

# ارائه یک روش ابتکاری برای طراحی خطوط شبکه حمل و نقل همگانی با استفاده از الگوریتم تولید مسیر

سیداحسان سیدابریشمی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

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

امیرعلی زرین مهر، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امیررضا ممدوحی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: seyedabrishami@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۳

دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۲۰

## چکیده

طراحی شبکه حمل و نقل همگانی کارآمد، یکی از ابزارهای مؤثر مدیران شهری برای پاسخ‌گویی به نیاز جابجایی در شهرها است. کارآمدی شبکه حمل و نقل همگانی وابسته به شیوه طراحی آن است. طراحی شبکه حمل و نقل همگانی از مسائل پیچیده در برنامه‌ریزی حمل و نقل است که پژوهشگران همواره تلاش کرده‌اند با استفاده از روش‌های ابتکاری ساده به حل این مسائل بپردازند. الگوریتم تولید مسیر یکی از روش‌های ابتکاری است که با استفاده از اصلاح مسیرهای حمل و نقل همگانی در یک شهر، کارآمدی شبکه حمل و نقل همگانی آن شهر را افزایش می‌دهد. در این مقاله روش جدیدی برای طراحی شبکه حمل و نقل همگانی مبتنی بر این الگوریتم پیشنهاد می‌شود که معیار فاصله برای هر دو گره از مسیر و معیار کمینه زمان سفر را نیز در نظر می‌گیرد و تلاش می‌شود تا با بهبود بیشتر شرایط برای کاربران، جواب مسأله به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود. این روش پیشنهادی در قالب یک برنامه رایانه‌ای پیاده‌سازی و برای شبکه سوفالز مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل حساسیت و در نظر گرفتن پارامترهایی همچون اشتراک کمان‌ها در مسیرهای شبکه نشان می‌دهد که طراحی مسیرها با روش پیشنهادی توانسته تعداد مسیرها در شبکه را برای پوشش تقاضای برابر تا ۷۰ درصد کاهش داده و طول هم‌پوشانی مسیرها در شبکه را نیز تا ۱/۳ کاهش دهد. این روش می‌تواند ابزاری برای سیاست‌گذاران باشد تا با طرح دقیق‌تر شبکه براساس نیاز کاربران گامی مؤثر در جهت افزایش سهم حمل و نقل همگانی بردارند.

واژه‌های کلیدی: تولید مسیر، حمل و نقل همگانی، طراحی شبکه

## ۱. مقدمه

که با برقراری محدودیت‌ها و با هدف بهبود الگوریتم‌های پیشین در مشخصاتی از شبکه (مانند طول کل مسیرهای موجود در شبکه) مورد استفاده قرار گرفتند. الگوریتم تولید مسیر توسط باج و مهمسانی [Baaj and Mahmassani, 1991] در دو مرحله ارائه شد. مرحله اول به تشکیل کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد با بیشترین تقاضا می‌پردازد و در مرحله دوم این مسیر توسعه پیدا می‌کند. در ادامه موتون و اورکوهارت [Mauttone and Urquhart, 2009] با استفاده از ایده اصلی الگوریتم سازنده یعنی ایجاد تغییرات در کوتاه‌ترین مسیر برای پوشش بیشتر تقاضا، پیشنهاداتی برای اصلاح روش توسعه مسیر مبتنی بر ورود مبدأ- مقصد به مسیر به‌جای ورود یک گره به آن دادند.

مقاله حاضر به یک روش ابتکاری طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر پوشش بهینه تقاضا با در نظر گرفتن هزینه‌های گرداننده<sup>□□□</sup> می‌پردازد. الگوریتم حل پیشنهادی به بررسی مجموعه-ای از گره‌های منتخب، که برای هر مسیر تعیین می‌شوند، می‌پردازد. در ادامه برای هر گره از این مجموعه، بهترین حالت ورود به مسیر که با شرط انتخاب مسیرها تعریف می‌شود، به‌عنوان مسیر برتر برای آن مسیر انتخاب می‌شود. ایجاد مسیرهای جدید در شبکه تا برقرار شدن کمینه پوشش تقاضا به‌وسیله شبکه ادامه می‌یابد.

