

# مقایسه‌ی الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ در یک زنجیره‌ی تأمین دوهدفه‌ی استوار سناریومحور با در نظر گرفتن ضایعات

سپیده اسدی زیدآبادی (کارشناسی ارشد)

ابراهیم رضایی نیک<sup>\*</sup> (استادیار)

دانشکده‌ی هندسی صنایع، دانشگاه صنعتی سجاد

مهمنگی صنایع و مدیریت شریف، (تاپیستان ۱۴۰۲)، دوری ۹۴، شماره ۱، صص. ۹۹-۱۰۴، پژوهشی

هدف از این تحقیق، توسعه‌ی یک مدل زنجیره‌ی تأمین چندمحصولی چنددوره‌ی با در نظر گرفتن ضایعات مواد اولیه‌ی موجود در محموله‌ی خریداری شده از تأمین‌کننده، ضایعات مواد اولیه‌ی حین تولید و کارلی نیروی انسانی است. این مدل به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه، با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی ضایعات مواد اولیه در شرایط عدم قطعیت است. در دنیای واقعی برخی پارامترهای زنجیره‌ی تأمین مانند تقاضا با عدم قطعیت مواجه‌اند، بنابراین رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور برای مواجهه با این عدم قطعیت به کار برده شده است. برای حل مدل، ابتدا مدل مذکور با روش محدودیت اپسیلوون و دو الگوریتم NSGA-II و SPEA۲ حل شده است. سپس کیفیت جواب و زمان حل آنها با یکدیگر مقایسه شده است. برای اتخاذ تصمیم از میان پاسخ‌های پارتو از شاخص ارزیابی عمدها MID و روش فرایند تحلیل سلسه مراتبی (AHP) استفاده شده است.

sepideh.asadi.1991@gmail.com  
rezaeenik@sadjad.ac.ir

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی استوار سناریومحور، الگوریتم NSGA-II، الگوریتم SPEA۲، عدم قطعیت، طراحی زنجیره‌ی تأمین.

## ۱. مقدمه

معیوب در فرایند تولید شامل اقلام دورریختنی، دوباره‌کاری و اصلاحی ارائه داد. هدف وی از این پژوهش کاهش زمان کلی پردازش روی منابع بحرانی با در نظر گرفتن فرایندهای خارج از کنترل و زمان آماده‌سازی ثابت و متغیر فرایندهای تولیدی بود.<sup>[۱]</sup> در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چنددهفه برای مستله‌ی زنجیره‌ی تأمین ۴ سطحی شامل تأمین‌کننگان، تولیدکننده، مرکز توزیع و مشتریان، با اهداف بهینه‌سازی اقلام معیوب خریداری شده از تأمین‌کننده ارائه شد.<sup>[۲]</sup> در آن مدل از رویکرد ۶ سیگما برای ارزیابی ریسک مالی استفاده شده است. در سال ۲۰۱۱ نیز یک مدل برنامه‌ریزی تولید بلندمدت چندمکانه، چندمحصوله و چنددوره‌ی در شرایط عدم قطعیت، در محیط زنجیره‌ی تأمین با چندین تأمین‌کننده، چندین تولیدکننده و چندین مشتری ارائه شد.<sup>[۳]</sup> مدل ارائه شده در این پژوهش به صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چنددهفه‌ی استوار، با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ی کل تولید و کمینه‌سازی تعداد سفارش به تأخیر افتاده است. آنها از رویکرد ال پی‌متریک برای حل مدل پیشنهادی استفاده کردند. سپس در سال ۲۰۱۹ یک مدل برنامه‌ریزی تولید چندمرحله‌ی با تولید تصادفی محصولات معیوب و در نظر گرفتن هزینه‌های آماده‌سازی در

تولیدی و همچنین زمان تحويل محصول به مشتری دارد زیرا هرچه میزان ضایعات بیشتر باشد، سرعت فرایندهای تولیدی را کاهش داده و باعث تأخیر ارسال محصول به مشتری می‌شود. از همین رو در این تحقیق به دنبال کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌ها و ضایعات مواد اولیه هستیم، به طوری که هزینه‌ها، تقاضای مشتریان و سفارش به تأخیر افتاده تحت شرایط عدم قطعیت باشند.

در سال ۱۹۹۲ لی یک مدل ریاضی برای مسئله‌ی اندازه‌ی انباشته با اقلام

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۷/۰۹/۱۴۰۰، اصلاحیه ۲۴/۱/۱، پذیرش ۲۱/۰۱/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J65.2022.58984.2251

استناد به این مقاله:

اسدی زیدآبادی، سپیده و رضایی نیک، ابراهیم، ۱۴۰۲. مقایسه‌ی الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ در یک زنجیره‌ی تأمین دوهدفه‌ی استوار سناریومحور با در نظر گرفتن ضایعات. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (۱۳۹)، صص. ۹۹-۱۰۹.

جدول ۱. مقایسه‌ی تحقیق فعلی با پژوهش‌های پیشین.

نویسنده‌گان	تصمیم‌گیری	شرایط	جنبه مدل‌سازی	جنبه حل
لی (۱۹۹۲)	قطعی	دوباره‌کاری محصولات	کارایی نیروی سفارش به برنامه‌ریزی برنامه‌ریزی	
فرانکا و همکاران (۲۰۱۰)	غیرقطعی	ضایعات مواد اولیه در خریداری شده	انسانی تأخیر افتاده ظرفیت موجودی	LP
آل هاشم و همکاران (۲۰۱۱)	غیرقطعی	دوباره‌کاری محصولات	کارایی نیروی سفارش به برنامه‌ریزی برنامه‌ریزی	محدودیت اپسیلون
سرکار (۲۰۱۹)	قطعی	دوباره‌کاری محصولات	آزادسازی لاگرانژ	LP متريک
اسلامی و همکاران (۲۰۲۰)	قطعی	ضایعات محصول	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	
سرکار و همکاران (۲۰۲۰)	قطعی	دوباره‌کاری محصولات	بهینه‌سازی غیرخطی	
توان و سجادی (۲۰۲۱)	غیرقطعی	ضایعات مواد اولیه در محموله‌ی خریداری شده	بهینه‌سازی شبیه‌سازی	
قندهاری و عبدی (۲۰۲۱)	قطعی	ضایعات مواد اولیه در محموله‌ی خریداری شده	الگوریتم ژنتیک	
تحقيق‌فعالی	غیرقطعی	ضایعات مواد اولیه در محموله‌ی خریداری شده و ضایعات مواد اولیه حین تولید	الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲	

پژوهش عبارت است از: «به کارگیری بهینه‌سازی استوار سناپریمحور برای مواجهه با عدم قطعیت در یک مدل زنجیره‌ی تأمین چندهدفه با در نظر گرفتن ضایعات موجود در مواد اولیه‌ی خریداری شده از تأمین‌کننده و ضایعات مواد اولیه حین فرایند تولید و نیز در نظر گرفتن کارایی نیروی انسانی برای اولین بار». همچنین طبق بررسی‌های صورت گرفته، تمامی تحقیقاتی که در آنها از رویکرد بهینه‌سازی استوار سناپریمحور در حل مسائل چندهدفه استفاده شده است، برای حل مدل پیشنهادی خود از روش‌های مبتنی بر حل تک‌هدفه استفاده کرده‌اند. در این تحقیق ما از دو الگوریتم تکاملی چندهدفه‌ی NSGA-II و SPEA۲ برای حل استفاده کردیم.

در این تحقیق، کمینه‌سازی هزینه‌ها شامل هزینه‌های تولید، خرید مواد اولیه، نگهداری موجودی محصول، نگهداری مواد اولیه، حمل و نقل و سفارش به تأخیر افتاده و کمینه‌سازی تعداد ضایعات مواد اولیه شامل ضایعات موجود در مواد اولیه خریداری شده از تأمین‌کننده و ضایعات مواد اولیه حین تولید به صورت همزمان در نظر گرفته شده است.

