

طراحی یک مدل شبیه‌سازی موجودی چندسطحی، چندمحصولی و مقایسه آن با مدل‌های منتخب (مورد مطالعه: صنایع فولاد ایران)

سیدمحمد رضا داودی*، فریبرز جولای**، علی محقر***، محمدرضا مهرگان****

چکیده

در این پژوهش طراحی و مقایسه یک مدل شبیه‌سازی موجودی چندسطحی، چندمحصولی در صنایع فولاد ایران ارائه می‌شود. مدل شبکه واگرا با چند محصول نهایی و چند محصول میانی و یک قلم محصول اولیه در نظر گرفته می‌شود. هدف کمیته‌سازی تابع هزینه با حفظ حداقل سطح سرویس‌دهی موردنظر برای هر تسهیل که با نرخ پرسازی سنجیده می‌شود، در مدل ارائه‌شده با داشتن یک نقطه شدنی و موضعی‌سازی درجه دوم تابع هدف و خطی قیود پیرامون آن نقطه و استفاده از الگوریتم ژنتیک در رسیدن به نقطه‌ی بهینه موضعی کوشیده شده است. از آنجاکه برآوردهای نقطه‌ای تابع هدف و نرخ‌های پرسازی به کمک شبیه‌سازی انجام می‌گیرد از آزمون فرض‌های آماری برای بررسی شدنی و بهبود جواب‌ها استفاده می‌شود. پس از اعتبار سنجی، مدل با استفاده از اطلاعات شرکت فولاد مبارکه در یک شبکه سه‌سطحی اجرا می‌شود. با توجه به این نکته که موضعی‌سازی خطی حالت خاصی از موضعی‌سازی درجه دوم است؛ از این رو با اطمینان بیشتری می‌توان انتظار داشت نقطه به‌دست‌آمده از این مدل، بهتر از حالت موضعی‌سازی خطی باشد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت زنجیره تأمین؛ بهینه‌سازی بر پایه شبیه‌سازی؛ کنترل موجودی چند سطحی؛ صنایع فولاد ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۵/۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۸/۱۳.

* دانشجوی دکتری، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران.

E-mail: smrdavoodi@ut.ac.ir

** استاد، دانشگاه تهران.

*** دانشیار، دانشگاه تهران.

**** استاد، دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

بهینه‌سازی سیستم‌های کنترل موجودی از مسائل مهم در مدیریت زنجیره‌های تأمین است. شکل کلاسیک مدل‌های کنترل موجودی عمدتاً یک انبار را به‌تنهایی در نظر می‌گیرد و تحت شرایط و مفروضات خاص به بهینه‌سازی سیستم موجودی آن اقدام می‌کند. مدل‌های موجودی چند سطحی تعمیمی از مدل‌های کلاسیک هستند که در آن‌ها تعدادی واحد مختلف در قالب یک زنجیره تأمین همکاری دارند. زمان سفارش و مقدار سفارش کالا به‌گونه‌ای که هزینه‌های سیستم حداقل و هم‌زمان تقاضای مشتریان برآورده شود دغدغه اصلی مدیریت موجودی است. پژوهش پیرامون سیستم‌های موجودی چندسطحی به دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بازمی‌گردد. مشهورترین کارهای اولیه در زمینه سیستم‌های موجودی چندسطحی را کلاسرک و اسکارف (۱۹۶۰) انجام دادند که در بیشتر مقالات و پژوهش‌های سیستم‌های چندسطحی به‌عنوان پایه‌گذاران این شاخه شناخته می‌شوند. آن‌ها با تأکید بر مفهوم «موجودی سطحی» به تحلیل تابع هزینه سیستم‌های چندسطحی پرداختند [۱۳]

یکی از اولین مدل‌های مرور پیوسته موجودی در سیستم‌های چندسطحی، توسط شربروک (۱۹۶۸) ارائه شد. در این بررسی تقریب متریک به‌عنوان روشی مناسب برای تعیین سطح بهینه موجودی‌ها در یک سیستم دوسطحی معرفی می‌گردد، مدل شربروک توسط مک استادت (۱۹۷۳) توسعه داده شد [۳۸].

بول اپراگادا و همکار (۱۹۹۳) سیستم توزیعی شامل یک دیپو و چند انبار را بررسی کردند که در آن تقاضا به‌صورت احتمالی و در سطح انبارها ایجاد می‌شود. در ابتدای هر دوره دیپو سفارشی به یک تأمین‌کننده خارج از سیستم ارائه می‌دهد که سفارش پس از مدت‌زمان انتظار ثابتی به دیپو می‌رسد. سپس دیپو سفارش‌های رسیده را به انبارها ارسال می‌کند. دیپو هیچ موجودی نگهداری نمی‌کند. زمان انتظار ثابتی بین دیپو و انبارها در نظر گرفته شده است و کمبود به‌صورت سفارش‌های عقب‌افتاده فرض شده است. همچنین انبارها به‌صورت غیریکسان بررسی شده‌اند. هوکیو و گوئال (۲۰۰۰) در کار خود با در نظر گرفتن مدل یکپارچه تولید ° موجودی تک فروشنده، تک خریدار هل (۱۹۹۷) روش ساده‌ای برای مقداردهی اندازه‌های ارسالی به‌دست‌آمده از روش یادشده ارائه نمود [۲۲، ۸].

لیو (۱۹۹۵) در ارزیابی عملکرد یک سیستم موتناژ با اجزا یا زیرمجموعه‌های تغذیه داخل چارچوب مرحله موتناژ را مطالعه کردند که میزان سفارش‌ها به‌عنوان یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده بود. [۲۷]

با ورود پارامترهای تصادفی مانند تقاضای تصادفی مشتریان و زمان بین ارسال تا دریافت سفارش به مدل، فرآیندهای تصادفی، معادلات دیفرانسیل و کنترل تصادفی برای بیان و حل چنین سیستم‌هایی به کار رفت که از آن میان می‌توان به دورمیر وشوارتز (۱۹۸۱)، گراویز (۱۹۸۵)، آکساتر (۱۹۹۰ و ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶)، کاچن (۲۰۰۱)، امیری و همکاران (۲۰۱۲)، ژائو و وانگ (۲۰۰۸)، کُچل ونیلندر (۲۰۰۵)، شربروک (۱۹۶۸)، ایوانوف و همکاران (۲۰۱۲) و پرا و همکاران (۲۰۰۳) اشاره کرد [۱۴،۳۵،۳۳،۳۸،۲۶،۱۷،۳،۹۶،۵،۴،۲۰].

شوارتز و همکاران (۲۰۰۶) به ترکیب شبیه‌سازی و کنترل تصادفی، چو و همکاران (۲۰۱۴)، جونگ و همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۰۴)، آلمدر و همکاران (۲۰۰۹) و نیکولوپل و همکاران (۲۰۱۲) به ترکیب شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی صحیح، مله و همکاران (۲۰۰۶) و سیلوا و همکاران (۲۰۰۶) به ترکیب شبیه‌سازی و الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند ژنتیک و کلونی مورچه‌ها انجام دادند [۳۷،۱۰،۲۴،۱،۳۳،۲۹،۳۹].

شبیه‌سازی را می‌توان برای تعریف و تفسیر سیستم، تجزیه و تحلیل آن به منظور تعیین پارامترهای بحرانی برای ارزیابی مسائل مختلف سیستم و نیز به عنوان تخمین‌گر برای تخمین مسائلی که در طرح‌ریزی و توسعه آینده سیستم دخالت دارند با حداقل خطای ممکن استفاده کرد.

این مقاله در چهار بخش اصلی تنظیم شده است. بعد از مقدمه به مبانی نظری و پیشینه پژوهش در بخش دوم پرداخته می‌شود. در بخش سوم روش شناسی پژوهش بررسی می‌شود که به معرفی مسئله معرفی و برآوردگرهای آماری برای پارامترهای سیستم و انجام آزمون فرض‌های آماری برای بررسی شدنی و بهتر بودن جواب‌ها، الگوریتم یافتن نقطه کمینه موضعی و مثال عددی روی شبکه کنترل موجودی دوسطحی و یک مثال کاربردی اختصاص داشته و در نهایت بخش چهارم با تحلیل داده‌ها و ارائه پیشنهادهایی برای پژوهشگران آتی به پایان رسانده می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

هوکیو و گوئال (۲۰۰۰) تعیین سیاست بهینه‌ای برای سیستم یکپارچه تولید - موجودی را مطالعه کردند. ویژگی خاص مدل پیشنهادی گوئال و هوکیو در بررسی مدل تحت شرط محدود بودن ظرفیت تجهیزات حمل‌ونقل است [۲۲].

وانگ و همکاران (۲۰۰۳) یک شبکه توزیع متشکل از چند انبار و چند خرده‌فروش در نظر گرفتند. در این شبکه تقاضاها باید به موقع تأمین شود و زودکرد یا دیرکرد در تأمین تقاضاها با

جریمه‌هایی همراه است. هدف تعیین برنامه‌ریزی توزیع بهینه به طریقی است که کل هزینه‌های ساخت، حمل، زودکرد یا دیرکرد به حداقل برسد [۴۲].

گومس و گونری (۲۰۰۷) به بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه سیستم‌های موجودی چندسطحی پرداخته و انواع روش‌های رایج در این مطالعات را شناسایی کردند [۲۱].

بنتون (۱۹۹۱) یک برنامه‌ریزی غیرخطی و روشی ابتکاری با استفاده از لاگرانژ برای انتخاب عرضه‌کننده تحت شرایط اقلام چندگانه محدودیت‌های منابع و تخفیفات مقداری را استفاده کرد. هدف این مدل، کم‌کردن مجموعه هزینه‌های خرید، نگهداری موجودی و سفارش است. همچنین محدودیت‌های انبار و سرمایه نیز در نظر گرفته شده است [۷].

