

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و کاهش زمان تحویل احتمالی*

الهام ناظمی^۱

مهدی یوسفی نژاد عطاری^۲

مهدی غفاری^۳

چکیده

امروزه زنجیره تأمین و بررسی هزینه‌های آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. تعداد سطوح زنجیره تأمین و چگونگی ساختار روابط بین این سطوح می‌تواند نقش مهمی در عملکرد بهینه یک زنجیره تأمین داشته باشد. از طرفی این واقعیت مسلم غیرقابل چشم‌پوشی است که همیشه انتقال محصول یا ارائه خدمت از یک سطح زنجیره به سطح بعدی آن با مدت زمانی یکسان انجام نمی‌شود چرا که همواره به دلایلی مثل بوجود آمدن مشکلات در سیستم حمل و نقل ممکن است انتقالات با زمان تعیین شده انجام نپذیرد. لذا در این تحقیق، سعی شده است با ارائه یک مدل چند هدفه در کنار بیشینه‌سازی سود، کیفیت محصولات جابجا شده در طول زنجیره تأمین حداکثر شده و زمان تحویل نهایی حداقل گردد. پس از ارائه مدل مذکور، در ادامه به حل قطعی مدل تحت نرم‌افزار بهینه‌ساز گمز و حل غیرقطعی آن با الگوریتم‌های فراابتکاری NSGAI و MOIWO تحت نرم‌افزار متلب پرداخته شده است و نتایج حاصل از حل مسئله با این دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد، الگوریتم فراابتکاری MOIWO در همه شاخص‌ها به جز شاخص NPS از الگوریتم فراابتکاری NSGAI برتر است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین، زمان تحویل احتمالی، الگوریتم NSGAI، الگوریتم MOIWO

* تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۲.

e.nazemi68@gmail.com

۱. دانشجوی مهندسی صنایع، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

Mahdi_108108@yahoo.com

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بناب، بناب، ایران

Ghaffari@Iau-Naragh.ac.ir

۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

مقدمه

زنجیره تأمین شامل همه مراحل مستقیم و غیرمستقیمی است در برآورده سازی درخواست یک مشتری نقش دارند. در یک زنجیره تأمین مستقیم مواد خام از تأمین کنندگان به کارخانه‌ها ارسال می‌شوند، سپس محصولات تولید شده در کارخانه‌ها به انبارهای میانی و انبارهای توزیع کننده ارسال می‌شوند و از آنجا نیز به خرده فروش‌ها منتقل شده و در نهایت به دست مشتری نهایی یا همان مصرف کننده می‌رسند.

با به کارگیری رویکردهای مطرح در مدیریت زنجیره تأمین، هزینه کل سیستم مشتمل بر هزینه‌های حمل و نقل، موجودی، جابه‌جایی مواد و غیره می‌تواند کاهش یابد. اما در رویکرد سیستمی صرفاً کاهش هزینه‌های حمل و نقل، موجودی‌ها و غیره مدنظر نیست بلکه مدیریت زنجیره تأمین قصد دارد کارایی کل زنجیره را بهبود داده و سطح خدمت به مشتری را با افزایش کیفیت و کاهش زمان تحویل نیز افزایش دهد.

نکته حائز اهمیت دیگری نیز که باید به آن اشاره نمود در نظر گرفتن لایه‌ای در شبکه است که تسهیلات یا گره‌های فعال موجود در آن به صورت تأمین کننده‌های عمده عمل می‌نمایند. تأمین کننده عمده عبارت است از تعریف استراتژی لجستیکی که ثمره آن کاهش میزان موجودی در گردش و کاهش هزینه‌های حمل و نقل باشد. این مفهوم بسته به ساختار شبکه زنجیره تأمین، به صورت‌های مختلفی می‌تواند در شبکه به کار رود. در این تحقیق شبکه زنجیره تأمین مطرح شده در مفهوم تأمین کنندگان عمده بعنوان تسهیل واسطی عمل می‌کند که از طریق آن محصولات تولید شده می‌توانند به توزیع کنندگان انتقال یابند.

با توجه به این که کالاها در طول زنجیره تأمین توسط وسایل نقلیه خاصی میان لایه‌های مختلف در زنجیره انتقال داده می‌شوند، لذا در مدل این تحقیق، با در نظر گرفتن مدل به صورتی ترکیبی، این موضوع نیز تعیین می‌گردد که کدام از یک نقاط کاندید در

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و ۳۳

هر لایه بعنوان تسهیل بالقوه تعیین می‌شوند. این امر نیز از اهمیت خاصی برخوردار بوده و باید در ساختار شبکه زنجیره تأمین مورد توجه قرار گیرد.

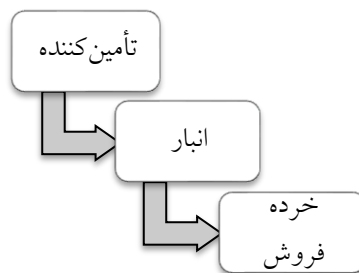
در حالت کلی زنجیره تأمین از دو یا چند سازمان تشکیل می‌شود که رسماً از یکدیگر جدا هستند و به وسیله جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی به یکدیگر مربوط می‌شوند. این سازمان‌ها می‌توانند بنگاه‌هایی باشند که مواد اولیه، قطعات، محصول نهایی یا خدماتی چون توزیع، انبارش، عمده‌فروشی و خرده‌فروشی را ارائه می‌دهند و حتی خود مصرف‌کننده نهایی را نیز می‌توان یکی از این سازمان‌ها در نظر گرفت. لذا در این تحقیق سه سطح زیر که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است، بصورت زیر مدنظر است:

- تأمین‌کنندگان: سازمان‌هایی که بخشی از کالاها یا خدمات مورد نیاز جهت تولید محصول یا ارائه خدمت به مشتری را تأمین می‌کنند.

- انبار: محل و فضایی است که یک یا چند نوع کالای بازرگانی، صنعتی، مواد اولیه یا فرآورده‌های مختلف در آن نگهداری می‌شود که بر اساس یک سیستم صحیح طبقه‌بندی و تنظیم می‌گردد.

- خرده‌فروشان: کسانی که به مصرف‌کننده نهایی می‌فروشند.

در واقع در این تحقیق، سعی شده است با ارائه یک مدل ریاضی کارا برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی با تقاضای احتمالی، سود کل زنجیره تأمین حداکثر شده، قابلیت اطمینان بعنوان یکی از جنبه‌های کیفیت محصولات بیشینه شده و زمان تحویلی احتمالی کل حداقل گردد.



شکل ۱. ساختار شبکه زنجیره تأمین تحقیق حاضر

ادامه مقاله در بخش‌های دوم تا پنجم سازماندهی شده است. در بخش دوم مقاله به ادبیات موضوعی پرداخته شده است. مدل ریاضی چندهدفه در بخش سوم مقاله انجام شده است و در قسمت چهارم به حل مدل و نهایتاً در قسمت آخر نتایج تحقیق ارائه شده است.

پیشینه پژوهش

در کنار افزایش سود کلی زنجیره تأمین، بررسی زمان‌های تحویل از جمله مهمترین فاکتورهای تأثیرگذار بر زنجیره تأمین است. در اغلب تحقیقات صورت گرفته در حوزه زنجیره تأمین، زمان‌های تحویل مدنظر قرار می‌گیرند با این حال، در برخی تحقیقات زمان‌های تحویل قطعی در نظر گرفته شده است. در حالی که در تحقیقات واقع بینانه‌تر زمان‌های تحویل غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. زمان‌های تحویل شارژ مجدد، بر پارامترهای سیستم کنترل موجودی تأثیرگذار است به نحوی که در یک سیستم «مقدار سفارش / نقطه سفارش» هر دو مشخصه سیستم (مقدار سفارش و نقطه سفارش) متأثر از دو پارامتر اصلی است که یکی از آن‌ها سفارشات رسیده و دیگری زمان‌های تحویل شارژ مجدد است. علاوه بر این تغییرات زمان تحویل بین مراحل متوالی زنجیره تأمین، هماهنگی زنجیره را نیز مختل می‌نماید (بوکبایندرو و کاکانلیدریم، ۱۹۹۹). در برخی تحقیقات بحث وجود دو منبع تأمین که دارای شیوه‌های حمل متفاوتی بوده و انتخاب بین آن دو با برقراری یک توازن بین هزینه‌های اضافی پرداخت شده برای حمل سریع تر و کاهش هزینه‌های ناشی از کاهش سطح موجودی اطمینان، مدنظر قرار گرفته است (رامش و همکاران، ۱۹۹۱). در تحقیق ارائه شده توسط کیامثلر^۱ و همکاران معیارهای سطح پاسخگویی زنجیره نیز مدنظر قرار گرفته است (کیامثلر و همکاران، ۲۰۰۵). این درحالی است که توجه به سایر معیارهای عملکردی سیستم سفارش‌دهی و سیستم کنترل موجودی زنجیره تأمین مانند واریانس سفارشات، متوسط اندازه سفارشات، مقادیر کمبود و ... که همگی می‌توانند متأثر از زمان تحویل باشند نیز حائز اهمیت فراوانی است. همچنین ایشان

