

فصلنامه علمی مطالعات مدیریت صنعتی - سال هفدهم، شماره ۵۳، تابستان ۹۸
صفحات ۲۴۶-۲۱۹

مسیریابی - مکان‌یابی مواد خطرناک با در نظر گرفتن شاخص ریسک در شبکه هاب با استفاده از الگوریتم فراابتکاری

علی محتشمی*، امیرحسین نیکنام فر**

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۱۷

چکیده

محصولات خطرناک به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی خود، ریسک قابل توجه‌ای بر ایمنی مردم و محیط زیست تحمیل می‌کنند. مسیریابی حمل و نقل این گونه مواد پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به مواد معمولی دارد. تلفیق دو موضوع مساله مکان‌یابی و مساله مسیریابی، سیستم یکپارچه‌ای به نام مساله مکان‌یابی- مسیریابی را به وجود می‌آورد. این گونه مسائل به تعیین همزمان تعداد و مکان بهینه تسهیلات و همچنین تعداد بهینه وسایل نقلیه و مسیر آنها می‌پردازد. در این تحقیق هدف طراحی یک شبکه برای حمل و نقل مواد خطرناک بوده و دربرگیرنده سطوح تامین، توزیع (هاب) و مشتری می‌باشد. لذا یک مدل ریاضی به منظور کمینه‌سازی همزمان هزینه‌ها و ریسک ارائه می‌شود. کالای خطرناک از تامین‌کنندگان به هاب‌ها ارسال می‌گردد و از طریق مسیریابی توسط حمل و نقل جاده‌ای به مشتریان تحویل می‌گردد. هاب‌ها در مدل پیشنهادی مکان‌یابی می‌گردند. جهت اعتبارسنجی مدل، کد در نرم‌افزار GAMS تهیه شده و برای حل دقیق، مسائل نمونه‌ای با ابعاد متنوع به شکل تصادفی تولید می‌گردد. با توجه به $NP-Hard$ بودن مسئله، یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک برای حل در ابعاد بزرگ ارائه و در پایان، نتایج حاصل از حل دقیق با الگوریتم پیشنهادی مقایسه می‌گردد.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی هاب، مسیریابی وسایل نقلیه، حمل و نقل مواد خطرناک، ریسک، الگوریتم فراابتکاری

* دانشیار گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران (نویسنده مسئول)

mohtashami07@gmail.com

** کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، قزوین، ایران

مقدمه

طی چند دهه گذشته، روند افزایشی در توجه به مباحث مدیریت زنجیره تامین بوجود آمده است. تلفیق دو موضوع تحت عنوان مسئله مکان‌یابی و مسئله مسیریابی وسیله نقلیه طی دهه‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. بطور کلی مدل‌های ترکیبی مکان‌یابی و مسیریابی به تعیین همزمان تعداد و مکان بهینه تسهیلات و همچنین تعداد بهینه وسایل نقلیه و مسیر آنها می‌پردازد. در این نوع مسائل هزینه‌های مکان‌یابی قابل مقایسه با هزینه‌های مسیریابی می‌باشد (رضوی و همکاران، ۱۳۹۰). لازم است این دو در یک مدل یکپارچه مورد بررسی قرار بگیرند و تاثیر گذاری هزینه‌های حمل و نقل در انتخاب نقاط توزیع نادیده گرفته نشود. تعدادی از محققین با ایده‌ی نگاه یکپارچه به دو مساله مکان‌یابی و مسئله مسیریابی در یک مدل مخالف بوده‌اند. این افراد معتقدند که مکان‌یابی، یک مسئله استراتژیک و مسیریابی، یک مسئله تاکتیکی می‌باشد؛ به عبارت دیگر، مسیریابی تصمیمی است که می‌تواند به طور متناوب در دوره‌های زمانی مورد بازنگری قرار بگیرد. با وجود این، یافته‌های اخیر نشان می‌دهد که در نظریه‌ی این دو مسئله به صورت یکپارچه و در یک چارچوب تصمیم‌گیری جامع می‌تواند هزینه‌های شبکه توزیع را در افق زمانی طولانی کاهش داده و موجب ارتقا بهره‌وری شود (سمائی، ۱۳۹۱). مساله مورد نظر این تحقیق، مکان‌یابی و مسیریابی مواد خطرناک در قالب یک شبکه‌ی هاب با در نظر گرفتن شاخص ریسک است. در این مساله، با در نظرگیری روابط متقابل بین مکان تسهیلات و مسیرهای حمل و نقل، دید قوی‌تری در اختیار تحلیل‌گران قرار داده می‌شود.

روزانه میلیون‌ها تن کالا در راه‌های سراسر کشور جابجا می‌شود که بخشی از این محمولات را کالاهای خطرناک تشکیل می‌دهند. جابجایی مواد خطرناک که به اختصار به آن‌ها HazMat^۱ یا HM گفته می‌شود، با توجه به ماهیت خطرآفرینی و تبعات ناشی از حوادث مرتبط با آنها از اهمیت خاصی برخوردار است و باید با شرایط و تدابیر ویژه‌ای جابجا شوند (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲).

1. Hazardous Materials

در اکثر موارد، محل تولید و مصرف مواد خطرناک یکی نیست و باید این مواد را از محل تولید به محل مصرف منتقل کرد. به دلیل ماهیت خطرناک این مواد، باید در کلیه مراحل تولید، انبار و حمل و نقل این مواد، شاخص‌ها و معیارهای ایمنی را مدنظر داشت (ارکوت و آلپ^۱، ۲۰۰۷). شرکت‌های حمل و نقل، عموماً به دنبال مسیریابی با زمان سفر و سوخت پایین تر هستند. برخی مسیرها کوتاه‌ترند ولی از میان جمعیت بیشتری عبور می‌کنند. برخی دیگر طولانی‌ترند ولی از جمعیت قابل توجهی عبور نمی‌کنند و برخی مسیرها از آزادراه‌ها می‌گذرند و علی‌رغم کاهش زمان سفر می‌توانند با خطر ریسک بالای حادثه توأم باشند (ارکوت و همکاران^۲، ۲۰۰۷).

ارکوت و آلپ در سال ۲۰۰۷، معتقدند تحلیل ریسک، مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی از جمله مسائل مهم در حمل و نقل مواد خطرناک است. در میان مسائل مکان‌یابی تسهیلات، مساله مکان‌یابی هاب^۳ یکی از موضوعات جدید است. عیدی و میرآخوری (۱۳۹۱) هاب را یک واژه عمومی می‌دانند که به یک مکان یا یک نقطه اشاره دارد؛ محلی که کالا یا اطلاعات فراهم شده از چندین منبع در آنجا جمع شده و سپس به سوی دیگر هاب‌های شبکه یا مقصد نهایی انتقال داده می‌شود. به بیان دیگر هاب‌ها کار یکپارچه‌سازی و تغییر جهت جریان را هنگامی که با تعداد زیادی جفت گره‌های مبدأ^۴ - مقصد^۵ سروکار داریم، انجام می‌دهند (عیدی و برزگر، ۱۳۹۴). در این گونه مسائل، مجموعه‌ای از مشتری‌ها با تقاضای معلوم و مجموعه‌ای از مکان‌ها برای پاسخ‌گویی به تقاضای مشتری وجود دارد و به دنبال انتخاب بهترین مکان و همگام با آن به دنبال انتخاب بهترین مسیرها هستیم (سمائی، ۱۳۹۱).

