

## بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت اطمینان سیستم بر مبنای هزینه‌ها و قابلیت اطمینان وابسته به مکان اجزای سیستم

مهدی کرباسیان<sup>۱\*</sup>، مهسا قندهاری<sup>۲</sup>، سعید عابدی<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

۲- استادیار دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان

۳- عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

### چکیده

طراحی مدارهای الکتریکی و الکترونیکی و یا شبکه‌های توزیع و تولید برق، سیستم‌های مکانیکی که از کارافتادگی یکی از قطعات آنها باعث از کارافتادگی کل سیستم می‌شود و حتی سیستم‌های تولید سلولی که در آنها ماشینها بصورت سری با هم مرتبط هستند از لحاظ میزان قابلیت اطمینان اهمیت زیادی دارند. تاکنون عمده‌ترین راهکارهای ارائه شده برای بهبود قابلیت اطمینان اینگونه سیستمها، تأکید بر افزایش قابلیت اطمینان ذاتی هر یک از قطعات یا اجزاء تشکیل دهنده سیستم یا افزایش قابلیت اطمینان سیستم بر مبنای استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات بوده است. در بعضی پژوهش‌ها نیز تنها تأثیر مکان اجزاء یک سیستم بر قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفته<sup>۱</sup> است. بنابراین، به نظر می‌رسد روش‌های دیگر کمتر استفاده شده است. در این مقاله مدلی چندهدفه ارائه شده که بین قابلیت اطمینان سیستم (که بر مبنای انتخاب مکان اجزاء است) و هزینه‌های مکانیابی، نگهداری و تعمیرات سیستم موازنه‌ی موردنظر را برقرار می‌کند. در پایان نیز مثالی عددی ارائه و توسط نرم‌افزار Lingo حل شده است.

واژه‌های کلیدی: قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، مکانیابی

## مقدمه

تا دهه‌ی ۱۹۶۰ اغلب افراد بر این باور بودند که هر چیزی (کالا یا سیستم) زمان مناسبی برای انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه دارد که عموماً شامل جایگزینی قطعات یا تعمیرات اساسی است. عقیده‌ی بسیاری از افراد بر این بود که با انجام عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌توان تناوب خرابی یک کالا در حین انجام عملیات را کاهش داد (دیلون، ۱۹۹۹) و (سلویکا و آونب، ۲۰۱۱). در بیشتر موارد دیده می‌شد که نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه اثرات مفیدی بر کارکرد سیستم ندارد و همچنین در بسیاری از موارد نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه باعث بدتر شدن وضعیت کارکردی اشیاء می‌شد چراکه باعث ایجاد فرصت بیشتری برای خرابی‌های تحمیلی بواسطه‌ی انجام عملیات نگهداری و تعمیرات می‌گردید (لوین و همکاران، ۲۰۰۳). در این دوران گروه نگهداری و تعمیرات ناوگان هوایی (MSG) ایالات متحده با توجه به این مشاهدات موضوع نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را مورد مطالعه قرار داد. نتایج مطالعه نشان می‌داد که نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه فقط برای اقلامی که الگوی معینی از خرابیها را دارا هستند مفید است (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به کاستیهای موجود آنها رویکردی منطقی برای تعیین اینکه آیا نوع مناسبی از نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای یک کالای مورد نظر اثر بخش است یا خیر ارائه کردند که عبارت "نگهداری و تعمیرات

مبتنی بر قابلیت اطمینان"<sup>۱</sup> به آن اطلاق شد (موبری،

۱۹۹۷). این رویکرد بر این قواعد استوار است:

- هدف از نگهداری و تعمیرات حفظ کارایی کالا است.

- این رویکرد بر کارکرد یک سیستم متمرکز می‌شود نه اجزاء آن.

- قابلیت اطمینان مبنای تصمیم‌ها است.

- اولین معیار اثرگذار بر این رویکرد، ایمنی است و سپس مسایل اقتصادی در نظر گرفته می‌شوند.

- این رویکرد بایستی از حدود طراحی تبعیت کند (آنها را تصدیق کند).