نشان دادند که استفاده از شیوه‌های حمل و نقل کندتر برای اقلام کم ارزش که زمان تحویل را افزایش می‌دهند از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است. در تحقیق مذکور با مدل‌سازی یک سیستم تأمین دو منبعی (منبع سریع و منبع کند) نشان داده شده است که صرفه جویی ناشی از نگهداری موجودی اطمینان کمتر، همواره از هزینه‌ای که برای استفاده از منبع تأمین سریع تر صرف می‌شود، بیشتر نیست. به عبارت دیگر همواره استفاده از تأمین کننده با زمان تحویل کمتر مقرون به صرفه نیست. در تحقیق مذکور تصمیمات سفارش دهی از تصمیمات حمل و نقل جدا شده‌اند یعنی این امکان وجود داشته است که زمان تحویل سفارش صادر شده بنا بر درخواست سفارش دهنده با صرف هزینه‌های مشخص تسریع شود. تحقیقات زیادی در ارتباط با تسریع زمان‌های تحویل با استفاده از شیوه‌های حمل و نقل، انتخاب تأمین کننده مناسب یا انتخاب فرآهم آورنده خدمات حمل و نقل مناسب انجام شده است و در اغلب آن‌ها سعی بر دستیابی به مدل‌های بهینه در انتخاب شیوه حمل، تأمین کننده یا فراهم آورنده خدمات حمل و نقل بوده است ولی هیچ یک از تحقیقات مذکور پاسخ مشخصی به سوالات زیر نداده‌اند:

"آیا در انتخاب شیوه حمل، شیوه‌های حمل و نقلی که میانگین زمان را کاهش می‌دهند مناسب‌تر هستند یا شیوه‌هایی که واریانس کمتری از لحاظ زمانی دارند؟" یا "آیا توزیع آماری زمان حمل تأثیری بر عملکرد زنجیره دارد یا خیر؟" یا به طور خاص "در شرایط مشابه، منبعی که زمان تحویل آن از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند ارجح است یا منبعی که زمان تحویل آن دارای توزیع نرمال است؟".

بقالیان و همکارانش در سال ۲۰۱۳ یک شبکه زنجیره تأمین چندمحصولی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان تحویل طراحی کرده‌اند و از روش استوار برای برخورد با عدم قطعیت استفاده کرده‌اند. آن‌ها همچنین مدلشان را بر روی صنعت مواد غذایی کشاورزی نیز آزمودند. ماهیت داده‌ها می‌تواند قطعی یا غیرقطعی باشد (بقالیان و همکاران، ۲۰۱۳). وی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک زنجیره تأمین حلقه بسته با تقارن اطلاعاتی را

مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به منظور بررسی قیمت فروش محصولات که زمان تحویل آن‌ها احتمالی است رویکرد تئوری بازی‌ها استفاده شده است. در این تحقیق به تعیین قیمت عمده فروشی و خرده فروشی و نیز میزان نگهداری در هر یک از انبارها در شرایط متقارن اطلاعاتی پرداخته شده است (وی و همکاران، ۲۰۱۵). گاویندان و همکاران در سال ۲۰۱۵ به ارائه یک مدل ریاضی دو هدفه برای یک زنجیره تأمین با زمان تحویل احتمالی پرداختند. آن‌ها به حل مدل ریاضی ارائه شده تحت تکنیک رباست پرداختند (گاویندان و همکاران، ۲۰۱۵). ژانک و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه با هدف مینیم کردن زمان انتظار و حداقل نمودن هزینه کل پرداختند. در این مدل زمان تحویل کالا به مشتریان به صورت احتمالی در نظر گرفته شده است (ژانک و همکاران، ۲۰۱۶). طلایی و همکاران در سال ۲۰۱۶، به طراحی زنجیره تأمین چند سطحی در صنعت الکترونیک به صورت حلقه بسته سبز پرداخته‌اند. در این تحقیق هدف ارائه زنجیره‌ای است که کمترین میزان کربن تولیدی را داشته باشد و همچنین کمترین هزینه را به کل زنجیره وارد کند. به منظور طراحی زنجیره تأمین مورد نظر، مکان‌یابی مراکز تولیدی و مراکز انباشت و مراکز بازاریافت تصمیم‌گیری می‌شود. این مسئله در شرایط عدم قطعیت زمان تحویل قطعات پیاده‌سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (طلایی و همکاران، ۲۰۱۶).

کایا و یورک در سال ۲۰۱۶، یک مدل غیرخطی عدد صحیح به منظور مکان‌یابی و تعیین موجودی و نیز قیمت فروش در یک زنجیره حلقه بسته ارائه کردند. در این تحقیق زمان تحویل به صورت یک رابطه نمایی از میزان قیمت تعیین شده ارائه شده است. به منظور حل این مدل یک روش ابتکاری مبتنی بر سیستم سفارش موجودی و نیز دوره سفارش‌دهی طراحی و پیاده‌سازی شده است (کایا و یورک، ۲۰۱۶). زهل و سلیمانی در سال ۲۰۱۶، به ترکیب لجستیک رفت و لجستیک معکوس با در نظر گرفتن زمان تحویل قطعی به منظور طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته‌اند. برای این منظور علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره، کاهش تولید گازهای CO₂ بعنوان یک هدف سبز نیز

ارائه و حل يك مدل زنجيره تأمين سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و ۳۷

معرفی شده است. برای حل این مدل يك الگوریتم كلونی مورچگان توسعه داده شده است (زهل و سلیمانی، ۲۰۱۶). الحاج و همکاران در سال ۲۰۱۶ يك مدل ریاضی دوسطحی با زمان تحویل احتمالی ارائه دادند. زنجیره تأمين طراحی شده توسط این محققان، نسبت به میزان کربن دی اکسید موجود در هوا حساس بود (الحاج و همکاران، ۲۰۱۶). در جدول (۱) مطالعات انجام شده با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۱. خلاصه مهمترین تحقیقات انجام شده

محققین	سال	زمان تحویل قطعی	زمان تحویل احتمالی	مدل ریاضی تک‌هافه	پیشینه سازی کیفیت	مدل ریاضی چندهدفه	حل قطعی	حل غیرقطعی	مقایسه کارایی الگوریتم‌های حل
ژانک و همکاران	۲۰۱۶	*	*	*	*	*	*	*	*
کیانلر و همکاران	۲۰۱۶	*	*	*	*	*	*	*	*
طلایی و همکاران	۲۰۱۶	*	*	*	*	*	*	*	*
کایا و یورک	۲۰۱۶	*	*	*	*	*	*	*	*
زهل و سلیمانی	۲۰۱۶	*	*	*	*	*	*	*	*
الحاج و همکاران	۲۰۱۶	*	*	*	*	*	*	*	*
وی و همکاران	۲۰۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*
گاوبندان و همکاران	۲۰۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*
بقالیان و همکاران	۲۰۱۳	*	*	*	*	*	*	*	*
لیانگ و همکاران	۲۰۱۷	*	*	*	*	*	*	*	*
حسین و همکاران	۲۰۱۷	*	*	*	*	*	*	*	*
سرکار و همکاران	۲۰۱۷	*	*	*	*	*	*	*	*
وانگ و دیسنی	۲۰۱۷	*	*	*	*	*	*	*	*
پژوهش حاضر	۲۰۱۷	*	*	*	*	*	*	*	*

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد توجه همزمان به موضوع حداکثرسازی سود، افزایش کیفیت و حداقل‌سازی زمان تحویل کل احتمالی مدنظر محققین قرار نگرفته است.

بنابراین در این تحقیق در یک زنجیره تأمین با سطوح تأمین کننده، انبار و خرده فروش یک مدل ریاضی چندهدفه جهت کاهش زمان تحویل احتمالی و افزایش کیفیت در کنار حداکثرسازی سود توجه شده است. همچنین در این تحقیق به مقایسه کارایی دو الگوریتم فراابتکاری^۱ NSGAI و^۲ MOIWO پرداخته شده است.

روش شناسی پژوهش

در این تحقیق بیان مسئله با مفروضات زیر تعریف می شود:

- موجودی تأمین کنندگان در پایان هر سیکل می تواند هر عددی باشد.
- سیاست موجودی صفر برای خرده فروشان امکان پذیر است.
- افق زمانی برای بررسی هزینه ها محدود در نظر گرفته شده است.
- در انبار تأمین کنندگان هزینه های استهلاک و خرابی مورد توجه قرار نگرفته است.
- محدودیت ذخیره سازی در انبار وجود دارد.
- نرخ تولید همه تأمین کنندگان یکسان فرض شده است.
- پارامترهای مدل از توزیع های احتمالی یکنواخت و نرمال تبعیت می کنند.