مسیریابی مواد خطرناک، پیچیدگی‌های بسیار بیشتری نسبت به مواد معمولی دارد، زیرا در این نوع مسیریابی، علاوه بر هزینه‌های حمل و نقل، ریسک حمل و نقل مواد خطرناک در مسیرها نیز باید در نظر گرفته شود (توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). مفهوم ریسک در حمل و نقل

1. Erkut & Alp
2. Erkut et al.
3. ub Location
4. Origin
5. Destination

مواد خطرناک، احتمال وقوع حوادث در بازه‌های زمانی متوالی است (ایسفانده و همکاران^۱، ۲۰۱۶).

یکی از مهمترین خطرات موجود در حمل و نقل مواد خطرناک، تصادفات جاده است که می‌تواند اثرات مخربی را بر محیط و ایمنی جاده‌ها داشته باشد. با استفاده از تکنیک‌های مدیریت ریسک می‌توان شرایط مسیر و نحوه حمل مواد را مورد ارزیابی قرار داد و قبل از اینکه سبب بروز حادثه ای شود آنرا شناسایی و کنترل نمود.

به طور قطع، برنامه ریزی اصولی و ایمنی برای مسیرهای حمل و نقل و وسایل نقلیه، با در نظر گرفتن نوع کاربری در مناطق عبوری، مدیریت ریسک در حمل و نقل مواد خطرناک را به عنوان بخش اصلی در بر می‌گیرد. بطور مثال، مصرف فرآورده‌های نفتی روز به روز در حال افزایش می‌باشد، به طوریکه با خطوط لوله موجود رساندن فرآورده‌ها برای شهرها و مناطق کشور امکان‌پذیر نمی‌باشد و با توجه به اینکه قسمت‌های عمده‌ای از جمعیت کشور ما در مناطق کوهستانی سکونت دارند، موضوع سوخت رسانی و حمل و نقل جاده‌ای مواد سوختی ضمن مشکلات فراوان از اهمیت خاص در ساختار تامین انرژی کشور برخوردار می‌باشد.

چنانچه آمار نشان می‌دهد سالانه چهار میلیون تن مواد خطرناک در سطح جهان جابه‌جا می‌شوند. همچنین در اغلب موارد فاصله‌ی محل تولید مواد خطرناک با محل مصرف آن بسیار زیاد است. علاوه بر جنبه‌های اقتصادی حمل و نقل مواد خطرناک، شاخص‌های انسانی و زیست محیطی نیز می‌بایست در نظر گرفته شود. تقریباً تمامی کالاهای خطرناک قابل حمل و جابه‌جایی هستند، به شرط آن‌که کلیه‌ی الزامات ایمنی مربوط به آن رعایت گردد. عدم رعایت فاکتورهای ایمنی در طی حمل و نقل مواد و کالاهای خطرناک می‌تواند منجر به بروز حوادث و حتی فجایع جبران‌ناپذیر گردد (ایکسای و همکاران^۲، ۲۰۱۲).

معیارها و پارامترهای مختلفی در ارزیابی و مدیریت ریسک پخش فرآورده‌های خطرناک وجود دارد که به دو دسته معیارهای ترافیکی و معیارهای ایمنی تقسیم می‌گردد؛ معیارهای ترافیکی که شامل عوامل موثر بر خطرات برای انسان‌ها و محیط زیست هستند عبارتند از،

1.Esfandeh et al.

2.Xie et.al

ترافیک مسیر (سرعت عبور و مرور)، تراکم مسیر (تعداد خودروی عبوری)، تعداد سرویس ساعت راننده، میزان تصادفات (تعداد تصادفات در یک سال)، وضعیت روسازی مسیر (سطح جاده که به سه دسته آسفالت نو، آسفالت کهنه، خاکی) نوع فرآورده، محیط اطراف مسیر تردد (مسکونی، عوارض کشاورزی، عوارض محیط زیستی، بیابان و کویر)، موقعیت مقصد (خارج از شهر / داخل شهر)، نوع جاده (که شامل؛ جاده دوطرفه، بزرگراه، اتوبان، کوهستانی)، و شرایط جوی منطقه. معیارهای ایمنی شامل وجود وجود سیستم مانع از پخش فرآورده در حوادث و سیستم‌های کنترلی ترافیکی، وجود پلیس ترافیکی، وجود دوربین، وجود گاردریل، وجود تیم امداد، وجود سیستم کنترل GPS می‌باشند.

با توجه به کاربرد این مساله در دنیای واقعی، در این پژوهش سعی شده است تا با بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی و راه‌حل‌های پیشنهادی رویکردی مناسب برای برخورد با اینگونه مسائل ارائه شود.

مرور ادبیات

اولین مقاله برای حل یک مساله کلی مکان‌یابی مسیریابی به وسیله‌ی روش‌های دقیق توسط لاپورته و نوبرت^۱، در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. در این روش از یک انبار و تعداد ثابتی وسیله نقلیه استفاده شده و الگوریتم شاخه و حد برای حل به کار گرفته شد. در پژوهشی که توسط لاپورته و همکارانش، در سال ۱۹۸۹ ارائه شده یک خانواده از مسایل مکان‌یابی - مسیریابی را مطرح کرده که از نوع تصادفی (احتمالی) است. یعنی در واقع میزان تقاضای هر مشتری مشخص نیست و به صورت یک متغیر تصادفی منظور می‌شود. در نهایت با توجه به اینکه روش‌های دقیق بینش وسیع و کافی را در مورد این گونه مسائل برای ما باز می‌کند، اما به علت پیچیدگی مسایل مکان‌یابی - مسیریابی این گونه روش‌ها فقط قادر به حل مسایل با حجم کوچک هستند. در پژوهشی که توسط "وو و همکارانش"^۲ (۲۰۰۲) انجام شده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به کار گرفته شده و دیده می‌شود که این روش برای بسیاری از مسایل

1. Laporte & Nobert
2. Wu et.al

ترکیبی مشکل و پیچیده مثل مساله مکان‌یابی - مسیریابی نتایج خوبی را ارائه داده است. پرینس و همکاران^۱ (۲۰۰۶) در تحقیق خود به ارائه مدل ریاضی برای مساله مکان‌یابی - مسیریابی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت که شامل دپو و وسیله نقلیه می‌شد، پرداختند. آن‌ها مدل خود را با ترکیب رویکرد جستجوی توافقی تصادفی حریصانه و یک فرایند یادگیری و یک مکانیزم مرتبط کردن مسیرها پیشنهاد کردند نگوین و همکاران^۲ (۲۰۰۷) یک مساله مکان‌یابی مسیریابی دو لایه را در نظر گرفته‌اند. در لایه اول یک دپوی اصلی وجود دارد که به دپوهای فرعی خدمت‌دهی می‌کند. مکان دپوهای فرعی از ابتدا مشخص نیست. در لایه دوم دپوهای فرعی تقاضای مشتری‌ها را تامین می‌کنند. آن‌ها پس از ارائه یک مدل ریاضی، برای حل مدل یک الگوریتم جستجوی حریصانه تطبیقی^۳، همراه با یک فرآیند یادگیری پیشنهاد می‌دهند. حسنی و علیایی (۱۳۹۴)، مساله مکان‌یابی - مسیریابی را با در نظر گرفتن ظرفیت و تنوع وسایل حمل و نقل و همچنین محدودیت تردد برخی وسایل در برخی مسیرها را مورد بررسی قرار دادند. برای حل مساله در ابعاد بزرگ تر نیز از الگوریتم کلونی مورچگان استفاده کردند.

