

فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۸۳، تابستان ۱۳۹۶، ۲۵۲-۲۲۱

مکان‌یابی هاب‌ها در شبکه پشتیبانی حمل‌ونقل هوایی چند مُده سبز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

محمدحسن سون‌قوری*

سعید ضامنی** محسن صادق عمل‌نیک***

پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۲

دریافت: ۹۵/۸/۲۴

شبکه پشتیبانی سبز / مکان‌یابی / حمل‌ونقل چند مُده / الگوریتم ژنتیک

چکیده

شبکه پشتیبانی حمل‌ونقل هوایی سبز سیستمی متشکل از تقاضا و برآوردن تقاضا با اهداف زیست‌محیطی است. در این مقاله در صدد ایجاد شبکه پشتیبانی سبز در صنایع هوایی هستیم به نحوی که از احداث مراکز آلوده‌کننده در مناطق آلوده تا حد امکان جلوگیری شود. متمرکزسازی باعث استفاده بهینه از تسهیلات حمل‌ونقل و در نهایت کاهش آلودگی می‌شود. یک شبکه پشتیبانی چند مده در حمل‌ونقل می‌تواند با توجه به اهداف شبکه از جمله کمینه‌سازی آلودگی زیست‌محیطی، با مکان‌یابی بهینه هاب نقش مهمی در این راستا ایفا کند. در این مقاله با در نظر گرفتن زمان برنامه‌ریزی شده برای تحویل هر قطعه به پایگاه‌های هوایی، یک مدل ریاضی بهینه ارائه شده است. حمل‌ونقل چند مده یکی از نوآوری‌های این پروژه است که با برنامه‌ریزی یک مدل جامع و انعطاف‌پذیر در حمل‌ونقل ایجاد می‌شود.

*. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تهران و کارشناس ارشد، دانشگاه Ensam فرانسه
hasan_songhori@yahoo.com

** کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تهران.

*** دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تهران.

■ محمدحسن سون‌قوری، مسئول مکاتبات.

همچنین، به دلیل ماهیت غیر قطعی در بسیاری از مسائل دنیای واقعی، پارامتر زمان حمل و نقل به صورت فازی در نظر گرفته شده است. برای قطعی سازی مدل از روش خمینز استفاده شده است. مدل پس از خطی سازی با نرم افزار GAMS و حل کننده CPLEX حل و اعتبارسنجی شده و همچنین برای حل مدل در ابعاد بزرگ از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک با خطای قابل قبولی وضعیت بهینه را شناسایی و نمایش می دهد.

طبقه بندی JEL: P41

مقدمه

عرضه قطعات و تجهیزات به ناوگان هوایی نیاز به یک شبکه پشتیبانی از تولید قطعه تا رسیدن آن به مصرف‌کننده دارد. شبکه پشتیبانی متشکل از انسان‌ها، سازمان‌ها، تسهیلات و تکنولوژی با هدف پاسخگویی و تأمین تقاضای بین اعضای مجموعه است. صنایع هوایی حساسیت بالای استراتژیک دارد زیرا کمبود قطعات یا نقص در پشتیبانی می‌تواند موجب غیرفعال شدن تسهیلات هوایی شود؛ برای دست‌یافتن به این مهم، باید با استفاده از تکنیک‌های ریاضی و مدل‌سازی، یک شبکه پشتیبانی مناسب حمل‌ونقل طراحی شود.

وضعیت آلودگی هوا و زمان تحویل قطعات مورد نیاز از جمله عواملی هستند که به تغییر انتخاب سیستم مناسب حمل‌ونقل منجر می‌شوند. یکی از چالش‌های مهم در صنایع هوایی، استقرار مناسب سیستم پشتیبانی حمل‌ونقل به نحوی است که کم‌ترین آلودگی را به محیط‌زیست تحمیل کند و سبز بودن یک شبکه پشتیبانی نیز به معنای توانایی آن برای حفاظت از محیط‌زیست بوده و باید بدون اخلاف و کم‌ترین هزینه در شبکه باشد. چالش دیگر در صنایع هوایی، تأمین تقاضای پایگاه‌های هوایی در کمتر از زمان مقرر است. به این منظور شبکه پشتیبانی حمل‌ونقل باید با استفاده از انعطاف‌پذیری (وسایل حمل‌ونقل مختلف بین هاب‌ها) نیاز پایگاه‌های هوایی را تأمین کند.

یکی از روش‌های استقرار شبکه پشتیبانی سبز، استفاده از هاب است. هاب‌ها تسهیلاتی هستند که با متمرکز کردن جریان گره‌های متصل به خود، نقش مراکز واسطه را ایفا می‌کنند. بنابراین، با استفاده از مبحث هاب به جای تأمین مستقیم تقاضا از مبدأ به مقصد، با متمرکز کردن و ارسال هم‌زمان تقاضای چند گره، هزینه‌های شبکه پشتیبانی و آلودگی ایجاد شده کمتر می‌شود.

هر شبکه هاب^۱ شامل سه عنصر گره غیر هاب^۲ (که می‌تواند هم مبدأ و هم مقصد باشد)، هاب و پیوند است. هر گره غیر هاب باید به حداقل یک هاب متصل شود و بین هر دو هاب یک مسیر موجه وجود داشته باشد. این خصوصیات باعث می‌شود تا بین هر دو زوج مبدأ و مقصد یک مسیر وجود داشته باشد^۳. برای نمونه می‌توان به فرودگاه دوبی به‌عنوان شبکه

1. Hub Network.

2. Non-hub Node.

3. O'Kelly, M. E. (1994).

هاب در حمل و نقل هوایی اشاره کرد که برای بسیاری از پروازهایی که از مبدأ خاورمیانه یا منتهی به آن باشد، به عنوان یک هاب عمل می کند!

مطالعات مسائل مکان‌یابی هاب اغلب سه فرض دارند، اگرچه این فرضیات در برخی تحقیقات آزادسازی می شوند!

- ارتباط بین هردو زوج هاب برقرار است.
- صرفه‌جویی اقتصادی با وارد کردن یک ضریب تخفیف β برای استفاده از اتصالات بین هاب‌ها منظور می شود.
- هیچ اتصالی بین دو گره غیر هاب مجاز نیست.

تقاضای قطعات پس از ارسال سفارش از پایگاه هوایی و انتظار جهت بارگیری، از گره مبدأ (انبار) به سمت هاب تخصیص یافته‌اش حرکت می کند. پس از بارگذاری در هاب و بارگیری در وسیله نقلیه بین‌هابی موردنظر، به هاب مقصد فرستاده می شود. مجدداً بارگذاری و باراندازی به وسیله نقلیه برای طی مسیر و رسیدن به گره مقصد و باراندازی جهت برآوردن تقاضا در زمانی کمتر از پیشینه زمان تحویل^۳ انجام می شود. همچنین، طراحی به گونه‌ای انجام می شود که تقاضای جمع‌آوری شده در مسیر از ظرفیت وسیله نقلیه بین‌هابی بیش تر نشود.

اکنون می‌خواهیم با توجه به زمان تحویل و همچنین آلودگی اولیه حاصل از تجهیز کردن محل‌های دریافت و فرستادن قطعات، کمینه‌سازی میزان کربن دی‌اکسید رها شده در محیط‌زیست و مکان‌یابی براساس عوامل زیست‌محیطی، شیوه حمل‌ونقل و مکان‌یابی مناسبی ارائه دهیم. مسأله انتخاب نوع سیستم حمل‌ونقل و مکان‌یابی مراکز در یک شبکه پشتیبانی سبز مبحثی بسیار مهم است؛ برای طراحی و یا بهسازی شبکه باید در ابتدا مراکز کاندید را مشخص کرده و با توجه به توان پذیرش آن مرکز از وسایل نقلیه مختلف، برنامه‌ریزی شبکه را انجام دهیم.

مهم‌ترین ویژگی این تحقیق، مکان‌یابی سبز مراکز هاب در صنایع هوایی است که به

1. Hekmatfar, M (2009).

2. Alumur, S. (2008).

3. Lead-Time.

آلودگی موجود در آن وابسته است و ویژگی دیگر توجه به حمل‌ونقل بین‌هابی و انتخاب وسایل حمل‌ونقل در این شبکه گره و هاب است که با توجه به مصرف گاز کربن دی‌اکسید و تحویل سفارش در کمتر از بیشینه زمان تحویل تعیین می‌شود. با توجه به غیر قطعی بودن بسیاری از پارامترها در شبکه‌های پشتیبانی، طراحی شبکه در محیط عدم قطعیت و ارائه مدل فازی برای آن، باعث می‌شود نتایج حاصل با مدل‌های موجود در دنیای واقع تطابق بیشتری داشته باشد. به همین دلیل، در این مقاله پارامتر زمان ارسال قطعات بین‌گره‌ها به صورت فازی در نظر گرفته شده و در نهایت به روش خمینز^۱ و همکاران^۲ مدل قطعی متناظر به دست آمده است.

استفاده بهینه از تسهیلات موجود حمل‌ونقل و مکان‌یابی مناسب هاب در این پروژه با توجه به میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید حاصل از حمل‌ونقل و عامل دورکننده تأسیس هاب برای پیشگیری از آلودگی شهرهای با آلودگی زیاد است. عامل دورکننده تأسیس هاب، با استفاده از یک هزینه ثابت زیست‌محیطی با هدف تمرکززدایی آلودگی تنظیم شده است. عامل زیست‌محیطی با تأثیر خود، تخصیص بهینه گره‌ها به هاب را تعیین می‌کند که تاکنون مدلی جامع و راهبردی توسط هیچ‌یک از تحقیقات مطالعه شده برای خدمت به بشریت در این زمینه صورت نگرفته است.

مدل ریاضی به صورت مدل عدد صحیح مختلط برنامه‌ریزی شده و در اندازه کوچک توسط نرم‌افزار GAMS23.5/CPLEX حل شده است. از آنجا که مسأله برنامه‌ریزی شبکه هاب از نوع مسائل NP-Hard است، در این مقاله با استفاده از روش فراالبتکاری^۳ الگوریتم ژنتیک، مسأله در ابعاد بزرگ حل و اعتبارسنجی شده است.