در ادامه این مقاله در بخش دوم مروری بر کارهای گذشته شده و در بخش سوم الگوریتمی برای طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی ارائه می‌شود. در ادامه در بخش چهارم به پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه سوفالز و در بخش پنجم به تحلیل نتایج حل پرداخته می‌شود.

## ۲. مروری بر کارهای گذشته

طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی در دو بخش تعریف و حل مسأله صورت می‌گیرد. حل مسائل طراحی خطوط شبکه برای مسأله با تقاضای ثابت معمولاً جوابی مناسب ارائه می‌دهد و طرح آن با تقاضای متغیر مشکلاتی برای حل به‌دنبال دارد. بخش زیادی از مطالعات حمل‌ونقل، تقاضا را در طول حل ثابت فرض کردند و تعداد

در چند دهه گذشته عواملی از قبیل رشد اقتصادی- اجتماعی، حفظ حریم شخصی و راحتی باعث شده‌است که سهم قابل توجهی از جامعه استفاده از وسایل نقلیه شخصی را به استفاده وسایل نقلیه همگانی ترجیح دهند. از سوی دیگر عواملی از قبیل افزایش هزینه پارکینگ و ترافیک متراکم در شهرها، کاربران را به استفاده از وسایل نقلیه همگانی تشویق می‌کند. گسترش حمل و نقل همگانی با کارایی زیاد و سرویس‌دهی مناسب، با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی و محیط زیستی، نه تنها از مشکلات ترافیکی می‌کاهد، بلکه گامی به سوی توسعه پایدار و بهبود محیط شهری خواهد بود. برای این منظور طراحی شبکه و یافتن مسیرهای بهینه حمل‌ونقل همگانی امری ضروری به نظر می‌رسد. مسأله طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی یک مسأله غیرمحدب و پیچیده است که معمولاً به‌صورت غیرخطی بهینه‌سازی می‌شود و شامل متغیرها و محدودیت‌های گسسته و پیوسته به‌صورت هم‌زمان است.

هدف از طراحی سیستم حمل‌ونقل همگانی در درجه اول بهبود سیستم برای استفاده‌کنندگان موجود این سیستم و در درجه دوم جذب مسافران حمل‌ونقل شخصی است. گستردگی و پیچیدگی مسائل حمل‌ونقل همگانی در جوامع مدرن کنونی، تنوع مسأله طراحی خطوط شبکه در زمینه نظری و اهمیت مسأله در زمینه اجرائی، نیاز به مطالعات بیشتر را به‌دنبال داشته است. به‌همین دلیل مطالعات حمل‌ونقل همگانی بخش قابل توجهی از تحقیقات در سالهای اخیر را به خود اختصاص داده است که ابعاد آن از طراحی خطوط شبکه تا زمان‌بندی کارکنان، از محاسبات تقاضا تا تخصیص سفر به مسیر را دربرگرفته است.

بیشتر الگوریتم‌های طراحی شبکه از روش‌های کوتاه‌ترین مسیر مانند الگوریتم دایکسترا و فلویید وارشال<sup>□</sup> استفاده می‌کنند. در سالهای اخیر برای بهبود الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر، پیشنهادهایی عنوان شده است، مانند الگوریتم ابتکاری تولید مسیر<sup>□□</sup>

الگوریتم طراحی شبکه، تعیین مسیر برای زوج مبدأ- مقصد با تقاضای بیشینه در اولویت قرار دارد و با تشکیل کوتاه‌ترین مسیر برای آن مبدأ- مقصد، مسیر را توسعه می‌دهد. توسعه در این الگوریتم با ورود گره‌های مجاور با تقاضای زیاد به مسیر ابتدایی، صورت می‌گیرد. الگوریتم RGA تا جایی ادامه می‌یابد که محدودیت‌های مربوط به کمینه و بیشینه پوشش تقاضا در آن برقرار شود.

