تحلیل تغییرات تقاضا و اثرات آن در طراحی شبکه تغذیه‌کننده چندطریقه‌ای

محمدمهدی طهوری نیا (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
افشین شریعت مهیمنی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: tahoorinia@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۹۱/۰۸/۲۰ پذیرش: ۹۲/۰۶/۰۴

چکیده:

یکی از راههای افزایش تمایل به استفاده از حمل و نقل همگانی، هماهنگی بیشتر بین طریقه‌های سرویس دهنده و یکپارچگی شبکه است. استفاده از طریقه‌های انبوه‌بر، زمانی توجیه پذیر است که تقاضای مناسب آنها به نحو مقتضی با استفاده از شبکه‌های پایین دست، مانند شبکه تغذیه کننده، تامین شود. در این مقاله، اثر تغییرات تقاضا برروی پارامترهای طراحی در شبکه حمل و نقل همگانی تغذیه‌کننده بررسی می‌شود. با توجه به پیچیدگی ذاتی طراحی شبکه، بویژه طراحی تغذیه کننده ها و ناتوانی روشهای ریاضی در همگرایی و رسیدن به جواب در فضای چندبعدی مسئله، از یک روش فراابتکاری، الگوریتم اجتماع مورچگان، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش تقاضا در نواحی حومه‌ای برای پارامترهای طراحی سیستم نسبت به مناطق مرکز شهر تأثیر بیشتری می گذارد و سبب افزایش هزینه های کلی سیستم بعلت طول بیشتر خطوط خواهد شد. بواسطه خدمت رسانی همزمان طریقه‌ها در شبکه و تخصیص تقاضا، ایجاد خدمات نیم دور امکان‌پذیر می شود به طوری که تواتر شناور خطوط، سبب کاهش هزینه های استفاده کننده و بهره بردار و افزایش مطلوبیت سرویس می‌شود. در مطالعه موردی انجام شده در این مقاله، کاهش تقاضای نواحی دور و نزدیک خط ریلی باعث می‌شود تعداد خطوط ۷٪، تواتر بهینه ۲۰٪، مجموع طول خطوط شبکه ۲٪ رشد و سرفاصله‌ی آنها نسبت به حالت مبنا بطور متوسط ۲۱٪ کاهش داشته باشد.

واژه های کلیدی: طراحی شبکه، تقاضا، بهینه‌سازی، هزینه شبکه، تغذیه‌کننده‌چندطریقه‌ای

۱. مقدمه

با توجه به رشد شهرها و افزایش تمایل به سفر، فعالیت بیشتری از سوی پژوهشگران برای طراحی شبکه همگانی دیده می‌شود. یکپارچگی شبکه حمل و نقل، علاوه بر اینکه دسترسی و خواست بیشتری را برای استفاده به وجود می آورد، منجر به کاهش هزینه‌ها از دیدگاه کاربر و بهره بردار نیز شده و حجم سفر با طریقه‌های خصوصی را کاهش می‌دهد. یکی از راههای افزایش سفر با ناوگان همگانی، استفاده از شبکه تغذیه‌کننده حمل و نقل انبوه است. خدمت رسانی طریقه‌های انبوه بر، زمانی توجیه اقتصادی دارند که تقاضای مرتبط با آنها در مسیر وجود داشته باشد (حداقل ۲۰۰۰۰ مسافر در هر ساعت، در هر جهت). از آنجا که گسترش این سرویس‌ها برای جذب تقاضای بیشتر به تمام مناطق اقتصادی بصرفه نیست، به این علت مسافر موجود در مناطق حومه‌ای و کم تراکم‌تر را می‌توان با طریقه‌های کم ظرفیت‌تر مانند اتوبوس، مینی‌بوس، جیتنی[۱] و ون پوشش داد. علاوه‌براین با اتصال مناسب شبکه‌های پایین دست با خطوط انبوه بوسیله همزمانی رسیدنها در نقاط تغییرطریقه[۲] و زمان بندی مناسب اعزام ناوگان، یکپارچگی شبکه‌افزایش یافته و امکان دسترسی تمام مناطق به سرویس چندطریقه‌ای پیوسته فراهم می‌شود. ازآنجا که یکی از هدف‌گذاریهای مهم در طراحی شبکه‌های حمل و نقل همگانی افزایش سطح پوشش تقاضا است، بنابراین بایستی ناوگان موجود، ظرفیت خطوط، سرفاصله و سرعت عملیاتی، پاسخگوی آن باشد. به عبارت دیگر، تغییرات الگوی تقاضا در روزهای یک هفته و ماههای یک سال و از سالی به سال دیگر متفاوت بوده و به همین دلیل شبکه طراحی شده باید از انعطاف پذیری مناسبی برخوردار بوده و به صورت بهینه به تغییرات، واکنش نشان دهد.

در این مقاله، تحلیل تغییرات تقاضا و اثرات آن در طراحی شبکه تغذیه‌کننده بررسی می‌شود. متدولوژی طراحی شبکه براساس خدمت رسانی طریقه‌های مختلف است. ابتدا شبکه تغذیه‌کننده با رویکرد خدمت رسانی همزمان چند طریقه طراحی می‌شود، سپس با استفاده از سناریوهایی که براساس تغییرات تقاضا در مناطق مختلف ناحیه تحت مطالعه ایجاد شده‌اند، بازطراحی شده و نتایج حاصل از آن تحلیل می‌گردد. ازآنجا که روشهای قطعی و ریاضی در مسائل طراحی شبکه به دلیل حجم زیاد ورودیها، معادلات پیچیده و فراوانی متغیرها، ناتوان نشان داده می‌شوند، بنابراین در دو دهه اخیر رویکرد بیشتری به استفاده از روشهای ابتکاری[۳] و فراابتکاری[۴] دیده می‌شود. یکی از الگوریتمهای بسیار مناسب برای حل مسائل طراحی شبکه، الگوریتم اجتماع مورچگان[۵] ACO است. در این مقاله با استفاده از این الگوریتم و عملکرد فرمون[۶] گذاری المانهای شبکه، طراحی چندطریقه‌ای به صورت بهینه انجام می‌پذیرد.

۲. مروری بر ادبیات گذشته

طراحی شبکه تغذیه‌کننده، اولین بار توسط کوآه و پرل در سال ۱۹۸۹ [Kuan and Perl, 1989] مدل شد. آنها در مقاله خود به ارایه روشی ریاضی برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده خط ریلی و تعیین تواتر خطوط پرداخته‌اند. هدف مقاله کمینه کردن هزینه‌های مسافر و بهره‌بردار بوده است. مدل استفاده شده توسط این پژوهشگران یک فرمول ریاضی با محدودیتهای خطی مطابق معادله (۱) است که با استفاده از روش فراابتکاری حل شده است. مسئله طراحی شبکه تغذیه کننده اتوبوس [۷] ابتدا برای الگوی تقاضای متعدد به یکی[۸]، فرمول بندی ریاضی شده سپس به طور کلی فرمول بندی متعدد به متعدد[۹]، بررسی می شود.

(۱)

$$
\begin{aligned}
Minimize\ Z(X,Y,F) = & \sum_{J=j+1}^{j+s} C_{js} \sum_{i=1}^{I} Q_i Y_{ij} \\
& + 2\lambda_o \left[\sum_{k=1}^{K} F_k \sum_{i=1}^{I} \sum_{h=1}^{I+S} L_{ih} X_{ihk} \right] \\
& + \frac{\lambda_r}{2U} \sum_{k=1}^{K} \left(\sum_{i=1}^{I} \sum_{h=1}^{I+S} L_{ih} X_{ihk} \right) \left(\overline{Q} + \sum_{i=1}^{I} \sum_{h=1}^{I+S} Q_i X_{ihk} \right) \\
& + \lambda_w \left[\sum_{k=1}^{K} \frac{1}{2F_k} \sum_{i=1}^{I} \sum_{h=1}^{I+S} Q_i X_{ihk} \right]
\end{aligned}
$$

در معادله فوق Q_i بیان کننده تقاضای ساعتی سرویس در ایستگاه i، L_{ih} : طول مسیر شبکه از نقطه i تا h، F_k : تواتر خطوط k، U: متوسط سرعت عملیاتی اتوبوس، X_{ihk} و Y_{ij} متغیرهای وقوع شبکه بین نقاط i و j و برای خط k، λ_o: هزینه واحد بهره بردار، λ_r: هزینه واحد زمان سواری و λ_w هزینه واحد زمان انتظار.