اثرنبرگ و زیمرمن (۲۰۱۲) یک شیوه بهینه‌سازی مبنی بر شبیه‌سازی را پیشنهاد کردند که بر جفت‌کردن شبیه‌سازی و بهینه‌سازی از طریق یک شیوه تولید زمان‌بندی تکیه دارد. ملوک و همکاران (۲۰۱۳) یک تصمیم‌گیری مبنی بر بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در صنایع فولاد معرفی کردند. برای بهینه‌سازی آن‌ها مدل شبیه‌سازی را با یک واحد بهینه‌سازی توسعه یافته با استفاده از OptQuest پیوند دادند. التندورفر و مینر (۲۰۱۱) یک مدل برای بهینه‌سازی هم‌زمان ظرفیت و زمان برنامه‌ریزی شده سفارش در یک سیستم تولید دومارحله‌ای با زمان سررسید متفاوت برای مشتریان ارائه دادند. گورن و همکاران (۲۰۱۰) دیدگاه جامعی درباره کاربردهای GA، به‌طور عمده در مسائل اندازه‌گیری تک‌سطحی ارائه کردند. دنیل و راجندران (۲۰۰۵) یک مدل چند سطحی، تک‌محصولی برای بهینه‌سازی سطوح موجودی در زنجیره تأمین با هدف حداقل سازی هزینه کل زنجیره تأمین فرموله کردند که شامل هزینه‌های نگهداری و کمبود در زنجیره تأمین است. کیمبروف (۲۰۰۲) و اودونل (۲۰۰۶) با اعمال GA به مدل زنجیره تأمین بر اساس بازی آبجو اثر شلاق چرمی را کاهش دادند. فخرزاد و زارع (۲۰۰۹) ترکیبی از GA را با ضریب‌های لاگرانژ در مسائل برنامه‌ریزی تولید چندسطحی، چندمحصولی و چنددوره‌ای ارائه کردند. پسندیده (۲۰۱۱) یک مدل سفارش اقتصادی (EOQ) برای سیستم زنجیره تأمین دوسطحی توسعه داد که شامل چندین محصول است که انبار تأمین‌کننده ظرفیت محدودی دارد. قیامی و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتم GA و جست‌وجو را برای کاهش زمان محاسبه استفاده کردند و یک مدل بهینه‌سازی برای موجودی رو به کاهش در زنجیره تأمین تک عمده‌فروش و خرده‌فروش، با انبار ظرفیت محدود خرده‌فروش را فرموله کردند [۱۸، ۳۴، ۱۶، ۳۶، ۱۹، ۲، ۳۰، ۱۵].

سیاریف (۲۰۰۲) مشکل توزیع تک‌دوره‌ای که تصمیم‌های باینری افتتاح دستگاه‌ها و مراکز توزیع را پوشش می‌دهد را در نظر گرفت. یوکویاما (۲۰۰۲) مدلی بر اساس GA برای سیستم توزیع تک‌محصولی با تقاضای ثابت و احتمالی ارائه کرد. هدف این مدل عبارت بود از تعیین سطوح هدف برای مراکز توزیع و کمیت‌های انتقال که هزینه‌های کل مرتبط با موجودی

موردانتظار را حداقل کند. هان و دمرونگونگسیری (۲۰۰۲) مدلی برای تعیین بهترین پارامترهای سیاست سفارش تا سطح برای مسئله شبکه تصادفی، چنددوره‌ای، دوسطحی توسعه دادند. آن‌ها GA را برای هدایت بهترین راهکارها در مسئله بهینه‌سازی دومرحله‌ای اعمال کردند. وانگ و وانگ (۲۰۰۸) همان روش را در مورد صنعت واقعی اجرا کرده و تأکید کردند که GA قادر است موجودی و برنامه توزیع خوبی را که ممکن است منجر به کاهش‌های چشمگیری در هزینه کل سیستم شود، هدایت کند. ناچیاپان و جواهر (۲۰۰۷) با استفاده از GA بهترین پارامترهای عملیاتی را برای زنجیره تأمین دوسطحی با تک فروشنده و چند خریدار تحت موجودی با مدیریت خریدار را به دست آوردند. آن‌ها مدلی ریاضی برای یافتن بهترین کمیت فروش برای هر خریدار را فرموله کردند و بهترین فروش و قیمت‌های قراردادی قابل قبولی را تحت ساختارهای درآمدی مختلف شرکت به دست آوردند. بیمر و دمیرلی (۲۰۱۰) زنجیره تأمین چندمحصولی و چند دستگاه تولید به سفارش را با چندین کانال تأمین و توزیع تحلیل کردند. آن‌ها مدلی پویا برای برنامه‌ریزی مونتاژ و توزیع محصولات نهایی بر اساس مشخصات سفارش مشتری توسعه دادند. بر اساس خروجی‌های این مدل، آن‌ها مدل برنامه‌ریزی برای تولید اجزا و تدارک مواد خام را فرموله کردند. لیائو (۲۰۱۱) مدلی یکپارچه برای دخیل کردن تصمیم‌های کنترل موجودی در مدل‌های مکان تسهیل مرسوم پیشنهاد کرد و الگوریتم تکمیلی چندهدفه‌ای برای تعیین بهترین پورتفولیوی مکان تسهیل و پارامترهای کنترل موجودی برای حصول بهترین توافق برای ارائه معیارهای متناقض، توسعه داد. وانگ (۲۰۱۱) برای حل یک مسئله تخصیص مکان با برنامه‌ریزی تصادفی دوسطحی GA را با اکتشاف حریصانه برای حل مسئله مکان تسهیل و اختصاص وظیفه زنجیره تأمین دوسطحی ترکیب کرد. نتایج مقاله مشخص کرد که GA پیشنهادی می‌تواند تقریباً بهترین راه‌حل را در محیط‌های تقاضای تصادفی ارائه کند. سوآن (۲۰۱۲) مدل ریاضی را که ناچیاپان و جواهر (۲۰۰۷) معرفی کرده بودند، استفاده کرد و یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذره‌ای و الگوریتم سیستم امن مصنوعی GA هیبرید را برای بهینه‌سازی یک مدل زنجیره تأمین دوسطحی پیشنهاد کرد [۴۰، ۲۷، ۴۴، ۳۲، ۴۳، ۴۵، ۴۱].

در جدول ۱ مروری بر میانی نظری پژوهش انجام شده است.

جدول ۱. مروری بر مباحث نظری پژوهش

نویسندگان	رویکرد
کلارک و اسکارف (۱۹۶۰)	تأکید بر مفهوم موجودی در هر سطح با استفاده از تحلیل تابع هزینه سیستم‌های چندسطحی
راسد یانسیا و سائو (۲۰۰۵)	توسعه مدل برای موجودی ماشین‌های سکه‌ای با استفاده از الگوریتم الحاق و جست‌وجوی ممنوع
دنیل و راجندران (۲۰۰۵)	فرموله کردن یک مدل چندسطحی، تک‌محصولی برای بهینه‌سازی سطوح موجودی در زنجیره تأمین با هدف حداقل‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین، شامل هزینه‌های نگهداری و کمبود.
گومس و گونری (۲۰۰۷)	بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه سیستم‌های موجودی چندسطحی پرداخته و شناسایی انواع روش‌های رایج در این مطالعات.
کیمبروف (۲۰۰۲) و اودونل (۲۰۰۶)	استفاده از GA در زنجیره تأمین بر اساس بازی آجگو و کاهش اثر شلاق چرمی.
ناچیاپان و جواهر (۲۰۰۷)	استفاده از GA برای محاسبه بهترین پارامترهای عملیاتی برای زنجیره تأمین دوسطحی با تک فروشنده و چند خریدار.
ژائو و همکاران (۲۰۰۷)	ارائه راه‌حل جدید بر اساس الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوع برای تعیین موجودی در زنجیره تأمین دوره‌ای
عزیز و معین (۲۰۱۱)	کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های حمل و نگهداری موجودی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای زنجیره تأمین چندمحصولی، چنددوره‌ای با چند تأمین‌کننده.
بودیا و همکاران (۲۰۰۷)	مسیریابی موجودی با توسعه جستجوی انطباقی حریصانه تصادفی در زنجیره تأمین
وانگ و وانگ (۲۰۰۸)	اجرای مسئله بهینه‌سازی دومرحله‌ای با الگوریتم GA و تأکید بر اینکه GA قادر است موجودی و برنامه توزیع را که ممکن است منجر به کاهش‌های چشمگیری در هزینه کل سیستم شود، هدایت کند.
ژائو و همکاران (۲۰۰۸)	توسعه الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ متغیری در زنجیره تأمین سه سطحی.
فخرزاد و زارع (۲۰۰۹)	ارائه ترکیبی از GA با ضریب‌های لاگرانژ در مسائل برنامه‌ریزی تولید چند سطحی، چند محصولی و چند دوره‌ای.
گورن (۲۰۱۰)	ارائه دیدگاه جامعی درباره کاربردهای GA، به‌طور عمده در مسائل اندازه‌گیری تک‌سطحی.
بیمر و دمیرلی (۲۰۱۰)	استفاده از مدل دینامیکی تحلیل زنجیره تأمین چند محصولی و چند دستگاه تولید به سفارش با چندین کانال تأمین و توزیع بر اساس مشخصات سفارش مشتری.
لیائو (۲۰۱۱)	توسعه الگوریتم تکمیلی چندهدفه برای تعیین بهترین پورتفولیوی مکان تسهیل و پارامترهای کنترل موجودی با ارائه معیارهای متناقض.
پسندیده (۲۰۱۱)	توسعه یک مدل سفارش اقتصادی (EOQ) برای سیستم زنجیره تأمین دوسطحی شامل چندین محصول است با ظرفیت محدود انبار تأمین‌کننده.
التندورفر و مینر (۲۰۱۱)	ارائه یک مدل برای بهینه‌سازی هم‌زمان ظرفیت و زمان برنامه‌ریزی شده انجام سفارش در یک سیستم تولید دومرحله‌ای با زمان سررسید متفاوت برای مشتریان.

