

طراحی شبکه تغذیه کننده خط ریلی و تعیین فرکانس با استفاده

از یک روش ابتکاری

مقاله پژوهشی

سارا احمدی نژاد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سید احسان سید ابریشمی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: seyedabrishami@modares.ac.ir

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۵ - پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۰

صفحه ۲۰۸-۱۹۹

چکیده

افزایش پوشش تقاضای سفر وسایل حمل و نقل همگانی سریع (مانند مترو و اتوبوس تندرو) به کمک شبکه های تغذیه کننده امکان پذیر است. از آنجایی که روش های دقیق حل مسائل طراحی شبکه های تغذیه کننده دارای پیچیدگی و زمان حل طولانی است، محققین به استفاده از روش های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسائل روی آورده اند. در این مقاله یک روش ابتکاری برای حل مسئله طراحی شبکه اتوبوسرانی تغذیه کننده در یک شبکه آزمایشی که قابلیت در نظر گرفتن بسیاری از شاخص های مهم در طراحی چنین شبکه هایی را دارد، پیشنهاد گردیده است. روش کار به این صورت است که ابتدا تعدادی مسیر اولیه تولید شده، سپس به کمک شاخص های بهینگی در نظر گرفته شده شامل نسبت تقاضای پاسخ داده شده به زمان سفر و محدودیت کمینه و بیشینه طول مسیر تعدادی از این مسیرها به عنوان خطوط تغذیه کننده انتخاب شده اند. محدودیت فرکانس، تعداد مسیر و درصد پوشش داده شده دیگر محدودیت هایی هستند که به کمک آنها مسیرهای نهایی انتخاب شده است. روش پیشنهادی در شبکه آزمایشی سو فالز بکار گرفته شده و توانسته پوشش تقاضای حمل و نقل همگانی در شبکه توسط خط ریلی را به کمک خطوط تغذیه کننده بهبود بخشد به طوری که با محدودیت تعداد ۳ مسیر تغذیه کننده، پوشش شبکه به مقدار ۶۵/۲۲٪ و با در نظر گرفتن محدودیت E، پوشش به میزان ۷۸/۴۲٪ برآورده شد.

واژه های کلیدی: ابتکاری، اتوبوسرانی، طراحی شبکه، تغذیه کننده، تعیین فرکانس

۱- مقدمه

حمل و نقل انبوه بر است. (Gholami, Mohaymani, 2012). از آنجا که گسترش این سرویس ها برای جذب تقاضای بیشتر به تمام مناطق از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست، بنابراین تقاضای کاربران موجود در مناطق حومه ای و کم تراکم تر را می توان با شیوه های کم ظرفیت تر مانند اتوبوس، مینی بوس و ون پوشش داد. از آنجا که یکی از هدف گذاری های مهم در طراحی شبکه های حمل و نقل همگانی افزایش سطح پوشش تقاضا است، بنابراین بایستی ناوگان موجود، ظرفیت خطوط، سرفاصله پاسخگویی آن باشد. در این مقاله به طراحی یک شبکه تغذیه کننده بر اساس محدودیت های در نظر

با گسترش روزافزون شهرها و به تبع آن افزایش سفرهای شهری، استفاده از حمل و نقل همگانی به عنوان یک ضرورت در شهرهای بزرگ دیده شده و پژوهشگران تلاش می کنند تا شبکه حمل و نقل همگانی کارآمدتری در کلان شهرها ایجاد کنند. یکپارچگی شبکه حمل و نقل همگانی موجب دسترسی بهتر و ایجاد تمایل به استفاده بیشتر از وسایل حمل و نقل همگانی شده و منجر به کاهش هزینه ها از دیدگاه کاربر و گرداندگان وسایل حمل و نقل عمومی می گردد، که در نتیجه موجب کاهش حجم سفر با وسایل نقلیه شخصی می گردد. یکی از راه های افزایش سفر با حمل و نقل همگانی، استفاده از شبکه تغذیه کننده

