

بهینه‌سازی استوار طراحی شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس در شرایط عدم قطعیت

ابوالقاسم یوسفی بابادی^۱ و داود شیشه‌بری^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه یزد

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت ۹۳/۰۶/۰۸ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۳/۰۸/۱۴ - تاریخ تصویب ۹۳/۱۰/۲۹)

چکیده

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی برای مسئله لجستیک یکپارچه، شامل مراکز تولید، توزیع، مشتری، جمع‌آوری، انهدام و احیا، با توجه به ساخت مسیرها در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌شود. سپس این مدل با استفاده از روش‌های مناسب خطی‌سازی، به یک مدل عدد صحیح خطی تبدیل می‌شود. در این مدل، پارامترهای تقاضای مشتریان، مقدار و کیفیت بازگشتی‌ها و هزینه‌های حمل‌ونقل قطعی نیست و به‌همین دلیل، از روش بهینه‌سازی استوار تحت سناریو برای قطعی‌سازی استفاده می‌شود. هدف مدل مذکور، کمینه‌سازی هزینه‌های سیستم و یافتن جوابی استوار است. در این مطالعه، شرکت کاله آمل به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و بررسی شد. همچنین یک الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی کارآمد برای حل مسئله ارائه شد. نتایج حل مسائل نمونه، بیانگر کارآمدی الگوریتم ترکیبی ارائه‌شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی، بهینه‌سازی استوار، زنجیره تأمین، لجستیک مستقیم و معکوس، لجستیک یکپارچه.

مقدمه

همکاران به ارائه مدلی غیرخطی برای تعیین محل مراکز جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده در یک شبکه لجستیک معکوس پرداختند [۶]. آن‌ها برای حل این مدل، از الگوریتمی ابتکاری بر مبنای روش جست‌وجوی ممنوع^۲ استفاده کردند. یوستر^۳ و همکاران، شبکه‌ای نیمه یکپارچه را- که در آن، شبکه لجستیک مستقیم موجود فرض می‌شود و تنها مراکز جمع‌آوری و احیا در لجستیک معکوس مکان‌یابی می‌شوند- را طراحی کردند؛ به‌طوری‌که جریان مستقیم و معکوس، هم‌زمان بهینه می‌شوند [۷].

پرداختن به طراحی لجستیک مستقیم و معکوس به‌طور جداگانه و غیرهم‌زمان، زمینه زیربهدی را فراهم می‌آورد [۸]. در مبحث طراحی یکپارچه شبکه لجستیک در ادبیات موضوع، دو برداشت از طراحی یکپارچه شبکه لجستیک وجود دارد. برداشت اول از واژه یکپارچه، یکپارچه‌سازی تصمیم‌ها در سطوح راهبردی (بلندمدت)، تاکتیکی (میان‌مدت) و عملیاتی (کوتاه‌مدت) در طراحی شبکه است.

اگرچه محصولات از روزهای آغازین تجارت برای انجام بعضی امور مانند تعمیرهای جزئی و... بازگردانده شده‌اند، لجستیک معکوس، از اوایل دهه ۱۹۹۰ توجه علمی را جلب کرده است. در دهه گذشته، مدل‌های بسیاری برای طراحی شبکه لجستیکی براساس روش‌های مکان‌یابی توسعه یافتند [۳]. این مدل‌ها، از مدل‌های ساده بدون ظرفیت تا مدل‌های پیچیده چندهدفه را پوشش می‌دهند [۴]. مطالعه ادبیات زنجیره تأمین و لجستیک نشان می‌دهد بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه لجستیک، مربوط به لجستیک پیشرو است و از سال ۲۰۰۵- که در آن، لجستیک معکوس به رسمیت شناخته شد- مطالعه‌ها در این زمینه نیز به‌عنوان بخشی از زنجیره تأمین افزایش یافته است [۵].

در گذشته، درباره مدل‌های یکپارچه مطالعه‌های گسترده‌ای انجام شده، اما بیشتر آن‌ها به‌صورت غیرقطعی است و کمتر به‌صورت قطعی درآمده است. آراس^۱ و

طراحی شبکه لجستیک، تصمیمی راهبردی است که به طور معمول، شامل تعیین محل تسهیلات، ظرفیت آن‌ها، تعداد رده‌ها در زنجیره و نحوه ارتباط تسهیلات است؛ بنابراین، یکپارچه‌سازی تصمیم‌های راهبردی طراحی شبکه، با تصمیم‌های سطح تاکتیکی نظیر مدیریت موجودی یا سطح عملیات مانند مسیریابی، از ایجاد زیربهره‌نگی جلوگیری می‌کند، اما برداشت دوم از واژه یکپارچه، یکپارچه‌سازی تصمیم‌های طراحی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس است. در بیشتر موارد، طراحی شبکه تنها برای لجستیک مستقیم لجستیک معکوس صورت گرفته و در مواردی نیز برای هردو، اما به صورت ترتیبی صورت گرفته است. مطالعات معدود و پراکنده‌ای نیز در سال‌های اخیر به طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته‌اند. طراحی یکپارچه شبکه لجستیک، موجب جلوگیری از ایجاد زیربهره‌نگی و در نتیجه، صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود [۹]. در این زمینه، فلیسچمن^۴ و همکاران نشان دادند که طراحی شبکه لجستیک به‌طور یکپارچه و هم‌زمان در مقایسه با رویکرد سنتی، موجب صرفه‌جویی شایان توجهی در هزینه‌ها می‌شود [۱۰]. مطلب دیگری که در یکپارچه‌سازی لجستیک مستقیم و معکوس به آن توجه شده، استفاده از تسهیلات ترکیبی انبار، جمع‌آوری یا انبار و تعمیر است. به لحاظ تاریخی، بهینه‌سازی در شرایط غیرقطعی، در اواخر دهه ۱۹۵۰ آغاز شد و هم در زمینه تئوری و هم الگوریتم به سرعت پیشرفت کرد. رویکردهای متعددی برای بهینه‌سازی در شرایط غیرقطعی به کار رفته که از آن جمله می‌توان به کمینه‌سازی امید ریاضی، کمینه‌سازی انحراف از آرمان‌ها و کمینه‌سازی بیشترین هزینه‌ها اشاره کرد. در این حیطه باید سه رویکرد اصلی را متمایز کرد: برنامه‌ریزی احتمالی^۵، برنامه‌ریزی فازی^۶ و برنامه‌ریزی پویای احتمالی^۷. در اواسط دهه ۱۹۵۰ برنامه‌ریزی احتمالی به‌عنوان رویکردی مؤثر برای مدل کردن عدم قطعیت داده‌ها معرفی شده است [۱]. پیشوایی و همکاران، برای طراحی یکپارچه شبکه‌های لجستیک مستقیم و معکوس، یک مدل دوهدفه مختلط غیرخطی و عدد صحیح در کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی پاسخگویی شبکه لجستیک را ارائه دادند و برای حل مدل ارائه‌شده، از الگوریتمی ابتکاری استفاده

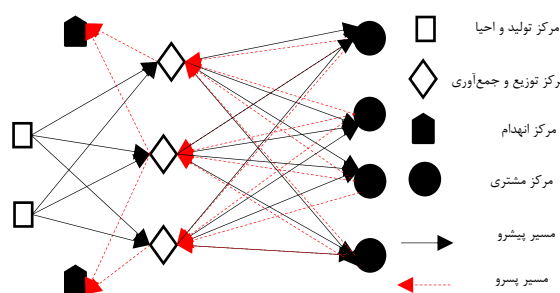
کردند [۱۱]. ال‌ساید و همکاران، با هدف بیشینه‌سازی کل سود، مدلی تصادفی برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه چندلایه و چنددوره‌ای ارائه دادند و مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط تصادفی چندمرحله‌ای را معرفی کردند [۱۲]. سونیا و همکاران، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی را برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین با جریان بازگشتی (زمانی که تولید، توزیع و فعالیت‌های لجستیک معکوس وجود دارد) معرفی و تقاضای غیرقطعی را به روش درخت سناریو قطعی کردند [۱۳]. ژانگ و زو با توجه به تعداد درخواست غیرقطعی، شبکه لجستیک بهینه را طراحی کردند. آن‌ها یک مدل دوسطحی مختلط عدد صحیح ارائه و به روش تکرارپذیری مدل را حل کردند [۱۴].

