

مدل یکپارچه و دهدفه برنامه‌ریزی تولید و نت با توجه به محدودیت ظرفیت انبار و رویکرد کاهش تغییر نیروی کار

سید محمدحسن حسینی^{۱*}، میلاد کلاگر درونکلا^۲، حسین عموزاد خلیلی^۳

۱. استادیار مهندسی صنایع و مدیریت دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع و مدیریت دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۳۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۷/۱۰/۱۷، تاریخ تصویب: ۹۸/۰۱/۱۷)

چکیده

دو مسئله برنامه‌ریزی تولید و تعمیرات و نگهداری از جمله تصمیم‌گیری‌های مهم در صنایع تولیدی هستند و با توجه به تأثیرگذاری بر یکدیگر باید هم‌زمان مشخص شوند؛ البته گاهی این دو تصمیم به‌صورت مجزا گرفته می‌شود که این امر به از دست رفتن نتایج ایده‌آل می‌انجامد. در پژوهش حاضر، مدل دهدفه یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات در سیستم تولید چندمحصولی و چنددوره‌ای با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت انبار ارائه شده است. تابع هدف اول عبارت است از مجموع کل هزینه‌های سیستم که تابع هدف مرسوم و شناخته‌شده در این حوزه است. تابع هدف دوم نیز به‌صورت مجموع تغییرات نیروی کار در میان دوره‌های برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. اگرچه هزینه تغییر نیروی کار جزئی از هزینه کل سیستم محسوب می‌شود، تأثیرات اجتماعی، از دست رفتن مستمر دانش و تجربه نیروها و... ایجاب می‌کند تغییر نیروی کار تابع هدف مستقل باشد و حداقل شود. براین اساس، پس از تشریح مسئله و تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم آن، مدل ریاضی این مسئله در حالت دهدفه توسعه داده شد. سپس با توجه به اینکه این مسئله از نوع NP-Hard است، دو روش حل مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-بازنگری ۲ (NSGA-II) و الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه (MOICA) ارائه شد. در پایان نیز حل این مسئله با داده‌های استاندارد منابع و همچنین ارزیابی نتایج صورت گرفت. بررسی و مقایسه دو الگوریتم پیشنهادی با شاخص‌های رایج در بهینه‌سازی چندهدفه نشان می‌دهد کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم MOICA بهتر از الگوریتم NSGA-II است، هرچند که زمان حل الگوریتم NSGA-II کوتاه‌تر است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراابتکاری MOICA، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II، برنامه‌ریزی تولید ادغامی، تعمیر و نگهداری، تغییر نیروی کار.

مقدمه

که می‌تواند در کنترل و کاهش هزینه‌های تولید و موجودی مؤثر باشد [۳، ۴]. از جمله موارد مهم در این زمینه می‌توان به موضوع ثبات و حفظ نیروی کار اشاره کرد. تغییرات بیش‌از اندازه نیروی کار، که به‌منظور تنظیم توان تولید مطابق با تقاضای هر دوره انجام می‌شود، علاوه‌بر تبعات اجتماعی و تضعیف تصویر سازمانی، موجب از دست رفتن مهارت و تجربه می‌شود و هزینه‌های غیرمستقیم بسیاری دارد. آموزش نیروی کار جدید، ضایعات محصولات به‌دلیل مهارت کم نیروی کار جدید، کاهش رضایت و وفاداری کارکنان، بهره‌برداری نامناسب از امکانات و... نمونه‌هایی از هزینه‌های جابه‌جایی و نوسانات نیروی کار است؛ بنابراین رویکردهای جدید به برنامه‌ریزی تولید، یک‌هدفه نیست و تلاش می‌شود اهداف متعدد و مهم هم‌زمان بهینه شوند. در پژوهش حاضر، مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و

مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی در سطح تاکتیکی مدیریت است که به‌منظور برآورده کردن تقاضای محصولات، مقدار بهینه تولید، سطح موجودی، نیروی انسانی، برنامه نت و... را در هر دوره زمانی با توجه به تعدادی محدودیت تعیین می‌کند [۱]. نتایج برنامه‌ریزی تولید یکپارچه می‌تواند اساس برنامه‌های دیگر سازمان مانند برنامه‌ریزی نیازمندی‌های ظرفیت، زمان‌بندی تولید جامع، برنامه‌ریزی نیازمندی‌های مواد و برنامه‌ریزی توزیع باشد؛ از این‌رو برنامه‌ریزی خوب تولید یکپارچه می‌تواند مدیریت زنجیره تأمین را تسهیل کند [۲].

مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و نت تا جایی اهمیت دارد که پژوهشگران این فرایند را یکی از هفت تصمیم‌گیری اصلی برنامه‌ریزی در واحدهای تولیدی بدانند

زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات در یک واحد تولیدی چندمحصولی و چند دوره‌ای با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت انبار مطالعه و حل شد. برای این مسئله دو تابع هدف مدنظر است. تابع هدف اول عبارت است از هزینه‌های کل سیستم که همه عوامل هزینه‌ای تولید را شامل می‌شود. تابع هدف دوم نیز میزان تغییر نیروی کار است که باید حداقل شود. با توجه به شرایط خاص جامعه، وجود قوانین مختلف حمایت از کارگر، تبعات اجتماعی اخراج نیروی کار و اهمیت حفظ نیروی کار به دلیل حفظ مهارت کاری و دانش وی، جایگاه حفظ منابع انسانی را بیشتر از آن می‌کند که تنها یکی از عوامل هزینه‌ای در تابع هدف در نظر گرفته شود؛ از این رو با افزودن تابع هدف دوم مسئله با عنوان کمینه کردن تغییر نیروی کار سعی شده است این مسئله به دنیای واقعی و شرایط روز جامعه نزدیک‌تر شود.

در بخش مرور ادبیات، خلاصه‌ای از مبانی نظری و پیشینه پژوهش‌های مرتبط با مطالعه حاضر ارائه شده است. در بخش بعد، مسئله مورد مطالعه، تعریف و تشریح شده و پارامترها و متغیرهای تصمیم مربوط همراه با مدل ریاضی آن ارائه شده‌اند. سپس روش‌های پیشنهادی حل مسئله که عبارت‌اند از حل دقیق با محدودیت اپسیلون، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه (MOICA) آمده‌اند. در بخش تجزیه و تحلیل نتایج نیز مسئله مورد مطالعه با روش‌های پیشنهادی حل و نتایج حاصل ارائه شده است. همچنین در بخش نهایی، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی پژوهش و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های بعدی آمده است.

پیشینه پژوهش

به موازات توجه مدیران صنایع تولیدی به برنامه‌ریزی تولید محصولات و نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات، پژوهشگران دانشگاهی نیز توجه خاصی به توسعه مدل‌های ریاضی برای این فرایند داشته‌اند. نگاهی به مقالات منتشر شده در حوزه برنامه‌ریزی تولید نشان می‌دهد پژوهش‌های انجام شده در این حوزه بسیار گسترده است [۵]. توجه زیاد پژوهشگران به حوزه برنامه‌ریزی تولید محصولات و نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات، بیانگر اهمیت و نقش اساسی این دو موضوع در صنعت است. مک‌کال به مرور کلی مدل‌های برنامه‌ریزی

شی ژیونگ و همکاران نیز مدل ریاضی MILP را برای مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و نت توسعه دادند و از رویکرد تکراری برای حل آن استفاده کردند [۱۲].

