



طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در فضای عدم قطعیت

رضا یوسفی زنوز (نویسنده مسؤل)

مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت دانشگاه خوارزمی

Email: reza.zenouz@gmail.com

فرزاد حقیقی راد

عضو هیات علمی گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات دانشگاه خوارزمی

سجاد ذاکری تبار

مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت دانشگاه خوارزمی

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۴/۱۴ * تاریخ پذیرش ۹۹/۱۱/۰۴

چکیده

تغییرات آب و هوا و اثرات مخرب زیست محیطی فعالیتهای اقتصادی، زنجیره‌های تامین را بر آن داشته است که در بازارهای رقابتی جهت کسب مزیت رقابتی در کنار عملکرد مالی، بدنبال اجرای سیاست‌های سبز و کاهش آسیب به محیط زیست باشند. یکی از روش‌های دستیابی همزمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، داشتن شبکه‌های زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته است که در آنها علاوه از جریان رو به جلو، لجستیک معکوس نیز در شبکه ادغام شده‌است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو هدفه به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته توسعه داده شده‌است. تابع هدف اول کمینه‌کردن هزینه‌های اقتصادی و تابع هدف دوم شامل حداقل نمودن زمان تاخیر ارسال محصولات از تولیدکنندگان به توزیع‌کنندگان است. برای حل مدل از روش‌های ال‌پی-متریک و اپسیلون- محدودیت استفاده شده‌است. در نهایت مثال عددی برای ارزیابی و آنالیز حساسیت مدل ارائه شده‌است. در این مدل هزینه‌ها و تقاضا بعنوان پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود. در راستای مواجهه با پارامترهای غیرقطعی و کاهش تاثیر آن بر روی جواب بهینه، یک مدل بهینه‌سازی استوار مطرح شده‌است. به‌منظور حل مدل ارائه شده در مقیاس بزرگ از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO) بهره‌گرفته شد. برای نشان دادن کارایی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی MOPSO، جواب‌های به دست آمده با جواب‌های روش حل دقیق مقایسه شده است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند مدیران و تصمیم‌گیرندگان را در طراحی زنجیره‌های تامین حلقه بسته کارآمد یاری رساند

کلمات کلیدی: برنامه ریزی چندهدفه، بهینه سازی استوار، شبکه زنجیره تامین حلقه بسته، عدم قطعیت.

۱- مقدمه

زنجیره تأمین شامل همه بخش‌هایی است که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در برآورد نیازهای مشتری درگیر هستند این بخش‌ها تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، مشتریان، توزیع‌کنندگان، حمل‌ونقل و خرده‌فروشان و را در برمیگیرد (Chopra & Meindl, 2007). فرایند برنامه ریزی، اجرا و کنترل جریان کارآمد و موثر کالا، خدمات و اطلاعات از نقطه شروع به نقطه مصرف به منظور رفع نیازهای مشتری، لجستیک نامیده می‌شود (Hugos, 2018).

امروزه در اقتصاد، موفقیت بلند مدت هر سازمان نه تنها به سودآوری آن بستگی دارد بلکه به دیدگاه سازمان نسبت به آینده بشر و زمین وابسته است. توجه به مسایل زیست محیطی می‌تواند موفقیت زنجیره تأمین و کسب مزیت رقابتی را در بلندمدت تضمین کند. محصولات معیوب و ضایعات همواره یک چالش مهم برای تولیدکنندگان بوده و این مسئله مورد علاقه بسیاری از تولیدکنندگان است. چراکه آنها متوجه شدند که بازیافت کالا و استفاده مجدد از محصولات، ضایعات و بقایای محصولات نه تنها باعث کاهش اثرات زیان‌آور برای محیط زیست می‌شود، بلکه منجر به افزایش جایگاه رقابتی آنها را در بازار می‌شود. با این استراتژی‌ها می‌توانند بطور قابل ملاحظه‌ای شبکه‌های زنجیره تأمین خود را بازسازی کرده و مزایای اقتصادی خود را به حداکثر برسانند. از این منظر تلاش‌ها در زمینه فعالیت‌های بازیافتی و لجستیکی موجب شده تا سازمان‌ها بر بسته شدن حلقه زنجیره تأمین و ایجاد زنجیره‌های تأمین حلقه بسته^۱ تمرکز کنند. زنجیره تأمین حلقه بسته هر دو جریان مستقیم و معکوس را در بر می‌گیرد که در طول دو دهه گذشته توجه متخصصان مدیریت عملیات را به خود جلب کرده است. مفهوم طراحی زنجیره تأمین در لجستیک معکوس با مفاهیمی همچون بازیافت، چرخه مجدد و یا استفاده مجدد از محصولات همراه است. بطور کلی طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس شامل تعیین تعداد، مکان و ظرفیت‌های تسهیلات و همچنین مقدار و نحوه جریان بین هر جفت از تسهیلات می‌باشد (Kara & Onut, 2010).

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه داده می‌شود، شبکه زنجیره تأمین مساله یک زنجیره حلقه بسته چند محصولی، چند دوره‌ای و چند سطحی است که شامل مراکز تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده، مشتری و جمع‌آوری و انهدام است. تابع هدف اول به دنبال کمینه کردن هزینه‌ها و تابع هدف دوم به دنبال حداقل کردن زمان تأخیر و تعجیل در ارسال محصولات از تولیدکنندگان به توزیع‌کنندگان می‌باشد. برخی از پارامترهای مدل اعم از هزینه‌ها و تقاضا دارای عدم قطعیت هستند.

در این قسمت به بررسی پیشینه و مبانی نظری تحقیق می‌پردازیم:

جایارمن و همکارانش (۱۹۹۹) مدلی برای طراحی لجستیک معکوس در یک سیستم تولید کششی براساس تقاضای مشتریان برای محصولات بازیابی شده، ارائه کردند (Jayaraman, et al., 1999). این مدل قادر به تعیین موارد زیر می‌باشد: (۱) حد بالای تعداد مراکز پردازش که می‌تواند باز باشد. (۲) ظرفیت‌های نگهداری برای محصولات قابل تولید مجدد و بازتولید شده در مراکز پردازش و (۳) ظرفیت‌های ذخیره برای محصولات قابل تولید مجدد در مراکز استفاده مجدد. شولتمن و همکاران (۲۰۰۵) مدلی برای برنامه ریزی مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه‌های بازیابی محصول ارائه کردند این مدل با ارایه سناریوهای مختلف، امکان برنامه ریزی لجستیک معکوس را فراهم می‌آورد (Schulmann, et al., 2005). ال سید و همکاران (۲۰۱۰) مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته در معرض ریسک ارایه کردند. این مدل نشان داد که سود مورد انتظار بطور مستقیم تحت تأثیر تقاضا و نسبت محصولات بازگشتی است (El-Sayed et al., 2010). طلایی و همکاران (۲۰۱۵) یک مدل بهینه‌سازی استوار چند محصولی و چندهدفه برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم اطمینان ارائه کردند. در مدل پیشنهادی، عدم قطعیت در ذات داده‌های ورودی وجود دارد (Talaie, et al., 2015). ویلدان و باشلیگیل (۲۰۱۳) برای مدل‌سازی زنجیره‌های تأمین حلقه بسته در محیط غیر قطعی، مدل بهینه‌سازی چند هدفه فازی ارائه دادند. در این مدل گزینه‌های مختلف بازیابی را در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن برای تحقیقات آتی، بهره‌گیری از روش‌های پویایی سیستم و مدل‌های شبیه‌سازی برای حل مساله را پیشنهاد نموده است (Özkır & Başlıgil, 2013). کاردوسو و

¹ closed loop supply chain networks- CLSC

همکاران (۲۰۱۳) بر روی طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره‌های تامین با ادغام فعالیت‌های لجستیک معکوس تحت عدم‌اطمینان تقاضا تمرکز نمودند. طراحی لجستیک معکوس، اگرچه در ابتدا هزینه بر است، اما بازیابی محصولات می‌تواند در بلندمدت مزایای اقتصادی نیز در بر داشته باشد (Cardoso et al., 2013). حسن زاده و ژنگ (۲۰۱۳) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته ارائه کردند. پارامترهای تقاضا و نرخ بازگشت این مدل دارای عدم قطعیت بودند. جهت حل مدل چندهدفه، روش اپسیلون محدودیت و روش‌های وزن‌دهی به اهداف بکار گرفته شد. در این تحقیق نشان دادند که روش اپسیلون محدودیت، می‌تواند راه حل‌های کارآمدتری را نسبت به روش‌های وزن‌دهی به دست آورد (Hassanzadeh & Zhang, 2013).

زبالوس و همکاران (۲۰۱۴) مدل بهینه‌سازی سه هدفه طراحی شبکه زنجیره تامین ارائه کرده و از الگوریتم NSGA-II اصلاح شده برای حل بهره‌گرفتند. الگوریتم بطور قابل توجهی بهتر از NSGA-II و SPEA2 اصلی عمل می‌کرد (Zaballos, et al., 2014). رویمین و همکاران (۲۰۱۵) مدل بهینه‌سازی استوار در زنجیره تامین حلقه بسته با در نظر گرفتن اثرات محیطی و عدم قطعیت ارائه کردند. نتایج محاسبات نشان‌دهنده برتری مدل استوار شده‌است که می‌تواند با در نظر گرفتن عدم قطعیتی که در بعضی پارامترها وجود دارد، مدلی بهینه از لحاظ هزینه و اثرات محیطی ارائه دهد. برای پژوهش‌های آتی حل مسائل با ابعاد بزرگ توسط رویکردهای فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مدت معقول پیشنهاد شد (Ruimin, et al., 2016).

انیل جیندال و همکاران (۲۰۱۵) شبکه و بهینه‌سازی یک زنجیره تامین حلقه بسته چند محصولی، چند دوره‌ای چند سطحی در یک محیط غیر قطعی طراحی نمودن (Jindal et al., 2015). سلیمانی و گویندان (۲۰۱۵) مقاله‌ای تحت عنوان بهینه‌سازی ترکیبی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در ابعاد بزرگ ارائه کردند. در این پژوهش الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیکی در همه موارد داشت (Soleimani & Kannan, 2015). زهل و سلیمانی (۲۰۱۶) رویکرد کلونی مورچه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز را توسعه داده‌اند. این مقاله به بررسی نحوه ایجاد مدل لجستیک چندهدفه در صنعت طلا پرداخته و از طریق الگوریتم فراابتکاری کارآمد، حل می‌شود. در این تحقیق، تمام پارامترها به صورت قطعی در نظر گرفته شدند، در حالیکه در دنیای واقعی برخی پارامترها همچون تقاضا و قیمت، قطعی نمی‌باشند (Zohal & Soleimani, 2016). کاسکن و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی یک مدل پیشنهادی برای طراحی شبکه زنجیره تامین سبز براساس تقسیم بندی مصرف‌کننده پرداخته‌اند. یافته‌ها روشی برای سنجش روابط زنجیره‌های تامین سبز و رفتار مصرف‌کننده ارائه می‌دهد (Coskun, et al., 2016). کیم و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل بهینه‌سازی استوار برای برنامه‌ریزی زنجیره تامین حلقه بسته تحت جریان لجستیک معکوس و عدم‌اطمینان تقاضا ارائه کردند که نتایج شبیه‌سازی نشان داد مدل پیشنهادی به شدت به عدم‌اطمینان پاسخ می‌دهد و برتر از مدل‌های قطعی و دیگر هم‌تایان استوار است. این مطالعه در یک دوره زمانی بررسی شد، اما عدم‌اطمینان عرضه و تقاضا در طول یک افق زمانی ممکن است متفاوت باشد. سپس یک محصول واحد با BOM ساده در نظر گرفته شد که تحقیقات بیشتری برای توسعه یک مدل پیچیده تر لازم است (Kim, et al., 2018). ژن‌هان وو و همکاران (۲۰۱۸) به مقایسه رویکردهای برنامه‌ریزی تعاملی فازی برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت عدم قطعیت پرداختند. در این مقاله چهار روش بهینه‌سازی فازی در مدل برنامه‌ریزی احتمالی تعاملی دو سطحی تعبیه شده و مقایسه شدند. یافته‌ها نشان‌دادند که رویکرد فازی ترابی هاسینی یک راه‌حل سازگار با تعادل موثرتری را نسبت به سایر روش‌های فازی ارائه می‌دهد (Wu, et al., 2018).