الگوریتم دیگری که در ادامه مطالعه باج و مهمسانی به طراحی شبکه خطوط حمل و نقل همگانی پرداخته‌است، الگوریتم ورود زوج گره به مسیر<sup>[10]</sup> است که توسط موتون و اورکوهارت پیشنهاد شده‌است. این الگوریتم نیز با هدف توسعه کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ و مقصد با تقاضای بیشینه پیشنهاد شده‌است. تفاوت دو الگوریتم اشاره شده در روش توسعه الگوریتم است به‌صورتی که در الگوریتم PIA برای توسعه مسیر، ورود مبدأ و مقصد به مسیر اولیه پیشنهاد شده‌است. جواب مسأله طراحی در روش دوم یکی از دو حالت زیر است:

- 1- کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد انتخابی
  - 2- مسیری که در اثر ورود مبدأ- مقصدی با بهترین مقدار تابع هدف به مسیر تشکیل می‌شود.
- توسعه در این الگوریتم، با فرض این‌که مسیر ابتدایی دارای  $n$  گره باشد، در یکی از دو حالت زیر صورت می‌گیرد:
- 1- یکی از گره‌ها عضو مسیر ابتدایی باشد
- در این حالت گره مزبور می‌تواند در،  $n+1$  حالت در مسیر، بین دو گره متوالی از مسیر وارد شود.
- 2- هیچکدام از گره‌ها در مسیر ابتدایی نباشد.
- در این حالت هر دو گره در  $n+1$  حالت در مسیر وارد می‌شوند و در بین این حالات مسیری با کمترین هزینه به عنوان مسیر نهایی انتخاب می‌شود.

اندکی از مطالعات از جمله لی و ووچیک [Lee and Vuchic, 2005] و اوکوسوری و پاتیل [Ukkusuri and Patil, 2009] طراحی شبکه را با تقاضای متغیر انجام دادند. برای حل مسائلی از نوع طراحی شبکه چند رویکرد وجود دارد. دسته اول روش‌هایی هستند که جواب دقیقی برای مسأله پیدا می‌کنند، این روش‌ها برای شبکه‌های بزرگ از نظر محاسباتی پیچیده بوده و استفاده از آن‌ها در مسائل بزرگ مسیر نیست. مطالعاتی از جمله فراهانی و همکاران [Farahani et al, 2013]، باج و مهمسانی [Baaj and Mahmassani, 1991] به این نکته اشاره داشته‌اند که ساختار غیرخطی و غیرمحدب و ماهیت چندگانه اهداف برای مسائل طراحی شبکه حمل و نقل همگانی، باعث آن شده که استفاده از روش‌های کلاسیک پاسخ‌گوی حل این مسائل نباشند. از این رو هنگامی که صحبت از طراحی شبکه حمل و نقل همگانی در اندازه واقعی- که در آن پارامترهای زیادی باید در نظر گرفته شود- می‌شود، این رویکردها خیلی خوب جواب نمی‌دهند [Afandizadeh et al, 2001]. روش‌های دیگری نیز وجود دارند که مسأله را به صورت تقریبی حل می‌کنند و از راه‌های ابتکاری به حل مسأله می‌پردازند. الگوریتم- های ابتکاری و فراابتکاری در چند دهه گذشته برای حل بسیاری از مسائل طراحی شبکه مورد استفاده قرار گرفتند. از جمله مطالعات [Ashtiani and Hejazi, 2001]، سپیریانی و همکاران [Cipriani et al. 2012]، تام و موهان [Tom and Mohan, 2003] که بیشتر این روش‌ها با انتخاب مجموعه‌ای از مسیرها به‌عنوان مسیر اولیه شکل گرفته و سپس از میان آن‌ها زیرمسیرهای بهینه به عنوان مسیرهای شبکه انتخاب می‌شوند. در تعدادی از این مطالعات، روش کوتاه‌ترین مسیر برای توسعه مسیر اولیه استفاده شده‌است، از جمله بکستر و همکاران [Baxter et al. 2014]، اسدی و سدر [Asadi and Ceder, 2011] فن و مکمهل [Fan and Machemehl, 2006]. در تعدادی دیگر نیز مانند مطالعه انگامچی و لاو [Ngamchai and Lovell, 2003] طراحی بر پایه انتخاب گره‌های همسایه به شبکه انجام می‌شود. الگوریتم ابتکاری در این مطالعه بر پایه الگوریتم تولید مسیر پیشنهادی توسط باج و مهمسانی شکل گرفته است. در این