در ادامه این تحقیق، بخش دوم به مختصراً در مورد مبانی بهینه‌سازی استوار سناپریمحور پرداخته و در بخش سوم، مدل پیشنهادی بررسی شده است. بخش چهارم به تشرییح روش حل و بررسی نتایج حاصل از حل مدل اختصاص یافته و در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲. بهینه‌سازی استوار سناپریمحور

بهینه‌سازی استوار برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط مالوی با رویکرد سناپریمحور مطرح شد. وی ابزاری کرد که یک جواب برای مدل بهینه‌سازی به صورت جواب استوار تعریف می‌شود اگر، برای تمام سناپری‌های داده‌های ورودی شبیه بهینه باقی بماند. و

بلندمدت ارائه شد.<sup>[۴]</sup> که به دنبال حذف ضایعات دوریختنی و کاهش هزینه از طرق استراتژی دوباره‌کاری بود. در این تحقیق از یک بازرسی دوم مرحله‌ی برای شناسایی تمام اقلام معیوب و نیز از روش آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل پیشنهاد شده استفاده کرده‌اند. در سال ۲۰۲۰ محققان یک مدل چندمرحله‌یی ظرفیت‌دار شده از مسئله‌ی اندازه‌ی انباسته‌ی پویا با اقلام معیوب، سفارش به تأخیر افتاده، زمان آماده‌سازی و ظرفیت اضافی ارائه دادند.<sup>[۵]</sup> هدف مدل مذکور بیشینه‌سازی سود از طریق فروش بیشترین قطعات دmontaz شده محصولاتی است که عمر آنها تمام شده است. در سال ۲۰۲۰ نیز برای کنترل اقلام معیوب در یک فرایند تولید تک‌مرحله‌یی یک مدل سیستم تولید پاک ارائه دادند.<sup>[۶]</sup> این مدل غیرخطی به دنبال کاهش دوباره‌کاری‌های با توابع توزیع احتمالی متفاوت برای هریک از اقلام معیوب است. در سال ۲۰۲۱ یک مدل زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن سیاست انتخاب تأمین‌کنندگان و کنترل موجودی برای کاهش هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین مطرح شد<sup>[۷]</sup> و برای حل آن از رویکرد شبیه‌سازی استفاده شد. در سال ۲۰۲۱ محققان یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی یکپارچه‌ی تولید - موجودی برای زنجیره‌ی تأمین دوستخطی به منظور بیشینه‌سازی سود تولید کننده ارائه دادند.<sup>[۸]</sup> آنها در مدل خود کیفیت مواد اولیه و محصول نهایی، قیمت محصول نهایی براساس طول عمر باقی‌مانده‌ی آن و تخفیفات مقداری مواد اولیه را در نظر گرفتند.

در جدول ۱ مقایسه‌ی بین این تحقیق با سایر تحقیقات انجام شده در گذشته ثبت شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده از تحقیقات پیشین نشانگر آن است که نلاش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی کمینه‌سازی ضایعات در زنجیره‌ی تأمین به ضایعات محصولات نیم‌ساخته یا ضایعات موجود در مواد اولیه خریداری شده از تأمین‌کننده محدود شده و ضایعات مواد اولیه تولید شده حین فرایند تولید نادیده گرفته شده است. همچنین این تحقیقات بیشتر به صورت تک‌هدفه یا به صورت مدل‌های چندهدفه‌ی قطعی ارائه شده است. نوآوری ارائه شده در این

- ۱.۳. مفروضات مدل**
- سفارش به تأخیر افتاده مجاز است.
  - عدم قطعیت در هزینه‌ها، تقاضا و سفارش به تأخیر افتاده در نظر گرفته شده است.
  - محصولات به صورت مستقیم به مشتریان ارسال می‌شوند و مراکز توزیع در نظر گرفته نشده است.
  - هر سه ماه به عنوان یک دوره‌ی زمانی در نظر گرفته شده است.
  - زمان کاری تولید ۲۵ روز در ماه و ۷ ساعت در هر روز در نظر گرفته شده است.
  - هزینه‌ی حمل و نقل مواد اولیه بر عهده‌ی تأمین‌کننده است.
- ۱.۴. نمادها**
- آن دیس‌ها:
  - $i = 1, 2, \dots, I$ : آنام؛  $t = 1, 2, \dots, T$ : دوره‌ی زمانی آنام؛  $r = 1, 2, \dots, R$ : ماده‌ی اولیه‌ی آنام؛  $M$ : روش حمل و نقل آنم؛  $n = 1, 2, \dots, N$ : مشتری آنم؛  $u = 1, 2, \dots, U$ : تأمین‌کننده‌ی آنم؛  $s = 1, 2, \dots, S$ : سفارشی آنم؛
  - پارامترها:
  - $PC_{it}^s$ : هزینه‌ی تولید هر واحد محصول  $i$  در دوره‌ی زمانی  $t$  تحت سفارشی  $s$ ؛
  - $RC_{r,t}^s$ : هزینه‌ی خرید هر واحد ماده‌ی اولیه‌ی  $r$  از تأمین‌کننده‌ی  $u$  در دوره‌ی زمانی  $t$  تحت سفارشی  $s$ ؛
  - $IC_{it}^s$ : هزینه‌ی نگهداری موجودی هر واحد محصول  $i$  در دوره‌ی زمانی  $t$  تحت سفارشی  $s$ ؛
  - $IRC_{r,t}^s$ : هزینه‌ی نگهداری موجودی هر واحد ماده‌ی اولیه‌ی  $r$  در دوره‌ی زمانی  $t$  تحت سفارشی  $s$ ؛
  - $TC_{nmt}^{s,am}$ : میانگین هزینه‌ی ارسال محصول برای مشتری  $n$  با روش حمل و نقل در دوره‌ی زمانی  $t$  تحت سفارشی  $s$ ؛
  - $BC_{int}^s$ : هزینه‌ی سفارش به تأخیر افتاده هر واحد محصول  $i$  برای مشتری  $n$  در دوره‌ی زمانی  $t$  تحت سفارشی  $s$ ؛
  - $D_{int}^s$ : تقاضای محصول آنم توسط مشتری آنم در دوره‌ی زمانی  $t$  تحت سفارشی  $s$ ؛
  - $RMax_{rut}$ : بیشترین مقدار قابل تأمین ماده‌ی اولیه‌ی  $r$  توسط تأمین‌کننده‌ی  $u$  در دوره‌ی زمانی  $s$ ؛
  - $RMMin_{rut}$ : کمترین مقدار ماده‌ی اولیه‌ی  $r$  که توسط تأمین‌کننده‌ی  $u$  در دوره‌ی زمانی  $t$  باید تأمین شود؛
  - $ctu_{inmt}$ : بیشترین ظرفیت ارسال محصول  $i$  برای مشتری  $n$  با روش حمل و نقل در دوره‌ی زمانی  $t$ ؛
  - $ctl_{linmt}$ : کمترین ظرفیت ارسال محصول  $i$  برای مشتری  $n$  با روش حمل و نقل در دوره‌ی زمانی  $t$ ؛
  - $BMax_{int}$ : بیشترین مقدار سفارش به تأخیر افتاده‌ی مجاز محصول  $i$  برای

یک مدل استوار است اگر، برای تمام سفاروهای داده‌ها تقریباً امکان‌پذیر باقی بماند. مدل استوار مذکور عبارت است از:<sup>[۴]</sup>

$$MinZ = \sum_{s \in X} \rho_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in X} \rho_s \left[ \left( \xi_s - \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] + \omega \sum_{s \in X} \rho_s \delta_s \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & s.t. \\ & \left( \xi_s - \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} \right) + \theta_s \geq 0 \\ & \theta_s \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

در مدل فوق ( $y_s = f(x, y_s)$ ) است که در آن  $x \in R^n$  نشان‌دهنده‌ی جزء ساختاری است که برای هر اختلال در داده‌های ورودی ثابت و آزاد است؛  $y \in R^{n+2}$  جزء کنترلی است که در معرض اختلال داده‌های ورودی قرار دارد. همچنین  $\rho_s$  احتمال رخداد سفارش،  $\lambda$  نشان‌دهنده‌ی وزن قلر گرفته بر واریانس جواب،  $\omega$  ضریب وزنی موازنی بین استواری جواب و استواری مدل و  $\theta_s$  متغیر انحرافی است که می‌تواند مقادیر غیر منفی اختیار کند.