طلایی و دیگران (۱۳۹۴) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای مکان‌یابی تسهیلات در شبکه زنجیره تامین حلقه‌بسته در صنعت تولید دستگاه کپی ارائه کردند. تابع هدف اول به دنبال مینیمم کردن هزینه‌های ثابت و متغیر و تابع هدف دوم مینیمم کردن انتشار دی‌اکسیدکربن را در کل شبکه دنبال می‌کرد. برای حل مساله از روش محدودیت اپسیلون بهره‌گرفته شد (Talaei, et al., 2015). ربانی و همکاران (۱۳۹۷) مساله طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در شرایط ریسک اختلال

در تأمین را بررسی کردند. مساله بصورت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله شده و با رویکرد دومرحله ای احتمالی حل شد. در این مدل تاثیر استراتژی‌های انعطاف‌پذیری بر بهبود کیفیت بررسی شده و همچنین با بهره‌گیری از استراتژی‌های تاب‌آوری توانستند در شرایط اختلال، عملکرد و میزان پاسخ‌گویی زنجیره به مشتریان را بهبود دهند (Rabbani, et al., 2019). محمدی و دیگران (۱۳۹۷) مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندمحصوله، چنددوره‌ای، چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و بازگشت سرمایه برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته ارائه نمودند. در این تحقیق، اهداف در نظر گرفته اقتصادی، زیست محیطی توسعه به‌مراه تصمیم‌های مالی بود. از روش مسیر سناریو برای مواجهه با عدم قطعیت بهره گرفته شد (Mohammadi, et al., 2018). در مقاله ای فخرزاد و گودرزبان (۱۳۹۸) یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط چند دوره ای، چندهدفه، چندسطحی و چند محصولی تحت شرایط عدم قطعیت در تسهیلات مختلف در زنجیره تأمین حلقه بسته سبز ارائه کردند. در این مدل اهداف کمینه‌سازی هزینه ها، کمینه سازی انتشار گازها و حداکثر سازی قابلیت اطمینان تحویل تقاضا می باشد. برای حل مدل از یک رویکرد دومرحله ای خیمز و ترابی-حسینی استفاده شد (Fakhrzad & Goodarzian, 2019).

در ادامه در جدول ۱ مهمترین روش‌های حل بکار گرفته شده جهت حل مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین اشاره شده است؛ با توجه به شکاف‌های مطرح شده نوآوری این پژوهش شامل موارد زیر می باشد:

- توسعه مدل ریاضی چند هدفه، چند سطحی، چند دوره ای، چند محصولی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته
- در نظر گرفتن مدل پیشنهادی در شرایط عدم قطعیت که پارامترهای تقاضا و هزینه ها به صورت غیر قطعی فرض شدند
- بهره‌گیری از رویکرد برنامه ریزی استوار جهت برخورد با عدم قطعیت
- حل مدل در مقیاس کوچک با بهره‌گیری از روش‌های ال پی-متریک و اپسیلون-محدودیت
- باتوجه به NP-hard بودن مسئله از الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات چند هدفه^۲ برای حل مسائل با ابعاد بزرگ بهره گرفته شد.

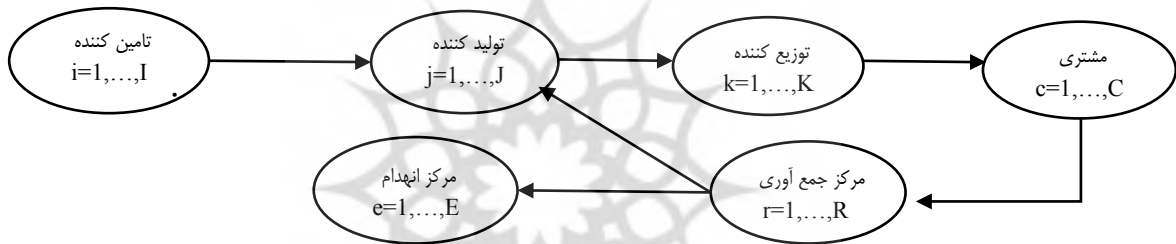
جدول شماره (۱): تحقیقات در زمینه روش‌های حل بکار گرفته شده

نویسندگان	سال	تابع هدف		محیط مسئله			روش حل
		MO	SO	قطعی	غیرقطعی	استوار	
جایارامان و شولتمن و	۱۹۹۹	✓	✓	✓			غیردقیق
ال سید و همکاران	۲۰۱۰	✓			✓		دقیق
پیشوایی و ویلدان و همکاران	۲۰۱۱	✓			✓		
سونیا و همکاران	۲۰۱۳	✓			✓		
حسن زاده و زبالوس و همکاران	۲۰۱۳	✓			✓	اپسیلون محدودیت	
رویمین و همکاران	۲۰۱۴	✓	✓				NSGA-II/
سلیمانی و کانن	۲۰۱۵	✓			✓	بهینه سازی استوار/ال پی-متریک	
انیل چیندال	۲۰۱۵	✓			✓		GA/PSO
زهل و سلیمانی	۲۰۱۶	✓			✓	برنامه ریزی ارمانی	
کاسکن و همکاران	۲۰۱۶	✓	✓			برنامه ریزی ارمانی	
حسن زاده و فاضل	۲۰۱۷	✓			✓	ال پی-متریک	
کنسر بیلیر و کیم و همکاران	۲۰۱۷	✓			✓	برنامه ریزی ارمانی	
ژن هان وو و	۲۰۱۸	✓			✓		TH ,LH ,SO , max-min
پژوهش حاضر		✓			✓	ال پی-متریک / اپسیلون - محدودیت	MOPSO

² Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

۲- روش شناسی پژوهش

مساله تحقیق طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته چند محصولی و چند سطحی است. مدل ریاضی به دنبال تعیین مکان بهینه تسهیلات، تخصیص بهینه و بهینه سازی هزینه موجودی است. شبکه پیشنهادی شامل چهار سطح در جهت رو به جلو (تامین-کنندگان، تولیدکنندگان، مراکز توزیع و مشتریان) و دارای دو سطح در جهت معکوس (مراکز جمع آوری، مراکز انهدام) بوده که تامین کننده مسئول ارائه مواد اولیه به تولیدکنندگان هستند. محصولات از کارخانه ها به مراکز توزیع ارسال می شوند سپس به مراکز مشتری فرستاده می شوند. در مسیر معکوس درصدی از محصولات توسط مشتریان برگردانده شده و در مراکز جمع آوری، ذخیره شده و بعد از تست، محصولات قابل بازیافت به سمت تسهیلات و یا کارخانه ها حمل می شوند. باقی مانده محصولات به مراکز انهدام فرستاده میشوند. مرکز جمع آوری مسئولیتهایی از جمله: جمع آوری محصولات برگشتی از بازارهای تقاضا، تعیین شرایط تولید مجدد و یا جداسازی به منظور بازیافت یا عدم بازیافت، جداسازی به منظور تفکیک محصولات قابل بهبود از غیر قابل بهبودها، فرستادن محصولات قابل بهبود به کارخانه ها (به دلایل اقتصادی و تکنولوژیکی) و فرستادن محصولات غیرقابل بهبود به مراکز انهدام یا دفع را عهده دار هستند. ساختار کلی شبکه لجستیک حلقه بسته مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل شماره (۱): شبکه زنجیره تامین حلقه بسته

الف) مفروضات مدل

- برای تولید هر محصول فقط یک ماده اولیه مورد نیاز است
- پارامترهای تقاضا و هزینه دارای عدم قطعیت هستند
- نگهداری کالا در محل توزیع کننده مجاز است
- مکان تامین کنندگان، مراکز مشتری و مراکز انهدام ثابت می باشند
- ظرفیت مراکز تولید، توزیع و جمع آوری از پیش تعیین شده می باشد

ب) اندیس ها و مجموعه های مدل

جدول شماره (۲): اندیس های مدل ریاضی

I	مجموعه مکانهای بالقوه مراکز جمع آوری (1-r-R)	R	مجموعه مکانهای بالقوه مراکز جمع آوری (1-r-R)
J	مجموعه مکانهای مراکز انهدام (1-e-E)	E	مجموعه مکانهای بالقوه کارخانه (1-j-J)
K	مجموعه محصولات (1-p-P)	P	مجموعه مراکز توزیع بالقوه (1-k-K)
C	مجموعه دوره های زمانی (1-t-T)	T	مجموعه مکان های بازارهای تقاضا (1-c-C)

ج) پارامترهای مدل

جدول شماره (۱): پارامترهای مدل ریاضی

\dot{D}_{cpt}	تقاضای مشتری c برای محصول p در دوره t	HC_{Kpt}	هزینه نگهداری محصول p در مراکز توزیع k در دوره t
F_j	بازده مشتری c برای محصول p در دوره t	RE_{cpt}	هزینه ثابت برای استقرار کارخانه j
A_k	ظرفیت کارخانه های z برای محصول p	CaJ_{jp}	هزینه ثابت برای استقرار مرکز توزیع k
B_r	ظرفیت مرکز جمع آوری r برای محصول p	CaR_{rp}	هزینه ثابت برای استقرار مرکز جمع آوری r
SC_p	ظرفیت مرکز توزیع k برای محصول p	CaK_{kp}	هزینه خرید مواد اولیه لازم برای تولید محصول p

MC_p	هزینه تولید یک واحد محصول p	H_p	هزینه انهدام یک واحد محصول p
CIJ_p	هزینه حمل یک واحد محصول p در هر کیلومتر بین تأمین کنندگان و کارخانه ها	Y_{jkpt}	جریمه برای هر واحد تاخیر و تعجیل در ورود محصول p از کارخانه z به مرکز توزیع k در دوره t
CJK_p	هزینه حمل و نقل محصول p در هر کیلومتر بین کارخانه‌ها و مراکز توزیع	β_{jkpt}	جریمه برای هر واحد تاخیر و تعجیل در ورود محصول p از کارخانه z به مرکز توزیع k در دوره t
CKC_p	هزینه حمل و نقل محصول p در هر کیلومتر بین مراکز توزیع و بازارهای تقاضا	ac_{jkpt}	زمان تعجیل در ورود محصول p از کارخانه z به مرکز توزیع k در دوره t
CCR_p	هزینه حمل و نقل محصول p در هر کیلومتر بین بازارهای تقاضا و مراکز جمع آوری	de_{jkpt}	زمان تاخیر در ورود محصول p از کارخانه z به مرکز توزیع k در دوره t
CRE_p	هزینه حمل و نقل محصول p در هر کیلومتر بین مراکز جمع آوری و مرکز انهدام	CRJ_p	هزینه حمل و نقل محصول p در هر کیلومتر بین مراکز جمع آوری و کارخانه ها
a_p	صرفه جویی در هزینه محصول p به دلیل بازاریابی	E_{ij}	فاصله بین تأمین کنندگان i و کارخانه های z
α_p	نسبت محصول p که تصمیم به انهدام گرفته می شود	E_{jk}	فاصله بین کارخانه های z و مراکز توزیع k
E_{rj}	فاصله بین مرکز جمع آوری r و کارخانه z	E_{kc}	فاصله بین مراکز توزیع k و بازارهای تقاضا c
E_{re}	فاصله بین مرکز جمع آوری r و مرکز انهدام e	E_{cr}	فاصله بین بازارهای تقاضا c و مرکز جمع آوری r