از جمله مهم‌ترین کاربردهای مسأله حل شده در این مقاله، برنامه‌ریزی شبکه‌های لجستیک حمل، شبکه پشتیبانی قطعات، پست و... با توجه به کمینه‌سازی آلودگی زیست‌محیطی است. به عنوان نمونه از مدل ارائه شده می‌توان در مکان‌یابی هاب‌های هوایی شبکه پشتیبانی سازمان صنایع هوایی ایران استفاده کرد.

در بخش بعد، مرور ادبیاتی بر موضوع شامل تحقیقاتی در حوزه مکان‌یابی، مکان‌یابی

1. Jimenez.

2. Jiménez, M.; M. Arenas and A. Bilbao (2007).

3. Metaheuristic.

هاب، حوزه چند مده بودن حمل و نقل و شبکه حمل و نقل سبز در صنایع هوایی ارائه شده و شکاف تحقیقاتی استخراج می‌شود. در بخش دوم، ابتدا به‌طور مختصر کلیاتی درباره مدل پیشنهادی توضیح داده شده و سپس، مدل پیشنهادی در قالب عدد صحیح مختلط ارائه می‌شود. در این بخش، مدل ارائه شده پس از خطی‌سازی، جهت اعتبارسنجی در ابعاد کوچک حل شده و در نهایت، روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک برای حل مدل در ابعاد بزرگ پیشنهاد شده است. در بخش سوم مسأله در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده و نتایج آن با استفاده از تحلیل حساسیت ارائه خواهد شد. در نهایت، در بخش آخر نتایج عمده و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۱. کارهای مرتبط

در این بخش ادبیات پژوهش بررسی می‌شود. ابتدا موضوع مکان‌یابی هاب کامل معرفی شده و سپس، مرور ادبیات مباحث شبکه حمل و نقل هوایی سبز بررسی می‌شود. در نهایت، عرصه‌های تحقیقاتی در این حوزه برای یافتن شکاف تحقیقاتی و تعریف مسأله تحقیق معرفی شده‌اند.

گلاره و همکاران^۱ مدل جدید و نزدیک به دنیای واقعی را برای برنامه‌ریزی شبکه با استفاده از حمل و نقل دریایی معرفی کرده‌اند. آن‌ها طبق این مدل تعدادی از مراکز را در یک حلقه اصلی مشخص کرده و سایر مراکز را نیز تحت حلقه‌های ثانویه‌ای به مراکز اصلی تخصیص دادند. به اعتقاد ایشان، حمل و نقل دریایی مزایای زیادی دارد و تحت فرضی سایر وسایل حمل و نقل، غیرقابل رقابت با حمل دریایی است. اما به این دلیل که این فرض یک محدودیت بزرگ برای مدلی جامع ایجاد می‌کند این مدل را تنها برای حمل دریایی کارا می‌سازد.

Alumur و همکاران^۲ چند مده بودن را در یک شبکه مکان‌یابی هاب و طراحی شبکه آن در نظر گرفتند. ایشان هزینه حمل و نقل و زمان را جزء فرضیات مدل قرار دادند و مسأله مکان‌یابی و طراحی شبکه را چند مده و تک تخصیص برنامه‌ریزی نمودند. همچنین

1. Gelareh, S. (2011).

2. Alumer, S. A. (2012).

حمل‌ونقل دو حالت هوایی و زمینی را با فرض این که زمان حمل‌ونقل در حمل زمینی بیش تر و هزینه آن کمتر است در نظر گرفتند. در نهایت آن‌ها یک مدل عدد صحیح مختلط نوشته و محاسباتش را برای ترکیه انجام دادند.

Camargo و همکاران^۱ شبکه گره و هابی را با در نظر گرفتن کمان‌هایی در گره‌های تخصیص یافته به هر هاب مدل‌سازی کرده و با روش الگوریتم تجزیه بندرز حل کردند. اما مدل‌سازی ایشان تا حد زیادی از واقعیت به دور بود زیرا گاهی پارامترهای زیادی با پنج اندیس وارد مدل شده بودند و داشتن چنین اطلاعاتی از یک شبکه یا امکان‌پذیر نیست و یا زمان بسیار زیادی از سازمان می‌گیرد. در این پژوهش سعی شده است از ارتباط‌های فاصله‌ای و زمانی در شبکه برای واقعی‌سازی و راحتی در استفاده از مدل استفاده شود.

Vera و همکاران^۲ یک مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی برای تعیین مکان یک تعداد ثابتی از تسهیلات ارائه کرده‌اند به طوری که کاربری این تسهیلات حداکثر شود. همچنین، تسهیلات به‌عنوان یک هاب مدل می‌شوند. رفت و آمدها می‌تواند به‌عنوان تسهیلات یا انتخاب سفر به وسیله ماشین به مقصدشان استفاده شود و از یک مدل لگاریتمی پیروی کند. ایشان همچنین یک رویکرد P-هاب را با در نظر گرفتن استفاده‌کننده‌هایی که هزینه‌های عمومی استفاده از تسهیلات را می‌دانند به کار گرفته و آن را به‌عنوان ورودی‌های مدل لگاریتمی در نظر گرفته‌اند. همچنین، برای مسائل با اندازه کوچک، با استفاده از یک برنامه‌ریزی خطی ترکیبی، مسأله غیرخطی صفر و یک را دقیقاً حل کرده و برای حل مسائل با اندازه بزرگ از یک الگوریتم ابتکاری استفاده کرده‌اند. در نهایت، برای نشان دادن کارایی مدل ارائه شده نیز از یک مطالعه موردی استفاده کرده‌اند.

Harris و همکارانش^۳ نیز مدل ریاضی‌ای ارائه دادند که در آن، اثرات زیست‌محیطی به‌عنوان یک تابع هدف مجزا از اهداف اقتصادی در نظر گرفته شد. در مدل ارائه شده توسط آن‌ها فرض شده است که اثرات زیست‌محیطی به نسبت، بالاتر از اثرات زیست‌محیطی ناشی از راه‌اندازی تسهیلات مربوطه است. همچنین، ایشان فرض کردند تمام اثرات زیست‌محیطی تنها مربوط به حمل‌ونقل کالا است. نتایج حاصل از حل نمونه‌های مختلف نشان داد که

1. Camargo R. S., Miranda G. d. and A. Løkketangen (2013).

2. Aros-Vera, F., Marianov, V. and J. E. Mitchell (2013).

3. Harris, I., Mumford, C. and M. Naim (2009).

نتایج می‌تواند به نحو مطلوبی به تصمیم‌گیرنده در انتخاب آگاهانه^۱ کمک کند. Dekker و همکاران^۲ یک مرور ادبیات در حوزه تحقیق در عملیات بر موضوع لجستیک سبز داشتند و در آن، کلیه موضوعات حمل‌ونقل از جهات سرعت، شیب مسیر و انتخاب مسیر و از سوی دیگر چرخه عمر محصول تولیدی، انتخاب از میان تسهیلات و کلیه عوامل دخیل را بررسی کرده‌اند.

محمدی و همکاران^۳ مسأله چند هدفه شبکه هاب سبز را با فرض زمان سرویس‌دهی احتمالی با توجه به زمان و ظرفیت انجام دادند. یکی از توابع هدف هزینه را کمینه می‌کند و دیگری مسیر طی شده را که همراه با اثر مستقیم بر انتشار آلودگی دارد کمینه کرده است. در این تحقیق مسیرهای انتخابی به صورت پارامتر، وارد مسأله شده و خواص مختلفی دارند. آن‌ها برای حل این مدل از روش فراابتکاری مختلفی استفاده کردند و در نهایت، از بهترین روش یعنی علف هرز استفاده کردند.

Sarkar^۴ در تحقیقی پس از بررسی رشد استفاده از حمل‌ونقل هوایی با توجه به استفاده بیش از پیش حمل‌ونقل هوایی به بررسی عوامل تأثیرگذار بر سبز شدن این صنعت پرداخته است. وی از سویی ساخت هواپیمای سبز به کمک طراحی بهینه موتور، ساخت آیرودینامیک هواپیما، استفاده از کامپوزیت‌های مناسب برای هواپیما و قابلیت بهسازی سوخت یا استفاده از سوخت‌های زیستی و از سوی دیگر استفاده از مدل‌های بهینه کسب و کار به کمک برنامه‌ریزی بهینه زنجیره تأمین را مهم‌ترین راهکارهای کاهش گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده از صنعت هوایی برای بهبود شرایط محیط‌زیست دانسته است.

Lay و همکاران^۵ مسائل زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های هوایی را با تمرکز بر تشعشعات هواپیما و آلودگی صوتی آن بررسی کردند. ایشان در مقاله خود مدل‌سازی ریاضی و تحلیل آماری را مورد بحث قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که استراتژی‌های زیادی برای به کارگیری در صنعت هوایی سبز وجود دارد.

1. Informed Choice.

2. Dekker, R., Bloemhof, J. and I. Mallidis (2012).

3. Mohammadi, M., Razmi, J. and R. Tavakkoli-Moghaddam (2013).

4. Sarkar A. N. (2012).

5. Lay Eng Teoh and Hooi Ling Khoo (2016).

عبدلقانی و همکاران^۱ نیز با ارائه مدل ریاضی، مصرف سوخت هواپیما را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفتند که باید با توجه به سناریوهای مختلف مصرف سوخت هواپیما و شرایط عملکردی پرواز کمینه شود.

