بهینه‌سازی سیستم‌های سری- موازی چندحالته با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سید سیروان کریمی *
کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه مهندسی صنایع، اصفهان
مهدی کرباسیان
دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
رضا توکلی مقدم
استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

چکیدهنیاز روز افزون به سیستم‌هایی با دسترس‌پذیری/ قابلیت اطمینان بالا منجر شده است که در سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری در زمینه بهینه‌سازی قابلیت‌اطمینان (دسترس‌پذیری در صورتی که سیستم تعمیرپذیر باشد) صورت گیرد. استفاده از انواع سیاست‌های افزونگی و افزودن اجزا اضافی، اساساً به عنوان راه‌های افزایش دسترس‌پذیری سیستم در نظرگرفته می‌شوند. در صورتی که سیستم، چندحالته باشد به دلیل پیچیدگی محاسباتی ایجاد شده، روش‌هایی که برای محاسبه دسترس‌پذیری سیستم به‌کار می‌روند نقش مهمی در ارائه یک پاسخ قابل قبول ایفا می‌کنند.این مقاله قصد دارد برای سیستم‌های چندحالته، هزینه‌ها را با این محدودیت که دسترس‌پذیری سیستم از حد قابل قبولی بیشتر باشد، کمینه نماید. مسئله تخصیص افزونگی، ناهمگن مدل‌سازی شده است که اجزا در چنین سیستمی می‌توانند متفاوت باشند.هر دو اجزا و سیستم می‌توانند حالت‌های متفاوتی داشته باشند که برای محاسبه دسترس‌پذیری سیستم از الگوریتم تابع مولد عمومی و برای بهینه‌کردن ساختار سیستم از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی سیستم‌های چندحالته، افزونگی ناهمگن، الگوریتم تابع مولد عمومی، الگوریتم ژنتیک

۱- مقدمه

خرابی و از کارافتادگی سیستم می‌تواند بر کارایی اقتصادی سازمان تاثیر منفی داشته باشد. در بسیاری از موارد، هنگامی که یک سیستم دچار خرابی می‌گردد سیستم متحمل هزینه-های بالایی می‌شود. درمراحل اولیه طراحی سیستم‌ها، تخصیص افزونگی به عنوان یکی از روش‌های بهبود دسترس‌پذیری/ قابلیت اطمینان سیستم مطرح می‌شود [۱]. مسأله تخصیص افزونگی[۱] (RAP)، شامل انتخاب همزمان اجزا و پیکربندی اجزای سیستم به نحوی است که با رعایت تمام محدودیت‌های وارد برسیستم، دسترس‌پذیری/ قابلیت اطمینان سیستم حداکثر شود [۲].مسائل تخصیص افزونگی، در زمره مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح قرار دارند. فیف و همکاران [۳]، اولین کسانی بودند که مدل ریاضی مسئله عمومی تخصیص افزونگی را ارائه دادند. برای بهینه‌سازی سیستم‌های باینری (صفر و یک) استفاده ازروش‌های دقیق مورد نظر پژوهشگران بوده و هست. به منظور حل این مسائل، روش‌های بهینه‌سازی گسسته زیادی نظیر برنامه‌ریزی پویا، انشعاب و تحدید، شمارشی و غیره پیشنهاد شده است. رامیرزمارکز و کویت [۴]، روشی ابتکاری برای حل مسائل تخصیص افزونگی با حالت‌های مختلف خرابی ارائه نمودند. این مسائل کاملاً شبیه مسائل عمومی تخصیص افزونگی است، با این تفاوت که در مسائل عمومی تخصیص افزونگی سیستم تنها می‌تواند در یکی از دو حالت سالم یا خراب باشد. در حالیکه در مسائل تخصیص افزونگی با حالت-های مختلف خرابی، حالت‌های بینابینی برای سیستم وجود دارد. در مدل آنها اجزا وزیر سیستم‌ها تنها می‌توانند در یکی از دو حالت سالم یا خراب باشند ولی سیستم در حالت‌های محدود بینابینی است. سیستم‌های چندحالته[۲](MSS)، سیستم-هایی می‌باشند کهدر حالت‌های مختلف از عملکرد کامل تا شکست کامل می‌توانند کار کنند. اگرچه این سیستم‌ها نمایش دقیق و واقعی‌تری از سیستم‌های مهندسی ارائه می‌دهند، ولی بهینه‌سازی آن‌ها پیچیده می‌باشد. مسائل بهینه‌سازی افزونگی برای سیستم‌های چندحالته در مرجع [۵] معرفی شد که در آن روش بهینه‌سازی کلی ارائه شده بود. در زمینه سیستم‌های چندحالته کارهای زیادی در گذشته انجام شده است که عموماً در بیشتر مقالات تلاش اصلی برای بهینه‌کردن سطح افزونگی در زیر سیستم‌های مختلف یک سیستم بوده است، اما تخصیص افزونگی به عنوان یگانه عامل تأثیرگذار در بهبود عملکرد

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲۶

*Corresponding author. karimi_sirvan@yahoo.com(S. Karimi)