مسئله مطرح شده توسط کوآه و پرل در سال (۱۹۸۹) توسط دو مقاله دیگر و با شیوه‌ای نوین حل شده است.

مارتین و پاتو [Martin and Pato, 1998] مسئله بیان شده در مورد شبکه تغذیه‌کننده را که کوآه و پرل در سال (۱۹۸۹) معرفی کرده‌اند، با سه روش ابتکاری حل نموده‌اند. روشهای استفاده شده شامل الگوریتم سازنده[۱۰]، جستجوی محلی[۱۱] و جستجوی ممنوعه[۱۲] است. آنها در مقاله خود به این نتیجه رسیده‌اند که روش جستجوی ممنوعه یکی از روشهای ابتکاری مفید در زمینه حل مسائل شبکه تغذیه کننده بوده و از طریق آن می توان به نتایج بهتری نسبت به روشهای دیگر رسید. مدل استفاده شده توسط آنها همان مدل ارایه شده در مقاله کوآه و پرل (۱۹۸۹) است

کوآن و اونگ [Kuan and Ong, 2006] مقاله‌ای ارایه کرده‌اند که در آن طراحی و آنالیز دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک[۱۳] و الگوریتم اجتماع مورچگان برای حل شبکه تغذیه‌کننده معرفی می‌شود. برای نشان دادن عملکرد روشهای فراابتکاری، چندین مسئله آزمایشی ساخته شده که برای ارزیابی کارآمدی محاسبات و کیفیت جوابها از آنها استفاده می‌شود. مولفین در این مقاله به دنبال الگوریتم مناسب تری برای حل (FBNDP) هستند.

شریواستاوا و دهینگرا [Shrivastava and Dhingra, 2001] مدلی را برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده در شهر بمبئی هندوستان ارایه کرده‌اند که از خط ریل حومه‌ای، تقاضا را به مقاصد برساند. آنها دو هدف را دنبال می کنند؛ اول اینکه شبکه تغذیه‌کننده اتوبوس را طراحی کنند و دوم اینکه زمانبندی خطوط تغذیه‌کننده را با سرویس خط ریلی هماهنگ نمایند.

شریواستاوا و اوماهونی [Shrivastava and O'Mahony, 2007] در مقاله خود طراحی شبکه تغذیه‌کننده با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و یک روش ابتکاری ثانویه را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله ابتدا مسیرهای شبکه تغذیه‌کننده توسط الگوریتم ژنتیک طراحی می‌شود، سپس یک الگوریتم ابتکاری ویژه عمل می‌کند تا تقاضای ایستگاهها پوشش داده شود. اهداف اصلی، طراحی بهینه شبکه تغذیه‌کننده برای پاسخگویی به تقاضای موجود و با توجه به محدودیت زمان سفر و حداقل کردن زمان تغییر طریقه بین خط ریلی و خطوط شبکه‌ی تغذیه‌کننده به وسیله زمانبندی هماهنگ است. تابع هدف شامل کمینه کردن (هزینه‌های زمان انتقال مابین خط ریل حومه‌ای و خطوط اتوبوس+ هزینه‌ی زمان سفر درون اتوبوس+ هزینه‌های عملکردی ناوگان) است.

ورما و دهینگرا (۲۰۰۶) [Verma and Dhingra, 2006] مدلی ارایه کرده‌اند که زمان بندی بهینه و یکپارچه را برای دو شبکه ریلی و تغذیه‌کننده اتوبوس فراهم می‌کند. مدل ارایه شده مطابق معادله (۲) شامل دو بخش زمان بندی خط ریلی و یکپارچه سازی آن است. تابع هدف مربوط به کمینه کردن مجموع هزینه‌های بهره‌بردار و زمان انتظار مسافران است.

(۲)

$$Minimize: \quad C1\left\{\sum_{all\ k\in SR}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} d_{ij}^{k} t_{wt\ ij}^{k}\right\}+C2\left\{\sum_{all\ k\in SR} f_k T_k\right\}$$

بخش اول معادله بیانگر هزینه زمان انتظار و بخش دوم مربوط به هزینه‌های عملکردی خط ریلی است. در این معادله t_{wt}^{k}، d_{ij}^{k}، f_{ij}^{k} و T_k به ترتیب مربوط به تقاضا، زمان انتظار، تواتر و زمان سفر سیستم هستند.

در زمینه طراحی شبکه تغذیه‌کننده چند طریقه‌ای، اولین کار توسط شریعت و غلامی [Shariat and Gholami, 2010]

ارایه شد. آنها مدلی برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده چندطریقه‌ای ارایه کرده‌اند، معادله(۳). تابع هدف مسئله بجهت کمینه کردن هزینه های مسافر، بهره بردار و اقتصادی-اجتماعی است. آنها برای حل مسئله از الگوریتم مورچگان استفاده کرده و برای نشان دادن نتایج، از مثال ارایه شده در مقاله کوآه و پرل (۱۹۸۹) [Kuah and Perl, 1989] بهره برده‌اند. اما با توجه به اینکه طراحی تغذیه‌کننده‌چندطریقه‌ای برای اولین بار توسط آنها ارایه شده، نتوانسته‌اند نتایج را با مقاله دیگری مقایسه کنند.

$$TSC_k^m = C_{w,k}^m + C_{r,k}^m + C_{o,k}^m + C_{s,k}^m + C_{f,k}^m + C_{m,k}^m \quad (۳)$$

که بخشهای آن به ترتیب مربوط به هزینه زمان انتظار مسافر، هزینه زمان سپری شده درون وسیله، هزینه عملیاتی ناوگان، هزینه‌های وارد بر اجتماع، هزینه تعمیر و نگهداری ناوگان و هزینه‌های ثابت سیستم است.

کارآیی مدهای تاکسی-ترانزیت با ظرفیت خودروهای ۴ نفره در مقایسه با اتوبوس در شبکه‌ی تغذیه‌کننده، در مطالعه غلامی و شریعت [Gholami and Shariat, 2012] بررسی شده است. در این مقاله شبکه تک طریقه اتوبوس با شبکه چندطریقه‌ای که با خودروی ۴ نفره و اتوبوس طراحی شده، مقایسه شده است. تابع هدف مسئله مشابه معادله(۳) است.

سووارد و همکاران [Suwardo et.al, 2010] تحلیل تقاضای حمل‌ونقل همگانی را برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت در مسیرهای ثابت بررسی کرده‌اند. آنها معتقدند زمانی که کیفیت سرویس اتوبوسرانی افزایش یابد، سرانه تقاضای استفاده کننده نیز افزون می شود. هدف اصلی مطالعه، آنالیز حساسیت تقاضای اتوبوس با توجه به تغییرات فاکتور جابجایی در شبکه است. نتایج نشان می‌دهند با توجه به شرایط موجود در مطالعه موردی انجام شده، تقاضا در سیستم فعلی اتوبوس برای برنامه ریزی کوتاه مدت به تغییرات کرایه، قیمت سوخت و سرفاصله حساس نبوده و تغییرات مهم در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت اتفاق خواهد افتاد. روش اصلی کار آنها استفاده از توابع نمایی مرتبط با آنالیز حساسیت قیمت و تقاضا و مشتقات مربوطه مطابق معادله (۴) است.

$$E = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP}\frac{P}{Q} \quad (۴)$$

که در آن P مربوط به هزینه و Q نشان‌دهنده تقاضای سیستم است.

تحلیل الاستیسیته تقاضا برای حمل و نقل همگانی درحالتی که اولویتهای سیستم مدنظر باشد، توسط لیو و همکاران [Liu et.al, 2012] انجام شده است. در این پژوهش ابتدا جزئیات مربوط به اولویت حمل و نقل همگانی بیان شده، سپس آنالیز تقاضا مرتبط با کرایه انجام می شود. همچنین در این مقاله الاستیسیته هزینه تردد برای تقاضای حمل و نقل همگانی، وسیله نقلیه شخصی و دوچرخه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که تقاضای حمل و نقل همگانی نیازمند تحلیل الاستیک هزینه‌ها است.