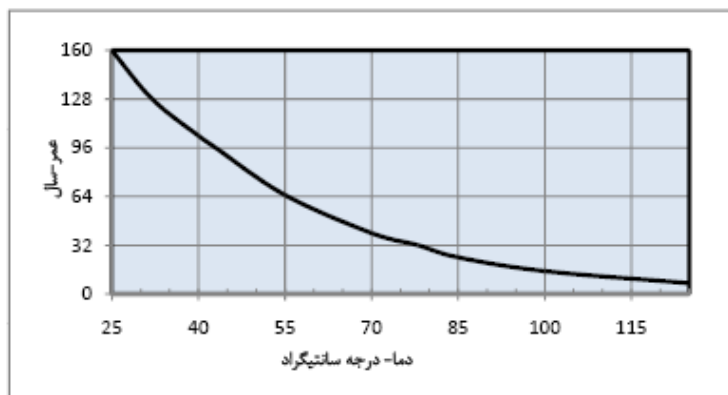
- نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان فرآیندی پیوسته است (راوسند ۱۹۹۸).

طراحی مدارهای الکتریکی و الکترونیکی، شبکه‌های تولید و توزیع برق، سیستمهای مکانیکی که از کارافتادگی بعضی از قطعات آنها باعث از کارافتادگی کل سیستم می‌شود و حتی سیستمهای تولید سلولی از این نظر که در صورت خرابی یکی از اجزاء، توقف کل سیستم را بهمراه خواهد داشت، دارای حساسیت می‌باشند و بنابراین باید سعی شود که قابلیت اطمینان سیستم افزایش یابد تا از بروز مشکلات عدیده‌ی از کارافتادگی سیستم جلوگیری شود (دیلون، ۲۰۰۲).

بخاطر اینکه اکثر اوقات قطعات مشابه، در محیطهای یکسان دارای قابلیت اطمینان یکسانی هستند تنها با انجام عملیات نگهداری و تعمیرات قوی می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داد که مستلزم افزایش هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات خواهد

مکانهای متفاوت می‌توان به مواردی چون: ۱- قطعات مجاور جزء مورد نظر (بخاطر عدم وجود فضای کافی برای انجام اتصالات بصورت صحیح)، ۲- در معرض صدمه قرار داشتن از قبیل نزدیکی به قطعات مکانیکی برد مثل کلید قطع و وصل و یا نزدیکی به لبه‌ی برد، ۳- حرارت و رطوبت، ۴- دمای محیط و مسیر انتقال حرارت در درون سیستم و محیط (بعنوان مثال در شکل ۱ نمونه‌ای از این اثرات قابل مشاهده است)، ۵- لرزش در آن قسمت از سیستم و ۷- مشکلات تداخل فرکانس (EMI) بین اجزاء، اشاره کرد (پاجداس و فرانک، ۱۹۹۶).

بود و این مقدار نیز محدود است چون به هر مقدار هم این عملیات افزایش یابد قابلیت اطمینان سیستم از مقدار خاصی بیشتر نخواهد شد با توجه به اینکه تغییر محیط (مکان) کارکرد اجزاء سیستم باعث تغییر در میزان قابلیت اطمینان آنها و حتی در برخی موارد باعث تغییر تابع توزیع عمر آنها می‌شود (اسمیت و هاوکیوز، ۲۰۰۴). می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان مکانی اجزاء آنها محاسبه کرد و جهت برقراری موازنه‌ی دلخواه بین هزینه و قابلیت اطمینان سیستم مکان اجزاء را تعیین نمود. از دلایل تغییر قابلیت اطمینان اجزاء در



شکل ۱: تغییر میانگین عمر قطعه‌ی مبدل سینکرو به دیجیتال (یک قطعه‌ی الکترونیکی در سیستم‌های اویونیک) بر حسب تغییر دمای محیط

است. بعنوان مثال (لیو و اسلام، ۲۰۰۵) روشی تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید قدرت ترکیبی بادی-دیزلی ارائه کردند. در این پژوهش نویسندگان بدنبال بررسی اثرات اندازه و فاکتورهای مکان بر پایداری سیستم بر روی قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی بادی-دیزلی برنامه‌ریزی شده بر مبنای مدل‌سازی معادله‌ی نرخ نیروی خروجی

در این زمینه رویکردهایی با شکل چند هدفه نیز موجود هستند که در اکثر موارد بدون توجه به تابع توزیع عمر قطعات و تنها به مقادیری عددی در حل مسایل خود پرداخته‌اند که در (بای و همکاران ۲۰۰۹) نمونه‌ای از اینگونه موارد دیده می‌شود. همچنین در برخی موارد استفاده از مکانیابی در جهت افزایش قابلیت اطمینان سیستم مورد تأکید قرار گرفته

**تعاریف و تعمیم مدل نگهداری و تعمیرات  
پیشگیرانه:**

**قابلیت اطمینان سیستم:**

قابلیت اطمینان یک جزء عبارتست از احتمال اینکه آن جزء کار مورد نظر را تحت شرایط معین در فاصله‌ی زمانی مشخصی انجام دهد (کرباسیان و طباطبایی، ۱۳۸۸).