### ۳. تشریح مسئله

هر زنجیره‌ی تأمین شامل قسمت‌های مختلفی است که از تأمین‌کننده تا مصرف‌کننده، با همان مشتری را در بر می‌گیرد. در این زنجیره یکی از مهمترین مسائل، افزایش سطح کیفیت با کمترین هزینه‌ی ممکن است. برای کاهش تعداد ضایعات اقداماتی نیاز است که این اقدامات هزینه‌زا هستند. لذا کاهش هزینه‌های سیستم با کاهش تعداد ضایعات در تضاد و ناسازگاری هستند. به طور مثال کاهش تعداد ضایعات حین تولید نیازمند استخدام نیروی کار ماهرتر یا خرید دستگاه‌های پیشرفته‌تر است که باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. همچنین درباره‌ی ضایعات مواد اولیه‌ی موجود در محموله‌ی خریداری شده از تأمین‌کننده، هرچه کیفیت مواد اولیه‌ی خریداری شده از تأمین‌کننده بیشتر و تعداد ضایعات موجود در مواد اولیه‌ی کمتر باشد، معمولاً قیمت خرید مواد اولیه نیز بیشتر است.<sup>[۱]</sup> در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه‌ی کاهش ضایعات در زنجیره‌ی تأمین صورت گرفته است که با توجه به بررسی‌های انجام شده در ادبیات موضوع، شامل کاهش ضایعات در مواد اولیه‌ی خریداری شده از تأمین‌کننده و ضایعات محصولات نیمساخته حین تولید است. اما در دنیای واقعی یکی از مشکلاتی که در حین تولید یک محصول پیش می‌آید، ضایعاتی شدن برخی مواد اولیه در حین فرایندهای تولیدی است. از این رو در این تحقیق، ضمن توسعه‌ی مدل پیشین ارائه شده توسط محققان<sup>[۲]</sup>، ضایعات موجود در مواد اولیه‌ی خریداری شده از تأمین‌کننده و ضایعات مواد اولیه‌ی حین تولید نیز در مدل سازی در نظر گرفته شده‌اند. مدل ارائه شده یک مدل دوهدفه‌ی استوار سفارش‌محضه، چنددوره‌ی و با در نظر گرفتن تأمین‌کننگان، تولیدکننده و مشتریان به صورت چندمحضه، چنددوره‌ی و با در نظر گرفتن چندین روش حمل و نقل است. همچنین موجودی مواد اولیه و محصول نهایی، سفارش به تأخیر افتاده، ظرفیت حمل و نقل و اپاراش کالاهای و کارایی نیروی انسانی نیز در این مدل در نظر گرفته شده است. مفروضات مدل، نمادها و مدل پیشنهادی در این تحقیق در ادامه تشریح می‌شود.

$$TTC^s = \sum_{i,n,m,t} Q_{inmt} TC_{nmt}^s \quad (7)$$

$$TBC^s = \sum_{i,n,t} B_{int}^s BC_{int}^s \quad (8)$$

عبارت ۱۰ نشان دهندهٔ تابع هدف اول است که در آن هزینهٔ کل طبق روش مالوی<sup>[4]</sup> استوار شده است. در تابع هدف اول، عبارت اول بیانگر میانگین هزینهٔ کل تحت سنتاریوهای مختلف و عبارت دوم بیانگر واریانس هزینهٔ کل تحت سنتاریوهای مختلف است که حاصل جمع این دو عبارت، استواری جواب را می‌دهد. در نهایت عبارت مدل است که در واقع جریمهٔ تجاوز از موجه بودن است.

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{s \in S} P_s & \left( \begin{array}{l} TPC^s + TRC^s \\ + TIPC^s + TIRC^s \\ + TTC^s + TBC^s \end{array} \right) + \\ & \lambda \sum_{s \in S} P_s \left[ \begin{array}{l} \left( \begin{array}{l} TPC^s + TRC^s \\ + TIPC^s + TIRC^s \\ + TTC^s + TBC^s \end{array} \right) - \\ \left( \begin{array}{l} \sum_{s' \in S} P_{s'} \left( \begin{array}{l} TPC^{s'} + TRC^{s'} \\ + TIPC^{s'} + TIRC^{s'} \\ + TTC^{s'} + TBC^{s'} \end{array} \right) \end{array} \right) \\ + 2\theta^s \end{array} \right] \\ & + \omega \sum_{s,i,n,t} P_s \delta_{int}^s \quad (9) \end{aligned}$$

رابطهٔ ۱۰ نشان دهندهٔ تابع هدف دوم است که کمینه‌سازی مجموع ضایعات مواد اولیه‌ی تأمین‌کننده و ضایعات مواد اولیه‌ی تأمین‌کننده را نشان می‌دهد.

$$\text{Min} \sum_{r,t} W_r \left( \sum_u \alpha_{rut} RS_{rut} + mw_{rt} \right) \quad (10)$$

s.t.

$$\begin{aligned} IR_{rt} &= IR_{r,t-1} + \sum_u RS_{rut} (1 - \alpha_{rut}) - \\ &\sum_i RU_{ir} x_{it} - mw_{rt} \quad \forall r, t \quad (11) \end{aligned}$$

$$IP_{it} = IP_{i,t-1} + x_{it} - \sum_{n,m} Q_{inmt} \quad \forall i, t \quad (12)$$

$$\sum_i IP_{it} \leq MaxCSP \quad \forall t \quad (13)$$

$$\sum_r IR_{rt} \leq MaxCSR \quad \forall t \quad (14)$$

$$\begin{aligned} D_{int}^s + B_{in,t-1}^s &= \sum_m Q_{inmt} \\ &+ B_{int}^s + \delta_{int}^s \quad \forall i, n, t, s \quad (15) \end{aligned}$$

$$RS_{rut} \leq RMax_{rut} y_{rut} \quad \forall r, u, t \quad (16)$$

$$RS_{rut} \geq RMin_{rut} y_{rut} \quad \forall r, u, t \quad (17)$$

$$B_{int}^s \leq BMax_{int} \quad \forall i, n, t, s \quad (18)$$

$$Q_{inmt} \leq ctu_{inmt} y_{inmt} \quad \forall i, n, m, t \quad (19)$$

مشتری n در دوره‌ی زمانی t:

$MaxCSP$ : بیشترین ظرفیت انبارش محصولات در انبار;

$MaxCSR$ : بیشترین ظرفیت انبارش مواد اولیه در انبار;

$RU_{ir}$ : تعداد مورد نیاز ماده‌ی اولیه‌ی r برای تولید محصول i;

$KcMax_t$ : زمان کاری عادی در دسترس برای تولید در دوره‌ی زمانی t;

$NumWf_t$ : تعداد نیروی انسانی در دوره‌ی زمانی t;

$MT_i$ : زمان پردازش روی محصول i;

$\alpha_{rut}$ : درصد ضایعات در ماده‌ی اولیه‌ی r تأمین شده توسط تأمین‌کننده‌ی ii در دوره‌ی زمانی t;

$W_r$ : فاکتور وزنی تأثیر ماده‌ی اولیه‌ی r در فرایند تولید;

$p_s$ : احتمال رخداد سنتاریوی s;

$\lambda$ : وزن قرار داده شده بر واریانس جواب;

$\omega$ : جریمهٔ وزنی تبادل استواری مدل.

#### متغیرها:

$x_i$ : تعداد کل محصول تولید شده‌ی i در پایان دوره‌ی زمانی t;

$IR_{rt}$ : سطح موجودی ماده‌ی اولیه‌ی r در پایان دوره‌ی زمانی t;

$IP_{it}$ : سطح موجودی محصول i در پایان دوره‌ی زمانی t;

$RS_{rut}$ : تعداد ماده‌ی اولیه‌ی r تأمین شده توسط تأمین‌کننده‌ی u در دوره‌ی زمانی t;

$B_{int}^s$ : تعداد محصول i سفارش داده شده توسط مشتری i در دوره‌ی زمانی t;

تحت سنتاریوی s که به تأخیر خواهد افتاد;

$Q_{inmt}$ : تعداد محصول i اختصاص داده شده به مشتری n حمل شده با روش حمل و نقل m در دوره‌ی زمانی t;

$mw_{rt}$ : تعداد ماده‌ی اولیه‌ی r ضایعاتی شده حین تولید در دوره‌ی زمانی t;

$y_{inmt}$ : اگر محصول i برای مشتری n با روش حمل m در دوره‌ی زمانی t ارسال شده باشد ۱ و در غیر این صورت صفر است;

$y_{rut}$ : اگر ماده‌ی اولیه‌ی r از تأمین‌کننده‌ی u در دوره‌ی زمانی t تأمین شده باشد ۱ و در غیر این صورت صفر است;

$\theta^s$ : انحراف از میانگین تحت سنتاریوی s;

$y_{int}$ : میزان تحقق تقاضای محصول i برای مشتری n در دوره‌ی زمانی t تحت سنتاریو s.

### ۳. مدل ریاضی

در مدل دوهدفه‌ی پیشنهادی، تابع هدف اول به دنبال کمینه‌سازی هزینهٔ کل است

که از حاصل جمع هزینه‌های تولید، خرید مواد اولیه، نگهداری موجودی محصول،

نگهداری موجودی مواد اولیه، حمل و نقل و سفارش به تأخیر افتاده به دست می‌آید.

