

توسعه یک مدل ریاضی جهت تعیین اندازه بهینه بافر و تخصیص افزونگی در سیستم‌های تولیدی سری-موازی

مجتبی آقایی

دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی، گرایش تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی،
mojtaba_ghaei68@yahoo.com

مقصود امیری

(نویسنده مسئول) استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی*

محمدتقی تقوی فرد

استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، dr.taghavifard@gmail.com

برهام عظیمی

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، p.azimi@yahoo.com

چکیده: مسئله مورد بررسی در این تحقیق، در نظر گرفتن مسائل تخصیص افزونگی و تخصیص بافر به صورت هم‌زمان در یک سیستم تولیدی سری-موازی است. هدف از انجام این تحقیق، بهبود دسترس‌پذیری، هزینه‌های کلی سیستم و ظرفیت بافرها از طریق تعیین میزان بهینه بافرهای بین ماشین‌آلات، انتخاب ماشین‌آلات با قابلیت اطمینان بالا و تخصیص آن‌ها و تدوین یک برنامه مناسب تعمیرات و نگهداری است. در این تحقیق، با توجه به دسته‌بندی کردن خرابی‌های صورت گرفته به صورت اضطراری و پیشگیرانه برای ماشین‌آلات، لحاظ کردن هزینه هر نوع خرابی برای ماشین‌آلات و در نظرگیری تابع توزیع غیر نمایی (از جمله ویبول) برای انواع خرابی‌ها که به موجب آن، به دست آوردن و محاسبه توابع ریاضی مربوط به اهداف دسترس‌پذیری و هزینه به صورت صریح، بسیار سخت شده، بنابراین رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی به منظور برآورد این دو تابع هدف بکارگرفته شد و به منظور حل مدل پیشنهادی از الگوریتم ابتکاری در متلب استفاده شد. به منظور پیاده سازی مدل پیشنهادی از یک مثال عددی استفاده شد و بر اساس متدولوژی پیشنهادی مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار گرفت. مدل مربوط به مسئله مورد بررسی، توسط الگوریتم NSGA-II کد نویسی و حل شد و مجموعه جواب‌های پارتو به دست آمد. نتایج حاصل از تحقیق حاکی از اعتبار متدولوژی پیشنهادی برای مسئله مورد بررسی بود.

کلمات کلیدی: اندازه بافر، تخصیص افزونگی، شبیه‌سازی، شبکه عصبی، طراحی آزمایش‌ها

این مسئله نیز به عنوان مسئله تخصیص افزونگی (RAP) نام‌گذاری شده است، اشاره کرد [۲]. مسائل تخصیص افزونگی (RAP) مربوط به جستجو برای ترکیب خاصی از اجزای جایگزین است که با ترکیب مناسب با اجزای تشکیل‌دهنده سیستم که نیاز به بهبود دارند، قابلیت اطمینان کل سیستم را افزایش می‌دهند [۳]. در مسائل تخصیص افزونگی، زمانی که یک سیستم تعمیر پذیر باشد از واژه دسترس‌پذیری به جای قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. دسترس‌پذیری به معنای درصدی از زمان است که سیستم تعمیر پذیر به صورت صحیح وظایف تعریف شده را انجام می‌دهد. دو راهکار عمده به منظور افزایش دسترس‌پذیری سیستم وجود دارد. راهکار اول، بالا بردن

۱- مقدمه

یک خط تولید در یک کارخانه تولیدی، شامل توالی ایستگاه‌های عملیاتی مختلف است که ایستگاه‌ها می‌توانند توسط اپراتور یا به صورت خودکار یعنی بدون حضور اپراتور یا نیمه خودکار فعالیت کنند [۱]. در هنگام طرح‌ریزی خط تولید، انواع مختلفی از مسائل طراحی وجود دارد. از جمله این مسائل می‌توان به تعیین اندازه بافرهایی که در مقابل هر ایستگاه کاری خط تولید قرار دارند و به عنوان مسئله تخصیص بافر (BAP) شناخته می‌شوند و تعیین تعداد ماشین‌آلات در هر ایستگاه کاری که

* (Corresponding author) amiri@atu.ac.ir

با توجه به موارد ذکر شده، به دنبال پاسخ به این سؤال هستیم که چگونه می‌توان از طریق ترکیب مسئله تخصیص افزونگی (اضافه کردن ماشین‌آلات به صورت موازی به هر ایستگاه) و نیز در نظر گرفتن موجودی بافر بین ایستگاه‌ها و در نظر گرفتن برنامه‌های زمانی انجام انواع تعمیرات و نگهداری، مدلی از یک خط تولید طراحی کنیم که در آن بتوان به بیشینه مقدار دسترس‌پذیری کل سیستم تولیدی در کنار کمینه‌سازی هزینه‌های خرید و نگهداری ماشین‌آلات (بر اساس موارد ذکر شده در ارتباط با خرابی ماشین‌آلات و نوع تعمیرات مورد نیاز و نیز در نظرگیری هزینه هر بار خرابی) و نیز موجودی‌های بافر دست‌یابیم؟

در ادامه ساختار کلی تحقیق بدین شرح است. مبانی نظری و پیشینه تحقیق در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش سوم مدل سه هدفه ریاضی مرتبط با تحقیق توسعه داده شده و تشریح شده است. روش‌شناسی تحقیق در بخش چهارم تشریح شده است. یک مثال کاربردی و تجزیه و تحلیل‌های مرتبط با آن در بخش پنج از این تحقیق ارائه شده است و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای تحقیقات آتی در بخش ششم آورده شده است.

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱: تعیین ظرفیت بافر

مدیریت اثربخش تخصیص اندازه بافر یکی از موضوعات کلیدی در سیستم‌های تولیدی است [۴]. از جمله اولین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیق کوئینگزبرگ [۵] در سال ۱۹۵۹ اشاره کرد که به بررسی خطوط تولید و در نظرگیری ذخیره‌سازی مواد بین این خطوط پرداخت. گرشوین و اسکور (۲۰۰۰) در تحقیق خود دو مسئله شامل کمینه‌سازی فضای تخصیص‌یافته به بافرها با در نظر گرفتن محدودیت نرخ تولید و در مسئله دوم بیشینه‌سازی نرخ تولید در ارتباط با محدودیت فضای کل بافرها را مورد بررسی قرار دادند [۶]. مانیتز^۲ (۲۰۰۸) فرآیند تولید در خطوط مونتاژ چندمرحله‌ای با ظرفیت‌های بافر محدود و زمان‌های پردازش در ایستگاه‌های کاری به صورت

قابلیت اطمینان اجزای سیستم و دیگری استفاده از اجزای مازاد در کنار اجزای اصلی سیستم به صورت موازی است. به علت محدودیت‌های اقتصادی و فناوریانه، بهترین و کاربردی‌ترین روش جهت افزایش دسترس‌پذیری سیستم، راهکار دوم یعنی استفاده از اجزای مازاد در کنار اجزای اصلی است. کارایی و دسترس‌پذیری خط تولید را می‌توان علاوه بر تخصیص افزونگی و انتخاب ماشین‌آلات با قابلیت اطمینان بالا، از طریق تعیین میزان بهینه بافرهای بین ماشین‌آلات بهبود بخشید. مدیریت اثربخش تخصیص اندازه بافر یکی از موضوعات کلیدی در سیستم‌های تولیدی است. علاوه بر موارد پیش‌گفته کارایی یک خط تولید را می‌توان از طریق تدوین یک برنامه مناسب تعمیرات و نگهداری بهبود بخشید. تعمیر و نگهداری پیشگیرانه از طریق برنامه‌های زمانی مناسب برای انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در مواقع خرابی‌های و شکست‌های ناگهانی، قابلیت اطمینان ماشین‌آلات موجود در خط تولید را در بازه‌های زمانی بلندمدت افزایش می‌دهد [۴].

با توجه به موارد پیش‌گفته، در این تحقیق به دنبال افزایش عملکرد کلی خط تولید از طریق تعیین میزان بهینه بافرهای بین ماشین‌آلات، انتخاب ماشین‌آلات با قابلیت اطمینان بالا و تخصیص آن‌ها و تدوین یک برنامه مناسب تعمیرات و نگهداری بهبود هستیم. بدین منظور در تحقیق حاضر، مسئله مورد بررسی تخصیص افزونگی و تخصیص بافر به صورت هم‌زمان با در نظر گرفتن موارد زیر است:

- در نظر گرفتن اهداف چندگانه شامل کمینه کردن هزینه‌ها (هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه مرتبط با انواع تعمیرات و نگهداری و هزینه مرتبط با تخصیص ظرفیت‌های مختلف برای بافرها)، بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری سیستم و کمینه‌سازی ظرفیت بافرهای تخصیص‌یافته در کل سیستم تولیدی؛
- دسته‌بندی کردن خرابی‌های صورت گرفته به صورت اضطراری و پیشگیرانه برای تجهیزات و لحاظ کردن هزینه هر نوع خرابی برای ماشین‌آلات و در نظرگیری تابع توزیع غیر نمایی (از جمله ویبول) برای انواع خرابی‌ها؛ که به موجب آن، به دست آوردن و محاسبه توابع ریاضی مربوط به اهداف دسترس‌پذیری و هزینه به صورت صریح، بسیار سخت است؛ بنابراین از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی به منظور برآورد این دو تابع هدف استفاده می‌شود.
- به کارگیری رویکرد فرا ابتکاری (الگوریتم NSGA-II) به عنوان یک الگوریتم کارا به منظور مدل ریاضی توسعه داده شده.

1. Koenigsberg
2. Manitz

زیرسیستم و با امکان انتخاب سیاست افزونگی (RAPMC) برای هر زیرسیستم ارائه دادند و مدل را با الگوریتم ممیتیک حل کردند [۱۴]. چمبری، رحمتی، نجفی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۲)، در مقاله خود به توسعه مدل دو هدفه تخصیص افزونگی پرداختند. برای حل این مدل از دو الگوریتم NSGA-II و الگوریتم تجمع ذرات چندهدفه استفاده شده است [۱۵]. ژیانسنگ، زوتونگ، مینگفا و یینگ^{۱۱} (۲۰۱۴) بر مبنای تئوری عدم اطمینان، مسئله تخصیص افزونگی سیستم سری-موازی با اجزای تعمیر پذیر با در نظر گرفتن فاکتورهای غیرقطعی را مورد مطالعه قرار دادند که در آن نرخ خرابی، نرخ تعمیر و دیگر پارامترهای مربوطه به عنوان متغیرهایی غیرقطعی در نظر گرفته شدند [۱۶]. ذوالفقاری، زینال همدانی و ابویی اردکان^{۱۲} (۲۰۱۴) مسئله تخصیص افزونگی دو هدفه با در یک سیستم با اجزای تعمیر پذیر و تعمیر ناپذیر را مورد بررسی قرار دادند. اغلب، در مسئله تخصیص افزونگی از دو استراتژی برای اجزای افزونه استفاده می‌شود: فعال و آماده‌به‌کار [۱۷]. ابویی اردکان، زینال همدانی و علی‌نقیان^{۱۳} (۲۰۱۵) در تحقیق خود یک استراتژی جدید در مسئله افزونگی تحت عنوان "افزونگی ترکیبی" را معرفی کرده و در قالب یک مدل بهینه‌سازی تخصیص افزونگی چندهدفه مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. کایدپور، امیری، رفیع زاده و شهریاری‌نیا^{۱۴} (۲۰۱۷) در تحقیق خود به بررسی مسئله تخصیص افزونگی چندهدفه برای یک سیستم با اجزای تعمیر پذیر با در نظر گرفتن دسترس‌پذیری لحظه‌ای پرداختند. به منظور بررسی و حل مدل تحقیق از زنجیره‌های مارکوف و الگوریتم NSGAI استفاده شد [۱۹]. حیدری و سولیوان^{۱۵} (۲۰۱۸) در تحقیق خود به منظور بهبود قابلیت اطمینان یک سیستم سری-موازی، استراتژی ترکیبی بررسی تجهیزات مورد استفاده (شناسایی و حذف حالت‌های شکست که منجر به افزایش قابلیت اطمینان می‌شوند) و تخصیص قطعات (تجهیزات) مازاد را مورد بررسی قرار داده و برای حل آن از یک الگوریتم دقیق استفاده کردند [۲۰]. از جمله مطالعات داخلی صورت گرفته در زمینه تخصیص افزونگی می‌توان به این موارد اشاره کرد. محتشمی (۱۳۹۳) در تحقیق خود روش تلفیقی جدید جهت تخصیص افزونگی در سیستم‌های تولیدی با استفاده از اصلاح شده MOPSO و NSGA-II را ارائه کرد. این مقاله به معرفی یک مدل ریاضی چندهدفه جهت تخصیص افزونگی در سیستم‌های تولیدی پرداخته است [۲۱]. شریفی و

توزیع‌های زمانی عمومی را مورد بررسی قرار داد و یک روش تخمینی برای تعیین خروجی این‌گونه از خطوط تولیدی ارائه کرد [۷]. امیری و محتشمی^۱ (۲۰۱۲) در تحقیق خود به بررسی حداکثر کردن نرخ تولید از طریق تعیین اندازه بهینه موجودی‌های بافر با استفاده از رویکرد تلفیقی متدولوژی سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک پرداختند [۸]. تی سادیراس، پاپادولوس و اوکلی^۲ (۲۰۱۳) در پژوهش خود به منظور حل مسئله تخصیص بافر^۳ در یک خط تولید پایا از سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کردند [۲]. کاستا، آلفیری و فیچرا^۴ (۲۰۱۵)، به منظور حل مسئله تخصیص بافر در سیستم‌های تولیدی سری از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع موازی^۵ استفاده کردند [۹]. از جمله مطالعات داخلی در زمینه تعیین ظرفیت بافر می‌توان به مطالعه صورت گرفته توسط امیری و محتشمی (۱۳۹۳) اشاره کرد. این محققین در تحقیق خود به بررسی حداکثر کردن نرخ تولید از طریق تعیین اندازه بهینه موجودی‌های بافر با استفاده از رویکرد تلفیقی متدولوژی سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک پرداختند [۱۰].

