

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

سال نهم، شماره ۳۵، پاییز ۱۳۹۸

شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

صص ۱۳۴ - ۱۰۹

بهینه‌سازی دوهدفه مسئله مدیریت موجودی توسط فروشندگان در یک زنجیره تامین چندسطحی سبز

افشین رادفر*، داود محمدی تبار**

چکیده

مدیریت موجودی توسط فروشندگان (VMI) یکی از استراتژی‌های محبوب برای مدیریت هماهنگ و یکپارچه کنترل موجودی در زنجیره تامین است. در این استراتژی، فروشنده بر اساس اطلاعاتی که از مشتری دریافت می‌کند تصمیم‌های مرتبط با انباشته سفارش (زمان تحویل و مقدار موجودی) را اتخاذ می‌کند. در این پژوهش مدل‌سازی و حل مسئله دوهدفه VMI در یک زنجیره تامین سه‌سطحی سبز شامل یک تولیدکننده، چند فروشنده و چند خرده‌فروش با در نظر گرفتن کمبود پس‌افت ارائه شده است. در تابع هدف اول هزینه‌های مرتبط با موجودی و آلاینده‌های زیست‌محیطی کمینه شده است. تابع هدف دوم به افزایش قابلیت اطمینان تولید می‌پردازد. با توجه به پیچیدگی زمانی سخت مدل ارائه شده، روش‌های فراابتکاری ژنتیک، انجماد تدریجی و ترکیبی از ژنتیک - انجماد تدریجی برای حل مسئله به کار گرفته شده است. برای افزایش کارایی الگوریتم‌های مورد نظر از روش تاگوچی برای تنظیم پارامتر آن‌ها استفاده شده است. عملکرد الگوریتم‌ها با استفاده از نتایج حاصل برای مسائل با اندازه‌های مختلف مقایسه شد که شواهد حاکی از بهتر بودن عملکرد کارایی الگوریتم ترکیبی ژنتیک - انجماد تدریجی نسبت به سایر الگوریتم‌های به کار گرفته شده است. در نهایت از آنجاکه مدل ارائه شده یک مدل دوهدفه و غیرخطی است، از معیارهایی به منظور بررسی جبهه پارتو برای مسائل نمونه‌ای با اندازه بزرگ نیز استفاده شد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت موجودی توسط فروشندگان؛ زنجیره تامین سبز؛ الگوریتم ترکیبی ژنتیک - انجماد تدریجی؛ روش تاگوچی؛ جبهه پارتو.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰.

* کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

** استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

E-mail: d_mohammaditabar@azad.ac.ir

۱. مقدمه

در عصر حاضر و دنیای رقابتی امروز، داشتن مزیت رقابتی و مدیریت هزینه‌ها جزو لاینفک تمامی صنایع است. حال با توجه به انواع بازارهایی که شرکت‌ها در آن‌ها فعالیت می‌کنند، انتخاب استراتژی مناسب برای مدیریت زنجیره تأمین بسیار مهم است. برای بسیاری از شرکت‌ها، کمینه‌کردن هزینه‌های نگهداری، پایین آوردن مدت‌زمان تحویل کالا، استفاده از سیستم‌های لجستیکی مطلوب و سبز، تحویل به‌موقع کالا از تأمین‌کننده به خرده‌فروش‌ها و همچنین از خرده‌فروش‌ها به مشتری نهایی و مواردی از این‌دست از جمله اهداف مدیریت زنجیره تأمین^۱ (SCM) به‌شمار می‌رود. مدیریت موجودی یکی از ابعاد مهم در مدیریت زنجیره تأمین است که می‌تواند زنجیره تأمین را در جهت اهداف تعیین‌شده هدایت کند. در این راستا رویکرد مدیریت موجودی توسط فروشنده^۲ (VMI) یکی از مهم‌ترین و مشهورترین سیاست‌ها در مدیریت موجودی است که بر اساس همکاری‌ها و مشارکت فروشنده و خرده‌فروش است. رویکرد VMI که گاهی اوقات «سیستم اداره تجدید موجودی توسط فروشنده»^۳ (VMR) نیز نامیده می‌شود، یک استراتژی است که بر اساس آن فروشنده سطوح موجودی را هم برای فروشنده و هم برای خرده‌فروش با استفاده از اطلاعات فروش و موجودی خرده‌فروش کنترل می‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر فروشنده مجاز به مدیریت موجودی در مکان‌های خرده‌فروشی با توجه به اطلاعات به‌اشتراک‌گذاری‌شده است [۲۹]؛ از این‌رو سیاست مدیریت موجودی توسط فروشنده در مقالات متعددی برای مدل‌سازی زنجیره تأمین به‌کار رفته است. در تحقیق حاضر، به مدل‌سازی یک شبکه توزیع محصول تحت سیاست VMI پرداخته شده است. در مدل توسعه داده شده هزینه‌های مرتبط با آلاینده‌های وسایل حمل و نقل، قابلیت اطمینان تولید و امکان مواجهه با کمبود لحاظ شده است.

در ادامه و در بخش ۲ مبانی نظری و پیشینه پژوهش بررسی شده است. روش‌شناسی تحقیق شامل تعریف مسئله و توسعه مدل در بخش ۳ ارائه شده است. بخش ۴، به تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش، تشریح روش حل، ارائه مثال عددی و تحلیل حساسیت آن اختصاص دارد. در نهایت و در بخش ۵، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی ارائه خواهد شد.

1. Supply Chain Management (SCM)
 2. Vendor-managed inventory (VMI)
 3. Vendor-managed Replenishment (VMR)

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

درویش^۱ و ادا^۲ (۲۰۱۰)، یک مدل مدیریت موجودی توسط فروشنده برای مسئله یک فروشنده - چند خریدار در زنجیره تأمین، با فرض وجود سیاست مقدار سفارش اقتصادی و محدودیت مقدار کالای ارسالی به خریدار را در نظر گرفتند [۱]. دانگ و اگزو^۳ (۲۰۰۲) با ارائه یک مدل ریاضی و در نظر گرفتن فرضیه‌های تقاضای ثابت، عدم کمبود و زمان‌های تحویل قطعی به مقایسه دو سیستم سنتی و سیستم VMI پرداختند. آن‌ها مطالعه خود را در بازه کوتاه‌مدت و درازمدت دنبال کرده و مشاهده کردند که هزینه‌های موجودی خریدار و تأمین‌کننده بعد از اجرای سیستم جدید کمتر از حالت سنتی است [۳]. پسندیده و همکاران (۲۰۱۴)، مسئله چندمحصولی VMI با یک فروشنده و چند خریدار را با هدف افزایش سود از طریق طراحی قرارداد عادلانه برای خریدار و فروشنده و محدودیت ظرفیت تولید و قیمت فروش در نظر گرفتند و برای حل این مسئله از روش بیشترین کمینه استفاده کردند [۱۲].

راد^۴ و همکاران (۲۰۱۴)، یک زنجیره تأمین دوسطحی با یک فروشنده و دو خریدار را در نظر گرفتند که نرخ تولید توسط تأمین‌کننده محدود فرض شده است. آن‌ها به توسعه مدلی ریاضی برای VMI با هدف مشخص کردن مقدار تولید بهینه و هزینه کل زنجیره تأمین پرداختند و در ادامه تأثیر هر یک از پارامترهای تقاضای خریدار، هزینه حمل‌ونقل خریدار و هزینه نگهداری و سفارش‌دهی فروشنده را بر مقدار تولید بررسی کردند [۱۵]. صادقی و همکاران (۲۰۱۴)، مسئله VMI با یک فروشنده و چند خریدار را با فرض فازی بودن تقاضا در نظر گرفتند [۱۷]. گویال^۵ (۱۹۸۸) در پژوهشی برای نخستین بار مدل موجودی دوسطحی یک فروشنده یک خریدار را توسعه داد. در این پژوهش از سیاست مقدار سفارش اقتصادی استفاده شده و قیمت در افق برنامه‌ریزی ثابت در نظر گرفته شده است [۷]. یاو^۶ و همکاران (۲۰۰۸)، سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده در دو سطح شامل یک فروشنده و یک خریدار را بررسی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن سیاست مقدار سفارش اقتصادی و تناوب بازسازی به توسعه مدل خود پرداختند؛ به گونه‌ای که برای حل مدل از راه‌حل بهینه بهره گرفتند [۲۸].

