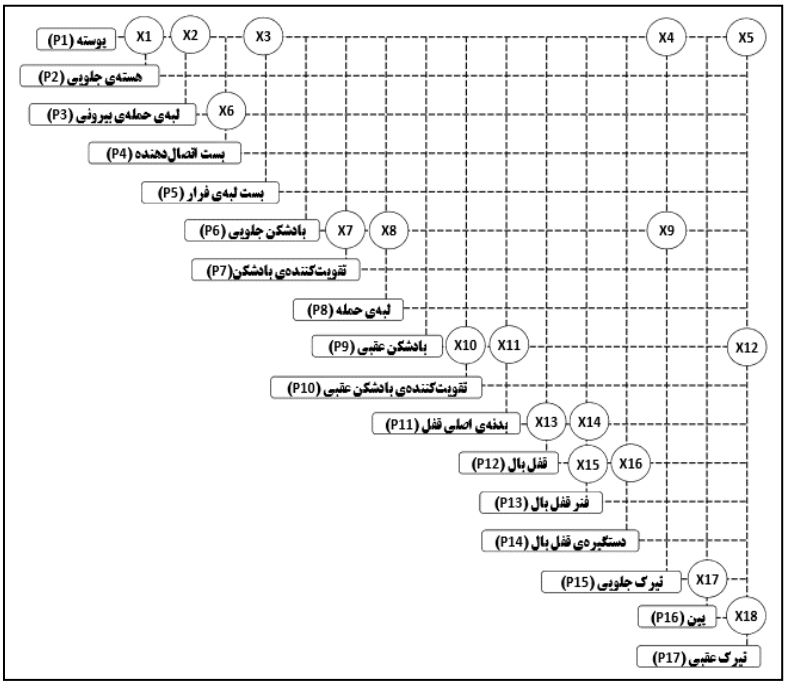
در محصولات صنعتی جهت اتصال و مونتاژ زیرسیستم‌ها و قطعات به یکدیگر از روش‌های مختلفی مانند پیچ و مهره، یا پرچ و جوش استفاده می‌شود؛ اما در اتصالات بال سازه پروازی، به دلیل تعمیرناپذیر بودن، تنها از جوش‌های خاص جهت اتصال قطعات به یکدیگر استفاده می‌گردد. سیستم بال سازه پروازی مورد بررسی شامل ۱۷ قطعه مختلف است $(P_j, j = ۱,...,۱۷)$ که از ۱۸ نقطه به هم متصل می‌شوند $(X_i, = ۱,...,۱۸)$. نحوه اتصال قطعات بال سازه پروازی به‌صورت نمودار شبکه‌ای اتصالات در شکل ۲ و ماتریس اتصالات در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۲. نمودار شبکه‌ای سیستم اتصالات بال سازه پروازی

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]



شکل ۳. ماتریس سیستم اتصالات بال سازه پروازی

٤-۲ مدل‌سازی مساله

برای مدل‌سازی مساله در سیستم اتصالات سازه پروازی باید متغیرها، توابع هدف و نیز محدودیت‌های مساله مشخص شوند که هر یک از آنها در ادامه تشریح شده‌اند.

٤-۲-۱ تعریف متغیرها

با توجه به این‌که 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 نقطه‌جوش در هر محل اتصال $(r_1,...,r_{18})$ و ۱۸ متغیر به منظور تعیین تعداد نقاط جوش در هر محل اتصال $(n_1,...,n_{18})$ می‌باشد.

٤-۲-۲ تعیین توابع هدف

در مدل پیشنهادی برای مساله RRAP دو تابع هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم در نظر گرفته‌شده است که با توجه به نحوه اتصالات سازه پروازی باید این توابع هدف مشخص گردند.

الف) تابع هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم

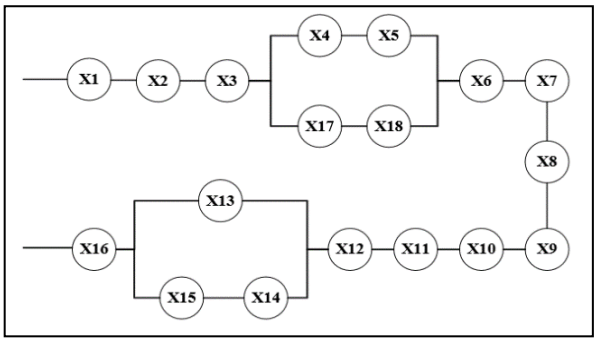
برای تعیین تابع قابلیت اطمینان در سیستم اتصالات بال سازه پروازی، باید ابتدا نمودار بلوکی قابلیت اطمینان[1] برای این سیستم مشخص شود و بدین منظور باید تعریف مشخصی برای شکست کل سیستم ارایه گردد. با توجه به تنش‌های وارده بر سیستم بال، شکست اتصالات هنگامی اتفاق می‌افتد که حتی یک قطعه به‌صورت کامل از