همان‌طور که از ادبیات موضوع استنتاج می‌شود، در مطالعه‌های پیشین، به بحث ساخت مسیر بین تسهیلات و وجود تنوع محصول‌ها توجهی نشده است. این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد؛ چراکه ضرورت مطالعه هم‌زمان طراحی شبکه‌های لجستیکی و ساخت مسیر، جواب مدل ریاضی را بسیار کاربردی‌تر می‌سازد. حمل‌ونقل مواد دارویی، سوختی یا مواد فسادپذیر، نمونه‌های بارزی از موضوع مورد بررسی قلمداد می‌شوند. بلایای طبیعی مانند زلزله یا سیل نیز از مواردی به‌شمار می‌آیند که در آن‌ها نیاز شدید به منابع دارویی و غذایی وجود دارد. در بحث تنوع محصول‌ها، در بعضی صنایع مانند صنایع قطعات الکترونیکی یا محصول‌های لبنیاتی، امکان تولید هم‌زمان چند محصول وجود دارد. حال با توجه به این مدل می‌توان بررسی کرد که ایجاد یک خط تولید جدید در همان کارخانه صرفه اقتصادی دارد یا احداث یک کارخانه جدید؛ بنابراین، در این پژوهش، احداث بهینه مسیر بین تسهیلات و تنوع محصول‌های تولیدی بررسی می‌شود.

در این پژوهش، مسئله یکپارچه‌سازی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس، با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای میزان تقاضا، مقدار و کیفیت محصول‌های مرجوعی و هزینه‌های حمل‌ونقل با رویکرد در نظر گرفتن هزینه‌های ساخت مسیر و تولید کارگاهی در مراکز تولید مطالعه می‌شود و مدل ارائه‌شده، با به کارگیری روش بهینه‌سازی استوار^۸ قطعی می‌شود. به عبارت دیگر، در این پژوهش با ارائه یک مدل یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس و

مختلف تولیدی نظیر صنایع تولید تجهیزات الکترونیکی و دیجیتالی، صنایع تولید وسایل نقلیه و سایر صنایع مشابه کاربرد دارد. نکته مهم دیگر، استفاده از تسهیلات ترکیبی توزیع-جمع‌آوری و تولید-احیاست. این تسهیلات، در جریان مستقیم، نقش مراکز توزیع و تولید و در جریان معکوس، نقش مراکز جمع‌آوری و احیا را ایفا می‌کنند. به‌کارگیری این تسهیلات، سبب صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث و نگهداری می‌شود؛ زیرا از احداث مراکز جمع‌آوری و احیای جداگانه جلوگیری می‌کند. به‌این‌ترتیب، هزینه‌های ساخت تسهیلات کاهش می‌یابند.

عدم قطعیت در پارامترهای مدل‌های طراحی شبکه، از عوامل مهمی است که باید در طراحی مدل به آن توجه شود. این امر در طراحی شبکه‌های لجستیک معکوس تشدید می‌شود. به‌طور کلی، در بازار رقابتی امروزی، پارامترهای مهمی مانند تقاضای مشتریان، میزان و کیفیت برگشتی‌ها، هزینه‌های حمل‌ونقل و بعضی پارامترهای دیگر، قطعیت چندانی ندارند. تاکنون روش‌های حل مختلفی براساس نظریه احتمال، نظریه فازی و بهینه‌سازی استوار بر مقابله با عدم قطعیت در پارامترها ارائه شده است [۲]. در اینجا برای حل این موضوع، با توجه به کارایی روش قطعی‌سازی استوار، از روش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو^۹ استفاده می‌شود [۴]. در این مدل فرض می‌شود که تقاضای مشتریان، مقدار و کیفیت بازگشتی‌ها و هزینه‌های حمل‌ونقل قطعیت ندارند.



شکل ۱. شبکه لجستیک یکپارچه

مدل پیشنهادی

مدل ارائه‌شده، یک مدل چندسطحی لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس با در نظر گرفتن عدم قطعیت در میزان تقاضا، مقدار و کیفیت محصول‌های مرجوعی و هزینه‌های

به‌کارگیری روش بهینه‌سازی استوار تحت سناریو، قابلیت یافتن جوابی استوار در مقابل شرایط عدم قطعیت بررسی می‌شود.

ساختار کلی پژوهش در ادامه به شرح زیر است. در بخش اول، طرح کلی شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس، ارائه و مدل غیرقطعی پیشنهادی بیان می‌شود. بخش دوم به رویکرد استوارسازی مورد استفاده و بخش سوم به معرفی مدل غیرقطعی به‌روش استوارسازی تحت سناریو قطعی‌شده اختصاص دارد. در بخش چهارم به‌منظور بیان شفاف و درک بهتر مسئله، مطالعه موردی شرکت تولیدی کاله^{۱۰} آمل ارائه می‌شود. در بخش پنجم، فرایند حل مسئله با استفاده از الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی توضیح داده می‌شود و بخش‌های آخر به تحلیل حساسیت و نتیجه‌گیری می‌پردازند.

مدل یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس در حالت عدم قطعیت

شبکه مورد بررسی، یک شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس است که قابلیت پوشش‌دهی انواع صنایع تولیدی را دارد و در شبکه لجستیک معکوس آن‌ها، احیا و بازیافت محصول‌هایی که در پایان عمر قرار دارند، انجام می‌گیرد. در مدل طراحی‌شده در جریان مستقیم، کالاهای تولیدشده از مراکز تولید، به مراکز توزیع و از آنجا به مشتریان منتقل می‌شوند. در جریان معکوس، محصول‌های برگشتی پس از جمع‌آوری و بازرسی به دو گروه محصول‌های قابل‌احیا و محصول‌های قراضه تقسیم می‌شوند (شکل ۱). محصول‌های قابل‌احیا به مراکز احیا حمل می‌شوند و در آنجا برحسب کیفیت، عملیات ساخت مجدد (تعمیر) روی آن‌ها انجام می‌گیرد. درغیراین‌صورت، عملیات جداسازی روی محصول‌های برگشتی صورت می‌گیرد. قطعات قابل‌استفاده، در عملیات تولید محصول به‌کار گرفته می‌شود. محصول‌های قراضه نیز به مرکز انهدام حمل می‌شوند و عملیات انهدام ایمن روی آن‌ها صورت می‌پذیرد. به‌این‌ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مذکور، یک مدل لجستیک یکپارچه شش‌لایه‌ای است که سه لایه روبه‌جلو (تولید، توزیع، مشتری) و سه لایه روبه‌عقب (جمع‌آوری، انهدام و احیا) دارد. این شبکه، در صنایع

M : نقاط ممکن برای مراکز انهدام $m \in M$
 Ω : سناریوهای مختلف $s \in \Omega$
 L : تعداد محصول‌های ممکن برای راه‌اندازی خط تولید
 در مراکز تولید $l \in L$

پارامترها

d_{kls} : تقاضای مرکز مشتری k از محصول l تحت سناریو s
 re_{kls} : میزان مرجوعی از مرکز مشتری k از محصول l تحت سناریو s
 α_l : متوسط کسر محصول‌های انهدامی از محصول l
 c_{ijls} : هزینه حمل یک واحد محصول از مرکز تولید i به مرکز توزیع j از محصول l تحت سناریو s
 α_{jks} : هزینه حمل یک واحد محصول از مرکز توزیع j به مرکز مشتری k از محصول l تحت سناریو s
 b_{kjl} : هزینه جمع‌آوری یک واحد محصول مرجوعی از مرکز مشتری k به مرکز جمع‌آوری j از محصول l تحت سناریو s
 e_{jils} : هزینه حمل یک واحد محصول مرجوعی از مرکز جمع‌آوری j به مرکز احیای i از محصول l تحت سناریو s
 P_{jmls} : هزینه حمل یک واحد محصول مرجوعی از مرکز جمع‌آوری j به مرکز انهدام m از محصول l تحت سناریو s
 f_i : هزینه ثابت احداث مرکز تولید و احیا در نقطه i
 g_j : هزینه ثابت احداث تسهیل ترکیبی توزیع/جمع‌آوری در j
 h_m : هزینه ثابت احداث مرکز انهدام در نقطه m
 cw_{il} : ظرفیت تولید در مرکز تولید i از محصول l
 cyl : ظرفیت پخش در مرکز توزیع j از محصول l
 czm : ظرفیت انهدام ایمن در مرکز انهدام m
 cyr_{jl} : ظرفیت جمع‌آوری در مرکز جمع‌آوری j از محصول l
 cwt_{il} : ظرفیت تعمیر در مرکز احیای i از محصول l
 toc_{ijs} : هزینه احداث مسیر از مرکز تولید و احیا i به مرکز توزیع و جمع‌آوری j تحت سناریو s
 toc_{jks} : هزینه احداث مسیر از مرکز توزیع و جمع‌آوری j به مرکز مشتری k تحت سناریو s
 toc_{jms} : هزینه احداث مسیر از مرکز توزیع و جمع‌آوری j به مرکز انهدام m تحت سناریو s
 CA_{ij} : ظرفیت حمل محصول از مسیر مرکز تولید و

حمل‌ونقل با رویکرد در نظر گرفتن هزینه‌های ساخت مسیر و تولید کارگاهی در مراکز تولید است. پیش از ارائه مدل، به بیان مفروضات و معرفی مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها پرداخته می‌شود:

مفروضات

- ظرفیت مسیرهای رفت و برگشت یکسان است.
- بین تسهیلات هر بخش (تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان) با یکدیگر ارتباطی وجود ندارد.
- هزینه ساخت تسهیلات و راه‌های ارتباطی در تمام سناریوها با یکدیگر برابر است.
- مقدار و هزینه حمل‌ونقل، تقاضا، مقدار و کیفیت مرجوعی‌ها غیرقطعی و از نوع سناریویی است.