صادقی و همکاران (۲۰۱۳)، سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده شامل چند فروشنده، چند خریدار و یک انبار مرکزی تحت سیاست VMI را برای نخستین بار بررسی کردند. آن‌ها محدودیت فضا و تعداد سفارش‌های انبار را در نظر گرفتند و در نهایت برای حل مدل به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی توده ذرات، ژنتیک بهبودیافته و الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی توده

1. Darvish
2. Odah
3. Dong & Xu
4. Rad
5. Goyal
6. Yao

ذرات استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده برای مسائل مختلف بر کارایی بهتر الگوریتم ترکیبی نسبت به بقیه دلالت دارد. در این مطالعه برای تنظیم پارامترهای دو الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی توده ذرات از رویکرد تاگوچی استفاده شده است [۲۲]. روزبه‌نیا و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل مدیریت موجودی سبز توسط فروشنده به‌صورت چندکالایی و مجازبودن کمبود ارائه کردند [۱۶]. صادقی و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل ریاضی مدیریت موجودی توسط فروشنده با یک خریدار و چند خرده‌فروش به‌صورت دوهدفه ارائه دادند. در مدل آن‌ها نرخ تقاضای خرده‌فروشان، قطعی و دارای محدودیت‌های بودجه کل، دفعات بازپرسازی کل فروشنده‌گان، فضای موردنیاز و میانگین موجودی است. هدف آن‌ها تعیین اندازه سفارش و توالی بازپرسازی و همچنین تعداد بهینه ماشین‌آلات برای تولید بود؛ به‌طوری‌که هزینه‌ها حداقل و قابلیت اطمینان افزایش یابد [۱۸].

فخرزاد و لطفی (۲۰۱۸)، یک مدل مدیریت موجودی سبز توسط فروشنده در زنجیره تأمین دوسطحی در حالت مواجه مشتری با کمبود، محدودیت انبار و تعداد سفارش‌ها را موردبررسی قرار دادند [۵]. پارک^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک به شبیه‌سازی و تعیین مقدار مناسب پارامترهای تولید و ارسال یک مدل VMI پرداخته و پارامترهای آن را با سیستم طراحی آزمایش‌ها تعیین و کارایی الگوریتم یادشده را نشان دادند [۱۳]. سیف برقی و مرتضوی (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی تاثیر گازهای گلخانه‌ای در طراحی زنجیره تأمین سه‌سطحی، شامل کارخانه‌ها، انبارها و خرده‌فروشان پرداختند. انواع کالاها از طریق حالت‌های مختلف حمل‌ونقل بین سطوح زنجیره منتقل می‌شوند [۲۴].

طالعی‌زاده و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل موجودی دوسطحی با یک فروشنده و چند خرده‌فروش، در محیط رقابتی با نرخ زوال‌پذیری مواد اولیه و محصول نهایی ارائه کردند [۲۵]. زمانی باجگانی و غلامیان (۲۰۱۸) مسئله کنترل موجودی اقلام منسوخ‌شدنی را با سیاست پرداخت معوقه در شرایط تورمی و با هدف دستیابی به حداقل هزینه مورد بررسی قرار دادند [۳۰]. طالعی‌زاده و محمدی (۲۰۱۵) در پژوهشی تصمیم‌های قیمت‌گذاری و بازاریابی در یک زنجیره تأمین دوسطحی، شامل یک تولیدکننده و دو خرده‌فروش رقیب را در نظر گرفتند؛ تولیدکننده به‌عنوان رهبر در یک بازی استکلبرگ لحاظ شده بود [۲۶]. صادقیان و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل موجودی برای یک زنجیره تأمین سه‌سطحی شامل چندین فروشنده و چندین خرده‌فروش را با در نظر گرفتن تقاضای احتمالی ارائه کردند [۲۳]. کرباسی بناب و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل دوهدفه مدیریت موجودی فروشنده با تقاضای فازی را برای یک مسئله زنجیره تأمین با فروشنده‌گان و خرده‌فروشان متعدد، موردبررسی قرار دادند [۱۰].

ربانی و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل مقدار سفارش اقتصادی با کمبود، به صورت سفارش‌های عقب‌افتاده را تحت سیاست مدیریت موجودی فروشنده به منظور کاربردی‌تر کردن مدل بررسی کردند و دو الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی ممنوعه را برای یافتن جواب‌های بهینه‌به کار گرفتند [۱۴]. ورما و چاترجی^۱ (۲۰۱۷)، یک مدل مدیریت موجودی فروشنده برای زنجیره تأمین دوسطحی متشکل از یک تأمین‌کننده و خرده‌فروشان چندگانه ارائه دادند. هدف آن‌ها یافتن تعداد و مقادیر بهینه تکمیل موجودی هر خرده‌فروش بود؛ به طوری که کل هزینه سیستم کمینه شود. آن‌ها از یک روش ابتکاری برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح با استفاده از ایده نسبت چرخه استفاده کردند [۲۷].

هان^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل تصمیم‌گیری سه‌سطحی برای مسئله برنامه‌ریزی مدیریت موجودی فروشنده غیرمتمرکز در یک شبکه زنجیره تأمین سه‌مرحله‌ای شامل یک فروشنده، چندین 3PL به عنوان توزیع‌کنندگان و چندین خریدار ارائه دادند و سپس برای حل مدل از یک الگوریتم شمارش رأس استفاده کردند [۹]. صادقی و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل بهینه‌سازی VMI را با در نظر گرفتن هزینه حمل در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی و با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری معرفی کردند [۱۹].

صادقی و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل دوهدفه کنترل موجودی بر اساس استراتژی VMI را برای یک زنجیره تأمین چندسطحی شامل یک تولیدکننده، یک فروشنده و چند خرده‌فروش ارائه کردند. در این مدل، تولیدکننده یک کالا را با یک نرخ تولید و با استفاده از چندین دستگاه که به صورت سری- موازی کار می‌کنند تولید کرده و آن‌ها را در یک انبار مرکزی ذخیره می‌کند تا به یک فروشنده که چندین خرده‌فروش را با یک دستگاه وسیله نقلیه سرویس می‌دهد، تحویل بدهد. این مدل VMI با چندین محدودیت از جمله بودجه در دسترس، فضای موجود برای ماشین‌آلات و تعداد سفارش‌ها و بودجه برای فروشنده مواجه است. در این مدل تعداد ماشین‌های بهینه، اندازه سفارش مطلوب، کوتاه‌ترین مسیر ممکن برای تحویل اقلام به خرده‌فروشان و نرخ بهینه تجدید موجودی خرده‌فروشان محاسبه شده است تا کل هزینه زنجیره به حداقل برسد؛ در حالی که قابلیت اطمینان سیستم برای کالاهای تولیدی با توجه به محدودیت‌ها حداکثر شود [۲۰].

صادقی و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل بهینه‌سازی موجودی با تقاضای فازی، کمبود و تخفیف و استفاده از الگوریتم رقابت استعماری ارائه کردند [۲۱]. کریمی و نیکنام‌فر (۲۰۱۷)، یک مدل کنترل موجودی توسط فروشنده را با در نظر گرفتن مسئله تخصیص اجزاء مازاد و هزینه مالیات انتشار کربن در حالت یک تولیدکننده و چندین خریدار مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. حالت

1. Verma & Chatterjee

2. Han

و حافظ‌الکتب (۲۰۱۹)، مدل‌سازی سیاست‌های تنظیم کربن در تصمیم‌گیری‌های مربوط به موجودی زنجیره تأمین چندسطحی سبز را با استفاده از رویکرد نظریه بازی مطالعه کردند [۸]. بای^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، اثرات کاهش انتشار کربن در یک زنجیره تأمین با یک تولیدکننده و دو خرده فروش رقیب را برای محصولات فسادپذیر تحت سیاست VMI موردبررسی قرار دادند [۴]. قرایی و همکاران (۲۰۱۹)، مدلی را در یک زنجیره تأمین یکپارچه سبز چندکالایی-چند خریدار و تحت سیاست VMI که دارای محدودیت‌های تصادفی واقعی است، بررسی کردند [۶]. خلاصه‌ای از پژوهش‌های مرور شده در جدول ۱، ارائه شده و از ابعاد مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۱. مقایسه پژوهش‌ها در زمینه مدیریت موجودی توسط فروشنده

پژوهش	تعداد خریدار فروشنده محدودیت		تعداد وجود		عدم قطعیت		روش حل
	تعداد خریدار	تعداد فروشنده	تعداد	وجود	قطعیت	عدم قطعیت	
درویش و ادا (۲۰۱۰)	*	*	*	*	*	*	هیوریستیک
صادقی و همکاران (۲۰۱۳)	*	*	*	*	*	*	ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی پویا
توکلی‌مقدم و همکاران (۲۰۱۴)	*	*	*	*	*	*	بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ژنتیک
پسندیده و همکاران (۲۰۱۴)	*	*	*	*	*	*	الگوریتم ژنتیک
راد و همکاران (۲۰۱۴)	*	*	*	*	*	*	الگوریتم دقیق
دی آبات (۲۰۱۴)	*	*	*	*	*	*	شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک
روزبه‌نیا و همکاران (۲۰۱۵)	*	*	*	*	*	*	ترکیبی ژنتیک و رقابت استعماری
طالعی‌زاده و همکاران (۲۰۱۵)	*	*	*	*	*	*	نظریه بازی‌ها
پارک و همکاران (۲۰۱۶)	*	*	*	*	*	*	دقیق و الگوریتم ژنتیک
صادقی و همکاران (۲۰۱۶)	*	*	*	*	*	*	بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک
هان و همکاران (۲۰۱۷)	*	*	*	*	*	*	الگوریتم شمارش راس
کریمی و نیکنام‌فر (۲۰۱۷)	*	*	*	*	*	*	نرم افزار GAMS
فخرزاد و لطفی (۲۰۱۸)	*	*	*	*	*	*	محدودیت اپسیلون و -NSGA II
قرایی و همکاران (۲۰۱۹)	*	*	*	*	*	*	الگوریتم تقریب بیرونی
حالت و حافظ‌الکتب (۲۰۱۹)	*	*	*	*	*	*	نظریه بازی‌ها
تحقیق جاری	*	*	*	*	*	*	ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک

بسیاری از پژوهش‌ها در حوزه VMI یک فروشنده و چند خریدار را در یک زنجیره دوسطحی بررسی کرده‌اند؛ از این رو لحاظ کردن سطوح دیگر زنجیره با توجه به نقش آن‌ها در کل هزینه‌های موجودی می‌تواند ارزشمند باشد؛ به‌علاوه لحاظ کردن هزینه‌های حمل‌ونقل به‌صورت یکپارچه با تصمیم‌های VMI کمتر در مبانی نظری موردتوجه قرار گرفته است [۲].