اعظمی و همکاران برای کالاهای فسادپذیر، مدل بهینه‌سازی استواری را به منظور برنامه‌ریزی تولید یکپارچه با توجه به شرایط تعویق ارائه کردند [۱۳]. تابع هدف در نظر گرفته شده در پژوهش آن‌ها، حداقل کردن مجموع هزینه‌هاست.

رویکو و هوئیرمین نیز در مقاله خود به برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات در یک کارگاه کاری (JS) پرداختند. همچنین برای این مسئله یک

تولید با توجه به عملیات تعمیرات و نگهداری پرداخته است [۶]. همچنین دکر پژوهش‌های مرتبط با بهینه‌سازی برنامه تولید را با استفاده از مدل‌های ریاضی و رویکردهای شبیه‌سازی بررسی و خلاصه‌ای از آن‌ها را در مقاله خود منتشر کرده است [۷]. در این میان، مبحث برنامه‌ریزی تولید یکپارچه که به برنامه‌ریزی هم‌زمان برای تولید کالاها و تعیین برنامه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات می‌پردازد، با توجه به کاربرد فراوان آن در صنایع تولیدی و نتایج ایده‌آلی که به همراه دارد، در چند سال اخیر مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است، اما اولین بار هولت و همکاران از مدل‌سازی ریاضی خطی برای تعریف و حل این مسئله استفاده کردند. در این پژوهش تابع هدف هزینه‌های تولید بود. محدودیت دسترسی به منابع نیز به عنوان محدودیت مدل در نظر گرفته شده بود [۸، ۹]. هانسمن و هس به بررسی مدل برنامه‌ریزی تولید یکپارچه پرداختند و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی خطی، روشی برای حل آن ارائه کردند. مدل آن‌ها در ادامه، برای سیستم‌های چندمحصولی، چندمرحله‌ای و با محدودیت‌های ظرفیت نیز توسعه یافت [۱۰].

فیتوخی و همکاران مدلی یکپارچه را برای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه غیردوره‌ای ارائه کردند که تصمیم‌های مربوط به برنامه‌ریزی تولید و نت را هم‌زمان فراهم می‌کند. با توجه به اینکه مسئله آن‌ها در رده مسائل سخت قرار دارد، روشی مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل آن در ابعاد بزرگ ارائه شده است. هدف این مدل حداقل کردن کل هزینه‌های تولید و نگهداری و تعمیرات است [۱۱].

شی ژیونگ و همکاران نیز مدل ریاضی MILP را برای مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و نت توسعه دادند و از رویکرد تکراری برای حل آن استفاده کردند [۱۲].

اعظمی و همکاران برای کالاهای فسادپذیر، مدل بهینه‌سازی استواری را به منظور برنامه‌ریزی تولید یکپارچه با توجه به شرایط تعویق ارائه کردند [۱۳]. تابع هدف در نظر گرفته شده در پژوهش آن‌ها، حداقل کردن مجموع هزینه‌هاست.

رویکو و هوئیرمین نیز در مقاله خود به برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات در یک کارگاه کاری (JS) پرداختند. همچنین برای این مسئله یک

حل آن، به مقاله نام و لاگندران مراجعه کنید که مدل‌های مختلف برنامه‌ریزی تولید ادغامی تا سال ۱۹۹۲ را بررسی و مطالعه کردند و به دسته‌بندی روش‌های حل موجود در شش گروه پرداختند. همچنین ضعف‌ها و قوت‌های روش‌های مختلف حل مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی را نیز تشریح کردند [۱۹]. بایکاسوگلو نیز مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی با رویکرد چندهدفه را بررسی کرد و روش حل مبتنی بر تکنیک برنامه‌ریزی آرمانی برای حل این مسئله را ارائه داد [۲۰].

مرور پیشینه پژوهش که خلاصه آن در جدول ۱ آمده است، نشان می‌دهد علاوه بر منابع ذکرشده، پژوهش‌های دیگری در زمینه برنامه‌ریزی تولید یکپارچه چندهدفه انجام شده که از آن جمله می‌توان به پژوهش غلامیان و همکاران اشاره کرد [۲۱]. باید توجه داشت که موضوع محدودیت ظرفیت انبار و توجه به تغییر نیروی کار به‌عنوان تابع هدف جدید در مدل یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات تاکنون در پژوهش‌های قبلی بررسی نشده، اما در پژوهش حاضر به‌عنوان مسئله‌ای جدید مدنظر قرار گرفته است.

مدل ریاضی ارائه دادند و برای ابعاد بزرگ نیز از الگوریتم تجمع ذرات استفاده کردند. [۱۴]. در پژوهش سعیدی مهرآباد و همکاران نیز به بررسی برنامه‌ریزی یکپارچه با در نظر گرفتن اثرات خرابی دستگاه‌ها در سیستم‌های چندحالتی پرداخته و مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح با هدف حداقل کردن کل هزینه‌ها ارائه شد [۱۵].

در بیشتر پژوهش‌ها، کمینه‌سازی هزینه کل سیستم، به‌منزله تابع هدف متداول در مدل‌های برنامه‌ریزی تولید اعم از یکپارچه و ادغامی بررسی شده است. همچنین مطالعه این مسئله در شرایط دو و چندهدفه که به دنیای واقعی نزدیک‌تر است کمتر مدنظر پژوهشگران قرار دارد [۱۶]. مازولا و همکاران دلیل توجه کمتر به برنامه‌ریزی تولید چندهدفه را سختی مواجهه با اهداف چندگانه و متضاد عنوان کرده‌اند [۱۷]. در این زمینه می‌توان به پژوهش مسعود و هوانگ اشاره کرد که مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی را با استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره بررسی کردند و چند روش حل برای آن ارائه دادند [۱۸]. برای آشنایی بیشتر این مسئله و روش‌های