چونکه سیستم‌های مورد نظر تعمیرپذیر هستند مشخص است که با افزایش استفاده از سیستم و همچنین افزایش عمر آن، قابلیت اطمینان سیستم کاهش خواهد یافت (نرخ خرابی افزایش خواهد یافت) که این خاصیت در تنها بعضی از توزیع‌های آماری مانند توزیع وایبال با پارامتر مقیاس بزرگتر از ۱ قابل مشاهده است (لوین و کالال، ۲۰۰۳).

**حد بالا برای تعداد عملیات تعمیرات پیشگیرانه و  
حد بالا برای عمر سیستم:**

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به مجموعه عملیاتی گفته می‌شود که در زمانهای خاص و طبق برنامه ریزی بر روی سیستم انجام می‌شود تا سیستم طول عمر بیشتری داشته باشد.

در این مدل حد بالایی برای تعداد عملیات تعمیرات پیشگیرانه وجود ندارد و بنابراین، این تعداد بطور غیرمستقیم و با محاسبه‌ی زمان بین انجام عملیات تعمیرات پیشگیرانه محاسبه خواهد شد.

حد بالای عمر سیستم نیز توسط عواملی چون عوامل اقتصادی، بهره‌وری، پیشرفت تکنولوژی و ... به سیستم تحمیل می‌شود که با استفاده از آن می‌توان

می‌باشد (اشنایدر و داسکی، ۲۰۰۵). مدل‌هایی برای انتخاب مکان تسهیلات برای حداقل سازی هزینه‌ی حمل و نقل مورد انتظار در زمان خرابی تسهیلات ارائه می‌کنند. هدف این پژوهش مکانیابی اجزاء برای کاهش تابع هدف سنتی (هزینه‌ی مکانیابی) و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات بشکلی است که سیستم قابلیت اطمینان حداکثر را داشته باشد. فلقی، حقی فام و رمضانی، (۱۳۸۳) با توجه به اینکه میزان موفقیت حاصل از انجام عملیات بازایی بار در سطح شبکه‌های توزیع به تعداد و مکان سکسیونرها و نقاط مانور آنها بستگی دارد مدلی برای افزایش میزان قابلیت اطمینان آنها براساس مکان اجزاء شبکه ارائه داده‌اند.

با توجه به کمبودهای هر یک از موارد فوق، این مقاله سعی در ایجاد مدل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ی دوره‌ای دارد که بتوان با استفاده از آن بر کاستی‌ها و مشکلات مدل‌های موجود فائق آمد. موارد زیر برای فهم بهتر مسأله ارائه می‌شوند. مدل ارائه شده در این مقاله با توجه به قواعد رویکرد نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان منجر به حالتی می‌شود که مکان مناسب اجزاء و همچنین زمان مناسب انجام تعمیرات پیشگیرانه بشکلی تعیین شود تا هم هزینه‌های مکانیابی، نگهداری و تعمیرات حداقل شود و هم قابلیت اطمینان سیستم حداکثر گردد. به این ترتیب هم در طول عمر سیستم، شکل قابل قبولی از ترکیب دو مورد ذکر شده خواهیم داشت و هم اینکه حداقل مقدار قابلیت اطمینان مورد نظر طراح و درخواست‌کننده‌ی سیستم تأمین می‌گردد.

تعداد دوره‌های انجام عملیات تعمیرات پیشگیرانه را محاسبه کرد.

#### حد بالا و پایین قابلیت اطمینان سیستم:

این مقدار توسط طراح سیستم یا کارفرما درخواست شده و بالا بودن حد پایین قابلیت اطمینان آن نشان‌دهنده‌ی میزان اهمیت عدم کارکرد سیستم می‌باشد به این معنا که هرچقدر میزان از کارافتادگی سیستم اهمیت داشته باشد این عدد نیز بیشتر خواهد بود. حد بالای قابلیت اطمینان سیستم نیز بخاطر وجود محدودیتهای طبیعی سیستم به آن تحمیل می‌شود.