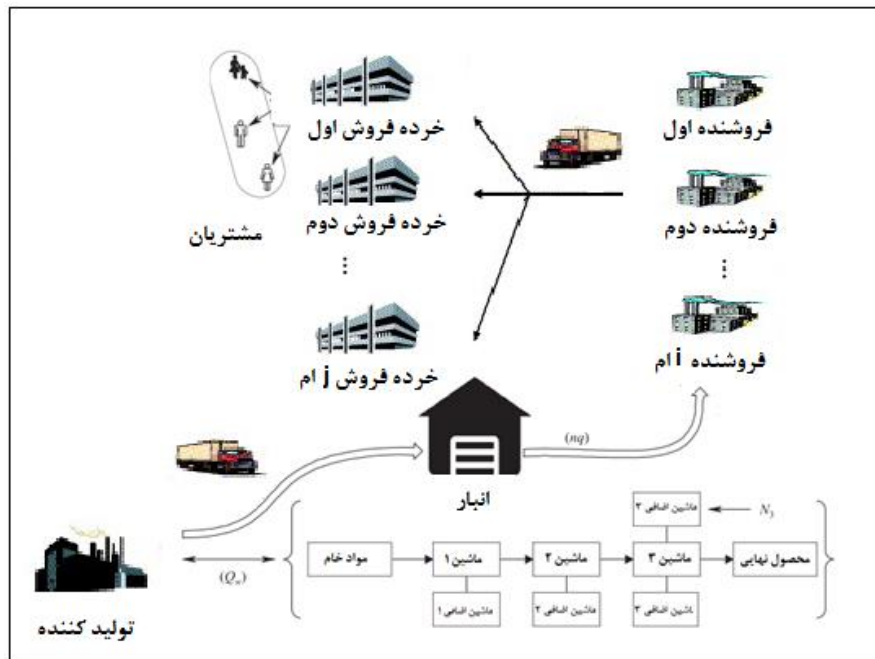
بررسی مرور مبانی نشری و مقاله‌های مختلف طبق جدول ۱، نشان می‌دهد که از رویکردها و روش‌های مختلفی برای حل مدل مدیریت موجودی توسط فروشنده و بهینه‌سازی آن استفاده شده است؛ اما در این پژوهش‌ها به محیط‌زیست و سبز بودن لجستیک در حمل‌ونقل در حالت VMI و در یک زنجیره تأمین چندسطحی دارای چندین فروشنده و چندین خریدار با کمبود پس‌افت، به‌صورت یکپارچه کمتر توجه و اشاره شده است. در بسیاری از کشورهای توسعه یافته فروشندگان موظف به اجرای الزامات زیست‌محیطی و لجستیک سبز با حداقل‌سازی میزان نشر آلاینده‌ها و هزینه حمل‌ونقل کالا هستند. امروزه مسائل زیست‌محیطی در ایران نیز موردتوجه قرار گرفته است. اهمیت مدیریت آلاینده‌ها برای کلیه شرکت‌ها و سازمان‌هایی است که در حال تولید یا ارسال محصول به خرده‌فروشان و یا خریداران کالاهای خود هستند؛ مانند ارسال‌کنندگان کالا به فروشگاه‌های زنجیره‌ای یا تولیدکنندگان محصولات خودرویی که تولیدات خود را به بازار هدف ارسال می‌کنند.

در این پژوهش شبکه توزیع محصول در یک زنجیره تأمین که توسط سیاست VMI مدیریت می‌شود با لحاظ کردن هزینه‌های مرتبط با آلاینده‌های وسایل حمل‌ونقل، قابلیت اطمینان تولید و امکان مواجهه با کمبود مدل‌سازی و حل شده است. نزدیک‌ترین پژوهش به این مقاله توسط صادقی و همکاران (۲۰۱۴)، ارائه شده است [۲۰]. در نظر گرفتن امکان مواجهه با کمبود، لحاظ کردن چندین فروشنده، و در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی به‌صورت عوامل هزینه‌ای در تابع هدف از جمله توسعه‌هایی است که در این پژوهش نسبت به مدل صادقی و همکاران (۲۰۱۴) اضافه شده است تا به شرایط واقعی و عملیاتی نزدیک‌تر شود؛ همچنین روش حل مدل توسعه‌داده‌شده با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری شرح داده شده و با تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها به مقایسه آن‌ها در ابعاد مختلف مسئله پرداخته شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش به بیان یک مدل دوهدفه بهینه‌سازی مدیریت موجودی توسط فروشنده در زنجیره تأمین سه‌سطحی سبز و لحاظ کردن هزینه‌های کمبود پرداخته شده است. بر اساس سیستم VMI، زمان و حجم بازپرسازی توسط فروشنده تعیین می‌شود و فروشنده به اطلاعات موجودی خریدار و داده‌های تقاضای آن دسترسی دارد [۱]. یک سیستم VMI اگر خوب طراحی شود می‌تواند سطح موجودی را کاهش و یکپارچگی سیستم را افزایش دهد و باعث کاهش

هزینه‌ها شود. مسئله حاضر شامل سه سطح تولیدکننده، فروشندگان و خرده‌فروشان است. با توجه به شکل ۱، در مسئله پیشنهادی تولیدکننده، محصولات را با نرخ تولید مشخص با استفاده از چند ماشین که به صورت سری-موازی کار می‌کنند، تولید می‌کند و آن‌ها را در یک انبار مرکزی ذخیره می‌کند؛ سپس این محصولات به فروشندگان عرضه می‌شود که این فروشندگان چند خرده‌فروش را تأمین می‌کنند. مدل VMI پیشنهادی با محدودیت‌های متعددی از جمله بودجه و فضای موجود برای ماشین‌آلات و تعداد سفارش‌ها متناسب با بودجه فروشندگان مواجه است.



شکل ۱. نمای شماتیک زنجیره تأمین شامل تولیدکننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش‌ها

مفروضات مرتبط با مسئله به شرح زیر است:

- دوره‌های سفارش‌دهی خریدارانی که به وسیله یک فروشنده تأمین می‌شوند، یکسان است؛
- زنجیره تأمین شامل یک کالا، یک تولیدکننده، چندین فروشنده و چندین خرده‌فروش است و مدل موجودی بر اساس سیاست مقدار سفارش اقتصادی است؛
- نرخ تقاضا معلوم و قطعی است؛
- هزینه نگهداری برای موجودی در راه محاسبه نمی‌شود؛
- کمبود مجاز بوده و به صورت پس‌افت برای خرده‌فروشان است؛

- تعداد دفعات بازپرسازی مشخص و محدود است؛
- فضای انبارش محدود بوده و تعداد سفارش از تأمین کننده مشخص است؛
- محدودیت حداکثر سرمایه در گردش وجود دارد؛
- چند نوع وسیله نقلیه با ظرفیت‌های مختلف وجود دارد.

مدل‌سازی. در این بخش قبل از بیان مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مسئله، ابتدا اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله بیان می‌شود.