ادامه جدول ۱. مروری بر مبانی نظری پژوهش

نویسندگان	رویکرد
امیدی و همکاران (۲۰۱۲)	استفاده از معادلات دیفرانسیل و کنترل تصادفی در زنجیره تأمین موجودی چندسطحی با تقاضای تصادفی
ملوک و همکاران (۲۰۱۳)	بهینه‌سازی مبنی بر شبیه‌سازی در صنایع فولاد. مدل شبیه‌سازی را با یک واحد بهینه‌سازی توسعه یافته با استفاده از OptQuest پیوند دادند
قیامی و همکاران (۲۰۱۳)	ترکیبی از GA و الگوریتم جست‌وجو برای کاهش زمان محاسبه مدل بهینه‌سازی برای موجودی رو به کاهش در زنجیره تأمین تک عمده‌فروش و خرده‌فروش با انبار ظرفیت محدود خرده‌فروش
چو و همکاران (۲۰۱۴)	استفاده از شبیه‌سازی برای موضعی‌سازی خطی تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی موجودی چندسطحی با کمک الگوریتم صفحه برش و مفروضات آماری.
پژوهش حاضر	استفاده از شبیه‌سازی برای موضعی‌سازی درجه دوم تابع هدف و خطی قیود مسئله بهینه‌سازی موجودی چندسطحی با کمک الگوریتم ژنتیک و مفروضات آماری.

چو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از شبیه‌سازی به موضعی‌سازی خطی تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی کنترل موجودی چندسطحی پرداختند و سپس به کمک الگوریتم صفحه برش و کارهای آماری سعی در رسیدن به نقطه بهینه موضعی کردند. در مقاله حاضر یک تعمیم بهبود از الگوریتم آن‌ها ارائه می‌شود. مشخصات و وجوه تمایز این تعمیم به صورت زیر است:

- در الگوریتم چو و همکاران (۲۰۱۴) از موضعی‌سازی خطی برای تقریب تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی سیستم استفاده می‌شود. در مقاله حاضر از موضعی‌سازی درجه دوم تابع هدف و موضعی‌سازی خطی قیود استفاده می‌شود. دلیل اتخاذ این رویکرد در این است که موضعی‌سازی خطی حالت خاصی از موضعی‌سازی درجه دوم است و این کار دقت تقریب و سرعت رسیدن به جواب را افزایش می‌دهد.
- در الگوریتم چو و همکاران (۲۰۱۴) در فرآیند بهینه‌سازی به علت خطی بودن تابع هدف از الگوریتم صفحه برش به همراه آزمون فرض‌های آماری برای رسیدن به نقطه بهینه موضعی استفاده شده است. در این مقاله به علت غیرخطی بودن تابع هدف از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. با وجود این همچنان از آزمون فرض‌های آماری در فرآیند یافتن نقطه کمینه موضعی استفاده می‌شود.
- در الگوریتم چو و همکاران در هر تکرار الگوریتم تنها یک بار عمل موضعی‌سازی انجام شده و برای رسیدن به جواب بهتر، محدوده جست‌وجوی جواب را کوچک‌تر می‌کنند ولی در الگوریتم جدید در هر بار تکرار در صورت نیافتن نقطه شدنی بهتر، فرآیند موضعی‌سازی در فضای کوچک‌تر انجام می‌شود. این کار به طور طبیعی باعث افزایش دقت الگوریتم می‌شود.

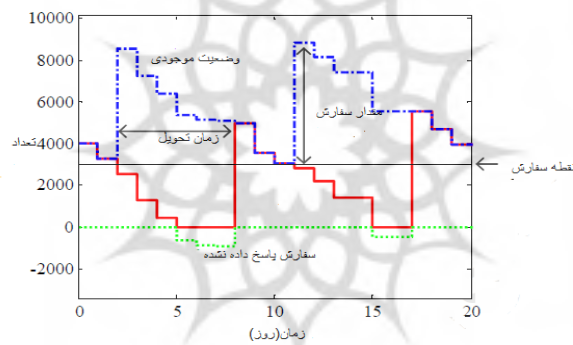
۳. روش شناسی پژوهش

معرفی مسئله. شبکه توزیع موردبررسی این مقاله یک شبکه واگرا است که در رأس آن یک کارخانه با سطح موجودی بی‌نهایت قرار دارد. سفارش‌های رسیده به کارخانه بلافاصله برای سفارش‌دهنده ارسال می‌شود. آخرین لایه شبکه همواره با تقاضای روزانه مشتری مواجه است که میزان آن برای هر واحد شبکه از یک تابع توزیع احتمال خاص پیروی می‌کند؛ در واقع برای به‌دست‌آوردن تابع چگالی تقاضای روزانه مشتری‌ها، از تقاضای روزانه آن‌ها نمونه‌برداری شده و با توجه به جدول توزیع فراوانی نمونه، تابع چگالی احتمال مناسب، انتخاب می‌شود. در یک روز زمانی که تقاضای مشتری از طریق موجودی واحدی که مشتری به آن مراجعه کرده تأمین نشود تقاضای مشتری به‌صورت تقاضای پاسخ داده نشده درآمده و در اولین فرصت به آن پاسخ داده می‌شود؛ بنابراین در یک روز هر واحد لایه آخر ابتدا به سفارش‌ها معوقه و سپس به تقاضای روزانه خود پاسخ می‌دهد. واحدهای واسط بین کارخانه و لایه آخر علاوه بر پاسخگویی به تقاضای روزانه مشتری‌های خود باید تقاضای واحدهای یک سطح پایین‌تر خود (در شبکه به هم متصل می‌باشند) را نیز پاسخ دهند. زمان بین ارسال سفارش توسط یک واحد به واحد بالاتر از خود (هر واحد فقط به واحد یک سطح بالاتر از خود سفارش می‌فرستد) تا زمانی که این سفارش از طریق موجودی دم‌دست واحد بالاتر تأمین شود (بدون اینکه به‌صورت معوقه درآید) یک متغیر تصادفی است که به آن زمان پردازش سفارش گفته می‌شود و برای هر واحد از توزیع تصادفی خاصی پیروی می‌کند. برای یافتن این توابع چگالی احتمال نیز از زمان‌های پردازش سفارش هر واحد نمونه‌برداری شده و با توجه به جدول توزیع فراوانی نمونه تابع چگالی احتمال مناسب انتخاب می‌شود. بدیهی است چنان‌چه واحد بالاتر نتواند بلافاصله به سفارش پاسخ گوید زمان بین ارسال تا دریافت سفارش از زمان پردازش سفارش بیشتر می‌شود؛ البته با توجه به فرض بی‌نهایت بودن موجودی کارخانه زمان بین ارسال تا دریافت سفارش برای واحدهای متصل به کارخانه برابر با زمان پردازش آن واحدها است. شکل ۱ نمای کلی شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمای کلی شبکه چندسطحی

در شبکه موردبررسی تمامی واحدها از سیاست کنترل موجودی نقطه سفارش مرور دائم (R, Q) استفاده می‌کنند. واحدی که از سیاست (R, Q) استفاده می‌کند، هرگاه سطح موجودیش به زیر R برسد یک سفارش به تعداد Q برای واحد بالاتر خود ارسال می‌کند. نمودار ۱ نحوه عملکرد این سیستم کنترل موجودی را نشان می‌دهد.



نمودار ۱. سیستم کنترل موجودی نقطه سفارش مرور دائم (مقادیر زیر صفر تقاضای پاسخ داده نشده است).

در مدل موردبررسی برای تمامی واحدها دو نوع هزینه نگهداری و هزینه سفارش واحد وجود دارد؛ بنابراین تابع هزینه شبکه به صورت زیر است.

$$INVCOST = \sum_{i=1}^{N_F} \sum_{t=1}^{N_T} C_i^H IOH_{it} + \sum_{i=1}^{N_F} \sum_{t=1}^{N_T} C_i^R SOR_{it}$$

تابع هزینه کنترل موجودی سیستم: $INVCOST$:

تعداد روزهای فعالیت سیستم: N_T

تعداد واحدهای شبکه (به غیر کارخانه): N_F

هزینه نگهداری یک واحد کالا برای واحد i : C_i^H

هزینه یک بار سفارش کالا برای واحد i : C_i^R

سطح موجودی پایان روز واحد i در روز t : IOH_{it}

SOR_{it} که دو مقدار به خود می‌گیرد:

واحد i در روز t سفارش ارسال کرده: $SOR_{it} = 1$

واحد i در روز t سفارش ارسال نکرده است: $SOR_{it} = 0$

هر واحدی باید در اتخاذ پارامترهای سیستم کنترل موجودی خود چنان عمل کند تا رضایت مشتریان مراجعه‌کننده به واحد از نظر تأمین فوری سفارش را جلب کند. در این مقاله سطح سرویس‌دهی به مشتریان به وسیله نرخ پرسازی که در زیر تعریف شده است، سنجیده می‌شود:

$$i : FR_i = \frac{SFD_i}{SRD_i}$$

FR_i : نرخ پرسازی واحد i

SFD_i : مجموع سفارش‌هایی که در یک دوره فعالیت در همان روز در واحد i تأمین شده‌اند

SRD_i : مجموع سفارش‌هایی که در یک دوره فعالیت سیستم به واحد i رسیده است

بدیهی است هر چه مقدار کسر بالا بیش‌تر شود؛ در واقع سفارش‌های کم‌تری به صورت معوقه درآمده است و مشتریان بیش‌تری در همان زمان ارائه تقاضای خود محصول را دریافت کرده‌اند. فرض می‌شود در یک شبکه مفروض با N_F واحد، R_i برابر نقطه سفارش واحد i و Q_i برابر مقدار سفارش آن واحد باشد.