جهت تعیین حالت بهینه‌ی قرارگیری اجزاء سیستم، در تامین قابلیت اطمینان بالا و هزینه‌ی کل پایین، نیاز به تعریف مدلی چندهدفه می‌باشد. در زیر ملزومات ایجاد این مدل ریاضی آورده شده‌اند:

#### نمادگذاری و فرضیات:

در این بخش چارچوبی ریاضی برای قابلیت اطمینان بر مبنای مدل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ی دوره‌ای با تأکید بر قابلیت اطمینان نقطه‌ای ارائه می‌شود و مشخصه‌های ساختاری آن برای نقطه بهینه تعیین می‌شود:

#### نمادگذاری:

##### پارامترها:

$T$ : دوره‌ی عمر سیستم برحسب واحد زمان.  
 $B_{ij}$ : میانگین عمر جزء  $i$  در محل  $j$ .  
 $n$ : تعداد اجزاء سیستم (برابر با تعداد نقاط کاندیدا برای مکانیابی).  
 $i$ : مشخصه‌ی نشان‌دهنده‌ی ترتیب اجزاء سیستم.  
 $j$ : مشخصه‌ی نشان‌دهنده‌ی نقاط کاندیدا.  
 $C_{ij}$ : هزینه‌ی استقرار جزء  $i$  در مکان  $j$ .  
 $C_{mij}$ : هزینه‌ی برگرداندن جزء  $i$  در مکان  $j$  به حالت سالم پس از خراب شدن بصورت تصادفی که با این مقدار هزینه سیستم به همان حالت قبل از خرابی برمی‌گردد و قابلیت اطمینان آن تغییری نمی‌کند.  
 $C_{pmij}$ : هزینه‌ی انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه بر روی جزء  $i$  در مکان  $j$ .  
 $T_{ij}$ : پارامتر مقیاس توزیع عمر اجزاء سیستم.

#### هزینه مکان‌یابی اجزاء سیستم:

این هزینه در هر مکان برای هر جزء خاص متفاوت می‌باشد. در واقعیت هر جزء که بخواهد در مکانی قرار گیرد دارای هزینه‌ی خاص خود جهت راه‌اندازی می‌باشد.

از علل متفاوت بودن این هزینه میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- هزینه‌ی دسترسی به نقاط ورودی و خروجی سیستم.
- افزایش یا کاهش تعداد لایه‌های یک برد الکترونیکی براساس محل قرارگیری قطعات روی برد.
- فرآیند تولید (نصب قطعات سیستم) در زمانی که توالی نصب قطعات مهم می‌باشد.
- چگونگی قرارگیری در محل و ...

▪ تابع توزیع عمر کلیه قطعات از توزیع وایبال با پارامترهای  $B_{ij}$  و  $r_{ij}$  می‌باشند.

می‌دانیم که تابع توزیع وایبال بصورت زیر می‌باشد:

$$F_w(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{B}\right)^r} = 1 - R_{ij} \quad (1)$$

مدل ریاضی:

توابع هدف:

در این مدل سعی در بهینه کردن ۲ تابع هدف زیر داریم:

حداکثر کردن قابلیت اطمینان سیستم:

با توجه به اینکه قابلیت اطمینان سیستمهای سری برابر با حاصلضرب قابلیت اعتماد تک تک اجزاء می‌باشد در اینجا نیز خواهیم داشت:

$$Max R_S = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n R_{ij} \quad \forall X_{ij} = 1 \quad (2)$$

که نشان می‌دهد قابلیت اطمینان سیستم برابر با حاصلضرب قابلیت اطمینان مکانی اجزاء سیستم است یعنی باید جزئی در مکان خاصی قرار گیرد تا از قابلیت اطمینان آن در محاسبات استفاده شود در غیر اینصورت در محاسبات دخیل نیست.

این تابع هدف با توجه به تعاریف ارائه شده در فوق و فرض وایبال بودن توزیع عمر سیستم بصورت زیر در می‌آید:

(۳)

$$Max R_S = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n e^{-\left(\frac{t}{B_{ij}}\right)^{r_{ij}}} = e^{-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{t}{B_{ij}}\right)^{r_{ij}} \times X_{ij}}$$

با توجه به اینکه حداکثر کردن تابع فوق هم‌ارز با حداقل کردن تابع زیر می‌باشد از این پس به جای تابع هدف اول از عبارت زیر استفاده می‌کنیم:

$R^{\min}$ : حداقل قابلیت اطمینان مورد قبول برای مشتری.

$R^{\max}$ : حداکثر قابلیت اطمینان قابل دستیابی.

