

## ارائه مدلی مبتنی بر سناریو برای مدیریت زنجیره تأمین چندمحصولی چندسطحی با تقاضا و مدت زمان انتظار تصادفی

محمدباقر فخرزاد<sup>۱\*</sup>، زهرا سادات حسینی<sup>۲</sup>، جواد حسن پور رودبارکی<sup>۳</sup>

۱. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

۲. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

۳. مربی دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی قوچان

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۶/۰۸/۰۱ تاریخ تصویب: ۹۶/۰۸/۰۲)

### چکیده

در این مقاله، مدل مدیریت زنجیره تأمین چندسطحی و چندمحصولی با استفاده از کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) ارائه می‌شود که می‌تواند زنجیره تأمین را با برنامه‌ریزی عدم قطعیت که از تقاضا و مدت زمان انتظار تصادفی ناشی می‌شود، اداره کند. علاوه بر این، با احتمال ۹۵ درصد سطح خاصی از خدمات را در قالب افق زمانی به مشتری تضمین می‌کند. احتمالی بودن مدت زمان انتظار ممکن است اثر شلاقی را در طول کل زنجیره و کمبودهایی را در سطوح مختلف ایجاد کند. بدین منظور، هزینه مواجهه با کمبود در مدل در نظر گرفته شده است. پس از مدل‌سازی، مسئله در حالت احتمالی حل شده، و برای حل مسائل بزرگ‌تر الگوریتم رقابت استعماری به کار رفته است. براساس نتایج، SCMPC از نظر محاسباتی بسیار کارآمد است و مزیت آن از بهینه‌سازی استوار و تصادفی بیشتر است.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو، چنددوره‌ای، چندمحصولی، کنترل پیش‌گویانه.

### مقدمه

سجادی و داوودپور [۴] مسئله مکان‌یابی تسهیل با محدودیت ظرفیت، چندمحصولی، تک‌دوره‌ای و دوسطحی را در حالت قطعی در نظر گرفتند. لئو و همکاران [۵] پنج قانون را برای تصمیم‌گیری درباره انتقال موجودی مبتنی بر نقشه راه به منظور راهنمایی مدیریت موجودی پیشنهاد دادند. ژو و همکاران [۶] چهارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را با استفاده از سیستم عامل برای حل مسئله چندسطحی موجودی ارائه دادند.

فرمول‌سازی ریاضی مسائل زنجیره تأمین چندسطحی، با چالش‌های عظیمی برای بهینه‌سازی و کنترل همراه است. درحقیقت، این فرمول‌بندی‌ها مبین مسائل بهینه‌سازی در مقیاس وسیع است که از اطلاعات ناقص و عدم قطعیت تأثیر می‌پذیرد. در جدیدترین بررسی پژوهش‌های مکان‌یابی و مدیریت زنجیره تأمین، ملو و همکاران [۷] نشان دادند در بیشتر مطالعات در این زمینه، به مدل‌های قطعی توجه می‌شود و

شبکه توزیع از مسائلی است که در چند دهه اخیر توجه زیادی به آن شده است. روش‌های مدیریت زنجیره تأمین، همچنان در مرکزیت پژوهش‌ها قرار دارد. معاملات در سطوح مختلف در شبکه توزیع اثربخش، باید به گونه‌ای باشد که در آن جریان محصولات از تولیدکننده تا مشتری با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداکثرسازی سود با بیشترین سطح رضایت مشتریان صورت بگیرد. طراحی شبکه زنجیره تأمین عبارت است از برنامه‌ریزی راهبردی این زنجیره که به عوامل زیر مربوط می‌شود [۱]:

تعداد، موقعیت مکانی، ظرفیت تأسیسات و مراکز توزیع، فناوری تولیدی به کاررفته در هریک از تأسیسات، انتخاب عرضه‌کننده، تصمیمات درباره ساختن یا خریدن و طراحی شبکه حمل‌ونقل.

شاپیرو و همکاران [۲]، و افشاری و همکاران [۳] مدلی از مکان‌یابی-موجودی-حمل‌ونقل را مطرح کردند.

برای دوره زمانی ثابت و بهینه‌سازی تصمیمات عملیاتی (تولید، حمل‌ونقل و...) با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، به‌کار گرفته می‌شود. در این رابطه، مشخص است «مدل عدم قطعیت، عموماً عملکرد کنترل پیش‌گویانه مدل MPC را فراتر از رویکرد قطعی، بهبود و توسعه می‌بخشد» (لی و مارلین [۲۳]؛ سوهدی و تنگ [۲۴])؛ زیرا این مدل، اطلاعات مهمی را درمورد تغییرپذیری مقادیر نامعلوم در مقایسه با جایگزینی آن‌ها به‌وسیله ارزش‌های محتمل یا قابل‌انتظار بیان می‌کند. شیلدبیچ و همکاران [۲۵] روش جدیدی را مطرح کردند که عدم قطعیت را در «کنترل پیش‌گویانه مدل MPC» با در نظر گرفتن نمونه سناریوهای عدم قطعیت ارائه می‌دهد. این روش «کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC)» نامیده می‌شود و سطح خاص خدمات مشتری را در پیاده‌سازی افق زمانی‌اش برآورده می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، در بیشتر مقالات تقاضا به‌عنوان پارامتر تصادفی در مسائل در نظر گرفته شده است. در این مقاله مدت‌زمان انتظار به‌صورت پارامتر تصادفی فرض شده است که موجب می‌شود سطوح موجودی در تولیدکنندگان، توزیع‌کننده و خرده‌فروش احتمالی شود. برای کنترل میزان کمبود در زنجیره تأمین هزینه‌های کمبود به تابع هدف اضافه شده است.

در این مقاله، با توسعه مدل شیلدبیچ و همکاران [۲۵] و به‌کاربردن مفهوم سطح اطمینان برای احتمالی‌کردن مدل، سطح اطمینانی برای مدل در نظر گرفته شد که به سطح خدمت به مشتری مربوط است و مدل برنامه‌ریزی شانس محدودیت‌دار نام دارد. از درخت سناریو نیز برای کمک به ایجاد K سناریو و حل مدل استفاده شده است.

این مقاله در بخش اول مقدمه و در قسمت‌های پایانی، خلاصه‌ای برای روش پیشنهادی ارائه می‌کند. در بخش دوم، مثالی از مدل زنجیره تأمین بیان می‌شود که به‌عنوان مطالعه موردی، در سراسر این مقاله در نظر گرفته می‌شود. درحقیقت، روش جدیدی که در بخش ۳ توصیف می‌شود، بسیار جامع است. تا آنجا که می‌توان برای مجموعه وسیعی از مدل‌های متنوع از آن استفاده کرد. به‌منظور شرح ویژگی‌های این روش، بعضی نتایج حاصل از آزمایش‌های عددی در بخش ۴ مطرح شده و در بخش ۵ خلاصه و نتیجه‌گیری مختصری صورت گرفته است.

عدم قطعیت پارامترها در مدل‌هایشان بررسی نمی‌شود. به هر حال، عدم قطعیت یکی از مهم‌ترین مسئله‌ها در SCM است. صابری و همکاران [۸] بیان کردند که به‌دلیل سختی حل مدل‌های SCND تصادفی، پژوهش‌های زیادی انجام نشده است که دربرگیرنده مدل‌های چند سطحی پیچیده و تصادفی باشد. بسیاری از این پژوهش‌ها مدل‌هایی هستند که تقاضا را تصادفی در نظر می‌گیرند.

اسنایدر [۹] روش‌های بهینه‌سازی مسئله‌های مکان‌یابی را مرور کرد. همچنین کلیبی و همکاران [۱۰] مسئله‌های SCND تحت عدم قطعیت و مدل‌های موجود را بررسی کردند.

تسیاکیس و همکاران [۱۱] مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای را برای مسئله طراحی شبکه در ارتباط با زنجیره تأمین چندمحصولی و چندسطحی تحت تقاضای غیرقطعی ایجاد کردند.

