



ارائه مدل ریاضی استوار برای طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین روبه جلو و عقب با استفاده از طراحی آزمایشات

حمید صفاری (نویسنده مسؤول)

دانشجوی دکتری مجتمع مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

Email: hamidsaffari87@yahoo.com

کریم آتشگر

دانشیار مجتمع مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مرتضی عباسی

استادیار مجتمع مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۰ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۲/۲۸

چکیده

توجه روزافزون به زنجیره تأمین‌های حلقه بسته و در نظرگیری جریان‌های رو به عقب در این دسته از مدل‌های زنجیره تأمین، موجب ارائه مدل‌های ریاضی مختلفی در این حوزه شده است. این مقاله ابتدا مدلی استوار برای یک شبکه زنجیره تأمین با رویکرد جریان روبه‌جلو و عقب ارائه می‌نماید و سپس با استفاده از روش طراحی آزمایشات میزان اثر هر یک از پارامترهای مدل‌سازی استوار و پارامترهای هزینه، نرخ تولید، و برگشت محصولات در زنجیره تأمین روبه‌جلو و عقب محصولات در حد بالا و پایین را تعیین می‌نماید. در نهایت این مقاله یک مدل جدید استوار بهینه‌شده را برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه می‌نماید. استفاده از طراحی آزمایشات و مدل‌سازی ریاضی استوار به صورت هم‌زمان که در این مقاله برای اولین بار انجام می‌شود، باعث شده است که: (۱) سرعت رسیدن به جواب‌های بهینه افزایش پیدا کند؛ (۲) تصمیم‌گیرنده را در انتخاب مناسب پارامترهای مدل به صورت ساخت‌یافته یاری نماید. گزارش و نتایج ارائه‌شده، با توجه به اطلاعات صنعت آهن و فولاد، کارا بودن استفاده از طراحی آزمایشات در حوزه استراتژیک زنجیره تأمین، به منظور کاهش زمان حل مدل ریاضی و ارائه خطوط راهنما به تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: طراحی آزمایشات، طراحی آزمایشات کسری، طراحی شبکه زنجیره تأمین، مدل‌سازی استوار.

۱- مقدمه

مدل‌های لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته یکی از مباحث مورد توجه محققین است. این امر تا حد زیادی به دلیل درک اهمیت روزافزون محصولات و فناوری ایجاد شده در محل پایان زنجیره‌های تأمین یک طرفه عمومی و تأثیر قوانین سبز است. مسائل و نگرانی‌های مربوط به دور انداختن زباله، پسماند و مواد زائد همواره به‌عنوان تابعی از زندگی شهری درخور توجه بوده است. کلیات موضوع زنجیره تأمین حلقه بسته یا لجستیک رو به عقب تقریباً در اوایل سال ۱۹۹۵ مورد بررسی قرار گرفت و بیشترین کاربرد این موضوع در صناعی مانند فناوری رایانه، اتوماسیون اداری پیشرفته و پشتیبانی لجستیک سیستم‌های اداری و تسلیحاتی بوده است (Blumberg, Farahani, Asgari & Asgari, 2009).

در دنیای واقعی در بعضی مواقع داده‌ها به‌صورت ناکامل و یا غلط می‌باشند؛ و در بسیاری از عرصه‌های اجرایی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با شکل‌های مختلفی از عدم قطعیت‌ها مواجه هستیم. برای مواجه با عدم قطعیت رویکرد برنامه‌ریزی استوار در مهوروموم‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است زیرا استفاده از روش میانگین‌گیری و سایر روش‌های سنتی برای مواجه با عدم قطعیت اثربخش نیست (Mulvey, Vanderbei & Zenios, 1995). در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین نیز وجود عدم قطعیت در پارامترهای مختلف زنجیره اجتناب‌ناپذیر است، برای مثال میزان تقاضا در طول دوره زمانی مشخص، قابل پیش‌بینی به‌صورت دقیق نمی‌باشد و با استفاده از تکنیک‌های مختلف پیش‌بینی، می‌توان در نهایت سناریوهای محتمل یا بازه‌های خاصی را برای تقاضای محصولات در نظر گرفت. برای ایجاد شبکه‌ای پایدار از تسهیلات مختلف زنجیره تأمین در نظرگیری تغییرپذیری موجود در پارامترهای مدل ریاضی حیاتی می‌باشد (Bashiri, Badri & Talebi, 2012). یکی از روش‌های ارائه شده برای مقابله با عدم قطعیت که تا حدودی مشکلات مرتبط با میانگین‌گیری و سایر روش‌های سنتی برخورد با عدم قطعیت را مرتفع نموده است روش برنامه‌ریزی استوار می‌باشد.

در این مقاله با ترکیب رویکرد برنامه‌ریزی استوار و طراحی آزمایشات سعی شده است مدلی کارا برای تصمیم‌گیرنده در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه شود. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی استوار خطی آمیخته عدد صحیح^۱ برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه شده است، سپس با استفاده از روش تجزیه و تحلیل واریانس در طراحی آزمایشات مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در میزان هزینه‌های زنجیره تأمین شناسایی می‌گردد. بعلاوه با رویکرد آزمایشات چندعاملی، میزان تأثیر هر یک از این عوامل مشخص می‌گردد. این مقاله برای اولین بار به‌جای استفاده از یک مقدار ثابت برای پارامترهای مدل استوار که معمولاً در ادبیات مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود، با در اختیار گذاشتن نتایج به تصمیم‌گیرنده، این امکان را فراهم می‌کند که در مورد پارامترهای مدل استوار و کل زنجیره تصمیم‌گیری نماید. در این روش پیشنهادی نه تنها از اجرای مدل‌های زمان‌بر ریاضی جلوگیری می‌شود، بلکه تصمیم‌گیرنده با در نظر گرفتن تأثیرات محاسبه شده برای هر عامل، می‌تواند انتخاب آگاهانه‌ای نسبت به تصمیمات استراتژیک زنجیره داشته باشد.

در سال‌های اخیر در خصوص مدل‌سازی ریاضی زنجیره تأمین توجه خاصی صورت پذیرفته است که در این بخش سعی می‌شود با دسته‌بندی مدل‌های ارائه شده مروری از اقدامات انجام شده در این زمینه انجام پذیرد.

الف) مدل‌های ارائه شده برای زنجیره تأمین با در نظرگیری جریان روبه‌جلو و عقب در زنجیره تأمین طراحی شبکه حلقه بسته، طراحی و اجرای سیستم کارا و مؤثر برای جریان مواد در شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی، اجتماعی و محیطی می‌باشد. در شبکه زنجیره تأمین که در آن به عوامل محیطی توجه می‌شود به مسائلی مانند صرفه‌جویی انرژی، طراحی محصولات قابل بازیافت و بادوام، استفاده از مواد مناسب و قابل بازیافت در طراحی محصولات و استفاده از سوخت‌های مناسب برای حمل و نقل محصولات توجه می‌شود (Fleischmann, Beullens & Wassenhove, 2001).

یک شبکه زنجیره تأمین که جریان معکوس را هم در نظر می‌گیرند می‌تواند برای محصولات مختلف از جمله مواردی که کالاها را پس از توزیع در میان مصرف‌کنندگان دوباره جمع‌آوری و به مصرف می‌رسانند، استفاده شود، به‌عنوان مثال:

✓ محصولاتی که کار نمی‌کنند، اما می‌توانند تعمیر شده یا مورد استفاده مجدد قرار گیرند.

¹ mixed-integer linear programming

- ✓ محصولاتی که از رده خارج شده‌اند یا در پایان عمر مفید خود می‌باشند اما هم چنان دارای ارزش‌اند و از مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها می‌توان برای تولید محصولات دیگر بهره برد.
- ✓ محصولات ناخواسته و فروش نرفته روی قفسه خرده‌فروش.
- ✓ محصولات در پایان اجاره و نه در پایان عمر. که این‌گونه محصولات باید مجدد به محل اصلی برگردند و پس از انجام تعمیرات موردنیاز مجدد به‌جای دیگر اجاره داده شوند.
- ✓ قطعات و زیرمونتازهای حاصل از تعمیرات (درآوردن و تعویض) در محل که هنوز دارای ارزش هستند (Fleischmann, et al., 2001).

در هر یک از موارد ذکرشده در بالا در صورت عدم جمع‌آوری محصولات لجستیک معکوس ریسک‌های مختلفی را برای زنجیره به همراه خواهد داشت برای مثال در صورت عدم جمع‌آوری محصولات از رده خارج‌شده، آلودگی‌های محیط‌زیست ایجاد خواهد شد و میزان مصرف مواد اولیه افزایش خواهد یافت که خود باعث افزایش هزینه‌ها در زنجیره خواهد شد. در ادامه تاریخچه‌ای از مدل‌های ریاضی ارائه‌شده در خصوص لجستیک روبه‌جلو و عقب ارائه می‌گردد.

ب) مدل‌های قطعی

در سال ۲۰۰۱ یک مدل کلی جایابی تسهیلات توسط فیلیشمن و همکاران (۲۰۰۱) ارائه‌شده است. می‌توان تحقیق موردنظر را یکی از نخستین پژوهش‌هایی در نظر گرفت که به لجستیک روبه‌جلو و عقب به‌طور هم‌زمان توجه کرده‌است. در ادامه سیم و همکاران (۲۰۰۴) و سالما و همکاران (۲۰۰۵) به توسعه مدل ارائه‌شده پرداختند.

ج) مدل‌های غیرقطعی

سالما و همکاران (۲۰۰۵) با ایجاد تغییراتی در مدل قبلی عدم‌قطعیت در تقاضا و نرخ برگشت را نیز در نظر گرفته و از روش سناریوسازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت بهره گرفتند که می‌توان این تحقیقات را جز نخستین تحقیقاتی در نظر گرفت که بحث عدم قطعیت در مدل‌سازی زنجیره تأمین روبه‌جلو و عقب ارائه کرده‌اند.