د) متغیرهای تصمیم مدل

جدول شماره (۴): متغیرهای تصمیم مدل ریاضی

X_{ijpt}	مقدار مواد اولیه تولید محصول p خریداری شده توسط کارخانه z از تأمین کننده i در دوره t
Y_{jkpt}	مقدار محصول p تولید شده توسط کارخانه z برای مرکز توزیع k در دوره t
Z_{kcpt}	مقدار محصول p ارسال شده توسط مرکز توزیع k برای بازار c در دوره t
U_{crpt}	مقدار محصول برگشتی p از بازار تقاضا به مرکز جمع آوری r در دوره t
V_{rjpt}	مقدار محصول برگشتی p از مرکز جمع آوری r تا کارخانه z در دوره t
W_{rept}	مقدار محصول برگشتی p از مرکز جمع آوری r تا مرکز انهدام e در دوره t
InV_{kpt}	مقدار موجودی کالای p در مرکز توزیع k در دوره t
O_k	متغیر باینری اگر مرکز توزیع k افتتاح شود ۱ و در غیر اینصورت صفر
G_r	متغیر باینری اگر مرکز جمع آوری r افتتاح شود ۱ و در غیر این صورت صفر
L_j	متغیر باینری اگر کارخانه z افتتاح شود ۱ و در غیر این صورت صفر

ه) مدل‌سازی ریاضی

با توجه به نمادهای تعریف شده، مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با اهداف حداقل کردن هزینه و حداقل کردن زمان تاخیر و تعجیل محصول از تولید کننده به توزیع کننده به صورت ذیل ارائه می‌گردد:

۱. توابع هدف

$$\begin{aligned}
 Min Z_1 : & \sum_j F_j L_j + \sum_k A_k O_k + \sum_r B_r G_r + \sum_k \sum_p \sum_t HC_{kpt} . InV_{kpt} + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t (SC_p + E_{ij} . CIJ_p) . X_{ijpt} \\
 & + \sum_j \sum_k \sum_p \sum_t (MC_p + E_{jk} . CKC_p) Y_{jkpt} + \sum_k \sum_c \sum_p \sum_t CKC_p . E_{kc} . Z_{kcpt} + \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t CCR_p . E_{cr} . U_{crpt} \\
 & + \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t (-a_p + CRJ_p . E_{rj}) V_{rjpt} + \sum_r \sum_e \sum_p \sum_t (H_p + CRE_p . E_{re}) W_{rept}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$Min Z_2 : \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \gamma_{jkpt} \cdot ac_{jkpt} Y_{jkpt} \right) \right] + \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \beta_{jkpt} \cdot de_{jkpt} Y_{jkpt} \right) \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

تابع هدف اول که در معادله 1 نشان داده شده است، کل هزینه شبکه را به حداقل می‌رساند. بخش اول و دوم و سوم هزینه احداث تسهیلات (مراکز تولید، مراکز توزیع و مراکز جمع آوری) را نشان می‌دهد. بخش چهارم به هزینه موجودی کل در مراکز توزیع اشاره شد. بخش پنجم شامل هزینه های خرید و حمل و نقل محصولات از تامین کنندگان به کارخانه ها می‌باشد. بخش ششم شامل هزینه های تولید و حمل و نقل محصولات از کارخانه ها به مراکز توزیع است. بخش هفتم شامل هزینه حمل و نقل محصولات از کارخانه ها به مراکز توزیع است. بخش بعدی هزینه های حمل محصولات بازگشتی را نشان می‌دهد. بخش نهم میزان صرفه جویی در هزینه محصولات بازگشتی و هزینه های حمل و نقل ارسال محصولات از مراکز جمع آوری به کارخانه ها را نشان می‌دهد. بخش دهم هزینه انهدام و حمل و نقل محصولات از مرکز جمع آوری به مرکز انهدام را در مدل اشاره می‌کند. تابع هدف دوم به دنبال حداقل کردن زمان تاخیر و تعجیل در ارسال محصولات از تولیدکنندگان به توزیع کنندگان و در نتیجه کمینه کردن فضای انبارش است

محدودیت ها

$$\sum_k Z_{kcpt} \geq D_{cpt} \quad \forall c, p, t \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sum_j Y_{jkpt} + Inv_{kp(t-1)} = \sum_k Z_{kcpt} + Inv_{kpt} \quad \forall k, p, t \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_j X_{ijpt} + \sum_r V_{rjpt} = \sum_k Y_{jkpt} \quad \forall j, p, t \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_j Y_{jkpt} \geq \sum_k Z_{kcpt} \quad \forall k, p, t \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_j Z_{kcpt} \geq \sum_r U_{crpt} \quad \forall c, p, t \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_k U_{crpt} = RE_{cpt} \quad \forall c, p, t \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\alpha_p \cdot \sum_r U_{crpt} \leq \sum W_{rept} \quad \forall r, p, t \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_r U_{crpt} = \sum_j V_{rjpt} + \sum W_{rept} \quad \forall r, p, t \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sum_i \sum_p X_{ijpt} + \sum_r \sum_p V_{rjpt} \leq L_j \cdot \sum_p Ca_j \quad \forall j, t \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_i \sum_p Y_{jkpt} \leq O_k \cdot \sum_p CaK_{kp} \quad \forall k, t \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sum_j \sum_p U_{crpt} \leq G_r \cdot \sum_p CaR_{rp} \quad \forall r, t \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$O_k, G_r, L_j \in \{0, 1\} \quad \forall j, r, k \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$X_{ijpt}, Y_{jkpt}, Z_{kcpt}, U_{crpt}, V_{rjpt}, W_{rept}, Inv_{kpt} \geq 0 \quad \forall i, j, k, c, r, e, p, t \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

محدودیت ۳ بیان می‌کند که مراکز توزیع باید بتواند تقاضای محصول را در هر دوره برآورده کند. محدودیت ۴ به رابطه بالانس موجودی معروف است. محدودیت ۵ نشان می‌دهد تعداد محصولات فرستاده شده از کارخانه ها با تعداد محصولات دریافتی از مراکز جمع آوری و تامین کنندگان توسط کارخانه برابر است. محدودیت ۶ نشان می‌دهد که تعداد محصولات دریافتی توزیع کننده باید حداقل برابر تعداد محصولات ارسالی آن باشد. و محدودیت ۷ بیانگر این است که تعداد محصولات فرستاده شده از توزیع کننده به مرکز مشتری بیشتر از تعداد محصولات فرستاده شده از مرکز مشتری به مرکز جمع آوری می‌باشد. محدودیت ۸ بیانگر تعداد محصولات برگشتی از بازارهای تقاضا است. محدودیت ۹ نشان دهنده کسری از محصولات برگشتی است. در محدودیت ۱۰ تعداد محصولاتی که به مرکز جمع آوری فرستاده میشود با تعداد محصولات ارسال شده به مراکز دفع و کارخانه ها برابر است. محدودیت ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ مربوط به ظرفیت تسهیلات (کارخانه ها، مراکز توزیع و مراکز جمع آوری) است. محدودیت ۱۴ نشان دهنده متغیرهای دودویی و محدودیت ۱۵ نشان دهنده غیرمنفی بودن متغیرهای پیوسته است.

۲. مدل استوار مبتنی بر سناریو

از دیدگاه مالوی و همکاران، دو تعریف در حوزه مدل استوار وجود دارد جواب استوار و مدل استوار که در ادامه به هر یک اشاره می شود. با توجه به مفاهیم و تعاریف یادشده، فرمول بندی مدل عمومی بر بهینه سازی استوار است. در این روش، در مواجهه با مدل های بهینه سازی با دو بخش مجزا روبه رو می باشد؛ (۱) بخش ساختاری که ثابت است و هیچ گونه اختلالی در داده های ورودی آن وجود ندارد. (۲) بخش کنترل که تابع دستخوش داده های نویز و نوسانی است. همچنین دو مجموعه از متغیرها قابل تعریف اند؛

$X \in R^{n1}$: بردار متغیرهای تصمیم و مشروط به تحقق یافتن پارامترهای نامطمئن است که متغیرهای طراحی شناخته می شوند.

$Y \in R^{n2}$: متغیرهای تصمیم کنترل و مستعد تنظیم پارامترهای نامطمئن است. مقادیر بهینه این متغیرها به تحقق یافتن

پارامترهای نامطمئن و مقادیر بهینه متغیرهای طراحی، وابسته است.

مدل بهینه سازی دارای ساختاری به صورت زیر است:

$$\text{Min} Z = C^T X + d^T Y \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\text{subject to : } A X = b$$

$$b x + c y = e$$

$$x \geq 0$$

رابطه (۱۶) بیانگر محدودیتهای ساختاری است که ضرایب آن ثابت و فاقد هرگونه نویز و نوسان (ضرایی مطمئن) هستند. معادله بالا بیانگر محدودیتهای کنترل است. ضرایب این محدودیت در برگرفته (مستعد) حالت نویزی و نوسانی هستند و معادله بعد بیانگر اطمینان از بردارهای نامنفی می باشد. به منظور تعریف مسأله بهینه سازی استوار مجموعه ای از سناریوها به شکل $\Omega = \{1, 2, 3, \dots, S\}$ تعریف می شود. اکنون برای هر یک از سناریوهای باید پارامتر (e_s, C_s, B_s, d_s) تعریف گردد. درحالی که S تعداد سناریوها و P_s احتمال وقوع هر یک از این بردارها باشد، رابطه زیر برقرار خواهد بود.

$$\sum P_s = 1 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

جواب بهینه مدل ریاضی فوق به لحاظ بهینگی، استوار خواهد بود. اگر به ازای تحقق یافتن هر سناریو S، «نزدیک» به بهینه باقی خواهد ماند و این «استواری جواب» نامیده می شود. جواب همچنین در قبال موجه بودن استوار است. اگر جواب به ازای هر تحقق (عملکرد) از S «تقریباً» موجه می باشد و این «استواری مدل» نامیده می شود. در اکثر مواقع یک مدل نمی تواند دارای راه حل استوار بوده و خود مدل استوار باشد. اغلب سناریوهایی وجود دارد که یکی از این موارد را نقض کنند. بنابراین مدلسازی باید بدنبال توازن بین مدل استوار و راه حل استوار باشد. برنامه ریزی آرمانی به صورت زیر به مدلسازی کمک می کند تا این توازن را بدست آورد.

$$\text{Min} Z = (x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega \sum \rho(\delta_1, \dots, \delta_s) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\text{subject to : } A X = b$$

$$B_s x + C_s y_s + Z_s = e_s$$

$$x \geq 0, S \geq 0$$

مجموعه $\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ مجموعه ای از متغیر کنترل برای سناریو $S \in \Omega$ است. همچنین $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s\}$ بردارهای خطا است که ناموجهی مجاز در محدودیتهای کنترل تحت سناریوی S را اندازه گیری می کنند. با توجه به سناریوهای چندگانه، تابع هدف $\xi_s = C^T x + d^T y$ متغیری تصادفی است که مقدار $\xi_s = C^T x + d^T y_s$ را با احتمال P_s می گیرد (Mulvey et al., 1995; Leung et al., 2007). عبارت دوم در تابع هدف یعنی $(\delta_1, \dots, \delta_s)$ یک تابع جریمه موجه بودن است که به منظور جریمه کردن نقض و تخطی از محدودیتهای کنترل با توجه به برخی از سناریوها مد نظر قرار می گیرد. نقض و تخطی از محدودیتهای کنترل به این مفهوم است که جواب غیرموجه برای یک مسأله در برخی از سناریوها حاصل می شود. به کمک وزن توازن (مبادله) بین استواری جواب (که توسط واژه $\sigma(0)$ سنجیده می شود) و استواری مدل (که توسط عبارت $\rho(0)$ سنجیده می شود).