متغیرهای تصمیم:

$R_{ij}(t)$ : قابلیت اطمینان تسهیل نوع  $i$  در مکان  $j$

پس از گذشت زمان  $t$  از انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه.

$t$ : فاصله‌ی زمانی بین انجام عملیات نگهداری

پیشگیرانه برحسب واحد زمان.

$R_S(t)$ : قابلیت اطمینان سیستم پس از گذشت

زمان  $t$  از انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه.

$X_{ij}$ : برابر با ۱ است اگر جزء  $i$  در مکان  $j$  قرار

گیرد و در غیر اینصورت برابر با صفر می‌باشد.

فرضیات:

▪ خرابی همه‌ی قطعات از بقیه مستقل می‌باشد.  
 ▪ سیستم در زمان شروع کار یک سیستم تازه و نو می‌باشد.

▪ خرابی‌های اجزاء سیستم، تصادفی بوده اما مقدار آنها با توجه به تابع عمر آنها قابل برآورد هستند.

▪ سیستم قابل تعمیر است و با افزایش استفاده از آن و عمرش با کاهش قابلیت اطمینان مواجه می‌شود.

▪ خرابی‌های موجود آمده در سیستم سریعاً بررسی و رفع می‌شوند.

▪ زمانهای انجام عملیات تعمیر و نگهداری ناچیز (قابل صرف‌نظر) هستند.

▪ پس از هر بار عملیات نگهداری پیشگیرانه سیستم به حالت اولیه برمی‌گردد یعنی اینکه می‌توان زمان کارکرد آن تا به حال را صفر در نظر گرفت.

در این رابطه هزینه‌ی یکبار انجام عملیات (۴)

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ی سیستم را نشان می‌دهد.

در نتیجه تابع هدف دوم که حاصل جمع کل هزینه‌های طول عمر سیستم است بصورت زیر می‌باشد:

$$Min C = C_L + C_r \frac{T}{t} + C_{PM} \times \left[ \frac{T}{t} \right] \quad (۸)$$

علت ضرب مقدار  $\frac{T}{t}$  در دو هزینه‌ی آخر محاسبه‌ی هزینه برای طول عمر سیستم است زیرا این مقادیر مربوط به یک دوره می‌باشند و علت استفاده از بزرگترین عدد صحیح کوچکتر از  $\frac{T}{t}$  تعیین تعداد تعمیرات تا پایان دوره می‌باشد.

#### محدودیتها:

۱. محدودیت قابلیت اطمینان کل سیستم:

$$R^{\min} \leq R_s \leq R^{\max} \quad (۹)$$

علت وجود این محدودیت جلوگیری از کاهش بدون حد قابلیت اطمینان سیستم است تا در هر شرایطی سیستم از حداقل میزان قابلیت اطمینان موردنیاز مشتری یا طراح برخوردار باشد.

می‌توان این محدودیت را برای رهایی از مشکلات محاسباتی و راحتی حل، مانند تابع هدف اول به شکل معادله‌ای با حالت جمع تبدیل کرد یعنی:

$$R^{\min} \leq R_s = e^{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( -\left( \frac{t}{B_{ij}} \right)^{r_{ij}} \times X_{ij} \right)} \leq R^{\max} \quad (۱۰)$$

و در نتیجه داریم:

$$Max R_s \approx Min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{t}{B_{ij}} \right)^r \times X_{ij}$$

حداقل کردن مجموع هزینه‌های مکانیابی، تعمیرات و نگهداری سیستم که از ۳ قسمت زیر تشکیل شده است:

الف) جمع هزینه‌های مکانیابی قطعات:

$$C_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \times X_{ij} \quad (۵)$$

این مقدار نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی ثابت مکانیابی اجزاء سیستم می‌باشد (از هزینه‌ی برقراری ارتباط بدلیل یکسان بودن هزینه‌ی برقراری ارتباط بین اجزاء صرفنظر شده چون در هر صورت مسافت بین اجزاء مقداری یکسان است).

ب) جمع هزینه‌های تعمیرات قطعات (خرابی‌های اتفاقی):

$$C_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{t}{B_{ij}} \right)^r \times C_{mrij} \right] \times X_{ij} \quad (۶)$$

که در اینجا مقدار خرابیها تا لحظه‌ی t در هزینه‌ی هربار تعمیر ضرب می‌شود.

این معادله نشان‌دهنده‌ی میانگین هزینه‌ی راه‌اندازی مجدد سیستم بدون افزایش در قابلیت اعتماد آن در فاصله‌ی بین دو عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد.