Visser^۲ مسیر هواپیما را توسط حداقل کردن آلودگی صوتی براساس معیارهای عمومی و معیارهای مختص مکان بهینه کرد. نقطه ضعف بیان پارامترهای زیست‌محیطی به‌عنوان تابع هدف این است که جواب‌شدنی ممکن است از لحاظ اقتصادی بهینه نباشد. این به این معنی است که آژانس‌های هوایی باید سطح سود خود را به عملکردی سبزتر اختصاص دهند. با توجه به مرور ادبیات صورت گرفته، تعداد زیادی از فعالیت‌ها در زمینه هاب تنها براساس هزینه انجام شده و کارهای اندکی بر پایه میزان آلودگی برنامه‌ریزی شده است. از سوی دیگر در شبکه‌های هاب مطالعه شده در صنایع هوایی، مدلی که براساس آلودگی موجود گره‌ها مکان‌یابی را برنامه‌ریزی کند، وجود ندارد و با توجه به اهمیت این موضوع مسأله‌ای قابل بحث است؛ زیرا تأثیر زیست‌محیطی مکان‌یابی در گره‌های مختلف با توجه به اقلیم و آلودگی موجود در هر گره متفاوت خواهد بود. نکته دیگر این که تاکنون فعالیتی در شبکه هاب تأمین پشتیبانی سبز چند مده با ظرفیت و زمان تحویل کالا انجام نشده است. انتخاب مد حمل برای جلوگیری از آلودگی هوا موضوع مهمی است زیرا مدهای مختلف حمل ظرفیت‌ها و سرعت‌های جابه‌جایی متفاوتی دارند. با توجه به شکاف تحقیقاتی موجود، نوآوری این پژوهش در نظر گرفتن آلودگی گره‌ها و همچنین مدهای مختلف حمل‌ونقل در مسأله مکان‌یابی است. بر این اساس در بخش بعد، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جهت بهینه‌سازی زیست‌محیطی شبکه حمل‌ونقل پشتیبانی در صنایع هوایی با وجود چند مد حمل‌ونقل ارائه شده است.

۲. مدل‌سازی ریاضی و روش حل پیشنهادی

در این مقاله کمینه کردن آلودگی ناشی از سوخت وسایل نقلیه هوایی، به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. هر هاب عبارت است از ایستگاهی که در آن نیاز قطعات متمرکز شده و به‌عنوان ایستگاه اصلی، رابطه بین سایر ایستگاه‌ها را مشخص می‌کند. جریان‌ها نیز شامل

1. Abdelghany, K., Abdelghany, A., and S. Raina (2005).

2. Visser, H. G. (2005).

جابه‌جایی قطعات و تجهیزات توسط وسایل نقلیه مختلف است که با استفاده از هواپیما یا بالگرد انجام می‌شود. در این مسأله پارامتر زمان سفر بین هر دو گره به صورت اعداد فازی در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱. فرضیات مدل

در بخش قبل فرضیات مختلف اتخاذ شده توسط سایر محققان بررسی شد. مسائل شامل مفروضات مختلفی بودند که با توجه به نوع مسائل هیچ‌یک کاملاً قابلیت همگام‌سازی با مسأله مورد نظر ما را نداشتند. فرضیات این تحقیق عبارتند از:

- ارتباط مستقیم بین نقاط غیر هاب امکان‌پذیر نیست.
- با ارتباط بین تمامی جفت هاب‌ها، شبکه هاب تکمیل می‌شود.
- مسأله از نوع p -میانه است و هر گره غیر هاب فقط به یک هاب تخصیص داده شده است.
- تعداد هاب‌هایی که باید تأسیس شود، مشخص و برابر p است.
- زمان سفر بین دو گره به صورت پارامتری فازی در نظر گرفته شده است.
- مکان گره‌ها مشخص و قطعی است و تمام گره‌ها پتانسیل هاب شدن دارند.
- هاب‌ها تسهیلات مختلفی دارند، ولی یک منتقل‌کننده با توجه به کمینه‌سازی مضرات زیست‌محیطی و رساندن بار در زمان تحویل سفارش بین هر دو هاب انتخاب می‌شود.
- گره‌های تخصیص یافته به هر هاب، مسیر جهت‌دار دارند.
- وسایل نقلیه بین‌هابی محدودیت ظرفیت دارند.

۲-۲. مدل‌سازی فازی مسأله

پس از تشریح فرضیات مدل در این بخش پارامترها، متغیرهای تصمیم و فرمول‌نویسی مدل در حالت فازی ارائه می‌شود:

۲-۲-۱. مجموعه‌ها

مجموعه گره‌ها $\{i, j, f = 1, 2, \dots, n\}$	I, J, F
مجموعه گره‌های منتخب تحت عنوان هاب $\{k, m = 1, 2, \dots, p\}$	K, M
مجموعه نوع وسیله نقلیه $\{v = 1, 2\}$	V

۲-۲-۲. پارامترهای مدل

تعداد هاب‌ها	p
جریان بین گره‌های i, j	w_{ij}
فاصله بین گره‌های i, j	d_{ij}
کربن دی اکسید موجود در هوای هر گره i	A_i
ضریب تولید کربن دی اکسید وسیله انتقال v	α_v
زمان سفر بین گره i, j	\tilde{t}_{ij}
زمان بارگیری و بارگذاری در گره غیر هاب	SN
زمان بارگیری و بارگذاری در هاب	SK
زمان موجود جهت تحویل سفارش	ld
ظرفیت وسیله نقلیه v	cap_v
ضریب تخفیف انتقال بین هابی	β
ضریب سرعت وسیله نقلیه v	θ_v
۱ اگر وسیله انتقال v در هاب k موجود باشد ۰ در غیر این صورت	p_k^v

۲-۲-۳. متغیرهای تصمیم

۱ اگر گره i به هاب k تخصیص داده شود ۰ در غیر این صورت	z_{ik}
۱ اگر وسیله انتقال v ارتباط بین k و m را برقرار کند ۰ در غیر این صورت	y_{km}^v

۲-۲-۴. فرمول نویسی مدل

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_k A_k \cdot z_{kk} \\
 & + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m \sum_v w_{ij} (z_{ik} \cdot d_{ik} + z_{ik} \cdot z_{jm} \cdot d_{km} \cdot y_{km}^v \cdot \alpha_v \cdot \beta + z_{mj} \cdot d_{mj})
 \end{aligned} \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_k z_{ik} = 1 \quad (۲)$$

$$\sum_k z_{kk} = p \quad (۳)$$

$$z_{ik} \leq z_{kk} \quad \forall i, k \quad (۴)$$

$$\sum_i \sum_j z_{ik} \cdot z_{mj} \cdot y_{km}^v \cdot w_{ij} \leq cap_v \quad \forall k, m, v \quad (۵)$$

$$y_{km}^v \leq z_{kk} \quad \forall k, m, v \quad (۶)$$

$$y_{km}^v \leq z_{mm} \quad \forall k, m, v \quad (۷)$$

$$\sum_v \sum_{m \neq k} \sum_k y_{km}^v = p \cdot (p - 1) \quad (۸)$$

$$\sum_v y_{km}^v \leq 1 \quad \forall k, m \quad (۹)$$

$$\forall i, j \neq i, k, m, v \quad (۱۰)$$

$$(z_{ik} \cdot \tilde{t}_{ik} + z_{ik} \cdot z_{jm} \cdot \theta_v \cdot y_{km}^v \cdot \tilde{t}_{km} + z_{mj} \cdot \tilde{t}_{mj}) + 2SK + 2SN \leq ld_{ij}$$

$$y_{km}^v \leq (p_k^v + p_m^v)/2 \quad \forall k, m, v \quad (۱۱)$$

$$y_{km}^v, z_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, m, v \quad (۱۲)$$

در مدل فوق تابع هدف (۱) شامل کمینه کردن کل کربن دی اکسید منتشر شده از انتقال تجهیزات در شبکه هاب با توجه به تسهیلات انتقال و مجموع کربن دی اکسید موجود در گره‌های منتخب به‌عنوان هاب است. در واقع، بخش اول تابع هدف نشان‌دهنده کمینه‌سازی آلودگی ایجاد شده توسط گره‌ها است و بخش دوم کربن دی اکسید حاصل

از انتقال تجهیزات را کمینه می‌کند. محدودیت (۲) مشخص‌کننده تخصیص تکی گره‌های غیرهاب به هاب‌ها است. محدودیت (۳) تضمین‌کننده انتخاب تعداد p هاب در شبکه بوده و تخصیص گره‌ها به هابشان با محدودیت (۴) مشخص می‌شود. محدودیت ظرفیت یک وسیله نقلیه توسط معادله (۵) بیان می‌شود، به نحوی که کل تقاضای تجمیع‌شده باید از ظرفیت آن وسیله نقلیه کمتر باشد. محدودیت‌های (۶) و (۷) برای تعیین وسیله نقلیه تنها بین زوج هاب‌ها تشریح شده است. بین هر دو زوج هاب یک تسهیل که در مبدأ و مقصد قابل سرویس‌دهی باشد جهت انتقال انتخاب می‌شود، که این انتخاب توسط محدودیت (۸) با در نظر داشتن کل وسایل نقلیه تعیین می‌شود. تنها یک نوع تسهیل انتقال بین دو زوج هاب در هر سو باید در نظر گرفته شود که محدودیت (۹) آنرا تضمین می‌کند. محدودیت (۱۰) تضمین‌کننده تحویل جنس در زمانی کمتر از زمان تحویل است. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که هاب مبدأ و مقصد توانایی سرویس‌دهی به تسهیلات منتخب جهت انتقال بین آن دو زوج هاب را دارند. در نهایت محدودیت (۱۲) صفر و یک بودن متغیرهای مسأله را نشان می‌دهد.

