

## مدل سازی قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار در سیستم‌های تولید سلولی: حل با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته با مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب

بهزاد کریمی<sup>۱</sup>، سید تقی اخوان نیایی<sup>۲\*</sup>، حسن حاله<sup>۳</sup>، بهمن نادری<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکترا، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۲. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۴. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

### خلاصه

امروزه به‌کارگیری قابلیت اطمینان در سیستم‌های تولید سلولی با استفاده از وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار (AGV) یکی از مهم‌ترین مباحث برای بهبود راندمان سیستم‌های تولیدی است. در این مقاله یک مدل ریاضی چندهدفه به‌منظور کاهش هزینه‌های تولید و جابجایی قطعات در دو حالت درون سلولی و بین سلولی و به دنبال آن افزایش قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار ارائه شده است. فرض می‌شود که وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار که وظیفه جابجایی درون سلولی را بر عهده دارند، دارای یکی از دو نوع نرخ خرابی و ایبل و نمایی در هر سلول هستند. همچنین وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار بین سلولی از نرخ خرابی ثابت تبعیت می‌کنند. قابل توجه است که همه انتقالات درون و بین سلولی تنها توسط وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار صورت می‌گیرند و در صورت خرابی همه AGVها سیستم تولید متوقف می‌شود. از آنجائی که امکان محاسبه قابلیت اطمینان در حالت نرخ خرابی و ایبل وجود ندارد، از شبیه‌سازی برای برآورد قابلیت اطمینان در این حالت استفاده می‌شود. در ادامه برای اعتبار سنجی، چندین مثال عددی به‌صورت تصادفی تولید و برای حل آن‌ها از دو الگوریتم فرا ابتکاری الگوریتم جستجوی فاخته با مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب (NSCS) و الگوریتم چندهدفه علف‌های هرز (MOIWO) استفاده می‌شود. در انتها از روش تکنیک ترکیبی سلسله مراتبی و تاپسیس (AHP-TOPSIS) به‌منظور انتخاب الگوریتم کارا تر بر اساس به‌کارگیری چند معیار چندهدفه به‌صورت هم‌زمان استفاده می‌شود.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۱۷

پذیرش ۱۳۹۶/۰۸/۱۴

کلمات کلیدی:

قابلیت اطمینان

سیستم‌های تولید سلولی

سیستم‌های حمل‌ونقل

هدایت‌شونده خودکار

شبیه‌سازی

الگوریتم جستجوی فاخته با

مرتب‌سازی جواب‌های نا

مغلوب

### ۱- مقدمه

تولید سنتی همچون تولید کارگاهی و تولید محصولی قادر به تأمین این نیازها و الزامات نیستند، چراکه این سیستم‌ها باید قابلیت تغییر و طرح‌ریزی مجدد برای پاسخ به تغییرات در طرح و تقاضای محصول را داشته باشند. افزون بر آن به وجود آمدن مسائلی چون کاهش زمان راه‌اندازی در تجهیزات و وسایل حمل‌ونقل، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، کنترل سراسری بهتر و موارد دیگر، ابعاد جدیدی را در بازار رقابت تولیدکنندگان به وجود آورده است که استراتژی تکنولوژی گروهی و وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار به‌عنوان یکی از راهبردهای طراحی شده برای پاسخگویی به این

یکی از مهم‌ترین تصمیمات فرآیندی در هر کارخانه تولیدی، انتخاب نوع روش تولیدی و وسایل حمل‌ونقل برای یک مجموعه از دپارتمان‌ها در محیط کاری است. سیستم‌های تولیدی، بدون اینکه به سرمایه‌گذاری عمده‌ای نیاز باشد، باید قادر به تطبیق یا پاسخ سریع به تغییرات در طرح و تقاضای محصولات باشند. سیستم‌های

\* نویسنده مسئول: سید تقی اخوان نیایی

تلفن: ۰۲۱-۶۶۱۶۵۷۴۰، پست الکترونیکی: niaki@sharif.edu

نیازها می‌باشد. تکنولوژی گروهی یک روش تولیدی است که بر اساس آن قطعات با خصوصیت و مشخصه‌های یکسان در یک گروه قرار می‌گیرند و مجموعه‌ای از ماشین‌ها نیز که برای تولید آن‌ها به‌کاربرده می‌شوند، به‌طور مناسبی طبقه‌بندی شده و در یک واحد استقرار می‌یابند. تولید سلولی یکی از کاربردهای اولیه قواعد تکنولوژی گروهی برای ساخت و تولید است که بر مبنای آن هر سلول متشکل از تعدادی ماشین‌ها و تجهیزات تولیدی قادر به پردازش گروهی از قطعات تحت عنوان خانواده قطعات که دارای فرایندهای تولیدی مشابه هستند، می‌باشد. سیستم تولید سلولی به‌عنوان یک رویکرد تولیدی مؤثر برای تولید قطعات گسسته شناخته شده است که سعی در رسیدن به مزایای زیادی در کاهش هزینه حمل‌ونقل مواد و ارتقا کیفیت و غیره دارد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی در عرصه حمل‌ونقل و به‌کارگیری وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار در سیستم‌های تولیدی و تولید سلولی، مسائل مرتبط به این بخش تسهیل شده است ولی قابلیت اطمینان در سیستم‌های تولیدی خودکار AGV و AMS کماکان یکی از مشکلات اصلی در آنالیز کارایی است [۱]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، جابجایی مواد یکی از اولین زمینه‌ها برای کاهش هزینه‌ها است و بین ۲۰ تا ۵۰ درصد از هزینه‌های کلی تولید در ارتباط با حمل‌ونقل مواد است که یک برنامه‌ریزی مؤثر و کارا می‌تواند این هزینه‌ها را بین ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش دهد [۲]. از آنجاکه سیستم جابجایی مواد یک جز یکپارچه از سیستم تولیدی است، همه پیچیدگی‌های موجود در عملیات تولیدی به MHS منتقل می‌شود. یک سیستم مناسب از جابجایی مواد، تحویل مواد به مکان‌های مناسب را تضمین می‌کند. علاوه بر آن نوع وسیله حمل‌ونقل مواد، الگوی مورد استفاده در یک مرکز کاری، سلول تولیدی، کارگاه ماشین، دپارتمان، انبار و غیره را نیز تعیین می‌کند. در ادامه این مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش (۲) به‌مرور ادبیاتی از سیستم‌های تولید سلولی پرداخته می‌شود. در بخش (۳) معرفی مسئله به همراه مدل ریاضی پیشنهادی، در بخش (۴) به‌روش‌های حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری، در بخش (۵) به تجزیه و تحلیل و حل یک مثال عددی و در نهایت در بخش (۶) به نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی می‌پردازیم.

## ۲- مرور ادبیات

پژوهش‌های بررسی شده در این بخش در دو گروه ۱- حمل‌ونقل در سیستم‌های تولید سلولی و ۲- قابلیت اطمینان در سیستم‌های تولید سلولی طبقه‌بندی شده‌اند.

### ۲-۱- حمل‌ونقل در سیستم‌های تولید سلولی

سیستم انتخاب وسیله حمل‌ونقل نقشی مهم و حیاتی در سیستم‌های تولیدی ایفا می‌کند. زمانی که طراحی به‌صورت کامل صورت نگیرد، سیستم جابجایی مواد به‌صورت مؤثر در عملکرد سیستم، افزایش بهره‌وری، بهبود فضای رقابتی و کاهش زمان تحویل

و یک مدل تخصیص برای جزئیات برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن هزینه ثابت ماشین‌آلات، هزینه جابجایی مواد بین سلولی، ظرفیت ماشین و تولید در سیستم تولیدی تشکیل می‌شود. در نهایت در یک محیط شبیه‌سازی به زبان جاوا به تجزیه و تحلیل مدل خود پرداختند.

## ۲-۲- قابلیت اطمینان در سیستم‌های تولید سلولی

در سیستم‌های تولید سلولی، قطعات توسط گروهی از ماشین‌های وابسته به یکدیگر پردازش می‌شوند، بنابراین قابلیت اطمینان ماشین‌ها نقش مهمی در کارکرد سلول ایفا می‌کند. از سویی دیگر قابلیت اطمینان مسیر پردازش برای تولید و تحویل به‌موقع نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها در سیستم‌های تولید سلولی شناخته می‌شود. از این جهت، ساوسار [۱۸] یک مدل احتمالی در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> با تحلیل قابلیت اطمینان یک ماشین و یک ربات ارائه کرد. وی مدت زمان عملیات، مدت زمان بارگیری/ بارگذاری و مدت زمان جابجایی برای قرار دادن قطعه پس از انجام عملیات بر روی پالت و نیز خرابی اجزای سلول (ماشین ابزار و ربات) را تصادفی فرض کرد و با استفاده از زنجیره مارکوف، دیاگرام حالت خرابی را ترسیم و در یک مثال موردی مدل خود را تحلیل و بررسی کرد. در ادامه این مقاله، ساوسار و الدایهانی [۱۹] مدل احتمالی دیگری برای تحلیل کارایی در FMC را با در نظر گرفتن دو ماشین و یک ربات که وظیفه سرویس به دو ماشین را دارد، پیشنهاد کردند. آنان ماشین‌ها را تعمیر پذیر در نظر گرفته و با استفاده از زنجیره مارکوف دیاگرام حالت را نمایش دادند. ربات‌ها در این مدل وظیفه بارگذاری/ بارگیری از پالت به ماشین‌ها و سپس از ماشین‌ها به پالت‌ها را بر عهده داشته است. داس و همکاران [۲۰] یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای طراحی سیستم‌های تولید سلولی به‌منظور کمینه کردن هزینه کل سیستم و بیشینه کردن قابلیت اطمینان ماشین‌های مسیرهای پردازش انتخاب شده ارائه دادند. مسئله طراحی سیستم تولید سلولی ایشان شامل تخصیص ماشین‌ها به سلول‌ها و انتخاب مسیر پردازش بالاترین سطح قابلیت اطمینان برای هر نوع قطعه و کمینه کردن هزینه‌های کل تولید داخلی عملیات، هزینه بیکاری ماشین‌ها و جابجایی بین سلولی مواد است. در ادامه داس و همکاران [۲۱] یک مدل برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه برای توسعه مدل قابلیت اطمینان ماشین‌ها در سیستم‌های تولید سلولی ارائه دادند. در این مدل فرض شده است که زمان خرابی ماشین‌ها از توزیع وایبل پیروی می‌کند. آن‌ها با دسته‌بندی ماشین‌ها بر اساس احتمال خرابی روشی ارائه دادند که در آن برنامه زمانی و فاصله تعمیرات پیشگیرانه برای هر دسته از ماشین‌ها با کمینه کردن هزینه تعمیرات کل و احتمال خرابی ماشین‌ها تعیین می‌شود. همچنین داس [۲۲] به مقایسه‌ی توزیع نمایی و توزیع وایبل در تحلیل قابلیت اطمینان ماشین‌ها در طراحی سیستم‌های تولید سلولی