شایان ذکر است که منظور از ساخت مسیر، لزوماً ساخت فیزیکی مسیر و ایجاد جاده نیست و ممکن است در بعضی از موارد، امکان وجود شرایطی خاص برای حمل‌ونقل کالاها به‌عنوان امکان ساخت مسیر مدنظر قرار گیرد؛ برای مثال، می‌توان گفت که ممکن است برای انتقال و حمل‌ونقل از هریک از مسیرهای شبکه، بستن قرارداد با یک شرکت راه‌وترابری، خرید خاور یا نisan برای انتقال از یک مسیر، اجاره یک وسیله حمل‌ونقل عمومی مانند کامیون یا تریلی یا هر مورد دیگری ضروری باشد. بدیهی است که هریک از موارد یادشده، به پرداخت بعضی هزینه‌های اولیه (به‌عنوان هزینه راه‌اندازی و ایجاد ارتباط) نیاز دارد که این هزینه را نیز می‌توان به‌عنوان هزینه‌های «ساخت مسیر بین دو تسهیل» تلقی کرد. به‌هرحال ممکن است در دنیای کاربردی، هزینه‌های «ساخت مسیر بین دو تسهیل» براساس شرایط و موقعیت عملی و کاربردی، به هر صورت دیگری تفسیر و تعبیر شوند.

مجموعه‌ها

I : نقاط ممکن برای مراکز تولید و احیا $i \in I$
 J : نقاط ممکن برای تسهیلات ترکیبی توزیع و جمع‌آوری $j \in J$
 K : نقاط ممکن برای مشتریان $k \in K$

T_{jmls} = مقدار محصول مرجوعی که از مرکز جمع‌آوری j به مرکز انهدام m از محصول نوع l تحت سناریو s حمل می‌شود؛

مدل ریاضی

تابع هدف:

Model (I):

$$\text{Min } \psi = \begin{pmatrix} \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4 + \psi_5 \\ + \psi_6 + \psi_7 + \psi_8 \\ + \psi_9 + \psi_{10} + \psi_{11} \end{pmatrix} \quad (1)$$

که در آن، موارد ψ_1 تا ψ_{11} به صورت زیرند:

$$\psi_1 = \sum_i \sum_j \sum_l C_{ijls} X_{ijls} \quad \text{هزینه حمل از تولید به توزیع:}$$

$$\psi_2 = \sum_j \sum_k \sum_l \alpha_{jkls} U_{jkls} \quad \text{هزینه حمل از توزیع به مشتری:}$$

$$\psi_3 = \sum_k \sum_j \sum_l b_{kjls} Q_{kjls} \quad \text{هزینه حمل از مشتری به جمع‌آوری:}$$

$$\psi_4 = \sum_j \sum_i \sum_l e_{jils} V_{jils} \quad \text{هزینه حمل از جمع‌آوری به احیا:}$$

$$\psi_5 = \sum_j \sum_m \sum_l p_{jmls} T_{jmls} \quad \text{هزینه حمل از جمع‌آوری به انهدام:}$$

$$\psi_6 = \sum_i \sum_j \text{toc}_{ijs} (hh_{ij} + hh_{ji}) \quad \text{هزینه ساخت راه بین تولید و احیا به توزیع و جمع‌آوری:}$$

$$\psi_7 = \sum_j \sum_k \text{toc}_{jks} (hh_{jk} + hh_{kj}) \quad \text{هزینه ساخت راه بین توزیع و جمع‌آوری به مشتری:}$$

$$\psi_8 = \sum_j \sum_m \text{toc}_{jms} hh_{jm} \quad \text{هزینه ساخت راه بین جمع‌آوری و انهدام:}$$

$$\psi_9 = \sum_i f_i w_i \quad \text{هزینه ساخت تسهیل ترکیبی تولید و احیا:}$$

$$\psi_{10} = \sum_j g_j y_j \quad \text{هزینه ساخت تسهیل ترکیبی توزیع و جمع‌آوری:}$$

$$\psi_{11} = \sum_i h_m z_m \quad \text{هزینه ساخت تسهیل انهدام:}$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{j \in J} U_{jkls} \geq d_{kls} \quad \forall k, s, l \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} Q_{kjls} \geq re_{kls} d_{kls} \quad \forall k, s, l \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ijls} - \sum_{k \in K} U_{jkls} = 0 \quad \forall j, s, l \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} V_{jils} - (1 - r_l) \sum_{k \in K} Q_{kjls} = 0 \quad \forall j, s, l \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} T_{jmls} - r_l \sum_{k \in K} Q_{kjls} = 0 \quad \forall j, s, l \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} V_{jils} - \sum_{j \in J} X_{ijls} \leq 0 \quad \forall i, s, l \quad (7)$$

احیای i به مرکز توزیع و جمع‌آوری j با توجه به محدودیت در امکانات

CA_{jk} : ظرفیت حمل محصول از مسیر مرکز توزیع و جمع‌آوری j به مرکز مشتری K با توجه به محدودیت در امکانات

CA_{jm} : ظرفیت حمل محصول از مسیر مرکز توزیع و جمع‌آوری j به مرکز انهدام m با توجه به محدودیت در امکانات

متغیرهای صفر و یک

w_i = در صورتی که مرکز تولید و احیا در نقطه i احداث شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

Y_j = در صورتی که تسهیل ترکیبی توزیع و جمع‌آوری در نقطه j احداث شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

Z_m = در صورتی که مرکز انهدام در نقطه m احداث شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

hh_{ij} = اگر مسیر از مرکز تولید i به مرکز توزیع j راه‌اندازی شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

hh_{jk} = اگر مسیر از مرکز توزیع j به مرکز مشتری K راه‌اندازی شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

hh_{jm} = اگر مسیر از مرکز جمع‌آوری j به مرکز انهدام m راه‌اندازی شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

hh_{ji} = اگر مسیر از مرکز جمع‌آوری j به مرکز احیا i راه‌اندازی شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

hh_{kj} = اگر مسیر از مرکز مشتری K به مرکز جمع‌آوری j راه‌اندازی شود مقدار ۱، در غیر این صورت ۰؛

متغیرهای همیشه مثبت

X_{ijls} = مقدار محصولی که از مرکز تولید i به مرکز j از محصول نوع l تحت سناریو s حمل می‌شود؛

U_{jkls} = مقدار محصولی که از مرکز توزیع j به مرکز مشتری k از محصول نوع l تحت سناریو s حمل می‌شود؛

Q_{kjls} = مقدار محصول مرجوعی که از مرکز مشتری k به مرکز جمع‌آوری j از محصول نوع l تحت سناریو s حمل می‌شود؛

V_{jils} = مقدار محصول مرجوعی که از مرکز جمع‌آوری j به مرکز احیای i از محصول نوع l تحت سناریو s حمل می‌شود؛

در سیستم لجستیک مستقیم را بیان می‌دارد. محدودیت ۵ نیز به تعادل در مراکز توزیع در سیستم لجستیک معکوس- که به سمت مراکز احیا ارسال می‌شود- اشاره دارد. محدودیت ۶ تعادل در مراکز توزیع در سیستم لجستیک معکوس را- که به سمت مراکز انهدام ارسال می‌شود- بررسی می‌کند. محدودیت ۷ نیز تعادل در مراکز تولید و احیا در سیستم یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس را یادآور می‌شود. محدودیت ۸ ظرفیت تولید در مراکز تولید در سیستم لجستیک مستقیم و همچنین امکان‌سنجی تأسیس آن مرکز و محدودیت ۹ ظرفیت توزیع محصول‌های تولیدی در مراکز توزیع در سیستم لجستیک مستقیم و همچنین امکان‌سنجی تأسیس آن مرکز را بیان می‌دارد. محدودیت ۱۰ ظرفیت جمع‌آوری محصول‌های عودتی در مراکز جمع‌آوری در سیستم لجستیک معکوس و امکان‌سنجی تأسیس آن مرکز جمع‌آوری و محدودیت ۱۱ ظرفیت بازسازی مراکز احیا در سیستم لجستیک معکوس و همچنین امکان‌سنجی تأسیس آن مرکز را کنترل می‌کند. محدودیت ۱۲ ظرفیت تخریب مراکز انهدام در سیستم لجستیک معکوس و همچنین امکان‌سنجی تأسیس آن مرکز را بیان می‌دارد و محدودیت‌های ۱۳ تا ۱۷ ظرفیت حمل محصول‌ها را از مسیرهای رفت و برگشت بیان می‌دارند در صورتی که مسیر منظور راه‌اندازی شود. در محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ مسیر رفت و برگشت، یکی است و اگر یکی ساخته شد، نیازی به ساخت مسیر جدید بین دو مکان نیست. محدودیت‌های ۲۰ و ۲۱ نوع متغیرها را بیان می‌کنند.