اندیس های به کار رفته در مدل ریاضی عبارتند از:

n	اندیس محصولات مختلف ($n=1,2,\dots,N$)
i	اندیس تأمین کنندگان ($i=1,2,\dots,I$)
j	اندیس انبارها ($j=1,2,\dots,J$)
k	اندیس خرده فروش ها ($k=1,2,\dots,K$)
t	اندیس دوره های مختلف زمانی ($t=1,2,\dots,T$)

پارامترهای به کار رفته در مدل ریاضی عبارتند از:

	P_1
تعداد تسهیلات بالقوه تأمین کنندگان	
P_2	
تعداد انبارهای بالقوه در انبار مرکزی	
P_3	
تعداد خرده فروشان بالقوه	
α	
درصد اقلام معیوب	
Pr_{nkt}	
قیمت فروش هر واحد از محصول n ام توسط خرده فروش k ام در دوره t ام	
$F1_i$	
هزینه ثابت استقرار تأمین کننده i ام	
$F2_j$	
هزینه ثابت استقرار انبار زام	
$T1_{jnt}$	
زمان نگهداری محصول n ام در انبار زام انبار مرکزی در دوره t ام	
$T4_{jnt}$	
زمان نگهداری محصول n ام در قسمت زام در دوره t	
$E(T3_{jkt})$	
ارزش انتظاری حمل محصول n ام از انبار زام به خرده فروش k ام در دوره t ام	
$E(T2_{nijt})$	
ارزش انتظاری حمل محصول n ام از مرکز تأمین کننده i ام به انبار زام از در دوره t	
$H1_{njt}$	
هزینه نگهداری محصول n ام در انبار زام در دوره t ام	
$H2_{nkt}$	
هزینه نگهداری محصول n ام در خرده فروش k ام در دوره t ام	
$C1_{nijt}$	
هزینه حمل و نقل محصول n ام از تأمین کننده i ام به انبار زام در دوره t	
$C2_{njkt}$	
هزینه حمل و نقل محصول n ام از انبار زام به خرده فروش k ام در دوره t ام	
β	
ضریب نگهداری محصول	
Rd	
احتمال از کار افتادگی تأمین کننده	
$Ca1_j$	
گنجایش انبار زام	
$Ca2_k$	
گنجایش خرده فروش k ام	
متغیرهای تصمیم به کار رفته در مدل ریاضی عبارتند از:	
$X1_i$	اگر تأمین کننده i ام انتخاب شود یک و در غیر اینصورت صفر
$X2_j$	اگر انبار زام مورد استفاده قرار گیرد یک و در غیر اینصورت صفر
$X3_k$	اگر خرده فروش k ام انتخاب شود یک و در غیر اینصورت صفر

- $S4_{knt}$ زمان رسیدن محصول n ام به خرده فروش k ام در دوره t ام
 $S2_{jnt}$ زمان رسیدن محصول n ام به قسمت j ام انبار در دوره t ام
 $S1_{nijt}$ زمان ارسال محصول n ام از تأمین کننده i ام به قسمت j ام انبار در دوره t ام
 $S3_{jnt}$ زمان ارسال محصول n ام از قسمت j ام انبار به خرده فروش k ام در دوره t ام
 $Y1_{njt}$ مقدار ذخیره محصول n ام در انبار j ام در دوره t ام
 $Y2_{nkt}$ مقدار ذخیره محصول n ام در خرده فروش k ام در دوره t ام
 $Y3_{nkt}$ مقدار فروش محصول n ام توسط خرده فروش k ام در دوره t ام
 $Y4_{nijt}$ مقدار محصول n ام که از تأمین کننده i ام به انبار j ام در دوره t ام منتقل می گردد
 $Y5_{njkt}$ مقدار محصول n ام ارسالی از انبار j ام به خرده فروش k ام در دوره t ام

تابع هدف به کار رفته در مدل ریاضی عبارتند از:

$$Max Z_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T Pr_{nkt} Y3_{nkt} - \sum_{i=1}^I F1_i X1_i - \sum_{j=1}^J F2_j X2_j \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (1-\alpha) H1_{njt} Y1_{njt} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \beta Y2_{nkt} H2_{nkt} \\
 & - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C1_{nijt} Y4_{nijt} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C2_{njkt} Y5_{njkt}
 \end{aligned}$$

$$Max Z_2 = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (1-Rd) Y4_{nijt} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Min Z_3 = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T S4_{knt} \quad \text{رابطه (۳)}$$

محدودیت های به کار رفته در مدل ریاضی عبارتند از:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Y4_{nijt} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T Y5_{njkt} (1-\alpha) \quad \forall j \in J \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$I \leq \sum_{i=1}^I X1_i \leq P1 \quad \text{رابطه (۵)}$$

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و ۴۱

$$I \leq \sum_{j=1}^J X2_j \leq P_2 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$I \leq \sum_{k=1}^K X3_k \leq P_3 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\forall n \in N, j \in J, i \in I, t \in T S1_{nijt} \geq Tl_{jnt} \cdot X1_i \quad \text{رابطه ۸}$$

$$(S1_{nijt} + E(T2_{nijt})) \cdot X2_j \cdot X1_i \leq S2_{jnt} \quad \forall n \in N, j \in J, i \in I, t \in T \quad \text{رابطه ۹}$$

$$(S2_{jnt} + T4_{jnt}) \cdot X2_j \leq S3_{jnt} \quad \forall n \in N, j \in J, k \in K, t \in T \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\forall n \in N, j \in J, k \in K, t \in T (S3_{jnt} + E(T3_{jnt})) \cdot X2_j \cdot X3_k \leq S4_{knt} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T Y4_{nijt} \leq Ca2_j \cdot X2_j \quad j \in J \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Y5_{njkt} \leq Ca2_k \cdot X3_k \quad k \in K \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$S1_{nijt}, S2_{jnt}, S3_{jnt} \geq 0 \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$Y1_{njt}, Y2_{nkt}, Y3_{nkt}, Y4_{nijt}, Y5_{njkt} \geq 0, Int \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$X1_i, X2_j, X3_k = 0, 1 \quad \text{رابطه ۱۶}$$

تابع هدف اول ارائه شده در رابطه (۱) مربوط به حداکثرسازی سود می باشد. رابطه شماره (۲) مربوط به حداکثرسازی کیفیت می باشد. تابع هدف سوم در رابطه (۳) نیز زمان کل رسیدن کالاها در انبارهای مختلف را با هدف افزایش رضایت مشتریان و افزایش قابلیت دسترس پذیری کالاها را حداقل می نماید. محدودیت (۴) بیان می کند که α درصد محصولاتی که از تأمین کننده های مختلف به قسمت زام انبار می رود دچار خرابی می شود و مابقی محصولات انبار به سوی خرده فروش ارسال می شود. محدودیت (۵) بیان گر این است که فقط p_1 تا تأمین کننده می توان در محل های مورد نظر ایجاد نمود. محدودیت (۶) بیان می کند که p_2 تا قسمت انبار می توانند به صورت فعال در نظر گرفته شوند. محدودیت (۷) تضمین می کند که فقط p_3 خرده فروش می توانند به صورت خرده فروش فعال انتخاب شوند. محدودیت (۸) زمان شروع ارسال محصول از تأمین کننده به انبار را محاسبه می کند.

محدودیت (۹) زمان تحویل محصول n ام به انبار z ام را محاسبه می کند. محدودیت (۱۰) زمان ارسال محصول از انبار به خرده فروش را محاسبه می کند. محدودیت (۱۱) زمان رسیدن کالا به دست خرده فروش را محاسبه می نماید. محدودیت های (۱۲) و (۱۳) بیانگر محدود بودن ظرفیت انبارها و خرده فروشان در دریافت کالاها می باشند. روابط (۱۴) تا (۱۶) نوع متغیرهای به کار رفته را نشان می دهند.

مقادیر $E(T_{2nijt})$ و $E(T_{3jknt})$ طبق روابط (۱۷) و (۱۸) قابل محاسبه است.

$$E(T_{2nijt}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t \leq T_{2nijt}) T_{2nijt} dt \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$E(T_{3jknt}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t \leq T_{3jknt}) T_{3jknt} dt \quad \text{رابطه ۱۸}$$

خطی سازی مدل

باتوجه به این که محدودیت های (۹) و (۱۱) به صورت غیر خطی می باشند، لذا رویه زیر برای خطی سازی هر کدام از محدودیت های فوق به کار می رود:

عبارت X_{2j}, X_{1i} که در محدودیت (۹) و عبارت X_{2j}, X_{3k} در محدودیت (۱۰) غیر خطی هستند که جهت خطی سازی محدودیت های (۱۹) تا (۲۴) جایگزین می شوند:

$$X_{4ij} \leq X_{1i} \quad \forall i \in I, j \in J \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$X_{4ij} \leq X_{2j} \quad \forall i \in I, j \in J \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$X_{4ij} \geq X_{1i} + X_{2j} - 1 \quad \forall i \in I, j \in J \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$X_{5jk} \leq X_{3k} \quad \forall k \in K, j \in J \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$X_{5jk} \leq X_{2j} \quad \forall k \in K, j \in J \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$X_{5jk} \geq X_{3k} + X_{2j} - 1 \quad k \in K, j \in J \quad \text{رابطه ۲۴}$$

نتیجه گیری و پیشنهادها

به منظور تعیین اعتبار مدل و صحت عملکرد آن، یک نمونه مسئله ارائه شده و این مسأله در نرم افزار GAMS با SOLVER برنامه ریزی غیر خطی به نام BARON، روی

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و ۴۳

یک کامپیوتر شخصی با مشخصات پردازنده‌ی Intel Core i5-3230M 2.6GHz و ۶ گیگا بایت رم اجرایی با سیستم عامل ویندوز ۸ نسخه ۱ حل شده است. داده‌های این مثال در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. داده‌های مثال اعتبار سنجی مدل

مقدار	پارامتر
۳	تعداد محصول
۳	تعداد تأمین کننده
۳	تعداد انبار
۳	تعداد خرده فروش
۳	تعداد دوره ها

سایر پارامترهای مسئله به صورت تصادفی مقداردهی شده‌اند. از آنجا که مدل ریاضی به صورت چندهدفه است و نرم افزار GAMS به صورت تک هدفه مدل ریاضی را حل می کند، لذا با استفاده از روش ϵ -constraint مسئله تک هدفه شده است. طبق این روش تابع هدف اول بعنوان تابع هدف اصلی تعریف شده و تابع هدف دوم و سوم با این تکنیک به محدودیت تبدیل شدند. حل مسئله با نرم افزار GAMS و با حل کننده BARON انجام شده است. مقدار بهینه هر یک از توابع هدف به شرح جدول (۳) می باشد.