به‌مرور زمان تحقیقات دیگری در حوزه عدم‌قطعیت در زنجیره روبه‌جلو و عقب ارائه گردید که روش‌های مختلفی نیز برای برخورد با این عدم‌قطعیت‌ها در نظر گرفته‌شده است برای تأیید این موضوع می‌توان به مقاله پیشوایی و همکاران (۲۰۰۹) اشاره نمود که به ارائه یک مدل بهینه‌سازی تصادفی سناریو محور برای طراحی شبکه زنجیره روبه‌جلو و عقب پرداختند. همچنین پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی آمیخته عدد صحیح دو هدفه شامل هزینه و پاسخ‌دهی به مشتری برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه دادند در مدل ارائه‌شده پارامترهای موردنظر به‌صورت فازی در نظر گرفته‌شده‌اند. اوزکیر و بسجل (۲۰۱۳) مدلی چند هدفی که اهداف شامل بیشینه کردن سطح تأمین تجارت، بیشینه کردن سطح پاسخ‌دهی مشتری و بیشینه کردن سود زنجیره می‌باشند، ارائه کردند. این مدل در شرایط عدم قطعیت بوده و در آن پارامترهای غیرقطعی به‌صورت اعداد فازی بیان شده‌اند. رضانی و همکاران (۲۰۱۳) مدلی را ارائه کردند که در آن عدم‌قطعیت به‌صورت سناریوهای مختلف در نظر گرفته‌شده‌است و از روش میانگین‌گیری سعی شده‌است جواب بهینه برای مسئله ارائه گردد. همان نویسندگان مدل دیگری را در این زمینه ارائه کردند و به‌جای میانگین‌گیری از سناریوهای مختلف، از روش حداقل کردن بیشترین پشیمانی استفاده‌شده‌است. صفاری و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از برنامه‌ریزی استوار یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه دادند. جریبا و همکاران (۲۰۱۸) مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کردند که در این مدل نرخ بازگشت، درآمد و هزینه و کیفیت محصولات بازگشتی به‌صورت متفاوت و غیرقطعی در نظر گرفته‌شده‌است و برای این منظور از مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر سناریو برای مدل‌سازی استفاده است. قلی‌پور و همکاران (۲۰۱۹) مدلی تک هدفه و چند محصوله را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته به‌کارگرفتند و از برنامه‌ریزی تصادفی فازی برای مدل‌سازی تقاضای غیرقطعی استفاده نمودند.

د) مدل‌های استوار

با توجه به مشکلاتی که در روش‌های مرتبط با میانگین‌گیری و ... وجود داشت، محققین مختلف استفاده از برنامه‌ریزی استوار را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد توجه قرار دادند. برای نمونه می‌توان به مقاله پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد که برای اولین بار از برنامه‌ریزی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو و عقب استفاده کردند. وحدانی و همکاران (۲۰۱۲) مدلی جدید برای طراحی شبکه حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت ارائه دادند که برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت از برنامه‌ریزی استوار استفاده شده‌است. اروسا و همکاران (۲۰۱۸) نیز مدلی استوار ارائه کردند که در آن تأسف مربوط به سناریوهای مختلف کمینه می‌شود و برای مدل‌سازی عدم قطعیت از توزیع لگ نرمال استفاده شده‌است. جبار زاده و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل برنامه‌ریزی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کردند و فرض از دست رفتن میزانی از ظرفیت تسهیلات در اثر اختلال در زنجیره تأمین را در این مدل در نظر گرفتند. شرافتی و همکاران (۲۰۱۹) مدلی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن تأثیرات محیط‌زیست، شرایط کاری در زنجیره و نیز مسئولیت‌های اجتماعی مصرف‌کننده ارائه دادند.

مرور ادبیات انجام‌شده در حوزه زنجیره تأمین روبه‌جلو و عقب نشان می‌دهد که وجود عدم قطعیت در طراحی شبکه و در نظرگیری عدم قطعیت در مدل‌سازی ریاضی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین به عضو جدایی‌ناپذیر این مدل‌ها در سال‌های اخیر تبدیل شده‌است. همان‌طور که از ماهیت عدم قطعیت برمی‌آید، روش‌های ارائه‌شده هرچند بهبود زیادی را در مدل‌های ارائه‌شده و به تبع جواب‌های استخراجی برای تصمیم‌گیران حوزه استراتژیک زنجیره تبدیل کرده است، ولی نیازمند بهبود در روش‌های استفاده و تکامل روش‌های موجود می‌باشد. مسئله انتخاب تکنولوژی در تسهیلات استقرار یافته و نیز تأثیر نرخ جریان برگشتی و نرخ تولید در کارخانه‌ها و تأثیرات میزان هزینه‌های حمل‌ونقل بر کل زنجیره و نیز جریان ضایعات از کارخانه‌های تولیدکننده به مراکز جمع‌آوری نیز، در ادبیات کمتر مورد توجه بوده‌است.

ه) طراحی آزمایشات در زنجیره تأمین

با مرور ادبیات در حوزه طراحی آزمایشات و زنجیره تأمین می‌توان تعدادی از تحقیقات را مشاهده نمود که در حوزه زنجیره روبه‌جلو و لجستیک معکوس ارائه شده‌است. بایل و همکاران (۲۰۰۷)، با شبیه‌سازی زنجیره تأمین لجستیک معکوس (RL) از طراحی آزمایش برای تحلیل تأثیر آن و همچنین تأثیر عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد عملیاتی سیستم استفاده کردند. توریسی و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی نقش لجستیک معکوس در زنجیره تأمین به کمک طراحی آزمایشات پرداختند. در این مقاله تأثیر فاکتورهایی مانند زمان تولید مجدد، زمان تدارکات و تولید، نسبت محصولات برگشتی، بر زنجیره تأمین روبه‌جلو و رو به عقب مورد بررسی قرار می‌گیرد. کامپوس و رامیرز (۲۰۱۳) مدلی را با استفاده از سیستم دینامیک برای ارزیابی عملکرد لجستیک زنجیره‌های تأمین ارائه کردند که از روش آماری طراحی آزمایش‌ها برای تحلیل نتایج سناریوهای مختلف استفاده شده است. نارایانا و همکاران (۲۰۱۸) مدلی ترکیبی برای پایداری در لجستیک معکوس با استفاده از سیستم دینامیک و طراحی آزمایشات ارائه دادند. سادراتو و همکاران (۲۰۱۶) مدلی را برای بررسی تأثیر برنامه‌ریزی ظرفیت بر چرخه حیات محصول و عملکرد پایداری در لجستیک معکوس ارائه نمودند و با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی تأثیر فاکتورهای مختلف کنترل، مانند سیاست‌های مختلف جمع‌آوری و ... را بر ابعاد مختلف پایداری و مسئولیت‌پذیری اجتماعی در زنجیره تأمین مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

تعدادی از نویسندگان با استفاده از طراحی آزمایشات درصد ارائه روش‌هایی برای کاهش ضایعات و هزینه‌ها در زنجیره تأمین بوده‌اند. انیوای و همکاران (۲۰۱۸) مقاله‌ای را ارائه دادند که هدف از این مطالعه استفاده از حسابداری هزینه جریان مواد (MFCA) و طراحی آزمایش‌ها (DOE) به منظور کاهش مصرف مواد و به حداقل رساندن ضایعات در زنجیره تأمین محصولات چوبی است. فرکوک و همکاران (۲۰۱۶) به منظور کاهش ضایعات در زنجیره، مقاله‌ای ارائه کردند که در آن با استفاده از طراحی آزمایش‌ها تأثیر روش‌های مختلف استخراج‌شده از رویکردهای ناب و سبز زنجیره تأمین، بر روی عملکرد مدیریت هدر رفت اندازه‌گیری شده‌است. ورا و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل مکان‌یابی و تخصیص برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین ۴ سطحی ارائه دادند در این تحقیق از طراحی آزمایشات برای تحلیل تأثیر ظرفیت، کیفیت، زمان تحویل و نرخ بهره در سود حاصل شده در زنجیره استفاده است.

تعدادی از نویسندگان هم با کمک طراحی آزمایشات به تنظیم پارامترهای مدل موردنظر پرداخته‌اند مانند اصارزادگان و راستی (۲۰۱۶) موسوی و همکاران (۲۰۱۸) که از رویکرد طراحی آزمایشات تاگوچی برای تنظیم پارامترهای مدل موردنظر و ایجاد جواب‌های باکیفیت برای راه‌حل ارائه‌شده، استفاده نمودند. جدول شماره (۱) تفاوت پژوهش ارائه‌شده در این تحقیق را با گزارشات موجود در ادبیات، نشان می‌دهد.

این مقاله ابتدا یک مدل استوار برای یک زنجیره تأمین ارائه می‌نماید و سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل طرح‌های عاملی در طراحی آزمایشات، شرایط بهینه‌ای را برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مدیران در یک زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهاد می‌دهد.

جدول شماره (۱): موارد در نظر گرفته شده به کمک طراحی آزمایشات توسط نویسندگان مختلف

نام نویسندگان	لجستیک رو به عقب	لجستیک روبه‌جلو	زمان تدارک و تولید	نسبت برگشتی	پایداری	ارزایی عملکرد	کاهش ضایعات	تأثیر ظرفیت	نرخ بهره	کیفیت	تنظیم پارامتر روش حل	پارامتر مدل استوار	نرخ تولید	هزینه حمل
بایل و همکاران	*					*								
توریسی و همکاران	*	*	*	*										
کامپوس و رامیرز		*				*								
نارایانا و همکاران	*				*									
سادرآتو و همکاران	*						*	*						
فر کوک و همکاران		*					*							
ورا و همکاران		*	*					*	*	*				
اصار زادگان و راستی		*									*			
موسوی و همکاران	*	*									*			
این تحقیق	*	*		*							*	*	*	*

۲- روش شناسی تحقیق

با توجه به استفاده از روش مدل‌سازی استوار در مقاله ابتدا در این بخش توضیحات مرتبط با برنامه‌ریزی استوار آورده می‌شود.

الف) برنامه‌ریزی استوار

مدل کلی برنامه‌ریزی ریاضی زیر را در نظر بگیرید:

$$\text{Min } C^T x + d^T y \quad \text{رابطه (۱)}$$

s.t

$$Ax = b \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Bx + Cy = e \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$x, y \geq 0 \quad \text{رابطه (۴)}$$

رابطه (۲) نشان‌دهنده پارامترهای قطعی می‌باشد. و X بردار متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد B, C ماتریس ضرایب فنی تصادفی و e بردار سمت راست را نشان می‌دهند.

ادبیات نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی استوار وجود دارد. یکی از معتبرترین این روش‌ها، روش ارائه‌شده توسط مولوی و همکاران (۱۹۹۵) است که در آن از سناریوهای گسسته برای مدل‌سازی استفاده شده‌است. در روش مولوی و همکاران (۱۹۹۵) که در زیر نشان داده شده‌است، پارامترهای غیرقطعی با مجموعه‌ای از سناریوها تعیین می‌گردند. که Ω نشان‌دهنده سناریوهای موردنظر است و به صورت $\{\Omega = 1, 2, \dots, S\}$ نشان داده می‌شوند. در این رویکرد احتمال وقوع هر

سناریو با p_s نشان داده می‌شود، بدیهی است که مجموع احتمال وقوع سناریوهای مختلف باید برابر با ۱ باشد. $(\sum_s p_s = 1)$. مجموعه $\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ به‌عنوان متغیرهای کنترلی و مجموعه $\{z_1, z_2, \dots, z_s\}$ پارامترهای خطا هستند که میزان نشدنی بودن را در محدودیت‌های نشدنی نشان می‌دهند.

$$\min \sigma(y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega \rho(z_1, z_2, \dots, z_s) \quad \text{رابطه (۵)}$$

s.t

$$Ax = b \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$B_s x + C_s y_s + z_s = e_s \quad \text{for all } s \in \Omega \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$x, y_s, z_s \geq 0 \quad \text{for all } s \in \Omega \quad \text{رابطه (۸)}$$

پارامترهای غیرقطعی B, C, e می‌توانند به‌صورت B_s, C_s, e_s برای هر سناریو $s \in \Omega$ نشان داده شوند.