ج) جمع هزینه‌های نگهداری سیستم.

$$C_{PM} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{PMij} \times X_{ij} \quad (۷)$$

(۱۱) دو محدودیت فوق تضمین می‌کنند که سیستم دقیقاً  $n$

جزء (نه کمتر و نه بیشتر) را در مکانهای مورد نظر

قرار دهد.

V. متغیر تصمیم:

(۱۵)

$$X_{ij} = 0, 1 \quad \forall i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$$

جمع بندی مدل ارائه شده:

توابع هدف:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{t}{B_{ij}} \right)^r \times X_{ij} \quad (16)$$

$$\text{Min} C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \times X_{ij} + \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{t}{B_{ij}} \right)^r \times C_{mrij} \right] \times X_{ij} \right) * \frac{T}{t} + \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{pmij} \times X_{ij} \right) \times \left[ \frac{T}{t} \right] \quad (17)$$

مربوط به خود وارد تابع هدف شده و سپس با هم

جمع می‌شوند در قدم اول، دو تابع هدف به عنوان

مسائل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط به طور

جداگانه با استفاده از Lingo را حل کرده و حل های

بهینه  $R_S^{\text{opt}}$  و  $C^{\text{opt}}$  بدست آمدند. سپس، دو تابع

ترکیب می‌شوند به طوری که در یک تابع هدف

جدید  $Z_3$  نتیجه شده است:

(۲۷)

$$Z_r = 1 \text{ وزن} * \frac{\text{Ln}(R_S)}{\text{Ln}(R_S^{\text{opt}})} + 2 \text{ وزن} * \frac{C}{C^{\text{opt}}}$$

محدودیتها:

(۱۸)

$$\text{Ln}(R^{\text{min}}) \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( - \left( \frac{t}{B_{ij}} \right)^{r_{ij}} \times X_{ij} \right) \leq \text{Ln}(R^{\text{max}})$$

T=L (۱۹)

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$X_{ij} = 0, 1 \quad \forall i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n \quad (22)$$

روش حل پیشنهادی و حل مثال عددی:

دو تابع هدف در مدل فوق وجود دارد برای حل

مسأله ی چند هدفه، دو تابع هدف به یک تابع هدف

تبدیل می‌شوند هر تابع هدف با یک وزن معین



85 52 77  
 85 53 83;  
 Bij = 496 429 407  
 468 426 425  
 470 468 423;  
 Cmrij = 4 1 2  
 3 3 1  
 2 4 2;  
 Cpmij = 11 13 13  
 12 13 15  
 13 14 15;  
 rij = r = 4  
 L=1,000  
 0.980 < R < 0.999

### نتایج عددی:

خلاصه‌ی نتایج بدست آمده از حل این مثال توسط نرم‌افزار Lingo در جدول شماره یک نشان داده شده است (در این مثال واحد زمان، ساعت می‌باشد):

برای نشان دادن درصد انحراف از  $R_S^{opt}$  استفاده شده است که این وضع برای  $\frac{C}{C^{opt}}$  نیز صادق است.

این کار قابل توجیه است چون  $\frac{C}{C^{opt}}$  و  $\frac{R_S}{R_S^{opt}}$  مقادیر وابسته ای دارند که می‌توانند با استفاده از وزن‌ها جمع شوند. از طرف دیگر به دلیل آنکه  $R_S^{opt}$  و  $C^{opt}$  واحدهای مختلفی دارند (که همان اندازه‌ی قابلیت اطمینان و هزینه هستند) نمی‌توانند با هم جمع شوند.

برای اثبات درست بودن مدل ارائه شده مثال زیر با نرم‌افزار LINGO حل شده و برای حل بدست آمده تحلیل حساسیت انجام می‌شود:

کلیدی پارامترها بصورت زیر می‌باشند:

$$C_{ij} = 82 \quad 66 \quad 74$$

جدول ۱: نتایج حاصله از حل مدل توسط نرم‌افزار Lingo برای ضرایب مختلف توابع هدف

مکان جزء	مکان جزء	مکان جزء اول	طول بازه‌ی انجام عملیات تعمیرات	مقدار تابع هدف قابلیت اطمینان	مقدار تابع هدف هزینه	ضریب تابع هدف اول
۳	۱	۲	۵۹.۱۷	۰.۹۹۹	۸۷۴	۱
۱	۲	۳	۵۸.۱۸	۰.۹۹۹	۸۷۴	۰.۹ و ۰.۸ و ۰.۷
۲	۱	۳	۵۹.۸۲	۰.۹۹۹	۸۳۶	۰.۶
۱	۲	۳	۵۸.۱۹	۰.۹۹۹	۸۷۴	۰.۵ و ۰.۴
۱	۲	۳	۵۸.۱۸	۰.۹۹۹	۸۷۴	۰.۳ و ۰.۲ و ۰.۱ و ۰