مجدد، برون‌سپاری و نگهداری موجودی ترکیب کردند. در ادامه رفیعی و همکاران [۱۱] یک مدل ریاضی جامع برای مسئله یکپارچه تشکیل سلول و تعیین اندازه موجودی ارائه کردند. اهداف مدل پیشنهادی آن‌ها عبارت‌اند از: کمینه کردن هزینه کل شامل خرید ماشین، پیکربندی مجدد سلولی، تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه، حمل‌ونقل مواد (بین سلولی و درون سلولی)، پردازش ماشین، برون‌سپاری قطعات، نگهداری قطعات نیمه ساخته و آماده و جایگزینی قطعات معیوب. توکلی‌مقدم و همکاران [۱۲] ابتدا یک مدل چندهدفه در CMSD با در نظر گرفتن هزینه‌های ماشینی (خرید، بالاسری و عملیاتی)، هزینه حمل‌ونقل مواد (درون و بین سلولی)، بهره‌برداری ماشین/سلول و توازن بارکاری بین سلول‌ها ارائه کردند. سپس با استفاده از رویکرد جستجوی پراکنده (مجموع وزنی اهداف) به حل مدل خود پرداختند. کیا و همکارانش [۱۳] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط جدید را برای طراحی مکان در CMSD پیشنهاد کردند. هدف این مدل کمینه کردن هزینه‌هایی از قبیل جابجایی درون و بین سلولی، جابجایی ماشین‌ها، خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه‌های بالاسری و هزینه‌های عملیات است. آن‌ها با طراحی یک همسایگی جدید در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، مدل خود را برای دو مثال عددی حل کردند. کیا و همکارانش [۱۴] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی مکان درون سلولی در CMSD ارائه کردند. مدل ارائه شده شامل چندین ویژگی طراحی از جمله طراحی داخل سلول، توالی عملیات، زمان عمل، مسیریابی روند جایگزین، خرید ماشین، ظرفیت ماشین‌آلات، انتخاب مسیر، حجم تولید قطعات و پیکربندی مجدد سلول است. هدف این مدل کمینه کردن هزینه‌هایی از جمله هزینه جابجایی مواد درون سلولی، هزینه حرکت رو به جلو و برگشت به عقب در جابجایی مواد، هزینه راه‌اندازی مسیر، هزینه جابجایی ماشین‌آلات، هزینه خرید ماشین‌آلات جدید، هزینه‌های سربار و پردازش ماشین است. با توجه به سخت بودن مسئله، آن‌ها در پایان از الگوریتم SA برای حل استفاده کردند. در ادامه این مقاله، کیا و همکارانش [۱۵] مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلطی را برای طراحی مکان گروهی در CMSD ارائه کردند و با تابع هدفی مشابه مقاله کیا و همکارانش [۱۴] مدل خود را در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار گمز برای یک مثال حل کردند. سخایی و همکاران [۱۶] با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مقاوم یک مدل ریاضی یکپارچه در مسائل CMSD ارائه کردند. در این مدل، آن‌ها مواردی از قبیل غیر مشخص بودن مدت‌زمان پردازش قطعات و ادغام مفاهیم مختلفی مانند قابلیت اطمینان ماشین‌ها، ظرفیت ماشین، تخصیص عملیات، جابجایی مبتنی بر فاصله و غیره را لحاظ و مدل خود را با نرم‌افزار C-PLEX حل کردند. همچنین رنا و آمبریکو [۱۷] به بهبود یک مدل در CMSD پرداختند. در این مدل، ماشین‌آلات چندمنظوره در هر سلول به‌صورت گروه‌بندی شده قرار گرفته و میزان تقاضا غیرقطعی است. مدل اصلی از دو زیر مدل

ضعف مقاله آنان را با به‌کارگیری الگوریتم SA برطرف کردند و در نهایت برای راستی آزمایی الگوریتم خود مثالی را طراحی و حل کردند. شیرزادی و همکاران [۲۸] یک مدل چندهدفه با ادغام قابلیت اطمینان و جابجایی درون‌سلولی در سیستم CMSD پیشنهاد کردند. توابع هدف آن‌ها شامل کمینه کردن هزینه‌های کل شامل هزینه جابجایی بین و درون‌سلولی، هزینه ماشین‌آلات، هزینه‌های سربار و راه‌اندازی مسیر و نیز بیشینه کردن قابلیت اطمینان مسیر پردازش است. آن‌ها از روش  $\epsilon$ -constraint برای نشان دادن قابلیت مدل استفاده کردند و سپس با استفاده از دو الگوریتم چندهدفه رقابت استعماری و ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب به حل مسئله در ابعاد بزرگ پرداختند و نتایج این دو الگوریتم را در یک مثال موردی با یکدیگر مقایسه کردند.

مرورهای انجام شده بالا نشان‌دهنده ضرورت و اهمیت زیاد هزینه‌های حمل‌ونقل و قابلیت اطمینان ماشین‌ها و مسیر پردازش در سیستم‌های تولید سلولی است. این نتایج نشانگر این موضوع است که در نظر گرفتن قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار را می‌توان به‌عنوان یک شکاف در نظر گرفت. در این مقاله، قصد بر این است که در یک سیستم تولید سلولی، قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار که به دو دسته وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار درون و بین سلولی تقسیم‌بندی می‌شوند را به‌طور هم‌زمان لحاظ کرد. در این سیستم تولید سلولی ماشین‌ها به‌صورت موازی با یکدیگر کار می‌کنند و نیز جابجایی قطعات در درون هر سلول و بین سلول‌ها با توجه به مسیر پردازش هر یک از قطعات، توسط وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار صورت می‌گیرد. نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از: (۱) قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار درون و بین سلولی به‌صورت هم‌زمان. (۲) بیشینه‌سازی کمترین قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار درون‌سلولی در هر سلول. (۳) محاسبه قابلیت اطمینان وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار درون‌سلولی در حالتی که نرخ خرابی وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار هر یک از سلول‌ها بتواند از یکی از دو نوع وایبل و یا نمایی باشد.

### ۳- تعریف مسئله

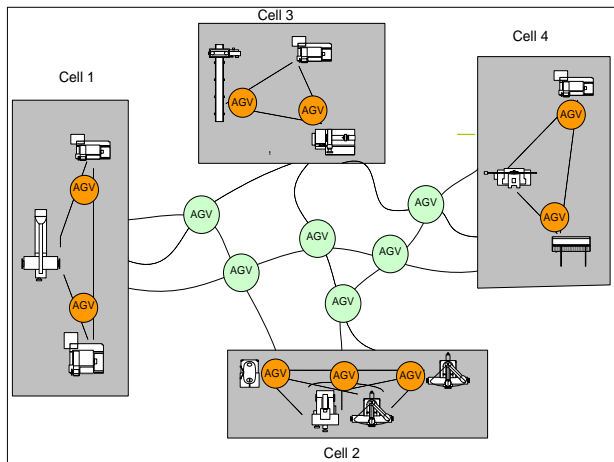
یک سیستم تولید سلولی را در نظر بگیرید که در آن قطعات پس از انجام عملیات توسط ماشین‌ها، بر اساس توالی عملیاتشان در درون سلول و یا بین دو سلول توسط وسایل نقلیه هدایت‌شونده جابجا می‌شوند. وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول جابجایی درون سلول و دسته دوم جابجایی بین سلولی را انجام می‌دهند. وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار درون‌سلولی و بین سلولی به‌صورت موازی با یکدیگر به قطعات پس از انجام عملیات توسط ماشین‌ها، سرویس می‌دهند. تا زمانی که دست کم یک وسیله نقلیه هدایت‌شونده خودکار در هر سلول و بین سلول‌ها باشد، انتقال قطعات امکان‌پذیر است. نرخ

پرداخت و با استفاده از یک مدل چندهدفه عدد صحیح مختلط، قابلیت اطمینان ماشین‌های سیستم و هزینه‌های سیستم را مورد بررسی قرار داد. در این مدل، رویکرد طراحی سیستم تولید سلولی به‌گونه‌ای است که مسیرهای پردازش با بیشترین قابلیت اطمینان ماشین‌ها انتخاب می‌شود. در این مقاله، تدارکات مسیریابی مجدد، به کاربر کمک می‌کند تا مشکلات خرابی ماشین را در حین پردازش یک قطعه حل کند. صفایی و همکاران [۲۳] یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی عدد صحیح برای ترکیب برنامه تعمیرات پیشگیرانه در سیستم‌های تولید سلولی با اهداف کمینه کردن هزینه‌های ماشین، جابجایی درون‌سلولی و بین سلولی مواد و هزینه‌های تعمیرات پیشگیرانه و تعمیرات خرابی‌ها، ارائه دادند و مدل پیشنهادی را با برنامه‌ریزی فازی حل کردند. همچنین چگونگی تأثیر تعمیرات پیشگیرانه و تعمیر خرابی‌ها بر زمان در دسترس ماشین را مورد بررسی قرار دادند. ساکونا و جین [۲۴] نیز یک مدل CMSD پیشنهاد کردند که موضوع قابلیت اطمینان را با ملحوظ کردن تأثیر خرابی ماشین و موضوع برنامه‌ریزی تولید را با ملحوظ کردن نگهداری موجودی، تولید داخلی و برون‌سپاری یکپارچه می‌کند. مشخصه‌های طراحی در نظر گرفته شده شامل اندازه دسته تولید، اندازه دسته حرکت درون و بین سلولی، تقسیم دسته تولیدی، مسیر پردازش جایگزین، توالی عملیات، نسخه‌های ماشینی چندگانه، ظرفیت ماشین، نیازمندی‌های ابزار برش، توازن بار کاری، محدودیت مجاورت ماشین، خرید ماشین و پیکربندی مجدد سلولی است. در ادامه آقاجانی و همکاران [۲۵] یک مدل عدد صحیح مختلط چندهدفه پویا در زمینه‌ی CMSD به همراه تقاضای احتمالی و تحلیل قابلیت اطمینان ماشین‌ها ارائه کردند. توابع هدف آن‌ها شامل کمینه کردن هزینه کارایی پایین ماشین و حداکثر میزان نرخ خرابی سیستم در افق برنامه‌ریزی به‌طور هم‌زمان است. آن‌ها مدل خود را در ابعاد کوچک با استفاده از  $\epsilon$ -constraint و در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۱</sup> حل کردند و برای راستی آزمایی از یک مثال عددی استفاده کردند. همچنین جبرعامل و همکاران [۲۶] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و یک با توجه به مسیرهای جایگزین و قابلیت اطمینان ماشین‌آلات ارائه کردند. آن‌ها در مدل خود به دنبال افزایش قابلیت اطمینان مسیر پردازش در سلول‌ها و کمینه کردن مجموع هزینه‌های تولید و مجموع زمان در CMS بودند. سپس در ابعاد کوچک با استفاده از رویکرد  $\epsilon$ -constraint و ارائه یک مثال عددی، به تجزیه و تحلیل پرداختند. یکی از نقاط ضعف مقاله مطرح شده، عدم توانایی آن در حل مسئله در ابعاد بزرگ است. در ادامه این مقاله، جوزدانی و همکارانش [۲۷] با اضافه کردن هزینه راه‌اندازی مسیر<sup>۲</sup> و میزان تقاضای هر بخش مدل ریاضی ارائه شده توسط جبرعامل و همکاران [۲۶] را بهبود دادند و

1. Non-sorting genetic algorithm

2. Setting up

خرابی وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار درون‌سلولی از یکی دو تابع توزیع نمایی و یا وایبل و نیز نرخ خرابی وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار بین سلولی از تابع توزیع نمایی پیروی می‌کند. شکل (۱) ترسیمی از سیستم تولید سلولی مورد نظر را در بردارد.