برای نمونه اگر $\omega = 0$ باشد، تابع هدف عبارت $\sigma(0)$ را حداقل می‌کند و جواب ممکن است غیرموجه باشد در حالیکه اگر به ω مقدار نسبتاً بزرگی تخصیص یابد هزینه بیشتری را حاصل می‌کند (Mulvey, et al., 1995; Yu & Li, 2000; Leung, et al., 2007). واژه $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$ که به وسیله مالوی و همکاران (۱۹۹۵) ارائه شده که شامل مقدار میانگین (0) و به علاوه مقدار ثابت λ ضرب در واریانس آن است، بطوری که داریم:

$$(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s=S} P_s \xi_s + \lambda \cdot \sum_{s=S} P_s \left[\xi_s - \sum_{s=S} P_s \cdot \xi_s \right]^2 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

این راه‌حل با افزایش کمتر به تغییر در داده‌ها تحت همه سناریوها حساس است (Mulvey, et al., 1995). شامل بخشی است که دارای توان دوم است و شکلی کوادراتیک^۳ در مدلسازی می‌باشد. براین اساس یو و لی (۲۰۰۰) بیان می‌دارد که عبارت $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$ ارائه شده به وسیله مالوی و همکاران (۱۹۹۵) نیازمند محاسبات زیادی است. فرمول زیر به جای آن ارائه نمودند (Yu & Li, 2000):

$$(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s=S} P_s \xi_s + \lambda \cdot \sum_{s=S} P_s \left| \xi_s - \sum_{s=S} P_s \cdot \xi_s \right| \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

این تابع هدف غیرخطی است ولی قابل تبدیل به تابع خطی با اضافه کردن دو متغیر انحراف غیرمنفی می‌باشد. یو و لی پیشنهاد می‌دهند، به جای حداقل کردن مرجع انحرافات مطلق از میانگین دو تابع فوق، دو متغیر انحراف با توجه به محدودیت‌ها حداقل می‌گردد. اما یو و لی (۲۰۰۰) یک روش کارا (براساس روش حل مسائل برنامه‌ریزی آرمانی ارائه شده لی (۱۹۹۶)) را ارائه می‌کنند. رویکرد یو و لی (۲۰۰۰) بشکل ذیل می‌باشد:

$$(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s=S} P_s \xi_s + \lambda \cdot \sum_{s=S} P_s \left[\left[\xi_s - \sum_{s=S} P_s \cdot \xi_s \right] + 2\theta_s \right] \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\text{subject to : } \xi_s - \sum_{s=S} P_s \cdot \xi_s \geq 0$$

۳. مدل بهینه سازی استوار پیشنهادی

تابع هدف اول مسئله استوارسازی می‌شود و با فرض اینکه تقاضا و هزینه‌ها دارای عدم قطعیت می‌باشند. برای مدل از بهینه-سازی استوار با رویکرد مالوی و همکاران استفاده می‌شود. یک اندیس جدید s ($s=1, 2, \dots, S$) با عنوان تعداد سناریوها به مجموعه اندیس‌ها اضافه می‌شود و به معرفی پارامترها و متغیرهای کنترل جدید می‌پردازیم:

جدول شماره (۵): پارامترهای اضافه شده به مدل

هزینه جریمه برای هر واحد تقاضای نامشخص ω مقدار ثابت λ احتمال وقوع سناریوها P_s

جدول شماره (۶): متغیرهای کنترل

ضریب خطی تحت سناریو S θ_s تقاضای بی پاسخ محصول p برای مشتری c در دوره t تحت سناریو S δ_{cpts}

تابع هدف دوم به دلیل اینکه پارامترهای غیرقطعی در آن تاثیر ندارد بدون تغییر می‌ماند:

$$Min Z_1 : \sum_j F_j L_j + \sum_k A_k O_k + \sum_r B_r G_r + \sum_k \sum_p \sum_t H C_{kpt} . Inv_{kpt} + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_t (S C_p + E_{ij} . C I J_p) . X_{ijpt} + \sum_j \sum_k \sum_p \sum_t (M C_p + E_{jk} . C K C_p) Y_{jkpt} + \sum_k \sum_c \sum_p \sum_t C K C_p . E_{kc} . Z_{kcpt} + \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t C C R_p . E_{cr} U_{crpt} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$+ \sum_r \sum_j \sum_p \sum_t (-a_p + C R J_p . E_{rj}) V_{rjpt} + \sum_r \sum_e \sum_p \sum_t (H_p + C R E_p . E_{re}) W_{rept}$$

$$Min Z_1 : \sum_s P_s . Z_{1s} + \lambda . \sum_s P_s \left(\left(Z_{1s} - \sum_s P_s . Z_{1s} \right) + 2\theta \right) + \omega \sum_c \sum_p \sum_t \sum_s P_s . \delta_{cpts} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$Min Z_2 : \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \sum_s \gamma_{jkpt} . ac_{jkpt} Y_{jkpts} \right) \right] + \left[\left(\sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \sum_s \beta_{jkpt} . de_{jkpt} Y_{jkpts} \right) \right] \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

عبارت نخست تابع هدف به حداقل نمودن میانگین تابع هزینه در صورت رخداد هر یک از سناریوها پرداخته میشود. عبارت دوم جهت حداقل نمودن واریانس تابع مذکور و باقی عبارات تابع هدف، توابع جریمه هستند که همگی مربوط به بخش استواری مدل می‌باشند.

محدودیت‌ها

محدودیت‌های کنترل بصورت زیر می‌باشند:

$$\sum_k Z_{kcpts} + \delta_{cpts} = D_{cpts} \quad \forall c, p, t, s \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\sum_j Y_{jkpts} + Inv_{kp(t-1)s} = \sum_k Z_{kcpts} + Inv_{kpts} \quad \forall k, p, t, s \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$\sum_i X_{ijpts} + \sum_r V_{rjpts} = \sum_k Y_{jkpts} \quad \forall j, p, t, s \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\sum_j Y_{jkpts} \geq \sum_k Z_{kcpts} \quad \forall k, p, t, s \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\sum_j Z_{kcpts} \geq \sum_r U_{crpts} \quad \forall c, p, t, s \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\sum_k U_{crpts} = R E_{cpts} \quad \forall c, p, t, s \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$\alpha_p . \sum_c U_{crpts} \leq \sum_e W_{repts} \quad \forall r, p, t, s \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$\sum_c U_{crpts} = \sum_j V_{rjpts} + \sum_e W_{repts} \quad \forall r, p, t, s \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$\sum_i \sum_p X_{ijpts} + \sum_r \sum_p V_{rjpts} \leq L_j . \sum_p C a j_{jp} \quad \forall j, t, s \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$\sum_i \sum_p Y_{jkpts} \leq O_k . \sum_p C a k_{kp} \quad \forall k, t, s \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$\sum_j \sum_p U_{crpts} \leq G_r . \sum_p C a r_{rp} \quad \forall r, t, s \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$Z_{1s} - \sum_s P_s . Z_{1s} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$O_k, G_r, L_j \in \{0, 1\} \quad \forall j, r, k \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

$$X_{ijpts}, Y_{jkpts}, Z_{kcpts}, U_{crpts}, V_{rjpts}, W_{repts}, Inv_{kpts} \geq 0 \quad \forall i, j, k, c, r, e, p, t, s \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

محدودیت‌های ظرفیت ذخیره سازی مراکز تولید و توزیع و جمع آوری و همچنین محدودیت مربوط به تعادل موجودی محصول پایانی در مراکز توزیع و سپس محدودیت تقاضا به صورت عبارات بالا بازنویسی می‌شوند. محدودیت بالا نشان دهنده محدودیت خطی سازی تابع هدف استوار بعنوان محدودیت جدید اضافه می‌شود.

۴. روش ال پی-متریک

روش ال پی متریک به منظور سنجش میزان نزدیکی به یک راه حل ایده آل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سنجش از انحراف به صورت زیر خواهد بود (Myers & Montgomery, 1995):

$$\sum_{j=1}^n \gamma_j = 1 \quad L - P = \left\{ \sum_{j=1}^K \gamma_j \left[\frac{f_j(x_j^*) - f_j(x_j)}{f_j(x_j^*)} \right]^p \right\}^{1/p} \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

γ_j بیانگر درجه اهمیت یا همان وزن برای هدف j ام می‌باشد. برای از بین بردن مشکل متفاوت بودن مقیاس های اهداف، میزان انحراف جواب ایده آل هدف j ام و تابع هدف آن را بر $f_j(x_j^*)$ تقسیم می‌کنیم. $1 \leq P \leq \infty$ هم مشخص کننده درجه تاکید بر انحرافات است بگونه ایی که هر چه این ارزش بزرگتر باشد تاکید بیشتری بر بزرگترین انحراف خواهد بود. تابع هدف کلی روش ال پی-متریک نیز به منظور حداقل کردن انحرافات از ایده آل باید کمینه گردد.

۵. روش اپسیلون-محدودیت

روش محدودیت اپسیلون^۴، از جمله روش های حل مسائل چند هدفه می‌باشد که تعداد دلخواهی نقاط پارتویی حاصل از موازنه توابع هدف را ارائه می‌دهد. نقاط پارتویی، به مجموعه تمامی راه حل های موثر یک مساله چندهدفه اطلاق می‌شود. این روش یکی از روش های بدست آوردن مرز پارتو می باشد (Mavrotas, 2009). روش اپسیلون محدودیت یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت به حل این نوع از مسائل می‌پردازد. مرز پارتو^۵ می‌تواند با روش قید ϵ ایجاد شود.

$$\min f_1(x) \quad \text{s.t. } X \in D, \quad \begin{aligned} f_1(x) &\leq \epsilon_2 \\ &\dots \\ f_n(x) &\leq \epsilon_n \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

بطور کلی، گام های روش اپسیلون محدودیت به صورت زیر است:

گام ۱. یکی از توابع هدف را بعنوان تابع هدف اصلی انتخاب کنید.
گام ۲. هربار با توجه به یکی از توابع هدف، مسئله را حل کنید و مقادیر بهینه هر تابع هدف را به دست آورید.
گام ۳. بازه بین مقادیر بهینه توابع هدف فرعی را بتعداد از قبل مشخص شده تقسیم کنید و یک جدول برای $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$ به دست آورید.