با مقایسه مدل ریاضی مذکور با آنچه در ادبیات موضوع اشاره شده، مشخص می‌شود که در زمینه بهینه‌سازی استوار طراحی شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس در شرایط عدم قطعیت، موضوع ظرفیت‌داربودن تسهیلات تولیدی، مراکز انتقال، انهدام و احیا و نیز ظرفیت‌داربودن راه‌های ارتباطی برای اولین بار در این مطالعه در نظر گرفته می‌شوند. همچنین ساخت راه‌های ارتباطی نیز از جمله دیگر موضوع‌هایی است که در این مطالعه با شرایط یادشده در نظر گرفته می‌شوند.

مقایسه‌ها در پژوهش پیشوایی و همکاران [۴] نشان می‌دهد که در هشت سناریو مورد نظر، مدل قطعی در شش سناریو به جواب غیرموجه منتج شده و این امر هزینه‌های

$$\sum_{j \in J} X_{ijls} \leq cw_{il} W_i \quad \forall i, s, l \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ijls} \leq cy_{jl} Y_j \quad \forall j, s, l \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} Q_{kjl} \leq cy_{jl} Y_j \quad \forall j, s, l \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} V_{jils} \leq cwr_{il} W_i \quad \forall i, s, l \quad (11)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} T_{jmls} \leq cz_m Z_m \quad \forall m, s, l \quad (12)$$

$$X_{ijls} \leq CA_{ij} (hh_{ij} + hh_{ji}) \quad \forall i, j, s, l \quad (13)$$

$$V_{jils} \leq CA_{ij} (hh_{ij} + hh_{ji}) \quad \forall i, j, s, l \quad (14)$$

$$U_{jkl} \leq CA_{jk} (hh_{jk} + hh_{kj}) \quad \forall j, k, s, l \quad (15)$$

$$Q_{kjl} \leq CA_{jk} (hh_{jk} + hh_{kj}) \quad \forall j, k, s, l \quad (16)$$

$$T_{jml} \leq CA_{jm} hh_{jm} \quad \forall j, m, s, l \quad (17)$$

$$hh_{ij} + hh_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (18)$$

$$hh_{jk} + hh_{kj} \leq 1 \quad \forall j, k \quad (19)$$

$$W_i, Y_j, Z_m, hh_{ij}, hh_{jk}, hh_{jm}, hh_{ji}, hh_{kj} \in \{0,1\} \quad (20)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall m \in M$$

$$X_{ijl}, U_{jkl}, Q_{kjl}, V_{jil} \geq 0, \quad (21)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall m \in M, \forall k \in K, l \in L$$

تابع هدف مدل (I)؛ کمینه‌کننده کل هزینه‌های زنجیره تأمین است. این هزینه‌ها شامل موارد زیر است: هزینه ثابت احداث مراکز تولید و احیا، هزینه ثابت احداث تسهیلات ترکیبی توزیع و جمع‌آوری، هزینه ثابت احداث مراکز انهدام، هزینه‌های مربوط به ساخت مسیرهای بین تسهیلات، هزینه حمل محصول از مراکز تولید و احیا به مراکز توزیع و جمع‌آوری، هزینه حمل محصول از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز مشتری، هزینه جمع‌آوری محصول‌های برگشتی از مراکز مشتری به مراکز توزیع و جمع‌آوری، هزینه حمل محصول‌های مرجوعی از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز تولید و احیا و هزینه حمل محصول‌های مرجوعی از مراکز توزیع و جمع‌آوری به مراکز انهدام.

در محدودیت ۲، مجموع توزیع کالاها در تمام مراکز توزیع، حداقل باید برآورده‌کننده تقاضای مشتریان باشد. محدودیت ۳ حداقل میزان کالای برگشتی از سوی مشتری k ام را تضمین می‌کند. محدودیت ۴ تعادل در مراکز توزیع

زیادی را دربرداشته است. درعوض به‌ازای سناریو اصلی (داده‌های قطعی)، مدل قطعی، جواب‌های باکیفیت‌تری را تولید می‌کند. براساس این نتایج، استفاده از رویکرد احتمالی موجب کاهش ریسک می‌شود، اما درعوض، هزینه‌های بیشتری را تحمیل می‌کند؛ بنابراین، در صورتی که هدف مدل، کمینه‌سازی ریسک باشد، می‌توان با پذیرفتن میزان قابل‌قبولی افزایش در هزینه‌های احداث و حمل‌ونقل، از رویکرد احتمالی برای حل مدل‌های غیرقطعی استفاده کرد.

قطعی کردن مدل به‌روش بهینه‌سازی استوار

معمولاً به‌ندرت اتفاق می‌افتد که جواب مدل (I) برای همه سناریوهای $s \in \Omega$ ، هم‌وجه و هم‌بهینه باشد. به عبارت دیگر، در یک مدل لازم است که مبادله بین استواری مدل و استواری جواب بررسی و ارزیابی شود. در ادامه، پس از معرفی روش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو، نحوه به‌کارگیری آن برای مدل پیشنهادی بیان می‌شود.

مدل استوار مبتنی بر سناریو

از دیدگاه مالوی و همکاران، دو تعریف مهم در حوزه مدل استوار وجود دارد؛ جواب استوار و مدل استوار که در ادامه به هریک اشاره می‌شود. جواب مدل بهینه‌سازی، هنگامی استوار شناخته می‌شود که برای همه سناریوهای داده‌های ورودی مدل، نزدیک به بهینه باقی بماند. همچنین مدلی استوار خوانده می‌شود که تقریباً برای همه سناریوهای داده‌های ورودی ووجه باشد [۱۵] و [۱۶].

با توجه به مفاهیم و تعاریف یادشده، مالوی و همکاران یک فرمول‌بندی مدل عمومی را- که بهینه‌سازی استوار است- ارائه دادند. در این روش، در مواجهه با مدل‌های بهینه‌سازی با دو بخش مجزا روبه‌رویم:

۱. بخش ساختاری که ثابت است و هیچ‌گونه اختلالی در داده‌های ورودی آن وجود ندارد؛

۲. بخش کنترل که تابع دستخوش داده‌های نویزی و نوسانی است.

همچنین دو مجموعه از متغیرها قابل تعریف‌اند:

$X \in \mathbb{R}^{nl}$: بیانگر بردار متغیرهای تصمیم و مشروط به تحقق‌یافتن پارامترهای نامطمئن است که به‌عنوان

متغیرهای طراحی شناخته می‌شوند.

$Y \in \mathbb{R}^{n2}$: بیانگر متغیرهای تصمیم کنترل^{۱۰} و مستعد تنظیم پارامترهای نامطمئن است. مقادیر بهینه این متغیرهای به تحقق‌یافتن پارامترهای نامطمئن و مقادیر بهینه متغیرهای طراحی، وابسته است.

مدل بهینه‌سازی دارای ساختاری به‌صورت زیر است:

Model (II):

$$\text{Minimize} \quad C^T X + d^T Y \quad (22)$$

$$\text{subject to} \quad AX = b \quad (23)$$

$$BX + CY = e \quad (24)$$

$$X, Y \geq 0 \quad (25)$$

محدودیت ۲۳ بیانگر محدودیت‌های ساختاری^{۱۱} است و ضرایب آن ثابت و بدون هرگونه نویز و نوسان است. محدودیت ۲۴ بیانگر محدودیت‌های کنترل^{۱۲} است. ضرایب این محدودیت، حالت نویزی و نوسانی را دربردارد. محدودیت ۲۵، اطمینان از بردارهای نامنفی را نشان می‌دهد. به‌منظور تعریف مسئله بهینه‌سازی استوار، مجموعه‌ای از سناریوها بدین شکل تعریف می‌شود:

که در هر سناریو S ، مجموعه $\{d_s, B_s, C_s, e_s\}$ با احتمال رخداد سناریو p_s اتفاق می‌افتد.

$$\sum_{s=1}^S p_s = 1 \quad (26)$$

اگر به‌ازای هر تحقق‌یافتن، سناریو نزدیک به بهینه باقی بماند، جواب بهینه مدل ریاضی فوق، به‌لحاظ بهینگی استوار خواهد بود و این حالت، استواری جواب نامیده می‌شود. جواب درقبال موجه‌بودن نیز استوار است. بدین ترتیب، اگر جواب به‌ازای هر تحقق‌یافتن از s تقریباً موجه باشد، این حالت نیز استواری مدل نامیده می‌شود. پس بسیار بعید است که جواب مدل II برای همه سناریوهای $s \in \Omega$ ، هم‌وجه و هم‌بهینه باشد. به عبارت دیگر، در یک مدل لازم است که مبادله بین استواری مدل و استواری، بررسی و ارزیابی شود. مدل بهینه‌سازی III که در ادامه آمده است، روشی را برای سنجش این مبادله ارائه می‌کند [۱۶]. چارچوب کلی مدل بهینه‌سازی استوار مالوی و همکاران به شرح زیر است:

لی اظهار کردند که عبارت $\sigma(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_S)$ مالی و همکاران، نیازمند محاسبه‌های بسیار است. پس فرمول‌بندی زیر را به جای آن ارائه دادند [۱۸]:

$$\sigma(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_S) = \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \lambda \times \left| \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s \right| \quad (32)$$

این تابع هدف، همچنان غیرخطی است، اما با افزودن دو متغیر انحراف غیرمنفی، قابلیت تبدیل شدن به تابع خطی را دارد. در این زمینه، یو و لی ادعا کردند که درواقع، به جای حداقل شدن مرجع انحرافات مطلق از میانگین دو تابع فوق، دو متغیر انحراف با توجه به محدودیت‌ها حداقل می‌شود؛ بنابراین، روشی کارا براساس روش حل مسائل برنامه‌ریزی آرمانی ارائه دادند. رویکرد آن‌ها به شرح زیر است [۱۸]:

Model (IV):

$$\text{Min} = \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \lambda \times \left[\sum_{s=1}^S p_s \times \left(\xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s \right) + 2 \times \theta_s \right] \quad (33)$$

subject to $\quad (34)$

$$\xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \theta_s \geq 0 \quad (35)$$

and integer $\theta_s \geq 0$

روش پیشنهادی یو و لی، مدل استوار را به یک مدل خطی تبدیل می‌کند که $n+m$ متغیر اضافی دارد (n تعداد سناریوها و m تعداد محدودیت‌های کنترل است)؛ درحالی‌که مدل پیشنهادی مالی و همکاران $2m+2n$ متغیر نیاز دارد [۱۹].

مدل پیشنهادی استوار

همان‌طور که گفته شد، تابع هدف اول دارای پارامترهای هزینه‌ای است که قطعیت ندارند و می‌توان آن‌ها را به‌روش بهینه‌سازی استوار بازنویسی کرد:

Model (V):

$$\text{Min } Z = \sum_{s \in \Omega} p_s \cdot F_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \cdot \left[\left(F_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \cdot F_s \right) + 2\theta_s \right] \quad (36)$$

S.t :

Model (III):

$$\text{Minimize } \sigma(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_S) + \omega p(Z_1, Z_2, \dots, Z_S) \quad (27)$$

$$\text{subject to } AX = b \quad (28)$$

$$B_s X + C_s Y_s + Z_s = e_s \quad ; \forall s \in \Omega \quad (29)$$

$$X, Y \geq 0 \quad ; \forall s \in \Omega \quad (30)$$

در مدل استوار III، مجموعه‌ای از متغیرهای کنترل برای هر سناریو $s \in \Omega$ است. همچنین مجموعه‌ای از بردارهای خطاست که ناموجهی مجاز در محدودیت‌های کنترل تحت سناریو s را اندازه‌گیری می‌کنند. با توجه به سناریوهای چندگانه، تابع هدف $\xi = C^T X + d^T Y$ متغیری تصادفی است که مقدار هدف $\xi_s = C^T X + d_s^T Y_s$ را با احتمال p_s می‌گیرد. مبادله استواری جواب و استواری مدل، به‌کمک مفهوم تصمیم‌گیری چندمعیاره^{۱۲} تعیین می‌شود. درواقع، مدل بهینه‌سازی استوار فوق قادر است میزان این مبادله را بسنجد [۱۷].

عبارت دوم در تابع هدف یعنی $p(Z_1, Z_2, \dots, Z_S)$

یک تابع جریمه موجه بودن است که به‌منظور جریمه کردن نقض و تخطی از محدودیت‌های کنترل با توجه به بعضی از سناریوها مدنظر قرار می‌گیرد. نقض و تخطی از محدودیت‌های کنترل به این مفهوم است که جواب غیرموجه برای یک مسئله در بعضی از سناریوهای حاصل سنجیده می‌شود. به‌کمک وزن ω ، توازن و مبادله بین استواری جواب و استواری مدل، در فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره مدل می‌شوند.

واژه $\sigma(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_S)$ مالی و همکاران، شامل

مقدار میانگین به‌علاوه مقدار ثابت λ ضرب در واریانس آن است؛ به‌طوری‌که داریم:

$$\sigma(X, Y_1, Y_2, \dots, Y_S) = \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s + \lambda \times \left[\sum_{s=1}^S p_s \times \left(\xi_s - \sum_{s=1}^S p_s \times \xi_s \right)^2 \right] \quad (31)$$

عبارت فوق شامل بخشی است که دارای توان دوم است و در مدل‌سازی، شکلی کوادراتیک دارد. براین‌اساس، یو و

مطالعه موردی

شرکت کاله به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و معتبرترین تولیدکنندگان فرآورده‌های لبنی کشور و یکی از شرکت‌های شناخته‌شده در سطح جهان، فعالیت تولیدی خود را از سال ۶۹ در شهرستان آمل آغاز کرد. در حال حاضر، تمامی خطوط تولید کارخانه، به‌نحوی انعطاف‌پذیر طراحی شده‌اند تا مواد اولیه ورودی‌های مختلف به خط تولید، وارد و محصول‌های متنوع خارج شوند. شرکت کاله، در حال حاضر بیش از ۱۶۰ نوع محصول لبنی تولید می‌کند.

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد شرکت کاله این است که محصول‌های فاسد خود را پس می‌گیرد و در مقابل محصول‌های مرجوعی، محصول سالم به مشتریان عرضه می‌کند. از این‌رو، باید تسهیلی به‌نام مرکز انهدام نیز تأسیس شود تا محصول‌های فاسدشده را در آن محل، معدوم یا به مواد آلی تبدیل کند؛ بنابراین، هشت مکان برای ساخت مرکز انهدام در نظر گرفته شده است که با توجه به محدودیت‌ها، مدیر شرکت باید بهترین محل‌ها برای ایجاد این مراکز انهدام را تشخیص دهد.

شرکت کاله، در حال حاضر هشت مرکز توزیع عمده در سراسر ایران دارد؛ بنابراین، درجهت رویکرد توسعه شرکت، مدیریت سعی در تأسیس مرکز توزیع عمده در هریک از استان‌ها دارد. حال ۲۵ مکان دیگر را در نظر گرفته است و باید بررسی کند که با توجه به محدودیت‌ها، از میان این مکان‌های سی‌وسه‌گانه، کدام‌یک قابلیت استفاده را دارند.

شرکت کاله، در حال حاضر، ۲۰ مرکز توزیع خرده‌فروشی دارد؛ بنابراین، براساس رویکرد توسعه‌ای شرکت، مدیر خواستار احداث ۱۰۰ مرکز است. همچنین با توجه به اینکه شرکت کاله بیش از ۲۰ نوع محصول را تولید می‌کند که از این محصول‌ها، نه گروه از خانواده لبنیات است، مدیر باید بررسی کند که از این نه گروه، کدام‌یک را می‌توان در یک خط تولید و به‌صورت کارگاهی تولید کرد و کدام محصول‌ها باید در کارخانه‌های جداگانه تولید شوند.

از آنجاکه مسئله فوق دارای ۱۵۰ گره است و بررسی ۲۳۷،۶۰۰ حالت مختلف آن ضرورت دارد، مسئله‌ای NP-hard به‌شمار می‌رود؛ بنابراین، برای حل این مسئله می‌توان از روش‌های فراابتکاری بهره برد. الگوریتمی که در این مقاله به کار گرفته شده است، الگوریتم ابتکاری ترکیبی

محدودیت‌های ۲-۲۱

$$F_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \cdot F_s + \theta_s \geq 0 \quad (37)$$

$$\theta_s \geq 0 \text{ and integer} \quad (38)$$

که در آن، p_s احتمال سناریو s است. تابع هدف ذکرشده در معادله ۳۶ شامل مقدار میانگین به‌انضمام مقدار ثابت λ ضربدر واریانس توابع هدف هر سناریو است. معادله‌های ۳۷ و ۳۸ برای خطی‌سازی عبارت واریانس به کار رفته‌اند. درنهایت می‌توان مدل نهایی را به‌صورت زیر ارائه کرد:

Model (VI):

تابع هدف

$$\begin{aligned} \text{Min } zzz = & \sum_{s=1}^S p_s \times F_s + \\ & \lambda \times \left[\sum_{s=1}^S p_s \times \left\{ \left(F_s - \sum_{s=1}^S p_s \times F_s \right) + 2\theta_s \right\} \right] + \\ & \left[\sum_i f_i w_i + \sum_j g_j y_j + \sum_i h_m z_m \right] \end{aligned} \quad (39)$$

محدودیت‌ها

محدودیت‌های ۲-۲۱ و ۳۷-۳۸:

که در عبارت ۳۹ مقدار F_s برابر معادله ۴۰ است:

$$F_s = \left(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 \right) \quad (40)$$

