فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ٤، تابستان ١٤٠١، ص. ١٨٨٦-١٨٧٥
مقاله علمی-پژوهشی

مکان یابی ایستگاه های ریلی با درنظر گرفتن عدم قطعیت با استفاده از رویکرد مبتنی بر بهینه سازی استوار

هستی جعفری، دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
حسین صفری (مسئول مکاتبات)، استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
E-mail: hsafari@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰ پذیرش: ١٤٠٠/٠٤/٢٧

چکیده

با توجه به وجود مزیت رقابتی بین سیستم های حمل‌ونقل، افزایش رضایت مشتریان عامل مهمی در جذب آن‌ها به این سیستم‌هاست. از سویی یک روش مفید جهت افزایش جذابیت سفرهای ریلی، احداث ایستگاه‌های جدید است. مکان‌یابی ایستگاه ها در شبکه های ریلی یک م سا له پیچیده و زمانبر ا ست. لذا ا ستفاده از مدل ریا ضی به منظور انتخاب مکان منا سب جهت احداث ای ستگاه ها ب سیار کارآمد خواهد بود، از سوی دیگر، داده ها در دنیای واقعی دارای عدم قطعیت می باشد و مکان یابی ایستگاه ها در محیط فازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت باعث افزایش قابلیت اطمینان در ارائه ی نتایج خواهد بود. مدل های بهینه سازی استوار با درنظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی جواب های موجه و بهینه تولید می کند لذا در این پژوهش به مدلسازی مکان یابی ایستگاه ها در محیط فازی با وارد نمودن عدم قطعیت در داده های م ساله پرداخته ایم و با ا ستفاده از مدل بهینه سازی ا ستوار با رویکردی واقع گرایانه مدل را حل کردیم. در ادامه یک مطالعه ی موردی برروی داده های واقعی قطار شهری مشهد اجرا و نتایج حاصل از حل مدل در فضای فازی با جواب ها در فضای قطعی مقایسه شده که بیانگر بهبود قابل توجهی در جواب ها می باشد.

واژه های کلیدی: بهینه سازی استوار، عدم قطعیت، مدلسازی، مکان یابی

۱. مقدمه

سیستم حمل‌ونقل عمومی یکی از رویکردهای موجود برای کاهش ازدحام ترافیک در مناطق شهری است. سیستم‌هایی نظیر مترو و یا قطارهای سبک یکی از روش‌های ارتباطی ممکن هستند که از طریق سرویس‌های تغذیه‌کننده نظیر اتوبوس‌ها در مناطق شهری و یا حومه‌ی شهری با یکدیگر ارتباط دارند. تصمیم‌گیری برای توسعه‌ی سیستم حمل‌ونقل ریلی با توجه به زمین‌های موجود و مکان‌های شدنی برای احداث ایستگاه‌ها نشات می گیرند. فاکتورهایی نظیر کاربران و جمعیت و نقاط پر تردد در تشخیص مسیر مناسب ریلی و مکان مناسب جهت احداث ایستگاه‌ها در نظر گرفته می‌شوند.بنابراین توسعه و ایجاد سیستم حمل و نقل ریلی در جهت رضایت مشتریان منجر به کاهش ترافیک و افزایش تقاضای این سیستم‌ها شده و یکی از راهکارهای مناسب آن، احداث ایستگاه‌های جدید در شبکه‌ی ریلی است. در نظر گرفتن عوامل موثر بر رضایت مشتریان نظیر افزایش قابلیت دسترسی آنها به این سیستم ها منجر به افزایش تقاضا شده و تعدیل زمان سیر آنها و افزایش جمعیت پوشش داده شده توسط شبکه‌ی ریلی برای بالا بردن کارایی شبکه، از نکاتی است که باید با احداث ایستگاه‌های جدید به آنها دست یافت. در سال ۲۰۱۹ مطالعه ای به منظور بهینه نمودن مکان خطوط و ایستگاه ها ارائه شد و مکان ایستگاه ها با جستجوی خطوط راه آهن پیدا می شود. روش ارائه شده در این مطالعه شامل مناطق کوهستانی و با انجام مطالعه ی موردی برروی یک منطقه ی کوهستانی در دنیای واقعی بررسی شده است [Pu. Zhang. Wang and Xiong. 2019]. در سال ۲۰۲۰ مساله طراحی خطوط ریلی به صورت چند هدفه شامل اهداف اقتصادی و محیطی مدلسازی شده است. در این مطالعه دو شاخص کمی برای اندازه گیری تاثیرات زیست محیطی به منظور ارائه ی تخریب پوشش گیاهی و فرسایش خاک ارائه شده است [Zhang et al. 2020]. مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۲در شهر میلان جهت بهینه کردن مکان استقرار خطوط با هدف بیشینه نمودن جمعیت تحت پوشش در شبکه‌ی حمل و نقل سریع انجام شده است [Bruno and Gendreau. 2002].

مارین و همکارش در سال ۲۰۰۹ برروی خطوط سریع‌السیر با رویکرد بهینه نمودن مکان خطوط و ایستگاه‌ها مطالعه‌ای توسط به منظور مدل‌سازی مسئله شبکه ریلی انجام دادند. [Marin and Garcia-Rodenas. 2009]. لاپورته و همکاران در سال ۲۰۰۷ به یکپارچه نمودن گام‌های مدل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شامل جذب و تولید سفر، توزیع سفر، انتخاب مد و توازن ترافیک پرداخته اند[Laporte et al. 2007]. این دو پژوهشگر در سال ۲۰۰۱۱ انواع مدل‌های مطالعه شده در شبکه های سریع بررسی کردند [Laporte et. al. 2011]. تاناکا و فروتا در سال ۲۰۱۰ به مکان‌یابی تعدادی از تسهیلات مشخص بروی شبکه، جهت بیشینه کردن جریان مسافران در برخورد با این تسهیلات پرداختند[Tanaka and Furuta. 2010]. پنج و همکاران در سال ۲۰۱۱ به مکان یابی تجهیزات تشخیص خرابی با هدف تضمین سلامت واگن‌های در حال عبور در طول خط پرداختند. دو مدل بیان شده در این مطالعه شامل مدل پوشش و حل یک مساله k-median است. الگویتم های حل مدل شامل جستجوی حریصانه و روش لاگرانژ و الگوریتم جابه‌جایی یکی‌یکی[1] است. جهت بررسی مدل، مطالعه‌ای موردی با استفاده از داده‌های دنیای واقعی استفاده شده است [Peng, Li and Ouyang. 2011]. مطالعه ی دیگری در سال ۲۰۰۹ توسط یانگ و همکاران به منظور نصب تجهیزات تشخیص خرابی کنار خط با هدف بیشینه نمودن سود بازرسی مورد انتظار، انجام و مدل ارائه شده در مساله با روش لاگرانژ حل شد [Ouyang. et al. 2009] .

مساله مکان یابی برای مدهای مختلف حمل و نقلی حائز اهمیت است و مکان یابی ایستگاه های دوچرخه با ارائه مدل ریاضی و با اهداف حداقل نمودن تعداد ایستگاه ها و بیشینه نمودن فواصل میان ایستگاه در سال ۲۰۱۷مورد مطالعه قرار گرفت. [Tavakoli

moghadam et al. 2017]

آقایی و همکاران به ارائه مدل ریاضی به منظور مکان یابی مراکز امداد موقت و مسیریابی پویای وسایل نقلیه امداد هوایی با هدف ارسال نمودن کالاهای امدادی به مناطق آسیب دیده در شرایط بحران پرداختند [Aghaee et al. 2017].

اهمیت مکان یابی ایستگاه و تاثیر آن بر سطح رضایت مشتریان موضوعی است که در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از شاخص های ارزیابی کیفیت به مطالعه جانمایی ایستگاه ها و مطالعه ی موردی بروی ایستگاه مترو علم و صنعت پرداختند [Haghi et al. 2018].

مساله مکان یابی هاب در شبکه های حمل و نقل چند وجهی با نظر گرفتن تاخیرات و با استفاده از الگوریتم ترکیبی جستجوی هماسیگی متغیر- شبیه سازی تبریدی مورد مطالعه قرار گرفت [Behnamian ،J. Safargholi ،A.M. 2019] .

این مساله به منظور انتخاب مکان مناسب به منظور ساخت مدارس وتخصیص دانش آموزان در سطح شهر به این مدارس با استفاده از مسیرهای بهینه حمل و نقلی مطالعه دیگری است که توسط شیری پور در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت [Shiripoor S. .2019]

در مطالعه ی دیگری توسط گروب و همکاران به مکان یابی ایستگاه‌های جدید در شبکه حمل‌ونقل موجود شامل مکان‌یابی ایستگاه‌های راه‌آهن در خطوط ریلی و یا ایستگاه‌های اتوبوس در طول مسیرهای اتوبوس با دو تابع هدف پرداخته شد [Groß. et al. 2008].

در مطالعه ای توسط همچر و همکاران برروی شبکه موجود ریلی و با هدف افزایش جذابیت سفر به مکان‌یابی ایستگاه‌ها به صورت پیوسته[۲] انجام شد. دو مدل بررسی شده در این مطالعه شامل مدل قابلیت دسترسی مسافران و مدل زمان سفر می باشد که در هیچ‌یک از این دو به مدل‌سازی ریاضی اشاره‌ای نشده و حل در قالب الگوریتم ژنتیک می باشد و برروی بزرگترین شبکه‌ی ریلی آلمان نیز انجام گردید. مساله ذکر شده در این مقاله NPHard بوده است [Hamacher et al. 2001]. در سال ۲۰۱۵ مدل ریاضی چند هدفه جهت بهینه نمودن مکان ایستگاه ها در شبکه های ریلی به منظور بیشینه نمودن زمان سفر ذخیره شده و جمعیت تحت پوشش در شبکه ارائه شد که به منظور بررسی اعتبار مدل، مطالعه ی موردی بروی متروی شهر مشهد انجام شد [Yaghini and Jafari. 2015]. در همین راستا در مطالعه ای دیگر و با ارائه یک مدل نوین به مدلسازی مساله مکان یابی ایستگاه های ریلی ببروی متروی شهر تهران پرداخته شد [H. Yaghini M .2019. Jafari,].

در تمامی مطالعات قبلی به مدلسازی مساله در فضای قطعی پراخته شد حال آنکه در واقعیت پارامترهای مساله به صورت قطعی نمی باشد و جهت افزایش اعتبار مدل و تطابق با واقعیت، ضروری است عدم قطعیت در مدل وارد گردد. لذا در این مطالعه به یافتن مکان های بهینه در حالت فازی و با درنظر گرفتن عدم قطعیت پرداخته شده است. لازم به ذکر است که مساله مکان‌یابی ایستگاه‌ها-NP hard بوده [Schobel et al. 2009]. به خصوص در حالتی‌که فواصل به صورت اقلیدسی در نظر گرفته شود [Soyster. 1973].

۲. بیان مساله

۲-۱ مدل ریاضی

متغیرها و پارامترهایی که برای مدل سازی مساله برای مکان یابی ایستگاه ها در شبکه های ریلی در زیر نشان داده شده است [Yaghini and Jafari. 2015].

۲-۱-۱ اندیس های مدل

i: بیانگر نقاط کاربری یا همان بخش‌بندی نواحی ترافیکی است.

j : نشان‌دهنده مکان ایستگاه جدید (نقاط کاندید) است. نقاط کاندید نقاطی هستند که با توجه به مطالعات اولیه و کارشناسانه برای گسترش شبکه‌ی ریلی در نظر گرفته شده‌اند و تمامی‌این نقاط در مجموعه ی J نگهداری شده‌اند.

k: بیانگر ایستگاه موجود در سطح (مختصه‌ی دو بعدی) است. تمامی ایستگاه‌هایی که در خطوط فعلی در حال بهره‌برداری هستند در مجموعه ی K نگهداری می‌شوند و هریک از اندیس های k یکی از این نقاط را نشان می‌دهد.

$$max \quad z_1=\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} p_i\, t_{ij} x_{ij} - \sum_{j\in J} s_j c_j y_j \qquad (۱)$$

$$max \quad z_2 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} p_i\, x_{ij} \qquad (۲)$$

s.t.

$$\sum_{j\in J} x_{ij} \le 1 \qquad \forall i \in I \qquad (۳$$

$$x_{ij} \le y_j \qquad \forall i \in I\,, \forall j \in J \qquad (٤)$$

$$\sum_{j\in J} y_j \le N \qquad (٥)$$

$$y_j\,, x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, \forall j \in J \qquad (٦)$$

۲-۱-۲ پارامترهای مساله

P_i جمعیت موجود در هر کاربری (ناحیه ی ترافیکی) را نشان می دهد. هریک از نواحی ترافیکی با استفاده از مختصات مرکز آن ناحیه نشان داده شده است که مختصات مرکز ناحیه‌ی ترافیکی نماینده مختصه‌ی آن ناحیه می‌باشد.

T_{ij} زمان کاهش یافته (Reduced Time) برای سیر مشتری از کاربری i ام تا رسیدن به ایستگاه j ام را نشان می‌دهد.

S_j نشان‌دهنده توقف (Stop) در هر ایستگاه جدید است. (تاخیر ایستگاه‌های مختلف، متفاوت فرض شده است).

(C_j) جمعیتی است که بصورت متوسط از ایستگاه j ام عبور می کند. (Crossing people)

۲-۱-۳ متغیرهای تصمیم

x_{ij}: متغیری باینری است که نشان می‌دهد کاربری i ام توسط ایستگاه جدید j ام پوشانده می‌شود یا خیر.

y_j : متغیری باینری است و بیان می‌کند که آیا ایستگاه جدید در مکان j احداث شود یا خیر.

مدلسازی مساله در ادامه ارائه شده است:

قسمت اول تابع هدف (۱) مجموع کاهش زمان سیر تا رسیدن به ایستگاه‌های شبکه را برای کل کاربران نواحی ترافیکی بیشینه می‌کند.

در قسمت دوم همان تابع هدف مجموع زمان توقف قطار در ایستگاه‌های جدید کمینه می‌شود. (با توجه به اینکه تابع هدف اول بیشینه‌سازی است بنابراین استفاده از ضریب منفی در قسمت دوم این تابع هدف، نشان دهنده کمینه کردن این بخش از تابع هدف است). پس به طور کلی تابع هدف (۱) به بهینه نمودن مدل زمان در شبکه می‌پردازد، که این زمان شامل زمان سیر کاهش یافته تا ایستگاه‌های شبکه در صورت احداث ایستگاه‌های جدید و نیز زمان توقف مسافران در ایستگاه‌های احداث شده است.

تابع هدف (۲) بیان می کند که جمعیت پوشش داده شده بیشینه شود.مدل‌سازی مساله به گونه‌ای است که با احداث ایستگاه‌های جدید بتوان زمان رسیدن مشتریان به ایستگاه‌ها را کاهش داد. همچنین مسافرانی که در قطار نشسته‌اند زمان تلف شده کمتری داشته باشند از سویی می‌خواهیم احداث ایستگاه‌ها در مکان‌هایی باشد که بیشترین جمعیت را پوشش دهد. بنابراین P_i را در متغیر تخصیص مربوطه ضرب کرده‌ایم متغیر تخصیص نشان دهنده این است که ناحیه ی ترافیکی i از ایستگاه j استفاده می‌کند و یا خیر. در صورتی این مقدار یک است که ایستگاه جدید در آن مکان احداث شده باشد. محدودیت (۳) بیان می کند که مجموع کل ایستگاه‌هایی که یک ناحیه ی ترافیکی را تحت پوشش قرار می دهد حداکثر برابر یک است.

وجود این محدودیت تضمین کننده این شرط است که مقدار P_i در تابع هدف حداکثر یک‌بار محاسبه شود.

محدودیت (٤) تضمین می‌کند در صورتی جمعیت موجود در یک

ناحیه ترافیکی می تواند از ایستگاه جدید استفاده کند که، آن ایستگاه در مکان j احداث شده باشد.

محدودیت (۵) حداکثر تعداد ایستگاه‌های جدید برای احداث را نشان می دهد.

محدودیت‌های (٦) باینری بودن متغیرهای مساله را نشان می دهد.

- فواصل محاسبه شده بین نقاط کاربری (نواحی ترافیکی) تا ایستگاه‌ها همگی به صورت اقلیدسی است.
- جهت محاسبه فاصله هر کاربری تا ایستگاه‌های موجود از حداقل فاصله استفاده شده است. به این معنا که افراد ترجیح می دهند از نزدیک ترین ایستگاه جهت سوار شدن در قطار استفاده کنند.

شایان ذکر است که در دنیای واقعی پارامترها به صورت دقیق و ثابت در نظر گرفته نمی شود. لذا به منظور افزایش دقت مدل و استفاده از آن در دنیای واقعی مدل را در محیط فازی و با وارد نمودن عدم قطعیت حل نموده ایم و جواب ها را با حالت قطعی و دقیق مقایسه نموده ایم.

۲-۲ مدل سازی در شرایط عدم قطعیت

وجود عدم قطعیت در داده های ورودی هر مساله باعث شده است که محاسبه سطح تمامیت ایمنی در سیستمها همراه با عدم قطعیت همراه شود [Jafari et al.2016].

مسائل دنیای واقعی دارای عدم قطعیت هستند که در مسئله مکان یابی ایستگاه ها پارامترهایی مانند جمعیت موجود در نقاط مبادی که به عنوان نقاط تقاضا در نظر گرفته می شوند دارای عدم قطعیت هستند. علاوه بر آن، جمعیت عبوری از هر ایستگاه و میزان تاخیر در هر ایستگاه از جمله پارامترهایی هستند که در دنیای واقعی دارای عدم قطعیت هستند و به صورت دقیق نمی توان پیش بینی کرد. لذا به منظور افزایش دقت و تطابق با دنیای واقعی پارامتر های درنظر گرفته شده در مدل با عدم قطعیت و به صورت فازی درنظر گرفته شده است. در ادبیات فازی در سال ۲۰۰۷ عدم قطعیت به دو دسته تقسیم می شود: ۱. در نظرگرفتن عدم قطعیت در مدل به طوریکه با توجه به نظر تصمیم گیرنده در محدودیت ها با توابع هدف انعطاف دیده شود. ۲. داده ها دارای عدم قطعیت باشد که ناشی از تصادفی بودن پارامتر مربوطه باشد (مانند پرتاپ تاس)، و با امکان پیش بینی دقیق پارامتر ممکن نباشد[۳] (مانند پیش بینی تقاضا در آینده) [Mula. Poler and Garcia. 2006] .

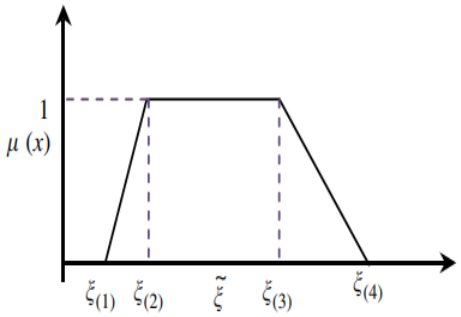
برای مدنظر قراردادن عدم قطعیت در داده های مساله با توجه به نوع مدل و روش مورد استفاده رویکردهای متفاوتی استفاده می شود به عنوان نمونه در مطالعه توسط جعفری و همکاران در سال ۲۰۲۰ برای درنظر گرفتن عدم قطعیت در داده های مساله در سیستم های ایمنی از درخت خطای فازی با مطالعه موردی بروی سیستم ترمز قطار استفاده شده است.[Jafari et al. 2020]

با توجه به مدل مساله و وجود عدم قطعیت در پارامترهای ورودی مدل؛ بهترین رویکرد برای حل آن استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار می باشد. در سال ۱۹۷۳ برای حل مسائل برنامه ریزی خطی غیر دقیق از یک رویکرد برنامه ریزی بدبینانه استفاده شد [Soyster. 1973]. یک روش برنامه ریزی استوار منعطف تر در سال ۱۹۹۵ براساس برنامه ریزی تصادفی سناریو محور توسط Mulvey et al. مطرح گردید که تغییرات گسترده ای در ادبیات موضوع ایجاد کرد [Mulvey. Vanderbei and Zenios. 1995]. پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به توسعه ی کاربرد منطق استواری در فضای برنامه ریزی امکانی پرداختند [Pishvaee and Razmi. 2012]. در ادامه به تشریح فرم کلی مدل برنامه ریزی استوار خواهیم پرداخت:

$$
\begin{aligned}
&Min\ z = f\ y + cx \\
&s.t. \\
&Ax \geq d, \\
&Bx = 0, \\
&Sx \leq N\ y, \\
&T\ x \leq 1, \\
&y \in \{0,\ 1\}, \\
&x \geq 0
\end{aligned}
\qquad (۷)
$$

فرض کنید مدل ساده مساله طراحی شبکه زنجیره تامین پاسخگو به فرم زیر باشد:

که در آن d ، c ، f به ترتیب هزینه های ثابت بازگشایی، هزینه های متغیر حمل و نقل و تولید و تقاضاها می باشد. ضرایب ماتریس محدودیت ها هستند با توجه به اینکه نحوه ی برخورد با تابع هدف دوم Tو A،B،N،Sماتریس دقیقا مشابه تابع هدف اول است، لذا آن را حذف کرده ایم. برای مدلسازی در شرایط عدم قطعیت پارامترهای مربوطه با چهار نقطه ی اصلی نشان داده می-شود. به عنوان نمونه $\tilde{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4)$ در صورتی که $\xi_2 = \xi_3$ عدد ذوزنقه ای به عدد مثلثی تبدیل می شود.



شکل ۱. توزیع احتمالی ذوزنقه ای پارامتر فازی $\tilde{\xi}$

براساس توضیحات ارائه شده مدل برنامه ریزی پایه ای محدودیت های شانسی (BPCCP) به صورت ذیل خواهد بود.

$$
\begin{aligned}
&Min\ E[z] = E[\ f\ ]y + E[\tilde{c}]x \\
&s.t.\ Nec\{Ax \geq d\} \geq \alpha\ , \\
&Bx = 0, \\
&Nec\{Sx \leq N\ y\} \geq \beta\ , \\
&T\ x \leq 1, \\
&y \in \{0,\ 1\},\ x \geq 0
\end{aligned}
\qquad (۸)
$$

این نکته قابل توجه است که تابع هدف و مجموعه ی محدودیت های اول و سوم دارای پارامترهای غیر قطعی هستند در حالیکه سایر محدودیت ها همگی قطعی می باشند. براساس مطالعات ذیل مدل قطعی مساله بالا به فرم ذیل خواهد بود [Dubois and Prade.1998].

$$
\begin{aligned}
&Min\ E[z] = \\
&\left(\frac{f_{(1)} + f_{(2)} + f_{(3)} + f_{(4)}}{4}\right) y \qquad (۹) \\
&+\left(\frac{c_{(1)} + c_{(2)} + c_{(3)} + c_{(4)}}{4}\right) x \\
&s.t. \\
&Ax \geq (1 - \alpha)d_{(3)} + d_{(4)}, \qquad (۱۰) \\
&Bx = 0, \qquad (۱۱) \\
&Sx \leq \left[(1 -)N_{(2)} + N_{(1)}\right]y, \qquad (۱۲) \\
&T\ x \leq 1, \qquad (۱۳) \\
&y \in \{0,\ 1\},\ x \geq 0. \qquad (۱۴)
\end{aligned}
$$

در فرمول مساله بالا محدودیت های دارای عدم قطعیت باید سطح حداقل اطمینان را برآورده کنند.

$$(\alpha, \beta > 0.5)$$

۲-۲-۱ مدل برنامه ریزی استوار واقع گرایانه (RPP)

تصمیم استوار، تصمیمی است که در مقابل عدم قطعیت محیط مقاومت می کند و دارای حداقل نوسان می باشد. در وضعیت استوار شدنی بودن جواب همواره برای تمامی حالت پارامترهای

دارای عدم قطعیت شدنی است و در استواری بهینگی جواب برای تمام حالات پارامترهای دارای عدم قطعیت نزدیک به بهینه می باشد. روشهای بهینه سازی استوار شامل سه رویکرد اصلی، بدینانه سخت[۴]، رویکرد بدبینانه نرم[۵] و واقع گرا[۶] می باشد که رویکرد بدبینانه سخت تضمین می کند که جواب به ازای تمامی مقادیر ممکن برای پارامترهای دارای عدم قطعیت شدنی باقی بماند و درصدد حداقل کردن بدترین مقدار تابع هدف می باشد [Ben-Tal and El-Ghaoui. 2009]. رویکرد بدبینانه، نسخه ی منعطف تر از رویکرد برنامه ریزی استوار بدبینانه سخت می باشد در این رویکرد بدترین مقدار تابع هدف را حداقل کرده ولی محدودیت ها در بدترین حالت خود نمی باشند [Bertsimas and Sim. 2004]. رویکرد واقع گرایانه، برخلاف رویکردهای بدبینانه، نقص جزیی بعضی از محدودیت ها را مجاز می داند و به دنبال جواب استوار نسبی براساس ترجیحات تصمیم گیرنده است [Pan and Nagi. 2010]. با توجه به انعطاف پذیری بیشتر رویکرد واقع گرایانه و با توجه به نزدیک بودن جواب ها با واقعیت، لذا با استفاده از این رویکرد به حل مدل خواهیم پرداخت.

مدل برنامه ریزی استوار واقع گرایانه دارای سه بخش است بطوریکه مدلهای دسته اول و دوم[۷] آن دارای عملکرد مشابهی هستند و آنها راه حل های مشابهی را برای داده های اسمی تولید می کنند. مدل سوم این برنامه‌ریزی دارای حداقل انحراف نسبت به دو مدل دیگر است، لذا در این مطالعه از مدل سوم[۸] برای مدلسازی مساله استفاده کرده ایم [Pishvaee and Razmi. 2012].

۲-۳ مدل برنامه ریزی استوار واقع گرایانه

در اینجا مدل اصلی مساله را با استفاده از برنامه ریزی واقع گرایانه استوار بیان می کنیم.

$$max \quad z_1=\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\left(\frac{p_{i1}+p_{i2}+p_{i3}+p_{i4}}{4}\right)t_{ij}x_{ij}$$

$$-\sum_{j\in J}\left(\frac{s_{1j}+s_{2j}+s_{3j}+s_{4j}}{4}\right)\left(\frac{c_{1j}+c_{2j}+c_{3j}+c_{4j}}{4}\right)y_j$$

$$+\gamma\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}(p_{i1})t_{ij}x_{ij}+\delta\times\left((1-\alpha)N_2+\alpha N_1-N_1\right) \qquad (۱۵)$$

$$-\gamma\sum_{j\in J}(s_{1j})(c_{1j})y_j$$

$$max \quad z_2=\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\left(\frac{p_{i1}+p_{i2}+p_{i3}+p_{i4}}{4}\right)x_{ij} \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{j\in J}x_{ij}\le 1 \qquad \forall i\in I \qquad (۱۷)$$

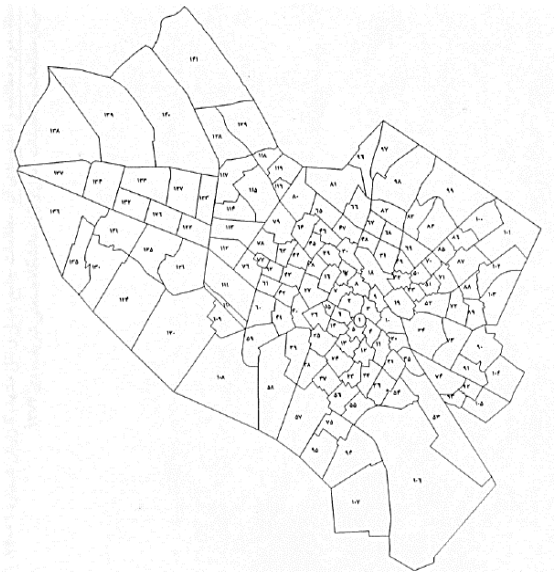
$$x_{ij}\le y_j \qquad \forall i\in I,\forall j\in J \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{j\in J}y_j\le(1-\alpha)N_2+\alpha N_1 \qquad (۱۹)$$

$$y_j,x_{ij}\in\{0,1\} \qquad \forall i\in I,\forall j\in J \qquad (۲۰)$$

۳. مطالعه موردی

در این مطالعه به منظور بررسی روش ارائه شده و مقایسه آن با جواب ها در فضای قطعی از شبکه ارائه شده در مقاله یقینی و جعفری (۲۰۱۵) استفاده کردیم تا بتوان کیفیت روش ارائه شده را در مقایسه با حل مدل در دنیای واقعی بسنجیم. شبکه شهر مشهد دارای ۲۵۳ ناحیه ی ترافیکی و ۶۳ ایستگاه (اعم از ایستگاه‌های کاندید و موجود) است [Yaghini and Jafari. 2015]. نمایی از گره‌ها و نواحی ترافیکی در شکل زیر نشان داده شده است. در این شکل نقاط آبی رنگ مکان ایستگاه‌ها و نقاط طوسی رنگ مکان مراکز نواحی ترافیکی (بخش‌بندی) را نشان می دهد.



شکل ۲. ناحیه های ترافیکی شهر مشهد [Yaghini and Jafari. 2015]

جدول ۱. نتایج ارائه شده در مطالعه ی یقینی و جعفری (۲۰۱۵) و حل مدل در محیط فازی [Yaghini and Jafari. 2015]

ردیف	مقدار تابع هدف اول در مطالعه ی یقینی و جعفری (۲۰۱۵)	تعداد ایستگاه ها در مطالعه یقینی و جعفری (۲۰۱۵)
۱	2.10E+09	٤٦
۲	2.02E+09	٤٢
۳	1.99E+09	٤٠
٤	2.42E+09	۳۲
۵	2.05E+09	٤١
٦	2.29E+09	٤۳
۷	2.13E+09	٤٠

مختصات مراکز مکان های ترافیکی و مختصات ایستگاه‌ها قطعی می باشند که جمعیت عبوری از هر ایستگاه، زمان توقف قطار در هر ایستگاه، جمعیت موجود در هریک از مراکز ترافیکی و حداکثر تعداد ایستگاه ها جهت احداث دارای عدم قطعیت هستند. تعداد ۶۳ ایستگاه منطبق بر گره های شبکه است که از این تعداد ۱۷ ایستگاه مربوط به خط یک مشهد بوده که هم اکنون درحال بهره برداری است [Yaghini and Jafari. 2015] که در مدل، این ایستگاه‌ها به‌عنوان ایستگاه‌های موجود در نظر گرفته شده‌اند. اطلاعات سایر ایستگاه‌ها مربوط به خطوط مصوب می‌باشد که هم اکنون به مرحله ی بهره برداری نرسیده‌اند.

خاطر نشان می گردد مکان ایستگاه های کاندید باتوجه به نظر خبرگان ریلی و بررسی همه جنبه این نقاط از منظر تملک، استقرار شهری از نظر همسایگان، بررسی های فنی و .... توسط متخصصین شرکت مترو انجام شده است که از بین این نقاط بهترین مکان ها با حل مدل و با درنظرگرفتن شاخص های بیان شده در مدل تعیین می گردد.

۳-۱ نتایج محاسباتی و مقایسه آن با مطالعات قبلی

پس از توسعه ی مدل مساله با درنظرعدم قطعیت در مدل و پارامترهای مساله به تجزیه و تحلیل نتایج محاسباتی می پردازیم. لذا با استفاده از داده های ارائه شده در مقاله یقینی و جعفری (۲۰۱۵) به حل مدل در محیط فازی با درنظر گرفتن عدم قطعیت خواهیم پرداخت و نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل در نرم افزار GAMS با نتایج ارائه در مقاله مذکور مقایسه شده اند. حداکثر شعاع پوششی در مساله ۸۰۰ متر درنظر گرفته شده است.همانطور که در جدول شماره ۱ ملاحظه می شود مقدار تابع هدف و تعداد بهینه ایستگاه جهت احداث در هردو روش ارائه شده است.

همان طور که از نتایج حل مدل با استفاده از مدل استوار مشاهده می شود جواب های بدست آمده در مقایسه با حل مدل با داده

های قطعی بهبود قابل ملاحظه ای پیدا کرده است، بطوریکه رنج اعداد تابع هدف افزایش چشمگیری داشته است، به علاوه جواب های بهینه دارای ثبات بوده و دارای اختلاف کمی از یکدیگر می باشند. از نتایج حاصله مشخص است بهترین جواب با متوسط تعداد ۲۵ ایستگاه (عدد فازی ۲۰،۲۵،۳۰) دارای مقدار تابع هدف 7.149147E+09 می باشد این درحالی است که تعدا بهینه ایستگاه ها با حل مدل در فضای قطعی 2.42E+09 با ساخت ۳۲ ایستگاه می باشد. لذا با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مساله با احداث تعداد ایستگاه کمتر می توان به جواب های بهتری دست یافت و نتایج تقراب بیشتری با دنیای واقعی دارد.

٤. نتیجه گیری

روش‌های رایج تعیین مکان مناسب برای احداث ایستگاه‌ها بسیار وقت گیر بوده و نیازمند صرف هزینه های گزاف برای تیم نیروی انسانی است. علاوه بر این تعیین آنها براساس مبانی تصمیم‌گیری بوده، لذا در بسیاری از حالات تصمیم گیری با تعدد ایستگاه‌ها بسیار دشوار بوده و با توجه به عدم اطمینان در پیش بینی دقیق بسیاری از داده ها اغلب تعیین بهترین حالات امکان پذیر نخواهد بود. لذا در این مطالعه به مدلسازی مکان یابی ایستگاه با درنظر گرفتن عدم قطعیت داده ها با استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار به دلیل انعطاف پذیری قابل توجه آن در مقابل عدم قطعیت پرداخته‌ایم و با استفاده از رویکرد استواری بهینگی به صورت واقع گرایانه به منظور دست یابی به جواب هایی موجه و نزدیک به بهینه، آن را مدلسازی و حل کردیم. داده های ورودی جهت مطالعه موردی از داده های مربوط به قطار شهری مشهد استفاده شده است که به عنوان نقاط کاندید و با درنظر گرفتن موارد حائز اهمیت جهت استقرار (اعم از امکان استقرار ایستگاه در آن مکان، تملک زمین، مطالعات فنی و ...) قبلا توسط متخصصین ریلی و شهری انجام شده است و از بین این نقاط، بهترین مکان به عنوان نقاط بهینه با استفاده از شاخص های درنظر گرفته در مدل تعیین می شود. نتایج حاصل از حل مدل بروی داده های قطاری شهری مشهد و مقایسه آن با حل مدل در فضای قطعی نشان دهنده کارایی استفاده از رویکرد فازی در این مساله و بهبود قابل ملاحظه ای در نتایج می باشد.

٥. پی‌نوشت‌ها

1. One interchange heuristic
2. Continues stop location problem
3. Epistemic uncertainty
4. Hard worst-case approach
5. Soft worst case approach
6. Realistic approach
7. RPP-I، RPP-II
8. RPP-III

٦. منابع

– آقایی، محمد، علینقیان، مهدی و صباغ، محمد سعید (۱۳۹۷) "مکان یابی مراکز امداد موقت و مسیریابی پویای وسایل نقلیه امداد هوایی در شرایط بحران"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال نهم، شماره ٤، تابستان ۱۳۹٦، ص ٥٤٨-٥١٩.

– توکلی مقدم، رضا، توکلی، محمد مهدی وجابری، محمد (۱۳۹۷) " مدلسازی ریاضی دو هدفه برای مکان‌یابی ایستگاه‌های دوچرخه با در نظر گرفتن تعداد سفر – مطالعه موردی" فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال نهم، شماره ٤، تابستان ۱۳۹۷، ص ٤٩٦-٤٨٣.

– جعفری، هستی، صندیدزاده، قصیری، کیوان، قوی بازو، امیر. (۱۳۹٥). "بررسی سطوح تمامیت ایمنی با استفاده از درخت خطای فازی (مطالعه موردی در صنعت ریلی)" فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال هشتم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹٦، ص ۳۸۷-۳۷۱.

– چراغی، اسماعیل، حیدری، جعفر، رحیمی، یاسر، رزمی، جعفر. (۱۳۹۷). "مکان یابی هاب چند محصوله در شبکه حمل و نقل کالای ایران با در نظر گرفتن روش های تامین مالی و رویکرد زیست محیطی" فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال دهم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۷، ص ۳۵۳-۳۳۵.

– حقی، محمدرضا، پورعلیخایینی، مسعود و صداقت نیا، سعید (۱۳۹۷) "ارزیابی رضایتمندی شهروندان از طراحی و جانمایی ایستگاه های مترو، نمونه مطالعه : ایستگاه دانشگاه علم و صنعت خط ۲ مترو تهران" فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال یازدهم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۸، ص ٤٧٤-٤٦١.

– شیری پور، صابر. (۱۳۹۸). "مساله مکان‌یابی-تخصیص در مسیریابی احتمالی برای برنامه ریزی بهینه مدارس و سیستم حمل ونقل شهری" فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال یازدهم، شماره 1، پاییز ۱۳۹۸، ص ٤٣-٢١.

- Ben-Tal، L. El-Ghaoui، A. (2009). “Nemirovski، Robust Optimization”. Princeton University Press.

- Bertsimas، D. Sim، M. (2004).”The price of robustness”. Operation. Research. Vol. 52 pp. 35–53.

- Bruno، G. Gendreau، M.. (2002). “A heuristic for the location of a rapid transit line.” Computers and Operations Research. Vol. 29. No، 1. pp. 1-12.

- Dubois، D. Prade، H. (1987).” The mean value of a fuzzy number “Fuzzy Sets and Systems. Vol.24. pp. 279–300.

- Groß، D. R. P. Hamacher. H. W. Horn. S and Schobel. A. (2008). “Stop location design in public transportation networks: Covering and accessibility objectives.” TOP. Vol. 17. No. 2. Pp. 335-346.

- Hamacher، H. W.، A. Liebers، A. Schöbel، D. Wagner and F. Wagner (2001). “Locating new stops in a railway network.” Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways. Vol. 50. No.1.

- Jafari، H. Yaghini، M (2019) “Optimal Location of Subway Stations: A Case Study on Tehran Subway،” International Journal of Railway Research. Vol. 6. No.2. pp. 123-131.

- Jafari H, Sandidzadeh M A, Ghavibazoo A. (2020) “Determining Safety Integrity Level by Considering Uncertainty Aspects in Fuzzy Environment (Case Study on Train Braking System)، ” International Journal of Railway Research. Vol. 7. No. 2. pp. 51-59.

- Laporte، G.، A. Marin، J. M. Mesa and Orteg. d. A. (2007). “An Integrated Methodology for the Rapid Transit Network Design Problem.” Railway Optimization: pp. 187-199.

- Laporte، G.، J. A. Mesa، F. A. Ortega and F. Perea (2011). “Planning rapid transit networks.” Socio-Economic Planning Sciences. Vol. 45.No. 3. pp. 95-104.

- Marin، A. and Garcia-Rodenas. R. (2009). “Location of infrastructure in urban railway networks.” Computers and Operations Research.Vol. 36. No. 5. pp. 1461-1477.

- Mula. J. Poler. R. Garcia. J.P. (2006). “MRP with flexible constraints: a fuzzy mathematical programming approach” Fuzzy Sets and Systems.Vol. 157. pp. 74–97.

- Mulvey، J. Vanderbei، R. Zenios، S. (1995) “Robust optimization of large-scale systems”، Operation. Research. Vol. 43. Pp.264–281.

- Ouyang، Y. Li. X. Barkan. C.P. Lai. Y. (2009). "Optimal locations of railroad wayside defect detection installations." Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Vol. 24. No. 5. Pp. 309-319.

- Pan. F. Nagi، R. (2010). "Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing" Computer Operation Research. Vol. 37. pp. 668–683.

- Peng، F.، X. Li and Y. Ouyang (2011). "Installation of railroad wayside defect detectors:" Multiperiod design. pp. 148-154.

- Pishvaee M، Razmi J. (2012) "Environmental supply chain network design using multiobjective fuzzy mathematical programming". Applied Mathematical Modelling Vol. .36. No. 8. pp.3433–46.

- Pu، H.، Zhang، H. Li، W. Wang، L. Xiong، J. (2019). " Concurrent optimization of mountain railway alignment and station locations using a distance transform algorithm". Vol.127. pp. 1297-1314.

- Schobel، A.، H. W. Hamacher، A. Liebers and D. Wagner (2009). "The continuous stop location problem in public transportation networks." Asia-Pacific Journal of Operational Research. Vol. 26. No. 1. pp.13-30.

- Soyster، A. (1973). "Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming"، Operation. Research. 21. pp. 1154–1157.

- Tanaka، K. and T. Furuta (2010). "Locating flow capturing facilities on a railway network with two levels of coverage". The 9th International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA 2010). China.

- Yaghini، M.، Jafari، H (2015) "A mathematical model for finding the optimal locations of railway stations،" Advances in Railway Engineering، An International Journal. Vol. 3. No.1. pp. 1-8.

- Zhang، H. Pu، H. Schonfeld، P. Song، T. Li، W. Wang، J. Peng، X. Hu، J. (2020). "Multi-objective railway alignment optimization considering costs and environmental impacts". Applied Soft Computing. Vol. 89.

حسین صفری، هستی جعفری

حسین صفری، درجه کارشناسی در رشته مدیریت صنعتی را در سال ۱۳۷۰ از دانشگاه خلیج فارس بوشهر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت صنعتی- تحقیق در عملیات را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مدیریت صنعتی- تولید و عملیات از دانشگاه تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تصمیم گیری چند معیاره فازی، مدلسازی فازی، مدیریت کیفیت، برنامه ریزی استراتژیک و زنجیره تامین است. و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه تهران است.

هستی جعفری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی حمل و تقل ریلی را در سال۱۳۹۰ از دانشگاه علم و صنعت و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی حمل و نقل ریلی در سال ۱۳۹۲ را از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. او، در حال حاضر دانشجوی دکتری در رشته مدیریت صنعتی در دانشگاه تهران است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه مدلسازی ریاضی، مدلسازی فازی، بهینه سازی و ایمنی است.