گام ۴. هربار مسئله را با تابع هدف اصلی با هریک از مقادیر $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n$ حل کنید.

گام ۵. در نهایت نیز جواب های پارتویی نتیجه شده گزارش گردد.

۶. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

الگوریتم دسته ذرات^۶ اولین بار در ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات مطرح شد. مانند دیگر الگوریتم های تکاملی، الگوریتم دسته ذرات نیز با ایجاد یک جمعیت تصادفی از ذرات شروع می‌کند که به آنها گروه ذرات گفته می‌شود. مشخصات هر ذره براساس مجموعه ای از پارامترها تعیین می‌شود که باید مقدار بهینه آنها تعیین شود. در این روش هر ذره یک نقطه از فضای جواب مساله را نشان می‌دهد (Angeline, 1998; Eberhart & Shi, 1998). در این الگوریتم، هر پرنده یک جواب ممکن در فضای جستجوی مسئله می‌باشد که آن را ذره می‌نامند. در ابتدا PSO بوسیله گروهی از پرندگان که بطورتصادفی در فضای مسئله تولید شده‌اند، مقداردهی می‌شوند و سپس جستجو برای رسیدن به بهترین جواب آغاز می‌گردد (Poli & Broomhead, 2007)

۷. الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات^۷ توسط کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید.

⁴ ϵ -constraint

⁵ Pareto Front

⁶ Particle Swarm Optimization

⁷ Multi-Objective Particle Swarm Optimization- MOPSO

در واقع الگوریتم، تعمیمی است از الگوریتم PSO، که برای حل مسائل چند هدفه بکار می رود. (Coello et al., 2007). در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام مخزن^۸ نسبت به الگوریتم PSO اضافه شده است. در این الگوریتم بهترین جواب‌های نامغلوب در یک حافظه خارجی نگهداری می‌شود. (Kim & Nelson, 2005). هنگامی که ذرات می‌خواهند حرکتی انجام دهند یک عضو از مخزن را بعنوان لیدر یا رهبر انتخاب می‌کنند. این لیدر حتما باید عضو مخزن و همچنین نامغلوب باشد. اعضای مخزن بیانگر جبهه ی پارتو و شامل ذرات نامغلوب هستند. به این دلیل در PSO مخزن وجود ندارد که در آن تنها یک هدف وجود دارد و یک ذره است که بهترین است. اما در MOPSO چند ذره وجود دارند که نامغلوب هستند و در مجموعه جواب جای دارند. گام های موجود این الگوریتم به صورت زیر میباشد:

گام اول: ایجاد جمعیت اولیه. در الگوریتم طراحی شده، تعداد ذرات برابر ۵۰ و اندازه آرشیو خارجی ۳۰ تعیین شد.

گام دوم: جدا کردن اعضای نامغلوب و ذخیره کردن آنها در حافظه خارجی

گام سوم: جدول بندی فضای هدف کشف شده

گام چهارم: انتخاب رهبر

با کمک رابطه ۳۶ احتمال انتخاب هر سلول مشخص میشود. طبق این رابطه، سلول با اعضای کمتر احتمال انتخاب بیشتری دارد (Coello et al., 2007). ii شماره سلول است.

$$prob_{ii} = \frac{e^{-n_{ii}}}{\sum_j e^{-n_{ij}}}, \quad 0 \leq prob_{ii} \leq 1, \quad \sum_i p_i = 1 \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

پس از تعیین احتمال انتخاب سلول ها با استفاده از روش چرخ رولت یکی از سلول ها انتخاب می شود و سپس یکی از اعضای سلول به صورت تصادفی بعنوان رهبر انتخاب میشود

گام پنجم: عملگرهای الگوریتم mopso. در pso گسسته سرعت باید به احتمالی تبدیل شود که همان شانس گرفتن ارزش 1 برای ذره است (Kennedy & Eberhart, 2001).

در اینجا برای محاسبه سرعت ذره از روابط 37 و 38 استفاده شد. c1 و c2 اعداد ثابت و برابر ۲ هستند. Pbest(i) بهترین جواب هر ذره i و Rep(t) بهترین جواب کلی (رهبر) است. W ثابت اینرسی نام دارد و برابر 0.5 است. r1 و r2 اعدادی تصادفی در محدوده ی [۰,۱] هستند. Xi^t موقعیت کنونی آمین ذره در زمان t و V^t سرعت حرکت ذره ها در آن مرحله می باشد.

V_i^{t+1} و X_i^{t+1} سرعت و موقعیت بروز شده ذره می باشد. P(t) همان pbest ذره است. در مرحله بعد باید pbest با توجه به موقعیت جدید به صورت زیر بروز شود

$$V_i^{t+1} = w V_i^t + c_1 \cdot r_1 (pbest(t) - X_i^t) + c_2 \cdot r_2 (rep(t) - X_i^t) \quad \text{رابطه (۴۲)}$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad \text{رابطه (۴۳)}$$

گام ششم: به روز رسانی بهترین تجربه شخصی هریک از ذرات. اگر موقعیت جدید ذره، بهترین تجربه را مغلوب کند، موقعیت جدید جای بهترین تجربه را میگیرد و اگر هیچ یک همدیگر را مغلوب نکنند، یکی از دو موقعیت بالا بطورتصادفی بهترین تجربه میشود.

$$P(t+1) = \begin{cases} p(t) & \text{در غیر این صورت} \\ x^{t+1} & p(t) \leq x^{t+1} \\ & x^{t+1} \leq p(t) \end{cases} \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

یکی به تصادف انتخاب میشود

گام هفتم: اضافه شدن اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به حافظه خارجی

گام هشتم: حذف اعضای نامغلوب حافظه خارجی

گام نهم: حذف اعضای بیش از ظرفیت حافظه خارجی

احتمال حذف شدن جواب های بیش از ظرفیت حافظه خارجی با توجه به رابطه 40 به دست می آید ii. شماره سلول است. پس از تعیین احتمالات حذف جواب های اضافی، با کمک روش چرخ رولت جواب های اضافی حذف می شوند.

$$del_prob_{ii} = \frac{e^{n_{ii}}}{\sum_j e^{n_{ij}}}, 0 \leq del_prob_{ii} \leq 1, \sum_i q_{ii} = 1 \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

گام دهم: در صورت تحقق شرط پایان، توقف و درغیراین صورت رفتن به گام سوم

۳- نتایج و بحث

برای نشان دادن اعتبار و کارایی مدل سناریویی و روش های حل پیشنهاد شده و نیز مقایسه عملکرد این روش ها به منظور بهینه ساختن توابع هدف بطورهمزمان، چند مثال عددی با ابعاد مختلف ارائه می شوند. برای مدل ۱۰ مسئله با ابعاد بزرگ و کوچک (۶ مسئله با ابعاد کوچک و ۴ مسئله با ابعاد بزرگ) در نظر گرفته می شود تمام پارامترهای ورودی مسائل بطورتصادفی با استفاده از توزیع یکنواخت در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول شماره (۷): اطلاعات عددی پارامترها

پارامترها	توزیع تصادفی	پارامترها	توزیع تصادفی	پارامترها	توزیع تصادفی	پارامترها	توزیع تصادفی
D_{cpt}	$U(300 \text{ و } 500)$	HC_{kpt}	$U(10 \text{ و } 50)$	E_{ij}	$U(70 \text{ و } 200)$	CIJ_p	$U(10 \text{ و } 20)$
F_j	$U(500 \text{ و } 2500)$	RE_{cpt}	$U(100 \text{ و } 200)$	E_{jk}	$U(100 \text{ و } 200)$	CJK_p	$U(20 \text{ و } 30)$
A_k	$U(200 \text{ و } 800)$	CaJ_{jp}	$U(1000 \text{ و } 5000)$	E_{kc}	$U(50 \text{ و } 300)$	CKC_p	$U(30 \text{ و } 40)$
B_r	$U(500 \text{ و } 1000)$	CaR_{rp}	$U(1000 \text{ و } 2000)$	E_{cr}	$U(10 \text{ و } 20)$	CCR_p	$U(40 \text{ و } 50)$
SC_p	$U(1500 \text{ و } 3000)$	CaK_{kp}	$U(500 \text{ و } 900)$	E_{rj}	$U(150 \text{ و } 300)$	CRE_p	$U(60 \text{ و } 70)$
MC_p	$U(1000 \text{ و } 2000)$	aC_{jkpt}	$U(2 \text{ و } 3)$	E_{re}	$U(200 \text{ و } 400)$	CRJ_p	$U(50 \text{ و } 60)$
γ_{jkpt}	$U(70 \text{ و } 200)$	de_{jkpt}	$U(4 \text{ و } 6)$	H_p	$U(15 \text{ و } 30)$		
β_{jkpt}	$U(100 \text{ و } 200)$	a_p	$U(20 \text{ و } 40)$	α_p	$U(0/25 \text{ و } 55)$		

با استفاده از داده های عددی در جدول بالا، مدل پیشنهادی چند هدفه استوار با دو روش ال پی متریک و اپسیلون-محدودیت در نسخه ۲۴.۱.۳ نرم افزار GAMS و در یک سیستم با مشخصات CPU=CORI7 و حافظه رم ۲ گیگابایت حل شده است.

الف) بررسی جواب های حل مدل با دو روش ال پی-متریک و اپسیلون-محدودیت در جدول ۸ و ۹ و شکل ۳ و ۲ نتایج حاصل از مقادیر توابع هدف Z_1 و Z_2 و در شش مسئله مختلف با دو روش اپسیلون-محدودیت و ال پی-متریک بررسی می گردد.

جدول شماره (۹): نتایج محاسباتی با روش اپسیلون-محدودیت

مسئله	Z_1	Z_2
1	۱۵۰۹۷۱۸۰۰	۳۷۵۳۸۸۴
2	۱۵۱۹۱۳۷۰۰	۴۰۰۳۸۴۶
3	۱۹۲۹۴۶۴۰۰	۶۰۲۷۲۳۱
4	۳۰۴۳۰۵۷۰۰	۸۷۰۶۷۹۹
5	۴۷۶۰۹۷۵۰۰	۱۲۲۸۹۴۹۰
6	۵۷۵۱۱۸۹۰۰	۱۴۵۵۷۶۰۰

جدول شماره (۸): نتایج محاسباتی با روش ال پی-متریک

مسئله	Z_1	Z_2
۱	۱۳۰۵۵۷۲۰۰	۳۷۵۳۸۸۴
۲	۱۳۲۸۳۳۵۰۰	۴۰۰۳۸۴۶
۳	۱۶۹۹۳۸۶۰۰	۶۰۲۷۲۳۱
۴	۲۶۹۷۳۳۸۰۰	۸۷۰۶۷۹۹
۵	۳۸۶۴۶۷۷۰۰	۱۲۲۸۹۴۹۰
۶	۴۶۸۷۰۵۰۰۰	۱۴۵۵۷۶۰۰

برای انتخاب بهترین روش با توجه به جدول ۸ و ۹، برای هر مساله بهترین و بدترین مقدار را در نظر گرفته می شود. چون Z_1 و Z_2 در مدل پیشنهادی از جنس کمینه سازی بوده پس کمترین مقدار در هر مساله بعنوان بهترین جواب انتخاب میشود. نمودارهای مربوط به Z_2 نشان می دهند که دو روش هیچ تفاوتی در به حداقل زمان تاخیر و تعجیل نسبت به هم ندارند. نمودارهای Z_1 نشان هنده این است که روش ال پی-متریک عملکرد بهتری را در به حداقل رساندن هزینه ها داشته است.