که در آن، موارد Φ_1 تا Φ_8 به‌صورت زیرند:

$$\Phi_1 = \sum_i \sum_j \sum_l c_{ijls} X_{ijls} \quad (41)$$

$$\Phi_2 = \sum_j \sum_k \sum_l \alpha_{jkls} U_{ijkls} \quad (42)$$

$$\Phi_3 = \sum_k \sum_j \sum_l b_{kjl} Q_{kjl} \quad (43)$$

$$\Phi_4 = \sum_j \sum_i \sum_l e_{jils} V_{jils} \quad (44)$$

$$\Phi_5 = \sum_j \sum_m \sum_l p_{jm} T_{jm} \quad (45)$$

$$\Phi_6 = \sum_i \sum_j \text{toc}_{ijs} (hh_{ij} + hh_{ji}) \quad (46)$$

$$\Phi_7 = \sum_j \sum_k \text{toc}_{jks} (hh_{jk} + hh_{kj}) \quad (47)$$

$$\Phi_8 = \sum_j \sum_m \text{toc}_{jms} hh_{jm} \quad (48)$$

انجماد تدریجی ذوب فلزها الگوبرداری شده است. در الگوریتم انجماد تدریجی، کار با یک جواب اولیه آغاز می شود و با جست و جوی همسایگی بهبود می یابد. همچنین از پارامتر دما برای کنترل الگوریتم در طول بهبود جواب مسئله استفاده می شود. جایگاه مولکول ها نشان دهنده متغیرهای تصمیم و میزان نظم و آرایش مولکول ها همان میزان بهینگی جواب است. پارامتر دما تشبیهی از دمای جسم و میزان کاهش دما بیانگر سرعت الگوریتم است. امروزه الگوریتم انجماد تدریجی، به عنوان یک تکنیک قوی جست و جوی همسایگی اثبات شده است که توانایی حل مسائل ترکیبی مانند وسائل نقلیه، جابجایی تسهیلات، زمان بندی تولید و مسائل مشابه را دارد [۲۱].

در هر مرحله، در همسایگی جواب جاری، جوابی جدید تعیین می شود و اگر دارای هزینه ای کمتر یا برابر با هزینه جواب جاری باشد، پذیرفته می شود. اگر هزینه ای بیشتر از هزینه جواب جاری داشته باشد، با احتمال پذیرفته می شود. با افزایش اختلاف هزینه دو جواب و کاهش دمای الگوریتم، این احتمال کاهش می یابد.

پارامترهای الگوریتم، به صورت زیر در نظر گرفته شده اند:

i. برای ایجاد جواب اولیه از روش ابتکاری زیر استفاده شده است:

- ✓ از هشت مرکز تولیدی، چهار مرکزی که کمترین هزینه را دارند ۱ و بقیه ۰ شوند.
- ✓ از ۳۳ مرکز توزیع، ۱۰ مرکزی که کمترین هزینه را دارند ۱ و بقیه ۰ شوند.
- ✓ از ۱۰۰ مرکز خرده فروش، ۳۰ مرکزی که کمترین هزینه را دارند ۱ و بقیه ۰ شوند.
- ✓ از هشت مرکز انهدام، دو مرکزی که کمترین هزینه را دارند ۱ و بقیه ۰ شوند.
- ✓ از 33×8 راه موجود بین مرکز تولیدی و توزیع، ۸۸ راهی که کمترین هزینه را دارند ۱ و بقیه ۰ شوند.
- ✓ از 33×100 راه موجود بین مرکز توزیع و خرده فروش، ۱۰۰ راهی که کمترین هزینه را دارند ۱ و بقیه ۰ شوند.
- ✓ از 33×8 راه موجود بین مرکز توزیع و انهدام، ۲۰ راهی که کمترین هزینه را دارند ۱ و بقیه ۰ شوند.

انجماد تدریجی^{۱۴} و نیز عملگر ژنتیک^{۱۵} است. برای این کار، ابتدا مسئله در اندازه کوچک، هم به وسیله نرم افزار بهینه سازی GAMS 24.1.2 و هم با الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی رمزگذاری شده است تا کارایی الگوریتم فراابتکاری بررسی شود. جواب بهینه به کمک الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی به دست می آید.

الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی پیشنهادی

با توجه به پیچیدگی مسئله، الگوریتم های جست و جوی دقیق، برای حل آن به زمان محاسباتی زیادی نیاز دارند و این زمان حل، با بزرگ شدن ابعاد مسئله به صورت نمایی زیاد می شود. در بعضی موارد نیز یافتن جواب بهینه عملاً امکان پذیر نیست؛ بنابراین، الگوریتم های ابتکاری که در پی به دست آوردن جواب با کیفیت مناسب در زمان معقول هستند، در حل این مسائل، کاربرد بسیاری می یابند. به همین منظور، در این مطالعه یک الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی، براساس منطق و مفاهیم الگوریتم ژنتیک ارائه شده و جواب بهینه حل مدل ریاضی مقایسه و ارزیابی شده است. از ویژگی های این الگوریتم آن است که جواب اولیه، با استفاده از یک رویکرد ابتکاری کارآمد به دست می آید. آن گاه در ادامه، الگوریتم انجماد تدریجی، با بهره گیری از این جواب اولیه، بررسی همسایگی را آغاز می کند؛ در صورتی که جواب بهینه قابل قبولی ندهد، از عملگر جهش - که از مفاهیم پایه ای الگوریتم ژنتیک است - استفاده می کند و با ایجاد یک جمعیت جدید، پس از کاهش دما، الگوریتم دوباره اجرا می شود. این فرایند تا زمانی که به یک تعداد تکرار معین برسد، ادامه دارد. از دیگر ویژگی های این الگوریتم آن است که به دلیل پذیرش جواب های بد با یک احتمال معین، توانایی خروج از بهینه محلی را نیز دارد [۲۰]. در این پژوهش، برای بهبود جواب مسئله و ایجاد همسایگی بهتر و همچنین به خاطر فرار از خطر بهینگی محلی، از عملگر جهش - که در الگوریتم ژنتیک مرسوم است - استفاده می شود.

تعریف پارامترهای مدل و الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی

الگوریتم انجماد تدریجی، از پدیده سرمایش (تبرید) و

اندازه‌های کوچک، هم به کمک نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS 24.1.2 و هم به روش الگوریتم ترکیبی، حل و نتایج مقایسه شدند. با توجه به جدول ۱ در بخش پیوست و شکل ۲ واضح است که الگوریتم ارائه شده اختلاف ناچیزی با حل دقیق مدل دارد و می‌توان گفت این الگوریتم کارایی مناسب دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که این الگوریتم در اندازه‌های بزرگ قابلیت استفاده دارد و مطالعه موردی را می‌توان با این الگوریتم حل کرد.

پس از حل مطالعه موردی، نتایج زیر حاصل شد:
الف) مقدار تابع هدف در این مطالعه، ۲۸۱۹۵۷۷۴/۱۰۳۲۱۱۶ واحد پولی است.

ب) علاوه بر کارخانه ۱ که در حال حاضر فعال است، کارخانه ۲ نیز باید راه‌اندازی شود.

ج) از بین ۳۳ مرکز پیشنهادی توزیع و جمع‌آوری، مراکز ۲، ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۵، ۲۷ و ۳۱ اقتصادی باید احداث شوند.

د) از بین ۸ مرکز پیشنهادی انهدام، علاوه بر مرکز ۱- که در حال حاضر فعال است- مرکز ۲ نیز باید احداث شود.
ه) از بین ۹ دسته محصول مورد نظر، راه‌اندازی خط تولید محصول ۴ در کارخانه تولیدی فعلی، غیراقتصادی است.

و) از کل مقدار هزینه تابع مدل- که ۳۳۵۰۰۰۰/۱۰۳۲ واحد پولی است- ۲۸۱۹۵۷۷۴/۱۰۳۲۱۱۶ واحد پولی صرف ساخت کارخانه جدید شماره ۲، مقدار ۱۳،۶۰۰،۰۰۰ واحد پولی صرف راه‌اندازی ۸ مرکز بهینه توزیع و جمع‌آوری، ۹۰۰ واحد پولی صرف احداث مرکز انهدام ۲ شده و باقی هزینه- که ۱۱۲۴۴۸۷۴/۰۰۱۱۰۱۱۶ واحد پولی است- برای ساخت راه‌ها و مسیریابی و همچنین حمل‌ونقل صرف شده است.

ز) زمان حل مسئله مطالعه موردی با الگوریتم فراابتکاری ترکیبی انجماد تدریجی، ۴۰۷۴/۵۵۶۹۲۸ ثانیه است. این زمان، در سیستمی با مشخصات با مشخصات core 2 Due @ 2.0 GHz and 8GB RAM تحت سیستم عامل ویندوز ۷ به دست آمده است.

ح) دمای نهایی الگوریتم ترکیبی انجماد تدریجی، تقریباً صفر (10^{-14}) است.