اندیس‌ها

i : اندیس فروشنده‌ها ($i \in V = \{1, \dots, v\}$)

j : اندیس خرده‌فروش‌ها ($j \in R = \{1, \dots, r\}$)

k : اندیس ماشین‌آلات ($k \in M = \{1, \dots, m\}$)

l : اندیس وسایل نقلیه ($l \in U = \{1, \dots, u\}$)

پارامترها:

d_{ij}^R : تقاضای سالیانه خرده‌فروش j که به وسیله فروشنده i تأمین می‌شود؛

d_i^v : تقاضای سالیانه فروشنده i ($d_i^v = \sum_{j=1}^r d_{ij}^R$)؛

D : کل تقاضای سالیانه مشتریان ($D = \sum_{i=1}^v \sum_{j=1}^r d_{ij}^R$)؛

A_i^R : هزینه سفارش‌دهی خرده‌فروش j به فروشنده i ؛

A_i^v : هزینه سفارش‌دهی فروشنده i ؛

A^w : هزینه سفارش‌دهی انبار؛

h_{ij}^R : هزینه سالیانه نگهداری هر واحد کالای خرده‌فروش j که به وسیله فروشنده i تأمین

می‌شود؛

π_{ij}^R : هزینه کمبود خرده‌فروش j که به وسیله فروشنده i تأمین می‌شود؛

h^w : هزینه سالانه نگهداری هر واحد کالا در انبار؛

h_i^v : هزینه سالانه نگهداری هر واحد کالای فروشنده i ؛

h^k : هزینه سالانه نگهداری تولیدکننده؛

Cap_l : ظرفیت وسیله نقلیه l ؛

g_l : هزینه آلودگی انتقال هر واحد کالا، به ازای هر واحد مسافت توسط وسیله نقلیه l ؛

- G_l : هزینه آلودگی به‌ازای هر واحد مسافت توسط وسیله نقلیه خالی l ؛
 β_l : هزینه انتقال سفارش توسط وسیله نقلیه l ؛
 y_{ij} : فاصله بین فروشنده i و خرده‌فروش j ؛
 y_i^v : فاصله بین انبار و فروشنده i ؛
 y^m : فاصله بین تولیدکننده و انبار؛
 T_i^R : دوره کاری در خرده‌فروش؛
 O : بیشترین دفعات سفارشی که به انبار مرکزی انجام می‌شود؛
 f : فضای اشغال‌شده توسط یک واحد محصول؛
 F : فضای در دسترس انبار مرکزی؛
 e : محدودیت فضای در دسترس برای استقرار ماشین‌آلات؛
 S_k : فضای اشغال‌شده برای ماشین k ؛
 B : بودجه مورد نیاز برای نصب ماشین؛
 C_k : هزینه خرید ماشین k ؛
 R_k : قابلیت اطمینان ماشین k .

متغیرها

- q_{ij}^R : مقدار سفارش خرده‌فروش j که توسط فروشنده i تأمین می‌شود؛
 q_i^v : کل اقلامی که از فروشنده i به همه خرده‌فروشان ارسال می‌شود ($q_i^v = \sum_{j=1}^r q_{ij}^R$)؛
 s_{ij} : حداکثر مقدار کمبود پس‌افت در خرده‌فروش j ؛
 n_i : تعداد بازپرسازی سالیانه خرده‌فروشان توسط فروشنده i ؛
 Q_i^v : مقدار سفارش فروشنده i به انبار مرکزی ($Q_i^v = n_i q_i^v$)؛
 Q_v : مقدار سفارش کل فروشندگان ($Q_v = \sum_{i=1}^v Q_i^v$)؛
 Q_w : مقدار سفارش کل انبار؛
 m : تعداد بازپرسازی فروشندگان توسط انبار مرکزی؛
 N_k : تعداد ماشین اضافی؛
 TC_{VMI} : کل هزینه‌های سیستم VMI در تابع هدف اول.

متغیرهای صفر و یک

اگر سفارش خرده‌فروش j (اندازه سفارش q_{ij}) از فروشنده i توسط وسیله نقلیه l انجام شود، برابر ۱ است؛

اگر سفارش فروشنده i (اندازه سفارش Q_i) از انبار مرکزی توسط وسیله نقلیه l انجام شود، برابر ۱ است؛

اگر سفارش انبار مرکزی (اندازه سفارش Q_w) از تولیدکننده توسط وسیله نقلیه l انجام شود، برابر ۱ است.

با توجه به اینکه طول دوره سفارش همه خریدارانی که به یک تأمین‌کننده سفارش می‌دهند یکسان است، رابطه ۱، برقرار خواهد بود:

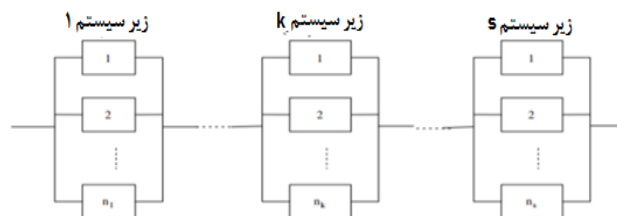
$$T_i^v = \frac{q_{ij}^R}{d_{ij}^R} = \frac{q_{i1}^R}{d_{i1}^R} \quad \forall i \in V; \forall j \in R \quad (1)$$

در رابطه ۱، متغیر q_{i1}^R مقدار کالای ارسالی از فروشنده i به خریدار اول است. مقدار کالای ارسالی فروشنده i در هر دوره کاری برابر است با q_i^v ، در نتیجه کل مقدار کالای ارسالی توسط فروشنده i برابر $Q_i^v = n_i q_i^v$ و مقدار کالای ارسالی توسط همه فروشندگان برابر $Q_v = \sum_{i=1}^v n_i q_i$ خواهد بود؛ علاوه‌براین کل مقدار سفارش انبار، برابر با حاصل ضرب نرخ بازپرسازی فروشندگان در مقدار سفارش همه فروشندگان به انبار است.

مدل ریاضی. در تابع هدف اول هزینه‌های کل زنجیره تأمین محاسبه شده است. هزینه کل زنجیره که در تابع ۳، نشان داده شده است، به ترتیب شامل هزینه‌های سفارش‌دهی خرده‌فروش، نگهداری خرده‌فروش، کمبود خرده‌فروش، سفارش‌دهی فروشنده، نگهداری فروشنده، سفارش‌دهی انبار، نگهداری انبار، خرید ماشین‌آلات مازاد، نگهداری تولیدکننده، آلاینده‌گی انتقال بار، آلاینده‌گی حرکت بدون بار وسایل نقلیه و هزینه انتقال بار می‌شود.

$$\begin{aligned}
MinTC_{VMI} = & \frac{D}{Q_w} m \sum_{i=1} \sum_{j=1} n_i A_{ij}^R + \sum_i \sum_j \frac{h_{ij}^R (q_{ij}^R - s_{ij})^2}{2q_{ij}^R} + \sum_i \sum_j \frac{\pi_{ij} (s_{ij})^2}{2q_{ij}^R} \\
& + \frac{D}{Q_w} m \sum_{i=1} A_{vi} + \sum_i \frac{h_{vi} q_i^v (n_i + 1)}{2} + \frac{A_w D}{Q_w} + h_w Q_v \frac{m+1}{2} + \sum_k C_k N_k \\
& + h_k \frac{Q_w}{2} + \sum_l \sum_i \sum_j x_{ijl}^R y_{ij} g_l D + x_l^w y^m g_l D + x_{il}^v y_i^w g_l D \\
& + G_l x_{ijl}^R y_{ij} \left[\frac{q_{ij}^R}{cap_l} + 1 \right] \frac{D}{q_{ijl}} + G_l x_{il}^v y_i^w \left[\frac{Q_i^v}{cap_l} + 1 \right] \frac{D}{Q_i^v} \\
& + G_l x_l^w y^m \left[\frac{Q_w}{cap_l} + 1 \right] \frac{D}{Q_w} + \sum_l \sum_i \sum_j \beta_l x_{ijl}^R y_{ij} \left[\frac{q_{ij}^R}{cap_l} + 1 \right] \frac{D}{q_{ij}^R} \\
& + \beta_l x_{il}^v y_i^w \left[\frac{Q_i^v}{cap_l} + 1 \right] \frac{D}{Q_i^v} + \beta_l x_l^w y^m \left[\frac{Q_w}{cap_l} + 1 \right] \frac{D}{Q_w}
\end{aligned} \tag{۲}$$

تابع هدف دوم به محاسبه قابلیت اطمینان تولید می‌پردازد. در سیستم‌های سری - موازی، مجموعه اصلی به صورت سری قرار می‌گیرد و برای افزایش قابلیت اطمینان در سیستم تولیدی، به هر یک از اجزای سری اجزای مازاد به صورت موازی اضافه می‌شود و سیستم تا زمانی که حداقل یکی از کل مجموعه‌های سری کار کند، سالم است. این نوع سیستم از پرکاربردترین چیدمان‌های رایج در صنایع مختلف است. در یک سیستم تولیدی شامل چند مرحله ممکن است برای اطمینان از انجام مأموریت در هر مرحله بیش از یک ماشین در خط تولید قرار گرفته و تخصیص باید تا در صورت خراب شدن یکی از ماشین‌ها، سیستم متوقف نشود.



شکل ۲. پیکربندی یک سیستم سری - موازی

بنابراین قابلیت اطمینان کل سیستم به صورت رابطه ۳، است.

$$\max R = \prod_{k=1}^m [1 - (1 - R_k)^{N_k}] \tag{۳}$$

محدودیت‌های مدل‌سازی توسط روابط ۴ تا ۱۳، نشان داده شده‌اند.