بنابراین در روش ال پی- متریکی مقادیر Z_1 و Z_2 در تمامی مسائل طراحی شده کمترین مقادیر را نسبت به روش اپسیلون- محدودیت دارد، در نهایت در میان این دو روش، روش ال پی- متریکی بهترین است.



شکل شماره (۳): مقدار Z_2 در شش مسئله طراحی شده

شکل شماره (۲): مقدار Z_1 در شش مسئله طراحی شده

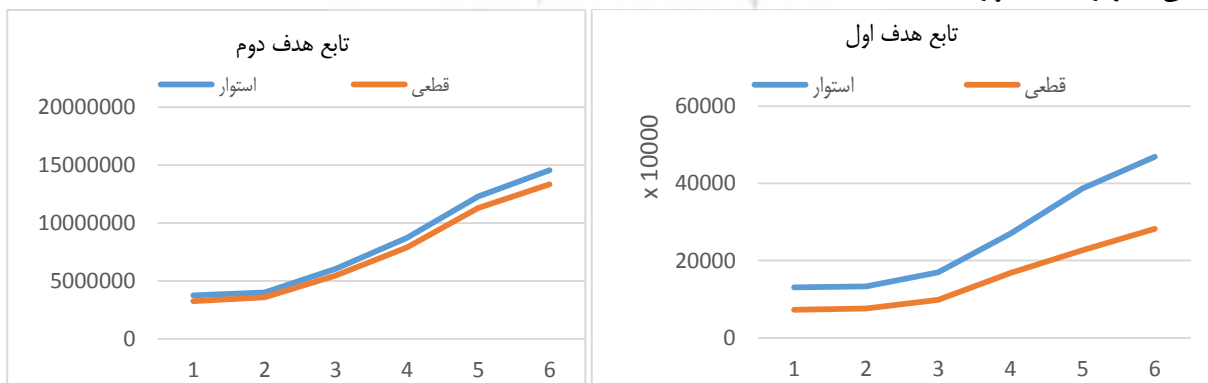
(ب) بررسی و تحلیل جواب ها در حالت قطعی و استوار

با توجه به در نظر گرفتن مدل ریاضی در دو حالت قطعی و غیر قطعی، نتایج برای هر دو حالت در شش مسئله آزمایشی در جدول ۱۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج محاسباتی بدست آمده در جدول ۹ برای تمام مسائل در ابعاد کوچک طراحی شده، مشاهده می شود که جواب مدل در حالت استوار نسبت به حالت قطعی بدتر بوده است و این امری طبیعی است. زیرا در حالت بهینه سازی استوار بدترین حالات سیستم در نظر گرفته می شود و از این رو جواب های حاصل همواره نسبت به مدل های قطعی بدتر می باشد. از این جهت پیاده سازی جواب مدل های استوار دارای ریسک به مراتب پایین تری نسبت به مدل های قطعی می باشد.

جدول شماره (۱۰): مقایسه جواب ها در حالت قطعی و استوار

شماره مسئله	قطعی		استوار	
	Z_1	Z_2	Z_1	Z_2
۱	۷۲۹۲۲۱۶۰	۳۲۵۲۹۶۴	۱۳۰۵۵۷۲۰۰	۳۷۵۳۸۸۴
۲	۷۵۷۱۱۹۰۰	۳۵۸۳۸۸۸	۱۳۲۸۳۳۵۰۰	۴۰۰۳۸۴۶
۳	۹۸۳۱۷۲۰۰	۵۴۵۴۸۶۵	۱۶۹۹۳۸۶۰۰	۶۰۲۷۲۳۱
۴	۱۶۷۵۸۲۰۰۰	۷۹۰۳۰۲۹	۲۶۹۷۲۳۸۰۰	۸۷۰۶۷۹۹
۵	۲۲۶۸۴۳۶۰۰	۱۱۲۸۱۷۴۰	۳۸۶۴۶۷۷۰۰	۱۲۲۸۹۴۹۰
۶	۲۸۲۲۸۴۶۰۰	۱۳۳۲۸۹۲۰	۴۶۸۷۰۵۰۰۰	۱۴۵۵۷۶۰۰

نمودار گرافیکی مقادیر مربوط به دو حالت قطعی و استوار در شکل ۵ و ۴ نشان داده شده است. برای هر مسئله آزمایشی مقدار تابع هدف اول و دوم با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، برای هر مسئله آزمایشی مقدار تابع هدف اول برای حالت قطعی کمتر از حالت استوار است.



شکل شماره (۵): مقادیر تابع هدف دوم در حالت قطعی و استوار

شکل شماره (۴): مقادیر تابع هدف اول در حالت قطعی و استوار

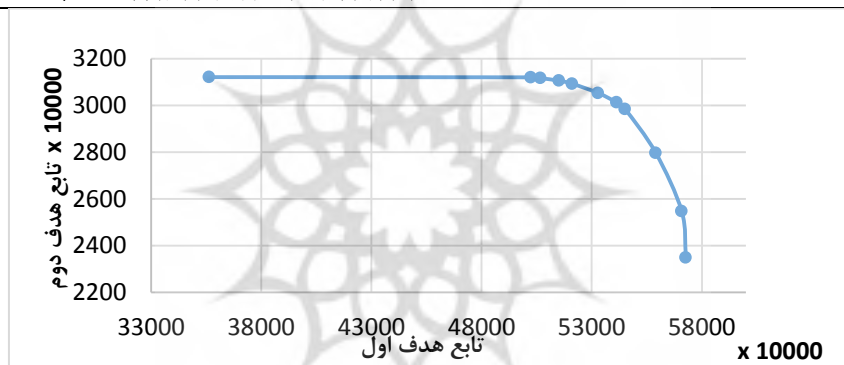
این نشان دهنده این امر می باشد که حالت قطعی با توجه به مینیمم بودن تابع هدف مقدار کمتری دارد. در شکل ۶ مقایسه مقدار تابع هدف دوم در حالت قطعی و استوار نشان داده شده است. این شکل نیز روال افزایشی برای حالت استوار دارد و نشان دهنده این است که همواره جواب مدل در حالت قطعی نسبت به استوار بهتر است.

(ج) بررسی توابع هدف به ازای وزن های متفاوت

مجموعه جواب های بدست آمده از توابع هدف Z_1 و Z_2 در ۱۱ تکرار به ازای مقدار وزن های متفاوت در جدول ۱۱ ارائه گردید. نمودار پارتو برای توابع هدف به ازای وزنهاي مختلف مطابق شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول شماره (۱۱): مقایسه توابع هدف به ازای وزن های متفاوت

شماره تکرار	وزن (W)	Z_1	Z_2	شماره تکرار	وزن (W)	Z_1	Z_2
۱	۰	۳۸۹۵۹۵۲۹۶۸	۲۱۳۹۹۷۱۱۶۴	۷	۰/۶	۴۴۹۴۲۳۷۰۲۸	۲۰۶۸۸۸۵۷۷
۲	۰/۱	۴۱۴۳۸۴۱۴۰۹	۲۱۴۰۸۵۷۶۰	۸	۰/۷	۴۵۶۱۵۸۶۱۰۴	۲۰۳۲۵۸۷۸۴۰۷
۳	۰/۲	۴۱۶۷۲۰۸۴۶۷	۲۱۴۰۰۷۵۰۲۰۱	۹	۰/۸	۴۶۲۲۰۵۳۸۵۱	۱۹۷۴۸۸۰۲۱۰۷
۴	۰/۳	۴۲۳۸۸۸۶۳۳۱	۲۱۳۲۲۶۰۲۸۰۵	۱۰	۰/۹	۴۷۴۶۹۰۸۶۲۳	۱۷۶۳۶۵۹۴۸۰۴
۵	۰/۴	۴۲۶۶۶۲۳۳۳۱	۲۱۲۷۵۸۱۰۹۰۴	۱۱	۱	۴۷۸۴۱۱۱۷۴۸	۱۵۶۶۹۴۹۰۸۰۷
۶	۰/۵	۴۴۳۶۳۲۸۷۸۹	۲۰۸۷۴۳۱۳۳۰۳				



شکل شماره (۶): نمودار پارتو بین توابع هدف Z_1 و Z_2

با توجه به نتایج و محاسبات صورت گرفته مطابق جدول ۱۱ همانطور که مشاهده می گردد با افزایش مقدار وزن (W)، مقدار تابع هدف اول که مینیمم کردن هزینه می باشد افزایش یافته و در همان راستا تابع هدف دوم هم که یک تابع مینیمم است کاهش می یابد. در تکرار شماره ۱ بهترین جواب برای تابع هدف اول (هزینه) و بدترین جواب تابع هدف دوم (زمان) را شامل شده و در تکرار شماره ۱۱ بهترین جواب تابع هدف دوم و بدترین جواب تابع هدف اول را نشان می دهد. همانطور که جدول 10 نشان می دهد با بهبود وضعیت تابع هدف دوم، مقدار تابع هدف اول وضعیت بدتری را به خود می گیرد و بالعکس. روند نشان داده شده در شکل 7 نیز تعارض بین دو تابع هدف ارائه شده را نشان می دهد.

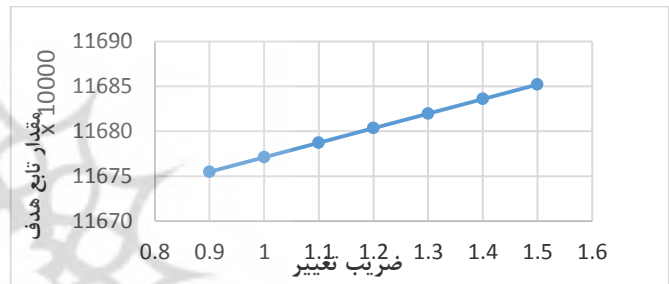
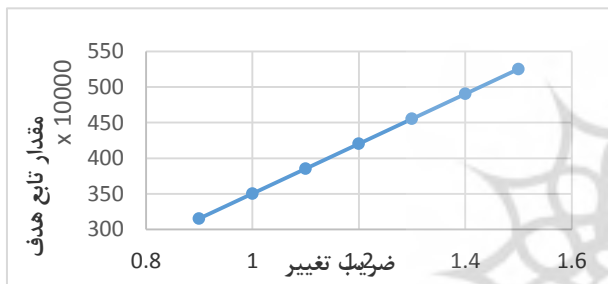
(د) تحلیل حساسیت

یکی از کاربردهای مدل های ریاضی آن است که به کمک آن میتوان تغییرات و نوسانات در هر یک از پارامترهای مطرح شده را بررسی و تاثیر آن بر روی خروجی نهایی مدل ریاضی را رصد نمود. برای این منظور در مدل ریاضی ارائه شده کلیدی ترین پارامترها مورد بررسی قرار می گیرد. پس از بررسی های انجام شده مشخص شده است که میزان محصولات برگشتی از مشتری پارامتری است که به دلیل وابستگی زیاد به شرایط و محدودیت های تولید، ممکن است نوسانات مختلفی داشته باشد. به منظور تحلیل حساسیت این پارامتر به سراغ مثال بررسی شده در اعتبار سنجی مدل ریاضی می رویم. براساس آن مقدار پارامتر میزان محصولات برگشتی را براساس یک روند صعودی افزایش داده می شود. برای این منظور یک ضریب تغییر از ۰.۹ تا ۱.۵ در نظر گرفته و در هر حالت مقدار پایه میزان محصولات برگشتی را در این مقدار ضرب کرده و سپس به ازای آن مدل قطعی را اجرا کرده تا تاثیر آن بر روی مقدار تابع کل مشخص شود. نتیجه این اجرا در جدول زیر ارائه شده است:

جدول شماره (۱۲): نتایج تحلیل حساسیت میزان محصولات برگشتی

مقدار تابع هدف Z_2	مقدار تابع هدف Z_1	میزان محصولات برگشتی از مشتری	ضریب تغییر
۳۱۵۱۴۴۰	۱۰۶۵۱۹۷۰۰	۹۰	۰/۹
۳۵۰۱۶۰۰	۱۱۸۳۳۰۵۰۰	۱۰۰	۱
۳۸۵۱۷۶۰	۱۳۰۱۴۱۳۰۰	۱۱۰	۱/۱
۴۲۰۱۹۲۰	۱۴۱۹۵۲۲۰۰	۱۲۰	۱/۲
۴۵۵۲۰۸۰	۱۵۳۷۶۳۰۰۰	۱۳۰	۱/۳
۴۹۰۲۲۴۰	۱۶۵۵۷۳۸۰۰	۱۴۰	۱/۴
۵۲۵۲۴۰۰	۱۷۷۳۸۴۶۰۰	۱۵۰	۱/۵

با افزایش میزان کالای برگشتی، مقادیر توابع هدف Z_1 و Z_2 نیز روند افزایشی دارد. به منظور درک بهتر این موضوع نمودار زیر ارائه شده است. با توجه به شکل ۹ و ۸ مشاهده میشود افزایش مقدار توابع هدف با افزایش ضریب تغییر رابطه کاملاً خطی دارد. لذا در این شرایط می‌توان ادعا نمود که افزایش و یا کاهش میزان محصولات بازگشتی تاثیر کاملاً شفافی روی مقدار توابع هدف Z_1 و Z_2 دارد و با توجه به رابطه کاملاً خطی بین آنها به سادگی میتوان میزان افزایش و یا میزان کاهش در ازای تغییر این پارامتر را مشخص نمود.



شکل شماره (۸): تحلیل حساسیت میزان محصولات برگشتی برای تابع هدف دوم

شکل شماره (۷): تحلیل حساسیت میزان محصولات برگشتی برای تابع هدف اول

(و) برخی از خروجی های حاصله از مدل

در جدول ۱۲ احداث مراکز بالقوه تولیدکننده و توزیع کننده و مرکز جمع آوری در مسئله ای با مشخصات پنج تامین کننده و تولید کننده و توزیع کننده و مرکز انهدام، دو مرکز مشتری، چهار مرکز جمع آوری، سه نوع محصول و سه سناریو نشان داده شده است.

جدول شماره (۱۳): احداث مراکز بالقوه در سه سناریو

احداث مراکز جمع آوری (I)	احداث مراکز توزیع (k)	احداث مراکز تولید (j)	تعداد سناریو (S)
۲،۴	۱،۳،۴	۲،۴،۵	۱
۴،۲	۴،۳،۲،۱	۵،۴،۲	۲
۱،۲،۴	۴،۲،۱	۵،۴،۳،۲	۳

در جدول ۱۳ تقاضای برآورده نشده مشتری در سه نوع محصول و سه دوره زمانی و سه سناریو خوش بینانه و محتمل و بدبینانه ارائه شده است. با توجه به اطلاعات جمع آوری شده، احتمال وقوع هر سناریو به ترتیب ۰.۳۵، ۰.۴، ۰.۲۵ در نظر گرفته شده است

جدول شماره (۱۴): تقاضای محصولات در دوره های مختلف

تعداد دوره	نوع محصول	تقاضای مشتری سناریو			تقاضای برآورده نشده مشتری سناریو		
		۱	۲	۳	۱	۲	۳
		۱	۳۰۳	۴۳۶	۴۹۱	۹۲	۱۹۲
۱	۲	۳۱۶	۳۱۶	۴۲۱	۱۲۷	۲۰۴	۲۳۴
	۳	۳۳۳	۳۷۳	۴۳۷	۴۷	۲۴۴	۲۸۷
	۲	۱	۴۷۵	۴۸۰	۴۸۰	۲۱۸	۳۱۹
۲		۳۳۱	۴۱۹	۴۳۷	۱۳۶	۱۸۶	۲۹۵

	۳	۴۰۱	۴۱۵	۴۴۴	۲۵۳	۲۸۹	۳۳۶
	۱	۳۷۸	۴۰۱	۴۶۷	۱۹۲	۲۳۱	۳۴۴
۳	۲	۳۶۳	۳۶۶	۴۰۴	۱۳۷	۱۵۷	۲۳۹
	۳	۳۰۳	۴۳۷	۴۶۸	۱۵۷	۱۷۲	۲۸۶

نتایج از برتری مدل استوار پیشنهادی در بررسی پارامترهای غیرقطعی و استواری راه‌حل‌های مربوطه در مقایسه با راه‌حل‌های به دست آمده از مدل قطعی نشان می‌دهد. در این مدل استوار، مشکلات مدل‌های غیرقطعی که باعث ایجاد جواب نشدنی و یا غیربهبینه بودند وجود ندارد و برای مسائل واقعی قابل پیاده‌سازی است.

ه) تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی MOPSO

تنظیم مناسب مقادیر پارامترهای اولیه و نوع عملگرها نقش بسیار مهمی بر همگرایی الگوریتم به جواب‌های بهینه کلی مسئله و دور شدن از دام بهینگی محلی دارد. در حقیقت هدف از این عمل، بهبود عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده در جستجوی فضای موجه مسئله در زمان مناسب می‌باشد. اگر پارامترهای یک الگوریتم کارآمد بطور صحیح تنظیم نگردد باعث ناکارآمدی این الگوریتم خواهد شد. لازم به ذکر است پارامترهای مربوط به تنظیمات الگوریتم پیشنهادی MOPSO، در جدول ۱۴ نمایش داده شده است

جدول شماره (۲): پارامترهای الگوریتم

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
جمعیت اصلی	۵۰	فشار حذف	۱
جمعیت آرشیو	۳۰	C_1	۲
نرخ جهش	۰.۲	C_2	۲
فشار انتخاب	۱	W	۰.۵

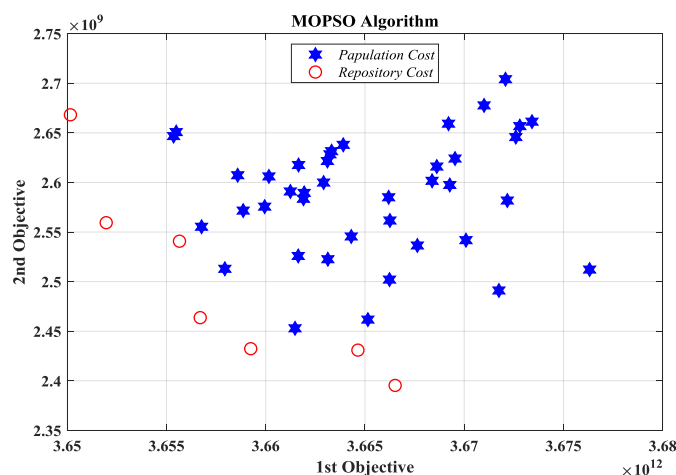
ی) بررسی نتایج روش حل دقیق و فراابتکاری

در این بخش جهت مقایسه نتایج حاصله از نرم افزار GAMS با دیگر الگوریتم فراابتکاری ملزم به استفاده از روش اپسیلون- محدودیت شدید تا به جواب‌های پارتو دست یابیم. برای تحلیل عملکرد این دو روش با توجه به جدول ۱۵ در ۱۰ مثال عددی مختلف با ابعاد بزرگ و کوچک در ۳۰ بار تکرار الگوریتم ارائه شد. سه شاخص ارزیابی شامل مقدار تابع هدف اول، مقدار تابع هدف دوم و زمان اجرای مدل تعیین گردیده است. نتایج حاصل از اجرای این دو روش دقیق و فراابتکاری در جدول ۱۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مدل ارائه شده در این تحقیق در برنامه MATLAB R2013a و پیاده سازی شد.

جدول شماره (۱۶): نتایج حل مثال‌ها با دو روش دقیق و فرا ابتکاری

شماره مسئله	تابع هدف اول		تابع هدف دوم		زمان پردازش	
	MOPSO	GAMS	MOPSO	GAMS	MOPSO	GAMS
۱	۴۱۲۵۵۲۹۸۱۰.۴	۱۴۷۱۷۶۵۰۰	۴۷۷۱۳۹۸۰.۱	۳۷۹۸۷۶۱.۴	۱۵.۵۹۳	۴.۹۶۵
۲	۱۴۶۴۴۷۴۵۰۵۶.۰	۱۳۹۱۴۹۶۰۰	۱۴۷۹۰۹۲۵.۱	۴۱۶۱۴۹۱.۴	۶۶۶۹۷	۸.۶۵۵
۳	۶۴۱۷۶۴۱۱۷۴۷.۳	۱۸۷۷۶۹۵۰۰	۴۷۲۸۵۴۰۳.۷۹	۶۰۷۸۰۳۱.۳	۸۳.۵۴۸	۸.۹۷۷
۴	۱۴۳۵۳۱۷۲۸۵۷۸.۹	۲۸۲۷۰۱۲۰۰	۸۷۲۷۲۰۸۹.۹	۸۴۰۲۲۲۲.۴	۱۰۴۶۵۰	۹.۳۲۲
۵	۶۴۶۴۰۵۷۰۴۹۳۱.۶	۴۴۶۶۲۷۸۰۰	۸۵۰۲۵۸۳۱۲.۶	۱۲۴۵۴۵۵۰	۱۶۹.۹۸۹	۱۳.۴۸۴
۶	۷۶۴۵۵۰۷۴۹۹۳۶.۴	۵۳۰۷۴۵۰۰۰	۹۲۲۸۱۵۲۸۶.۱	۱۴۷۳۶۷۹۰	۱۹۴.۶۲۲	۱۳.۵۲۲
۷	۳۵۵۲۸۴۷۸۷۳۳۳۱۴۸	-	۳۳۸۸۴۷۷۲۱۱۷۳.۳	-	۳۰۵.۳۶۳	-
۸	۷۸۴۶۹۰۸۲۴۰۱۴۰۴۸	-	۶۵۰۴۳۴۶۹۱۸۰.۷	-	۴۴۱.۵۱۶	-
۹	۹۳۰۳۲۳۷۰۲۹۳۵۰۶۷	-	۶۸۹۷۳۲۸۸۳۶۴۸.۳	-	۵۲۶.۴۵۲	-
۱۰	۱۱۳۷۴۲۴۰۳۵۸۰۸۲۲۰	-	۸۴۹۵۳۸۵۷۳۹۹۳.۹	-	۶۶۹.۶۶۲	-

همچنین فرم نهایی مربوط به اجرای مدل توسط الگوریتم حل پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل شماره (۹): اجرای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

با توجه به جدول و شکل فوق نتایج نشان می‌دهد که در ابعاد بزرگ روش حل دقیق کارایی خود را از دست می‌دهد زیرا استفاده از روش های کلاسیک بهینه‌سازی جهت دستیابی به جواب های بهینه سراسری یا موضعی، تقریباً غیرممکن است (نرم افزار GAMS فقط در مسئله با ابعاد کوچک جواب بهینه محلی ارائه می‌دهد و قادر به حل این گونه مسائل که جزء مسائل NP-Hard است نمی‌باشد) و الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO) جواب بهینه تری ارائه می‌دهد. همچنین در ابعاد کوچک تر روش اپسیلون-محدودیت کارآمدتر می‌باشد.

