طراحی شبکه زنجیره تأمین چابک با الگوریتم جستجوی ممنوع

الهه سالاری[**]
دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
salarielahe73@pgs.usb.ac.ir

محمدرضا شهرکی[*]
دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
mr.shahraki@eng.usb.ac.ir

عبداله شریفی[***]
دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
a.sharifi@email.kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷
تاریخ اصلاحات: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴

چکیده

طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل تصمیمات کلیدی است که تأثیر زیادی بر ساختار عملیاتی زنجیره تأمین دارد. طراحی کارآمد زنجیره تأمین باعث بهبود عملکرد در سازمان‌ها می‌شود. این موضوع باعث به‌وجود آمدن مفاهیم جدیدی در مسأله زنجیره تأمین در دهه گذشته شده است. در این تحقیق مسأله طراحی شبکه زنجیره‌ی تأمین در سازمان‌های چابک دارای چند سطح و چند دوره زمانی مورد توجه قرار گرفته است. این مسأله تحت شرایط داشتن چندین مشتری با حجم تقاضای زیاد در نظر گرفته شده است. تصمیمات شامل انتخاب شرکت‌ها در هر سطح، مقدار تولید، انبار و حمل‌ونقل هر شرکت است. مسأله برای یکپارچه‌سازی تمامی متغیرهای تصمیم‌گیری و با هدف حداقل‌کردن هزینه‌های عملیاتی کل در تمام زنجیره‌ی تأمین و ارضاء تقاضای کامل مشتری‌ها و کسب رضایت آنها مدل‌سازی شده است. از آنجایی‌که حل مسأله طراحی زنجیره تأمین چند سطحی چند دوره‌ای در شرایط عدم قطعیت از نوع مسائل NP-Hard می‌باشد بهتر است الگوریتم‌های ابتکاری و فرابتکاری به منظور کاهش زمان حل مسأله استفاده شود. به همین منظور برای حل مدل از الگوریتم جستجوی ممنوع که یکی از الگوریتم‌های فرابتکاری است، به کار گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با بالارفتن تعداد تکرارهای حل مسأله، به جواب‌هایی با کمتر از ۳٪ اختلاف از جواب بهینه دست پیدا کرده است که الگوریتم جستجو ممنوع برای به‌دست آوردن جواب بهینه در مقایسه با الگوریتم لاگرانژ بهتر عمل کرده است.

واژگان کلیدی

طراحی زنجیره تأمین چابک؛ مدل‌های تصمیم‌گیری؛ الگوریتم‌های فرابتکاری؛ الگوریتم جستجوی ممنوع.

۱- مقدمه

در فضای رقابتی شرکت‌ها با مشکلات متعددی از جمله تقاضاهای متنوع مشتریان و ارضاء نیازهای آن‌ها مواجه می‌باشند. برای شرکت‌ها مهم است که بتوانند به‌سرعت محصولات را طراحی، تولید و توزیع کنند و به بهبود کارآیی تولید و کاهش هزینه‌های عملیاتی نیز توجه داشته باشند. برای رویارویی با این مشکلات از مفهوم تولید چابک استفاده می‌شود. در یک زنجیره‌ی تأمین چابک[1] که در آن طراحی، تولید و توزیع محصولات صورت می‌پذیرد، از فرصت‌های فزاینده‌ی بازار استفاده‌شده و با توجه به تغییرات محیط و عدم قطعیت‌های موجود در آن زنجیره‌ی تأمین منعطف می‌باشد [۴].

طراحی شبکه زنجیره تأمین[2] (SCND) بر تعیین ساختار زنجیره و هزینه‌ها و عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. بازار امروزه رقابتی و پویا است و هدف از SCND، طراحی یک ساختار کارآمد برای مهندسی مجدد و افزایش ارزش کل زنجیره تأمین است [۵]. طراحی زنجیره تأمین اثرات قابل توجهی برای مدت طولانی بر روی عملکرد زنجیره تأمین می‌گذارد و زنجیره تأمین به دلیل افزایش رقابت، مورد توجه قرار گرفته است [۶].

این مقاله به طراحی شبکه زنجیره تأمین چند سطحی در تولید چابک با استفاده از روش الگوریتم جستجوی ممنوع پرداخته است. در بخش دوم تحقیق به مفهوم تولید چابک و زنجیره تأمین چند سطحی پرداخته و تحقیقات پیشین که با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع انجام‌شده بررسی شده است. در بخش سوم به بیان مسأله و مدل‌سازی آن پرداخته شده است. در بخش چهارم مراحل روش الگوریتم جستجوی ممنوع برای حل مسأله بیان‌شده است. در بخش پنجم یک مثال از زنجیره تأمین چند سطحی با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوع را حل و در بخش ششم به ارائه نتایج تحقیق و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده پرداخته‌شده است.

۲- ادبیات و پیشینه تحقیق

چابکی به معنای واکنش مناسب و درست به تغییرات غیرقابل‌پیش‌بینی محیط و استفاده از این تغییرات برای پیشرفت سازمان است [۷]. تولید چابک یک مدل جدید برای برطرف‌کردن محدودیت‌های تولید ناب است [۸]. بنابراین تولید چابک، مدلی منعطف از ترکیب تولید

1. Agile Supply Chain
2. Supply Chain Network Design

[*] نویسنده مسئول - استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
[**] دانشجوی کارشناسی ارشدمهندسی صنایع دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
[***] دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

ناب با انعطاف‌پذیری عملیاتی است. بـه همـین خـاطر بـه تولیدکننـدگان چابک تولیدکنندگان منعطف می‌گویند که می‌توانند محصولات باکیفیـت، با هزینه اندک و در زمان کوتاه‌تر تحویل دهند [۹].