جدول ۳. مقدار توابع هدف به دست آمده از نرم افزار گمز

مقدار	تابع هدف
۱۶۵۷۸۵	هدف اول (حداکثر سازی سود)
۳۴۹۷	تابع هدف دوم (حداکثر سازی کیفیت)
۲۷۹۴	تابع هدف سوم (حداقل سازی زمان)

از آنجا که مهمترین رکن این زنجیره، مکان یابی تأمین کننده‌ها، انبار ها و خرده فروشان است، پس از حل مدل ریاضی خروجی های زیر در خصوص مکان یابی ارائه شده است. در ادامه در جداول (۴) و (۵) مکان یابی تأمین کننده‌ها مشخص شده است. عدد ۰ به معنای عدم انتخاب و عدد ۱ به معنای انتخاب تأمین کننده می باشد.

جدول ۴. تأمین‌کننده‌های انتخاب شده در حالت بهینه

تأمین کننده	۱	۲	۳
انتخاب/عدم انتخاب	۰	۱	۰

جدول ۵. انبارهای انتخاب شده در حالت بهینه

انبار	۱	۲	۳
انتخاب/عدم انتخاب	۱	۰	۱

جدول ۶. خرده فروش‌های انتخاب شده در حالت بهینه

خرده فروش	۱	۲	۳
انتخاب/عدم انتخاب	۱	۱	۱

پس از حل این مثال نتایج زیر بدست آمده است. با توجه به این که جواب‌های بدست آمده برای متغیرهای تصمیم معقول می‌باشد و با حل و تحلیل دستی این مثال تطابق دارد. لذا مدل ریاضی ارائه شده کارا و معتبر است. در ادامه به تحلیل و بررسی کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده در خصوص حل مدل مورد نظر پرداخته می‌شود. در ابتدا لازم است مقدار پارامترهای هر یک از الگوریتم‌ها بهینه‌سازی شود. برای این کار از تکنیک طراحی آزمایشات به روش تاگوچی استفاده خواهد شد.

طراحی آزمایشات به روش تاگوچی

در تکنیک تاگوچی اطلاعات حیاتی با تعداد آزمایش و تجربه بسیار کمتری فراهم می‌شود. نتیجه آن است که محصولات و فرایندها به منظور مقاومت در برابر (اغتشاش) ایجاد می‌شوند. به نظر تاگوچی، طراحی جزء اصلی هزینه محصول نهایی است و توسعه محصول سه مرحله دارد:

۱. طراحی سیستم: طراحی سیستم توأم با نوآوری است و نیاز به دانش مهندسی دارد؛

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و ۴۵

۲. طراح پارامتر: مرحله کلیدی است که در آن مقادیر پارامتری محصول و سطوح عمل عوامل فرایند طوری تعیین می‌شود که حداقل حساسیت را به عوامل اغتشاش داشته باشد؛

۳. طراحی تلرانس: به معنی صرف پول برای مواد، اجزاء یا ماشین آلات مرغوب‌تر است اما تنها در صورتی که انحرافات کاهش یافته حاصل از طراحی پارامتر، کفایت لازم را نداشته باشد.

تابع زیان ایده مهم دیگری است که تاگوچی بیان کرده است و تأثیر بسیار در اندیشه و عمل کیفیت داشته است. این ایده جایگزین دیدگاه سنتی می‌شود که بر اساس آن محصولات در صورتی که حدود مشخصات را محقق کنند قابل قبول هستند. چنین دیدگاهی به معنی آن است که حدی وجود دارد که محصول به علت ناتوانی برای تحقق مشخصات در آن حد، غیرقابل قبول می‌شود. تاگوچی استدلال می‌کند که انحراف در محصول حتی در حیطه حدود مشخص شده «زیانی برای اجتماع» در دوره عمر محصول ایجاد می‌کند و هرچه محصول از ارزش مورد نظر خود دورتر می‌شود، انحطاط در عملکرد آن بیشتر خواهد بود. تاگوچی بر این باور است که زیان متناسب با مربع انحراف از ارزش مورد نظر است. اگر محصولی که به مشتری می‌رسد نتواند کارکرد خود را داشته باشد، زیان وارد می‌کند. این زیان از طرف مشتری در هزینه‌های تعمیر و جایگزینی و از طرف سازنده در هزینه‌های تضمین، افت اعتبار شرکت و از دست رفتن شغل و بازار جلوه می‌کند. برای به حداقل رساندن این زیان، بهبود کیفیت باید تا رسیدن به کمال هدف ادامه یابد و دیگر حدود مشخصات فنی هدف نیستند. اقدامات بهبود هرگز نباید متوقف شود.

طراحی آزمایشات برای پارامترهای الگوریتم NSGAII

بر اساس ساختار روش تاگوچی ابتدا برای هر یک از پارامترهای الگوریتم NSGAII سه مقدار پیشنهاد می‌شود. مقادیر پیشنهادی به شرح جدول ۷ می‌باشند.

جدول ۷. پارامترها و سطوح مقادیر آنها برای الگوریتم NSGA II

الگوریتم مورد بررسی	پارامتر	مقادیر هر سطح		
		سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
NSGA-II	احتمال تقاطع ^۱	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	احتمال جهش ^۲	۰/۰۳	۰/۱	۰/۱۵
	تعداد جمعیت اولیه ^۳	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
	حداکثر تعداد تکرار ^۴	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰

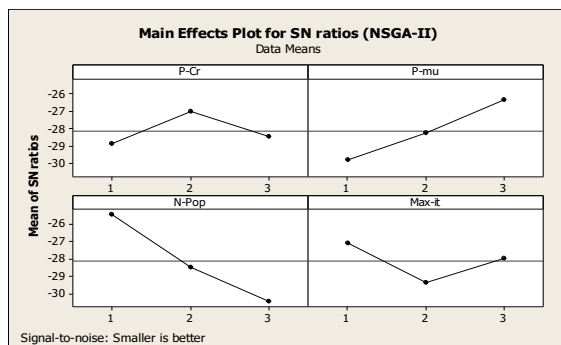
سپس به ازای طرح L9 تاگوجی به ازای حالات زیر الگوریتم NSGA II اجرا شده و خروجی های آن در جدول ۸ ارائه شده است

جدول ۸. مقدار متغیر پاسخ در تکنیک تاگوجی برای NSGAII

شماره آزمایش	پارامترهای الگوریتم				پاسخ NSGA-II
	احتمال تقاطع	احتمال جهش	تعداد جمعیت	حداکثر تکرار	
۱	۱	۱	۱	۱	۲۱/۹۸
۲	۱	۲	۲	۲	۳۳/۷۹
۳	۱	۳	۳	۳	۲۸/۹۱
۴	۲	۱	۲	۳	۲۷/۸۳
۵	۲	۲	۳	۱	۲۶/۴۷
۶	۲	۳	۱	۲	۱۵/۵۵
۷	۳	۱	۳	۲	۱۵/۰۵
۸	۳	۲	۱	۳	۱۹/۳۴
۹	۳	۳	۲	۱	۲۰/۰۲

پس از وارد کردن این اطلاعات در نرم افزار MINTAB و اجرای روش تاگوجی، نمودار S/N به صورت شکل ۲ ارائه شده است.

1 Percentage of Crossover (Pc)
 2 Percentage of Mutation (Pm)
 3 Number of Solutions in the Population (N-pop)
 4 Maximum iteration(Max-iteration)



شکل ۲. خروجی مینی تب برای روش تاگوچی در الگوریتم NSGA II

بر اساس نمودار فوق ، برای هر پارامتر مقداری مناسب است که کمترین مقدار S/N را داشته باشد. لذا در خصوص الگوریتم NSGAII مقادیر زیر مقادیر بهینه می باشند و سایر مثال ها با این مقادیر اجرا خواهند شد.

جدول ۹. مقدار بهینه پارامتر های NSGA II

الگوریتم مورد بررسی	پارامتر	مقدار بهینه
NSGA-II	احتمال تقاطع	۰/۷
	احتمال جهش	۰/۰۵
	جمعیت اولیه	۱۵۰
	حداکثر تعداد تکرار	۲۰۰

طراحی آزمایشات برای پارامترهای الگوریتم MOIWO

مطابق روندی که در الگوریتم NSGAII اجرا شد در این الگوریتم نیز اجرا خواهد شد. ابتدا مقادیر پیشنهادی برای هر یک از الگوریتم ها ارائه می شود. این موضوع در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰. پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم MOIWO

الگوریتم مورد بررسی	پارامتر	مقادیر هر سطح		
		سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
MOIWO	حداکثر تعداد تکرار	N*۱۵	N*۱۰	N*۵
	تعداد علف ها ^۱	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰
	ماکزیمم مقدار p	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰
	احتمال جهش	۰/۶	۰/۵	۰/۴
	مقدار اولیه انحراف معیار	۰/۳	۰/۴	۰/۵
	مقدار نهایی انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱
	حداقل تعداد دانه ها	۳	۲	۱
	حداکثر تعداد دانه ها	۱۰	۸	۵
	شاخص ماژولارسازی غیر خطی (n)	۴	۳	۲

سپس طرح L27 تاگوچی آزمایشات مختلف را ایجاد و برای هر کدام الگوریتم MOIWO اجرا شده است. که در جدول ۱۱ به این موضوع اشاره شده است.

جدول ۱۱. مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوچی برای MOIWO

شماره آزمایش	حداکثر تعداد تکرار	تعداد علف ها	ماکزیمم مقدار p	احتمال جهش	مقدار اولیه انحراف معیار	مقدار نهایی انحراف معیار	حداقل تعداد دانه ها	حداکثر تعداد دانه ها	شاخص ماژولارسازی غیر خطی	مقدار MOIWO
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱/۶۸۳۳۵
۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱/۶۶۵۰۳
۳	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۱/۱۲۹۳۰
۴	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۱/۶۱۱۵۷
۵	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۱/۳۱۵۵۰
۶	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۱	۱	۱/۴۵۰۰۱
۷	۱	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۳	۳	۱/۱۹۵۶۶

دوفصلنامه مدیریت مهندسی و رایانش نرم
دوره ۷ شماره ۲/ پاییز و زمستان ۱۴۰۰، شماره پیاپی ۱۴

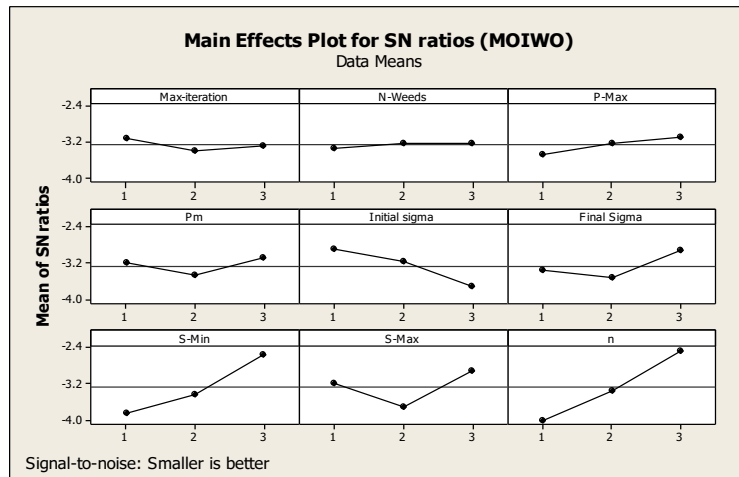
1 Number of weeds (N-Weeds)

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و // ۴۹

شماره آزمایش	حداکثر تعداد تکرار	تعداد علف ها	ماکزیمم مقدار P	احتمال جهش	مقدار اولیه انحراف معیار	مقدار نهایی انحراف معیار	حداقل تعداد داده ها	حداکثر تعداد داده ها	شاخص مازولارسازی غیر خطی	مقدار MOIWO
۸	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱/۴۹۴۸۲
۹	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۱/۴۵۰۴۷
۱۰	۲	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۱/۲۲۶۴۵
۱۱	۲	۱	۲	۳	۲	۳	۱	۲	۳	۱/۴۲۰۸۶
۱۲	۲	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۳	۱	۱/۷۸۴۳۸
۱۳	۲	۲	۳	۱	۱	۲	۳	۲	۳	۱/۳۰۵۸۱
۱۴	۲	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۳	۱	۱/۵۰۹۹۴
۱۵	۲	۲	۳	۱	۳	۱	۲	۱	۲	۱/۵۰۱۷۶
۱۶	۲	۳	۱	۲	۱	۲	۳	۳	۱	۱/۵۱۹۲۳
۱۷	۲	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۱	۲	۱/۵۸۲۹۸
۱۸	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۲	۳	۱/۵۴۲۴۸
۱۹	۳	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۱/۲۵۹۱۰
۲۰	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۳	۲	۱	۱/۳۸۵۹۸
۲۱	۳	۱	۳	۲	۳	۲	۱	۳	۲	۱/۸۶۸۴۱
۲۲	۳	۲	۱	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۱/۶۹۸۱۷
۲۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۳	۲	۱/۲۵۹۱۲
۲۴	۳	۲	۱	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۱/۴۵۲۱۹
۲۵	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۲	۳	۲	۱/۱۹۶۵۷
۲۶	۳	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۲	۳	۱/۳۸۳۳۸
۲۷	۳	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۲	۱	۱/۷۸۵۸۷

حال با ارائه این خروجی ها به نرم افزار MINITAB نمودار S/N به صورت شکل ۴

ارائه می شود.



شکل ۳. خروجی Minitab برای روش تاگوچی در الگوریتم MOIWO

حال بر اساس خروجی ارائه شده در نمودار فوق بهترین سطح هر پارامتر مشخص شده در جدول ۱۲ مقدار بهینه سطوح پارامترها ارائه شده است.

جدول ۱۲. مقدار بهینه متغیرها در MOIWO

مقدار بهینه	پارامتر	الگوریتم مورد بررسی
10*N	حداکثر تعداد تکرار	MOIWO
۲۰۰	تعداد علف ها	
۴۰۰	ماکزیمم مقدار p	
۰/۵	احتمال جهش	
۰/۵	مقدار اولیه انحراف معیار	
۰/۰۳	مقدار نهایی انحراف معیار	
۳	حداقل تعداد دانه ها	
۸	حداکثر تعداد دانه ها	
۴	شاخص ماژولاسازی غیر خطی (n)	

مقایسه عملکرد الگوریتم‌های NSGAI و الگوریتم MOIWO

از آنجا که این دو الگوریتم به صورت چندهدفه به بهینه‌سازی مسئله مورد نظر می‌پردازند و خروجی آن‌ها شامل چندین جواب (مرکز کارای مسئله چندهدفه) می‌باشد،

به منظور مقایسه این دو الگوریتم لازم است شاخص‌هایی جهت ارزیابی خروجی‌های آن‌ها ارائه شود. در ادامه این شاخص‌ها معرفی شده‌اند.

شاخص‌های مقایسه الگوریتم‌های MOIWO و NSGAII

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه شش شاخص ارائه شده است. این معیارها عبارتند از معیار گستردگی (SM1)، معیار فاصله از جواب ایده آل (MID2)، معیار فاصله گذاری (S3) و معیار بیشترین گستردگی (MD4)، تعداد جواب‌های غیرمغلوب یافت شده (NPS5) و معیار نرخ دستیابی همزمان به هر دو هدف (RAS6). در ادامه روش محاسبه شاخص‌های فوق بیان شده است.

MID-1: معیار MID به منظور محاسبه میانگین فاصله جواب‌های پارتو از جواب ایده‌آل یا در برخی مواقع از مبدأ مختصات استفاده می‌شود. در رابطه زیر مشخص است که هرچه این معیار کمتر باشد کارایی الگوریتم بیشتر خواهد بود. در این رابطه NOS تعداد جواب‌ها، g اهداف و sol جواب‌ها هستند.

$$MID = \frac{1}{NOS} \sum_{sol=1}^n \sqrt{\sum_{g=1}^2 1 = f_{sol,g}^2} \quad \text{(رابطه ۲۵)}$$

MD-2: معیار بیشترین گستردگی طول قطر مکعب فضایی با مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود، را اندازه‌گیری می‌کند. رابطه ۲۶ رویه محاسباتی این شاخص را نشان می‌دهد. هرچه این معیار بزرگتر باشد، بهتر است.

$$MD = \sqrt{\sum_{g=1}^2 (\max_{sol} f_{sol}^g - \min_{sol} f_{sol}^g)^2} \quad \text{(رابطه ۲۶)}$$

SM-3: این سنجه نحوه توزیع جواب‌های پارتو را با استفاده از فاصله نسبی جواب‌های متوالی محاسبه می‌کند.

$$SM = \frac{\sum_{m=1}^M d_m^e + \sum_{i=1}^{|A|} |d_i - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^M d_m^e + |A|\bar{d}} \quad \text{رابطه ۲۷}$$

در این رابطه m تعداد اهداف، d_i فاصله و d_m^e فاصله بین جواب‌های کناری مرز پارتو بهینه و مرز پارتو به دست آمده در تابع هدف m ام است. هرچه مقدار این سنجه کمتر باشد مرز بدست آمده دارای توزیع بهتری است. معیار یکنواختی میزان فاصله نسبی جواب‌های متوالی را با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌کند. الگوریتمی که جواب‌های نامغلوب نهایی آن دارای مقدار فاصله گذاری کوچکی باشند، بهتر خواهد بود.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{g=1}^n (dd_i - \overline{dd_i})^2} \quad \text{رابطه ۲۸}$$

$$dd_i = \min_{k \in n, k \neq i} \sum_{m=1}^r |f_m^i - f_m^k|, \overline{dd_i} = \sum_{i=1}^n \frac{dd_i}{|n|} \quad \text{رابطه ۲۹}$$

۴-NPS: این شاخص تعداد جواب‌های موجود در پارتو مربوط به هر الگوریتم حل را نشان می‌دهد. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد مناسب‌تر می‌باشد.

۵-RAS: این شاخص که بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود میزان دستیابی به مقدار ایده آل همه تابع هدف‌ها به صورت همزمان را محاسبه می‌کند. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد کارایی الگوریتم بیشتر است.

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^n |f_{i1}(x) - f_{i1}^{best}(x) + f_{i2}(x) - f_{i2}^{best}(x)|}{n} \quad \text{رابطه ۳۰}$$

۵-Spacing: این شاخص برای اندازه‌گیری میزان گسترش در بین راه حل‌های به دست آمده معرفی گردید. مقدار این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$spacing = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad \text{رابطه ۳۱}$$

که در این رابطه $\bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{|n|}$ و $d_i = \min_{k \in n \wedge k \neq i} \sum_{m=1}^r |f_m^i - f_m^k|$ میانگین همه d_i ها و n ساینز پارتو را مشخص می‌کند. فاصله اندازه‌گیری شده برابر با کم‌ترین مقدار مجموع قدر مطلق تفاضل در مقادیر توابع هدف بین i امین جواب و جواب‌های واقع در مجموعه نامغلوب نهایی است. قابل ذکر است که این معیار فاصله با معیار کم‌ترین فاصله اقلیدسی بین جواب‌ها متفاوت است. معیار بالا انحراف معیارهای مقادیر مختلف را اندازه‌گیری می‌کند. زمانی که جواب‌ها به طور یکنواخت در کنار هم باشند آنگاه مقدار S

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و III ۵۳

نیز کوچک خواهد بود، بنابراین الگوریتمی که جواب‌های نامغلوب نهایی آن دارای مقدار فاصله‌گذاری کوچکی باشند بهتر خواهد بود.