معادلات هریک از این هزینه‌ها به ترتیب در عبارت ۴ تا ۹ نمایش داده شده است:

$$TPC^s = \sum_{i,t} PC_{it}^s x_{it} \quad (3)$$

$$TRC^s = \sum_{r,u,t} RC_{rut}^s RS_{rut} \quad (4)$$

$$TIPC^s = \sum_{i,t} IP_{it} IC_{it}^s \quad (5)$$

$$TIRC^s = \sum_{r,t} IR_{rt} IRC_{rt}^s \quad (6)$$

**۴. روش حل و نتایج عددی**

در این بخش مدل پیشنهادی که یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه است، حل شده و نتایج حاصل از حل آن بررسی و تحلیل می‌شوند. به منظور حل مدل با الگوریتم‌های فرالاتکاری دو الگوریتم NSGA-II<sup>۱</sup> و SPEA۲<sup>۲</sup> به کار برده شده‌اند که دو تا از کارآمدترین و پرکاربردترین الگوریتم‌ها در حل مسائل چنددهدفه به حساب می‌آیند. برتری الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ بر سایر الگوریتم‌های تکاملی در این است که هم می‌توانند مجموعه‌ی متعدد تری از جواب‌ها را پیدا کنند و هم جواب‌های نزدیک‌تری به مرز بهینه‌ی پارتوی اصلی مسئله می‌یابند.<sup>[۱۰]</sup> در این بخش، ابتدا مدل پیشنهادی با توجه به پارامترهای تعریف شده (که در پیوست آورده شده است) با روش دقیق حل شده، سپس با الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ حل می‌شود نتایج حاصل از حل مدل با روش دقیق و فرالاتکاری با هم مقایسه می‌شود. پس از آن با استفاده از شاخص ارزیابی عملکرد نقاط پارتو، عملکرد دو الگوریتم فرالاتکاری نسبت به یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، برای اخذ یک سیاست تصمیم‌گیری از میان پاسخ‌های پارتویی به دست آمده و تعیین مقدار هزینه و سطح کیفیت مطلوب، از روش تحلیل سلسه‌مراتبی (AHP) استفاده می‌شود.

#### ۱. الگوریتم SPEA۲ و NSGA-II

نسخه دوم الگوریتم زنگنه با مرتب‌سازی نامغلوب یا NSG A-II یکی از الگوریتم‌های تکاملی برای حل مسائل چنددهدفه مبتنی بر الگوریتم زنگنه است. این الگوریتم هریک از نقاط جواب را با سایر نقاط مقایسه کرده و هر نقطه را توجه به تعداد دفعات نامغلوب شدن آن رتبه‌بندی می‌کند و نقاط با رتبه‌ی یکسان را در یک مجموعه دسته‌بندی و مرتب‌سازی می‌کند. سپس با به کار بردن عملگرهای ترکیب و جهش به تولید فرزندان می‌پردازد و جمعیت جدید را براحتی انتخاب، ترکیب و فاصله‌ی ازدحامی شان تشکیل می‌دهد. این عمل تا زمانی که الگوریتم به شرط پایانی بررسی ادامه دارد. در نهایت این الگوریتم، آن دسته از نقاطی را که توسط هیچ نقطه‌ی دیگری مغلوب نشده‌اند به عنوان مجموعه‌ی نقاط پارتو نمایش می‌دهد.<sup>[۱۱]</sup> ویژگی‌های الگوریتم NSGA-II در این تحقیق به صورت زیر است:

ابتدا کروموزوم<sup>۳</sup> اولیه به طول اندازه جمعیت<sup>۵</sup> به صورت تصادفی تولید شده و توابع هدف مدل به عنوان توابع برازنده<sup>۶</sup> تعیین می‌شود. عملگرهای انتخاب، ترکیب و جهش به ترتیب به صورت چرخ رولت<sup>۷</sup>، حسابی<sup>۸</sup> و حقیقتی<sup>۹</sup> در نظر گرفته شده و اجرا می‌شود. برای اصلاح کروموزوم‌های غیر موجه از رویکرد جرمیه استفاده شده است. پس از ادغام جمعیت فعلی با کروموزوم‌های حاصل از عملیات ترکیب و جهش، بهترین کروموزوم‌ها انتخاب و به نسل<sup>۱۰</sup> بعد منتقل می‌شود. در نهایت الگوریتم زمانی خاتمه می‌یابد که با تعداد تکرارها به پایان رسیده باشد یا تغییری در جواب حاصل نشود.

الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو یا SPEA۲ نیز یک الگوریتم تکاملی چنددهدفه است که از روش k نزدیک‌ترین همسایه<sup>۱۱</sup> و مقدار قوت (تعداد دفعات مغلوب شدن هر نقطه توسط سایر نقاط) برای شناسایی نقاط نامغلوب استفاده می‌کند. این الگوریتم نقاط نامغلوب را در یک آرشیو نگهداری می‌کند. اگر تعداد نقاط نامغلوب از حجم آرشیو بیشتر باشد، الگوریتم نقاط نامغلوب اضافی را حذف خواهد کرد و اگر تعداد نقاط نامغلوب موجود در آرشیو از حجم آرشیو کم‌تر باشد،

$$Q_{inmt} \geq c t l_{inmt} y_{inmt} \quad \forall i, n, m, t \quad (۲۰)$$

$$\sum_i M T_i x_{it} \leq NumW f_t KcMax_t \quad \forall t \quad (۲۱)$$

$$\left( \begin{array}{l} TPC^s + TRC^s + TIPC^s + \\ TIRC^s + TTC^s + TBC^s \end{array} \right) \\ - \left( \sum_{s' \in S} P_{s'} \left( \begin{array}{l} TPC^{s'} + TRC^{s'} + \\ TIPC^{s'} + TIRC^{s'} \\ + TTC^{s'} + TBC^{s'} \end{array} \right) \right) \\ + \theta^s \geq 0 \quad \forall s \quad (۲۲)$$

$$x_{it}, RS_{rxt}, IP_{it}, IR_{rt}, Q_{inmt}, B_{int}^s, mw_{rt},$$

$$\theta^s, \delta_{int}^s \geq 0 \quad \text{عدد صحیح} \quad (۲۳)$$

عبارت ۱۱ نشان‌دهنده‌ی محدودیت تعادل موجودی مواد اولیه است که طبق این معادله موجودی مواد اولیه در دوره‌ی فعلی برابر است با مجموع موجودی مواد اولیه‌ی دوره‌ی قبل و تعداد مواد اولیه‌ی سالم خریداری شده از تأمین‌کننده در دوره‌ی فعلی منهاه تعداد مواد اولیه‌ی مصرف شده در تولید محصولات منهاه تعداد ضایعات مواد اولیه‌ی حین تولید.

عبارت ۱۲ نشان‌دهنده‌ی معادله‌ی تعادل موجودی محصولات است که طبق این معادله موجودی محصول در دوره‌ی فعلی برابر است با مجموع موجودی محصول در دوره‌ی قبل و تعداد محصول تولید شده در دوره‌ی فعلی منهاه تعداد ارسال شده به مشتریان.

عبارت ۱۳ نشان‌دهنده‌ی پیشینه‌ی ظرفیت انبارش محصولات در انبار.

عبارت ۱۴ نشان‌دهنده‌ی پیشترین ظرفیت انبارش مواد اولیه در انبار است.

عبارت ۱۵ نشان‌دهنده‌ی معادله‌ی تعادل سفارش به تأخیر افتاده است که طبق این معادله مجموع تقاضای یک محصول در دوره‌ی فعلی و سفارش به تأخیر افتاده‌ی آن محصول از دوره‌ی قبل برابر است با مجموع تعداد محصول ارسال شده برای مشتریان در دوره‌ی فعلی و سفارش به تأخیر افتاده در دوره‌ی فعلی.

رابطه‌ی ۱۶ نشان‌دهنده‌ی پیشترین مقدار قابل تأمین مواد اولیه از هر تأمین‌کننده است.

عبارت ۱۷ نشان‌دهنده‌ی کمترین مقدار قابل تأمین مواد اولیه از هر تأمین‌کننده است.

عبارت ۱۸ نشان‌دهنده‌ی پیشترین مقدار مجاز سفارش به تأخیر افتاده برای هر مشتری است.

عبارت ۱۹ نشان‌دهنده‌ی پیشترین ظرفیت سفارش قابل ارسال برای مشتری است.

رابطه‌ی ۲۰ نشان‌دهنده‌ی کمترین ظرفیت سفارش قابل ارسال برای مشتری است.

رابطه‌ی ۲۱ نشان‌دهنده‌ی محدودیت مربوط به کارایی نیروی انسانی است که در آن زمان کل پردازش محصولات کوچک‌تر یا مساوی کل زمان کاری در دسترس است.

عبارت ۲۲ محدودیت استوار است که از غیرمنفی شدن مقدار تابع هدف استوار تحت سناریوهای مختلف اطمینان حاصل می‌کند. عبارت ۲۳ محدودیت مقادیر متغیرهای تصمیم مدل را نمایش می‌دهد.

است. جداول ۲ و ۳ به ترتیب نتایج تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ را با روش تاگوچی نمایش می‌دهند.

برای حل مدل، ۱۱ مسئله با مقادیر س مختلف در نظر گرفته شده‌اند که مقادیر میانگین تابع هدف اول، میانگین تابع هدف دوم و زمان حل آن با سه روش حل دقیق (محدودیت اپسیلون)، SPEA۲ و NSGA-II در جدول ۴ آورده شده است.

همان‌طور که از جدول ۴ مشخص است، نتایج مقادیر تابع هدف اول و دوم با الگوریتم‌های SPEA۲ و NSGA-II بسیار به مقادیر روش دقیق نزدیک‌اند در حالی که زمان حل مدل با الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ به صورت قابل توجهی کمتر است.

