Archive of SID

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

IERPS نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

ISSN: 2345-2269

سال هفتم، شماره چهاردهم، بهار و تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۰۵-۱۲۲

www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2019.14188.1644

طراحی یک زنجیره تأمین پایدار با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در ریسک مربوط به تأمین‌کنندگان

مجتبی نوری[۱]، عمران محمدی[۲*]، محمد سعید جبل عاملی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. استادیار دانشکده مهندسی صنایع ، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. استاد تمام دانشکده مهندسی صنایع ، دانشگاه علم و صنعت ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۶/۴/۳۱

پذیرش ۱۳۹۸/۶/۲۸

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین سبز

ریسک

عدم‌قطعیت

بهینه‌سازی استوار

تخفیف

خلاصه

مدیریت ریسک، مسئله‌ای مهم در مدیریت زنجیره تأمین و تدارکات است. بهبود قابلیت پاسخگویی در قالب کاهش (احتمال) رخداد ریسک، شرکت را قادر می‌سازد تا ضمن سبقت از رقبای خود، آسیب طولانی‌مدت مورد انتظار را کاهش دهد. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط به‌منظور طراحی زنجیره تأمین سبز ارائه می‌گردد. این مدل، به‌دنبال کمینه‌سازی هزینه، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و ریسک است. برای اولین‌بار، ریسک تأمین مواد خام و ریسک حمل‌ونقل در سطوح مختلف زنجیره تأمین با عدم‌قطعیت روبه‌رو هستند و هزینه مواد خام براساس مدل تخفیف نموی از سوی تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان ارائه می‌گردد. پارامترهای مورداستفاده در مدل‌سازی اولیه دارای عدم‌قطعیت است و با استفاده از رویکرد استوار سازی به حالت قطعی تبدیل می‌شود و حل آن با نرم‌افزار گمز، صورت می‌پذیرد. علاه‌براین، در مورد پارامتر عدم قطعیت، تحلیل حساسیت انجام می‌شود و تحت مقادیر مختلف از این پارامتر، نتیجه به‌دست‌آمده مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در مقدار تابع هدف، تابع ریسک است، زیرا پارامترهای آن با عدم‌قطعیت روبه‌رو هستند.

۱- مقدمه

به‌دلیل چالش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی که در دهه اخیر سازمان‌ها را تهدید نموده است، رویکرد مشتری‌گرایی و تمرکز بر خواسته‌های آن، و طراحی راهبرد سازمان بر این اساس (ایجاد رضایت مشتریان) قابلیت خود را برای ایجاد مزیت رقابتی ازدست‌داده است. این نگرش باعث تولید محصولات و فرایندهایی گردید که با محیط‌زیست هماهنگ نبودند. در همین راستا سازمان‌ها بقای خود را در مسئولیت‌پذیری در سه حوزه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی یافته‌اند [۱].

بنابراین اهمیت زیاد مسائل زیست‌محیطی منجر به ادغام عوامل پایداری در مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین شده است. این ادغام می‌تواند به‌عنوان اقدامات زیست‌محیطی در توابع هدف یا محدودیت‌های محیطی در مدل ریاضی اعمال شود. طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز، یکی دیگر از الگوهایی[1] است که هدف آن ادغام اهداف یا عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین است [۴].

علاوه‌براین، وقوع پیشامدهای ریسک در سطوح مختلف زنجیره تأمین می‌تواند بر عملکرد آن اثر منفی بگذارد. مدیریت پیشامدهای ریسک تحت عنوان مدیریت ریسک زنجیره تأمین، به یک بخش کلیدی از استراتژی کسب‌وکار تبدیل‌شده است. مدیریت ریسک زنجیره تأمین، توجه بیشتری به حرکت به سمت زنجیره تأمین جهانی و کاهش پیشامدهای ریسک داخلی و خارجی که باعث اختلال در عملیات زنجیره تأمین می‌شود، دارد [۵].

1. paradigm

* نویسنده مسئول: عمران محمدی

تلفن: ۷۳۲۲۵۰۷۵-۰۲۱؛ پست الکترونیکی: e_mohammadi@iust.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

با نگاهی به‌مرور ادبیات درمی‌یابیم که در تحقیقات صورت گرفته، معمولاً ریسک برآورد تقاضای مشتریان در نظر گرفته شده است و به ریسک مربوط به تأمین مواد اولیه و ریسک حمل‌ونقل پرداخته نشده است [۴]. در تحقیق حاضر، ریسک تأمین مواد اولیه توسط تأمین‌کنندگان به هنگام ارائه‌ی طرح‌های تخفیف از جانب تأمین‌کنندگان موردبررسی قرار می‌گیرد تا به این سؤال پاسخ داده شود که طرح با تخفیف بیشتر، بر میزان ریسک تأمین مواد اولیه از سوی تأمین‌کنندگان اثر مستقیم دارد یا غیرمستقیم؟ سایر ریسک‌ها در سیستم حمل‌ونقل مانند ترافیک، تصادفات، خرابی وسایل نقلیه و غیره، و عدم آگاهی از میزان دقیق این ریسک‌ها، مسئله‌ی مهمی است. همچنین، هزینه‌ها و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات آن بر محیط‌زیست، در انتخاب مکان تولید، انبار و نحوه پاسخگویی به تقاضا تأثیرگذار خواهد بود و موضوع اصلی این تحقیق است.

از سوی دیگر اندازه‌گیری ریسک با چالش‌هایی همراه است. ابهام در اندازه‌گیری دقیق ریسک‌های مطرح شده، تحقیق را به‌سمت استفاده از یک رویکرد مناسب جهت در نظر گرفتن عدم‌قطعیت مربوط به این اندازه‌گیری، سوق می‌دهد. سؤال اساسی دیگری که در جستجوی پاسخ آن هستیم، این است که کدام رویکرد برای این مسئله مناسب است؟ در تعیین میزان ریسک‌ها در این تحقیق، هیچ بانک اطلاعاتی و معیار مناسبی یافت نشده است. لذا پارامترهای مرتبط از سطح قطعیت بسیار پایینی برخوردار است. به سبب این موضوع، از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است.

این مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است، در بخش ۲ به پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته به‌منظور تعیین مسیر پژوهش پرداخته می‌شود. مدل مستخرج از بخش قبل، در بخش ۳ ارائه، و در بخش ۴ حل می‌شود. در بخش ۵ با یک مورد عددی به تحلیل جواب و کاربرد مدل پرداخته، و در بخش ۶ نتایج حاصل از پژوهش و پیشنهادات آتی ارائه می‌گردد.

۲. مرور ادبیات

مفهوم مدیریت زنجیره تأمین سبز، به‌طور گسترده‌ای در دو دهه‌ی اخیر موردمطالعه قرارگرفته است. اولین تلاش برای تعریف مدیریت زنجیره تأمین سبز در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ صورت گرفت [۶]. پر استنادترین مقاله در حوزه‌ی مدیریت زنجیره تأمین سبز، توسط اسریواستاوا[1][۷] ارائه شد که مدیریت زنجیره تأمین سبز را این‌گونه تعریف کرده است،" یکپارچه‌سازی تفکر زیست‌محیطی با مدیریت زنجیره تأمین سبز، شامل طراحی محصول، یافتن منابع مواد و انتخاب آن، فرآیندهای تولید، تحویل محصول نهایی به مشتریان نهایی و همچنین مدیریت محصولات بعد از عمر مفیدشان است" [۸]. طراحی ساختار فیزیکی شبکه مربوط به یک زنجیره تأمین، طراحی شبکه زنجیره تأمین نامیده می‌شود [۹]. با توجه به تأثیر قابل‌توجهی که طراحی شبکه زنجیره تأمین بر انعطاف‌پذیری، سود، و شایستگی رقابتی دارد، طراحی شبکه یکی از تصمیمات مهم استراتژیک در مدیریت زنجیره تأمین است که سودآوری بلندمدت و پایداری زنجیره تأمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۰]. به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز، مقالات زیادی در راستای توسعه مدل‌های نظری و محاسباتی ارائه‌شده‌اند، در ادامه جدیدترین مقالات در این حوزه و نوآوری‌های صورت گرفته در آن‌ها، موردبررسی قرار می‌گیرد.

منسینی[2] و همکاران یک زنجیره تأمین با تأمین‌کنندگانی که تخفیف‌های کلی ارائه می‌دهند و هزینه‌های حمل‌ونقلی که براساس نرخ بارگیری کالا است، طراحی نمودند. آن‌ها از برنامه‌ریزی خطی مبتنی بر روش ابتکاری گرد کردن تکراری و روش متنوع سازی[3]، برای حل مسئله‌ی خود استفاده نمودند[۱۱]. لی[4] و همکاران به‌منظور کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین، بر انتخاب تأمین‌کنندگان تمرکز نمودند. در مدل آن‌ها، انتخاب تأمین‌کنندگان با در نظر گرفتن تخفیف‌های نموی و کلی، مدل‌سازی شد. الگوریتم ژنتیک در حل مدل پیچیده آن‌ها مورداستفاده قرار گرفت[۱۲].

مینا[5] و سارماه[6] مسئله تخصیص سفارش بین چندین تأمین‌کننده را در حضور ریسک مدل نمودند. آن‌ها با توجه به ظرفیت‌های مختلف برای هر تأمین‌کننده، تخفیف کلی در نظر گرفتند و از روش الگوریتم ژنتیک برای حل آن استفاده کردند [۱۳]. همامی[7] و همکاران با توجه نوسانات نامشخص نرخ ارز و تخفیف قیمت، به طراحی یک زنجیره تأمین پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح مبتنی بر سناریو، مسئله را مدل‌سازی نمودند [۱۴]. آیهان[8] و کیلیک[9] یک مسئله انتخاب تأمین‌کننده را براساس معیارهای مختلف در نظر گرفتند. برای حل مسئله، ابتدا از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده نمودند. در مرحله دوم، خروجی مرحله اول را به‌عنوان ورودی در مدل MILP استفاده نمودند. در مدل مدل‌سازی ریاضی، تخفیف کلی لحاظ گردید [۱۵].

چای و ان‌گای[10] یک مدل تصمیم‌گیری نرم به‌منظور انتخاب تأمین‌کننده ارائه دادند که دارای ذینفعان و چشم‌اندازهای مختلفی است. این مدل جدید که با استفاده از روش فازی مردد[11] ایجاد شده است، قابلیت‌های قابل‌توجهی در رسیدگی به ابهامات در مورد ذینفعان نشان می‌دهد [۱۶]. مقدم[12] یک مدل ریاضی چند هدفه فازی، برای شناسایی و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان در یک پیکربندی شبکه لجستیک معکوس تهیه کرد. این روش مدل‌سازی عدم اطمینان ذاتی

1. Stivastava
2. Mansini
3. Linear programming based iterative rounding heuristics and diversification methods
4. Lee
5. Meena
6. Sarmah
7. Hammami
8 Ayhan
9. Kilic
10. Chai and Ngai
11. Hesitant fuzzy sets
12. Moghaddam

www.SID.ir

Archive of SID

در تقاضای مشتری، ظرفیت تأمین‌کنندگان و درصد کالاهای برگشتی و همچنین وجود اهداف متناقض در سیستم‌های لجستیک معکوس را به دست می‌آورد. او یک شبیه‌سازی مونت کارلو یکپارچه برای تعیین مجموعه راه‌حل‌های بهینه پارتو انجام داد [۱۷].