نتایج عددی

برای مقایسه الگوریتم‌های مورد نظر بر اساس شاخص‌های مورد بررسی، ۱۹ مثال در ابعاد مختلف تولید گردید. این مثال‌ها به صورت تصادفی تولید شده است و تمامی ابعاد مسئله یعنی ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ را شامل می‌شود. اطلاعات این مثال‌ها به شرح جدول ۱۳ می‌باشد.

جدول ۱۳. نتایج عددی

شماره مثال	i	j	k	n	t
۱	۶	۴	۴	۱	۱
۲	۸	۵	۶	۱	۲
۳	۱۰	۵	۸	۱	۲
۴	۱۲	۷	۱۰	۱	۳
۵	۱۴	۸	۱۲	۱	۳
۶	۱۶	۸	۱۴	۱	۴
۷	۱۸	۱۰	۱۸	۲	۴
۸	۲۰	۱۲	۲۰	۲	۵
۹	۲۲	۱۲	۲۲	۲	۵
۱۰	۲۴	۱۵	۲۴	۲	۶
۱۱	۲۶	۱۶	۲۶	۲	۶
۱۲	۲۸	۱۸	۲۸	۲	۷
۱۳	۳۰	۲۰	۳۰	۲۰	۷
۱۴	۳۵	۲۴	۳۲	۳	۸
۱۵	۴۰	۲۵	۳۴	۳	۸
۱۶	۵۰	۳۰	۳۶	۳	۹
۱۷	۶۰	۳۵	۳۸	۴	۹
۱۸	۷۰	۴۰	۴۰	۴	۱۰
۱۹	۸۰	۵۰	۵۰	۴	۱۰

سپس هر دو الگوریتم با مقادیر بهینه پارامترهای خود و برای هر یک از ۱۹ مثال مورد بررسی و اجرا شده‌اند و مقادیر شاخص‌های مورد نظر برای آن‌ها محاسبه شده است. در جدول ۱۴ خلاصه این نتایج برای الگوریتم NSGA II ارائه شده است.

جدول ۱۴. خروجی الگوریتم NSGAI برای مثال‌های حل شده

	NSGAI					
	MID	MD	SM	NPS	RAS	Spacing
۱	۲۱۲۸/۴۰۲	۱۹۴۸/۶۲۶۴۳۸	۳۸۸/۳۰۲۶	۹۹	۰/۴۵۱۶۲۹	۳۳۷/۱۳۸
۲	۹۹۰۱/۸۴۱	۲۹۹۴/۹۲۴۰۲۹	۹۴۷/۱۶۵۴	۹۷	۰/۳۴۳۹۰۹	۱۳۲۷/۴۹۵
۳	۱۴۹۶۰/۲۴	۴۲۵۱/۸۳۰۴۳۳	۱۶۲۶/۷۹۵	۹۷	۰/۱۸۳۹۸۱	۱۴۲۴/۴۷۹
۴	۲۶۶۱۴/۱۹	۴۸۵۹/۹۹۸۹۴۷	۶۵۶/۵۳۶۶	۱۰۰	۰/۲۲۴۴۳۴	۲۰۱۳/۴
۵	۴۳۸۸۵/۵۵	۷۱۹۲/۱۹۰۶۴۲	۳۲۹۲/۸۱۳	۹۵	۲/۲۶۸۱۸۷	۲۹۸۲/۹۴۴
۶	۶۵۹۲۵/۹۹	۵۷۹۳/۶۸۰۳۶	۱۶۷۰/۲۹۶	۹۸	۰/۰۳۳۱۱۸	۳۶۹۲/۹۷۲
۷	۱۷۰۱۵۰/۰۲	۲۷۲۳۷/۳۳۶۹۱	۷۹۸۶/۵۹	۹۸	۰/۱۶۱۷۸۸	۶۳۹۴/۳۶۱
۸	۲۵۲۰۳۲/۰۸	۱۳۱۵۶/۲۵۰۸۸	۵۵۸۳/۵۹۸	۹۹	۰/۱۰۵۷۴۱	۴۸۷۰/۰۰۱
۹	۲۸۴۹۵۱/۵	۳۴۷۹۹/۲۰۰۴	۱۶۷۷۹/۵۳	۹۵	۰/۲۱۲۹۷۴	۹۱۷۷/۹۵۸
۱۰	۳۸۱۹۲۴	۱۰۸۴۱/۶۵۹۴۴	۱۵۸۴۴/۸۷	۹۶	۰/۰۸۳۷۴۵	۴۱۷۰/۵۲۲
۱۱	۴۰۷۱۸۷/۷	۱۵۴۰۱/۸۹۲۹۶	۱۳۰۲۳/۶۲	۹۷	۰/۱۶۹۸۵۳	۵۰۱۷/۱۸۷
۱۲	۵۱۱۳۵۳/۵	۳۱۶۳۶/۸۰۴۰۶	۲۲۱۱۴/۷۸	۹۶	۰/۱۱۱۶۸۷	۶۲۹۶/۴۵۳
۱۳	۵۶۸۸۲/۱	۱۹۲۸۹/۸۷۳۸۷	۲۳۷۴۳/۵۶	۹۶	۰/۰۸۴۲۷۹	۵۴۸۰/۲۴
۱۴	۱۰۱۸۱۷۳	۱۳۸۷۰/۸۷۹۱۲	۲۱۰۶۳/۶۹	۹۸	۰/۰۸۲۸۳۷	۴۸۳۱/۱۷۱
۱۵	۱۱۳۵۰۴۵	۳۸۱۲۶/۷۷۲۴۸	۴۶۶۹۴/۵۲	۹۶	۰/۱۱۶۹۰۱	۶۴۸۴/۲۲۹
۱۶	۱۳۸۴۴۷۸	۴۸۴۵۲/۸۲۲۲۱	۵۷۶۰۹/۵۶	۹۶	۰/۱۲۴۸۵۸	۱۱۳۱۰/۷۸
۱۷	۱۸۴۳۰۵۱	۲۹۳۷۵/۶۵۴۷	۶۵۹۴/۳۱۲	۱۰۰	۰/۱۱۰۸۲۷	۷۲۴۵/۲۰۵
۱۸	۲۱۸۷۹۸۲	۱۲۲۲۳۶/۴۱۸	۷۴۴۸۱/۸۲	۹۷	۰/۲۰۳۲۸۸	۲۵۵۷۸/۹۲
۱۹	۲۳۲۴۵۶۷	۳۰۸۶۵/۷۲۴۶	۲۵۴۹۰/۳	۹۹	۰/۰۷۶۸۵۹	۸۱۸۱/۹۶
میانگین	۶۶۴۶۹۴/۴	۲۴۳۳۲/۷۶۵۲۹	۱۸۱۸۹/۰۹	۹۷/۳۱۵۷۹	۰/۱۶۵۸۳۷	۶۱۴۸/۲۸۵

همچنین در جدول زیر خلاصه نتایج برای ۱۹ مثال اجرا شده توسط الگوریتم

MOIWO در جدول ۱۵ ارائه شده است.

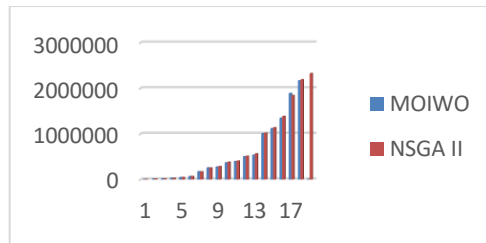
ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و // ۵۵