طبق جدول ۴، میانگین هزینه‌ها در روش دقیق ۴۳۱۴۰۳۶ واحد است که نسبت به الگوریتم NSGA-II به میزان ۸۹۰۸۲ واحد و نسبت به الگوریتم SPEA۲ به میزان ۶۷۱۱۸ واحد بیشتر است که بیانگر این است که از نظر هزینه‌ها عملکرد الگوریتم NSGA-II نسبت به SPEA۲ و NSGA-II نسبت به روش دقیق بهتر است. همچنین میانگین تعداد ضایعات در روش دقیق ۲۷۵ واحد است که نسبت به الگوریتم NSGA-II به میزان یک واحد و نسبت به الگوریتم SPEA۲ به میزان ۱۴۳۶/۹۵ دو واحد بیشتر است که نشان می‌دهد از نظر تعداد ضایعات عملکرد سه روش دقیق، NSGA-II و SPEA۲ تقریباً یکسان است. در نهایت، میانگین زمان حل در روش دقیق ۱۵۶۶/۹۳ ثانیه است که نسبت به الگوریتم NSGA-II به میزان ۱۳۶۷/۸۵ ثانیه بیشتر است و چنین بیان می‌کند که از نظر زمان حل عملکرد الگوریتم NSGA-II نسبت به SPEA۲ و SPEA۲ نسبت به روش دقیق بهتر است.

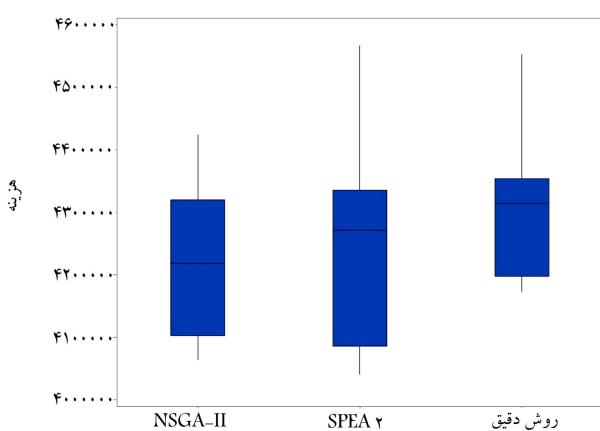
همچنین با توجه به شکل ۱ انحراف استاندارد هزینه‌ها در روش دقیق، NSGA-II

جدول ۲. مقادیر پارامترهای الگوریتم NSGA-II

	اندازه‌ی انتخاب	احتمال	تعداد نسل	ترکیب	جهش	جمعیت
رولت	۰/۱	۰/۹	۲۰۰	۵۰	۵۰	

جدول ۳. مقادیر پارامترهای الگوریتم SPEA۲

	اندازه‌ی انتخاب	احتمال	تعداد نسل	ترکیب	جهش	جمعیت
رقبه‌ی تراوی	۱۰۰	۰/۱	۰/۹	۲۰۰	۵۰	



شکل ۱. مقایسه‌ی تابع هدف اول در روش دقیق، NSGA-II و SPEA۲

الگوریتم آرشیو را با تعدادی از نقاط مغلوب با بالاترین رتبه‌ی موجود پر می‌کند. الگوریتم SPEA۲ با استفاده از عملکردهای ترکیب و جهش جمعیت جدید فرزندان را تشکیل می‌دهد.<sup>[۱۲]</sup> وینگی‌های الگوریتم SPEA۲ در این تحقیق عبارت است از: ابتدا کروموزوم اولیه به طول اندازه جمعیت به صورت تصادفی تولید می‌شود. یک آرشیو برای نگهداری کروموزوم‌های نامغلوب ایجاد شده و قوت هر کروموزوم k براساس تعداد دفعات مغلوب شدن آن سنجیده می‌شود. تابع برازنده‌گی براساس k نزدیک‌ترین همسایه به دست آمده و عملکردهای انتخاب، ترکیب و جهش به ترتیب به صورت رقات دودویی<sup>[۱۳]</sup>، حسابی و حقیقی در نظر گرفته شده و اجرا می‌شوند. برای اصلاح کروموزوم‌های غیرموجه از رویکرد جریمه استفاده شده است. پس از ادغام جمعیت فعلی با کروموزوم‌های حاصل از عملیات ترکیب و جهش، بهترین کروموزوم‌ها انتخاب و به آرشیو منتقل می‌شود. در نهایت الگوریتم زمانی خاتمه می‌یابد که یا تعداد تکرارها به پایان رسیده باشد یا تغییری در جواب حاصل نشود.

#### ۲.۴. ارزیابی عملکرد نقاط پارتو

یکی از نکات مهم در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، سنجش کیفیت پاسخ‌های پارتو به دست آمده است. با توجه به اینکه پاسخ‌های پارتویی به دست آمده از الگوریتم‌های حل، تقریبی از نقاط پارتویی اصلی مسئله‌اند، هرچه پاسخ‌های به دست آمده به مرز پارتویی اصلی مسئله نزدیک‌تر باشند از کیفیت بیشتری برخوردار خواهند بود. بدین منظور در این تحقیق از روش میانگین فاصله‌ی ایده‌آل (MID)<sup>[۱۴]</sup> استفاده شده است که فاصله‌ی پاسخ‌های پارتویی حاصل شده از الگوریتم‌های حل را نسبت به نقطه ایده‌آل که مرکز مختصات است، اندازه‌گیری می‌کند. در این روش، در مسائل کمیه‌سازی هرچه فاصله‌ی پاسخ‌های پارتو به دست آمده تا مبدأ مختصات کم‌تر باشد، پاسخ‌ها از کیفیت بالاتری برخوردارند.<sup>[۱۵]</sup>

عملکرد MID که فاصله‌ی اقلیدسی نقاط پارتو ( $c_i$ ) را نسبت به نقطه‌ی ایده‌آل (۰,۰) می‌سنجد، چنین است:<sup>[۱۶]</sup>

$$c_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2} \quad (24)$$

$$MIDM = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (25)$$

$f_1$  و  $f_2$  به ترتیب مقدار تابع هدف اول و مقدار تابع هدف دوم به دست آمده برای عضو نام هستند و  $n$  تعداد اعضای جبهه‌ی پارتو را نشان می‌دهد.

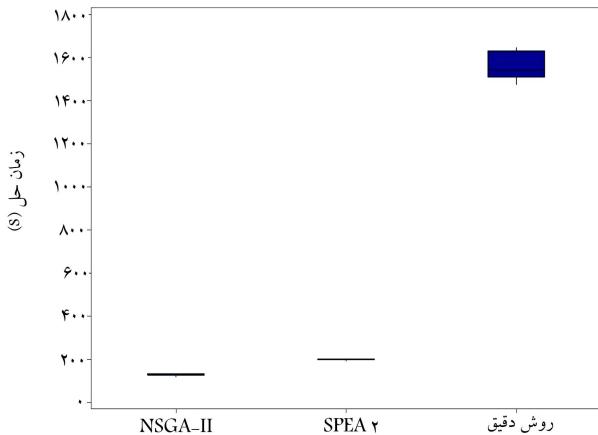
#### ۳.۴. ارائه نتایج

در این تحقیق، ۴ نوع محصول، ۱۲ دوره‌ی زمانی، ۱۲ نوع ماده‌ی اولیه، ۳ نوع روش حمل و نقل، ۴ مشتری، ۳ تأمین‌کننده و ۴ سفاربیوی خوش‌بینانه با احتمال ۰/۲۵، مورد انتظار با احتمال ۰/۵، بدینانه با احتمال ۰/۱۵ و بسیار بدینانه با احتمال ۰/۱ برای حل مدل در نظر گرفته شد. جریمه‌ی وزنی تبادل استواری مدل ( $w$ ) به صورت مقادیر بین صفر و ۱ در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای مدل پیشنهادی در پیوست شرح داده شده‌اند. مدل پیشنهادی با نرم‌افزار MATLAB R20۱۹b و روی سیستم Intel® Core™ i5-۲۴۵۰ MCPU@۲/۵۰ GHz اجرا شده است.

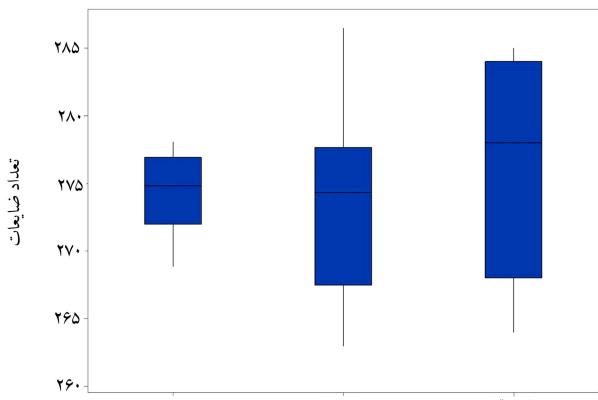
سطح پارامترهای در نظر گرفته شده برای الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ براساس روش تاگوچی<sup>[۱۷]</sup> تعیین شده، که نتایج آن به تفصیل در پیوست ذکر شده

جدول ۴. نتایج حل مدل.