[1] Reliability Block Diagram

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

پیکره جدا شود که این رویداد ممکن است با قطع یک اتصال به‌تنهایی و یا قطع چند اتصال باهم رخ دهد. نمودار بلوکی قابلیت اطمینان سیستم اتصالات در شکل ۴ نشان داده‌شده است.



شکل ٤. نمودار بلوکی قابلیت اطمینان (RBD) اتصالات بال سازه پروازی

با توجه به نمودار فوق و روابط سری و موازی بین قطعات، تابع قابلیت اطمینان کلی سیستم (R) بدون در نظر گرفتن اجزای مازاد به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$R = R_1.R_2.R_3.\{1-(1-R_4.R_5).(1-R_{17}.R_{18})\}.R_6.R_7.R_8.R_9.R_{10}.R_{11}.R_{12} .\{1-(1-R_{13}).(1-R_{14}.R_{15})\}.R_{16} \quad (۳)$$

برای تبدیل این تابع به یک تابع هدف مدل RRAP، باید هر اتصال را به‌صورت n_i اتصال موازی با هم در نظر گرفته و رابطه (۱) را در رابطه (۳) جایگزین نمود. در این حالت تابع هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان مدل RRAP به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\max R = \left[1-(1-r_1)^{n_1}\right].\left[1-(1-r_2)^{n_2}\right].\left[1-(1-r_3)^{n_3}\right].\left\{1-\left(1-\left[1-(1-r_4)^{n_4}\right].\left[1-(1-r_5)^{n_5}\right]\right)\right. .\left(1-\left[1-(1-r_{17})^{n_{17}}\right].\left[1-(1-r_{18})^{n_{18}}\right]\right)\Big\}.\left[1-((1-r_6)^{n_6}\right].\left[1-(1-r_7)^{n_7}\right].\left[1-(1-r_8)^{n_8}\right].\left[1-(1-r_9)^{n_9}\right] .\left[1-(1-r_{10})^{n_{10}}\right].\left[1-(1-r_{11})^{n_{11}}\right].\left[1-((1-r_{12})^{n_{12}}\right].\left\{1-\left(1-\left[1-(1-r_{13})^{n_{13}}\right]\right)\right. .\left(1-\left[1-(1-r_{14})^{n_{14}}\right].\left[1-(1-r_{15})^{n_{15}}\right]\right)\Big\}.\left[1-(1-r_{16})^{n_{16}}\right] \quad (۴)$$

ب) تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم

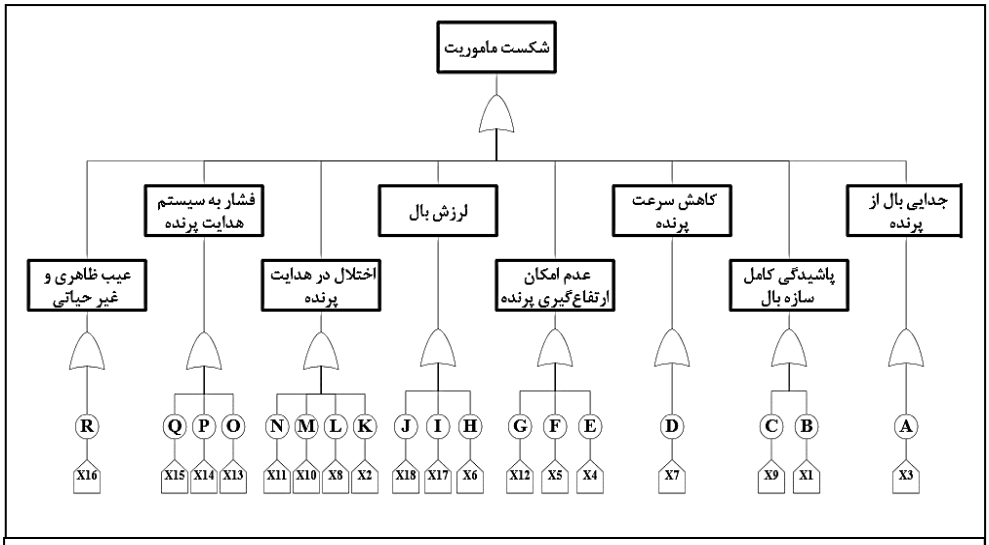
برای تعیین تابع ریسک شکست سیستم اتصالات بال سازه پروازی، مطابق با گام‌های تشریح‌شده در بخش ۲ و به‌صورت زیر عمل می‌شود:

گام ۱: تعیین ریسک‌های سیستم با استفاده از روش FTA

در گام اول با استفاده از نظرات خبرگان، درخت تجزیه‌وتحلیل خطا (FTA) برای سیستم مشخص و در شکل ۵ نشان داده‌شده است.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]



A: جدایی بست لبه‌ی فرار
B: جدایی هسته جلویی از پوسته
C: جدایی بادشکن جلویی
D: جدایی تقویت‌کننده‌ی بادشکن
E: ضعیف شدن اتصال پوسته و تیرک جلویی
F: ضعیف شدن اتصال پوسته و تیرک عقبی
G: جدایی بادشکن عقبی
H: جدایی بست اتصال‌دهنده
I: ضعیف شدن اتصال پین با تیرک جلویی
J: ضعیف شدن اتصال پین با تیرک عقبی
K: جدایی لبه‌ی حمله بیرونی
L: جدایی لبه‌ی حمله
M: جدایی تقویت‌کننده‌ی بادشکن عقبی
N: جدایی قفل بال و متعلقات
O: ضعیف شدن اتصال قفل بال به بدنه‌ی اصلی آن
P: ضعیف شدن اتصال فنر قفل بال به بدنه‌ی اصلی قفل
Q: ضعیف شدن اتصال فنر قفل به قفل
R: جدایی دستگیره‌ی قفل بال

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 تعیین‌شده 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 [۱۰-۱] 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) به‌صورت زیر مشخص می‌گردد:

$$pr_i = ۱ - R_i = \left(۱ - r_i\right)^{n_i} \qquad i = ۱,\ldots,۱۸ \tag{۵}$$

سپس با توجه به این‌که 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:

$$\mathrm{Pr}_k = ۱ - \prod_{i \in Risk(k)} \left(۱ - pr_i\right) = ۱ - \prod_{i \in Risk(k)} \left[۱ - \left(۱ - r_i\right)^{n_i}\right] \qquad k = ۱,\ldots,۸ \tag{۶}$$

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.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

گام ۳: محاسبه تابع عدد اولویت هر ریسک

در گام سوم تابع عدد اولویت (RPN) هر ریسک از حاصل‌ضرب، ضرایب شدت، کشف و تابع احتمال وقوع هر ریسک محاسبه و مقدار آن به‌صورت یک تابع در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

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

نوع ریسک	شدت	احتمال	کشف
جدایی بال از سازه پروازی	۱۰	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۳)^{n_۳}\right]\right)$	۹
پاشیدگی کامل بال	۱۰	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۱)^{n_۱}\right]\left[۱-(۱-r_۹)^{n_۹}\right]\right)$	۴
کاهش سرعت سازه پروازی	۸	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۷)^{n_۷}\right]\right)$	۳
عدم امکان ارتفاع‌گیری سازه پروازی	۸	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۴)^{n_۴}\right]\left[۱-(۱-r_۵)^{n_۵}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۲})^{n_{۱۲}}\right]\right)$	۴
لرزش بال	۶	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۶)^{n_۶}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۷})^{n_{۱۷}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۸})^{n_{۱۸}}\right]\right)$	۶
اختلال در هدایت سازه پروازی	۶	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۲)^{n_۲}\right]\left[۱-(۱-r_۸)^{n_۸}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۰})^{n_{۱۰}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۱})^{n_{۱۱}}\right]\right)$	۳
فشار به سیستم هدایت سازه پروازی	۴	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۳)^{n_۳}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۴})^{n_{۱۴}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۵})^{n_{۱۵}}\right]\right)$	۵
عیوب ظاهری و غیرحیاتی	۲	$۱۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_{۱۶})^{n_{۱۶}}\right]\right)$	۸