امیری پور و همکاران [Amiripour et.al, 2012] در مقاله خود طراحی شبکه حمل و نقل اتوبوس با رویکرد تغییرات فصلی تقاضا را انجام داده‌اند. آنها معتقدند در بسیاری از شهرهای جهان به علت تغییرات تقاضا در مناسبتهای مختلف، آنالیز حساسیت یکی از مهم ترین پارامترهای ورودی، تقاضا، در طراحی شبکه حمل و نقل همگانی اتوبوس درنظر گرفته نمی‌شود. روش حل آنها استفاده از الگوریتم ژنتیک و مثال موردی، شهر مشهد است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم ارایه شده زمان اجرای کوتاه تری نسبت به حل مدل با روشهای مرسوم دارد.

طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی تحت شرایط تقاضای متغیر با توجه به تقاضای کلی و ثابت در مطالعه‌ای توسط لی و ووچیک [Lee and Vuchic, 2005] انجام شده است. رویکرد اصلی مقاله ساخت شبکه حمل و نقل همگانی بهینه با هدف کمینه کردن زمان سفر درون وسیله با تکرار تفکیک ناوگان تا جایی که بهبودی

بیشتری حاصل نشود، بوده است. باتوجه به تغییرات تقاضا، روش تفکیک به مدل اصلی اضافه می‌شود تا ارتباط بین ورودی‌های بحرانی مسئله و طراحی بهینه شبکه مانند سرعت عملیاتی ناوگان، مجموع تقاضای کلی و جریمه‌ی ناشی از تغییر طریقه نیز در این مقاله بیان شود.

بررسی تغییرات تقاضا در خلال طراحی شبکه حمل و نقل همگانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقاله فن و ماچمهی [Fan and Machemehi, 2006] بررسی شده است. در این مقاله یک مدل غیرخطی عدد صحیح چندهدفی ساخته می‌شود تا مسئله طراحی شبکه حمل و نقل اتوبوس را بسازد. چهارچوب کلی ارایه شده برای حل مسئله شامل مسیرهای برگزیده اولیه برای ساخت، روش تحلیل مسئله شامل تخصیص تقاضا به سفرهای ناوگان، تعیین تواتر خطوط و محاسبه عملکرد سیستم و الگوریتم است که مکمل دو بخش بالا هستند. تحلیل پارامترهای موثر در طراحی و ساخت مسیرهای حمل‌و نقل‌همگانی مانند تأثیر اندازه مجموعه مسیرها، تراکم جمعیت و بازطراحی شبکه حمل و نقل موجود، در بخش تحلیل مطالب مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همان طور که در بخش مرور برادبیات گذشته دیده شد، طراحی شبکه تغذیه‌کننده، برای اولین بار در سال (۱۹۸۹) با استفاده از مدل ریاضی انجام شده است. بعد از آن پژوهشگران متعددی طراحی این نوع شبکه را از دیدگاه طراحی، زمان بندی بهینه و یکپارچگی همزمانی رسیدن طریقه‌ها در ایستگاههای تغییرطریقه پیگیری کرده اند. استفاده از طریقه‌های مختلف در خلال طراحی شبکه تغذیه‌کننده برای اولین بار در سال (۲۰۱۰) معرفی شد که طی آن دو طریقه اتوبوس و ون، به طور همزمان در شبکه سرویس دهی می کنند. به علاوه آنالیز حساسیت تقاضا در طراحی شبکه حمل‌و نقل‌همگانی توسط مطالعات مختلفی از جنبه های گوناگون مانند تاثیر تغییرات تقاضا ناشی از تغییرات کرایه، یارانه، تعداد ناوگان، سرفاصله و زمانبندی خطوط مورد بررسی قرار گرفته است.

طبق بررسی صورت گرفته مشخص می‌شود که در مطالعات گذشته تاکنون موضوع آنالیز حساسیت تقاضا در طراحی شبکه تغذیه‌کننده حمل‌و نقل‌همگانی مطرح نشده و با توجه به تأثیرگذاری تغییرات آن بر نوع ناوگان، خطوط شبکه و سرفاصله سرویس در این مقاله این موضوع مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۳. شرح مسئله

همزمانی استفاده از طریقه‌های مختلف در شبکه، علاوه بر بهبود عملکرد سیستم حمل و نقل، موجب افزایش مطلوبیت و انعطاف پذیری بیشتر می‌شود. متدولوژی بکار برده شده در این مقاله به گونه‌ای عمل می کند که طریقه‌های مختلف می‌توانند به طور همزمان در ایستگاههای شبکه خدمت رسانی کرده و تخصیص تقاضا بین طریقه‌ها به صورت بهینه صورت پذیرد. طبق بررسی انجام شده در بخش مرور بر ادبیات، دیده شد که تمام مطالعات در زمینه طراحی شبکه های تغذیه کننده چندطریقه‌ای با محدودیت خدمت رسانی تنها یک طریقه در هر ایستگاه شبکه، انجام شده است، اما در اینجا این محدودیت از بین رفته است. برای امکان پذیر بودن حل مسئله، مفروضاتی به شرح زیر درنظر گرفته می شود:

۱- ناحیه تحت طراحی و محل ایستگاههای شبکه از قبل مشخص هستند

۲- فرض می شود زمان انتظار مسافران در ایستگاه، نصف سرفاصله خط سرویس دهنده آن ایستگاه باشد

تابع هدف مسئله که تنها برای کمینه کردن هزینه‌های مربوط به مسافر، بهره بردار و اجتماع در شبکه است از مقاله شریعت و غلامی [Shariat and Gholami, 2010] برگرفته شده، معادله(۳)، که بسط داده شده آن مطابق معادله (۵) است:

(۵)

$$C=\sum_{m=1}^{M}\left(\frac{\lambda_w^m}{2}\sum_{k=1}^{K^m}\frac{P_k^m}{F_k^m}\right)+\sum_{m=1}^{M}\left(\lambda_r^m\sum_{k=1}^{k^m}\frac{1}{V_{o,k}^m}\sum_{s=1}^{S_k^m}\left(l_{s,d}.P_s^m\right)\right)$$
$$+\sum_{m=1}^{M}\left(2\left(\lambda_o^m+\lambda_s^m\right)\sum_{k=1}^{K^m}F_k^m l_k^m\right)+\sum_{m=1}^{M}\left(2\left(\lambda_f^m+\lambda_m^m\right)\sum_{k=1}^{K^m}\left[\frac{F_k^m l_k^m}{V_{c,k}^m}\right]^+\right)$$

که در آن:

C: هزینه کلی شبکه، M: تعداد طریقه‌های موجود در شبکه، λ_w^m: هزینه واحد زمان انتظار برای طریقه m، K^m: تعداد مسیر طریقه m، P_k^m: تقاضای مسیر k برای طریقه m، F_k^m: تواتر مسیر k برای طریقه m، λ_r^m: هزینه واحد زمان سواری برای طریقه m، $V_{o,k}^m$: سرعت عملیاتی طریقه m در مسیر k، S_k^m: مجموعه ایستگاههای مسیر k و طریقه m، $l_{s,d}$: فاصله بین ایستگاه s و مقصد d، P_s^m: تقاضای ایستگاه s برای طریقه m، λ_o^m: هزینه واحد بهره بردار برای طریقه m، λ_s^m: هزینه واحد اجتماعی برای طریقه m، l_k^m: طول مسیر k برای طریقه m، λ_f^m: هزینه واحد ثابت سیستم برای طریقه m، λ_m^m: هزینه واحد تعمیر و نگهداری سیستم برای طریقه m، $V_{c,k}^m$: سرعت چرخه برای مسیر k و طریقه m.

دو ترم اول تابع هدف مربوط به هزینه‌های کاربر است که شامل هزینه‌های زمان انتظار در ایستگاه و هزینه‌های زمان سواری درون وسیله نقلیه است. هزینه زمان سواری، هزینه زمانی است که مسافر از لحظه سوار شدن تا هنگام رسیدن به مقصد که همان ایستگاه خط ریلی است، صرف می‌کند. ترمهای سوم و چهارم تابع هدف مربوط به هزینه‌های بهره بردار و هزینه‌های اجتماع هستند و بستگی به وسیله-کیلومتر طی شده در شبکه دارند. هزینه بهره‌بردار شامل هزینه خرید ناوگان، سوخت، یارانه پرداختی و حقوق کارکنان است. همچنین هزینه اجتماعی شامل تأثیرات سیستم بر سلامت مردم، آلودگی هوا، تنشهای اجتماعی و هزینه های کلی دیگری است که کمی کردن آنها نیاز به مطالعات و مدلهای پیچیده دارد. در اینجا از خروجی مطالعات مرتبط برای محاسبه آن استفاده شده است. دو ترم آخر تابع هزینه مربوط به هزینه‌های ثابت شامل هزینه‌های روزمره و تعمیر و نگهداری سیستم است که بستگی به تعداد ناوگان استفاده شده در شبکه دارد. با مشتق گیری از معادله (۵) برحسب تواتر، می‌توان به فرمول تواتر بهینه مطابق معادله (۵-۱) و پس از ساده سازی به معادله (۶) دست یافت.