روش دقیق			SPEA۲			NSGA-II			مقدار امگا	شماره مساله
زمان حل (ثانیه)	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف دوم	تابع هدف اول		
۱۵۰۸.۵۲	۲۷۸	۴۵۵۲۰۰۰	۱۹۹.۱۲	۲۶۶.۵	۴۰۸۶۰۰۰	۱۱۸.۸۳	۲۷۸.۰	۴۱۰۳۰۰۰	۰	۱
۱۶۲۴.۳۲	۲۶۷	۴۳۳۵۸۰۰	۱۹۷.۸۸	۲۷۷.۶	۴۰۴۱۱۰۰	۱۲۳.۶۲	۲۷۱.۸	۴۱۹۴۶۰۰	۰.۱	۲
۱۵۳۵.۰۴	۲۸۴	۴۳۱۴۴۰۰	۱۹۸.۳۲	۲۷۵.۹	۴۴۶۵۰۰۰	۱۲۶.۶۳	۲۷۲.۰	۴۰۶۴۴۰۰	۰.۲	۳
۱۵۱۹.۰۲	۲۶۸	۴۳۵۴۱۰۰	۱۹۶.۳۴	۲۶۷.۵	۴۲۷۱۰۰۰	۱۳۴.۸۵	۲۷۴.۴	۴۱۰۲۷۰۰	۰.۳	۴
۱۵۴۱.۹۷	۲۶۴	۴۱۷۴۰۰۰	۱۹۱.۹۸	۲۸۶.۵	۴۲۲۹۴۰۰	۱۲۷.۹۶	۲۷۵.۶	۴۲۵۸۶۰۰	۰.۴	۵
۱۴۷۴.۷۲	۲۷۴	۴۳۰۶۹۰۰	۱۹۸.۱۳	۲۷۸.۷	۴۰۷۰۸۰۰	۱۳۱.۴۸	۲۷۷.۲	۴۳۶۲۳۰۰	۰.۵	۶
۱۴۹۹.۲۸	۲۷۸	۴۲۲۱۷۰۰	۱۹۹.۹۱	۲۷۲.۴	۴۱۰۲۲۰۰	۱۳۴.۲۲	۲۷۴.۷	۴۲۲۳۵۰۰	۰.۶	۷
۱۶۴۵.۴۵	۲۷۹	۴۴۸۵۲۰۰	۲۰۲.۱۹	۲۶۳.۰	۴۵۶۶۱۰۰	۱۳۲.۰۹	۲۷۴.۸	۴۲۰۲۶۰۰	۰.۷	۸
۱۶۱۹.۲۰	۲۸۵	۴۱۸۵۳۰۰	۲۰۳.۴۶	۲۷۴.۳	۴۲۷۶۸۰۰	۱۳۳.۶۱	۲۷۴.۸	۴۳۲۰۰۰۰	۰.۸	۹
۱۶۳۴.۰۲	۲۸۴	۴۳۲۷۰۰۰	۲۰۳.۴۱	۲۷۲.۰	۴۳۴۵۶۰۰	۱۳۲.۰۹	۲۷۶.۹	۴۲۱۸۹۰۰	۰.۹	۱۰
۱۶۳۶.۱۶	۲۶۸	۴۱۹۸۰۰۰	۱۹۹.۱۶	۲۷۵.۳	۴۲۷۱۶۰۰	۱۳۴.۳۴	۲۶۸.۸	۴۴۲۳۹۰۰	۱	۱۱
۱۵۶۶.۹۲	۲۷۵.۳۶	۴۳۱۴۰۳۶.۳۶	۱۹۹.۰۸	۲۷۳.۶۱	۴۲۴۶۹۱۸.۱۸	۱۲۹.۹۸	۲۷۴.۴۶	۴۲۲۴۹۵۴.۵۵	میانگین	



شکل ۳. مقایسه زمان حل در روشن دقیق، NSGA-II و SPEA۲.



شکل ۲. مقایسه تابع هدف دوم در روشن دقیق، NSGA-II و SPEA۲.

SPEA۲ و NSGA-II از روش MID استفاده می‌کنیم که در مسائل کمینه‌سازی، هرچه مقدار شاخص MID کمتر باشد، نقاط پارتویی به دست آمده از دقت بیشتری برخوردارند. با در نظر گرفتن شکل ۴ مشاهده می‌شود که در الگوریتم NSGA-II بهترین مقدار عملکرد  $D/2 = 0$  و در الگوریتم  $SPEA2 = 0$  بهترین مقدار عملکرد بهترین مقدار عملکرد  $D/1 = 0$  را داده است. در شکل ۵ و ۶ به ترتیب نقاط پارتو الگوریتم SPEA۲ به ازای  $2/0 = 0$  و الگوریتم NSGA-II به ازای  $1/0 = 0$  نمایش داده شده است.

چنان‌که در شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، مجموعه‌یی از نقاط پارتو را داریم که در آن تمام نقاط نسبت به یکدیگر از اهمیت یکسانی برخوردارند، اما هرکدام از نقاط از سطح هریه و تعداد ضایعات متفاوتی برخوردارند. هرچه تولیدکننده هریه‌یی بیشتری برای خرید مواد اولیه‌ی باکیفیت‌تر نیروی انسانی ماهترت، روش‌های نگهداری مواد اولیه و تکنولوژی‌های تولید مطمئن‌تر بکند، طبیعتاً تعداد ضایعات مواد اولیه کمتر

باشد از نظر پراکندگی الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به روشن دقیق، و روشن دقیق عملکرد بهتری نسبت به SPEA۲ داشته است. در شکل ۲ انحراف استاندارد تعداد ضایعات با روشن دقیق و NSGA-II SPEA۲ به ترتیب برابر  $7/61 = 4/5$  و  $6/49 = 3/5$  است که نشان می‌دهد از نظر پراکندگی الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به SPEA۲ SPEA۲ عملکرد بهتری نسبت به روشن دقیق داشته است.

در شکل ۳ انحراف استاندارد زمان حل مدل با روشن دقیق، NSGA-II و SPEA۲ به ترتیب برابر  $112101 = 1/15$  و  $167369 = 1/15$  است که نشان می‌دهد از نظر پراکندگی الگوریتم SPEA۲ عملکرد بهتری نسبت به NSGA-II و NSGA-II SPEA۲ عملکرد بهتری نسبت به روشن دقیق داشته است. همان‌طور که قبلاً بیان کردیم، برای ارزیابی عملکرد نقاط پارتویی دو الگوریتم

آمده استفاده شده است. در این فرایند وزن هریک از توابع هدف  $5/5$  در نظر گرفته شده‌اند.

نتایج اجرای فرایند تحلیل سلسه‌مراتبی بیان می‌دارد که در الگوریتم NSGA-II پاسخ با مقدار هزینه‌ی  $4869000$  و تعداد ضایعات  $5/247$  و در الگوریتم SPEA۲ پاسخ با مقدار هزینه‌ی  $3957000$  و تعداد ضایعات  $8/307$  دارای بالاترین ترجیح برای تولیدکننده است که به ترتیب در شکل ۵ و ۶ با کادر مربعی دور آن مشخص شده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

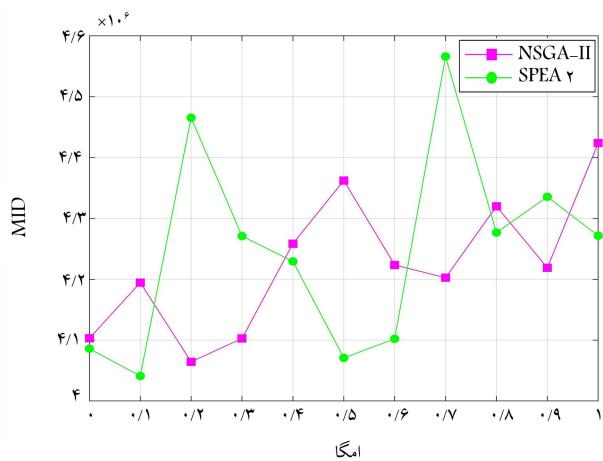
در محیط‌های تولیدی، یکی از چالش‌های تولیدکننده کاهش ضایعات سیستم با کمترین هزینه ممکن است. هرچه تولیدکننده هزینه‌ی بیشتری برای خرید مواد اولیه‌ی باکیفیت تر نیروی انسانی ماهرتر، روش‌های نگهداری مواد اولیه و تکنولوژی‌های تولید مطمئن‌تر بکند، طبیعتاً تعداد ضایعات کمتر خواهد بود.