۲-۲: تخصیص افزونگی

مسائل تخصیص افزونگی (RAP) مربوط به جستجو برای ترکیب خاصی از اجزای جایگزین است که با ترکیب مناسب با اجزای تشکیل‌دهنده سیستم که نیاز به بهبود دارند، قابلیت اطمینان کل سیستم را افزایش می‌دهند [۳]. چرن^۶ (۱۹۹۲) اثبات کرد که مسائل تخصیص افزونگی به دسته مسائل NP-HARD تعلق دارد که این امر نشان‌دهنده نیاز به استفاده از رویکردهای ابتکاری یا فرا ابتکاری برای حل این نوع از مسائل است [۱۱]؛ بنابراین برای حل این دسته از مسائل در تحقیقات گذشته روش‌های متعدد و متفاوتی توسعه داده شده است. اولین بار آیدا، گن و یوکوتا^۷ [۱۲] و یوکوتا، گن و آیدا^۸ [۱۳]، یک الگوریتم ژنتیک ساده برای حل مسائل تخصیص افزونگی بدون امکان تخصیص اجزای غیر همسان به هر زیرسیستم در سیستم‌های سری - موازی با چندین حالت خرابی ارائه نمودند. توکلی مقدم، صفری و ساسانی^۹ (۲۰۰۸) مدلی برای مسائل تخصیص افزونگی با امکان تخصیص اجزای غیر همسان به هر

10. Chambari, Rahmati, Najafi & Karimi

11. Jiansheng, Zutong, Mingfa & Ying

12. Zoufaghari, Zeinal Hamadani, & Abouei Ardakan

13. Abouei Ardakan, Zeinal Hamadani & Alinaghian

14. Kayedpour, Amiri, Rafizadeh & ShahrvariNia

15. Heydari & Sullivan

1. Amiri & Mohtashami

2. Tsadiras, Papadopoulos & O'Kelly

3. buffer allocation problem

4. Costa, Alfieri & Fichera

5. parallel tabu search

6. Chern

7. Ida, Gen & Yokota

8. Yokota, Gen & Ida

9. Tavakkoli-Moghaddam, Safari & Sassani

غیرخطی عدد صحیح برای بهینه‌سازی دسترس‌پذیری سیستم با در نظر گرفتن اجزای تعمیر پذیر و تعمیر ناپذیر به صورت هم‌زمان ارائه کردند [۱۷]. ژنگ، ژو، ژنگ و وو^۲ (۲۰۱۶) در تحقیق خود یک سیاست بهینه تعمیر و نگهداری برای سیستم‌هایی با تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و دو دسته از خرابی‌ها ارائه کردند [۳۱]. یحیی تبار و نجفی (۲۰۱۷) از یک الگوریتم بهینه‌سازی تحت عنوان تولیدمثل درجه دوم بر اساس علف هرز مهاجم به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های تعمیر پیشگیرانه برای سیستم‌های سری-موازی استفاده نمودند [۲۹]. ربانی، زارع و بهنیا (۱۳۹۲) در مطالعه ای به ارائه الگوی مناسب جهت پیاده سازی سیستم نگهداری و تعمیرات در کارخانجات خطوط تولید پیوسته با رویکرد مدل های تصمیم گیری و برنامه‌ریزی آرمانی فازی پرداختند [۳۲]. همچنین ربانی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود، برنامه ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن دوره های یکسان نت را مورد بررسی قرار دادند [۳۳].

به‌عنوان جمع‌بندی کلی نسبت به مطالعات صورت گرفته می‌توان این‌گونه بیان کرد که در تحقیقات پیشین به‌جز چند مورد محدود [۳۵،۳۴،۳۳] کمتر این نکته مورد توجه قرار گرفته است که با گذشت زمان و افزایش مدت‌زمان استفاده از دستگاه، نرخ خرابی دستگاه‌ها رو به افزایش گذاشته و از توابع توزیعی از جمله ویبول تبعیت می‌کنند. همچنین هزینه انجام تعمیرات با توجه به نوع خرابی صورت گرفته نیز از نکات قابل توجهی است که در تحقیقات پیشین کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در ارتباط با هزینه‌های مرتبط با خرابی‌ها، باید متناسب با وقوع هر نوع خرابی، تعمیرات مورد نظر روی سیستم صورت پذیرد و هزینه هر نوع خرابی به‌صورت مجزا در مدل لحاظ شود (که می‌توان این مورد را وجه تمایز اصلی تابع هدف مرتبط با کمینه‌سازی هزینه‌ها در این تحقیق با تابع هدف مربوط به کمینه‌سازی هزینه‌ها در سایر تحقیقات مرتبط دانست). همچنین در روش‌های انجام‌گرفته در مطالعات پیشین، نحوه محاسبه حجم بهینه بافرها و ماشین‌آلات با مفروضات زیادی ساده شده‌اند که این ساده‌سازی منجر به این امر گشته است که سیستم‌های مورد نظر تا حدی در از واقعیت خطوط تولیدی باشند و عملاً کاربرد آن‌ها در مسائل علمی کاهش می‌یابد. می‌توان موارد در نظر گرفته شده در این مقاله و مقالات موجود در ادبیات تحقیق را به صورت جدول ۱ به نمایش در آورد. همچنین بر اساس جدول ارائه شده می‌توان با استفاده از شکل ۱ به مقایسه تحقیق حاضر با تحقیقات اخیر و مرتبط با موضوع مورد بررسی پرداخت.

همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه خود بهینه‌سازی همزمان قابلیت اطمینان و هزینه‌ی طراحی در سیستم‌های سری - موازی k-ou-t-of-n در نظر گرفتن نرخ خرابی وابسته به تعداد اجزای در حال کار را مورد بررسی قرار دادند [۲۲]. کریمی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه خود به بهینه سازی سیستم‌های سری- موازی چندحالتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. عزیزمحمدی و همکاران (۱۳۹۵)، در تحقیق خود به ارائه مدلی برای حل مسئله تخصیص افزونگی قابلیت اطمینان به‌وسیله یک الگوریتم رقابتی تلفیقی چندهدفه با در نظر گرفتن سه هدف شامل بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان، کمینه‌سازی حجم و کمینه‌سازی هزینه پرداختند [۲۳]. عظیمی و هادی نژاد (۱۳۹۵)، در پژوهش خود به ارائه مدل بهینه‌سازی چند هدفه در مسئله تخصیص افزونگی سیستم‌های تعمیر پذیر، با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی پرداختند [۲۴]. فاروقی و سلگی (۱۳۹۶) نیز در تحقیق خود به بهینه‌سازی مسئله چند هدفه تخصیص افزونگی و قابلیت اطمینان در سیستم‌های چند وضعیت سری- موازی پرداختند [۲۵].

۲-۳: تعمیر و نگهداری در خط تولید

نگهداری و تعمیرات به‌عنوان یک ابزاری کلیدی جهت موفقیت صنایع مدرن در عصر حاضر محسوب می‌شود [۲۶]. اجزای تشکیل‌دهنده سیستم‌ها و به‌خصوص سیستم‌های تولیدی به‌طور معمول در صورت خرابی، قابل تعمیر بوده و بنابراین در تحلیل‌های مربوط به این سیستم‌ها باید هزینه‌های تعمیرات و نگهداری در نظر گرفته شوند [۲۷]. انتخاب استراتژی تعمیر و نگهداری مناسب به فاکتورهای متعددی از جمله هزینه‌های از کارافتادگی (دستگاه‌ها)، قابلیت اطمینان (دسترس‌پذیری)، سیاست‌های کلی سازمان در خرید ماشین‌آلات و ... بستگی دارد [۲۸]. اگرچه مسائل مربوط به تعمیر و نگهداری و جایگزینی به‌طور وسیعی در ادبیات بررسی شده‌اند ولی استراتژی تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای سیستم‌های تولیدی از قبلی سیستم‌های سری-موازی سهم اندکی در میان این تحقیقات در حوزه بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری داشته‌اند [۲۹]. اوکاشا و دان^۱ (۲۰۰۹) یک رویکرد بهینه‌سازی تعمیر و نگهداری جدید ارائه کردند که در آن اهداف قابلیت اطمینان سیستم و هزینه‌های طول عمر سیستم را مورد بررسی قرار داده و با کمک الگوریتم ژنتیک مدل توسعه داده شده را حل کردند [۳۰]. ذوالفقاری، زینال همدانی و ابویی اردکان (۲۰۱۴) یک مدل ترکیبی

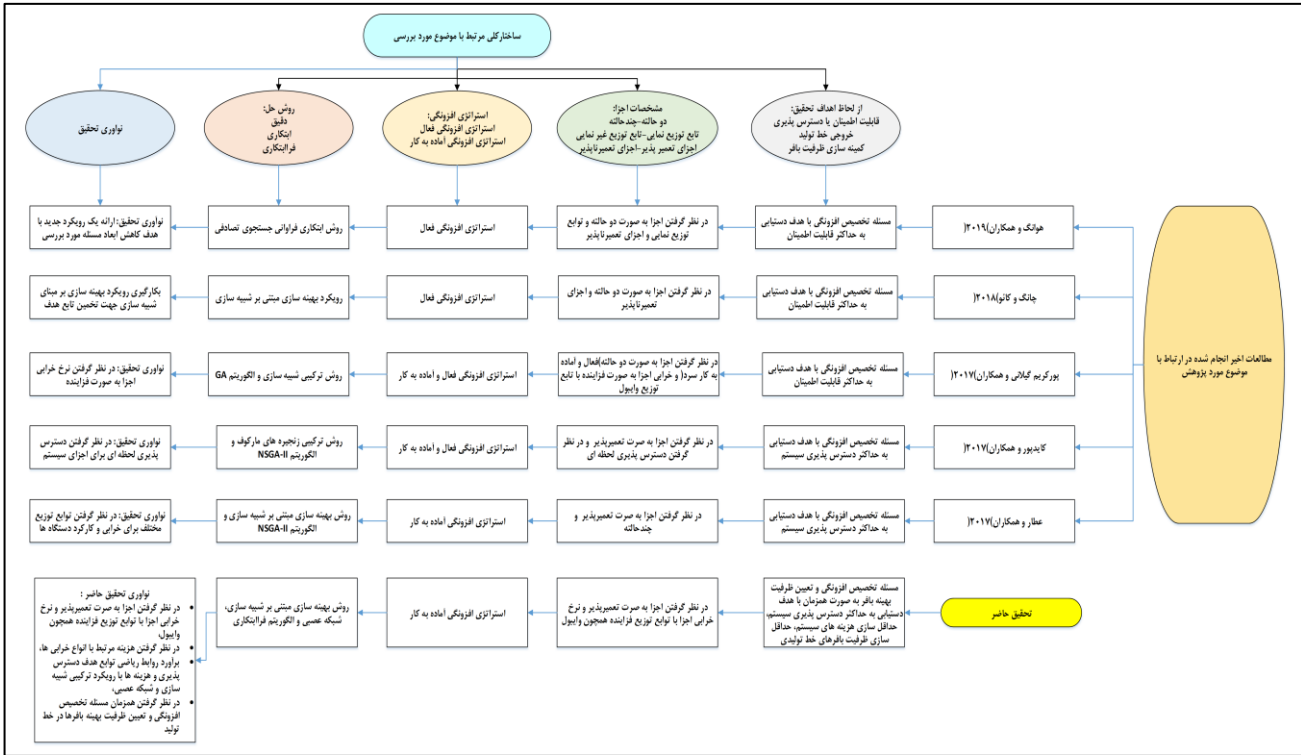
۳- روش‌شناسی تحقیق

نگهداری ماشین‌آلات و نیز هزینه‌های موجودی کالای در جریان ساخت در بافرها و ظرفیت کل بافرها خواهد بود. تحقیق پیش رو از لحاظ استراتژی‌های تحقیق و زمان گردآوری، پیمایشی و از نوع مقطعی است. متدولوژی پیشنهادی در این پژوهش توسعه یک مدل ترکیبی بهینه‌سازی با استفاده از ترکیب مسئله تخصیص افزونگی و تخصیص بهینه بافر در یک سیستم تولیدی سری موازی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه و برنامه‌ریزی غیرخطی و حل آن با الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که در نهایت به بیشینه‌سازی دسترس‌پذیری سیستم و کمینه‌سازی هزینه‌های خرید و نگهداری و تعمیرات و نیز موجودی بافر منجر می‌شود. شکل ۲، مراحل انجام پژوهش را به تصویر کشیده است. در ادامه، با توجه به مراحل انجام پژوهش، مواردی پیرامون روش تحقیق تشریح می‌شوند.