شکل (۱): نمایش حرکت درون و بین سلولی توسط AGV

**اندیس‌ها:**

$p$	شمارنده قطعات
$m$	شمارنده ماشین
$o$	شمارنده عملیات
$v$	شمارنده وسایل نقلیه خودکار بیرون سلولی ( $AGV_v$ )
$a$	شمارنده وسایل نقلیه خودکار درون سلولی ( $AGV_a$ )
$c$	شمارنده سلول

**پارامترها:**

$CH_{pvcc'}$	هزینه جابجایی قطعه $p$ توسط $AGV_v$ از سلول $c$ به $c'$
$CI_{pamm'c}$	هزینه جابجایی قطعه $p$ توسط $AGV_a$ از ماشین $m$ به $m'$ در سلول $c$
$C_{pomc}$	هزینه عملیات $o$ بر روی قطعه $p$ توسط ماشین $m$ در سلول $c$
$T_{pomc}$	مدت‌زمان عملیات $o$ بر روی قطعه $p$ توسط ماشین $m$ در سلول $c$
$T_{poamm'c}$	مدت‌زمان جابجایی قطعه $p$ توسط $AGV_a$ از ماشین $m$ به $m'$ در سلول $c$ بعد از انجام عملیات $o$
$T_{povcc'}$	مدت‌زمان جابجایی قطعه $p$ توسط $AGV_v$ از سلول $c$ به $c'$ بعد از انجام عملیات $o$
$E$	مجموعه کارگاه‌هایی که از نرخ خرابی نمایی تبعیت می‌کنند.
$WI$	مجموعه کارگاه‌هایی که از نرخ خرابی وایبل تبعیت می‌کنند.
$L'_a$	مدت‌زمان در دسترس بودن $AGV_a$
$L_v$	مدت‌زمان در دسترس بودن $AGV_v$
$\alpha_{pom}$	۱ اگر ماشین $m$ توانایی انجام عملیات $o$ بر روی قطعه $p$ داشته باشد، در غیر این صورت ۰

**متغیرها:**

$Z_{pomc}$	۱ اگر ماشین $m$ برای انجام عملیات $o$ بر روی قطعه $p$ در سلول $c$ انتخاب شود، در غیر این صورت ۰.
$AGV_{ac}$	۱ اگر $AGV_a$ به سلول $c$ تخصیص داده شود، در غیر این صورت ۰.
$X_{po+1amm'c}$	۱ اگر عملیات $o$ بر روی قطعه $p$ توسط ماشین $m$ انجام شود و از $AGV_a$ برای انتقال به ماشین $m'$ برای انجام عملیات $o+1$ در سلول $c$ استفاده شود، در غیر این صورت ۰.
$Y_{po+1vmm'cc'}$	۱ اگر عملیات $o$ بر روی قطعه $p$ توسط ماشین $m$ در سلول $c$ انجام شود و از $AGV_v$ برای انتقال به ماشین $m'$ برای انجام عملیات $o+1$ در

**۳-۱- مفروضات**

- مفروضات مسئله مورد بررسی شامل موارد زیر است:
- ✓ برای تولید هر نوع قطعه تعداد مشخصی عملیات مورد نیاز است که باید بر اساس توالی عملیات موجود در برگه مسیر قطعات پردازش شود.
- ✓ انتقال مواد درون‌سلولی و بین سلولی توسط دو دسته وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار صورت می‌گیرد.
- ✓ حرکت بین سلولی زمانی رخ می‌دهد که دو عملیات متوالی از یک نوع قطعه در دو سلول متفاوت پردازش شوند. هرگاه دو عملیات متوالی از یک نوع قطعه در درون یک سلول پردازش شوند، یک حرکت درون‌سلولی اتفاق افتاده است.
- ✓ وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار در هر سلول دارای یکی از دو نوع نرخ خرابی نمایی و یا وایبل است.
- ✓ وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار بین سلولی از نرخ خرابی نمایی پیروی می‌کنند.
- ✓ وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار از سیاست آماده به کار فعال پیروی می‌کنند.
- ✓ وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار دو حالت سالم و خراب دارند.
- ✓ خرابی وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار آسیب‌ی به کل سیستم تولید وارد نمی‌کند.
- ✓ جابجایی‌های درون‌سلولی و بین سلولی انواع قطعات هزینه‌های متفاوت دارند.
- ✓ مدت‌زمان کل در دسترس بودن وسایل نقلیه هدایت‌شونده خودکار درون‌سلولی و بین سلولی مشخص است.

**۳-۲- نمادها**

از نمادهای زیر در مدل‌سازی مسئله استفاده می‌شود:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M H'_{poamm'c} \leq M * AGV_{ac} \quad (10)$$

$$\forall a, c \quad m, m' \in M_c$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{c=1}^C T_{poamm'c} H'_{poamm'c} \leq L'_a \sum_{c=1}^C AGV_{ac} \quad (11)$$

$$\forall a ; m, m' \in M_c$$

$$\sum_{c=1}^C AGV_{ac} \leq 1 \quad \forall a \quad (12)$$

$$\sum_{a=1}^A AGV_{ac} \geq 1 \quad \forall c \quad (13)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C T_{povcc'} H_{povcc'} \leq L_v \quad \forall v \quad (14)$$

$$H'_{poamm'c} \leq AGV_{ac} \quad (15)$$

$$\forall p, o, m, m', a, c ; m, m' \in M_c ; m \neq m'$$

معادله (۱) به دنبال کمینه کردن هزینه های تولید که شامل هزینه عملیاتی قطعات در همه سلول ها و هزینه جابجایی درون سلولی قطعات در هر سلول توسط AGV های درون سلولی و نیز هزینه جابجایی بین سلولی قطعات توسط AGV های بین سلولی است، می باشد. معادله (۲) به دنبال بیشینه کردن کمترین قابلیت اطمینان AGV در درون هر سلول است. معادله (۳) نیز به دنبال افزایش قابلیت اطمینان AGV های بین سلولی است. معادله (۴) بیانگر این است که در صورتی یک ماشین می تواند برای انجام عملیات انتخاب شود که توانایی انجام آن عملیات را داشته باشد. معادله (۵) نشان می دهد که زمانی جابجایی درون سلولی رخ می دهد که یک AGV درون سلولی و دو ماشین بر اساس توالی عملیات و توانایی هر یک انتخاب شده باشند. معادله (۶) تضمین می کند که انجام عملیات روی هر قطعه تنها باید توسط یک ماشین در یک سلول صورت پذیرد. معادله (۷) نشان می دهد که زمانی جابجایی بین سلولی رخ می دهد که یک AGV بین سلولی و دو ماشین بر اساس توالی عملیات در دو سلول مجزا و بر اساس توانایی هر یک، انتخاب شده باشند. اگر دو ماشین متفاوت بر اساس توالی عملیات در یک سلول انتخاب شود بر اساس معادله (۸) باید حتماً AGV درون سلولی در آن انتخاب شود و به همین ترتیب اگر دو ماشین بر اساس توالی عملیات در دو سلول مختلف انتخاب شوند، بر اساس معادله (۹) باید حتماً AGV بین سلولی در آن نیز انتخاب شود. معادله (۱۰) تضمین می کند که زمانی امکان انتقال در یک سلول امکان پذیر است که به آن سلول یک AGV درون سلولی اختصاص داده شده باشد. در معادله (۱۱) مدت زمان استفاده از AGV درون سلولی نباید از حد مجاز زمان در دسترسی خود تجاوز کند. معادله (۱۲) بیانگر این است که هر AGV درون سلولی تنها به یک سلول تخصیص می یابد. معادله (۱۳) تضمین می کند که در هر سلول باید دست کم یک AGV درون سلولی تخصیص یابد. بر اساس معادله (۱۴) مدت زمان استفاده از AGV بین سلولی نباید از حد مجاز زمان در دسترسی خود تجاوز کند. در نهایت بر اساس

سلول  $C'$  استفاده شود، در غیر این صورت  $\cdot$ .  
 $H_{povcc'}$  ۱ اگر پس از انجام عملیات  $O$  بر روی قطعه  $p$ ،

ام  $AGV_v$  برای انتقال از سلول  $C$  به  $C'$  انتخاب شود، در غیر این صورت  $\cdot$ .

$H'_{poamm'c}$  ۱ اگر پس از انجام عملیات  $O$  بر روی قطعه  $p$

توسط ماشین  $m$ ،  $AGV_a$  ام برای انتقال به ماشین  $m'$  در سلول  $C$  انتخاب شود، در غیر این صورت  $\cdot$ .

قابلیت اطمینان وسایل نقلیه خودکار درون سلولی.  $R'_A(t)$

قابلیت اطمینان وسایل نقلیه خودکار بیرون سلولی.  $R''_V(t)$

### ۳-۳- مدل ریاضی

مدل ریاضی پیشنهادی دارای سه تابع هدف است که شامل کمینه کردن هزینه های تولید، بیشینه سازی قابلیت اطمینان AGV های درون سلولی و بیشینه کردن قابلیت اطمینان AGV های بین سلولی می باشد. در قابلیت اطمینان AGV های درون سلولی، از آنجایی که انتقال قطعات دارای توالی منظمی بر حسب چیدمان نیست به دنبال بیشینه سازی کمترین قابلیت اطمینان AGV در هر سلول هستیم. بر این اساس مدل ریاضی مسئله به صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$\text{Min} \sum_{p=1}^P \sum_{o=1}^O \sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C T_{pomc} Z_{pomc} C_{pomc} + \sum_{c=1}^C \sum_{c' \neq c}^C \sum_{p=1}^P \sum_{v=1}^V CH_{pvc'c'} \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{o=1}^O Y_{po o+1vmm'cc'} + \quad (1)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A \sum_{m=1}^M \sum_{m' \neq m}^M \sum_{c=1}^C CI_{pamm'c} \sum_{o=1}^O X_{po o+1amm'c} \quad (2)$$

$$\text{Max} R'_A(t) = \left( \text{Min}_{C \in E} \left( 1 - \prod_{a=1}^{n_{ac}} (1 - R_{ac}) \right), \text{Min}_{C \in W} \left( 1 - \prod_{a=1}^{n_{ac}} (1 - R_{ac}) \right) \right)$$

$$\text{Max} R''_V(t) = 1 - \prod_{v=1}^V (1 - R_v) \quad (3)$$

s.t.

$$Z_{pomc} \leq \alpha_{pom} \quad \forall p, o, m, c \quad (4)$$

$$Z_{pomc} + Z_{po+1m'c} + H'_{poamm'c} \leq 2 + X_{po o+1amm'c} \quad (5)$$

$$\forall p, o, m, m', a, c ; m, m' \in M_c ; m \neq m'$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{c=1}^C Z_{pomc} = 1 \quad \forall p, o \quad (6)$$

$$Z_{pomc} + Z_{po+1m'c} + H_{povcc'} \leq 2 + Y_{po o+1vmm'cc'} \quad (7)$$

$$\forall p, o, m, m', v, c, c' \quad c \neq c'$$

$$Z_{pomc} + Z_{po+1m'c} \leq 1 + H'_{poamm'c} \quad (8)$$

$$\forall p, o, m, m', a, c \quad m, m' \in M_c \text{ and } m \neq m'$$

$$Z_{pomc} + Z_{po+1m'c} \leq 1 + \sum_{v=1}^V H_{povcc'} \quad (9)$$

$$\forall p, o, m, m', c, c' \quad c \neq c'$$

حرکت تصادفی با الگوی خاص است. به منظور جلوگیری از به دام افتادن در بهینه محلی. در رویه حرکت تعالی هر جواب به سمت ناحیه دارای جواب راهنما حرکت می‌کند و ناحیه اطراف جواب راهنما را جستجو می‌کند که این حرکت بر اساس رابطه (۱۶) انجام می‌شود:

$$nest_i^{t+1} = nest_i^t + (\alpha)(r)(S)(nest_i^t - leader_i^t) \quad (16)$$

که در آن  $nest_i^t$  و  $nest_i^{t+1}$  موقعیت فاخته  $iam$  در تکرار  $t$  و  $t+1$ ام است و  $leader_i^t$  موقعیت جواب راهنما برای فاخته  $iam$  در تکرار  $t$ ام می‌باشد و  $\alpha$  اندازه گام هست.  $S$  عددی است که طبق فرمول  $S = \frac{u}{|v|^{1/\beta}}$  محاسبه می‌شود.  $\beta$  شعاع حرکتی هست و  $v, u, r$  به ترتیب اعداد تصادفی نرمال با میانگین صفر و واریانس‌های  $\sigma_v^2, \sigma_u^2, \sigma_r^2$  است که در آن  $\sigma_v = 1, \sigma_u = 1, \sigma_r = 1$  طبق فرمول (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin \sin \left( \frac{\pi\beta}{2} \right)}{\Gamma \left[ \frac{(1+\beta)}{2} \right] \cdot \beta \cdot 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta} \quad (17)$$

در ادامه در حرکت تصادفی، ابتدا به صورت تصادفی دو جواب انتخاب می‌شوند و جواب مدنظر با احتمال  $\lambda$  به اندازه حداکثر فاصله بین دو جواب انتخابی حرکت می‌کند و جستجوی تصادفی توسط فرمول‌های (۱۸) تا (۲۰) انجام می‌گیرد:

$$x = rand \cdot (nest_j^t - nest_k^t) \quad (18)$$

$$nest_i^{t+1} = nest_i^t + P \cdot x \quad (19)$$

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } rand < \lambda \\ 0 & \text{if } rand \geq \lambda \end{cases} \quad (20)$$

که در آن  $nest_k^t$  و  $nest_j^t$  موقعیت جواب  $iam$  و  $iam$  در تکرار  $t$ ام است که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند.