جدول ۱. خلاصه مشخصات پژوهش‌های پیشین

پژوهشگر و سال پژوهش	موضوع پژوهش	توابع هدف					تعداد اقلام دوره		تکنیک و روش حل
		یک‌هدفه	دو یا چندهدفه	تغییرات نیروی کار	محدودیت ظرفیت انبار	یک‌مجموعی	چندمجموعی	برنامه‌ریزی	
کال (۱۹۵۵)	تصمیم‌گیری خطی برای زمان‌بندی برنامه تولید، تعمیرات و کارکنان	*					*	MILP	
هانسن و همکاران (۱۹۶۰)	برنامه‌ریزی خطی برای زمان‌بندی برنامه تولید، تعمیرات و کارکنان	*					*	MILP	
فیتوچی و همکاران (۲۰۱۲)	مدل یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه غیردوره‌ای	*				*	*	MILP SA	
ژیونگ و همکاران (۲۰۱۴)	برنامه‌ریزی یکپارچه تولید، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر رویکرد حل تکراری	*				*	*	MILP IT	
اعظمی و همکاران (۱۳۹۶)	بهینه‌سازی استوار به‌منظور برنامه‌ریزی تولید ادغامی با در نظر گرفتن سیاست تعویق	*				*	*	Robust	
رویکیو و همکاران (۲۰۱۷)	برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات در یک کارگاه کاری (JS)	*				*	*	MILP PSO	
سعیدی مهرآباد و همکاران (۲۰۱۷)	برنامه‌ریزی یکپارچه با در نظر گرفتن اثرات خرابی دستگاه‌ها	*				*	*	ILP	
مسعود و همکاران (۱۹۸۰)	برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات	*				*	*	MCDM	
بایکاسوگلو (۲۰۱۰)	برنامه‌ریزی تولید ادغامی با رویکرد چندهدفه	*				*	*	GP PSO	
بالاوی و همکاران (۲۰۱۴)	برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و تعمیرات پیشگیرانه در سیستم‌های تولیدی فسادپذیر	*				*	*	MILP	
غلامیان و همکاران (۲۰۱۵)	برنامه‌ریزی تولید یکپارچه تحت شرایط فازی و عدم قطعیت	*				*	*	MINLP	
پژوهش حاضر (۱۳۹۷)	مدل یکپارچه و دوهدفه برنامه‌ریزی تولید و نت با توجه به محدودیت ظرفیت انبار و رویکرد کاهش تغییر نیروی کار	*				*	*	MILP MOICA NSGA-II	

g : تعداد ساعات کاری هر کارگر در هر دوره زمانی
 a_t : درصدی از ظرفیت نیروی کار که برای اضافه کاری در دوره t ام در دسترس است.
 u_i : تعداد نفرساعت مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول i ام در زمان عادی
 ul_i : تعداد نفرساعت مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول i ام در زمان اضافه کاری
 e_i : زمان مورد نیاز ماشین برای تولید یک واحد از محصول i ام در زمان تولید عادی و اضافه کاری
 M_t : ظرفیت ماشین در دسترس در زمان عادی در دوره t ام
 MT_t : زمان انجام نگهداری و تعمیرات در دوره t ام
 K : درصدی از ظرفیت ماشین که در هر دوره به علت خرابی از دست می‌رود.
 bl_t : درصدی از ظرفیت تولید ماشین که برای اضافه کاری در دسترس است.
 Inv_{i0} : سطح موجودی محصول خانواده i ام در ابتدای افق برنامه‌ریزی

• متغیرهای تصمیم

X_{it} : میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان تولید عادی در دوره t ام
 Y_{it} : میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان اضافه کاری در دوره t ام
 W_t : تعداد نیروی کار مورد نیاز در دوره t ام
 H_t : تعداد نیروی کار استخدام شده در دوره t ام
 L_t : تعداد نیروی کار اخراج شده در دوره t ام
 OT_t : ساعات اضافه کاری مورد نیاز در دوره t ام
 Inv_{it} : سطح موجودی محصول i ام در انتهای دوره t ام
 B_{it} : سطح کسری (سفارش عقب افتاده) محصول خانواده i ام در دوره t ام
 SC_{it} : میزان محصول خانواده i ام که در دوره t ام به کمک قرارداد جانبی تهیه شده است.
 PM_t : متغیر نگهداری و تعمیرات. در صورت انجام در دوره t ام مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر

• مدل ریاضی

$$Z_1 \quad (1)$$

$$= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C1_i X_{it} + C2_i Y_{it}$$

$$+ \sum_{t=1}^T C3_t W_t + C4_t OT_t$$

$$+ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C5_i SC_{it}$$

$$+ \sum_{t=1}^T C6_t PM_t + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C7_i Inv_{it} + C8_i B_{it}$$

$$+ \sum_{t=1}^T C9_t H_t + C10_t L_t$$

$$Z_2 = \sum_{t=2}^T H_t + L_t \quad (2)$$

S.t.

با توجه به پیچیدگی مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید، نگهداری و تعمیرات که از جمله مسائل NP-hard محسوب می‌شود، پژوهش‌های بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مسئله بهره برده‌اند [۲۲، ۲۳]. در میان الگوریتم‌های چندهدفه، نسخه توسعه یافته الگوریتم ژنتیک به نام الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب نسخه ۲ (NSGA-II) الگوریتمی بر پایه پاراست که برای حل مسائل چندهدفه مناسب است [۲۴]. در این مقاله نیز به منظور حل مسئله برنامه‌ریزی تولید ادغامی از این الگوریتم استفاده شده و تنظیمات لازم روی پارامترهای آن انجام شده است. همچنین الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه (MOICA) که نسخه توسعه داده شده الگوریتم رقابت استعماری (ICA) برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است، برای حل مسئله مدنظر تنظیم و استفاده شده است.

تعریف مسئله

در این بخش ابتدا اندیس‌ها و مجموعه‌ها، پارامترهای مسئله و متغیرهای تصمیم مسئله تعریف و تشریح شد. سپس مدل ریاضی مسئله در حالت دوهدفه همراه با محدودیت‌های موجود توسعه داده شد.

• اندیس‌ها و مجموعه‌ها

i : شماره (اندیس) محصول ($i=1, 2, \dots, I$)

t : شماره (اندیس) دوره زمانی ($t=1, 2, \dots, T$)

• پارامترها

D_{it} : میزان تقاضای محصول i ام در دوره t ام
 $C1_i$: هزینه تولید یک واحد محصول i در زمان عادی
 $C2_i$: هزینه تولید یک واحد محصول i در اضافه کاری
 $C3_t$: هزینه یک نفر کارگر در دوره t ام در زمان عادی
 $C4_t$: هزینه یک نفر-ساعت کارگر در دوره t ام در زمان اضافه کاری
 $C5_i$: هزینه یک واحد محصول i ام تهیه شده از طریق قرارداد جانبی
 $C6_t$: هزینه نگهداری و تعمیرات در دوره t ام
 $C7_t$: هزینه نگهداری یک واحد موجودی از محصول i ام در انبار
 $C8_t$: هزینه یک واحد کسری (سفارش عقب افتاده) از محصول i ام
 $C9_t$: هزینه اخراج یک نفر کارگر در دوره t ام
 $C10_t$: هزینه استخدام یک نفر کارگر در دوره t ام
 $Imax_t$: ظرفیت انبار در دوره t ام
 Cap_t : درصدی از ظرفیت انبار که در یک واحد از محصول i ام اشغال می‌شود.
 SI_i : درصدی از تقاضای محصول i ام که در هر دوره مجاز به کسری است.

باشد. رعایت ظرفیت موجودی انبار با رابطه ۵ تضمین شده است. براساس رابطه ۶، کسری هر محصول برای هر دوره نباید از مقدار معینی تجاوز کند. رابطه ۷، تعادل نیروی کار را بیان می‌کند که در هر دوره برابر نیروی کار دوره قبل به‌علاوه استخدام و اخراج طی دوره است. براساس رابطه ۸، در هر دوره یا استخدام یا اخراج وجود دارد و اعمال این دو با هم از بین می‌رود. همچنین براساس رابطه ۹، در هر دوره یا موجودی اضافه یا کسری داریم. در رابطه ۱۰، سقف ظرفیت زمان اضافه‌کاری نیروی کار برای هر دوره بیان می‌شود. در رابطه ۱۱، زمان موردنیاز برای تولید در زمان عادی باید از زمان در دسترس نیروی کار در زمان عادی کمتر باشد. براساس رابطه ۱۲، زمان موردنیاز برای تولید اضافه‌کاری باید از زمان در دسترس نیروی کار در زمان اضافه‌کاری کمتر باشد. در رابطه ۱۳، مجموع زمان مورد نیاز برای تولید عادی ماشین‌آلات به‌علاوه زمان نگهداری و تعمیرات به‌همراه زمان کاهش‌یافته از ظرفیت به‌دلیل خرابی در سیستم کمتر از ظرفیت ماشین در دوره است. در رابطه ۱۴، مجموع زمان مورد نیاز برای تولید اضافه‌کاری و زمان خرابی در اضافه‌کاری مشخص می‌شود. رابطه ۱۵ متغیر تصمیم‌گیری برای نگهداری کردن یا نکردن و تعمیرات در دوره t را نشان می‌دهد. رابطه ۱۶ دامنه تغییر متغیرهای تصمیم مدل را نشان می‌دهد و علامت متغیرها را مشخص می‌کند.

با توجه به اینکه مسئله مدنظر می‌تواند شرایط و حالات مختلفی داشته باشد، فرضیه‌های در نظر گرفته شده برای آن در این مطالعه به شرح زیر تعیین می‌شود:

- ظرفیت انبار محصولات، مشخص و محدود است؛
- محدودیتی برای میزان تأمین محصولات از قراردادهای جانبی وجود ندارد؛
- محدودیتی برای کسری محصولات وجود ندارد.
- ظرفیت تولید در زمان اضافه‌کاری محدود است.

روش‌های پیشنهادی حل مسئله

در این بخش، ابتدا به‌منظور اجرای مدل ریاضی و اطمینان از صحت و عملکرد آن، روش حل دقیق مبتنی بر روش محدودیت افسیلون (ϵ -Constraint) تعریف شده است. سپس با توجه به اینکه مسئله مطالعه‌شده NP-Hard

$$Inv_{it-1} - B_{it-1} + X_{it} + Y_{it} + SC_{it} \quad (3)$$

$$-I_{it} + B_{it} = D_{it} \quad , \quad for \quad i = 1, 2, \dots, I$$

$$and \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$Inv_{i0} + X_{it} + Y_{it} + SC_{it} \geq \sum_{t=1}^T D_{it} \quad , \quad for \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I Inv_{it} Cap_i \leq I_{max} \quad , \quad for \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$$B_{it} \leq Sl_i \cdot D_{it} \quad , \quad for \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (6)$$

$$and \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$W_{t-1} + H_t - L_t \geq W_t \quad (7)$$

$$for \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$H_t, L_t = 0 \quad , \quad for \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

$$Inv_{it} \cdot B_{it} = 0 \quad , \quad for \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (9)$$

$$and \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$OT_t \leq g \cdot a_i \cdot W_t \quad , \quad for \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

$$(11)$$

$$\sum_{i=1}^I u_i X_{it} \leq g \cdot W_t \quad , \quad for \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^I u_i Y_{it} \leq OT_t \quad , \quad for \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I e_i X_{it} + PM_t \cdot MT_t$$

$$+ 1 - PM_{t-1} \cdot KM_t \leq M_t \quad , \quad for \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$(13)$$

$$\sum_{i=1}^I e_i Y_{it} + 1 - PM_t \cdot k \cdot bl_t \cdot M_t$$

$$\leq bl_t \cdot M_t \quad , \quad for \quad t = 1, 2, \dots, T$$

$$(14)$$

$$PM_t \in 0.1 \quad , \quad \forall \quad t \in T \quad (15)$$

$$X_{it}, Y_{it}, W_t, H_t, L_t, OT_t, Inv_{it}, B_{it}, \quad (16)$$

$$SC_{it} \geq 0 \quad and \quad Integer, \quad \forall \quad i \in I$$

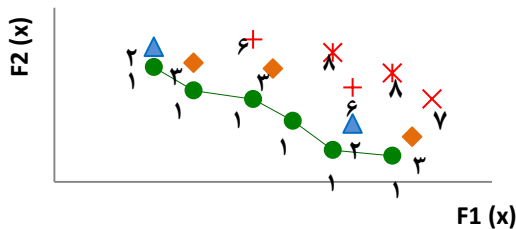
$$and \quad t \in T$$

در مدل ریاضی فوق، رابطه‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده دو تابع هدف مسئله هستند. رابطه ۳ تعادل تولید در هر دوره را نشان می‌دهد. براساس رابطه ۴، مجموع کل تولید هر کالا در زمان‌های کار عادی و اضافه‌کاری و میزان تأمین آن کالا از قراردادهای جانبی در افق برنامه‌ریزی به‌همراه موجودی ابتدایی نباید کمتر از کل تقاضای آن محصول

با توجه به معیایی از قبیل عدم نخبه‌گرایی و پیچیدگی‌های محاسباتی برای مرتب‌سازی، این الگوریتم را دب و همکاران در سال ۲۰۰۲ توسعه دادند و با عنوان NSGA-II معرفی کردند [۲۷]. فلوجارت مراحل کلی الگوریتم NSGA-II استفاده‌شده در این پژوهش، مطابق شکل ۱ است. همچنین به‌منظور مرتب‌کردن جمعیت یک نسل در هر تکرار، از دو رویکرد زیر استفاده می‌شود:

▪ رتبه‌بندی نامغلوب

در این مرحله باید جواب‌ها بر مبنای مغلوب‌بودن مرتب شود و تقسیم‌بندی آن‌ها در جبهه‌ها صورت بگیرد. در شکل ۲ نمونه‌ای از رتبه‌بندی نامغلوب آمده است.



شکل ۲. رتبه‌بندی نامغلوب استفاده‌شده در پژوهش

▪ استفاده از رویکرد گوناگونی

براساس این رویکرد، برای هر عضو یک فاصله ازدحامی مطابق رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود که بیانگر اندازه‌ای از نزدیکی نمونه مد نظر به دیگر اعضای جمعیت آن دسته و گروه است. مقدار بیشتر این پارامتر برای هر عضو بیانگر اهمیت آن عضو است.

$$I d_k m = \frac{I K + 1 m - I K - 1 m}{f_m^{max} - f_m^{min}} \quad (18)$$

$$CD_K = I d_k 1 + I d_k 2 + \dots + I d_k m \quad (19)$$

هدر ادامه، ساختار مناسب کروموزوم برای نمایش راه‌حل مسئله در الگوریتم NSGA-II و تنظیمات اولیه پارامترهای این الگوریتم تشریح شده است.

▪ ساختار کروموزوم

طراحی یک کروموزوم مناسب مهم‌ترین مرحله در استفاده از الگوریتم NSGA-II برای حل مسئله است. در مسئله مورد نظر، سه متغیر اصلی به شرح زیر وجود دارد و سایر متغیرها تابعی از این سه متغیر هستند:

X_{ii} میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان تولید عادی در دوره t ام

به‌شمار می‌آید، دو الگوریتم چندهدفه فراابتکاری نیز توسعه داده شده است. این دو الگوریتم عبارت‌اند: از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-بازنگری ۲ (NSGA-II) و الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه (MOICA).

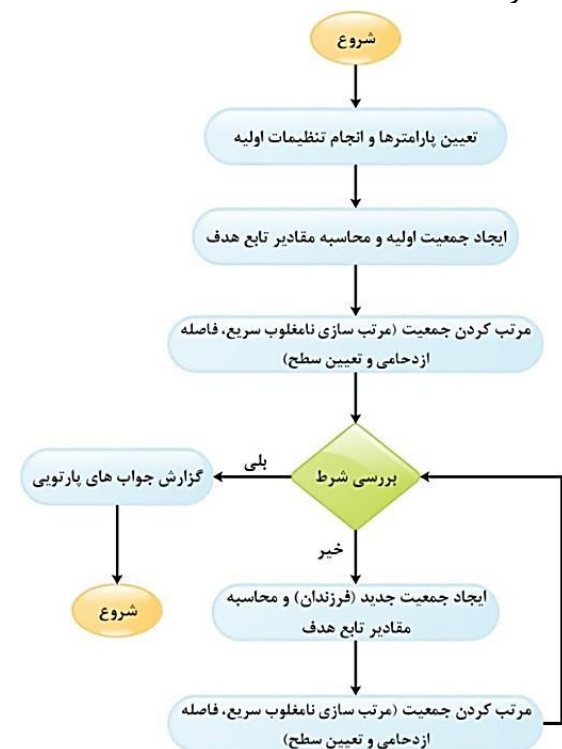
• حل مسئله با استفاده از روش محدودیت افسیلون^۱

روش محدودیت افسیلون یکی از رویکردهای پرکاربرد برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که اولین بار هیمز و همکاران آن را مطرح کردند [۲۵]. قالب کلی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش محدودیت افسیلون براساس رابطه ۱۷ است:

$$\begin{aligned} \min f_j x \\ f_i x \leq \varepsilon_i \text{ for } i = 1, 2, \dots, n; i \neq j; \\ \varepsilon_i = RL_k \\ x \in X \end{aligned} \quad (17)$$

• الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-بازنگری^۲ (NSGA-II)

اولین بار در سال ۱۹۹۴ سرینیواز و دب الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب را برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه کردند [۲۶].



شکل ۱. الگوریتم NSGA-II

جدول ۲. سطح بهینه فاکتورها برای الگوریتم NSGA-II

پارامترها	مقدار بهینه
MaxIt	۲۰۰
Popsize	۷۰
Pc	۰/۹
Pm	۰/۴

- جواب‌های اولیه

جواب‌های اولیه موردنیاز به صورت تصادفی ایجاد و به گونه‌ای طراحی شده‌اند که مجموع تولید در زمان‌های عادی و اضافه‌کار به علاوه میزان تأمین طی قرارداد جانبی برای هر محصول با کل تقاضای آن محصول برابر شود.

- عملگرهای تقاطع و جهش

با توجه به نوع مسئله و متغیرهای تصمیم، کدگذاری مسئله از نوع ارزشی گسسته است و با بررسی‌های زیاد، عملگر تقاطع یکنواخت برای ایجاد فرزند انتخاب شده است. براساس این تقاطع، برای ایجاد هر فرزند، مقادیر ستون‌های مورد نیاز که بیانگر میزان تولید در هر دوره هستند، به صورت تصادفی از والد برگزیده می‌شوند. همچنین عملگر جهش بدین صورت است که ابتدا دو خانه از خانه‌های کروموزوم یک فرزند به صورت تصادفی تعیین می‌شود. سپس درصدی از یک خانه کاهش داده و معادل آن به خانه دوم اضافه می‌شود. این میزان تغییر در عملگر جهش با تست‌های مختلف بررسی و در نهایت مقدار تصادفی بین ۲۰ تا ۴۵ درصد تعیین شده است. همچنین برای ردیف آخر کروموزوم که مربوط به متغیر دودویی تعمیرات و نگهداری است، از عملگر جهش معکوس استفاده شده است.

- الگوریتم رقابت استعماری چندهدفه^۳ (MOICA)

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) از جمله الگوریتم‌های تکاملی و جمعیت مبناست. در این الگوریتم، هر نقطه در فضای جواب مسئله یک عضو جمعیت یا یک کشور نامیده می‌شود. کشورها با توجه به میزان قدرت (برازندگی تابع هدف) به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر با توجه به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درمی‌آورد و آن‌ها را کنترل می‌کند. این الگوریتم تا رسیدن به یک استعمارگر (شایسته‌ترین جواب) ادامه می‌یابد. موفقیت این الگوریتم

Y_{it} میزان تولید محصول خانواده i ام در زمان اضافه‌کاری در دوره t ام

SC_{it} میزان محصول خانواده i ام که در دوره t ام به کمک قرارداد جانبی تهیه شده است.

همچنین متغیر دودویی تعمیرات و نگهداری که مستقل است در ردیف آخر هر کروموزوم درج می‌شود؛ بنابراین کروموزوم استفاده‌شده در این پژوهش به صورت ماتریس $n \times (m + 1)$ طراحی شده است. تعداد ستون‌ها معادل تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی (t) و تعداد سطرها برابر با تعداد انواع محصولات ضرب در ۳ است به همراه ردیف آخر برای متغیر دودویی تعمیرات و نگهداری. شماتیک کروموزوم استفاده‌شده در این پژوهش براساس شکل ۳ است.

- تنظیم اولیه پارامترهای الگوریتم

در الگوریتم NSGA-II، باید چهار فاکتور اندازه جمعیت، حداکثر تعداد تکرار، احتمال رخداد تقاطع (Pc) و احتمال رخداد جهش (Pm) تنظیم شوند. در این پژوهش، برای هر یک از فاکتورها سه سطح در نظر گرفته شده و با توجه به روش تاگوچی با طرح L_{27} ، مقادیر بهینه هر پارامتر مطابق جدول ۲ تعیین شده است.

t=T	...	t=3	t=2	t=1		
					X_{1t}	
						Y_{1t}
					X_{2t}	
						Y_{2t}
					X_{It}	
						Y_{It}
					PM_t	

شکل ۳. ساختار کروموزوم

▪ حرکت کلونی‌ها به سوی کشورهای استعمارگر هر مستعمره به اندازه x واحد در جهت خط واصل مستعمره به استعمارگر حرکت می‌کند و به موقعیت جدید کشانده می‌شود. در محاسبه این جابه‌جایی، d بیانگر فاصله میان استعمارگر و مستعمره است. x نیز میزان حرکت مستعمره و عددی تصادفی است. تعیین مقدار x براساس رابطه ۲۲ صورت می‌گیرد:

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (22)$$

که در آن β عددی بزرگ‌تر از یک و نزدیک به ۲ است. حرکت یک کلونی به سمت استعمارگر معمولاً با یک زاویه انحراف صورت می‌گیرد که مقدار این زاویه براساس رابطه ۲۳ مشخص می‌شود.

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (23)$$

پارامتر γ مقداری اختیاری است که هرچقدر بزرگ‌تر باشد، الگوریتم را به جست‌وجوی تصادفی سوق می‌دهد و هرچقدر کمتر باشد، کلونی‌ها روی بردار واصل به استعمارگران حرکت می‌کنند و الگوریتم سریع‌تر همگرا خواهد شد. با در نظر گرفتن واحد رادیان برای θ ، عددی نزدیک به $\pi/4$ در بیشتر اجراها، انتخاب مناسبی است و در این پژوهش نیز از همین مقدار استفاده شده است.

▪ جابه‌جایی موقعیت استعمارگر با مستعمره در این مرحله ممکن است یک مستعمره (کلونی) به دلیل بهبود موقعیت خود، به جایگاهی بهتر از استعمارگر مربوط دست یابد.

▪ محاسبه قدرت کل یک امپراتوری محاسبه قدرت کل یک امپراتوری براساس رابطه ۲۴ انجام می‌شود.

$$TC_n = Cost_{imperialist_n} \quad (24)$$

$$+ \xi \text{mean Cost colonies of empire}_n$$

در رابطه ۲۴، پارامتر ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و ۱ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر کوچک ξ سبب می‌شود هزینه کل یک امپراتوری تقریباً با هزینه حکومت مرکزی آن برابر شود. افزایش مقدار ξ نیز سبب افزایش تأثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراتوری در هزینه کل آن می‌شود. در حالت نوعی $0.05 = \xi$ بیشتر به جواب‌های مطلوب منجر شده است.

در حل مسائل بهینه‌سازی یک‌هدفه موجب می‌شود تا برای حل مسائل چندهدفه نیز توسعه داده شود [۱۶، ۲۸]. در ادامه تنظیم مراحل این الگوریتم برای حل مسئله مدنظر تشریح می‌شود.

▪ تشکیل جمعیت و امپراتوری‌های اولیه برای شروع استفاده از الگوریتم MOICA، نیازمند تنظیمات اولیه و ایجاد جمعیت اولیه به تعداد N_{pop} هستیم. پس از ایجاد جمعیت اولیه، رتبه ۴ هر کشور با استفاده از روش مرتب‌سازی نامغلوب تعیین می‌شود و محاسبه قدرت هر کشور با استفاده از روش سیگما براساس رابطه ۲۰ صورت می‌گیرد. سپس تعداد N_{imp} عضو با بهترین مقدار تابع هدف به‌عنوان امپراتورها تعیین می‌شود.

$$Power_n = \frac{1}{\sum_{j=1}^D \left[\frac{f_j \cdot n}{\sum_{i=1}^{N_{rank}(C)} f_j \cdot i} \right] \times D} \quad (20)$$

در رابطه ۲۰، عبارت $Power_n$ بیانگر قدرت استعمارگر n ، $Rank(C)$ رتبه کشور n ، D تعداد توابع هدف، $f_j(i)$ مقدار تابع هدف J ام از کشور i ام، و $N_{rank}(C)$ تعداد کشورها با رتبه C است. تعداد کشورهای تخصیص یافته به هر استعمارگر، براساس رابطه ۲۱ مشخص می‌شود.

$$NC_n = \text{round} \left(P_n \cdot N_{col} \right) \quad (21)$$

در رابطه ۲۱، عبارت P_n بیانگر قدرت نسبی استعمارگر n ام است و به صورت $P_n = \frac{Power_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} Power_i}$ محاسبه شده است. همچنین N_{col} نشان‌دهنده تعداد کشورهای مستعمره (غیر استعمارگر) است. به‌منظور تنظیمات این الگوریتم برای حل مسئله مورد بررسی، هر پارامتر با استفاده از طرح تاگوچی L27 در سه سطح ارزیابی شد و در نهایت مقادیر بهینه پارامترها در حل این مسئله براساس جدول ۳ تعیین شد.

جدول ۳. سطح بهینه فاکتورها برای الگوریتم MOICA

پارامترها	مقدار بهینه
N_{pop}	۵۰
N_{imp}	۵
ضریب تأثیر کلونی‌ها	۰/۱۵
انحراف از مسیر اصلی	۰/۳
متغیر تصادفی	۱/۸

پیشنهادی NSGA-II و MOICA در حل مسئله مورد مطالعه، از مسائل استاندارد تشریح‌شده در دو منبع [۱۸ و ۲۰] استفاده شد و پارامترهای خاص مطالعه حاضر نیز به آن افزوده شد؛ بنابراین داده‌های مسائل تست براساس جدول ۴-۶ است. مقادیر پارامترهای اولیه مانند موجودی ابتدای دوره، کسری محصولات و... صفر در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی توسعه داده شده با استفاده از برنامه GAMS IDE نسخه ۲۳/۵ و الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی نیز در محیط MATLAB 7/10/0/499 (R2010a) کدنویسی شده است و همه مدل‌ها و الگوریتم‌ها در رایانه شخصی با پردازشگر Core i5 و حافظه جانبی 2GB اجرا شده‌اند.

در روش حل محدودیت اپسیلون، ۱۵ شکست برای هر تابع هدف در نظر گرفته شد و در مجموع حداکثر ۳۰ نقطه پاراتویی به دست آمد. با توجه به اینکه در برخی نقاط شکست، تنها یکی از توابع هدف بدتر شده و تابع هدف دوم تغییری نکرده است، این نقاط به عنوان نقاط مغلوب مشخص، و از ادامه بررسی‌ها حذف شدند. در نهایت از ۳۰ پاسخ به دست آمده، ۱۳ نقطه پاراتویی براساس شکل‌های ۴ و ۵ مشخص شدند.

▪ رقابت استعماری

در هر تکرار، امپراتوری‌های قوی‌تر، ضعیف‌ترین مستعمره را از ضعیف‌ترین امپراتوری با احتمالی براساس رابطه ۲۵ تصاحب می‌کنند.

$$P_n = \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \quad (25)$$

در رابطه ۲۵ عبارت NTC_n بیانگر هزینه کل نرمالیزه شده امپراتوری n ام است و براساس رابطه ۲۶ تعیین می‌شود.

$$NTC_n = \max_i TC_i - TC_n \quad (26)$$

▪ سقوط امپراتوری‌های ضعیف

در الگوریتم پیشنهادی، یک امپراتوری زمانی حذف می‌شود که همه مستعمرات خود را از دست داده باشد.

▪ شرط خاتمه و همگرایی الگوریتم

در پژوهش حاضر رسیدن به یک امپراتوری به عنوان شرط خاتمه الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

بحث

در این بخش، به منظور اجرای مدل ریاضی و اطمینان از صحت عملکرد آن و ارزیابی و مقایسه کارایی دو الگوریتم

جدول ۴. داده‌های مربوط به هشت دوره برنامه‌ریزی

پارامتر	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴	دوره ۵	دوره ۶	دوره ۷	دوره ۸
$C3_t$	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴	۶۴
$C4_t$	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
$C6_t$	۲۵۰,۰۰۰	۲۵۰,۰۰۰	۲۵۰,۰۰۰	۲۵۰,۰۰۰	۲۵۰,۰۰۰	۲۵۰,۰۰۰	۲۵۰,۰۰۰	۲۵۰,۰۰۰
$C7_t$	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰
$C10_t$	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
$C11_t$	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
a_t	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
bl_t	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۶
MT_t	۱۵۰۰	۶۰۰۰	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۴۷۰۰	۲۴۰۰	۲۵۵۰	۱۶۰۰
M_t	۳۲,۰۰۰	۲۸,۴۰۰	۲۹,۶۰۰	۲۰,۰۰۰	۲۵,۰۰۰	۳۳,۶۰۰	۲۹,۶۰۰	۲۶,۴۰۰
$Imax_t$	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
$Wmax_t$	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۴۵۰۰	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۵۵۰۰	۴۵۰۰	۴۰۰۰

نتایج نشان می‌دهد کیفیت جواب‌های الگوریتم MOICA بهتر از الگوریتم NSGA-II است، هرچند زمان حل

مقایسه پاسخ‌های حاصل از دو الگوریتم پیشنهادی و روش دقیق محدودیت اپسیلون در جدول ۷ آمده است. این

شاخص «تعداد کل نقاط نامغلوب (ONVG)» شناسایی شده و «نرخ نقاط نامغلوب به نقاط نامغلوب پاراتو بهینه (ONVGR)^۷» اشاره کرد که به ترتیب با روابط ۲۷ و ۲۸ محاسبه می‌شوند.

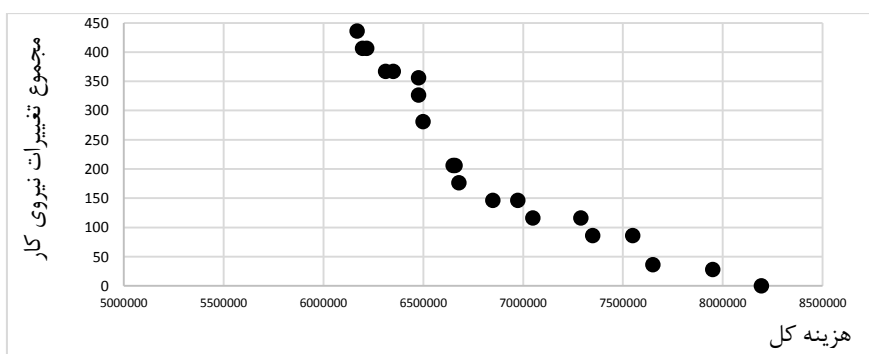
الگوریتم NSGA-II کوتاه‌تر است. با توجه به مشخص بودن جواب‌های پاراتو بهینه ($|PF_{true}|$)^۵، مقایسه بهینگی عملکرد دو الگوریتم پیشنهادی با شاخص‌های مختلف امکان پذیر است. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به دو

جدول ۵. داده‌های مربوط به محصولات تولیدی

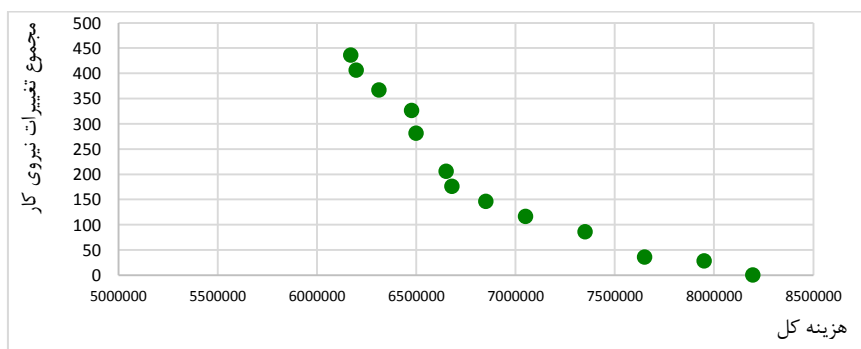
e_i	wl_i	U_i	U_i	$C9_i$	$C8_i$	$C5_i$	$C2_i$	$C1_i$	
۱/۵	۰/۵	۲	۲	۷۰	۴۰	۷۴	۱۵	۱۵	محصول ۱
۲	۰/۵	۳	۳	۱۰۰	۶۰	۱۰۰	۲۰	۲۰	محصول ۲

جدول ۶. میزان تقاضای محصولات

دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴	دوره ۵	دوره ۶	دوره ۷	دوره ۸	
۸۰۰۰	۱۳،۰۰۰	۱۰،۰۰۰	۹۰۰۰	۱۴،۰۰۰	۱۲،۰۰۰	۶۰۰۰	۸۰۰۰	محصول ۱
۴۵۰۰	۱۵،۰۰۰	۱۱،۰۰۰	۴۰۰۰	۹۰۰۰	۳۵۰۰	۸۰۰۰	۱۱،۰۰۰	محصول ۲



شکل ۴. مقدار توابع هدف در نقاط شکست در روش محدودیت اسیلون



شکل ۵. جبهه پاراتو بهینه با روش محدودیت اسیلون

جدول ۷. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی

الگوریتم	بهترین مقدار تابع هدف اول	بهترین مقدار تابع هدف دوم	تعداد نقاط پاراتویی	زمان حل (ثانیه)
ϵ _Constraint	۶,۱۷۰,۰۸۱	۰	۱۳	۱۰۹۵
NSGA-II	۶,۱۷۲,۵۳۱	۲۸	۱۰	۳۶۱
MOICA	۶,۱۷۰,۰۸۱	۰	۱۲	۴۲۵

نشان می‌دهد مجموع جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم MOICA بهتر از الگوریتم NSGA-II است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، مسئله یکپارچه برنامه‌ریزی تولید، نگهداری و تعمیرات در شرایط دوهدفه بررسی شد. برای این مسئله، یک مدل ریاضی با دو هدف هزینه‌های کل سیستم و تغییر نیروی کار ارائه شد و برای حل آن روش محدودیت اسپیلون به کار رفت. ابتدا مجموعه جواب‌های پاراتو بهینه با استفاده از این روش مشخص شد. سپس توسعه دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و MOICA نیز برای حل آن صورت گرفت. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از حل مسائل استاندارد نشان می‌دهد الگوریتم MOICA در ارائه مجموعه جواب‌های باکیفیت بهتر از الگوریتم NSGA-II عمل کرده و زمان حل الگوریتم NSGA-II کمتر بوده است.

به‌منظور پژوهش‌های بعدی می‌توان همین مدل را برای سیستم‌های تولید دیگر از قبیل تولید خطی، ماشین‌های موازی و... توسعه داد، یا شرایط عدم قطعیت، احتمالی و فازی را برای این مسئله بررسی و مطالعه کرد. همچنین استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت مانند تجمع ذرات (PSO) و مقایسه آن با روش‌های استفاده‌شده در این پژوهش می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد. توجه به اثر کهولت یا اثر یادگیری و تغییر تدریجی زمان تولید نیز تاکنون برای این مسئله بررسی نشده است.

$$ONVG = |PF_{known}| \quad (27)$$

$$ONVGR = \frac{|PF_{known}|}{|PF_{true}|} \quad (28)$$

علاوه بر دو شاخص فوق، دو شاخص مهم نرخ خطا (ER) و فاصله عمومی (GD) به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم NSGA-II به‌ترتیب مطابق روابط ۲۹ و ۳۰ محاسبه می‌شود.

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^{|PF_{known}|} e_i}{|PF_{known}|} \quad (29)$$

در رابطه ۲۹، متغیر e_i یک متغیر دودویی است؛ به‌طوری‌که اگر جواب پاراتو مربوط (جواب پاراتو i ام) یکی از جواب‌های واقع بر جبهه پاراتو بهینه باشد، مقدار صفر و در غیر این صورت مقدار ۱ را به خود می‌گیرد. همچنین عبارت $|PF_{known}|$ بیانگر تعداد جواب‌های پاراتو ارائه‌شده به‌کمک الگوریتم است.

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{|PF_{known}|} \quad (30)$$

جدول ۸. شاخص‌های بهینگی در دو الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم	ONVG	ONVG	ER	GD
NSGA-II	۱۰	۰/۷۷	۰/۱	۰/۶ درصد
MOICA	۱۲	۰/۹۲	۰	۱/۹ درصد

در رابطه ۳۰، پارامتر d_i^2 بیانگر فاصله اقلیدسی i امین جواب پاراتو الگوریتم تا نزدیک‌ترین جواب واقع بر جبهه پاراتو بهینه است. مقایسه عملکرد دو الگوریتم پیشنهادی با شاخص‌های فوق در جدول ۸ آمده است. این نتایج نیز

منابع

- Cassady, C. R., and Kutanoglu, E., (2010). "Minimizing Job Tardiness Using Integrated Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling", *IIE Transactions*, Vol. 35, No. 6, PP. 503-513.
- Ozdamar, L., Bozyel, M. A., Birbil, S., (1998). "A Hierarchical Decision Support System for Production Planning (With Case Study)", *European Journal of Operational Research*, Vol. 104, No. 3, PP. 403-422.
- Cheraghali Khani, A., Khoshalhan, F., (2012). "An Integrated Model of Aggregate Production Planning with Maintenance Costs", *IJIEPM*, Vol. 23, No. 1, PP. 67-77.
- Hax, A. C. (1978). *Aggregate Production Planning*, In: J. Models and S. Elmaghraby (Eds.), *Handbook of Operation Research*, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Buffa, E. S., Taubert, W. H., (1972). *Production-Inventory Systems: Planning and Control*, Homewood, Illinois: Irwin.
- Mccall, J. J. (1965). "Maintenance Policies for Stochastically Failing Equipment: A Survey", *Management Science*, Vol. 11, No. 5, PP. 493-524.

7. Dekker, R., (1996). "Application of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51, No. 3, PP. 229-240.
8. Holt, C. C., Modigliani, F., Simon, H. A., (1955). "A Linear Decision Rule for Production and Employment Scheduling", *Management Science*, Vol. 2, No. 1, PP. 1-30.
9. Holt, C. C., Modigliani, F., Muth, J. F., (1956). "Derivation of a Linear Decision Rule for Production and Employment", *Management Science*, Vol. 2, No. 2, PP. 159-177.
10. Hanssman, F., Hess, S., (1960). "A Linear Programming Approach to Production and Employment Scheduling", *Management Technology*, Vol. 1, No. 1, PP. 46-51.
11. Fitouhi, M. C., Noureelfath, M., (2012). "Integrating Noncyclical Preventive Maintenance Scheduling and Production Planning for a Single Machine", *Int. J. Production Economics*, Vol. 136, No. 2, PP. 344-351.
12. Shixiong, Zh., Liya, Yu., and Zh, W., (2014). "Integrating Production Planning and Maintenance: An Iterative Method", *Industrial Management and Data Systems*, Vol. 114, No. 2, PP. 162-182.
13. Aazami, A., Jabbarzadeh, A., Makui, A., (2018). "A Robust Optimization Model for Aggregate Production Planning with Postponement Policy", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 51, No. 4, PP. 389-404.
14. Ruiqiu, L., Huimin, M., (2017). "Integrating Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling Under Reentrant Job Shop", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 31, PP. 1-9.
15. Saidi Mehrabad, M., Jabbarzadeh, A., Alimian, M., (2017). "An Integrated Production and Preventive Maintenance Planning Model with Imperfect Maintenance In Multi-State System", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 10, No. 4, PP. 28-42.
16. Kheirkhah, A., Nobari, A., Hajipour, V., (2016). "Proposing a Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm to Optimize Reliable Aggregate Production Planning Problem", *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, Vol. 4, No. 7, PP. 1-15.
17. Mazzola, J. B., Neebe, A. W., and Rump, C. M., (1998). "Multiproduct Production Planning in the Presence of Work Force Learning", *European Journal of Operational Research*, Vol. 106, No. 2-3, PP. 336-356.
18. Masud, A. S. M., Hwang, C. L., (1980). "An Aggregate Production Planning Model and Application of Three Multiple Objective Decision Methods", *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No. 6, PP. 741-752.
19. Nam, S. J., Logendran, R., (1992). "Aggregate Production Planning A Survey of Models and Methodologies", *European Journal of Operational Research*, Vol. 61, No. 3, PP. 255-272.
20. Baykasoglu, A., (2010). "MOAPPS 1.0: Aggregate Production Planning Using the Multiple Objective Tabu Search", *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 16, PP. 3685-3702.
21. Gholamian N., Mahdavi I., Tavakkoli Moghaddam R., Mahdavi-Amiri N., (2015). "A Comprehensive Fuzzy Multi-Objective Multi-Product Multi-Site Aggregate Production Planning Decisions in a Supply Chain Under Uncertainty", *Applied Soft Computing*, Vol. 37, PP. 585-607.
22. Fahimnia, B., Luong, L. H. S., Marian, R. M., (2006). "Modeling and Optimization of Aggregate Production Planning—A Genetic Algorithm Approach", *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*, Vol. 1, No. 27 PP. 1007-1012.
23. Wang S. C., Yeh, M. F., (2014). "A Modified Particle Swarm Optimization for Aggregate Production Planning", *Expert Systems with Applications*, Vol. 1, No. 6, PP. 3069-3077.
24. Chambari, A., Rahmati, S. H. R., Najafi, A. A., Karimi, A., (2012). "A Bi-Objective Model to Optimize Reliability and Cost of System with a Choice of Redundancy Strategies", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 1, PP. 109-119.
25. Haimes, Y. Y., Wismer, D. A., and Lasdon, D. S. (1971). "On bicriterion formulation of the integrated systems identification and system optimization." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-1, No. 3, 296-97.
26. Srinivas, N., Deb, K. (1995). "Multi-Objective Function Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms", *Evol. Comput*, Vol. 2, No. 3, PP. 221-248.
27. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., (2002). "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, PP. 182-197.
28. Rezaei Malek, M., Tavakkoli Moghaddam, R., Avaz Abadian, F., (2014). "A Bi-Objective Model for A Flowshop Scheduling Problem with Availability Constraint of Machines", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 42, No. 2, PP. 189-200.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. E-Constraint
2. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II

3. Multi-Objective Imperialism Competitive Algorithm
4. Rank
5. Optimum Pareto-Front
6. Overall Non-Dominated Vector Generation
7. Overall Non-Dominated Vector Generation Ratio
8. Error Ratio
9. Generational Distance