۵-۲-۲. خطی‌شده مدل پیشنهادی

مدل ریاضی موجود غیرخطی است و برای حل دقیق آن به خطی‌سازی مسأله حس نیاز می‌شود. متغیر کمکی X_{ijkm} که برابر است با ضرب متغیرهای Z_{jm} و Z_{ik} توسط معادلات (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) اضافه می‌شود.

$$X_{ijkm} \leq Z_{jm} \quad \forall i,j,k,m \quad (13)$$

$$X_{ijkm} \leq Z_{ik} \quad \forall i,j,k,m \quad (14)$$

$$x_{ijkm} \geq \frac{Z_{ik} + Z_{jm} - 1}{2} \quad \forall i,j,k,m \quad (15)$$

$$x_{ijkm} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k,m \quad (16)$$

متغیر کمکی جدید X_{ijkmv} نیز که برابر است با ضرب متغیرهای x_{ijkm} و y_{km}^v با معادلات

(۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) به مدل اضافه می‌شود.

$$xy_{ijkmv} \leq x_{ijkm} \quad \forall i,j,k,m,v \quad (17)$$

$$xy_{ijkmv} \leq y_{km}^v \quad \forall i,j,k,m,v \quad (18)$$

$$xy_{ijkmv} \geq \frac{y_{km}^v + x_{ijkm} - 1}{2} \quad \forall i,j,k,m,v \quad (19)$$

$$xy_{ijkmv} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k,m,v \quad (20)$$

اکنون تابع هدف (۱) با معادله (۲۱) جایگزین می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum A_k \cdot z_{kk} \quad \forall i,j,k,m,v \quad (21) \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m \sum_v w_{ij} (z_{ik} \cdot d_{ik} + xy_{ijkmv} \cdot d_{km} \cdot \alpha_v \cdot \beta + z_{jm} \cdot d_{jm}) \end{aligned}$$

برای خطی کردن محدودیت‌های (۵) و (۱۰) نیز به ترتیب محدودیت‌های زیر جایگزین می‌شود:

$$\sum_i \sum_j xy_{ijkmv} \cdot w_{ij} \leq cap_v \quad \forall v,m,k \quad (22)$$

$$(z_{ik} \cdot \tilde{t}_{ik} + xy_{ijkmv} \cdot \tilde{t}_{km} \cdot \theta_v + z_{mj} \cdot \tilde{t}_{mj}) + 2SK + 2sn \leq ld_{ij} \quad \forall i,j \neq i,k,m,v \quad (23)$$

۲-۳. مدل قطعی کمکی متناظر

روش‌های متفاوتی برای قطعی کردن مدل‌های فازی براساس روش رتبه‌بندی اعداد فازی وجود دارد. در این مقاله با توجه به این که پارامتر زمان سفر تنها در محدودیت‌ها وجود داشته و اعداد به صورت فازی مثلثی در نظر گرفته می‌شوند و اهمیت خطی بودن مسأله برای حل دقیق، از روش ارائه شده توسط خمینز و همکاران استفاده شده است. در این روش، اعداد فازی برای تعریف درجه موجه بودن بردار جواب و مفهوم حل بهینه قابل قبول رتبه‌بندی می‌شوند.

مدل قطعی کمکی متناظر با مدل پیشنهادی با جایگزینی معادله (۲۴) به جای معادله (۲۳) در مدل مذکور به دست می‌آید:

$$z_{ik} \cdot \left((1 - \alpha) \cdot \frac{t_{ik}^1 + t_{ik}^2}{2} + (\alpha) \cdot \frac{t_{ik}^2 + t_{ik}^3}{2} \right) + xy_{ijkmv} \cdot \left((1 - \alpha) \cdot \frac{t_{km}^1 + t_{km}^2}{2} + (\alpha) \cdot \frac{t_{km}^2 + t_{km}^3}{2} \right) \cdot \theta_v \quad 1, V \quad (24)$$

$$+ z_{mj} \cdot \left((1 - \alpha) \cdot \frac{t_{mj}^1 + t_{mj}^2}{2} + (\alpha) \cdot \frac{t_{mj}^2 + t_{mj}^3}{2} \right) + 2SK + 2sn \leq ld_{ij}$$

با توجه به این که به ازای α های مختلف (درجه موجه بودن محدودیت‌ها)، جواب‌های مختلفی تولید می‌شود، همچنین امکان یافتن جواب بهتر برای تابع هدف نیز نیازمند در نظر گرفتن درجه پایین تری از موجه بودن محدودیت‌ها است، به این ترتیب می‌توان گفت تصمیم‌گیرنده با دو هدف متضاد در ارتباط است:

- بهبود مقدار تابع هدف
- رضای محدودیت‌ها در سطح α

۲-۴. اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

در این قسمت، مدل ارائه شده حل شده و اعتبارسنجی خواهد شد. بدین منظور مسأله‌ای در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار GAMS23.5/CPLEX حل شده است و از آن‌جا که در ادبیات مربوط به مسائل مکان‌یابی هاب، مدلی مانند مدل این پژوهش وجود ندارد، بنابراین دسترسی به اطلاعات جامع از یک مسأله با مفروضات ارائه شده وجود نداشته و از سایر کارهای مرتبط اطلاعاتی استفاده شده است.

همچنین، برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مفروضات زنجیره تأمین Zhang و همکاران با اندکی تغییر به کار رفته است. به این صورت که اثر پیوندهای بخشی از پارامتر فاصله شبکه AP^۱ طبق جدول (۱) جایگزین شده و پارامتر جریان شبکه AP نیز طبق جدول (۲) در آن ضرب می‌شود. افزون بر این، باید گفت در پیوندهای میان هابی راهکار دوم یعنی ضریب تخفیف به میزان ۰/۶ و برای سایر پیوندها راهکار اول یعنی برابر ضرب فاصله در جریان انتخاب شده و اثرات زیست‌محیطی ناشی از راه‌اندازی هاب با توجه به میزان آلودگی

موجود در هاب‌ها در سطح اول آلودگی موجود در کلیه گره‌ها نیز برابر ۲۰ و در سطح دوم برابر ۳۰ است که به تفکیک در جدول (۴) ملاحظه می‌شود.

همچنین، از آن‌جا که بخش اعظم ادبیات مسائل زیست‌محیطی در سیستم‌های پشتیبانی مربوط به اثر کربن دی‌اکسید (CO_2) آزاد شده است، این نمونه نیز تنها این اثر را در نظر گرفته و دنبال می‌شود. با توجه به بررسی رزمی و نصراللهی درباره تسهیلات انتقال کالا، نسبت‌های ضریب تخفیف زیست‌محیطی حمل ریلی ۰/۲۵ حمل جاده‌ای و حمل با هواپیما ۶/۲۵ برابر حمل جاده‌ای در نظر گرفته شده که در انتقال بین‌هابی مؤثر است. این پارامتر و پارامتر تخفیف زمان سفر به همراه ظرفیت کلیه وسایل نقلیه در جدول (۵) معرفی شده است.

پارامتر زمان سفر بین گره‌ها، زمان تنظیم در گره‌ها و هاب‌ها به صورت تصادفی تعیین شده‌اند. زمان تنظیم در گره‌ها ۰/۱ و در هاب‌ها ۰/۴ واحد زمان در نظر گرفته شده است. مقدار میانی پارامتر زمان سفر که با فاصله رابطه مستقیمی دارد نیز در جدول (۳) ملاحظه می‌شود.

همچنین، از آن‌جا که زمان پارامتری فازی فرض شده است، بنابراین، زمان را به صورت $(0.9t_{ij}, t_{ij}, 1.1t_{ij})$ تحت عنوان اعداد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است. سطح ارضای محدودیت‌ها نیز برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شده و ویژگی گره‌ها نیز در جدول (۴) مشاهده می‌شود.

جدول ۱- فاصله گره‌های i و j در بخشی از شبکه AP

d_{ij}	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
$j=1$	۰	۱۰	۱۷۳۵۲/۵۲	۱۴۴۸	۱۷۸۲۹/۲۹	۳۳۴۲/۴۷
$j=2$	۱۰	۰	۱۷۳۵۱/۶۹	۱۴۳۸	۱۷۸۲۶/۸۶	۳۳۴۲/۱۷
$j=3$	۱۷۳۵۲/۵۲	۱۷۳۵۱/۶۹	۰	۱۷۲۹۲	۲۸۹۶	۵۰۵۱/۰۸
$j=4$	۱۴۴۸	۱۴۳۸	۱۷۲۹۲	۰	۱۷۵۳۲/۸۳	۳۳۲۶/۲۸
$j=5$	۱۷۸۲۹/۲۹	۱۷۸۲۶/۸۶	۲۸۹۶	۱۷۵۳۲/۸۳	۰	۵۰۴۳
$j=6$	۳۳۴۲/۴۷	۳۳۴۲/۱۷	۵۰۵۱/۰۸	۳۳۲۶/۲۸	۵۰۴۳	۰

جدول ۲- جریان تقاضا بین گره‌های i و j در بخشی از شبکه AP

w_{ij}	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
$j=1$	۰/۳۸۶۶۴	۰/۰۱	۰/۱۸۵۲۳	۰/۳۹۴۷۶	۰/۰۱	۰/۰۹۵۳۴
$j=2$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
$j=3$	۰/۱۹۳۶۳	۰/۰۱	۰/۰۹۲۷۶	۰/۱۹۷۶۹	۰/۰۱	۰/۰۴۷۷۵
$j=4$	۰/۱۹۲۷۱	۰/۰۱	۰/۰۹۲۳۲	۰/۱۹۶۷۶	۰/۰۱	۰/۰۴۷۵۲
$j=5$	۰/۰۱۲۶۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱۲۸۸	۰/۰۱	۰/۰۱
$j=6$	۰/۰۷۱۸۵	۰/۰۱	۰/۰۳۴۴۲	۰/۰۷۳۳۶	۰/۰۱	۰/۱۱۹۷۸

جدول ۳- حد میانی زمان سفر بین گره‌های i و j

t_{ij}	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
$j=1$	۰	۰/۰۱	۱۷/۳۵	۱/۴۴۸	۱۷/۸۳	۱۳/۴۲
$j=2$	۰/۰۱	۰	۱۷/۳۵	۱/۴۳۸	۱۷/۸۲	۱۳/۴۲۵
$j=3$	۱۷/۳۵	۱۷/۳۵	۰	۱۷/۲۹۲	۲/۸۹۶	۳۰/۵۱۸
$j=4$	۱/۴۴۸	۱/۴۳۸	۱۷/۲۹۲	۰	۱۷/۵۳	۱۳/۲۷
$j=5$	۱۷/۸۳	۱۷/۸۳	۲/۸۹۶	۱۷/۵۳	۰	۳۰/۴۳۵
$j=6$	۱۳/۴۲۶	۱۳/۴۲۵	۳۰/۵۱	۱۳/۲۷	۳۰/۴۳۵	۰