هدف پژوهش یافتن بردار زیر است؛ به صورتی که تابع هزینه سیستم کمینه شود:

$X = [R_1, R_2, \dots, R_{N_F}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_F}]$ درحالی که نرخ پرسازی واحدها از بردار

fr^{\min} بیشتر شود:

$$i : FR_i \geq fr_i^{\min}$$

هر واحد موظف است سطح حداقلی از رضایت مراجعان را تأمین کند.

در برخورد با سیستم موجودی اولیه واحدها و تابع توزیع احتمال بردار به صورت زیر در نظر

گرفته شده است:

$$\theta = [od_{11}, \dots, od_{N_F N_T}, ot_{11}, \dots, ot_{N_F N_T}]$$

متغیر تصادفی نشان‌دهنده تعداد سفارش‌ها روزانه مشتریان واحد i در روز t od_{it} زمان پردازش سفارش واحد i در روز t $ot_{it} = t$ بنا بر آنچه گذشت توابع $f, g_1, g_2, \dots, g_{N_F}$ موجود هستند که:

$$INVCOST = f(X, \theta)$$

$$i: FR_i = g_i(X, \theta)$$

عبارات بالا نشان می‌دهد تابع هزینه سیستم و نرخ پرسازی هر واحد به سیستم کنترل موجودی اتخاذ شده و همچنین به پارامترهای تصادفی شامل تقاضا و زمان پردازش سفارش وابسته است. با معرفی

$$\Phi(x) = E_{\theta}(f(x, \theta))$$

و

$$i: \psi_i(X) = \frac{E_{\theta}(SFD_i(X, \theta))}{E_{\theta}(SRD_i(X, \theta))}$$

E_{θ} امید ریاضی نسبت به بردار تصادفی است، شکل ریاضی مدل بهینه‌سازی سیستم با متغیر تصمیم صحیح X به صورت زیر است:

$$INVOPT = \min (X)$$

$$i: f_i(X) \leq fr_i^{\min}$$

برآوردهای آماری عملکرد و بهبود سیستم. برای برآورد (x) و $i(x)$ در مدل INVOPT از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در این روش به یک نمونه تصادفی مانند:

$$r = \{ (r,1), (r,2), \dots, (r, N_{MC}) \}$$

$$r = 1, 2, \dots, N_R$$

نیاز است که:

N_{MC} اندازه نمونه r ام و (r,i) یک ماتریس با N_T سطر بوده که هر سطر آن یک بردار

تصادفی برای مقداردهی به θ است. برنامه شبیه‌ساز به کمک Γ به تعداد N_{MC} بار و در هر بار برای N_T روز شبکه را بررسی می‌کند و از آن برای برآورد، مطابق فرمول‌های زیر استفاده می‌کند:

$$f^{(r,s)}(x) = f(x, (r,s))$$

$$SFD_i^{(r,s)} = SFD_i(x, (r,s))$$

$$SRD_i^{(r,s)} = SRD_i(x, (r,s))$$

$$r(x) = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{s=1}^{N_{MC}} f^{(r,s)}(x)$$

$$i: \quad r_i(x) = \frac{\sum_{s=1}^{N_{MC}} SFD_i^{(r,s)}(x)}{\sum_{s=1}^{N_{MC}} SFR_i^{(r,s)}(x)}$$

با فرض اینکه X^P یک نقطه شدنی مدل INVOPT باشد که هزینه و نرخ پرسازی آن به‌وسیله نمونه شماره Γ یعنی r برآورد شده است. در بخش بعد الگوریتمی معرفی می‌شود که هدف آن یافتن نقطه شدنی X^{P-1} از روی X^P به‌منظور کاهش هزینه است.

ابتدا فرض می‌شود که آن الگوریتم اجرا شده و نقطه X^{P-1} هزینه و نرخ پرسازی آن به‌وسیله نمونه شماره $\Gamma+1$ برآورد شده، به‌دست‌آمده است.

$$r(x^{P-1}), \quad i: \quad r_i(x^{P-1}) = \min_i fr_i$$

آیا صرف اینکه $r(x^{P-1}), \quad i: \quad r_i(x^{P-1}) = \min_i fr_i$ می‌توان نتیجه گرفت که X^{P-1} شدنی و بهتر از X^P است یعنی:

$$r(x^{P-1}), \quad i: \quad r_i(x^{P-1}) = \min_i fr_i$$

از آنجاکه برای برآورد هزینه سیستم و نرخ پرسازی واحدها با نمونه مواجه بوده و این اختلاف‌ها می‌تواند معنادار نباشد و ناشی از تصادف باشد؛ بنابراین آزمون فرض‌های زیر انجام می‌شود:

$$H_0: \quad i: \quad r_i(x^{P-1}) = \min_i fr_i$$

$$H_1: i_i(X^P) \leq f_i^{\min}$$

9

$$H_0: (X^P) \leq (X^P)$$

$$H_1: (X^P) \leq (X^P)$$

مطابق چو و همکاران (۲۰۱۴) در آزمون فرض اول H_0 زمانی قبول می‌شود که:

$$i_i: i_i(x) \leq f_i^{\min} + dp_i$$

در رابطه اخیر:

$$dp_i = sp_i \cdot t_{\alpha, NMC}$$

α سطح معنی‌داری آزمون و

$$i_i = sp_i \sqrt{\frac{1}{N_R} \left(\frac{r_i(x)}{r_i} \right)^2 + \frac{N_R}{N_R} \left(\frac{r_i'(x)}{r_i} \right)^2}$$

همچنین مطابق چو و همکاران (۲۰۱۴) آماره آزمون فرض دوم به صورت:

$$tf = \frac{r_i(X^P) - r_i(X^P)}{\sqrt{\frac{(sf^{r_i})^2 + (sf^{r_i})^2}{NMC}}}$$

که sf^{r_i} ، sf^{r_i} به ترتیب انحراف معیارهای استاندارد $f^{(r_i,s)}(X^P)$ و $f^{(r_i,s)}(X^P)$ هستند؛ بنابراین H_0 زمانی رد می‌شود که:

$$tf \leq t_{\alpha, 2}(NMC)$$

آزمون مورد استفاده همان آزمون t زوجی در زمانی که واریانس دو جامعه مجهول است است؛ چون برآوردگر (X^P) یک میانگین‌گیری است و مطابق قضیه حد مرکزی با بزرگ‌تر شدن نمونه، توزیع میانگین به سمت توزیع نرمال میل پیدا می‌کند و چون اندازه نمونه در شبیه‌سازی بزرگ انتخاب می‌شود توزیع (X^P) نرمال در نظر گرفته می‌شود. [۱۲].

الگوریتم یافتن نقطه کمینه موضعی. با فرض اینکه X^P یک نقطه شدنی برای مسئله INVOPT باشد؛ در این قسمت الگوریتمی که هدف آن یافتن نقطه شدنی بهتر X^P از روی

$$XP = (X_{1=1}^P, X_1^P, \dots, X_{NF}^P, X_{NF}^P, X_{NF}^P, 1 = Q_1^P, \dots, X_{2NF}^P, Q_{NF}^P)$$

است ارائه می‌شود.

روش کار موضعی‌سازی درجه دوم و موضعی‌سازی خطی i ها پیرامون X^P است.

این موضعی‌سازی‌ها به ترتیب با r_p و $r_{i,p}$ نمایش داده می‌شود:

$$r_p(x) = f_c^P(x) - f_c^P(x^P) + (x - x^P)^T f_a^P(x^P) + \frac{1}{2}(x - x^P)^T f_b^P(x^P)(x - x^P)$$

$$r_{i,p}(x) = f_c^P(x) - f_c^P(x_i^P) + (x - x_i^P)^T f_a^P(x_i^P) + \frac{1}{2}(x - x_i^P)^T f_b^P(x_i^P)(x - x_i^P)$$

$$i: r_{i,p}(x) = (x - x^P)^T h_{a,i}^P + \frac{1}{2}(x - x^P)^T h_{b,i}^P(x - x^P)$$

برای یافتن بردارهای مجهول $f_a^P, f_b^P, h_{a,i}^P, h_{b,i}^P$ روابط بالا از کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای N_f نقطه

$$(x_1^P, x_2^P, \dots, x_{N_f}^P), \dots, (x_1^P, x_2^P, \dots, x_{N_f}^P)$$

$$D = \{X^P, (x_1^P, x_2^P, \dots, x_{N_f}^P)\}$$

$$\{(x_1^P, x_2^P, \dots, x_{N_f}^P)\}$$

استفاده می‌شود که یک مقدار مثبت است که متناسب با ابعاد مسئله انتخاب می‌شود.