اگر Γ تابع سود یا هزینه فرض شود و با $f(x, y)$ نشان داده شود حال تحت سناریوهای مختلف مقدار Γ را به‌صورت $\Gamma_s = f(x, y_s)$ می‌توان نشان داد. در این صورت هرچقدر مقدار واریانس برای $\Gamma_s = f(x, y_s)$ بیشتر باشد تصمیم موردنظر با ریسک بیشتری می‌باشد. به‌این ترتیب می‌توان نوشت:

$$\sigma(0) = \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s (\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s)^2 \quad \text{رابطه (۹)}$$

اگر λ وزن در نظر گرفته‌شده توسط تصمیم‌گیرنده برای قسمت پایداری مدل را نشان دهد، یو و لی (۲۰۰۰) روشی را به‌صورت معادله ۱۰ برای در نظر گرفتن انحراف از میانگین جواب‌ها ارائه کردند:

$$\sigma(0) = \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \left| \Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s \right| \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

با تبدیل تابع هدف غیرخطی فوق به‌صورت خطی، خواهیم داشت:

$$\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \theta_s \geq 0 \quad \text{for all } s \in \Omega \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

اگر مقدار $\sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s$ تابع جریمه در نظر بگیریم، و میزان جریمه باشد، آنگاه تابع هدف مدل (۱۲) را می‌توان نوشت. مقادیر λ و ω مقادیری هستند که توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شوند.

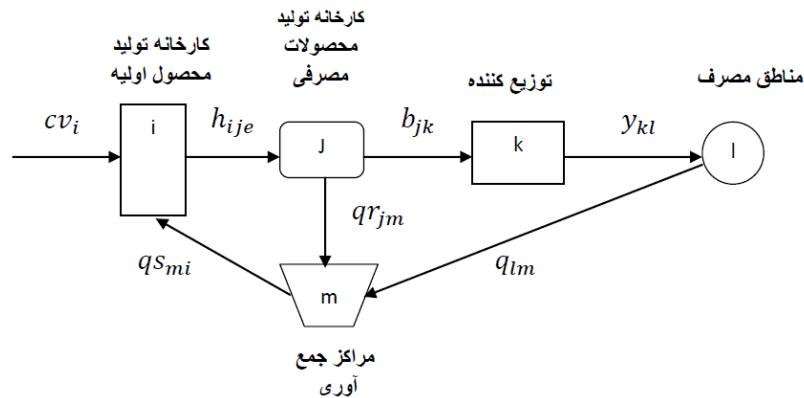
$$\text{Min } \sigma(0) = \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \left[(\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s) + 2\theta_s \right] + \omega \sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

با توجه به اینکه مقادیر λ و ω باید توسط تصمیم‌گیرنده تعیین شوند با انتخاب هر مقدار ممکن است جواب‌های متفاوتی به تصمیم‌گیرنده ارائه گردد. که در نتیجه برای این منظور باید مدل ریاضی به‌دفعات مختلف اجرا گردد. همچنین عدم وجود دانش کافی در زمینه میزان تأثیر انتخاب تصمیم‌گیرنده در جواب‌های ارائه‌شده در مدل ریاضی و حتی میزان تأثیر بر سایر پارامترها باعث می‌شود تصمیم‌گیرنده زمان زیادی را برای انتخاب درست صرف نماید و یا مقادیر را اشتباه انتخاب نماید که ممکن است، جواب بهینه موردنظر به‌درستی انتخاب نشود.

(ب) توصیف مدل

شبکه مورد مطالعه در این تحقیق از سه نوع تسهیل در جهت روبه‌جلو زنجیره شامل کارخانه‌های تولید مواد اولیه، کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی و توزیع‌کنندگان و مراکز جمع‌آوری در جهت معکوس تشکیل شده‌است. جریان محصولات در شبکه به این صورت است که در کارخانه‌های تولید محصول اولیه مقداری از مواد موردنیاز از مراکز جمع‌آوری تأمین می‌شود. و بقیه مواد موردنیاز خریداری می‌گردد. بعد از تولید محصول اولیه این محصولات به کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی منتقل می‌شوند تا از آن‌ها محصولات مختلف ساخته شود و در اختیار توزیع‌کننده‌ها قرارگیرند. این محصولات پس از توزیع در میان نقاط مصرفی مختلف و پس از اتمام دوره عمر آن‌ها مجدد در مرکز جمع‌آوری می‌گردند. از آنجایی که در کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی مقداری ضایعات وجود دارد این مواد نیز می‌توانند وارد مراکز جمع‌آوری شوند تا از آن‌ها برای تولید محصولات جدید استفاده شود. در این شبکه مکان تسهیلات مختلف، جریان بین تسهیلات مختلف و نیز انتخاب نوع تکنولوژی و ظرفیت کارخانه‌های تولید

محصول اولیه با توجه به اهداف مختلف انجام می‌گیرد. شکل (۱) توضیحات فوق را بصورت گرافیکی نشان می‌دهد. این نوع زنجیره تولید محصولات، در صنایع مختلف مانند صنایع تولید محصولات فلزی مانند آهن و فولاد کاربرد دارد (Vahdani, Tavakkoli-Moghaddam, Modarres & Baboli, 2012).



شکل شماره (۱): شبکه زنجیره روبه‌جلو و عقب آهن و فولاد

فرضیات در نظر گرفته شده در این مدل به صورت زیر می‌باشد.

- کارخانه‌های تولید محصول اولیه دارای ظرفیت‌های گوناگون بوده و در آن‌ها امکان استفاده از روش‌های مختلف وجود دارد.
- فرض می‌شود مقدار مواد اولیه به صورت نامحدود وجود دارد.
- فرض می‌شود که کیفیت محصولات جمع‌آوری شده از نقاط مصرف گوناگون، از یک سطح کیفیت واحد پیروی می‌کنند.
- تنها یک محصول در شبکه جریان دارد و مدل موردنظر برای یک دوره در نظر گرفته شده است.
- مکان کارخانه تولید محصولات و مشتریان از قبل مشخص هستند.
- تقاضا به صورت غیرقطعی است و توسط سناریوهای مختلف وارد مدل می‌شود.
- ظرفیت هر تسهیل محدود بوده و از قبل مشخص است.
- جریان محصولات فقط بین دو سطح متوالی از زنجیره امکان‌پذیر است.
- فرض می‌شود که در کارخانه‌های تولید محصول اولیه فقط یک نوع محصول تولید می‌شود.
- درصد بازگشت میزان محصولات بازگشتی و همچنین درصد ضایعات تولیدی در کارخانه‌های تولید محصول مصرفی مشخص است.
- محدودیتی در ظرفیت جریان مواد در طول شبکه در نظر گرفته نشده است.

(ج) نمادگذاری مدل سازی ریاضی شبکه زنجیره تأمین

نمادگذاری زیر برای مدل موردنظر استفاده شده است.

اندیس‌ها:	Γ_j : نرخ تولید در کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی j
\bar{I} : تعداد نقاط بالقوه کارخانه تولید مواد اولیه	d_l : مقدار تقاضا در نقاط مصرف l
\bar{J} : مکان‌های ثابت کارخانه‌های تبدیل کننده مواد خام به محصولات مصرفی	μ : هزینه حمل هر واحد محصول به ازای هر کیلومتر
k : مکان‌های بالقوه توزیع کننده	f_l : نرخ برگشت محصولات در نقاط مصرف l
l : مکان‌های ثابت نقاط مصرف	S : مجموعه محدود سناریوها
m : مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری	pb_s : احتمال رخ دادن سناریوی s

- پارامترها : θ_{1s} : ضریب خطی سازی در تابع هدف
 λ_1 : وزن تخصیص یافته به بخش تغییرپذیری در تابع هدف
 ω : هزینه جریمه نشدنی بودن در محدودیت‌های غیرقطعی
متغیرهای تصمیم :
 x_i^{ec} : اگر کارخانه تولید مواد اولیه در مکان i با روش e و ظرفیت C احداث شود 1 و در غیر این صورت 0
 Z_k : اگر در مکان k توزیع کننده احداث شود 1 و در غیر این صورت 0
 W_m : اگر در مکان m مرکز جمع‌آوری تأسیس شود 1 و در غیر این صورت 0
 cv_i : مقدار مواد خام ورودی به کارخانه تولید مواد اولیه i
 h_{ije} : مقدار محصول ارسالی از تولیدکننده محصول اولیه i با سطح روش e به کارخانه تولید فلزات j
 b_{jk} : مقدار محصول ارسالی از کارخانه تولید محصولات مصرفی j به توزیع کننده k
 y_{kl} : مقدار محصول ارسالی از توزیع کننده k به نقاط مصرف l
 q_{lm} : مقدار محصول ارسالی از منطقه مصرف l به مرکز جمع‌آوری m
 qs_{mi} : مقدار محصول ارسالی از مرکز جمع‌آوری m به کارخانه تولید مواد اولیه i
 qr_{jm} : مقدار محصول ارسالی از کارخانه تولید محصول j به مرکز جمع‌آوری m
- FX_i^{ce} : هزینه ثابت احداث کارخانه تولید محصول اولیه i با تکنولوژی e و با ظرفیت C
 g_k : هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k
 o_m : هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری m
 CX_i^c : ظرفیت کارخانه تولید مواد اولیه i با سطح ظرفیت C
 CY_j : ظرفیت کارخانه تولید محصولات مصرفی j
 CZ_k : ظرفیت مرکز توزیع k
 CW_m : ظرفیت مرکز جمع‌آوری m
 v_{ab} : فاصله بین دو تسهیلات a, b
 pc_i^{ec} : هزینه تولید هر واحد محصول اولیه در کارخانه i ، با استفاده از روش e و با ظرفیت C
 jc_j : هزینه تولید هر واحد محصول مصرفی در کارخانه تولید محصولات j
 CY_j : ظرفیت کارخانه تولید محصولات مصرفی j
 kc_k : هزینه عملیاتی هر واحد محصول در توزیع کننده k
 mc_m : هزینه عملیاتی هر واحد محصول در مرکز جمع‌آوری m