جدول ۴- ویژگی‌های گره i

گره	جاده‌ای	بالگرد	هوایی	آلودگی اولیه موجود
$i=1$	✓	✓	x	۳۰
$i=2$	✓	✓	✓	۲۰
$i=3$	✓	✓	✓	۲۰
$i=4$	✓	✓	✓	۳۰
$i=5$	✓	x	✓	۳۰
$i=6$	✓	✓	✓	۲۰

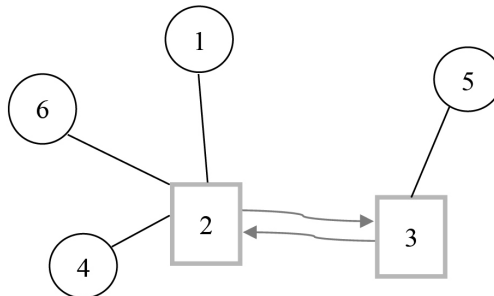
جدول ۵- ویژگی‌های تسهیلات بین‌هابی v

تسهیل بین‌هابی	α_v	θ_v	Cap_v
جاده‌ای ($v=1$)	۱	۱	۴۰۰
بالگرد ($v=2$)	۰٫۲۵	۲	۷۰۰
هوایی ($v=3$)	۶٫۲۵	۰٫۲	۵۰۰

جدول ۶- بیش‌ترین زمان ممکن برای انتقال بین‌گره‌های i و j

Idij	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
j=1	۰	۲۹	۲۳	۲۵	۲۷	۲۷
j=2	۲۳	۰	۲۳	۲۵	۲۷	۲۹
j=3	۲۵	۲۹	۰	۲۵	۲۶	۲۹
j=4	۲۶	۲۹	۲۴	۰	۲۷	۲۵
j=5	۲۳	۲۹	۳۳	۲۵	۰	۲۸
j=6	۲۴	۲۹	۳۵	۲۵	۲۷	۰

جدول (۶) نمایانگر بیش‌ترین زمان ممکن برای انتقال بین‌گره‌های i و j است که به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. حل این نمونه به‌ازای دو هاب توسط یک رایانه شخصی $۲٫۲$ GHz و ۴ MB حافظه جانبی در $۰٫۳۹۷$ ثانیه انجام شد. شکل (۱) نمایش‌گردهنده شبکه طراحی بهینه این مسأله است. طرح بهینه این شبکه که مجموع آلاینده‌گی حمل‌ونقل و آلاینده‌گی زیست‌محیطی گره‌های دو و سه را دربردارد، برابر است با $۱۶۴۷۷۴/۵۳۲$ واحد.



شکل ۱- شبکه طراحی بهینه مسأله اعتبارسنجی

تسهیلات مناسب انتقال بین هاب‌ها، گره دو به سه هواپیما و سه به دو نیز هواپیما به دست آمده که در ۳/۴۷ واحد زمان انجام می‌شود و تخصیص گره‌ها نیز در شکل (۱) به وضوح نمایان است. با توجه به این که بیش‌ترین زمان ممکن برای انتقال بین گره‌ها اعداد کوچکی در نظر گرفته شده‌اند، برای رفع محدودیت زمان، از حمل‌ونقل هواپیما که سرعت بالاتری دارد، استفاده شده است. گره‌های دو و سه نیز به‌عنوان هاب انتخاب شده و تا حد امکان از نقاط آلوده‌تر دور شده‌اند، هرچند با بیش‌تر شدن این اعداد این موضوع اثر خود را بیش‌تر نمایان خواهد ساخت. از آنجاکه مدل حل شده با توجه به توضیحات ارائه‌شده جوابی منطقی ارائه داد، می‌توان به صحت عملکرد مدل پی‌برد. در ادامه روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک برای حل مدل در ابعاد بزرگ بررسی و پیشنهاد می‌شود.

۲-۵. روش حل پیشنهادی

برخی مسائل بهینه‌سازی مسائلی‌اند که نرخ رشد فضای جواب‌هایشان با متغیرها، یک رابطه چندجمله‌ای خطی است. این مسائل با الگوریتم‌های قطعی به‌سادگی قابل‌حل‌اند ولی در مقابل در بسیاری مسائل بهینه‌سازی فضای جواب‌ها، با افزایش تعداد متغیرها، به‌صورت نمایی رشد می‌کند. این مسائل را نمی‌توان در زمان‌های معقول محاسباتی با روش‌های قطعی حل کرد. این دسته مسائل، مسائل NP-Hard هستند. مسائل مکان‌یابی هاب جزء مسائل NP-Hard بوده^۱ و یکی از بهترین روش‌های حل‌شان، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری است که در واقع یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند. این الگوریتم‌ها مکانیزم‌های خروج از بهینه محلی داشته و قابل‌کاربرد در طیف وسیعی از مسائل هستند^۲.

۲-۵-۱. ساختار کلی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک الگوریتم تکاملی است که در سال ۱۹۷۵ توسط جان هلند^۳، ارائه شده و در دهه ۱۹۸۰ بسیار مورد توجه قرار گرفت. الگوریتم ژنتیک روش فراابتکاری است که با استفاده از روش‌های الهام‌گرفته‌شده از طبیعت به جواب‌های مطلوب می‌رسد. الگوریتم ژنتیک تعداد زیادی از راه‌حل‌های ممکن را تولید کرده و هر یک را با استفاده

1. Hekmatfar, M. and M. Pishvaei (2009).

2. Blum, C. and A. Roli (2003).

3. Holland.

از تابع تناسب ارزیابی کرده و از بهترین جواب‌ها در مرحله بعد برای تولید جواب‌های بهتر استفاده می‌کند. این روش کمک می‌کند تا الگوریتم براساس دو مؤلفه استخراج و اکتشاف یک راه‌حل بهینه سراسری بیابد. استخراج یا جست‌وجوی محلی کمک می‌کند تا الگوریتم راه‌حل‌های محلی بهتر و جدیدتر را بیابد و اکتشاف تلاش برای راه‌حل بهینه کلی از طریق کاوش در تمام فضای راه‌حل است^۱. ایجاد تعادل درست بین این دو مؤلفه، باعث همگرایی الگوریتم به راه‌حل بهینه خواهد شد.

این الگوریتم با راه‌حل‌هایی تصادفی به نام «جمعیت» متشکل از کروموزوم‌ها شروع شده و این عمل براساس عملگر تابع تناسب انجام می‌شود؛ به این صورت که احتمال انتخاب برای فرزندان دارای تابع تناسب بالاتر، بیش‌تر است.

الگوریتم ژنتیک پنج پارامتر دارد: تابع تناسب^۱، آستانه تناسب، جمعیت^۲، نرخ تقاطع^۴ و جهش^۵. تابع تناسب نشانگر عملگر مورد استفاده برای اندازه‌گیری میزان تناسب جمعیت تولید شده است. آستانه تناسب، شرایط توقف الگوریتم را تعیین می‌کند و پارامتر جمعیت، تعداد جمعیتی که باید در تکرار استفاده شود را معین می‌کند.

۲-۵-۲. نحوه نمایش جواب‌ها

اولین گام در الگوریتم پیشنهادی کد کردن متغیرهای مسأله در غالب بردارها یا کروموزوم‌های حامل جواب و به عبارت بهتر «نحوه نمایش جواب‌ها» است. در مدل ریاضی ارائه شده برای مسأله مورد نظر، متغیر Z_{ik}^V و Z_{km}^V متغیر اصلی مسأله است و نشان‌دهنده تخصیص گره‌ها به هاب‌های انتخاب شده و نوع مد انتقال بین هاب‌ها هستند. همان‌طور که ذکر شد در ابتدا تعداد p گره به صورت تصادفی انتخاب شده و پس از آن تخصیص گره‌ها و تسهیلات بین آن‌ها انجام می‌گیرد. جواب اولیه که همان تلفیق دو متغیر Z_{ik}^V و Z_{km}^V است برای نمونه در شکل زیر نمایش داده شده است.

به‌طور نمونه کروموزوم بهینه مسأله شماره یک که در شکل (۲) نشان داده شد به شرح زیر است. سطر اول شماره گره را جهت آشنایی با رمز‌گشایی نشان می‌دهد. مقدار هر ژن در سطر دوم بیانگر تخصیص به آن هاب را نشان می‌دهد و سطر سوم بیانگر مد حمل بین هاب‌ها است.

1. Blum, C. and A. Roli (2003).

2. Fitness Function.

3. Population.

4. Cross over Rate.

5. Mutation Rate.

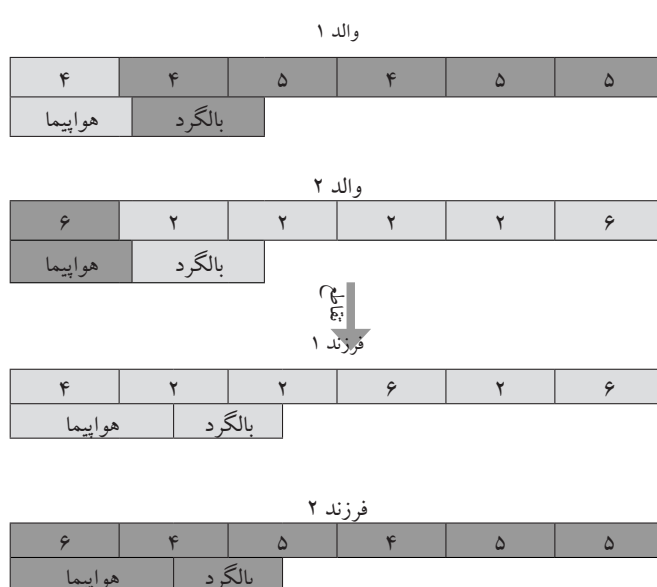
۱	۲	۳	۴	۵	۶
۲	۲	۳	۲	۳	۲
هوایما	هوایما				

شکل ۲- کروموزوم مسأله ۱

گره‌های دو و سه به صورت تصادفی با عنوان هاب شناخته شده و سایر گره‌ها نیز با توجه به مقدار تصادفی از میان مقدار هاب‌ها به یکی از آن‌ها تخصیص یافته است. ردیف دوم نیز مد انتقال بین هابی را به صورت تصادفی از بین تسهیلات انتقال موجود هر دو زوج هاب که به ترتیب افزایش عدد هاب به صورت افزایشی با ارجحیت عدد اول در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد.