ترابی[1] و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای حل مسئله انتخاب تأمین‌کننده ارائه دادند. در این مدل، ریسک‌های عملیاتی در نظر گرفته شد و یک روش پنج مرحله‌ای برای حل کارآمد مسئله طراحی گردید [۱۸]. جین[2] و همکاران، یک مدل ریاضی غیرخطی برای انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش توسعه دادند. برای حل مدل غیرخطی ارائه‌شده، آن‌ها از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک[3]، الگوریتم زنبورعسل استعماری[4] و مستعمره زنبورعسل پرهرج و مرج[5] استفاده کرده‌اند. درنهایت برای انجام آنالیز حساسیت و نشان دادن کارایی، هزینه خرید مواد اولیه بدون در نظر گرفتن تخفیف، با تخفیف کلی و تخفیف افزایشی مقایسه شده است [۱۹]. چبی و اتای[6] یک رویکرد فازی دو مرحله‌ای برای انتخاب تأمین‌کننده و مسئله تخصیص سفارش ارائه دادند. در مرحله اول، از مولتی‌مورا فازی[7] برای ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان با توجه به اقدامات ذهنی استفاده شد. سپس در مرحله دوم، با در نظر گرفتن تخفیف‌های مقداری، یک برنامه‌ریزی ریاضی، برای تعیین میزان سفارش تخصیص‌یافته به تأمین‌کنندگان منتخب ارائه شد [۲۰].

رضایی و همکاران، از طریق غربالگری اولیه، زیرمجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان واجد شرایط را شناسایی نمودند. سپس از روش بهترین بدترین[8] برای یافتن بهترین تأمین‌کنندگان از بین تأمین‌کنندگان واجد شرایط استفاده می‌شود. سرانجام یک رتبه‌بندی نسبتاً معنادار از تأمین‌کنندگان به‌دست می‌آید [۲۱]. محمدی‌تبار و همکاران از تئوری بازی‌ها به‌منظور انتخاب تأمین‌کنندگان استفاده کردند و هزینه‌های زنجیره تأمین را در دو سناریو تحلیل نمودند. در سناریوی اول، تأمین‌کنندگان مستقل عمل می‌کنند درحالی‌که در سناریوی دوم، تأمین‌کنندگان با یکدیگر همکاری نموده و ائتلاف می‌کنند [۲۲]. مینا و سارماه[9] به طراحی زنجیره تأمین با توجه به ریسک احتمال وقوع اختلال برای تأمین‌کننده پرداختند. ریسک و پیشنهادهای تخفیف از جانب تأمین‌کننده وجود دارد و به علت پیچیدگی مدل، حل آن به‌صورت دقیق در مقیاس مسائل بزرگ بسیار طولانی و وقت‌گیر خواهد بود به همین دلیل یک رویکرد جدید برای حل مسئله در مقاله ارائه شده است. روش حل مدل دارای ۷ مرحله است [۲۳].

امین و باکی[10] یک مدل ریاضی برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با توجه به عوامل جهانی، ازجمله نرخ ارز و عوارض ارائه دادند که اهداف چندمنظوره و عدم‌قطعیت به‌طور هم‌زمان در آن تجمیع شده و رویکرد بهینه‌سازی برنامه‌ریزی فازی، برای حل این مدل، توسعه‌یافته است [۲۴]. عرب‌شیبانی و همکاران، از یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه فازی مبتنی بر آنالیز نسبت (مورا[11] فازی) برای ارزیابی عملکرد کلی تأمین‌کننده استفاده کردند. آن‌ها در مدل‌سازی، تخفیف نموی تأمین‌کنندگان و خطراتی مانند فاجعه طبیعی یا تغییرپذیری سیاسی که با آن روبرو هستند را در نظر گرفتند. ازاین‌رو، از روش آنالیز حالات بالقوه خرابی و اثرات آن[12] برای ارزیابی خطرات هر تأمین‌کننده استفاده کردند[۲۵]. بررسی مقالات مروری و مقایسه با تحقیق حاضر، در جدول ۱ آورده شده است.

در تحقیق حاضر علاوه بر موارد ذکر شده در جدول ۱، موارد نزدیک به واقعیت مانند انتخاب تأمین‌کننده براساس میزان تخفیف لحاظ شده از طرف او همین‌طور ریسک تأمین مواد اولیه در نظر گرفته شده است. اما مهم‌ترین نوآوری صورت گرفته در این تحقیق، به‌کارگیری عدم‌قطعیت استوار در ریسک تأمین مواد اولیه است. انتخاب تأمین‌کننده مناسب با توجه به سیاست‌های تخفیف دهی آن‌ها و ریسکی که آن‌ها در تأمین مواد اولیه، با آن روبه‌رو هستند و عدم آگاهی از میزان دقیق این ریسک، چالش بزرگی را در انتخاب درست، ایجاد می‌کند.

درحالی‌که سایر ریسک‌ها در سیستم حمل‌ونقل مانند ترافیک، تصادفات، خرابی وسایل نقلیه و غیره، و عدم آگاهی از میزان دقیق این ریسک‌ها، مسئله‌ی مهمی است. همچنین، هزینه‌ها و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات آن بر محیط‌زیست، در انتخاب مکان تولید، انبار و نحوه پاسخگویی به تقاضا تأثیرگذار خواهد بود و موضوع اصلی این تحقیق است.

۳- تعریف مسئله و مدل‌سازی

در این پژوهش، شبکه زنجیره تأمین، از چهار سطح از نهادها تشکیل شده است: تأمین‌کننده، تولیدکننده، انبار و مشتری. این سطوح از طریق سه جریان به یکدیگر متصل شده‌اند: جریان مواد، جریان اطلاعات و جریان سرمایه. جریان مواد در این شبکه زنجیره تأمین، از تأمین‌کنندگان مواد اولیه شروع شده و با عبور از تولیدکنندگان محصول و انبار، در آخر به مشتریان می‌رسد. جریان اطلاعات و سرمایه از مشتریان شروع شده و به تأمین‌کنندگان ختم می‌شود.

در این مسئله، تأمین مواد اولیه براساس طرح تخفیف پیشنهادی تأمین‌کنندگان صورت می‌گیرد. مدل‌سازی ریاضی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که تأمین‌کنندگان با تخفیف مناسب‌تر انتخاب شوند. از طرف دیگر با افزایش تخفیف در طرح پیشنهادی یک تأمین‌کننده، میزان ریسک تأمین مواد اولیه نیز افزایش می‌یابد. علاوه‌بر موضوع مطرح

1.Torabi
2. Jain
3. Genetic algorithm
4. Artificial Bee Colony
5. Chaotic Bee Colony
6. Çebi and Otay
7. Fuzzy Multimoora
8. best worst method (BWM)
9. Meena and Sarmah
10. Baki
11. Moora
12. failure mode and effects analysis (FMEA)

www.SID.ir

Archive of SID

شده، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای براساس میزان فواصل طی شده و تعداد دفعات خودروهای حمل‌کننده‌ی هر تقاضا، در مدل لحاظ شده است.

۳-۱. مفروضات مسئله

مفروضات زیر برای مدل پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند:

۱. تخفیف اعمال‌شده توسط تأمین‌کننده مواد خام از نوع تخفیف نموی (افزایشی)[1] است.
۲. مقدار موجودی مواد خام در انبار مراکز تولیدی و محصولات نهایی در انبارهای بالقوه برابر صفر است.
۳. تمامی مراکز دارای ظرفیت محدود و مشخص است.
۴. تقاضای مشتریان بایستی تا آخرین دوره زمانی برآورده گردد.
۵. ظرفیت وسایل نقلیه باری محدود در نظر گرفته شده است.
۶. در سیستم حمل‌ونقل از یک نوع خودرو به‌منظور حمل استفاده شده است و میزان انتشار گازهای آلاینده در سیستم حمل‌ونقل بر اساس واحد مسافت است.

۳-۲- مجموعه‌ها، پارامترهای ورودی و متغیرهای تصمیم

در نهایت، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه‌شده در این مقاله، به‌منظور تعیین تعداد و مکان امکانات بالقوه، انتخاب تأمین‌کنندگان و جریان مواد درون تسهیلات در هر سطح از زنجیره تأمین در دوره‌های مختلف برای هر محصول و تعیین سطح مناسب تخفیف با در نظر گرفتن موضوع زیست‌محیطی به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

برای مدل‌سازی مجموعه، پارامتر و متغیرهای مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

جدول (۱): بررسی مقالات مروری و مقایسه با تحقیق حاضر

نویسنده (سال انتشار)	تخفیف			معیارها				عدم‌قطعیت			روش حل/ رویکرد
	بدون تخفیف	کلی	نموی	سبز	ریسک	هزینه	بازه‌ای	فازی	تصادفی		
منسینی و همکاران (۲۰۱۲)		✓				✓					روش ابتکاری
لی و همکاران (۲۰۱۳)		✓	✓			✓					الگوریتم ژنتیک
مینا و سارماه (۲۰۱۳)		✓			✓	✓					الگوریتم ژنتیک
همامی و همکاران (۲۰۱۴)		✓	✓			✓			✓		مبتنی بر سناریو
آیهان و کیلیک (۲۰۱۵)		✓		✓		✓		✓			تحلیل سلسله مراتبی فازی و مدل‌سازی ریاضی
چای و ان‌گای (۲۰۱۵)	✓					✓		✓			مجموعه فازی مردد
مقدم (۲۰۱۵)	✓				✓	✓		✓			برنامه‌ریزی آرمانی فازی - شبیه‌سازی مونت‌کارلو
ترابی و همکاران (۲۰۱۵)	✓				✓	✓			✓		سناریو محور– محدودیت اپسیلون
جین و همکاران (۲۰۱۵)	✓	✓	✓			✓					الگوریتم‌های فرا ابتکاری
چبی و اتای (۲۰۱۶)		✓	✓			✓		✓			مولتی‌مورا فازی
رضایی و همکاران (۲۰۱۶)	✓			✓		✓					روش بهترین و بدترین
محمدی‌تبار و همکاران (۲۰۱۶)	✓					✓					تئوری بازی‌ها
لال منا و سارما (۲۰۱۶)		✓	✓		✓	✓					
امین و باکی (۲۰۱۷)		✓				✓		✓			برنامه‌ریزی فازی
عرب‌شیبانی و همکاران (۲۰۱۸)		✓			✓	✓		✓			برنامه‌ریزی فازی چند هدفه و FMEA
مقاله حاضر			✓	✓	✓	✓	✓				برنامه‌ریزی استوار و روش مطلوبیت مجموع وزنی

1. incremental discount

www.SID.ir

Archive of SID

مجموعه‌ها

S	مجموعه تأمین‌کنندگان
P	مجموعه مکان‌های پیشنهادی برای مراکز تولیدی
W	مجموعه مکان‌های پیشنهادی برای انبار
C	مجموعه مشتری‌ها
K	مجموعه محصولات تولیدی
T	مجموعه دوره‌های زمانی
M	مجموعه نقاط شکست در تخفیف نموی

پارامترهای ورودی

FCP_p هزینه ثابت احداث مرکز تولیدی p

FCW_w هزینه ثابت احداث انبار w

CP_{ptk} هزینه عملیاتی هر واحد در مرکز تولیدی p در دوره t به‌منظور تولید محصول k

CS_{skm} هزینه خرید ماده خام k از تأمین‌کننده s که به بازه m ام مربوط است.

hf_{tk} هزینه نگهداری محصول k در دوره t در واحد تولیدی p

hd_{tk} هزینه نگهداری محصول k در دوره t در انبار w

π_{tk} هزینه کمبود محصول k در دوره t از مشتری c

TCS_{spt} هزینه حمل‌ونقل هر واحد بین تأمین‌کننده s و کارخانه تولیدیp در دوره t

TCP_{pwt} هزینه حمل‌ونقل هر واحد بین مرکز تولیدی p و انبارw در دوره t

TCW_{wct} هزینه حمل‌ونقل هر واحد بین انبارw و مشتری c در دوره t

$CAPS_{stk}$ ظرفیت تأمین توسط تأمین‌کننده s در دوره t به‌منظور تأمین محصول نوع k

$CAPP_{ptk}$ ظرفیت تولید در مرکز تولیدی p در دوره t به‌منظور تولید محصول نوع k

$CAPW_{wtk}$ ظرفیت نگهداری انبار در انبار w در دوره t به‌منظور نگهداری محصول نوع k