Subject to:

$$\sum_k C_k N_k \leq B + \sum_k C_k \quad (۴)$$

$$\sum_k s_k N_k \leq e \quad (۵)$$

$$fQ_w \leq F \quad (۶)$$

$$\frac{D}{Q_w} \leq O \quad (۷)$$

$$\sum_l x_{ijl}^R = 1 \quad \forall i, j \quad (۸)$$

$$\sum_l x_{il}^v = 1 \quad \forall i \quad (۹)$$

$$\sum_l x_l^w = 1 \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i,j} x_{ijl}^R + \sum_i x_{il}^v + x_l^w = 1 \quad (۱۱)$$

$$q_{ij}^R, q_i^v, Q_w, Q_i^v, Q_{ij}^v, s_{ij}, n_i, m, N_k \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (۱۲)$$

$$x_{ijl}^R, x_{il}^v, x_l^w \in \{0,1\} \quad \forall i, j, l \quad (۱۳)$$

محدودیت ۴، به حداکثر بودجه در دسترس برای نصب ماشین آلات مازاد اشاره دارد. در محدودیت ۵، تضمین می‌شود که کل ماشین آلات مازاد نصب شده از فضای در دسترس تجاوز نکند. محدودیت ۶ تضمین می‌کند که مقدار سفارش انبار مرکزی کمتر از ظرفیت آن باشد. در محدودیت ۷، حداکثر تعداد سفارش‌های انبار مرکزی از یک حد مشخص تجاوز نمی‌کند. محدودیت ۸، تضمین می‌کند که برای حمل سفارش هر خرده‌فروش از هر تأمین‌کننده یک وسیله نقلیه اختصاص یابد. محدودیت ۹، تضمین می‌کند که برای حمل سفارش هر فروشنده از انبار مرکزی یک وسیله نقلیه اختصاص یابد. به طریق مشابه، محدودیت ۱۰، تضمین می‌کند که برای حمل سفارش انبار مرکزی از تولیدکننده نیز یک وسیله نقلیه اختصاص یابد. محدودیت ۱۱، تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه به یکی از جریان‌های تولیدکننده - انبار مرکزی، فروشنده - انبار مرکزی و یا خرده‌فروش - فروشنده خدمت دهد. در نهایت محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳، نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کنند.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

با توجه به بررسی مبانی نظری موضوع، مسائل VMI به صورت غیرخطی بوده و در ابعاد بزرگ زمان حل آن‌ها به طور نمایی افزایش می‌یابد و دارای پیچیدگی زمانی سخت هستند. در

شرایط چندهدفه، صادقی و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم ژنتیک NSGA-II استفاده کرده و با الگوریتم NRGA و SA چندهدفه مقایسه کرده‌اند [۱۷]. روزبه‌نیا و همکاران (۲۰۱۵)، از الگوریتم ترکیبی هیبرید ژنتیک و رقابت استعماری استفاده کرده‌اند [۱۶]. دیابات (۲۰۱۴)، از الگوریتم هیبرید ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید و صادقی و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم هیبرید خفاش بهره گرفته‌اند [۲۰، ۲]. در این پژوهش از الگوریتم‌های فراابتکاری SA، GA و ترکیب SA-GA برای حل مسئله VMI موردنظر، استفاده شده و نتایج مقایسه شده است.

تولید داده‌های آزمایشی مسئله. در این بخش ۱۰ مسئله نمونه‌ای در محیط زنجیره تأمین با اندازه‌های مختلف در اندازه‌های کوچک و بزرگ تولید شده‌اند؛ از این رو ۵ مسئله نمونه‌ای در اندازه کوچک با روش دقیق و با استفاده از نرم‌افزار گمز، و ۵ مسئله در اندازه بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید (SA)، ژنتیک (GA)، و ترکیب این دو الگوریتم (GA-SA) برای مدل پیشنهادی حل می‌شود. اندازه مسائل نمونه‌ای کوچک در جدول ۲، ارائه شده است. لازم است داده‌های آزمایشی مسئله به‌منظور بررسی و اعتبارسنجی مدل ریاضی پیشنهاد شده و همچنین کیفیت نتایج الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی مسئله تولید شوند. تولید داده‌های آزمایشی مسائل نمونه‌ای با اندازه کوچک که برخی از آن‌ها قطعی و مشخص بوده و برخی به‌صورت تصادفی و مبتنی بر توزیع یکنواخت است، در جدول ۳، مشاهده می‌شود.

جدول ۲. اندازه مسائل نمونه‌ای کوچک

مسئله نمونه‌ای	تعداد فروشندگان	تعداد خُرده‌فروشان	تعداد ماشین	تعداد وسایل نقلیه
مسئله ۱	۱	۳	۲	۲
مسئله ۲	۲	۵	۲	۳
مسئله ۳	۳	۷	۳	۳
مسئله ۴	۴	۸	۳	۴
مسئله ۵	۵	۱۰	۴	۴

جدول ۳. تولید داده‌های تصادفی برای مدل پیشنهادی

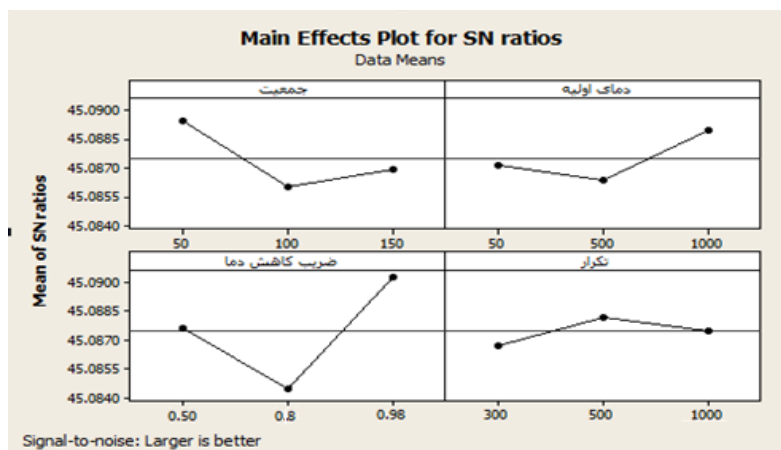
پارامتر	مقدار پارامتر
D	$U \sim [100, 500]$
d_i	$U \sim [20, 50]$
$d_{i,j}$	$U \sim [10, 25]$
$A_{i,j}$	$U \sim [1, 10]$
Av_i	$U \sim [1, 10]$
Aw	$U \sim [1, 10]$

$h_{i,j}$	$U \sim [5, 10]$
$\pi_{i,j}$	$U \sim [25, 50]$
hw	$U \sim [5, 10]$
h_i	$U \sim [5, 10]$
h_k	$U \sim [5, 10]$
Cap_l	$U \sim [50, 150]$
g_l	$U \sim [15, 25]$
G_l	$U \sim [50, 100]$
$y_{i,j}$	$U \sim [30, 100]$
yw_i	$U \sim [30, 100]$
Y_m	$U \sim [30, 50]$
α_i	$U \sim [50, 200]$
f	$U \sim [1, 5]$
F	$U \sim [250, 1000]$
G	$U \sim [1000000, 10000000]$
X	$U \sim [1000000, 5000000]$
e	$U \sim [50, 100]$
S_k	$U \sim [10, 25]$
B	$U \sim [50, 100]$
C_k	$U \sim [30000, 200000]$
R_k	$U \sim [0, 5, 1]$

یادآوری این نکته لازم است که U ، توزیع احتمالی یکنواخت را نشان می‌دهد.

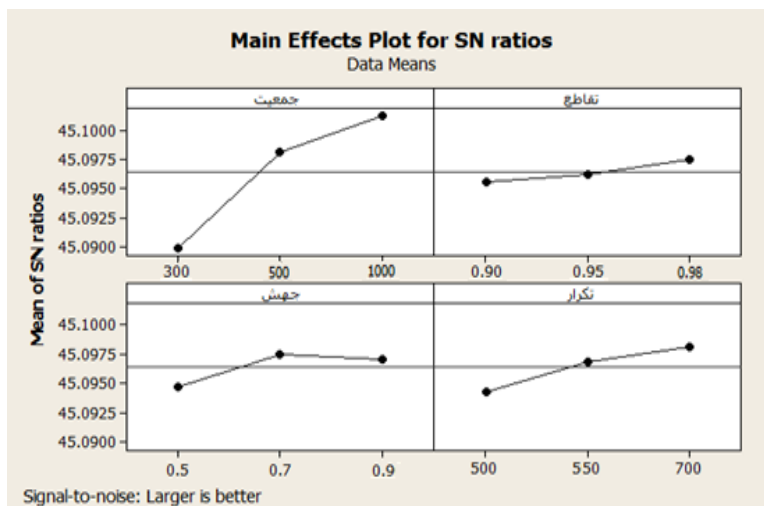
تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی به روش تاگوچی. انتخاب پارامترهای مربوط به الگوریتم ممکن است کیفیت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. در الگوریتم انجماد تدریجی چهار پارامتر مهم ضریب کاهش دما در هر مرحله، دمای اولیه، جمعیت اولیه و تعداد تکرار وجود دارد. پارامتر ضریب کاهش دما نحوه کاوش در فضای جست‌وجو را تعیین می‌کند. هرچه این مقدار کمتر باشد، الگوریتم جواب‌های بیشتری را بررسی می‌کند. دمای اولیه نیز مانند پارامتر ضریب کاهش دما هرچه بیشتر باشد، الگوریتم جواب‌های بیشتری را مورد بررسی قرار داده است؛ ولی بالا بودن دما باعث می‌شود که الگوریتم در زمان قابل قبولی جواب نزدیک به جواب بهینه را ارائه ندهد. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم که موجب افزایش کارایی الگوریتم می‌شود، سطوحی در نظر گرفته می‌شود و به‌ازای هر سطح از پارامترها برنامه ۵ بار اجرا شده و پس از به‌دست‌آوردن معیار عملکرد این مقادیر به‌عنوان ستون مینا در نرم‌افزار Minitab برای تجزیه و تحلیل و محاسبات قرار می‌گیرد؛ بنابراین برای یک مثال تصادفی مقادیر مختلف عوامل نام‌برده مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