کلی سیستم مکان اجزاء ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب از ۲ و ۱ و ۳ به ۳ و ۲ و ۱ تغییر می‌یابد و طول بازه‌ی زمان انجام تعمیرات از ۵۹.۱۷ واحد به ۵۸.۱۸ واحد کاهش می‌یابد. برای اوزان ۰.۸ و ۰.۷ برای مقدار قابلیت اطمینان همان نتایج مربوط به وزن ۰.۹ برقرار

یادآور می‌شویم که وزن تابع هدف دوم در هر یک از موارد از رابطه‌ی {وزن تابع هدف اول - ۱} بدست می‌آید. مشاهده می‌شود که با تغییر وزن تابع هدف اول از ۱ به ۰.۹ برای جبران تغییرات و حفظ قابلیت اطمینان

نتایج فوق نشان می‌دهد که با استفاده از مدل پیشنهادی، در شرایط متفاوت برای تصمیم‌گیری نظیر میزان اهمیت بودجه و یا میزان اهمیت قابلیت اطمینان می‌توان تصمیم‌گیری را با بهترین موازنه‌ی ممکن انجام داد.

به این ترتیب دیده شد که با انجام مکانیابی صحیح می‌توان هم قابلیت اطمینان سیستم را بهینه کرد و هم هزینه‌های سیستم را کاهش داد و این همان اصل مورد نظر روش نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان است.

#### نتیجه‌گیری:

از آنجا که دغدغه‌ی اکثر طراحان و کارفرمایان سیستم افزایش قابلیت اطمینان سیستم بدون افزایش ملموس هزینه‌ها می‌باشد، در این پژوهش مدلی ارائه شده که توانایی برقراری موازنه‌ی دلخواه طراح، کارفرما و یا پیمانکار سیستم را در هر مقدار دلخواه خواهد داشت و از این نظر که همزمان با افزایش قابلیت اطمینان سیستم با تأکید بر مکان اجزاء آن، هزینه‌های سیستم نیز در نظر گرفته می‌شوند مدلی کاربردی بوده، همچنین با واقعیات موجود در مورد سیستمها تطابق بیشتری دارد و نسبت به مدل‌های رایج شده در زمینه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان مزیت تأکید بر مکانیابی را با خود به همراه دارد. اساساً تلفیق سه مبحث مهم از جمله، قابلیت اطمینان سیستم، برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات و مکانیابی در این مدل موجود می‌باشد. همچنین این مدل تنها توانایی کاربرد در سیستم‌های دارای حالت سری را دارد و در مورد سیستم‌های موازی یا

می‌باشد. با تغییر وزن تابع هدف از ۰.۷ به ۰.۶ دو مرتبه سیستم برای مقابله با این تغییر، ترتیب مکان اجزاء را از ۳ و ۲ و ۱ به ۳ و ۱ و ۲ تغییر می‌دهد و مقدار قابلیت اطمینان سیستم همان ۰.۹۹۹ باقی مانده و هزینه‌ی سیستم نیز از ۸۷۴ واحد به ۷۳۶ واحد کاهش می‌یابد. در این تغییرات طول بازه‌ی زمان انجام تعمیرات از ۵۸.۱۸ واحد به ۵۹.۸۲ واحد افزایش می‌یابد. با تغییر وزن تابع هدف اول از ۰.۶ به ۰.۵ یا ۰.۴ دو مرتبه سیستم ترتیب مکان اجزاء را تغییر می‌دهد و آن را به ۳ و ۲ و ۱ تغییر می‌دهد و هزینه‌ی سیستم نیز به ۸۷۴ واحد افزایش می‌یابد ولی قابلیت اطمینان سیستم حفظ خواهد شد و طول بازه‌ی زمان انجام تعمیرات از ۵۹.۸۲ واحد به ۵۸.۱۹ واحد تغییر می‌کند. در تغییر وزن تابع هدف اول به ۰.۳ و ۰.۲ و ۰.۱ و ۰ تنها پارامتری که تغییر می‌کند طول بازه‌ی زمان انجام تعمیرات است که تنها با ۰.۰۱ تغییر به ۵۸.۱۸ تغییر می‌یابد.