پژوهشگرانی در مقاله‌ای مدل بهینـه‌سـازی اسـتوار را جهـت طراحـی شبکه زنجیره تأمین خون با لحـاظ‌کـردن مسـیر انتقـال مراکـز خـون در شـرایط بحرانـی ارائـه داده‌انـد [۱]. در پژوهشـی دیگـر بـا اسـتفاده از مجموعه‌های فازی طراحی شبکه زنجیره تـأمین یکپارچـه حلقـه بسـته را پیشنهاد دادند [۲]. تحقیقی دیگر با استفاده از مـدل برنامـه‌ریـزی اعـداد صحیح چند هدفه، یک مدل عمومی برای شبکه زنجیره تإمین پایـدار کـه شامل اهداف اقتصادی، زیست‌محیطـی و اجتمـاعی مـی‌باشـد را طراحـی کردند [۱۰]. پژوهشگرانی در مقالـه‌ی خـود بـه طراحـی زنجیـره تـأمینی پرداختن که باعث کاهش کربن می‌شود. این مدل براساس الگوریتم تجزیه بندرز طراحی شده است و بر پارامترهای نامشـخص غلبـه مـی‌کنـد [۱۱]. تحقیقی دیگر زنجیره تأمین حلقه بسته‌ای را طراحی کرده است که در آن مـدل چندمحصـولی و چنـد دوره‌ای را مـورد بررسـی قـرار داده اسـت. از آنجایی‌که مدل پیشنهادی شامل پارامترهای نامعلوم است به همین دلیـل از نظریه فازی بهره گرفته‌اند و کاربرد مدل را با مطالعه موردی واقعی مورد آزمایش قرار داده‌اند [۱۲]. همچنین در پژوهشی دیگر با استفاده از مـدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط یک شبکه زنجیره تأمین حلقه- بسته چند هدفه را طراحی کردند. آنها در این مدل عدم قطعیت‌ها و ریسک‌ها، شامل "شاخص تنوع"، "ریسک حرکـت نزولـی" و "ارزش در معـرض ریسـک" مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. در تحقیقی نقـش شـرکت‌هـای ثالـث را در طراحی زنجیره تأمین به منظور افزایش درک عدم قطعیت‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها مدل غیرخطی بهینه‌سازی را بـرای زنجیـره تـأمین حلقـه بسته معرفی کردند و مدل را با الگوریتم رقابت اسـتعماری و بهینـه‌سـازی ذرات حل کردند [۱۴].

در مقاله‌ای بیان می‌کنند که زنجیره تأمین نیاز به یـک شـبکه پایـدار دارد، به همین دلیل باید شاخص‌هـای کلیـدی در طراحـی مـدل زنجیـره تأمین مانند عملکرد اقتصادی، فناوری و ارزش ذینفعان در نظر گرفته شود [۱۵]. در پژوهشی به طراحی زنجیـره تـأمین پایـدار بـا اسـتفاده از مـدل برنامه‌ریزی عدد صحیح چندهدفه پرداختند. آنها یک الگوریتم مبتنـی بـر آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل پیشنهاد دادند [۱۶].

در این تحقیق برای طراحی زنجیره تأمین چابک از الگوریتم جستجوی ممنوع استفاده شده است. بعد از طراحی و اعتبارسنجی مدل در نرم‌افـزار گمز، مثال عددی از مسأله بـا نـرم‌افـزار CPLEX حـل شـد و در نهایـت جواب‌های این روش با روش لاگرانژ مقایسه شد.

جدول ۱- مروری بر تحقیقات گذشته

نویسندگان	حوزه مورد استفاده	روش بکار گرفته شده
جبارزاده و همکاران [۲۲]	ارزیابی ریسک و تعیین تصمیمات برای تعیین محل تسهیلات و مقادیر حمل و نقل	آزادسازی لاگرانژ
اسکندرپور و همکاران [۲۳]	طراحی شبکه چندسطحی که برنامه سفر همراه با محموله از مبدأ به مقصد و حالت‌های حمل و نقل را در نظر می‌گیرد	الگوریتم جستجوی همسایگی
سقاییان و رمضانیان [۲۴]	رقابت چند محصولی در بازارهای دو طرفه	الگوریتم ژنتیک
علوی و جبارزاده [۲۵]	ارزیابی اعتبار تجاری و اعتبار بانکی مربوط به تصمیمات مالی	آزادسازی لاگرانژ
ژان و همکاران [۲۶]	تعیین مکان‌های مرکز توزیع و ظرفیت مربوط به هزینه‌های مورد انتظار جریان محصولات	الگوریتم جستجوی ممنوع
فتح‌الهی فرد و همکاران [۲۷]	توجه به ملاحظات اقتصادی و اجتماعی	الگوریتم‌های هیبریدی
مطالعه حاضر	انجام چندین عملیات در چندین سطح مختلف با توجه به ظرفیت و هزینه‌های تولید و حمل و نقل	الگوریتم جستجوی ممنوع

جدول (۱) خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده در زمینه طراحی زنجیره تأمین می‌باشد که حوزه‌ی مورد مطالعه هر کدام از آنها در جدول بیان شده است.

۳- بیان مسأله و مدلسازی

۳-۱- بیان مسأله

در این تحقیق طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین تحـت شـرایط تقاضـای احتمالی از طرف چندین مشتری در نظـر گرفتـه مـی‌شـود بـه‌گونـه‌ای کـه تقاضای عقب‌افتاده مجاز نیست. طراحـی انجـام‌شـده بـرای تعـدادی دوره‌ی زمانی (T) و با توجه به ظرفیت‌های تولید و حمل‌ونقـل هـر شـرکت در هـر دوره‌ی زمانی پذیرفته است. در جهت ارضاء تقاضای مشتریان، در هر سطح و در هر دوره‌ی زمانی یک یا بیشتر از یک شرکت را می‌توانیم انتخاب کنیم.