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

نوع ریسک	RPN
جدایی بال از سازه پروازی	$۹۰۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۳)^{n_۳}\right]\right)$
پاشیدگی کامل بال	$۴۰۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۱)^{n_۱}\right]\left[۱-(۱-r_۹)^{n_۹}\right]\right)$
کاهش سرعت سازه پروازی	$۲۴۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۷)^{n_۷}\right]\right)$
عدم امکان ارتفاع‌گیری سازه پروازی	$۳۲۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۴)^{n_۴}\right]\left[۱-(۱-r_۵)^{n_۵}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۲})^{n_{۱۲}}\right]\right)$
لرزش بال	$۳۶۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۶)^{n_۶}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۷})^{n_{۱۷}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۸})^{n_{۱۸}}\right]\right)$
اختلال در هدایت سازه پروازی	$۱۸۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۲)^{n_۲}\right]\left[۱-(۱-r_۸)^{n_۸}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۰})^{n_{۱۰}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۱})^{n_{۱۱}}\right]\right)$
فشار به سیستم هدایت سازه پروازی	$۲۰۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۳)^{n_۳}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۴})^{n_{۱۴}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۵})^{n_{۱۵}}\right]\right)$
عیوب ظاهری و غیرحیاتی	$۱۶۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_{۱۶})^{n_{۱۶}}\right]\right)$

گام ٤: تعیین تابع هدف کمینه‌سازی ریسک شکست سیستم

در این گام با توجه به مقادیر RPN به‌دست‌آمده 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) به‌صورت زیر فرموله می‌گردد:

$$\begin{aligned}\min\ S = {} & ۹۰۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۳)^{n_۳}\right]\right)+۴۰۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۱)^{n_۱}\right]\left[۱-(۱-r_۹)^{n_۹}\right]\right) \\ & +۲۴۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۷)^{n_۷}\right]\right)+۳۲۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_۴)^{n_۴}\right].\left[۱-(۱-r_۵)^{n_۵}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۲})^{n_{۱۲}}\right]\right)\end{aligned} \quad (۷)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

$$+۳۶۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_{۶})^{n_{۶}}\right].\left[۱-(۱-r_{۱۷})^{n_{۱۷}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۸})^{n_{۱۸}}\right]\right)$$
$$+۱۸۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_{۲})^{n_{۲}}\right]\left[۱-(۱-r_{۸})^{n_{۸}}\right].\left[۱-(۱-r_{۱۰})^{n_{۱۰}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۱})^{n_{۱۱}}\right]\right)$$
$$+۲۰۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_{۳})^{n_{۳}}\right]\left[۱-(۱-r_{۱۴})^{n_{۱۴}}\right].\left[۱-(۱-r_{۱۵})^{n_{۱۵}}\right]\right)+۱۶۰\left(۱-\left[۱-(۱-r_{۱۶})^{n_{۱۶}}\right]\right)+$$

٤-۲-۳ 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 نقطه‌جوش در نظر گرفته‌شده که نحوه تعیین آن‌ها در ادامه تشریح شده است.

الف) محدودیت فازی وزن سیستم

به دلیل تاثیرگذاری وزن سیستم اتصالات در مرکز ثقل و آشفتگی 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 نقطه‌جوش برحسب قابلیت اطمینان تعیین گردد که برای این کار از داده‌های به‌دست‌آمده از بررسی یک نمونه ۱۰۰۰ تایی از نقاط جوش در اتصالات مختلف بال سازه‌های پروازی استفاده‌شده است. برای تعیین این تابع ابتدا با فرض توزیع وایبول برای زمان شکست یک نقطه‌جوش و با شبیه‌سازی کشش نقطه‌جوش در شرایط کاربردی سیستم، مدت‌زمان دوام نقطه‌جوش محاسبه و از تقسیم این مقدار بر عمر موردنیاز سیستم اصلی، قابلیت اطمینان هر نقطه‌جوش محاسبه‌شده است. سپس وزن هر نقطه‌جوش (برحسب گرم) اندازه‌گیری و با تحلیل آماری این مجموعه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab، رابطه وزن یک نقطه‌جوش برحسب قابلیت اطمینان به‌صورت زیر مشخص‌شده است:

$$w_i = ۱۲/۳۵\ e^{\,۶/۷\,(r_i)} \qquad i = ۱,\ldots,۱۸ \tag{۸}$$

که در رابطه بالا r_i و w_i به ترتیب قابلیت اطمینان و وزن یک نقطه‌جوش در اتصال i ($i = ۱,\ldots,۱۸$) را نشان می‌دهند.

با فرض تشابه نقاط جوش در هر محل اتصال، وزن نقاط جوش در هر محل اتصال از حاصل‌ضرب وزن یک نقطه‌جوش در تعداد نقاط جوش به دست می‌آید. همچنین با توجه به محاسبات و نظرات خبرگان، حداکثر وزن سیستم اتصالات به‌طورمعمول برابر ۵۸۵۲ گرم در نظر گرفته‌شده است که می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد. بنابراین برش α برای محدودیت فازی وزن نقاط جوش در اتصالات سازه پروازی به‌صورت زیر مشخص می‌گردد:

$$\sum_{i=۱}^{۱۸} ۱۲/۳۵\ \ n_i\ \ e^{\,۶/۷(r_i)} \le ۵۸۵۲ + ۵۸۵۲(۱-\alpha) \tag{۹}$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

ب) محدودیت فازی هزینه سیستم

افزودن اجزای مازاد به سیستم اتصالات، نیازمند صرف هزینه برای ایجاد هر نقطه‌جوش بوده و این هزینه با توجه به قیمت تمام‌شده و بودجه از قبل تعیین‌شده برای سیستم اتصالات محدود است. برای تعیین محدودیت هزینه نیز از بررسی نمونه ۱۰۰۰ تایی از نقاط جوش در اتصالات مختلف بال سازه‌های پروازی استفاده‌شده و پس از تعیین قابلیت اطمینان هر نقطه‌جوش، هزینه تمام‌شده آن نقطه‌جوش (برحسب دلار) توسط خبرگان تعیین و با استفاده از نرم‌افزار Minitab، رابطه هزینه یک نقطه‌جوش برحسب قابلیت اطمینان به‌صورت زیر مشخص‌شده است:

$$c_i = ۴/۳ \left(\frac{-۱۰۰۰}{۲/۶ ln(r_i)} \right)^{۰/۳} \qquad i = ۱,\ldots,۱۸ \tag{۱۰}$$

با فرض تشابه نقاط جوش در هر محل اتصال، هزینه جوش در هر محل اتصال از حاصل‌ضرب تعداد نقاط جوش در هزینه هر نقطه‌جوش محاسبه می‌گردد. همچنین با توجه به محاسبات نقطه سربه‌سر، مقدار هزینه معمول سیستم اتصالات برابر ۶۶۷۱ دلار در نظر گرفته‌شده که حداکثر می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد. با توجه به موارد بالا، برش α محدودیت فازی هزینه‌ی نقاط جوش در سیستم اتصالات به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\sum_{i=۱}^{۱۸} ۴/۳ \; n_i \left(\frac{-۱۰۰۰}{۲/۶ \; ln(r_i)} \right)^{۰.۳} \le ۶۶۷۱ + ۶۶۷۱(۱-\alpha) \tag{۱۱}$$

ج) محدودیت فازی قابلیت اطمینان هر نقطه‌جوش

با توجه به نظر خبرگان و آزمایش‌های انجام‌شده و به علت محدودیت فن‌آوری موجود جوشکاری، قابلیت اطمینان نقاط جوش به‌صورت معمول مقدار ۰/۲۷۳ بوده و حداکثر می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد. بنابراین برش α محدودیت‌های فازی در رابطه با بیشینه قابلیت اطمینان هر نقطه‌جوش به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$r_i \le ۰/۲۷۳ + ۰/۲۷۳(۱-\alpha) \qquad i = ۱,\ldots,۱۸ \tag{۱۲}$$

٤-۳ حل مدل

برای حل مدل دو هدفه تخصیص قابلیت اطمینان–اجزای مازاد پیشنهادی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده 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 به‌صورت موزون خطی باهم ترکیب می‌شوند:

$$\min \; Z = -\lambda R + (۱-\lambda)\left(\frac{S-۱}{۲۷۰۰-۱} \right) \tag{۱۳}$$

برای استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده باید ابتدا مقادیر پارامترهای این الگوریتم تعیین گردند. مقادیر این پارامترها از طریق آزمون مقادیر مختلف و استفاده از پارامترهای مورداستفاده در مقالات مشابه مشخص و در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

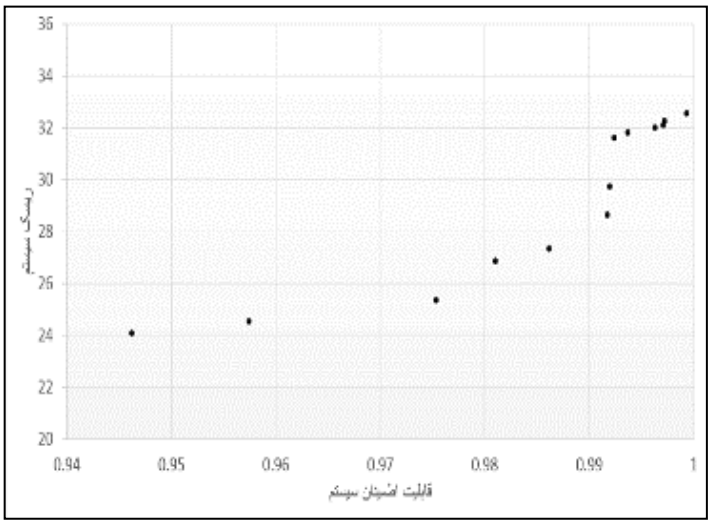
[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده

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 (۳۶ ×۵۰) 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 [۵-۲] در نظر گرفته‌شده است.

برای کد نویسی الگوریتم فرا ابتکاری فاخته اصلاح‌شده از نرم‌افزار MATLAB استفاده‌شده است. مساله برای هر مقدار برش α بین [۱-۰] با استفاده از ضرایب مختلف λ در فاصله [۱-۰] حل شده و به ازای هر برش α جواب‌های پارتو از میان جواب‌های به‌دست‌آمده مشخص‌شده است. شکل ۶ مقادیر توابع هدف را در جواب‌های پارتوی مساله به ازای برش α =۱ نشان می‌دهد.



شکل ٦. مقادیر توابع هدف در جواب‌های پارتوی سیستم اتصالات بال سازه پروازی (α=۱)

برای بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مساله، عملی بودن[۱] جواب‌های به‌دست‌آمده از این الگوریتم با توجه به محدودیت‌های مساله بررسی و صحت جواب‌ها و عدم نقض محدودیت‌ها تایید شده است. همچنین به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده، جواب‌های به‌دست‌آمده 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 به‌دست آمده در دو روش به ازای مقادیر λ=۰/۶ و برش α=۰/۵ نشان می‌دهد.

[۱] feasibility

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

جدول ٤. جواب مساله در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته اصلاح‌شده و نرم‌افزار GAMS (λ =۰/۶ و α=۰/۵)

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

مقایسه نتایج حاصل از این دو روش نشان می‌دهد که اگرچه در این حالت جواب به‌دست‌آمده از نرم‌افزار GAMS اندکی از جواب به‌دست‌آمده از الگوریتم فاخته اصلاح‌شده بهتر است اما نرم‌افزار GAMS برای رسیدن به این جواب به زمان بسیار طولانی‌تر (حدود ۶۰ برابر) نسبت به الگوریتم فاخته اصلاح‌شده 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 اصلاح‌شده برای این منظور استفاده گردد.

٤-۳-۱ انتخاب جواب رضایت‌بخش

برای انتخاب جواب رضایت‌بخش در سیستم اتصالات بال سازه پروازی، نظرات خبرگان در مورد درجه اهمیت توابع هدف بررسی شده است. با توجه به این نظرات مقدار λ=۰/۶ در نظر گرفته‌شده و جواب‌های بهینه به ازای مقادیر مختلف برش α محاسبه و در جدول ۵ نشان داده‌شده است.

جدول ۵. مقادیر توابع هدف در جواب‌های بهینه مساله به ازای λ =۰/۶ 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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

نهایتاً از میان این جواب‌ها، خبرگان جواب به‌دست‌آمده به ازای برش α=۰/۵ 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 گرفته‌شده 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 λ =۰/۶ و α=۰/۵ مقایسه و نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ٦. مقادیر توابع هدف جواب بهینه مدل پیشنهادی و وضعیت موجود (λ =۰/۶ و α=۰/۵)

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

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 ازاین‌رو 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 داده‌شده است که در آن وزن، هزینه و حداکثر قابلیت اطمینان اجزاء به‌صورت فازی در نظر گرفته‌شده 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 حاصل‌ضرب 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 استفاده‌شده 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 مشخص‌شده 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 حاصل‌شده 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 مشخص‌شده است. با توجه به این نتایج استفاده

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

از مدل پیشنهادی و روش حل آن در مساله تخصیص قابلیت اطمینان–اجزای مازاد، می‌تواند در بهبود عملکرد سیستم‌های پیچیده مؤثر باشد و ازاین‌رو 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, IIIE Transactions. 35(6), 535-544.

[4] Kuo, W., Prasad, R. (2000). An annotated overview of system reliability optimazition, 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-standy 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 intervalenviroment 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 multy–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

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]

[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 Rseach 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 Rseach in its Applications, 13 (1), 1-14.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.52547/jamlu.19.3.113]