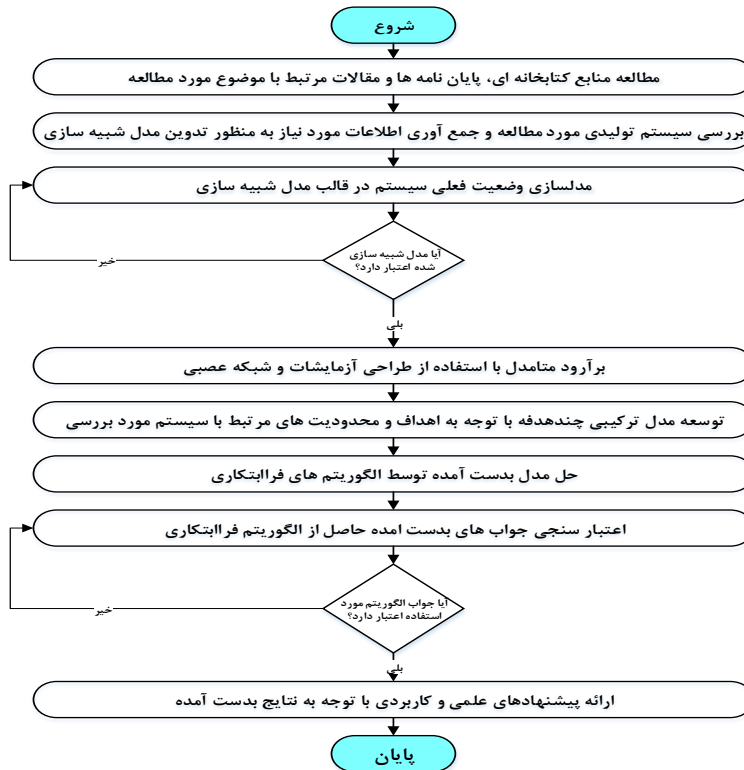
تحقیق پیش رو از نوع تحقیقات بهینه‌سازی است که به کمک تکنیک‌های تحقیق در عملیات (برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی چندهدفه، مدل‌سازی)، طراحی آزمایش‌ها، شبکه عصبی، شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری سعی در نیل به اهداف خود دارد. همچنین این تحقیق از حیث هدف کاربردی و از حیث روش (جهت‌گیری‌های تحقیق)، توسعه‌ای محسوب می‌شود. متدولوژی مورد نظر برای توسعه در این پژوهش استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه در محیط قطعی و استفاده از طراحی آزمایش‌ها، شبکه‌های عصبی، شبیه‌سازی و الگوریتم فرا ابتکاری خواهد بود. مدل توسعه داده‌شده قادر به برآورد نرخ دسترس‌پذیری کل سیستم، هزینه‌های مرتبط با خرید و تعمیر و

جدول ۱. خلاصه تحقیقات انجام شده در زمینه تخصیص افزونگی و مقایسه با تحقیق حاضر

روش حل	استراتژی افزونگی		مشخصات اجزا								هدف				نویسنده مقاله
			تعمیر پذیری		نوع توزیع		حالت‌ها		موارد دیگر	هزینه	دسترس پذیری	قابلیت اطمینان			
			فعال	آماده‌به‌کار	تعمیر پذیر	تعمیر ناپذیر	سایر	نمایی					چندحالته	دو حالته	
فرا ابتکاری	دقیق	ابتکاری				✓					✓				چمبری و همکاران (۲۰۱۳)
✓						✓		✓			✓	✓	✓		ژیانشنگ و همکاران (۲۰۱۴)
✓						✓		✓			✓	✓	✓		ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۴)
✓			✓	✓		✓				✓	✓	✓	✓		ابوبی اردکان و همکاران (۲۰۱۵)
✓				✓		✓		✓		✓		✓	✓		گارگ (۲۰۱۵)
✓			✓			✓		✓				✓	✓		عطار و همکاران (۲۰۱۷)
✓				✓		✓		✓				✓	✓		کریمی و همکاران (۱۳۹۴)
✓				✓		✓		✓			✓	✓	✓		عزیزمحمدی و همکاران (۱۳۹۵)
															...
✓	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	مطالعه حاضر



شکل ۱: مقایسه تحقیقات اخیر در حوزه مورد بررسی و تحقیق فعلی



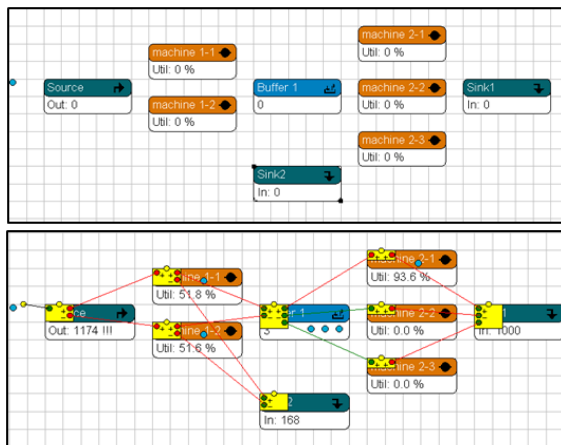
شکل ۲: مراحل انجام تحقیق

۳-۱: شبیه سازی

همانطور که در بالا بدان اشاره شد زمانی که سیستم‌ها اجزایی داشته باشند که خرابی‌های آن‌ها با نرخ‌هایی به صورت فزاینده اتفاق بیفتد (عدم وجود نرخ خرابی به صورت ثابت)، استفاده از روش‌هایی مانند زنجیره‌های مارکوف به منظور محاسبه قابلیت

توسعه مدل ترکیبی چندهدفه با توجه به اهداف و محدودیت های مرتبط با سیستم مورد بررسی

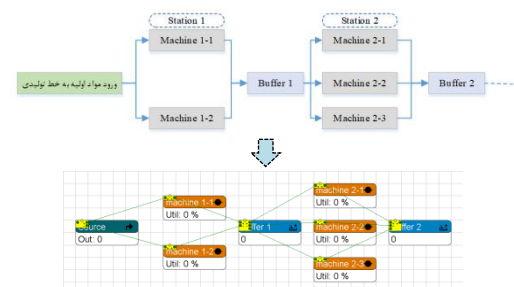
تولید به‌عنوان محصول ساخته شده و خروجی قطعات در حال ساخت هر ایستگاه از فرآیند تولید به دلایل مختلف از جمله در حال کار (و یا خراب) بودن تمامی ماشین‌های ایستگاه بعد و نیز پر بودن بافر ایستگاه بعد استفاده شده است. زمانی که تمامی ماشین‌های یک ایستگاه در حال ارائه خدمت باشند و یا تمامی آن‌ها در حالت خرابی و انجام تعمیرات باشند و هم‌زمان بافر قبل از این ایستگاه نیز از لحاظ ظرفیت تکمیل شده باشد، ایستگاه مورد نظر (مجموع ماشین‌ها و بافر قبل از ایستگاه) از دسترس خارج شده و به‌ناچار خروجی ایستگاه قبل از آن تا زمان در دسترس شدن ایستگاه مورد نظر از فرآیند تولید خارج می‌شود؛ بنابراین دسترس‌پذیری سیستم را می‌توان از تقسیم مجموع خروجی نهایی سیستم بر مجموع خروجی نهایی سیستم و خروجی‌های هر ایستگاه از فرآیند تولید محاسبه کرد. به‌عنوان مثال، به‌منظور محاسبه دسترس‌پذیری سیستمی همانند شکل ۴، نیاز به دو اتم sink در مدل است: یکی از این اتم‌ها به‌منظور نشان دادن خروجی نهایی خط تولید و دیگری برای نشان دادن خروجی‌های ایستگاه اول به دلیل در دسترس نبودن ایستگاه دوم. دسترس‌پذیری این سیستم در زمان مورد بررسی از تقسیم خروجی نهایی خط تولید بر خروجی قطعات نیمه ساخته از ایستگاه‌های کاری در فرآیند تولید بعلاوه خروجی نهایی از خط تولید بدست می‌آید.



شکل ۴: نحوه محاسبه مقدار دسترس‌پذیری در مدل شبیه‌سازی شده

در این تحقیق، تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها نیز باید همانند تابع هدف بیشینه دسترس‌پذیری، برآورد شود. این تابع متشکل از سه قسمت است. قسمت اول شامل هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، قسمت دوم مربوط به هزینه تخصیص بافرها بین ایستگاه‌ها و قسمت سوم نیز شامل هزینه‌های مربوط به هر بار خرابی پیشگیرانه و تعمیرات مربوط به آن است. در واقع این تابه هدف نیز متامدلی است که با استفاده از طراحی آزمایش‌ها،

اطمینان (دسترس‌پذیری در سیستم‌های تعمیر پذیر) دیگر کارایی نخواهد داشت و استفاده از این روش‌ها بسیار سخت خواهد شد. یکی از روش‌هایی که از آن می‌توان در این حوزه استفاده کرد رویکرد بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی است [۳۴]. شبیه‌سازی گسسته پیشامد نیز یکی از انواع شبیه‌سازی است که زمانی اتفاقات سیستم در بازه‌های گسسته از زمان اتفاق می‌افتند، مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش کارایی برای محاسبه و تخمین پارامترهای مورد بررسی سیستم‌ها است [۳۶]. در این تحقیق از یکی از نرم‌افزارهای مورد استفاده در این نوع از شبیه‌سازی تحت عنوان ED¹ استفاده شده است. کاربردهای موفق از این نرم‌افزار در تحقیقات اخیر محققینی از جمله [۳۵]، [۳۴] می‌توان یافت. در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی، از اتم‌های^۲ مختلفی که در نرم‌افزار شبیه‌سازی تعبیه‌شده، استفاده شده است. سیستم مورد بررسی در این تحقیق یک خط تولیدی سری موازی است که دارای K زیرسیستم (ایستگاه) بوده و بین آن‌ها مکان‌هایی برای ذخیره محصولات نیمه ساخته در نظر گرفته شده است؛ بنابراین اتم‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل اتم منبع^۳ (برای ورود مواد اولیه به خط تولید بر اساس تابع توزیع مشخص)، اتم خدمت دهنده^۴ (برای نشان دادن ماشین‌های موجود در هر ایستگاه)، اتم صف^۵ (برای نشان دادن بافرهای بین ایستگاه‌ها) است. شکل ۳، بخشی از یک خط تولید که توسط نرم‌افزار، شبیه‌سازی شده است را به تصویر می‌کشد.



شکل ۳: شبیه‌سازی بخشی از یک خط تولید با سیستم سری-موازی

در این تحقیق با توجه به رویکرد مورد نظر و عدم وجود مقالات مشابه به‌منظور محاسبه دسترس‌پذیری سیستم، از روشی ابتکاری استفاده شده است. در این روش به‌منظور محاسبه دسترس‌پذیری کل سیستم، از دو مفهوم خروجی نهایی خط

1. Enterprise Dynamics

۲. به هر جزء موجود در این نرم افزار اتم گفته می شود

3. Source

4. Server

5. Queue

۳-۳: شبکه عصبی مصنوعی

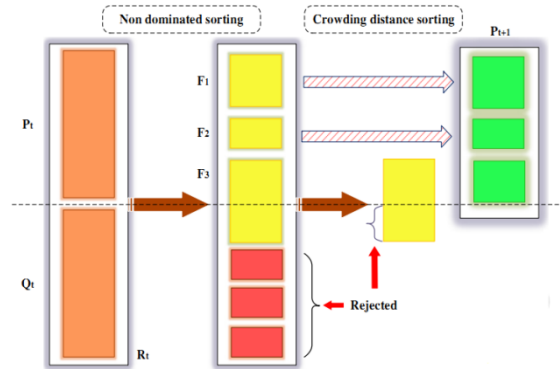
امروزه شبیه‌سازی یک ابزار عمومی برای آنالیز و طراحی سیستم‌های پیچیده است. این عمومیت به علت انعطاف‌پذیری آن و همچنین توانایی آن برای مدل کردن دقیق سیستم‌های واقعی است. اگرچه شبیه‌سازی فرض‌های محدودکننده کمتری نسبت به مدل‌های ریاضی، برای مدل کردن سیستم‌های پیچیده و پویا نیاز دارد، خود این مدل‌های شبیه‌سازی معمولاً پیچیده بوده و دارای ابعاد زیادی است. همچنین با استفاده از مدل شبیه‌سازی رابطه بین پارامترهای طراحی و معیارهای عملکرد را نمی‌توان به‌طور صریح مشخص کرد. لذا مدل شبیه‌سازی به یک فرآیند سعی و خطا که در آن یک مجموعه ورودی‌ها برای پیش‌بینی یک مجموعه خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر عملکرد دلخواه به دست آمد، یک طرح سیستم مناسب به دست آمده است، در غیر این صورت این عمل تکرار می‌شود تا زمانی که عملکرد مطلوب به دست آید. متأسفانه طبیعت تکراری این فرآیند موجب افزایش هزینه‌های محاسباتی می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل محققان گاهی از یک مدل ساده‌تر و کمکی به نام فرا مدل برای آسان‌تر کردن و فهم روابط بین ورودی‌ها و نمایش دقیق، خروجی‌های یک سیستم استفاده می‌کنند. یکی از اهداف عمده فرا مدل‌های شبیه‌سازی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در فضای مقادیری که پارامترها می‌توانند به خود بگیرند است و درعین‌حال از نظر محاسباتی کاراتر از مدل شبیه‌سازی باشند. یکی از روش‌های تولید فرا مدل‌ها استفاده از شبکه عصبی مصنوعی است. شبکه‌های عصبی مصنوعی از جمله روش‌هایی هستند که قادر به تخمین موارد غیرخطی متعدد در داده‌ها بوده و یک چارچوب محاسبه‌ای انعطاف‌پذیر برای دامنه وسیعی از مسائل غیرخطی هستند. یکی از مزیت‌های بارز این‌گونه از مدل‌ها نسبت به مدل‌های غیرخطی دیگر، این است که شبکه‌های عصبی مصنوعی یک تقریب زنده عام هستند که می‌توانند هر نوع تابعی را با دقت دلخواه تقریب بزنند [۳۸]. هدف از به‌کارگیری شبکه‌های عصبی در این تحقیق، تخمین توابع هدف مربوط به اهداف دسترس‌پذیری و هزینه‌های کلی سیستم بر مبنای آزمایش‌های طراحی شده و اجرا شده در مدل شبیه‌سازی است. شبکه‌های عصبی مورد استفاده در این تحقیق شامل Net Forward Feed، Net Pattern و Net Fit RBF هستند که بر مبنای مقدار خطای نهایی برای هر یک از این انواع، شبکه‌ای که بهترین برازش برای هر یک از توابع هدف در نظر گرفته شده با کمترین خطای برآورد را نشان دهد انتخاب می‌شود.

شبیه‌سازی و شبکه عصبی بر روی مدل شبیه‌سازی شده خط تولیدی مورد نظر، برازش داده می‌شود چراکه با توجه به اینکه نرخ خرابی ماشین‌آلات از تابع توزیع ویبول تبعیت می‌کند و با توجه به پیچیدگی سیستم نمی‌توان با استفاده از روابط دقیق ریاضی مقدار هزینه‌های مرتبط با خرابی‌ها را پیش‌بینی نمود. در این تابع با قرار دادن مقادیر مختلف تعداد ماشین نوع i ام در ایستگاه i ام، ظرفیت بافر ایستگاه i ام و مدت‌زمان تعمیر پیشگیرانه بر روی ماشین i در ایستگاه i ، کل هزینه خط تولیدی مورد نظر بر مبنای ترکیب‌های مختلف برآورد می‌شود.