CD_{ctk} تقاضای مشتری c در دوره t از محصول نوع k

ESP_{sp} فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای بین تأمین‌کننده s و کارخانه تولیدی p

EPW_{pw} فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای بین کارخانه تولیدی p و انبار w

EWC_{wc} فاکتور انتشار گازهای گلخانه‌ای بین انبار w و مشتری c

DSP_{sp} فاصله حمل‌ونقل بین تأمین‌کننده s و کارخانه تولیدی p

DPW_{pw} فاصله حمل‌ونقل بین کارخانه تولیدی p و انبار w

DWC_{wc} فاصله حمل‌ونقل بین انبار w و مشتری c

$LDSP_{spk}$ میانگین بارگیری وسایل نقلیه بین تأمین‌کننده s و کارخانه تولیدی p از محصول نوع k

$LDPW_{pwk}$ میانگین بارگیری وسایل نقلیه بین کارخانه تولیدی p و انبار w از محصول نوع k

$LDWC_{wck}$ میانگین بارگیری وسایل نقلیه بین کارخانه انبار w و مشتری c از محصول نوع k

RK_{stk} ریسک تأمین‌کننده s در دوره t برای تأمین محصول نوع k

RS_{sptk} ریسک حمل‌ونقل بین تأمین‌کننده s و کارخانه تولیدی p در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k

RP_{pwtk} ریسک حمل‌ونقل بین کارخانه تولیدی p و انبار w در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k

RC_{cwtk} ریسک حمل‌ونقل بین انبار w و مشتری c در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k

IF عدد مثبت بزرگ

متغیرهای تصمیم

X_s اگر تأمین‌کننده s انتخاب شود مقدار یک می‌گیرد در غیر این صورت صفر می‌شود.

X_p اگر مرکز تولید پیشنهادی p انتخاب شود مقدار یک می‌گیرد در غیر این صورت صفر می‌شود.

X_w اگر انبار پیشنهادی w انتخاب شود مقدار یک می‌گیرد در غیر این صورت صفر می‌شود.

AS_{sptk} مقدار ماده خام نوع k در دوره t که از تأمین‌کننده s به واحد تولیدی p منتقل می‌شود.

AP_{pwtk} تعداد محصول نوع k در دوره t که از واحد تولیدی p به انبار w منتقل می‌شود.

AW_{wctk} تعداد محصول نوع k در دوره t که از انبار w به مشتری c منتقل می‌شود.

If_{ptk} موجودی محصول نوع k در دوره t در واحد تولیدی p

Id_{wtk} موجودی محصول نوع k در دوره t در انبار w

B_{ctk} کمبود محصول نوع k در دوره t که برای مشتری c اتفاق می افتد.

۳-۳- مدل برنامه‌ریزی قطعی

در ادامه، ضمن ارائه مدل برنامه‌ریزی مسئله برای حالت قطعی، توضیحات مختصری از اجزای آن ارائه می‌شود. همان‌طور که در مدل زیر مشاهده می‌شود، معادلات (۱)، (۲) و (۳) توابع هدف برای مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز می‌باشند.

www.SID.ir

Archive of SID

$$
\begin{aligned}
&MinOBJ1 \\
&= \sum_{p=1}^{P} X_p FCP_p + \sum_{w=1}^{W} X_w FCW_w \\
&+ \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} CP_{ptk} AS_{sptk} \\
&+ \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} If_{ptk} hf_{tk} + \sum_{w=1}^{W}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} Id_{wtk} hd_{tk} \\
&+ \sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} B_{ctk}\pi_{tk} \\
&+ \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} TCP_{spt} AS_{sptk} \\
&+ \sum_{p=1}^{P}\sum_{w=1}^{W}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} TCP_{pwt} AP_{pwtk} \\
&+ \sum_{w=1}^{W}\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} TCW_{wct} AW_{wctk}
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

$$
\begin{aligned}
&MinOBJ2 \\
&= \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P} ESP_{sp} \frac{\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AS_{sptk}\right) DSP_{sp}}{LDSP_{sp}} \\
&+ \sum_{p=1}^{P}\sum_{w=1}^{W} EPW_{pw} \frac{\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AP_{pwtk}\right) DPW_{pw}}{LDPW_{pw}} \\
&+ \sum_{w=1}^{W}\sum_{c=1}^{C} EWC_{wc} \frac{\left(\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AW_{wctk}\right) DWC_{wc}}{LDWC_{wc}}
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

$$
\begin{aligned}
&MinOBJ3 \\
&= \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} RK_{stk} AS_{sptk} \\
&+ \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} RS_{sptk} AS_{sptk} \\
&+ \sum_{p=1}^{P}\sum_{w=1}^{W}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} RP_{pwtk} AP_{pwtk} \\
&+ \sum_{w=1}^{W}\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} RW_{wctk} AW_{wctk}
\end{aligned}
\qquad (۳)
$$

معادله (۱) تابع هدف کمینه‌سازی هزینه است که از چند بخش تشکیل‌شده و به‌ترتیب عبارت‌اند از: هزینه ثابت مربوط به احداث و راه‌اندازی مراکز تولید و انبارها، هزینه نگهداری موجودی در مراکز تولیدی و انبارها، هزینه کمبود، و هزینه‌های حمل‌ونقل در هر سه سطح. در این تابع هدف هزینه خرید مواد خام لحاظ نشده است و به‌دلیل مدل تخفیف نموی تأمین‌کنندگان، در بخش ۳-۴ این قسمت از هزینه‌ها به تابع هدف (۱) افزوده می‌گردد.

معادله (۲) تابع هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. انتشار گازهای گلخانه‌ای شاخص بسیار محسوسی برای محیط‌زیست است. در این مدل، انتشار گازهای گلخانه‌ای با فاصله‌ی طی شده، رابطه مستقیم دارد و به‌طور معکوس، متناسب با بار وسایل نقلیه است. لازم به ذکر است که فاکتور انتشار برای اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای، بر اساس نوع وسیله نقلیه حمل‌ونقل، شرایط جاده و سایر عوامل تأثیرگذار تعیین می‌شود.

معادله (۳) تابع هدف کمینه‌سازی ریسک است. بخش اول این معادله، نشان‌دهنده خطرات احتمالی تأمین‌کننده در برآورده ساختن نیازهای تولیدکننده است، و بخش‌های دیگر نشان‌دهنده‌ی ریسک‌های بالقوه حمل‌ونقل است. شاخص ریسک تأمین‌کننده براساس عوامل ذاتی، ظرفیت عملیاتی، قابلیت اطمینان و شهرت وی تعیین می‌شود و شاخص ریسک حمل‌ونقل تحت تأثیر قابلیت اطمینان حمل‌ونقل، احتمال ریسک‌های زیربنایی، احتمال وقوع فاجعه طبیعی و غیره است. لازم به ذکر است، در تابع هدف (۳)، ریسک‌ها در بخش ۳-۵ با توجه به این‌که غیرقطعی هستند، به‌صورت استوار بازنویسی می‌گردد.

به‌منظور تحقق یافتن جریان مواد، ظرفیت تأسیسات و همچنین محدودیت‌های دیگر، معادلات و نامعادلات دیگری تحت عنوان محدودیت‌ها به مدل اضافه می‌گردد:

$$\sum_{p=1}^{P} AS_{sptk} \le CAPS_{stk} \quad \forall s,t,k \qquad (۴)$$

$$\sum_{s=1}^{S} AS_{sptk} \le CAPP_{ptk} \quad \forall p,t,k \qquad (۵)$$

$$\sum_{p=1}^{P} AP_{pwtk} \le CAPW_{wtk} \quad \forall w,t,k \qquad (۶)$$

$$X_s \le IF * \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AS_{sptk} \quad \forall s \qquad (۷)$$

$$X_p \le IF * \sum_{s=1}^{S}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AS_{sptk} \quad \forall p \qquad (۸)$$

$$X_w \le IF * \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AS_{sptk} \quad \forall w \qquad (۹)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AS_{sptk} \le X_s . X_p . IF \quad \forall s,p \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AP_{pwtk} \le X_p . X_w . IF \quad \forall p,w \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} AW_{wctk} \le X_w . IF \quad \forall w \qquad (۱۲)$$

$$If_{ptk} = If_{pt-1k} + \sum_{s=1}^{S} AS_{sptk} - \sum_{w=1}^{W} AP_{pwtk} \quad \forall p,t,k \qquad (۱۳)$$

$$Id_{wtk} = Id_{wt-1k} + \sum_{p=1}^{P} AP_{pwtk} - \sum_{c=1}^{C} AW_{wctk} \quad \forall w,t,k \qquad (۱۴)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$B_{ctk} = B_{ct-1k} + CD_{ctk} - \sum_{w=1}^{W} AW_{wctk}$$

$$\forall c,t,k \qquad (۱۵)$$

$$If_{ptk} = 0 \qquad \forall p,t = 0,T,k$$

$$Id_{wtk} = 0 \qquad \forall w,t = 0,T,k$$

$$B_{ctk} = 0 \qquad \forall c,t = 0,T,k$$

$$X_s, X_p, X_w \in \{0,1\}$$

$$AS_{sptk}, AP_{pwtk}, AW_{wctk} \geq 0 \quad \forall s,p,w,c,t,k \qquad (۱۶)$$

$$If_{ptk}, Id_{wtk}, B_{ctk} \geq 0$$

معادلات (۴)، (۵) و (۶) به‌ترتیب محدودیت ظرفیت عملیاتی تأمین‌کنندگان، ظرفیت عملیاتی تولیدکنندگان و ظرفیت نگهداری در انبارها است. معادله (۷) تضمین می‌کند تا تأمین‌کننده s، چنانچه به هیچ‌یک از تولیدکنندگان ماده خام ارسال نکند، برای مدل انتخاب نشود. معادله (۸)و(۹) تضمین می‌کند تا تولیدکننده و انباری که استفاده نمی‌شود، انتخاب نگردد. معادله (۱۰) تضمین می‌کند که تولیدکننده p در صورتی از تأمین‌کننده s خرید می‌کند که هر دوی آن‌ها توسط مدل انتخاب‌شده باشند. درواقع تولیدکنندگان و تأمین‌کنندگانی که توسط مدل انتخاب شده‌اند می‌توانند با هم تعامل داشته باشند. معادله (۱۱) این موضوع را بین دو نقطه تولیدکننده و انبار بررسی می‌کند و معادله (۱۲) تضمین کند تا از انباری که انتخاب شده، به تقاضای مشتری پاسخ داده شود. معادله (۱۳)، معادله تعادل موجودی در هر یک از مکان‌های تولیدی را نشان می‌دهد. معادله (۱۴) این تعادل موجودی را در انبارها بررسی می‌کند. معادله (۱۵)، معادله کمبود است که در واقع اجازه می‌دهد تا کمبود از نوع پس‌افت باشد و بتوان در دوره‌های بعد به آن پاسخ گفت. معادله (۱۶) و (۱۷) موجودی دوره اول و آخر را در مکان‌های تولیدی و انبار صفر می‌کند.و معادله(۱۸) بر این موضوع تأکید می‌کند که کمبود در دوره‌ی اول و آخر مجاز نیست. در پایان، متغیرهای مدل به دو صورت تعریف‌شده‌اند. متغیرهای باینری، که تنها مقادیر صفر و یک را اختیار می‌کنند و متغیرهای غیرباینری که مجاز به پذیرش مقادیر منفی نیستند.