ط) با توجه به شکل ۲ و جدول ۱، رفتار تابع هدف در روش حل دقیق و روش فراابتکاری، مشابه است و اختلافی

ii. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در این مقاله برای ایجاد همسایگی از عملگر جهش استفاده شده است؛ بنابراین، با توجه به ماهیت متغیرها از عملگر جهش به صورت زیر استفاده شده است:

✓ تکنیک ۱ برای متغیرهای صفر و یک: جهش به صورت معکوس کردن یک بیت شامل تغییر ۰ به ۱ و از ۱ به ۰ باشد؛

$$X_i^{new} = 1 - X_i \rightarrow \begin{cases} X_i = 0 \text{ Mutate } X_i^{new} = 1 \\ X_i = 1 \text{ Mutate } X_i^{new} = 0 \end{cases}$$

✓ تکنیک ۲ برای متغیرهای عدد صحیح: برای متغیرهای عدد صحیح به صورت زیر عمل شده است:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$$X_i \text{ Mutate } X_i^{new}$$

در این حالت به صورت تصادفی، عضوی از مجموعه زیر انتخاب می‌کنیم:

$$X_i^{new} \in X - \{X_i\}$$

✓ تکنیک ۳ برای متغیرهای پیوسته: برای عمل جهش بر متغیرهای پیوسته، مقداری تصادفی از توزیع نرمال استاندارد به متغیر مورد نظر اضافه می‌شود:

$$X_i^{new} \sim N(X_i, \sigma^2)$$

$$X_i^{new} = X_i + \sigma N(0, 1)$$

مقدار σ معمولاً با عرض فضای ممکن برای X_i در نظر گرفته می‌شود:

$$\sigma = \mu(X_{Max} - X_{Min}) \quad ; \mu = 0.1$$

iii. دمای اولیه الگوریتم $T_0 = 70$ در نظر گرفته شده است.

iv. روش کاهش دما به صورت $T = \alpha T_0$ و نرخ کاهش دما $\alpha = 0.99$ است.

v. درصد عملگر جهش برابر $mu = 0.2$ است.

vi. روش توقف الگوریتم، رسیدن به یک تکرار مشخص است.

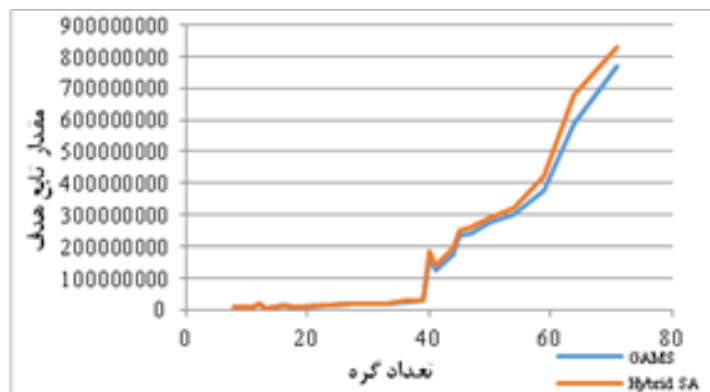
نتایج عددی و تحلیل مطالعه موردی

در ابتدا برای اثبات کارایی الگوریتم ترکیبی، مدل VI را در

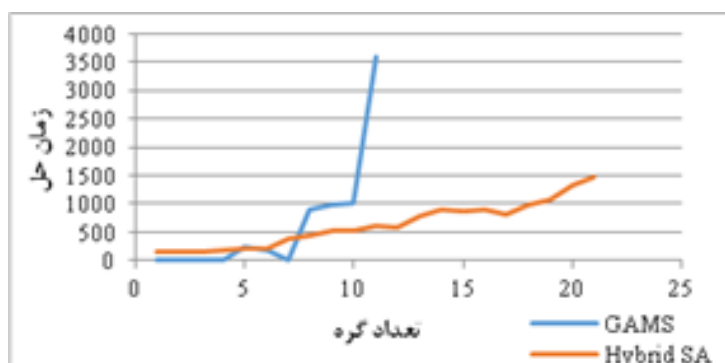
کوچک زمان، حل روش دقیق به مراتب کمتر از روش فراابتکاری ترکیبی است، اما هنگامی که بعد مسئله از تعدادی گره معین بزرگ تر می شود، زمان حل فراابتکاری ترکیبی، به مراتب کمتر از روش دقیق به کمک GAMS است.

که در انتهای نمودار وجود دارد، به این دلیل است که در اندازه های بزرگ تر GAMS، قادر به حل نهایی مدل نیست؛ بنابراین، جواب فراابتکاری، با حد پایینی از حل بهینه دقیق مقایسه شده است.

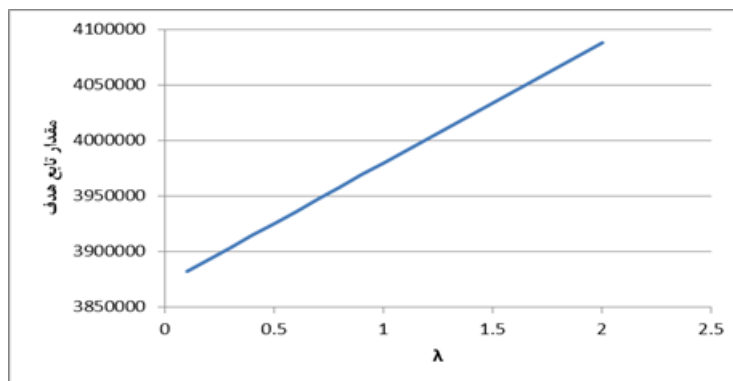
ی) با توجه به شکل ۳ و جدول ۱، در اندازه های



شکل ۲. نمودار مقایسه مقدار تابع هدف دو روش دقیق و فراابتکاری



شکل ۳. نمودار مقایسه زمان حل دو روش دقیق و فراابتکاری ترکیبی



شکل ۴. نمودار تحلیل حساسیت پارامتر λ

با توجه به اهمیت و نقش کلیدی پارامتر λ در مدل نهایی VI و تأثیر بسزای آن بر جواب مدل، تحلیل

شرکت کالۀ آمل و برای دستیابی به جواب بهینه، از الگوریتم فراابتکاری ترکیبی انجماد تدریجی استفاده شد. این شبکه، قابلیت کاربرد در صنایع مختلف تولیدی، نظیر صنایع تولید تجهیزات الکترونیکی و دیجیتالی، تولید وسایل نقلیه و سایر صنایع مشابه را دارد که در آن‌ها، به‌کارگیری درست مدل، صرفه‌جویی‌های هنگفتی را به‌همراه خواهد داشت.

از جمله موضوع‌هایی که برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود این است که در صورت برآورده‌نشدن تقاضای مشتریان، هزینه کمبود به تابع هدف اضافه شود. این هزینه ممکن است در سناریوهای متعدد، مقادیر متفاوت داشته باشد. از جمله مسائل دیگری که در آینده می‌توان درباره آن بحث کرد، در نظر گرفتن مراکز تهیه مواد اولیه است. همچنین می‌توان مباحث زمان‌بندی تولید و دوره‌های مختلف تولیدی را نیز به مدل افزود و جامعیت بیشتری به مدل بخشید.

حساسیت جواب بهینه مدل مذکور با توجه به تغییرهای انجام شده است که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش مقدار عددی پارامتر ثابت λ ، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، میزان تابع هدف، به پارامتر وزنی واریانس حل (λ) - که از سوی تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود - حساس است و تغییرهای آن، بر تابع هدف تأثیر شایان توجهی دارد؛ بنابراین، تعیین مناسب و کارآمد این پارامتر، کیفیت جواب حل را به‌اندازه شایان توجهی بهبود می‌بخشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا یک شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس طراحی شد و سپس با توجه به ویژگی غیرقطعی بودن پارامترها، مدلی غیرقطعی برای این شبکه ارائه شد. در نهایت، به منظور دستیابی به یک جواب بهینه استوار با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار، مدل قطعی شد. برای اعتبارسنجی مدل، از یک مطالعه موردی در

مراجع

1. Mirghafoori, H. (2001). "Mathematical planning of supply chain of Yazd tire industry." Ph.D. thesis in production management (in Persian). Tabiat Modarress University.
2. Teimoori, E., Shafii, J. and Kalb Khani, K. (2002). "Simultaneous selecting and developing of suppliers in fuzzy state." (in Persian). The first national conference of logistics and supply chains.
3. Sepehri, Jafarie, (2003). "A solution to timely supply of required components of production systems by using mathematical model and Ant algorithm." Journal of Faculty of Engineering, University of Tehran, JFE, Vol. 38, No. 1, PP. 145-160.
4. Pishvae, M.S., Jolai, F. and Razmi, J. (2009). "A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design." Journal of Manufacturing Systems, Vol. 28, PP. 107-114.
5. Pokhare, S. and Mutha, A. (2009). "Perspectives in reverse logistics: a review." Resources, Conservation and Recycling, Vol. 53, No. 4, PP. 175-182.
6. Necati, A. and Deniz, A. (2008). "Locating collection centers for distance- and incentive-dependent returns." International Journal of Production Economics, PP. 316-333.
7. Burcu, B. and Keskin, H. Ü. (2007). "Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem." European Journal of Operational Research, PP. 663-682.
8. Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M. and Wassenhove, L. (2001). "The impact of product recovery on logistics network design." Production and Operations Management, Vol. 10, No. 2, PP. 156-173.
9. Farahani, Z. and Pishvae, M.S. (2008). "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design." Journal of Faculty of Engineering, University of Tehran, JFE, Vol. 42, No. 7.