تحقیقات در مورد مکان‌یابی - مسیریابی حمل مواد خطرناک از دهه‌ی ۱۹۶۰ شروع شده است. کریستوفایدز و ایلون^۴ (۱۹۶۹)، از اولین کسانی بودند که روی مساله‌ی مکان‌یابی - مسیریابی مواد خطرناک مطالعه کردند. توکلی مقدم و همکاران (۱۳۹۲)، مدل جدیدی را به منظور مسیریابی وسایل نقلیه جهت کمینه کردن ریسک حمل و نقل مواد خطرناک ارائه کردند. در مدل ارائه شده، سعی شده است در مسیریابی وسایل نقلیه، علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل، کاهش ریسک مسیر نیز مورد توجه قرار گیرد و زمانبندی مناسبی برای خدمت‌دهی وسائط نقلیه به مشتریان ارائه شود تا هزینه‌های نیروی انسانی کمینه شود و امکان برنامه‌ریزی بهتری برای مسیریابی و توزیع مواد خطرناک به وجود آید. کازانتزی و

1.Prins et.al

2.Nguyen et al

3.Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)

4.Christofide & Elon

همکاران^۱ (۲۰۱۱)، چارچوبی سیستماتیک برای توسعه مدل حمل و نقل مواد خطرناک ارائه کردند، به گونه‌ای که هزینه حمل و نقل به کمترین میزان برسد، در حالی که خطرات احتمالی در سطوح تعیین شده کاهش می‌یابد. آن‌ها از شبیه‌سازی مونت کارلو به عنوان ابزاری جامع و ساده برای ارزیابی داده‌های موثر بر رفتار ریسک در سیستم حمل و نقل استفاده کردند. در آخر برای جمع بندی و نشان دادن نوآوری‌های تحقیق جدول زیر تهیه گردید.

جدول ۱. نمایش نوآوری با توجه به تحقیقات انجام شده مرتبط با عنوان پژوهش

ردیف	مکان یابی تسهیلات	مسیریابی	تنوع تامین کننده	زمان ورود خودرو به محل مشتری	هزینه ارتباط با تامین کننده	هزینه تاسیس هاب (انبار)	هزینه‌های حمل و نقل	روش تحلیل داده‌ها	رفرنس
۱	✓	×	×	×	×	✓	✓	الگوریتم ژنتیک	ویلیام و همکاران (۲۰۱۵)
۲	✓	✓	×	×	×	✓	✓	الگوریتم ژنتیک	ویی و همکاران (۲۰۱۴)
۳	✓	✓	×	×	×	✓	✓	بر پایه تئوری بی نظمی	محمودآبادی (۲۰۱۵)
۴	✓	✓	×	×	×	✓	✓	نرم افزار لینگو	جیانگ و همکاران (۲۰۱۴)
۵	✓	✓	×	×	×	✓	✓	الگوریتم لاپلاس	یونگ و همکاران (۲۰۱۷)
۶۶	✓	✓	×	×	×	✓	✓	روش لاگرائز	کوک و همکاران (۲۰۱۷)
	✓	✓	×	×	×	✓	✓	نرم افزار گمز	رضاییان و همکاران (۲۰۱۸)

1. Kazantzi

تحقیق حاضر	الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه سازی تبرید	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
------------	--	---	---	---	---	---	---	---	--

همانطور که در جدول شماره (۱) مشخص شده است تاکنون پژوهشی در خصوص در نظر گرفتن موضوعاتی مانند تنوع تامین کنندگان، زمان ورود خودرو به محل مشتری، و هزینه ارتباط با تامین کنندگان در مسائل مکانیابی-مسیریابی صورت نگرفته است. از طرف دیگر، از آنجا که اینگونه مسائل جز مسائل دارای پیچیدگی محاسباتی^۱ محسوب می شوند، لذا برای حل اینگونه مسائل در ابعاد بزرگ نیاز به الگوریتم های فرا ابتکاری است که متاسفانه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

لذا برای برطرف نمودن این شکاف تحقیقاتی، در این تحقیق یک مدل ریاضی به منظور کمینه سازی هزینه ها و ریسک به صورت توأمان ارایه می شود. در زنجیره مورد بررسی کالای خطرناک از تامین کنندگان به هاب ها ارسال می گردد و از آنجا از طریق مسیریابی توسط حمل و نقل جاده ای به مشتریان تحویل می گردد. لازم به ذکر است که هاب ها در مدل پیشنهادی مکان یابی می گردند. در ادامه مفروضات مدل پیشنهادی آورده شده است:

۳. مفروضات در نظر گرفته شده در مدل

- زنجیره تامین مورد نظر در این پژوهش سه سطحی بوده و دربرگیرنده سطوح تامین، توزیع (هاب) و مشتری می باشد.
- همچنین این زنجیره تامین چند محصولی و تک دوره ای در نظر گرفته شده است.
- زنجیره مورد نظر برای حمل و نقل مواد خطرناک طراحی شده است.

1. NP-Hard

- موقعیت جغرافیایی محل های مشتری و تامین کنندگان خارج از حدود مدل تحقیق در عملیات تعیین می گردد ولی مکان یابی هاب ها توسط مدل تعیین می گردد.
- تعداد و ظرفیت خودروهای قابل استفاده برای حمل و نقل مشخص می باشد ولی مدل تعیین می نماید که از کدام خودروها استفاده شود.
- زمان لازم برای جابه جایی خودروها به شکل قطعی از پیش مشخص است.
- امکان خرابی خودروها در پژوهش در دست در نظر گرفته نشده است.
- مساله مسیریابی خودروها بین سطوح هاب و مشتری می باشد.
- مساله مسیریابی به صورت چندانباره در نظر گرفته شده است.
- ظرفیت مراکز محدود در نظر گرفته شده است.

شاخص های مدل ارائه شده

$i = 1, \dots, I$	I: شاخص محصولات
$s = 1, \dots, S$	S: شاخص تامین کننده
$v = 1, \dots, V$	V: شاخص وسایل نقلیه
$d = 1, \dots, D$	D: شاخص هاب
$c = 1, \dots, C$	C, \hat{c} : شاخص مشتری

تعریف پارامترها به کار رفته در مدل پیشنهادی

cap_{id}^{hub}	: ظرفیت هاب d برای کالای i؛
cap_v^{veh}	: ظرفیت خودرو v؛
cap_{is}^{sup}	: ظرفیت تامین کننده S در تامین محصول i؛
$cost_{isd}^{trn}$: هزینه انتقال هر واحد محصول i از تامین کننده S به هاب d؛
$cost_s^{fix}$: هزینه ثابت ارتباط با تامین کننده S؛
$dis_{\hat{c}c}^{cus}$: فاصله ی محل مشتری C از محل مشتری \hat{c} ؛

$tm_{v\bar{c}}^{cus}$: فاصله زمانی محل مشتری C از محل مشتری \bar{c} توسط خودرو V؛

ts_{vc} : زمان خدمت‌دهی به مشتری C توسط وسیله نقلیه V؛

dis_{dc} : فاصله هاب d از مشتری C؛

tm_{vdc} : فاصله زمانی هاب d از مشتری C؛

$cost_d^{hub}$: هزینه احداث هاب d؛

$cost_v^{veh}$: هزینه تامین خودرو V؛

dem_{ic} : میزان تقاضای مشتری C برای محصول i؛

dem_{id}^{hub} : میزان تقاضای هاب d از کالای i؛

f_v : میزان مصرف سوخت در واحد مسافت توسط خودرو V؛

c^{fuel} : هزینه مصرف سوخت؛

$R_{\bar{c}c}$: میزان ریسک مسیر مشتری C تا مشتری \bar{c} (براساس پراکنندگی جمعیت موجود در مسیر)؛

$M \sim \infty$: عدد بسیار بزرگ.