سیستم مطرح نیست[۶]. نورالفتح و آیت کادی [۷]، یک مدل بهینه‌سازی افزونگی با پیکربندی کمینه‌کردن هزینه یک سیستم سری- موازی چندحالته که براساس یک سیاست نگهداری مشخص شده است، تحت محدودیت قابلیت اطمینان ارائه کردند. لویتین و همکاران [۸]، یک مدل برای تعیین ورژن‌های بهینه اجزا و افزونگی زیر سیستم‌های مختلف در سیستم‌های سری- موازی چندحالته ارائه دادند. همچنین برای سیستم‌های سری- موازی چندحالته یک روش بهینه‌سازی مشترک قابلیت‌اطمینان و افزونگی توسط تیان و همکاران [۹] ارائه شده است که در آن حالت‌های توزیع اجزا متأثر از نرخ‌های تبدیل و افزونگی به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. با توجه برمطالعات چرن [۱۰] مبنی بر سخت‌بودن[۳] مسائل بهینه‌سازی تخصیص افزونگی، همواره از دیر باز از الگوریتم‌های فراابتکاری در این نوع مسائل مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهشگران در بهینه‌سازی افزونگی از الگوریتم‌های فراابتکاری چون ژنتیک[۶]، [۱۱]، [۱۲] و[۱۳]، جستجوی ممنوع [۱۴] و مورچگان [۱۵] استفاده کردند. یکی از محدودیت‌های پژوهشگران با بکار بردن الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری در مسائل تخصیص افزونگی سیستم‌های سری- موازی این است که برای بهبود افزونگی، مجاز شده است در هر زیرسیستم تنها اجزا همسان استفاده شود. این استراتژی به عنوان افزونگی همسان(همگن) نام برده شده است. در مقابل، استراتژی افزونگی که ترکیب مختلف اجزا را در زیرسیستم اجازه می دهد افزونگی ناهمگن نامیده می‌شود[۱۶ و ۱۷]. به منظور توسعه بیشتر فضای حل، مسائلRAP با افزونگی ناهمگن خیلی پیچیده‌تر و مشکل‌تر از مسائل RAP با افزونگی همگن است. مسائل RAP برای سیستم‌های سری- موازی با افزونگی ناهمگن اولین بار در کارلویتین و همکاران [۱۸] پیشنهاد شد و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی آن استفاده شد. این کار نشان داد که تا زمان تکمیل الزامات دسترس-پذیری یک سیستم، افزونگی ناهمگن بالای ۲۱,۹ درصدهزینه کل را در مقایسه با افزونگی همگن کاهش می‌دهد. کالترکوناک و همکاران [۱۴]، یک الگوریتم جستجوی ممنوع برای حل مسائل تخصیص افزونگی با امکان تخصیص اجزای ناهمگن به هر زیر سیستم ارائه نمودند. همچنین شرما و همکاران [۱۹]، ارزیابی قابلیت اطمینان و طراحی بهینه در سیستم‌های سری- موازی چندحالته ناهمگن را ارائه داده‌اند. لی و همکاران [۲۰]، یک مدل برای بهینه‌سازی سیستم‌های چندحالته براساس خطاهای سببی رایج ارائه دادند. از تابع مولد عمومی[۴](UGF) برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم چندحالته با افزونگی ناهمگن بکار بردند و از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده کردند. وانگ و لی [۱۷] یک مدل افزونگی ناهمگن با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های سیستم سری-موازی چندحالته تحت محدودیت دسترس‌پذیری ارائه دادند. برای ارزیابی سیستماز تابع مولد عمومی و برای بهینه‌سازی آن از یک روش ترکیبی الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات‌و جستجوی محلی استفاده نمودند. در عمل، این مقاله قصد دارد سیستم‌های چندحالته را براساس انواع خطاهای تصادفی که در دسترس‌پذیری سیستم تاثیر دارند مدل نماید. هر دو اجزا و سیستم می‌توانند حالت-های متفاوتی داشته باشند.از آنجا که نرخ انتقال بین حالت‌های مختلف اجزا براساس نرخ‌های خرابی و تعمیر می‌باشد از مدل‌های مارکف برای نمایش آن استفاده شده است. مسئله تخصیص افزونگی، ناهمگن مدل‌سازی شده است که اجزا می‌توانند متفاوت باشند. برای محاسبه دسترس‌پذیری سیستم از الگوریتم UGF و برای بهینه‌کردن ساختار سیستم از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. همچنین از آنجا که عملکرد الگوریتم-های فراابتکاری به پارامترهای ورودی بستگی دارد، جهت تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک از روش رویه پاسخ (RSM)[۵] استفاده می‌شود. ادامه مقاله بر اساس زیر تدوین می-شود:

بخش ۲ مدل کلی سیستم‌های سری- موازی چندحالته بررسی می‌شود. ارزیابی دسترس‌پذیری سیستم با استفاده از تابع مولد عمومی در بخش ۳ می‌باشد. الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌کردن ساختار سیستم در بخش ۴ بکار برده شده است. مطالعه موردی در بخش ۵ و نتیجه‌گیری آن در بخش ۶ آورده شده است.

۲- تدوین مسأله

فرضیات مسأله عبارتند از:

- سیستم و اجزا چندحالته هستند.
- ترکیب اجزا مختلف در زیرسیستم‌ها مجاز می‌باشد.
- اجزا مستقل از هم می‌باشند.

۲-۱- معرفی پارامترها

N: تعداد کل زیرسیستم‌های موجود

g_{ij}: مجموعه عملکرد اجزا نوع jدر زیرسیستم i

P_{ij}: مجموعه احتمال‌های اجزا نوع j در زیرسیستم i

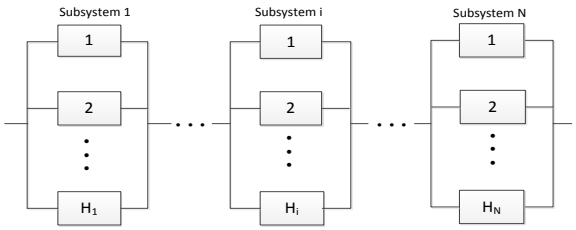
n_{ij}: تعداد اجزا نوع j استفاده شده در زیرسیستم i

