طراحی شبکه خطوط همگانی با استفاده از اولویت‌بندی حریصانه خطوط در شبکه‌های شطرنجی

مقاله علمی - پژوهشی

امیرعلی زرین‌مهر*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، مازندران، ایران
هانیه ملوک‌زاده، دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، مازندران، ایران
* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: azarinmehr@umz.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵
صفحه ۱۶۰-۱۴۷

چکیده

مسأله طراحی شبکه خطوط همگانی از مسائل اساسی در دستیابی به توسعه پایدار شهری به‌شمار می‌رود. این مساله به یافتن ترکیب بهینه خطوط حمل‌ونقل همگانی می‌پردازد، به‌گونه‌ای که با حفظ محدودیت بودجه، هدف خاصی در شبکه تامین گردد. باتوجه به این‌که طراحی شبکه، یک مسئله از نوع پیچیده و نمایی است، دستیابی به جواب دقیق (بهینه جهانی) آن در ابعاد بزرگ نیازمند روش‌های‌حل سیستماتیک همچون الگوریتم‌های ابتکاری/فرابتکاری است. این الگوریتم‌ها به‌طور گسترده در ادبیات تحقیق مورد استفاده قرارگرفتند، اما تمرکز بر روی انواع شبکه‌های حمل‌ونقلی با ویژگی‌های خاص اندک بوده‌است. هدف این مقاله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقلی در شبکه‌های شهری با الگوی شطرنجی است به گونه‌ای که، ضمن حفظ محدودیت بودجه، حداکثر پوشش در شبکه حاصل گردد. برای این منظور، این مطالعه یک الگوریتم جدید، از نوع ابتکاری –طراحی‌شده به طور خاص با تمرکز برای شبکه های شطرنجی– پیشنهاد میکند. الگوریتم پیشنهادی یک شاخص حریصانه موسوم به شاخص تقاضا ارایه داده و از آن برای ارتباط بین گره های پرتقاضا در شبکه استفاده میکند؛ به این ترتیب که به طور تکراری، هربار گره دارای بیشترین شاخص تقاضا انتخاب و یک خط همگانی کاندیدای عبوری از آن به ترکیب خطوط موجود اضافه میشود. مقایسه بهترین جواب‌های حاصل از الگوریتم ابتکاری در یک شبکه شطرنجی ۱۰×۶ برای ۳۰ ماتریس تقاضای سفر تصادفی، در مقابل جواب‌های دقیق مساله نشان می‌دهد که الگوریتم ابتکاری می‌تواند در زمان کوتاه قابل‌توجه‌ای، جواب‌هایی نزدیک‌به جواب‌های دقیق مسئله را بیابد. مطابق نتایج به دست آمده، در مقایسه با حل دقیق در مدت زمان تقریبا ٤ ساعت، الگوریتم پیشنهاد شده می‌تواند در مدت‌زمان (±۸) ۲۹ ثانیه، به طور متوسط، به جواب‌هایی با اختلاف ۲/۹ درصد نسبت به جواب‌های بهینه جهانی دست پیدا کند.

واژه‌های کلیدی: طراحی شبکه خطوط، شبکه شطرنجی، اولویت‌بندی حریصانه، پوشش

۱- مقدمه

گسترش شهرها، تراکم جمعیت و افزایش تعداد سفر در کلان شهرها موجب بروز مشکلات بالقوه‌ای همچون ازدحام ترافیکی، آلودگی هوا، افزایش مصرف انرژی و گرم‌شدن زمین شده‌است. در ایران، براساس گزارش‌های آماری منتشرشده توسط وزارت نیرو در سال ۱۳۹۷، سوخت مصرف‌شده در بخش حمل‌ونقل بیش از ۵۰ درصد کل مصارف فراورده‌های نفتی در کشور است، و سهم گازهای گلخانه‌ای انتشاریافته در این بخش در مقایسه با بخش‌های صنعتی، تجاری، خانگی و ... بیشتر از ۲۰ درصد است (Ministry of Energy., in Persian, 2018). نتایج حاکی از آن است که سیاست‌گذاری

مناسب در جهت برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همگانی می‌تواند از بار مشکلات جامعه شهری بکاهد. برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همگانی، به‌طورکلی، دربرگیرنده مجموعه‌ای از مسائل مرتبط و درهم‌تنیده است که بدون توجه به یک مساله نمی‌توان به سایر مسائل به طور مستقل پرداخت.

این مسائل، طیف گسترده‌ای از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را شامل می‌شوند؛ از تصمیم‌گیری‌های در سطوح کلان همچون برنامه‌ریزی کاربری‌زمین (Aminzadeh Goharrizi et al., 2019; Aghdas Vatankhah & Gharib, 2009) و طراحی‌خطوط همگانی (Khanzad et al., 2017; Afandizadeh Zargari & Afyounian, 2003) تا مسائل روزمره همچون ارائه برنامه زمان‌بندی خدمه همگانی یا زمان‌بندی حرکت ناوگان بین خطوط مختلف (Shafahi & Ameri, 2017; Seyedabrishami et al., 2017). علی‌رغم درهم‌تنیدگی ذاتی و وابستگی مجموعه مسائل نام‌برده به‌یکدیگر، به‌دلیل ابعاد گسترده مسائل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همگانی، این مسائل معمولا در چند سطح طبقه‌بندی می‌شوند و با هر مسئله به‌طور مستقل برخورد می‌شود (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009). در میان سطوح مختلف، مساله طراحیِ خطوط جزء سطوح اولیه (یا استراتژیک) محسوب می‌گردد که بر سایر سطوح برنامه‌ریزی نظیر تنظیم فرکانس، زمان‌بندی وسایل نقلیه و ... تاثیرگذار است (Zarrinmehr et al., 2016). در یک تعریف کلی، مسئله طراحی خطوط شبکه همگانی، انتخاب زیرمجموعه‌ای از میان ترکیب‌های امکان‌پذیر خطوط است، به گونه‌ای که ضمن حفظ محدودیت بودجه، اهداف خاصی را برای گرداننده یا کاربرشبکه (مسافر) سیستم بهینه نماید. این دسته از مسائل به دلیل تنوع در تابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری، از گستردگی زیادی در ادبیات پژوهش برخوردارند. تعدد اهداف در مسائل واقعی، باعث پیچیدگی و عدم امکان پیداکردن راه‌حلی موثر برای مسئله می‌شود، بنابراین به طور رایج، به‌جای درنظرگرفتن همه مسائل و اهداف برنامه‌ریزی حمل‌ونقل همگانی، در فرآیند طراحی، ابتدا برخی از زیرمسئله‌های کاملاً مشخص انتخاب و سپس به صورت سلسله مراتبی (از مسائل کلان تا مسائل عملکردی جزئی‌تر و روزمره) به حل آن‌ها پرداخته می‌شود (Baaj & Mahmassani, 1991).

تاکنون اهداف متعددی برای برنامه‌ریزی خطوط همگانی موردتوجه قرار گرفته‌است، از جمله کاهش هزینه‌های عملکردی، کاهش زمان‌سفر در کل شبکه، کاهش تعداد انتقال کاربران بین خطوط همگانی، کاهش مجموعه طول خطوط همگانی، افزایش سهم همگانی از مجموع تقاضای سفر در شبکه. یکی از اصلی‌ترین اهداف در حل مسائل طراحی شبکه در سطح استراتژیک تصمیم‌گیری، بیشینه‌سازی پوشش تقاضا در سطح شبکه بوده‌است، که در صورت برآورده‌شدن می‌تواند رضایت کاربران و گردانندگان سیستم را به طور همزمان فراهم کند (Mauttone, Cancela & Urquhart, 2021). در یک بیان کلی، منظور از پوشش فراهم‌بودن امکانِ سفر همگانی برای تقاضای سفر موجود در سطح یک شبکه حمل و نقلی هست. این تعریف در ادامه (بخش۲) با جزئیات بیشتری بیان می‌گردد.

برای یافتن پاسخ شبکه بهینه (دارای حداکثر پوشش) چند رویکرد وجود دارد. رویکرد اول موسوم به حل دقیق است که وقت و هزینه محاسباتی سنگینی را در پی دارد. در یک حالت خاص از این رویکرد، حل دقیق مستلزم شمارش یکایک جواب‌های امکان‌پذیر مسئله و بررسی مقدار پوشش برای آن‌ها است. این روش به لحاظ محاسباتی بسیار پیچیده بوده و استفاده از آن برای شبکه‌های موجود در ابعاد بزرگ مساله امکان ناپذیر است (Li et al., 2020; Zarrinmehr & Shafahi, 2016). از این‌رو در دهه‌های اخیر، تمرکز بیشتر ادبیات بر روی حل مسئله با استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری بوده، که در صورت طراحی مناسب، ممکن است بتوانند به جواب‌هایی نزدیک به بهینه جهانی در مدت زمان کوتاهی دست پیداکنند.

ایده اصلی در الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری تهاتر بین سرعت‌حل الگوریتم و کیفیت جواب‌های حاصله از آنها است. تاکنون طیف گسترده‌ای از این الگوریتم‌ها در پیشینه تحقیق معرفی گردیده است، از جمله الگوریتم ژنتیک، کلونی مورچگان، کلونی زنبورها، بهینه‌سازی اجتماع ذرات، گرم و سردسازی شبیه‌سازی‌شده. خواننده علاقه‌مند می‌تواند جزئیات بیشتر در این خصوص را از مراجع مروری مانند Ul Abedin et al. (2018)، Saif , Zefreh & Torok. (2019)، یا Mauttone, Cancela & Urquhart. (2021) پیگیری نماید. علی‌رغمِ تحقیقات وسیعی که در جهت بیشینه‌سازی

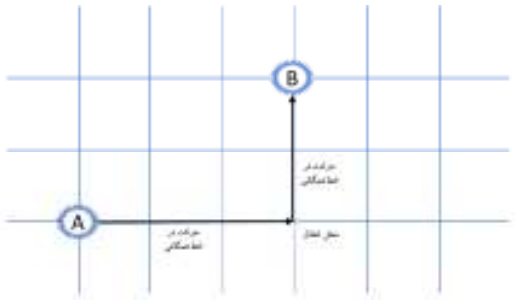
پوشش در شبکه‌های حمل‌ونقل همگانی انجام شده‌است، بررسی ادبیات موضوع نشان‌دهنده آن است که تمرکز مطالعات صورت‌گرفته بر شبکه‌های حمل‌ونقلی دارای توپولوژی‌های خاص، نظیر شبکه‌های شطرنجی، شعاعی، و... در این حوزه ناچیز بوده‌است. به‌علاوه، بنابه اطلاع نویسندگان، اندک مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه نیز، با به‌کار بستن فرض‌های ثوی ساده‌کننده، سعی در استخراج روابط تحلیلی داشته‌اند که ممکن است تا حد زیادی با دنیای واقعیت فاصله داشته‌باشد. از جمله این فرض‌های ساده‌کننده می‌توان به استفاده از توابع تقاضای سفر یکنواخت یا مرکزگرا، و نیز فرض پیوستگی برای متغیرهای مساله از جمله سرفاصله زمانی و فاصله بین بلاک‌های شبکه شطرنجی اشاره نمود (Miyagawa, 2018; Daganzo, 2010).

با بررسی ادبیات موجود در موضوع طراحی شبکه خطوط همگانی، عدم طراحی و به‌کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری متناسب با شبکه‌های خاص حمل‌ونقلی یا نیازمندی به فرض‌های قوی ساده‌کننده در مورد آنها به‌عنوان خلا پژوهشی در حوزه این مطالعات به چشم می‌خورد. مقاله پیش‌رو، به عنوان گامی در این جهت، یک الگوریتم ابتکاری جدید را به‌منظور بیشینه‌سازی "پوشش" خطوط همگانی، به طور خاص برای شبکه های شهری شطرنجی، پیشنهاد می‌کند. الگوریتم پیشنهادی، به‌منظور اعتبارسنجی برروی تعداد ۳۰ ماتریس تقاضای تصادفی در یک شبکه شهری ۶۰ گره‌ای (شبکه۱۰×۶) اجراشده، نتایج آن در کنار نتایج حل‌دقیق مساله گزارش، و به‌لحاظ سرعت و کیفیت جواب‌ها مقایسه می‌گردد. این نتایج حاکی از آن است که الگوریتم ابتکاری پیشنهادشده می‌تواند با سرعت بسیاربالایی (کمتر از ۱ دقیقه، در مقایسه با چندساعت)، به جواب‌هایی با اختلاف تابع‌هدف زیر ۳ درصد نسبت به جواب‌های دقیق (اصطلاحاً بهینه جهانی) مساله دست پیداکند. این مقاله در ادامه، به بیان مسئله، فرضیات و نوع شبکه شطرنجی می‌پردازد. سپس الگوریتم پیشنهادی را معرفی، نتایج را برای یک شبکه شطرنجی ۶۰ گره‌ای ارایه و عملکرد الگوریتم را از طریق مقایسه جواب‌ها با حل دقیق مسئله ارزیابی می‌کند. مقاله در نهایت با ارایه چند پیشنهاد به‌منظور ادامه تحقیق پایان می‌پذیرد.

۲- پیشینه تحقیق

مسئله شبکه حمل‌ونقل همگانی مسئله‌ای است که در طی آن خطوط شبکه به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که ضمن حفظ محدودیت بودجه، رضایت استفاده کنندگان از سیستم را به دنبال داشته‌باشد. رضایت استفاده‌کنندگان یک مساله چندبعدی است، که اهداف و محدودیت‌های متعددی را می‌توان به طور همزمان برای آن درنظرگرفت. بیشینه‌سازی پوشش تقاضا در طراحی شبکه حمل‌ونقل عمومی از مهم‌ترین اهدافی است که از دیدگاه کاربر و ارائه دهنده سیستم، به مسئله می‌نگرد و بیانگر هدف اصلی از ارائه سیستم حمل‌ونقل‌عمومی است. در یک تعریف کلی، منظور از "پوشش" ، تعداد یا درصد افرادی است که امکان استفاده از سیستم حمل و نقلهمگانی برای انجام سفر خود دارند (Mauttone, Cancela & Urquhart, 2021).

از دیگر اهدافی که در بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل همگانی می‌توان به‌آن اشاره نمود، کاهش انتقال بین خطوط در جهت افزایش رضایت مسافران است. پژوهش‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد مسافران تمایل دارند، در برابر مسیری با یک یا دو انتقال بین خطوط، مسیر طولانی‌تر اما با تعداد انتقال کمتر انتخاب نمایند (Stern, 1996). از این‌رو تمرکز بر یکی از پارامترهای مساله همانند افزایش پوشش‌تقاضا، کاهش هزینه و یا تعداد انتقال تبعاتی همچون کاهش کیفیت طراحی، ازدست‌رفتن رضایت مسافران همگانی و در نهایت ناکارآمدی شبکه را به همراه دارد. در نتیجه، درنظرگرفتن مستقیم یا غیرمستقیم موارد یادشده در تعریف تابع هدف (به طور خاص، پوشش) اهمیت دارد.



شکل ۱. مثالی از انجام سفر همگانی با یک انتقال در یک شبکه شهری شطرنجی

۲-۱- شبکه شطرنجی

شبکه‌های حمل‌ونقل شهری ممکن است گاهی با توپولوژی‌های به‌خصوصی تعریف و طراحی گردند، که انتخاب توپولوژی مناسب بستگی به هدف طرح (تاب‌آوری، زمان‌سفر، دسترسی، و ...) و نیز عوارض موجود دارد. از جمله توپولوژی‌های شناخته‌شده در طراحی ساختار شبکه‌های شهری می‌توان به شبکه‌های شطرنجی، مرکزمدار(شعاعی)، دودرختی، حلقه‌مرکزی، مسیرهای متقاطع، الماسی و ... اشاره نمود (Dezfolinejad, Raoufi & Dalvand., in Persian, 2020). در این پژوهش یک شبکه شهری، از نوع شطرنجی (یا اصطلاحاً گرید) مدنظر قرار می‌گیرد. شبکه شطرنجی یک شبکه ساده، فاقد مرکزیت شهری و متشکل از مسیرهای مستقیم افقی و عمودی است، که در آن تقاطع‌ها نماینده موقعیت گره‌های شبکه و خطوط نمایانگر خیابان‌هایی است که این گره‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند. در این نوع شبکه به علت وجود تعداد بالای گره، امکان سفر از مسیرهای مختلف وجود دارد و این ویژگی، شرایط را برای پراکنده‌سازی جریان ترافیک در معابر شبکه فراهم می‌کند. به‌علاوه، مطابق شکل۱ سهم قابل‌توجه‌ای از افراد پوشش‌داده‌شده توسط سیستم همگانی می‌توانند بدون انتقال و یا حداکثر با یک انتقال (همچون سفر از نقطه A به نقطه B) به صورت مستقیم یا L شکل سفر کنند (Walker, 2020).

۲-۲- مفروضات مساله

در این پژوهش فرض می‌شود:

-ماتریس تقاضای سفر یک ورودی ثابت است.

-شبکه خیابانی یک شبکه از نوع شطرنجی است.

-سیستم مدیریت‌شهری به دلیل سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری ذکر شده در ادبیات پژوهش، خطوط همگانی مورد نظر را به صورت افقی یا عمودی در نظر گرفته‌است.

-در جهت افزایش کیفیت خطوط شبکه، برای هریک واحد انتقال بین خطوط، با افزودن یک زمان‌سفر مصنوعی به عنوان جریمه (نمایانگر افزایش سختی سفر)، به کل زمان‌سفر مدل می‌گردد. جریمه‌زمانی، قابل کالیبره‌کردن و جزء ورودی‌های مدل هست، که برای هر تغییر خط در این پژوهش ۵دقیقه فرض می‌شود.

-با درنظرگیری این نکته که مسافران تمایل دارند، در برابر مسیری با یک یا چند انتقال بین خطوط، مسیر طولانی‌تر اما با تعداد انتقال کمتر را انتخاب نمایند (Stern, 1996)، در جهت اعمال کاهش تمایل مسافران برای استفاده از سیستم حمل‌ونقل همگانی، در محاسبه کل تقاضای پوشش داده‌شده، برای هر انتقال بین خطوط ضرائب کاهشی اعمال می‌گردد. چنان‌که در ادامه در بخش ۲-۳ خواهیم دید، این مطالعه فرض می‌کند مقدار این ضریب کاهشی برای یک انتقال (معادل استفاده از دوخط همگانی برای انجام‌سفر) از ۱/۰ به مقدار ۰/۷ و برای دو انتقال (معادل استفاده از سه‌خط همگانی برای انجام‌سفر)
از ۱ به ۰/۵ کاهش پیدا می‌کند.

۲-۳- بیان ریاضی مسئله

طراحی شبکه خطوط همگانی تاکنون به شکل‌های مختلفی فرمول‌بندی شده‌است؛ از فرمول‌بندی‌های ساده اولیه همچون باج و مهمسانی (Baaj & Mahmassani, 1991) گرفته، تا فرمول‌بندی‌های چندسطحی ارائه‌شده در مطالعات اخیر (Zarrinmehr et al., 2018; Tang & Xu, 2022). با نظر به اینکه مطالعه پیش‌رو، به دنبال استفاده از جزئیات بیان فرمول‌بندی ریاضی برای حل آن توسط نرم افزارهای تجاری نیست، در این بخش به یک بیان ریاضی کلی برای مساله بسنده می‌شود. برای یک شبکه شطرنجی، نام‌گذاری می‌کنیم:

R: مجموعه K خط همگانی کاندیدا به منظور احداث در شبکه،

b_k: متغیر صفر و یکی، به منظور تصمیم به عدم احداث یا احداث خط همگانی k ام، $1\leq k\leq K$،

B: بردار متغیرهای تصمیم مساله به طول K،

R_B:زیرمجموعه خطوط‌همگانی انتخاب‌شده برمبنای بردارتصمیم B،

l_k: طول خط همگانی کاندیدای k ام، $1\leq k\leq K$،

l: مجموعه همه خطوط شبکه،

L : : حداکثر طول قابل احداث برای خطوط همگانی جدید، با حفظ محدودیت بودجه،

$N(R_B)= N_B$: شبکه حاصل از احداث خطوط همگانی R_B،

$Cov(N_B)$: پوشش حاصله از خطوط همگانی در شبکه N_B .

به منظور محاسبه سطح پوشش $Cov(N_B)$ در شبکه، ابتدا مقدار پوشش تقاضا بین یک مبدا-مقصد را تعریف کرده، سپس پوشش در شبکه را از مجموع مقادیر پوشش روی مبدا-مقصدها محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه پوشش تقاضای همگانی بین یک مبدا- مقصد، ابتدا جریمه ۵ دقیقه‌ای انتقال بین خطوط همگانی به همه مسیرهای همگانی موجود اعمال می‌گردد، و سپس، کوتاه‌ترین مسیر همگانی از مبدا به مقصد

تعیین می‌شود. اگر کوتاه‌ترین مسیر حاصل شامل ۰، ۱، ۲، یا بیش از ۲ انتقال بین خطوط باشد، به‌ترتیب، فرض می‌شود که تقاضای آن مبدا–مقصد به میزان ۱۰۰، ۷۰، ۵۰، یا صفر درصد پوشش داده‌شده‌است. در نهایت، پوشش تقاضا در سطح کل شبکه از مجموع مقادیر پوشش روی همه مبدا–مقصدها محاسبه می‌گردد. با مقدمات یادشده، اکنون می‌توان مساله این مقاله را به صورت کلی زیر تعریف کرد:

$$\max_{B} \quad \mathrm{Cov}(N_B) \qquad (۱)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^{K} b_k l_k \le L \qquad (۲)$$

براساس این فرمول‌بندی کلی، هدف مساله یافتن بردار تصمیم B است، به‌گونه‌ای که مطابق سطر(۱) این تصمیم منجر به ایجاد حداکثر پوشش در سطح شبکه گردد. به‌علاوه، محدودیت سطر (۲) حداکثر طول خطوط همگانی را به مقدار L محدود می‌کند.

به لحاظ ریاضی، واضح است که مساله فوق قابل‌کاهش به مساله جمع مساله کوله‌پشتی است (Cacchiani et al., 2022). از این‌رو، در کلاس پیچیدگی مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد، که حل آن در ابعاد بزرگ نیازمند طراحی و استفاده از الگوریتم‌های غیردقیق (ابتکاری یا فراابتکاری) است.

۳- روش‌حل مساله

چنان‌که پیش‌تر گفته‌شد، به دلیل پیچیدگی‌های مساله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل، حل دقیق این مساله با استفاده از شمارش تمام جواب‌های امکان‌پذیر در ابعاد بزرگ ممکن نیست.

بخشی زیادی از مجموعه مسائل تصمیم‌گیری از نوع انتخاب/عدم‌انتخاب، در حوزه تحقیق در عملیات، اصطلاحا در کلاس پیچیدگی مسائل NP-Hard قرار می‌گیرند. مسائل طراحی شبکه گسسته حمل‌ونقل شخصی یا همگانی نیز از این دست مسائل محسوب می‌گردند که حل دقیق آنها، حتی به کمک امکانات قوی، همچون محاسبات موازی، زمان‌بر یا حتی غیرممکن است (Zarrinmehr & Shafahi, 2014,2015). در مواجه با این چنین مسائلی، ایده اصلی حاکم بر روش‌های حل، برقراری تهاتر بین زمان‌حل مساله و کیفیت جواب‌های حاصله است، به این معنی که الگوریتم‌هایی مدنظر طراحی و استفاده قرار می‌گیرند که بتوانند در مدت زمانی معقول به جوابی نسبتاً خوب (نه الزاما بهترین جواب) برای مساله دست پیدا کنند. این الگوریتم‌ها، اصطلاحا الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری نامیده می‌شوند.

در این پژوهش، یک الگوریتم ابتکاری جدید بر پایه‌ی افزودن مسیرهایی با کمترین طول خطوط به شبکه‌های شطرنجی در راستای اتصال گره‌هایی با بیشترین شاخص تقاضا، پیشنهاد می‌گردد. این الگوریتم، بنا به اطلاع نویسندگان، در مطالعات پیشین طراحی شبکه پیشنهاد یا به‌کارگرفته نشده‌است.

روش‌حل الگوریتم پیشنهادی از دوگام اصلی تشکیل شده‌است. در گام اول جهت یافتن گره‌هایی با بیشترین شاخص تقاضا، یک شاخص بر اساس اطلاعات ماتریس تقاضای سفر در شبکه گرید اعمال می‌شود. این شاخص برای هرگره از گره‌های شبکه، به صورت مجموع کل سفرهای ورودی و خروجی آن گره تعریف می‌شود. در واقع، این شاخص به صورت ابتکاری و حریصانه نقش هر گره در ایجاد ارتباط بین نقاط مختلف شبکه و امکان بیشینه‌سازی پوشش در شبکه‌های حمل‌ونقلی را نشان می‌دهد. سپس در گام‌دوم این الگوریتم برپایه‌ی یک فرایند تکرارشونده هر بار خط همگانی با بالاترین شاخص موسوم به "شاخص حاشیه‌ای پوشش" را از میان خطوط همگانی متناظر هر گره انتخاب‌شده تعیین و به شبکه خطوط موجود اضافه می‌کند. بخش ۳-۱ با جزئیات بیشتری به معرفی روش حل پیشنهادی می‌پردازد.

۳-۱- شاخص تقاضا

مقدمتاً تعریف می‌کنیم:

V: مجموعه همه گره‌های شبکه،

V_{-i}: مجموعه همه گره‌های شبکه به استثنای گره i، یعنی $V_{-i}=V-\{i\}$، $i\epsilon V$

D_{ij}: تعداد سفر از گره i به گره jدر شبکه، $i\epsilon V$ ،$j\epsilon V_{-i}$

D_{ji}: تعداد سفر از گره jبه گره i در شبکه، $i\epsilon V$ ،$j\epsilon V_{-i}$ و

DI_i: شاخص تقاضا برای گره i از شبکه، $i\epsilon V$

با تعاریف صورت‌گرفته، شاخص تقاضا برای یک گره از شبکه همچون i به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$DI_i = \sum_{j\epsilon V_{-i}} (Dij + Dji) \qquad (۳)$$

مطابق این تعریف، شاخص تقاضا برای گره i از شبکه به صورت مجموع کل تعداد سفرهای ورودی به این گره و خروجی از این گره تعریف می‌شود. این شاخص، به صورت حریصانه، نماینده‌ای از میزان تاثیر گره i در فراهم‌کردن امکان سفر بین گره‌های مختلف درسطح شبکه است.

۳-۲- شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا

در مطالعه حاضر، شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا برای یک خط همگانی عبارت است از مقدارِ افزایش پوشش در شبکه که با افزودن خط همگانی مورد نظر به ترکیب خطوط موجود حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، در یک ترکیب از خطوط همگانی، افزودن هر یک از خطوط همگانی کاندیدای جدید به ترکیب خطوط می‌تواند به مقدار حاشیه‌ای موجب مقداری افزایش پوشش تقاضا گردد. این مقدار برای هر یک از خطوط همگانی کاندیدا اصطلاحا شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا برای آن خط همگانی نامیده می‌شود. بدیهی است که شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا برای یک خط همگانی مقداری نامنفی است.

۳-۳-بیان الگوریتم پیشنهادی

شکل ۲ جزئیات الگوریتم حل پیشنهادی این مطالعه را در قالب یک فلوچارت نمایش می‌دهد. گام‌های الگوریتم، مطابق این فلوچارت، به صورت زیر قابل تشریح هستند:

گام ۱: در این گام، ابتدا همه اطلاعات مورد نیاز برنامه از ورودی دریافت میگردد. این اطلاعات شامل ماتریس تقاضا، اتصالات و شماره‌بندی کمان‌ها و گره‌های شبکه، و سطح‌بودجه در دست است.

گام ۲: پس از دریافت اطلاعات ورودی، در این گام، مقدمتا سطح بودجه در دست (برحسب واحد طول) l_b نامیده می‌شود. همچنین طول هریک از خطوط همگانی پیشنهادی شبکه تعیین می‌گردد.

گام ۳: در این مرحله، شاخص تقاضا که در رابطه (۳) پیش‌تر معرفی گردید، برای همه گره‌های شبکه تعیین می‌شود. کلیه گره‌های شبکه، سپس، در یک مجموعه N قرار می‌گیرند.

۳-۴- حل دقیق مسئله

در روش شمارش کامل به‌منظور حل دقیق مساله (و به کمک آن، ارزیابی الگوریتم پیشنهادی)، اگر بخواهیم تمام جواب‌های امکان‌پذیر مسئله را شمارش نموده و برای هریک از آن‌ها پوشش تقاضا را محاسبه نماییم، یک مسئله نمایی از مرتبه 2^K (K معادل تعداد خطوط‌همگانی) خواهیم داشت که عملاً یافتن پاسخ آن در ابعاد بزرگ امکان‌ناپذیر است.

به‌علاوه، مجموعه L به‌عنوان مجموعه خطوط همگانی کاندیدا (مورد انتخاب) درنظرگرفته می‌شود. این مجموعه در ابتدای الگوریتم تهی است.

-گام‌های ٤ و ٥: در این گام‌ها، که گام‌های آغازین در تکرارهای الگوریتم هستند، هربار گره‌ای که دارای بیشترین "شاخص تقاضا" هست، همچون n، از میان مجموعه گره‌های N خارج می‌شود و متناظر با آن، دو خط همگانی کاندیدای گذرنده (افقی و عمودی) از n، مشخص می‌شوند. هر یک از این خط‌های کاندیدا، در صورتی‌که پیش‌تر در مجموعه خطوط L وجود نداشته‌باشند، به مجموعه L اضافه می‌شوند.

-گام ٦: در این مرحله، که بار اصلی محاسباتی الگوریتم را دربرمی‌گیرد، با درنظرگرفتن توپوگرافی خطوط انتخاب‌شده تاکنون، شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا برای هریک از خطوط کاندیدا در L محاسبه می‌گردد و خط همگانی کاندیدا که بیشترین شاخص پوشش تقاضا را دارد، همچون l، تعیین و از مجموعه L خارج می‌گردد.

-گام‌های ۷ و ۸: مطابق شرط الگوریتم در گام ۷، ابتدا بررسی می‌شود که آیا سطح‌بودجه موجود اجازه اضافه‌کردن خط‌همگانی کاندیدا l را به مجموعه خطوط فعلی شبکه می‌دهد؟ (الف) اگر بله، خط l به مجموعه خطوط موجود اضافه‌شده و بودجه در دست متناسبا اصلاح می‌گردد. سپس الگوریتم برای آغازکردن یک تکرار دیگر به گام ٤ بازمی‌گردد. (ب) اگر نه، این بدان معنی هست که امکان اضافه‌کردن یک خط همگانی جدید وجود ندارد و الگوریتم به گام پایانیِ ۹ می‌رود.

-گام ۹: در این گام، الگوریتم با چاپ نتایج حاصل (ترکیب خطوط، بودجه مورد نیاز، میزان پوشش، و ...) در خروجی به کار خود پایان می‌دهد.

با درنظرگرفتن این نکته که شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا برای هر خط همگانی در هر ترکیب خطوط مقداری نامنفی است، جهت کاهش حجم عملیات جستجو، به‌جای همه جواب‌های امکان‌پذیر، شمارش فقط بر روی جواب‌های اصطلاحا غالب صورت می‌گیرد. منظور از جواب‌های غالب جواب‌هایی هستند که با توجه به محدودیت بودجه، نتوان خط همگانی جدیدی به آنها اضافه کرد. خواننده می‌تواند جزئیات

بیشتر در این خصوص را در منابع Zarrinmehr & Shafahi (2014,2015) پیگیری کند.

٤- نتایج استفاده از الگوریتم

الگوریتم پیشنهادی این پژوهش به همراه شمارش جواب‌های غالب مساله، در محیط برنامه‌نویسی Python بر روی یک شبکه ساختگی شطرنجی پیاده‌سازی شد، و برای ۳۰ ماتریس‌تقاضای سفر تصادفی مختلف اجرا گردید. مطابق شکل۳ شبکه مورد استفاده یک شبکه ۱۰×٦ است، که طول هر ضلع افقی و عمودی آن به‌ترتیب ۲/۲ و ۲ کیلومتر است. لازم است اشاره‌شود که در مرحله فعلی پژوهش اطلاعات ماتریس‌های تقاضای سفر به صورت تصادفی (ساختگی) تولیدشده‌اند و مبتنی بر داده‌های واقعی نیستند.

شبکه شطرنجی۱۰×٦ مورد استفاده دارای تعداد ١٦ خط همگانی کاندیدا هست، که از این میان، خطوط عمودی و افقی به ترتیب دارای شماره ۱ الی ۱۰ و ۱۱ الی ١٦ بوده، در شکل ۳ قابل‌مشاهده هستند. اطلاعات بیشتر از جمله ماتریس تقاضای سفر مربوط به این شبکه در مرجع Khanzad et al. (2017) در دسترس است.

٤-١- نحوه عملکرد الگوریتم ابتکاری در یک اجرا

جدول ۱ نحوه عملکرد الگوریتم ابتکاری پیشنهادی را در شبکه شکل ۳، و با فرض محدودیت بودجه ۱۰۰ کیلومتری برای احداث

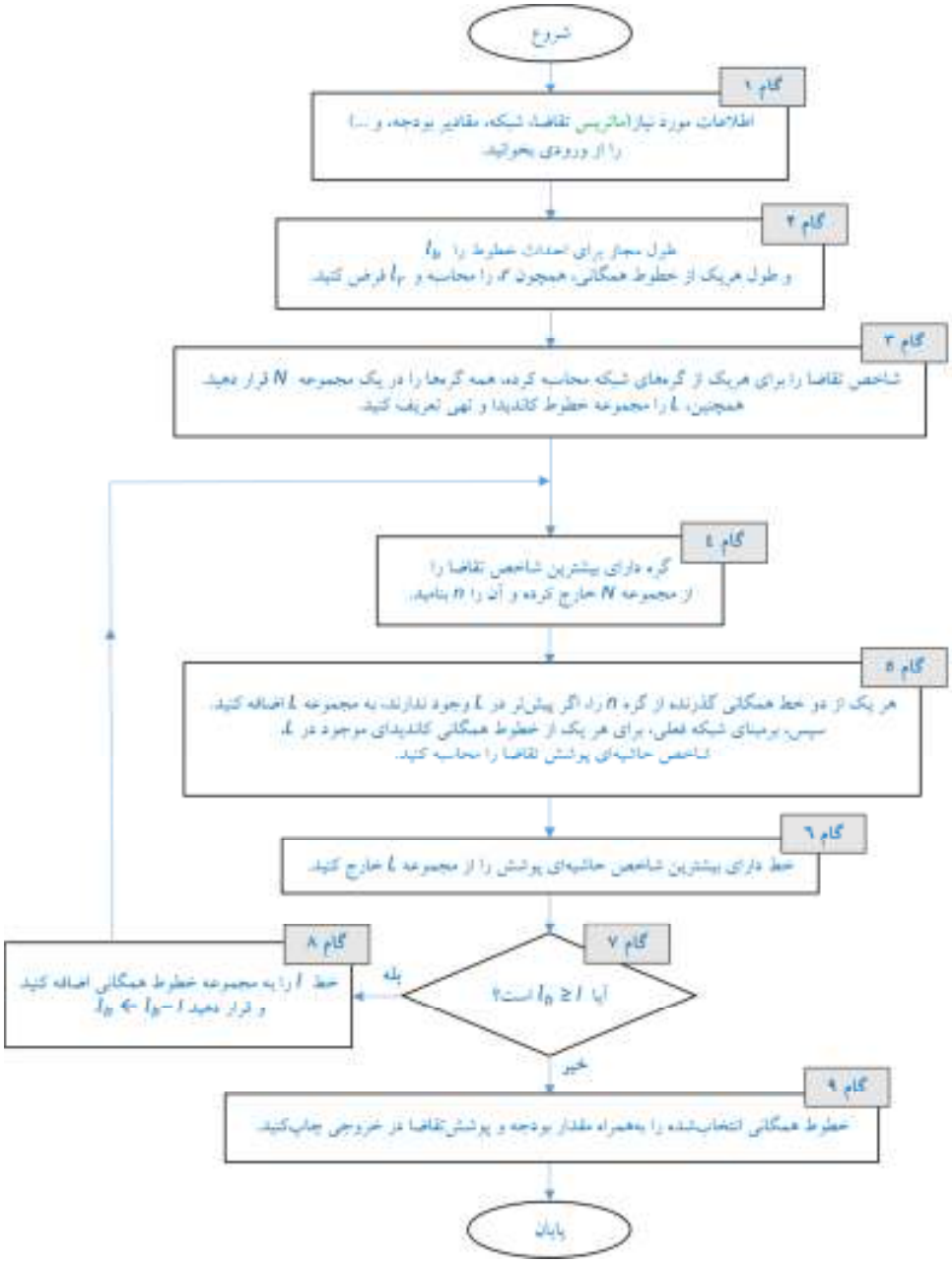
خطوط نمایش می‌دهد. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌شود برنامه در این اجرا با انتخاب گره ۲۰ و افزودن خطوط متناظر ۱۲و ۱۰ به لیست انتظار آغاز می‌شود. سپس شاخص حاشیه‌ای پوشش هریک از خطوط موجود را محاسبه کرده و بهترین خط، یعنی خط ۱۲ با شاخص ٤٤٥/۲ را به شبکه خطوط همگانی اضافه می‌کند. سپس طی تکرار جدیدی، این‌بار با گره ۱ آغاز می‌گردد.

این فرایند تا زمانی که مجموع طول خطوط همگانی از محدودیت بودجه ۱۰۰ تجاوز نکند ادامه می‌یابد. در این مساله نهایتا درجواب [12,10,9,1,8,6,5,4,7,3] با سطح بودجه ۹۹/۸ و مقدار پوشش ١٤٧٠٩١,٤ متوقف می‌شود.

٤-٢- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم

همان‌طور که اشاره شد، به‌منظور اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم پیشنهادشده، این مطالعه یک شبکه شطرنجی فرضی در ابعاد ۱۰×٦ را با ۳۰ سناریوی تقاضای سفر تصادفی درنظر می‌گیرد. بخش پیش‌رو، به بررسی نتایج به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی در کنار نتایج حل‌دقیق، و گزارش متوسط زمان حل مربوطه و اختلاف جواب‌های حاصله نسبت‌به جواب‌های دقیق می‌پردازد.

جدول ۲ نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی را برای ۳۰ ماتریس تقاضای سفر تصادفی در شبکه مورد نظر نشان می‌دهد. نتایج عددی الگوریتم پیشنهادی مربوطبه پیاده‌سازی در محیط برنامه‌نویسی Python و اجرا در وضعیت Safe mode بر روی یک لپ‌تاپ دارای پردازنده سری Core-i7 دارای سرعت 1.99GHz، حافظه 8.00GB، و سیستم‌عامل Windows10 است.

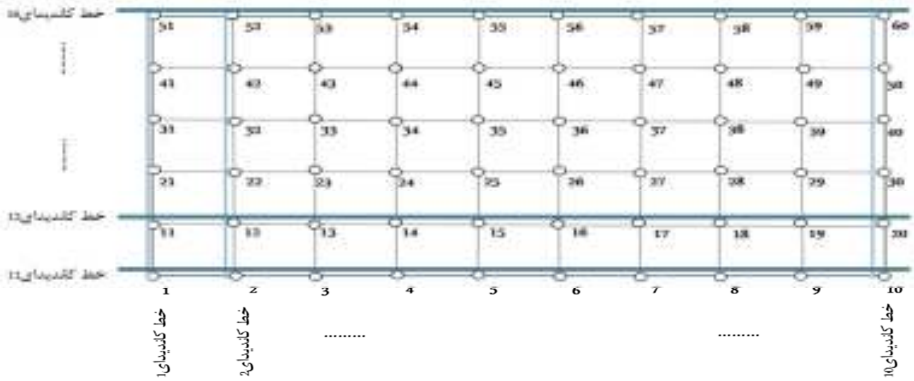


شکل ۲. الگوریتم حل حریصانه پیشنهادی در این مطالعه

مطابق جدول ۲ ملاحظه می‌گردد که، درحالی که زمان‌اجرای روش شمارش جواب‌های غالب در همه ۳۰ اجرا بیش از ۳ ساعت و در مواردی بیش از ٤ ساعت است، زمان اجرای الگوریتم پیشنهادشده به‌طور متوسط تنها برابر با (±۸) ۲۹ ثانیه بوده‌است.

همچنین، مدت زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی در همه ۳۰ مورد به زیر ۱ دقیقه محدود می‌شود، که این مشاهده برای مساله‌ای زیرساختی همچون طراحی‌شبکه سرعت بسیاربالایی محسوب می‌گردد. درکنار سرعت‌بالا، الگوریتم پیشنهاد شده قادر است به جواب‌هایی با متوسط اختلاف زیر ۳ درصد نسبت به مقادیر بهینه‌جهانی مساله دست پیدا کند (اختلاف متوسط ۲/۹ در ستون انتهایی جدول ۲).

بررسی دقیق‌تر نتایج حاصل از اجرای الگوریتم نشان می‌دهد که اختلاف جواب‌های حاصله با جواب دقیق مساله در بیش‌از نیمی از اجراها زیر ۱ درصد است. الگوریتم پیشنهادی در ۲ مورد از ۳۰ اجرا (اجراهای شماره ۱۰ و ١٤) به جواب دقیق یا همان بهینه جهانی مساله دست پیدا می‌کند، و مجموعا در ۱۷ مورد از ۳۰ مورد اجرا به جوابی با اختلاف زیر ۱ درصد از جواب بهینه می‌رسد.



شکل ۳. شبکه شطرنجی ۱۰×۶ به همراه موقعیت خطوط همگانیِ کاندیدا در آن

جدول ۱. نتایج عملکرد الگوریتم در یک اجرا بر روی شبکه ۱۰×۶ شطرنجی

خط برگزیده	خطوط لیست انتظار: شاخص	خطوط لیست انتظار: خط	گره برگزیده	جواب فعلی: بودجه مورد نیاز (کیلومتر)	جواب فعلی: ترکیب خطوط همگانی	جواب فعلی: گرههای شبکه
[12]	311.6	10	[20]	0	-----	---
	445.2	12		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
[10]	1751.9	10	[1]	خیر		
	881.6	11		19.8	[12]	[20]
	1748.4	1		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
[9]	2035.5	11	[9]	خیر		
	2877.3	1		29.8	[12,10]	[20,1]
	2900.8	9		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
[1]	2786.6	11	[45]	خیر		
	4321.6	1		39.8	[12,10,9]	[20,1,9]
	4214.44	5		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
	2750.42	15		خیر		
[8]	3562.8	11	[38]	49.8	[12,10,9,1]	[20,1,9,45]
	5869.9	5		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
	3583.3	15		خیر		
	5913.4	8				
	3535.2	14				
[6]	4452	11	[46]	59.8	[12,10,9,1,8]	[20,1,9,45,38]
	7716.5	5		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
	4467.3	15		خیر		
	4403.63	14				
	7811.2	6				
[5]	5421.6	11	[4]	69.8	[12,10,9,1,8,6]	[20,1,9,45,38,46]
	9886.5	5		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
	5398.1	15		خیر		
	5400.7	14				
	9794.3	4				
[4]	6460.2	11	[52]	79.8	[12,10,9,1,8,6,5]	[20,1,9,45,38,46,4]
	6390.8	15		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
	6412.9	14		خیر		
	12116.9	4				
	12095.4	2				
[7]	7507.5	11	[57]	89.8	[12,10,9,1,8,6,5,4]	[20,1,9,45,38,46,4,52]
	7407.9	15		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
	7481.4	14		خیر		
	14562.1	2				
	7530.9	16				
	14709.1	7				
[3]	8694.6	11	[33]	99.8	[12,10,9,1,8,6,5,4,7]	[20,1,9,45,38,46, 4,52,57]
	8598.1	15		آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
	8683.9	14		خیر		
	17379.7	2				
	8663.14	16				
	17521.3	3				
				109,8		
				آیا بودجه موردنیاز از محدودیت بودجه بیشتر است؟		
				بله		

بودجه مورد نیاز (کیلومتر)	مقدار پوشش (وسیله بر ساعت)	ترکیب خطوط همگانی	گرههای شبکه	جواب مسئله
99.8	147091.4	[12,10,9,1,8,6,5,4,7]	[20,1,9,45,38,46, 4,52,57]	

جدول ۲: نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی

شماره ماتریس تقاضای سفر تصادفی	کل تقاضا در شبکه (سفر)	روش شمارش جوابهای غالب				الگوریتم پیشنهادی				اختلاف مقدار پوشش الگوریتم پیشنهادی تا جواب دقیق (درصد)
		ترکیب خطوط انتخاب شـــده	پوشش(سفر)	پوشش(درصد)	زمان اجـرا (ثانیه: دقیقه: ساعت)	ترکیب خطوط انتخاب شـــده	پوشش(سفر)	پوشش(درصد)	زمان اجـرا (ثانیه)	
۱	۳۳۳۰۱۸	[1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 15]	۱٤٥٦٥٥	٤۳.۷	٤:۲۷:۲٥	[15, 10, 6, 3, 4, 2, 8, 11]	۱۲٥۲۰۷	۳۷.٦	۲۱	٦.۱
۲	۳۳۷۹٥٤	[1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 15]	۱٥۰۰٤۱	٤٤.٤	۳:۳۰:۰۱	[11, 9, 3, 10, 1, 5, 6, 4, 2]	۱٤۹٥۹۸	٤٤.۳	۳۲	۰.۱
۳	۳۲٥۹۸۰	[1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11]	۱٤٤۸٤٤	٤٤.٤	٤:۲۲:۳۷	[11, 5, 3, 2, 7, 8, 9, 10, 4]	۱٤۳۹۱۷	٤٤.۱	۳۰	۰.۳
٤	۳۳٤۳٥۸	[1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11]	۱٤۸۰۳۷	٤٤.۳	٤:۲٦:۲۰	[16, 7, 10, 6, 9, 8, 1, 3, 2]	۱٤٦۷۱٥	٤۳.۹	۲۸	۰.٤
٥	۳۳٦۷۸٦	[1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11]	۱٤٥۳۱۲	٤٤.٥	٤:۲۱:۳٥	[13, 1, 3, 2, 6, 5, 10, 9, 8]	۱٤٤٥٤٦	٤٤.۲	۲٤	۰.۲
٦	۳۳٦۱۹۲	[1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 12]	۱٤۳۹۰۳	٤٤.۱	۳:۲۸:۲۸	[14, 3, 7, 2, 1, 4, 8, 9, 5]	۱٤۱۸۲۲	٤۳.٥	۳۸	۰.٦
۷	۳۳۳٦۱٦	[1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 13]	۱٤۷٦۷٥	٤٤.۳	۳:۲۷:۰۸	[13, 6, 2, 10, 7, 4, 9, 3, 1]	۱٤٦٥۰٥	٤۳.۹	۲٦	۰.٤
۸	۳۳٦۳٤۰	[1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12]	۱٤۹۱۰۷	٤٤.۳	۳:۲۸:۲٤	[14, 8, 1, 9, 12, 7, 2, 3]	۱۲۸۹٥۱	۳۸.۳	۲٤	٦.۰
۹	۳٤۳٤٤۸	[1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11]	۱٥۲۹۰۳	٤٤.٥	۳:۲٦:٥۱	[13, 1, 10, 3, 8, 5, 9, 4, 7]	۱٥۲۰۹۱	٤٤.۳	۲۸	۰.۲
۱۰	۳۳۹٥٦۸	[1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11]	۱٥۰۰۰٦	٤٤.۲	۳:۲۷:٤۲	[11, 4, 7, 8, 2, 1, 5, 10, 3]	۱٥۰۰۰٦	٤٤.۲	۳۱	۰.۰
۱۱	۳۳٤٤۰۰	[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14]	۱٤۹۳۳۰	٤٤.٦	۳:۲۹:۱٥	[13, 8, 10, 2, 6, 7, 3, 5, 4]	۱٤٦٥۹٥	٤۳.۸	٥۲	۰.۸
۱۲	۳۳۱۱۲۸	[1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 15]	۱٤۷۸۳۲	٤٤.٦	۳:۲٦:٥۷	[15, 8, 4, 6, 3, 7, 2, 11]	۱۲۸٦۷٥	۳۸.۹	۲٤	٥.۸
۱۳	۳۲۹٦۷۲	[1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12]	۱٤۷۲۷۸	٤٤.۷	۳:۲۷:۲۰	[11, 1, 4, 8, 9, 12, 10, 3]	۱۲۷٦۰۱	۳۸.۷	۱۸	٦.۰
۱٤	۳۲۷٤۹۲	[1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 13]	۱٤٥٥٥۰	٤٤.٤	۳:۲۹:٤۷	[13, 10, 2, 8, 7, 5, 1, 4, 3]	۱٤٥٥٥۰	٤٤.٤	۲۸	۰.۰
۱٥	۳۳٦۱۱۲	[1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12]	۱٤۹٤٦۱	٤٤.٥	٤:۲٤:۲۰	[15, 2, 4, 6, 1, 3, 12, 10]	۱۲۸۷۸۷	۳۸.۳	۲۱	٦.۲
۱٦	۳۳٤٦۳٤	[1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11]	۱٤۸۸۳٥	٤٤.٥	۳:۲۸:٥۰	[15, 10, 6, 2, 1, 5, 3, 12]	۱۲٥۹۰۰	۳۷.٦	۲۰	٦.۹
۱۷	۳۳۳٦۲٦	[1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 13]	۱٤۷۹۱۷	٤٤.۳	۳:۲۹:۳۱	[12, 10, 2, 1, 8, 3, 13, 9]	۱۲۷۰۷۳	۳۸.۱	۲٤	٦.۲
۱۸	۳۳۰٤۲۲	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11]	۱٤٦۸۰٥	٤٤.٤	٤:۲۲:۳٤	[11, 4, 7, 6, 3, 8, 1, 2, 10]	۱٤٥۳۳۹	٤٤.۰	۳۳	۰.٤
۱۹	۳۳٥۱۸۸	[2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 15]	۱٤۸٥٥۷	٤٤.۳	۳:۲٤:٥۲	[16, 8, 2, 9, 11, 7, 4, 10]	۱۲۸٦۹۷	۳۸.٤	۳٤	٥.۹
۲۰	۳۳٥۰۹٦	[2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 13]	۱٤۹۰۸٥	٤٤.٥	۳:۲۷:۱۲	[11, 6, 8, 2, 3, 1, 5, 9, 4]	۱٤٦۰۱۹	٤۳.٦	۲۹	۰.۹
۲۱	۳۳۳٤۳۲	[1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 16]	۱٤۷۸۳۳	٤٤.۳	٤:۲۲:۰۱	[14, 5, 10, 1, 4, 2, 13, 7]	۱۲٦۸۸۳	۳۸.۱	۲۰	٦.۳
۲۲	۳۳٥٤٥۸	[1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14]	۱٤٦۹٥٥	٤۳.۸	٤:۲٥:۳۲	[16, 10, 8, 5, 3, 1, 11, 6]	۱۲٦۷٦۳	۳۷.۸	۲۳	٦.۰
۲۳	۳۳۳۷٤۲	[2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 16]	۱٤٦٦٥٤	٤٤.۱	٤:۳۰:۳٤	[12, 7, 6, 4, 1, 9, 2, 10, 3]	۱٤٤٥۱۰	٤۳.٤	۳۹	۰.٦
۲٤	۳۳۱٥۹۸	[2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]	۱٤٥۸۳۷	٤٤.۰	٤:۲٥:٤۸	[16, 4, 9, 10, 1, 2, 3, 6, 8]	۱٤٥۱۳۷	٤۳.۸	۳٥	۰.۲
۲٥	۳۳۳۷٥٤	[2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 13]	۱٤۸۲۷٥	٤٤.٦	۳:۲۸:٥٦	[13, 8, 10, 4, 15, 7, 2, 9]	۱۲۸۸۰۷	۳۸.۷	۲۸	٥.۹
۲٦	۳۳۳۷۳۸	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15]	۱٤۸۳٥٤	٤٤.٥	٤:۲۲:۳٦	[15, 1, 2, 8, 10, 3, 5, 4, 9]	۱٤٦۷۱۷	٤٤.۰	۳۹	۰.٥
۲۷	۳۳۳۹٥۰	[1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 14]	۱٤۷۷۸٤	٤٤.۳	٤:٤۰:۳٤	[12, 5, 10, 3, 7, 4, 9, 14]	۱۲۸۲۱۲	۳۸.٤	۱۹	٥.۹
۲۸	۳۳٤۳۰۰	[1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13]	۱٤۸٥۸۸	٤٤.٤	٤:۳۳:٥۹	[15, 6, 1, 7, 4, 2, 10, 9, 5]	۱٤۸۲۳٦	٤٤.۳	۳٦	۰.۱
۲۹	۳۲٦٦٥٦	[1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13]	۱٤۳٥۷٤	٤٤.۰	٤:۲٥:۰٥	[11, 8, 6, 13, 9, 4, 2, 7]	۱۲۳٥۲٦	۳۷.۸	۲۰	٦.۱
۳۰	۳۳٥۷٥٤	[2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]	۱٤۹۱۹۱	٤٤.٤	٤:۳۳:۱۹	[12, 10, 9, 1, 8, 6, 5, 4, 7]	۱٤۷۰۹۱	٤۳.۸	۳۳	۰.٦
					متوسط ۳:٥۷:۱۱			متوسط ۲۹		متوسط ۲.۹

۵- نتیجه‌گیری

یکی از خلاهای موجود در مباحث طراحی شبکه خطوط همگانی، طراحی الگوریتم برای شبکه‌های خاص شهری، از جمله شبکه‌های شطرنجی است. مطالعه حاضر به پیشنهاد یک الگوریتم جدید اولویت‌بندی خطوط همگانی در شبکه‌های شهری شطرنجی به منظور طراحی شبکه خطوط همگانی پرداخت. الگوریتم معرفی‌شده، با هدف بیشینه‌سازی پوشش تقاضای سفر همگانی در شبکه، یک "شاخص تقاضا" تعریف کرده، به کمک آن، گره‌ها و خطوط همگانی گذرنده از آنها را انتخاب و به صورت حریصانه به ترکیب خطوط شبکه اضافه می‌کند. کاربرد الگوریتم ابتکاری پیشنهادی برای یک شبکه شطرنجی در ابعاد ۱۰×۶ و روی ۳۰ ماتریس تقاضای سفر تصادفی نشان داد که با استفاده از یک شاخص حاشیه‌ای پوشش تقاضا در سطح شبکه، الگوریتم می‌تواند در مدت‌زمانی زیر یک دقیقه (در مقایسه با زمان اجرای چندساعته روش شمارش جواب‌های غالب) به جواب‌هایی با کیفیت بالا (زیر ۳ درصد اختلاف) در مقایسه با جواب دقیق مساله دست پیدا کند. به منظور توسعه نتایج حاصل در این مطالعه، می‌تواند کاربرد الگوریتم پیشنهادی را در ابعاد بزرگتر و در مقایسه با سایر الگوریتم‌های ابتکاری در مطالعات آتی بررسی نمود. همچنین توسعه مدل به منظور درنظر گرفتن شبکه در شرایط چندوسیله‌ای می‌تواند جالب‌توجه باشد (Zarrinmehr et al., 2019). در نهایت، باید توجه داشت که اجرا و ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه برروی اطلاعات ۳۰ ماتریس تقاضای تصادفی (و نه واقعی) بوده است. کاربرد داده‌های واقعی مربوط به شبکه یا زیرشبکه‌های شطرنجی می‌تواند در ادامه مورد بررسی قرار گیرد.

٦- سپاسگزاری

نویسندگان مراتب سپاس خود را از داوران محترم فصل‌نامه پژوهشنامه حمل‌ونقل برای مطالعه دقیق مقاله و پیشنهادهای ارزنده ایشان ابراز می‌دارند.

۷-مراجع

-افندی زاده زرگری، ش. و افیونیان، م. ر.، (۱۳۸۲)، "طراحی شبکه خطوط حمل و نقل عمومی (اتوبوس‌رانی) با استفاده از تکنیک شاخه و کرانه"، امیرکبیر، ١٤، (د-٥٤)، ص.٥٨٩-٥٧٨.

- وطن‌خواه، ا. و قریب، ف.، (۱۳۸۸)، "بررسی اثرات کاربری زمین و توسعه شهری بر حمل و نقل سریع همگانی"، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۱(۳)، ص.٢٥٦-٢٤٩.

-امین زاده گوهرریزی، ب.، جبارزاده، آ.، رستگار، س.، و رحمانی، م.، (۱۳۹۸)، "بهینه سازی یکپارچه تخصیص تراکم و کاربری زمین و طراحی شبکه حمل ونقل عمومی- موردپژوهی: منطقه ۲۲ تهران"، مهندسی حمل و نقل، ۱۱ (۱)، ص.۱۹۹-۱۸۱.

-دزفولی نژاد، م.، رؤفی، ر.، و دالوند، ا. (۱۳۹۹)، "بررسی اثر تغییر در چگالی شبکه بر نحوه بهینه‌سازی تخصیص بودجه محدود بین پل‌ها جهت تاب آورسازی شبکه حمل و نقل"، مهندسی زیرساختهای حمل و نقل، ٦ (٤)، ص.٩٩-٨١.

-شفاهی، ی.، و عامری، م.، (۱۳۹٦)، "دو روش حل برای انتخاب و زمان بندی پروژه‌ها در مساله طراحی شبکه‌های حمل و نقل چنددوره یی، مهندسی عمران شریف، ۳۳ (۲)، ص.۱۱۸-۱۱۱.

-وزارت نیرو، (۱۳۹۷)، "ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی"، معاونت امور برق و انرژی.

-Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1991), "An AI-based approach for transit route system planning and design", Journal of advanced transportation, *25*(2), pp.187-209.

-Cacchiani, V., Iori, M., Locatelli, A., & Martello, S., (2022), "Knapsack problems-An overview of recent advances", Part II: Multiple, multidimensional, and quadratic knapsack problems, Computers & Operations Research, 143, in press, https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105693.

-Daganzo, C. F., (2010), "Structure of competitive transit networks", Transportation Research Part B: Methodological, 44(4), pp.434-446.

-Ul Abedin, Z., Busch, F., Wang, D. Z., Rau, A., & Du, B., (2018), "Comparison of public transport network design methodologies using solution-quality evaluation", Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 144(8), 04018036.

-Walker, J., (2020), "Why do so many public transport networks use grid systems?" https://www.citymetric.com/transport/why-do-so-many-public-transport-networks-use-grid-systems-955.

-Zarrinmehr, A., Aashtiani, H. Z., Nie, Y. M., Azizian, H., (2019), "Complementarity formulation and solution algorithm for auto-transit assignment problem", Transportation Research Record, 2673(4), pp.384-397

-Zarrinmehr, A., Saffarzadeh, M., & Seyedabrishami, S., (2018), "A local search algorithm for finding optimal transit routes configuration with elastic demand" International Transactions in Operational Research, 25(5), pp.1491-1514.

-Zarrinmehr, A., Saffarzadeh, M., Seyedabrishami, S., & Nie, Y. M., (2016), "A path-based greedy algorithm for multi-objective transit routes design with elastic demand", Public Transport, 8(2), pp.261-293.

-Zarrinmehr, A., & Shafahi, Y., (2014), "Enumeration of dominant solutions: an application in transport network design", International Journal of Transportation Engineering, 1(4), pp.335-348.

-Zarrinmehr, A., & Shafahi, Y., (2015), "Accelerating the performance of parallel depth-first-search branch-and-bound algorithm in transportation network design problem", International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES), Lisbon, Portugal, 10-12 January, pp.359-366.

-Zhao, F., (2006), "Large-scale transit network optimization by minimizing user cost and transfers", Journal of Public Transportation, 9(2), 6.

-Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M., (2009), "Transit route network design problem", Journal of transportation engineering, 135(8), pp.491-505.

-Khanzad, I., Zarrinmehr, A., Seyedabrishami, S., & Saffarzadeh, M., (2017), "Application of a route expansion algorithm for transit routes design in grid networks", International Journal of Transportation Engineering, 4(3), pp.179-196.

-Lee, Y. J., & Vuchic, V. R., (2005), "Transit network design with variable demand", Journal of Transportation Engineering, 131(1), pp.1-10.

-Li, W., Ding, Y., Yang, Y., Sherratt, R. S., Park, J. H., & Wang, J., (2020), "Parameterized algorithms of fundamental NP-hard problems: a survey", Human-Centric Computing and Information Sciences, 10(1), pp.1-24.

-Mauttone, A., Cancela, H., & Urquhart, M. E., (2021), "Public transportation, In Network Design with Applications to Transportation and Logistics, Springer, Cham., pp. 539-565.

-Miyagawa, M., (2018), "Spacing of intersections in hierarchical road networks", Journal of the Operations Research Society of Japan, 61(4), pp.272-280.

-Saif, M. A., Zefreh, M. M., & Torok, A., (2019), "Public transport accessibility: a literature review", Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 47(1), pp.36-43.

-Seyedabrishami, S., Rahimi, A., & Zarrinmehr, A., (2017), "Planning the departure of vacant transit vehicles to the median stops in a single line", Transportation Research Procedia, 25, pp.1317-1326.

-Stern, R., (1996), "Passenger transfer system review", 19, Transportation Research Board.

-Tang, L., & Xu, X., (2022), "Optimization for operation scheme of express and local trains in suburban rail transit lines based on station classification and bi-level programming. Journal of Rail Transport Planning & Management, 21, in press, https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100283.

Transit Routes Network Design by Greedy Prioritization of the Routes in Grid Networks

Amirali Zarrinmehr, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran.

Hanie Moloukzade, B.Sc., Student, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran.

E-mail: azarinmehr@umz.ac.ir

Received: February 2023- Accepted: April 2023

ABSTRACT

The problem of transit routes network design is one of the fundamental problems in moving towards sustainable urban development. This problem deals with finding the optimal configuration of transit routes so as to satisfy a specific objective while holding the budget constraint. Regarding that network design is a complex and exponential problem, achieving a solution close to the exact solution (global optimum) in large-scale calls for systematic methods such as heuristic/meta-heuristic algorithms. Such algorithms have been extensively devised in the related literature, though, less effort has been put to investigate various types of transportation network topologies with specific settings. This paper aims to design urban transit routes configuration in urban settings for "grid" networks in order to achieve the maximum coverage through the network within the budget level. To this end, this study proposes a novel heuristic-type algorithm dedicated to deal with grid-type networks. The proposed algorithm introduces a greedy index namely the "demand index" and exploits this index to make connections among the nodes with high levels of demand. In each iteration, the node with the highest demand index is selected and one of the candidate routes passing through that node is incorporated into the existing routes configuration. Comparing the results obtained from the proposed algorithm against the exact solutions in a 6×10 grid network over 30 random demand matrices suggests that the proposed algorithm is capable to hit near-optimal solutions within notably short run-times. According to the results, in comparison to the exact solution in almost 4 hours run-time, within only 29(±8) seconds of run-time, on average, the proposed algorithm can achieve solutions with 2.9% difference from global optimal solutions.

Keywords: Routes Network Design, Grid Network, Greedy Prioritization, Coverage