همچنین متغیرهای تصمیم عبارتند از:

y_d^{hub}	1	صفر	اگر هاب d تأسیس شود
	0	و یک	در غیر این صورت
y_v^{veh}	1	صفر	اگر خودرو V تامین شود
	0	و یک	در غیر این صورت
$y_{v\bar{c}c}$	1	صفر	اگر خودرو V از مشتری \bar{c} به مشتری C برود
	0	و یک	در غیر این صورت
β_{vd}	1	صفر	اگر خودرو V به هاب d تخصیص داده شود
	0	و یک	در غیر این صورت
y_s^{sup}	1	صفر	اگر تامین کننده S برای انتخاب گردد
	0	و یک	در غیر این صورت

at_{vc}	مثبت	زمان ورود خودرو v به محل مشتری C
x_{ivdc}	مثبت	میزان کالای i تحویلی به مشتری C توسط خودرو v متعلق به هاب d
α_{isd}	مثبت	میزان کالای i انتقالی از تامین کننده S به هاب d

تابع هدف

تابع هدف مساله به صورت زیر فرموله می شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } z^{\text{cost}} = & c^{\text{fuel}} \times \sum_{v,d,c>1} f_v \times dis_{dc} \times y_{v1c} \times \beta_{vd} + c^{\text{fuel}} \times \sum_{v,\bar{c}>1,c>1} f_v \times dis_{\bar{c}c}^{\text{cus}} \times y_{v\bar{c}c} + \\ & c^{\text{fuel}} \times \sum_{v,d,c>1} f_v \times dis_{dc} \times y_{vc1} \times \beta_{vd} + \sum_v y_v^{\text{veh}} \times cost_v^{\text{veh}} + \sum_d y_d^{\text{hub}} \times cost_d^{\text{hub}} + \\ & \sum_s y_s^{\text{sup}} \times cost_s^{\text{fix}} + \sum_{i,s,d} \alpha_{isd} \times cost_{isd}^{\text{tm}} \\ \text{Min } Z^{\text{risk}} = & \sum_{v,\bar{c},c} R_{\bar{c}c} \times y_{v\bar{c}c} \end{aligned}$$

محدودیت های مدل

$$\begin{aligned} \sum_{v,c} x_{ivdc} \times \beta_{vd} & \leq cap_{id}^{\text{hub}} & \forall i,d & (1) \\ \sum_{i,c} x_{ivdc} & \leq cap_v^{\text{veh}} \times z_v^{\text{veh}} & \forall v,d & (2) \\ \sum_d \alpha_{isd} & \leq cap_{is}^{\text{sup}} \times y_s^{\text{sup}} & \forall i,s & (3) \\ \sum_s \alpha_{isd} & \leq cap_{id}^{\text{hub}} \times y_d^{\text{hub}} & \forall i,d & (4) \\ \sum_s \alpha_{isd} & = dem_{id}^{\text{hub}} + \sum_{v,c} x_{ivdc} & \forall i,d & (5) \\ \sum_d \alpha_{isd} & \leq M \times y_{is}^{\text{sup}} & \forall i,s & (6) \\ \sum_{i,d,c} x_{ivdc} & \leq M \times \sum_d \beta_{vd} & \forall v & (7) \\ \sum_d \beta_{vd} & \leq 1 & \forall v & (8) \end{aligned}$$

$$\sum_v \beta_{vd} \leq M \times y_d^{hub} \quad \forall d \quad (9)$$

$$\sum_{\bar{c}} y_{v\bar{c}} \leq 1 \quad \forall v, c \quad (10)$$

$$\sum_{\bar{c}} y_{v\bar{c}} = \sum_{\bar{c}} y_{vc\bar{c}} \quad \forall v, c \quad (11)$$

$$at_{vc} \geq \sum_{\bar{c}} (at_{v\bar{c}} + ts_{v\bar{c}} + tm_{v\bar{c}}^{cus}) \times y_{v\bar{c}} \quad \forall v, c > 1 \quad (12)$$

$$at_{vc} \geq \sum_d tm_{vdc} \times \beta_{vd} \times y_{vc1} \quad \forall v, c \quad (13)$$

$$\sum_{i,d} x_{ivdc} \leq M \times \sum_{\bar{c}} y_{v\bar{c}} \quad \forall v, c \quad (14)$$

$$\sum_{v,d} x_{ivdc} = dem_{ic} \quad \forall i, c \quad (15)$$

$$, y_v^{veh}, y_{v\bar{c}}, \beta_{vd}, y_s^{sup} \in \{0,1\} \quad y_d^{hub} \quad (16)$$

$$, x_{ivdc}, \alpha_{isd} \geq 0 \quad at_{vc} \quad (17)$$

هدف از ارائه مدل فوق را به ترتیب می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

تابع هدف اول: کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها می‌باشد که این هزینه‌ها شامل هزینه حمل و نقل، هزینه تأسیس هاب و هزینه ارتباط با تامین کننده است.

تابع هدف دوم: کمینه‌سازی ریسک مسیر انتخابی به منظور جابجایی محصولات است. همانطور که مشخص است این دو تابع هدف باهم در تناقض هستند بطوریکه با افزایش تعداد هاب‌های تأسیس شده، مسافت‌های طی شده توسط خودروها افزایش یافته که این امر باعث افزایش سطح ریسک (تابع هدف دوم) می‌شود، درحالی‌که تابع هدف دوم میل به کاهش سطح ریسک دارد.

عدم تجاوز از ظرفیت هاب، وسایل نقلیه و تامین کننده به ترتیب در محدودیت‌های (۱) تا (۴) آورده شده است. محدودیت (۵) بیانگر بالانس موجودی به ازای هر محصول در هر هاب است. شرط انتقال محصول از تامین کننده به هاب این است که با تامین کننده ارتباط گرفته شود این مهم در محدودیت (۶) آورده شده است.

بنابر محدودیت (۷) شرط دریافت محصول از مشتریان توسط خودروها این است که آن خودرو به یک هاب اختصاص یابد. براساس محدودیت (۸) هر خودرو حداکثر به یک هاب تخصیص می‌یابد. براساس محدودیت شماره (۹)، امکان تخصیص خودرو به هاب وجود نخواهد داشت، مگر این که هاب تأسیس شده باشد. هر خودرو، هر مشتری را حداکثر یکبار ویزیت می‌کند، اما امکان ویزیت چند خودرو وجود دارد (فرض هم‌پوشانی) که در محدودیت (۱۰) نشان داده شده است.

براساس محدودیت (۱۱)، اگر به یک محل مشتری وارد شدیم باید از آن خارج شویم. محدودیت حذف زیرتور توسط محدودیت و محاسبه‌ی زمان ورود به محل هر مشتری در محدودیت‌های شماره (۱۲) و (۱۳) ارایه شده است.

شرط تحویل کالا به مشتری این است که خودرو مشتری را ویزیت نماید این مهم در محدودیت‌های (۱۴) ارایه شده است. در نهایت محدودیت (۱۵) مربوط به محدودیت ارضای تقاضا است. روابط (۱۵) و (۱۶) بیانگر نوع متغیرها می‌باشند.

بعد از فرموله کردن مدل تحقیق، به منظور اعتبارسنجی مدل، کد در نرم‌افزار GAMS IDE/Cplex تهیه شده و جهت حل دقیق مدل لازم است تا مسائل نمونه‌ای با ابعاد متنوع به شکل هوشمند و تصادفی تولید گردند. به همین منظور الگوریتمی طراحی و در نرم‌افزار Matlab نوشته شد. فرآیند تولید و شبیه‌سازی صورت مساله‌های تصادفی در ادامه آورده شده است. با توجه به دو هدفه بودن مدل ارائه شده از یک روش وزن دهی برای حل آن استفاده می‌کنیم.

بازه مقدارگیری پارامترها در الگوریتم مذکور جهت تولید مسائل تصادفی در جدول زیر آمده است.