n_i: تعداد کل اجزا استفاده شده در زیرسیستم i

n_{max}: حداکثر تعداد اجزا مجاز در زیرسیستم

H_i: تعداد کل انواع متفاوت اجزا در دسترس برای زیر سیستم i

C_{ij}: هزینه خرید اجزا j در زیرسیستم i



شکل ۱: ساختار سری-موازی چندحالته

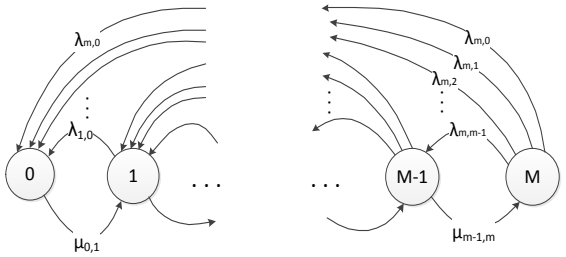
W: سطح عملکرد مورد نیاز سیستم
A_s: دسترس‌پذیری سیستم
$P_i(t)$: احتمال ماندن اجزا در حالت i
M: تعداد حالت‌های ممکن اجزا
M_i: تعداد حالت‌های ممکن زیر سیستمi
M_{sys}: تعداد حالت‌های ممکن سیستم
$U_{ij}(z)$: تابع مولد عمومی اجزا نوع j در زیرسیستم i
$U_i(z)$: تابع مولد عمومی زیرسیستم i
f_x: تابع برازندگی
P_c: احتمال تقاطع
P_m: احتمال جهش
n_{pop}: اندازه جمعیت

۲-۲- سیستم سری-موازی چندحالته

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است یک سیستم سری-موازی چندحالته شامل N زیرسیستم می‌باشد که به صورت سری به‌هم متصل شده اند. زیرسیستم iشامل H_i نوع متفاوت از اجزا می‌باشد که بصورت موازی بهم متصل هستند. همچنین اجزا چندحالته می‌باشند که هر حالت دارای سطح عملکردهای متفاوتمی‌باشد. در تعیین سطح عملکرد سیستم از دو اصل اساسی استفاده می‌شود:نرخ عملکرد یک زیرسیستم موازی چندحالته برابر با مجموع نرخ‌های عملکردی اجزای آن است. همچنین نرخ عملکرد یک سیستم سری–موازی چندحالته برابر با حداقل نرخ عملکردی زیرسیستم‌های آن است. هزینه سیستم C و دسترس‌پذیری سیستم هنگامی که سطح عملکرد موردنیاز آن wباشد، $A(w)$است.

۲-۳- مدل ریاضی

بیشتر مسائل بهینه‌سازی که تا به امروز به آن پرداخته شده است، می‌تواند براساس هریک از این دو رویکرد طبقه‌بندی شود [۲۱]: بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری/ قابلیت‌اطمینان سیستم بر اساس محدودیت هزینه‌های کل سیستم و یا کمینه‌سازی هزینه-های کل سیستم مورد انتظار براساس دسترس‌پذیری/قابلیت-اطمینان مورد انتظار سیستم. در این پژوهش، هدف کمینه-سازی هزینه‌های سیستم است بطوریکه دسترس‌پذیری سیستم از حد قابل قبولی بیشتر باشد. مدل مورد نظر به صورت مدل (۱) تدوین می‌شود:



شکل ۲: دیاگرام حالت برای خرابی‌های جزیی و کلی

$$\text{Min } C_s = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{H_i} n_{ij}C_{ij}$$

s.t.

$$A(w) \geq A. \quad (1)$$

$$1 \leq n_i \leq n_{max}$$

$$n_i, n_{ij} = \text{integer}$$

$$i = 1,\dots,N\ ; j = 1,\dots,H_i\ ; \sum_{j=1}^{H_i} n_{ij} = n_i$$

۲-۴- مدل اجزا چندحالته و دیاگرام حالت

مدل‌های فرآیند تصادفی مانند مدل‌های مارکوف و مدل‌های شبه‌مارکوف را می‌توان برای نمایش اجزا چندحالته مورد استفاده قرار داد. همچنین می‌توان نرخ انتقال میان حالت‌های مختلف را بر اساس نرخ خرابی اجزا آن تخمین زد [۶].باید به این نکته توجه داشت که توابع نرخ انتقال با توجه به توابع توزیع خرابی و تعمیر تعیین می‌شود. در این پژوهش، رویکرد تابع توزیع نمایی همراه با توابع نرخ انتقالش مورد ارزیابی قرارگرفته است.همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است اگر اجزا چندحالته باشند (حالت M: کارکرد کامل تا حالت ۰: خرابی کامل)، در اغلب مواقع این‌طور فرض می‌شود که انتقال اجزاتنها بین دو حالت مجاور(به صورت جزیی[۶]) رخ می‌دهد[۶ و ۱۲]. به عبارت دیگر در چنین وضعیتی امکان خرابی در حالت های مختلف تک‌مرحله‌ای فرض می‌شود. اما با فرض وجود خرابی‌های چندمرحله‌ایدر صورت وقوع خرابی‌هایی با ابعاد گسترده، این احتمال وجود داردکه حالت اجزاتا چندین مرحله

به سمت از کارافتادگی محض پیشروی نماید. این فرض به این دلیل است که در اجزا و سیستم‌های مختلف ممکن است خرابی‌هایی با پیامدهای نامعلوم رخ دهد. اما این موضوع با توجه به ارادی بودن فرآیندهای تعمیر کمی بعید به نظر می‌رسد. لذا در مدل ارائه شده انتقال حالت سیستم‌ها بر اساس نرخ‌های خرابی جزیی و کلی[۷] و و نیز نرخ‌های تعمیر جزیی‌فرض شده است تا به این ترتیب امکان وقوع هر نوع حادثه پیش‌بینی نشده در بهینه‌سازی سیستم لحاظ شود. معادلات چپمن-کولموگرف مربوط به صورت زیر است:

$$P_M(t) = -\left(\sum_{i=۱}^{m-۱} \lambda_{m,i}\right) P_m(t) + \mu_{m-۱,m}.P_{m-۱}(t)$$
$$P_j(t) = -\left(\sum_{i=۰}^{j-۱} (\lambda_{j,i}) + \mu_{j,j+۱}\right) P_j(t) + \quad (۲)$$
$$\sum_{i=j+۱}^{M} \left(\lambda_{i,j}.P_i(t)\right) + \mu_{j-۱,M} P_{j-۱}(t)\,; j = ۱,۲,\dots,M-۱$$
$$P_۰(t) = \mu_{۰,۱} P_۰(t) - \left(\sum_{i=۱}^{M} \lambda_{i,۰}\right) P_i(t)$$