۳-۲: طراحی آزمایش‌ها

به‌منظور حل مدل توسعه داده شده، به یک طرح آزمایشی مناسب جهت آزمایش مدل شبیه‌سازی و تخمین مقادیر مربوط به توابع هدف دسترس‌پذیری و هزینه‌ها نیاز است. تعداد متغیرهای مورد بررسی در انتخاب طرح آزمایش بسیار تأثیرگذار است [۳۷]. طرح‌های پلاکت-برمان از جمله "طرح‌های کسری دوسطحی" می‌باشند که به لحاظ تعداد اجرا طرح‌های بسیار کارایی هستند اما به جهت برازش یک متامدل که به لحاظ آزمون‌های روایی و آماری رضایت‌بخش باشند مناسب نیستند. همچنین اجرای طرح‌های کسری دوسطحی چون نیازمند طراحی با درجه تجزیه پایین به جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها است نیز باعث کاهش دقت مدل برازش شده خواهد شد. در این تحقیق، با توجه به اینکه قصد داریم مدل پیشنهادی برای مسائل با ابعاد بزرگ نیز کارایی داشته باشد و به دنبال این هستیم که هم‌زمان تأثیر تمامی متغیرها (از تأثیر زیاد تا تأثیر کم) بر روی اهداف مورد نظر بررسی شود، از رویکرد ترکیبی طرح پلاکت-برمان و شبکه عصبی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در شبکه عصبی برحسب یک تعداد مناسب آزمایش اولیه، خود به آموزش داده‌های وارد شده می‌پردازد، با این رویکرد می‌توان عیب به‌کارگیری طرح پلاکت-برمان (کاهش دقت متا مدل برآورد شده به دلیل کاهش تعداد آزمایش‌ها) را با کاهش خطای تابع برآورد شده از طریق آموزش مناسب شبکه عصبی برطرف نمود. در تحقیق مورد بررسی پارامترهایی که به‌منظور انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل تعداد ماشین‌های هر ایستگاه، ظرفیت بافر هر ایستگاه و مدت‌زمان تعمیر پیشگیرانه برای هر ماشین در هر ایستگاه می‌باشند.

۳-۴: الگوریتم‌های فرا ابتکاری



شکل ۵: نحوه عملکرد الگوریتم در انتخاب جواب‌ها [۳۸]

نمایش جواب

کروموزوم مجموعه‌ای از ژن‌هاست که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. تعداد ژن‌های موجود در یک کروموزوم با تعداد متغیرهای تصمیم مورد بررسی برابر است. تشریح ساختار کروموزوم از جمله مهم‌ترین بخش‌های یک الگوریتم است. در این تحقیق راه‌حل‌های کدگذاری شده به صورت یک ماتریس $m \times 3$ بوده که عناصر مربوط به اولین سطر از این ماتریس، نشان‌دهنده تعداد ماشین‌های در نظر گرفته شده برای هر ایستگاه کاری، عناصر مربوط به سطر دوم نشان‌دهنده ظرفیت بافر برای هر ایستگاه کاری و در نهایت عناصر سطر سوم نشان‌دهنده مدت‌زمان انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای هر یک از ماشین‌ها در هر ایستگاه کاری است. شکل ۶ یک ساختار نمونه از کروموزوم برای هر ایستگاه کاری را نشان می‌دهد.

تقاطع

عملگر تقاطع فضای راه‌حل جدید را بررسی کرده و امکان تولید راه‌حل‌های جدید به نام فرزندان را از طریق جفت کردن کروموزوم‌ها میسر می‌نماید [۴۲]. در این تحقیق به منظور تولید جمعیت از تقاطع چند نقطه‌ای استفاده شده است. علاوه بر این، پس از تولید جمعیت اولیه، اپراتور انتخاب چرخ رولت برای انتخاب والد برای عمل تقاطع استفاده می‌شود. در این عملیات، یک عدد باینری تصادفی برای هر ژن در کروموزوم والدین تعیین می‌شود. اگر این عدد تصادفی برابر با یک باشد، سپس مقادیر ژن پدر و مادر با یکدیگر مبادله می‌شود. در غیر این صورت تبادلی بین والدین اتفاق نخواهد افتاد [۱۴]. شکل ۷ عملگر تقاطع در الگوریتم NSGA-II را نشان می‌دهد.

جهش^۲

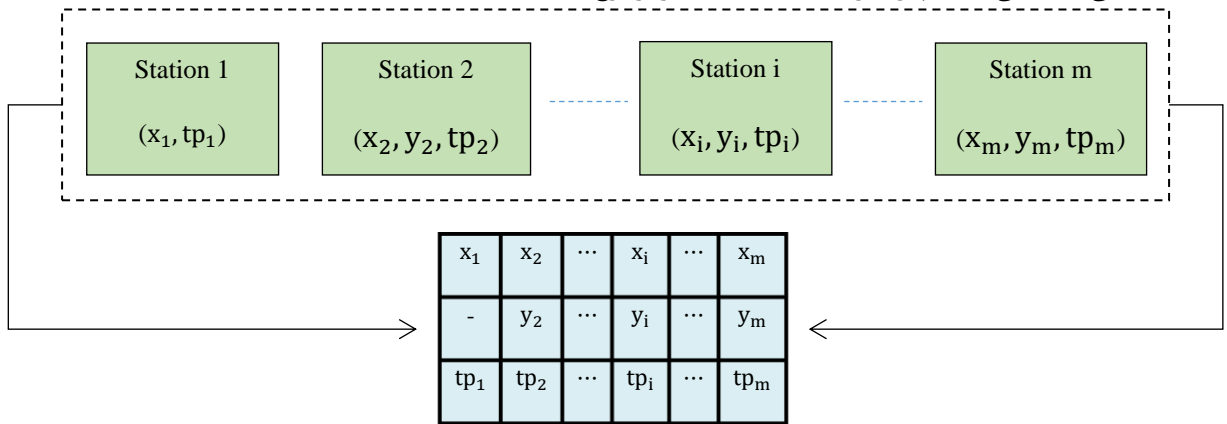
جهش فرایندی است که طی آن با تغییر در یک یا چند ژن مربوط به یک کروموزوم والد، یک کروموزوم فرزند تولید می‌شود

همان‌طور که ذکر شد هر دو مسئله تخصیص افزونگی [۱۱] و تخصیص بافر [۳۹] از جمله مسائل NP-HARD هستند؛ بنابراین در این تحقیق از الگوریتم NSGA-II که از جمله الگوریتم‌های پرکاربرد در این دو حوزه است، استفاده شده است.

۳-۴-۱: الگوریتم NSGA-II

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نا مغلوب (NSGA-II) یکی از کارآمدترین و مشهورترین الگوریتم‌های بهینه‌یابی چندهدفه است که توسط دب در سال ۲۰۰۱ ارائه شد [۴۰]. روش کار و الگوریتم کلی NSGA-II بدین شرح است: ایجاد جمعیت اولیه، محاسبه معیارهای برازندگی، مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن، محاسبه فاصله ازدحامی، انتخاب (به محض این‌که جمعیت اولیه بر اساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود. این انتخاب بر اساس دو المان صورت می‌پذیرد: رتبه جمعیت (جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر انتخاب می‌شوند) و محاسبه فاصله (با فرض این‌که p و q دو عضو از یک رتبه باشند، عضو انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. گفتنی است که اولویت انتخاب، ابتدا با رتبه و سپس بر اساس فاصله ازدحامی است)، انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید، تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش، جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل (در مرحله نخست، اعضای رتبه‌های پایین‌تر جایگزین والدهای قبلی می‌شوند و سپس بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع و جهش، ابتدا برحسب رتبه دسته‌بندی می‌شوند و قسمتی از آن‌ها که دارای رتبه پایین‌تری هستند، حذف می‌گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقی‌مانده بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. در اینجا مرتب‌سازی داخل یک جبهه انجام می‌شود) و در نهایت تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می‌شوند [۴۱]. شکل ۵، نحوه عملکرد الگوریتم در انتخاب جواب‌ها را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی نمایش جواب‌ها، عملگر تقاطع و جهش پرداخته می‌شود.

دوالفقاری، زینال همدانی و ابویی اردکان، (۲۰۱۴). در این تحقیق، عملگر جهش برای هر نسل از کروموزوم‌ها یک عدد تصادفی ایجاد می‌کند، سپس اگر عدد ایجاد شده کمتر از نرخ جهش در نظر گرفته باشد ژن‌ها به‌طور تصادفی جهش می‌یابند. شکل ۸ عملگر جهش را نشان می‌دهد.



شکل ۶: ساختار کروموزوم برای هر ایستگاه کاری

۳	۴	۱	۲	۳	۳	والد ۲	۳	۲	۱	۲	۳	۲	والد ۱
۴۵	۴۰	۲۰	۱۵	۳۵	-		۳۵	۲۰	۲۵	۲۰	۳۰	-	
۶۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰۰	۶۵۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰		۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۹۰۰۰	۱۳۰۰۰	۶۰۰۰	۸۰۰۰	
↓													
						تقاطع							
						چند							
						نقطه							
↓													
۳	۲	۴	۲	۳	۳	فرزند ۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	فرزند ۱
۳۵	۴۰	۲۰	۱۵	۶۰	-		۵۰	۲۰	۲۵	۲۰	۴۰	-	
۶۰۰۰	۱۰۰۰۰	۹۰۰۰	۸۵۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰		۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۷۰۰۰	۱۱۰۰۰	۶۰۰۰	۸۰۰۰	

شکل ۷: عملگر تقاطع

۲	۳	۲	۱	۲	۳	والد ۱
-	۳۰	۲۰	۲۵	۲۰	۳۵	
۸۰۰۰	۶۰۰۰	۱۳۰۰۰	۹۰۰۰	۱۲۰۰۰	۵۰۰۰	
↓						
عدد						
تصادفی						
۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۵۵	۰/۰۶	۰/۳۷	۰/۰۹	
-	۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۸	۰/۳۸	۰/۲۲	
۰/۵۲	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۳۶	
↓						
۲	۳	۲	۳	۲	۴	فرزند
-	۳۰	۲۰	۲۵	۲۰	۳۵	
۸۰۰۰	۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۹۰۰۰	۱۲۰۰۰	۵۰۰۰	

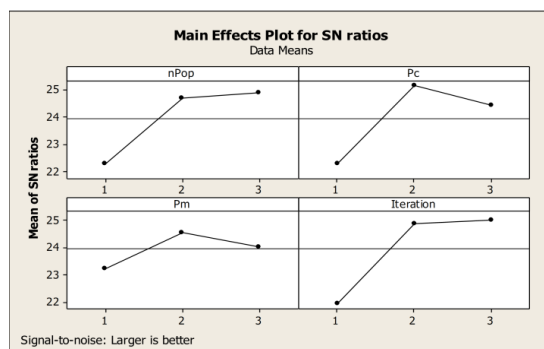
شکل ۸: عملگر جهش

۳-۵: طراحی آزمایش‌های تاگوچی

مشخص شده برای پارامترها در کد طراحی شده برای مدل مورد بررسی، آزمایش‌های طراحی شده در نرم‌افزار متلب اجرا شده و بر اساس نتایج به دست آمده، شکل ۹ چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N را در سطوح مختلف پارامترها نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده ناشی از انجام آزمایش‌های تاگوچی، سطوح ایدئال فاکتورهای برای الگوریتم NSGA-II به شرح جدول ۳ است.

در این پژوهش به منظور تعیین سطح مناسب پارامترهای الگوریتم مورد استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است. جدول ۲، نشان‌دهنده دامنه جست‌وجوی سطوح پارامترها ورودی الگوریتم مورد استفاده است. با استفاده از طرح سه سطحی برای تنظیم پارامترها نیاز به حداقل ۹ آزمایش است. پس از لحاظ کردن دامنه‌های

جدول ۲: سطوح مربوط به پارامترهای الگوریتم NSGA-II						
سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	دامنه	توضیحات	پارامترها (فاکتورها)	الگوریتم
۱۰۰	۶۰	۳۰	۳۰-۱۰۰	اندازه جمعیت اولیه	nPOP	NSGA-II
۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۰-۹/۷	درصد تقاطع	Pc	
۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۰-۳/۱	درصد جهش	Pm	
۱۰۰	۷۵	۵۰	۵۰-۱۰۰	تعداد تکرار	Iteration	



شکل ۹: نمودار اثر اصلی برای مقادیر شاخص S/N

جدول ۳: سطوح ایده آل فاکتورهای برای الگوریتم NSGA-II			
سطح ایده آل	توضیحات	پارامترها (فاکتورها)	الگوریتم
۱۰۰	اندازه جمعیت اولیه	nPOP	NSGA-II
۰/۸	درصد تقاطع	Pc	
۰/۲	درصد جهش	Pm	
۱۰۰	تعداد تکرار	Iteration	

۴- مدل تحقیق

هر یک از این انواع تعمیرات باید متناسب با تابع نرخ خرابی اجزا باشد.

به‌منظور خرید ماشین‌آلات به‌منظور افزونگی محدودیتی در تهیه ماشین‌آلات از بازار وجود ندارد.

ماشین‌آلات مورد استفاده در این تحقیق برای هر ایستگاه تنها می‌توانند از یک نوع باشند.

اجزاء (ماشین‌آلات) مورد استفاده در سیستم تولیدی مورد بحث با در نظر گرفتن رویکرد سنتی، تنها می‌توانند دو حالت ممکن را قبول کنند: کاملاً در حال کار و کاملاً خراب.

۴-۱ مفروضات

مفروضات اساسی که در این تحقیق مبنای مدل توسعه داده شده قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از:

سیستم تولیدی مورد نظر شامل m_i ایستگاه کاری ($i = 1, 2, \dots, k$) و $k-1$ بافر ($b_i, i = 1, \dots, k-1$) است که هر جفت متوالی از ایستگاه‌ها را از یکدیگر جدا می‌کند.

ایستگاه m_i زمانی که بافر b_{i-1} (بافر قبل از آن) خالی باشد و یا بافر b_i (بافر بعد از آن) پر باشد و همچنین ایستگاه پس از آن مشغول انجام فعالیت و یا تحت عملیات تعمیر باشد از کار باز می‌ایستد.

زمان‌های پردازش ماشین‌آلات در هر ایستگاه از توابع توزیع عمومی تبعیت می‌کنند.