ضرایب موضعی‌سازی، حاصل کمینه‌سازی مجموعه‌ات زیر است:

$$x \in D \quad (x - x^P)^T r_p(x)$$

و

$$i: (x - x_i^P)^T r_{i,p}(x)$$

حال نقطه X^P جواب مسئله INVOPT1 زیر خواهد بود.

$$\text{INVOPT1} \min r_p(X)$$

$$(1) \quad i: \quad r_{i,p}^r(X) \quad fr_i^{\min} \quad dp_i$$

$$(2) \quad i: x_i^p \quad x_i \quad x_i^p$$

برای حل هر دو مسئله اخیر از الگوریتم ژنتیک با متغیرهای صحیح استفاده می‌شود. به این منظور به راحتی می‌توان با توجه به ابعاد مسئله برای هر کدام از متغیرها، کران بالایی در نظر گرفت؛ همچنین برای حل 1 INVOPT با الگوریتم ژنتیک، قیود مسئله با ضریب جریمه‌ای (عددی بزرگ مانند M) که در صورت تخلفی دریافت می‌کنند به تابع هدف افزوده می‌شوند و سپس مدل حاصل بهینه می‌شود. با در نظر گرفتن

$$a_i = (fr_i^{\min} \quad dp_i \quad r_{i,p}^r(X))$$

مدل آماده برای اجرای الگوریتم ژنتیک به صورت زیر است:

$$\min \quad r_p^r(X) \quad \frac{1}{2} M \sum_i ((a_i \mid a_i) \mid (a_i \mid a_i))$$

$$i: x_i^p \quad x_i \quad x_i^p$$

مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده مطابق جدول ۲ است:

جدول ۲. مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

اندازه جمعیت	۱۰۰۰
تعداد تکرار	۱۰۰
مکانیزم انتخاب	چرخه رولت
نرخ تقاطع	۹۵٪
نرخ جهش	۵٪

فرم کلی کروموزوم مورد استفاده به صورت زیر است:

R_1	R_2	R_{NF}	Q_1	Q_2	Q_{NF}
-------	-------	-------	----------	-------	-------	-------	----------

ضرایب موضعی سازی، حاصل کمینه‌سازی مجموعه‌های زیر است:

$$x \quad D \quad (x) \quad \frac{r_p^r(x)}{P(x)}^2$$

$$i: \left(\begin{matrix} i(x) \\ x \end{matrix} \quad i_f(x) \right)^T$$

حال نقطه X^P ۱ جواب مسئله INVOPT1 زیر خواهد بود.

$$\text{INVOPT1 } \min r_p(X)$$

$$(1) \quad i: r_{i,p}(X) \quad f_i^{\min} \quad dp_i$$

$$(2) \quad i: x_i^P \quad x_i \quad x_i^P$$

برای حل INVOPT 1 از الگوریتم ژنتیک مقید برای متغیرهای صحیح استفاده می‌شود. در اینجا ذکر چند نکته ضروری است:

۱. در محاسبه ضرایب موضعی‌سازی با توجه به وجود ترم $(X - X^P)$ و $(x_i - x_i^P)^2$ به وضوح:

$$i: h_{a,i}^P \quad r_i(X^P), f_c^P \quad r(X^P)$$

۲. موضعی‌سازی درجه دوم تابع هدف دارای دقت بالاتری نسبت به موضعی‌سازی خطی است؛ چون در حالت خاصی که $f_b^P = 0$ موضعی‌سازی درجه دوم به خطی تبدیل می‌شود.

۳. دلیل اصلی استفاده از موضعی‌سازی این است که

$$i: r_{i,p}(X^P) \quad r_i(X^P), r_p(X^P) \quad r(X^P)$$

و دقت محاسبه در نقاط نزدیک X^P را افزایش می‌دهد. با این رویکرد در نقطه‌ای که موضعی‌سازی پیرامون آن انجام می‌شود، مقدار حاصل از موضعی‌سازی برابر مقدار واقعی است.

۴. از آنجاکه $x_i^P \quad x_i^P \quad x_i^P$ ؛ بنابراین در صورت یافتن نقطه شدنی X^P

همواره $r_p(X^P)$ ؛ یعنی نقطه بهتری حاصل می‌شود؛ البته ممکن است که تفاوت دو مقدار بالا حاصل از شانس باشد و آزمون فرض‌های آماری این بهتر شدن را تأیید نکند.

در صورت پیداشدن نقطه بهتر کاهش داده شده و با در نظر گرفتن مجموعه جدید D الگوریتم از ابتدا آغاز می‌شود.

۵. دلیل افزودن ترم dp_i در قید ۱ مسئله INVOPT 1 اطمینان بیشتری برای قبول فرض شدنی بودن X^P ۱ است.

بعد از محاسبه X^P ۱ و بررسی نتایج آزمون‌های آماری و اطمینان از اینکه X^P ۱ شدنی و

بهتر از X^P است، این بار با موضعی‌سازی پیرامون X^P به X^P می‌رسیم و اگر در مرحله‌ای یکی از آزمون‌های فرض رد شود به بررسی این مطلب پرداخته می‌شود که آیا نقطه‌ای که پیرامون آن موضعی‌سازی انجام شده است یک کمینه موضعی است یا نه؟ مطابق شرایط KKT برای اینکه X^P یک نقطه کمینه موضعی باشد، باید شرایط زیر احراز شود:

$$(۱) \quad (X^P) \quad i \quad i(X^P)$$

$$(۲) \quad i: \quad i(x^P) \quad fr_i^{\min} \quad dp_i) \quad .$$

$$(۳) \quad i: \quad i(x^P) \quad fr_i^{\min} \quad .$$

$$(۴) \quad i: \quad i \quad .$$

مجموعه $\{i: \quad i(x^P) \quad fr_i^{\min} \quad dp_i\}$ I در بردارنده اندیس قیودی است که در جواب X^P فعال هستند. از آنجاکه از تقریب‌های آماری استفاده شده است برای شناسایی این اندیس‌ها آزمون فرض زیر انجام می‌شود:

$$H_0: \quad i: \quad i(x) \quad fr_i^{\min} \quad dp_i$$

$$H_1: \quad i: \quad i(x) \quad fr_i^{\min} \quad dp_i$$

مطابق چو و همکاران () فرض H_0 زمانی قبول می‌شود که:

$$r_i(x) < fr_i^{\min} + \gamma dp_i$$

بدیهی است در شرایط KKT، $i \in I: \quad i \quad .$ در این پژوهش میزان صحت رابطه رگرسیونی ملاکی برای برقراری رابطه ۱ شرایط KKT قرار داده می‌شود:

$$r(x^P) \quad i \quad I \quad r_i(x^P)$$

$$i(x^P) \quad h_{a,i}^P \quad (x^P) \quad f_a^P$$

یادآوری می‌شود که نماد مشتق جهتی یا گرادیان است.

برای سنجش میزان صحت رابطه یادشده از ملاک ضریب تعیین استفاده می‌شود:

$$R^2 \leq \frac{\varepsilon}{(x^P)^T (x^P)}$$

ε جواب بهینه مسئله کمینه‌سازی مقید زیر است یعنی:

$$\varepsilon \min_{i \in I} \left((x^P)_i - i (x^P) \right)^T \left((x^P)_i - i (x^P) \right)$$

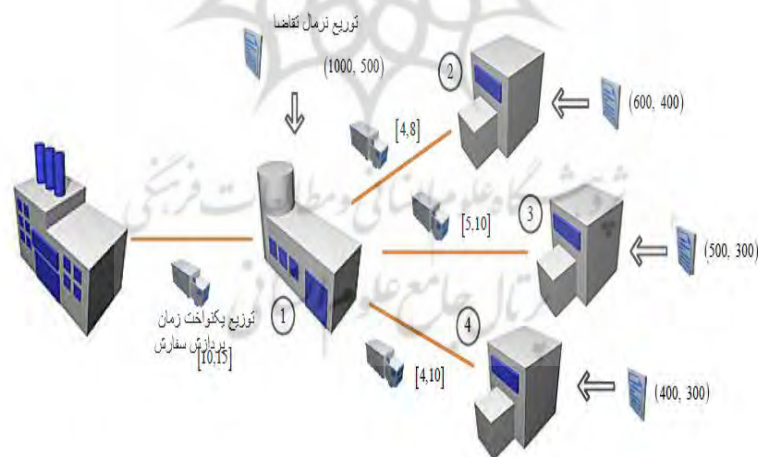
$$i \in I: i \geq 0$$

مسلماً هر چه R^2 به عدد یک نزدیک‌تر باشد، صحت رابطه رگرسیونی بیشتر است. در صورتی که شرایط KKT تأمین نشود، جواب حاضر یک زیرجواب بهینه (بهتر از جواب‌هایی که تاکنون موجود بود) خواهد بود.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

اجرا و مثال عددی روی شبکه کنترل موجودی

شبکه واگرایی دوسطحی. شبکه واگرایی دوسطحی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). در این شبکه تابع چگالی تقاضای مشتریان دارای توزیع نرمال است. مؤلفه اول تقاضا در شکل ۲، میانگین و مؤلفه دوم واریانس توزیع است؛ همچنین تابع چگالی زمان پردازش سفارش‌ها (اعداد روی یال‌ها) برای تمام واحدها از توزیع یکنواخت روی فاصله بیان شده در شکل ۲ پیروی می‌کند.



شکل ۲. نمای سیستم کنترل موجودی دوسطحی

هزینه‌های نگهداری برای تمام واحدها به صورت C_i^H

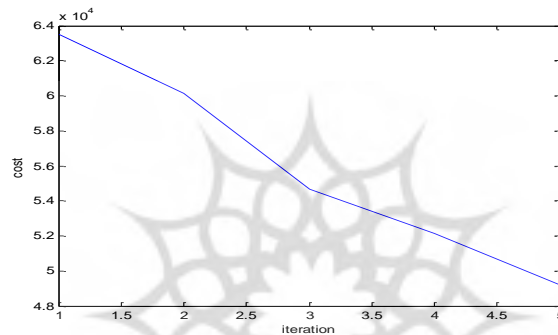
هزینه سفارش واحد اول برابر C_1^R ۱۰۰

هزینه سفارش برای بقیه واحدها C_1^R ۵۰۰

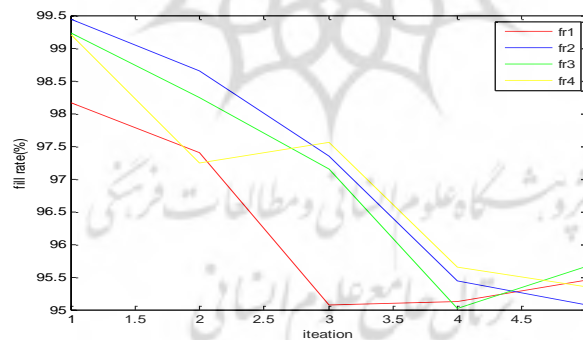
حداقل نرخ پرسازی واحدها ۹۵٪

زمان شبیه‌سازی ۳۶۵ روز و فاصله اطمینان برای برآوردگر هزینه سیستم و نرخ پرسازی ۹۹٪ انتخاب شده است. تعداد اعضای نمونه برای شبیه‌سازی برابر ۱۰۰۰ است.