۳-۵-۲. عملگر تقاطع

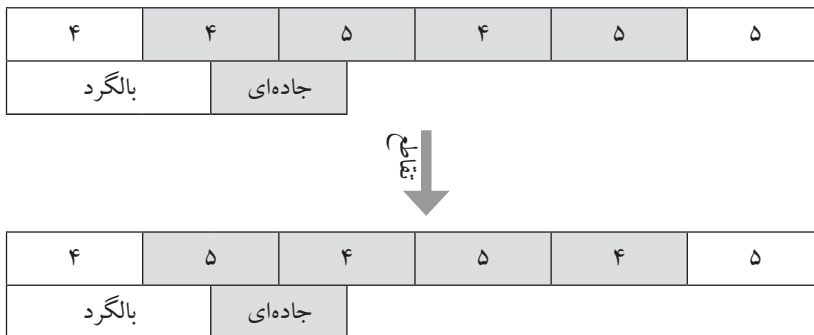
در این پژوهش از ترکیب یک نقطه‌ای استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، والد یک و دو که به صورت تصادفی از مسأله اول، انتخاب شده‌اند از بخش اول برای ترکیب بریده شده‌اند. پس از ترکیب با توجه به تعداد هاب و وضعیت تخصیص گره‌ها طی چند عملگر کروموزوم‌ها اصلاح می‌گردند.



شکل ۳- نمونه عملکرد تقاطع

۶-۵-۲. عملگر جهش

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ژن دوم و پنجم به صورت تصادفی انتخاب شده با برچیدن ژن انتخابی کوچک‌تر، سایر ژن‌ها تا ژن تصادفی بزرگ‌تر به عقب حرکت می‌کنند. سپس ژن کوچک‌تر انتخابی محل خالی شده بر اثر حرکت را پر می‌کند. پس از ترکیب با توجه به تعداد هاب و وضعیت تخصیص گره‌ها در چند عملگر کروموزوم‌ها اصلاح می‌شوند.



شکل ۴- نمونه عملگر جهش

۳. نتایج محاسباتی و تحلیل داده‌ها

پس از بررسی و شرح مدل ریاضی و الگوریتم پیشنهادی در این فصل به تجزیه و تحلیل روش حل ارائه شده پرداخته می‌شود. ابتدا مشخصات نمونه مسائل حل شده مطرح شده و پس از آن مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهادی با توجه به کیفیت جواب‌ها، ارزیابی و تنظیم می‌گردد. جهت بررسی عملکرد مدل و الگوریتم، اندازه‌های مختلفی از مسأله حل و بررسی شده‌اند. ضمناً تحلیل حساسیت برخی پارامترها انجام پذیرفته است. همچنین مسأله مورد نظر براساس درجات مختلف موجه بودن محدودیت‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این مقاله چهار نمونه مسأله با تعداد گره‌های ۶، ۱۰، ۲۵، ۲۰۰ (اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ) به منظور عملکرد الگوریتم ارائه شده است. برای هر یک از نمونه بیشینه زمان تحویل، ظرفیت هاب و تعداد هاب در چند میزان تغییر می‌کند. به منظور تحلیل

حساسیت الگوریتم پیشنهادی مقدار ضریب تخفیف زمانی تسهیلات حمل‌ونقل و در مسأله‌ای دیگر سطح آلودگی یک گره تغییر و اثرات آن ارزیابی می‌گردد. چون فرض شده است که زمان پارامتری فازی است، بنابراین زمان را به صورت $(0.9t_{ij}, t_{ij}, 1.1t_{ij})$ با عنوان اعداد فازی مثلثی در نظر گرفته‌ایم.

با توجه به نتایج حاصل از اجرای الگوریتم حل مسأله به روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی جهت تنظیم پارامترها، مقدار مناسب برای پارامتر اندازه جمعیت نسل‌ها ۴۰، تعداد نسل‌ها ۴۰، تعداد نخبگان ۱۰، نرخ ترکیب ۰/۶ و احتمال جهش ۰/۴۵ است.

۳-۱. نتایج محاسباتی الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم موجود به دلیل زمان حل زیاد در اندازه‌های بزرگ طراحی شده و در جدول (۴) با جواب بهینه در اندازه‌های کوچک و متوسط با استفاده از معیار سنجیده شده است. برای محاسبه از رابطه (۲۵) استفاده شده است:

$$GAP = \frac{\text{best}_{\text{algorithm}} - \text{best}}{\text{best}} \quad (25)$$

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، مقدار صفر و یا بسیار کوچک است. به علت زمان بسیار زیاد مورد نیاز برای حل، از حل مدل با GAMS/CPLEX در اندازه بزرگ صرف نظر شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این است که الگوریتم ژنتیک نتایجی با پراکندگی کم تولید کرده است و می‌توان با این اطلاعات، بالا بودن کارایی الگوریتم را نتیجه گرفت.

جدول ۴- حل چند مسأله و تعیین GAP

Gap (%)	فراابتکاری Genetic Algorithm		دقیق CPLEX		Cap1	p	N	شماره مسأله
	جواب	زمان حل (sec)	جواب	زمان حل (sec)				
۰/۰۰۵	۱۶۴۷۶۱/۱	۰/۷۳۵۴	۱۶۴۷۵۳/۱	۰/۵۳	۴۰۰	۲	۶	۱
۰/۰۰۳	۱۶۴۲۱۰/۴	۰/۶۹۹۲	۱۶۴۲۰۵/۵	۰/۵۴	۴۵۰	۲	۶	۲
۰/۰۱۱	۱۶۹۷۶۴/۶	۰/۸۱۳۰	۱۶۹۷۴۷/۶	۰/۵۴	۵۰۰	۲	۶	۳
۰/۰۰۶	۲۶۹۹۳۷/۹	۱/۰۰۳۲	۲۶۹۹۲۲/۵	۰/۵۳	۵۵۰	۲	۶	۴

Gap (%)	فراابتکاری Genetic Algorithm		دقیق CPLEX		Cap1	p	N	شماره مسأله
	جواب	زمان حل (sec)	جواب	زمان حل (sec)				
۰/۰۰۵	۲۶۹۹۳۷/۶	۰/۹۵۳۸	۲۶۹۹۲۲/۵	۰/۵۴	۶۰۰	۲	۶	۵
۰/۰۰۵	۲۶۹۹۳۷/۶	۰/۸۷۲۴	۲۶۹۹۲۲/۵	۰/۵۳	۶۵۰	۲	۶	۶
۰/۰۰۵	۱۶۱۹۲۸/۷	۰/۹۶۸۷	۱۶۱۹۲۰/۵	۰/۵۲	۷۰۰	۲	۶	۷
۰/۰۰۴	۱۶۱۹۲۷	۰/۷۵۰۷	۱۶۱۹۲۰/۵	۰/۵۴	۷۵۰	۲	۶	۸
۰/۰۰۴	۱۶۱۹۲۷	۰/۷۰۶۹	۱۶۱۹۲۰/۵	۰/۵۴	۸۰۰	۲	۶	۹
-	Infeasible	-	Infeasible	-	۴۰۰	۲	۱۰	۱۰
-	Infeasible	-	Infeasible	-	۴۵۰	۲	۱۰	۱۱
-	Infeasible	-	Infeasible	-	۵۰۰	۲	۱۰	۱۲
-	Infeasible	-	Infeasible	-	۵۵۰	۳	۱۰	۱۳
-	Infeasible	-	Infeasible	-	۶۰۰	۳	۱۰	۱۴
۰/۰۱۴	۳۹۲۵۱/۶۶	۴/۳۳۳۲	۳۹۲۴۶/۱۷	۱/۵۷	۶۵۰	۳	۱۰	۱۵
۰/۰۱۱	۳۶۳۰۳/۷۵	۴/۵۰۸۲	۳۶۲۹۹/۷۶	۱/۴۹	۷۰۰	۳	۱۰	۱۶
۰/۰۱۰	۳۶۳۰۳/۷	۴/۲۵۰۲	۳۶۲۹۹/۷۶	۱/۴۸	۷۵۰	۳	۱۰	۱۷
۰/۰۱۰	۳۶۳۰۳/۷	۴/۲۰۳۷	۳۶۲۹۹/۷۶	۱/۴۹	۸۰۰	۳	۱۰	۱۸
	Infeasible	-	Infeasible	-	۴۰۰	۳	۲۵	۱۹
	Infeasible	-	Infeasible	-	۴۵۰	۳	۲۵	۲۰
	Infeasible	-	Infeasible	-	۵۰۰	۳	۲۵	۲۱
	Infeasible	-	Infeasible	-	۵۵۰	۳	۲۵	۲۲
	Infeasible	-	Infeasible	-	۶۰۰	۳	۲۵	۲۳
	Infeasible	-	Infeasible	-	۶۵۰	۳	۲۵	۲۴
۰/۰۱۸	۹۴۰۵۵/۶	۴۳/۷۱۰	۹۴۰۴۰/۴	۱۰۶۵۵/۱۱۲	۴۰۰	۶	۲۵	۲۵
۰/۰۲۰	۹۲۶۵۲/۴۹	۴۴/۹۳۴۲	۹۲۶۳۳/۹۶	۱۰۶۴۸/۸۵۶	۴۵۰	۶	۲۵	۲۶
۰/۰۱۷	۸۴۸۰۶/۱۵	۴۵/۰۲۵۱	۸۴۷۹۱/۷۳	۱۰۶۵۲/۵۶۴	۵۰۰	۶	۲۵	۲۷
۰/۰۱۷	۹۶۶۹۵/۲۷	۴۵/۶۹۱۴	۹۶۶۷۸/۸۴	۱۰۷۹۳/۶۹۳	۴۰۰	۸	۲۵	۲۸