۳-۴. تابع تخفیف نموی

در این وضعیت از تخفیف، خریدار با یک لیست قیمت مواجه می‌شود که شامل فواصلی از مقدار سفارش است قیمت خرید کمتر برای احد کالا، فقط شامل آن کالاهایی می‌شود که در فاصله‌ی مقداری آن قیمت خاص قرار دارند. به‌عنوان‌مثال در این حالت هزینه‌ی خرید، $C_j \; j = 1,2,\dots,n$ فقط شامل مقادیری از یک انباشته می‌شود که در فاصله‌ی q_j و q_{j+1} (نقاط شکست قیمت) قرار گیرند. لیست قیمت‌های ارائه شده از طرف فروشنده ممکن است به‌صورت زیر باشد[۲]:

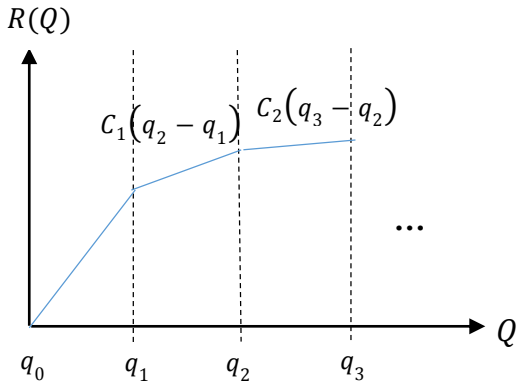
$$C = \begin{cases} C_0 & q_0 \leq Q \leq q_1 \\ C_1 & q_1 \leq Q \leq q_2 \\ C_2 & q_2 \leq Q \leq q_3 \\ \dots & \dots \\ C_{n-1} & q_{n-1} \leq Q \leq q_n \\ C_n & q_n \leq Q \end{cases}$$

در فهرست تخفیف فوق، میان قیمت‌ها رابطه‌ی $C_j > C_{j+1}$ به ازای $j = 0,1,\dots,n-1$ برقرار است. از فهرست تخفیف فوق می‌توان دریافت که هزینه‌ی خرید برای تمام واحدهای یک انباشته با حجم Q ثابت نیست[۲].

در شکل۱، هزینه خرید انباشته‌ای با حجم Q در حالت تخفیف نموی(افزایشی) نشان داده شده است[۳]. با هزینه خرید$R(Q)$، اگر مقدار سفارش در ناحیه $q_j \leq Q \leq q_{j+1}$ قرار گیرد، برابر است با [۲]:

$$R(Q) = \begin{cases} C_0 Q & if \quad j = 0 \\ \sum_{k=0}^{j-1} C_k (q_{k+1} - q_k) + C_j (Q - q_j) & if \quad j \geq 1 \end{cases}$$

$C_0(q_1 - q_0)$



شکل (۱): هزینه خرید انباشته‌ای با حجم Q در حالت تخفیف نموی [۳]

در این تحقیق فرض شده که هر تأمین‌کننده برای هر نوع محصول، طرح تخفیف خاصی ارائه می‌دهد:

www.SID.ir

Archive of SID

$$
\begin{cases}
C_{sk1}(\mathrm{AS}_{sptk}-AM_{spk1}) & AM_{spk1}\le AS_{sptk}\le AM_{spk2}\\
C_{sk2}(\mathrm{AS}_{sptk}-AM_{spk2})+C_{sk1}(AM_{spk2}-AM_{spk1}) & AM_{spk2}\le AS_{sptk}\le AM_{spk3}\\
C_{sk3}(\mathrm{AS}_{sptk}-AM_{spk3})+C_{sk2}(AM_{spk3}-AM_{spk2})+C_{sk1}(AM_{spk2}-AM_{spk1}) & AM_{spk3}\le AS_{sptk}\le AM_{spk4}\\
\cdots & \\
C_{skm}(\mathrm{AS}_{sptk}-AM_{spkm})+\ldots+C_{sk2}(AM_{spk3}-AM_{spk2})+C_{sk1}(AM_{spk2}-AM_{spk1}) & AM_{spkm}\le AS_{sptk}\le AM_{spkm+1}\\
\cdots & \\
C_{skM-1}(\mathrm{AS}_{sptk}-AM_{spkM-1})+\ldots+C_{sk2}(AM_{spk3}-AM_{spk2})+C_{sk1}(AM_{spk2}-AM_{spk1}) & AM_{spkM-1}\le AS_{sptk}\le AM_{spkM}
\end{cases}
$$

$$\forall s\in S, p\in P, t\in T, k\in K$$

در تابع تخفیف نموی فوق، AM_{spkr} نقاط شکست در تابع تخفیف، C_{skm} هزینه مواد خام مربوط به بازه m ام، AT_{sptk} مقدار سفارش تولیدکننده است. به‌منظور لحاظ کردن مدل تخفیف نموی در مدل اصلی لازم است تا تغییراتی در تابع تخفیف داده شود. این تغییرات کمک می‌کند تا تخفیف نموی به‌صورت مناسب در مدل ریاضی قرار بگیرد. در اثر این تغییرات مدل فوق به‌صورت ذیل قابل بازنویسی است:

$$
\begin{cases}
C_{sk1} & \mathrm{Y}_{sptk1}(AM_{spk2}-AM_{spk1})\le AQ_{sptk1}\le (AM_{spk2}-AM_{spk1})\\
C_{sk2} & \mathrm{Y}_{sptk2}(AM_{spk3}-AM_{spk2})\le AQ_{spt2}\le \mathrm{Y}_{sptk1}(AM_{spk3}-AM_{spk2})\\
C_{sk3} & \mathrm{Y}_{sptk3}(AM_{spk4}-AM_{spk3})\le AQ_{spt3}\le \mathrm{Y}_{sptk2}(AM_{spk4}-AM_{spk3})\\
\cdots & \\
C_{skm} & \mathrm{Y}_{sptkm}(AM_{spkm+1}-AM_{spkm})\le AQ_{sptkm}\le \mathrm{Y}_{sptkm-1}(AM_{spkm+1}-AM_{spkm})\\
\cdots & \\
C_{skM-1} & \mathrm{Y}_{sptkM-1}(AM_{spkM}-AM_{spkM-1})\le AQ_{sptM-1}\le \mathrm{Y}_{sptkM-2}(AM_{spkM}-AM_{spkM-1})
\end{cases}
$$

$$\forall s\in S, p\in P, t\in T, k\in K$$

در مدل تخفیف نموی بازنویسی شده، متغیر Y_{sptkm} از نوع صفر و یک است و زمانی که بازه mام فعال شود، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. AT_{sptk} با AQ_{sptkm} جایگزین شده است و رابطه $AT_{sptk}=\sum_{m=1}^{M-1}AQ_{sptkm}$ با توجه به $\forall s\in S, p\in P, t\in T, k\in K$ برقرار است. در واقع مقدار سفارش داده‌شده که AT_{sptk} است به قسمت‌های AQ_{sptkm} تقسیم‌شده و هزینه مربوط به هر قسمت با ضرب مقدار AQ_{sptkm} در هزینه واحد که C_{skm} است به دست می‌آید. درنتیجه هزینه کل مربوط به خرید مواد خام، $\sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M-1}C_{skm}AQ_{sptkm}$ است که در تابع هدف هزینه‌ها(۱) لحاظ می‌شود:

www.SID.ir

Archive of SID

$$MinOBJ1 = \sum_{p=1}^{P} X_p FCP_p + \sum_{w=1}^{W} X_w FCW_w + \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} CP_{ptk} AS_{sptk} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} If_{ptk} hf_{tk} + \sum_{w=1}^{W}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} Id_{wtk} hd_{tk} + \sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} B_{ctk}\pi_{tk} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} TCS_{spt} AS_{sptk} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{w=1}^{W}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} TCP_{pwt} AP_{pwtk} + \sum_{w=1}^{W}\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} TCW_{wct} AW_{wctk} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M-1} C_{skm} AQ_{sptkm}$$

همان‌طور که گفته شد هدف از بازنویسی مدل تخفیف نموی، لحاظ کردن آن در مدل اصلی بود، برای رسیدن به این هدف می‌بایست محدودیت‌هایی به مدل اضافه شود، این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

$$AT_{sptk} = \sum_{m=1}^{M-1} AQ_{sptkm} \qquad \forall s,p,t,k \qquad (۱۷)$$

$$Y_{sptk1}(AM_{sptk2} - AM_{sptk1}) \le AQ_{sptk1} \le (AM_{sptk2} - AM_{sptk1}) \qquad \forall s,p,t,k,\ m = 2....M-2 \qquad (۱۸)$$

$$Y_{sptkm}(AM_{spkm+1} - AM_{spkm}) \le AQ_{sptkm} \le Y_{sptkm-1}(AM_{spkm+1} - AM_{spkm}) \qquad \forall s,p,t,k \qquad (۱۹)$$

$$Y_{sptkM-1}(AM_{sptkM} - AM_{sptkM-1}) \le AQ_{sptkM} \le Y_{sptkM-1}(AM_{sptkM} - AM_{sptkM-1}) \qquad \forall s,p,t,k \qquad (۲۰)$$

$$Y_{sptkm} \in \{0,1\}, AQ_{sptkm} \ge 0 \qquad (۲۱)$$

معادله (۱۷)، مقدار ماده خام خریداری‌شده از هر تأمین‌کننده را از هر محصول در هر دوره نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) به‌منظور لحاظ نمودن تخفیف نموی در مدل می‌باشند و بازه‌های مقداری و هزینه واحد مرتبط با همان بازه را در مدل نشان می‌دهند. در پایان، متغیرهای تصمیم جدید که در این مرحله به مدل اضافه شده‌اند معرفی‌شده‌اند.

۳-۵. رویکرد بهینه‌سازی استوار

براساس مطالعات مورابیتو[1] [۳۲]، بهینه‌سازی استوار ازجمله رویکردهایی است که در شرایطی که نبود قطعیت وجود دارد، بسیار کارا عمل می‌کند. بهینه‌سازی استوار در سال ۱۹۷۳ توسط سویستر[2] معرفی شد. مدل ارائه شده توسط سویستر بسیار محافظه‌کارانه عمل می‌کند و بدبینانه‌ترین رویکرد است [۳۳]. در دو دهه گذشته تلاش‌های زیادی برای ارائه مدل‌های استوار مهارپذیر مناسب برای حل انواع مسائل بهینه‌سازی با داده‌های غیرقطعی به‌عمل‌آمده است. بنتال[3] و نمیروسکی[4] مدل‌هایی را ارائه کرده‌اند که همتای استوار برنامه‌ریزی خطی آن‌ها، یک مدل‌های برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه‌ی دوم[5] است. این مدل‌ها محافظه‌کاری کمتری داشته و جواب‌های بهتری ارائه می‌کنند [۳۴]. در این بین برتسیماس[6] و سیم[7] تحولی در بهینه‌سازی استوار به وجود آوردند. در مدل پیشنهادی آن‌ها، میزان محافظه‌کاری قابل تنظیم است و همتای استوار مسئله‌ی اولیه، نیز یک مسئله برنامه-ریزی خطی است. این مدل، قابلیت اعمال روی مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته را نیز دارد[۲۶]. مدل بهینه‌سازی زیر را در نظر بگیرید:

$$\min\ c'x : Ax \le b, l \le x \le u,$$

فرض می‌شود که عدم‌قطعیت در ماتریس A وجود دارد:

$$A = \{A \in R^{m\times n} | a_{ij} \in [\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij}, \bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}]\ \forall i,j\}.$$

مسئله استوار به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\min c'x \quad s.t.\ \ Ax \le b,\ \ \forall A \in A \qquad (*) \quad l \le x \le u.$$

قضیه ۱ (برتسیماس و سیم): مسئله برنامه‌ریزی خطی غیرقطعی دارای همتای خطی و استوار زیر است:

$$\min c'x \qquad (**)$$

1. Morabito
2. Soyster
3. Ben-Tal
4. Nemirovski

۵. برنامه ریزی مخروط مرتبه دوم بسط برنامه‌ریزی مربعی و برنامه‌ریزی خطی است که در آن ترکیب افاین متغیرها به صورت قید داخل یک مخروط مرتبه دوم تعریف می‌شوند. این نوع برنامه‌ریزی در حل مسائل هندسی کاربرد دارد و همچنین در برنامه ریزیهای خطی که داده‌ها با خطا همراه هستند و به‌طور دقیق مشخص نیستند کاربرد دارد.