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی این سیستم به کمک نرم‌افزار متلب صورت گرفت. پس از ۵ مرحله تکرار الگوریتم، نقطه کمینه موضعی حاصل شد. نمودارهای ۲ و ۳ نتایج هزینه سیستم و نرخ پرسازی واحدها در این پنج مرحله را نشان می‌دهد.



نمودار ۲. هزینه‌های سیستم



نمودار ۳. نرخ پرسازی واحدها

جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب جواب‌های آغازین و بهینه موضعی مستخرج شده و هزینه سیستم

و نرخ پرسازی واحدها است؛ همچنین یک فاصله اطمینان 0.99 را می‌توان از طریق افزودن و کاستن میزان انحراف (سطر دوم جدول سوم) از مقدار بهینه (سطر اول جدول سوم) به دست آورد.

جدول ۳. مقایسه جواب آغازین و بهینه موضعی با مدل چو و همکاران (۲۰۱۴).

	نقطه سفارش واحد ۱	نقطه سفارش واحد ۲	نقطه سفارش واحد ۳	نقطه سفارش واحد ۴	مقدار سفارش واحد ۱	مقدار سفارش واحد ۲	مقدار سفارش واحد ۳	مقدار سفارش واحد ۴
جواب آغازین	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۵۰۰۰	۸۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰	۶۰۰۰
جواب بهینه	۳۴۱۲۵	۳۴۵۰	۴۱۲۵	۹۵۲۴	۳۸۷۵۰	۶۳۴۱	۷۱۰۱	۵۵۴۸
جواب بهینه چو و همکاران	۳۲۶۰۶	۳۵۵۶	۳۹۵۶	۹۲۸۹	۳۹۵۴۸	۹۲۸۹	۷۰۲۵	۵۶۵۴

جدول ۴ هزینه سیستم و نرخ پرسازی تسهیل‌ها در جواب نهایی به همراه فاصله اطمینان 99% و مقایسه آن‌ها را با نتایج مدل چو و همکاران (۲۰۱۴) را نشان می‌دهد.

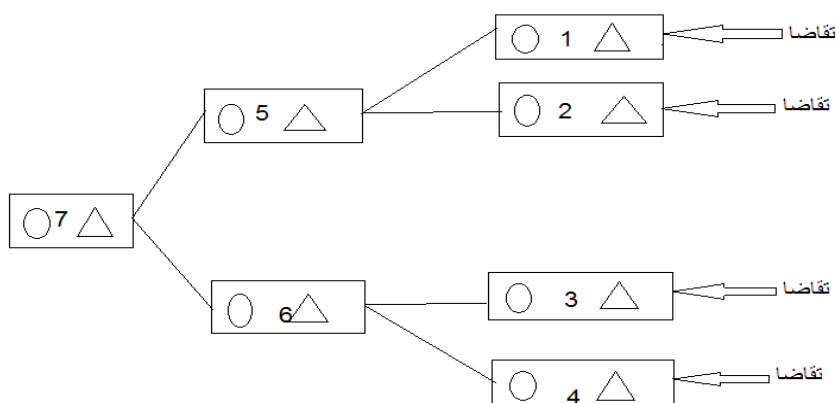
جدول ۴. مقایسه هزینه و نرخ پرسازی در جواب بهینه موضعی با مدل چو و همکاران

	هزینه کنترل موجودی	نرخ پرسازی واحد ۱	نرخ پرسازی واحد ۲	نرخ پرسازی واحد ۳	نرخ پرسازی واحد ۴
مقدار	۵۱۰۰۴	95.02%	95.65%	95.07%	95.45%
99% اطمینان	± 124.5	± 0.14	± 0.12	± 0.15	± 0.14
مقدار با توجه به مدل چو ()	۵۱۲۴۳	95.16%	95.15%	95.16%	95.2%
99% اطمینان	± 108.9	± 0.14	± 0.13	± 0.13	± 0.13

در شبیه‌سازی سیستم کنترل موجودی دوسطحی با مشخصات ذکر شده، الگوریتم چو و همکاران (۲۰۱۴) بعد از ۱۵ تکرار به جواب بهینه موضعی رسید؛ در حالی که همان مفروضات برای سیستم کنترل موجودی و با استفاده از چارچوب این مقاله بعد از تنها پنج مرحله به نقطه بهینه موضعی رسیده و جواب نیز بهبود یافته است.

در بررسی شرایط KKT مقادیر: $\lambda_1 = 1.22$ $\lambda_2 = 0.21$ $\lambda_3 = 0.47$ $\lambda_4 = 5.24$ به همراه ضریب تعیین $R^2 = 0.85$ حاصل شدند. بالا بودن ضریب تعیین معیار مناسبی برای پذیرش کمینه موضعی بودن نقطه پایانی است.

مورد مطالعاتی: فولاد مبارکه اصفهان. مثال بالا برای مقایسه دقت و سرعت الگوریتم ارائه‌شده با الگوریتم چو و همکاران (۲۰۱۴) بود. به‌عنوان یک مثال کاربردی به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کنترل موجودی چندسطحی خط‌نورد سرد «فولاد مبارکه اصفهان» ارائه می‌شود. نمای کلی این سیستم کنترل موجودی سه‌سطحی در شکل ۳ به‌صورت زیر است.



شکل ۳: نمای کلی سیستم کنترل موجودی سه‌سطحی در خط‌نورد سرد «فولاد مبارکه اصفهان».

فعالیت واحدهای این سیستم کنترل موجودی چندسطحی به شرح زیر است:
واحد ۷ واحد تولید کلاف نورد سرد CA1964 است.

واحدهای ۵ و ۶ به ترتیب واحدهای تولید کلاف قلع‌اندود PA500334 و کلاف گالوانیزه PA500333 هستند. واحدهای ۱ و ۲ به ترتیب واحدهای تولید ورق قلع‌اندود PA500549 و PA500552 و واحدهای ۳ و ۴ به ترتیب واحدهای تولید ورق گالوانیزه PA500550 و PA500553 است. بیرونی‌ترین سطح سیستم شامل واحدهای ۱، ۲، ۳ و ۴ پس از جمع‌بندی تعداد سفارش‌ها رسیده در طول دوره تولید فعلی، خود را برای دوره تولید بعدی آماده می‌کنند. از آنجاکه تقریباً هیچ موجودی انباری در این واحدها نگهداری نمی‌شود، کل فرآیند انجام سفارش‌ها باید از طریق تبدیل موجودی خام واحد به محصول نهایی موردطلب مشتری حاصل شود. طول زمان تولید به حجم محصول سفارش‌داده‌شده وابسته بوده و حداقل این زمان (در صورتی که موجودی خام واحد به حد کافی باشد) برای واحدهای ۱، ۲، ۳ و ۴ یک هفته است. در شبیه‌سازی برای سفارش‌هایی که کمتر یا مساوی میانگین واحد هستند، زمان حداقل در نظر گرفته شده و طول زمان لازم برای سفارش‌ها بالاتر از میانگین به نسبت فاصله از میانگین افزایش داده می‌شود. روش عملی مورد استفاده «شرکت فولاد مبارکه» در مورد کنترل موجودی مواد خام هر سطح، سیستم دوره سفارش یک‌هفته‌ای است؛ بنابراین برای هر واحد یک سطح

موجودی مبنا تعریف می‌شود که در فواصل یک‌هفته‌ای موردبازدید قرار گرفته و به اندازه اختلاف سطح زمان بازدید تا سطح مبنا به واحد بالاتر مرتبط، سفارش فرستاده می‌شود. اولین زمان بازدید سطح موجودی شروع اولین هفته تولید است؛ یعنی در شروع دوره تولید با مشخص بودن تقاضای آن دوره، آن را از موجودی انبار کم کرده و به اندازه اختلاف موجودی جدید تا سطح مبنا سفارش می‌دهند. در صورتی که این واحدها نتوانند تقاضا را در زمان مقرری که در شروع دوره تولید برآورد می‌شود، تحویل دهند این تقاضا به صورت معوقه درآمده و در دوره تولید بعدی ابتدا به آن پاسخ داده می‌شود. برای شبیه‌سازی سیستم مطابق داده‌های آماری مستخرج شده، جدول ۵ تقاضا و سطح موجودی مبنا به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۵. تقاضا و سطح موجودی مبنا

واحد	تابع چگالی تقاضا	میانگین (تن)	انحراف معیار استاندارد	سطح موجودی مبنا
۱	نرمال	۲۳۲۴	۱۱۶۲	۴۶۴۸
۲	نرمال	۵۱۴۷	۲۵۷۴	۱۰۲۹۴
۳	نرمال	۶۴۹	۳۲۵	۱۲۹۸
۴	نرمال	۱۴۰۱	۷۰۱	۲۸۰۲