جدول ۱. بازه مقدار گیری پارامترها

پارامترها			
۱	Node position	x	continuous uniform([0 200],{c})
		y	continuous uniform([0 200],{c})
۲	Node position	x1	continuous uniform([0 200],{d})
		y2	continuous uniform([0 200],{d})
۴	dis_{cc}^{cus}		Euclidean distance(x,y)
۵	tm_{vc}^{cus}		d_{cc}^{cus} * continuous uniform([0.8 1.2])/100
۶	dis_{dc}		Euclidean distance(x1,x),(y1,y)
۷	tm_{vdc}		$d_{dc}^{str-cus}$ *continuous uniform([0.8 1.2])/100
۸	$cost_d^{hub}$		continuous uniform([2000000 3000000]){d}
۹	$cost_v^{veh}$		continuous uniform([1000000 2000000]){v}
۱۰	ts_{vc}		continuous uniform([20 30])
۱۱	cap_{id}^{hub}		$\frac{\sum_{i,c} dem_{ic} \times continuous\ uniform([0.7\ 1.2])}{d}$
۱۲	cap_v^{veh}		$\frac{\sum_{i,c} dem_{ic}}{v} \times continuous\ uniform([0.8\ 1.2])\{v\}$
۱۳	cap_{is}^{sup}		$\frac{\sum_{i,c} dem_{ic} \times continuous\ uniform([0.7\ 1.2])}{s}$
۱۴	$cost_{isd}^{trn}$		continuous uniform([30 70])
۱۵	$cost_s^{fix}$		continuous uniform([400 7000])
۱۶	dem_{ic}		continuous uniform([30 70]){i,c}

۱۷	dem_{id}^{hub}	continuous uniform([40 80]){i,d}
۱۸	f_v	continuous uniform([10 20])
۱۹	R_{EC}	continuous uniform([100 300]){p,t}
۲۰	c^{fuel}	1000

در عبارات فوق $([l u], \{a, b\})$ continuous uniform نشان‌دهنده یک ماتریس با تعداد سطرهای برابر تعداد حالات اندیس a و تعداد ستون‌هایی برابر تعداد حالات اندیس b است که درایه‌های آن اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت و مقادیری در بازه $[l u]$ می‌باشند. در فرآیند شبیه‌سازی هوشمند پارامترهای مذکور، ارتباط بین پارامترها نیز لحاظ گردیده‌اند. در نظر گرفتن ارتباط بین پارامترها به منظور افزایش قابلیت انعطاف‌پذیری مسائل حاصله بوده است. در نتیجه لحاظ نمودن نحوه تاثیرپذیری پارامترهای مساله از یکدیگر و لحاظ نمودن تعاملات درونی بین آن‌ها، مسائل تولیدی از اعتبار بالاتری در شبیه‌سازی آن‌چه که در واقعیت اتفاق می‌افتد برخوردار هستند. شبیه‌سازی هر چه بهتر واقعیات بیرونی به منزله افزایش اعتبار نتایج اتخاذی از حل دقیق مسائل نمونه تولیدی می‌باشد.

حل مدل دو هدفه با رویکرد وزن دهی

برای حل مدل مورد نظر ابتدا باید توابع هدف را بی مقیاس کرد تا بتوان به حل آن پرداخت. تابع هدف مساله مورد نظر از مجموع دو معیار معرفی شده است. مزیت این روش در این است که تصمیم‌گیرنده با توجه به مطلوبیت هر هدف، به اهداف مختلف وزن اختصاص می‌دهد و با ضرب نمودن توابع هدف در وزن‌های تخصیص داده شده، در نهایت تابع هدف یگانه‌ای به دست خواهد آمد. لذا این روش از دیدگاه مدیریتی بسیار کاربردی می‌باشد. این معیارها در یک مقیاس نمی‌باشند و برای بی بعد سازی تابع هدف به روش زیر عمل می‌شود.

$$MinZ = w_1 \left(\frac{f_1 - f_1^+}{f_1^- - f_1^+} \right) + w_2 \left(\frac{f_2 - f_2^+}{f_2^- - f_2^+} \right)$$

که در عبارت فوق w_1, w_2 اوزان معیارهای f_1, f_2 به ترتیب می‌باشد. این اوزان را می‌توان از کارشناسان و تصمیم‌گیرندگان در حوزه مورد مطالعه به دست آورد. همچنین f^- یک حد بالا f^+ یک حد پایین برای معیار مورد نظر می‌باشد. برای به دست آوردن f^- و f^+ ها به این صورت عمل می‌شود که ابتدا با در نظر گرفتن هر معیار به تنهایی مساله حل شود که در این صورت با توجه به دو معیار موجود دو بار باید هر مساله حل شود که برای هر حل دو معیار f_1, f_2 محاسبه می‌شود که نتایج مربوطه به صورت یک ماتریس 2×2 در رابطه زیر نشان داده شده است.

$$\begin{matrix} f_1 & f_2 \\ f_1^* \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \\ f_2^* \end{matrix}$$

در ماتریس سطر اول مربوط به حالتی است که فقط با در نظر گرفتن معیار f_1 مدل مساله مورد نظر حل می‌شود و سطر دوم مربوط به حالت‌های در نظر گرفتن فقط معیارهای f_2 حل می‌شوند. مقادیر f^- و f^+ ها نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} f_1^+ &= \min\{a_{11}, a_{21}, a_{31}\} & f_1^- &= \max\{a_{11}, a_{21}, a_{31}\} \\ f_2^+ &= \min\{a_{12}, a_{22}, a_{32}\} \\ f_2^- &= \min\{a_{12}, a_{22}, a_{32}\} \end{aligned}$$

اعتبارسنجی مدل

در این قسمت برای بررسی اعتبار و صحت مدل دو هدفه ارائه شده، ۷ مساله با ابعاد متوسط حل می‌شود. لازم به ذکر است که برای حل مدل دو هدفه از روش ارائه شده در قسمت قبل بهره گرفته شده است.

جدول ۲. ابعاد مسائل برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی

ابعاد					مساله
i	s	d	c	V	
۶	۷	۶	۸	۶	مسئله ۱
۷	۷	۶	۹	۷	مسئله ۲
۷	۸	۷	۱۰	۷	مسئله ۳
۸	۹	۸	۱۲	۷	مسئله ۴
۸	۹	۹	۱۳	۷	مسئله ۵
۹	۱۰	۹	۱۴	۷	مسئله ۶
۹	۱۱	۱۰	۱۵	۸	مسئله ۷
۶	۷	۶	۸	۶	مینیم
۷,۷	۸,۷	۷,۹	۱۱,۶	۷	میانگین
۹	۱۱	۱۰	۱۵	۸	ماکزیمم

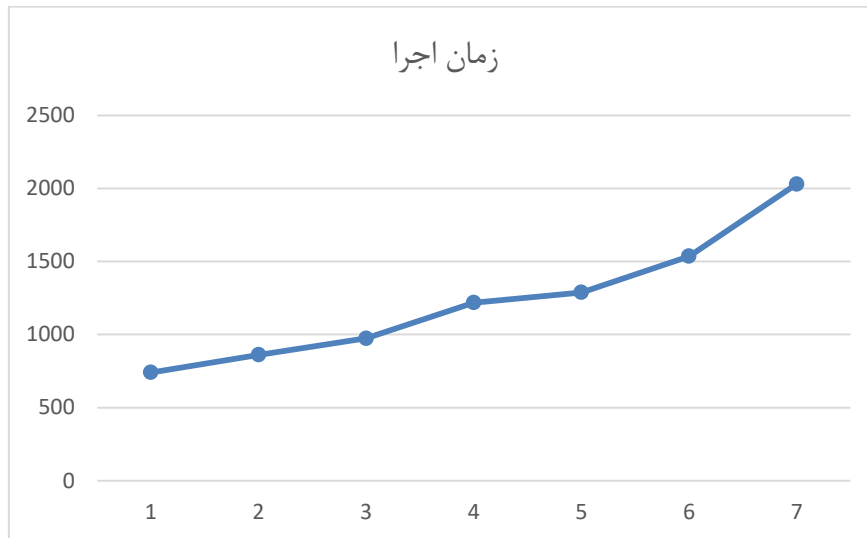
مسائلی که نرم افزار حل دقیق GAMS IDE/Cplex قادر به حل آنها در بازه زمانی ۷۰۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه بوده است در زمره مسائل متوسط دسته بندی شده اند. نتایج حاصل از حل با استفاده از نرم افزار GAMS در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج محاسباتی