(۵)

$$\frac{\partial C}{\partial F}=0\rightarrow\frac{-2\lambda_w^m P_k^m}{4(F_k^m)^2}+0+2\left(\lambda_o^m+\lambda_s^m\right)l_k^m+2\left(\lambda_f^m+\lambda_m^m\right)\frac{l_k^m}{V_{c,k}^m}=0$$

$$F_{opt,k}^m=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{P_k^m\lambda_w^m}{l_k^m[(\lambda_o^m+\lambda_s^m)+\frac{(\lambda_f^m+\lambda_m^m)}{V_{c,k}^m}]}}\qquad(۶)$$

که در آنها:

$F_{opt,k}^m$: تواتر بهینه برای مسیر k و طریقه m، بقیه‌ی پارامترها قبلا توضیح داده شده اند.

ممکن است در شرایطی تواتر مورد نیاز خطی، از تواتر بهینه آن مسیر بیشتر باشد، ازاین رو تواتر مورد نیاز با معادله (۷) تعریف می‌شود:

$$F_{req,k}^m=\frac{P_k^m}{L^m.\mu^m}\qquad(۷)$$

که در آن:

$F_{req,k}^m$: تواتر مورد نیاز برای مسیر k و طریقه m برحسب (وسیله نقلیه/ساعت)، L^m: ضریب بار مسافر برای طریقه m، μ^m: ظرفیت طریقه m

تواتر استفاده شده برای هر مسیر و هر طریقه بزرگ ترین مقدار از بین دو عدد به دست آمده از معادلات (۶) و (۷) است.

با توجه به اینکه در ترم آخر معادله (۵) عبارت $\left[\frac{F_k^m l_k^m}{V_{c,k}^m}\right]^+$ بیان کننده تعداد ناوگان مورد نیاز برای خط حمل و نقلی است،

بنابراین تعداد اعشاری ناوگان بی معناست، ازاین رو عبارت «+» برای گرد کردن عدد به دست آمده به سمت بیشترین عدد صحیح بعد از آن قرار داده شده است.

۴. روش حل

برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده چندطریقه‌ای باید تقاضای موجود در ایستگاههای شبکه به نحو مناسبی بین طریقه‌های سرویس دهنده تخصیص داده شوند. باتوجه به اینکه روش حل مسئله الگوریتم اجتماع مورچگان است، بنابراین لازم است روندحل، به نوعی توسط این الگوریتم و ساختار آن شبیه سازی شود. ازآنجا که مورچه‌ها در طبیعت برای یافتن محل غذا و راهنمایی سایر همنوعان جهت سیر مسیر در کوتاه ترین زمان، ماده‌ای به نام فرمون که دارای خصوصیاتی از جمله تبخیر پس از گذر زمان، از خود باقی می‌گذارند، در این مقاله نیز برای طراحی چندطریقه‌ای شبکه از این خصوصیت بهره گیری شده است. ازاین رو به هر ایستگاه شبکه، فرمونی به نام فرمون "نوع ایستگاه" داده شده و براساس روابط احتمالی نوع ایستگاه هر ناحیه از نظر تک‌طریقه‌ای یا چندطریقه‌ای بودن تعیین می‌شود. بعد از تعیین نوع ایستگاههای شبکه، مطابق شکل (۱) به هر واحد درصد مابین صفر تا صد یک فرمون بنام فرمون "تخصیص" تعلق می‌گیرد که با توجه به قوانین رولت ویل و احتمالات، درصد تخصیص داده شده به هر طریقه در ایستگاههای چندطریقه‌ای تعیین خواهد شد. در این شکل هر سطر ماتریس بیانگر یک ایستگاه چندطریقه‌ای و هر ستون آن مبین یک واحد درصد از صفر تا صد است.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & .... & 97 & 98 & 99 & 100 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 1 & 2 & 3 & .... & 97 & 98 & 99 & 100 \end{bmatrix}$$

شکل ۱. ماتریس تخصیص تقاضا

سپس لازم است برای هر گروه از ایستگاهها، مسیریابی طوری صورت پذیرد تا تقاضای مربوط به ایستگاه ریلی رسانده شود. برای شروع هر مسیر نیاز به تعیین ایستگاه ابتدایی (ترمینال) است. در مطالعات گذشته روش کار براساس انتخاب ایستگاهی با بیشترین تقاضا بوده که تجربه نشان داده روش خیلی مناسبی نیست. در اینجا از الگوریتم اجتماع مورچگان استفاده شده و به هر ایستگاه شبکه فرمونی بنام "فرمون ترمینالی" اختصاص داده می شود. سپس با استفاده از معادله (۸)، احتمال انتخاب هریک از ایستگاهها به دست می‌آید.

$$P_p^{k,m} = \frac{(\tau_{p,m})^{\alpha}}{\sum_{i \in \Omega} (\tau_{i,m})^{\alpha}} \qquad (۸)$$

که در آن:

$P_p^{k,m}$: احتمال انتخاب ایستگاه p برای ترمینال توسط مورچه k ام و طریقه m، Ω: مجموعه ایستگاه های انتخاب نشده توسط مورچه kام برای طریقه m، $\tau_{p,m}$: فرمون ترمینالی برای ایستگاه p و طریقه m، $\tau_{i,m}$: فرمون ترمینالی تمام ایستگاههای i از مجموعه Ω که هنوز انتخاب نشده اند و برای طریقه m، α: پارامتر تنظیم کننده شدت فرمون.

بعد از اینکه برای هر مورچه احتمال انتخاب تمام ایستگاهها محاسبه شد، با استفاده از قاعده چرخ رولت یکی از آنها به عنوان ایستگاه ترمینالی انتخاب می شود.

۴-۱ مسیریابی

برای مسیریابی به هر لینک واصل و موجود بین ایستگاههای شبکه، فرمون دیگری بنام "فرمون لینک" داده می شود. سپس با استفاده از معادله (۹) احتمال ادامه مسیر از گره i به گره‌های j محاسبه شده و با استفاده از قاعده چرخ رولت یکی از ایستگاهها برای امتداد آن انتخاب می‌شوند. قابل ذکر است؛ با توجه به احتمالی بودن اساس کار الگوریتم ACO ، ایستگاهی که در طول فرآیند الگوریتم، دارای فرمون بیشتری باشد، نشان از مناسب‌تر

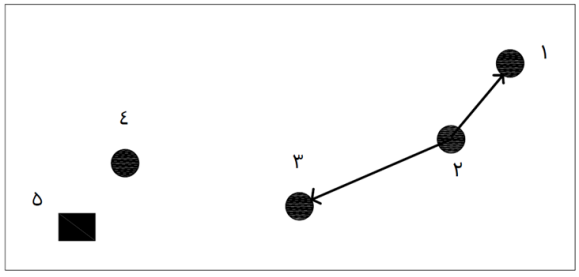
بودن انتخاب آن برای مسیریابی می دهد.

$$P_{i,j}^{k,m}=\frac{(\tau_{ij}^{m})^{\alpha}.(\eta_{ij}^{m})^{\beta}}{\sum_{s\in\Omega}(\tau_{is}^{m})^{\alpha}.(\eta_{is}^{m})^{\beta}} \quad (۹)$$

که در آن:

$P_{i,j}^{k,m}$: احتمال انتخاب ایستگاه j از ایستگاه i برای مورچه k ام و طریقه m، $\tau_{ij,m}$: فرمون لینک بین ایستگاه های i و j برای طریقه m، $\eta_{ij,m}$: دیدپذیری[۱۴] ایستگاه j از ایستگاه i برای طریقه m، β : پارامتر تنظیم کننده دیدپذیری ایستگاه j از ایستگاه i.

درطراحی شبکه بااستفاده از الگوریتم اجتماع مورچگان، نه تنها فرمونها در انتخاب مسیرتاثیرگذارهستند، بلکه مکان هندسی ایستگاهها نیز نسبت به هم موثر است. علاوه برموقعیت ایستگاهها نسبت به هم، موقعیت آنها نسبت به ایستگاه ریلی نیز مهم است. به عنوان مثال درشکل (۲) می‌خواهیم ازگره ۲ به طرف ایستگاه ۵ مسیریابی کنیم. دراین شکل گره ۱ نزدیک ترین ایستگاه به گره ۲ است اما از نظر موقعیت نسبت به مقصد، گره مناسبی برای انتخاب نیست. بنابراین بهتراست که گره ۳ انتخاب شود، زیرا درست است که هدف گره ۵ می‌باشد وگره ۴ نزدیک تر به مقصداست اما گره ۳ موقعیت بهتری برای انتخاب شدن دارد.



شکل ۲. دیدپذیری نقاط نسبت به مقصددرمثال فرضی

به همین منظور برای اینکه برنامه به سمت انتخاب مناسب نقاط، جهت مسیر یابی به سمت ایستگاههای ریلی پیش رود، درمعادله (۹) ازترم (η_{ij}^{m}) که بیان کننده دیدپذیری گره j از i برای طریقه mاست، استفاده می‌کنیم. مطابق تعریف تیلمان وکاین به نقل از کوآن و اونگ (۲۰۰۶) دیدپذیری ازرابطه زیر به دست می آید:

$$\eta_{ij}=\tilde{d}_{i}^{st}+\tilde{d}_{j}^{st}-d_{ij}$$

که درآن:

η_{ij}: دیدپذیری گره j نسبت به i در کمان ij

$\tilde{d}_{i}^{st}$: فاصله‌ی اصلاح شده بین ایستگاه ریلی st و ایستگاه i

$\tilde{d}_{j}^{st}$: فاصله‌ی اصلاح شده بین ایستگاه ریلی st و ایستگاه j

d_{ij}: فاصله بین گره های i و j

دررابطه فوق $\tilde{d}_{i}^{st}$ و $\tilde{d}_{j}^{st}$ ازرابطه زیر به دست می آیند:

$$\tilde{d}_{i}^{st}=\min_{m} d_{i}^{m}-(d_{i}^{st}-\min_{m} d_{i}^{m})$$

که درآن:

$\min_{m}$ $_{i}$:فاصله بین ایستگاه i و نزدیکترین ایستگاه ریلی m

d_{i}^{st}: فاصله بین ایستگاه ریلی st و ایستگاه i

بعد از اینکه هر مسیر به ایستگاه ریلی رسید، ایستگاههای پوشش داده شده توسط آن از مجموعه ایستگاههای اولیه شبکه حذف می‌شود. حال اگر هنوز ایستگاه پوشش داده نشده‌ای برای هر طریقه در شبکه وجود داشته باشد، مجددا پروسه تعیین ترمینال و مسیریابی تا رسیدن به ایستگاه ریلی توسط هر مورچه طی خواهد شد تا تمام ایستگاهها پوشش داده شوند.

زمانی که هر مورچه تعیین شده در الگوریتم، شبکه مربوط به خود را ساخت، در انتهای یک چرخه از الگوریتم ACO قرار می‌گیریم. در اینجا شبکه‌هایی که دارای کمترین هزینه هستند انتخاب شده و فرمون مربوط به نوع طریقه، ایستگاههای ترمینالی و لینکها شبکه آنها بهبود داده می‌شود تا در چرخه های بعدی شانس بیشتری برای انتخاب داشته باشند. به عبارت دیگر براساس یک رابطه تجربی مقداری به فرمون تمام المانهای شبکه منتخب افزوده می‌شود و برای فرآیند بهینه سازی الگوریتم از جستجوی کلی در بین جوابهای موجود به سمت جستجوی محلی برای رسیدن به یک جواب قطعی پیش رود، در هر چرخه، مقداری از فرمون تمام المانهای شبکه‌های ساخته شده، کسر می‌گردد. به عبارت دیگر فرمونها در ضریبی کمتر از یک ضرب می‌شوند.

در این مقاله از ضریب ۰/۹۹۹۸ جهت کاهش فرمون استفاده شده است. به این عمل تبخیر گفته می شود. عملگر تبخیر باعث می‌شود شبکه هایی که در چرخه‌های ابتدایی برنامه به صورت کاملا اتفاقی ساخته شده و مناسب نیستند، به تدریج فرمون خود را از دست داده و شانسی برای انتخاب نداشته باشند.

۵. مطالعه موردی

در این پژوهش برای نمایش نتایج حاصل از تغییرات تقاضا در ساختار شبکه‌های تغذیه‌کننده چندطریقه‌ای، از یک مثال حقیقی، شبکه حمل و نقل همگانی غرب شهر مشهد استفاده شده است، شکل (۳). منطقه مورد نظر از نظر بافت تراکمی، مسکونی- ویلایی است و شبکه همگانی آن اتوبوس و خط قطار سبک شهری است که فاقد یک شبکه‌منسجم تغذیه‌کننده برای دسترسی به خط ریلی است. برای اجرای مدل، پنج سناریو مطابق جدول (۱) درنظر گرفته شده است. تفاوت سناریوهای اعمالی، ناشی از تغییرات تقاضا در ایستگاههای شبکه است. ابتدا متدولوژی طراحی بدون تغییرات و با اطلاعات اولیه موجود به عنوان سناریوی مبنا اجرا می‌شود. سپس بقیه سناریوها با آن مقایسه خواهند شد. برای تحلیل بهتر، ایستگاههای موجود در فضای مطالعه مطابق اشکال (۳و۴) در دو ناحیه، یکی نزدیک به خط ریلی و به صورت مرکزی و ناحیه دیگر به صورت حومه‌ای دسته بندی می‌شوند. تغییرات تقاضا براساس تغییر در این دو ناحیه صورت می‌پذیرد. طریقه‌های استفاده شده در شبکه، اتوبوس شهری و ون بوده که با توجه به قابلیت چندطریقه‌ای بودن طراحی در این مقاله، همزمان سرویس‌دهی می‌کنند.

شکل ۳. منطقه مورد مطالعه، شهر مشهد-ایران

جدول ۱. مشخصات سناریوهای برنامه

سناریو	مبنا	۱	۲	۳	۴
تقاضا در ناحیه ۱	ثابت	دوبرابر سناریوی مبنا	ثابت	نصف سناریوی مبنا	ثابت
تقاضا در ناحیه ۲	ثابت	ثابت	دوبرابر سناریوی مبنا	ثابت	نصف سناریوی مبنا

۶. نتایج و تحلیل مطالب

همان طور که در بخش قبل گفته شد پنج سناریو براساس تغییر در تقاضای نواحی مختلف منطقه مورد مطالعه برنامه‌ریزی شده که سناریوی اول "مبنا" نامیده می‌شود. در این سناریو طراحی بدون تغییر در ورودی های مسئله انجام می شود، اما سناریوهای (۱) تا (۴) براساس تغییر در تقاضای مرکز و حومه منطقه مورد مطالعه ایجاد شده اند. شبکه طراحی شده براساس داده‌های سناریوی مبنا، مطابق شکل (۵) بوده؛ که پایین‌تر بودن هزینه‌های واحد ون نسبت به اتوبوس، سبب افزایش تعداد خطوط ناوگان با ظرفیت کمتر شده است. به علاوه کلیه مسیرهای شبکه، بجز آنهایی که از ترمینالهای ۷، ۳۷ و ۴۸ آغاز می‌شوند، با ون سرویس‌دهی می‌شوند که موید بهینه بودن طریقه ون نسبت به اتوبوس در شرایط آن سناریو است. اشکال (۶)، (۷) و (۸) به ترتیب شبکه طراحی شده برای سناریوهای (۱) تا (۳) را نشان می‌دهند. همچنین اشکال (۹) و (۱۰) نشان دهنده میزان تغییرات پارامترهای طراحی و میزان تغییرات هزینه‌های شبکه سناریوهای (۱) تا (۳)، نسبت به سناریوی مبنا هستند. با توجه به اینکه در سناریوی (۱) حجم بیشتری از ایستگاههای بخش تحتانی خط ریلی در زمره ایستگاههای ناحیه ۱ قرار دارند و از آنجا که مطابق جدول (۱) تقاضا در ناحیه ۱ دوبرابر حالت مبنا است، بنابراین مشاهده می‌شود سهم بیشتری از خطوط طراحی شده از ترمینال ابتدایی با ناوگان اتوبوس سرویس‌دهی می‌شوند. اشکال (۷) و (۸) به ترتیب شبکه طراحی شده برای سناریوهای (۲و۳) را نشان می‌دهند. به علت افزایش تقاضا در ناحیه دوم مطابق شکل (۴)، و نیاز به ناوگان با ظرفیت بیشتر، ۹۸٪ خطوط شبکه از ابتدا توسط ناوگان اتوبوس پوشش داده می‌شود، حال آنکه این درصد در شکل (۸) مرتبط با سناریوی۳، به ۸۵٪ کاهش یافته، ضمن اینکه کاهش تقاضا سبب پوشش بیشتری با طریقه ون شده تاهزینه های کلی کاهش یابد. به طور کلی شکلهای (۵) تا (۸) نشانگرانعطاف پذیری روش ارایه شده در مقاله در ارتباط با تخصیص ناوگان و تقاضا و پاسخگو بودن به پارامترهای ورودی شبکه است. در سناریوهای (۱) و (۲) تقاضای مربوط به نواحی (۱)و(۲) به ترتیب دوبرابر سناریوی مبنا شده است. دراین حالت نتایج به دست آمده نشان می‌دهند تعداد خطوط ۷٪، تواتر بهینه ۲۰٪، مجموع طول خطوط شبکه ۲٪ رشد و سرفاصله متوسط ۲۱٪ کاهش داشته‌اند. علت افزایش پارامترهای فوق الذکر، بیشتر شدن تقاضای مجموع و لزوم افزایش کمی خدمات است. همچنین پارامتر هزینه در این سناریوها نسبت به شرایط مبنا، به ترتیب ۲۹٪ و ۶۵٪ افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده نشان دهنده تأثیرات بیشتر افزایش تقاضای حومه بر عملکرد شبکه حمل و نقل همگانی تغذیه‌کننده برای این دو سناریو است، به طوری که رشد متوسط هزینه‌های طراحی نسبت به سناریوی مبنا در شکل (۱۰) مشهود است. نتایج نشان می‌دهد افزایش تقاضای حومه (سناریوی ۲) سبب افزایش ۵۹ درصدی تواتر، ۷۰ درصدی مسافر- کیلومتر طی شده و ۶۶ درصدی صندلی- ساعت مورد نیاز نسبت به شرایط اولیه می شود که در مقایسه با سناریوی (۱) این پارامترها به ترتیب ۲۵٪، ۲۴٪ و ۲۷٪ رشد دارند. از بررسی نتایج همچنین به دست می‌آید که با وجود عدم تفاوت مجموع طول خطوط شبکه بین دو سناریوی ابتدایی این مقاله، فاصله بیشتر بین مبدا-مقصد سفر باعث نیاز بیشتر به تعداد ناوگان، صندلی- ساعت مورد نیاز و در نهایت مسافر-کیلومتر طی شده می شود. همچنین از مقایسه هزینه‌های این دو سناریو در شکل (۱۰)، افزایش تواتر در سناریوی (۲) نسبت به سناریوی (۱)، سبب کاهش هزینه زمان انتظار به مقدار ۲۷٪ می‌شود. لازم به ذکر است؛ افزایش طول خطوط شبکه حمل و نقل همگانی سبب افزایش تواتر و بواسطه آن کاهش زمان انتظار شبکه می‌شود که به تبع آن هزینه زمان انتظار کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۹)، طول خطوط شبکه در سناریوهای (۱و۲) تفاوت چندانی ندارند،

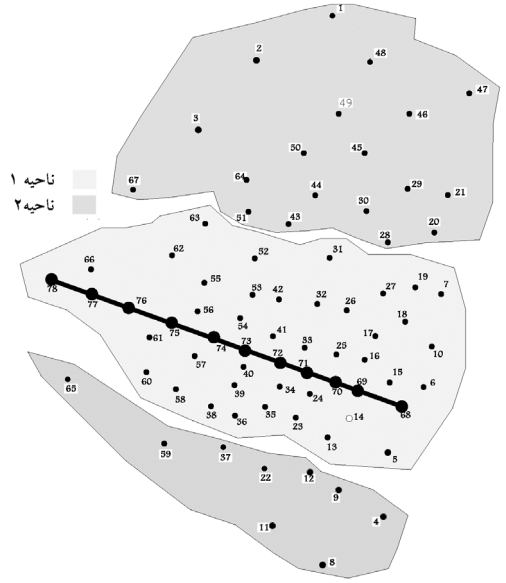
بنابراین استفاده همزمان از طریقه‌ها با ظرفیت متفاوت سبب کاهش هزینه‌های زمان انتظار شده است. مقایسه بین پارامترهای هزینه‌ای در سناریوهای (۱) و (۲) روند مشخصی را نشان نمی‌دهد و به طور کلی علت افزایش در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، افزایش نسبی تقاضا در ناحیه (۲) است. اشکال (۶و۷) مربوط به شبکه طراحی شده برای سناریوهای (۱و۲) هستند، ایستگاههای ناحیه‌ی (۱) در شکل (۶)، بیشتر با طریقه‌ای که ظرفیت بیشتری دارد (در اینجا اتوبوس) پوشش داده شده و نواحی دورتر با طریقه کم ظرفیت تر (ون)، خدمت رسانی می‌شوند، حال آنکه در شکل (۷)، مسیرهایی که پوشش دهنده ایستگاههای ناحیه (۲) هستند به دلیل تقاضای بیشتر با ناوگان اتوبوس سرویس‌دهی می‌شوند و نواحی نزدیک خط ریلی با ون به صورت نیم دور پوشش داده می‌شود. به علاوه عملکرد سرویس های نیم دور[15] نیز در اشکال بالا به یکی از قابلیتهای طراحی چندطریقه‌ای اشاره دارد. نیم دور حالتی از سرویس است که قسمتی از ناوگان در خط، قبل از رسیدن به انتهای مسیر از جایی مناسب به مسیر مقابل رفته و به اول خط باز می‌گردد. معمولا استفاده از این نوع سرویس در خطوطی که پروفیل تقاضا نقاط اوج متفاوت دارد، توصیه می‌شود. از مزایای آن کاهش زمان سفر، کاهش تعداد ناوگان مورد نیاز و در مجموع کاهش هزینه‌ها است. همان طور که در شکل (۶) دیده می‌شود در خطوطی که از ترمینال های ۶۵، ۵۸، ۳۸، ۲۲، ۱۲، ۲۱، ۲۹، ۴۷، ۴۸، ۴۹، ۴۲، ۱، ۶۴، ۲ و ۶۷ آغاز می‌شوند، سرویس ون طول بیشتری از خط را پوشش می‌دهد، حال آنکه سرویس اتوبوس با ظرفیت بیشتر برای پوشش مناطق مرکزی با تقاضای بیشتر عمل می کند.

در سناریوهای (۳و۴) تقاضای نواحی (۱و۲) نسبت به سناریوی مبنا کاهش یافته‌اند. شکل (۹) نشان می‌دهد که برای این دو سناریو تمام پارامترهای طراحی شامل تعداد و طول خطوط، مسافر- کیلومتر، وسیله- کیلومتر و صندلی- ساعت مورد نیاز شبکه به علت نیاز کمتر به خدمات، کاهش یافته‌اند. به علاوه سرفاصله متوسط ناوگان برای این دو سناریو به ترتیب کمتر و بیشتر شده که نسبت به سناریوی مبنا بیانگر سطح سرویس پایین‌تر است. همان طور که در ابتدای مقاله گفته شد، تابع هدف مسئله در جهت کمینه کردن هزینه های مسافر، بهره بردار و هزینه‌های اجتماعی است. زمانی که هزینه‌های واحد تقاضا به واسطه مسافر کمتر ارزش وزنی به مراتب پایین تری نسبت به هزینه‌های واحد ناوگان و بهره برداری سیستم دارند، ازاین رو متدولوژی ارایه شده، طراحی بهینه را در جهت ایجاد شبکه با سطح خدمات کمتر، برنامه‌ریزی می‌کند. شکل (۸) نشان دهنده سرویس‌دهی نواحی نزدیک به خط ریلی با ون (ظرفیت کمتر) بواسطه کاهش تقاضا (سناریو (۳)) نسبت به سناریوی مبنا است.

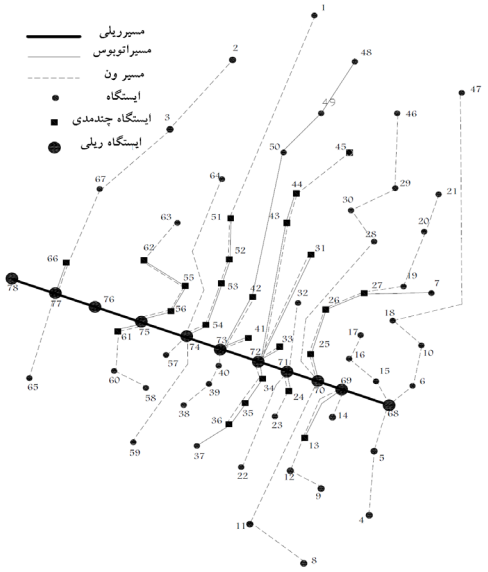
مقایسه هزینه کل شبکه‌طراحی شده نسبت به تقاضای شبکه نشان می‌دهد که باتوجه به شرایط شبکه مبنا، محل ایستگاهها، جانمایی خط ریلی و الگوی تقاضای منطقه، مسافران حومه‌ای بیشتر از تقاضای مرکز شهر، بر طراحی تأثیر گذارند، به طوری که هزینه‌های کل برای سناریوهای (۱) تا (۴) به ترتیب ۲۹٪، ۶۵٪، ۱۲-٪ و ۱۵-٪ نسبت به سناریوی مبنا تغییرات داشته‌اند (علامت منفی بیانگر کاهش مقادیر است). بیشترین و کمترین میزان نوسانات به ترتیب مربوط به سناریوهای (۲) و (۴) است که به افزایش و کاهش تقاضا در نواحی حومه ارتباط دارد.

طبق بررسی های انجام شده می توان درک کرد که شناخت الگوی تقاضا و ارایه عرضه متناسب با آن، از اهم موارد در طراحی شبکه تغذیه‌کننده است. همچنین استفاده از طریقه‌های مختلف در طراحی می‌تواند انعطاف پذیری شبکه را افزایش داده و به کاهش هزینه‌های عملکردی در مقابل افزایش مطلوبیت سیستم بیانجامد. زمانی که تقاضا در مناطق مختلف طراحی تغییر می‌کند، بهینه است که سرویس‌دهی با یک سیستم مرکب متشکل از طریقه‌های مختلف انجام شود تا هم زمان سفر مسافرین به نحو مقتضی

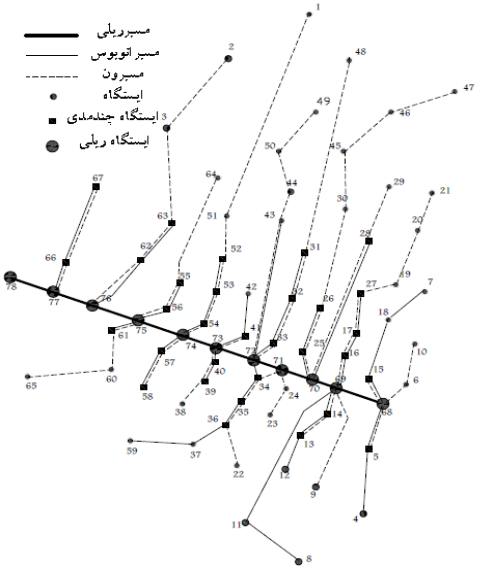
کاهش یابد و هم هزینه‌های بهره‌بردار کمینه شود. از نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که یکی از راهکارهای مناسب طراحی در شرایط تقاضای متغیر، خطوط نیم دور هستند. هنگامی که پروفیل تقاضا روند مشخصی را نشان نمی‌دهد، در صورت استفاده از یک طریقه، تواتر مورد نیاز براساس بیشترین تقاضای خط در ساعت اوج تعیین می‌گردد حال آنکه ممکن است در بخشی از خط عرضه ارایه شده متناسب با تقاضای موجود نباشد. با استفاده از متدولوژی طراحی چندطریقه‌ای شبکه تغذیه‌کننده، شرایط مورد نیاز برای ایجاد سرویسهای نیم دور بنحو مقتضی ایجاد می‌گردد



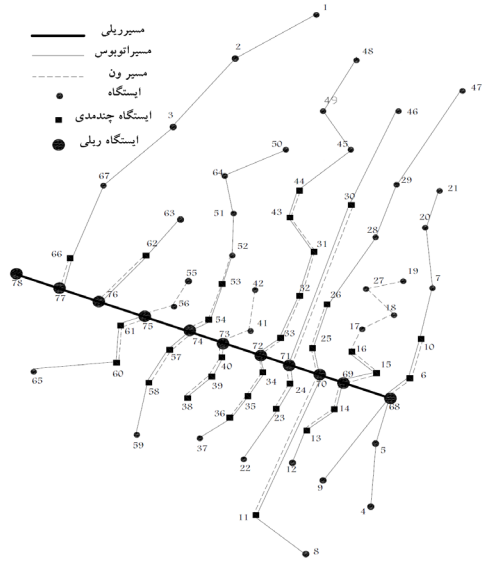
شکل۴. ایستگاه های تحت پوشش هر ناحیه در منطقه مورد مطالعه



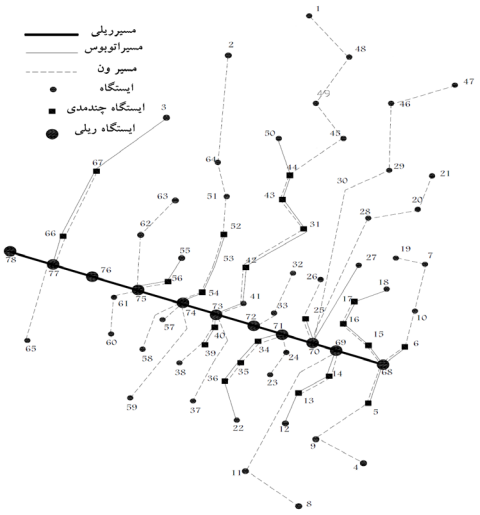
شکل ۵. شبکه طراحی شده با سناریو مبنا



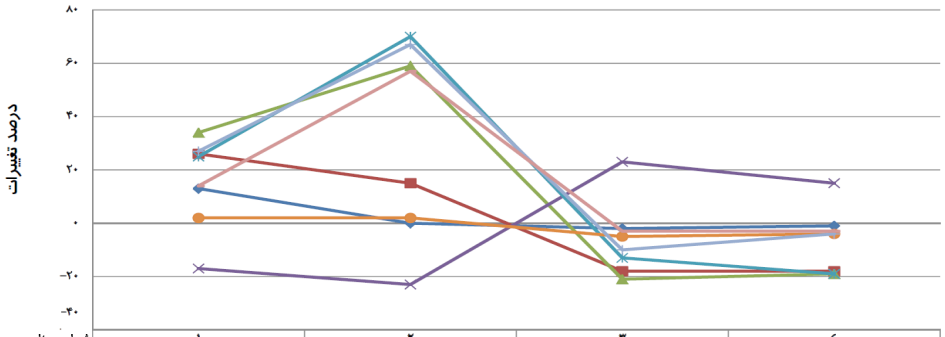
شکل ۶. شبکه طراحی شده با سناریو (۱)



شکل ۷. شبکه طراحی شده با سناریو (۲)

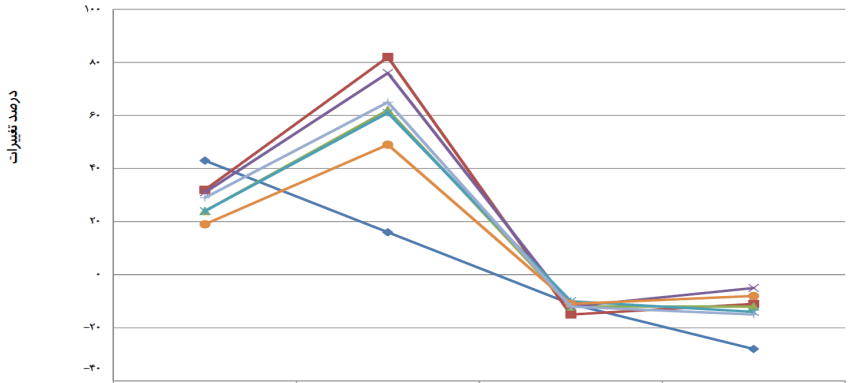


شکل ۸. شبکه طراحی شده با سناریو (۳)



شماره سناریو	۱	۲	۳	٤
تعداد خطوط	۱۳	۰	-۲	-۱
متوسط توانر بهینه	۳٦	۱۵	-۱۸	-۱۸
متوسط توانر مورد نیاز	۳٤	۵۹	-۲۱	-۱۹
متوسط سرفاصله	-۱۷	-۲۳	۲۳	۱۵
مجموع مسافر-کیلومتر	۲۵	۷۰	-۱۳	-۱۹
مجموع طول خطوط	۲	۲	-۵	-٤
صندلی-ساعت مورد نیاز	۲۷	٦۷	-۱۰	-٤
مجموع وسیله-کیلومتر	۱٤	۵۷	-۳	-۳

شکل ۹. میزان تغییرات پارامترهای طراحی برنامه



شماره سناریو	۱	۲	۳	٤
هزینه زمان انتظار - صدهزاریال/ساعت	٤۳	۱٦	-۱۱	-۲۸
هزینه زمان سواری - صدهزاریال/ساعت	۳۲	۸۲	-۱۵	-۱۱
هزینه بهره بردار شبکه - صدهزاریال/ساعت	۲٤	٦۲	-۱۲	-۱۲
هزینه اجتماعی - صدهزاریال/ساعت	۳۱	۷٦	-۱۲	-۵
هزینه ثابت سیستم - صدهزاریال/ساعت	۲٤	٦۱	-۱۰	-۱٤
هزینه تعمیر و نگهداری سیستم - صدهزاریال/ساعت	۱۹	٤۹	-۱۱	-۸
هزینه کلی سیستم - صدهزاریال/ساعت	۲۹	٦۵	-۱۲	-۱۵

شکل ۱۰. میزان تغییرات پارامترهای هزینه‌ای برنامه

۷. نتیجه گیری

در بالا تحلیل طراحی شبکه تغذیه‌کننده چندطریقه ای وتغییرات آن براساس نوسانات تقاضا مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی نتایج از پنج سناریو استفاده شد که اساس آنها تغییر در تقاضای ایستگاههای مرکزی و حومه در منطقه مورد مطالعه است. نتایج نشان می‌دهند استفاده از طریقه‌های مختلف در شبکه قابلیت ایجاد سرویس های نیم دور را با توجه به پروفیل تقاضا فراهم می‌آورد، به‌طوری که می‌توان زمان سفر و هزینه‌های عملکردی را به نحو مطلوبی کاهش داد. طبق نتایج در شرایطی که تقاضای حومه‌ای افزایش می‌یابد، ناوگان با ظرفیت بیشتر برای پوشش نواحی دورتر استفاده شده و برای خدمت رسانی به تقاضای نزدیک خط ریلی، طریقه ون به صورت نیم دور خدمت رسانی می کند. مقایسه هزینه کل شبکه طراحی شده نسبت به تقاضای شبکه نشان می‌دهد که باتوجه به شرایط شبکه مبنا، محل ایستگاهها، جانمایی خط ریلی و الگوی تقاضا، مسافران حومه‌ای بیشتر از تقاضای مرکز شهر بر طراحی تاثیر گذارند، طوری که هزینه‌های کل برای سناریوهای (۱) تا (۴) به ترتیب ۲۹٪، ۶۵٪، ۱۲-٪ و ۱۵-٪ نسبت به سناریوی مبنا تغییرات داشته‌اند. هنگام افزایش تقاضا در ناحیه‌ی دور از خط ریلی و نیاز به ناوگان با ظرفیت بیشتر، ۹۸٪ خطوط شبکه از ابتدا توسط ناوگان اتوبوس پوشش داده می‌شود حال آنکه این درصد در هنگام کاهش تقاضای مرکز شهر، به ۸۵٪ تقلیل یافته ضمن اینکه سبب پوشش بیشتر توسط طریقه ون شده و هزینه های کلی کاهش می‌یابد

۸. پیشنهادات

تحقیق انجام شده با موضوع تقاضای متغیر برای طراحی شبکه تغذیه کننده چندطریقه‌ای یکی از جزئیات موجود در روند کلی طراحی شبکه را بررسی کرده است. نوآوری مقاله استفاده از طریقه‌های مختلف به صورت همزمان در شبکه و تخصیص بهینه تقاضا بوده است. مفروضات مسئله سبب شده تا گامهای اولیه در این زمینه به نحو مقتضی برداشته شود حال آنکه در آینده می توان با حذف برخی محدودیتها شرایط طراحی را به نمونه‌های واقعی نزدیک تر کرد. نویسندگان این مقاله به عنوان رویکرد آینده استفاده از تقاضای مبدا- مقصد، زمان بندی شبکه تغذیه کننده و بهینه سازی همزمانی رسیدن طریقه‌ها در ایستگاههای تغییرطریقه را به عنوان پیشنهادات جدید بر روش ارایه شده مطرح می کنند..

۹. پی‌نوشتها

1- Jitney

2-Transfer Point

3-Heuristic

4-Metaheuristic

5-Ant Colony Optimization (ACO)

6- Phromone

7-Feeder Bus Network Design Problem (FBNDP)

8-Many to one

9-Many to many

10-Construtive Algorithm

11-Local search heuristic

12-Tabu search (TS)

13-Genetic Algorithm (GA)

14- Visibility of station i from stop j

15-Short-Turn

۱۰. مراجع

-Amiripour, S. M. Mahdi., Ceder, Avishai. and Shariat Mohaymany, Afshin (2012) “Bus

on urban public transport priority in Beijing", 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies Changsha, China, August 1-3.

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

-Shariat Mohaymany, Afshin. and Gholami, Ali. (2010) "Multimodal feeder network design problem: Ant colony optimization approach", Journal of Transportation Engineering, Vol. 136, No. 4, pp.323-331.

-Shrivastava, P. and Dhingra, S. L. (2001) "Development of feeder routes for suburban railway stations using heuristic approach", Journal of Transportation Engineering, Vol. 127, No. 4, pp.0334-0341.

-Shrivastava, P. and O'Mahony, M. (2007) "Design of feeder route network using combined genetic algorithm and specialized repair heuristic", Journal of Public Transportation, Vol. 10, No. 2.

network design considering high seasonal demand variations" Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Washington DC.

-Fan, Wei. and Machemehi, Randy, B. (2006) "Optimal transit route network design problem with variable transit demand: Genet.ic algorithm approach." Journal of Transportation Engineering, Vol.132, Issue 1, pp. 40-51.

-Gholami, Ali and Shariat Mohaymany, Afshin (2012) "Analogy of fixed route shared taxi (taxi khattee) and bus services under various demand density and economical conditions", Journal of Advanced Transportation. DOI: 10.1002/atr.157

-Kuah, G. K. and Perl, J. (1989) "The feeder bus network design problem", Journal of Operational Research Society, Vol. 40, No.8, pp. 751-767.

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

-Liu, Mingjum., Jiang, Yang., Yang, Lingling. and Zhang, Zheng (2012) "An elastic analysis

Napiah, Madzlan. and Kamaruddin, -Suwardo., Ibrahim. (2010) "Ridership factors change and bus service demand sensitivity assessment of the fixed-route bus setvice for short-term action plan." Internationa Journal of Civil & Enviromental Engineering, Vol.10, No. 2.

-Verma, A. and Dhingra, S. L. (2006) "Developing integrated schedules for urban rail and feeder bus operation", Journal of Urban Planning and Development. Vol. 312, No. 3, pp.138-146

-Vuchic, V. R. (2004) "Urban transit: Operations, planning, and economic", Wiley, New York.

-Young, Jae Lee and Vukan, R.Vuchic (2005) "Transit network design with variable demand." Journal of Transportation Engineering, Vol.131, Issue 1, pp. 1-10.