واحدهای ۵ و ۶ پس از جمع‌آوری سفارش‌ها در طول دوره فعلی، خود را برای برنامه‌ریزی دوره تولید بعدی آماده می‌کنند. با فرض اینکه این واحدها نیز موجودی انبار را نگهداری نمی‌کنند، کل فرآیند انجام سفارش‌ها باید از طریق تبدیل موجودی خام واحد به محصول نهایی مورد سفارش واحدهای سطح پایین‌تر حاصل شود. طول زمان تولید به حجم محصول سفارش داده شده وابسته بوده و حداقل این زمان (در صورتی که موجودی خام واحد به حد کافی باشد) برای واحدهای ۵ و ۶ دو هفته است. شبیه‌سازی این زمان برای واحد ۵ به این صورت عمل می‌شود که در سفارش‌هایی که کمتر یا مساوی مجموع میانگین‌های تقاضای واحدهای ۱ و ۲ که ۷۴۷۱ تن در هفته است، زمان حداقل دو هفته‌ای را در نظر گرفته و طول زمان لازم برای سفارش‌ها بالاتر از این مقدار به نسبت فاصله از میانگین افزایش داده می‌شود. مفروضات کاملاً مشابهی در مورد واحد ۶ برقرار است (البته این بار با واحدهای ۳ و ۴ و مجموع میانگین سفارش‌ها برابر ۲۰۵۱ تن در هفته است). سطح مبنای موجودی خام در سیستم مرور دوره‌ای یک‌هفته‌ای این واحدها به ترتیب ۱۵۹۷۳ و ۴۳۶۷ تن است. در صورتی که این واحدها نتوانند تقاضا را در زمان مقرری که در شروع دوره تولید برآورد می‌شود، تحویل دهند این تقاضا به صورت معوقه درآمده و در دوره تولید بعدی ابتدا به آن پاسخ داده می‌شود. واحد ۷ نیز پس از

جمع‌آوری سفارش‌ها در طول دوره فعلی، خود را برای برنامه‌ریزی دوره تولید بعدی آماده می‌کند. از آنجاکه فرض می‌شود این واحد نیز موجودی انبار نگهداری نمی‌کند، کل فرآیند انجام سفارش‌ها باید از طریق تبدیل موجودی خام واحد به محصول نهایی مورد سفارش واحدهای سطح پایین‌تر حاصل شود. طول زمان تولید به حجم محصول سفارش داده شده وابسته بوده و حداقل این زمان سه هفته است. در فرآیند شبیه‌سازی برای شبیه‌سازی سفارش‌هایی که کمتر یا مساوی مجموع میانگین تقاضای واحدهای ۵ و ۶ هستند، زمان حداقل سه هفته‌ای در نظر گرفته و طول زمان لازم برای سفارش‌ها بالاتر از این مقدار به نسبت فاصله از میانگین افزایش داده می‌شود. سطح مبنای موجودی خام در سیستم مرور دوره‌ای یک هفته‌ای این واحد ۲۰۲۹۴ تن است. اگر موجودی به زیر این مقدار برسد، بدون هیچ تأخیر زمانی تأمین موجودی می‌شود. با توجه به حمل درون کارخانه‌ای هزینه حمل و نقل و هزینه کمبود لحاظ نشده است. هزینه‌های تولید و نگهداری واحدهای مختلف در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶ هزینه‌های تولید و نگهداری واحدهای مختلف

واحد	هزینه تولید برحسب دلار در هر تن در هر هفته	هزینه نگهداری برحسب دلار در هر تن در هر هفته
۱	۱۰۰۰	۱۶
۲	۱۰۰۰	۱۶
۳	۱۰۰۰	۱۶
۴	۱۰۰۰	۱۶
۵	۹۰۰	۱۵
۶	۹۰۰	۱۵
۷	۹۰۰	۱۵

فرآیند شبیه‌سازی سیستم با مفروضات ذکر شده برای ۱۰۰ هفته و در ۱۰۰۰ دور شبیه‌سازی انجام شد. حداقل نرخ پرسیازی واحدهای یک تا چهار ۹۵٪ و سطح اطمینان نیز ۹۹٪ اختیار شد. بعد از چهار تکرار نقطه کمینه موضعی حاصل شد. جدول ۷ جواب بهینه موضعی را نشان می‌دهد.

جدول ۷. جواب بهینه موضعی

	سفرش واحد سطح مبنا ۱	سفرش واحد سطح مبنا ۲	سفرش واحد سطح مبنا ۳	سفرش واحد سطح مبنا ۴	سفرش واحد سطح مبنا ۵	سفرش واحد سطح مبنا ۶	سفرش واحد سطح مبنا ۷
جواب آغازین	۴۶۴۸	۱۰۲۹۴	۱۲۹۸	۲۸۰۸	۱۵۹۷۳	۴۳۶۷	۲۰۲۹۴
جواب بهینه	۵۰۴۵	۱۱۱۲۰	۱۰۰۰	۲۰۰۲	۱۷۲۰۰	۳۸۶۷	۱۸۲۹۳

در بررسی شرایط KKT

$$1=6.25 \quad 2=0.54 \quad 3=1.26 \quad 4=0.02 \quad 5=4.68 \quad 6=0.03 \quad 7=10.72$$

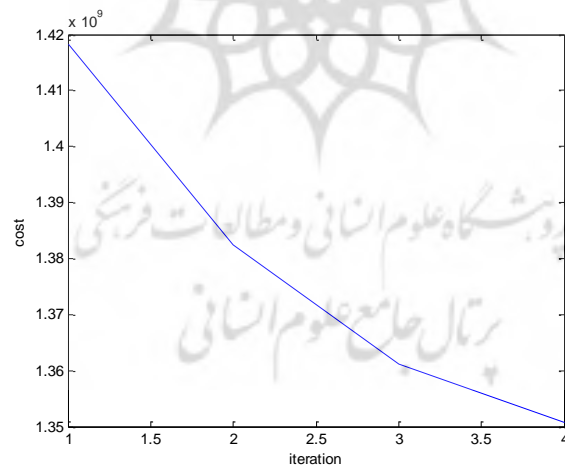
به همراه $R^2 = 0.73$ حاصل شده‌اند.بالا بودن R^2 معیار مناسبی برای پذیرش کمینه موضعی بودن نقطه پایانی است.

جدول ۸ هزینه سیستم و نرخ پرسازی واحدها در جواب بهینه نشان می‌دهد.

جدول ۸. هزینه سیستم و نرخ پرسازی واحدها در جواب بهینه موضعی

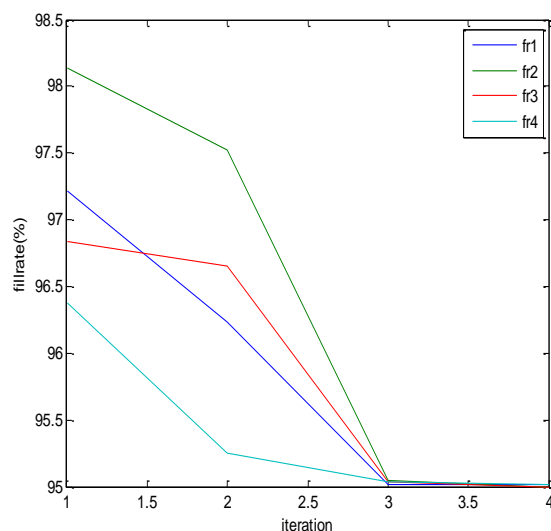
	هزینه کنترل موجودی	نرخ پرسازی واحد ۱	نرخ پرسازی واحد ۲	نرخ پرسازی واحد ۳	نرخ پرسازی واحد ۴
مقدار	۱۳۵۰۶۵/۴۲	%۹۵,۰۲	%۹۵,۰۰	%۹۵,۰۰	%۹۵,۰۱
%۹۹ اطمینان	$\pm ۱۲۲,۲۲$	$\pm ۰,۱۴$	$\pm ۰,۱۰$	$\pm ۰,۱۱$	$\pm ۰,۱۲$

نمودار ۴ روند کاهش هزینه‌های سیستم را نشان می‌دهد.



نمودار ۴. روند کاهش هزینه‌های سیستم

نمودار ۵ روند نرخ پرسازی واحدها در چهار تکرار را نشان می‌دهد.



نمودار ۵. روند نرخ پرسازی واحدها

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به ویژگی‌ها و تمایزات ذکر شده در مقدمه برای چارچوب بهینه‌سازی این مقاله انتظار می‌رفت تفاوت مقدار تابع هدف و مقدار تخمین زده شده آن کمتر از حالت موضعی سازی خطی باشد و از این رو با اطمینان بیشتری می‌توان انتظار داشت نقطه به دست آمده از این الگوریتم، شذنی و بهتر از حالت موضعی سازی خطی باشد و الگوریتم دارای سرعت بالاتری باشد. نتایج شبیه‌سازی مؤید این مطلب هستند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سرعت و دقت چارچوب بهینه‌سازی این پژوهش از چارچوب بهینه‌سازی چو و همکاران () بیشتر است.

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی به صورت زیر ارائه می‌شود:

۱. در شبیه‌سازی به کاررفته به جای یک قلم کالا، چند قلم کالا در نظر گرفته و سیستم کنترل موجودی چند سطحی چند اقلامی را با چارچوب این مقاله بهینه کنند؛
۲. در شبیه‌سازی به کاررفته برای واحدها محدودیت ظرفیت انبار قائل شده و سیستم کنترل موجودی چندسطحی را با چارچوب این پژوهش بهینه کنند؛
۳. در این پژوهش در رأس سیستم، یک کارخانه با سطح موجودی بی‌نهایت فرض شده است. پژوهشگر می‌تواند این شرط را به صورت واقعی‌تری به کار گیرد. سفارش‌های رسیده به کارخانه برای تولید، بسته‌بندی و غیره به زمان نیاز دارند که می‌توان آن را به مدل افزود؛

۴. در برآورد تابع هدف این پژوهش فقط دو هزینه نگهداری و سفارش در نظر گرفته شده که پژوهشگران می‌توانند با افزایش تعداد این هزینه‌ها مدل را کامل‌تر ارزیابی کنند؛
۵. سیاست کنترل موجودی مورد استفاده واحدها سیاست نقطه سفارش مرور دائم است. با تغییر این سیاست به سیاست دوره سفارش می‌توان چارچوب این پژوهش را اجرا کرد؛
۶. موضوعی‌سازی‌های دیگری غیر از چندجمله‌ای‌ها برای تابع هدف و قیود استفاده شده و دقت جواب‌ها بررسی شود؛
۷. الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگری غیر از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و دقت جواب‌ها بررسی شود.



منابع

1. Almeder, C., Preusser, M., & Hartl, R. F. (2009). Simulation and optimization of supply chains: *Alternative or complementary approaches?* *OR Spectrum*, 31, 95-119.
2. Altendorfer, K., Minner, S., (2011). Simultaneous optimization of capacity and planned lead time in a two-stage production system with different customer due dates. *Eur. J. Oper. Res.* 213, 134° 146.
3. Amiri, M., Seif barghy, M., Olfat, L., Razavi Hajiagha, S.H. (2012). "Determination of a desirable inventory policy in a three echelon multilayer supply chain with normal demand. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, 23(1), 65-72.
4. Axsater, S. (2006). *Inventory control*. 2nd edition, New York: Springer.
5. Axsater, S. (1990). Simple Solution Procedure for a Class of Two-Echelon Inventory Problem. *Operations Research*, 38(1), 64-69.
6. Axsater, s. (2002). "Approximate optimization of a two-level distribution inventory system. *International Journal of Production Economics*, 81-82, 545-553.
7. Benton, W.C., Park, Seungwook, 1996. A classification of literature on determining the lot size under quantity discounts. *European Journal of Operational Research* 92(2), 219° 238.
8. Bollapragada, S., Morton, TE. (1993). The periodic review inventory problem with random yield: near-myopic properties, heuristics and testing. WP # 199311, Graduate School of Industrial Administration and The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
9. Cachon, G.P. (2001). Exact Evaluation of Batch-ordering Inventory Policies in Two-Echelon supply chains with Periodic Review. *Operations Research: 49(1)*, 79-98.
10. Chu, Y., You, F., & Wassick, J. M. (2014). Hybrid method integrating agent-based modeling and heuristic tree search for scheduling of complex batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 60, 277-296.
11. Chu, Y., You, F., Wassick, J.M., & Agarwal, A. (2014). Integrated planning and scheduling under production uncertainties: Bi-level model formulation and hybrid solution method. *computers & chemical Engineering*, DOI: 10. 1016 /j. compchemeng. 2014.02.023. With general network structure via agent-based modeling. *AIChE Journal*, 59, 2884-2906.
12. Chu, Y., You, F., wassick, J.M., & Agarwal.A. (2014). Simulation ° based optimization framework for multi ° echelon inventory systems under uncertainty. *Computer & chemical Engineering*, 73, 1-16.
13. Clark, A. J., Scarf, H. (1960). Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. *Management science*, 6(4), 475-490
14. Deuermeyer, B. L., Schwarz, L.B. (1981). A model for the analysis of system service level in warehouse-retailer distribution systems: the identical retailer case. Presented in: Schwarz, L.B. (1981). *Multilevel Production/Inventory Control systems: Theory and Practice*, Elsevier science Ltd.
15. Ehrenberg, C., Zimmermann, J., (2012). Simulation-based optimization in make-to-order production: scheduling for a special-purpose glass manufacturer. In: Laroque, C., Himmelsbach, J., Pasupathy, R., Rose, O., Uhrmacher, A. (Eds.),

- Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, December 2012. IEEE, pp. 1° 12.
16. Fakhrazad, M., & Zare, H. (2009). Combination of genetic algorithm grange multipliers for lot-size determination in multi-stage productioning problems. *Expert Systems with Applications*, 36, 10180° 10187.
17. Gao, J., Wang, w. D. (2008). Simulation-based optimization and its application in multi-echelon network stochastic inventory system. 7th International conference on system simulation and scientific computing, 10-12 October, china, Beijing, 1302-1307.
18. Ghiami, Y., Williams, T., & Wu, Y. (2013). A two-echelon inventory model for a deteriorating item with stock-dependent demand, partial backlogging and capacity constraints. *European Journal of Operational Research*.
19. Gajen, H.G., Tunal Ş., And Jans, R., (2008). A review of applications of genetic algorithms in lot sizing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.21,no.4,pp. 575-590.
20. Graves, S. C. (1985). A Multi-Echelon Inventory Model for a Repairable Item with one-for-one Replenishment. *Management science*, 31(10), 1247-1256.
21. Gumus, A.T., Guneri, A.F. (2007). Multi-echelon inventory management in supply chains with uncertain demand and lead times: literature review from an operational research perspective. *Proceedings - Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(10): 1553-1570
22. Hoque, M.A., Goyal, S.K., (2000). An optimal policy for a single vendor single buyer integrated production inventory system with capacity constraint of the transport equipment. *Inter-national Journal of Production Economics* 65, 305° 315.
23. Ivanov, D., Dolgui, A., & sokolov, B. (2012). Applicability of optimal control theory to adaptive supply chain planning and scheduling. *Annual Reviews in control*, 36, 73-84.
24. Jung, J. Y., Blau, G., Pekny, J. F., Reklaitis, G., & Eversdyk, D. (2008). Integrated safety stock management for multi-stage supply chains under production capacity constraints. *Computers & chemical Engineering*, 32, 2570-2581.
25. Jung, J. Y., Blau, G., Pekny, J. F., Reklaitis, G., V. & Eversdyk, D. (2004). A Simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. *Computers & chemical Engineering*, 28, 2087-2106.
26. Kochel, P., Nielander, U. (2005). Simulation-based optimisation of multi-echelon inventory systems. *International Journal of Production Economics*. 93-94 (1), 505-513.
27. Liao, S.-H., Hsieh, C.-L., & Lin, Y.-S. (2011). A multi-objective evolutionary optimization approach for an integrated location-inventory distribution network problem under vendor-managed inventory systems. *Annals of Operations Rasearch*, 186, 213° 229.
28. Lu, L., (1995). Theory and methodology: A one vendor multibuyer integrated inventory model. *European Journal of Operational Research* 81 (2), 312° 323.
29. Mele, F. D., Guillen, G., Espuna, A., & Puigjaner, L. (2006). A simulation-based optimization framework for parameter optimization of supply-chain networks. *Industrial & Engineering chemistry Research*, 45, 3133- 3178.

30. Melouk, S., Freeman, N., Miller, D., Dunning, M., (2013). Simulation optimization based decision support tool for steel manufacturing. *Int. J. Prod. Econ.* 141 (1), 269° 276.
31. Moin, N.H., Salhi, S., Aziz, N.A.B. (2011). An efficient hybrid genetic algorithm for the multi° product multi° period inventory routing problem. *International Journal of Production Economics* 133, 334° 343.
32. Nachiappan, S., & Jawahar, N. (2007). A genetic algorithm for optimal operating parameters of vmi system in a two-echelon supply chain. *European Journal of Operational Research*, 182, 1433° 145.
33. Nikolopoul, A., & Ierapetritou, M. G. (2012). Hybrid simulation based optimization approach for supply chain management. *Computers & chemical Engineering*, 47, 183-193.
34. Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., & Nia, A. R. (2011). A genetic algorithm for vendor managed inventory control system of multi-product multi-constraint economic order quantity model. *Expert Systems with Applications*, 38, 2708 ° 2716.
35. Perea-Lopez, E., Ydstie, B.E., & Grossmann, I.E. (2003). A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computers & chemical Engineering*, 27, 1201- 1218.
36. Rajendran, C., Daniel, S., (2005). A simulation-based genetic algorithm for inventory optimization in a serial supply chain. *International Transactions in Operational Research*, Vol 12, Issue 1, pages 101° 127.
37. Schwartz, J.D., Wang, W.L. & Rivera, D.E. (2006). Simulation- based optimization of process control policies for inventory management in supply chains. *Automatica*, 42, 1311- 1320.
38. Sherbrook, C.C. (1968). Metric: A Multi- Echelon Technique for Recoverable Item Control. *Operations Research*, 16(1), 122- 141.
39. Silva, C.A., Sousa, J.M.C. Runkler, T.A., & Dacosta, J. (2006). Distributed optimization of a logistic system.
40. Sue-Ann, G., Ponnambalam, S., & Jawahar, N. (2012). Evolutionary algorithms for optimal operating parameters of vendor managed inventory systems in a two-echelon supply chain. *Advances in Engineering Software*, 52, 47 ° 54.
41. Syarif, A., YoungSu, Y. and Gen, M. (2002) Study on Multi-Stage Logistic Chain Network: A Spanning Tree-Based Genetic Algorithm Approach. *Computers and Industrial Engineering*, 43(1-2), 299-314.
42. Wang, W., Fung, R.Y.K., Chai, Y., (2003). Approach of just-in-time distribution requirements planning for supply chain management. *Int. J. of Production Economics*, 91, 101-107.
43. Wang, K., & Wang, Y. (2008). Applying genetic algorithms to optimize the cost of multiple sourcing supply chain systems: An industry case study. *Studies in Computational Intelligence*, 92, 355° 372.
44. Yimer, A. D., & Demirli, K. (2010). A genetic approach to two-phase optimization of dynamic supply chain scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 58, 411° 422.
45. Yokoyama, M. (2002). Integrated optimization of inventory distribution systems by random local search and a genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 42, 172° 188.