آن به کمک دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و الگوریتم اجتماع مورچگان به طراحی و بررسی شبکه تغذیه‌کننده پرداختند. برای نشان دادن و مقایسه روش‌های فراابتکاری در نظر گرفته‌شده، چندین مسئله آزمایشی ساخته‌شده که برای ارزیابی عملکرد روش محاسبات و کیفیت جواب‌ها از آنها استفاده می‌شود. آنها به دنبال ارائه یک الگوریتم مناسب برای حل طراحی شبکه تغذیه‌کننده بودند (Kuan, Ong, 2006). شرایواستاوا و اوماهونی در مقاله خود برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده از الگوریتم ژنتیک و یک روش ابتکاری ثانویه استفاده کردند. آنها در این مقاله ابتدا مسیرهای شبکه تغذیه‌کننده را توسط الگوریتم ژنتیک طراحی کردند، سپس یک الگوریتم ابتکاری ویژه عمل می‌کند تا تقاضای ایستگاه‌ها پوشش داده شود. تابع هدف شامل کمینه کردن هزینه‌های زمان انتقال مابین خطوط ریلی حومه‌ای و خطوط اتوبوس، هزینه زمان سفر درون اتوبوس و هزینه‌های عملکردی ناوگان است. اهداف اصلی آن‌ها طراحی بهینه شبکه تغذیه‌کننده برای پاسخگویی به تقاضای موجود و با توجه به محدودیت زمان سفر و حداقل کردن زمان تغییر طریقه بین خطوط ریلی و خطوط شبکه تغذیه‌کننده به‌وسیله زمان‌بندی هماهنگ است (Shrivastva, O'Mahony, 2007). ورما و دهینگرا در سال ۲۰۰۶ به ارائه مدلی پرداختند که زمان‌بندی بهینه و یکپارچه را برای دو شبکه ریلی و تغذیه‌کننده اتوبوس فراهم می‌کند. مدل ارائه شده توسط آنها شامل دو بخش زمان‌بندی خط ریلی و یکپارچه‌سازی آن است. تابع هدف کمینه کردن مجموع هزینه‌های گردانندگان و زمان انتظار مسافران است و معادله آن شامل هزینه زمان انتظار و هزینه‌های عملکردی خط ریلی است (Verma, Dhingra, 2006). مهیمنی و غلامی در سال ۲۰۱۲ از چندین شیوه سفر با ظرفیت و عملکرد مختلف شامل تاکسی و اتوبوس برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده استفاده کردند. تابع هدف موردنظر آنها شامل کمینه کردن هزینه کاربر و اپراتور و هزینه‌های اجتماعی است (Gholami, Mohaymany, 2012). جن جیا لین و هوئی ونگ یک مدل طراحی مسیر تغذیه‌کننده ارائه کردند که شامل کوتاه کردن طول مسیر و به حداقل رساندن بیشترین زمان سفر برای مسیرهای طراحی‌شده بود. محدودیت‌های آنها شامل نحوه اتصال مسیر، حداقل و حداکثر زمان سفر، روابط میان طرح مسیر و محدوده متغیرها است. در این مدل با توجه عدم

گرفته‌شده، پرداخته‌شده است. طراحی مسیرها در دو مرحله صورت می‌گیرد: در مرحله اول تعدادی مسیر اولیه بر اساس محدودیت‌ها و شاخص‌های در نظر گرفته‌شده طراحی می‌شود و در مرحله بعد تعدادی از این مسیرها به‌عنوان مسیرهای نهایی بر اساس محدودیت امکانات در دسترس که شامل فرکانس و تعداد مسیر است انتخاب می‌شود. از آنجایی که استفاده از روش‌های قطعی و ریاضی در مسائل طراحی شبکه به دلیل معادلات پیچیده و تعداد مسیر زیاد ساده نیست، بنابراین در دوده اخیر به استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری توجه بیشتری شده است.

۲- پیشینه تحقیق

طراحی شبکه تغذیه‌کننده، اولین بار توسط کوآه و پرل در سال ۱۹۸۹ انجام شد آن‌ها در مقاله خود به ارائه روشی برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده برای خط ریلی و تعیین تواتر خطوط پرداختند. تابع هدف مقاله شامل کمینه‌کردن هزینه‌های مسافر و گردانندگان بوده است. مدل استفاده‌شده توسط این پژوهشگران یک فرمول ریاضی است که با استفاده از روش فراابتکاری حل شده است. آن‌ها مسئله طراحی شبکه تغذیه‌کننده اتوبوس را ابتدا برای الگوی تقاضای متعدد به یک مقصد، حل کردند سپس به حل مسئله در حالتی که تقاضا از مبادی مختلف به مقاصد مختلف وجود داشت، پرداختند (Kuah, Perl, 1989). مسئله مطرح‌شده توسط کوآه و پرل در سال ۱۹۸۹ توسط دو مقاله دیگر و با شیوه‌ای نوین حل شده است. مارتین و پاتو در ادامه کار کوآه و پرل به طراحی شبکه تغذیه‌کننده با سه روش ابتکاری پرداختند. روش‌های استفاده‌شده توسط آن‌ها شامل الگوریتم سازنده، جستجوی محلی و جستجوی ممنوعه است. در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش جستجوی ممنوعه نسبت به روش‌های دیگر برای حل مسائل شبکه بهتر است. مدلی که آن‌ها برای مقاله خود استفاده کردند همان مدل استفاده‌شده توسط کوآه و پرل بود (Martins, Pato, 1998). شرایواستاوا و دهینگرا مدلی برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده در شهر بمبئی هندوستان ارائه کردند که از خط ریل حومه‌ای، تقاضا را به مقاصد برساند. آن‌ها دو هدف را دنبال می‌کنند، اول اینکه شبکه تغذیه‌کننده اتوبوس را طراحی کنند و دوم اینکه زمان‌بندی خطوط تغذیه‌کننده را با سرویس خط ریلی هماهنگ نمایند (Shrivastva, Dhingra, 2001). کوآن و اونگ مقاله‌ای ارائه کرده‌اند که در

پژوهشگران به دنبال کاهش هزینه‌های گردانندگان و مسافران سیستم برای طراحی شبکه بودند. در اغلب مطالعات طراحی شبکه تغذیه‌کننده، مسیر و فرکانس به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده‌اند. با بررسی مطالعات پیشین هدف از این پژوهش ارائه روشی برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده و در نظر گرفتن جابه‌جایی مسافرانی با مقصدی غیر از خطوط انبوه‌بر است که محدودیت تعداد ناوگان و تعداد مسیر نیز در آن لحاظ شده است.

۳- شرح مسئله

همزمانی استفاده از طریقه‌های مختلف در شبکه، علاوه بر بهبود عملکرد سیستم حمل و نقل، موجب افزایش مطلوبیت و انعطاف‌پذیری بیشتر می‌شود. متدولوژی بکار برده شده در این مقاله به این صورت است که بر اساس مسیرهای امکان‌پذیر و از پیش تولید شده (و نه کمان‌های شبکه که در مدل‌های موجود مرسوم است)، طراحی شبکه خطوط اتوبوس تغذیه‌کننده صورت گرفته است. مسئله طراحی شبکه حمل و نقل در نمونه‌های واقعی دارای ابعاد بسیار بزرگ با پیچیدگی زیاد است، بنابراین از فرض‌های ساده‌کننده با کمترین انحراف از واقعیت، برای کاهش پیچیدگی‌های مسئله استفاده شده است.

فرض‌های مطرح شده برای حل این مسئله عبارتند از:

۱. شبکه انبوه‌بر مشخص و ثابت است.
 ۲. مختصات و تقاضای ساعتی مسافران در هر زوج مبدأ-مقصد مشخص است.
 ۳. زمان سفر بین تمامی مبدأ-مقصدها به‌عنوان ورودی محسوب شده است و اثراتی مانند تراکم در کمان‌ها در نظر گرفته نخواهد شد.
 ۴. هر گره تنها توسط یک مسیر خدمت‌رسانی می‌شود.
 ۵. حداکثر طول مسیر اتوبوس، ظرفیت حمل و نقل همگانی در دوره زمانی برنامه‌ریزی داده مشخص است. لازم به یادآوری است که زمان انتظار مسافران در ایستگاه، برابر نصف سرفاصله خط سرویس‌دهنده آن ایستگاه است.
- به‌این ترتیب در شبکه فرض شده، کلیه مسیرهای ممکن بر مبنای شبکه موجود طوری ساخته می‌شوند که شرایط زیر را داشته باشند.
۱. یک طرف آن‌ها به گره‌های اصلی روی خط انبوه بر متصل شود.

قطعیت پارامترها از اعداد فازی استفاده و مدل به‌عنوان یک مسئله چندهدفه توسعه داده شد. نمونه موردی شامل یک نمونه در شهر تایوان است. نتایج حاصل از استفاده مدل شامل ارائه مسیرهای بهتر با پوشش و خدمت‌رسانی بیشتر و کاهش حداکثر زمان سفر مسیر با توجه به مسیرهای موجود است (Jen-Jia Lin & Huei-In Wong, 2012).

در مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی که توسط شولیانگ پن و همکاران ارائه گردید به طراحی همزمان بهینه‌سازی منطقه تحت پوشش و برنامه‌ریزی مسیر حمل و نقل با توجه به اندازه ناوگان و زمان سفر بین گره‌های تقاضا پرداخته شد. مدل پیشنهادی دارای دو سطح است که سطح بالا برای حداکثر کردن تعداد مسافران پوشش داده شده و سطح پایین به‌منظور حداقل کردن هزینه عملیاتی اپراتورهاست. در این مقاله یک رویکرد اکتشافی برای ارایه راه‌حل‌های قابل قبول برای مدل در زمان معقول ارائه گردیده است (Pan et al., 2014). ژیلین لو و همکاران برای بهبود دسترسی به سیستم حمل و نقل در مناطق شهری، یک مدل مسیریابی انعطاف‌پذیر ارایه کردند که می‌تواند روی شبکه‌های نامنظم به‌کار گرفته شود. با تلفیق بهره‌وری هزینه سیستم حمل و نقل مسیرهای ثابت و انعطاف‌پذیری تقاضای پوشش داده شده مدل پیشنهادی اجازه می‌دهد تا اتوبوس‌های تغذیه‌کننده به‌طور موقت برای پوشش دادن تقاضای ایجاد شده در مسیرهای دیگر از مسیر فعلی خود خارج شود. هنگامی که چندین اتوبوس تغذیه‌کننده در منطقه در نظر گرفته شده خدمت‌رسانی می‌کنند، مدل پیشنهادی می‌تواند یک طرح بهینه برای یافتن نزدیک‌ترین اتوبوس برای پاسخگویی به تقاضای ایجاد شده ارائه دهد. یک الگوریتم راه‌حل سه مرحله‌ای برای ایجاد راه‌حل‌های بهینه‌ی فراگیر برای حل مسئله در یک‌زمان منطقی به‌وسیله تبدیل مسئله به یک مسئله فروشنده دوره‌گرد ایجاد شده است (Lu et al., 2015). تحقیقات متعددی در رابطه با طراحی یک شبکه تغذیه‌کننده صورت گرفته است و از آنجاکه کار کمتری در زمینه طراحی شبکه تغذیه‌کننده نسبت به شبکه حمل و نقل صورت گرفته است، نیاز به بررسی‌های بیشتر وجود دارد. روش‌های ابتکاری، فراابتکاری و ریاضی مختلفی برای حل بهینه طراحی شبکه به‌کار می‌رود. الگوی تقاضایی که در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته وجود دارد به‌صورت چند مبدأ به یک مقصد است و مقصد مسافران به خط انبوه‌بر محدود شده است. بیشتر

۲. در محدودیت کمینه و بیشینه مجاز زمان سفر مسیر صدق کنند.

۴- روش حل

گام بعدی در طراحی شبکه، انتخاب روش حل مناسب برای طراحی مسیرهای تغذیه‌کننده بهینه با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در زمان معقول است. در این مقاله از یک روش ابتکاری برای حل مسئله کمک گرفته شده است. روش در نظر گرفته شده در این تحقیق از دو مرحله تشکیل شده است. ابتدا در مرحله اول به انتخاب مبادی بر اساس حداکثر تقاضا به خط اصلی پرداخته، سپس نزدیک‌ترین ایستگاه روی خط اصلی به عنوان مقصد انتخاب شده است. به کمک الگوریتم k -امین کوتاه‌ترین مسیر تعدادی مسیر تولید می‌شود که در محدودیت‌های مورد نظر مانند: حداقل و حداکثر طول مسیر، مستقیم بودن مسیر و غیره صدق کرده است. از بین مسیرهای تولید شده مسیر با حداکثر شاخص بهینگی انتخاب و در مجموعه‌ای ذخیره شده است. در این مطالعه شاخص بهینگی برابر با مقدار تقاضای مستقیم پوشش داده شده توسط مسیر (مجموع مقدار تقاضای تمام جفت گره‌های موجود در مسیر به یکدیگر و به خط انبوه‌بر) بر زمان سفر آزاد مسیر انتخاب شده است. گردانندگان سیستم به دنبال حداکثر پوشش تقاضا و کمینه کردن هزینه‌های عملکردی هستند، هر چه تعداد مسافران پوشش داده شده بیشتر شود، منفعت این افراد نیز بیشتر می‌شود. منفعت مسافران نیز در حداقل بودن زمان سفر است. بنابراین با حداکثر شدن شاخص در نظر گرفته شده در واقع یک توازن میان خواسته گردانندگان سیستم و مسافران بوجود می‌آید. مسیری که بیشترین مقدار را برای این شاخص داشته باشد و محدودیت‌های مورد نظر را برآورده کند به عنوان مسیر مطلوب از آن مبدأ انتخاب می‌شود. این شاخص به صورت زیر است:

$$Z = \frac{d(r)}{t(r)} \quad r \in R \quad (1)$$

که در آن:

R : مجموعه‌ی مسیرهای انتخابی

$d(r)$: مجموع تقاضای پوشش داده شده مستقیم توسط

مسیر $r (r \in R)$

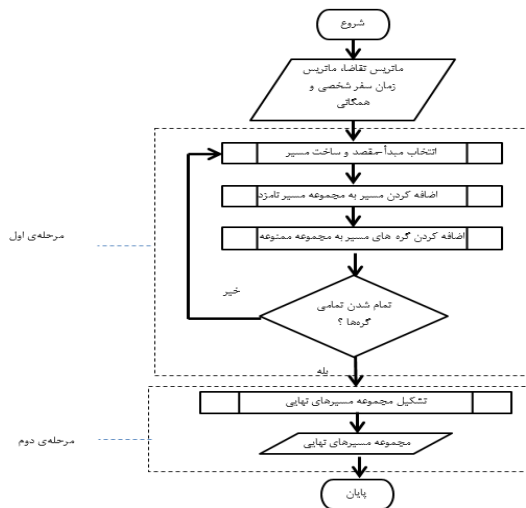
$t(r)$: زمان سفر آزاد مسیر $r (r \in R)$

فرآیند انتخاب گره برای ایجاد مسیر و انتخاب بهترین مسیر تا اتمام تمامی گره‌ها ادامه یافته است. در مرحله دوم از بین مجموعه مسیرهای ایجاد شده در مرحله قبل، مسیرهایی که در محدودیت‌های مورد نظر مانند: حداکثر تعداد خط و حداکثر فرکانس صدق کرده‌اند، انتخاب و در نهایت به عنوان مسیرهای منتخب برای تشکیل شبکه‌ی حمل و نقل همگانی گزارش شده‌اند. در ادامه در شکل (۱) نمودار بدنه اصلی روش حل به صورت کلی نشان داده شده است.

برای محاسبه فرکانس مسیرهایی که در مرحله اول تولید شده بودند از تابع هدفی برای حداقل کردن زمان انتظار مسافران استفاده شده که به صورت ذیل است:

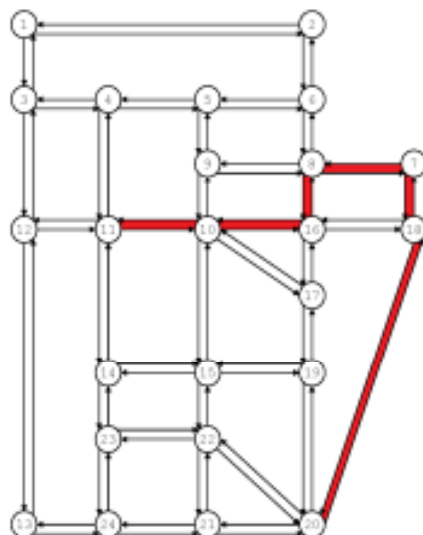
$$h(x) = \frac{1}{30} \sum_{k=0}^n \frac{1}{x} \times d_k \quad (2)$$

در این معادله متغیر X نشان‌دهنده فرکانس مسیر و d_k نشان‌دهنده تقاضای مسیر k است. اندیس k برابر با محدودیت تعداد مسیر است. حاصلضرب تقاضا در تابع بالا، بیان کننده آن است که به مسیرهای دارای تقاضای بیشتر، فرکانس بیشتری اختصاص یابد.



شکل ۱. نمودار جریان بدنه اصلی روش حل پیشنهادی

در این مقاله برای نمایش نتایج از شبکه سوزالز (شکل ۲) استفاده شده است. شبکه سوزالز دارای ۲۴ گره و ۷۶ کمان یکطرفه است. طراحی مسیر برای این شبکه با در دست داشتن داده‌های تقاضا و زمان سفر انجام شده است. در ابتدا یک مسیر فرضی به عنوان خط حمل و نقل همگانی سریع و انبوه بر مانند مترو روی این شبکه در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. شمای شبکه سوفالز و خط انبوه بر در نظر گرفته شده

۵- تحلیل و بررسی نتایج

در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین میزان زمان سفر، پوشش و شاخص بهیگی (نسبت تقاضا به زمان سفر) برای هر مسیر محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می شود مسیر شماره ۱ که گره های ۱۰، ۱۵، ۱۹ و ۱۷ را پوشش می دهد با بیشترین میزان پوشش تقاضای ۲۸۱۵ و کوتاه ترین زمان سفر، دارای بیشترین میزان شاخص بهیگی است. مسیر شماره ۳ اگرچه دارای زمان سفری برابر با مسیر ۱ است (کوتاه ترین زمان سفر) اما به دلیل پوشش تقاضای کمتر دارای میزان شاخص بهیگی کمتری است.

پس از بارگذاری اطلاعات در برنامه شامل: ماتریس تقاضا، لیست گره ها به همراه مشخصات مکانی آن ها و لیست کمان های شبکه به همراه اطلاعات زمان سفر، به ایجاد ۵ مسیر متفاوت که در شرایط در نظر گرفته شده مانند: حداقل و حداکثر طول، اتصال به ایستگاه مترو و غیره صدق کرده، پرداخته شد و از بین آن ها ترکیب سه تایی و چهارتایی ساخته و مسیرهای برتر آن به عنوان خطوط اتوبوس تغذیه کننده ارائه شده است. حداقل و حداکثر طول زمانی مسیر برابر ۱۵ و ۳۰ دقیقه فرض شدند. مسیرهای کلی بدست آمده در مرحله اول

جدول ۱. مشخصات خطوط تغذیه کننده بدست آمده در مرحله اول

شماره مسیر	شماره گره	زمان سفر	میزان پوشش	تقاضا به زمان سفر
۱	۱۰-۱۵-۱۹-۱۷	۲۲	۲۸۱۵	۱۲۷/۹۵
۲	۱۱-۱۴-۲۳-۲۲	۲۴	۱۷۴۰	۷۲/۵
۳	۸-۶-۵-۴	۲۲	۱۲۳۰	۵۵/۹۰
۴	۲۰-۲۱-۲۴-۱۳	۲۶	۱۱۱۵	۴۲/۸۸
۵	۱۱-۱۲-۳-۴	۲۸	۱۱۷۰	۴۱/۷۸

در مرحله بعدی با توجه به محدودیت تعداد مسیر و فرکانس، مسیرهایی از بین مسیره‌های اولیه انتخاب شده است. محدودیت برای تعداد مسیر، دو مقدار ۳ و ۴ و برای فرکانس مقدار ۲۵ و ۳۵ وسیله است. مسیره‌های تشکیل دهنده شبکه تغذیه‌کننده با در نظر گرفتن محدودیت ۳ مسیر و فرکانس بدست آمده برای هر مسیر در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج مسیره‌های تشکیل دهنده شبکه تغذیه‌کننده و فرکانس آنها در مرحله دوم برای محدودیت ۳ مسیر

محدودیت فرکانس=۲۵					
حداکثر تعداد مسیر=۳					
فرکانس	مسیر	ردیف	فرکانس	مسیر	ردیف
۱۱،۷،۷	۱،۴،۵	۶	۷،۸،۱۰	۳،۲،۱	۱
۹،۸،۸	۲،۳،۴	۷	۱۰،۸،۷	۱،۲،۴	۲
۹،۸،۸	۲،۳،۵	۸	۱۰،۸،۷	۱،۲،۵	۳
۱۰،۸،۸	۲،۴،۵	۹	۶،۱۱،۷	۱،۳،۴	۴
۹،۸،۸	۳،۴،۵	۱۰	۱۱،۷،۷	۱،۳،۵	۵
محدودیت فرکانس=۳۵					
حداکثر تعداد مسیر=۳					
۱۰،۱۰،۱۲	۲،۳،۴	۷	۸،۱۲،۱۴	۱،۲،۴	۲
۱۰،۱۰،۱۲	۲،۳،۵	۸	۸،۱۲،۱۴	۱،۲،۵	۳
۱۰،۱۰،۱۳	۲،۴،۵	۹	۷،۱۱،۱۵	۱،۳،۴	۴
۱۱،۱۱،۱۳	۳،۴،۵	۱۰	۸،۱۱،۱۵	۱،۳،۵	۵

است. همچنین با در نظر گرفتن محدودیت فرکانس برابر با ۳۵ و وسیله بر ساعت، بر تعداد فرکانس مسیره‌ها اضافه می‌گردد و بیشترین افزایش فرکانس برای مسیری با تقاضای بیشتر است. نتایج حاصل از افزایش تعداد مسیره‌های تشکیل دهنده شبکه به ۴ مسیر در جدول ۳ ارائه شده است.

با در نظر گرفتن محدودیت حداکثر ۳ مسیر، ده ترکیب مختلف سه‌تایی از ۵ مسیر تولید شده در ابتدا به وجود آمده است. مسیر ۱ که دارای بیشترین تقاضای پوشش داده شده است در تمامی حالات بیشترین فرکانس را به خود اختصاص داده است. بیشترین ناوگان برای مسیر ۱ در حالت حداکثر فرکانس برابر با ۲۵ زمانی اتفاق می‌افتد که همراه با مسیره‌هایی با تقاضای کمتر

جدول ۳. نتایج مسیره‌های تشکیل دهنده شبکه تغذیه‌کننده و فرکانس آنها در مرحله دوم برای محدودیت ۴ مسیر

محدودیت فرکانس=۲۵					
حداکثر تعداد مسیر=۴					
فرکانس	مسیر	ردیف	فرکانس	مسیر	ردیف
۵،۵،۶،۹	۱،۳،۴،۵	۴	۵،۵،۶،۸	۱،۲،۳،۴	۱
۶،۶،۶،۷	۲،۳،۴،۵	۵	۵،۵،۶،۸	۱،۲،۳،۵	۲
			۵،۵،۶،۸	۱،۲،۴،۵	۳

ادامه جدول ۳. نتایج مسیرهای تشکیل دهنده شبکه تغذیه کننده و فرکانس آنها در مرحله دوم برای محدودیت ۴ مسیر

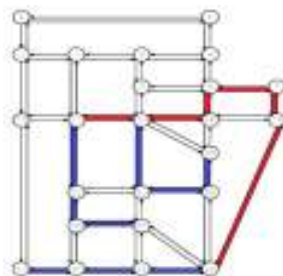
محدودیت فرکانس = ۳۵					
حداکثر تعداد مسیر = ۴					
فرکانس	مسیر	ردیف	فرکانس	مسیر	ردیف
۸,۷۸,۱۲	۱,۳,۴,۵	۴	۷,۷,۹,۱۲	۱,۲,۳,۴	۱
۷,۸,۹,۱۰	۲,۳,۴,۵	۵	۷,۷,۹,۱۲	۱,۲,۳,۵	۲
			۷,۷,۹,۱۲	۱,۲,۴,۵	۳

بین مسیرهای ترکیبی به دست آمده در نهایت برای هر محدودیت مسیر، آن ترکیبی که بیشترین پوشش در شبکه را ایجاد کرده، انتخاب شده است. نتایج حاصل از مسیرهای تشکیل دهنده شبکه نهایی در حالت ۳ و ۴ مسیر در جدول ۴ گزارش شده است.

نتایج نشان دهنده آن است که مسیرهایی با تقاضای بیشتر، فرکانس بیشتری را به خود اختصاص داده اند، این امر به دلیل تابع فرکانس که شامل حداقل کردن زمان انتظار است، اتفاق افتاده است. هر چه تعداد مسیرها بیشتر شود میزان پوشش شبکه بیشتر و هر مسیر نسبت به حالتی که شبکه دارای مسیرهای کمتری است، دارای فرکانس کمتری شده است.

جدول ۴. درصد پوشش ترکیب مسیرهای تشکیل دهنده شبکه تغذیه کننده

درصد پوشش	مسیرهای انتخابی	تعداد محدودیت مسیر
۶۳/۲۸	۱,۲,۳	۳
۶۵/۲۲	۱,۲,۴	
۶۲/۰۶	۱,۲,۵	
۵۴/۲۴	۱,۳,۴	
۵۴/۰۲	۱,۳,۵	
۵۳/۱۳	۱,۴,۵	
۵۱/۲۴	۲,۳,۴	
۴۹/۴۱	۲,۳,۵	
۵۱/۱۹	۲,۴,۵	
۴۳/۱۵	۳,۴,۵	
۷۸/۴۲	۱,۲,۳,۴	۴
۷۵/۹۸	۱,۲,۳,۵	
۷۷/۹۸	۱,۲,۴,۵	
۶۶/۶۱	۱,۳,۴,۵	
۶۴/۰۵	۲,۳,۴,۵	



شکل ۳. مسیرهای پیشنهادی برای حالت ۳ مسیر

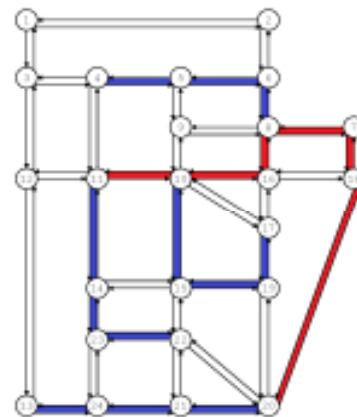
شکل ۳ و جدول ۵ نتایج شبکه طراحی شده برای این حالت را نشان داده اند.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می شود از بین ترکیب سه تایی برای انتخاب مسیر، مسیرهای شماره ۱، ۲ و ۴ دارای بیشترین پوشش شبکه با مقدار $65/22\%$ انتخاب شده است. اگرچه بر اساس جدول ۱ مسیر شماره ۳ دارای تقاضای مستقیم بیشتری است، اما با اضافه شدن مسیر شماره ۴ به مسیرهای ۱ و ۲ گره هایی که در مسیرهای تغذیه کننده به یکدیگر متصل می شوند که تقاضای بیشتری را پوشش می دهند و به همین دلیل شبکه شامل این مسیرها دارای درصد پوشش بیشتری شده است.

جدول ۵. نتایج مسیرهای پیشنهادی برای محدودیت ۳ مسیر

شماره مسیر	شماره گره	زمان (دقیقه)	ناوگان (محدودیت فرکانس)
۱	۱۰-۱۵-۱۹-۱۷	۲۲	۸(۲۵)، ۱۲(۳۵)
۲	۱۱-۱۴-۲۳-۲۲	۲۴	۷(۲۵)، ۱۰(۳۵)
۴	۲۰-۲۱-۲۴-۱۳	۲۶	۵(۲۵)، ۸(۳۵)

نتایج مسیرهای پیشنهادی برای محدودیت ۴ مسیر و برای تمامی مسیرها در جدول ۶ نشان داده شده است. از بین ترکیب چهارتایی برای انتخاب مسیر، مسیرهای شماره ۱، ۲، ۳، ۴ دارای بیشترین پوشش شبکه با مقدار $78/42\%$ انتخاب شده است. شکل ۴ نتایج شبکه طراحی شده برای این حالت را نشان داده است. در این حالت مشاهده شد مسیرهای ۱، ۲، ۴ که در ترکیب سه تایی انتخاب شده بودند، ثابت هستند و مسیری که دارای پوشش بیشتری در مسیر خود و در کل شبکه است به آنها اضافه شده است.



شکل ۴. مسیرهای پیشنهادی برای حالت ۴ مسیر

جدول ۶. نتایج مسیرهای پیشنهادی برای محدودیت ۴ مسیر

شماره مسیر	شماره گره	زمان مسیر	فرکانس (محدودیت فرکانس)
۱	۱۰-۱۵-۱۹-۱۷	۲۲	۸(۲۵)، ۱۰(۳۰)
۲	۱۱-۱۴-۲۳-۲۲	۲۴	۶(۲۵)، ۸(۳۰)
۴	۲۰-۲۱-۲۴-۱۳	۲۶	۵(۲۵)، ۶(۳۰)
۳	۸-۶-۵-۴	۲۲	۵(۲۵)، ۶(۳۰)

۶- نتیجه گیری

خطوط حمل و نقل همگانی کمتر از مسائل طراحی شبکه معابر پرداخته شده است. یکی از مهمترین سیاستها در بهبود کارایی سیستمهای شهری، برنامه ریزی جهت افزایش استفاده از

مسائل طراحی شبکه در زمره سخت ترین مسائل برنامه ریزی ریاضی هستند که مدت هاست مورد توجه برنامه ریزان حمل و نقل قرار دارد. در این میان به مسئله طراحی شبکه

-Kuah, G. K., & Perl, J. (1989), "The feeder-bus network-design problem", *Journal of the Operational Research Society*, 40(8), pp.751-767.

-Lu, X., Yu, J., Yang, X., Pan, S., & Zou, N., (2016), "Flexible feeder transit route design to enhance service accessibility in urban area", *Journal of Advanced Transportation*, 50(4), pp.507-521.

-Martins, C. L., & Pato, M. V., (1998), "Search strategies for the feeder bus network design problem". *European Journal of Operational Research*, 106(2), pp.425-440.

-Shrivastav, P., & Dhingra, S. L., (2001), "Development of feeder routes for suburban railway stations using heuristic approach", *Journal of Transportation Engineering*, 127(4), pp.334-341.

-Kuan, S. N., Ong, H. L., & Ng, K. M. (2006), "Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization", *Advances in Engineering Software*, 37(6), pp.351-359.

- Shrivastava, P., & O'Mahony, M., (2007), "Design of feeder route network using combined genetic algorithm and Specialized repair heuristic", *Journal of public transportation*, 10(2), pp.7.

-Pan, S., Yu, J., Yang, X., Liu, Y., & Zou, N., (2014), "Designing a flexible feeder transit system serving irregularly shaped and gated communities: determining service area and feeder route planning", *Journal of Urban Planning and Development*, No.141 (3), 04014028.

-Verma, A., & Dhingra, S. L., (2006), "Developing integrated schedules for urban rail and feeder bus operation", *Journal of urban planning and development*, 132(3), pp.138-146.

حمل و نقل همگانی است. همانطور که سیستم‌های حمل و نقل سریع مانند مترو نقش مهمی در شبکه حمل و نقل شهری دارند، خطوط اتوبوس تغذیه‌کننده نیز نقش تکمیلی خوبی در جایگاه حمل و نقل شهری دارند. در این مقاله سعی شد با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای که شامل ساخت و انتخاب مسیر است به طراحی مسیرهای تغذیه‌کننده اتوبوسرانی در شبکه معابر شهری پرداخته شود. برای ساخت مسیرها در مرحله اول از انتخاب مسیرهای تولیدشده توسط الگوریتم k-امین کوتاه‌ترین مسیر با در نظرگیری شاخص بهینگی که تقاضای مستقیم به زمان سفر مسیر و محدودیت کمینه و بیشینه زمان سفر است استفاده و در مرحله دوم از میان مسیرهای ساخته‌شده در مرحله اول با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعداد مسیر و تعداد ناوگان (که در این مقاله به‌عنوان امکانات در دسترس تعبیر شده است) در کنار محدودیت حداکثر پوشش تقاضا مسیرهای نهایی انتخاب شدند. در نهایت با محدودیت تعداد مسیر ۳، پوشش شبکه به مقدار ۶۵/۲۲٪ و با در نظر گرفتن محدودیت ۴ برای تعداد مسیر پوشش شبکه به میزان ۷۸/۴۲٪ برآورده شد. با توجه ابعاد مختلف در برخورد با مسائل طراحی شبکه خطوط تغذیه‌کننده هنوز هم جای مطالعه و بررسی بیشتر وجود دارد. در این مطالعه طراحی خطوط براساس ماتریس تقاضای متقارن انجام می‌شود. پیشنهاد می‌شود برای مطالعات آتی طراحی در شرایطی صورت پذیرد که کمان‌ها به صورت دوجبهته نبوده و مسیر از مبدا به مقصد با مسیری که در جهت عکس وجود دارد مشابه نباشد. در این مطالعه فرض شد که تقاضای گره‌ها ثابت است، در حالی که در واقعیت با توجه به طریقه‌های متفاوت جهت رسیدن به مقصد، میزان تقاضا می‌تواند متفاوت باشد. مطالعات آتی می‌تواند بر روی طراحی خطوط تغذیه‌کننده با تقاضای انعطاف‌پذیر گره‌ها باشد.

۷- مراجع

-Gholami, A., Mohaymany, A. S., (2012), "Analogy of fixed route shared taxi (taxi khattee) and bus services under various demand density and economic conditions", *Journal of Advanced Transportation*, 46(2), pp.177-187.

The Design of Feeder Network Rail Line and Determine Frequency Using a Heuristic Method

Sara Ahmadinejad, M.Sc., Grad., Civil and Environment Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Seyes Ehsan Seyed Abrishami, Assistant Professor, Civil and Environment Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

E-mail: seyedabrishami@modares.ac.ir

Received: January 2020-Accepted: July 2020

ABSTRACT

The main role of feeder in urban networks is to increase the coverage of rapid public transportation systems such as subway and bus rapid transit. The high complexity of the exact methods of designing feeder networks motivates researchers to apply heuristic and meta-heuristic methods to find approximate solution of feeder network design. This paper presents an innovative approach to design of feeder network for a subway line using a two-stage heuristic method. The proposed method has been applied in Sioux Falls as a test network which is often used in transit network design. According to the proposed method, at the first stage, a number of primary routes are generated as initial solutions; then these routes are screened according to a set of parameters such as the ratio of the covered demand to travel time, maximum and minimum limit for feeder network length. At second stage, frequency restrictions, the number of routes and covered percentage have been used to select final routes. The proposed method was used in the test network Sioux Falls that improved the demand coverage for public transport system. The demand coverage with the limit of 3 and 4 lines for feeder network are equal to 65.22 and 78.42 percent, respectively.

Keywords: Network Design, Feeder, Heuristic, Bus