هینجوسا و همکاران [۱۲] مسئله مکان‌یابی تسهیلات را به‌همراه در نظر گرفتن موجودی در دوره‌های مختلف، در شرایطی که توانایی باز و بسته‌کردن تسهیلات وجود دارد بیان کردند.

زانگ و وانگ [۱۳] در مقاله خود، مسئله برنامه‌ریزی ظرفیت را تحت شرایط عدم قطعیت بررسی کردند و نتیجه گرفتند تقاضای بازار و هزینه محصول، تصادفی است. در بیشتر مطالعاتی که مدیریت زنجیره تأمین را تحت عدم قطعیت در نظر می‌گیرند، تقاضا به‌عنوان تنها پارامتر تصادفی مدنظر است.

یکی از حوزه‌های جدید در مدیریت زنجیره تأمین، شامل روش‌هایی است که به کنترل مدل پیش‌گویانه مربوط است. برای بررسی اجمالی این مدل می‌توان به اثر ماین و همکاران [۱۴] مراجعه کرد. پژوهشگران زیر مطالعات گوناگونی را در این حوزه برای کاهش هزینه عملیات سیستم موجودی انبار و زنجیره تأمین انجام دادند:

پری‌لوپز و همکاران [۱۵]، فخرزاد و حیدری [۱۶] ساریمویز و همکاران [۱۷] ماستر و همکاران [۱۸] و فخرزاد و همکاران [۱۹].

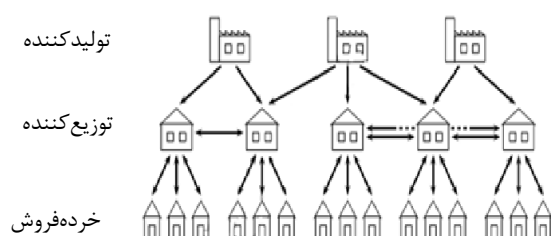
الگوریتم‌های مبتنی بر کنترل پیش‌گویانه مدل MPC، برای کنترل موجودی انبار در داروخانه‌ها (جورادو و همکاران [۲۰])، صنعت نیمه‌هادی (ونگ و همکاران [۲۱]) و شبکه‌های آب آشامیدنی (گروسو و همکاران [۲۲]) به‌صورت موفقیت‌آمیزی اجرا شده است. مدل MPC، به‌منظور پیش‌بینی وضعیت سیستم (موجودی انبار، سطح خدمات و...)

### ساختار جدید

فعالیت خود را انجام می‌دهد، بسیار طولانی در نظر گرفته می‌شود که از بازه برنامه‌ریزی منطقی بسیار طولانی‌تر است. به همین منظور، در ادامه روش مناسبی برای افق تصمیم‌گیری ارائه شده است.

### ساختار مدل

مدل زنجیره تأمین، دارای سه سطح زنجیره، تأمین و امکانات متعدد برای هر مرحله است. اولین سطح، شامل  $L = 3$  تولیدکننده، محصول  $L \in \{1, \dots, L\}$  دومین سطح، شامل  $M = 5$  انبار یا مراکز توزیع  $m \in M\{1, \dots, M\}$  و سومین سطح، شامل  $N = 15$  مشتری یا خرده‌فروشی  $n \in N\{1, \dots, N\}$  است.



شکل ۱. طرح کلی مثالی از مدل زنجیره تأمین

این مدل، شامل  $J=2$  کالا است و در آن،  $I=3$  امکانات تولید محصول،  $M=5$  انبار و  $N=15$  خرده‌فروشی وجود دارد. فلش‌های موجود در این مدل، مسیرهای حمل‌ونقل در دسترس را نشان می‌دهد.

محصولات ممکن است در طول مسیرهایی که از قبل تعریف شده‌اند، انتقال یابند. با توجه به فلش‌ها در شکل ۱، این مسیرها می‌توانند با تغییر زمان تغییر کنند، اما این فرض وجود دارد که دائمی هستند. در این حوزه، انتقالات اصلی رو به پایین با احتمالات مضاعف، برای توزیع مجدد محصولات از سطح خرده‌فروشان به سطح انبارها در نظر گرفته می‌شود. برای راحتی نوشتار، مجموعه مسیرها به‌عنوان زیرمجموعه‌های سلسله‌مراتب چندتایی مبدأ و مقصد هدف تعریف، و مجموعه مسیرهای انتقال به‌عنوان معرفی  $S := S_{im} \cup S_{mm} \cup S_{mn} \cup S_{nm}$  می‌شوند.  $S_{im} \subseteq L \times M$ ,  $S_{mm} \subseteq M \times M$ ,  $S_{mn} \subseteq M \times N$ ,  $S_{nm} \subseteq N \times M$

اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مورد استفاده برای مدل کردن این مسئله در ادامه بیان شده است:

این پژوهش، رویکرد جدید متمرکزی را برای مدیریت زنجیره تأمین چندسطحی ارائه می‌دهد که می‌توان از آن برای تنوع وسیعی از مدل‌های متفاوت زنجیره تأمین استفاده کرد. این روش، براساس نتایج اخیر «کمپی و گراتی [۲۶]» درباره رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو (رویکرد سناریو) و اثر «شیلدیچ و همکاران [۲۵]، [۲۷]» در مورد کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) صورت گرفته است.

کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC)، بارها مسئله برنامه‌ریزی بهینه را در افق زمانی محدود حل کرده است. SCMPC محدودیت‌های ظرفیت را مانند سطوح مشخص خدمات مشتری حفظ می‌کند و در آن، تقاضای مشتریان با موجودی در دسترس برآورده می‌شود (بیتران و یاناس [۲۸]؛ بوکیندر و تن [۲۹]).

در این مدل هم‌زمان، هزینه‌های عملیاتی بلندمدت در حداقل‌ترین حالت خود نگه داشته می‌شود. از سوی دیگر، زنجیره‌های تأمین با عدم قطعیت‌های مختلف (به‌عنوان مثال عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا، بازده تولید، موجودی‌های فاسدشدنی، قیمت و...) در طول افق زمانی اداره می‌شود (اک و گوپالاکریشن [۳۰]) و می‌تواند شامل تخمین‌ها و پیش‌بینی‌هایی در مورد این عدم قطعیت‌ها باشد. کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC)، بر مبنای تعداد مشخص ( $k$ ) سناریو نمونه تصمیم‌گیری می‌کند. از آنجا که سناریوها، تصادفی نمونه‌برداری می‌شوند، SCMPC الگوریتمی تصادفی به‌شمار می‌آید. البته بعد از این تصادفی‌سازی، مسائل بهینه‌سازی به مسائلی قطعی و ثابت مبدل می‌شوند.

مزیت اساسی این روند، کارایی محاسباتی است که در آن SCMPC می‌تواند مسائل با مقیاس مشابه را مانند آن‌هایی که با استفاده از الگوریتم‌های قطعی حل می‌شوند، اداره کند.

### مدل زنجیره تأمین

شیلدیچ و همکاران [۲۵] و شیلدیچ و همکاران [۲۷] روش کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) را که در این پژوهش ارائه شده است مطرح کرده‌اند. در اینجا، مطالعه موردی واقعی برای اهداف مورد نظر که با مدل قطعی «پراپوز و همکاران [۱۵]» قابل‌مقایسه است معرفی، و ساختار اساسی آن در شکل ۱ شرح داده شده است. دوره زمانی  $T$  که در طول آن، سیستم

## اندیس‌ها

$N$ : مجموعه اندیس خرده‌فروشان  $n \in N$   
 $M$ : مجموعه اندیس انبارها  $m \in M$   
 $L$ : مجموعه اندیس کارخانه‌ها  $l \in L$   
 $J$ : مجموعه اندیس محصول‌ها  $j \in J$   
 $S$ : مجموعه اندیس محصول‌ها  $s \in S$

## پارامترها

$\gamma_{tjl}$ : هزینه تولید محصول  $j$  در کارخانه  $l$  در زمان  $t$ ؛  
 $C_l$ : ظرفیت تولیدی از سوی کارخانه  $l$ ؛  
 $C_{jl}$ : ظرفیت تولید محصول  $j$  از جانب کارخانه  $l$ ؛  
 $\sigma_{tjs}$ : هزینه ارسال محصول  $j$  از طریق مسیر  $s$  در زمان  $t$ ؛  
 $P_l$ : ظرفیت ذخیره‌سازی در کارخانه تولیدی  $l$ ؛  
 $W_m$ : ظرفیت ذخیره‌سازی در انبار  $m$ ؛  
 $R_n$ : ظرفیت ذخیره‌سازی در خرده‌فروش  $n$ ؛  
 $p_{jl}$ : ضریب ذخیره‌سازی محصول  $j$  در کارخانه تولیدی  $l$ ؛  
 $w_{jm}$ : ضریب ذخیره‌سازی تولید محصول  $j$  در انبار  $m$ ؛  
 $r_{jn}$ : ضریب ذخیره‌سازی برای محصول  $j$  در خرده‌فروش  $n$ ؛  
 $\theta_{jl}$ : هزینه ذخیره‌سازی برای محصول  $j$  به‌وسیله کارخانه  $l$ ؛  
 $\omega_{jm}$ : هزینه ذخیره‌سازی برای محصول  $j$  توسط انبار  $m$ ؛  
 $\rho_{jn}$ : هزینه ذخیره‌سازی برای محصول  $j$  از جانب خرده‌فروش  $n$ ؛  
 $\varphi_{jl}$ : هزینه مواجهه با کمبود برای تولید محصول  $j$  به‌وسیله کارخانه  $l$ ؛  
 $\delta_{jm}$ : هزینه مواجهه با کمبود برای محصول  $j$  توسط انبار  $m$ ؛  
 $\theta_{jn}$ : هزینه مواجهه با کمبود برای محصول  $j$  از سوی خرده‌فروش.

## متغیرهای تصمیم

$\nu_{tjl}$ : تصمیمات مرتبط با میزان تولید محصول  $j$  توسط کارخانه  $l$  در زمان  $t$ ؛  
 $x_{tjs}$ : تصمیمات مرتبط با میزان ارسال محصول  $j$  به‌وسیله مسیر  $s$  در زمان  $t$ ؛

$I_{tjl}$ : سطح موجودی از محصول  $j$  در کارخانه  $l$  در زمان  $t$ ؛  
 $I_{tjm}$ : سطح موجودی از محصول  $j$  در انبار  $m$  در زمان  $t$ ؛  
 $I_{tjn}$ : سطح موجودی از محصول  $j$  در خرده‌فروش  $n$  در زمان  $t$ ؛  
 $B_{tjl}$ : میزان کمبود از محصول  $j$  در کارخانه  $l$  در زمان  $t$ ؛  
 $B_{tjm}$ : میزان کمبود از محصول  $j$  در انبار  $m$  در زمان  $t$ ؛  
 $B_{tjn}$ : میزان کمبود از محصول  $j$  در خرده‌فروش  $n$  در زمان  $t$ .  
انتقالات  $x_{tjs}$  به مقصدشان ( $S_2$ )، بعد از مدت‌زمان انتظار  $\lambda_{ts}$  از طریق مسیر  $s \in S$  صورت می‌گیرد. تولیدات  $y_{tjl}$  زمان انجام فرایند تولید  $\lambda_t$  در  $l \in L$  دارند. به‌علاوه، برنامه تولید باید از قبل در قالب مراحل زمانی  $T_{prod}$  تعیین شود. پس از انتقالات برای دوره زمانی  $t \in T$ ، انتقالات و مقادیر تولیدشده، از دوره‌های پیشین حاصل می‌شود، سپس مقادیر تقاضای  $d_{tjn}$  برای محصول  $j \in J$  در خرده‌فروشی  $n \in N$  قابل مشاهده خواهد بود.

## هدف و محدودیت‌ها

سیستم زنجیره تأمین برای مدیریت باید در طول افق زمانی  $t \in \{1, \dots, T\}$  در حالت قطعی به‌صورت زیر مدل شود. در این مدل معادله ۱ نشان‌دهنده تابع هدف، و عبارت است از کمینه‌کردن هزینه‌های کل شبکه. عبارت اول شامل هزینه‌های تولید، عبارت دوم دربردارنده هزینه‌های ارسال و عبارت سوم شامل هزینه‌های نگهداری است. محدودیت‌های ۲، ۳ و ۴، نشان‌دهنده سطح موجودی در سطح تولیدکننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش است و محدودیت ۵ بیانگر ظرفیت تولید کارخانه‌هاست. محدودیت‌های ۶، ۷ و ۸ نشان‌دهنده محدودیت ذخیره‌سازی موجودی در سطح کارخانه، انبار و خرده‌فروش است. محدودیت ۹، نامنفی بودن متغیرها را در نظر می‌گیرد. محدودیت ۱۰، نشان‌دهنده این است که متوسط تعداد دوره‌هایی که کمبود وجود دارد، باید از سطح خدمت تعریف‌شده کمتر باشد.

$$\min z = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \gamma_{tjl} y_{tjl} + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sigma_{tjs} x_{tjs} + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} (\sum_{jl} \theta_{jl} I_{tjl} + \sum_{m \in M} \omega_{jm} I_{tjm} + \sum_{n \in N} \rho_{jn} I_{tjn}) \quad (1)$$

s.t.

$$I_{tjl} = I_{t-1,jl} - \sum_{s \in S, s_l=l} x_{tjs} + y_{t-\lambda_t,jl} \quad \forall l \in L \quad (2)$$

$$I_{tjm} = I_{t-1,jm} - \sum_{s \in S, s_l=m} x_{tjs} + \sum_{s \in S, s_l=m} x_{t-\lambda_t,s,j} \quad \forall m \in M \quad (3)$$

$$I_{ijn} = I_{t-1, jn} - \sum_{s \in S, s_t = n} x_{ijs} + \sum_{s \in S, s_t = n} x_{t-\lambda_{i,s}, js} - d_{ijn} \quad \forall n \in M \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} C_j y_{ijl} \leq C_l \quad \forall l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} p_j I_{ijl} \leq P_l \quad \forall l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} w_j I_{ijm} \leq W_m \quad \forall m \in M \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} r_j I_{ijn} \leq R_n \quad \forall n \in N \quad (8)$$

$$y_{ijl} \geq 0, \quad x_{ijs} \geq 0, \quad I_{ijl} \geq 0, \quad I_{ijm} \geq 0 \quad (9)$$

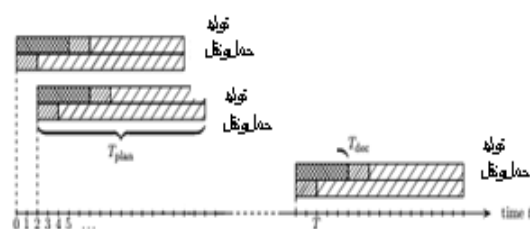
برای همه محدودیت‌ها به ازای  $\forall t \in T$  و  $\forall j \in J$

$$\frac{1}{T} \sum_{t \in T} (I_{ijn} < 0) \leq \varepsilon_{jn} \quad \forall n \in N, \forall j \in J \quad (10)$$

در این مدل، معادله ۱۱ نشان‌دهنده تابع هدف، و عبارت است از کمینه‌کردن هزینه‌های کل شبکه در حالت احتمالی که عبارت اول شامل هزینه‌های تولید، عبارت دوم دربردارنده هزینه‌های ارسال، عبارت سوم شامل هزینه‌های نگهداری در شرایط احتمالی و عبارت چهارم دارنده هزینه‌های کمبود در شرایط احتمالی است. محدودیت‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان‌دهنده سطح موجودی تحت سناریوهای مختلف در سطح تولیدکننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروش است. محدودیت ۱۵ ظرفیت تولید کارخانه‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشانگر محدودیت ذخیره‌سازی تحت سناریوهای مختلف در هریک از سطوح زنجیره است. محدودیت ۱۹ بیانگر نامنفی بودن متغیرهاست. محدودیت ۲۰ نشان‌دهنده این است که در  $(1 - \alpha)$  درصد از مواقع متوسط، تعداد دوره‌هایی که با کمبود مواجه می‌شود باید از سطح خدمت تعریف‌شده کمتر باشد. در این مطالعه موردی، سناریوهای تقاضای  $d_{t+\tau/tjn}^{(K)}$  و  $\lambda_{t,s}^{(K)}$  به ایجاد سطوح موجودی تحت سناریوهای مختلف برای  $I_{t+\tau/tjm}^{(K)}$ ،  $I_{t+\tau/tjl}^{(K)}$ ،  $B_{t+\tau/tjm}^{(K)}$ ،  $B_{t+\tau/tjl}^{(K)}$  و سطوح مختلف کمبود  $I_{t+\tau/tjn}^{(K)}$  در طول زنجیره منجر می‌شوند. سناریوی مجازی  $K + 1$  که در آن همه تقاضا  $d_{t+\tau/tjn}^{(K)}$  صفر است، می‌تواند برای تضمین قاطع برآورده‌سازی محدودیت‌های ظرفیت ذخیره‌سازی خرده‌فروشی معرفی شود.

#### کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو

سیاست کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC)، زنجیره تأمین را در چارچوب برنامه‌ریزی افق زمانی اجرا می‌کند (شکل ۲). علاوه بر بازه برنامه‌ریزی  $T_{prod}$ ، سیاست کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC)، شامل بازه تصمیم  $T_{dec} \ll T_{plan}$  (اغلب  $T_{dec} = 1$ ) و برنامه تولیدی ثابت  $T_{prod} \ll T_{plan}$  است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نوار پایین، نمایانگر تصمیمات ارسال کالا، و نوار بالا نمایانگر تصمیمات تولید است. مناطق هاشورزده متقاطع نشان می‌دهد برنامه تولید ثابت (در دوره  $T_{prod}$ ) شده است. کل تصمیمات در مناطق هاشورزده برای اهداف برنامه‌ریزی شده (در طول بازه برنامه‌ریزی  $T_{plan}$ ) محاسبه می‌شود و در مناطقی که متراکم‌تر هاشور خوردند (در طول بازه تصمیم  $T_{dec}$ ) اجرا می‌شود.



شکل ۲. کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو.

برنامه سناریو افق زمانی متناظر (RHSCP) در قالب زیر بیان می‌شود.

$$minz = \frac{1}{K} \sum_{k \in K} \left[ \sum_{\tau=1}^{T_{prod}} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} \gamma_{t+\tau, jl} y_{t+\tau, jl} + \sum_{\tau=1}^{T_{prod}} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sigma_{t+\tau, js} x_{t+\tau, js} + \sum_{\tau=1}^{T_{prod}} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} (\sum \varnothing_{jl} I_{t+\tau/tjl}^{(K)} \right. \tag{11}$$

$$\left. + \sum_{m \in M} \omega_{jm} I_{t+\tau/tjm}^{(K)} \sum_{n \in N} \rho_{jn} I_{t+\tau/tjn}^{(K)} + \sum_{\tau=1}^{T_{prod}} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} (\sum \varphi_{jl} B_{t+\tau/tjl}^{(K)} + \sum_{m \in M} \delta_{jm} B_{t+\tau/tjm}^{(K)} + \sum_{n \in N} \vartheta_{jn} B_{t+\tau/tjn}^{(K)}) \right] \tag{11}$$

$$I_{t+\tau/tjl}^{(K)} - B_{t+\tau/tjl}^{(K)} = I_{t+\tau/t-\lambda, jl}^{(K)} - \sum_{s \in S, s_l=l} x_{t+\tau/tjs} + y_{t+\tau/t-\lambda_s^{(K)}, jl} \quad \forall l \in L \tag{12}$$

$$I_{t+\tau/tjm}^{(K)} - B_{t+\tau/tjm}^{(K)} = I_{t+\tau/t-\lambda, jm}^{(K)} - \sum_{s \in S, s_j=m} x_{t+\tau/tjs} + \sum_{s \in S, s_j=m} x_{t+\tau/t-\lambda_s^{(K)}, js} \quad \forall m \in M \tag{13}$$

$$I_{t+\tau/tjn}^{(K)} - B_{t+\tau/tjn}^{(K)} = I_{t+\tau/t-\lambda, jn}^{(K)} - \sum_{s \in S, s_j=n} x_{t+\tau/tjs} + \sum_{s \in S, s_j=n} x_{t+\tau/t-\lambda_s^{(K)}, js} - d_{t+\tau/tjn}^{(K)} \quad \forall n \in N \tag{14}$$

$$\sum_{j \in J} C_j y_{t+\tau/tjl} \leq C_l \quad \forall l \in L \tag{15}$$

$$\sum_{j \in J} P_j I_{t+\tau/tjl}^{(K)} \leq P_l \quad \forall l \in L \tag{16}$$

$$\sum_{j \in J} W_j I_{t+\tau/tjm}^{(K)} \leq W_m \quad \forall m \in M \tag{17}$$

$$\sum_{j \in J} r_j I_{t+\tau/tjn}^{(K)} \leq R_n \quad \forall n \in N \tag{18}$$

$$y_{t+\tau/tjl} \geq 0, \quad x_{t+\tau/tjs} \geq 0, \quad I_{t+\tau/tjl}^{(K)} \geq 0, \quad I_{t+\tau/tjm}^{(K)} \geq 0, \quad I_{t+\tau/tjn}^{(K)} \geq 0, \quad B_{t+\tau/tjl}^{(K)} \geq 0, \quad B_{t+\tau/tjm}^{(K)} \geq 0, \quad B_{t+\tau/tjn}^{(K)} \geq 0. \tag{19}$$

$\forall j \in J$  و  $\forall t \in T$  برای همه محدودیت‌ها به ازای

$$\left( \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^{T_{prod}} (B_{t+\tau/tjn}^{(K)} > 0) \leq \varepsilon_{jn} \right) \geq 1 - \alpha \quad \forall n \in N, \forall j \in J \tag{20}$$

اگر تمامی متغیرهای عدم قطعیت شناخته شده و ثابت باشند، نتایج مسائل بهینه‌سازی محدب شود.

۲. برنامه سناریو افق زمانی متناظر (RHSCP) همچنان به‌عنوان برنامه بهینه‌سازی امکان‌پذیر در هر مرحله تصمیم‌گیری  $t := (i - 1)T_{desc}, i \in \{1, 2, \dots\}$  باقی می‌ماند (شیلدبیچ و همکاران، ۲۰۱۴).

۳. در برنامه سناریو، شبه‌فضا نامحدود باقی مانده است.  
۴. در برنامه سناریوی افق زمانی SCMPC کران پایین  $K$  که برای محدودیت سطح خدمات مورد نیاز است، با فرمول زیر ارائه شده است [۱۹]:

$$\frac{1}{K+1} \leq \varepsilon \Leftrightarrow K \geq \frac{1}{\varepsilon} - 1 \tag{21}$$

۵. در حالت کلی، سطوح خدمات  $\varepsilon_{jn} \in (0, 1)$  ممکن است به‌تنهایی برای هر محصول  $j \in J$  و خرده‌فروشی  $n \in N$  انتخاب شود. سپس انتخاب اندازه هر نمونه  $K_{jn}$  باید براساس سطوح خدمات صورت

الگوریتم کلی کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC)، می‌تواند به شکل زیر خلاصه شود:

برای هر مرحله تصمیم  $t = (i - 1)T_{desc}$  در جایی که  $i \in \{1, 2, \dots\}$  برقرار است، گام‌های زیر را اجرا کنید:  
۱. استخراج  $K$  سناریو عدم اطمینان، در طول بازه برنامه‌ریزی؛

۲. این سناریوها را در برنامه سناریوی افق زمانی متناظر (RHSCP) جایگزین کنید و پاسخگوی تصمیمات انتقال بهینه  $x_{t+\tau/tjs}$  در جایی که  $\tau \in \{1, \dots, T_{plan}\}$  برقرار است و تصمیمات تولید  $y_{t+\tau/tjl}$  در جایی که  $\tau = T_{plan} + 1, \dots, T_{plan}$  برقرار است، باشید.

فرضیات در برنامه سناریوی افق زمانی SCMPC به شرح زیر است:

۱. عدم قطعیت‌های موجود در فرمول‌سازی مدل روش کنترل پیش‌گویانه مدل SCM، باید به‌گونه‌ای باشد که

### تخصیص مستعمره‌ها به استعمارگران

برای شروع الگوریتم، تعداد  $N_{country}$  کشور اولیه را ایجاد، و  $N_{imp}$  تعداد از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) را به‌عنوان امپریالیست انتخاب می‌کنیم. باقیمانده  $N_{col}$  تعداد از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هرکدام به یک امپراتوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه میان امپریالیست‌ها، به هر امپریالیست تعدادی از مستعمرات را که این متناسب با قدرت آن است می‌دهیم. برای انجام این کار، با داشتن هزینه همه امپریالیست‌ها، هزینه نرمالیزه آن‌ها را به‌صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$C_n = \max\{c_i\} - c_n$$

با داشتن هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه هر امپریالیست به‌صورت زیر محاسبه شده است و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره میان امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند.

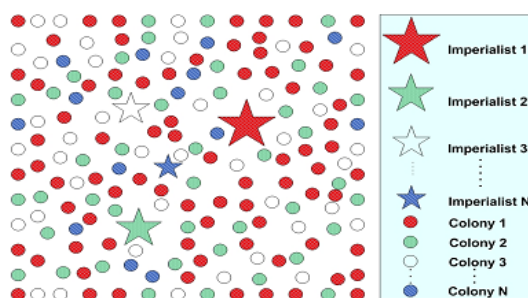
$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_n} \right|$$

از دیدگاهی دیگر، قدرت نرمالیزه شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که آن امپریالیست اداره می‌کند؛ بنابراین تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست با

$$N.C_n = \text{round}\{P_n.(N_{col})\}$$

برابر خواهد بود.

شکل ۳، چگونگی شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه را نشان می‌دهد. بر این اساس، امپراتوری‌های بزرگ‌تر مستعمره‌های بیشتری دارند. در این شکل، استعمارگر ۱ قوی‌ترین امپراتوری را ایجاد کرده است و بیشترین مستعمرات را دارد.



شکل ۳. نمایشی از شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه

بگیرد (شیلدینگ و همکاران [۲۱]). از این پس، سطح خدمات  $\varepsilon_{jn} = \varepsilon$  برای تمام  $n \in N$  و  $j \in J$  در این پژوهش، فرض شده است.

### الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

آتش‌باز گرگری و لوکاس [۳۱] الگوریتم رقابت استعماری (ICA) را مطرح کردند. این الگوریتم با جمعیت اولیه‌ای شروع می‌شود و به هر عضو واژه «کشور» اطلاق می‌شود. این الگوریتم از فرایندی اجتماعی-سیاسی به نام رقابت امپریالیستی تبعیت می‌کند. در این میان، کشورها به دو گروه مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند.

درواقع، کشورهای برتر (کشورهایی با حداقل تابع هدف در مسائل کمینه‌سازی و حداکثر تابع هدف در مسائل بیشینه‌سازی) به‌عنوان «استعمارگر» و سایر کشورها به‌عنوان «مستعمره» انتخاب می‌شوند. هر استعمارگر مطابق با مقدار قدرتش، تعدادی از مستعمره‌ها را به سلطه خود درمی‌آورد و به این ترتیب مجموعه یک استعمارگر با مستعمره‌هایش «امپراتوری» را تشکیل می‌دهند. قدرت هر امپراتوری مجموع قدرت استعمارگر و درصدی از متوسط قدرت مستعمره‌های آن است. رقابت استعماری به این صورت است که مستعمره‌های هر امپراتوری به سمت استعمارگر خود حرکت می‌کنند و استعمارگران نیز سعی دارند تعداد مستعمره‌های خود را افزایش دهند. در نتیجه با گذشت زمان امپراتوری ضعیف‌تر سقوط می‌کند و در انتها یک امپراتوری باقی می‌ماند.

### تولید کشورهای اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن جواب بهینه برحسب متغیرهای مسئله است. در این حالت آرایه‌ای از متغیرهای مسئله که باید بهینه شوند، ایجاد می‌شود. در الگوریتم ژنتیک، این آرایه کروموزوم، و در الگوریتم رقابت استعماری کشور نام دارد. در مسئله بهینه‌سازی  $N_{var}$  بعدی، یک کشور، آرایه  $1 \times N_{var}$  است که این آرایه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{کشورها} = [P_1, P_2, \dots, P_{N_{var}}]$$

$P_i$  نمایانگر متغیری است که ویژگی اجتماعی-سیاسی آن کشور مانند فرهنگ، زبان، ساختار اقتصادی و... را نشان می‌دهد.

درصدی از قدرت کل مستعمرات آن برابر است. بدین ترتیب برای هزینه کل یک امپراتوری داریم.

$$T.C_n = (Cost(imperialist_n) + \xi \text{ mean} \\ \{Cost(colonies \text{ of } empire_n)\})(QE_n)$$

که در آن  $T.C_n$  هزینه کل امپراتوری  $n$ ام و  $\xi$  عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک، و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که  $\xi = 0.05$  در بیشتر پیاده‌سازی‌ها به جواب‌های مطلوبی منجر شده است.

### رقابت استعماری

با توجه به الگوریتم استعماری، هر امپراتوری‌ای که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، به تدریج در جریان رقابت‌های امپریالیستی حذف خواهد شد. بدین ترتیب، در تکرار الگوریتم، یک یا چند مورد از ضعیف‌ترین مستعمرات ضعیف‌ترین امپراتوری را دربردارند که برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی میان تمام امپراتورها ایجاد می‌شود. با توجه به هزینه کل هر امپراتوری، محاسبه هزینه کل نرمالیزه امپراتوری همانند هزینه کل استعمارگر است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N.T.C_n = \max\{T.c_i\} - T.c_n$$

قدرت هر امپراتوری بعد از هزینه نرمالیزه شده از رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$P_n = \left| \frac{N.T.C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C_i} \right|$$

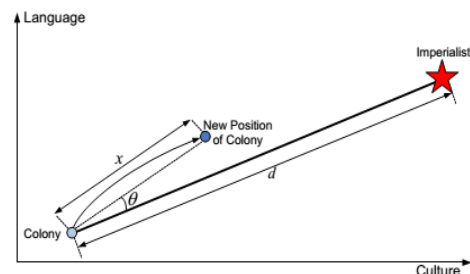
با داشتن احتمال تصاحب هر امپراتوری، مکانیسمی مانند چرخه رولت در الگوریتم ژنتیک مورد نیاز است تا مستعمره مورد رقابت را با احتمال متناسب با قدرت امپراتوری‌ها در اختیار یکی از آن‌ها قرار دهد. شمای کلی رقابت استعماری در شکل ۵ نشان داده شده است.

### سقوط امپراتوری‌های ضعیف

در جریان رقابت‌های امپریالیستی، خواه‌ناخواه امپراتوری‌های ضعیف به تدریج سقوط می‌کنند و مستعمرات آن‌ها به دست امپراتوری‌های قوی‌تر می‌افتد. برای سقوط یک امپراتوری می‌توان شروط متفاوتی را در نظر گرفت. در الگوریتم استعماری، یک امپراتوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد.