نتایج و بحث. دفع و یا رها کردن محصولات به ویژه محصولات صنعتی در انتهای عمر در طبیعت، مشکلات بزرگی را ایجاد کرده و باعث آسیب های زیست محیطی شده است. یکی از راهکارهای کاهش اثرات منفی زیست محیطی در پایان عمر محصولات، طراحی شبکه بازیابی است. زنجیره تامین حلقه بسته، زنجیره تامنی است که هر دو جریان مستقیم و معکوس را دربرمی‌گیرد. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین، جهت انتخاب بهترین مکان پیشنهادی تسهیلات چگونگی تخصیص و انتقال محصولات در بین لایه های زنجیره و کنترل موجودی انبار مرکز توزیع، ارائه شد. مدل پیشنهادی دارای دو هدف است که به صورت قطعی و استوار مبتنی بر سناریو ارائه شده است. برای نشان دادن اعتبار و کارایی مدل، بطورهمزمان، ۱۰ مثال عددی مختلف با ابعاد کوچک و بزرگ (شش مثال در ابعاد کوچک و چهار مثال در ابعاد بزرگ) ارائه شد. برای حل مدل دوهدفه، از روش ال پی-متریک و اپسیلون-محدودیت بهره گرفته شد. در ادامه مدل پیشنهادی به صورت قطعی و استوار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که مشاهده شد مقادیر توابع هدف حاصل از حل مساله توسط مدل استوار در مقایسه با مقادیر توابع هدف حاصل از حل همان مساله توسط مدل قطعی در تمامی حالات، بدترند، زیرا در بهینه سازی استوار بدترین حالات ممکن در نظر گرفته می‌شوند. در مرحله بعدی نمودار پارتو مربوط به مدل پیشنهادی در ۱۱ تکرار مختلف با مقادیر وزن های مختلف (۰، ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴، ۰.۵، ۰.۶، ۰.۷، ۰.۸) مورد بررسی قرار گرفت که در نقطه $w=0$ تابع هدف اول بیشترین مقدار و تابع هدف دوم کمترین مقدار را داشته است به همین صورت در نقطه $w=1$ تابع هدف اول کمترین مقدار و تابع هدف دوم بیشترین مقدار را به خود می‌گیرد.

در قسمت تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی را با تغییر پارامتر میزان محصولات برگشتی با میزان تغییر پذیری ۰.۹ تا ۱.۵ مورد ارزیابی قرار دادیم که با توجه به نتایج بدست آمده از مدل ارائه شده مشاهده شد که افزایش مقدار تابع هدف با افزایش ضریب تغییر رابطه کاملاً خطی دارد. لذا در این شرایط می‌توان ادعا نمود که افزایش و یا کاهش میزان محصولات برگشتی تاثیر کاملاً شفافی روی مقادیر توابع هدف دارد.

در قسمت بعدی برخی از خروجی های حاصله از مدل پیشنهادی مانند احداث مراکز بالقوه تولیدکننده و توزیع کننده و مرکز جمع‌آوری و همینطور تقاضای محصولات در دوره های مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در بخش بعدی از روش دقیق و روش فراابتکاری برای حل در مسائل بزرگ و کوچک مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. در روش حل دقیق از اپسیلون-

محدودیت که یکی از روش های حل در برنامه ریزی چند هدفه می باشد استفاده شد که این دو روش در ۱۰ مثال عددی مختلف با ابعاد بزرگ و کوچک در ۳۰ بار تکرار الگوریتم مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که مشاهده شد در ابعاد بزرگ روش حل دقیق کارایی خود را از دست داد زیرا نرم افزار GAMS قادر به حل این مسائل که جزء مسائل NP-Hard است نمی باشد و بالعکس الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO) جواب بهینه تری ارائه می دهد. در ابعاد کوچک روش حل دقیق عملکرد کارآمدتر می باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق می تواند برای سازمان هایی که در حوزه زنجیره تامین حلقه بسته فعالیت میکنند مورد استفاده قرار گیرد و با تعیین مکان بهینه تسهیلات، تخصیص بهینه و همچنین بهینه سازی هزینه های موجودی شبکه میتوان هزینه ها را کاهش داد و از لحاظ مزایای اقتصادی به صرفه میباشد. در زمینه محیط زیست، با بازیافت کالا و استفاده مجدد از محصولات، ضایعات باعث کاهش اثرات زیان آور و مخرب میشود.

رویکرد فازی رویکرد مناسبی برای پرداختن به عدم قطعیت است، می توان در تحقیقات آینده از این رویکرد در این حوزه استفاده کرد. در نظر گرفتن معیارهای دیگر زیست محیطی و همچنین شاخص های ارزیابی اجتماعی در مدل های بهینه سازی لجستیک نیز بعنوان موضوعات جالب و جذاب برای محققان می باشد. مرتبط کردن مدل های ارائه شده با زنجیره ی سبز و در نظر گرفتن کمبود و عدم ارضای کامل تقاضا مشتریان و نتایج حاصله از این کمبود در مدل می تواند نتایج عملیاتی بهتری را به دنبال داشته باشد.

۴- منابع

1. Angeline, P. J. (1998). Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: Philosophy and performance differences. *International Conference on Evolutionary Programming* (pp. 601-610). Berlin, Heidelberg.: Springer.
2. Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P., & Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 226(3), 436-451.
3. Chopra, S., & Meindl, P. (2007). Supply chain management. Strategy, planning & operation. In B. C., & E. R., *Das Summa Summarum des Management* (pp. 265-275). Gabler.
4. Coello Coello, C. A., Aguirre, A. H., & Zitzler, E. (2007). Evolutionary multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research*, 18(1), 1617-1619.
5. Coskun, S., Ozgur, L., Polat, O., & Gungor, A. (2016). A model proposal for green supply chain network design based on consumer segmentation. *Journal of Cleaner Production*, 110, 149-157.
6. Eberhart, R. C., & Shi, Y. (1998). Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. *International conference on evolutionary programming* (pp. 611-616). Berlin, Heidelberg: Springer.
7. El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk . *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423-431.
8. FAKHRZAD, M., & GOODARZIAN, F. (2019). The green Closed-Loop Supply Chain Network Design Considering Supply Centers Reliability Under Uncertainty. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 7(14), 179 - 197.
9. Hassanzadeh, A., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165-4176.
10. Hugos, M. H. (2018). *Essentials of supply chain management*. John Wiley & Sons.
11. Jayaraman, V., Guide, J. V., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 497–508.

12. Jindal, A., Sangwan, K. S., & Saxena, S. (2015). Network design and optimization for multi-product, multi-time, multi-echelon closed-loop supply chain under uncertainty. *Procedia Cirp*, 29, 656-661.
13. Kara, S. S., & Onut, S. (2010). A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network: The case of paper recycling. *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6129-6137.
14. Kennedy, J., & Eberhart, R. (2001). *Swarm Intelligence*. San Francisco, CA.: Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
15. Kim, J., Do Chung, B., Kang, Y., & Jeong, B. (2018). Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty. *Journal of cleaner production*, 196, 1314-1328.
16. Kim, S. H., & Nelson, B. L. (2005). Selecting the best system. *Handbooks in operations research and management science*, 13, 501-534.
17. Leung, S. C., Tsang, O., S., Ng, W. L., & Wu, Y. (2007). A robust optimization model for multisite production planning problem in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research*, 181, 224-832.
18. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems". *Applied Mathematics and Computation*, 213, 455-465.
19. Mohammadi, A. S., Alem Tabriz, A., & Pishvae, M. (2018). Designing Green Closed-loop Supply Chain Network with Financial Decisions under Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 10(1), 61- 84.
20. Mulvey, J., & Ruszczyński, J. A. (1995). A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization. *Operations Research*, 43(3), 477-094.
21. Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (1995). *Response Surface Methodology: Process and Optimization Using designed experiment*. John Wiley and sons Inc.
22. Özkır, V., & Başlıgil, H. (2013). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 41, 114-125.
23. Pishvae, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 637-649.
24. Poli, R., & Broomhead, D. (2007). Exact analysis of the sampling distribution for the canonical particle swarm optimiser and its convergence during stagnation. *Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, (pp. 134-141).
25. Rabbani, M., Asgaari, E., Ghavamifar, A., & Farrokhi-Asl, H. (2019). Designing a Closed Loop Supply Chain Network Considering the. *Computational Methods in Engineering*, 37(2), 61-78.
26. Ruimin, M. A., Lifei, Y. A., Maozhu, J. I., Peiyu, R. E., & Zhihan, L. V. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons & Fractals*, 89, 195-202.
27. Schultmann, F., Zumkeller, M., & Rentz, O. (2005). Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry. *European Journal of Operational Research*, 1-18.
28. Soleimani, H., & Kannan, G. (2015). hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks. *Applied Mathematical Modelling*, 39(14), 3990-4012.
29. Talaei, M., Farhang, M. B., Pishvae, M., & Bozorgi, A. A. (2015). A Bi-Objective facility location model for a green closed-loop supply chain network design. *Quarterly journal of transportation research*, 12(1), 65-77.

30. Wu, G. H., Chang, C. K., & Hsu, L. M. (2018). . Comparisons of interactive fuzzy programming approaches for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 500-513.
31. Yu, C., & Li, H. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64, 385–397.
32. Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2014). Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 51-164.
33. Zohal, M., & Soleimani, H. (2016). Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry. *Journal of Cleaner Production*, 133, 314-337.



Closed Loop Supply Chain Network Design under Uncertainty

Reza Yousefi Zenouz (Corresponding Author)

Information technology and operations management, Kharazmi University

Email: reza.zenouz@gmail.com

Farzad Haghghi rad

Faculty member., Operations and Information technology management Kharazmi University

Sajad Zakeritabar

Operations and information Technology Management

Abstract

Climate change and environmental impacts of economic activities, have forced supply chains to implement green policies and reduce environmental impacts and destruction to achieve competitive advantage. One approach to achieve simultaneously to the economic and environmental objectives is to design closed loop supply chain networks (CLSCN) that integrate reverse logistics into their forward paths. In this paper, a bi-objective mixed integer linear programming model was developed for the CLSCN problem. The first objective is to minimize the cost function and the second objective function tries to minimize the time of transferring products from manufacturers to the distributors. Lp Metric and ϵ -constraint methods were utilized to solve the model. A numerical example was presented to show the applicability of the model and also sensitivity analysis was done. In this model two parameters of cost and demand are uncertain; in order to deal with uncertain parameters a robust optimization approach was utilized. Multi objective particle swarm optimization (MOPSO) was used to solve the model in large scales and the solutions were compared with the solutions that obtained by exact methods. The findings of this research can help decision makers and executives to design efficient closed loop supply chains.

Keyword: Closed loop supply chain network, Multi-objective programming, Robust optimization, Uncertainty.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی