

طراحی یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی در شرایط عدم قطعیت و حل آن با الگوریتم NSGA II

محمد مهدی صفار^۱، حامد شکوری گنجوی^{۲*}، جعفر رزمی^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۳. استاد دانشکده مهندسی صنایع پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۹۳/۲/۲۰ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۳/۷/۲۶ - تاریخ تصویب ۹۳/۱۰/۲۸)

چکیده

با گسترش و تشدید فضای رقابتی در دنیای امروزی، مدیریت زنجیره تأمین به یکی از مسائل اساسی پیش روی بنگاه‌های اقتصادی تبدیل شده است؛ طوری که همه فعالیت‌های سازمان‌ها را به منظور تولید محصولات، بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌ها، و ارائه خدمات مورد نیاز مشتریان تحت تأثیر داده است. از طرف دیگر، با افزایش حجم گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها، مدیران سازمان‌ها و محققان در پی طراحی و راه‌اندازی شبکه‌هایی برآمدند که علاوه بر بهینه‌سازی اقتصادی بر عوامل زیست‌محیطی و کاهش آلاینده‌ها در همه بخش‌ها تمرکز ویژه داشته باشند. در این تحقیق یک شبکه زنجیره تأمین چندلایه‌ای، چندمحصولی، و چنددوره‌ای با بازگشت محصولات بررسی می‌شود. ریسک‌های عملیاتی به صورت خرابی در قسمت تأمین‌کنندگان و کارخانه در نظر گرفته شد. مدل ریاضی تأمین‌کنندگان مناسب را بر اساس معیارهایی مانند قیمت فروش، متوسط خرابی، و هزینه‌های حمل‌ونقل انتخاب می‌کند. عدم قطعیت در مسئله به کمک رویکرد فازی مطرح شد و مدل فازی دوهدفه ابتدا به کمک روش خیمنز به مدل قطعی تبدیل و سپس با روش TH حل شد. به دلیل NP-Hard بودن مسائل زنجیره تأمین، در این تحقیق، برای حل مسئله در اندازه‌های بزرگ از روش NSGA II استفاده شد.

کلیدواژگان: برنامه‌ریزی چندهدفه فازی، بهینه‌سازی زیست‌محیطی، ریسک‌های عملیاتی، طراحی شبکه زنجیره تأمین

حلقه‌بسته

مقدمه

تخصیص جریان بین تسهیلات انتخاب‌شده است. در مسائل مکان‌یابی گسسته تسهیلات تعداد محدودی مکان وجود دارد که می‌توانند برای استقرار تسهیلات جدید کاندید باشند. ساده‌ترین انواع این مسائل در طراحی شبکه مسائلی است که باید در آن‌ها p تسهیل جدید به گونه‌ای مستقر شود که مجموع فواصل یا هزینه‌های تأمین تقاضای مشتریان را کمینه کند [۱]. این مسائل در پیشینه موضوع به منزله مسائل مکان‌یابی تسهیلات، بدون در نظر گرفتن ظرفیت، شناخته می‌شوند. در این مسائل هر مشتری به یک تسهیل به گونه‌ای اختصاص می‌یابد که مجموع هزینه‌ها کمینه شود [۲]. تلاش‌های اولیه برای طراحی شبکه زنجیره بهینه را ملکات و دسکین [۳] با ارائه یک مدل طراحی شبکه مکان‌یابی تسهیلات تک‌دوره‌ای، با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت، در زرنر و وسولوسکی [۴] با ارائه مدل مکان‌یابی تک‌لایه‌ای و تک‌دوره‌ای، به منظور بهینه‌سازی

مدیریت زنجیره تأمین مدیریت همه فرایندهای ساخت و تأمین، از مواد اولیه تا مشتری نهایی، است که کل زنجیره ارزش را، از استخراج مواد تا پایان عمر مفید محصول، در بر می‌گیرد. برخی فراتر می‌روند و بازیافت مواد اولیه را نیز در محدوده مدیریت زنجیره تأمین می‌دانند. در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش سرعت و حجم ارتباط در سرتاسر نقاط جهان و وسعت‌یافتن محیط رقابتی میان سازمان‌های تولیدی و خدماتی، اهمیت طراحی و اعمال یک زنجیره تأمین بهینه و اقتصادی بیش از پیش مورد توجه مدیران و مسئولان قرار گرفته است. طراحی شبکه زنجیره تأمین بر اساس کارایی عوامل استراتژیک و با توجه به نیازمندی‌های مشتریان آن زنجیره پایه‌ریزی می‌شود. از تصمیم‌های مهم در زنجیره تأمین تصمیم در زمینه سطوح استراتژیک آن است. مهم‌ترین موضوع در طراحی استراتژیک زنجیره تأمین یا همان طراحی شبکه مکان‌یابی تسهیلات و سپس

کردن محصولات بازتولیدی است. ابراهیم‌نژاد و همکاران [۱۳] در پژوهش خود، با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فازی، به مدل‌سازی یکپارچه خرید-تولید-توزیع پرداختند. در این مدل برخی پارامترها، از قبیل تقاضا و ظرفیت و هزینه فازی، در نظر گرفته شد. تارخ و همکاران [۱۴] در پژوهش خود با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط یک شبکه لجستیک یکپارچه تک‌دوره‌ای چندمحصولی را همراه ظرفیت‌های محدود مدل کردند. در این مدل هدف کمینه‌سازی هزینه کل شبکه است. پیشوایی و رزمی [۱۵] یک مدل چندهدفه فازی برای مسئله زنجیره تأمین بازگشتی ارائه کردند که علاوه بر کمینه‌کردن هزینه، کمینه‌کردن آثار زیست‌محیطی را نیز به منزله هدف در نظر می‌گیرد. مدل مفروض تک‌محصولی است و بر اساس یک مثال موردی واقعی- کارخانه سرنگ‌سازی- کارایی خود را نشان می‌دهد. پیشوایی و همکاران [۱۶] با گسترش یک مدل دوهدفه برای مسئله زنجیره تأمین، علاوه بر در نظر گرفتن هزینه‌های اقتصادی، آثار اجتماعی را نیز در مدل خود در نظر گرفتند. همچنین برای نشان دادن عملکرد مناسب مدل خود یک مطالعه موردی را بررسی کردند. پیشوایی و همکاران [۱۷] در پژوهش خود یک زنجیره تأمین دوسطحی را بررسی کردند که هم‌زمان به کمینه‌کردن هزینه و آثار زیست‌محیطی می‌پردازد. آثار زیست‌محیطی در این پژوهش در قالب انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در نظر گرفته شد. همان‌طور که پیشینه موضوع نشان می‌دهد، تا به حال تحقیقی مشاهده نشده است که به طور هم‌زمان هم مسائل زیست‌محیطی و هم هزینه را در مسئله طراحی زنجیره تأمین، با فروض واقع‌گرایانه و وسعت پارامترهای دارای عدم قطعیت، در نظر گرفته باشد. جدول ۱ شکاف تحقیقاتی در این زمینه و ویژگی‌ها و نوآوری‌های این پژوهش را به طور خلاصه نشان می‌دهد. در ادامه، برای روشن شدن موضوع، مسئله بررسی و فروض مرتبط با آن به طور مفصل بیان می‌شود.

تعریف مسئله

در این بخش مشخصات و فرضیات این پژوهش به طور کامل بیان می‌شود. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، محصولات تولیدشده در کارخانه از طریق مراکز توزیع مستقیم به مشتریان انتقال داده می‌شود. فرض بر آن است که درصدی از تقاضای محصولات در دوره قبل، به عنوان محصولات معیوب، از طریق مراکز مشتری به مراکز جمع‌آوری و بازرسی فرستاده می‌شوند. پس از عملیات

هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های جایابی تسهیلات، آمبروزینو و آکیوتلا [۵] با ارائه یک مدل پویا (چند دوره زمانی) در شرایط قطعیت برای یک شبکه چهارلایه‌ای، و تان و همکاران [۶] با ارائه یک مدل پویا تحت شرایط قطعیت انجام دادند. در این مدل‌ها پارامترهایی مانند تقاضا، قیمت فروش، هزینه راه‌اندازی تسهیلات، مکان‌یابی تسهیلات، و حمل‌ونقل در دوره‌های زمانی مختلف (یا تک‌دوره‌ای) در نظر گرفته شدند. در همه پژوهش‌های یادشده، که تعدادی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه زنجیره تأمین است، زنجیره تأمین به صورت رو به جلو بررسی شده است؛ به گونه‌ای که سازمان‌ها هیچ مسئولیتی در قبال محصولات، پس از تحویل به مشتری، ندارند. به تدریج، با افزایش محیط رقابتی، مسئولان و صاحبان صنایع، نه تنها برای جذب مشتریان بیشتر، بلکه برای از دست‌دادن مشتریان خود، جریان‌های برگشتی را در مدل‌های طراحی زنجیره تأمین وارد کردند. از تحقیقات انجام‌شده در این بخش پژوهش لو و بوستل [۷] است. آن‌ها یک مدل طراحی شبکه سه‌لایه‌ای ارائه کردند که به دنبال مکان‌یابی تسهیلات در شبکه لجستیک معکوس است. به عبارت دیگر، علاوه بر مکان‌یابی تسهیلات، مراکز جمع‌آوری و بازسازی را نیز در نظر می‌گیرد. همچنین در پژوهشی که پیشوایی و شکوری [۸] انجام دادند یک مدل جهت کمینه‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و احداث تسهیلات در یک شبکه با جریان برگشتی معرفی شد. در پژوهشی دیگر پیشوایی و همکاران [۹] مدلی ارائه کردند که هم جریان رو به جلو و هم جریان برگشتی را به طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. آن‌ها در این پژوهش یک تابع دوهدفه با اهداف کاهش هزینه‌های ثابت و متغیر و افزایش پاسخگویی شبکه ارائه کردند. جریان رو به جلو فرایندهای توزیع محصولات به مشتریان و جریان برگشتی و فرایندهای جمع‌آوری محصولات برگشتی از مشتریان را در نظر می‌گیرد. همچنین در پژوهش سایید و همکاران [۱۰] یک مدل یکپارچه لجستیک رو به جلو و برگشتی جهت انتخاب مکان مراکز توزیع و جمع‌آوری ارائه شد. تارخ و ناصری [۱۱] در پژوهش خود یک شبکه توزیع را برای زنجیره تأمین چندسطحی مطالعه و با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط هزینه‌های شبکه توزیع را در مسئله مورد مطالعه کمینه کردند. آن‌ها برای حل مدل از ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کمک گرفتند. آقای و زندی [۱۲] در پژوهش خود یک زنجیره تأمین دولایه‌ای را با امکان بازگشت کالا بررسی کردند. این زنجیره تأمین شامل بازتولید محصولات بازگشتی و سیستم انبار

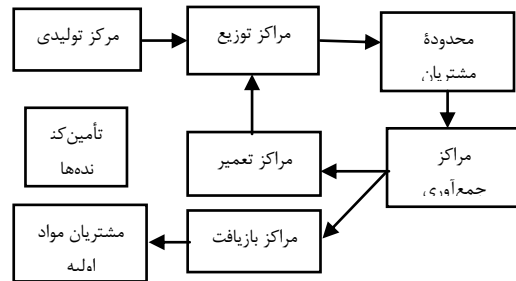
مشتری فرستاده می‌شوند. ریسک‌های عملیاتی در قالب خرابی در این مسئله بیان شده است. در مدل هزینه‌های احداث تسهیلات، حمل‌ونقل، عملیات تعمیر و تولید و بازیافت، ضرایب پخش CO_2 ، زمان در دسترس ماشین‌آلات، میزان خرابی و جرایم خرابی‌ها، میزان بازگشت محصولات، و درصد تعمیرپذیر به دلیل ذات عدم قطعیت در دنیای واقعی به صورت فازی در نظر گرفته شدند. پارامترهای فازی با علامت " ~ " روی آن‌ها قابل تشخیص‌اند.

بازرسی، اجناس قابل تعمیر به قسمت تعمیر و اجناس غیر قابل استفاده به مرکز بازیافت و از آنجا برای مشتریان مواد اولیه فرستاده می‌شوند. در مرکز تعمیر، محصولات پس از تعمیر، برای استفاده مجدد، دوباره از طریق مراکز توزیع، به مراکز مشتری فرستاده می‌شوند. گفتنی است، با توجه به محدود بودن ظرفیت تولید در کارخانه، برای تأمین نیاز مشتریان می‌توان محصولات را برون‌سپاری کرد و آن‌ها را از تأمین‌کنندگان خرید. اجناس خرید شده سپس برای عملیات بسته‌بندی به کارخانه منتقل و از آنجا به مراکز

جدول ۱. شکاف تحقیقاتی موجود در مقالات اخیر

مقالات	توابع هدف		شبکه	زنجیره تأمین سبز		ریسک عملیاتی	روش حل	رویکرد بازگشتی		
	سال	هزینه		چندمحصولی	چندپروودی				خرابی	عدم قطعیت
Tseng et al.	2014	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Ramezani et al.	2014	*	*	*	*	*	*	*	*	*
J. Zeballos	2014	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Qiang	2013	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Hassanzadeh and Zhang	2013	*	*	*	*	*	*	*	*	*
این پژوهش	2014	*	*	*	*	*	*	*	*	*

- مقدار گاز CO_2 منتشر شده ناشی از حمل‌ونقل با ماشین‌آلات مختلف غیر قطعی در نظر گرفته شده است.
- احتمال رسیدن جنس خراب به دست مشتری وجود دارد که در قبال آن باید جریمه پرداخت شود.
- تعداد تسهیلاتی که باید احداث شوند از پیش تعیین نشده است.
- تعداد دستگاه‌های تولید، تعمیر، و بازیافت از پیش تعیین نشده است.



شکل ۱. زنجیره تأمین یکپارچه

خروجی مدل

مدل به دنبال یافتن مکان بهینه استقرار مراکز توزیع، جمع‌آوری و بازرسی، مراکز تعمیر، و مراکز بازیافت است. مقدار جریان بهینه را بین همه تسهیلاتی که در کل شبکه با هم مرتبط‌اند تعیین می‌کند. تعیین می‌کند چه تعداد ماشین‌آلات برای کدام مرکز تولید و تعمیر و بازیافت خریداری شود. چه تعداد از کدام محصول با کدام ماشین تولید و تعمیر یا بازیافت شوند. چه مقدار از مواد اولیه به کدام مشتری مواد اولیه فروخته شود و چه تعداد از کدام محصول از کدام تأمین‌کننده خریداری شود.

فرضیه‌های مسئله

- ظرفیت تسهیلات (مرکز تولید، مراکز تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع، مراکز تعمیر، مراکز بازیافت) محدود است.
- مکان نواحی مشتریان و مکان مشتریان مواد اولیه و نیز تأمین‌کنندگان ثابت و از پیش تعیین شده است.
- همه تقاضا باید برآورده شود.
- مکان‌های بالقوه برای تأسیس مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری و تعمیر و بازیافت معلوم و به صورت گسسته است.
- از لحاظ میزان جابه‌جایی روی شبکه محدودیت ظرفیت انتقالی وجود ندارد.
- مدل چندمحصولی و چنددوره‌ای است.

		اندیس‌ها
مراکز توزیع r با نوع حمل و نقل p		I اندیس تأمین‌کنندگان $i = 0, 1, \dots, I$
هزینه حمل یک واحد از محصول j از مراکز توزیع r به مرکز مشتری k با نوع حمل و نقل p	\tilde{a}_{jk}^p	J اندیس محصولات $j = 0, 1, \dots, J$
هزینه حمل یک واحد از محصول j از مرکز مشتری k به مرکز جمع‌آوری و بازرسی q با نوع حمل و نقل p	\tilde{b}_{jkq}^p	R اندیس محل‌های کاندید برای احداث مراکز توزیع $r = 0, 1, \dots, R$
هزینه حمل یک واحد از محصول j از مرکز جمع‌آوری و بازرسی q به مرکز تعمیر m با نوع حمل و نقل p	\tilde{v}_{jqm}^p	V اندیس محل‌های ثابت مشتریان مواد اولیه $v = 1, 2, \dots, V$
هزینه حمل یک واحد از محصول j از مرکز تعمیر m به مراکز توزیع r با نوع حمل و نقل p	\tilde{s}_{jmr}^p	K اندیس محل‌های ثابت مراکز مشتری $k = 1, 2, \dots, K$
هزینه حمل یک واحد از محصول j از مرکز جمع‌آوری و بازرسی q به مرکز بازیافت n با نوع حمل و نقل p	\tilde{w}_{jqn}^p	Q اندیس محل‌های کاندید برای احداث مراکز جمع‌آوری و بازرسی $q = 1, 2, \dots, Q$
هزینه حمل یک واحد از ماده اولیه از مرکز بازیافت n به مشتری ماده اولیه v با نوع حمل و نقل p	\tilde{v}_{nv}^p	M اندیس محل‌های کاندید برای احداث مراکز تعمیر $m = 1, 2, \dots, M$
زمان در دسترس یک ماشین در کارخانه	Ti	N اندیس محل‌های کاندید برای احداث مراکز بازیافت $n = 1, 2, \dots, N$
زمان لازم برای تولید یک واحد از محصول j	Pt_j	Z اندیس ظرفیت در دسترس برای مراکز توزیع $z = 1, 2, \dots, Z$
زمان در دسترس یک ماشین در مرکز تعمیر	TM	P اندیس روش‌های مختلف حمل و نقل $p = 1, 2, \dots, P$
زمان لازم برای تعمیر یک واحد از محصول j	PTM_j	T اندیس زمان $t = 1, 2, \dots, T$
زمان در دسترس یک ماشین در مرکز بازیافت	TN	
زمان لازم برای بازیافت یک واحد از محصول j	PTN_j	
ظرفیت تأمین‌کننده i برای تولید محصول j	\tilde{C}_{ji}	
حجم مرکز توزیع در محل r با ظرفیت z	VoR_r^z	
ضریب پخش CO ₂ برای حمل یک واحد از محصول j از تأمین‌کننده i به کارخانه با نوع حمل p	\tilde{t}_{ji}^p	
ضریب پخش CO ₂ به‌ازای حمل یک واحد از محصول j از کارخانه به مراکز توزیع r با نوع حمل p	$\tilde{\phi}_{jr}^p$	
ضریب پخش CO ₂ برای حمل یک واحد محصول j از مرکز توزیع r به مشتری k با نوع حمل p	\tilde{J}_{jrk}^p	
ضریب پخش CO ₂ برای حمل یک واحد محصول j از مشتری k به بازرسی q با نوع حمل p	\tilde{g}_{jkq}^p	
ضریب پخش CO ₂ به‌ازای حمل یک واحد	\tilde{Y}_{jqm}^p	
		پارامترها
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز توزیع r با سطح ظرفیت z	\tilde{H}_r^z	
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری q	\tilde{h}_q	
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز تعمیر m	\tilde{r}_m	
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز بازیافت n	\tilde{f}_n	
هزینه خرید یک ماشین در کارخانه	Cs	
هزینه خرید یک ماشین در مرکز تعمیر m	Cs_m	
هزینه خرید یک ماشین در مرکز بازیافت n	Cs_n	
هزینه تولید یک واحد از محصول j در کارخانه	\tilde{h}_j	
هزینه تعمیر یک واحد از محصول j در مرکز تعمیر m	$\tilde{\rho}_{jm}$	
هزینه بازیافت یک واحد از محصول j در مرکز بازیافت n	\tilde{t}_{jn}	
هزینه حمل یک واحد از محصول j از تأمین‌کننده i به کارخانه با نوع حمل و نقل p	\tilde{T}_{ji}^p	
هزینه حمل یک واحد از محصول j از کارخانه به	\tilde{C}_{jr}^p	

مقداری از محصول j که از مرکز مشتری k با نوع حمل‌ونقل p در پیوند t به مرکز جمع‌آوری و بازرسی q منتقل می‌شود.	δ_{jkqt}^p	معمیر m با نوع حمل p	
مقداری از محصول j که از مرکز جمع‌آوری و بازرسی q با نوع حمل‌ونقل p در پیوند t به مرکز تعمیر m منتقل می‌شود.	M_{jqmt}^p	ضریب پخش CO ₂ به‌ازای حمل یک واحد محصول j از مرکز بازرسی q به مرکز بازیافت n	$\tilde{\psi}_{jqn}^p$
مقداری از محصول j که از مرکز جمع‌آوری و بازرسی q با نوع حمل‌ونقل p در پیوند t به مرکز بازیافت n منتقل می‌شود.	I_{jqnt}^p	ضریب پخش CO ₂ به‌ازای حمل یک واحد محصول j از مرکز تعمیر m به مراکز توزیع r با نوع حمل p	$\tilde{\pi}_{jmr}^p$
مقداری از محصول j که از مرکز تعمیر m با نوع حمل‌ونقل p در پیوند t به مراکز توزیع r منتقل می‌شود.	ζ_{jmr}^p	ضریب پخش CO ₂ برای حمل یک واحد از ماده اولیه n از مرکز بازیافت n به مشتری ماده اولیه v با نوع حمل p	$\tilde{\delta}_{nv}^p$
مقداری از ماده اولیه n که از مرکز بازیافت n با نوع حمل‌ونقل p در پیوند t به مشتری ماده اولیه v منتقل می‌شود.	U_{nvt}^p	نرخ خرابی محصول j از تأمین‌کننده i	\tilde{q}_{ji}
مقداری از محصول نوع j که در پیوند t با ماشین در کارخانه تولید می‌شود.	z_{jt}	نرخ خرابی محصول j تولیدشده در کارخانه	\tilde{g}_j
تعداد ماشین خریداری‌شده در کارخانه	NM	نرخ بازگشت محصول j از مشتری k در پیوند t	$\tilde{\omega}_{jkt}$
مقداری از محصول نوع j که در پیوند t در مرکز تعمیر m تعمیر می‌شود.	m_{jmt}	مقدار محصول بازگشتی نوع j از مشتری k در پیوند t	\tilde{r}_{jkt}
تعداد ماشین خریداری‌شده در مرکز تعمیر m	NoM_m	درصد قابل تعمیر محصول نوع j که در مرکز بازرسی قرار دارد.	$\tilde{\rho}_j$
مقداری از محصول نوع j که در پیوند t در مرکز بازیافت n بازیافت می‌شود.	i_{jnt}	مقدار ماده اولیه‌ای که یک واحد از محصول نوع j تولید می‌کند.	Fr_j
تعداد ماشین خریداری‌شده در مرکز بازیافت n	NoN_n	قیمت خرید و بسته‌بندی یک واحد از محصول نوع j از تأمین‌کننده i	\tilde{p}_{ji}
$1 =$ اگر مراکز توزیع در محل r با سطح ظرفیت z تأسیس شود؛ در غیر این صورت $= 0$	β_r^z	هزینه خرابی یک واحد از محصول نوع j	\tilde{e}_j
$1 =$ اگر مرکز جمع‌آوری و بازرسی در محل q تأسیس شود؛ در غیر این صورت $= 0$	z_q	قیمت فروش یک واحد از ماده اولیه به مشتری ماده اولیه v	\tilde{c}_{ov}
$1 =$ اگر مرکز تعمیر در محل m تأسیس شود؛ در غیر این صورت $= 0$	ϖ_m	تقاضای محصول j در مرکز مشتری k در پیوند t	\tilde{d}_{jkt}
$1 =$ اگر مرکز بازیافت در محل n تأسیس شود؛ در غیر این صورت $= 0$	ρ_n	حجم اشغال‌شده با یک واحد محصول j	Vo_j
		متغیرهای تصمیم	
		مقداری از محصول j که از تأمین‌کننده i با نوع حمل‌ونقل p در پیوند t به کارخانه منتقل می‌شود.	x_{jit}^p
		مقداری از محصول j که از کارخانه با نوع حمل p در پیوند t به مراکز توزیع r منتقل می‌شود.	y_{jrt}^p
		مقداری از محصول j که از مراکز توزیع r با نوع حمل‌ونقل p در پیوند t به مرکز مشتری k منتقل می‌شود.	χ_{jrtk}^p

مدل فازی پیشنهادی

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t x_{jit}^p \cdot \tilde{p}_{ji} + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t \tilde{q}_{ji} x_{jit}^p \tilde{e}_j \\ & + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t x_{jit}^p \tilde{T}_{ji}^p + \sum_j \sum_t z_{jt} \tilde{h}_j \\ & + NM \cdot Cs + \sum_j \sum_t z_{jt} \tilde{g}_j \tilde{e}_j + \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t y_{ijt}^p \tilde{c}_{ij}^p + \sum_r \sum_z \tilde{H}_r^z \cdot \beta_r^z \\ & + \sum_r \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \chi_{jrk}^p \tilde{a}_{jrk}^p + \sum_r \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \delta_{jkqt}^p \tilde{b}_{jkq}^p + \sum_q \tilde{h}_q \cdot Z_q \\ & + \sum_q \sum_j \sum_m \sum_p \sum_t M_{jqm}^p \tilde{v}_{jqm}^p + \sum_q \sum_n \sum_j \sum_p \sum_t I_{jqnt}^p \tilde{w}_{jqn}^p \\ & + \sum_m \tilde{r}_m \cdot \omega_m + \sum_m \sum_j \sum_t m_{jmt} \cdot \tilde{\rho}_{jm} + \sum_m Cs_m \cdot NoM_m \\ & + \sum_m \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t \zeta_{jmnt}^p \tilde{s}_{jmr}^p + \sum_n \sum_v \sum_p \sum_t U_{nvt}^p \tilde{v}_{nv}^p + \sum_n \tilde{f}_n \cdot \phi_n \\ & + \sum_n \sum_j \sum_t i_{jnt} \cdot \tilde{t}_{jn} + \sum_n Cs_n \cdot NoN_n - \sum_n \sum_v \sum_p \sum_t U_{nvt}^p \cdot C\tilde{o}_v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t x_{jit}^p \tilde{f}_{ji}^p + \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t y_{jrt}^p \tilde{\phi}_{jr}^p \\ & + \sum_r \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \chi_{jrk}^p \tilde{J}_{jrk}^p + \sum_k \sum_q \sum_j \sum_p \sum_t \delta_{jkqt}^p \tilde{g}_{jkq}^p \\ & + \sum_q \sum_m \sum_j \sum_p \sum_t M_{jqm}^p \tilde{Y}_{jqm}^p + \sum_q \sum_n \sum_j \sum_p \sum_t I_{jqnt}^p \tilde{W}_{jqn}^p \\ & + \sum_m \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t \zeta_{jmnt}^p \tilde{\pi}_{jmr}^p + \sum_n \sum_v \sum_p \sum_t U_{nvt}^p \tilde{\delta}_{nv}^p \end{aligned}$$

$$\sum_k \sum_p \delta_{jkqt}^p = \sum_m \sum_p M_{jqmt}^p + \sum_n \sum_p I_{jqnt}^p \quad \forall q, j, t \quad (V)$$

محدویت‌ها

$$\tilde{\phi}_j \cdot \sum_k \sum_p \delta_{jkqt}^p = \sum_m \sum_p M_{jqmt}^p \quad \forall q, j, t \quad (A) \quad \sum_p X_{jit}^p \leq \tilde{C}_{ji}, \quad \forall i, j, t \quad (1)$$

$$\sum_q \sum_p M_{jqmt}^p = \sum_r \sum_p \zeta_{jmnt}^p \quad \forall m, j, t \quad (9) \quad \sum_r \sum_p \chi_{jrk}^p \geq \tilde{d}_{jk}, \quad \forall j, t, k \quad (2)$$

$$m_{jmt} = \sum_q \sum_p M_{jqmt}^p \quad \forall j, m, t \quad (10) \quad \sum_j Z_{jt} \cdot P\tilde{f}_j \leq NM T\tilde{i} \quad \forall t \quad (3)$$

$$Fr_j \cdot \sum_q \sum_p I_{jqnt}^p = \sum_v \sum_p U_{nvt}^p \quad \forall n, j, t \quad (11) \quad \sum_i \sum_p x_{jit}^p + z_{jt} = \sum_r \sum_p y_{jrt}^p \quad \forall j, t \quad (4)$$

$$i_{jnt} = \sum_q \sum_p I_{jqnt}^p \quad \forall j, t, n \quad (12) \quad \sum_p y_{jrt}^p + \sum_m \sum_p \zeta_{jmnt}^p = \sum_k \sum_p \chi_{jrk}^p \quad \forall r, j, t \quad (5)$$

$$\sum_j \left[\left(\sum_k \sum_p \chi_{jrk}^p \right) Vo_j \right] \leq \sum_z VoR_r^z \cdot \beta_r^z \quad \forall r, t \quad (13) \quad \sum_q \sum_p \delta_{jkqt}^p \geq \tilde{r}_{jkt} \left(= \tilde{\alpha}_{jkt} \cdot \tilde{d}_{jk(t-1)} \right) \quad \forall k, j, t \quad (6)$$

$$\sum_j m_{jmt} \cdot P\tilde{T}M_j \leq \tilde{T}M \cdot NoM_m \quad \forall m, t \quad (14)$$

محدودیت‌های ۱۰ و ۱۲ تضمین‌کننده تکمیل تقاضا به کمک ماشین‌آلات موجود (خریداری شده) در بخش تعمیر و بازیافت است. محدودیت‌های ۱۳ تا ۱۵ اطمینان حاصل می‌کند به ترتیب محدودیت ظرفیت انبار، تعمیر، و بازیافت در مسئله در نظر گرفته شود. محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند یک مرکز توزیع فقط با یک سطح ظرفیت احداث شود. محدودیت‌های ۱۷ تا ۱۹ تضمین می‌کند به ترتیب تا زمانی که مرکز جمع‌آوری، تعمیر، و بازیافتی احداث نشود ماشینی برای آن خریداری نشود.

روش حل پیشنهادی

مرحله اول: تعیین مدل کمکی قطعی برای مدل فازی اصلی

در پیشینه موضوع مدل‌های فازی روش‌هایی متعددی برای مواجهه با مدل‌های فازی، که دارای ضرایب غیر قطعی در محدودیت‌ها و توابع هدف هستند، معرفی شدند (خیمنز و همکاران [۲۲]؛ وانگ و لیانگ [۱۸]؛ پارا و همکاران [۱۹]). در روش حل ارائه شده در این پژوهش، به منظور تبدیل مدل پیشنهادی فازی خطی مختلط عدد صحیح به مدل قطعی معادل آن، روش پیشنهادی خیمنز و همکاران [۲۲]، به علت کارایی بالای آن، به کار رفت. روش خیمنز و همکاران [۲۲] بر مبنای مفاهیم «فاصله مورد انتظار» و «امید ریاضی» پایه‌ریزی شده است که نخستین بار یاگر [۲۰] آن را معرفی کرد. برای معرفی این مفاهیم، عدد فازی مثلثی مفروض است. معادله ۲۱ می‌تواند به منزله توابع عضویت تعریف شود:

$$\mu_{\tilde{c}}(x) = \begin{cases} f_c(x) = \frac{x-c^p}{c^m-c^p} & \text{if } c^p \leq x \leq c^m \\ 1 & \text{if } x = c^m \\ g_c(x) = \frac{c^o-x}{c^o-c^m} & \text{if } c^m \leq x \leq c^o \\ 0 & \text{if } x \leq c^p \text{ or } x \geq c^o \end{cases} \quad (21)$$

فاصله مورد انتظار (EI) و امید ریاضی (EV) عدد فازی مثلثی به ترتیب با رابطه‌های ۲۲ و ۲۳ تعریف می‌شوند:

$$EI(\tilde{c}) = [E_1^c, E_2^c] = \left[\int_0^1 f_c^{-1}(x) dx, \int_0^1 g_c^{-1}(x) dx \right] \quad (22)$$

$$= \left[\frac{1}{2}(c^p + c^m), \frac{1}{2}(c^m + c^o) \right]$$

$$\sum_j i_{jnt} \cdot PTN_j \leq T\tilde{N} \cdot NoN_n \quad \forall n, t \quad (15)$$

$$\sum_z \beta_r^z \leq 1 \quad \forall r \quad (16)$$

$$\sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \delta_{jkqt}^p \leq M \cdot z_q \quad \forall q \quad (17)$$

$$\sum_q \sum_j \sum_p \sum_t M_{jqmt}^p + NoM_m \leq M \cdot \bar{\omega}_m \quad \forall m \quad (18)$$

$$\sum_q \sum_j \sum_p \sum_t I_{jqmt}^p + \sum_j \sum_s \sum_t i_{jnt}^s \leq M \cdot \phi_n \quad \forall n \quad (19)$$

$$\beta_r^z, z_q, \bar{\omega}_m, \phi_n \in \{0,1\}$$

$$\tilde{H}_r^z, \tilde{h}_q, \tilde{r}_m, \tilde{f}_n, Cs_m, Cs_n \geq 0$$

$$\tilde{h}_j, \tilde{\rho}_{jm}, \tilde{\tau}_{jn}, \tilde{T}_{ji}^p, \tilde{c}_{jr}^p, \tilde{a}_{jr}^p, \tilde{b}_{jkq}^p, \tilde{v}_{jqm}^p, \tilde{s}_{jmr}^p, \tilde{w}_{jqn}^p \geq 0$$

$$T\tilde{i}, \tilde{P}_j, T\tilde{M}, P\tilde{T}M_j, T\tilde{N}, P\tilde{T}N_j, \tilde{C}_{ji}, \forall o R_r^z, \forall nv^p \geq 0$$

$$\tilde{r}_{ji}^p, \tilde{\phi}_{jr}^p, \tilde{f}_{jr}^p, \tilde{\rho}_{jkq}^p, \tilde{\gamma}_{jqm}^p, \tilde{\psi}_{jqn}^p, \tilde{\pi}_{jmr}^p, \tilde{\delta}_{nv}^p \geq 0 \quad (20)$$

$$\tilde{L}_j, \tilde{\epsilon}_j, \tilde{\kappa}_j, \tilde{q}_{ji}, \tilde{\theta}_j, \tilde{\omega}_{jkt}, \tilde{r}_{jkt}, \tilde{\phi}_j \geq 0$$

$$\tilde{F}_r, \tilde{p}_{ji}, \tilde{e}_j, \tilde{C}o_v, \forall o_j, U_{nvt}^p \geq 0$$

$$\tilde{d}_{jkt}, x_{jnt}^p, y_{jnt}^p, \chi_{jrt}^p, \delta_{jkqt}^p, M_{jqmt}^p, I_{jqmt}^p$$

$$\zeta_{jmt}^p, z_{jt}, NM, m_{jmt}, NoM_m, i_{jnt}, NoN_n \in Z^+$$

$$\forall i, j, r, v, k, q, m, n, z, p, t$$

در واقع، تابع هدف اول به دنبال کم کردن هزینه‌هاست (به ترتیب: خرید از تأمین‌کننده، جریمه خرابی جنس برون‌سپاری شده، حمل از تأمین‌کننده تا کارخانه، تولید، خرید ماشین‌آلات تولیدی، جریمه خرابی جنس تولیدی، حمل از کارخانه تا مرکز توزیع، احداث مرکز توزیع، حمل از مرکز توزیع تا مشتری، حمل از مرکز مشتری تا مرکز جمع‌آوری، احداث مرکز جمع‌آوری، حمل از مرکز جمع‌آوری تا مرکز تعمیر و بازیافت، احداث مرکز تعمیر، تعمیر، خرید ماشین‌آلات تعمیر، حمل از مرکز تعمیر تا مرکز توزیع، حمل از مرکز بازیافت تا مشتری ماده اولیه، احداث مرکز بازیافت، بازیافت، خرید ماشین‌آلات بازیافت، سود حاصل از فروش ماده اولیه) و تابع هدف دوم به دنبال حداقل کردن انتشار گازهای آلاینده حاصل از حمل بین تسهیلات. محدودیت ۱ تضمین می‌کند بیشتر از ظرفیت تأمین‌کنندگان از آن‌ها خرید نکنیم. محدودیت ۲ تضمین‌کننده ارضای تقاضای مشتری است. محدودیت ۳ تضمین می‌کند میزان تولید کارخانه بیشتر از ظرفیت تولید آن نباشد. محدودیت‌های ۴ تا ۹ و ۱۱ به ترتیب بیان‌کننده وجود تعادل بین ورودی و خروجی در قسمت تولید، توزیع، مشتری، بازرسی، تعمیر، و بازیافت است.

$$\tilde{a} \geq_{\alpha/2} \tilde{b} \quad , \quad \tilde{a} \leq_{\alpha/2} \tilde{b} \quad (25)$$

رابطه ۲۵ معادل رابطه ۲۶ است و می‌تواند چنین نوشته شود:

$$\frac{\alpha}{2} \leq \mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \leq 1 - \frac{\alpha}{2} \quad (26)$$

بر اساس آنچه آمد، تغییرات زیر در توابع هدف و محدودیت‌های ۱، ۲، ۳، ۶، ۸ (که این محدودیت به دو محدودیت تبدیل می‌شود)، ۱۴، ۱۵ مدل فازی پیشنهادی رخ می‌دهد و به ترتیب آن‌ها را به توابع و محدودیت‌های معادل ۱'، ۲'، ۳'، ۶'، ۸'، ۱۴'، ۱۵' تبدیل می‌کند. با این عمل، مدل فازی پیشنهادی به مدل قطعی کمکی تبدیل می‌شود. گفتنی است محدودیت‌هایی که در قسمت مدل قطعی کمکی آورده نشده به تغییر نیاز نداشته است و به همان صورت در مدل قطعی کمکی آورده می‌شود که از بازنویسی دوباره آن‌ها به دلیل محدودیت فضا خودداری شد.

$$EV(\tilde{c}) = \frac{E_1^c + E_2^c}{2} = \frac{c^p + 2c^m + c^o}{4} \quad (23)$$

همچنین، برای هر جفت اعداد فازی \tilde{a} و \tilde{b} درجه بزرگ‌تر بودن \tilde{a} از \tilde{b} با رابطه ۲۴ تعریف می‌شود:

$$\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) = \begin{cases} 0 & \text{if } E_2^a - E_1^b < 0 \\ \frac{E_2^a - E_1^b}{E_2^a - E_1^b - (E_1^a - E_2^b)} & \text{if } E_1^a - E_2^b < 0 < E_2^a - E_1^b \\ 1 & \text{if } E_1^a - E_2^b > 0 \end{cases} \quad (24)$$

نشان‌دهنده درجه بزرگ‌تر بودن \tilde{a} از \tilde{b} $\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b})$ است و هنگامی که $\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq \alpha$ باشد، گفته می‌شود « \tilde{a} حداقل با درجه α بزرگ‌تر یا مساوی \tilde{b} است» و به صورت $\tilde{a} \geq_{\alpha} \tilde{b}$ نمایش داده می‌شود. علاوه بر این، برای هر جفت اعداد فازی \tilde{a} و \tilde{b} گفته می‌شود « \tilde{a} با درجه α با \tilde{b} برابر است» اگر دو نامساوی زیر هم‌زمان برقرار باشند:

مدل قطعی کمکی

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t x_{jit}^p \left(\frac{P_{ji}^p + 2P_{ji}^m + P_{ji}^o}{4} \right) + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t \left(\frac{q_{ji}^p + 2q_{ji}^m + q_{ji}^o}{4} \right) x_{jit}^p \left(\frac{e_j^p + 2e_j^m + e_j^o}{4} \right) \\ & + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t x_{jit}^p \left(\frac{T_{ji}^p + 2T_{ji}^m + T_{ji}^o}{4} \right) + \sum_j \sum_t z_{jt} \left(\frac{h_j^p + 2h_j^m + h_j^o}{4} \right) + NM \quad .Cs \\ & + \sum_j \sum_t z_{jt} \left(\frac{g_j^p + 2g_j^m + g_j^o}{4} \right) \left(\frac{e_j^p + 2e_j^m + e_j^o}{4} \right) \\ & + \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t y_{jrt}^p \left(\frac{c_{rj}^p + 2c_{rj}^m + c_{rj}^o}{4} \right) + \sum_r \sum_z \left(\frac{H_r^z + 2H_r^m + H_r^o}{4} \right) \cdot \beta_r^z \\ & + \sum_r \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \chi_{jrkt}^p \left(\frac{a_{jrkt}^p + 2a_{jrkt}^m + a_{jrkt}^o}{4} \right) + \sum_k \sum_q \sum_j \sum_p \sum_t \delta_{jkqt}^p \left(\frac{b_{jkq}^p + 2b_{jkq}^m + b_{jkq}^o}{4} \right) \\ & + \sum_q \left(\frac{h_q^p + 2h_q^m + h_q^o}{4} \right) \cdot Z_q + \sum_q \sum_m \sum_j \sum_p \sum_t M_{jqmt}^p \left(\frac{v_{jqm}^p + 2v_{jqm}^m + v_{jqm}^o}{4} \right) \\ & + \sum_q \sum_n \sum_j \sum_p \sum_t I_{jqnt}^p \left(\frac{w_{jqn}^p + 2w_{jqn}^m + w_{jqn}^o}{4} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_m \left(\frac{r_m^p + 2r_m^m + r_m^o}{4} \right) \cdot \bar{\sigma}_m + \sum_m \sum_j \sum_t m_{jmt} \cdot \left(\frac{\rho_{jm}^p + 2\rho_{jm}^m + \rho_{jm}^o}{4} \right) + \sum_m C s_m \cdot NoM_m \\ & + \sum_m \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t \zeta_{jmrt}^p \cdot \left(\frac{S_{jmr}^p + 2S_{jmr}^m + S_{jmr}^o}{4} \right) + \sum_n \sum_v \sum_p \sum_t U_{nvt}^p \cdot \left(\frac{v_{nv}^p + 2v_{nv}^m + v_{nv}^o}{4} \right) \\ & + \sum_n \left(\frac{f_n^p + 2f_n^m + f_n^o}{4} \right) \cdot \varphi_n + \sum_n \sum_j \sum_t i_{jnt} \cdot \left(\frac{\tau_{jn}^p + 2\tau_{jn}^m + \tau_{jn}^o}{4} \right) + \sum_n C s_n \cdot NoN_n \\ & - \sum_n \sum_v \sum_p \sum_t \sum_t U_{nvt}^p \cdot \left(\frac{Co_v^p + 2Co_v^m + Co_v^o}{4} \right) + \\ & \text{Min} \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t x_{jit}^p \cdot \left(\frac{t_{ji}^p + 2t_{ji}^m + t_{ji}^o}{4} \right) + \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t y_{jrt}^p \cdot \left(\frac{\phi_{jr}^p + 2\phi_{jr}^m + \phi_{jr}^o}{4} \right) \\ & + \sum_r \sum_k \sum_j \sum_p \sum_t \chi_{jrkt}^p \cdot \left(\frac{J_{jrk}^p + 2J_{jrk}^m + J_{jrk}^o}{4} \right) + \sum_k \sum_q \sum_j \sum_p \sum_t \delta_{jkqt}^p \cdot \left(\frac{g_{jkq}^p + 2g_{jkq}^m + g_{jkq}^o}{4} \right) \\ & + \sum_q \sum_m \sum_j \sum_p \sum_t M_{jqmt}^p \cdot \left(\frac{\gamma_{jqm}^p + 2\gamma_{jqm}^m + \gamma_{jqm}^o}{4} \right) + \sum_q \sum_n \sum_j \sum_p \sum_t I_{jqnt}^p \cdot \left(\frac{\psi_{jqn}^p + 2\psi_{jqn}^m + \psi_{jqn}^o}{4} \right) \\ & \sum_m \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t \zeta_{jmrt}^p \cdot \left(\frac{\pi_{jmr}^p + 2\pi_{jmr}^m + \pi_{jmr}^o}{4} \right) + \sum_n \sum_v \sum_p \sum_t U_{nvt}^p \cdot \left(\frac{\partial_{nv}^p + 2\partial_{nv}^m + \partial_{nv}^o}{4} \right) \end{aligned}$$

محدودیت‌ها

$$\left[\left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\varphi_j + \varphi_i}{2} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\varphi_j + \varphi_j}{2} \right) \right] \cdot \sum_k \sum_p \delta_{jkqt}^p \geq \sum_m \sum_p M_{jqmt}^p \quad \forall q, j, t \quad (31)$$

$$\left[\frac{\alpha}{2} \left(\frac{\varphi_j + \varphi_j}{2} \right) + \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\varphi_j + \varphi_j}{2} \right) \right] \cdot \sum_k \sum_p \delta_{jkqt}^p \leq \sum_m \sum_p M_{jqmt}^p \quad (32)$$

$$\sum_j m_{jmt} \cdot \left[\alpha \cdot \left(\frac{PTM_j + PTM_j}{2} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{PTM_j + PTM_j}{2} \right) \right] \leq \quad (33)$$

$$\left[\alpha \left(\frac{TM + TM}{2} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{TM + TM}{2} \right) \right] \cdot NoM_n \quad \forall n, t$$

$$\sum_t x_{jit}^p \leq \alpha \cdot \left(\frac{c_{ji}^m + c_{ji}^o}{2} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{c_{ji}^m + c_{ji}^o}{2} \right), \quad \forall i, j, t \quad (34)$$

$$\sum_t \delta_{jkqt}^p \geq \alpha \cdot \left(\frac{r_{jkt}^m + r_{jkt}^o}{2} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{r_{jkt}^m + r_{jkt}^o}{2} \right) \quad \forall k, j, t \quad (35)$$

$$\sum_r \sum_p \chi_{jrkt}^p \geq \alpha \cdot \left(\frac{d_{jkt}^m + d_{jkt}^o}{2} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{d_{jkt}^m + d_{jkt}^o}{2} \right), \quad \forall j, t, k \quad (36)$$

$$\sum_j Z_{jt} \cdot \left[\alpha \cdot \left(\frac{Pt_j + Pt_j}{2} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{Pt_j + Pt_j}{2} \right) \right] \leq \quad (37)$$

$$NM \cdot \left[\alpha \left(\frac{Ti + Ti}{2} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{Ti + Ti}{2} \right) \right] \quad \forall t$$

$$\left[\left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\varphi_j + \varphi_j}{2} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\varphi_j + \varphi_j}{2} \right) \right] \cdot \sum_k \sum_p \delta_{jkqt}^p \geq \sum_m \sum_p M_{jqmt}^p \quad (38)$$

$\forall q, j, t$

s.t.

$$\lambda_0 \leq \mu_h(x), \quad h = 1, 2$$

$$x \in F(x) \quad (36)$$

$$\lambda_0, \lambda \in [0, 1]$$

$$\text{Min } \lambda(x) = \gamma \lambda_h + (1 - \gamma) \sum_h \theta_h \mu_h(x) \quad (37)$$

$F(x)$ نشان دهنده ناحیه شدنی تشکیل شده بر اساس محدودیت‌های قطعی مدل کمکی معادل است. همچنین θ_h و λ به ترتیب نشان دهنده درجه اهمیت اهمیت تابع هدف و ضریب تصحیح‌اند؛

۷. تعیین مقدار ضریب تصحیح و اهمیت نسبی اهداف فازی و حل مدل تک‌هدفه قطعی. اگر جواب برای تصمیم‌گیرنده رضایت‌بخش بود، توقف حل و در غیر این صورت به دست‌آوردن جوابی جدید و رفتن به گام ۳.

نتایج حل مدل پیشنهادی

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مسئله با مثال‌های عددی متفاوت در نرم‌افزارهای GAMS با استفاده از CPLEX و نرم‌افزار MATLAB روی رایانه‌ای با پردازشگر 3GB و Intel core 2 Duo (2MB Cache, 2.6 GHz) حافظه حل شد. داده‌های مدل مطالعه‌شده با اقتباس از داده‌های پژوهش‌های موجود در پیشینه موضوع [۸ و ۹] شبیه‌سازی و تولید شد. نتایج حل مسئله با نرم‌افزار GAMS در جدول ۲ آمده است.

برای پاسخ به این سؤال که آیا مدل ارائه‌شده و روش حل به‌کاررفته به نتایج صحیح منجر می‌شود یا خیر، این نتایج با مدل پیشنهادی پیشوایی و ترابی [۲۳] مقایسه شد. با حل مسائل مختلف، مشاهده شد در مدل پیشنهادی این پژوهش به صورت میانگین حدود ۱۸ درصد هزینه‌ها بیشتر از مدل پیشوایی و ترابی [۲۳] است که این اختلاف به دلیل فروض ساده‌سازی است که پیشوایی و ترابی در پژوهش خود لحاظ کرده‌اند. برخی تفاوت‌های اصلی دو مدل، که منشأ اختلاف در مقدار تابع هدف‌اند، در ادامه فهرست شده‌اند. مهم‌ترین تفاوت دو مدل، که به اختلاف هزینه‌ها منجر شده، این است که مدل توسعه‌یافته در این پژوهش عوامل زیست‌محیطی را لحاظ کرده و این موضوع موجب ایجاد تعادل بین هزینه‌های مالی و هزینه‌های ناشی از انتشار گاز CO₂ شده به نحوی که کاهش در دومی باعث افزایش اولی است. جریمه رسیدن اجناس خراب به دست مشتریان در این مدل لحاظ شد. در این پژوهش، مدل تعیین می‌کند چه تعداد

$$\sum_j i_{jmt} \cdot \left[\alpha \cdot \left(\frac{PTN_j + PTN_j^o}{2} \right) + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{PTN_j + PTN_j^o}{2} \right) \right] \leq$$

$$\left[\alpha \left(\frac{PTN_j + PTN_j^o}{2} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{PTN_j + PTN_j^o}{2} \right) \right] \cdot NoN_n \quad \forall n, s, t \quad (34)$$

مرحله دوم: حل مدل قطعی چندهدفه با رویکرد فازی

در مرحله دوم روش حل پیشنهادی، یک رویکرد ترکیبی از روش ترابی و هسینی [۲۱] و خیمنز و همکاران [۲۲] برای حل مسئله چندهدفه قطعی، که در فاز اول به دست آمد، به کار رفت.

روش ترابی و هسینی (TH)

گام‌های روش حل پیشنهادی چنین خلاصه می‌شوند:

۱. تعیین توابع توزیع احتمال مثلثی مناسب بر مبنای داده‌های تاریخی موجود و نظر افراد خبره و تعیین مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح فازی چندهدفه؛
۲. غیر فازی کردن تابع هدف با استفاده از امید ریاضی (EV) پارامترهای دارای عدم قطعیت؛
۳. تعیین «حداقل درجه پذیرفته بودن بردارهای جواب» و غیر فازی کردن محدودیت‌ها و تعیین مدل کمکی؛
۴. تعیین جواب ایده‌آل مثبت با درجه آلفا و جواب ایده‌آل منفی با درجه آلفا برای هر یک از توابع هدف؛
۵. تعیین یک تابع عضویت فازی خطی برای هر یک از توابع هدف به صورت رابطه ۳۵:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_1^{\alpha-PIS} \leq Z_1 \\ \frac{Z_1 - Z_1^{\alpha-NIS}}{Z_1^{\alpha-PIS} - Z_1^{\alpha-NIS}} & \text{if } Z_1^{\alpha-NIS} \leq Z_1 \leq Z_1^{\alpha-PIS} \\ 0 & \text{if } Z_1 \leq Z_1^{\alpha-NIS} \end{cases} \quad (35)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_2^{\alpha-PIS} \leq Z_2 \\ \frac{Z_2 - Z_2^{\alpha-NIS}}{Z_2^{\alpha-PIS} - Z_2^{\alpha-NIS}} & \text{if } Z_2^{\alpha-NIS} \leq Z_2 \leq Z_2^{\alpha-PIS} \\ 0 & \text{if } Z_2 \leq Z_2^{\alpha-NIS} \end{cases}$$

$\mu_h(x)$ نشان دهنده درجه برآورده‌سازی اهمیت تابع هدف است؛

۶. تبدیل مدل خطی عدد صحیح مختلط قطعی چندهدفه به یک مدل تک‌هدفه، به کمک تابع ادغام‌سازی پیشنهادی ترابی و هسینی [۲۱]:

که بتواند از افزایش هزینه‌های مدل بررسی شده، نسبت به مدل پیشوایی و ترابی، جلوگیری کند. به دلیل NP-Hard بودن مسئله و زمان طولانی (تقریباً هفت ساعت برای یک مدل متوسط) از الگوریتم فراابتکاری NSGA II برای حل مسئله در اندازه‌های بزرگ استفاده شد.

ماشین‌آلات در قسمت تولید، تعمیر، و بازیافت خریداری شود. در واقع هزینه خرید ماشین‌آلات نیز لحاظ شد؛ در صورتی که پیشوایی و ترابی از آن صرف‌نظر کرده‌اند. هر چند در مدل این تحقیق درآمد ناشی از فروش مواد اولیه در نظر گرفته شد، این افزایش درآمد آن‌قدر نیست

جدول ۲. نتایج محاسبات حاصل از نرم‌افزار GAMS

مقادیر توابع هدف	درجه آورده‌سازی توابع هدف		درجه اهمیت توابع هدف		حداقل درجه امکان
CO2	هزینه	μ_2	μ_1	ν_2	ν_1
$2/93E+06$	$6/99E+07$	$0/691$	$0/997$	$0/1$	$0/9$
$2/76E+06$	$7/46E+07$	$0/764$	$0/929$	$0/2$	$0/8$
$2/57E+06$	$8/13E+07$	$0/847$	$0/834$	$0/5$	$0/5$
$2/43E+06$	$8/83E+07$	$0/912$	$0/734$	$0/8$	$0/2$
$2/27E+06$	$9/20E+07$	$0/982$	$0/681$	1	$0/1$
$2/85E+06$	$6/88E+07$	$0/715$	$0/997$	$0/1$	$0/9$
$2/72E+06$	$7/37E+07$	$0/768$	$0/926$	$0/2$	$0/8$
$2/57E+06$	$7/97E+07$	$0/837$	$0/839$	$0/5$	$0/5$
$2/37E+06$	$8/68E+07$	$0/925$	$0/737$	$0/8$	$0/2$
$2/25E+06$	$8/96E+07$	$0/982$	$0/695$	1	$0/1$
$2/79E+06$	$6/71E+07$	$0/739$	$0/995$	$0/1$	$0/9$
$2/66E+06$	$7/17E+07$	$0/797$	$0/928$	$0/2$	$0/8$
$2/56E+06$	$7/82E+07$	$0/839$	$0/831$	$0/5$	$0/5$
$2/33E+06$	$8/65E+07$	$0/943$	$0/706$	$0/8$	$0/2$
$2/24E+06$	$8/75E+07$	$0/982$	$0/692$	1	$0/1$

الگوریتم NSGA II

در تعریف الگوریتم ژنتیک بر پایه ناچیرگی باید گفت در الگوریتم NSGA-II یک اندازه جمعیت N در نظر گرفته می‌شود. در آغاز، یک جمعیت تصادفی به اندازه N تولید و عملیات مرتب‌سازی ناچیره روی جمعیت اعمال می‌شود. این عملیات اعضای جمعیت را در سطوح ناچیرگی مختلف طبقه‌بندی می‌کند. مجموعه اعضای ناچیره جمعیت اعضای ناچیره سطح ۱ نامیده می‌شوند. به هر جواب یک برآزش برابر با سطح ناچیرگی آن انتساب داده می‌شود؛ بنابراین کمینه‌سازی برآزش مورد نظر است. برای جواب‌های موجود در هر سطح ناچیرگی فاصله تراکم به گونه‌ای که شرح آن آمد اندازه‌گیری می‌شود. عمل گرهی گزینش رقابتی تراکم‌نگر، تقاطع، و جهش برای پدیدآوردن جمعیت فرزندان به اندازه N به کار می‌رود. گفتنی است در گزینش رقابتی جوابی که برآزش آن کمتر است برنده می‌شود و میان دو

جواب با برآزش یکسان جوابی که فاصله تراکم آن بزرگ‌تر باشد برگزیده می‌شود. جهت تنظیم کردن پارامترهای الگوریتم مسئله به دو دسته با اندازه بزرگ و اندازه کوچک تقسیم شد و برای هر دسته از مسائل بهترین مجموعه پارامترها تخمین زده شد. در این تحقیق، برای تنظیم پارامترها از روش سطوح پاسخ (RSM) استفاده شد. جواب‌ها در جدول ۳ می‌آید. روش سطوح پاسخ برای تخمین بهینه پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر یک فرآیند به کار می‌رود. در این روش، از روش معادله رگرسیونی برای ارزیابی سطوح مختلف پارامترها استفاده می‌شود. روش کار بدین گونه است که یک سری سطوح مختلف پارامترهای مؤثر الگوریتم بر مبنای شاخص‌های ورودی (معمولاً از مقدار تابع هدف استفاده می‌شود) بررسی و با برآزش بهترین معادله رگرسیونی بر سطوح مختلف پارامترها مقادیر مطلوب برای تنظیم پارامترها پیشنهاد می‌شود. جدول ۳ تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II را با روش سطوح

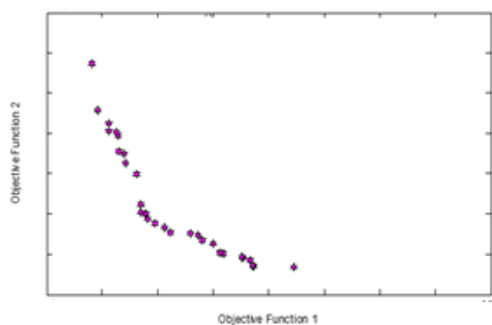
جدول ۳. تنظیم پارامتر الگوریتم NSGA-II

تنظیم پارامترهای NSGA-II		
	اندازه کوچک	اندازه بزرگ
تعداد جمعیت اولیه	۲۰۰	۳۰۰
میزان جهش	۰/۲	
میزان تقاطع	۰/۸	
شرط توقف الگوریتم	۳۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰

نمایش جواب حل به کمک الگوریتم NSGA-II
هجده دسته داده در اندازه‌های متوسط و بزرگ به تصادف
تولید شده است. پاسخ‌های حل به کمک الگوریتم
NSGA-II در جدول ۴ می‌آید.

جدول ۴. نتایج محاسباتی به کمک نرم‌افزار NSGA-II

مقدار آلفا	شاخص پراکندگی	میانگین تابع هزینه	میانگین میزان انتشار گاز CO2 (Kg)	شماره مسئله
۰,۷	۰,۷۲۷	۹۹۱۱۰۹۶۷۸۸۴	۷۷۴۹۲۳۳۹۷	۱
۰,۸	۰,۷۴۴	۹۸۶۳۰۰۶۴۸۵۶	۷۸۹۳۲۶۶۸۵	۲
۰,۹	۰,۷۹۱	۸۲۶۴۰۴۳۳۳۱۶	۷۹۴۷۲۹۸۱۶	۳
۰,۷	۰,۷۳۸	۸۱۴۰۴۴۹۸۲۱۱	۸۶۵۱۳۹۴۴۶	۴
۰,۸	۰,۵۷۱	۸۶۸۳۱۳۸۳۳۴۷	۸۴۰۵۶۰۴۷۸	۵
۰,۹	۰,۴۹۹	۸۶۵۲۱۴۵۳۹۹۱	۸۵۶۹۱۲۰۶۸	۶
۰,۷	۰,۷۹۳	۸۳۶۷۱۱۱۰۹۷۸	۸۸۱۵۶۴۱۷۲	۷
۰,۸	۰,۹۸۳	۸۹۷۶۳۳۴۳۰۲۳	۸۷۷۹۲۹۶۵۴	۸
۰,۹	۰,۸۵۳	۹۴۸۰۰۷۰۷۳۹۶	۹۹۴۴۶۵۷۴۳	۹
۰,۷	۱,۱۰۱	۷۴۰۷۷۵۱۳۰۲۹	۹۳۳۵۶۷۳۸۵	۱۰
۰,۸	۱,۳۱۱	۸۱۱۳۷۵۳۰۱۱۰	۹۴۵۸۷۲۱۰۶	۱۱
۰,۹	۰,۹۴۵	۹۱۹۳۵۸۳۰۶۷۴	۹۹۲۳۸۶۵۷۴	۱۲
۰,۷	۰,۹۶۴	۹۶۰۲۶۵۷۲۶۱۳	۱۱۳۷۸۴۳۹۰۷	۱۳
۰,۸	۰,۷۳۱	۹۸۵۸۸۷۴۴۷۲۳	۱۱۵۶۳۴۷۸۹۴	۱۴
۰,۹	۱,۸۰۹	۹۹۴۰۷۷۸۱۴۵۶	۱۲۰۳۶۸۹۸۹۲	۱۵
۰,۷	۰,۹۸۴	۹۲۳۴۸۲۰۴۸۴۲	۱۱۵۹۸۷۶۷۶۹	۱۶
۰,۸	۰,۷۷	۹۵۶۳۹۵۸۳۷۲۱	۱۲۳۰۹۵۸۴۹۰	۱۷
۰,۹	۰,۹۳۹	۹۸۴۷۲۷۵۸۲۹۱	۱۲۷۸۴۵۶۴۲۴	۱۸



شکل ۲. نمودار بهینه پارتو الگوریتم NSGA II

پاسخ نشان می‌دهد. در ادامه از شاخص فاصله (رابطه ۳۸)
برای نشان دادن کارایی الگوریتم استفاده می‌شود. شاخص
فاصله یکنواختی توزیع جواب‌های پارتو در فضای حل را نشان
می‌دهد:

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad (38)$$

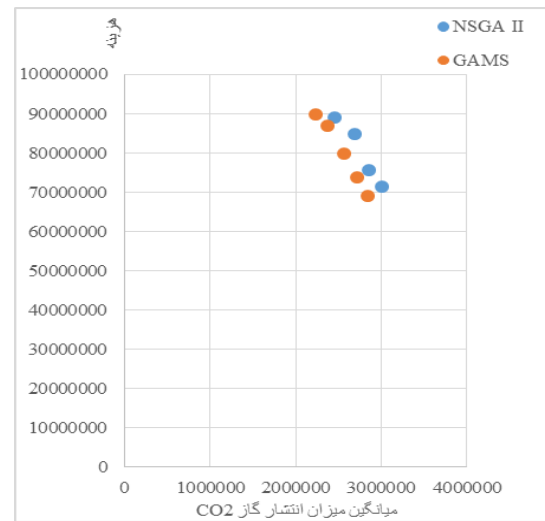
di برابر است با فاصله اقلیدسی بین دو جواب پارتو
کناری در فضای حل و \bar{d} نیز برابر میانگین فواصل
diهاست. هر چه این شاخص کمتر باشد، الگوریتم بهتر
است.

با توجه به نتایج به دست آمده، نمودار پارتو در شکل ۲
می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کارکرد مدل
دوهدفه مطلوب و مؤثر است.

با مقایسه جواب به دست آمده از نرم‌افزار GAMS و جواب
به دست آمده از NSGA II در مسائل با اندازه کوچک، مشاهده
شد جواب به دست آمده از الگوریتم فراابتکاری در مقایسه با
نرم‌افزار GAMS اختلاف ناچیزی دارد. این موضوع
نشان دهنده کارکرد مطلوب الگوریتم NSGA II است.

می‌کند، بلکه از لحاظ اقتصادی هزینه‌های تولید دوباره را کاهش می‌دهد و حتی از فروش مواد بازیافتی سود به دست می‌آورد. همچنین، برای اولین بار در طراحی یک شبکه یکپارچه زنجیره تأمین مسائل زیست‌محیطی به صورت جدی و تحت شرایط عدم قطعیت تأثیر خود را بر چگونگی طراحی شبکه نشان می‌دهد. این تأثیرات، چه در بخش حمل‌ونقل چه در جریان برگشتی (تعمیر و بازیافت)، مشاهده می‌شود. عدم قطعیت به صورت فازی در نظر گرفته شد و مدل پیشنهادی با رویکرد ترکیبی خیمنز و TH حل شد. نتایج حاصل از حل مدل با نرم‌افزارهای GAMS و NSGA II نشان‌دهنده کارکرد منطقی و مطلوب مدل در رسیدن به جواب بهینه است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هر چه هزینه بیشتری برای سیستم حمل‌ونقل بهینه صرف شود تابع میزان انتشار آلاینده‌ها بهینه‌تر و کمتر خواهد شد. این در تضاد بودن توابع هدف را نشان می‌دهد.

با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران و اهمیت و خطر عواملی همچون سیل و زلزله، که منجر به مختل شدن عملکرد و از کار افتادن زنجیره تأمین می‌شود، بسیار ضروری به نظر می‌رسد که پژوهشگران علاقه‌مند در مدل‌های آتی این عوامل را نیز در نظر گیرند و به پایداری و کشسانی زنجیره‌های تأمین بپردازند. در کنار عوامل زیست‌محیطی پیشنهاد می‌شود به عوامل اجتماعی، همچون ایجاد فرصت‌های شغلی و غیره، نیز در قالب یک مدل یکپارچه پرداخته شود.



شکل ۳. مقایسه جواب الگوریتم فراابتکاری با حل دقیق در مسائل کوچک

نتیجه‌گیری

آنچه اهمیت طراحی یک شبکه زنجیره تأمین را روزافزون می‌کند تأثیر آن بر مکان‌یابی تسهیلات و تجهیزات، جریان تولید و خرید کالا و مواد اولیه، حمل و توزیع آن‌ها، و میزان رضایتمندی مشتریان است. در سال‌های اخیر، با توجه به زیان‌های ناشی از خرابی محصولات، هم از نظر اقتصادی و هم از نظر سطح رضایتمندی مشتری، جریانات برگشتی، اعم از تحویل کالاهای معیوب از مشتریان و تعمیر و بازیافت آن‌ها، در طراحی شبکه گنجانده شد. این تحقیق با رویکردی یکپارچه، با در نظر گرفتن جریانات رو به جلو و معکوس، نه تنها سطح رضایتمندی مشتریان را بهینه

REFERENCES

1. Daskin, M. S. (1995). "Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications." Wiley, New York.
2. Melo, M. T., Nickel, S., and Gama, F. S. (2009). "Facility location and supply chain management." *European Journal of Operation Research*, Vol. 196, No. 2, 401-412.
3. Melkote, S. and Daskin, M. S. (2001). "Capacitated facility location/network design problem." *European Journal of Operation Research*, Vol. 129, No. 3, 481-495.
4. Drezner, Z. and Wesolowsky, G. O. (2003). "Network design: selection and design of links and facility location." *Transportation Research*, Vol. 37, No. 3, 241-256.
5. Ambrosino, D. and Scutella, M. G. (2005). "Distribution Network Design: New Problems and Related Models." *European Journal of Operational Research*, Vol. 165, No. 3, 610-624.
6. Nga Thanh, P., Bostel, N., and Peton, O. (2008). "A dynamic model for facility location in the design of Complex supply chains." *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, No. 2, 678-693.
7. Lu, Z. and Bostel, N. (2007). "A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities." *Computers & Operations Research*, Vol. 34, No. 2, 299-323.
8. Pishvaei, M. S. and Shakouri, H., (2009). "A System Dynamics Approach for Capacity Planning and Price

- Adjustment in a Closed-Loop Supply Chain.” EMS: 435-439.
9. Pishvae, M. S., Rabbani, M., and Torabi, S. A. (2011). “A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty.” *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 35, No. 2, 637-649.
 10. Sayed, M., Afia, N., and Kharbotly, A. (2010). “A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk.” *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, 423-431.
 11. Tarokh, M. J. and Naseri, A. (2012). “Genetic Algorithm and Hybrid Method to Minimize Total Distribution Cost in Multi-level Supply Chain.” *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 46, No. 1, 15-26.
 12. Aghaei, A. and Zandi, F. (2012). “Analyzing and Optimization a Two Echelon Supply Chain with Uncertainly Returned Product.” *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 46, No. 2, 119-132.
 13. Pourrousta, A., Tavakkoli Moghaddam, R., and Ebrahimnejad, S. (2012). “A Multi-product and Multi-period Model for a Procurement-production-distribution in Supply Chain with Fuzzy Parameters” *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 46, No. 2, 147-156.
 14. Tarokh, M. J., EsmaeiliGookeh, M., and Torabi, Sh. (2012). “A Model to Optimize the Design of a Reverse Logistic Network under Uncertainty” *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 46, No. 2, 159-173.
 15. Pishvae, M. S. and Razmi, J. (2012). “Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming.” *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, No. 8, 3433-3446.
 16. Pishvae, M. S., Razmi, J., and Torabi, S. A., (2012). “Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach.” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 206, 1-20.
 17. Pishvae, M. S., Torabi, S. A., and Razmi, J. (2012). “Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty.” *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 62, No. 2, 624-632.
 18. Wang, R. -C. and Liang, T. -F. (2005). “Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning.” *International Journal of Production Economics*, Vol. 98, No. 3, 328-341.
 19. Arenas Parra, M., Bilbao Terol, A., Pérez Gladish, B., and Rodríguez Uría, M. V. (2005). “Solving a multiobjective possibilistic problem through Compromise programming.” *European Journal of Operational Research*, Vol. 164, No. 3, 748-759.
 20. Yager, R. R., (1981). “A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval.” *Information Sciences*, Vol. 24, No. 2, 143-161.
 21. Torabi, S. A. and Hassini, E. (2008). “An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning.” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 159, No. 2, 193-214.
 22. Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., and Rodriguez, M. V. (2007). “Linear programming with fuzzy parameters, An interactive method resolution” *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, 1599–1609.
 23. Pishvae, M. S. and Torabi, S. A. (2010). “A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty.” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 161, No. 20, 2668-2683.

واژگان لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. NP-Hard
2. CO₂
3. Suppliers
4. Production Center
5. Distribution Center
6. Customer Zones
7. Collection Centers
8. Recovery Centers
9. Recycle Centers
10. Material Customer