(د) مدل ریاضی قطعی

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1 = & \sum_e \sum_i \sum_c FX_i^{ce} x_i^{ec} + \sum_k g_k z_k + \sum_m o_m w_m + \sum_i \sum_e \sum_c \sum_j pc_i^{ec} h_{ije} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ije} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + jc_j) b_{jk} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + kc_k) y_{kl} + \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lm} + \\ & \sum_j \sum_m (v_{jm} \mu) qr_{jm} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + mc_m) qs_{mi} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_k y_{kl} = d_l \quad \forall l \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_m q_{lm} = y_{kl} * f_l \quad \forall l \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_j b_{jk} = \sum_l y_{kl} \quad \forall k \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$(1 - r_j) \sum_i \sum_e h_{ije} = \sum_m qr_{jm} \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$r_j \sum_i \sum_e h_{ije} = \sum_k b_{jk} \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sum_m qs_{mi} + cv_i = \sum_j \sum_e h_{ije} \quad \forall i \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$\sum_i qs_{mi} = \sum_j qr_{jm} + \sum_l q_{lm} \quad \forall m \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$\sum_j h_{ije} \leq \sum_c CX_i^c x_i^{ec} \quad \forall i, e \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\sum_l y_{kl} \leq CZ_k z_k \quad \forall k \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\sum_i qs_{mi} \leq CW_m w_m \quad \forall m \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\sum_i \sum_e h_{ije} \leq CY_j \quad \forall j \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$\sum_e \sum_c x_i^{ec} = 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$x_i^{ec}, z_k, w_m \in \{0,1\} \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$cv_i, h_{ije}, b_{jk}, y_{kl}, q_{lm}, qr_{jm}, qs_{mi} \geq 0 \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

در تابع هدف، سه جمله اول مربوط به هزینه‌های ثابت مکان‌یابی تسهیلات می‌باشند جمله چهارم هزینه‌های تولید در کارخانه مواد اولیه را نشان می‌دهد. جمله پنجم مربوط به هزینه‌های حمل از کارخانه تولید مواد اولیه هست. جمله ششم و هفتم مربوط به هزینه حمل و هزینه عملیاتی از کارخانه‌های تولید محصولات به توزیع‌کننده‌ها و هزینه‌ای عملیاتی و حمل از توزیع‌کننده‌ها به مشتریان می‌باشد. جمله هشتم و نهم مربوط به هزینه حمل از نقاط مصرف به مراکز جمع‌آوری و از کارخانه‌های تولید محصولات به مراکز جمع‌آوری هست و در نهایت جمله آخر بیان‌کننده میزان هزینه حمل از مراکز جمع‌آوری به کارخانه‌های تولید محصول اولیه و هزینه‌های عملیاتی در مراکز جمع‌آوری هست.

محدودیت (۱۴) این را نشان می‌دهد که میزان کالای حمل شده از توزیع‌کننده‌ها، باید میزان تقاضای مناطق مصرف را ارضا کند. محدودیت (۱۵) نشان‌دهنده این است که مقداری که از مناطق مصرف به مراکز جمع‌آوری حمل می‌شود با حاصل ضرب مقدار ورودی به مناطق مصرف در نرخ برگشت باید برابر باشد. محدودیت (۱۶) نشان‌دهنده این است که مقدار ورودی به هر مرکز توزیع با مقدار خروجی از آن مرکز باید برابر باشد. محدودیت (۱۷) و (۱۸) نشان‌دهنده تعادل ورودی و خروجی در کارخانه‌های تولید محصولات مصرفی است.

محدودیت (۱۹) نشان‌دهنده رابطه تعادل در کارخانه‌های تولید محصول اولیه هست. محدودیت (۲۰) نشان‌دهنده رابطه تعادل ورودی و خروجی در مراکز جمع‌آوری است. محدودیت (۲۱)، (۲۲)، (۲۳)، (۲۴) محدودیت ظرفیت برای تسهیلات مختلف در شبکه می‌باشند. محدودیت (۲۵) این را نشان می‌دهد که در هر مکان تنها یک کارخانه با ظرفیت مشخص و تکنولوژی مشخص می‌تواند احداث شود. محدودیت‌های (۲۶) و (۲۷) مثبت بودن و متغیرهای صفر و یک را نشان می‌دهد.

(ر) مدل استوار ارائه‌شده

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش قبل، مدل ارائه‌شده توسط مولوی و همکاران (۱۹۹۵) تابع هدف مدل استوار به صورت عبارت (۲۸) به دست می‌آید.

رابطه (۲۸)

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \sum_e \sum_i \sum_c FX_i^{ce} x_i^{ec} + \sum_k g_k z_k + \sum_m o_m w_m + \\ & \sum_s p b_s \left(\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + \right. \\ & j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q_{rjms} + \\ & \left. \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + m c_m) q_{smis} \right) + \lambda_1 \sum_s p b_s \left[\left(\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \right. \right. \\ & \left. \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \right. \\ & \left. \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q_{rjms} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + m c_m) q_{smis} \right) - \\ & \left. \sum_{s'} p b_{s'} \left(\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + \right. \right. \\ & \left. \left. j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q_{rjms} + \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + m c_m) q_{smis} \right) + 2\theta_{1s} \right] + \omega \sum_s \sum_l p b_s \delta_{sl} \end{aligned}$$

با توجه به محدودیت‌های توضیح داده‌شده در روش مولوی و همکاران (۱۹۹۵) محدودیت‌های مدل این مقاله به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$\sum_k y_{kls} + \delta_{ls} = d_{ls} \quad \forall l, s \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\sum_m q_{lms} = \sum_k y_{kls} * f_l \quad \forall l, s \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$\sum_j b_{jks} = \sum_l y_{kls} \quad \forall k, s \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$(1 - r_j) \sum_i \sum_e h_{ijes} = \sum_m q_{rjms} \quad \forall j, s \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

$$r_j \sum_i \sum_e h_{ijes} = \sum_k b_{jks} \quad \forall j, s \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

$$\sum_m q_{smis} + c v_{is} = \sum_j \sum_e h_{ijes} \quad \forall i, s \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$\sum_i q_{smis} = \sum_j q_{rjms} + \sum_l q_{lms} \quad \forall m, s \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

$$\sum_j h_{ijes} \leq \sum_c C X_i^{ec} X_i^{ec} \quad \forall i, e, s \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

$$\sum_l y_{kls} \leq CZ_k Z_k \quad \forall k, s \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

$$\sum_i q_{smis} \leq CW_m W_m \quad \forall m, s \quad \text{رابطه (۳۸)}$$

$$\sum_i \sum_e h_{ijes} \leq CY_j \quad \forall j, s \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

$$\sum_e \sum_c x_i^{ec} = 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

$$x_i^{ec}, z_k, w_m \in \{0,1\} \quad \text{رابطه (۴۱)}$$

$$cv_{is}, h_{ijes}, b_{jks}, y_{kls}, q_{lms}, qr_{jms}, q_{smis}, \theta_{1s}, \theta_{2s}, \theta_{3s} \geq 0 \quad \text{رابطه (۴۲)}$$

علاوه بر محدودیت‌های فوق محدودیت‌های زیر نیز باید در نظر گرفته شوند تا همان‌طور که در بخش برنامه‌ریزی استوار به آن اشاره شد، بتوان خطی سازی مدل موردنظر انجام پذیرد.

$$\begin{aligned} & (\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j pc_i^{ec} h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + jc_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + kc_k) y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \mu qr_{jms} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + mc_m) q_{smis}) - \\ & \sum_s pb_s (\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j pc_i^{ec} h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + jc_j) b_{jks} + \\ & \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + kc_k) y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \mu qr_{jms} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + mc_m) q_{smis}) + \theta_{1s} \geq 0 \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴۳)}$$

ه) طراحی آزمایشات و تجزیه و تحلیل نتایج

زمانی که در یک طرح عاملی 2^k تعداد عامل‌ها افزایش می‌یابد تعداد اجراهای موردنیاز نیز به سرعت افزایش می‌یابد؛ غالباً تمایل کمتری برای در نظر گرفتن اثرات متقابل با مرتبه‌های بالا وجود دارد، اگر فرض کنیم که تاثیر اثرات متقابل با مرتبه بالا ناچیز است، از طرح عاملی کسری که نسبت به مجموعه کامل 2^k اجرا، دارای تعداد اجرای کمتری است، می‌توان برای به دست آوردن اطلاعات مربوط به اثرات اصلی و اثرات متقابل با مرتبه پایین، استفاده کرد (Atashgar, 2019).

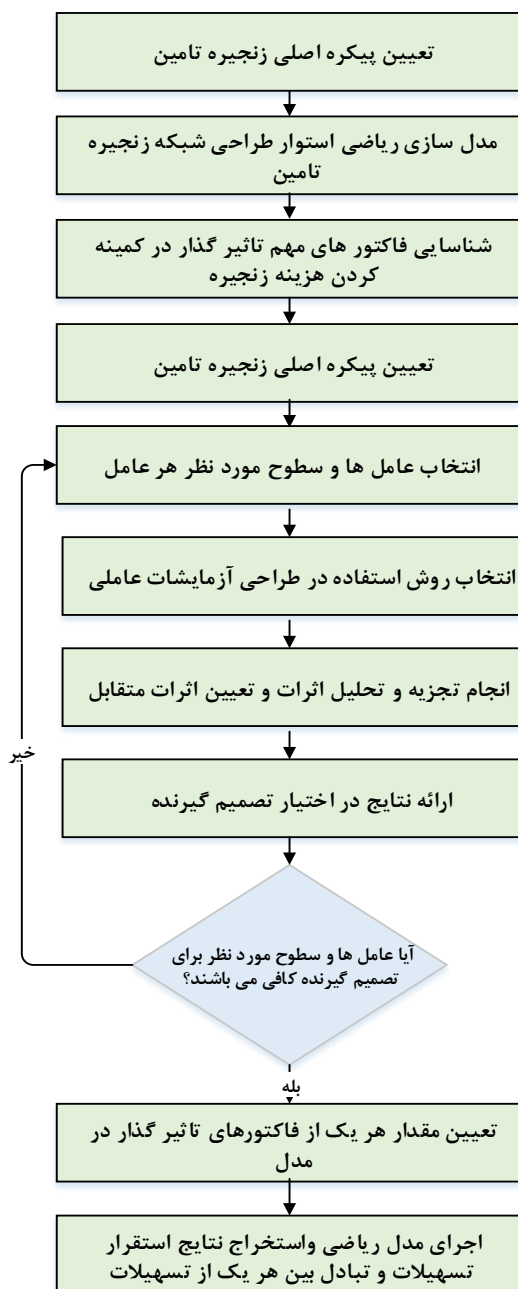
از طرف دیگر با توجه NP-hard بودن مدل ریاضی ارائه شده (Wang & Hsu, 2010; Gen & Cheng, 1997) با اضافه شدن تعداد نقاط کاندید جهت مکان‌یابی و دیگر عوامل، زمان حل مدل موردنظر به شدت افزایش پیدا می‌کند که البته در ادبیات برای این موارد راه‌حلی‌هایی مانند استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری ارائه شده است که معمولاً کیفیت جواب‌های ارائه شده پایین‌تر از روش‌های حل دقیق می‌باشد (Ramkumarb & Subramaniana, 2013).

KO & Evans 2007, Bozorgi, Mahmoodian, Fahimnia, Saffari, 2015, Lee & Dong, 2008, (Wang & Hsu, 2010, Gen & Cheng, 1997

استفاده از طراحی آزمایشات کسری می‌تواند به حل این مشکل کمک زیادی کند. در مدل‌سازی استوار مولوی و همکاران (1995) که در مقاله‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته است تعدادی از پارامترهای این مدل مانند مقادیر λ و ω توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود به همین دلیل انتخاب مناسب مقادیر آن‌ها در دست‌یابی به جواب‌های بهینه استوار بسیار حائز اهمیت می‌باشد این تحقیق درصدد است که با استفاده از طراحی آزمایشات، سطوح این پارامترها را پیشنهاد دهد، به طوری که با مشخص کردن تأثیر هر یک از پارامترها در کاهش هزینه‌ها به تصمیم‌گیرنده در خصوص انتخاب مقادیر کمک خواهد شد. از طرفی تعدادی از پارامترهای مدل که ممکن است این پارامترها را تحت تأثیر قرار دهند مانند مقدار نرخ تولید در کارخانه‌ها، مقدار نرخ برگشت و مقدار هزینه‌های حمل نقل در مدل پیشنهادی این مقاله در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به موارد فوق یک طرح عاملی 2^5 تشکیل شده است (نرخ تولید در کارخانه‌ها (بالا و پایین) نرخ برگشت محصولات (بالا و پایین)، هزینه حمل (بالا و پایین)، ضریب پایداری مدل (بالا و پایین) مقدار جریمه نشدنی بودن مدل (بالا و پایین)) که با صرف نظر کردن از تأثیر مرتبه‌های بالا، در این تحقیق طرح 2^{5-1} اجرا گردید. شکل (۲) مراحل و فرایند استفاده از طراحی آزمایشات و مدل‌سازی ریاضی در تحقیق را نمایش می‌دهد. داده‌های استفاده شده در تحقیق بر اساس مطالعات انجام شده در حوزه زنجیره تأمین آهن و فولاد (Vahdani et al, 2012., Grobler & Minnitt. 1997) استخراج شده است که خلاصه‌ای از آن‌ها در جدول شماره (۲) آورده شده است.

جدول شماره (۲): داده‌های استفاده شده در مقاله (Grobler & Minnitt 1997., vahdani et al., 2012_۲)

پارامتر	بازه در نظر گرفته شده	پارامتر	بازه در نظر گرفته شده
FX_i^{11}	Uniform (330000-960000)	pc_i^{2c}	Uniform (90-120)
FX_i^{12}	Uniform (300000-900000)	jc_j	Uniform (25-35)
FX_i^{21}	$\alpha * FX_i^{11}$	kc_k	Uniform (2-5)
FX_i^{22}	$\alpha * FX_i^{12}$	mc_m	Uniform (2-5)
α	Uniform (.5-.7)	CX_i^{1e}	Uniform (1500-3000)
g_k	Uniform (5000-10000)	CX_i^{2e}	λCX_i^{1e}
o_m	Uniform (1000-5000)	CY_j	Uniform(1500-3000)
pc_i^{1c}	Uniform (60-90)	CZ_k	Uniform (800-1800)
		CW_m	Uniform (800-1800)



شکل شماره (۲) مراحل و فرایندهای استفاده از طراحی آزمایشات و مدل سازی استوار

(و روش 2^k استفاده شده در تحقیق

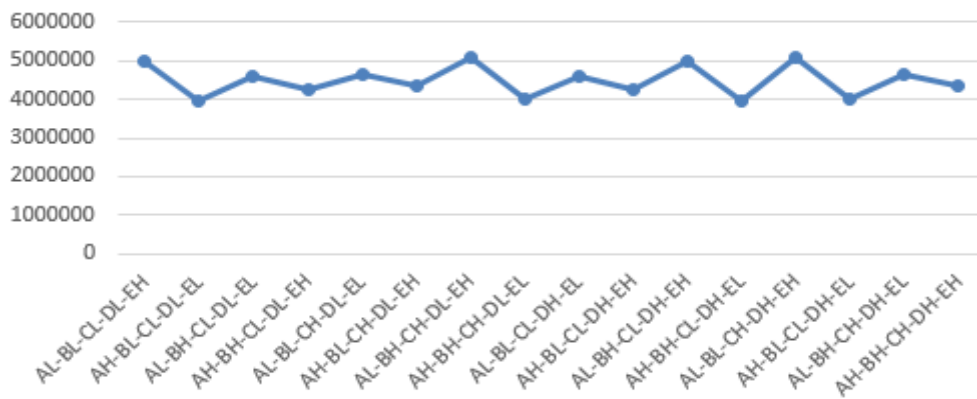
رابطه مولد $E = ABCD$ برای آزمایشات کسری در نظر گرفته می شود. در نتیجه ساختار هم اثری، به صورت جدول شماره (۳) می شود. همچنین در این جدول دفعات اجرا و هزینه زنجیره با نتایج استخراج شده از مدل ریاضی استوار نمایش داده شده است. برای حل مدل ریاضی ارائه شده از نرم افزار گمز استفاده شده است.

با در نظر گرفتن داده های جدول شماره (۲) در مدل ریاضی استفاده شده و با در نظر گیری سطوح بالا و پایین برای هر یک از پارامترهای مدل در طراحی آزمایشات نتایج به دست آمده از نرم افزار گمز به شرح جدول شماره (۳) می باشد. در شکل شماره (۳) میزان هزینه های ساختار شبکه زنجیره تأمین روبه جلو و عقب با توجه به سطوح مختلف عامل های نمایش داده شده اند:

جدول شماره (۳) : مقادیر مدل ریاضی به ازای سطوح مختلف عوامل در نظر گرفته شده در طراحی آزمایشات

اجرا	طرح	A	B	C	D	E=ABCD	ABE	ACE	BCE	ABC	ADE	BDE	ABD	CDE	ACD	BCD	هزینه زنجیره تامین
۱	E	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	۴۹۹۸۹۱۴
۲	A	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	۳۹۵۵۶۸۶
۳	B	-	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	۴۵۹۷۷۳۲
۴	ABE	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	۴۲۶۷۲۱۲
۵	C	-	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	۴۶۴۷۰۷۷
۶	ACE	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	۴۳۳۰۵۶۱
۷	BCE	-	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	۵۰۸۹۲۶۰
۸	ABC	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	۴۰۳۱۷۱۸
۹	D	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	۴۵۹۱۲۳۴
۱۰	ADE	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	۴۲۶۸۱۱۶
۱۱	BDE	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	۵۰۰۵۰۲۷
۱۲	ABD	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	۳۹۶۱۹۱۲
۱۳	CDE	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	۵۰۷۹۹۰۸
۱۴	ACD	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	۴۰۲۲۰۶۵
۱۵	BCD	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	۴۶۵۷۱۳۹
۱۶	ABCDE	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	۴۳۴۵۳۴۶

میزان هزینه مدل ریاضی استوار به ازای سطوح مختلف عامل ها



شکل شماره (۳) : هزینه های مدل ریاضی به ازای سطوح مختلف عامل ها

۳- نتایج و بحث

الف) استخراج نتایج از مدل سازی و طراحی آزمایشات

برای محاسبه اثر هر عامل داریم:

$$v = \frac{\text{contrast}}{n2^{k-1}} \quad \text{رابطه (۴۴)}$$

$$A = 1/8(a+abe+ace+abc+ade+abd+acd+abcd-e-b-c-d-bce-bde-cde-bcd) = 33.375$$

$$SS = \frac{\text{contrast}^2}{16} \quad \text{رابطه (۴۵)}$$

به همین ترتیب برای سایر عوامل میزان اثرات محاسبه می‌شوند که این اثرات از تفاوت اثرات مثبت و منفی به دست می‌آیند، که نتایج در جدول شماره (۴) آورده شده است.

جدول شماره (۴): میزان اثر هر یک از عامل‌ها

	contrast	اثر	SS
E	-۵۴۸۲۶۷۵	-۶۸۵۴۵۹	۱/۸۸E+۱۲
A	۶۱۷۸۳	۷۷۲۳	۲۳۸۵۷۳۶۰۳
B	۵۵۷۲۴۱	۶۹۶۵۵	۱/۹۴E+۱۰
ABE	۱۲۵۸۵	۱۵۷۳	۹۹۰۰۳۳۳
C	۲۹۱۹۷۸۲	۳۶۴۹۷۳	۵/۳۳E+۱۱
ACE	-۹۰۱	۱۱۳	۵۰۷۱۸
BCE	۱۴۷۱۸۱۶	۱۸۳۹۷۷	۱/۳۵E+۱۱
ABC	۱۱۹۳۷	۱۴۹۲	۸۹۰۵۳۳۹
D	-۸۳۳۲۲۶	-۱۰۴	۴/۳۴E+۱۰
ADE	۸۰۷۰۰۵۱	۱۰۰۸۷۵۶	۴/۰۷E+۱۲
BDE	-۳۷۱۲	-۴۶۳	۸۶۱۱۵۷
ABD	۵۴۳۷۳	۶۷۹۷	۱۴۴۷۷۴۳۵۲
CDE	-۲۲۶۷	-۲۸۳	۳۲۱۱۳۹
ACD	۶۱۳۸۹۹	۷۶۷۳۷	۲/۳۶E+۱۰
BCD	-۴۴۰۰۷۵	-۵۵۰۰۹	۱/۲۱E+۱۰

در شکل ۴ اثرات نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین اثرات برای عامل A یعنی میزان نرخ تولید و میزان جریمه نشدنی بودن مدل استوار (درجایی استفاده می‌شود که بعضی از محدودیت‌ها در بعضی از سناریوها نشدنی شوند) می‌باشد. در ادامه با صرف نظر از اثرهای چهارطرفه و سه‌طرفه و نیز اثرات دوطرفه‌ای که میزان اثرات آن‌ها خیلی ناچیز بوده است، تجزیه و تحلیل واریانس انجام شده است. به این ترتیب میزان این اثرات در درون خطای مدل قرار می‌گیرد. گزارش تجزیه و تحلیل واریانس انجام شده با استفاده از نرم‌افزار مینی تب به صورت زیر می‌باشد.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	2.44419E+12	2.44419E+11	6549.08	0.000
Linear	5	2.43189E+12	4.86379E+11	13032.28	0.000
A	1	1.87942E+12	1.87942E+12	50358.06	0.000
B	1	238573603	238573603	6.39	0.053
C	1	19407361497	19407361497	520.01	0.000
D	1	9900333	9900333	0.27	0.628
E	1	5.32820E+11	5.32820E+11	14276.65	0.000
2-Way Interactions	5	12294336698	2458867340	65.88	0.000
A*D	1	8905339	8905339	0.24	0.646
A*E	1	12104113910	12104113910	324.32	0.000
B*C	1	41988119	41988119	1.13	0.337
B*D	1	129854754	129854754	3.48	0.121

D*E	1	9474576	9474576	0.25	0.636
Error	5	186605506	37321101		
Total	15	2.44438E+12			