به‌منظور تعیین سطوح مطلوب و اقتصادی پارامترهای الگوریتم انجماد تدریجی با توجه به سطوح تعریف‌شده بالا در حالت معمول لازم است تعداد ($81 = 3 \times 3 \times 3 \times 3$) آزمایش انجام شود که نیازمند صرف هزینه و زمان بالایی است. به همین منظور از طرح تاگوچی L_9 برای انتخاب سطوح بهینه و اقتصادی پارامترها استفاده شده است. مثال موردنظر برای هر ترکیب متفاوت از سطوح پارامترها پنج بار توسط الگوریتم اجرا شده است. در این قسمت با توجه به تحلیل‌های مربوط به روش تاگوچی، تأثیر عوامل مختلف تأثیرگذار بر هزینه‌های سیستم مورد انتظار بررسی می‌شود. در روش تاگوچی با استفاده از نسبت سیگنال - نویز، بررسی پراکندگی عوامل مختلف در سطوح مختلف صورت می‌گیرد. شکل ۳، متوسط مربوط به سیگنال - نویز را نشان می‌دهد.



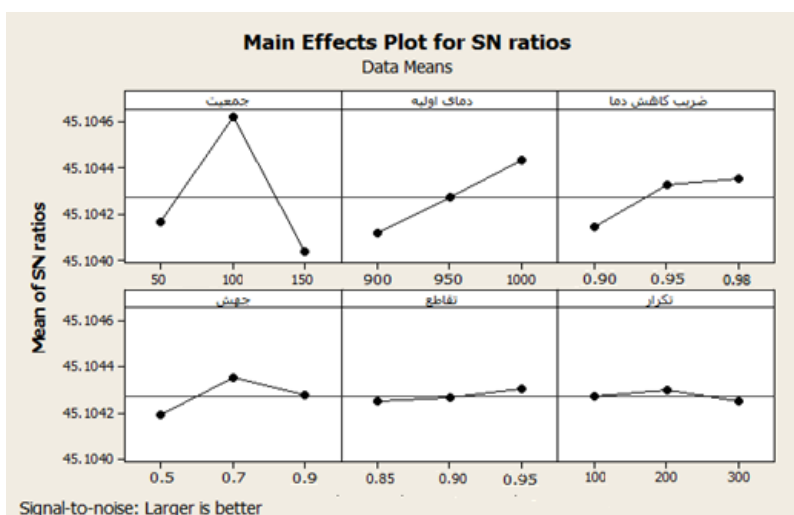
شکل ۳. متوسط مربوط به سیگنال - نویز برای الگوریتم SA

مقادیر پایین‌تر متغیر پاسخ سیگنال - نویز یک سطح نشان‌دهنده مطلوبیت بیشتر آن سطح نسبت به سایر سطوح است. برای سایر الگوریتم‌ها نیز این روند انجام شده است. برای نمونه عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم GA و سطوح آن‌ها در شکل ۴، نشان داده شده است.



شکل ۴. متوسط مربوط به سیگنال - نویز الگوریتم GA

عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم ترکیبی SA-GA انجماد تدریجی - ژنتیک و سطوح آنها در شکل ۵، مشاهده می‌شود.



شکل ۵. متوسط مربوط به سیگنال - نویز الگوریتم SA - GA

نتایج محاسباتی. در این بخش نتایج محاسباتی مسئله ارائه شده است. حل دقیق مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی پیشنهادی در نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴.۱.۲ با استفاده از حل‌کننده BONMIN صورت گرفت. الگوریتم‌های فراابتکاری نیز توسط نرم‌افزار MATLAB R2017b کدنویسی شده و بر روی رایانه‌ای با پردازشگر ۲.۴۰ GHz و ۴G حافظه اجرا شد. برای حل مدل دوهدفه حاضر نیز، روش مجموع وزن‌دار^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه کلاسیک به کار رفت. وزن‌های مربوط به این توابع هدف بسته به میزان اهمیت آن‌ها از نظر تصمیم‌گیرندگان قابل تغییر است؛ اما در این پژوهش با توجه به مبانی نظری موضوع و اهمیت توابع هدف، برای تابع هدف اول وزن ۰/۸۵ و برای تابع هدف دوم وزن ۰/۱۵ در نظر گرفته شد.

شاخص‌های بررسی کارایی الگوریتم‌ها. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌ها و مدل ریاضی پیشنهادی از شاخص‌های زیر استفاده خواهد شد. مقدار انحراف از بهترین جواب پیداشده: این شاخص برای الگوریتم A با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

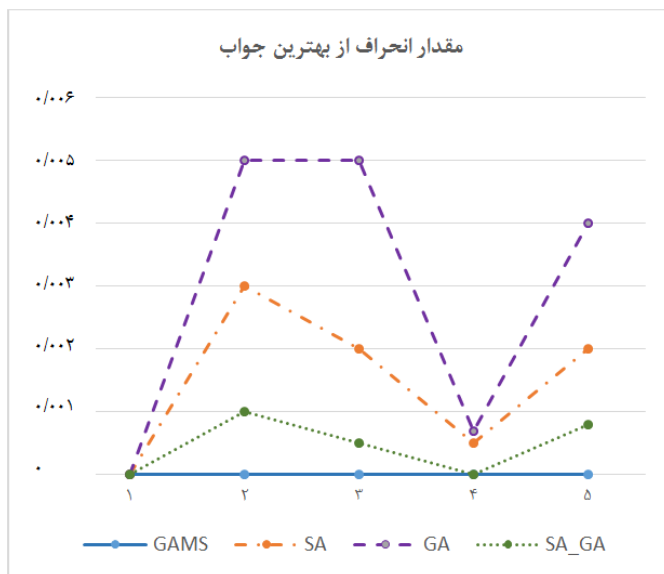
$$GAP_A = 100 \cdot (\text{بهترین جواب مسئله} - \text{بهترین جواب الگوریتم A}) / \text{بهترین جواب مسئله}$$

میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنادار نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$RPD_A = 100 \cdot (\text{بهترین جواب الگوریتم‌ها} - \text{بهترین جواب الگوریتم A}) / \text{بهترین جواب الگوریتم‌ها}$$

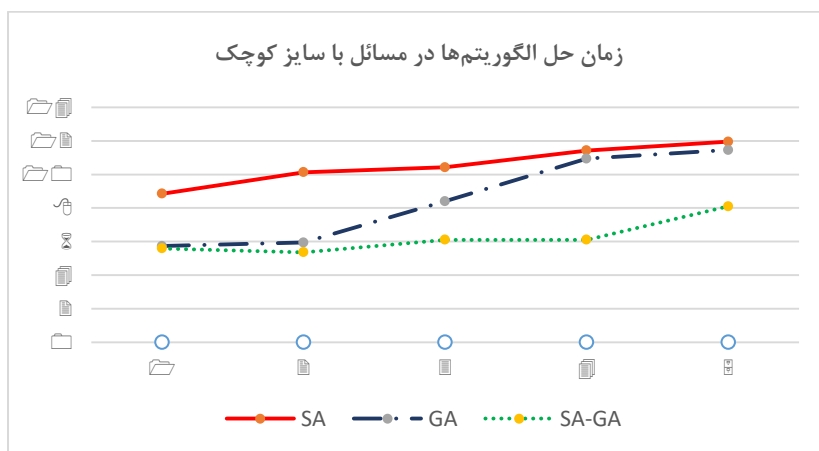
شکل ۶ مقدار شاخص انحراف از بهترین جواب یافت‌شده را برای ۵ مسئله نمونه در اندازه کوچک نمایش می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت الگوریتم ترکیبی GA-SA در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها همگرایی بیشتری به جواب دقیق دارد. به‌طور کلی در این پژوهش هدف از ترکیب دو الگوریتم SA و GA ترکیب دو مزیت این الگوریتم‌ها است. الگوریتم SA همگرایی بیشتری به جواب بهینه دارد؛ اما زمان اجرای آن طولانی‌تر است؛ درحالی‌که الگوریتم GA زمان اجرای بسیار کمی نسبت به الگوریتم SA دارد؛ اما همگرایی زیادی به جواب بهینه ندارد.

1. weighted sum



شکل ۶. مقدار شاخص انحراف از بهترین جواب یافت شده

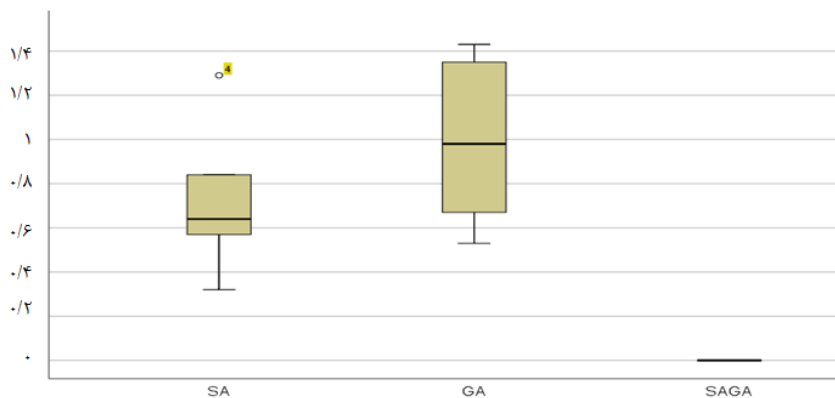
شکل ۷، زمان به کاررفته برای حل مسائل با اندازه کوچک را در الگوریتم‌های موردبررسی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، کمترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل را الگوریتم ترکیبی SA-GA و بیشترین زمان را SA به خود اختصاص داده است.



شکل ۷. مقایسه زمان حل الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه کوچک

به منظور بررسی کارایی الگوریتم‌ها در حل مسائل با ابعاد بزرگ، نمودار میانگین تابع هدف و بازه حداقل اختلاف معنادار (با اطمینان ۹۵ درصد) در پنج مرتبه اجرا برای الگوریتم‌ها در شکل ۸،

آورده شده است که نشان می‌دهد الگوریتم SA-GA در کل به نتایج خیلی بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌رسد؛ چراکه میانگین درصد انحرافات آن از همه کمتر است.

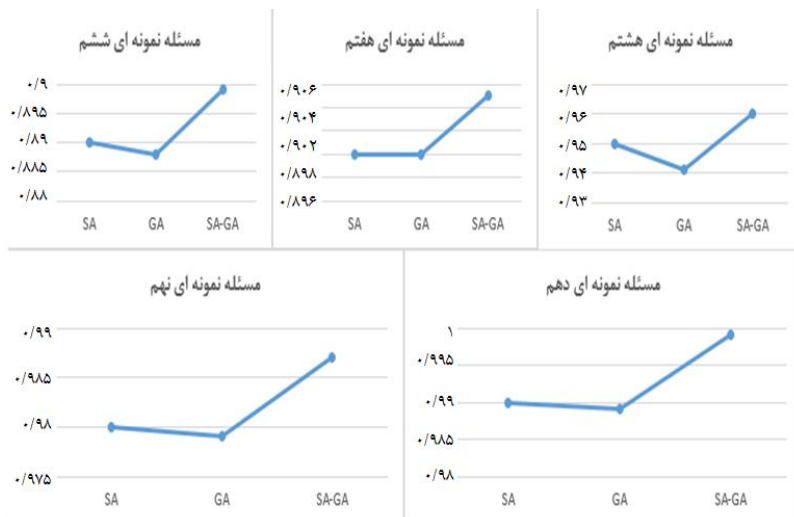


شکل ۸. نمودار میانگین RPD با بازه اطمینان ۹۵ درصد برای الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه بزرگ

به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰، برای مثال‌های حل شده با اندازه بزرگ به مقایسه کارایی الگوریتم‌ها بر اساس مقدار تابع هدف اول و دوم به‌دست‌آمده از هر یک پرداخته شده است. با توجه به نمودارها برای هر ۵ مثال حل شده، کارایی الگوریتم ترکیبی ژنتیک - انجماد تدریجی بر اساس تابع هدف بهتر از سایر الگوریتم‌ها بوده است.

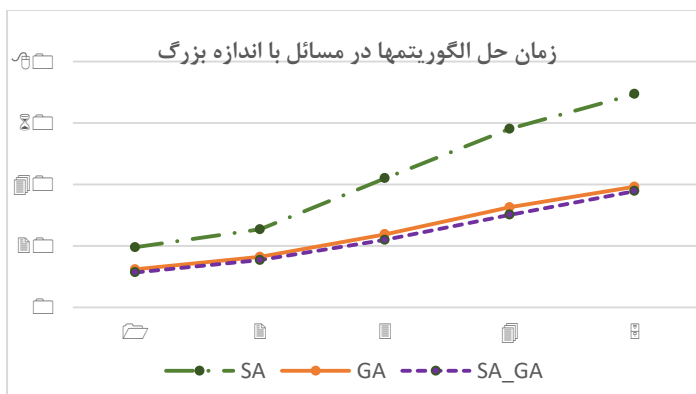


شکل ۹. مقایسه کارایی الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه بزرگ (تابع هدف اول)



شکل ۱۰. مقایسه کارایی الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه بزرگ (تابع هدف دوم)

شکل ۱۱، زمان به کاررفته برای حل مسائل با اندازه بزرگ را در الگوریتم‌های موردبررسی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، کمترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل را الگوریتم ترکیبی SA-GA و بیشترین زمان مورد استفاده برای حل مسائل را الگوریتم SA به خود اختصاص داده‌اند.



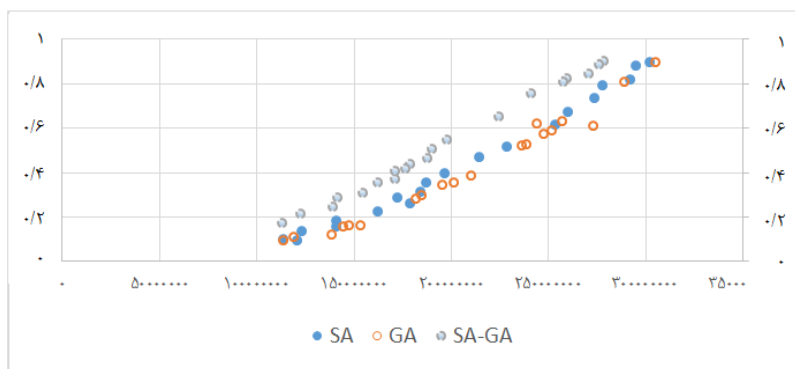
شکل ۱۱. مقایسه زمان حل الگوریتم‌ها در مسائل با اندازه بزرگ

جبهه پارتو بهینه‌سازی چندهدفه. در ادامه معیارهای استاندارد مقایسه برای ارزیابی الگوریتم‌های چندهدفه با رویکرد پارتو ارائه می‌شود. به‌طور کلی بر خلاف بهینه‌سازی تک‌هدفه دو معیار اصلی شامل حفظ تنوع در بین جواب‌های پارتو و همگرایی به مجموعه جواب‌های پارتو را برای بهینه‌سازی چندهدفه می‌توان در نظر گرفت. در این بخش طبق شکل ۱۲، سه معیار بیشترین گسترش، فاصله‌گذاری و فاصله از جواب ایده‌آل مقایسه شده و به‌منظور ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌شود.



شکل ۱۲. خلاصه‌ای از عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری از منظر معیارهای پارتو بر اساس ۴ مسئله نمونه‌ای بزرگ

بررسی جواب‌های پارتو. نتایج انجام آزمایش‌ها برای مسئله هفتم از مسائل نمونه‌ای بزرگ توسط سه الگوریتم SA، GA و SA-GA در شکل ۱۳، نشان داده شده است. با توجه به شکل، بهترین جواب‌های پارتو مربوط به الگوریتم SA-GA است.



شکل ۱۳. جواب‌های پارتو

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش یک مدل ریاضی جدید به منظور بهینه‌سازی دودهدفه مسئله مدیریت موجودی توسط فروشنده در یک زنجیره تأمین سه‌سطحی با مجازبودن کمبود، محدودیت تعداد سفارش‌ها و با توجه به الزامات زیست‌محیطی و لجستیک سبز در زنجیره تأمین و همچنین افزایش قابلیت اطمینان در خطوط تولیدی بررسی شد. مدل ارائه‌شده بهترین ترکیب و ارتباط بین فروشندگان و خرده‌فروشان را انتخاب کرده است؛ به طوری که کمترین هزینه به زنجیره تأمین تحمیل شود. برای این منظور یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید توسعه داده شد.