6. Bertsimas
7. Sim

www.SID.ir

Archive of SID

$$s.t.\ \sum_j \bar{a}_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j:(i,j)\epsilon J} p_{ij} \le b_i \quad ,\forall i$$

$$z_i + p_{ij} \ge \hat{a}_{ij}y_j \quad ,\forall (i,j) \in J$$
$$-y_j \le x_j \le y_j$$
$$l_j \le x_j \le u_j$$
$$p_{ij} \ge 0,\ z_i \ge 0\ ,y_j \ge 0.$$

Γ، پارامتری است که درجه محافظه‌کاری را کنترل می‌کند. مدل استوار فوق، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی است. این یک ویژگی بسیار جذاب ازاین‌رویکرد است، زیرا مسائل برنامه‌ریزی خطی به‌آسانی با بسته‌های بهینه‌سازی استاندارد حل می‌شوند. علاوه بر این، اگر در مسئله اصلی(*)، برخی از متغیرها محدود به اعداد صحیح باشند، همتای استوار(**) خواص مشابه را حفظ می‌کند. یعنی همتای استوار یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح است. همان‌طور که پیشتر گفته شد، در این تحقیق، مدل ارائه شده در کنار کمینه‌سازی هزینه و انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌دنبال کاهش ریسک‌های زنجیره تأمین است. می‌دانیم که در دنیای واقعی، عوامل ایجاد و تشدیدکننده ریسک‌ها متفاوت و متنوع می‌باشند. تعداد این عوامل بسیار زیاد بوده، به‌طوری‌که غیرقطعی در نظر گرفتن ریسک‌های زنجیره تأمین را توجیه می‌کند. در این مدل ریسک تأمین مواد خام و ریسک سیستم‌های حمل‌ونقل در سطوح مختلف زنجیره تأمین با عدم‌قطعیت روبه‌رو هستند؛ عدم‌قطعیتی که در مورد آن از اطلاعات کمی با خبر هستیم. به این منظور از مدل پیشنهادی آقایان برتسیماس و سیم، برای تبدیل مدل غیرقطعی به مدل قطعی استفاده شده است. پارامترها و متغیرهای تصمیمی که ما را در این امر، یاری می‌دهند در جدول مقابل معرفی شده‌اند:

پارامترهای عدم‌قطعیت

$\overline{RK}_{stk}$	قسمت قطعی ریسک تأمین‌کننده در دوره t برای تأمین محصول نوع k
$\overline{RS}_{sptk}$	قسمت قطعی ریسک حمل‌ونقل بین تأمین‌کننده s و کارخانه تولیدی p در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k
$\overline{RP}_{pwtk}$	قسمت قطعی ریسک حمل‌ونقل بین کارخانه تولیدی p و انبار w در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k
$\overline{RC}_{cwtk}$	قسمت قطعی ریسک حمل‌ونقل بین انبار w و مشتری c در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k
$\widehat{RaK}_{stk}$	قسمت غیرقطعی ریسک تأمین‌کننده در دوره t برای تأمین محصول نوع k
$\widehat{RaS}_{sptk}$	قسمت غیرقطعی ریسک حمل‌ونقل بین تأمین‌کننده s و کارخانه تولیدی p در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k
$\widehat{RaP}_{pwtk}$	قسمت غیرقطعی ریسک حمل‌ونقل بین کارخانه تولیدی p و انبار w در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k
$\widehat{RaW}_{wctk}$	قسمت غیرقطعی ریسک حمل‌ونقل بین انبار w و مشتری c در دوره t به‌منظور انتقال محصول نوع k
Γ	پارامتر عدد صحیح: از صفر تا تعداد پارامترهای دارای عدم قطعیت، مربوط به محدودیت i ام

متغیرهای تصمیم عدم قطعیت

p^1_{stk}	متغیرهای مربوط به عدم‌قطعیت در $\widehat{RaK}_{stk}$
p^2_{sptk}	متغیرهای مربوط به عدم‌قطعیت در $\widehat{RaS}_{sptk}$
p^3_{pwtk}	متغیرهای مربوط به عدم‌قطعیت در $\widehat{RaP}_{pwtk}$
p^4_{wctk}	متغیرهای مربوط به عدم‌قطعیت در $\widehat{RaC}_{cwtk}$
z	متغیر مربوط به عدم‌قطعیت در تابع هدف

به‌منظور قطعی سازی تابع هدف(۳)، ابتدا تابع هدف را به‌صورت محدودیت درآورده، سپس با توجه به مدل برتسیماس و سیم، به تابع هدف و محدودیت‌های مقابل خواهیم رسید.

$$\sum_{s=1}^{S}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\overline{RK}_{stk}AS_{stk} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\overline{RS}_{stk}AS_{stk} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{w=1}^{W}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\overline{RP}_{pwtk}AP_{pwtk} + \sum_{w=1}^{W}\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\overline{RW}_{wctk}AW_{wctk} + \Gamma z \qquad (۲۲)$$
$$+ \sum_{s=1}^{S}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}p^1_{stk} + \sum_{s=1}^{S}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}p^2_{sptk} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{w=1}^{W}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}p^3_{pwtk} + \sum_{w=1}^{W}\sum_{c=1}^{C}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}p^4_{wctk} \le f$$

$$p^1_{stk} + z \ge RK_{stk}\left(\sum_{p=1}^{P}AT_{sptk}\right) \quad \forall s,t,k \qquad (۲۳)$$

$$p^2_{sptk} + z \ge RaS_{sptk}AT_{sptk} \quad \forall s,p,t,k \qquad (۲۴)$$

$$p^3_{pwtk} + z \ge RaP_{pwtk}AT_{pwtk} \quad \forall p,w,t,k \qquad (۲۵)$$

$$p^4_{wctk} + z \ge RaW_{wctk}AT_{wctk} \quad \forall w,c,t,k \qquad (۲۶)$$

$$f, z, p^1_{spt}, p^2_{sptk}, p^3_{pwtk}, p^4_{wctk} \ge 0 \quad \forall s,p,w,c \ \forall t,k,m \qquad (۲۷)$$

محدودیت (۲۲) به دلیل تبدیل تابع هدف به محدودیت و اعمال شرایط مدل برتسیماس و سیم، به مدل اضافه می‌شود. همچنین محدودیت‌های (۲۳) تا (۲۶) ب دلیل اعمال شرایط مدل برتسیماس و سیم به مدل اضافه می‌شوند تا مدل با پارامترهای غیرقطعی به مدل با

www.SID.ir

Archive of SID

پارامترهای قطعی تبدیل گردد. در پایان ، متغیرهای مربوط به مدل معرفی می‌گردد.

۴- حل مدل

۴-۱- روش مطلوبیت مجموع وزنی

به‌منظور ترکیب چند تابع با مقیاس‌های مختلف، روش مطلوبیت مجموع وزنی که توسط شئو[1] و لین[2] [۲۷] توسعه‌یافته است به کار گرفته می‌شود. و سه تابع هزینه،انتشار گازهای گلخانه‌ای و ریسک که واحدهای متفاوتی دارند، به یک تابع تبدیل می‌شوند. البته روش‌های مشابهی که توسط یو[3] و همکارانش [۲۸]، نِما[4] و گوپتا[5] [۲۹] و شئو[6] [۳۰] توسعه‌یافته، نیز قابل‌استفاده است ولیکن به روش مطلوبیت مجموع وزنی بسنده می‌کنیم. قبل از استفاده از روش مطلوبیت مجموع وزنی، لازم است تا پارامترهای تنظیم، پارامترهای معیار و متغیرهای پاسخ به‌صورت زیر، معرفی گردند.

پارامترهای تنظیم

WT_{OBJ1} , WT_{OBJ2} , WT_{OBJ3}

وزن مطلوبیت هزینه، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ریسک.

پارامترهای معیار

$OBJ1_{min}$, $OBJ2_{min}$, $OBJ3_{min}$

کمترین مقدار به‌دست‌آمده از تابع هدف کمینه‌سازی هزینه، کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای و کمینه‌سازی ریسک.

متغیرهای پاسخ

$OBJ1$, $OBJ2$, $OBJ3$

مقدار واقعی تابع هدف کمینه‌سازی هزینه، تابع هدف کمینه‌سازی گازهای گلخانه‌ای، کمینه‌سازی ریسک.

UT_{OBJ1} , UT_{OBJ2} , UT_{OBJ3}

مطلوبیت هزینه، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ریسک.

UT مطلوبیت تابع ترکیبی

$$MinUT = WT_{OBJ1}UT_{OBJ1} + WT_{OBJ2}UT_{OBJ2} + WT_{OBJ3}UT_{OBJ3} \quad (۲۸)$$

معادله (۲۸) تابع هدفِ روش مطلوبیت مجموع وزنی است و هدف آن به حداقل رساندن توزین وزنی هر تابع هدف است. وزن هر یک از توابع مطلوبیت، اهمیت نسبی آن تابع هدف را نشان می‌دهد و توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌گردد. معادلات (۲۹)، (۳۰) و (۳۱) روش محاسبه هرکدام از توابع مطلوبیت را نشان می‌دهد. در معادله (۲۹)، $OBJ1_{max}$ منهای $OBJ1_{min}$، بیشترین مقدار تئوری اختلاف بین کمترین و بیشترین هزینه را نشان می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان معیاری برای محاسبه مطلوبیت هزینه استفاده شود. $OBJ1$ منهای $OBJ1_{min}$، نشان‌دهنده‌ی انحراف بین مقدار واقعی و حداقل مقدار قابل‌دستیابی است. همچنین معادله‌های (۳۰) و (۳۱) به همین صورت برای تابع انتشار گازهای گلخانه‌ای و تابع ریسک، عمل می‌کنند. بنابراین هرکدام از توابع مطلوبیت بی‌مقیاس شده و به‌طور مستقیم تحت وزن‌های مختلف، جمع می‌شوند. مجموع اوزان این سه تابع، حداکثر یک و حداقل صفر است؛ زمانی که صفر است، مقدار واقعی OBJ برابر با حداقل مقدار قابل‌دستیابی $OBJ1_{min}$ ، و زمانی که یک است مقدار واقعی OBJ برابر با حداکثر مقدار قابل‌دستیابی $OBJ1_{max}$ است.

$$UT_{OBJ1} = \frac{OBJ1 - OBJ1_{min}}{OBJ1_{max} - OBJ1_{min}} \quad (۲۹)$$

$$UT_{OBJ2} = \frac{OBJ2 - OBJ2_{min}}{OBJ2_{max} - OBJ2_{min}} \quad (۳۰)$$

$$UT_{OBJ3} = \frac{OBJ3 - OBJ3_{min}}{OBJ3_{max} - OBJ3_{min}} \quad (۳۱)$$

۴-۲- تضمین‌های احتمالی راه‌حل‌های بهینه‌سازی استوار

مجموعه عدم‌قطعیت که تشکیل‌دهنده‌ی چهارچوب بهینه‌سازی استوار است، توسط تصمیم‌گیرنده تعریف می‌گردد. اگر مجموعه عدم‌اطمینان، تمام فضای نامشخص را که حاوی تمام موارد ممکن از پارامترهای نامشخص است، پوشش دهد، پس مطمئن است که راه‌حل استوار (اگر وجود داشته باشد) برای هر نوع عدم‌قطعیت شدنی است (به‌عنوان‌مثال، تضمین احتمالاتی در مورد برقراری محدودیت، ۱ است). بااین‌حال، در حقیقت، مجموعه عدم‌قطعیت لزوماً تعریف نمی‌شود تا کل فضای نامشخص را پوشش دهد، زیرا ممکن است تصمیم‌گیرنده به میزان معینی، اجازه نقض محدودیت را بدهد. به‌عنوان‌مثال، غیرممکن است مجموعه‌ای محدود برای پوشش فضای غیرقطعی و نامحدود، تعریف شود.

برای یک محدودیت داده‌شده، اگر یک راه‌حل عملی داشته باشیم و توزیع احتمالی پارامترهای نامشخص را بدانیم، درجه نقض محدودیت دقیقاً همان احتمالی است که محدودیت نقض می‌شود. در مواردی که عدم‌قطعیت مجموعه تمام فضای نامشخص را پوشش نمی‌دهد، سؤال زیر به‌طور طبیعی به وجود می‌آید: قبل از حل یک مسئله بهینه‌سازی استوار، چه اندازه‌ای از عدم‌قطعیت لازم است تا اطمینان حاصل شود که میزان نقض محدودیت از یک سطح معینی عبور نکند؟ پس از حل مسئله بهینه‌سازی استوار، میزان نقض محدودیت چیست؟ پاسخ به این سؤالات مربوط به تضمین احتمالی در مورد رضایت محدودیت، یا حد بالای احتمال نقض محدودیت است.

به‌طورکلی، در ارزیابی تضمین‌های احتمالی، می‌توان از دو نوع متدولوژی متفاوت استفاده کرد. متدولوژی نوع اول، احتمال استفاده از اطلاعات مجموعه عدم اطمینان را قبل از حل مسئله می‌یابد و مرز حاصل از آن، یک مرز تئوری احتمالی محسوب می‌شود. روش دوم، این احتمال را به‌طور مستقیم، از حل مدل بهینه‌سازی همتای استوار، به‌دست می‌آورد که همچنین می‌تواند به‌عنوان بررسی احتمال نقض

1. Sheo
2. Lin
3. Yu
4. Nema
5. Gupta
6. Sheo

www.SID.ir

Archive of SID

محدودیت در نظر گرفته شود که محدوده نتیجه نامیده می‌شود. همچنین می‌توان برای هر دو روش، مرزهای احتمالی مختلفی با اطلاعات در سطوح مختلف عدم اطمینان استخراج کرد [۳۱].

در متدولوژی اول، از ارزیابی تضمین‌های احتمالی، برتسیماس و سیم در سال ۲۰۰۴ ، یک حد احتمالی برای "فاصله + چندضلعی" ارائه دادند [۲۶] :

$$Pr\left(\sum_{j\epsilon J_i}\gamma_{ij}\eta_{ij}\geq\Gamma_i\right)\leq exp\left(-\frac{\Gamma_i^2}{2|J_i|}\right)$$

۵. مثال عددی

در این بخش، یک مثال عددی به‌منظور ایجاد یک دید عمیق از مدل پیشنهادشده و طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز در کشور ایران ارائه‌شده است. نمونه عددی بر اساس یک زنجیره تأمین سبز چهار سطحی فرضی، شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، انبار و مشتری است. تمام اجزای زنجیره تأمین در داخل کشور است.

به‌منظور طراحی زنجیره تأمین سبز پایدار، لازم است تا مدیر زنجیره تأمین چندین تصمیم مهم را اتخاذ کند: تعداد و محل کارخانه‌ها و انبارهای تولیدی، انتخاب تأمین‌کنندگان، مقدار خریداری‌شده از هر منبع انتخاب‌شده، مقدار محصولات نهایی ذخیره‌شده در آن انبار. مدل پیشنهادشده به‌منظور پشتیبان تصمیم‌گیری مورداستفاده قرارگرفته است. در زنجیره تأمین فرض شده امکان تهیه مواد خام حداکثر از ۵ تأمین‌کننده وجود دارد. تعداد نقاط پیشنهادی برای احداث مکان واحدهای تولیدی و انبار، هرکدام ۵ نقطه با شرایط متفاوت است. مدل به دنبال یافتن بهترین نقاط برای هرکدام از این سه مورد است. همچنین در واحدهای تولیدی ۵ نوع محصول در ۵ دوره تولید می‌شود. هزینه ثابت احداث مکان‌های پیشنهادی واحدهای تولیدی و انبارها در جدول ۱ آمده است. تقاضاها در این زنجیره تأمین در ۵ فروشگاه اتفاق می‌افتد که پاسخگویی به آن می‌تواند با کمبود روبه‌رو شود. همچنین نگهداری محصولات در انبار و مواد خام در واحدهای تولیدی، هزینه‌هایی را به سیستم تحمیل می‌کند. بخشی از اطلاعات این مثال عددی، از مقاله یو و همکاران[۳۵] گرفته‌شده است. میزان تقاضا در زنجیره تأمین سبز، در جداول ۱ تا ۵ بیان شده است.

براساس محاسبات انجام‌شده، با افزایش تعداد پارامترهایی که با عدم‌قطعیت روبه‌رو هستند، میزان احتمال نقض مرز محدودیت کاهش می‌یابد. اما آیا انتخاب مقادیر بزرگ‌تر گاما، ما را به رسیدن به جواب بهینه سوق می‌دهد؟ برای پاسخ به این سؤال لازم است تا مدل تحت مقادیر مختلف گاما موردبررسی قرار بگیرد. جدول۶، حالات مختلفی از گاما را در احتمالات مختلف نقض مرز محدودیت نشان می‌دهد. این جدول مقدمه‌ای برای تحلیل موشکافانه‌تری برای انتخاب مقدار مناسب پارامتر گاما است؛ اما برای درک مدیریتی این موضوع درصد اطمینان مطرح شده است. درصد اطمینان در مقایسه با احتمال نقض محدودیت، برای مدیران قابل‌لمس‌تر است و به‌صورت یک منهای احتمال نقض محدودیت تعریف شده است.

جدول (۱): تقاضای فروشگاه ۱

فروشگاه ۱		دوره زمانی(ماه)				
		۱	۲	۳	۴	۵
محصول	۱	۱۰۰	۱۲۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۵۰
	۲	۱۵۰	۱۶۰	۲۱۰	۱۸۰	۱۸۰
	۳	۲۰۰	۱۸۰	۲۵۰	۱۷۰	۱۷۰
	۴	۱۰۰	۱۳۰	۱۹۰	۱۶۰	۱۶۰
	۵	۱۲۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۷۰	۲۰۰

جدول (۲): تقاضای فروشگاه ۲

فروشگاه ۲		دوره زمانی(ماه)				
		۱	۲	۳	۴	۵
محصول	۱	۱۵۰	۲۱۰	۱۸۰	۱۵۰	۱۹۰
	۲	۸۰	۷۰	۲۰۰	۱۴۰	۱۸۰
	۳	۱۲۰	۱۳۵	۱۹۵	۱۷۰	۱۷۰
	۴	۲۱۰	۲۰۰	۱۷۵	۱۸۰	۱۶۰
	۵	۱۸۰	۱۸۰	۱۶۵	۱۷۰	۱۹۰

جدول (۳): تقاضای فروشگاه ۳

فروشگاه ۳		دوره زمانی(ماه)				
		۱	۲	۳	۴	۵
محصول	۱	۲۵۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۰
	۲	۱۸۰	۱۷۰	۲۲۰	۲۰۰	۱۶۰
	۳	۱۶۰	۱۵۰	۲۲۰	۱۹۰	۱۸۰
	۴	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰	۲۰۰	۱۹۰
	۵	۱۱۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۸۰	۱۴۰

جدول (۴): تقاضای فروشگاه ۴

فروشگاه ۴		دوره زمانی(ماه)				
		۱	۲	۳	۴	۵
محصول	۱	۱۵۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰
	۲	۲۰۰	۲۱۰	۱۳۰	۱۴۰	۱۷۰
	۳	۱۵۰	۱۳۰	۱۲۵	۱۲۰	۱۸۰
	۴	۱۴۰	۱۵۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۵۰
	۵	۱۶۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۲۰	۱۹۰

جدول (۵): تقاضای فروشگاه ۵

فروشگاه ۵		دوره زمانی(ماه)				
		۱	۲	۳	۴	۵
محصول	۱	۱۰۰	۱۲۰	۲۰۰	۱۹۰	۱۴۰
	۲	۱۵۰	۱۶۰	۲۱۰	۱۸۰	۱۳۰
	۳	۲۰۰	۱۸۰	۲۵۰	۱۷۰	۹۰
	۴	۱۰۰	۱۳۰	۱۹۰	۱۶۰	۱۲۰
	۵	۱۰۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۷۰	۸۰

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۶): متغیر عدم‌قطعیت و درصد اطمینان مربوط به آن

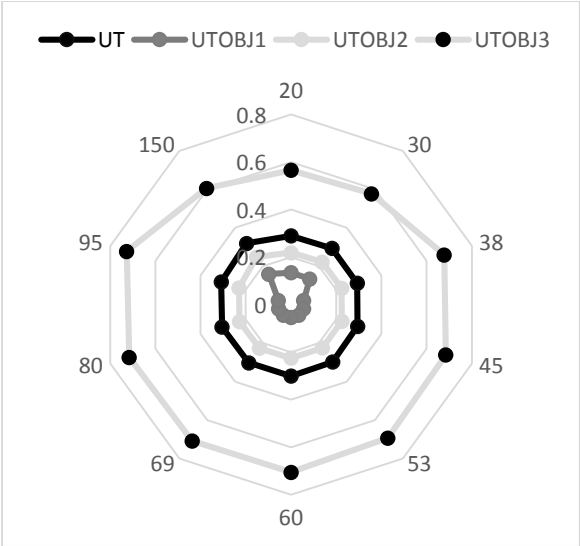
ردیف	متغیر عدم قطعیت	احتمال نقض محدودیت	درصد اطمینان
۱	۲۰	۰,۹	٪۱۰
۲	۳۰	۰,۸	٪۲۰
۳	۳۸	۰,۷	٪۳۰
۴	۴۵	۰,۶	٪۴۰
۵	۵۳	۰,۵	٪۵۰
۶	۶۰	۰,۴	٪۶۰
۷	۶۹	۰,۳	٪۷۰
۸	۸۰	۰,۲	٪۸۰
۹	۹۵	۰,۱	٪۹۰
۱۰	بزرگ‌تر از ۱۴۵	۰	٪۱۰۰

با توجه به اطلاعات مثال عددی و با استفاده از نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴,۷,۳ - حل‌کننده CPLEX - جدول ۷ نتایج حاصل از حل مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

جدول (۷): نتایج تابع اصلی و توابع هدف هزینه، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ریسک به ازای گاماهای مختلف

Gama	UT	UTOBJ1	UTOBJ2	UTOBJ3
۲۰	۰,۲۹۰	۰,۱۳۵	۰,۲۱۹	۰,۵۶۶
۳۰	۰,۲۹۳	۰,۱۳۴	۰,۲۲۲	۰,۵۷۷
۳۸	۰,۲۹۳	۰,۰۵۶	۰,۲۲۴	۰,۶۷۸
۴۵	۰,۲۹۵	۰,۰۵۵	۰,۲۲۵	۰,۶۸۵
۵۳	۰,۲۹۸	۰,۰۵۰	۰,۲۲۵	۰,۶۹۳
۶۰	۰,۳۰۰	۰,۰۵۳	۰,۲۲۵	۰,۷۰۵
۶۹	۰,۳۰۲	۰,۰۵۵	۰,۲۲۶	۰,۷۰۸
۸۰	۰,۳۰۵	۰,۰۵۵	۰,۲۲۸	۰,۷۱۶
۹۵	۰,۳۰۹	۰,۰۵۶	۰,۲۳۰	۰,۷۲۷
۱۵۰	۰,۳۱۹	۰,۱۵۹	۰,۲۴۷	۰,۶۰۵

به‌منظور تحلیل بهتر و بررسی دقیق‌تر و درک نوسانات توابع مختلف، از نمودار راداری استفاده شده است. شکل ۲ براساس نتایج حل مدل که در جدول ۷ بیان‌شده، رسم شده است.



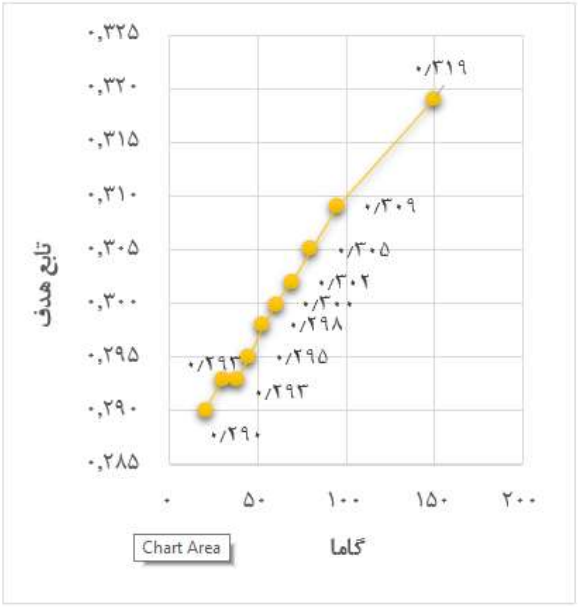
شکل (۲): نمودار راداری نتایج حاصل از مدل به ازای گاماهای مختلف

با توجه به شکل ۲، تابع هدف که با رنگ آبی نشان داده شده، سعی در حفظ موقعیت کمینه خود داشته است. تابع انتشار گازهای گلخانه‌ای همانند تابع اصلی رفتار کرده و سعی داشته تا در حالت کمینه خود باقی بماند. اما تابع هزینه که دارای بیشترین ضریب بوده است و در واقع اهمیت بیشتری در بین توابع به آن داده شده بود، نوسانات بیشتری را به نسبت تابع اصلی و تابع انتشار گازهای گلخانه‌ای تجربه کرده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در مقدار تابع هدف، تابع ریسک است زیرا که پارامترهای آن با عدم‌قطعیت روبه‌رو هستند و این موضوع با نتایج حاصل، کاملاً مطابقت دارد.

در جدول ۶ که احتمال نقض مرز محدودیت به ازای مقادیر مختلف گاما بررسی شده است، با افزایش گاما، احتمال نقض کاهش می‌یابد اما نمی‌توان مقادیر بزرگ‌تر گاما را انتخاب کرد تا احتمال نقض صفر شود. مهم‌ترین دلیل این ناتوانی، افزایش مقدار تابع هدف است درحالی‌که ما به دنبال کمینه‌سازی تابع هدف هستیم. شکل ۳، میزان افزایش تابع هدف به ازای افزایش پارامترهای عدم‌قطعیت در مدل را نشان می‌دهد. بنابراین یافتن مقدار مناسب پارامتر Γ که در میزان احتمال نقض مرز محدودیت و مقدار تابع هدف تأثیرگذار است بسیار حائز اهمیت است.

www.SID.ir

Archive of SID



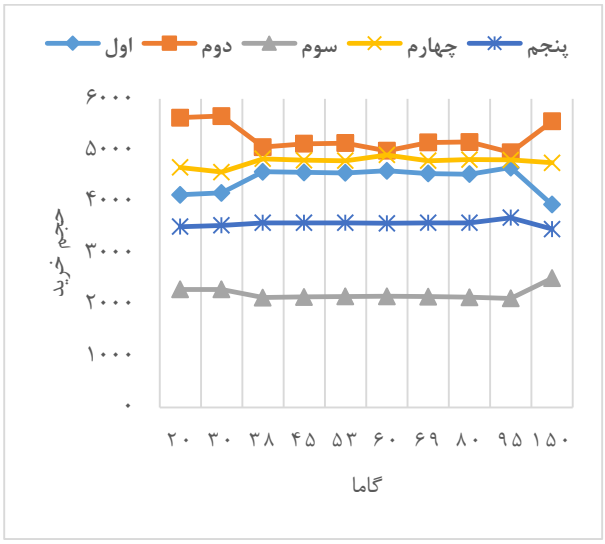
شکل (۳): مقادیر تابع هدف به ازای مقادیر مختلف Γ

اما یکی از بخش‌های مهم مدل، تحت تأثیر تابع تخفیف تأمین‌کنندگان است که در بخش ۳-۴ بیان شد. حال‌آنکه ریسک تأمین مواد خام از سوی تأمین‌کنندگان، نیز مطرح است. با توجه به این دو عامل، میزان خرید ماده خام از هر تأمین‌کننده اهمیت ویژه‌ای می‌یابد چراکه تأمین‌کنندگان با ریسک بالاتر در تأمین، قیمت کمتری را به‌منظور فروش مواد خام به تولیدکنندگان پیشنهاد می‌دهند. مدیران به‌دنبال کاهش ریسک و هزینه به‌طور هم‌زمان هستند ولیکن افزایش یکی باعث کاهش دیگری است و ناسازگار می‌باشند. نتایج حاصل از حل مدل به ازای مقادیر مختلف Γ در جدول۸ آورده شده است.

جدول (۸): مجموع حجم بهینه سفارش مواد خام از هر تأمین‌کننده

گاما	تأمین‌کنندگان				
	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
۲۰	۴۱۳۴	۵۶۳۵	۲۲۹۵	۴۶۶۵	۳۵۱۵
۳۰	۴۱۷۰	۵۶۶۶	۲۲۹۵	۴۵۷۵	۳۵۳۹
۳۸	۴۵۸۳	۵۰۶۰	۲۱۳۷	۴۸۳۵	۳۵۹۰
۴۵	۴۵۶۹	۵۱۲۷	۲۱۵۰	۴۸۰۷	۳۵۹۰
۵۳	۴۵۶۱	۵۱۳۹	۲۱۵۷	۴۷۹۶	۳۵۹۰
۶۰	۴۶۰۲	۴۹۹۰	۲۱۶۲	۴۹۱۰	۳۵۸۰
۶۹	۴۵۴۸	۵۱۵۱	۲۱۵۶	۴۷۹۸	۳۵۹۰
۸۰	۴۵۳۴	۵۱۶۲	۲۱۴۱	۴۸۱۷	۳۵۹۰
۹۵	۴۶۶۲	۴۹۵۸	۲۱۲۰	۴۸۱۳	۳۶۹۰
۱۵۰	۳۹۴۳	۵۵۶۲	۲۵۱۴	۴۷۵۶	۳۴۶۸

با توجه به جواب مدل، بیشترین مقدار خرید ماده خام از تأمین‌کننده دوم در تمامی حالات، صورت پذیرفته است. اما میزان خرید با تغییر مقدار پارامتر Γ، در نقاط ۳۸ و ۱۵۰ دچار تغییر ناگهانی است.



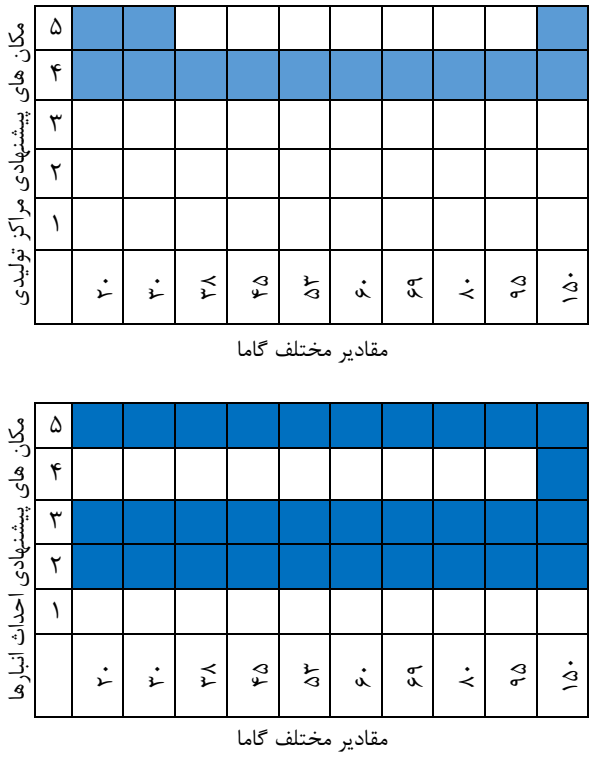
شکل (۴): نمایش شماتیک نوسان حجم خرید از هر تأمین‌کننده به ازای مقادیر مختلف گاما

میزان خرید از تأمین‌کننده اول در حالات مختلف دارای نوسان بوده ولی میزان خرید از تأمین‌کننده سوم دارای نوسان بسیار کمی به نسبت تأمین‌کننده اول، و در پایین‌ترین حجم خرید در بین تأمین‌کنندگان است. حجم خرید از تأمین‌کننده پنجم دارای نوسان ناچیز و ثبات بیشتری نسبت به میزان خرید از تأمین‌کننده چهارم است. بنابراین توصیه می‌شود تا به ترتیب بیشترین حجم خرید مواد اولیه به تأمین‌کننده ۲، ۴، ۱، ۵ و ۳ اختصاص پیدا کند. میزان نوسانات خرید از هر تأمین‌کننده در شکل۴ به‌وضوح قابل‌رؤیت است. ترتیب ارائه نمودارها با توجه به حجم خرید از هر یک است. در هر کدام از سطوح عدم قطعیت، توابع هدف مقدار خاصی را به‌عنوان جواب بهینه معرفی می‌کند و حجم بهینه خرید از هر یک از تأمین‌کنندگان را نشان می‌دهد. حال‌آنکه مدل ارائه‌شده علاوه بر این اطلاعات به دنبال یافتن مکان‌های مناسب به‌منظور احداث واحدهای تولیدی و انبارها است. در ادامه به معرفی نقاط انتخاب‌شده از بین نقاط پیشنهادی می‌پردازیم. اگرچه هزینه‌های ساخت، جریان‌های ورودی و خروجی به این مکان‌ها، افزایش پاسخگویی به سطح تقاضا و غیره، در مکان‌یابی مهم است ولیکن میزان عدم‌قطعیت و توانایی تأمین مواد خام برای واحدهای تولیدی می‌تواند تأثیر شایانی در انتخاب آن‌ها داشته باشد. مکان‌های انتخاب‌شده در جدول ۹ بیان شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۹): مکان‌های انتخاب‌شده به‌منظور احداث واحدهای تولیدی و انبارها



۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز چهار سطحی، شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، انبار و فروشگاه با توابع هدف کمینه‌سازی هزینه، کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای و کمینه‌سازی ریسک‌های مربوط به زنجیره تأمین و تأمین مواد خام، ارائه گردید. هزینه‌های این مدل شامل هزینه‌های احداث مکان‌های تولیدی و انبارها، هزینه خرید مواد خام از تأمین‌کننده براساس طرح تخفیف نموی، هزینه‌های حمل‌ونقل، نگهداری موجودی، کمبود و هزینه‌های عملیاتی تولید محصول است.