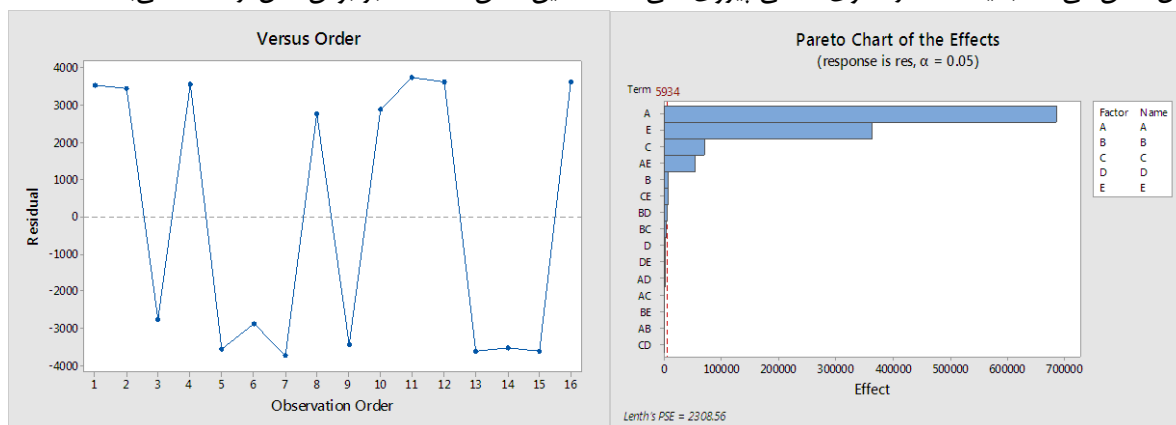
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6109.10	99.99%	99.98%	99.92%

با توجه به ناحیه بحرانی F در خصوص عامل‌های A (نرخ تولید)، C (نرخ هزینه حمل‌ونقل)، E (میزان جریمه نشدن بودن مدل) شاهد قویی برای پذیرش فرض صفر وجود ندارد، یعنی می‌توان نتیجه گرفت که نرخ این پارامترها در کاهش هزینه‌ها محسوس می‌باشد. از طرفی برای عامل‌های B (نرخ برگشت محصولات از دست مشتریان) و D (ضریب پایداری در مدل استوار) نمی‌توان فرض صفر را رد کرد بنابراین تأثیر این عامل‌ها در هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین اندک می‌باشد. همچنین تنها اثر متقابل حائز اهمیت اثر متقابل AE می‌باشد. بنابراین می‌توان مدل رگرسیونی برای متغیر پاسخ را به صورت (۴۶) ارائه داد.

$$y = 4490557 - 342730 A + 34828 C + 182486 E - 27505 A * E \quad (46)$$

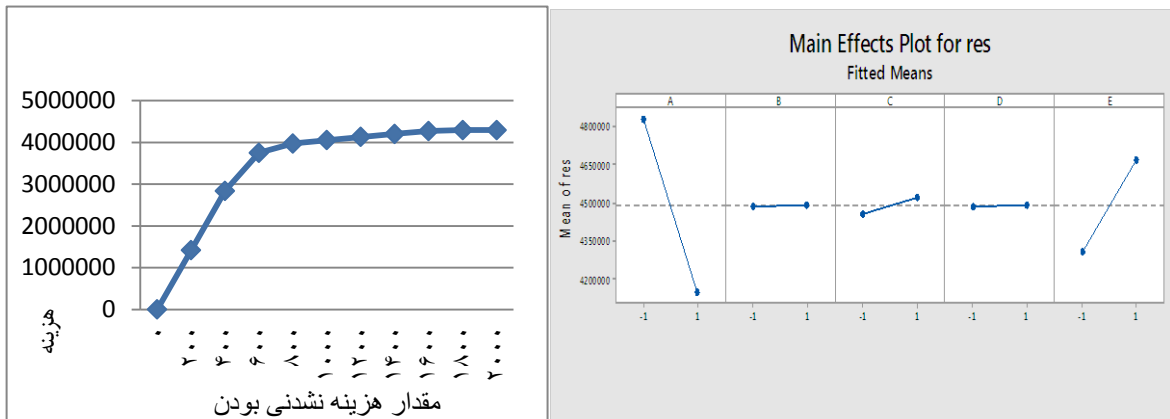
بنابراین با توجه به مدل ارائه‌شده مقدار باقیمانده‌ها به صورت شکل (۵) توسط نرم‌افزار مینی‌تب محاسبه شده‌است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد باقیمانده‌ها از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند که این نشان‌دهنده معتبر بودن مدل ارائه‌شده می‌باشد.



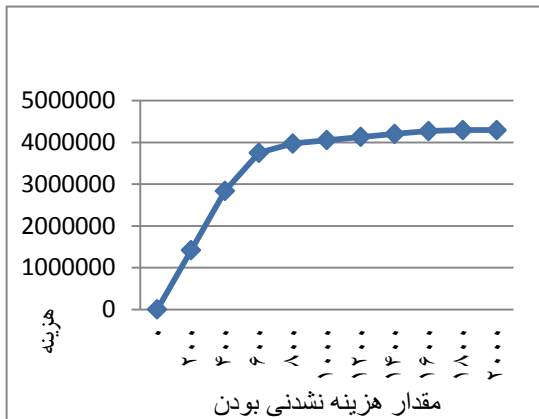
شکل شماره (۴): مقایسه اثرات عامل‌های مختلف

شکل شماره (۵): باقیمانده‌های حاصل از طراحی آزمایشات

همچنین در شکل (۶) تأثیرات اصلی برای متغیر پاسخ ترسیم شده‌است که همان‌طور که از شکل شماره (۶) پیداست عامل A و E بیشترین تأثیر را در مقدار مدل و تغییرات ناشی از آن‌ها دارند با اجرای مدل ریاضی به ازای مقادیر مختلف میزان جریمه نشدنی بودن نمودار مربوطه ترسیم شده‌است که همان‌طور که از شکل (۷) مشخص است با افزایش هزینه نشدنی بودن، مقدار هزینه‌ها به صورت نمایی افزایش پیدا خواهد کرد که نتایج با نتایج به‌دست‌آمده از مقاله مولوی و همکاران (۱۹۹۵) تطابق کامل دارد.



شکل شماره (۶): نمودار تأثیرات اصلی برای متغیر پاسخ



شکل شماره (۷): رابطه بین هزینه کل و هزینه نشدنی

با توجه به اینکه در این تحقیق تعداد عامل‌ها ۵ مورد در نظر گرفته شده‌اند و هر عامل دارای دو سطح می‌باشد و با در نظر گرفتن آزمایشات کسری به صورت نصف تعداد آزمایشات برای تصمیم‌گیری مناسب توسط تصمیم‌گیرنده ۱۶ بار می‌باشد؛ که البته با در نظر گرفتن سایر روش‌های کسری برای مثال 2^{5-2} تعداد اجرای مدل ریاضی به ۸ بار کاهش می‌یابد یعنی تنها با اجرای ۸ بار مدل ریاضی می‌توان بستر مناسب برای تصمیم‌گیری فراهم نمود. از طرف دیگر می‌توان با مشاهده عدم تأثیرگذاری تعدادی از عوامل، برای مثال در این مقاله عامل نرخ برگشت (B) و ضریب در نظر گرفته شده برای پایداری مدل (D) را به دلیل عدم تأثیر روی هزینه‌های زنجیره، حذف نمود. که این بار تعداد دفعات انجام آزمایش و اجرای مدل ریاضی تنها ۴ بار می‌شود. یعنی به جای اجرای ۳۲ بار مدل ریاضی تنها با اجرای ۴ بار می‌توان اطلاعات مفیدی را در اختیار تصمیم‌گیرنده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین گذاشت. همچنین با توجه به NP-hard بودن مدل ریاضی موردنظر با افزایش سایز مسئله، برای مثال افزایش نقاط کاندید جهت احداث کارخانه‌ها یا توزیع‌کننده‌ها، زمان اجرای مدل به شدت افزایش خواهد یافت که این موضوع برای تصمیم‌گیرنده مطلوب نخواهد بود؛ بنابراین اینجا نیز طراحی آزمایشات می‌تواند نقش مفید را در کاهش زمان بازی کند و زمان را به صورت قابل توجهی کاهش دهد. جدول شماره (۵) نمونه‌ای از این محاسبات را نمایش می‌دهد.

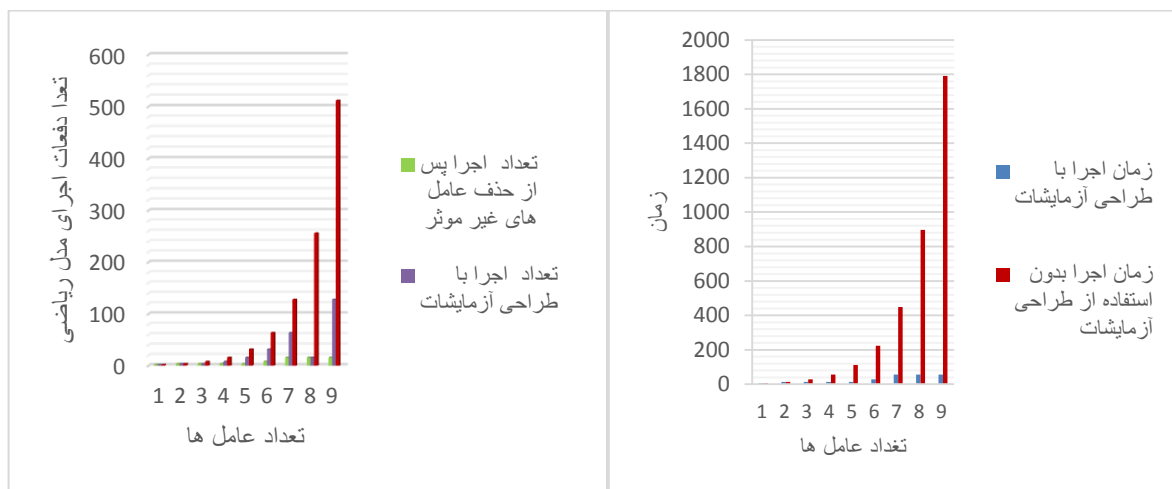
همان‌طور که مشاهده می‌کنید با افزایش تعداد عامل‌ها و سطوح، با کمک روش پیشنهادی می‌توان به جواب‌های کارا دست یافت. شکل شماره ۸ نیز تعداد دفعات اجرای مدل‌سازی ریاضی را در نظرگیری طراحی آزمایشات و بدون آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این اشکال پیداست وقتی تعداد عامل‌ها زیاد می‌شود و نیز زمانی که تعداد متغیرهای مدل ریاضی زیاد می‌گردد استفاده از طراحی آزمایشات هم در زمان حل و هم در دفعات اجرای مدل‌سازی کمک فراوانی خواهد نمود. در واقع در این تحقیق با کمک طراحی آزمایشات می‌توان ابتدا تأثیرات پارامترها را مشخص نمود و سپس پارامترهای با تأثیر کمتر را حذف نمود که این خود باعث کاهش زمان می‌گردد. بعلاوه، طراحی آزمایشات کمک می‌کند تا تصمیم‌گیرنده بتواند حدود این پارامترها را نیز تعیین نماید، و در انتخاب پارامترها نیز آگاهانه‌تر تصمیم‌گیری نماید.