به طوری که داریم:

$P_۰(t), P_۱(t), \dots, P_M(t)$ برابر احتمال وجود اجزا به ترتیب در حالت‌های ۰ و ۱ و ... و M در زمان t است و λ_{ij} هم نرخ خرابی از حالت i به حالت j و μ_{ij} هم نرخ تعمیر از حالت i به حالت j را نشان می‌دهد. شرایط اولیه برای این معادله‌ها به صورت زیر است:

$$P_i(۰) = ۰ \;\; ; \;\; i = ۰,۱,\dots,M-۱ \quad (۳)$$
$$P_M(۰) = ۱$$

۳- ارزیابی دسترس‌پذیری سیستم‌های چندحالته با استفاده از روش UGF

به طورکلی، روش‌های ارزیابی دسترس‌پذیری/ قابلیت‌اطمینان سیستم‌های چندحالته بر مبنای ۵ روش است [۲۱]: توسعه مدل‌های دوحالته برای چندحالته، روش فرآیندهای تصادفی، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تابع مولدعمومی (UGF) و الگوریتم بازگشتی. در سال‌های اخیر روش UGF به‌طور گسترده در ارزیابی دسترس‌پذیری/قابلیت‌اطمینان سیستم‌های چندحالته مورد استفاده قرار گرفته است. روش UGF سرعت عمل بسیار بالایی در حل مسائل دارد و ثابت شده است که بسیار موثر است[۲۰]. با استفاده از این روش می‌توان توزیع کارایی سیستم چندحالته را از روی توزیع کارایی اجزا و با استفاده از روش‌های جبری یافت [۶]. الگوریتم UGF تعداد کل حالت‌های سیستم را تا اندازه قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و در نتیجه محاسبه قابلیت‌اطمینان و دسترس‌پذیری سیستم را بسیار آسان می‌کند [۲۳ و ۲۲]. تابع مولدعمومی به وسیله یوشکاو [۲۴] معرفی شد. لیسنیانسکی و لویتین [۲۵]، اولین بارUGF را برای تحلیل سیستم قدرت بکار بردند. همچنین دینگ و لیسنیانسکی[۲۳]، از روشUGF برای محاسبه قابلیت‌اطمینان برای یک سیستم چند حالته استفاده کردند و به روش فازی نیز توسعه دادند.

در این مقاله، از روشUGFبرای محاسبه دسترس‌پذیری سیستم‌های چندحالته با ساختار سری- موازی ارائه شده است بطوریکه نرخ عملکرد و احتمال‌های مربوط به آن عددی قطعی می‌باشند. جزئیات کامل روش را می‌توان در مراجع [۲۰، ۲۳ و۲۶] یافت. فرض کنید که عملکرد تصادفی G اجزا نوع j در زیر سیستم i، M حالت ممکن دارد و G می‌تواند به وسیله دو مجموعه g_{ij} و P_{ij} نشان داده شود. مجموعه:

$$g_{ij} = \{g_{ij۱}, g_{ij۲}, \dots, g_{ijM}\} \quad (۴)$$

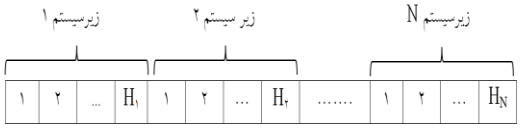
عملکردهای حالت اجزا و مجموعه:

$$P_{ij} = \{P_{ij۱}, P_{ij۲}, \dots, P_{ijM}\} \quad (۵)$$

احتمال‌های حالت مربوطه هستند که:

$$P_{ijl} = P_r\{G = g_{ijl}\}\ ,\ l = ۱,۲,\dots,M \quad (۶)$$

پس تابع مولد عمومی اجزا به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل۳: نمایش متغیرهای تصمیم به صورت کروموزوم

$$U_{ij}(z) = \sum_{l=۱}^{M} P_{ijl}.Z^{g_{ijl}} \quad (۷)$$

تابع مولد عمومی (UGF) زیرسیستم می‌تواند با استفاده از عملیات جبری حول تابع مولد عمومی اجزا بدست آید. هنگامی که عملکرد زیرسیستم i برابر مجموع عملکردهای اجزا در زیرسیستم است، UGF زیرسیستم i می‌تواند به صورت متوالی با استفاده از عملگر π محاسبه شود.

$$U_i(z) = \pi\left(U_{i۱}(z), \dots, U_{in_i}(z)\right) = \sum_{s=۱}^{M_i} P_{is}Z^{W_{is}} \quad (۸)$$

که W_{is} عملکرد حالت زیرسیستم i است و P_{is} احتمال حالت مربوطه است. تابع مولد عمومی یک سیستم، بر اساس تابع مولد عمومی زیرسیستم‌ها بدست می‌آید. معمولاً عملکرد سیستم برابر با حداقل عملکرد زیرسیستم‌ها است. بنابراین UGF سیستم می‌تواند به صورت متوالی با استفاده از عملگر $\sigma_۲$ محاسبه شود.

$$U(z) = \sigma_۲\big(U_۱(z), \dots, U_N(z)\big) = \sum_{s=۱}^{M_{sys}} P_s Z^{X_s} \qquad (۹)$$