Gap (%)	فراابتکاری Genetic Algorithm		دقیق CPLEX		Cap1	p	N	شماره مسئله
	جواب	زمان حل (sec)	جواب	زمان حل (sec)				
۰/۰۱۷	۹۴۳۵۱/۹	۴۵/۴۷۵۲	۹۴۳۳۵/۸۶	۱۰۷۹۰/۲۰۱	۴۵۰	۸	۲۵	۲۹
۰/۰۱۶	۹۴۱۲۳/۵۸	۴۵/۴۷۲۶	۹۴۱۰۸/۵۲	۱۰۷۵۱/۱۴۰	۵۰۰	۸	۲۵	۳۰
	Infeasible	-	-	-	۵۵۰	۱۱	۲۵۰	۳۱
	Infeasible	-	-	-	۶۰۰	۱۱	۲۵۰	۳۲
	Infeasible	-	-	-	۶۵۰	۱۱	۲۵۰	۳۳
	Infeasible	-	-	-	۷۰۰	۱۱	۲۵۰	۳۴
	Infeasible	-	-	-	۷۵۰	۱۱	۲۵۰	۳۵
	Infeasible	-	-	-	۸۰۰	۱۱	۲۵۰	۳۶
	Infeasible	-	-	-	۴۰۰	۳۰	۲۵۰	۳۷
	Infeasible	-	-	-	۴۵۰	۳۰	۲۵۰	۳۸
	۴۴۲۳۴۵۲	۵۴۵۲۷/۸۴۵۲	-	-	۵۰۰	۳۰	۲۵۰	۳۹
	۳۹۶۶۷۸۵۳	۵۴۰۱۲/۰۳۳۶	-	-	۵۵۰	۶۰	۲۵۰	۴۰
	۳۹۱۴۶۸۱	۵۴۰۴۴/۷۴۵۴	-	-	۶۰۰	۶۰	۲۵۰	۴۱
	۳۸۵۸۴۲۲	۵۳۲۵۵/۲۴۱۶	-	-	۶۵۰	۶۰	۲۵۰	۴۲

جدول (۴) با تغییر یک به یک پارامترهای مسئله در چهار اندازه مختلف با تولید ۴۲ سؤال به نتیجه حاصله از ابعاد مختلف و تغییر پارامترها پرداخته است. مسائل یک، دو و سه در ابعاد کوچک با افزایش ظرفیت وسیله نقلیه در سؤال‌های مختلف شاهد روند نزولی جواب‌های دقیق و فراابتکاری این مسئله است. مسائل چهار تا نه مشابه مسائل یک تا سه با تفاوت در پارامتر بیشینه زمان رساندن تقاضا است. نتایج با توجه به محدودسازی و آزادسازی زمانی به ترتیب دارای افزایش و کاهش نسبت به مسائل یک، دو و سه هستند. درضمن، مسائل هفت تا نه به دلیل آزادسازی بیش از نیاز پارامتر زمان دارای جواب‌های یکسان هستند. مسائل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشابه مسائل یک تا سه طرح شده‌اند و تنها تعداد گره‌ها به ۱۰ عدد افزایش یافته و ابعاد متوسط دارند. این مسائل جواب‌های نشدنی دارند. با طرح

مسائل مشابه ۱۳، ۱۴ و ۱۵ و افزایش تعداد هاب به عدد سه، مسأله مورد بررسی قرار گرفت و تنها با ظرفیت چهار واحد مسأله به جواب شدنی رسید. این موضوع بیانگر نیاز به تنظیم ظرفیت و تعداد هاب با توجه به وضعیت شبکه است. اکنون با طرح سؤال‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ و افزایش زمان نسبت به مسأله ۱۵ نتیجه بررسی شده و نتایج به دست آمده حاکی از کاهش آلودگی کل شبکه است. مسائل ۱۹ تا ۲۴ با افزایش تعداد گره‌ها به ۲۵ مشابه مسائل قبلی با روند افزایشی زمان و ظرفیت بررسی شده‌اند و در هیچ حالتی به جواب شدنی نرسیده است. بدین منظور با افزایش تعداد هاب به شش و هشت عدد و طرح مسائل جدید ۲۵ تا ۳۰ طراحی شبکه بررسی شده است. جواب‌های مسائل با شش هاب دارای آلودگی کمتری نسبت به شبکه با هشت هاب است. جهت حل مسائل با اندازه بزرگ مسائل ۳۱ تا ۴۲ در شبکه کامل AP شامل ۲۵۰ گره از روش فراابتکاری استفاده شده است. این مسائل نیز با توجه به پارامترهای تعریف شده، حداقل با تعداد ۳۰ هاب جواب‌های شدنی داده است. با توجه به این که بیش‌ترین میزان، ۰/۰۲ درصد و میانگین آن برابر ۰/۱۱ درصد محاسبه شده است، می‌توان به کارایی الگوریتم پی‌برد. همچنین، با مقایسه آن با فعالیت‌های مشابه موارد زیر بیانگر مزایای این الگوریتم است:

- با توجه به نسبت کاهش زمان به دقت الگوریتم، استفاده از الگوریتم فراابتکاری طراحی شده کاملاً معقول به نظر می‌رسد.
- توانایی در نظر گرفتن تمام مفروضات مسأله را دارد.
- مقدار GAP در سطح قابل قبولی قرار دارد.

۲-۳. تحلیل حساسیت

به منظور تعیین میزان اعتبار و مقدار حساسیت پارامترهای مدل در این بخش با اجرای تغییراتی در مقادیر پارامترها، مقدار تغییر در جواب نهایی ارزیابی می‌شود. به این منظور، تعدادی از پارامترهای مهم به شرح زیر تغییر کرده‌اند.

اکنون با تغییر پارامتر کربن دی‌اکسید اولیه موجود، ضریب تخفیف زیست‌محیطی و زمانی تسهیلات انتقال، تغییر جواب مسأله ارزیابی می‌شود. جدول (۵) با کاهش ۲۰ درصدی هریک از ضرایب تخفیف تسهیلات هوایی و ریلی مسأله ۲۵ طبق مسائل ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ به تحلیل اثر آن‌ها پرداخته است.

جدول ۵- تحلیل حساسیت ضرایب تخفیف بین هابی

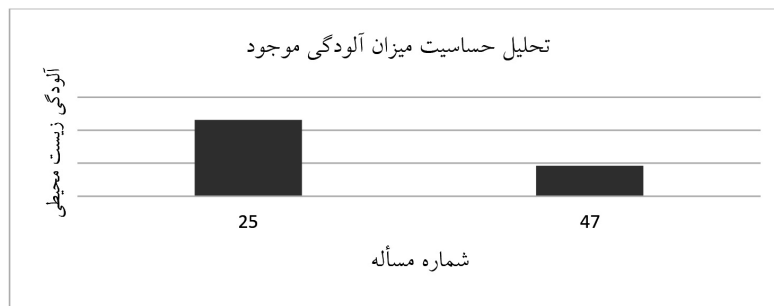
شماره مسأله	n	P	α_v	θ_v	جواب
۲۵	۲۵	۶	۱, ۰, ۲۵, ۶, ۲۵	۱, ۲, ۲, ۰	۹۴۰۵۵,۶
۴۳	۲۵	۶	۱, ۰, ۲, ۶, ۲۵	۱, ۲, ۲, ۰	۸۳۴۹۶,۱۱۴۱
۴۴	۲۵	۶	۱, ۰, ۲۵, ۶, ۲۵	۱, ۶, ۱, ۲, ۰	۸۱۹۵۴,۹۲۱۸
۴۵	۲۵	۶	۱, ۰, ۲۵, ۵	۱, ۲, ۲, ۰	۸۵۲۱۴,۹۵۸۴
۴۶	۲۵	۶	۱, ۰, ۲۵, ۶, ۲۵	۱, ۲, ۱, ۰, ۱۶	۸۳۴۹۱,۸۰۴۹

برای تحلیل حساسیت تأثیر آلودگی موجود اولیه گره‌ها، مسأله ۲۵ مورد ارزیابی شده است. در این مسأله، گره دوازدهم به‌عنوان گره غیرهاب بوده و با طرح مسأله ۴۷ به‌صورت مشابه و تغییر آلودگی اولیه موجود گره دوازدهم به سطح اول آلودگی، جواب مسأله بررسی شده است. جدول (۶) تغییر تابع هدف را نسبت به تغییر این پارامتر نشان می‌دهد.

جدول ۶- تحلیل حساسیت آلودگی موجود اولیه یک گره

شماره مسأله	n	P	A_{12}	جواب
۲۵	۲۵	۶	۳۰	۹۴۰۵۵,۶
۴۷	۲۵	۶	۳۰	۹۴۰۴۵,۸

شبکه طراحی شده مسأله ۴۷ تا حدی متفاوت از مسأله ۲۵ بوده و در آن گره ۱۲ به‌عنوان هاب انتخاب شده است. همچنین، تحلیل حساسیت میزان آلودگی در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات تابع هدف برحسب مقادیر مختلف آلودگی موجود اولیه یک گره

شکل (۴) نشانگر کاهش هزینه کل بر اثر تغییر پارامتر کربن دی اکسید اولیه موجود است. با توجه به نتایج بالا، پارامتر آلودگی اولیه یک گره در طراحی شبکه مؤثر واقع می شود و به طور نمونه در این تحلیل، گره تغییر یافته را که آلودگی کمتری یافته، به عنوان هاب مکان یابی کرده است.