فرض بر این است که دستگاه‌های موجود در خط تولید همگی مدتی از عمر مفید خود را سپری کرده باشند (به خاطر اینکه در شرایط نو بودن دستگاه‌ها توابع توزیع عمر آن‌ها نزدیک به نمایی منفی بوده و انجام تعمیرات پیشگیری احتمال خرابی را افزایش می‌دهد).

زمان لازم برای اعمال تعمیرات پیشگیری باید از زمان لازم برای انجام تعمیرات اضطراری کمتر باشد.

احتمال خرابی ماشین‌آلات به‌صورت افزایشی در نظر گرفته شده و از تابع توزیع عمومی از جمله ویبول تبعیت می‌کنند.

زمان‌های انجام تعمیرات برای هر یک از ماشین‌آلات در نظر گرفته شده و تابع توزیع فراوانی آن‌ها بر اساس داده‌های سیستم برآورد می‌شوند.

زمانی که یکی از ماشین‌های ایستگاه‌ها دچار خرابی می‌شود، فرآیند تولید از طریق ماشین دیگر موجود در ایستگاه ادامه می‌یابد.

مقادیر مربوط به وزن‌ها و هزینه‌ها برای ماشین‌آلات قطعی هستند.

هزینه‌های مربوط به سیستم شامل هزینه‌های خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه‌های مرتبط با خرابی‌ها و تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات، هزینه رکود سیستم در صورت از کارافتادگی خط و هزینه نگهداری موجودی بافرها می‌شود.

در ارتباط با هزینه نگهداری و تعمیر انواع خرابی‌های ماشین‌آلات نیز لازم به ذکر است که این هزینه خود دربرگیرنده هزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی است که زمان انجام

۴-۲ پارامترها و متغیرهای مدل

پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق به شرح ذیل هستند.

تعداد ماشین نوع j در سیستم i (ایستگاه کاری i)	x_{ij}
ظرفیت بافر ایستگاه کاری i	y_i
مدت‌زمان تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین نوع j در ایستگاه کاری i	tp_{ij}
تعداد ماشین نوع j مربوط به ایستگاه i	n
تعداد ایستگاه‌های کاری خط تولید	m
هزینه خرید ماشین نوع j مرتبط با ایستگاه کاری i	C_{ij}
تعداد ماشین موجود نوع j در ایستگاه کاری i	l_{ij}
حد بالای ظرفیت بافر i	u_i
حد پایین ظرفیت بافر i	l_i
حد بالا برای ظرفیت کل بافرها از نظر تعداد	uy
حد بالای حجم کل قطعات نیمه ساخته در ایستگاه i	uv_i
حد پایین حجم کل قطعات نیمه ساخته در ایستگاه i	lv_i
حجم هر قطعه در ایستگاه i	v_i
حد بالا برای کل بافر از لحاظ حجم	uwy
حد بالای وزن کل تجهیزات در ایستگاه i	uw_i
حد پایین وزن کل تجهیزات در ایستگاه i	lw_i
وزن هر یک از تجهیزات در ایستگاه i	w_i
حد بالای وزن مجموع بافر در کل خط تولید	uwy
حد بالای هزینه برای هر بافر در ایستگاه i	lc_i
حد پایین هزینه برای هر بافر در ایستگاه i	uc_i
هزینه بافر برای هر ایستگاه	$c_i y_i$
حد بالای هزینه تمام بافرها در خط تولید	ucy
حد بالای تعداد ماشین‌آلات نوع j در ایستگاه کاری i	u_{ij}
حد پایین تعداد ماشین‌آلات نوع j در ایستگاه کاری i	l_{ij}
حد بالای تعداد کل ماشین‌آلات مختلف نوع j در زیرسیستم i	ux_i
حد بالای تعداد ماشین‌آلات در کل خط تولید	ux
وزن ماشین‌آلات نوع j در ایستگاه کاری i	w_{ij}
حد پایین وزن ماشین‌آلات نوع j در ایستگاه کاری i	lw_{ij}
حد بالای وزن ماشین‌آلات نوع j در ایستگاه کاری i	uw_{ij}
حد بالای وزن مجموع ماشین‌آلات مختلف j در زیرسیستم i	uwx_{ij}
حد بالا برای وزن کل ماشین‌آلات خط تولید	uwx
حجم ماشین‌آلات نوع j در ایستگاه کاری i	v_{ij}

کرد، توابع هدف دسترس پذیری و هزینه به صورت یک برآوردگر ارائه شده‌اند.

$$\text{Max}(Z_1) = f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij}), \forall i = 1, \dots, m; \forall j = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$\text{Min}(Z_2) = f_2(x_{ij}, y_i, tp_{ij}), i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\text{Min}(Z_3) = \sum_{i=1}^{m-1} y_i \quad (3)$$

Subject to:

$$l_i \leq y_i \leq u_i, \forall i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} y_i \leq uy \quad (5)$$

$$lv_i \leq v_i y_i \leq uv_i, \forall i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} v_i y_i \leq uvy \quad (7)$$

$$lw_i \leq w_i y_i \leq uw_i, \forall i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} w_i y_i \leq uwy \quad (9)$$

$$lc_i \leq c_i y_i \leq uc_i, \forall i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} c_i y_i \leq ucy \quad (11)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \forall i = 1, 2, \dots, m; \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq ux_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq ux \quad (14)$$

$$lw_{ij} \leq w_{ij} x_{ij} \leq uw_{ij} \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \leq uwx_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \leq uwx \quad (17)$$

$$lv_{ij} \leq v_{ij} x_{ij} \leq uv_{ij}, \forall i = 1, 2, \dots, m; \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n v_{ij} x_{ij} \leq uvx_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij} x_{ij} \leq uvx \quad (20)$$

$$lc_{ij} \leq c_{ij}(x_{ij} - l_{ij}) \leq uc_{ij}, \forall i = 1, 2, \dots, m; \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^n c_{ij}(x_{ij} - l_{ij}) \leq ucx_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}(x_{ij} - l_{ij}) \leq ucx \quad (23)$$

$$f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij}) \geq l_{f_{x_{ij}, y_i, tp_{ij}}} \quad (24)$$

$$f_2(x_{ij}, y_i, tp_{ij}) \leq ucxy \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} + w_i y_i \leq uwxy_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^{m-1} w_i y_i \leq uwxy \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^n v_{ij} x_{ij} + v_i y_i \leq uvxy_i, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (28)$$

حد پایین حجم ماشین آلات نوع z در ایستگاه کاری i lv_{ij}

حد بالای حجم ماشین آلات نوع z در ایستگاه کاری i uv_{ij}

حد بالای حجم کل ماشین آلات مختلف نوع z در ایستگاه کاری i uvx_i

حد بالای حجم کل ماشین آلات خط تولید uvx

هزینه خرید ماشین آلات نوع z در ایستگاه کاری i c_{ij}

حد پایین هزینه خرید ماشین نوع z در ایستگاه کاری i lc_{ij}

حد بالای هزینه خرید ماشین نوع z در ایستگاه کاری i uc_{ij}

حد بالای هزینه خرید مجموع تعداد ماشین آلات نوع z در زیرسیستم i ucx_i

حد بالا برای هزینه خرید ماشین آلات در کل خط تولید ucx

حد پایین نرخ دسترس پذیری برای کل خط تولید $l_{f_{xyt}}$

کل بودجه‌ای که تصمیم گیرنده می‌خواهد در کل خط تولید $ucxy$

سرمایه‌گذاری کند $uvxy_i$

حد بالای وزن کلی ماشین آلات با انواع مختلف z و وزن بافر در ایستگاه کاری i $uwxy_i$

حد بالای وزن کلی ماشین آلات با انواع مختلف z و وزن بافر در کل خط تولید $uwxy$

حد بالای حجم کل ماشین آلات با انواع مختلف z و وزن بافر در ایستگاه کاری i $uvxy_i$

حد بالای حجم کل ماشین آلات با انواع مختلف z و وزن بافر در کل خط تولید $uvxy$

تابع تخمین زنده نرخ دسترس پذیری بر اساس متغیرهای f_1

تصمیم x_{ij}, p_{ij}, y_i f_1

تابع تخمین زنده هزینه‌های خط تولیدی بر اساس متغیرهای f_2

تصمیم x_{ij}, p_{ij}, y_i f_2

تابع کمینه‌سازی ظرفیت کلی بافرها در خط تولید f_3

۳-۴ فرموله کردن مدل پیشنهادی

زمانی که نرخ خرابی ماشین‌ها یا زمان پردازش توسط ماشین‌ها به صورت ثابت در طول زمان باشد به عبارتی توابع توزیع مورد استفاده به صورت نمایی یا ارلانگ باشند، از طریق روش‌هایی از جمله زنجیره مارکوف و تئوری چابمن-کولموگروف می‌توان قابلیت اطمینان (دسترس پذیری) سیستم را محاسبه کرد (پورکریم گیلانی و همکاران، ۲۰۱۶)؛ اما با توجه به این که در این تحقیق احتمال خرابی ماشین آلات به صورت افزایشی (تابع توزیع عمومی از جمله ویبول) در نظر گرفته شده، محاسبه تابع دسترس پذیری سیستم و هزینه‌های کلی سیستم مورد بررسی به صورت یک رابطه صریح ریاضی بسیار سخت می‌شود؛ بنابراین از یک رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها و شبکه عصبی به منظور به دست آوردن تخمینی از توابع اهداف دسترس پذیری و هزینه استفاده شده است. با توجه به موارد ذکر شده همان‌طور که در مدل توسعه داده شده مشاهده خواهید

بالای وزن ماشین‌های نوع j در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۶) حد بالای وزن انواع ماشین‌ها در ایستگاه i را نشان می‌دهد. رابطه (۱۷) حد بالای وزن کل ماشین‌های خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۱۸) حد بالا و پایین حجم ماشین‌های نوع j در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۹) حد بالای حجم انواع ماشین‌ها در ایستگاه i را نشان می‌دهد. رابطه (۲۰) حد بالای حجم کل ماشین‌ها خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) حد بالا و پایین هزینه خرید ماشین‌آلات جدید نوع j در زیرسیستم i را نشان می‌دهد. رابطه (۲۲) حد بالای هزینه خرید ماشین‌آلات از انواع مختلف در ایستگاه i را نشان می‌دهد. رابطه (۲۳) حد بالای هزینه خرید ماشین‌آلات در کل خط تولید را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۴) محدودیت پایین برای میزان دسترس‌پذیری کل خط تولید را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۵) حد بالا برای همه انواع هزینه‌ها از جمله هزینه خرید ماشین‌های جدید، هزینه‌های تخصیص بافرها، هزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه و اضطراری کل خط تولید را نشان می‌دهد. در واقع، این محدودیت، کل بودجه‌ای را نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده می‌خواهد در کل خط تولید سرمایه‌گذاری کند. رابطه (۲۶) حد بالای مجموع وزن ماشین‌هایی با انواع مختلف j در زیرسیستم i و وزن بافرهای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. در واقع این محدودیت نشان‌دهنده کل وزنی است که تصمیم‌گیرنده مایل است در ایستگاه i داشته باشد. رابطه (۲۷) حد بالای مجموع وزن ماشین‌های موجود در خط، وزن ماشین‌هایی که به سیستم اضافه می‌شوند و نیز وزن کل بافرهای خط تولید را نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده مایل است در خط لحاظ کند. رابطه (۲۸) حد بالای مجموع حجم ماشین‌هایی با انواع مختلف j در زیرسیستم i و حجم بافرهای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. در واقع این محدودیت نشان‌دهنده کل حجمی است که تصمیم‌گیرنده مایل است در ایستگاه i داشته باشد. رابطه (۲۹) حد بالای مجموع حجم ماشین‌های موجود در خط، حجم ماشین‌هایی که به سیستم اضافه می‌شوند و نیز حجم کل بافرهای خط تولید را نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده مایل است در خط لحاظ کند و جزئی از محدودیت‌های فضای تولیدی به شمار می‌رود.

۵- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۵-۱ مثال عددی

در این بخش به منظور تشریح کاربرد روش‌شناسی ارائه شده، یک مثال عددی ارائه خواهد شد. شکل ۱۰ یک خط تولید با ۷ ایستگاه کاری را نشان می‌دهد که از ۱۲ ماشین و ۵ بافر تشکیل

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n v_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^{m-1} v_i y_i \leq uvxy \quad (29)$$

$$x_{ij}, y_i, tp_{ij} \geq 0 \text{ and integer} \quad (30)$$

در مدل بالا، متغیرهای تصمیم شامل ماشین‌های نوع j که در ایستگاه i مورد استفاده قرار خواهند گرفت، ظرفیت بافر هر ایستگاه و زمان مربوط به انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ماشین نوع j در ایستگاه i می‌باشند. رابطه ۱، به‌عنوان تابع هدف اول مدل به حداکثر کردن دسترس‌پذیری کل خط تولید می‌پردازد که در آن x_{ij} نشان‌دهنده تعداد ماشین نوع j است که باید در زیرسیستم i (ایستگاه i ام) وجود داشته باشد، m_i نشان‌دهنده تعداد ایستگاه‌های خط تولید، n نشان‌دهنده تعداد ماشین نوع j ام در ارتباط با ایستگاه i ام، y_i نشان‌دهنده ظرفیت بافر مربوط به ایستگاه i ام، tp_{ij} نشان‌دهنده مدت زمان تعمیرات پیشگیرانه ماشین نوع j ام در زیرسیستم i ام و $f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij})$ تابع تخمین زنده نرخ دسترس‌پذیری بر مبنای x_{ij}, y_i, tp_{ij} است. به عبارت دیگر $f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij})$ تابعی از تعداد ماشین‌ها، ظرفیت بافرهای خط و مدت زمان تعمیرات پیشگیرانه بر روی ماشین‌ها است. در واقع $f_1(x_{ij}, y_i, tp_{ij})$ متامدلی است که با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی بر روی مدل شبیه‌سازی شده خط تولیدی مورد نظر، برازش داده می‌شود. در این تابع با قرار دادن مقادیر مختلف تعداد ماشین نوع j ام در ایستگاه i ام، ظرفیت بافر ایستگاه i ام و مدت زمان تعمیر پیشگیرانه بر روی ماشین j در ایستگاه i ، نرخ دسترس‌پذیری خط تولیدی مورد نظر بر مبنای ترکیب‌های مختلف برآورد می‌شود. رابطه ۲، تابع هدف دوم مدل، هزینه‌ها را حداقل می‌کند که تابع تخمین زنده این تابع هدف نیز همانند تابع هدف اول محاسبه می‌شود. رابطه ۳ به‌عنوان تابع هدف سوم مدل، ظرفیت کل بافرها در خط تولید مورد نظر را حداقل می‌کند. رابطه (۴) حدود بالا و پایین ظرفیت هر بافر از نظر تعداد در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه (۵) حد بالای ظرفیت کل بافرها در خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۶) حد پایین و بالای حجم بافرها در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه (۷) حد بالای حجم بافرها در کل خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۸) حد بالا و پایین وزن بافرها در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه (۹) حد بالای وزن بافرها در کل خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۱۰) حدود بالا و پایین بهای تمام‌شده بافرهای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۱) حد بالای بهای تمام‌شده کل قطعات نیمه ساخته در خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۱۲) حدود پایین و بالای تعداد ماشین‌های نوع j در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۳) حد بالای تعداد ماشین‌های نوع j در ایستگاه i را نشان می‌دهد. رابطه (۱۴) حد بالای تعداد کل ماشین‌ها در خط تولید را نشان می‌دهد. رابطه (۱۵) حد

گرفته شده است. در جدول ۵، علاوه بر زمان‌های بین خرابی‌های ماشین‌آلات و نیز زمان‌های تعمیر آن‌ها، زمان‌های پردازش قطعات توسط ماشین‌آلات مختلف نیز ارائه شده است.