در این تحقیق، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای زنجیره‌ی تأمین دوهدفه استوار سtar بمحور با در نظر گرفتن ضایعات مواد اولیه تأمین‌کننده، ضایعات مواد اولیه حین تولید و کارایی نیروی انسانی ارائه شد. توابع هدف مدل پیشنهادی شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی تعداد ضایعات مواد اولیه است. هزینه‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل هزینه‌های تولید، خرید مواد اولیه، نگهداری موجودی محصول، نگهداری موجودی مواد اولیه، حمل و نقل و سفارش به تأخیر افتاده می‌باشند. ضایعات مواد اولیه نیز شامل ضایعات موجود در مواد اولیه پس از خرید از تأمین‌کننده و ضایعات مواد اولیه حین تولید است. همچنین در این مدل ظرفیت‌های حمل و نقل و انبارش و روش‌های حمل و نقل متعدد در نظر گرفته شده است.

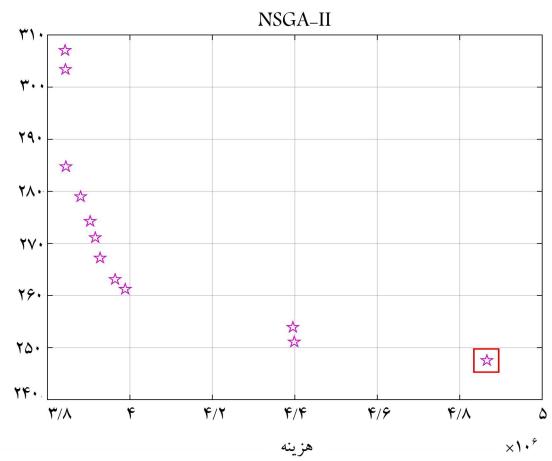
در حل مدل پیشنهادی از روش محدودیت اپسیلون و دو الگوریتم NSGA-II و SPEA۲ استفاده شد و نتایج حاصل از هر یک از این روش‌ها از نظر کیفیت جواب و زمان حل با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که کیفیت پاسخ‌های به دست آمده با هر سه روش بسیار نزدیک به هم بوده در حالی که زمان حل الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ به صورت قابل ملاحظه‌ی کمتر از روش حل دقیق است. در نهایت برای اخذ تصمیم از میان پاسخ‌های پارتویی به دست آمده با الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲ از شاخص ارزیابی عملکرد MID و روش AHP استفاده شد.

برای پژوهش‌های آتی می‌توان از رویکردهای بهینه‌سازی استوار بازه‌محور مانند رویکرد برتسیماس و سیم یا بن تال و نمیروفسکی به جای رویکرد سtar بمحور استفاده کرد. همچنین می‌توان مدل را با در نظر گرفتن چندین مرحله تولید طرح کرد. با توجه به اینکه در این تحقیق، یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی با در نظر گرفتن تأمین‌کننده، تولیدکننده و مشتری ارائه شده است، در تحقیقات آتی می‌توان این زنجیره‌ی تأمین راگسترش داد و به صورت چهارسطحی و با در نظر گرفتن مراکز توزیع نیز مدل سازی کرد.

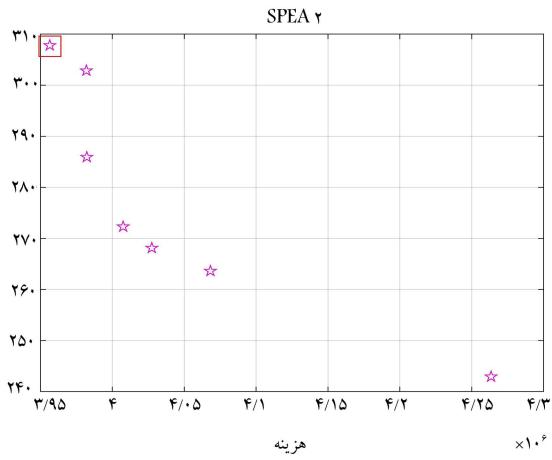
پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در مسائل واقعی کشور نیز می‌تواند ضمن بررسی چالش‌های مدل‌های نظری، منجر به عینی سازی نتایج پژوهش‌ها شود که از نیازهای اساسی کشور در حوزه‌ی پژوهش و فناوری است. در این راستا نویسنده‌گان نوشتار حاضر قصد دارند مدل پیشنهادی را در یک واحد تولیدی در استان خراسان رضوی پیاده‌سازی کنند و اطلاعات اولیه نیز جمع‌آوری شده است.



شکل ۴. شاخص MID برای الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA۲



شکل ۵. نقاط پارتو الگوریتم NSGA-II



شکل 6. نقاط پارتو الگوریتم SPEA۲

خواهد بود. از این سو، لزوم وجود روشی برای انتخاب یک پاسخ پارتو حس می‌شود که بتواند به تصمیم‌گیری مدیریت برای تعیین مطلوب‌ترین مقدار هزینه و ضایعات در زنجیره‌ی تأمین کمک کند. لذا بدین منظور در هریک از این دو الگوریتم، از روش فرایند تحلیل سلسه‌مراتبی برای انتخاب یک نقطه از میان پاسخ‌های پارتویی به دست

## پابلوشتها

1. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
2. Strength Pareto Evolutionary Algorithm2
3. Analytic Hierarchy Process
4. Chromosome
5. Population Size
6. Fitness Function
7. Roulette Wheel
8. Arithmetic Crossover
9. Real Mutation
10. Generation
11. K-Nearest Neighbor
12. Binary Tournament
13. Mean Idea Distance

## منابع (References)

1. Lee, H.L. "Lot sizing to reduce capacity utilization in a production process with defective items, process corrections, and rework", *Manage. Sci.*, **38**, pp. 1314-1328 (1992).
2. Franca, R.B., Jones, E.C., Richards, C.N. and et al. "Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality", *Int. J. Prod. Econ.*, **127**, pp. 292-299 (2010).
3. Mirzapour Al-E-Hashem, S.M.J., Malekly, H. and Aryanezhad, M.B. "A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty", *Int. J. Prod. Econ.*, **134**, pp. 28-42 (2011).
4. Sarkar, B. "Mathematical and analytical approach for the management of defective items in a multi-stage production system", *J. Clean. Prod.* **218**, pp. 896-919 (2019).
5. Slama, I., Ben-Ammar, O., Dolgui, A. and et al. "New mixed integer approach to solve a multi-level capacitated disassembly lot-sizing problem with defective items and backlogging", *J. Manuf. Syst.*, **56**, pp. 50-57 (2020).
6. Sarkar, B., Dey, B.K., Pareek, S. and et al. "A single-stage cleaner production system with random defective rate and remanufacturing", *Comput. Ind. Eng.*, **150**, p. 106861 (2020).
7. Tavan, E. and Sajjadi, S.M. "Simultaneous selection of suppliers and an inventory policy of multi-product uncertain supply chains with simulation-based optimization approach", *Sharif Ind. Eng. Manag.*, **36-1**, pp. 73-82 (2021).
8. Ghandehari, M. and Abdi, M. "Development of a model for determining an integrated production-inventory policy in a two-echelon supply chain for perishable products with consideration discounts", *Sharif Ind. Eng. Manag.*, **36-1**, pp. 63-76 (2021).
9. Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A. "Robust optimization of large-scale systems", *Oper. Res.*, **43**, pp. 264-281 (1995).
10. Coello, C.A.C., Lamont, G.B. and Van Veldhuizen, D.A. "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems", **5** (Springer 2007).
11. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and et al. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE Trans. Evol. Comput.*, **6**, pp. 182-197 (2002).
12. Zitzler, E., Laumanns, M. and Thiele, L. "SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm", *TIK-report* **103**, (2001).
13. Yen, G.G. and He, Z. "Performance metric ensemble for multiobjective evolutionary algorithms", *IEEE Trans. Evol. Comput.* **18**, pp. 131-144 (2013).
14. Behnamian, J., Ghomi, S.M.T.F. and Zandieh, M. "A multi-phase covering pareto-optimal front method to multi-objective scheduling in a realistic hybrid flowshop using a hybrid metaheuristic", *Expert Syst. Appl.* **36**, pp. 11057-11069 (2009).
15. Wu, C.F.J. and Hamada, M.S. "Experiments: planning, analysis, and optimization", **552** (John Wiley & Sons 2011).

مراحل پیاده‌سازی روش تاگوجی عبارت است از:<sup>[۱۵]</sup>

۱. محاسبه‌ی نسبت سیگنال به نویز برای هر آزمایش.

۲. برای فاکتورهایی که تأثیر قابل توجهی بر نسبت سیگنال به نویز دارند، سطح بهینه نسبت سیگنال به نویز را بیشینه می‌کند.