سیستم حمل‌ونقل موجب تولید گازهای گلخانه‌ای می‌گردد و ریسک ناشی از تأمین مواد خام و ریسک حمل‌ونقل مواد خام و محصولات نهایی، زنجیره تأمین را تهدید می‌کند. تجزیه‌وتحلیل ریسک و مدیریت آن برای مدیران یک دغدغه همیشگی و الزامی است. متأسفانه اندازه‌گیری قطعی پارامترهای ریسک دشوار بوده و تقریباً نشدنی است. یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های اصلی پژوهش جاری در نظر گرفتن ریسک به‌صورت پارامتر دارای عدم‌قطعیت است. ازآنجاکه داده‌های تاریخی مناسب جهت تخمین تابع چگالی در بهینه‌سازی احتمالی وجود نداشت و همچنین برای خبرگان حوزه تعیین تابع درجه‌ی عضویت به‌منظور استفاده در بهینه‌سازی فازی مشکل بود، در این حالت با پیچیده‌ترین نوع عدم‌قطعیت مواجه می‌شویم. در نتیجه، از رویکرد بهینه‌سازی استوار برتسیماس و سیم به‌منظور لحاظ نمودن این موضوع در مسئله استفاده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در مدل ارائه شده، تابع ریسک است زیرا که پارامترهای آن با عدم‌قطعیت روبه‌رو هستند. این مسئله در برنامه‌ریزی‌های استراتژیک برای مدیران بسیار حائز اهمیت است.

این مدل شامل تصمیم‌گیری در مورد مکان واحدهای تولیدی، مکان احداث انبار، تعیین حجم خرید از مواد خام از تأمین‌کنندگان در هر دوره، میزان تولید هر محصول در هر دوره در هر واحد تولیدی، سیستم حمل‌ونقل بهینه بین سطوح زنجیره تأمین است. ولیکن خروجی مدل به تعیین پارامتر عدم‌قطعیت Γ وابسته است و مقدار آن بر احتمال نقض مرز محدودیت و درصد اطمینان جواب حاصل، تأثیر ویژه‌ای دارد. مدیران علاقه‌مند به آگاهی برشدنی بودن رویکرد جدید دارند ازاین‌رو در سطح اطمینان مشخصی، می‌توانند به Γ مناسب برای حل مدل دست یابند و به جواب بهینه برای زنجیره تأمین برسند.

رویکرد ارائه‌شده در این تحقیق از جنبه‌های مختلف قابل توسعه است. به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، می‌توان مواردی مانند زمان‌بندی حمل‌ونقل، تعیین بهینه ظرفیت تسهیلات، مسیریابی وسایل حمل‌ونقل، در نظر گرفتن ریسک تولید محصولات (مانند ریسک خرابی ماشین و ابزارآلات) اشاره کرد. در این پژوهش، به علت برخی محدودیت‌ها و نقص اطلاعات در دسترس در خصوص محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای صرفاً به مسافت طی شده توسط تسهیلات حمل‌ونقل پرداخته شده است. لیکن سایر عوامل نظیر تجهیزات تولید، شیب مسیر حمل‌ونقل و موارد دیگری ازاین‌دست، می‌توانند به‌عنوان توسعه آتی در نظر گرفته شود. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن ضایعات و دوباره‌کاری، جمع‌آوری و بازیافت زنجیره تأمین ارائه‌شده در این مدل را به زنجیره تأمین حلق بسته تبدیل نمود. علاوه بر این پیشنهادها، چند ضابطه‌ای در نظر گرفتن هزینه‌های کمبود می‌تواند جذابیت مسئله را دوچندان کند. توسعه روش‌های حل دقیق و ابتکاری ازجمله دیگر پیشنهادها برای تحقیقات آتی مطرح است.

مراجع

[۱] قهرمانی‌نهر، جاوید، قدرت‌نما، ایزدبخش، حمیدرضا، توکلی‌مقدم، رضا (۱۳۹۷). «طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چندهدفه چند محصولی و چند دوره ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت»، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۵(۱۱): ۱۹۳-۲۰۹.

[۲] کریمی، بهروز و جنابی، مسعود (۱۳۹۲). «برنامه‌ریزی و کنترل تولید و موجودی‌ها- جلد اول: سیستم‌های با تقاضای مستقل»، انتشارات جهاد دانشگاهی(دانشگاه اصنعتی امیرکبیر)، چاپ سوم، ۱۸۰-۱۸۲.

[۳] نیکوفکر، محمد هادی و عبداله زاده، وحید (۱۳۹۳). «برنامه‌ریزی و کنترل تولید و موجودی‌ها»، انتشارات نگاه دانش، چاپ دوم، ص ۳۴۷-۳۵۰.

[4] Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokooh, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future

www.SID.ir

Archive of SID

research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108-141.

[5] Aqlan, F., & Lam, S. S. (2015). Supply chain optimization under risk and uncertainty: A case study for high-end server manufacturing. Computers & Industrial Engineering, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.025.

[6] Handfield, R.B., Walton, S.V., Swwgers, L.K., Melnyk, S.A. (1997). "Green" value chain practices in the future industry. Journal of Operations Management 1997, 15 (4), 293-315.

[7] Stivastava, S.K. (2007) Green supply-chain management: a state-of-the art literature review. International Journal of Management Reviews 2007, 9 (1), 53-80.

[8] Farahani, R.Z., Rezapour, S., Drezner, T., Fallah, S. (2014). Competitive supply chain network design: An overview of classification, models, solution techniques and applications. Omega 2014, 45, 92-118.

[9] Shen, Z.J. (2007). Integrated supply chain models: a survey and future research directions. Journal of Industrial Management and Optimization, 3(1), 1-27.

[10] Wang, F., Lai, X.F., Shi, N. (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design. Decision Support System, 51, 262-269.

[11] Mansini, R., Savelsbergh, M. W., & Tocchella, B. (2012). The supplier selection problem with quantity discounts and truckload shipping. Omega, 40(4), 445-455.

[12] Lee, A. H., Kang, H. Y., Lai, C. M., & Hong, W. Y. (2013). An integrated model for lot sizing with supplier selection and quantity discounts. Applied Mathematical Modelling, 37(7), 4733-4746.

[13] Meena, P.L. and Sarmah, S.P. (2013). Multiple sourcing under supplier failure risk and quantity discount: A genetic algorithm approach. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 50, 84-97.

[14] Hammami, R., C. Temponi, and Y. Frein, A. (2014). scenario-based stochastic model for supplier selection in global context with multiple buyers, currency fluctuation uncertainties, and price discounts. European Journal of Operational Research, 233(1): 159-170.

[15] Ayhan, M.B. and Kilic, H.S. (2015). A two stage approach for supplier selection problem in multi-item/multi-supplier environment with quantity discounts. Computers & Industrial Engineering, 85: 1-12.

[16] Chai, J. and Ngai, E.W.T. (2015). Multi-perspective strategic supplier selection in uncertain environments. International Journal of Production Economics, 166: 215-225.

[17] Moghaddam, K.S., (2015). Fuzzy multi-objective model for supplier selection and order allocation in reverse logistics systems under supply and demand uncertainty. Expert Systems with Applications, 42(15–16): 6237-6254.

[18] Torabi, S.A., Baghersad, M. and Mansouri, S.A. (2015). Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 79: 22-48.

[19] Jain, V., et al., (2015). A Chaotic Bee Colony approach for supplier selection-order allocation with different discounting policies in a coopetitive multi-echelon supply chain. Journal of Intelligent Manufacturing, 26(6): 1131-1144.

[20] Çebi, F. and Otay, İ. (2016). A two-stage fuzzy approach for supplier evaluation and order allocation problem with quantity discounts and lead time. Information Sciences, 339: 143-157.

[21] Rezaei, J., Nispeling, T., Sarkis, J., & Tavasszy, L. (2016). A supplier selection life cycle approach integrating traditional and environmental criteria using the best worst method. Journal of Cleaner Production, 135, 577-588.

[22] Mohammaditabar, D., Ghodsypour, S. H., & Hafezalkotob, A. (2016). A game theoretic analysis in capacity-constrained supplier-selection and cooperation by considering the total supply chain inventory costs. International Journal of Production Economics, 181, 87-97.

[23] Meena, P.L. and Sarmah, S.P. (2016). Supplier selection and demand allocation under supply disruption risks. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83(1): 265-274.

[24] Amin, SH, Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. Applied Mathematical Modelling; 41: 316-30.

[25] Arabsheybani, A., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2018). An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier's risk. Journal of cleaner production, 190, 577-591.

[26] Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. Operations research, 52(1), 35-53.

[27] Sheu, J.-B., Lin, A.Y.-S. (2012). Hierarchical facility network planning model for global logistics network configuration. Applied Mathematical Modelling, 36, 3066-3053.

[28] Yu, H., Solvang, W.D., Yuan, S. (2012). A multi-objective decision support system for simulation and optimization of municipal solid waste management system. Proceeding of the 3rd IEEE International Conference on Cognitive Info communications. Kosice, Slovakia, 199-193.

[29] Nema, A.K., Gupta, S.K. (1999). Optimization of regional hazardous waste management systems: an

www.SID.ir

Archive of SID

improved formulation. Waste Management 1999, 19, 451-441.

[30] Sheu, J.-B. (2007). A coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous wastes. Computers & Operations Research, 34, 1462-1442.

[31] Li, Zukui, Qiuhua Tang, and Christodoulos A. (2012). Floudas. "A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization: II. Probabilistic guarantees on constraint satisfaction." Industrial & engineering chemistry research 51.19 (2012): 6769-6788.

[32] D. J., Morabito, R. (2012). Production planning in furniture settings via robust optimization." Computers & Operations Research, Vol. 39, 139-150.

[33] Soyster, A. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. Operations Research, Vol. 21, 1154–7.

[34] Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (1998). Robust convex optimization." Mathematics of Operations Research, Vol. 23, 769-805.

[35] Yu, H, Solvang, WD, Chen, C. (2014). A green supply chain network design model for enhancing competitiveness and sustainability of companies in high north arctic regions. International Journal of Energy and Environment; 5(4): 403-18.

www.SID.ir

Archive of SID

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269 Spring and Summer 2019, Volume 7., No.14., pp.105-122
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2019.14188.1644

Sustainable Supply Chain Design with Considering Uncertainty in Suppliers' Risk

M. Nouri[1], E. Mohammadi[2*], M.S. Jabalameli[3]

[1] Master's degree student, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology
[2] Assistant Professor, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology
[3] Professor, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 22 July 2017
Accepted 19 September 2019

***Keywords*:**

Green Supply Chain, Risk Uncertainty
Robust Optimization
Discount

ABSTRACT

Risk management is a significant issue in supply chain management. Improving the ability to control and manage the risk, enables the companies to be more successful in competing with other companies and decrease the expected long-term loss. In this manuscript, a mixed integer linear programming model for designing the green supply chain is presented. This model aims to minimize the cost, greenhouse gas emissions, and risk. Risk of supplying the raw materials and transportation in all levels of supply chain are under uncertainty. Furthermore, cost of raw materials is suggested by suppliers to producers with an incremental discount. The initial modelling is turned into a deterministic one using Bertsimas and Sim budget of uncertainty approach and consequently solved by GAMS software to manage risk. Furthermore, the uncertain parameter is analyzed and using various amounts the obtained result has been assessed and evaluated. The results show that the risk function is the most important factor in objective function, because parameters of risk function are subject to uncertainty.

[*] Corresponding author. O. Mohammadi
Tel.: 021-84063363; E-mail address: e_mohammadi@iust.ac.ir

www.SID.ir