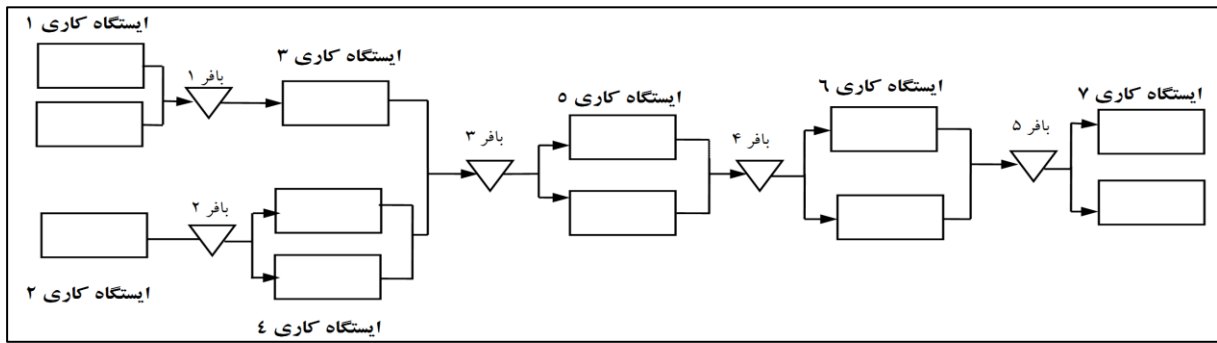
در جدول ۶ نیز حدود پایین و بالا برای متغیرهای مورد بررسی، هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه اضافه کردن به ظرفیت بافرها، وزن و حجم ماشین‌آلات و بافرها ارائه شده است. پس از گردآوری پارامترهای موردنیاز مسئله به انجام طراحی آزمایش‌ها در نرم‌افزار مینی تب ۱۷ با به‌کارگیری روش پلاکت-برمان، اقدام می‌شود که بخشی از آزمایش‌های طراحی شده در جدول ۷ قابل مشاهده است. برای هر یک از این آزمایش‌ها، مقادیر مربوط به توابع هدف دسترس‌پذیری و هزینه‌های کلی خط تولید (شامل هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه انجام انواع تعمیرات، هزینه تخصیص ظرفیت بیشتر برای بافرها و هزینه رکود سیستم به علت در دسترس نبودن هر یک از ایستگاه‌ها) محاسبه شد. دو ستون آخر مربوط به جدول ۷، نتایج حاصل از اجراهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که مدت‌زمان هر آزمایش شبیه‌سازی شده ۱۰۰۰۰۰۰ واحد زمانی در نظر گرفته شده است.

پس از انجام شبیه‌سازی، نتایج مربوطه به‌عنوان پارامترهای ورودی، به شبکه‌های عصبی وارد شدند. همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد، هنگامی که توابع خرابی‌ها برای ماشین‌آلات از توابع توزیع افزایشی مثل ویبول تبعیت کنند، محاسبه تابع هدف که از این توابع تأثیر می‌پذیرند سخت است؛ بنابراین از شبکه‌های عصبی برای برآورد رابطه بین پارامترهای ورودی و متغیرهای پاسخ استفاده شد. شبکه‌های عصبی مورد استفاده و تعریف‌شده به ترتیب: *feed forward net* و *pattern net* و *fit net* و *RBF* هستند. با توجه به اینکه با استفاده از شبکه *RBF* به جواب‌های نامرتبیطی دست یافته شد، این شبکه از انجام محاسبات حذف شد. برای داده‌های مختلف شبکه‌های عصبی مختلف نتایج متفاوتی را در هنگام فیت کردن یک مدل ارائه می‌کنند. در بررسی هر چهار مدل شبکه عصبی و با توجه به مقدار خطای نهایی هر یک از شبکه‌های عصبی، بهترین فیت با استفاده از شبکه عصبی *feed forward net* حاصل شد که این شبکه عصبی را به‌عنوان شبکه پیش‌فرض تعریف شد. برای بخش تعداد لایه‌ها و نودهای هر لایه مخفی هم مقادیر به‌صورت تجربی بر اساس سعی و خطا به دست آمد. شکل ۱۱، شبکه مورد استفاده برای مسئله مورد بررسی با لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌های هر لایه را نشان می‌دهد. جدول ۸ نیز ساختار مناسب شبکه عصبی مورد استفاده را نشان می‌دهد. جدول ۸ بیانگر این امر است که شبکه عصبی مورد استفاده دارای حداکثر دقت و

شده است. در این خط تولیدی، مواد اولیه نوع ۱ به ایستگاه اول (ماشین اول و دوم) وارد شده و سپس توسط ماشین ایستگاه سوم نیز مورد پردازش قرار می‌گیرد. مواد اولیه نوع ۲ به ماشین دوم (ایستگاه دوم) وارد شده و سپس توسط ایستگاه چهارم (ماشین ۵ و ۶) پردازش می‌شود. ماشین‌های ۷ و ۸ (ایستگاه پنجم) خروجی‌های ایستگاه‌های ۳ و ۴ را مونتاژ کرده و به ایستگاه ششم (ماشین‌های ۹ و ۱۰) ارسال می‌کند. در ادامه پردازش‌های تکمیلی بر روی محصول توسط ایستگاه هفتم (ماشین ۱۱ و ۱۲) انجام‌شده و خروجی این ایستگاه محصول نهایی خواهد بود. با توجه به اینکه در این تحقیق، ماشین‌آلات مورد استفاده در خط تولید تعمیر پذیر در نظر گرفته شده‌اند و نیز عنوان شد که برای تعمیر ماشین‌آلات از دو رویکرد پیشگیرانه و اضطراری استفاده می‌شود، بنابراین جهت لحاظ کردن هزینه برطرف کردن انواع خرابی‌های صورت گرفته نیاز به مشخص شدن هزینه‌های مرتبط با این دو نوع از تعمیرات است؛ بنابراین، بر اساس خط تولید طراحی شده در شکل ۸، در جدول ۴ مقادیر مربوط به هزینه‌های مرتبط با انجام انواع تعمیرات به‌عنوان پارامترهای ورودی به مدل مورد بررسی در نظر گرفته شده است.

برای جلوگیری از خرابی‌های اضطراری و به‌منظور بالا بردن عمر مفید سیستم‌ها، مطمئناً اعمال تعمیرات پیشگیری در شرایط بخصوصی لازم و مفید است. میزان اعمال تعمیرات پیشگیری باید در حدود اقتصادی و قابل‌قبول باشد به این دلیل که انجام تعمیرات پیشگیری شامل هزینه‌های نیروی انسانی، مواد، قطعات، هزینه توقف ماشین‌آلات و رکود سیستم و سایر هزینه‌های معمول در نگهداری و تعمیرات خواهد بود. از سوی دیگر طولانی شدن فواصل بین تعمیرات پیشگیری نیز باعث ایجاد خسارت به علت بروز خرابی‌های اضطراری خواهد شد. در این میان لازم است در هر سیستم تولیدی و برای هر ماشین، فاصله زمانی بهینه برای انجام تعمیرات پیشگیری که به ازای آن جمع هزینه‌های تعمیرات اضطراری و پیشگیری به حداقل می‌رسد محاسبه شود. فرض بر این است که ماشین‌آلات موجود در خط تولید همگی مدتی از عمر مفید خود را سپری کرده باشند زیرا در شرایط نو بودن دستگاه‌ها توابع توزیع عمر آن‌ها نزدیک به نمایی منفی بوده و انجام تعمیرات پیشگیری احتمال خرابی را افزایش می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که زمانی کارایی ماشین با اعمال تعمیرات پیشگیرانه افزایش پیدا خواهد کرد که زمان لازم برای اعمال تعمیرات پیشگیری روی این ماشین‌آلات از زمان لازم برای اعمال تعمیرات اضطراری کمتر باشد. با توجه به موارد ذکرشده، توابع توزیع مربوط به زمان‌های بین دو خرابی به‌صورت توابع توزیع همانند جدول ۵ در نظر

میزان خطای کمتر از ۵ درصد بوده و از همبستگی بالایی (۰/۹۹۹) برخوردار است.



شکل ۱۰: خط تولیدی فرضی

جدول ۴: مقادیر مربوط به هزینه‌های مرتبط با انجام انواع تعمیرات

ایستگاه هفتم	ایستگاه ششم	ایستگاه پنجم	ایستگاه چهارم	ایستگاه سوم	ایستگاه دوم	ایستگاه اول	پارامترها
۱۹۰۰۰	۳۲۰۰۰	۱۷۰۰۰	۲۸۰۰۰	۲۴۰۰۰	۲۱۰۰۰	۲۳۰۰۰	هزینه اعمال یک ساعت تعمیر پیشگیرانه (C_p) (به ریال)
۲۹۰۰۰	۶۳۰۰۰	۴۰۰۰۰	۶۵۰۰۰	۳۸۰۰۰	۶۲۰۰۰	۵۲۰۰۰	هزینه اعمال یک ساعت تعمیر اضطراری (C_e) (به ریال)
۱۷۰۰۰۰	۲۲۳۰۰۰	۱۳۸۰۰۰	۲۲۵۰۰۰	۱۹۵۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۱۹۰۰۰	هزینه یک ساعت رکود سیستم ناشی از در دسترس نبودن ایستگاه (C_D) (به ریال)

جدول ۵: توابع توزیع مدت‌زمان‌های پردازش، مدت‌زمان‌های بین‌خرابی‌های متوالی و مدت‌زمان‌های تعمیر

ایستگاه	مدت‌زمان پردازش	مدت‌زمان بین‌خرابی‌ها		مدت‌زمان تعمیر	
		مدت‌زمان بین‌خرابی‌های پیشگیرانه	مدت‌زمان بین‌خرابی‌های اضطراری	مدت‌زمان تعمیرات پیشگیرانه	مدت‌زمان تعمیرات اضطراری
اول	Exp(18)	Weibull(12000,80,12)	Gama (23000,260,40)	Weibull(1500,250,70)	Gama(2500,230,27)
دوم	Exp(25)	Gama (11000,210,14)	Weibull(19000,270,40)	Gama(1600,340,40)	Weibull(3700,240,30)
سوم	Exp(30)	Weibull(13700,320,25)	Gama (24000,410,20)	Exponential (1300)	Gama(2600,250,28)
چهارم	Normal(25,4)	Gama (11500,200,75)	Weibull(17500,250,30)	Weibull(2100,240,70)	Weibull(4000,230,37)
پنجم	Normal(35,5)	Weibull(12800,370,110)	Gama (21000,360,45)	Gama (1100,255,25)	Gama(2100,230,38)
ششم	Exp(30)	Gama (13000,400,22)	Weibull(20500,370,70)	Exponential(2500)	Exponential(4000,340,65)
هفتم	Normal(21,4)	Weibull(7000,250,45)	Gama (15000,380,110)	Gama (500,2300,50)	Weibull(1600,350,60)

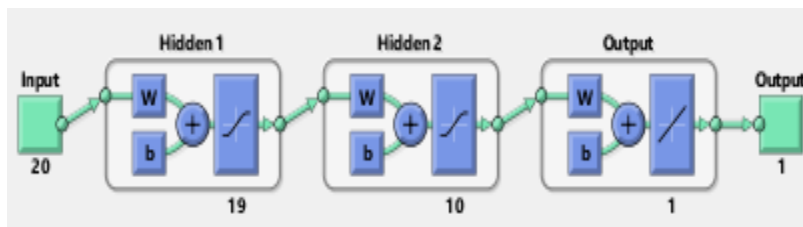
جدول ۶: حد پایین و بالای متغیرهای تصمیم، هزینه خرید ماشین‌آلات، حجم و وزن بافرها

متغیر تصمیم	حد پایین	حد بالا	هزینه	kg(وزن)	m^3 (حجم)
X1	۲	۷	۵۴۰۰۰۰	۳۳۰	۴
X2	۱	۶	۵۱۰۰۰۰	۴۲۰	۳
X3	۱	۷	۴۹۰۰۰۰	۳۸۰	۳
X4	۲	۷	۵۸۰۰۰۰	۴۰۰	۴
X5	۲	۸	۳۹۰۰۰۰	۴۶۰	۳
X6	۲	۷	۵۴۰۰۰۰	۵۵۰	۲
X7	۲	۶	۵۶۰۰۰۰	۶۲۰	۳
X9(Y1)	۰	۴۰	۲۷۰۰۰	۲۰	۰/۳
X10(Y2)	۰	۵۰	۳۲۰۰۰	۲۵	۰/۳۵
X11(Y3)	۰	۴۵	۲۸۰۰۰	۲۲	۰/۲۵