GAMS								Solver مسائل
زمان اجرا	Z	f_2^+	f_2^*	f_2^-	f_1^+	f_1^*	f_1^-	f_3^-
۷۴۰,۶۵۴	۰,۴۰۱	۰,۳۳۷	۰,۳۹۱	۰,۵۰۸	۳۴۵۲۷۵۵۷۶	۳۹۱۰۱۸۰۴۱	۴۳۹۶۶۹۹۱۰	مسئله ۱
۸۶۰,۶۵۵	۰,۴۰۷	۰,۳۵۲	۰,۴۱۱	۰,۴۷۳	۴۴۹۷۴۷۲۸۵	۴۹۰۱۵۶۸۱۳	۵۷۳۰۹۲۶۹۱	مسئله ۲
۹۷۴,۳۶۰	۰,۲۱۸	۰,۳۹۳	۰,۴۲۲	۰,۵۵۸	۵۸۹۵۲۶۳۷۹	۶۵۸۲۲۱۷۸۳	۸۵۴۴۶۳۲۲۸	مسئله ۳
۱۲۱۸,۰۴	۰,۳۳۷	۰,۴۳۵	۰,۴۵۳	۰,۵۱۳	۸۲۱۳۶۲۷۴۷	۸۸۵۱۲۱۱۶۰	۹۶۶۲۸۱۲۴۷	مسئله ۴
۱۲۸۷,۸۲	۰,۵۲۳	۰,۳۸۹	۰,۴۷۷	۰,۵۴۶	۱۰۲۵۵۰۷۲۸۰	۱۲۹۶۸۸۵۶۱۳	۱۵۸۲۸۳۶۰۴۵	مسئله ۵
۱۵۳۵,۷۵	۰,۳۰۵	۰,۴۶۵	۰,۴۸۲	۰,۶۷۳	۱۲۲۷۳۵۴۸۴۱	۱۴۷۹۷۲۳۲۹۵	۱۷۰۴۸۲۷۷۴۳	مسئله ۶
۲۰۲۹,۴۳	۰,۲۹۶	۰,۴۵۹	۰,۴۹۸	۰,۶۹۳	۱۴۳۶۹۰۷۴۰۸	۱۶۶۸۶۴۳۵۲۳	۱۹۷۹۷۹۵۲۴۴	مسئله ۷
۷۴۰,۶۵	۰,۲۱۸	۰,۳۳۷	۰,۳۹۱	۰,۴۷۳	۳۴۵۲۷۵۵۷۶	۳۹۱۰۱۸۰۴۱	۴۳۹۶۶۹۹۱۰	مینیم
۱۲۳۵,۲۵	۰,۳۵۵	۰,۴۰۴	۰,۴۴۸	۰,۵۶۶	۸۴۲۲۴۰۲۱۶	۹۸۱۳۹۵۷۴۶	۱۱۵۷۲۸۰۸۷۲	میانگین
۲۰۲۹,۴۴	۰,۵۲۳	۰,۴۶۵	۰,۴۹۸	۰,۶۹۳	۱۴۳۶۹۰۷۴۰۸	۱۶۶۸۶۴۳۵۲۳	۱۹۷۹۷۹۵۲۴۴	ماکزیمم

جدول فوق شامل مشخصات ۷ مساله با سایز متوسط و نتایج حل دقیق آنها می باشد. پراکندگی قابل توجهی در زمان حل مورد نیاز برای این مسائل مشاهده می گردد به نحوی که این زمان بین ۷۴۰,۶۵ و ۲۰۲۹,۴۴ ثانیه متغیر بوده و به طور میانگین مقدار ۱۲۳۵,۲۵ ثانیه را به خود گرفته است.

نمودار زیر نشان دهنده مقادیر زمان اجرای مورد نیاز نرم افزار برای حل دقیق مسائل با سایز متوسط می باشد. همانطور که مشاهده می شود زمان اجرا به صورت نمایی با افزایش مقادیر اندیس های مساله افزایش می یابد که دلیل آن نیز پیچیدگی بالای مساله مورد نظر است.



شکل ۱. مقادیر زمان اجرای مورد نیاز نرم افزار برای حل دقیق مسائل با سایز متوسط

الگوریتم بهینه سازی ترکیبی

الگوریتم های تکاملی از جمله کاربردی ترین روش های بهینه سازی محسوب می گردند. در مقابل روش ها و نرم افزارهای حل مدل های تحقیق در عملیات حساسیت بسیار بالایی به عبارات غیرخطی در تابع هدف و محدودیت های مساله از خود نشان می دهند. بنابراین با توجه به انبوه روابط پیچیده و عبارات غیرخطی موجود در مدل ارائه شده، واضح است که نرم افزارهای حل مدل های تحقیق در عملیات در بهینه سازی مدل ارائه شده در قسمت قبل کارایی ندارند. در نتیجه روش های تکاملی، با توجه به حساسیت بسیار پائینشان نسبت به پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط به منظور یافتن سیاست های بهینه در سیستم فوق انتخاب شده اند. الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق به صورت ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم

شبیه سازی تبرید می باشد که در ادامه به معرفی گام های آن می پردازیم. الگوریتم پیشنهادی به صورت موازی فضای حل را جستجو می کند. در ادامه، برای افزایش کارایی الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم دیگری به نام شبیه سازی تبرید که به صورت نقطه ای فضای حل را جستجو می کند، ارائه می شود. ساختار و نحوه نمایش جواب در الگوریتم پیشنهادی عبارتست از یک ماتریکس $7 \times d$ بوده که تعداد سطرها برابر با تعداد خودروها و تعداد ستون ها برابر با تعداد هاب ها است. لازم به ذکر است که ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک همانند نحوه نمایش جواب در الگوریتم شبیه سازی تبرید است.

گام های الگوریتم پیشنهادی

- ۱- پارامترهای مدل بهینه سازی را دریافت کن
- ۲- پارامترهای الگوریتم (از جمله اندازه جمعیت، درصد نگهداری، تقاطع و جهش و همچنین نقطه شکست در اپراتور تقاطع و ضریب تغییرات در اپراتور جهش، هم چنین ثابت دمایی (T) (شرط توقف در الگوریتم شبیه سازی تبرید) را مقدار دهی کن.
- ۳- جمعیت اولیه را ایجاد کن
 - ۱-۳ کروموزوم های اولیه را به صورت تصادفی بساز.
 - ۲-۳ تست های مورد نیاز را جهت بررسی و اصلاح کروموزوم های حاصله اجرا کن.
 - ۳-۳ تابع هدف مرتبط با هر کروموزوم را محاسبه نما.
 - ۴-۳ جمعیت اصلاحی را بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
 - ۵-۳ کروموزوم های نخبه را تعیین کرده و تا وقوع شرط توقف در الگوریتم شبیه سازی تبرید، آن ها را بهبود بده.
- ۳-۵-۱ به کمک فرآیند جهش، جوابی در همسایگی جواب اولیه تولید کن.