لازم به ذکر است روش ارائه شده تنها برای زمان حل نمی‌باشد زیرا تا قبل از این تصمیم‌گیرنده مجبور بود پارامترهای مدل ریاضی و استوار را بدون هیچ آگاهی اولیه تعیین نماید که این موضوع باعث اتلاف وقت و نیز فاصله گرفتن از جواب‌های بهینه می‌شود اما استفاده از طراحی آزمایشات باعث می‌شود که تصمیم‌گیرنده با اثرات هر یک از پارامترها آشنا شده و در مورد عواملی که تأثیر زیادی روی هزینه‌دارند آگاهانه‌تر تصمیم‌گیری نماید که با تغییر سطوح عامل‌ها میزان هزینه به مقدار بهینه خود نزدیک‌تر شود. به طوری که این روش، توسعه‌ای برای روش استوار ارائه شده نیز می‌باشد زیرا تا پیش از این انتخاب مقدار پارامترها بر عهده تصمیم‌گیرنده بود. برای مثال در این تحقیق نشان داده شد که نرخ برگشت و ضریب پایداری مدل تأثیر چندانی روی مدل ریاضی و هزینه‌های مربوطه نمی‌گذارند بنابراین با حذف این عامل‌ها تصمیم‌گیرنده در زمان کمتر و با آگاهی بیشتر به تصمیم بهینه خواهد رسید. بدیهی است هنگامی که ابعاد مسئله بیشتر باشد و تعداد عامل‌های تأثیرگذار روی جواب بهینه بیشتر شود، روش پیشنهادی این مقاله کمک بیشتری را ارائه می‌نماید.

برای مثال تصور کنید که مدل ریاضی دارای ۸ پارامتر باشد که هریک از پارامترها دارای دو سطح باشند بدون استفاده از طراحی آزمایشات مدل استوار ارائه‌شده، باید ۲۵۶ بار اجرا گردد تا تمامی حالت‌ها در نظر گرفته شود حال با کمک آزمایشات کسری و حذف عامل‌های غیرموثر می‌تواند به ۱۶ حالت کاهش یابد که این باعث کاهش زمان حل نیز می‌گردد. (ردیف ۸ در جدول شماره (۵)) حال هرچه ابعاد مسئله گسترده‌تر شود نقش روش ارائه‌شده برجسته‌تر می‌شود (جدول شماره (۵)). در واقع استفاده از این روش باعث می‌شود که کلیدی‌ترین عامل‌های تأثیرگذار بر روی میزان هزینه شبکه زنجیره تأمین، شناسایی شده و تصمیم‌گیرنده را برای انتخاب میزان پارامترها برای حل مدل یاری نماید. تا سطح پارامتر به‌گونه‌ای انتخاب شود که بهترین سطح عملکردی برای هزینه زنجیره تأمین فراهم شود.

جدول شماره (۵): مقایسه تعداد دفعات اجرا و زمان اجرا در حالت استفاده از طراحی آزمایشات و بدون استفاده از آن

ردیف	سایز مدل	تعداد عامل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی	نوع آزمایش کسری	تعداد دفعات اجرای مدل ریاضی	تعداد دفعات اجرا با طراحی آزمایشات	تعداد دفعات اجرا پس از حذف عامل‌های غیر موثر	زمان اجرا بدون استفاده از طراحی آزمایشات در گمز	زمان اجرا با طراحی آزمایشات در گمز
۱	۸*۱۰*۸*۵*۶	۱	کامل	۲	۲	۲	۷	۷
۲	۸*۱۰*۸*۵*۶	۲	کامل	۴	۴	۴	۱۴	۱۴
۳	۸*۱۰*۸*۵*۶	۳	2 ³⁻¹	۸	۴	۴	۲۸	۱۴
۴	۸*۱۰*۸*۵*۶	۴	2 ⁴⁻¹	۱۶	۸	۴	۵۶	۱۴
۵	۸*۱۰*۸*۵*۶	۵	2 ⁵⁻¹	۳۲	۱۶	۴	۱۱۲	۱۴
۶	۸*۱۰*۸*۵*۶	۶	2 ⁶⁻¹	۶۴	۳۲	۸	۲۲۴	۲۸
۷	۸*۱۰*۸*۵*۶	۷	2 ⁷⁻¹	۱۲۸	۶۴	۱۶	۴۴۸	۵۶
۸	۸*۱۰*۸*۵*۶	۸	2 ⁸⁻⁴	۲۵۶	۱۶	۱۶	۸۹۶	۵۶
۹	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۱	کامل	۲	۲	۲	۵۳	۵۳
۱۰	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۲	کامل	۴	۴	۴	۱۰۶	۱۰۶
۱۱	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۳	2 ³⁻¹	۸	۴	۴	۲۱۲	۱۰۶
۱۲	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۴	2 ⁴⁻¹	۱۶	۸	۴	۴۲۴	۱۰۶
۱۳	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۵	2 ⁵⁻¹	۳۲	۱۶	۴	۸۴۸	۱۰۶
۱۴	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۶	2 ⁶⁻¹	۶۴	۳۲	۸	۱۶۹۶	۲۱۲
۱۵	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۷	2 ⁷⁻¹	۱۲۸	۶۴	۱۶	۳۳۹۲	۴۲۴
۱۶	۱۲*۱۵*۱۰*۷*۹	۸	2 ⁸⁻⁴	۲۵۶	۱۶	۱۶	۶۷۸۴	۴۲۴
۱۷	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۱	کامل	۲	۲	۲	۱۰۹	۱۰۹
۱۸	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۲	کامل	۴	۴	۴	۲۱۸	۲۱۸
۱۹	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۳	2 ³⁻¹	۸	۴	۴	۴۳۶	۲۱۸
۲۰	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۴	2 ⁴⁻¹	۱۶	۸	۴	۲۱۴۴	۲۱۸
۲۱	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۵	2 ⁵⁻¹	۳۲	۱۶	۴	۸۷۲	۲۱۸
۲۲	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۶	2 ⁶⁻¹	۶۴	۳۲	۸	۱۷۴۴	۴۳۶
۲۳	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۷	2 ⁷⁻¹	۱۲۸	۶۴	۱۶	۳۴۸۸	۸۷۲
۲۴	۱۸*۲۰*۱۵*۱۲*۱۰	۸	2 ⁸⁻⁴	۲۵۶	۱۶	۱۶	۶۹۷۶	۸۷۲



شکل شماره (۸): مقایسه تعداد دفعات و زمان اجرای مدل ریاضی با طراحی آزمایش و بدون آن

برای مقایسه مدل قطعی و استوار برای ۱۰ حالت مختلف با کمک چرخ گردون سناریوهای مختلف تولید شدند و نتایج هر دو مدل قطعی و پایدار مورد مقایسه قرار گرفتند. و نتایج در جدول (۶) نشان داده شده است. همان طور در این جدول مشاهده می شود، مدل استوار دارای میانگین و انحراف معیار هزینه کمتری می باشد.

جدول شماره (۶): مقایسه مدل قطعی و استوار

ردیف	سناریو	مقدار هزینه شبکه زنجیره تأمین	
		برنامه ریزی استوار	قطعی
۱	۳	۴۰۳۶۴۳۶	۳۸۰۷۰۷۲
۲	۴	۴۰۱۱۹۱۶	۴۵۷۴۰۸۳
۳	۳	۴۰۳۶۴۳۶	۳۸۰۷۰۷۲
۴	۵	۵۴۳۲۵۷۳	۶۰۵۲۶۲۸
۵	۵	۵۴۳۲۵۷۳	۶۰۵۲۶۲۸
۶	۲	۴۳۱۰۲۸۲	۳۹۲۵۳۳۸
۷	۳	۴۰۳۶۴۳۶	۳۸۰۷۰۷۲
۸	۵	۵۴۳۲۵۷۳	۶۰۵۲۶۲۸
۹	۱	۴۶۳۵۱۶۹	۴۰۷۰۱۶۱
۱۰	۴	۴۰۱۱۹۱۶	۴۵۷۴۰۸۳
میانگین		۴۵۳۷۶۳۱	۴۶۷۲۲۷۷
انحراف معیار		۶۴۷۲۴۳	۹۹۴۵۱۸

(ب) نتیجه گیری

در این مقاله مدلی ارائه شد که همزمان جریان روبه جلو و عقب و نیز جریان انتقال ضایعات به مراکز جمع آوری را در یک زنجیره تأمین بهینه می سازد. در این مقاله انتخاب مکان تسهیلات، جریان بین این تسهیلات و انتخاب تکنولوژی در کارخانه ها تحت شرایط عدم قطعیت تقاضای محصول نیز به کمک مدل ریاضی استوار ارائه شد. همچنین در این مدل پیشنهادی، با کمک طراحی آزمایشات تأثیر نرخ جریان برگشتی و نرخ تولید در کارخانه ها و تاثیرات میزان هزینه های حمل و نقل بر کل زنجیره و نیز تأثیر پارامترهای مدل برنامه ریزی استوار تعیین گردید. تاکنون، استفاده کنندگان از روش مدل سازی استوار از داده های فرضی یا داده ها مقاله های قبلی برای پارامترهای مدل سازی استفاده کرده اند، ولی در این تحقیق با ارائه نتایج حاصل از طراحی آزمایشات تصمیم گیرنده می تواند در خصوص پارامترها با توجه به سطوح در نظر گرفته شده تصمیم گیری نماید. این رویکرد پیشنهادی نه تنها باعث دستیابی به نتایج دقیق تر می شود بلکه به خاطر زمان بر بودن مدل سازی ریاضی در زمان حل مدل نیز صرفه جویی

می‌گردد. درواقع تصمیم‌گیرنده می‌تواند به‌جای استفاده از روش‌های فراابتکاری یا زمان‌بر با استفاده از طراحی آزمایشات تصمیمات مناسب را اتخاذ نماید. علاوه بر مورد فوق، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش پیشنهادی این مقاله، آن است که استفاده از طراحی آزمایشات به تفسیر نتایج حاصل از مدل ریاضی کمک خواهد کرد و همان‌طور که از جداول و اشکال بخش قبل پیداست مدل موردنظر تاثیرات قابل‌توجهی در تعداد دفعات اجرای مدل ریاضی و نیز زمان حل (مخصوصاً با توجه به NP-Hard بودن مدل ریاضی ارائه‌شده) در ابعاد بزرگ‌تر زنجیره خواهد گذاشت. همچنین استفاده از طراحی آزمایشات باعث می‌شود که تصمیم‌گیرنده از تاثیرات مختلف پارامترها مانند نرخ برگشت، هزینه‌های حمل‌ونقل، نرخ تولید و ... اطلاع پیدا کرده و در تصمیم‌گیری‌ها استفاده نماید.