ترتیب عملیات در زنجیره تأمین توسط متغیر φ تعریف مـی‌شـود کـه بیانگر تعداد سطح‌های موجود در زنجیـره‌ی تـأمین اسـت. در هـر سـطح چندین شرکت کاندیدا برای انجام عملیـات آن سـطح وجـود دارد. هـدف اصلی انتخاب تعدادی از شرکت‌ها در هـر سـطح بـرای تشـکیل شـبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین است. شرکت با توجه بـه ظرفیـت و هزینـه‌هـای تولیـد و حمل‌ونقل می‌تواند چندین عملیات را در چندین سطح مختلف انجام دهد.

مجموعه‌ی، E_α مجموعه‌ی کارخانه‌هایی است که مـی‌تواننـد عملیـات α $(\alpha = 1, 2, \dots, \varphi)$ را انجام دهند. همچنین سطح فرضی $\varphi + 1$ برای نمایش مشتری نهایی تعریف می‌شود. مجموعه‌ی یال‌ها به گونه‌ای تعریـف شده است که هیچ یالی در مجموعه‌ی گره‌هـای وجـود نـدارد و یـال‌هـای مستقیمی از مجموعه‌ی E_α به یـک یـا چنـد گـروه دیگـر در مجموعـه‌ی

$E_{\alpha+1}$ $(\alpha = 1, 2, \dots, \varphi)$ وجـود دارد و از طرفـی $E_\alpha \neq \Phi$ بـه ازای $\forall \alpha \in P$ است، یعنی هیچ سطحی نمی‌تواند تهی از عملیات باشد.

در این مدل فرض شده است که زنجیره‌ی تأمین محصـول نهـایی را از طریق فقط یک خروجی (E_φ) به دست مشتری نهایی می‌رسـاند و سـایر سـطوح E_α $(\alpha = 1, 2, \dots, \varphi - 1)$ محصـول نیمـه‌سـاخته را بـه‌دسـت مشتری نهایی نخواهند داد. محصول سطح $\alpha - 1$، به‌عنوان مـواد خـام در سطح α به‌کار می‌رود. در واقع مواد خام هر سطح، همـان ورودی سـطح و خروجی سطح قبل از آن است. مدت زمان عملیات شامل تولید و حمـل و نقل در یک دوره‌ی زمانی است. ظرفیت تولید و حمل‌و نقل شـرکت‌هـا در افق زمانی و در طی دوره‌های زمانی مختلف، مـی‌توانـد متفـاوت باشـد. از طرفی در مدل ارائه شده موجـودی کـالای در جریـان سـاخت در ابتـدای دوره‌ی اول صفر خواهد بود و در نتیجـه در انتهـای دوره‌ی اول، محصـول نیمه ساخته‌ی سطح اول بـه دسـت سـطح دوم مـی‌رسـد و سـطح دوم از ابتدای دوره‌ی دوم می‌تواند کـار خـود را شـروع کنـد. بـه همـین منـوال محصول نهایی زودتر از ابتدای دوره $t = \varphi + 1$ به دست مشتری نهـایی نخواهد رسید. این فرض بدین معنی است که مدت زمان سفارش کـالا تـا دریافت کالا در هر سطح یـک دوره‌ی زمـانی خواهـد بـود. از آنجـایی‌کـه مدت‌زمان سفارش کالا تا دریافت کالا همواره مقداری ثابـت و برابـر یـک دوره است، نیازی به در نظر گرفتن روش‌های مختلف حمل‌ونقل و داشـتن تبادل بین هزینه- زمان در سیستم حمل‌و نقل نیست. در این مسأله فقـط یک روش حمل‌ونقل با ظرفیت محدود در نظر گرفته شده است.

در جدول (۲) پارامترهای بکار رفته برای مـدل‌سـازی مسـأله و شـرح آن‌ها آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای بکاررفته در مدل‌سازی مسأله

پارامتر	شرح
P	ترتیب عملیات (سطح‌های) موردنیاز برای تولید محصول $P = \{1, 2, \dots, \varphi\}$
N_α	تعداد شرکت‌های واجد شرایط در سطح α
T	تعداد دوره‌های زمانی در افق برنامه‌ریزی
$F_{i(\alpha)j(\alpha+1)}$	هزینه‌ی ثابت رابطه‌ی بین شرکت i از سطح α با شرکت j از سطح $\alpha + 1$
$C_{i(\alpha)j(\alpha+1)}$	هزینه‌ی حمل‌ونقل هر واحد محصول از شرکت i در سطح α به شرکت j در سطح $\alpha + 1$ در دوره t
$H^f_{i(\alpha)t}$	هزینه‌ی نگهداری محصول نهایی در شرکت i از سطح α در دوره t
$H^r_{i(\alpha)t}$	هزینه‌ی نگهداری مواد اولیه در شرکت i از سطح α در دوره t
$U_{i(\alpha)t}$	هزینه‌ی تولید هر واحد کالا در شرکت i از سطح α در دوره t
$\Phi_{i(\alpha)t}$	ظرفیت تولید در دسترس (برحسب تعداد واحد کالا) در شرکت i از سطح α در دوره t
$\Psi_{i(\alpha)j(\alpha+1)t}$	ظرفیت حمل‌ونقل (برحسب تعداد واحد کالا) از شرکت i در سطح α به شرکت j در سطح $\alpha + 1$ در دوره t
θ_α	تعداد واحد مواد اولیه موردنیاز از سطح $\alpha - 1$ برای تولید یک واحد کالا در سطح α
D_{jt}	تقاضای مشتری j در دوره t

در تمامی پارامترها، t بازه‌ای از اعداد در دسترس را می‌تواند بپـذیرد و تمامی افق زمانی مدنظر نیست.

در جدول (۳) متغیرهای تصمیم‌گیری بکاررفته در مدل‌سـازی مسـأله ذکر شده است.