الگوریتم جستجوی فاخته با الهام گرفتن از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب توسعه داده می‌شود. در این الگوریتم جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و در هر نسل جمعیت جدید بر اساس حرکت و حرکت تصادفی جمعیت جدید ایجاد می‌شود. جمعیت جدید با جمعیت نسل قبل مخلوط می‌شود و با توجه به رتبه‌بندی جواب‌های الگوریتم، جواب‌های نامغلوب شناسایی می‌شوند. برای نسل بعدی مطابق مرجع [۳۲] جمعیت‌های جدید با جمعیت نسل قبلی با یکدیگر مخلوط می‌شوند و بر اساس رویه مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها و فاصله ازدحامی اعضای دارای شرایط مناسب‌تر برای نسل بعدی مطابق مرجع [۳۳] انتخاب می‌شوند. در پایان هر نسل جواب‌های نامغلوب گزارش می‌شوند. در بخش استراتژی انتخاب جواب راهنما برای حرکت تعالی، عملگر مسابقه‌ای دودویی به کار گرفته می‌شود. این کار برای ایجاد جمعیت بعدی و به هدف ایجاد گستردگی در مرز بهینه پارتو

معادله (۱۵) در صورتی که AGV درون سلولی نوع  $iam$  به یک سلول تخصیص یابد، از آن AGV درون سلولی به ازای جابجایی بین ماشین‌های مختلف برای انجام عملیات متفاوت می‌توان استفاده کرد.

#### ۴- متدولوژی حل

اکثر مسائل در زمینه قابلیت اطمینان از نوع سخت هستند [۲۹] و نیز در مدل ارائه شده قابلیت اطمینان AGV‌های درون سلولی از دو نوع نرخ خرابی و ایبل و یا نمای تبعیت می‌کنند و اینکه فرمول بسته‌ای برای محاسبه مقدار قابلیت اطمینان زمانی که نرخ خرابی و ایبل باشد، وجود ندارد. در نتیجه باید از تکنیک‌هایی مانند شبیه‌سازی برای برآورد قابلیت اطمینان در این حالت استفاده شود. از این جهت می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده در بخش (۳) نیز در زمره مسائل سخت قرار دارد و برای حل آن نیاز به استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است. یکی از الگوریتم‌های حل مسائل چندهدفه که امروزه مورد توجه قرار دارد، الگوریتم جستجوی فاخته با مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب (NSCS) است که توجه محققین را به خود جلب کرده است.

#### ۴-۱- الگوریتم جستجوی فاخته با مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب (NSCS)

این الگوریتم یکی از الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت است که امروزه به عنوان یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های حل به حساب می‌آید. پایه و اساس اولیه این الگوریتم جستجوی فاخته است که در سال ۲۰۰۹ توسط یانگ و دب [۳۰] ارائه شد و توسعه‌ی زیادی در زمینه‌ی بهبود عملکرد این الگوریتم در سال‌های اخیر صورت گرفته است [۳۱]. این الگوریتم الهام گرفته از زندگی پرنده فاخته هست و مبنای آن پدیده تخم‌گذاری این پرنده است. این پرنده در لانه پرنده‌ها دیگر تخم‌گذاری می‌کند و دو حالت برای تخم‌های این پرنده می‌تواند رخ دهد. حالت اول این است که پس از تخم‌گذاری در آشیانه پرنده‌ها دیگر، اگر پرنده میزبان تخم فاخته را شناسایی کند این تخم را نابود می‌کند و یا آشیانه‌اش را عوض می‌کند. در حالت دوم تخم پرنده فاخته به دلیل شباهت با دیگر تخم‌ها شناسایی نمی‌شود و بعد از اینکه جوجه فاخته سر از تخم بیرون بیاورد تخم‌های دیگر را نابود می‌کند. بر اساس توضیحات ارائه شده پرنده‌های فاخته ناحیه‌های گوناگون را جستجو کرده‌اند و تخم‌های خود را در ناحیه‌های مختلف پراکنند. ناحیه‌ای که بیشترین فاخته‌ها بتوانند سر از تخم بیرون بیاورند، ناحیه‌ای مطلوب‌تر است که جستجوی آن باید بیشتر صورت گیرد. در این صورت فاخته‌های دیگر در نسل‌های بعدی تمایل به تخم‌گذاری در مناطقی پیدا می‌کنند که کمترین نابودی تخم را داشته باشند. این رویه نشانگر همگرایی الگوریتم فاخته است. بنابراین در هر تکرار یک فاخته دو حرکت دارد حرکت نخست حرکت تعالی<sup>۱</sup> است و حرکت بعدی

1. Levy flight

توجه به تعداد قطعات و تعداد فرآیندهای لازم بر روی هر قطعه یک ماتریس با بعد  $[p, \text{Max } O]$  ایجاد می‌شود. منظور از  $p$  تعداد قطعات و  $\text{Max } O$  ماکزیمم تعداد عملیات لازم برای قطعات است. سپس اعداد تصادفی یکنواخت بین  $[1, C]$  که  $C$  نشانگر تعداد سلول است، در این ماتریس تولید می‌شوند. با استفاده از این ماتریس می‌توان دریافت که عملیات مربوط به هر قطعه، باید در چه سلولی انجام شود. این نمایش در شکل (۲) آورده شده است.

$$\begin{array}{c}
 \text{Max Operation} \\
 \begin{array}{cccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 \begin{array}{c} p \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} & \left[ \begin{array}{cccccccc}
 1 & 3 & 3 & 2 & 1 & 1 & - \\
 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & - & - \\
 2 & 3 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\
 2 & 3 & 3 & 1 & 1 & 2 & 2 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}$$

شکل (۲): تخصیص فرآیند قطعات به سلول‌های تولیدی

فرض کنید تعداد قطعات و تعداد سلول‌ها در یک خط تولیدی به ترتیب ۴ و ۳ می‌باشد. تعداد عملیات قطعات متفاوت است و ماکزیمم تعداد عملیات در چهار قطعه برابر با ۷ است. با توجه به شکل (۲) می‌توان دریافت که قطعه اول نیازمند شش عملیات است که عملیات اول در سلول ۱، عملیات دوم و سوم در سلول ۳، عملیات چهارم در سلول ۲ و در نهایت عملیات پنجم و ششم باید در سلول ۱ صورت گیرد.

در مرحله دوم، همانند مرحله اول با توجه به تعداد قطعات و تعداد فرآیندهای لازم بر روی هر قطعه یک ماتریس با بعد  $[p, \text{Max } O]$  ایجاد می‌شود. اعداد تصادفی بین  $[1, M]$  که  $M$  بیانگر تعداد ماشین است، در این ماتریس تولید می‌شوند. با استفاده از این ماتریس می‌توان دریافت کدامیک از ماشین‌ها وظیفه انجام عملیات مربوط به هر قطعه در سلول مورد نظر را دارند. فرض کنید تعداد ماشین‌ها در همه سلول‌ها یکسان و به تعداد ۵ عدد در هر سلول است. بر اساس سطر اول شکل (۳)، عملیات اول قطعه اول در سلول ۱ توسط ماشین چهارم، عملیات دوم و سوم در سلول ۳ به ترتیب توسط ماشین‌های سوم و اول، عملیات چهارم در سلول ۲ توسط ماشین پنجم، عملیات پنجم و ششم در سلول ۱ نیز به ترتیب توسط ماشین‌های دوم و سوم اجرا می‌شوند.

$$\begin{array}{c}
 \text{Max Operation} \\
 \begin{array}{cccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 \begin{array}{c} p \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} & \left[ \begin{array}{cccccccc}
 4 & 3 & 1 & 5 & 2 & 3 & - \\
 1 & 3 & 2 & 3 & 5 & - & - \\
 1 & 4 & 3 & 5 & 1 & 2 & 5 \\
 5 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 & 1 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}$$

شکل (۳): تخصیص ماشین جهت انجام عملیات در سلول‌ها

در مرحله سوم و نهایی به دنبال تخصیص AGV‌های درون‌سلولی به سلول‌ها هستیم. در این مرحله، یک ماتریس با بعد  $[1, a]$  ایجاد می‌شود که در آن  $a$  بیانگر تعداد AGV‌های

به کار می‌رود. در این راستا هر یک از جواب‌های انتخابی که دارای رتبه کمتر باشد انتخاب می‌شوند و در صورتی که رتبه جواب‌های انتخابی برابر باشد، جواب دارای فاصله ازدحامی بیشتر انتخاب می‌شود. عملکرد نخبه‌گرایی که به منظور ایجاد نسل جدید بهتر از نسل قبلی به کار می‌رود، به دو شکل زیر است:

- از هر نسل به نسل بعدی درصد معینی از بهترین جواب‌های هر جمعیت منتقل خواهند شد. مکانیسم این انتقال با شروع از لبه‌های پایین به سمت لبه‌های بالاتر خواهد بود و از میان حل‌های یک لبه از فاصله ازدحامی بیشتر به کمتر هست.
- نخبه‌گرایی دیگر این الگوریتم مقایسه جمعیت ایجاد شده با حل‌های موجود در آخرین لبه نامغلوب است. چنانچه جمعیت جدید ایجاد شده توسط هیچ‌یک از حل‌های آخرین لبه مغلوب نشد، اجازه ورود به نسل جدید را خواهد داشت. مزیت اصلی این نخبه‌گرایی جلوگیری از همگرایی زودرس الگوریتم در عین حفظ بهبود نسل بعدی است.