پنج مسئله نمونه‌ای در اندازه کوچک با روش دقیق و با استفاده از نرم‌افزار گمز و ۵ مسئله در اندازه بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید (SA)، ژنتیک، (GA)، و ترکیب این دو الگوریتم (GA-SA) برای مدل پیشنهادی حل شد. برای عملکرد بهتر الگوریتم‌های فراابتکاری پارامترهای مهم آن‌ها با استفاده از روش تاگوچی تنظیم و نتایج محاسباتی حاصل از این الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه شد. در نهایت به دلیل چندهدفه بودن مدل پیشنهادی، معیارهای پارتو برای بررسی کارایی الگوریتم‌ها محاسبه شدند. نتایج گویای کارایی روش حل پیشنهادی است. برای توسعه این پژوهش پیشنهاد می‌شود که عدم قطعیت در تقاضا و هزینه‌های سیستم در نظر گرفته شود و مدل به صورت چندمحصولی، چنددوره‌ای و در نظر گرفتن تخفیف بررسی شود؛ همچنین استفاده از مسیریابی در پنجره زمانی و در نظر گرفتن انبار مجزا برای هر فروشنده در مدل نیز به منظور نشان دادن شرایط واقعی‌تر به مسئله پیشنهاد می‌شود. استفاده و مقایسه سایر الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری توصیه می‌شود.

منابع

1. Darwish, M. A., & Odah, O. M. (2010). Vendor managed inventory model for single-vendor multi-retailer supply chains. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 473-484.
2. Diabat, A. (2014). Hybrid algorithm for a vendor managed inventory system in a two-echelon supply chain. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 114-121.
3. Dong, Y., & Xu, K. (2002). A supply chain model of vendor managed inventory. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(2), 75-95.
4. Bai, Q., Gong, Y., Jin, M., & Xu, X. (2019). Effects of carbon emission reduction on supply chain coordination with vendor-managed deteriorating product inventory. *International Journal of Production Economics*, 208, 83-99.
5. Fakhrzad, M., & Lotfi, R. (2018). Green vendor managed inventory with backorder in two echelon supply chain with epsilon-constraint and NSGA-II approach. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 5(11), 193-209.
6. Gharaei, A., Karimi, M., & Shekarabia, S.A.H. (2019). An integrated multi-product, multi-buyer supply chain under penalty, green, and quality control polices and a vendor managed inventory with consignment stock agreement: The outer approximation with equality relaxation and augmented penalty algorithm. *Applied Mathematical Modeling*, 69, 223-254.
7. Goyal, S.K. (1988). A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor: a comment. *Decision sciences*, 19(1), 236-241.
8. Halat, K., & Hafezalkotob, A. (2019). Modeling carbon regulation policies in inventory decisions of a multi-stage green supply chain: A game theory approach. *Computers and Industrial Engineering*, 128, 807-830
9. Han, J., Lu, J., & Zhang, G. (2017). Tri-level decision-making for decentralized vendor-managed inventory. *Information Sciences*, 421, 85-103.
10. Karbasi-bonab, V., Yousefi Nejad Attari, M., & Neishabouri, E. (2018). Presenting a bi-objective vendor managed inventory model with fuzzy demand for multiple vendor. *Journal of Decisions and Operations Research*, 2(2), 147-168.
11. Karimi, M., & Niknamfar, A. H. (2017). A vendor-managed inventory system considering the redundancy allocation problem and carbon emissions. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 12(4), 269-279.
12. Pasandideh, S.H. R., Niaki, S.T.A., & Niknamfar, A.H. (2014). Lexicographic max-min approach for an integrated vendor-managed inventory problem. *Knowledge-Based Systems*, 59, 58-65.
13. Park, Y.B., Yoo, J.S., & Park, H.S. (2016). A genetic algorithm for the vendor-managed inventory routing problem with lost sales. *Expert Systems with Applications*, 53, 149-159.
14. Rabbani, M., Rezaei, H., Lashgari, M., & Farrokhi-Asl, H. (2018). Vendor managed inventory control system for deteriorating items using metaheuristic algorithms. *Decision science letters*, 7(1), 25-38.
15. Rad, R.H., Razmi, J., Sangari, M.S., & Ebrahimi, Z.F. (2014). Optimizing an integrated vendor managed inventory system for a single-vendor two-buyer supply

- chain with determining weighting factor for vendor's ordering cost. *International Journal of Production Economics*, 153, 295-308.
16. Roozbeh-Nia, A.R., Far, M.H., & Niaki, S.T.A. (2015). A hybrid genetic and imperialist competitive algorithm for green vendor managed inventory of multi-item multi-constraint EOQ model under shortage. *Applied Soft Computing*, 30, 353-364.
17. Sadeghi, J., Sadeghi, S., & Niaki, S.T.A. (2014). Optimizing a hybrid vendor-managed inventory and transportation problem with fuzzy demand: an improved particle swarm optimization algorithm. *Information Sciences*, 272, 126-144.
18. Sadeghi, J., Sadeghi, S., & Niaki, S.T.A., (2014). A hybrid vendor managed inventory and redundancy allocation optimization problem in supply chain management: An NSGA-II with tuned parameters. *Computers and Operations Research*, 41, 53-64.
19. Sadeghi, J., Taghizadeh, M., Sadeghi, A., Jahangard, R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Optimizing a vendor managed inventory (VMI) model considering delivering cost in a three-echelon supply chain using two tuned parameter meta-heuristics. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 6(4), 500-510.
20. Sadeghi, J., Mousavi, S.M., Niaki, S.T.A., & Sadeghi, S. (2014). Optimizing a bi-objective inventory model of a three-echelon supply chain using a tuned hybrid bat algorithm. *Transportation Research Part E*, 70, 274-292.
21. Sadeghi, J., Mousavi, S.M., & Niaki, S.T.A. (2016). Optimizing an inventory model with fuzzy demand, backordering, and discount using a hybrid imperialist competitive algorithm. *Applied Mathematical Modeling*, 40, 7318-7335.
22. Sadeghi, J., Mousavi, S.M., Niaki, S.T.A., & Sadeghi, S. (2013). Optimizing a multi-vendor multi-retailer vendor managed inventory problem: Two tuned meta-heuristic algorithms. *Knowledge-Based Systems*, 50, 159-170.
23. Sadeghian, R., Talebi-Langaroudi, G., & Zoraghi, N. (2015). An inventory model for tri-stage supply chain with a warehouse, stochastic demand and multi retailers and vendors. *International Journal of Operations and Logistics Management*, 4(2), 125-138.
24. Seif Barghy, M., & Mortazavi, S. (2018). Two-objective modeling of location-allocation problem in a green supply chain considering transportation system and CO2 emission. *Journal of Industrial Management Perspectives*, 8(29), 163-185 (In Persian).
25. Taleizadeh, A.A., Noori-daryan, M., & CárdenasBarrón, L.E. (2015). Joint optimization of price, replenishment frequency, replenishment cycle and production rate in vendor managed inventory system with deteriorating items. *International Journal of Production Economics*, 159, 285-295.
26. Taleizadeh, A.A., & Mohammadi, R. (2015). Optimizing the selling price and advertising cost in a two layers supply chain including a manufacturer and two retailers. *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(2), 107-127(In Persian).
27. Verma, N.K., & Chatterjee, A.K. (2017). A multiple-retailer replenishment model under VMI: Accounting for the retailer heterogeneity. *Computers and Industrial Engineering*, 104, 175-187.
28. Yao, Y., Evers, P.T., & Dresner, M.E. (2005). Supply chain integration in vendor-managed inventory. *Decision support systems*, 43(2), 663-674.

29. Yao, Y, & Dresner, M. (2008). The inventory value of information sharing continuous replenishment and vendor-managed inventory. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 361-378.
30. Zamani Bajegani, H., & Gholamian, M. (2018). An inventory model for obsolescence items with permissible delay in payments and inflation. *Journal of Industrial Management Perspectives*, 7(4), 77-105 (In Persian).

Bi-Objective Optimization of Vendor Managed Inventory Problem in a Mult Echelon Green Supply Chain

Afshin Radfar^{*}, Davood Mohammaditabar^{}**

Abstract

Integrating decisions in the supply chain is a challenge for producers who intend to optimize their supply chain costs. Vendor managed inventory (VMI) is one of the popular strategies for integrated supply chain management. In this strategy, customers provide their information to the vendor, and the vendor uses this information to manage their inventory and decide on the order quantity and delivery schedules. In this study, a three-tier green supply chain consisting of multi-retailers, multi-vendors with backorders is considered. The total cost of green supply chain is minimized and system reliability for manufactured goods is maximized by considering the constraints. The meta-heuristic methods of GA, SA and a combination of SA-GA are used to solve the model. Taguchi method was used to increase the efficiency of the algorithms. After performing the algorithms for problems of different sizes, the results were compared with respect to the efficiency of the algorithms. The obtained results suggest that the efficiency of the SA-GA is better than other algorithms. Finally, since the model is multi-objective, Pareto optimal solutions are analyzed.

Keywords: VMI; Green SCM; Hybrid Genetic Simulated Annealing; Taguchi Method; Pareto Frontier.

Received: May, 19, 2019, Accepted: Nov. 11, 2019.

^{*} MSc., Department of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

^{**} Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran (Corresponding Author).

E-mail: d_mohammaditabar@azad.ac.ir