جدول ۱۵. خروجی MOIWO برای ۱۹ مثال حل شده

	MOIWO					
	MID	MD	SM	NPS	RAS	Spacing
۱	۲۳۹۲/۸۷۱	۱۲۲۹/۴۸۴	۳۸۷/۰۶۹۵	۲۹	۰/۵۰۱۲۵۹	۶۲/۳۶۷۲۹
۲	۱۰۰۲۵/۸۳	۵۹۸۴/۳۶۱	۲۱۲۶/۹۸	۷	۰/۲۲۶۵۴۷	۸۱۱/۶۱۱۸
۳	۱۷۰۶۴/۷۱	۲۶۲۱/۵۴۵	۱۱۱۵/۳۷۵	۱۲	۰/۲۰۲۷۶۸	۶۳۰/۳۵۴۷
۴	۲۹۸۸۷/۹۳	۲۶۳/۰۵۹۱	۷۱/۴۴۹۶۶	۱۱	۰/۰۲۱۲۲۱	۳۶/۱۳۵۵۶
۵	۴۳۲۵۳/۹۹	۵۱۶۲/۰۵۲	۱۴۳۸/۳۶۳	۱۹	۰/۱۲۲۹۵۳	۱۶۷۶/۰۶۱
۶	۶۵۰۰۷/۱۱	۹۴۶۳/۸۵۴	۳۴۱۱/۲۶۴	۱۳	۰/۰۹۶۵۱۷	۲۷۷۸/۸۶۱
۷	۱۷۲۷۴۵/۸	۱۵۰۶۱/۹۶	۳۴۹۸/۷۳۲	۳۵	۰/۱۴۷۱۷۸	۲۴۴۲/۳۷
۸	۲۵۶۵۰۹/۷	۱۹۷۰۶/۳۷	۵۹۲۸/۷۹۴	۲۷	۰/۱۱۳۴۰۶	۴۴۷۴/۰۷۱
۹	۲۷۳۱۷۷/۹	۳۲۱۱۹/۲۲	۶۸۸۷/۲۶	۳۰	۰/۰۹۴۱۲۲	۴۸۴/۲۱۲
۱۰	۳۶۷۴۴۲/۱	۲۷۲۷۸/۳۸	۸۱۴۴/۱۴۸	۳۷	۰/۰۸۰۰۴۴	۱۰۶۱۴/۲۸
۱۱	۳۹۶۲۱۵/۳	۱۲۷۸۴/۲۳	۳۳۳۳/۱۸۱	۲۰	۰/۰۵۸۵۲	۲۱۱۶/۸۰۴
۱۲	۵۰۰۲۱۱	۱۹۲۰۴/۲۴	۵۷۱۳/۹۷۹	۱۸	۰/۰۸۱۱۰۷	۷۵۳۹/۶۶۵
۱۳	۵۳۵۱۸۹/۲	۴۵۷۹۹/۹۹	۱۰۶۵۲/۹۷	۲۲	۰/۱۰۹۵۰۷	۵۹۰/۲۸۸
۱۴	۱۰۰۷۰۱۰	۴۱۵۰۰/۵۲	۹۱۰۲/۶۵۹	۳۳	۰/۰۶۷۵۲۵	۵۰۸۳/۹۱۴
۱۵	۱۱۱۸۷۸۵	۲۹۱۰۷/۱۵	۵۰۱۱/۷۷۵	۵۶	۰/۰۴۱۷۸	۲۶۳۰/۰۸۹
۱۶	۱۳۴۶۶۶۴	۷۲۶۲۹/۷۴	۱۴۱۵۰/۲۷	۴۲	۰/۰۷۹۲۴۱	۸۸۹۰/۷۲۳
۱۷	۱۸۸۸۴۴۴	۴۶۷۳۳/۸۹	۱۲۱۸۶/۷۵	۲۳	۰/۰۸۲۰۸۷	۶۹۵۹/۹۲۶
۱۸	۲۱۶۳۰۷۴	۶۱۱۸۹/۴۵	۱۴۳۰۹/۲	۳۵	۰/۰۵۰۷۳۲	۸۸۷۷/۹۴۹
۱۹	۲۳۹۲/۸۷۱	۱۲۲۹/۴۸۴	۳۸۷/۰۶۹۵	۲۹	۰/۵۰۱۲۵۹	۶۲/۳۶۷۲۹
میانگین	۵۶۶۲۸۳/۴	۲۴۸۷۹/۹۷	568/5970	۲۶/۰۵۵۵۶	۰/۱۲۰۹۱۸	۴۲۴۳/۴۶

مقایسه الگوریتم ها بر اساس شاخص MID

میانگین این شاخص برای الگوریتم NSGAI برابر ۶۶۴۶۹۴ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۵۶۶۲۸۳ بوده است. در شکل (۴) مقدار این شاخص برای هر یک از مثال‌های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.

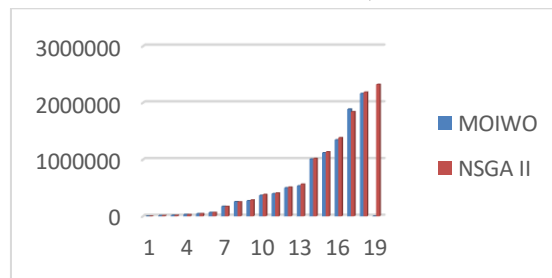


شکل ۴. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص MID

با توجه به ماهیت این شاخص و بر اساس نمودار فوق می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOIWO در این شاخص عملکرد بهتری نسبت به NSGAII داشته است.

مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص MD

میانگین این شاخص برای الگوریتم NSGAII برابر ۵۱۶۲ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۲۴۸۷۹ بوده است. در شکل (۵) مقدار این شاخص برای هر یک از مثال‌های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.



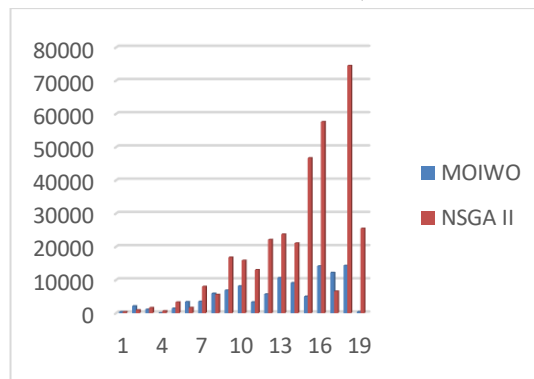
شکل ۵. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص MD

همانطور که مشاهده می‌کنید در برخی مثال‌ها الگوریتم NSGAII بهتر بوده و در سایر مثال‌ها الگوریتم MOIWO بهتر بوده است. در این ۲۰ مثال در مثال‌های ۲ و ۶ و ۸ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۶ الگوریتم MOIWO برتری داشته است. با توجه به ماهیت این شاخص و بر اساس نمودار فوق می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOIWO در این شاخص عملکرد بهتری نسبت به NSGAII داشته است.

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و // ۵۷

مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص SM

میانگین این شاخص برای الگوریتم NSGAI برابر ۱۸۱۸۹ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۵۹۷۰ بوده است. در شکل (۶) مقدار این شاخص برای هر یک از مثال‌های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.

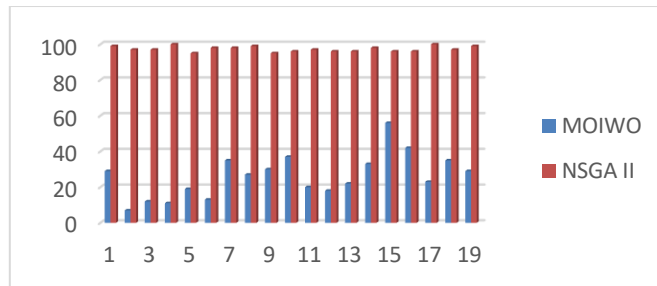


شکل ۶. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص SM

همانطور که مشاهده می‌کنید برتری نسبی الگوریتم MOIWO نسبت به NSGAI بر اساس این شاخص به وضوح حس می‌شود. با توجه به ماهیت این شاخص و بر اساس نمودار فوق می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOIWO در این شاخص عملکرد بهتری نسبت به NSGA II داشته است.

مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص NPS

میانگین این شاخص برای الگوریتم NSGAI برابر ۹۷/۳ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۲۶ بوده است. در شکل (۷) مقدار این شاخص برای هر یک از مثال‌های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.

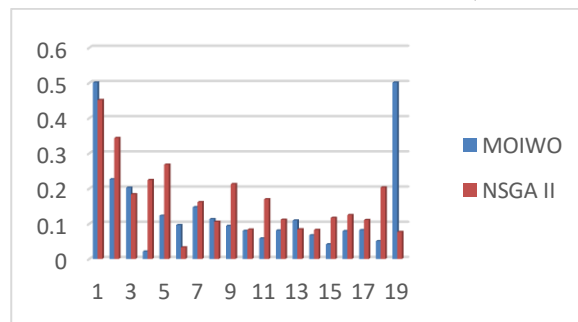


شکل ۷. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص NPS

همانطور که مشاهده می‌کنید برتری نسبی الگوریتم NSGA II نسبت به MOIWO بر اساس این شاخص به وضوح حس می‌شود. با توجه به ماهیت این شاخص و بر اساس نمودار فوق می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم NSGA II در این شاخص عملکرد بهتری نسبت به MOIWO داشته است.

مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص RAS

میانگین این شاخص برای الگوریتم NSGA II برابر ۰/۱۶۵ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۰/۱۲ بوده است. در شکل (۸) مقدار این شاخص برای هر یک از مثال‌های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.

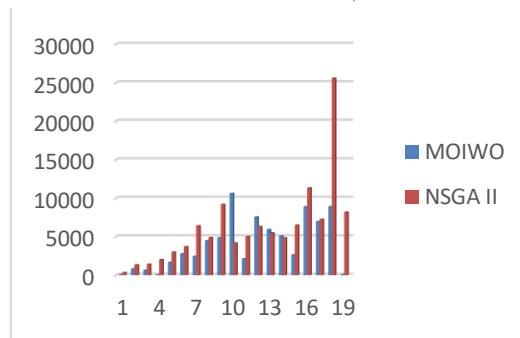


شکل ۸. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص RAS

همانطور که مشاهده می‌کنید در اکثر مثال‌ها الگوریتم MOIWO مقدار کمتری از این شاخص ارائه کرده است. با توجه به ماهیت این شاخص و بر اساس نمودار فوق می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOIWO در این شاخص عملکرد بهتری نسبت به NSGA II داشته است.

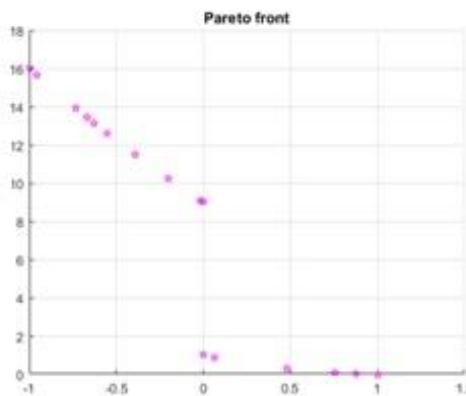
مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص Spacing

میانگین این شاخص برای الگوریتم NSGAI برابر ۶۱۴۸ بوده و برای الگوریتم MOIWO برابر ۴۱۴۲ بوده است. در شکل (۹) مقدار این شاخص برای هر یک از مثال‌های حل شده توسط دو الگوریتم ارائه شده است.