جدول ۳- متغیرهای تصمیم‌گیری بکار رفته در مدل‌سازی مسأله

پارامتر	شرح
$z_{i(\alpha)t}$	مقدار محصول تولیدشده در شرکت i از سطح α در دوره t
$x_{i(\alpha)j(\alpha+1)t}$	مقدار کالای حمل شده از شرکت i در سطح α به شرکت j در سطح $\alpha + 1$ در دوره t (اگر $\alpha = \varphi$ باشد نشان‌دهنده‌ی تحویل کالا به مشتری نهایی j است.)
$h^f_{i(\alpha)t}$	مقدار کالای نهایی موجود در شرکت i از سطح α در دوره t $(\alpha = 1, 2, \dots, \varphi)$
$h^r_{i(\alpha)t}$	مقدار مواد خام موجود در شرکت i از سطح α در دوره t $(\alpha = 1, 2, \dots, \varphi)$
$W_{i(\alpha)}$	1 اگر شرکت i در سطح α در شبکه در نظر گرفته شود 0 در غیر صورت این
$Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)}$	اگر رابطه‌ی بین شرکت i در سطح α با شرکت j در سطح $\alpha + 1$ برقرار شود در غیر صورت این

در جدول (۲) متغیرهای تصمیم‌گیری بکار رفته در مدل‌سازی مسـأله آورده شده است.

۳-۲- مدل‌سازی مسأله

تابع هدف شـامل تمـامی هزینـه‌هـای عملیـاتی، هزینـه‌هـای ثابـت و هزینه‌های مرتبط با تولید می‌شود. هزینه‌هـای ثابـت شـامل هزینـه‌هـای ارتباط بین دو شرکت در دو سطح مجاور خواهد بود. هزینه‌های تولید نیـز شامل هزینه تولید، هزینه حمل‌ونقل، هزینه نگهداری مواد اولیـه و هزینـه نگهداری محصولات نهایی می‌شود. مدل مسأله به شرح زیر است:

$$Min \sum_{\alpha=1}^{\varphi-1} \sum_{i=1}^{N_\alpha} \sum_{j=1}^{N_{\alpha+1}} F_{i(\alpha)j(\alpha+1)} Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)}$$
$$+ \sum_{\alpha=1}^{\varphi} \sum_{i=1}^{N_\alpha} \sum_{t=\alpha}^{T-\varphi-\alpha} U_{i(\alpha)t} Z_{i(\alpha)t}$$
$$+ \sum_{\alpha=1}^{\varphi} \sum_{i=1}^{N_\alpha} \sum_{j=1}^{N_{\alpha+1}} \sum_{t=\alpha}^{T-\varphi+\alpha} C_{i(\alpha)j(\alpha+1)t} X_{i(\alpha)j(\alpha+1)t}$$
$$+ \sum_{\alpha=1}^{\varphi} \sum_{i=1}^{N_\alpha} \sum_{t=\alpha}^{T-\varphi+\alpha} H^f_{i(\alpha)t} h^f_{i(\alpha)t}$$
$$+ \sum_{\alpha=2}^{\varphi} \sum_{i=1}^{N_\alpha} \sum_{t=\alpha}^{T-\varphi+\alpha} H^f_{i(\alpha)t} h^r_{i(\alpha)t}$$

Subject to:

$$Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)} \leq W_{i(\alpha)} \qquad i = 1, \dots, N_\alpha;\ j = 1, \dots, N_{\alpha+1};$$
$$\alpha = 1, \dots, \varphi - 1 \qquad (1)$$
$$Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)} \leq W_{j(\alpha+1)}$$
$$i = 1, \dots, N_\alpha; j = 1, \dots, N_{\alpha+1};$$

$$\alpha = 1,\dots,\varphi-1 \quad (2)$$
$$\sum_{j=1}^{N_{\alpha+1}} Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)} \geq W_{i(\alpha)}$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi-1 \quad (3)$$
$$\sum_{i=1}^{N_\alpha} Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)} \geq W_{j(\alpha+1)}$$
$$j = 1,\dots,N_{\alpha+1};\ \alpha = 1,\dots,\varphi-1 \quad (4)$$
$$Z_{i(\alpha)t} \leq \Phi_{i(\alpha)t} W_{i(\alpha)}$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (5)$$
$$X_{i(\alpha)j(\alpha+1)t} \leq \Psi_{i(\alpha)j(\alpha+1)t} Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)}$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ j = 1,\dots,N_{\alpha+1};\ \alpha = 1,\dots,\varphi-1;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (6)$$
$$h^f_{i(\alpha)t} = h^f_{i(\alpha)t-1} + Z_{i(\alpha)t} - \sum_{j=1}^{N_{\alpha+1}} X_{i(\alpha)j(\alpha+1)t}$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (7)$$
$$h^r_{i(\alpha)t} = h^r_{i(\alpha)t-1} - \theta_\alpha Z_{i(\alpha)t} + \sum_{j=1}^{N_{\alpha-1}} X_{j(\alpha-1)i(\alpha)t-1}$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 2,\dots,\varphi;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (8)$$
$$\sum_{i=1}^{N_\varphi} X_{i(\varphi)j(\varphi+1)t} = D_{jt}$$
$$j = 1,\dots,N_{\varphi+1};\ t = \varphi,\dots,T \quad (9)$$
$$h^f_{i(\alpha)t-1} = 0$$
$$t = \alpha;\ i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi \quad (10)$$
$$h^r_{i(\alpha)t-1} = 0$$
$$t = \alpha;\ i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 2,\dots,\varphi \quad (11)$$
$$Z_{i(\alpha)t} \geq 0$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (12)$$
$$X_{i(\alpha)j(\alpha+1)t} \geq 0$$
$$\forall (i,j) \in A;\ \alpha = 1,\dots,\varphi;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (13)$$
$$h^f_{i(\alpha)t} = 0$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (14)$$
$$h^r_{i(\alpha)t} = 0$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi;\ t = \alpha,\dots,T-\varphi+\alpha \quad (15)$$
$$Y_{i(\alpha)j(\alpha+1)} \in \{0,1\}\ \ \forall (i,j) \in A \quad (16)$$
$$W_{i(\alpha)} \in \{0.1\}$$
$$i = 1,\dots,N_\alpha;\ \alpha = 1,\dots,\varphi \quad (17)$$

۳-۳- شرح مدل

تابع هدف برای حداقل‌کردن هزینه‌های ثابت و هزینه‌های تولید می‌باشد. محدودیت‌های (۱) تا (۴) بیان می‌کند که ارتباط بین دو شرکت زمانی برقرار می‌شود که هر دو شرکت انتخاب شده باشند. محدودیت (۵) برای اطمینان از اینکه تولید فقط در شرکت‌های انتخاب‌شده صورت می‌پذیرد، آمده است. محدودیت (۶) نشان می‌دهد که فقط در صورت وجود ارتباط بین شرکت‌ها، حمل و نقل انجام می‌شود. محدودیت‌های (۷) و (۸) برای اطمینان از این است که معادله‌ی تعادل بین محصولات نهایی و مواد خام برقرار است. محدودیت (۸) برای اطمینان از این است که میزان مواد اولیه‌ی موردنیاز هر سطح به طور کامل از سطح قبل فراهم شود. محدودیت (۹) برای اطمینان از ارضاء تقاضای کل مشتری‌ها است. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱)میزان نگهداری موجودی را برای شرکت جهت ارضا تقاضای بیان می‌کند. محدودیت‌های (۱۲) مقدار محصول تولید شده در شرکت را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۳) بیان می‌کند که چه مقدار کالا از شرکت حمل شده و به مشتری نهایی تحویل داده شده است. محدودیت (۱۴) و (۱۵) به ترتیب مقدار کالای نهایی و مقدار مواد خام موجود در شرکت را نشان می‌دهند. محدودیت (۱۶) و (۱۷) به ترتیب ارتباط بین دو شرکت و انتخاب آنها در شبکه را نشان می‌دهند.

۴- الگوریتم فراابتکاری

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کاربرد ندارند ولی الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های نزدیک به جواب بهینه در زمان کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت می‌باشند. الگوریتم‌های تقریبی به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری و فوق ابتکاری بخش‌بندی می‌شوند. الگوریتم فراابتکاری یا فرااکتشافی نوعی الگوریتم تصادفی هستند که دارای راهکارهای برونرفت از نقاط بهینه محلی می‌باشند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند [۳].

۴-۱- الگوریتم جستجوی ممنوع

الگوریتم جستجوی ممنوع یک روش فراابتکاری است [۱۷]. این الگوریتم برای حل مسائل غیرخطی و ترکیبی، مبتنی بر رویکرد تکراری جستجوی همسایگی استفاده می‌شود. در این الگوریتم از یک جواب پذیرفتنی شروع و پس از ارزیابی جواب‌های پذیرفتنی در اطراف جواب کنونی به سمت بهترین آن حرکت می‌کند تا در نهایت به سمت جواب بهینه یا نزدیک به بهینه بدست آید [۱۸].

گام‌های استفاده از جستجوی ممنوع به شرح زیر است:

گام اول: الگوریتم جستجوی ممنوعه با یک راه‌حل اولیه شروع می‌شود. در خیلی از مواقع راه‌حل اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. مقدار به‌دست آمده از جواب اولیه به‌عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته می‌شود.

گام دوم: در این گام با توجه به ساختار معرفی‌شده برای همسایگی، کلیه همسایگی‌های بررسی می‌شوند.

گام سوم: در بین همسایگی‌ها بهترین همسایه انتخاب می‌گردد.

گام چهارم: بعد از انتخاب بهترین همسایگی، حرکت به آن راه‌حل با لیست ممنوع مقایسه می‌گردد. در صورتی‌که این حرکت جز لیست ممنوعه باشد، به گام پنجم رفته و در صورتی که ممنوع نباشد، الگوریتم به گام ششم خواهد رفت.

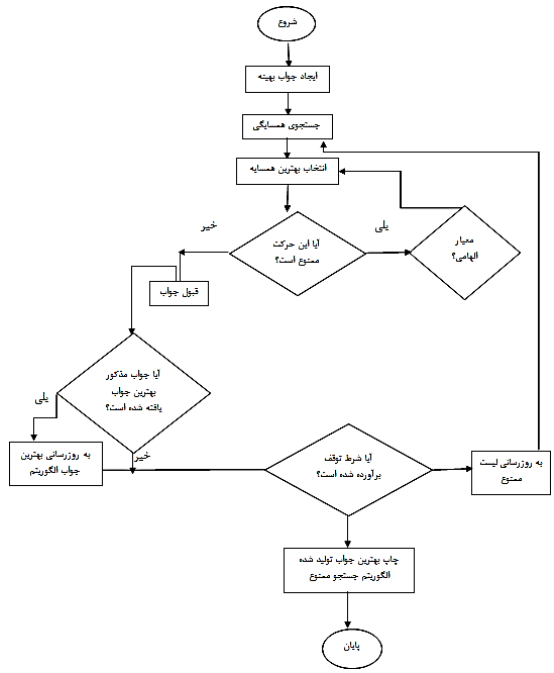
گام پنجم: در این گام، حرکت ممنوع شده با معیار آرمانی مقایسه می‌شود. در صورتی‌که معیار آرمانی برآورده شده باشد، حرکت انجام شده و در صورتی معیار آرمانی برآورده نشود، الگوریتم به گام سوم بر می‌گردد و بهترین راه‌حل بعدی را انتخاب می‌کند.

گام ششم: در این گام از راه‌حل جاری به راه‌حل جدید حرکت می‌شود و راه‌حل جدید، به‌عنوان راه‌حل جاری شناخته می‌شود.

گام هفتم: در طول الگوریتم، همواره بهترین جواب ذخیره می‌گردد. در ابتدا اولین نقطه، به‌عنوان بهترین جواب در نظر گرفته می‌شود و هر زمان که حرکتی انجام گردد، جواب جدید با بهترین جوابی که تا لحظه به دست آمده است، مقایسه می‌گردد. در صورتی‌که جواب جدید جواب بهتری باشد، جواب جدید به‌عنوان بهترین جواب ذخیره می‌گردد و در غیر این صورت، بهترین جواب تغییری نمی‌کند.

گام هشتم: بعد از هر حرکت، شرط توقف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورتی‌که شرط توقف برآورده شود، الگوریتم پایان یافته و نتایج آن گزارش می‌شود، در غیر این صورت، به گام بعدی منتقل خواهد شد.

گام نهم: بعد از هر حرکت، مشخصه حرکت جدید وارد لیست ممنوع می‌گردد و سپس لیست ممنوع بهنگام می‌شود. مدت زمان ماندن در لیست ممنوع و نحوه بهنگام‌سازی آن از ابتدا تعریف می‌گردد. براساس این قاعده، در زمان انتقال یک حرکت به لیست ممنوع، ممکن است یک یا چند حرکت قدیمی از لیست ممنوع حذف گردد. بعد از بهنگام‌سازی لیست ممنوع، الگوریتم به گام دوم رفته و به جستجوی همسایگی در اطراف جواب جدید می‌پردازد.



شکل ۱- الگوریتم جستجوی ممنوع [۱۹]

الگوریتم جستجوی ممنوع یک روش فرا اکتشافی برای پیداکردن جواب‌های ترکیبی مسائل بهینه‌سازی است. این الگوریتم دارای قابلیت انعطاف‌پذیری در به‌دست آوردن جواب‌ها و توانایی رهاشدن از تله‌ی بهینه‌های موضعی است تا به نقطه‌ی بهینه نزدیک شود [۲۰].

۵- مثال عددی

برای اعتبارسنجی روش ارائه شده در این تحقیق از داده‌های تحقیق در مثال عددی ارائه شده توسط نقی و پن [۴] استفاده شده است. داده‌ها به‌صورت تصادفی در سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ تولید شده‌اند. داده‌هایی که در مسائل مورد استفاده قرارگرفته است براساس جدول (۳) و توزیع یکنواخت است. برای به‌دست آوردن جواب بهینه براساس الگوریتم جستجوی ممنوع از نرم‌افزار CPLEX 12.1 استفاده شده است.

جدول ۴- داده‌های ورودی مثال عددی

نوع داده	توزیع آماری
هزینه‌ی تولید هر واحد	$Unif(20,60)$
هزینه‌ی نگهداری هر واحد کالای نهایی	$Unif(5,15)$
هزینه‌ی نگهداری مواد اولیه	$Unif(5,15)$
هزینه‌ی ثابت ارتباط بین دو شرکت	$Unif(1000,5000)$
هزینه‌ی حمل‌ونقل هر واحد کالا	$Unif(10,20)$
ظرفیت تولید	$Unif(350,700)$
ظرفیت حمل‌ونقل	$Unif(400,800)$
تقاضای مشتریان	$Unif(10,1000)$

نتایج حل به دو دسته‌ی مسائل کوچک و متوسط و مسائل بزرگ دسته‌بندی شده‌اند. در جداول (۵) و (۶) نتایج محاسباتی و نتایج بهینه حاصل از الگوریتم جستجوی ممنوع با نتایج تحقیق نقی و پن [۴] برای هر دو دسته از مسائل آورده شده است.

جدول ۵- مقایسه نتایج محاسباتی برای مسائل کوچک و متوسط

فاصله جواب نقی و پن (۲۰۱۳) با بهینه	فاصله جواب جستجوی ممنوع با بهینه	جواب بهینه (CPLEX 12.1)	حد پایین جواب نقی و پن (۲۰۱۳)	حد بالای جواب نقی و پن (۲۰۱۳)	جواب جستجوی ممنوع	تعداد تکرارها	تعداد مشتریان	تعداد دوره‌ها	ساختار مسأله
٪۰/۰۵	٪۰/۰۳	۱۵۱۷۶۳۳	۱۵۰۵۳۴۸	۱۵۱۸۴۵۱	۱۵۱۸۰۸۸	۵۰۰	۱	۱۸	۳ ،۵ ،۲
٪۰/۴۴	٪۰/۵۰	۲۴۳۵۸۳	۲۳۶۳۳۸	۲۴۴۶۵۲	۲۴۴۸۰۱	۵۰۰	۱	۳	۳ ،۳ ،۳ ،۳
٪۰/۰۵	٪۰/۰۴	۶۰۰۰۰۷	۵۸۶۹۹۰	۶۰۰۳۲۱	۶۰۰۲۴۷	۵۰۰	۱	۸	۳ ،۳ ،۳ ،۳
٪۰/۵۱	٪۰/۵۳	۷۷۰۷۹۸	۷۵۴۴۱۹	۷۷۴۷۸۶	۷۷۴۸۸۳	۵۰۰	۱	۶	۶ ،۵ ،۸ ،۴ ،۶
٪۰/۸۳	٪۰/۵۴	۱۵۵۴۲۹۲	۱۵۲۷۰۶۷	۱۵۶۷۲۷۲	۱۵۶۲۶۸۵	۵۰۰	۲	۷	۶ ،۶ ،۵ ،۱۳
٪۱/۱۰	٪۰/۶۷	۱۲۹۷۲۰۲	۱۲۷۳۱۳۸	۱۳۱۱۵۹۰	۱۳۰۵۸۹۳	۵۰۰	۱	۱۰	۶ ،۵ ،۸ ،۵ ،۴ ،۶
٪۰/۶۵	٪۰/۵۵	۱۰۳۵۹۹۰	۱۰۱۴۴۴۴	۱۰۴۲۷۸۹	۱۰۴۱۶۸۸	۵۰۰	۲	۶	۴ ،۵ ،۲۱ ،۵ ،۱۰
٪۰/۶۴	٪۰/۵۸	۱۵۱۶۶۹۴	۱۴۸۵۱۹۶	۱۵۲۶۴۱۹	۱۵۲۵۴۹۱	۵۰۰	۲	۶	۵ ،۵ ،۵ ،۵ ،۵ ،۵
٪۰/۱۶	٪۰/۰۳	۴۶۵۲۶۹۶	۴۵۹۷۰۰۴	۴۶۶۰۳۴۴	۴۶۵۴۰۹۲	۵۰۰	۲	۱۱	۳ ،۳ ،۳ ،۳ ،۳ ،۳ ،۳ ،۳ ،۳ ،۳
٪۱/۷۰	٪۰/۸۳	۵۷۷۳۶۶	۵۶۳۷۳۰	۵۸۷۳۳۸	۵۸۲۱۵۸	۵۰۰	۱	۷	۱۰ ،۲۰ ،۲۹ ،۲۱

جدول ۶- مقایسه نتایج محاسباتی برای مسائل بزرگ

فاصله جواب نقی و پن (۲۰۱۳) با جواب جستجوی ممنوع	حد پایین جواب نقی و پن (۲۰۱۳)	حد بالای جواب نقی و پن (۲۰۱۳)	جواب جستجوی ممنوع	تعداد تکرارها	تعداد مشتریان	تعداد دوره‌ها	ساختار مسأله
٪۰/۹۴	۲۷۴۴۰۳۶	۲۸۱۷۴۴۳	۲۷۶۱۸۷۲	۵۰۰	۱	۲۰	۳ ،۶ ،۵ ،۶ ،۱۰ ،۳
٪۱/۲۰	۴۱۳۲۱۸۴	۴۲۳۶۸۸۷	۴۱۴۴۶۶۶	۵۰۰	۲	۱۴	۴ ،۳ ،۱۰ ،۹ ،۵ ،۶ ،۸
٪۱/۲۳	۲۷۰۶۴۹۸	۲۷۸۸۷۴۳	۲۷۲۱۹۴۸	۵۰۰	۲	۱۰	۱۰ ،۶ ،۵ ،۸ ،۶ ،۶
٪۴/۴۵	۲۴۹۲۲۷۷	۲۵۶۸۴۹۴	۲۴۲۵۰۶۶	۱۰۰	۵	۴	۱۰ ،۱۰ ،۱۰ ،۱۰ ،۱۰
٪۴/۶۸	۴۰۸۲۱۳۴	۴۲۷۲۲۲۶	۳۹۹۹۸۰۸	۱۰۰	۵	۴	۲۰ ،۲۰ ،۲۰ ،۲۰ ،۲۰ ،۲۰ ،۲۰ ،۲۰ ،۲۰ ،۲۰

نتایج به‌دست آمده از اجرای الگوریتم‌ها در جداول (۵) و (۶) آورده شده است. جدول (۵) مقایسه نتایج محاسباتی برای مسائل کوچک و متوسط می‌باشد که جواب‌ها به دست آمده از دو الگوریتم را نشان می‌دهد. جدول (۶) مقایسه نتایج محاسباتی برای مسائل بزرگ را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (۵) مشخص شده است شکاف بهینگی برای مسائل کوچک و متوسط ۱٪ است و جواب‌های بدست آمده از الگوریتم ممنوع به جواب بهینه تولید شده توسط نرم‌افزار CPLEX نزدیک‌تر از روش لاگرانژ می‌باشد. همچنین داده‌های موجود در جدول (۶) نشان می‌دهد که شکاف بهینگی برای مسائل بزرگ، کمتر از ۵٪ است و هر چه تعداد تکرار بیشتر می‌شود فاصله جواب جستجوی ممنوع با جواب ارائه شده براساس روش لاگرانژ کمتر می‌شود که نشان می‌دهد الگوریتم جستجوی ممنوع جواب بهتری از الگوریتم لاگرانژ ارائه می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مدل مورد مطالعه در این تحقیق در شرایط خاص و مبتنی بر فرضیه‌های خاصی ایجاد شده است و این نیز ناشی از تنوع ساختارها و مدل‌های موجود یا قابل توسعه است. از طرفی طراحی زنجیره تأمین چابک با در نظر داشتن چندین مشتری و با حجم تقاضای زیاد در نظر گرفته شده است. و برای جلوگیری از ارضانشدن تقاضای مشتریان و به دلایل حجم زیاد تقاضا، محدودیت ظرفیت تولید و حمل و نقل در هر سطح از زنجیره تأمین چندین شرکت را برای تشکیل شبکه‌ی زنجیره تأمین انتخاب گردید. بررسی مدل مورد بحث و تحلیل‌های حاصل از آن به صورت نظری، مجموعه نتایج زیر را برای مدل مفروض در بر دارد:

- انعطاف‌پذیری تولید با در نظر گرفتن پویایی تقاضا مفهوم چابکی در طراحی زنجیره تأمین را تبیین می‌کند.

- شبکه زنجیره تأمین از جهت تولید، انبار و برنامه‌ریزی حمل و نقل برای شرکت‌های انتخاب شده برای تشکیل سازمان مجازی، مدل‌سازی آن یکپارچه گردید.

با توجه به NP-Hard بودن مسأله نگرش مؤثر برای رسیدن به جواب توسعه داده شد، که براساس الگوریتم جستجوی ممنوع و با کمک فن نوسان راهبردی به جواب‌های قابل قبولی دست یافت. مدل مورد نظر هزینه ارتباط بین شرک در دو سطح مجاور را حداقل می‌کند. با اجرای مدل و با استفاده از داده‌های موجود در مقاله پن و نقی نتایج نشان داد که، الگوریتم جستجوی ممنوع در این تحقیق بهتر از الگوریتم لاگرانژ ارائه شده توسط پن و نقی بوده که دارای سرعت همگرایی بیشتری است و عملکرد بهتری را مخصوصاً برای مسائل بزرگ دارد [۴].

به منظور تحقیقات بیشتر می‌توان ارائه روش‌های حل دقیق برای حل مسأله در ابعاد بزرگ را پیشنهاد داد. استفاده از روش‌های سرعت‌دهنده برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم برای حل مسائل با ابعاد بسیار بزرگ نیز می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد. برخی از پارامترهای موجود معمولاً دارای عدم قطعیت می‌باشندکه می‌توان از رویکردهای مختلف از قبیل برنامه‌ریزی فازی برای مدل‌سازی آنها استفاده نمود.

این پـژوهش بـا حمایـت مـالی معاونـت پـژوهش و فنـاوری دانشـگاه سیستان و بلوچستان انجام گردیده است.

۷- مراجع

۱- عقیانی مونا، جبارزاده آرمین، سجادی جعفر. "ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین خون در شرایط بحران با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان". نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت، ۱۳۹۴.

۲- زاهدی علی، صالحی امیری امیرحسین، سرور جواد، اکبری حسین‌علی. "طراحی شبکه زنجیره تأمین چند محصولی، چند سطحی، حلقه بسته تحت شرایط کاملاً فازی". هشتمین کنفرانس بین‌المللی انجمن ایرانی تحقیق در عملیات، ۱۳۹۴.

۳- فتاحی، پرویز. "الگوریتم‌های فراابتکاری". انتشارات دانشگاه بوعلی سینا. سال ۱۳۹۳.

4- Pan, F., Nagi, R. “Multi-echelon supply chain network design in agile manufacturing”. Omega, vol. 41, pp. 969-983, 2013.

5- Farahani, R., Rezapour, Sh., Drezner, T., Fallah, S. “Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications”. Omega, vol. 45, pp. 92-118, 2014.

6- Pham, T., Yenradee, P. “Optimal Supply Chain Network Design with Process Network and Bom under uncertainties: A Cace Study in Toothbrush Industry”. Computers & Industrial Engineering, 2017.

7- Agarwal, A., Shankar, R., Tiwari, M.K. “Modeling agility of supply chain”. Industrimal Marketing Management, vol, 36, pp. 443-457, 2007.

8- Adeleye, E.O., Yusuf, Y.Y. “Towards agile manufacturing: Model of competition and performance outcomes”. International Journal Systems and Management,vol. 1, pp. 93-110, 2006.

9- Jain, N.K., Jain, V.K. “Computer aided process planning for agile manufacturing environment strategy”. Elsevier, pp. 515-534, 2001.

10- Varsei, M. Polyakovskiy, S. ‘Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia”. Omega, vol. 66, pp. 236-247, 2017.

11- Rahmani, D,. Mahoodian, V. “Strategic and operational supply chain network design to reduce carbon emission considering reliability and robustness”. Journal of Cleaner Production, vol. 149, pp. 607-620, 2017.

12- Dehghan, E., Shafiei, M., Amiri, M., Jabbarzadeh, A. “Hybrid robustm stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design” Computers & Industrial Engineering, vol. 123, pp. 220-231, 2018.

13- Subulan, K., Baykasoglu, A. Ozsoydan, F. B. Tasan, A. S. Selim, H. “A case-oriented approach to a lead/ acid battery closed-loop supply chain network design under risk and uncertainty”. Journal of Manufacturing System, vol. 37, pp. 340-361, 2015.

14- Najjartabar-Bisheh, M., Delavari, M., Malmir, B. “Role of third-party companies in a sustainable supply chain design”. International Journal Logistics Systems and Management, vol. 30, pp. 95-112, 2018.

15- Lemmens, S., Decouttere, C., Vandaele, N., Bernuzzi, M. “A review of integrated supply chain network design models: Key issues for vaccine supply chain”. Chemical Engineering Research and Design, vol. 109, pp. 366-384, 2016.

16- Heidari-Fathian, H., Pasandideh, S. H. R. “Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function & Lagrangian relaxation”. Computers & Industrial Engineering, vol. 122, pp. 95-105, 2018.

17- Altiparmak, F., Karaoglan, I. “An Adaptive tabu-simulated annealing for concave cost transportation problems”. The Journal of the Opevational Research society, vol. 59, pp. 331-341, 2008.

18- Silva, M. R., Cunha, C. B. “A tabu search heuristic for the uncapacitatect single allocation p-hub maximal covering problem”. European Journal of Operational Research, vol. 262, pp. 954-965, 2017.

19- Pham, D. T., Karaboga, D. “Intelligent Optimisation Techniques: Genetic Algorithm, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks”. Springer, 1999.

20- Sun, M. “Solving the uncapacitated facility location problem using tabu search”. Computers & Operations Research,vol. 33, pp. 2563–2589, 2006

21- http://faradars.org

22- Jabbarzadeh, A., Haughton, M., Khosrojerdi, A. “Closed-loop Supply Chain Network Design under Disruption Risks: A Robust Approach with Real World Application”. Computers & Industrial Engineering, vol. 118, pp. 178-191, 2018.

23- Eskandarpour, M., Dejax, P., Peton, O. “A large neigh borhood search heuristic for supply chain network design”. Computers & Operations Research, vol. 80. pp.23-37.

24- Saghaeeian, A., Ramezanian, R. “An efficient hybrid genetic algorithm for multi-product competitive supply chain network design with price dependent demand”. Applied Soft Computing, vol. 71, pp.872-893.

25- Alavi, S.H., Jabbarzadeh, A., “Supply chain network design using trade credit and bank credit: A robust optimization model with real world application”. Computers & Industrial Engineering, vol. 125, pp. 69-86, 2018.

26- Zhen, L., et al. “Copacitated Closed-loop supply chain network design under uncertainty”. Advanced Engineering Informatics, vol. 38, pp.306-315.

27- Fathollahi-fard, A.M., Hajiaghaei-Keshteli, M., Mirjalili, S. A. “Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations”. Applied Soft Computing, vol. 71, pp.505-525.