۳. برای فاکتورهایی که تأثیر ناچیزی بر نسبت سیگنال به نویز و تأثیر قابل توجهی بر میانگین متغیر پاسخ دارند، سطح بهینه مقدار تابع هدف را بهینه می‌کند.

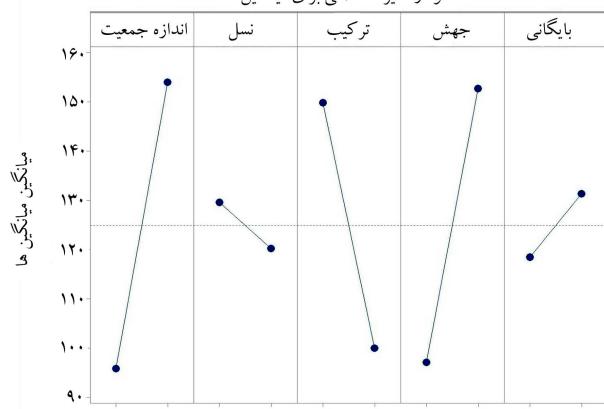
## پیوست

**پیوست ۱: تنظیم پارامترهای الگوریتم**  
در این تحقیق از روش تاگوجی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است. در روش تاگوجی از آرایه‌های متعامد (Orthogonal Arrays) برای تحلیل فاکتورها با تعداد آزمایشات کم استفاده می‌شود. به منظور تعیین سطح بهینه‌ی فاکتورها نیز نسبت سیگنال به نویز (Signal-To-Noise Ratio) بیشینه می‌شود.

جدول ۵. آزمایشات تاگوچی برای پارامترهای الگوریتم SPEA۲.

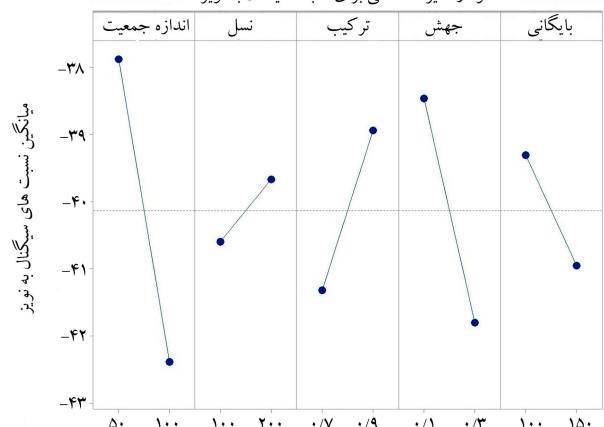
نسبت سیگنال به نویز	اندازه‌ی آرشیو	احتمال			تعداد نسل	اندازه‌ی جمعیت	شماره‌ی آزمایش
		جهش	ترکیب	جدهش			
-۳۷/۰۳۴۷	۱۰۰	۰/۱	۰/۷	۱۰۰	۵۰	۱	
-۴۲/۰۲۴۷	۱۵۰	۰/۳	۰/۷	۱۰۰	۵۰	۲	
-۳۲/۷۲۲۳	۱۰۰	۰/۱	۰/۹	۲۰۰	۵۰	۳	
-۳۸/۷۱۲۴	۱۵۰	۰/۳	۰/۹	۲۰۰	۵۰	۴	
-۴۰/۸۱۴۴	۱۵۰	۰/۱	۰/۹	۱۰۰	۱۰۰	۵	
-۴۲/۵۱۲۴	۱۰۰	۰/۳	۰/۹	۱۰۰	۱۰۰	۶	
-۴۲/۲۶۵۰	۱۵۰	۰/۱	۰/۷	۲۰۰	۱۰۰	۷	
-۴۳/۹۶۳۱	۱۰۰	۰/۳	۰/۷	۲۰۰	۱۰۰	۸	

نمودار تأثیرات اصلی برای میانگین‌ها



شکل ۷. میانگین RPD برای سطوح پارامترهای الگوریتم SPEA۲.

نمودار تأثیرات اصلی برای نسبت سیگنال به نویز



شکل ۸. میانگین نسبت سیگنال به نویز برای سطوح پارامترهای الگوریتم SPEA۲.

۴. برای فاکتورهایی که تأثیر ناچیزی بر نسبت سیگنال به نویز و میانگین متغیر پاسخ دارند، سطحی که دارای کمترین زمان محاسباتی است، بهینه خواهد بود.

در این تحقیق از درصد انحراف نسبی (RPD) (Relative Percentage Deviation) برای نرمال‌سازی مقادیر متغیر پاسخ برای هدف کمینه‌سازی مطابق رابطه‌ی ۲۶ استفاده شده است:

$$RPD = \left( \frac{sol_i - sol_{min}}{sol_{min}} \right) \times 100 \quad (26)$$

که در آن  $sol_{min}$  بهترین مقدار تابع هدف به دست آمده و  $sol_i$  مقدار تابع هدف نامین آزمایش است. کمترین مقدار متغیر پاسخ برای هدف مطلوب است در نتیجه نسبت سیگنال به نویز چنین محاسبه می‌شود:

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (27)$$

که  $y_i$  نشان‌دهنده‌ی مقدار متغیر پاسخ در نامین آزمایش و  $n$  تعداد تکرارهاست.

در این تحقیق پنج عامل اندازه جمعیت، تعداد نسل، احتمال ترکیب، احتمال جهش و اندازه آرشیو در دو سطح با طرح تاگوچی L8(2<sup>5</sup>) آزمایش شده است. طرح آزمایشات مربوطه برای الگوریتم SPEA۲ و نسبت سیگنال به نویز آنها در جدول ۵ آمده است که هر کدام از این آزمایشات ۵ بار تکرار شده است.

در شکل ۷ نمودار میانگین RPD برای هر سطح از پارامترهای الگوریتم SPEA۲ و در شکل ۸ نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز برای هر سطح از پارامترهای الگوریتم SPEA۲ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۷ و ۸ هر پنج فاکتور اندازه جمعیت، تعداد نسل، احتمال ترکیب، احتمال جهش و اندازه آرشیو به عنوان فاکتورهای تأثیرگذار بر تابع هدف مشخص شده است که سطح بهینه‌ی پارامترهای آنها برای الگوریتم‌های SPEA۲ و NSGA-II به ترتیب بهینه‌ی پارامترهای آنها برای الگوریتم‌های SPEA۲ و NSGA-II می‌باشد. به ترتیب در جدول ۲ و ۳ آمده است.

پیوست ۲: مقادیر پارامترهای مدل  
مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل مدل پیشنهادی در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. مقادیر پارامترهای مدل پیشنهادی.

نام پارامتر	مقدار پارامتر
$uniform(0,4,0,5)$	سناریو ۱
$uniform(0,45,0,55)$	سناریو ۲
$uniform(0,5,0,6)$	سناریو ۳
$uniform(0,55,0,65)$	سناریو ۴
$uniform(1,3)$	سناریو ۱
$1,1 \times uniform(1,3)$	سناریو ۲
$1,2 \times uniform(1,3)$	سناریو ۳
$1,3 \times uniform(1,3)$	سناریو ۴
$uniform(5,13)$	سناریو ۱
$uniform(7,14)$	سناریو ۲
$uniform(7,15)$	سناریو ۳
$uniform(8,16)$	سناریو ۴
$uniform(4,9)$	سناریو ۱
$uniform(5,10)$	سناریو ۲
$uniform(7,11)$	سناریو ۳
$uniform(7,12)$	سناریو ۴
$uniform(0,0,15,0,25)$	سناریو ۱
$1,1 \times uniform(0,0,15,0,25)$	سناریو ۲
$1,2 \times uniform(0,0,15,0,25)$	سناریو ۳
$1,3 \times uniform(0,0,15,0,25)$	سناریو ۴
$uniform(1,4)$	سناریو ۱
$uniform(1,25,4,25)$	سناریو ۲
$uniform(1,5,4,5)$	سناریو ۳
$uniform(1,75,4,75)$	سناریو ۴
$uniform(0,1300)$	سناریو ۱
$1,1 \times uniform(0,1300)$	سناریو ۲
$1,2 \times uniform(0,1300)$	سناریو ۳
$1,3 \times uniform(0,1300)$	سناریو ۴
$uniform(200,500)$	$RMax_{nut}$
$uniform(0,50)$	$RMin_{nut}$
$uniform(100,200)$	$ctu_{inmt}$
$uniform(10,100)$	$ctl_{inmt}$
$0.05 \times \bar{D}_{int}^s$	$BMax_{int}$
۱....	$MaxCSP$
۱۱...	$MaxCSR$
$uniform(0,2)$	$RU_{ir}$
$uniform(120,200)$	$KcMax_t$
$uniform(2,10)$	$NumWf_t$
$uniform(0,8)$	$MT_i$
.. $\Delta$	$\alpha_{nut}$
$uniform(0,0,1)$	$W_r$