و در نهایت شرط به‌کارگیری توقف الگوریتم، رسیدن به تعداد معینی از تکرارها در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۲- الگوریتم چندهدفه علف‌های هرز (MOIWO)

دیگر الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت MOIWO است که امروزه به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین الگوریتم‌ها است. این الگوریتم بر اساس ویژگی‌های اولیه و طبیعی علف‌های هرز مانند تولید بذرها، رشد برای بقا در یک کلونی عمل می‌کند که در سال ۲۰۱۱ توسط کاندو و همکارانش [۳۴] ارائه شد. علف‌های هرز گیاهانی هستند که با رشد سریع در مکان‌هایی ناخواسته به وجود می‌آیند و تهدید مهمی برای گیاهان زراعی بشمار می‌روند. علف‌های هرز بسیار مقاومند و به‌راحتی در مقابل تغییرات محیطی خود را وفق می‌دهند. طبق تعریف، علف هرز گیاهی است که در مکان‌های ناخواسته، وابسته به شرایط تولید نمو می‌کند و برای گیاهان زراعی به‌عنوان آفت جدی است و باعث عدم ادامه رشد آن‌ها می‌شود. این الگوریتم در عین سادگی، دریافتن نقاط بهینه بسیار مؤثر و سریع است. در ابتدا یک میزان دانه در فضای جواب پخش می‌شود. دانه‌ها رشد می‌کنند و به علف تبدیل می‌شوند و سپس علف‌ها با توجه به کفایت شروع به زادوولد می‌کنند و هرچه کفایت آن‌ها بهتر باشد تعداد زاد ولد آن‌ها بیشتر است. در طول زمان پراکندگی محیطی پخش دانه در کنار علف کمتر می‌شود و بعد از تبدیل دانه‌های جدید به علف، برای نسل بعدی علف‌های دارای کفایت بهتر باقی می‌مانند و بقیه علف‌ها حذف می‌شوند. این پدیده حذف رقابتی هم نامیده می‌شود و تا زمان رسیدن به علف با بهترین مطلوبیت ادامه می‌یابد.

#### ۴-۳- روش نمایش جواب

به‌منظور ارائه نحوه نمایش جواب، سه مرحله و سه ماتریس از اعداد تصادفی با بعدهای مختلف طراحی شده است. در مرحله ابتدایی، با



مطلوب اشاره می‌کند که هدف ماکزیمم کردن این نسبت است. به عبارت دیگر، تاگوچی تحلیل تغییرات را با استفاده از  $S/N$  که به طور مناسب انتخاب شده است را به صورت رابطه (۲۱) محاسبه می‌کند که در آن  $y_i$  مقدار پاسخ مشاهده شده در آزمایش است:

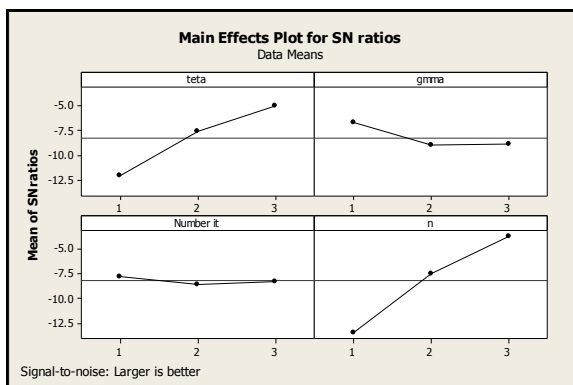
$$S/N = -10 * \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (21)$$

#### ۴-۴-۱- پارامترهای شبیه‌سازی

در محاسبه تابع هدف قابلیت اطمینان، امکان انتخاب دو نوع نرخ خرابی برای ماشین‌ها وجود دارد. وایبل یکی از توابع توزیع معروف در نظریه قابلیت اطمینان است که برای اجزای سیستم در دو حالت افزایش نرخ خرابی شکست (IFR) و نیز کاهش نرخ خرابی شکست (DFR) کارایی دارد. با ایجاد مقادیر مثبت و یا منفی در دو پارامتر ورودی این تابع توزیع که  $\theta$  و  $\gamma$  می‌باشند، دو حالت رخ می‌دهد [۳۷]. به منظور تخمین پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$  نیز تعداد ماشین‌ها در هر کارگاه و همچنین با تعریف سطوح مختلف تکرار به ازای هر ۳۰۰ ثانیه ( $t=300$ ) مقادیر بهینه تعداد سطوح در جدول (۱) و مقادیر سیگنال به نویز به دست آمده در ۳ سطح در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول (۱): مقادیر بهینه پارامترهای شبیه‌سازی

	پارامترها	سطوح پارامترها			مقادیر بهینه
		۱	۲	۳	
simulation	Teta	۴۰	۶۰	۸۰	۸۰
	Gamma	۰/۶	۰/۸	۱	۰/۶
	Number it	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰
	N	۳	۵	۷	۷



شکل (۵): مقادیر سیگنال به نویز پارامترهای شبیه‌سازی

#### ۴-۴-۲- پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری

پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر اساس شاخص یکنواختی فضا (DM) و شاخص فاصله از نقطه ایدئال (MID) جواب‌های به دست آمده آن‌ها تنظیم می‌شوند. در اینجا پاسخ به کار رفته در روش تاگوچی برای هر جواب پیدا شده عبارت است از  $MOCV = \frac{MID}{DM}$  [۳۸]. هر چه مقدار متغیر پاسخ کمتر باشد بهتر

درون سلولی است. با توجه به این شرط که در هر سلول باید حداقل یک AGV موجود باشد، از تابع رندپریم به تعداد سلول‌ها استفاده می‌شود تا بتوان این حالت را پیاده‌سازی کرد. فرض کنید تعداد ۱۰ عدد AGV درون سلولی باید به ۳ سلول تخصیص یابند. در این حالت برای ۳ مقدار اولیه سطر ماتریس از تابع رندپریم استفاده شده و به هر سلول یک AGV تخصیص می‌یابد. سپس سایر AGV‌ها به صورت تصادفی بین سلول‌ها پخش می‌شوند. به منظور تفهیم بیشتر شکل (۴) را در نظر بگیرید.

a

$$[1 \ 3 \ 2 \ 1 \ 3 \ 3 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1]$$

شکل (۴): تخصیص AGV‌های درون سلولی به سلول‌ها

شکل (۴) بیان می‌کند که AGV‌های یک، دو و سه به ترتیب به سلول‌های ۱، ۳ و ۲ تخصیص یافته‌اند و از AGV‌های باقیمانده، سه AGV دیگر در سلول ۱، دو AGV به سلول ۲ و در نهایت دو AGV آخر در سلول ۳ قرار گرفته‌اند.

#### ۴-۴-۳- تنظیم پارامتر

همواره فرآیندها یا سیستم‌های مورد مطالعه تحت تأثیر عوامل قابل کنترل و غیر قابل کنترل مختلفی قرار دارند که ترکیبات مختلف این عوامل منتج به خروجی‌هایی می‌شوند که یک یا چند پاسخ قابل مشاهده دارند. طرح آزمایش دنباله‌ای از این آزمون‌هاست که در آن‌ها تغییرات مورد نظر در متغیرهای ورودی فرآیند یا سیستم اعمال می‌شوند به قسمی که بتوان علل تغییرات در پاسخ را مشاهده و مشخص کرد. در همه الگوریتم‌های فرا ابتکاری همواره پارامتر یا پارامترهایی وجود دارند که مقادیر آن‌ها بسته به هر مسئله‌ای باید تعیین شوند. برای تنظیم پارامترهای موجود در الگوریتم‌های پیشنهادی این مقاله، از روش آماری طراحی آزمایش‌های تاگوچی<sup>۱</sup> استفاده شده است. تاگوچی یک خانواده از ماتریس‌های آزمایش‌های فاکتوریلی جزئی را بهبود داد طوری که توانست پس از آزمایش‌های زیاد، آزمایش‌ها را به گونه‌ای اجرا کرد که تعداد آن‌ها برای یک مسئله خاص کاهش یابد. در روش تاگوچی، آرایه‌های متعامد برای مطالعه‌ی تعداد زیادی از متغیرهای تصمیم با تعداد کمی از آزمایش‌ها استفاده شده است [۳۵]. تاگوچی فاکتورها را به دو کلاس اصلی فاکتورهای قابل کنترل<sup>۲</sup> و فاکتورهای نویز<sup>۳</sup> تقسیم می‌کند. فاکتورهای نویز آن‌هایی هستند که نمی‌توانند به طور مستقیم کنترل شوند. زمانی که حذف فاکتورهای نویز غیرممکن و نشدنی است، روش تاگوچی به دنبال حداقل کردن تأثیر نویزها و تعیین سطح بهینه فاکتورهای قابل کنترل مهم است [۳۶]. تاگوچی داده‌های تکراری را به مقادیری تبدیل می‌کند که معیاری برای ارزیابی تغییرات در نتایج است. این تبدیل یک نسبت  $S/N$ <sup>۴</sup> است. قسمت S به مقادیر مطلوب اشاره می‌کند و قسمت N به مقادیر غیر

1. Taguchi Design
2. Controllable
3. Noise
4. Signal-to-Noise

۴-۵- شاخص‌های ارزیابی الگوریتم‌های چندهدفه

یکی از مشکلات که در حل مسائل چندهدفه وجود دارد چگونگی ارزیابی کیفیت پاسخ‌های نهایی است که به دلیل تناقض اهداف به کار رفته گاهی امری پیچیده خواهد بود. در مسائل چندهدفه در پایان حل، مجموعه‌ای از جواب‌ها ایجاد می‌شوند که باید با توجه به این مجموعه از حل‌ها راجع به عملکرد الگوریتم اظهار نظر شود. در این مقاله ۵ معیار عملکردی به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۵-۱- زمان اجرای الگوریتم (CPU Time)

زمان اجرای الگوریتم عبارت است از زمان محاسباتی لازم برای حل هر مسئله از شروع تا پایان. زمان یک معیار از جنس هزینه هست و هر چه مقدار آن کمتر باشد الگوریتم مناسب‌تر هست.

۴-۵-۲- شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل<sup>۱</sup>

با استفاده از این شاخص، فاصله بین جواب‌های نا مغلوب حاصله و نقطه ایده‌آل حاصل می‌شود. این شاخص از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود [۳۹].

$$MID = \frac{1}{NOS} \sum_{i=1}^{NOS} c_i \quad (22)$$

جایی که  $C_i$  برابر فاصله‌ی هر عضو جمعیت از بهترین مقدار ممکن است و NOS نشان‌دهنده تعداد جواب‌های بهینه پارتو هستند. این شاخص هر چه کمتر باشد مطلوب‌تر است.

۴-۵-۳- بیشترین گسترش<sup>۲</sup>

در این معیار اندازه قطر مکعب فضایی که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نا مغلوب بکار می‌رود را اندازه‌گیری می‌کند. رابطه (۲۳) رویه محاسباتی این شاخص را نشان می‌دهد [۴۰].

$$DM = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\max_i f_i^j - \min_i f_i^j)^2} \quad (23)$$

که در آن  $m$  تعداد اهداف است. این معیار برابر با فاصله اقلیدسی بین دو جواب مرزی در فضای هدف می‌باشد. هر چه این معیار بزرگ‌تر باشد، بهتر است.

۴-۵-۴- شاخص گستردگی جواب‌های نا مغلوب<sup>۳</sup>

این شاخص به‌عنوان شاخص گستردگی نیز شناخته می‌شود. هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، الگوریتم اولویت بالاتری دارد. این شاخص بر اساس معادله (۲۴) محاسبه می‌شود [۴۰].

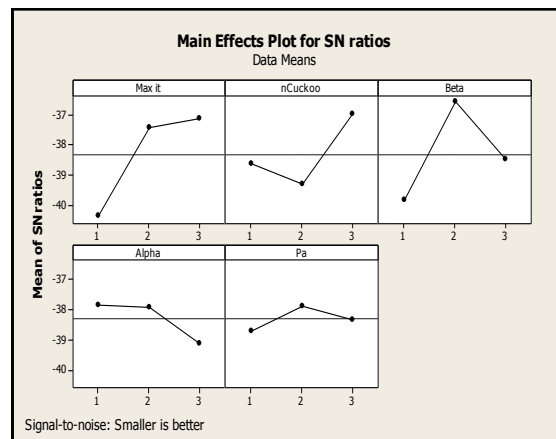
$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MID - c_i)^2}{n-1}} \quad (24)$$

که در آن  $n$  تعداد جواب‌های مرز پارتو است.

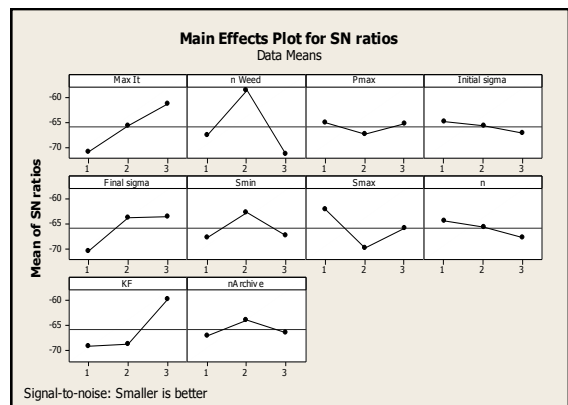
است. در پایان خروجی حاصل در جدول (۲) و شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های NSCS و MOIWO

الگوریتم	پارامترها	سطوح پارامترها			مقادیر بهینه
		۱	۲	۳	
NSCS	Max it	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰
	n Cuckoo	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰
	Beta	۱	۱.۵	۲	۱.۵
	Alpha	۰/۰.۵	۰/۰.۱	۰/۰.۱۵	۰/۰.۰۵
	Pa	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۶
	Max It	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰
MOIWO	n Weed	۱۰۰	۱۵۰	۳۰۰	۱۵۰
	P max	۱۵۰	۲۲۵	۳۰۰	۱۵۰
	Initial sigma	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۵
	Final sigma	۰/۰.۱	۰/۰.۳	۰/۰.۵	۰/۰.۵
	S min	۱	۲	۳	۲
	S max	۵	۸	۱۰	۵
	n	۲	۳	۴	۲
	KF	۱	۲	۳	۳
	n Archive	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰



شکل (۶): مقادیر سیگنال به نویز پارامترهای الگوریتم NSCS



شکل (۷): مقادیر سیگنال به نویز پارامترهای الگوریتم MOIWO

1. Mean Ideal Distance Metric (MID)
2. Maximum Spread or Diversity
3. Spread of Non-dominance Solution (SNS)

۴-۵-۵- فاصله‌گذاری<sup>۱</sup>

این معیار میزان فاصله نسبی جواب‌های متوالی را با استفاده از رابطه (۲۵) محاسبه می‌کند [۴۱].

$$SM = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (25)$$

$$d_i = \min_{k \in n \setminus \{i\}} \sum_{j=1}^m |f_j^i - f_j^k|$$

فاصله اندازه‌گیری شده برابر با کمترین مقدار مجموع قدر مطلق تفاضل در مقادیر توابع هدف بین آمین جواب و جواب‌های واقع در مجموعه نا مغلوب نهایی است. قابل ذکر است که این معیار فاصله با معیار کمترین فاصله اقلیدسی بین جواب‌ها متفاوت است. این معیار هر چه کمتر باشد بهتر است.

## ۵- تجزیه و تحلیل

در جهت راستی آزمایی مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های مطرح شده، ۳۰ مسئله با تصادفی در نظر گرفتن تعداد سلول‌ها، تعداد قطعات، تعداد AGV‌های درون و بین سلولی طراحی شده است. تعداد عملیات و تعداد قطعات بر اساس مسیر پردازش از پیش تعیین شده است. قطعات در درون و بین سلول‌ها جابجا می‌شوند که وظیفه جابجایی بر عهده AGV‌های درون و بین سلولی است. هر یک از AGV‌های بین سلولی از نرخ خرابی نمایی تبعیت می‌کنند. در صورت خرابی یکی از AGV‌های بین سلولی که در حال انتقال قطعات می‌باشند، AGV دیگری در صورت موجود بودن وظیفه AGV خراب شده را بر عهده می‌گیرد. علاوه بر آن AGV‌های درون سلولی که وظیفه جابجایی در درون هر سلول را بر عهده دارند، در هر سلول از یکی از دو نوع نرخ خرابی نمایی و یا وایبل پیروی می‌کنند و همانند AGV‌های بین سلولی، در صورت خرابی AGV دیگری در صورت امکان جایگزین می‌شود. در جدول (۳) مسئله مورد نظر نشان داده شده است. همچنین نحوه مقدار دهی به پارامترهای مدل مربوطه و برد هر یک از پارامتر، در جدول (۴) نمایش داده شده است.

پنج شاخص ارزیابی برای مقایسه کارایی الگوریتم‌ها در حل ۳۰ مسئله تولید شده در جدول (۵) نمایش داده شده است. از آنجایی که با توجه به نتایج حاصل در جدول (۵)، امکان مقایسه نتایج دو الگوریتم به صورت نموداری وجود ندارد، نیازمند تکنیکی برای مقایسه کارایی الگوریتم‌ها نسبت به هم هستیم. به منظور رتبه‌بندی کلی الگوریتم‌های پیشنهادی از نظر همه معیارهای مورد استفاده، از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه ترکیبی به نام روش تکنیک ترکیبی سلسله‌مراتبی و تاپسیس (AHP-TOPSIS) استفاده می‌شود. برای به کارگیری این روش باید در ابتدا وزن هر یک از شاخص‌های الگوریتم‌های چندهدفه، می‌بایست مشخص باشد. برای به دست آوردن وزن، نظر متخصصین در ماتریس مقایسات زوجی به کار رفته است و نتایج در جدول (۶) نمایش داده شده‌اند [۳۸].

جدول (۳): مقادیر ورودی مسائل تولید شده تصادفی

شماره مسئله	تعداد سلول	تعداد قطعات	تعداد AGV درون سلولی	تعداد AGV بین سلولی
۱	۳	۵	۳	۸
۲	۴	۴	۳	۹
۳	۳	۵	۳	۹
۴	۴	۳	۴	۹
۵	۵	۴	۴	۱۱
۶	۵	۵	۴	۱۰
۷	۶	۴	۴	۱۱
۸	۷	۴	۵	۱۳
۹	۸	۵	۵	۱۵
۱۰	۹	۵	۵	۱۵
۱۱	۱۰	۶	۵	۱۷
۱۲	۱۰	۸	۶	۱۸
۱۳	۱۱	۷	۶	۲۰
۱۴	۱۱	۹	۶	۱۹
۱۵	۱۱	۸	۶	۲۳
۱۶	۱۲	۱۰	۷	۲۳
۱۷	۱۲	۱۲	۷	۲۵
۱۸	۱۲	۱۱	۷	۲۷
۱۹	۱۲	۱۳	۷	۲۹
۲۰	۱۳	۱۲	۷	۲۸
۲۱	۱۳	۱۶	۸	۳۱
۲۲	۱۳	۱۴	۸	۲۹
۲۳	۱۳	۱۵	۸	۳۲
۲۴	۱۴	۱۳	۸	۳۳
۲۵	۱۴	۱۶	۸	۳۳
۲۶	۱۴	۱۷	۹	۳۵
۲۷	۱۴	۱۶	۹	۳۵
۲۸	۱۵	۱۵	۹	۳۷
۲۹	۱۵	۲۰	۹	۳۸
۳۰	۱۵	۲۵	۹	۴۳

جدول (۴): نحوه تولید مقادیر پارامترها

پارامتر	تابع تصادفی
$CH_{pvcc'}$	$U \sim [10, 18]$
$CI_{pamm'c}$	$U \sim [7, 12]$
$C_{pomc}$	$U \sim [5, 20]$
$T_{pomc}$	$U \sim [15, 35]$
$T_{poamm'c}$	$U \sim [10, 15]$
$T_{povcc'}$	$U \sim [25, 40]$
$E$	$Rand(1, C-1)$
$WI$	C-E
$L'_a$	$U \sim [30, 50]$
$L_v$	$U \sim [40, 80]$

جدول (۵): متوسط معیارهای عملکرد دو الگوریتم در حل ۳۰ مسئله تولیدی

شماره مسئله	الگوریتم NSCS					الگوریتم MOIWO				
	SM	DM	MID	SNS	TIME	SM	DM	MID	SNS	TIME
۱	۳۰۷۰۸۱	۷۵۵۰۰۱۹	۲۰۹۰۰۷۱	۳۶۸۷۰۷۳	۸۸۵۰	۱۶۳۰۰۴۸	۸۰۲۸۰۲۵	۶۹۶۷۰۲۹	۱۷۶۱۰۳۴	۵۷۵۰
۲	۴۰۹۰۶۷	۸۰۹۲۰۱۹	۲۰۹۳۰۶۸	۴۲۵۲۰۰۴	۹۶۳۶	۹۷۱۰۰۰	۶۹۹۸۰۵۱	۴۵۰۵۰۵۸	۱۰۹۱۰۴۵	۴۲۴۲
۳	۷۸۶۰۶۲	۹۵۷۶۰۲۱	۴۲۲۴۰۵۴	۱۳۴۹۰۴۴	۱۰۳۴۲	۱۷۴۲۰۰۱	۱۲۹۱۱۰۵۲	۸۵۲۶۰۳۹	۲۲۳۰۰۴۸	۷۹۴۶
۴	۱۴۵۲۰۰۴	۱۰۲۲۰۰۸۲	۷۱۲۵۰۶۵	۱۷۲۴۰۱۶	۱۳۳۱۸	۱۲۳۷۰۹۲	۱۳۳۳۶۰۸۰	۷۶۸۵۰۵۰	۱۸۵۳۰۵۳	۸۵۴۱
۵	۲۵۴۹۰۴۴	۱۸۱۴۵۰۷۲	۱۵۵۰۴۰۸۳	۳۸۰۶۰۶۹	۱۲۵۱۱	۱۳۱۳۰۷۵	۲۴۵۲۱۰۱۹	۱۱۵۴۰۰۵۲	۲۷۴۰۰۵۲	۹۵۴۵
۶	۱۳۳۳۰۸۳	۲۷۵۹۳۰۳۱	۹۸۹۷۰۴۰	۲۴۹۴۰۴۲	۱۲۹۲۱	۱۶۱۹۰۳۳	۲۰۷۹۷۰۰۳	۹۵۱۹۰۷۰	۲۸۱۶۰۳۶	۱۰۸۶۸
۷	۱۱۹۴۰۸۰	۲۶۸۶۲۰۴۵	۱۰۱۶۲۰۰۸	۲۹۰۲۰۶۰	۱۲۸۵۹	۲۴۴۰۰۱۵	۳۳۱۸۹۰۵۹	۱۲۴۳۲۰۷۱	۳۴۰۹۰۶۷	۱۰۰۹۶
۸	۱۳۷۷۰۷۰	۳۵۰۲۵۰۲۸	۹۴۲۳۰۰۵	۲۴۶۹۰۸۹	۱۴۶۱۶	۲۶۳۴۰۲۰	۳۱۷۰۱۰۸۶	۱۴۵۶۰۰۵۹	۴۱۱۰۰۷۸	۱۱۵۷۶
۹	۱۳۶۰۰۵۹	۳۸۸۶۱۰۷۱	۱۰۹۵۱۰۶۷	۳۰۹۰۰۷۱	۱۶۴۲۲	۴۰۷۲۰۸۶	۳۹۲۲۰۰۸۲	۱۸۳۲۴۰۱۶	۵۶۹۲۰۱۹	۱۲۰۴۹
۱۰	۱۵۱۷۰۴۷	۳۷۷۵۴۰۶۵	۱۳۳۲۲۰۶۸	۳۴۶۶۰۱۷	۱۶۹۶۵	۲۳۴۷۰۹۶	۴۱۵۶۵۰۰۶	۱۸۶۵۹۰۴۸	۴۲۸۶۰۲۵	۱۲۹۰۸
۱۱	۲۲۱۹۰۳۳	۴۵۳۸۲۰۹۰	۱۴۳۱۶۰۷۳	۴۴۳۱۰۹۷	۱۵۶۱۷	۳۹۵۱۰۶۷	۳۶۳۹۲۰۵۷	۱۵۷۷۹۰۹۳	۴۳۱۰۰۰۴	۱۳۸۹۹
۱۲	۲۷۹۶۰۲۸	۳۸۰۰۹۰۶۷	۱۲۴۰۷۰۴۳	۳۷۴۲۰۷۵	۱۷۲۳۶	۴۱۳۶۰۸۰	۵۲۶۶۷۰۶۶	۲۳۴۳۰۰۴۸	۵۹۱۱۰۵۲	۱۳۹۳۹
۱۳	۲۲۱۷۰۸۴	۶۰۴۰۳۰۷۲	۲۴۷۶۵۰۸۰	۵۶۲۵۰۲۸	۱۸۷۶۵	۳۴۵۹۰۴۸	۶۵۰۱۱۰۹۰	۲۰۰۳۲۰۷۱	۶۱۹۴۰۸۰	۱۴۶۱۴
۱۴	۳۸۹۶۰۶۵	۷۱۹۱۱۰۵۲	۳۶۰۱۱۰۱۵	۸۸۵۴۰۲۸	۱۸۲۵۹	۷۰۴۵۰۳۵	۷۵۷۴۴۰۹۸	۳۲۵۰۵۰۵۸	۱۲۹۷۱۰۰۰	۱۴۲۳۸
۱۵	۲۸۹۳۰۶۸	۷۹۲۰۹۰۶۷	۲۷۲۹۵۰۹۱	۶۱۴۲۰۷۵	۱۹۰۳۷	۷۰۹۸۰۱۴	۷۸۷۸۵۰۱۳	۲۷۹۱۸۰۲۲	۱۰۴۹۳۰۶۸	۱۴۸۶۹
۱۶	۴۱۹۸۰۵۱	۱۰۶۱۱۰۰۷۸	۳۰۴۴۳۰۸۷	۸۱۳۰۰۸۶	۱۹۵۲۴	۵۴۹۵۰۱۷	۱۱۰۰۹۲۰۹۴	۳۷۳۴۴۰۲۴	۱۰۳۶۸۰۷۷	۱۶۰۶۶
۱۷	۴۹۵۵۰۳۹	۱۳۶۱۹۷۰۰۳	۳۳۴۱۱۰۹۰	۸۹۶۵۰۸۰	۲۰۳۶۵	۷۳۴۸۰۷۰	۱۲۸۱۴۷۰۲۱	۴۵۲۶۹۰۱۴	۱۰۰۱۳۰۳۸	۱۵۶۵۹
۱۸	۶۸۱۸۰۵۹	۱۵۷۱۷۰۰۲۶	۴۱۶۰۲۰۲۳	۱۰۵۱۴۰۵۰	۲۰۳۴۶	۵۰۰۵۰۲۰	۱۵۸۳۴۴۰۲۴	۴۰۹۷۱۰۰۰	۱۰۴۹۵۰۱۷	۱۶۱۷۶
۱۹	۵۸۹۴۰۴۲	۱۸۴۶۴۱۰۶۴	۴۳۸۷۸۰۸۱	۱۱۵۱۴۰۵۰	۲۱۵۰۰	۵۴۲۲۰۳۰	۱۶۵۱۸۲۰۹۰	۴۹۹۵۳۰۱۶	۱۰۶۶۴۰۶۸	۱۷۳۰۶
۲۰	۸۲۳۵۰۶۹	۷۵۵۰۰۱۹	۲۰۹۰۰۷۱	۳۶۸۷۰۷۳	۲۱۲۴۵	۷۴۶۰۰۹۷	۲۰۷۶۸۹۰۹۶	۶۶۴۹۹۰۶۳	۱۴۰۹۲۰۹۴	۱۸۴۸۳
۲۱	۱۱۴۷۰۹۶	۱۵۴۳۴۰۲۰	۷۲۹۹۰۶۳	۲۸۸۸۰۴۸	۲۳۶۷۴	۱۴۴۱۰۶۴	۱۶۹۸۲۰۹۰	۹۱۶۸۰۷۷	۲۱۳۲۰۳۴	۱۸۹۲۴
۲۲	۲۱۹۷۰۷۷	۴۶۷۶۴۰۳۱	۱۷۳۱۳۰۷۵	۴۵۲۵۰۶۵	۲۲۱۴۱	۲۰۸۹۰۲۲	۴۸۹۱۸۰۹۶	۲۰۵۲۹۰۳۷	۵۰۰۵۰۲۰	۱۹۱۱۴
۲۳	۵۴۹۹۰۶۳	۱۴۶۴۸۳۰۲۷	۲۲۶۲۹۰۰۰	۹۵۲۱۰۱۹	۲۴۱۴۷	۶۱۸۹۰۵۹	۱۳۹۷۲۷۰۸۸	۴۵۹۲۵۰۶۵	۱۱۰۲۷۰۵۱	۱۹۱۶۵
۲۴	۳۰۷۰۸۱	۷۵۵۰۰۱۹	۲۰۹۰۰۷۱	۳۶۸۷۰۷۳	۲۴۸۹۸	۱۶۳۰۰۴۸	۸۰۲۸۰۲۵	۶۹۶۷۰۲۹	۱۷۶۱۰۳۴	۲۰۳۲۲
۲۵	۴۰۹۰۶۷	۸۰۹۲۰۱۹	۲۰۹۳۰۶۸	۴۲۵۲۰۰۴	۲۵۱۱۲	۹۷۱۰۰۰	۶۹۹۸۰۵۱	۴۵۰۵۰۵۸	۱۰۹۱۰۴۵	۲۰۷۴۱
۲۶	۷۸۶۰۶۲	۹۵۷۶۰۲۱	۴۲۲۴۰۵۴	۱۳۴۹۰۴۴	۲۶۹۵۵	۱۷۴۲۰۰۱	۱۲۹۱۱۰۵۲	۸۵۲۶۰۳۹	۲۲۳۰۰۴۸	۲۱۸۸۳
۲۷	۱۴۵۲۰۰۴	۱۰۲۲۰۰۸۲	۷۱۲۵۰۶۵	۱۷۲۴۰۱۶	۲۷۸۱۰	۱۲۳۷۰۹۲	۱۳۳۳۶۰۸۰	۷۶۸۵۰۵۰	۱۸۵۳۰۵۳	۲۱۹۷۰
۲۸	۲۵۴۹۰۴۴	۱۸۱۴۵۰۷۲	۱۵۵۰۴۰۸۳	۳۸۰۶۰۶۹	۲۷۳۰۸	۱۳۱۳۰۷۵	۲۴۵۲۱۰۱۹	۱۱۵۴۰۰۵۲	۲۷۴۰۰۵۲	۲۲۷۹۰
۲۹	۱۳۳۳۰۸۳	۲۷۵۹۳۰۳۱	۹۸۹۷۰۴۰	۲۴۹۴۰۴۲	۲۸۲۰۴	۱۶۱۹۰۳۳	۲۰۷۹۷۰۰۳	۹۵۱۹۰۷۰	۲۸۱۶۰۳۶	۲۳۶۱۵
۳۰	۱۱۹۴۰۸۰	۲۶۸۶۲۰۴۵	۱۰۱۶۲۰۰۸	۲۹۰۲۰۶۰	۲۸۰۶۹	۲۴۴۰۰۱۵	۳۳۱۸۹۰۵۹	۱۲۴۳۲۰۷۱	۳۴۰۹۰۶۷	۲۴۰۶۴

به دلیل اینکه مجموع وزن‌های نسبی همه شاخص‌ها باید برابر یک باشد، وزن‌ها طبق معادله (۲۷) نرمالیزه شده‌اند و در جدول (۷) نمایش داده شده‌اند [۳۸].

$$V_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (27)$$

خروجی روش AHP وزن هر یک از شاخص‌های ارزیابی چندهدفه را مشخص می‌کند. وزن نسبی هر شاخص توسط معادله (۲۶) محاسبه می‌شود:

$$W_i = \sqrt[n]{f_{i1} \times f_{i2} \times \dots \times f_{in}} \quad (26)$$

که در آن  $W_i$  وزن نسبی شاخص  $i$ ام،  $n$  تعداد شاخص‌ها و  $f_{ij}$  مقدار ماتریس تصمیم‌گیری است.

معیار منفی است. در حالی که جواب ایده‌آل منفی به‌عنوان بزرگ‌ترین ارزش معیارهای مثبت و کوچک‌ترین مقدار از معیارهای منفی تعریف شده است.

- محاسبه فاصله اقلیدسی گزینه‌ها با استفاده از جواب ایده‌آل مثبت و منفی که از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (30)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (31)$$

- محاسبه نزدیکی نسبی هر گزینه به جواب ایده‌آل از طریق فرمول زیر:

$$CL_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (32)$$

- اولویت‌بندی گزینه‌ها: هرچه مقدار  $CL_i$  بیشتر باشد بهتر است. با خروجی نتایج حاصل از پیاده‌سازی تکنیک AHP-TOPSIS در جدول (۸) نشان داده شده است. این خروجی نشانگر برتری و کارایی‌تر بودن الگوریتم NSCS نسبت به MOIWO دارد.

### ۶- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین تجهیزات در سیستم‌های تولید سلولی، وسایل نقلیه خودکار و قابلیت اطمینان آن‌هاست که نقش به‌سزایی در ارزیابی و سنجش کارایی سیستم دارند. با ایجاد بهبود در وسایل انتقال دهنده خودکار، راندمان تولید افزایش یافته و به دنبال آن بسیاری از هزینه‌های تولیدی کاهش و خروجی مطلوب‌تری حاصل می‌شود. سیستم تولیدی مورد مطالعه در این مقاله یک سیستم تولید سلولی بوده که هر سلول شامل تعدادی ماشین برای انجام عملیات و تعدادی AGV برای انتقال قطعات است. در این سیستم، AGVها به دو دسته درون و بین سلولی برای انتقال قطعات

جدول (۶): ماتریس مقایسه زوجی معیارهای ارزیابی

	SM	DM	MID	SNS	TIME
SM	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۵
DM	۲	۱	۰/۵	۲	۳
MID	۲	۲	۱	۲	۲
SNS	۲	۰/۵	۰/۵	۱	۵
Time	۰/۲	۰/۳۳	۰/۵	۰/۲	۱

جدول (۷): مقادیر وزن معیارهای ارزیابی

شاخص	وزن
SM	۰/۲۱
DM	۰/۲۴
MID	۰/۲۵
SNS	۰/۲۴
CPU Time	۰/۰۶

پس از به دست آمدن وزن نرمالیزه شده شاخص‌ها، از روش تاپسیس برای انتخاب الگوریتم کارا تر استفاده می‌کنیم. مراحل زیر برای اولویت‌بندی استفاده می‌شود:

- تشکیل ماتریس تصمیم
- نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم از طریق فرمول زیر:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (28)$$

که در آن  $r_{ij}$  به‌عنوان عناصر نرمالیزه شده ماتریس تصمیم و  $f_{ij}$  به‌عنوان عناصر ماتریس تصمیم هستند.

- محاسبه ماتریس تصمیم وزنی نرمالیزه شده با استفاده از فرمول زیر:

$$V_{ij} = r_{ij} \times W_{mn} \quad (29)$$

که در آن  $W_{mn}$  وزن به دست آمده از روش AHP است.

- محاسبه جواب ایده‌آل مثبت و منفی: جواب ایده‌آل مثبت به‌عنوان بزرگ‌ترین ارزش معیارهای مثبت و کوچک‌ترین مقدار

جدول (۸): نتایج روش تاپسیس

Metric	ماتریس تصمیم					ماتریس تصمیم نرمالایز شده					ماتریس تصمیم نرمالایز وزن دهی شده					rank			
	SM	MID	DM	SNS	Time	SM	MID	DM	SNS	Time	SM	MID	DM	SNS	Time		d+	d-	CI
NCSC	۲۴۴۳	۱۴۹۷۹	۵۴۱۰۰	۴۶۰۰	۱۹۷۸	۰/۵۱	۰/۵۹	۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۷۸	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۷	۱
MOIWO	۴۱۳۷	۲۰۳۰۸	۵۴۳۵	۵۳۱۹	۱۵۳۹	۰/۰۶	۰/۸۰	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۶۲	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۳	۲

متفاوت در AGVهای درون سلولی و یک نوع نرخ خرابی در AGV های بین سلولی و نیز کاهش هزینه‌های تولید همچون هزینه تولید قطعات، هزینه جابجایی درون و بین سلولی بوده‌ایم. برای آزمایش مدل ارائه شده، کارایی دو الگوریتم فرا ابتکاری NSCS و MOIWO

در این سیستم، AGVها به دو دسته درون و بین سلولی برای انتقال قطعات در درون و بیرون سلول‌ها تقسیم می‌شوند. برای بهبود سیستم تولید سلولی ارائه شده به دنبال افزایش قابلیت اطمینان دو دسته AGVها با در نظر گرفتن دو نوع نرخ خرابی

- Journal of Production Economics, 120(2): 301-314.
- [11] Rafiee, K., Rabbani, M., Rafiei, H., Rahimi-Vahed, A., (2011). "A new approach towards integrated cell formation and inventory lot sizing in an unreliable cellular manufacturing system", *Applied Mathematical Modelling*, 35(4): 1810-1819.
- [12] Tavakkoli-Moghaddam, R., Ranjbar-Bourani, M., Amin, G.R., Siadat, A., (2012). "A cell formation problem considering machine utilization and alternative process routes by scatter search," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(4): 11-27.
- [13] Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M., Khorrami, J., (2012). "Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing", *Computers & Operations Research*, 39(11): 2642-2658.
- [14] Kia, R., Shirazi, H., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., (2013). "A multi-objective model for designing a group layout of a dynamic cellular manufacturing system", *Journal of Industrial Engineering International*, 9: 1-14.
- [15] Kia, R., Javadian, N., Paydar, M.M., Saidi-Mehrabad, M., (2013). "A simulated annealing for intra-cell layout design of dynamic cellular manufacturing systems with route selection, purchasing machines and cell reconfiguration", *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 30(4): 1-41.
- [16] Sakhaii, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bagheri, M., Vatani, B., (2016). "A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines", *Applied Mathematical Modelling*, 40(1): 169-191.
- [17] Renna, P., Ambrico, M., (2015). "Design and reconfiguration models for dynamic cellular manufacturing to handle market changes", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(2): 170-186.
- [18] Savsar, M., (2000). "Reliability analysis of a flexible manufacturing cell" *Reliability Engineering & System Safety*, 67(2): 147-152.
- [19] Savsar, M., Aldaihani, M., (2008). "Modeling of machine failures in a flexible manufacturing cell with two machines served by a robot" *Reliability Engineering & System Safety*, 93(10): 1551-1562.
- [20] Das, K., Lashkari, R.S., Sengupta, S., (2007). "Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems", *European Journal of Operational Research*, 183(1): 162-180.
- [21] Das, K., Lashkari, R.S., Sengupta, S., (2007). "Reliability consideration in the design and analysis of cellular manufacturing systems", *International Journal of Production Economics*, 105(1): 243-262.
- در ۳۰ نوع مسئله تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس ۵ شاخص ارزیابی مرسوم و استفاده از تکنیک AHP-TOPSIS دریافتیم که الگوریتم NSCS کارایی و جواب‌های مطلوب‌تری نسبت به الگوریتم MOIWO دارد. یکی از پیشنهادهایی که می‌توان در جهت نزدیک‌تر شدن به دنیای تولید و سیستم‌های تولیدی در تحقیقات آتی ارائه کرد، محاسبه قابلیت اطمینان AGVها و سیستم‌های ذخیره/بازیابی (AS\RS) به‌طور هم‌زمان است. همچنین می‌توان از سیاست‌های مختلف در تخصیص افزونگی در AGVها استفاده و مدل را به دنیای واقعی نزدیک‌تر نمود.

## مراجع

- [1] Sanchez, A.M., (1994). "FMS in Spanish Industry: Lessons from Experience", *Integrated Manufacturing Systems*, 5(2): 28-36.
- [2] Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Tanchoco, J.M.A., (2010). "Facilities planning", John Wiley & Sons.
- [3] Paulo, J., Lashkari, R.S., Dutta, S.P., (2002). "Operation allocation and materials-handling system selection in a flexible manufacturing system: A sequential modelling approach", *International Journal of Production Research*, 40(1): 7-35.
- [4] Chen, M., Cao, D., (2004). "Coordinating production planning in cellular manufacturing environment using Tabu search", *Computers & Industrial Engineering*, 46(3): 571-588.
- [5] Chen, M., Cao, D., (2004). "Coordinating production planning in cellular manufacturing environment using Tabu search," *Computers & Industrial Engineering*, 46(3): 571-588.
- [6] Nsakanda, A.L., Diaby, M., Price, W.L., (2006) "Hybrid genetic approach for solving large-scale capacitated cell formation problems with multiple routings," *European Journal of Operational Research*, 171(3): 1051-1070.
- [7] Tavakkoli-Moghaddam, R., Aryanezhad, M.B., Safaei, N., Azaron, A., (2005). "Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics", *Applied Mathematics and Computation*, 170(2): 761-780.
- [8] Saidi-Mehrabad, M., Safaei, N., (2007). "A new model of dynamic cell formation by a neural approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9): 1001-1009.
- [9] Bajestani, M.A., Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A.R., Baharian Khoshkhou., G., (2009). "A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem", *Computers & Operations Research*, 36(3): 777-794.
- [10] Safaei, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., (2009). "Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems", *International*

- [35] Roy, R.K., (2010). "A Primer on the Taguchi Method", Second Edition: Society of Manufacturing Engineers.
- [36] Guilani, P.P., Azimi, P., Niaki, S.T.A., Niaki, S.A.A., (2016). "Redundancy allocation problem of a system with increasing failure rates of components based on Weibull distribution: A simulation-based optimization approach," *Reliability Engineering & System Safety*, 152: 187-196.
- [37] Maghsoudlou, H., Kahag, M.R., Niaki, S.T.A., Pourvaziri, H., (2016). "Bi-objective optimization of a three-echelon multi-server supply-chain problem in congested systems: Modeling and solution", *Computers & Industrial Engineering*, 99: 41-62.
- [38] Karimi, N., Zandieh, M., Karamooz, H.R., (2010). "Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: A multi-phase approach", *Expert Systems with Applications*, 37(6): 4024-4032.
- [39] Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., Ramezani, P., (2013). "Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem", *Scientia Iranica*, 20(3): 861-872.
- [40] Coello, C.A.C., Lamont, G.B., Veldhuizen, D.A.V., (2007). "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems", Springer, 515-545.
- [41] Askin, R.G., Estrada, S., (1999) "Investigation of cellular manufacturing practices", *Handbook of cellular manufacturing systems*, 25-34.
- [22] Das, K., (2008). "A comparative study of exponential distribution vs Weibull distribution in machine reliability analysis in a CMS design" *Computers & Industrial Engineering*, 54(1): 12-33.
- [23] Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., Jabal-Ameli, M.S., (2008). "A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system", *European Journal of Operational Research*, 185(2): 563-592.
- [24] Saxena, L.K., Jain, P.K., (2011). "Dynamic cellular manufacturing systems design—a comprehensive model" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4): 11-34.
- [25] Aghajani, A., Didehbani, S.A., Zadahmad, M., Seyedrezaei, M.H., Mohsenian, O., (2014). "A multi-objective mathematical model for cellular manufacturing systems design with probabilistic demand and machine reliability analysis", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8): 755-770.
- [26] Jabal Ameli, M.S., Arkat, J., Barzinpour, F., (2008). "Modelling the effects of machine breakdowns in the generalized cell formation problem", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(7): 838-850.
- [27] Jouzdani, J., Barzinpour, F., Shafia, M.A., Fathian, M., (2014). "Applying simulated annealing to a generalized considering alternative routings and machine reliability", *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 31(4): 1-26.
- [28] Shirzadi, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kia, R., Mohammadi, M., (2017). "A multi-objective imperialist competitive algorithm for integrating intra-cell layout and processing route reliability in a cellular manufacturing system", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(8): 839-855.
- [29] Chern, M.S., (1992). "On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system", *Operations Research Letters*, vol. 11(5): 309-315.
- [30] Yang, X.S., Susash, D., (2009). "Cuckoo Search via Levy flights", In *Proceedings Of The Nabic - World Congress On Nature & Biologically, Inspired Computing*, 210-214.
- [31] Yang, X.S., (2014). "Cuckoo search and firefly algorithm: Theory and applications" Springer, 516: 49-62.
- [32] Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., Niaki, S.T.A., (2016). "A multi-objective invasive weeds optimization algorithm for solving multi-skill multi-mode resource constrained project scheduling problem", *Computers & Chemical Engineering*, 88: 157-169.
- [33] Kundu, D., Suresh, K., Ghosh, S., Das, S., Panigrahi, B.K., Das, S., (2011). "Multi-objective optimization with artificial weed colonies", *Information Sciences*, 181(12): 2441-2454.
- [34] Taguchi, G., (1986). "Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes".







## Reliability modeling of automated guided vehicles in cellular manufacturing systems: A non-dominated sorting cuckoo search (NSCS) algorithm

B. Karimi<sup>1</sup>, S.T. Akhavan-Niaki<sup>2,\*</sup>, H. Haleh<sup>1</sup>, B. Naderi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Industrial Engineering and Management, Qazvin Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

<sup>2</sup> Faculty of Industrial Engineering and Management, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 07 June 2017

Accepted 05 November 2017

#### Keywords:

Reliability

Cellular manufacturing systems

Automatic guided vehicles

Simulation

Non-dominated sorting cuckoo search

### ABSTRACT

Reliability of the cellular manufacturing systems and automated guided vehicles (AGVs) in the production systems has been recently become one of the most challenging issues. This paper focuses on proposing a multi-objective mathematical model in order to optimize three objectives including the minimization of production costs, minimization of the intracellular and intercellular part transportations and finally maximization of the reliability of AGVs. The failure rates of intracellular AGVs at any of the cells follow either an exponential or a Weibull distribution whereas, this rate is considered to be constant for the intercellular AGVs. As reliability calculation in the Weibull case is very hard (if not impossible), a simulation approach is applied to estimate the reliability of system in this case. It is assumed that all the intracellular and intercellular transportations are done through the AGVs. This means that the production system halts when all AGVs are failed. In order to validate the proposed model, some numerical examples are generated and solved by implementation of a non-dominated sorting cuckoo search (NSCS) and a multi-objective invasive weeds optimization (MOIWO) algorithm. Finally, a hybrid analytic hierarchy process and TOPSIS method (AHP-TOPSIS) method is utilized to select the better algorithm in terms of some multi-objective metrics, simultaneously.

\* Corresponding author. Seyed Taghi Akhavan Niyaki

Tel.: 021-66165740; E-mail address: niaki@sharif.edu