10. Mortiz, F., Hans, R. K., Rommert, D., Simme, D. and Flapper, P. (2000). "A characterisation of logistics networks for product recovery." *Omega*, PP. 653–666.
 11. Pishvae, M.S., Farahani, R.Z. and Dullaert, W. (2010). "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design." *Computers & Operations Research*, Vol. 37, PP. 1100–1112.
 12. El-Sayed, M., Afia, N. and El-Kharbotly A. (2010). "A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk." *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, PP. 423–431.
 13. Sonia, R., Cardoso, A., Paula, F.D., Barbosa, P. and Susana, R. (2013). "Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty." *European Journal of Operational Research*, Vol. 226, PP. 436–451.
 14. Wei, Z. and Di, X. (2014). "Integrating the logistics network design with order quantity determination under uncertain customer demands." *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, PP. 168–175.
 15. Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A. (1995). "Robust optimization of large scale systems." *Operations Research*, Vol. 43, PP. 264–281.
 16. Leung, S.C.H., Tsang, S.O.S., Ng, W.L. and Wu, Y. (2007). "A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment." *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, PP. 224–238.
 17. Mulvey, J.M. and Ruszczyński, A. (1995). "A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization." *Operations Research*, Vol. 43, PP. 477–490.
 18. Yu, C.S. and Li, H.L. (2000). "A robust optimization model for stochastic logistic problems." *International Journal of Production Economics*, Vol. 64, PP. 385–397.
 19. Li, H.L. (1996). "An efficient method for solving linear goal programming problems." *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 90, PP. 465–469.
 20. Pham, D.T. and Karaboga, D. (2000). "Intelligent Optimisation Techniques: Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and neural networks." London Springer.
 21. Varadharajan, T.K. and Chandrasekharan, R. (2005). "A Multi-Objective Simulated-Annealing Algorithm for Scheduling in Flowshops to Minimize the Makespan and Total Flowtime of Jobs." *European Journal of Operational Research*, Vol. 167, PP. 772–795.
-

پیوست

	N.O	node	product	GAMS		Hybrid SA		Comparison	
				value	time	value	time	value	time
اندازه کوچک	۱	۸	۲	۶۱۷۱۴۹۴.۲۲۰	۰.۰۵۰	۶۵۲۸۸۴۸.۵۳۴	۱۳۷.۵۲۴	۰.۰۵۸	۲۷۴۹.۴۷۱
	۲	۱۱	۲	۷۴۲۸۰۱۸.۵۲۰	۰.۱۹۰	۷۵۱۳۴۰۲۸.۹۰	۱۴۶.۵۲۰	۰.۰۱۱	۷۷۰.۱۵۸
	۳	۱۲	۲	۱۶۸۴۱۰۹۶.۰۰۰	۰.۴۷۰	۱۸۷۸۵۷۶۴.۲۱۳	۱۵۷.۶۷۹	۰.۱۱۵	۳۳۴.۴۸۷
	۴	۱۳	۳	۳۹۷۹۷۲۷.۸۵۳	۰.۱۴۰	۳۹۲۵۱۰۰.۹۶۴	۱۷۵.۱۴۲	-۰.۰۱۴	۱۲۵۰.۰۱۴
	۵	۱۶	۲	۱۳۷۶۸۵۹۷.۰۰۰	۲۴۷.۳۷۰	۱۴۹۳۰۷۲۸.۴۹۵	۱۹۶.۹۶۲	۰.۰۸۴	-۰.۲۰۴
	۶	۱۶	۳	۱۴۶۰۵۵۱۳.۸۹۰	۱۸۶.۱۴۰	۱۵۰۶۵۷۴۶.۸۴۰	۱۹۳.۱۶۷	۰.۰۳۲	۰.۰۳۸
	۷	۱۸	۳	۷۳۳۱۰۹۳.۳۵۹	۱۰.۳۸۰	۸۸۲۶۰۳۴.۷۳۰	۳۶۵.۱۴۸	۰.۲۰۴	۳۴.۱۷۸
	۸	۲۷	۴	۱۸۶۶۰۸۰۴.۲۶۵	۹۰.۲۵۶۰	۱۹۸۷۴۱۹۶.۴۴۹	۴۲۳.۵۴۷	۰.۰۶۵	-۰.۵۳۱
اندازه متوسط	۹	۳۳	۴	۱۹۷۱۹۷۱۴.۶۹۱	۹۷۲.۰۰۰	۱۹۹۶۰۱۲۱.۵۹۳	۵۰۸.۴۰۵	۰.۰۱۲	-۰.۴۷۷
	۱۰	۳۶	۴	۲۵۲۴۸۷۶۰.۰۹۷	۱۰۰۰.۰۱۰	۲۹۳۷۷۰۵۸.۷۹۵	۵۳۱.۶۹۲	۰.۱۶۴	-۰.۴۶۸
	۱۱	۳۹	۷	۲۷۰۵۶۳۹۹.۶۰۰	۳۵۹۹.۹۹۰	۳۰۳۱۸۳۳۰.۹۹۶	۵۹۸.۰۰۳	۰.۱۲۱	-۰.۸۳۴
	۱۲	۴۰	۷	۱۶۱۶۷۲۹۲۸.۱ ⁺	*	۱۸۶۲۳۷۰.۷۴۸	۵۸۹.۳۴۲۶۵۶	۰.۱۵۱۸۷۵۴۴	*
	۱۳	۴۱	۷	۱۲۶۷۰۱۹۵۴.۴ ⁺	*	۱۳۸۱۶۸۳۵۷.۶	۷۸۵.۴۱۹۵۹	۰.۰۹۰۴۹۹۰۲	*
	۱۴	۴۴	۷	۱۷۵۴۸۶۹۱۲.۶ ⁺	*	۱۹۲۷۴۶۶۶۲.۴	۸۸۴.۸۵۱۸۴۴	۰.۰۹۸۳۵۳۴۹	*
	۱۵	۴۵	۷	۲۳۷۴۳۶۶۷۲.۳ ⁺	*	۲۵۰۶۸۵۸۳۸.۶	۸۷۷.۷۱۰۵۳۱	۰.۰۵۵۸۰۰۸۴	*
اندازه بزرگ	۱۶	۴۷	۷	۲۳۹۱۱۴۴۲۵ ⁺	*	۲۶۰۴۴۸۵۴۸	۹۰۴.۳۶۱۷۱۶	۰.۰۸۹۲۲۱۴	*
	۱۷	۵۰	۷	۲۷۷۹۴۰۸۸۶.۶ ⁺	*	۲۹۰۰۴۴۵۳.۳	۸۱۴.۵۰۱۷۸۷	۰.۰۴۳۵۴۷۳۷	*
	۱۸	۵۴	۷	۲۹۹۳۳۲۳۲.۴ ⁺	*	۳۲۰۴۰۹۱۴۱.۳	۹۷۵.۶۹۱۹۰۶	۰.۰۷۰۴۱۳۰۹	*
	۱۹	۵۹	۷	۳۷۵۲۰۲۷۲۲ ⁺	*	۴۲۰۵۸۷۸۶۳.۹	۱۰۷۴.۲۶۰۷	۰.۱۲۰۹۶۱۶۵	*
	۲۰	۶۴	۷	۵۸۶۵۱۲۱۷۳.۴ ⁺	*	۶۷۶۸۹۳۹۳۶.۱	۱۳۱۵.۸۶۸۰۸	۰.۱۵۴۱۰۰۴	*
	۲۱	۷۱	۷	۷۶۹۷۲۹۷۲۷.۴ ⁺	*	۸۳۱۰۳۶۵۳۷.۲	۱۴۸۱.۰۹۷۴۹	۰.۰۷۹۶۴۷۱۹	*

جدول ۱. نتایج مقایسه زمان حل و مقدار تابع هدف به دو روش دقیق و فراابتکاری تریبی SA و درصد اختلاف در زمان حل و مقدار تابع هدف
⁺ (به دلیل قابلیت نداشتن GAMS در تعیین جواب بهینه سراسری، برای مقایسه با فراابتکاری، از مقدار حد پایین حاصل از آزادسازی متغیرهای صحیح استفاده

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Aras
2. Taboo Search
3. Uster
4. Fleischmann
5. Stochastic Programming
5. Fuzzy Programming
6. Stochastic Dynamic Programming
7. Robust
8. Scenario Based Robust Optimization
9. Control Variables
10. Structural Constraints
11. Control Constrains
12. Multiple Criteria Decision Making
13. Simulated Annealing (SA)
14. Genetic Algorithm (GA)