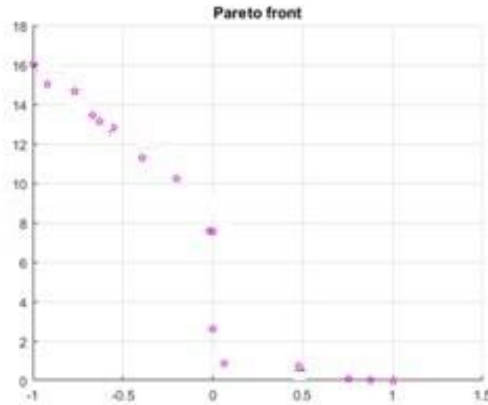


شکل ۹. مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص SPACING

همانطور که مشاهده می‌کنید در اکثر مثال‌ها الگوریتم MOIWO مقدار کمتری از این شاخص ارائه کرده است. با توجه به ماهیت این شاخص و بر اساس نمودار فوق می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOIWO در این شاخص عملکرد بهتری نسبت به NSGAI داشته است. جوابهای پارتو را نیز می‌توان با استفاده از الگوریتم MOIWO و NSGAI برای مقایسه تابع هدف اول و سوم به صورت شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داد. هر دو نمودار پارتو نشان می‌دهد بین تابع هدف اول و سوم تناقض وجود دارد.



شکل ۱۰. نمودار پارتو در الگوریتم MOIWO برای مقایسه تابع هدف اول و سوم



شکل ۱۱. نمودار پارتو در الگوریتم NSGAIII برای مقایسه تابع هدف اول و سوم

در این قسمت به ارائه نتایج عددی در خصوص حل مدل ریاضی چندهدفه با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه و نیز الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه پرداخته شده است. در ابتدا اعتبارسنجی مدل انجام شد و سپس به کمک تکنیک تاگوچی مقادیر بهینه پارامترهای این دو الگوریتم معرفی شدند. سپس برای ۱۹ مثال طراحی شده دو الگوریتم اجرا شده و بر اساس ۵ شاخص با هم مقایسه شدند. نتایج نشان‌گر کارایی هر دو الگوریتم در حل مسئله مورد نظر می‌باشد. در ادامه ابتدا به بیان نتایج حاصل از انجام این تحقیق و سپس به ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آتی پرداخته می‌شود.

در این تحقیق، یک مدل ریاضی چندهدفه برای زنجیره تأمین سه‌سطحی همراه با زمان تحویل مورد توجه قرار گرفت. لذا می‌توان نتایج عمده تحقیق را در موارد زیر بیان نمود:

۱. اکثر شرکت‌های فعال در زنجیره تأمین به دنبال افزایش سود خود هستند، اما در شرایط واقعی زنجیره تأمین مشتریان انتظار افزایش کیفیت و کاهش زمان تحویل کالاها را دارند. لذا در این تحقیق با تعریف توابع هدف جداگانه برای هر کدام از این اهداف سعی گردید انتظار مشتریان در کنار افزایش سود مورد توجه قرار گیرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد شرکت‌ها برای افزایش کیفیت در ارائه خدمات

ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و // ۶۱

باید با تعریف کالاهای موازی قابلیت اطمینان را در قابلیت دسترس پذیری کالاها و در نتیجه کیفیت کالاها را افزایش دهند. در حالی که در صورت عدم توجه به این هدف میزان سود شرکت‌ها متفاوت است.

۲. زمان تحویل کالاها به مشتریان همواره یکی از دغدغه‌های مشتریان محسوب می‌گردد، نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد با کاهش سود مورد انتظار شرکت‌ها می‌توان زمان انتظار مشتریان را برای دریافت کالاها کاهش داد.

۳. در شرایط احتمالی می‌توان انعطاف بیشتری را در شرایط مختلف تحویل کالا مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای تابع چگالی احتمال زمان تحویل نشان می‌دهد، باید در انتخاب میزان پارامترهای تابع چگالی احتمال دقت کافی را با توجه به میزان انتظار مشتریان و خصوصیات کالاها به کار برد.

از دیگر نتایج این تحقیق، مقایسه کارایی هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGAI و MOIWO نسبت به شاخص‌های تعریف شده می‌باشد. این نتایج به شرح جدول ۱۶ ارائه شده‌اند.

جدول ۱۶. مقایسه الگوریتم‌های حل نسبت به شاخص‌ها

الگوریتم کارا تر	مبنای کارایی	نتیجه برای الگوریتم MOIWO	نتیجه برای الگوریتم NSGAI	شاخص
MOIWO	هرچه کمتر بهتر	۵۶۶۲۸۳/۴	۶۶۴۶۹۴	MID
MOIWO	هرچه بزرگتر بهتر	۲۴۸۷۹/۹۷	۲۴۳۳۲/۷۶	MD
MOIWO	هرچه کمتر بهتر	۵۹۷۰/۵۶	۱۸۱۸۹/۰۹	SM
NSGAI	هرچه بزرگتر بهتر	۲۷۰۵	۹۷/۳۱	NPS
MOIWO	هرچه کمتر بهتر	۰/۱۲	۰/۱۶	RAS
MOIWO	هرچه کمتر بهتر	۴۲۴۳/۴۶	۶۱۴۸/۲۸	Spacing

با توجه به نتایج ذکر شده در جدول ۱۶ مشاهده می‌گردد که الگوریتم فراابتکاری MOIWO در همه شاخص‌ها به جز شاخص NPS، از الگوریتم فراابتکاری NSGAI برتر است.

- پیشنهاد نگارنده به محققان دیگر برای انجام کارهای آتی به شرح ذیل می باشد:
- در نظر گرفتن بیش از سه سطح برای زنجیره تأمین
 - در نظر گرفتن زمان تحویل به صورت عدم قطعیت تحت شرایط فازی
 - در نظر گرفتن پارامترهایی همچون تعداد تقاضای مشتری به صورت غیرقطعی
 - در نظر گرفتن پنجره زمانی برای تحویل کالا توسط سطوح مختلف
 - حل مسئله با دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری و مقایسه جواب‌ها تحت دیگر شاخص‌های مقایسه پاسخ الگوریتم‌های مختلف
 - در نظر گرفتن زنجیره تأمین به صورت حلقه بسته
 - توجه به مسائل زیست‌محیطی و در نظر گرفتن زنجیره تأمین به صورت سبز

منابع

- Alhaj, M. A., Svetinovic, D., & Diabat, A. (2016). A carbon-sensitive two-echelon-inventory supply chain model with stochastic demand. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 82–87. article.
- Baghalian, A., Rezapour, S., & Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational Research*, 227(1), 199–215. article.
- Bookbinder, J. H., & Cakanyildirim, M. (1999). Random lead times and expedited orders in (Q, r) inventory systems. *European Journal of Operational Research*, 115(2), 300–313. article.
- Govindan, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2015). Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic. *Computers & Operations Research*, 62, 112–130. article.
- Hossain, M. S. J., Ohaiba, M. M., & Sarker, B. R. (2017). An optimal vendor-buyer cooperative policy under generalized lead-time distribution with penalty cost for delivery lateness. *International Journal of Production Economics*, 188, 50–62. article.
- Kaya, O., & Urek, B. (2016). A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain. *Computers & Operations Research*, 65, 93–103. article.
- Kiesmüller, G. P., De Kok, A. G., & Fransoo, J. C. (2005). Transportation mode selection with positive manufacturing lead time. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(6), 511–530. article.
- Liang, X., Ma, L., Wang, H., & Yan, H. (2017). Inventory Control and Pricing with Alternative Delivery Times. In *Inventory Management with Alternative Delivery Times* (pp. 63–72). in collection, Springer.
- Ramasesh, R. V., Ord, J. K., Hayya, J. C., & Pan, A. (1991). Sole versus dual sourcing in stochastic lead-time (s, Q) inventory models. *Management Science*, 37(4), 428–443. article.
- Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 113, 662–673. article.
- Wang, X., & Disney, S. M. (2017). Mitigating variance amplification under stochastic lead-time: The proportional control approach. *European Journal of Operational Research*, 256(1), 151–162. article.
- Wei, J., Govindan, K., Li, Y., & Zhao, J. (2015). Pricing and collecting decisions in a closed-loop supply chain with symmetric and asymmetric information. *Computers & Operations Research*, 54, 257–265. article.
- Zhang, J., Lam, W. H. K., & Chen, B. Y. (2016). On-time delivery probabilistic models for the vehicle routing problem with stochastic demands and time windows. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 144–154. article.
- Zohal, M., & Soleimani, H. (2016). Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry. *Journal of Cleaner Production*, 133, 314–337. article.

استناد به این مقاله:

شناسه دیجیتال (DOI): JEMSC-1611-1046 (R2)

دوختانی، ف؛ حریری، ن؛ آل طاهای، الف. (۱۴۰۰). «ارائه و حل یک مدل زنجیره تأمین سه سطحی با هدف افزایش کیفیت و کاهش زمان تحویل احتمالی». *دوفصلنامه مدیریت مهندسی و رایانش نرم*، ۳(۴)، ۱۴۵-۱۷۷.