بنابراین با توجه به نتایج فوق بهترین حالت مکانیابی سیستم زمانی است که طول بازه‌ی زمان انجام تعمیرات برابر با ۵۹.۸۲ واحد باشد و اجزاء سیستم به این شکل قرار گیرند: جزء اول در مکان شماره ۳، جزء دوم در مکان شماره ۱ و جزء سوم در مکان شماره ۲.

نتایج فوق نشان می‌دهد که با استفاده از مدل پیشنهادی، در شرایط متفاوت برای تصمیم‌گیری نظیر میزان اهمیت بودجه و یا میزان اهمیت قابلیت اطمینان می‌توان تصمیم‌گیری را با بهترین موازنه‌ی ممکن انجام داد.

Dhillon, B. S. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach* (1st ed.). USA: CRC.

Levin, M. A., & Kalal, T. T. (2003). *Improving Product Reliability: Strategies and Implementation* (1st ed.). California: John Wiley & Sons Ltd.

Li, D., & Gao, J. (2010). Study and Application of Reliability Centered Maintenance Considering Radical Maintenance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23 (5), 622-629.

Lio, X., & Islam, S. (2005). Effect of Site and Size on Reliability of A Wind-DieselHybrid Power System. *Australian Universities Power Engineering Conference* (pp. 420-425). Hobart: Tasmania.

Moubray, J. (1997). *Reliability Centered Maintenance* (2nd ed.). Oxford: Elsevier.

Nakagawa, T. (2008). *Advanced Reliability Models and Maintenance Policies* (1st ed.). Berlin: Springer.

Pujadas, W., & Frank, F. (1996). A Reliability Centered Maintenance Strategy for Discrete Part Manufacturing Facility. *Computers & Industrial Engineering*, 31 (1-2), 241-244.

Rausand, M. (1998). Reliability Centered Maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 60 (2), 121-132.

Selvika, J. T., & Aven, T. (2011). A framework for Reliability and Risk Centered Maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 96 (2), 324-331.

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM: Gateway to World Class Maintenance* (1st ed.). USA: Elsevier.

Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean Maintenance: Reduce Costs, Improve Quality and Increase Market Share* (1st ed.). USA: Elsevier.

Snyder, L. V., & Daskin, M. S. (2005). Reliability Models for Facility Location: The Expected Failure Cost Case. *Journal of Transportation Science*, 39 (3), 400-416.

Wang, H., & Pham, H. (2006). *Reliability and Optimal Maintenance*. Berlin: Springer.

سری-موازی بایستی مدل مربوطه طراحی شود و به کار رود. در ضمن پیشنهاد می‌گردد که محققین از این مدل در تعیین قابلیت اطمینان سیستمهای دارای چیدمان محصولی، و یا حتی سیستمهای توزیع برق بهره‌گیری نمایند. در تحقیقات آتی نیز توصیه می‌شود که محققین گرانقدر به طراحی مدل‌های مربوط به سیستمهای سری- موازی و یا موازی بپردازند.

#### قدردانی:

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم که از پرسنل شرکت صنایع اویونیک ایران بخصوص آقایان مهندسین سعید کنارکوهی، روح‌الله آیتی، عبدالرضا رادمش و بهلول قربانی بخاطر راهنمایی و کمکهای بی‌دریغشان در انجام این پژوهش تشکر کنیم.

#### مراجع

فلقی، ح.، حقی فام، م.، ر. و رمضان، م. (۱۳۸۳). بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی توسط جایگذاری بهینه‌ی تجهیزات کلیدزنی. *فصل نامه امیرکبیر*، ۳۳۸-۳۵۱.

کرباسیان، م.، & طباطبایی، ل. (۱۳۸۸). *آشنایی با قابلیت اطمینان (نسخه اول)*. اصفهان: ارکان دانش.

Bae, C., Koo, T., Son, Y., Park, K., Jung, J., Han, S., et al. (2009). A Study on Reliability Centered Maintenance Planning of A Standard Electric Motor Unit Subsystem Using Computational Techniques. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23, 1157-1168.

Bloom, N. B. (2006). *Reliability Centered Maintenance Implementation Made Simple* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.

Dhillon, B. S. (1999). *Design Reliability: Fundamentals and Applications* (1st ed.). Florida: CRC Press.