که X_s عملکرد حالت سیستم و P_s احتمال حالت مربوطه است. فضای حالات (state) برای یک MSS می‌تواند به دو زیر مجموعه قابل پذیرش و غیرقابل پذیرش تقسیم شود. رابطه بین عملکرد سیستم و تقاضا W به صورت شاخص کفایت حالت سیستم، r_i بیان شده است که به صورت زیر است:

$$r_i = g_i - w \qquad (۱۰)$$

حالت iحالت قابل پذیرش است، اگر و تنها اگر $r_i \geq 0$ باشد.
دردسترس بودن یک MSS احتمالی است که در آن سیستم در یک زیر مجموعه قابل پذیرش باقی می‌ماند. در دسترس بودن یک MSS در بیشتر مواقع می‌تواند به‌صورت احتمالی که نرخ عملکرد MSS بزرگتر از تقاضای W باشد، تعریف شود:

$$A(w) = \sum_{r_i \geq ۰} P_i \qquad (۱۱)$$

با استفاده از عملگر δ_A داریم:

$$\begin{aligned} A(w) &= \delta_A(U(z), w) \\ &= \delta_A\left(\sum_{i=۱}^{K} P_i Z^{g_i}, w\right) = \sum_{i=۱}^{K} P_i \alpha_i \\ \alpha_i &= \begin{cases} ۱, & r_i \geq ۰ \\ ۰, & r_i \leq ۰ \end{cases} \end{aligned} \qquad (۱۲)$$

۴- الگوریتم ژنتیک

در بهینه‌سازی سیستم‌های چندحالته در میان روش‌های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک به منظور انعطاف‌پذیری در مدلسازی و توانایی بهینه‌سازی کلی در مسئله تخصیص افزونگی کاربرد وسیعی دارد [۱۳].لویتین و لیسنیانسکی [۲۷]، گزارشی راجع به استفاده از تابع مولد عمومی و الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی سیستم‌های چند حالته تهیه کردند.برای حل مسأله ابتدا باید مکانیسمی برای تبدیل هر جواب مساله به یک کروموزوم[۸] تعریف کردکه مهمترین قسمت در پیاده‌سازی الگوریتم است. متغیرهای تصمیم که در یک رشته کروموزوم کدگذاری می‌شوند شامل N قسمت است. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، هر قسمت نشانگر تعداد انواع متفاوت اجزا در هر زیرسیستم است. به طوریکه:

$$n_{ij} \in Z\,, n_{ij} \geq ۰\,,\ ۱ \leq n_i \leq n_{max} \qquad (۱۳)$$

انتخاب[۹] والد برای عملگر تقاطع[۱۰] می‌کنیم. فرآیند انتخاب مبتنی بر مقدار برازندگی[۱۱] هر رشته می‌باشد. در این مقاله، از چرخهٔ رولت[۱۲] برای انتخاب استفاده شده و در اثر به اجرا درآوردن عملگر تقاطع تک نقطه‌ای[۱۳]، جمعیت فرزندان شکل می‌گیرد. در مرحلهٔ بعد مجدداً اعضای دیگری از جمعیت برای عملگر جهش نیز گزینش می‌شوند. پس از اجرای عملگر جهش[۱۴] جمعیت جهش یافتگان نیز به وجود می‌آید. در انتها جمعیت جدید جایگزین جمعیت قبلی می‌شود و الگوریتم بعد از طی چندین نسل به تدریج به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود. این روال تا رسیدن به شرط توقف ادامه می‌یابد. جزئیات بیشتر در مورد الگوریتم ژنتیک را می‌توان در مرجع [۲۸] یافت. نحوه محاسبه تابع برازندگی هر جواب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_x = C(x) + \eta \times \max(\big((A_{.} - A(w)\big), ۰) \qquad (۱۴)$$

اگر دسترس‌پذیری سیستم بیشتر از حداقل دسترس‌پذیری تعریف شده باشد جریمه‌ای اعمال نمی‌شود و تابع برازندگی $f_x = C(x)$ خواهد بود. در غیر اینصورت، تابع برازندگی $f_x = C(x) + \eta \times (A_{.} - A(w))$ می‌شود.

در رابطه بالا، تابع $C(x)$ همان تابع هدف مسأله است و η ضریب تابع جریمه است که برای جواب‌های غیرموجه (عددی بسیار بزرگ است) اعمال می‌شود.

۵- مطالعه موردی

در یکی از کارخانجات صنایع دفاع قرار است سیستمی طراحی گردد.

این سیستم باید شرایطی داشته باشد که عبارتند از:

- هنگامی که سطح عملکرد مورد نیاز ۰,۹۵ باشد، دسترس‌پذیری سیستم نباید کمتر از ۹۰ درصد باشد.
- به علت محدودیت فضای هر بخش، حداکثر اجزا مجاز در هر زیرسیستم ۱۰ باشد.
- قرار است سیستم شامل سه زیر سیستم باشد.

تسهیلات به کار رونده در هر زیرسیستم به شرح جداول (۱) الی (۳) است. مدل مورد نظر به صورت زیر تدوین می‌شود:

$$\begin{aligned}\text{Min}C_s = {} & ۱۸ \times n_{۱۱} + ۲۵ \times n_{۲۱} + ۳۵ \times n_{۳۱} + ۴۰ \times n_{۴۱} \\ & + ۶۰ \times n_{۵۱} + ۲۵ \times n_{۱۲} + ۴۰ \times n_{۲۲} \\ & + ۶۰ \times n_{۳۲} + ۱۸ \times n_{۱۳} + ۲۵ \times n_{۲۳} \\ & + ۳۵ \times n_{۳۳} + ۴۰ \times n_{۴۳}\end{aligned}$$

s.t.

$$\begin{aligned} & A(۰.۹۵) \geq ۰.۹۰ \\ & ۱ \leq n_i \leq ۱۰ \\ & n_i, n_{ij} = \text{integer} \\ & i = ۱, \ldots, ۳ \; ; j = ۱, \ldots, ٤ \; ; \sum_{j=۱}^{٤} n_{ij} = n_i \end{aligned} \qquad (۱۵)$$

از آنجا که عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری به پارامترهای ورودی بستگی دارد، جهت تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک از روش رویه پاسخ (RSM) استفاده شده است. این روش، ترکیبی از روش‌های ریاضی و آمار است که برای مدل-بندی و تحلیل مسائلی که پاسخ موردنظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد مفید است و هدف از آن بهینه‌سازی این پاسخ است. پارامترهای اصلی الگوریتم، در جدول (۴) جهت تنظیم بر روی سطوح مناسب در نظر گرفته شده‌اند. ضمناً معیار توقف در الگوریتم، برابر با ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. به دلیل انتخاب طرح عاملی دو سطحی آزمایش، برای هر یک از آزمایش‌ها در دو سطح بالا و پایین در نظر گرفته میشود. روش پیش‌برد روش سطح پاسخ به گونه‌ای است که علاوه بر حرکت روی سطوح بالا و پایین، نقاطی محوری با استفاده از سطوح میانی و همچنین تعدادی نقطه مرکزی (در اینجا ۴ نقطه مرکزی افزوده شده) نیز در نظر گرفته می‌شود.

1	1	2	0	0	0	1	0	2	0	0	0

شکل ۴: خروجی کرومزوم

برای الگوریتم با توجه به سه پارامتر موجود، طرح عاملی $۳^۳$ در نظر گرفته می‌شود. بدین منظورآزمایش موردنظر برای الگوریتم ژنتیک انجام داده شده است که در جدول (۵) قابل مشاهده است و سپس، بهترین مقدار را برای آزمایش مطابق با روش RSM بدست آورده شده است:

$$n_{pop} = ۱۰۰ \;,\; P_c = ۰.۷ \;,\; P_m = ۰.۳ \qquad (۱۶)$$

ضمن این که جدول تحلیل واریانس برای پارامترهای ورودی الگوریتم در جدول (۶) قابل مشاهده است. در نهایت،خروجی الگوریتم ژنتیک با استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای ورودی مطابق شکل (۴) است. هم‌چنین مقادیر بهینه برای تعداد تسهیلات به کار رونده در سیستم مطابق جدول (۷) است که براساس آن هزینه سیستم ۱۸۹ میلیارد ریال است.

جدول ۱: مشخصات تسهیلات برای زیرسیستم

تسهیلات	$g_۱$	$g_۲$	$\lambda_{۱,۰}$	$\lambda_{۲,۱}$	$\lambda_{۲,۰}$	$\mu_{۰,۱}$	$\mu_{۱,۲}$	هزینه خرید(میلیارد ریال)
دستگاه فرز بورینگ ۸CNC متری	۳۰	۶۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۴	۰/۶	۱۸
دستگاه کاروسل CNC ۴,۵ متری	۵۰	۱۰۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۴۵	۰/۴	۰/۵	۲۵
دستگاه کاروسل CNC۲,۵ متری	۱۰۰	-	۰/۰۶	-	-	۰/۳۵	-	۳۵
فرز دروازه ای CNC ۸ متری	۶۰	۱۲۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۴	۰/۷	۴۰
ماشین سنتر CNC	۱۵۰	-	۰/۰۳	-	-	۰/۴۵	-	۶۰
تسهیلات	$g_۱$	$g_۲$	$\lambda_{۱,۰}$	$\lambda_{۲,۱}$	$\lambda_{۲,۰}$	$\mu_{۰,۱}$	$\mu_{۱,۲}$	هزینه خرید(میلیارد ریال)
دستگاه فرز بورینگ ۸CNC متری	۳۰	۶۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۴	۰/۶	۱۸
دستگاه کاروسل CNC ۴,۵ متری	۵۰	۱۰۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۴۵	۰/۴	۰/۵	۲۵
دستگاه کاروسل CNC۲,۵ متری	۱۰۰	-	۰/۰۶	-	-	۰/۳۵	-	۳۵
فرز دروازه ای CNC ۸ متری	۶۰	۱۲۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۴	۰/۷	۴۰
ماشین سنتر CNC	۱۵۰	-	۰/۰۳	-	-	۰/۴۵	-	۶۰

جدول ۲: مشخصات تسهیلات برای زیرسیستم ۲

تسهیلات	$g_۱$	$g_۲$	$\lambda_{۱,۰}$	$\lambda_{۲,۱}$	$\lambda_{۲,۰}$	$\mu_{۰,۱}$	$\mu_{۱,۲}$	هزینه خرید(میلیارد ریال)
دستگاه کاروسل CNC ۴,۵ متری	۵۰	۱۰۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۴۵	۰/۴	۰/۵	۲۵
فرز دروازه ای CNC ۸ متری	۶۰	۱۲۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۴	۰/۷	۴۰
ماشین سنتر CNC	۱۵۰	-	۰/۰۳	-	-	۰/۴۵	-	۶۰

جدول ۳: مشخصات تسهیلات برای زیرسیستم ۳

تسهیلات	g_1	g_2	$\lambda_{1,0}$	$\lambda_{2,1}$	$\lambda_{2,0}$	$\mu_{0,1}$	$\mu_{1,2}$	هزینه خرید(میلیارد ریال)
دستگاه فرز بورینگ CNC ۸ متری	۳۰	۶۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۴	۰/۶	۱۸
دستگاه کاروسل CNC ۴,۵ متری	۵۰	۱۰۰	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۴۵	۰/۴	۰/۵	۲۵
دستگاه کاروسل CNC۲,۵ متری	۱۰۰	-	۰/۰۶	-	-	۰/۳۵	-	۳۵
فرز دروازه ای CNC ۸ متری	۶۰	۱۲۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۴	۰/۷	۴۰

جدول ۵: نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک بر اساس طرح آزمایش

Std Order	Run Order	Blocks	Pt Type	n pop	pc	pm	Cost
۱	۱	۱	۱	۵۰	۰/۳	۰/۱	۱۸۸
۲	۲	۱	۱	۱۰۰	۰/۳	۰/۱	۱۸۹
۳	۳	۱	۱	۵۰	۰/۷	۰/۱	۱۸۹
۴	۴	۱	۱	۱۰۰	۰/۷	۰/۱	۲۱۳
۵	۵	۱	۱	۵۰	۰/۳	۰/۳	۱۸۸
۶	۶	۱	۱	۱۰۰	۰/۳	۰/۳	۱۸۶
۷	۷	۱	۱	۵۰	۰/۷	۰/۳	۱۹۵
۸	۸	۱	۱	۱۰۰	۰/۷	۰/۳	۱۸۹
۹	۹	۱	۱	۵۰	۰/۵	۰/۲	۲۳۷
۱۰	۱۰	۱	۱	۱۰۰	۰/۵	۰/۲	۱۱۴
۱۱	۱۱	۱	۱	۷۵	۰/۳	۰/۲	۱۸۸
۱۲	۱۲	۱	۱	۷۵	۰/۷	۰/۲	۱۹۱
۱۳	۱۳	۱	۱	۷۵	۰/۵	۰/۱	۲۲۱
۱۴	۱۴	۱	۱	۷۵	۰/۵	۰/۳	۱۶۸
۱۵	۱۵	۱	۱	۷۵	۰/۵	۰/۲	۱۶۱
۱۶	۱۶	۱	۱	۷۵	۰/۵	۰/۲	۱۶۵
۱۷	۱۷	۱	۱	۷۵	۰/۵	۰/۲	۱۷۸
۱۸	۱۸	۱	۱	۷۵	۰/۵	۰/۲	۱۵۴
۱۹	۱۹	۱	۱	۷۵	۰/۵	۰/۲	۱۹۳

جدول۶: جدول تحلیل واریانس برای پارامترهای ژنتیک

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	۹	۳۶۲۰/۲	۳۶۲۱۷/۲	۴۰۴/۲۴	۰/۴۱	۰/۸۹۷
Linear	۳	۱۸۶۰/۳	۱۸۶۰/۳۰	۶۲۰/۱۰	۰/۶۴	۰/۶۰۹
Npop	۱	۱۱۸۸/۱	۱۱۸۸/۱۰	۱۱۸۸/۱۰	۱/۲۲	۰/۲۹۷
Pc	۱	۱۶۸/۱	۱۶۸/۱۰	۱۶۸/۱۰	۰/۱۷	۰/۶۸۷
Pm	۱	۵۰۴/۱	۵۰۴/۱۰	۵۰۴/۱۰	۰/۵۲	۰/۴۸۹
Square	۳	۱۵۴۶/۴	۱۵۴۶/۳۷	۵۱۵,۴۶	۰/۵۳	۰/۶۷۲
npop*npop	۱	۳۵۱/۲	۶۴/۲۹	۶۴/۲۹	۰/۰۷	۰/۸۰۳
pc*pc	۱	۶۴۸/۱	۲۲۸/۷۴	۲۲۸/۷۴	۰/۲۴	۰/۶۳۹
pm*pm	۱	۵۴۷/۰	۵۴۷/۰۵	۵۴۷/۰۵	۰/۵۶	۰/۴۷۲
Interaction	۳	۲۱۳/۵	۲۱۳/۵	۷۱/۱۷	۰/۰۷	۰/۹۷۳
npop*pc	۱	۶۰/۵	۶۰/۵	۶۰/۵	۰/۰۶	۰/۸۰۸
npop*pm	۱	۱۱۲/۵	۱۱۲/۵	۱۱۲/۵	۰/۱۲	۰/۷۴۱
pc*pm	۱	۴۰/۵	۴۰/۵	۴۰/۵	۰/۰۴	۸۴۳
Residual Error	۹	۸۷۳۴/۵	۸۷۳۴/۴۶	۹۷۰/۵۰		
Lack-of-Fit	۵	۷۷۷۹/۷	۷۷۷۹/۶۶	۱۵۵۵/۹۳	۶/۵۲	۰/۰۴۷
Pure Error	۴	۹۵۴/۸	۹۵۴/۸	۲۳۸/۷		
Total	۱	۱۲۳۵۴/۶				

۶- نتیجه گیری

سیستم‌های چندحالته به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که تنها دو حالت عملکردی سالم و خراب ندارند و می‌توانند حالت‌های خرابی متفاوتی داشته باشند.در چند دهه گذشته به ارزیابی دسترس-پذیری و بهینه‌سازیسیستم‌های چندحالته توجه اساسی شده است. در این مقاله، از آنجا که انواع خرابی‌ها در بهینه‌سازی سیستم‌ها نقش مهمی دارند و باید آن را در محاسبه دسترس-پذیری در نظر گرفت، بهینه‌سازی افزونگی ناهمگن برای سیستم-های سری- موازی چندحالته بر اساس انواع خطاها تدوین شده است. از آنجا که نرخ انتقال بین حالت‌های مختلف اجزا براساس نرخ‌های خرابی و تعمیر است از مدل‌های مارکف برای نمایش آن استفاده شده است. با این کار نشان داده شده که با افزایش ابعاد بهینه‌سازی مسائل تخصیص افزونگی، مدل‌هایی را تنظیم نمود که با دنیای واقعی انطباق بیشتری دارند. استفاده از انواع سیاست‌های افزونگی و افزودن اجزا اضافی، اساساً به عنوان راه‌های افزایش دسترس‌پذیری سیستم درنظرگرفته می‌شوند.

در این مقاله، بر روی اجزا مستقل از هم مطالعه شد. در حالی که می‌توان رابطه اجزا را مشروط یا متضاد از هم در نظر گرفت و تاثیر آنها را بر روی فرآیندهای بهینه‌سازی سیستم بررسی نمود. همچنین عملکرد سیستم‌ها می‌تواند به صورت پیوسته تدوین شود این نوع سیستم‌ها تحت عنوان سیستم‌های حالت پیوسته (CSS) در منابع مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین پیاده شدن فرضیات موجود در این پژوهش بر روی چنین سیستم‌هایی بستر یک پژوهش مناسب را مهیا می‌کند.

منابع

[1] Tavakkoli-Moghaddam, R., Safari, J., &Sassani, F. (2008). Reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies using a genetic algorithm. Reliability Engineering & System Safety, 93(4), 550-556.

[2] Coit, D.W., & Smith, A., (1995) Optimization approaches to the redundancy allocation to the redundancy allocation problem for series-parallel systems, Proceedings of the Fourth Industrial Engineering Research Conference.

[3] Fyffe, D. E., Hines, W. W., & Lee, N. K. (1968). System reliability allocation and a computational algorithm, IEEE Transactions onReliability, 17(2), 64-69.

[4] Ramirez-Marquez, J. E., &Coit, D. W. (2004). A heuristic for solving the redundancy allocation problem for multi-state series-parallel systems. Reliability Engineering & System Safety, 83(3), 341-349.

[5] Ushakov, I. A. (1987). Optimal standby problems and a universal generating function. Soviet Journal of Computer and Systems Sciences, 25(4), 79-82.

[6] Tian, Z., Levitin, G., &Zuo, M. J. (2009). A joint reliability–redundancy optimization approach for multi-state series–parallel systems. Reliability Engineering & System Safety, 94(10), 1568-1576.

[7] Nourelfath, M., &Ait-Kadi, D. (2007). Optimization of series–parallel multi-state systems under maintenance policies. Reliability Engineering & System Safety, 92(12), 1620-1626.

[8] Levitin, G., Lisnianski, A., Ben-Haim, H., &Elmakis, D. (1998). Redundancy optimization for series-parallel multi-state systems, IEEE Transactions onReliability, 47(2), 165-172.

[9] Tian, Z., Zuo, M. J., & Huang, H. (2008). Reliability-redundancy allocation for multi-state series-parallel systems, IEEE Transactions onReliability, 57(2), 303-310.

[10] Chern, M. S. (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. Operations Research Letters, 11(5), 309-315.

[11] Peng, R., Mo, H., Xie, M., & Levitin, G. (2013). Optimal structure of multi-state systems with multi-fault coverage. Reliability Engineering & System Safety, 119, 18-25.

[12] Li, Y. F., & Peng, R. (2014). Availability modeling and optimization of dynamic multi-state series–parallel systems withrandom reconfiguration. Reliability Engineering & System Safety, 127, 47-57.

[13] Faghih-Roohi, S., Xie, M., Ng, K. M., & Yam, R. (2014). Dynamic availability assessment and optimal component design of multi-state weighted k-out-of-n systems. Reliability Engineering & System Safety, 123, 57-62.

[14] Kulturel-Konak, S., Smith, A. E., &Coit, D. W. (2003). Efficiently solving the redundancy allocation problem using tabu search. IIE Transactions, 35(6), 515-526.

[15] Liang, Y. C., & Smith, A. E. (2004). An ant colony optimization algorithm for the redundancy allocation problem (RAP), IEEE Transactions onReliability, 53(3), 417-423.

[16] Levitin, G., &Lisnianski, A. (2001). A new approach to solving problems of multi-state system reliability optimization. Quality and Reliability Engineering - International, 17(2), 93-104.

[17] Wang, Y., & Li, L. (2012). Heterogeneous redundancy allocation for series-parallel multi-state systems using hybrid particle swarm optimization and local search. Systems, IEEE Transactions on Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 42(2), 464-474.

[18] Levitin, G., Lisnianski, A., &Elmakis, D. (1997). Structure optimization of power system with different redundant elements. Electric Power Systems Research, 43(1), 19-27.

[19] Sharma, V. K., Agarwal, M., & Sen, K. (2011). Reliability evaluation and optimal design in heterogeneous multi-state series-parallel systems. Information Sciences, 181(2), 362-378.

[20] Li, C. Y., Chen, X., Yi, X. S., & Tao, J. Y. (2010). Heterogeneous redundancy optimization for multi-state series–parallel systems subject to common cause failures. Reliability Engineering & System Safety, 95(3), 202-207.

[21] Yingkui, G., & Jing, L. (2012). Multi-state system reliability: A new and systematic review. Procedia Engineering, 29, 531-536.

[22] Ouzineb, M., Nourelfath, M., &Gendreau, M. (2008). Tabu search for the redundancy allocation problem of homogenous series–parallel multi-state systems. Reliability Engineering & System Safety, 93(8), 1257-1272.

[23] Ding, Y., &Lisnianski, A. (2008). Fuzzy universal generating functions for multi-state system reliability assessment. Fuzzy Sets and Systems, 159(3), 307-324.

[24] Ushakov, I. A. (1986). A universal generating function. Soviet Journal of Computer and Systems Sciences, 24(5), 118-129.

[25] Lisnianski, A., Levitin, G., Ben-Haim, H., &Elmakis, D. (1996). Power system structure optimization subject to reliability constraints. Electric Power Systems Research, 39(2), 145-152.

[26] PourkarimGuilani, P., Sharifi, M., Niaki, S. T. A., &Zaretalab, A. (2014). Reliability evaluation of non-reparable three-state systems using Markov model and its comparison with the UGF and the recursive methods. Reliability Engineering & System Safety, 129, 29-35.

[27] Lisnianski, A., Levitin, G., & Ben-Haim, H. (2000). Structure optimization of multi-state system with time redundancy. Reliability Engineering & System Safety, 67(2), 103-112.

[28] Holland, J. (1975, 2nd edition in 1992), Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence, MIT Press, Cambridge

1. Redundancy Allocation Problem
2. Multi-State System
3. NP-Hard
4. Universal Generating Function
5. Response Surface Method
6Minor
7Major
8Chromosome
9Selection
10Crossover
11Fitness Value
12Roulette Wheel
13Single-Point
14 Mutation