- ۲-۵-۳ پس از محاسبه مقدار تابع هدف جواب تولیدی، ΔE را محاسبه کن.
- ۳-۵-۳ اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، آن را به عنوان جواب فعلی قرار داده و در غیر این صورت، آن را با احتمال $\exp(-\Delta E/T)$ به عنوان جواب فعلی بپذیر.
- ۶-۳ کروموزوم‌های حاصله را بار دیگر بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
- ۴- حلقه زیر را تا آنجا ادامه بده که شرط توقف الگوریتم تلفیقی محقق گردد (حلقه اصلی الگوریتم)
- ۷-۳ درصدی از کشورها را با نتیجه آمیزش آن‌ها با یکی از کروموزوم‌های نخبه جایگزین کن.
- ۸-۳ از اپراتور جهش برای تغییر تعدادی از کروموزوم‌های عادی استفاده کن.
- ۹-۳ تست‌های مورد نیاز را جهت بررسی و اصلاح کروموزوم‌های حاصله اجرا کن.
- ۱۰-۳ تابع هدف مرتبط با هر کروموزوم را محاسبه نما.
- ۱۱-۳ جمعیت اصلاحی را بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
- ۱۲-۳ کروموزوم‌های نخبه را تعیین کرده و تا وقوع شرط توقف در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، آن‌ها را بهبود بده.
- ۱۳-۳ به کمک فرآیند جهش، جوابی در همسایگی جواب اولیه تولید کن.
- ۱۴-۳ پس از محاسبه مقدار تابع هدف جواب تولیدی، ΔE را محاسبه کن.
- ۱۵-۳ اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، آن را به عنوان جواب فعلی قرار داده و در غیر این صورت، آن را با احتمال $\exp(-\Delta E/T)$ به عنوان جواب فعلی بپذیر.
- ۱۶-۳ کروموزوم‌های حاصله را بار دیگر بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
- ۵- نتایج را ذخیره کرده و نمایش بده.

اعتبارسنجی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

اکنون به منظور مقایسه بهتر و جامع تر عملکرد الگوریتم تلفیقی با روش حل دقیق به نتایج حل مسائل متوسط توسط نرم افزار توجه نمایید. جدول زیر مقایسه عملکرد الگوریتم فراابتکاری با روش حل دقیق را مشاهده می کنید.

تنظیم پارامتر

لازم به ذکر است پارامترهای الگوریتم ترکیبی پیشنهادی توسط روش تاگوجی تنظیم شده است. روش تاگوجی انحراف های ممکن از مقدار هدف را همراه با تابع زیان مدل بندی می کند. تاگوجی از کاربرد طرح های آرایه های متعامد برای اختصاص فاکتورهای انتخاب شده، جانب داری می کند، متداول ترین طرح های آرایه های متعامد L16، L18، و L8 است که در این تحقیق از آرایه L8 بهره برده شده است.

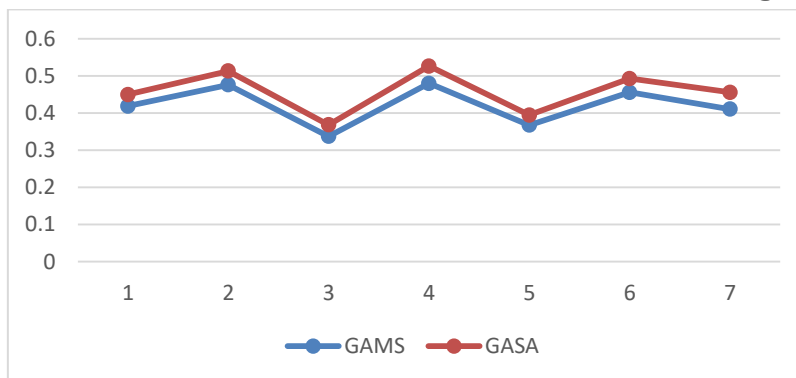
جدول ۴. مقایسه عملکرد الگوریتم فراابتکاری با روش حل دقیق در راستای بهینگی جواب ها و زمان

حل مسائل با سایز متوسط

مقایسه عملکرد الگوریتم فراابتکاری با نرم افزار گمز						نام مسائل
$\frac{GASA}{GAMS}$	$(1 - \frac{GASA - GAMS}{GAMS})$	GASA		GAMS		
زمان اجرا	مقدار تابع هدف	زمان اجرا	مقدار تابع هدف	زمان اجرا	مقدار تابع هدف	
۰,۰۸۷	۰,۹۲۶	۸۷,۲۰۷	۰,۴۳۱	۷۴۰,۶۵۴	۰,۴۰۱	مسئله ۱
۰,۰۷۱	۰,۹۲۲	۱۰۴,۹۹۰	۰,۴۳۸	۸۶۰,۶۵۵	۰,۴۰۷	مسئله ۲
۰,۰۷۳	۰,۹۰۷	۹۰,۸۷۰	۰,۲۳۸	۹۷۴,۳۶۰	۰,۲۱۸	مسئله ۳
۰,۰۶۵	۰,۹۰۲	۱۰۸,۸۳۹	۰,۳۷۰	۱۲۱۸,۰۴۶	۰,۳۳۷	مسئله ۴

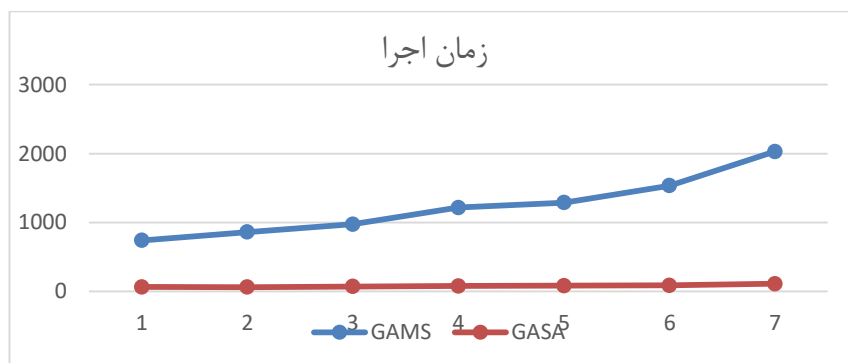
۰,۰۶۴	۰,۹۲۷	۸۲,۹۵۲	۰,۵۶۱	۱۲۸۷,۸۲۷	۰,۵۲۳	مسئله ۵
۰,۰۵۶	۰,۹۱۸	۷۱,۴۹۲	۰,۳۳۰	۱۵۳۵,۷۵۹	۰,۳۰۵	مسئله ۶
۰,۰۵۵۳	۰,۸۹۰	۷۱,۶۵۱	۰,۳۲۸	۲۰۲۹,۴۳۶	۰,۲۹۶	مسئله ۷
۰,۰۵۵	۰,۸۹۰	۷۱,۴۹۲	۰,۲۳۸	۷۴۰,۶۵۴	۰,۲۱۸	مینیم
۰,۰۶۷	۰,۹۱۳	۸۸,۲۸۷	۰,۳۸۵	۱۲۳۵,۲۴۸	۰,۳۵۵	میانگین
۰,۰۸۷	۰,۹۲۷	۱۰۸,۸۳۹	۰,۵۶۱	۲۰۲۹,۴۳۶	۰,۵۲۳	ماکزیمم

نتایج به دست آمده از حل مسائل متوسط با الگوریتم تلفیقی و مقایسه آن با نتایج حل دقیق بیش از پیش بر عملکرد برجسته و اعتبار این الگوریتم دلالت دارد. به طوری که بر مبنای نتایج حاصله الگوریتم فراابتکاری توانسته است در ۵٪ تا ۸٪ از زمان حل دقیق به ۸۹ تا ۹۲٪ از بهینگی نتایج حل دقیق دست یابد.