۴- منابع

1. Assarzadegan, P., & Rasti-Barzoki, M. (2016). Minimizing sum of the due date assignment costs, maximum tardiness and distribution costs in a supply chain scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 47, 343-356.
2. Atashgar, K. (2019). *Design Of Experiment And Taguchi Method (DOE)*. Malek Ashtar University of Technology. (in persian)
3. Bashiri, M., Badri, H., & Talebi, J. (2012). A new approach to tactical and strategic planning in production-distribution networks. *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1703-1717.
4. Biehl, M., Prater, E., & Realf, M. J. (2007). Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems. *Computers & Operations Research*, 34(2), 443-463.
5. Bozorgi-Amiri, A., Mahmoodian, V., Fahimnia, E., & Saffari, H. (2015). A new memetic algorithm for solving split delivery vehicle routing problem. *Management Science Letters*, 5(11), 1017-1022.
6. Blumberg, D., Zanjirani Farahani, R., Asgari, N., Hafezi, M. (2009). *Revers Logistics. Institute for Trade studies and Research*.
7. Cedillo-Campos, M., & Sánchez-Ramírez, C. (2013). Dynamic self-assessment of supply chains performance: an emerging market approach. *Journal of applied research and technology*, 11(3), 338-347.
8. Chompu-inwai, R., Jaimjit, B., & Prem Suriyanunt, P. (2015). A combination of Material Flow Cost Accounting and design of experiments techniques in an SME: the case of a wood products manufacturing company in northern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1352-1364.
9. Fercoq, A., Lamouri, S., & Carbone, V. (2016). Lean/Green integration focused on waste reduction techniques. *Journal of Cleaner production*, 137, 567-578.
10. Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF- RUWAARD, J. M., & Van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, 10(2), 156-173.
11. Gen, M., & Cheng, R. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*. New York [ua].
12. Gholipour, A., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2019). A faucet closed-loop supply chain network design considering used faucet exchange plan. *Journal of Cleaner Production*, 235, 503-518.
13. Grobler, F., & Minnitt, R. C. A. (1999). *The increasing role of direct reduced iron in global steelmaking*.
14. <http://www.steelonthenet.com>
15. Jabbarzadeh, A., Houghton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178-191.
16. Jerbia, R., Boujelben, M. K., Sehli, M. A., & Jemai, Z. (2018). A stochastic closed-loop supply chain network design problem with multiple recovery options. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 23-32.
17. Ko, H. J., & Evans, G. W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34(2), 346-366.

18. Lee, D. H., & Dong, M. (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 455-474.
19. Sherafati, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvae, M. S. (2019). Supply chain network design considering sustainable development paradigm: A case study in cable industry. *Journal of Cleaner Production*, 234, 366-380.
20. Mousavi, S. M., Pardalos, P. M., Niaki, S. T. A., Fügenschuh, A., & Fathi, M. (2019). Solving a continuous periodic review inventory-location allocation problem in vendor-buyer supply chain under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 541-552.
21. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
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., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
24. Pishvae, M. S., Jolai, F., & Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4), 107-114.
25. 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.
26. Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1-2), 328-344.
27. Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 825-843.
28. De Rosa, V., Gebhard, M., Hartmann, E., & Wollenweber, J. (2013). Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 145(1), 184-198.
29. Saffari, H., Makui, A., Mahmoodian, V., & Pishvae, M. S. (2015). Multi-objective robust optimization model for social responsible closed-loop supply chain solved by non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 8(3), 42-58.
30. Salema, M. I. G., Póvoa, A. P. B., & Novais, A. Q. (2005). Design and planning of supply chains with reverse flows. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 20, pp. 1075-1080).
31. Salema M. I. G., Póvoa A. P. B., Novais A. Q., (2007), An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 179, 1063-1077.
32. Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European journal of operational research*, 179(3), 1063-1077.
33. Subramanian, P., Ramkumar, N., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2013). PRISM: PRiority based SiMulated annealing for a closed loop supply chain network design problem. *Applied soft computing*, 13(2), 1121-1135.
34. Sudarto, S., Takahashi, K., Morikawa, K., & Nagasawa, K. (2016). The impact of capacity planning on product lifecycle for performance on sustainability dimensions in Reverse Logistics Social Responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 133, 28-42.
35. Narayana, S. A., Pati, R. K., & Padhi, S. S. (2019). Market dynamics and reverse logistics for sustainability in the Indian Pharmaceuticals industry. *Journal of cleaner production*, 208, 968-987.
36. Turrisi, M., Bruccoleri, M., & Cannella, S. (2013). Impact of reverse logistics on supply chain performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
37. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., & Baboli, A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6), 1152-1168.

38. Olivares Vera, D. A., Olivares-Benitez, E., Puente Rivera, E., López-Campos, M., & Miranda, P. A. (2018). Combined use of mathematical optimization and design of experiments for the maximization of profit in a four-echelon supply chain. *Complexity*, 2018.
39. Wang, H. F., & Hsu, H. W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & operations research*, 37(2), 376-389.
40. Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, 64(1-3).
41. Atashgar, K. (2019). *Design Of Experiment And Taguchi Method (DOE)*. Malek Ashtar University of Technology. (in persian)
42. Bashiri, M., Badri, H., & Talebi, J. (2012). A new approach to tactical and strategic planning in production–distribution networks. *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1703-1717.
43. Biehl, M., Prater, E., & Realf, M. J. (2007). Assessing performance and uncertainty in developing carpet reverse logistics systems. *Computers & Operations Research*, 34(2), 443-463.
44. Bozorgi-Amiri, A., Mahmoodian, V., Fahimnia, E., & Saffari, H. (2015). A new memetic algorithm for solving split delivery vehicle routing problem. *Management Science Letters*, 5(11), 1017-1022.
45. Blumberg, D., Zanjirani Farahani, R., Asgari, N., Hafezi, M. (2009). *Revers Logistics. Institute for Trade studies and Research*.
46. Cedillo-Campos, M., & Sánchez-Ramírez, C. (2013). Dynamic self-assessment of supply chains performance: an emerging market approach. *Journal of applied research and technology*, 11(3), 338-347.
47. Chompu-inwai, R., Jaimjit, B., & Premsurianunt, P. (2015). A combination of Material Flow Cost Accounting and design of experiments techniques in an SME: the case of a wood products manufacturing company in northern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1352-1364.
48. Fercoq, A., Lamouri, S., & Carbone, V. (2016). Lean/Green integration focused on waste reduction techniques. *Journal of Cleaner production*, 137, 567-578.
49. Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF- RUWAARD, J. M., & Van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, 10(2), 156-173.
50. Gen, M., & Cheng, R. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*. New York [ua].
51. Gholipoor, A., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2019). A faucet closed-loop supply chain network design considering used faucet exchange plan. *Journal of Cleaner Production*, 235, 503-518.
52. Grobler, F., & Minnitt, R. C. A. (1999). *The increasing role of direct reduced iron in global steelmaking*.
53. <http://www.steelonthenet.com>
54. Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 178-191.
55. Jerbia, R., Boujelben, M. K., Sehli, M. A., & Jemai, Z. (2018). A stochastic closed-loop supply chain network design problem with multiple recovery options. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 23-32.
56. Ko, H. J., & Evans, G. W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34(2), 346-366.
57. Lee, D. H., & Dong, M. (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 455-474.
58. Sherafati, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvae, M. S. (2019). Supply chain network design considering sustainable development paradigm: A case study in cable industry. *Journal of Cleaner Production*, 234, 366-380.
59. Mousavi, S. M., Pardalos, P. M., Niaki, S. T. A., Fügenschuh, A., & Fathi, M. (2019). Solving a continuous periodic review inventory-location allocation problem in vendor-buyer supply chain under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 541-552.

60. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
61. Özkır, V., & Başlıgil, H. (2013). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 41, 114-125.
62. Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
63. Pishvae, M. S., Jolai, F., & Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4), 107-114.
64. 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.
65. Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1-2), 328-344.
66. Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 825-843.
67. De Rosa, V., Gebhard, M., Hartmann, E., & Wollenweber, J. (2013). Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 145(1), 184-198.
68. Saffari, H., Makui, A., Mahmoodian, V., & Pishvae, M. S. (2015). Multi-objective robust optimization model for social responsible closed-loop supply chain solved by non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 8(3), 42-58.
69. Salema, M. I. G., Póvoa, A. P. B., & Novais, A. Q. (2005). Design and planning of supply chains with reverse flows. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 20, pp. 1075-1080).
70. Salema M. I. G., Póvoa A. P. B., Novais A. Q., (2007), An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 179, 1063-1077.
71. Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European journal of operational research*, 179(3), 1063-1077.
72. Subramanian, P., Ramkumar, N., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2013). PRISM: PRiority based SiMulated annealing for a closed loop supply chain network design problem. *Applied soft computing*, 13(2), 1121-1135.
73. Sudarto, S., Takahashi, K., Morikawa, K., & Nagasawa, K. (2016). The impact of capacity planning on product lifecycle for performance on sustainability dimensions in Reverse Logistics Social Responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 133, 28-42.
74. Narayana, S. A., Pati, R. K., & Padhi, S. S. (2019). Market dynamics and reverse logistics for sustainability in the Indian Pharmaceuticals industry. *Journal of cleaner production*, 208, 968-987.
75. Turrisi, M., Bruccoleri, M., & Cannella, S. (2013). Impact of reverse logistics on supply chain performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
76. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., & Baboli, A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: a robust-M/M/c queuing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(6), 1152-1168.
77. Olivares Vera, D. A., Olivares-Benitez, E., Puente Rivera, E., López-Campos, M., & Miranda, P. A. (2018). Combined use of mathematical optimization and design of experiments for the maximization of profit in a four-echelon supply chain. *Complexity*, 2018.
78. Wang, H. F., & Hsu, H. W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & operations research*, 37(2), 376-389.
79. Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, 64(1-3).

Robust Optimization Model for Forward/Revers Logistics Network Using Experiment Design

Hamid Saffari (Corresponding Author)

PhD Candidate, Malek Ashtar University of Technology

Email: hamidsaffari87@yahoo.com

Karim Atashgar

Malek Ashtar University of Technology

Morteza Abbasi

Malek Ashtar University of Technology

Abstract

Increasing attention to the closed-loop supply chain and considering forward /reverse logistics has led to the presentation of various mathematical models in this field. This paper first presents a robust model for a supply chain network with forward /reverse flow approach, and then uses the experiment design method to determine the effect of each of the robust modeling parameters and the parameters of cost, production rate, return of products in the top and bottom level. this paper presents a new robust optimized model for the supply chain network.design The use of robust mathematical design and experimental modeling at the same time, which is done for the first time in this paper, has caused: 1) to increase the speed of achieving optimal answers, 2) to help the decision maker in the appropriate choice of model parameters in a structured way. The report and the presented results, according to the information of iron and steel industry, show the efficiency of using experimental design in order to reduce the time of solving the mathematical model and providing guidelines to the decision maker in the strategic area of supply chain.

Keywords: supply chain network design, Design of Experime, Fractional design of experiment, robust optimization.