۰/۳	۳۰	۳۵۰۰۰	۶۰	۰	X12(Y4)
۰/۳۵	۲۸	۳۰۰۰۰	۵۵	۰	X13(Y5)
-	-	۳۰۰۰۰	Weibull(14000,85,10)	Weibull(6000,80,10)	X14(Tp1)
-	-	۳۵۰۰۰	Gama (14700,220,15)	Gama (7200,220,15)	X15(Tp2)
-	-	۲۴۰۰۰	Weibull(19500,350,50)	Weibull(11500,350,50)	X16(Tp3)
-	-	۴۰۰۰۰	Gama (14800,200,75)	Gama (6700,200,75)	X16(Tp4)
-	-	۱۶۰۰۰	Weibull(17500,370,110)	Weibull(9500,370,110)	X17(Tp5)
-	-	۳۶۰۰۰	Gama (16500,410,20)	Gama (8500,410,20)	X18(Tp6)
-	-	۴۰۰۰۰	Weibull(11000,250,70)	Weibull(3000,250,70)	X19(Tp7)

جدول ۷: طراحی آزمایش ها با طرح پلاکت-برمان و نتایج حاصل از پیاده سازی آن ها

Run	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	Av.	Cost
۱	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	۷۹/۸۲	۵۲۹۱۷۳۰۰۲
۲	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	۸۵/۰۶	۶۷۷۲۹۱۵۸۴
۳	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	۷۳/۷۲	۶۵۳۰۹۲۷۸۶
۴	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	۸۲/۹۱	۶۷۴۲۴۱۸۹۳
:	:																			:	
۴۵	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+	+	۶۱/۷۱	۱۶۷۷۱۹۲۷۵
۴۶	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+	۳۶/۳۲	۲۷۶۸۴۴۴۳۷
۴۷	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	۳۸/۳۵	۲۱۶۶۷۵۵۳۳
۴۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۷۹/۷۶	۲۸۸۵۸۳۳۸۹



شکل ۱۱: شبکه عصبی آموزش داده شده جهت تخمین توابع هدف

جدول ۸: ساختار مناسب شبکه عصبی بعد از سعی و خطا

مرحله	تابع محرک	ساختار لایه ها	RMSE	MAE	ضریب همبستگی اعتبار سنجی	ضریب همبستگی آموزش
آموزش	سیگموئید	۲۰-۱۹-۱۰-۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۹	۰/۹۹۵	۰/۹۸۸
اعتبار سنجی	سیگموئید	۲۰-۱۹-۱۰-۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۸	۰/۹۹۶	۰/۹۹۹
تست	سیگموئید	۲۰-۱۹-۱۰-۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ورودی اولیه با توجه بازه تغییرات خروجی، بهترین جواب بر اساس داده‌های ورودی اولیه را ارائه می‌کند. با داشتن یک شبکه عصبی تعلیم‌دیده شده می‌توان از آن به‌عنوان یک تابع وابسته به ورودی استفاده کرد و این تابع در بقیه قسمت‌های مدل دقیقاً مشابه یک تابع معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بدین مفهوم که در صورتی که به این شبکه هر مقداری به‌عنوان ورودی داده شود دقیقاً مشابه یک تابع، مقدار خروجی خواهد داشت. شکل ۱۲ شاخص‌های کارایی شبکه‌های عصبی پیشنهادشده را نشان می‌دهد؛ بنابراین پس از به‌کارگیری شبکه‌های عصبی جهت برآورد هر یک از دو تابع هدف دسترس‌پذیری و هزینه‌های کلی سیستم، توابع برآورد شده را به‌عنوان متامدل برازش شده برای هدف دسترس‌پذیری و هدف هزینه‌ها در نرم‌افزار متلب کد کرده و دیگر هدف مدل (کمینه‌سازی ظرفیت بافرها) و محدودیت‌های مدل نیز به کدهای برنامه‌نویسی شده اضافه می‌شوند و در غالب الگوریتم NSGA-II کد نویسی نهایی می‌شوند. نتایج حاصل این الگوریتم برای مسئله مورد نظر به شرح جدول ۹ است. شکل ۱۳ نیز نشان‌دهنده مجموعه جواب پارتو بر اساس نتایج پیاده‌سازی الگوریتم NSGA-II است.

همچنین به‌منظور اعتبار سنجی متا مدل شبیه‌سازی شده، از رویکرد ارائه شده توسط دوریوکس و پیروال [۴۳] استفاده شده است. بدین منظور تعدادی از پیکره‌بندی‌های (ترکیب‌های متخلف از متغیرهای تصمیم برای خط تولیدی مورد نظر) مربوط به خروجی الگوریتم NSGA-II (۲۵ عدد) به‌طور تصادفی انتخاب شدند. سپس این پیکره‌بندی‌ها در نرم‌افزار شبیه‌سازی، مدل‌سازی شده و اجرا شدند. در مرحله بعد خروجی‌های حاصل از مدل شبیه‌سازی شده با خروجی‌های حاصل از ۲۰ جواب انتخاب‌شده از الگوریتم فرا ابتکاری با استفاده از میزان خطای مطلق مورد مقایسه قرار گرفت. میزان خطای مطلق محاسبه‌شده برای این مقایسات مدل شبیه‌سازی و متامدل ناشی از تحقیق برابر با ۱.۸۵ درصد بوده که این مقدار کمتر از ۳ درصد (مبنای تصمیم‌گیری) است که این مقدار میزان دقت متامدل به دست آمده را تأیید می‌نماید.

در این پژوهش به ارائه مدلی توسعه یافته به منظور بررسی در خطوط تولیدی اقدام شد که در آن‌ها تنها یک محصول نهایی تولید می‌شود بنابراین محققین می‌توانند خطوط تولیدی را بررسی کنند که امکان تولید دو یا بیشتر از دو محصول را داشته باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود این مدل برای انواع مختلفی از سیستم‌های تولیدی از جمله کارگاهی، سلولی و ... نیز بررسی شود. از دیگر موارد پیشنهادی به محققین اینکه می‌توان برخی مفروضات جدید از جمله در نظر گرفتن انواع مختلفی از ماشین‌آلات برای هر ایستگاه و در نظر گرفتن دیگر استراتژی‌های افزونگی به‌منظور نزدیک‌تر کردن مسئله مورد

در این تحقیق به دنبال این بودیم تا با ترکیب مسئله تخصیص افزونگی و مسئله تخصیص بافر در خط تولید به سیستمی نائل شویم که در عین اینکه از بیشترین دسترس‌پذیری برخوردار باشد به اهداف تولیدی از قبیل کمینه‌سازی موجودی‌های کالای در جریان ساخت در بافرها، کمینه‌سازی هزینه‌های سیستم از جمله هزینه خرید ماشین‌آلات، هزینه انواع تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی با توجه به محدودیت‌های مرتبط با سیستم نیز منجر شود؛ بنابراین، نوآوری عمده این تحقیق را می‌توان در ترکیب مسئله تخصیص افزونگی و تخصیص بافر و نیز در نظر گرفتن انواع خرابی‌ها برای ماشین‌آلات و هزینه‌های انواع خرابی‌های صورت گرفته نام برد. با توجه به این موارد، این تحقیق به دنبال طراحی یک خط تولید با توالی ایستگاه‌های مختلف کاری بوده که در این سیستم تولیدی، امکان اضافه نمودن ماشین‌های مازاد به‌صورت موازی وجود دارد و نیز بین ایستگاه‌ها، مکان‌های مجزایی برای انبارش (ذخیره موقت) کالای در جریان ساخت (بافر) وجود دارد. متغیرهای مستقل (قابل کنترل) در این پژوهش که با تحلیل آن‌ها می‌توان برای حل مسئله به پاسخ‌های صحیحی دست یافت عبارت‌اند از تعداد ماشین‌آلات در هر ایستگاه کاری، ظرفیت بافرها و زمان‌های انجام تعمیرات پیشگیرانه بر روی هر ماشین. همچنین متغیر وابسته (پاسخ) مورد انتظار نیز عبارت خواهند بود از نرخ دسترس‌پذیری سیستم و هزینه‌های کلی سیستم. با توجه به اهداف مورد استفاده در مدل تحقیق و نامشخص بودن رابطه ریاضی آن‌ها، ابتدا با استفاده از مفاهیم و روش‌های شبیه‌سازی، طراحی آزمایش‌ها، شبکه‌های عصبی به برآورد این دو تابع هدف (دسترس‌پذیری سیستم و هزینه‌های کلی سیستم) اقدام نموده و جهت تجزیه و تحلیل‌های آماری و شبیه‌سازی و طراحی آزمایش‌ها به ترتیب از نرم‌افزارهای مینی تب ۱۷ و ED استفاده شد. بدین منظور، جهت تعیین رابطه بین متغیرهای پاسخ و مستقل، در مرحله اول بعد از بررسی کامل سیستم مورد مطالعه اقدام به تشکیل مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار نمودیم. در این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی سیستم تولیدی مورد بررسی، از نرم‌افزار ED استفاده شد. پس از واردکردن تمامی اطلاعات موردنیاز (از جمله زمان‌های پردازش، زمان‌های خرابی، زمان‌های تعمیرات، ظرفیت بافرها و ...)، در مرحله بعد با به‌کارگیری رویکرد طراحی آزمایش‌ها و روش شبکه عصبی رابطه بین این دو نوع متغیر مشخص شد. شبکه‌های عصبی مدل‌های وابسته به داده‌های ورودی هستند. وقتی مدل بر اساس داده‌های موجود تعلیم داده شد، برای هر ترکیب ورودی جدید در بازه داده‌های

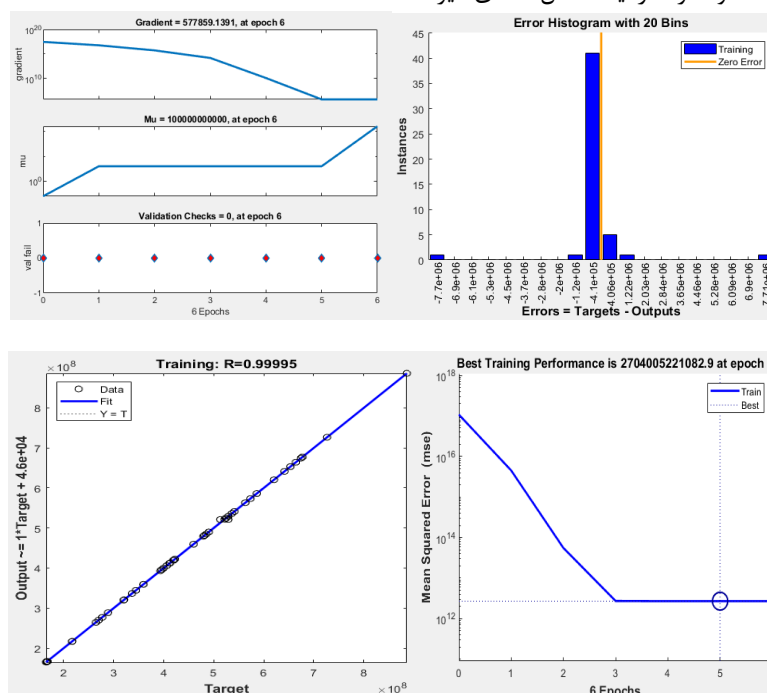
استفاده کرده اند می توان به تحقیق [۴۴،۸،۳۳] و نیز عدم همکاری با محقق جهت کسب اطلاعات و یا عدم مطابقت خطوط تولیدی بررسی شده، محقق را بر آن داشت که برای پیاده سازی مدل مورد نظر از مثال عددی استفاده نماید. از جمله پیشنهادات برای انجام تحقیقات آبی تحقیق، پیاده سازی مدل در یک مورد مطالعه واقعی به منظور بررسی اعتبار مدل و روش مطرح شده می باشد.

۱-۶ محدودیت های تحقیق

یکی از مهم ترین عوامل مؤثر در انجام به موقع و درست تحقیقاتی از این دست که بخش زیاد از آن به صورت میدانی انجام می شوند، همکاری نزدیک شرکت ها در انجام تحقیق است. با توجه به نوع تحقیق که از نوع توسعه مدل است برای انجام این تحقیق این امکان وجود داشت که در وهله اول گزینه های ممکن به منظور انتخاب به عنوان مورد مطالعه محدود شوند که این امر نیز اتفاق افتاد و علی رغم مراجعه به چندین شرکت تولیدی مختلف، نوع سیستم های تولیدی مورد استفاده قابلیت بکارگیری نداشتند و همچنین در وهله بعد این امکان وجود داشت که جلب همکاری و هماهنگی با شرکت تولیدی مورد نظر به سختی و در زمان طولانی انجام گیرد که علی رغم یافتن دو شرکت تولیدی که قابلیت پیاده سازی مدل توسعه داده شده را دارا بودند، اما از ارائه اطلاعات و انجام همکاری ممانعت بعمل آوردند.

بررسی به دنیای واقعی را به مسئله مورد بررسی اضافه نمود. همچنین می توان از مبانی این تحقیق به منظور مدل سازی و حل مسائل پیچیده در خطوط تولید زمانی که بین اجزای هر زیرسیستم (ایستگاه) به یکدیگر وابستگی وجود داشته باشد (که تحت عنوان سیستم های به اشتراک گذاری بار نیز نامیده می شوند) و در نظر گرفتن اجزای سیستم چندحالتی و تعمیر پذیر، استفاده نمود. همچنین در این تحقیق از الگوریتم فرا ابتکاری NSGA-II استفاده شد که محققان می توانند دیگر الگوریتم های پرکاربرد در این حوزه از جمله الگوریتم چندهدفه بهینه سازی انبوه ذرات و NSGA-III را مورد استفاده قرار دهند.