۳-۳. بررسی عملکرد مدل به ازای درجات مختلف موجه بودن محدودیت ها

برای نشان دادن کارایی مدل خمینز و همکاران^۱ در به دست آوردن مدل قطعی کمکی متناظر، مسأله ۲۵ بخش (۳-۱) بررسی می شود. این مثال ۲۵ گره داشته و مکان یابی مناسب شش هاب مدنظر است. همچنین، ظرفیت هاب ها دو واحد است و باید تقاضا در زمانی کمتر از ۴۰۰ واحد در دسترس باشد. با درجات موجه بودن α که مطلوب تصمیم گیرنده است به صورت زیر است:

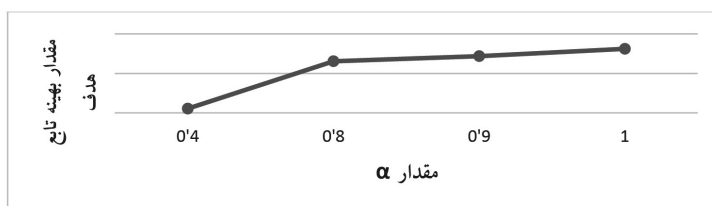
$$m \in \{0/4, 0/8, 0/9, 1\}$$

بدیهی است که اگر تصمیم گیرنده درجه بالایی از محدودیت ها را درخواست کند، مجموعه جواب های موجه کوچک تر خواهد شد و در نتیجه، مقدار تابع هدف بدتر می شود. بنابراین، باید جواب متعادلی برای بهبود تابع هدف و درجه رضایت مندی از محدودیت ها بیابد. اکنون مسأله ۲۵ بخش (۳-۱) به طور نمونه به ازای درجات مختلف موجه بودن جواب طبق جدول (۷) بررسی می شود.

جدول ۷- مقدار تابع هدف و طول دوره زمان بندی برای مقادیر مختلف α برای شبکه مفروض

تابع هدف	درجه موجه بودن جواب
۹۲۴۲۳/۶۷۱۲	۱
۸۸۶۴۴/۳۶۶۷	۰/۹
۸۶۱۲۶/۵۵۶۹	۰/۸
۸۱۲۴/۲۳۰۵	۰/۴

شکل (۶)، نمودار تغییرات تابع هدف برحسب مقادیر مختلف α را نشان می‌دهد. همان‌طور که کاملاً مشهود است، با افزایش مقدار α ، مقدار تابع هدف نیز افزایش یافته است. با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی پارامترهای تأثیرگذار مسأله، مشاهده می‌شود که مدل عملکردی منطقی از خود نشان می‌دهد و پاسخ‌های دور از انتظار در تحلیل حساسیت وجود ندارد. بدین ترتیب می‌توان گفت مدل قابل اعتبار است.



شکل ۶- نمودار تغییرات تابع هدف برحسب مقادیر مختلف α برای زمان‌بندی شبکه مفروض

جمع‌بندی و ملاحظات

در این مقاله، پس از مرور ادبیات جامع بر روی مسأله مکان‌یابی هاب در صنایع هوایی و دسته‌بندی فرضیات و مطالعات انجام شده درصدد یافتن شکاف تحقیقاتی برآمده شد. پس از تحقیق درباره مدل‌سازی موارد مشابه، مدل جدید که یک مدل غیرخطی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بود، با روش‌هایی جهت دستیابی به جواب دقیق خطی‌سازی شد. همچنین، در دنیای واقعی در صنایع هوایی مقدار دقیق بسیاری از پارامترها به‌طور دقیق مشخص نیست. با توجه به نقش بسیار پررنگ پارامتر زمان در شبکه‌های پشتیبانی، پارامتر زمان سفر بین گره‌ها در این پژوهش به‌صورت فازی در نظر گرفته شد. پس از ارائه مدل فازی، مدل قطعی کمکی متناظر به‌صورت برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح ارائه و به روش Jiménez حل شد.

مدل با یک مثال در اندازه کوچک به تفصیل بررسی شده و با توجه به نتایج آن، اعتبار مدل اثبات شد. مدل معرفی شده در این پژوهش ضمن محاسبه آلودگی به‌وجود آمده ناشی از استقرار شبکه پشتیبانی با مکان‌یابی مناسب هاب در شبکه پشتیبانی از استقرار آن در

شهرهای آلوده جلوگیری کرده و بهترین مکان‌ها را معرفی می‌کند. همچنین، تسهیلات انتقال بین‌هابی را با هدف استفاده از تسهیلات با آلودگی کمتر با در نظر داشتن زمان جهت بهره‌برداری مشخص کرده و به‌عنوان راهکار ارائه می‌کند. این مدل مشکل آلودگی را با مکان‌یابی بهینه و دقت مناسب در انتخاب شبکه پشتیبانی حل کرده و در عین حال برای اجرا هزینه زیادی تحمیل نمی‌کند.

مدل پیشنهادی کاربردهای زیادی در دنیای واقعی دارد؛ شبکه پست سبز، شرکت‌های توزیع بار، شرکت‌های حمل‌ونقل شهری و بین‌شهری، شرکت‌های پخش کالا، توزیع سبز مواد فاسدشدنی و شرکت‌هایی که بخواهند از فروش حق آلودگی خود منفعت کسب کنند از جمله مواردی هستند که می‌توانند از مدل پیشنهادی بهره ببرند.

پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی

مقاله قابلیت بسط و انجام تحقیقات جدید را دارد. از جمله پیشنهادهایی که مرتبط با این تحقیق بوده و قابلیت گسترش داشته باشند عبارتند از:

- حل برای مسائل چند تخصیص در صنایع هوایی.
- حل مدل با در نظر گرفتن ظرفیت هاب.
- در نظر گرفتن هزینه موجودی در هاب‌ها مادامی‌که آخرین وسیله نقلیه برای باراندازی به هاب برسد.
- توسعه روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای کسب جواب‌های با کیفیت بالاتر و زمان حل کوتاه‌تر برای مسائل با ابعاد بزرگ.
- حل مدل با هدف کاهش هزینه.
- برنامه‌ریزی مدلی که خود تعداد هاب‌ها را مشخص کند.
- در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های متفاوت برای مدهای حمل‌ونقل.
- حل مسأله با وجود چند دوره زمانی.
- امکان تخصیص چند وسیله نقلیه به هر هاب و ایجاد صف خدمت‌دهی توسط هاب.

منابع

- رزمی جعفر و میثم نصرالهی (۱۳۹۲)؛ زنجیره تأمین سبزی: طراحی، برنامه‌ریزی، استقرار و ارزیابی، سازمان چاپ و انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، چاپ اول، قزوین.
- Abdelghany, K., Abdelghany, A., and S. Raina (2005); "A Model for the Airlines' Fuel Management Strategies", *Journal of Air Transport Management*, vol.11, no.4, pp.199-206.
- Alumur, S. and B. Y. Kara (2008); "Network Hub Location Problems: The State of the Art", *European Journal of Operational Research*, no.190(1), pp.1-21.
- Alumur, S. A., Kara, B. Y. and O. E. Karasan (2012); "Multimodal Hub Location and Hub Network Design. *Omega*, no.40(6), pp.927-939.
- Aros-Vera, F., Marianov, V. and J. E. Mitchell (2013); "P-Hub Approach for the Optimal Park-and-ride Facility Location Problem", *European Journal of Operational Research*, no.226(2), pp.277-285.
- Blum, C. and A. Roli (2003); "Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison", *ACM Computing Surveys (CSUR)*, no.35(3), pp.268-308.
- Camargo R. S., Miranda G. d. and A. Løkketangen (2013); "A New Formulation and an Exact Approach for the Many-to-many Hub Location-routing Problem", *Applied Mathematical Modelling*, no.37, pp.7465-7480.
- Carter, M. W. and G. Laporte (1998); "Recent Developments in Partial Course Timetabling. The Practice and Theory of Automated Timetabling", Springer Lecture Notes in Computer Science Series 1408, pp.3-19.
- Dekker, R., Bloemhof, J. and I. Mallidis (2012); "Operations Research for Green Logistics: An Overview of Aspects, Issues, Contributions and Challenges", *European Journal of Operational Research*, no.219(3), pp.671-679.
- Gelareh, S. and D. Pisinger (2011); "Fleet Deployment, Network Design and Hub Location of Liner Shipping Companies", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, no.47(6), pp.947-964.
- Goldberg, D. E. (1989); *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, p.412, Reading Menlo Park: Addison-wesley.
- Harris, I., Mumford, C. and M. Naim (2009); "The Multi-objective Uncapacitated Facility Location Problem for Green Logistics", *In Evolutionary Computation, CEC'09*. IEEE Congress on (pp. 2732-2739). IEEE.
- Hekmatfar, M. and M. Pishvaei (2009); *Hub Location Problem. in Facility Location*, pp. 243-270, Physica-Verlag HD.
- Jiménez, M.; M. Arenas and A. Bilbao (2007); "Linear Programming with Fuzzy Parameters: An Interactive Method Resolution", *European Journal of Operational Research*, no.177(3), pp.1599-1609.

- Lay Eng Teoh and Hooi Ling Khoo (2016); "Green Air Transport System: An Overview of Issues, Strategies and Challenges", *Journal of Civil Engineering*, no.20(3), pp.1040-1052.
- Mohammadi, M., Razmi, J. and R. Tavakkoli-Moghaddam (2013); "Multi-objective Invasive Weed Optimization for Stochastic Green Hub Location Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries", *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, no.47(3).
- O'Kelly, M. E., and H. J. Miller (1994); "The Hub Network Design Problem: A Review and Synthesis", *Journal of Transport Geography*, no.2(1), pp.31-40.
- Sarkar A. N. (2012); "Evolving Green Aviation Transport System: A Holistic Approach to Sustainable Green Market Development", *American Journal of Climate Change*, no.1, pp.164-180.
- Visser, H. G. (2005); "Generic and Site-specific Criteria in the Optimization of Noise Abatement Trajectories", *Transportation Research Part D*, vol.10, no.5, pp.405-419.
- Zhang, J., Liao, F., Arentze, T. and H. Timmermans (2011); "A Multimodal Transport Network Model for Advanced Traveler Information Systems", *Procedia Computer Science*, no.5, pp.912-919.