شکل ۲. مقایسه عملکرد الگوریتم فراابتکاری با روش حل دقیق در راستای بهینگی جواب‌های به دست آمده برای مسائل با سایز متوسط

شکل زیر نیز نمودار مقایسه عملکرد الگوریتم فراابتکاری با روش حل دقیق را در راستای زمان حل مسائل با سایز متوسط را نشان می دهد.



شکل ۳. مقایسه عملکرد الگوریتم فراابتکاری با روش حل دقیق در راستای زمان حل مسائل با سایز متوسط

متغیرهای تصمیم

در این بخش، بمنظور تجزیه و تحلیل مقادیر بدست آمده برای متغیرهای تصمیم، یک مسئله حل و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. فرض کنید سه تامین کننده برای تامین سه محصول توسط سه وسیله نقلیه در نظر گرفته شده است. تعداد هاب های بالقوه جهت احداث برای تامین نیاز سه مشتری برابر سه هاب می باشد. در جدول ۵، مقدار بدست آمده برای برخی متغیرهای مسئله مذکور با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ارائه می شود. همانطور که مشاهده می شود جواب بدست آمده، موجه و قابل قبول بوده و در محدودیت های مسئله نیز صدق می کند. ضمناً مشاهده می شود که هاب اول و سوم انتخاب شده اند در صورتیکه هاب دوم انتخاب نشده است. در نتیجه، مقدار تابع هدف بدست آمده برابر با ۰,۹۳۳ می باشد. همچنین مدت زمان صرف شده توسط الگوریتم پیشنهادی برابر با ۷۴۰ ثانیه است.

جدول ۵. مقادیر بدست آمده برای برخی متغیرهای تصمیم مسئله پیشنهادی

y_v^{veh}			y_d^{hub}			مسئله	
						مقدار	
y_1^{veh}	y_2^{veh}	y_3^{veh}	y_1^{hub}	y_2^{hub}	y_3^{hub}	زمان اجرا	تابع هدف
۰	۱	۱	۱	۰	۱	۷۴۰,۶۵۴	۰,۹۳۳

جمع بندی

در این تحقیق طرح بهینه‌ای به منظور استفاده هرچه بهتر از امکانات و تسهیلات موجود در راستای توزیع محصولات و تامین تقاضای مشتریان ارائه شده است. مسیریابی وسایل نقلیه در جهت برنامه‌ریزی حمل و نقل و تعیین نحوه بهینه تعامل بین سطوح توزیع و تقاضا در راستای کمینه‌سازی میزان ریسک و هزینه‌های زنجیره تامین در حوزه سیاست‌های اتخاذی این پژوهش قرار می‌گیرند.

به منظور تحقق اهداف پژوهش از تکنیک‌های بهینه‌سازی متعددی بهره گرفته شده است. در قدم اول مجموعه فرضیات، اهداف و محدودیت‌های این مساله به صورت یکپارچه فرموله گردید. مدل نهایی قطعی این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار GAMS IDE/Cplex و با در نظر گرفتن داده‌های مختلف حل شده است. برای اعتبار سنجی مدل مورد نظر و پی بردن به صحت آن مسائلی در ابعاد متوسط طراحی شده است و در نهایت برای مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم فرا ابتکاری طراحی شده است که برای سنجش اعتبار آن در مسائل با ابعاد متوسط توسط این الگوریتم حل شده و نتایج با حل دقیق مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از حل مسائل متوسط با الگوریتم تلفیقی و مقایسه آن با نتایج حل دقیق بیش از پیش بر عملکرد برجسته و اعتبار این الگوریتم دلالت دارد. به طوری که بر مبنای نتایج حاصله

الگوریتم فراابتکاری توانسته است در ۱۲٪ تا ۳٪ از زمان حل دقیق به ۸۹ تا ۹۲٪ از بهینگی نتایج حل دقیق دست یابد.

پیشنهادات آتی

در تحقیقاتی آتی می توان حمل و نقل جاده ای در نظر گرفته شده را با حمل و نقل های دیگر (ریلی، دریایی و ...) تلفیق کرد همچنین می توان مساله مورد نظر را در حالت پویا در نظر گرفت.

منابع

توکلی مقدم، رضا، محمود سلطانی، ف. و محمود آبادی، ع.، توسعه مدل ریاضی مساله مسیریابی حمل و نقل مواد سوختی تحت شرایط فازی - مطالعه موردی، مهندسی حمل و نقل، سال چهارم، شماره سوم، ۱۳۹۲.

حسینی، سید محمد حسن، خلجی علیایی، سهیلا، مدل سازی ریاضی مساله مکان یابی - مسیریابی با در نظر گرفتن ظرفیت، تنوع و محدودیت تردد وسایل حمل و نقل و توسعه یک مدل حل مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان، پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید، سال سوم، شماره پنجم، ۱۳۹۴.

رضوی، مریم، سوخکیان، محمد علی. و زیارتی، کورش،. ارایه الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر سیستم کلونی مورچگان برای مساله مکان یابی مسیریابی با چندین انبار و فرض تخصیص چندین مسیر به هر وسیله نقلیه، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، دوره ۳، شماره ۶، (۱۳۹۰).

سمائی، فرشید، بررسی مساله مکان یابی - مسیریابی ظرفیت دار چند هدفی با پنجره زمانی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، (۱۳۹۱).

عیدی، علیرضا، برزگر، خالد، ارائه یک الگوریتم حل دقیق برای مساله جایابی P هاب میانه با تخصیص ۲- تایی، نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولیدی، سال سوم، شماره پنجم، (۱۳۹۴).

عیدی، علیرضا، میرآخورلی، عباس، ارائه یک روش ابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مساله هاب پوششی در حالت فازی، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، شماره ۲، جلد ۲۳، (۱۳۹۱).

Erkut, E., Alp, O., *Designing a Road Network for Dangerous Goods shipments*, Computers & Operations Research, 34 (5), 2007.

Erkut, E., and Tjandra, S., Verter, V., *Hazardous Material Transportation*, Handbook in OR & MS, Vol. 14, 2007.

Esfandeh, T., Kwon, C., Batta, R., *Regulating hazardous materials transportation by dual toll pricing*, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 83, 2016.

Jiang, Y., Zhang, X., Rong, Y., Zhang, Z., *A Multimodal Location and Routing Model for Hazardous Materials Transportation based on Multi-commodity Flow Model*, Procedia- Social and Behavioral Sciences, Vol. 138, 2014.

Kazantzi, V., Kazantzis, N., and Gerogiannis, V.C., *Risk Informed Optimization of a Hazardous Material Multi-periodic Transportation Model*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24, 2011.

Laporte, G., Nobert, Y., *An Exact Algorithm for Minimizing Routing and Operating Costs In Depot Location*, European Journal of Operational Research 6, 1981.

Laporte, G., Louveaux, F., Mercure, H., *Models and Exact Solutions for a Class of Stochastic Location-Routing Problems*, European Journal of Operational Research 39: 1989.

Mahmoudabadi, A., *Developing a chaotic pattern of dynamic risk definition for solving hazardous material routing-locating problem*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 37, 2015.

Prins, C., Prodhon, C., and Wolfler-Calvo, R., *Solving the capacitated location- routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking*, A Quarterly Journal of Operations Research, 4: 2006.

Wei, M., Yu, L., Li, X., *Credibilistic Location-Routing Model for Hazardous Materials Transportation*, International Journal of Intelligent Systems, Vol.30, 2015.

Wu, T.H., Low, C., Bai, J.W., *Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems*, Computers & Operations Research 29: 2002.

Xie, Y., Lu, W., Wang, W., Quadrioglio, L., *A Multimodal Location and Routing Model for Hazardous Materials Transportation*, Journal of Hazardous Materials, 227-228, 2012.