### حرکت مستعمرات امپراتوری به سمت استعمارگرشان (هماندسازی)

با در نظر گرفتن شیوه نمایش یک کشور در حل مسئله بهینه‌سازی، این حکومت مرکزی با اعمال سیاست جذب سعی داشت کشور مستعمره را در راستای ابعاد مختلف اجتماعی-سیاسی به خود نزدیک کند. در عمل، به جای حرکت به اندازه  $x$  به سمت کشور استعمارگر و در جهت بردار واصل مستعمره به استعمارگر به همان میزان، اما با انحراف  $\theta$  در مسیر به حرکت خود ادامه می‌دهیم.  $\theta$  را به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت در نظر می‌گیریم (هر توزیع دلخواه و مناسب دیگر را نیز می‌توان استفاده کرد).



شکل ۴. حرکت مستعمرات امپراتوری به سمت استعمارگر با انحراف  $\theta$

### انقلاب؛ تغییرات ناگهانی در موقعیت یک کشور

انقلاب تغییرات ناگهانی را در ویژگی‌های اجتماعی-سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابه‌جایی تصادفی یک کشور مستعمره به موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود. از دیدگاه الگوریتمی، انقلاب کلیت حرکت تکاملی را از گیرکردن در دره‌های محلی بهینگی نجات می‌دهد. این مقوله در بعضی موارد سبب بهبود موقعیت یک کشور می‌شود و آن را به محدوده بهینگی بهتری می‌برد.

### جابه‌جایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

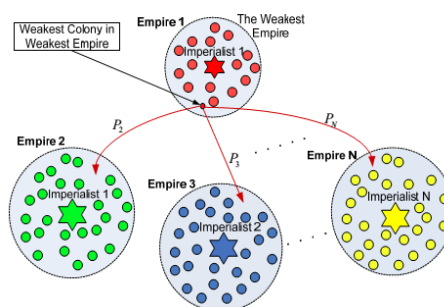
در این مرحله ابتدا هزینه کل تمامی استعمارگران به‌روزرسانی می‌شود. سپس در هر امپراتوری، استعمارگر و جمعیت مستعمره‌های آن امپراتوری با هم ادغام می‌شوند. در نهایت بهترین عضو این جمعیت به‌عنوان استعمارگر انتخاب می‌شود.

### قدرت کل یک امپراتوری

قدرت یک امپراتوری با قدرت کشور استعمارگر، به اضافه



مدت زمان انتظار ارسال  $\lambda_{t,s}^{(K)}$  را برای محصول  $z = 1$  و  $z = 2$  مقادیر گسسته با احتمال یکسان اختیار می‌کند. در این صورت ممکن است هریک از حالات رخ دهد. حالت‌های مختلف از مقادیر تقاضا مدت زمان انتظار سناریوهای مختلفی را ایجاد می‌کند  $\alpha = 0.05$ . به عنوان مثال اگر برای  $d_{t1n} = 40$ ,  $d_{t1n} = 60$  و  $d_{t2n} = 55$  و  $d_{t1n} = 45$  و  $\lambda_t^{(K)} = 1$  و  $\lambda_{t,s}^{(K)} = 2$  باشد، در یک دوره، ۱۶ سناریو وجود دارد.



شکل ۵. رقابت استعماری

### هم‌گرایی

الگوریتم تا برآورده شدن شرط هم‌گرایی، یا تا اتمام تعداد کل تکرارها ادامه می‌یابد. پس از مدتی، همه امپراتوری‌ها سقوط می‌کنند و تنها امپراتوری واحدی خواهیم داشت که بقیه کشورها تحت کنترل آن قرار می‌گیرند. در چنین موقعیتی، رقابت امپریالیستی به پایان رسیده است. در این مقاله، اقتباس جمعیت اولیه و تمامی موارد مطرح شده از مقاله علی کرمانی و همکاران [۳۲] صورت گرفت که در ادامه با نرم‌افزار حل و بررسی می‌شود.

### مثال کاربردی

این مطالعه موردی مدل زنجیره تأمین معرفی شده در بخش ۲ تحت الگوریتم کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) - که در بخش ۳ بیان شده است - در نظر می‌گیرد. در ابتدا پارامترهای عددی مدل مشخص شدند. سپس نتایج شبیه‌سازی در مسائل سبک با استفاده از نرم‌افزار گمز و سبک بزرگ با استفاده از متلب ارائه، و درباره آن بحث شد. [۳۳]

### مشخصات عددی

مقادیر عددی مدل شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. می‌توان هزینه‌ها را در قالب هر نوع واحد پولی، برآورد کرد و هفته‌ها را به عنوان مراحل زمانی  $t \in T$  در نظر گرفت. بازه برنامه‌ریزی  $T_{plan} = 26$  هفته، بازه تصمیم  $T_{dec} = 1$  و برنامه تولید، از قبل  $T_{prod} = 4$  است. شبیه‌سازی‌هایی برای بازه زمانی دوساله عملیاتی اجرا می‌شود (هفته  $T = 104$ ). در یک مرحله مقادیر تقاضا و مدت زمان برای هر محصول به طور قطعی و گسسته تعیین شده و مدل را حل کرده است. در مرحله بعد، مقادیر تقاضا  $d_{t1n}$ ,  $d_{t2n}$ ، مدت زمان تولید  $\lambda_t^{(K)}$  و

### نتایج شبیه‌سازی

نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است. برای سبزه‌های متنوع نمونه‌های  $K$  و سطوح خدمات تضمین شده مرتبط  $E_{j,m}$ ، سطوح خدمات تجربی  $\bar{E}_{j,m}$  براساس ۲۰ اجرای شبیه‌سازی ارزیابی می‌شود. براین اساس، حدود سطح خدمات تئوریک  $\frac{1}{K+1}$  همان گونه که از معادله ۲۱ مشتق شده است، در سطوح خدمات تجربی، تطابق نسبتاً شدیدی با هم دارند.

بهینه‌سازی استوار یکی از روش‌های نوین برای حل مسائلی است که عدم قطعیت در پارامترهای آن وجود دارد. این روش با در نظر گرفتن بدترین سناریوی ممکن و بهینه‌سازی براساس آن عمل می‌کند. به همین دلیل در مقابل عدم قطعیت داده‌ها مقاوم است، اما یکی از کاستی‌های این روش محتاطانه عمل کردن آن است. به منظور مقایسه عملکرد جواب‌های روش کنترل پیش‌گویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC)، روش بهینه‌سازی استوار به کار گرفته شد که شیلدبچ و همکاران [۲۷] آن را ارائه کردند. در جدول ۳، نتایج عملکردی این دو روش با توجه به کل هزینه‌های انتقالات  $H_{tran}$ ، کل هزینه‌های ذخیره‌سازی  $H_{stor}$  و کل هزینه‌های کمبود  $H_{shor}$  نشان داده شده است. براین اساس، هزینه‌های انتقالات  $H_{tran}$  در هر دو روش یکسان است، اما هزینه‌های ذخیره‌سازی  $H_{stor}$  در روش بهینه‌سازی استوار بالاتر از روش کنترل پیش‌گویانه است؛ زیرا روش محتاطانه‌ای است. این امر سبب بالابودن جمع کل هزینه‌های این روش شده است. در نتیجه روش کنترل پیش‌گویانه عملکرد بهتری دارد.

اگر تعداد محصولات در این مطالعه موردی افزایش یابد و یا تعداد حالات تقاضا و مدت زمان انتظار تولید و انتقال افزایش یابد، پیچیدگی مسئله زیاد می‌شود. و حل دقیق آن ممکن نیست. در این صورت باید از الگوریتم‌های

مشخصی، تضمین سطح ازپیش تعیین شده خدمت مشتری را صورت داد. این پدیده، از نظر محاسباتی بسیار کاراست؛ زیرا تنها به نمونه سناریوهای محدودی در هر مرحله زمانی نیاز دارد. به منظور نشان دادن کارایی این رویکرد، آن را با روش بهینه سازی استوار مقایسه می کنیم و نتیجه می گیریم در کنترل پیش گوینده مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) صرفه جویی بیشتری در هزینه ها می شود و این کنترل عملکرد بالاتری دارد. برای پژوهش های بعدی می توان این مدل را با استفاده از سایر الگوریتم های فراابتکاری مانند PSO و... حل کرد و نتایج آن را با الگوریتم رقابت استعماری قیاس داد. همچنین می توان بدون استفاده از رویکرد پیش گوینده، رویکرد متوسط تقریب نمونه را به کار برد و عملکرد این دو روش را مقایسه کرد.

فراابتکاری برای به دست آوردن مقادیر نزدیک به بهینه استفاده کرد. در این پژوهش به دلیل نوآوری در عین شناخته شده بودن، کارایی قابل رقابت با الگوریتم های شناخته شده و انعطاف پذیری، از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شد. همچنین مشخصات عددی مطالعه موردی به کار رفت و برای ۲۰ محصول گسترش داده شد. در جدول ۴ و ۵ نتایج به کارگیری الگوریتم فراابتکاری در این مسئله نشان داده می شود.

### نتیجه گیری

در این مقاله، رویکرد کنترل پیش گوینده مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) برای مدیریت هماهنگ تنوع وسیعی از زنجیره های تأمین ارائه شد. با این رویکرد می توان عدم قطعیت تصادفی را در سیستم اداره کرد و با احتمال

جدول ۱. مقدار پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی عددی

توصیف	پارامتر
ظرفیت تولید	$C_l = 60000, C_r = 80000, C_v = 60000$
ضریب تولید	$c_{il} = 1, c_{rl} = 1 \quad \forall l \in L$
ظرفیت ذخیره سازی	$P_l = 100000 \quad \forall l \in L$ $W_m = 500000 \quad \forall m \in M$ $R_n = 40000 \quad \forall n \in N$
ضریب ذخیره سازی	$p_{il} = 1, p_{rl} = 2 \quad \forall l \in L$ $w_{im} = 1, w_{rm} = 2 \quad \forall m \in M$ $r_n = 1, r_{rn} = 2 \quad \forall n \in N$
هزینه های تولید	$\gamma_{tl} = 5, \gamma_{trl} = 8 \quad \forall t \in T, \forall l \in L$
هزینه های انتقالات	$\sigma_{t1s} = 0.2, \sigma_{t2s} = 0.3, \forall t \in T, \forall s \in S_{lm} \cup S_{mm}$ $\sigma_{t1s} = 0.3, \sigma_{t2s} = 0.4, \forall t \in T, \forall s \in S_{mm} \cup S_{mm}$
هزینه های ذخیره سازی	$\phi_{il} = 0.08, \phi_{rl} = 0.2 \quad \forall l \in L$ $\omega_{im} = 0.04, \omega_{rm} = 0.1 \quad \forall m \in M$ $\rho_{jn} = 0.08, \rho_{rn} = 0.2 \quad \forall n \in N$
هزینه های کمبود	$\varphi_{il} = 0.06, \varphi_{rl} = 0.3 \quad \forall l \in L$ $\delta_{im} = 0.05, \delta_{rm} = 0.08 \quad \forall m \in M$ $\theta_{jn} = 0.07, \theta_{rn} = 0.1 \quad \forall n \in N$

جدول ۲. مقایسه سطوح خدمت تئوری و سطوح خدمت تجربی، مقادیر نشان داده شده، نمایانگر میانگینی، در بین ۲۰ اجرای شبیه سازی است.

سایز نمونه	سطح سرویس تئوری		سطح سرویس تجربی	
	j = 1	j = 2	j = 1	j = 2
K = 8	$\epsilon_{1,j} \leq 11.11\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 11.11\%$	$\epsilon_{1,j} \leq 12.05\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 10.08\%$
K = 16	$\epsilon_{1,j} \leq 5.88\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 5.88\%$	$\epsilon_{1,j} \leq 6.03\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 5.72\%$
K = 24	$\epsilon_{2,j} \leq 4\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 4\%$	$\epsilon_{1,j} \leq 4.06\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 3.96\%$
K = 36	$\epsilon_{1,j} \leq 2.7\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 2.7\%$	$\epsilon_{1,j} \leq 2.74\%$	$\epsilon_{2,j} \leq 2.68\%$

جدول ۳. مقایسه هزینه های انتقالات  $H_{tran}$ ، هزینه های ذخیره سازی  $H_{stor}$  و هزینه های کمبود  $H_{shor}$  برای روش بهینه سازی استوار و سیاست کنترل پیشگویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) نمایانگر میانگین در بین ۲۰ اجرای شبیه سازی است.

حالت مساله	سایز نمونه	سطح سرویس	SCMPC	بهینه سازی استوار
سناریو محور	$K = 8$	$\epsilon_{1,n} \leq 11.11\%$	$H_{tran} = 5.64, H_{stor} = 0.38, H_{shor} = 0.57$	$H_{tran} = 5.64, H_{stor} = 2.11, H_{shor} = 0.27$
	$K = 16$	$\epsilon_{1,n} \leq 5.88\%$	$H_{tran} = 5.61, H_{stor} = 0.51, H_{shor} = 0.46$	$H_{tran} = 5.61, H_{stor} = 2.68, H_{shor} = 0.21$
	$K = 24$	$\epsilon_{1,n} \leq 4\%$	$H_{tran} = 5.59, H_{stor} = 0.68, H_{shor} = 0.39$	$H_{tran} = 5.59, H_{stor} = 3.12, H_{shor} = 0.17$
	$K = 36$	$\epsilon_{1,n} \leq 2.7\%$	$H_{tran} = 5.68, H_{stor} = 0.76, H_{shor} = 0.32$	$H_{tran} = 5.68, H_{stor} = 3.47, H_{shor} = 0.11$

جدول ۴. مقایسه سطوح خدمت تئوری و سطوح خدمت تجربی، مقادیر نشان داده شده، نمایانگر میانگینی، در بین ۲۰ اجرای شبیه سازی است.

سایز نمونه	سطح سرویس تئوری		سطح سرویس عملی	
	j = 1	j = 2	j = 1	j = 2
K=1024	$\epsilon_{1,n} \leq 9.756 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 9.756 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{1,n} \leq 9.985 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 9.545 \times 10^{-4}$
K=1536	$\epsilon_{1,n} \leq 6.510 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 6.510 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{1,n} \leq 6.742 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 6.392 \times 10^{-4}$
K=2048	$\epsilon_{1,n} \leq 4.880 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 4.880 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{1,n} \leq 4.987 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 4.687 \times 10^{-4}$
K=2304	$\epsilon_{1,n} \leq 4.338 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 4.338 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{1,n} \leq 4.456 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{2,n} \leq 4.197 \times 10^{-4}$

جدول ۵. مقایسه هزینه های انتقالات  $H_{tran}$ ، هزینه های ذخیره سازی  $H_{stor}$  و هزینه های کمبود  $H_{shor}$  برای روش بهینه سازی استوار و سیاست کنترل پیشگویانه مدل مبتنی بر سناریو (SCMPC) نمایانگر میانگین در بین ۲۰ اجرای شبیه سازی است

حالت مساله	سایز نمونه	سطح سرویس	SCMPC	بهینه سازی استوار
سناریو محور	$K=1024$	$\epsilon_{1,n} \leq 9.756 \times 10^{-4}$	$H_{tran} = 53.41, H_{stor} = 2.93, H_{shor} = 6.1$	$H_{tran} = 53.41, H_{stor} = 10.23, H_{shor} = 2.27$
	$K=1536$	$\epsilon_{1,n} \leq 6.510 \times 10^{-4}$	$H_{tran} = 54.98, H_{stor} = 4.83, H_{shor} = 5.3$	$H_{tran} = 54.98, H_{stor} = 13.72, H_{shor} = 1.98$
	$K=2048$	$\epsilon_{1,n} \leq 4.880 \times 10^{-4}$	$H_{tran} = 55.03, H_{stor} = 6.02, H_{shor} = 4.2$	$H_{tran} = 55.03, H_{stor} = 16.39, H_{shor} = 1.41$
	$K=2304$	$\epsilon_{1,n} \leq 4.338 \times 10^{-4}$	$H_{tran} = 54.95, H_{stor} = 8.41, H_{shor} = 2.8$	$H_{tran} = 54.95, H_{stor} = 18.97, H_{shor} = 0.92$

## منابع

1. Sarimveis, H., Patrinos, P., Tarantilis, C., and Kiranoudis, C. (2008). "Dynamic Modeling and Control of Supply Chain Systems", *Computers and Operations Research*, Vol. 35, No. 11, PP. 3530–3561.
2. Shapiro, J.F. (2007). "Modeling the Supply Chain", South-Western College Pub, Inc., NJ, USA.
3. Afshari, H., AminNayeri, M., and Ardestanijaafari, A. (2010). "Optimizing Inventory Decisions in Facility Location within Distribution Network Design", *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*,
4. Sadjady, H., and Davoudpour, H. (2011). "Two-Echelon, Multi-Commodity Supply Chain Network Design with Mode Selection Lead-Times and Inventory Costs", *Computers & Operation Research*, Vol. 39, No. 7, PP. 1266–1283.
5. Lau H., Nakandala D., and Shum P. (2016). "A Case-Based Roadmap for Lateral Transshipment in Supply Chain Inventory Management", *J Inform Syst Technol Manag*, Vol. 13, No. 1, PP. 27–44.

6. Zhu, S. X. (2015). "Analysis of Dual Sourcing Strategies under Supply Disruptions", *International Journal of Production Economics*, Vol. 170, No. 1, PP. 191-203.
7. Melo, M. T., Nickel, S., and SaldanhaDaGama, F. (2009). "Facility Location and Supply Chain Management—A Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, No. 2, PP. 401-412.
8. Sabri, E. H., and Beamon, B. M. (2000). "A MultiObjective Approach to Simultaneous Strategic and Operational Planning in Supply Chain Design", *Omega*, Vol. 28, No. 5, PP. 581-598.
9. Snyder, L. V. (2006). "Facility Location Under Uncertainty: A Review", *IIE Transactions*, Vol. 38, No. 7, PP. 547-564.
10. Klibi, W., Martel, A., and Guitouni, A. (2010). "The Design of Robust Value-Creating Supply Chain Networks: A Critical Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 203, No. 2, PP. 283-293
11. Tsiakis, P., Nilay S., and Constantinos C. P. (2001). "Design of MultiEchelon Supply Chain Networks Under Demand Uncertainty", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 40, No. 16, PP. 3585-3604
12. Hinojosa, Y. (2008). "Dynamic Supply Chain Design with Inventory", *Computers and Operations Research*, Vol. 35, No. 2, PP. 373-391.
13. Zhang, R. Q, and RuPing W. (2009). "ScenarioBased Stochastic Capacity Planning Model and Decision Risk Analysis", *Systems Engineering Theory and Practice*. Vol. 29, No. 1, PP. 55-63.
14. Mayne, D., Rawlings, J., Rao, C., and Scolaert, P. (2000). "Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality", *Automatica*, Vol. 36, No. 6, PP. 789–814.
15. PereaL'Opez, E., Ydstie, B., and Grossmann, I. (2003). "A Model Predictive Control Strategy for Supply Chain Optimization", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, No. 8, PP. 1201–1218.
16. Fakhrzad, M.B., Heydari, M., 2008. A Heuristic Algorithm for Hybrid Flow-shop Production Scheduling to Minimize the Sum of The Earliness ANDF Tardiness Costs. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. 25 (2), 105-115.
17. Sarimveis, H., Patrinos, P., Tarantilis, C., and Kiranoudis, C. (2008). "Dynamic Modeling and Control of Supply Chain Systems", *Computers and Operations Research*, Vol. 35, No. 11, PP. 3530–3561.
18. Maestre, J. M., Muñoz De La Peña, D., Camacho, E. F., and Alamo, T. (2011). "Distributed Model Predictive Control Based on Agent Negotiation", *Journal of Process Control*, Vol. 21, No. 5, PP. 685–697.
19. Fakhrzad, M.B., A. Sadri Esfahani, (2013). Modeling the time windows vehicle routing problem in cross-docking strategy using two meta-heuristic algorithms. *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics* 27 (7), 1113.
20. Jurado, I., Maestre, J. M., Velarde, P., Ocampo-Martinez, C., Fern´andez, I., Isla Tejera, B., and Del Prado, J. (2016). "Stock Management in Hospital Pharmacy Using ChanceConstrained Model Predictive Control", *Computers in Bi Ology and Medicine*, Vol. 72, No. 1, PP. 248-255.
21. Wang, W., Rivera, D. E., and Kempf, K. G. (2005). "A Novel Model Predictive Control Algorithm for Supply Chain Management in Semiconductor Manufacturing", in: *American Control Conference. Portland (OR)*, United States.
22. Grosso, J., OcampoMart´inez, C., Puig, V., and Joseph, B. (2014). "Chance Constrained Model Predictive Control for Drinking Water Networks", *Journal of Process Control*, Vol. 24, No.5, PP. 504–516.
23. Li, X., Marlin, T., (2009). Robust supply chain performance via model predictive control. *Computers & Chemical Engineering*, Vol .33, No.1, PP. 2134–2143.
24. Sohdi, M., and Tang, C. (2012). "Managing Supply Chain Risk", Springer, New York et al.
25. Schildbach, G., and Morari, M. (2016). "Scenario-Based Model Predictive Control for Multi-Echelon Supply Chain Management", *European Journal of Operational Research*, Vol. 252, No. 2, PP. 540-549.
26. Campi, M., and Garatti, S. (2008). "The Exact Feasibility of Randomized Solutions of Uncertain Convex Programs", *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 19, No. 3, PP. 1211–1230.

27. Schildbach, G., Fagiano, L., Frei, C., and Morari, M. (2014). "The Scenario Approach for Stochastic Model Predictive Control with Bounds on ClosedLoop Constraint Violations", *Automatica*, Vol. 50, No. 12, PP. 3009-3018.
28. Bitran, G., and Yanasse, H. (1984). "Deterministic Approximations to Stochastic Production Problems", *Operations Research*, Vol. 32, No. 5, PP. 999-1018.
29. Bookbinder, J., and Tan, J. Y. (1988). "Strategies for the Probabilistic LotSizing Problem with ServiceLevel Constraints", *Management Science*, Vol. 34, No.5, PP. 1096-1108.
30. Oke, A., and Gopalakrishnan, M. (2009). "Managing Disruptions in Supply Chains: A Case Study of A Retail Supply Chain", *International Journal of Production Economics*, Vol. 118, No. 1, PP. 168-174.
31. AtashpazGargari, E., and Lucas, C. (2007). "Imperialist Competitive Algorithm. an Algorithm for Optimization Inspired by Imperialist Competitive", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore.2007.
32. Kermani, A. A. K., Aliahmadi, A., Salamat, A., Barzinpour, F., and Hadiyan, E. (2014). "Supplier Selection in a SingleEchelon Supply Chain with Horizontal Competition Using Imperialist Competitive Algorithm", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 28, No. 6, PP. 628-638.
33. Fakhrzad, M.B., Moobed, M., (2010), A GA model development for decision making under reverse logistics. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*.21 (4)211-220.

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Supply Chain Network Design (SCND)
2. Model predictive control (MPC)
3. Relative percent deviation (RPD)