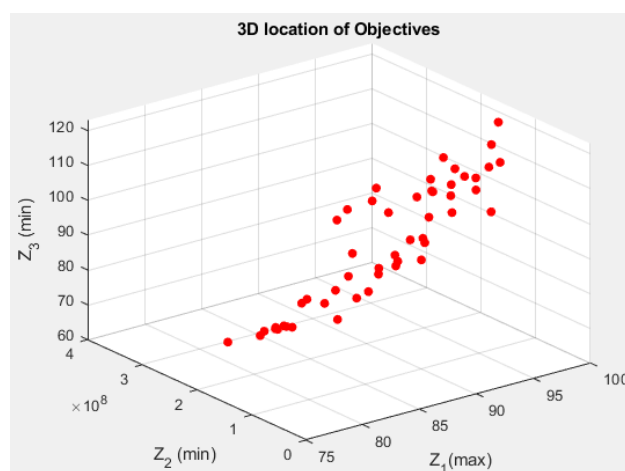
همچنین، با توجه به رویکرد پژوهش پیش رو که از جمله تحقیقات توسعه ای محسوب می شود و نیز با توجه به در نظر گرفتن برخی مفروضات به مدل مورد بررسی (از جمله لحاظ کردن تعمیرات پیشگیرانه و هزینه های مرتبط با انواع خرابی ها و ... که این موارد از جمله نوآوری های این تحقیق می باشند) و نیز با توجه به توسعه ای بودن این تحقیق (چرا که یکی از خصوصیات تحقیقات توسعه ای عدم وجود مثال عددی در پیشینه تحقیق می باشد و مثال های عددی مشابهی که بتوان این مدل توسعه ای را در آن ها مورد بررسی قرار داد توسط محقق یافت نشد) و با توجه به جنس چنین تحقیقاتی و وجود مقالاتی که به منظور پیاده سازی مدل توسعه داده شده از مثال عددی استفاده نموده اند (از جمله مواردی مشابه با این تحقیق که رویکرد توسعه ای داشته و صرفاً از یک مثال عددی نیز



شکل ۱۲: شاخص‌های کارایی شبکه‌های عصبی پیشنهادشده

جدول ۹: بخشی از مجموعه جواب‌های پارتو به دست آمده بر اساس ترکیب مقادیر مختلفی از متغیرهای تصمیم

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	y1	y2	y3	y4	y5	tp1	tp2	tp3	tp4	tp5	tp6	tp7	Z1	Z2	Z3	
۴	۲	۴	۴	۴	۴	۲	۲۵	۲	۱۱	۱۹	۳۳	۹۸۵۰	۱۱۱۶۰	۱۷۳۴۵	۱۱۰۶۰	۹۸۷۹	۹۹۸۲	۴۸۶۸	۹۸/۹	۲۷۸۵۰۸۲۵۰	۱۱۹	
۴	۲	۲	۳	۵	۵	۲	۱۸	۴	۲	۱۰	۲۱	۱۰۰۹۰	۱۰۹۶۴	۱۶۷۵۰	۱۰۷۵۹	۱۰۳۵۳	۹۹۸۴	۳۴۲۰	۷۶/۰۴	۹۲۱۴۴۸۶۲	۶۸	
۴	۲	۲	۵	۴	۴	۲	۱۹	۳	۴	۵	۲۲	۱۱۰۰۰	۱۰۳۵۰	۱۶۳۴۰	۱۰۸۸۰	۱۰۶۵۵	۹۶۶۱	۳۷۹۸	۹۴/۲۳۰	۳۰۸۸۸۱۲۶۳	۶۹	
...
۴	۲	۲	۵	۵	۵	۲	۵	۳	۳	۱۷	۳۱	۱۱۷۰۰	۱۱۳۵۶	۱۵۶۵۵	۱۱۲۴۰	۱۰۲۶۹	۹۴۰۰	۳۵۸۶	۹۱/۵۲۱	۲۳۳۸۴۲۴۹	۱۱۲	
۴	۲	۳	۴	۵	۵	۲	۱۹	۲	۴	۲	۲۰	۱۰۶۰۰	۱۲۱۱۳	۱۶۸۰۰	۱۰۷۴۲	۱۰۱۸۲	۹۸۶۸	۳۶۹۰	۸۵/۰۶	۲۲۸۶۷۴۲۵۳	۶۳	
۴	۲	۳	۵	۴	۴	۲	۲۳	۳	۳	۹	۲۲	۱۰۵۵۰	۱۱۲۵۴	۱۶۹۰۰	۱۰۶۴۸	۱۰۲۴۴	۹۹۲۶	۳۵۵۴	۸۱/۶۶۰	۶۴۵۹۴۲۶۱	۸۵	



شکل ۱۳: مجموعه جواب پارتو ناشی از حل الگوریتم NSGA-II

Operations Research. Computers and Operations Research; 60(c):67-78.

[5] Ernest Koenigsberg, 1959. "Production Lines and Internal Storage:A Review," Management Science, Informs,5(4), 410-433.

[6] Gershwin, S. B., & Schor, J. E. (2000). Efficient algorithms for buffer space allocation. Annals of Operations Research, (93), 117-144.

[7] Manitz, M. (2008). Queuing model based analysis of assembly lines with finite buffers and general services times. Comput Oper Res, 35(8), 2520-2536.

[8] Amiri, M., & Mohtashami, A. (2012). Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. Int J Adv Manuf Technol,(62), 371-383.

[9] Costa, A., Alfieri, A., & Fichera, S. (2015). A parallel tabu search for solving the primal buffer allocation problem in serial production

مراجع

[1] Groover M. P. (2010). Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. John Wiley & Sons.

[2] A.K. Tsadiras, C.T. Papadopoulos, M.E.J. O’Kelly. An artificial neural network based decision support system for solving the buffer allocation problem in reliable production lines. Computers & Industrial Engineering 66 (2013) 1150-1162.

[3] Mariano C.H and Pece C.A.Z. (2015). Simulation Optimization Approach to Solve a Complex Multi-objective Redundancy Allocation Problem. Applied Simulation and Optimization, Springer Cham Heidelberg, Newyork.

[4] Yelkenci Kose, S., & Kilincci, O. (2015). Hybrid approach for buffer allocation in open serial production lines, Computers &

- [19] Kayedpour, F., Amiri, A., Rafizadeh, M., & ShahryariNia, A. (2016). Multi-objective redundancy allocation problem for a system with repairable components considering instantaneous availability and strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 160, 132-151.
- [20] Heydari M and Sullivan KM. (2018). An Integrated Approach to Redundancy Allocation and Test Planning for Reliability Growth. *Computers & Operations Research*. 92, 182-193.
- [۲۱] محتشمی، علی. یک روش تلفیقی جدید جهت تخصیص افزونگی در سیستم‌های تولیدی با استفاده از اصلاح‌شده NSGA-II و MOPSO. فصلنامه علمی پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، سال دوازدهم، شماره ۳۳، تابستان ۱۳۹۳. صفحات ۹۷-۱۲۴.
- [۲۲] شریفی، مانی؛ دشتی ملجائی، کامران و چراغی، قاسم (۱۳۹۵). بهینه‌سازی همزمان قابلیت اطمینان و هزینه‌ی طراحی در سیستم‌های سری - موازی k-out-of-n با در نظرگرفتن نرخ خرابی وابسته به تعداد اجزای در حال کار. مهندسی صنایع و مدیریت، دوره ۳۲(۱)، شماره ۱(۲)، ۱۴۱-۱۴۸.
- [۲۳] عزیزمحمدی، روزه؛ امیری، مقصود؛ توکلی مقدم، رضا و مشاط زادگان، حمیدرضا. ارائه مدلی برای حل مسئله تخصیص افزونگی قابلیت اطمینان به‌وسیله یک الگوریتم رقابتی تلفیقی چندهدفه. فصلنامه علمی پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی، سال چهاردهم، شماره ۴۲، پاییز ۱۳۹۵، صفحات ۱۰۳ تا ۱۲۱.
- [۲۴] عظیمی، پرهام و هادی نژاد، فرهاد. (۱۳۹۵). ارائه مدل بهینه‌سازی چند هدفه در مساله تخصیص افزونگی سیستم‌های تعمیرپذیر، با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، طراحی آزمایشات و شبیه‌سازی. مطالعات مدیریت صنعتی، دوره ۱۴، شماره ۴۱، ۱۳۷-۱۶۵.
- [۲۵] فاروقی، هیوا و سلگی، زهرا. (۱۳۹۶). بهینه‌سازی مسئله چند هدفه تخصیص افزونگی و قابلیت اطمینان در سیستم‌های چند وضعیت‌سری - موازی، مهندسی و مدیریت کیفیت، دوره ۷، شماره ۳، ۱۷۶-۱۸۵.
- [26] Alrabghi, A., & Tiwari, A. (2016). A novel approach for modeling complex maintenance systems using discrete event systems, *Computers & Operations Research*, (64):97-112.
- [۱۰] امیری، مقصود و علی محتشمی، ۱۳۹۳، حداکثر کردن نرخ تولید از طریق تعیین اندازه بهینه موجودی‌های بافر با استفاده از رویکرد تلفیقی متدولوژی سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک، فصلنامه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید ۲۵ (۲) ۱۶۷-۱۸۴.
- [11] Chern, M. S. (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. *Oper Res Lett*, (11), 309-315.
- [12] Ida, K., Gen, M. and Yokota, T. (1994). System Reliability Optimization with Several Failure Modes by Genetic Algorithm, *Proceeding of the 16th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Ashikaga of Japan, 82.
- [13] Yokota, T., Gen, M. and Ida, K. (1995). System Reliability of Optimization Problems with Several Failure Modes by Genetic Algorithm, *Japanese Journal of Fuzzy Theory and systems*; Vol. 7, pp. 117-135.
- [14] 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.
- [15] Chambari, A., Rahmati, S.H., Najafi A.A., & Karimi, A. (2012). A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1):109-119.
- [16] Jiansheng G., Zutong, W., Mingfa, Z., Ying, W. (2014). Uncertain multi-objective redundancy allocation problem of repairable systems based on artificial bee colony algorithm. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(6): 1477-1487.
- [17] Zoulfaghari, H., Zeinal Hamadani, A., & Abouei Ardakan, M. (2014). Bi-objective redundancy allocation problem for a system with mixed repairable and non-repairable components. *ISA Transactions*. 53: 17-24.
- [18] Abouei Ardakan, M., Zeinal Hamadani, A. & Alinaghian, M. (2015). Optimizing bi-objective redundancy allocation problem with a mixed redundancy strategy. *ISA Transactions*; 55; 116-128.

Redundancy allocation problem of a system with increasing failure rates of components based on Weibull distribution: A simulation-based optimization approach. *Reliability Engineering and System Safety*. 152;187–196.

[35] Attar, A., Raissi, S., & Khalili-Damghani, K. (2017). A simulation-based optimization approach for free distributed repairable multi-state availability-redundancy allocation problems. *Reliability Engineering and System Safety*, 157, 177–191.

[36] Lavoie Ph., Jean-Pierre, K. & Gharbi, A. (2009). Optimization of production control policies in failure-prone homogenous transfer lines. *IIE Transactions* 41(3):209-222.

[37] Montgomery, D.C. (2012). *Design and Analysis of Experiments*, 8th Edition, Wiley.

[38] Esfe, M. H., Razi, P., Hajmohammad, M. H., Rostamian, S. H., Sami Sarsam, W., Akbar Abbasian Arani, A., & Dahari, M. (2017). Optimization, modeling and accurate prediction of thermal conductivity and dynamic viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al₂O₃ nanofluids by NSGA-II using ANN. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 154-160.

[39] Huang, M., Guang, C., Pao, L., & Chou, Y. (2002). Buffer allocation in flow shop-type production system with general arrival and service patterns. *Comput Oper Res*, 29(2), 103–121.

[40] Deb, K. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, VOL. 6, NO. 2.182-197.

[41] Coello Coello C.A., Lamont G.B. & Van Veldhuizen D.A. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Second Edition. Springer Science & Business Media.

[42] Pasandideh, S.H.R., Akhavan Niaki, S.T., & Asadi, K. (2015). Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA. *Information Science*, 292, 57–74.

[43] Pierreval H., & Durieux S. (2003). Robust simulation with a base environmental scenario. *European Journal of Operational Research* 182(2):783-793

[44] Chang, Kuo-Hao., & Kuo P.Y. (2018). An efficient simulation optimization method for the generalized redundancy allocation problem.

simulation. *Reliability Engineering and System Safety*, 154, 160–170.

[27] Rigdon S.E & Basu A.P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. Wiley series in probability and statistics.

[28] Stenström, C., Parida, A., & Kumar, U. (2016). Measuring and monitoring operational availability of rail infrastructure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(5), 1457–1468.

[29] Yahyatabar A., & Najafi A.A. (2016). A quadratic reproduction based Invasive Weed Optimization algorithm to minimize periodic preventive maintenance cost for series-parallel systems. *Computers & Industrial Engineering*. v(110), 436-461.

[30] M.Okasha Nader & M.Frangopol Dan Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA. *Structural Safety* V(31), I(6), 460-474.

[31] Zheng, Z., Zhou, W., Zheng, Y., & Wu, Y. (2016). Optimal maintenance policy for a system with preventive repair and two types of failures, *Computers & Industrial Engineering*. 98:102-112.

[۳۲] ربانی، علی؛ زارع، حبیب و بهنیا، فروغ. (۱۳۹۲). ارائه الگوی

مناسب جهت پیاده سازی سیستم نگهداری و تعمیرات در کارخانجات خطوط تولید پیوسته با رویکرد مدل های تصمیم گیری و برنامه ریزی آرمانی فازی. فصلنامه علمی - پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی - سال یازدهم، شماره ۳۱، صفحات ۸۵-۱۰۰.

[۳۳] ربانی، مسعود؛ افرازه، محمدحسین؛ امینی، ساسان؛ فرخی اصل، حامد. (۱۳۹۵). برنامه ریزی یکپارچه تولید و نگهداری و تعمیرات با در نظر گرفتن دوره های یکسان نت. روش های عددی در مهندسی، سال ۳۶، شماره ۲، صفحات ۶۳-۷۸.

[33] Mohtashami, A. (2014). A new hybrid method for buffer sizing and machine allocation in unreliable production and assembly lines with general distribution time-dependent parameters. *Int J Adv Manuf Technol*. 74:1577–1593.

[34] P. Pourkarim Guilani, P. Azimi, S.T.A. Niaki, S.A. Akhavan Niaki. (2016).

European Journal of Operational Research,
265, 1094–1101.