با در نظر گرفتن این شرط برای هر زوج مبدأ-مقصد، کوتاه‌ترین مسیر بین آن‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کند که کمترین مقدار را برای شرط انتخاب داشته باشد.

محدودیت‌های طراحی به صورت زیر است:

۱- مجموعه مسیرهای شکل گرفته باید تقاضای کمینه را برای جابه‌جایی کاربران بدون انتقال خط پوشش دهد.

$$\sum_{r \in R} d(r) > D_{\min} \quad (2)$$

که در آن  $(D_{\min})$  کمینه پوشش مورد انتظار از شبکه برای جابه‌جایی کاربران بدون انتقال خط است.

۲. هرکدام از مسیرهایی که از ایجاد تغییرات در کوتاه‌ترین مسیر (زیرمسیرها) تشکیل می‌شوند باید در سه محدودیت زیر صدق کنند:

الف: زمان سفر کمینه و بیشینه

$$t_{\min} < t(r) < t_{\max} \quad (3)$$

که در آن  $t_{\min}$  و  $t_{\max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه زمان سفر مجاز برای زیرمسیرها هستند.

ب: مستقیم بودن مسیر

$$\frac{t(r)}{t(\text{shortestpath})} < r \quad (4)$$

این محدودیت از مجموعه محدودیت‌ها، شرطی برای جلوگیری از چرخش بیش از اندازه مسیر در شبکه برای جذب تقاضای بیشتر است و نسبت  $r$  بیشینه مقداری است که برای نسبت زمان سفر زیرمسیرها به زمان سفر کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ-مقصد، در نظر گرفته می‌شود.

ج: کوتاه‌ترین زمان بین هر دو گره از مسیر

$$\frac{t(r,i,j)}{t(\text{shortestpath},i,j)} < r \quad \forall (i,j) \in R \quad (5)$$

۲- مسیر نهایی برای ورود به مجموعه مسیرهای شبکه  $(R)$  نباید

زمانی کمتر از کمینه زمان سفر مجاز داشته باشد:

با تشکیل مسیر نهایی هزینه مسیر با هزینه کوتاه‌ترین مسیر مقایسه می‌شود و در صورتی به عنوان مسیر نهایی بین مبدأ-مقصد انتخابی برگزیده می‌شود که هزینه کمتری نسبت به آن‌ها داشته باشد.

یکی از مشکلات موجود در هر دو مطالعه بالا، در نظر نگرفتن شرط فاصله برای ورود گره به مسیر است. ورود گره منتخب به گره‌هایی از مسیر که در فاصله زیادی از آن قرار دارند در واقعیت امکان‌پذیر نبوده و تنها باعث افزایش زمان اجرای برنامه می‌شود.

### ۳. طراحی شبکه حمل و نقل همگانی

شبکه حمل و نقل همگانی به صورت مجموعه‌ای از کمان‌ها و گره‌ها تعریف می‌شود. در این مطالعه شرط انتخاب مسیر به صورت نسبت زمان سفر کاربران در یک مسیر به پوشش تقاضای مسیر تعریف می‌شود. داده‌های این مسأله به صورت ماتریس‌های تقاضا و زمان سفر بین تمام گره‌های شبکه و ماتریس شبکه تعریف می‌شوند.

در مسأله پیش‌رو  $d_{ij}$  و  $t_{ij}$  به ترتیب نشان‌دهنده تقاضا و زمان سفر بین گره  $i$  و گره  $j$  است و مجموعه مسیرها نیز با  $R$  نمایش داده می‌شود. در این مسأله تقاضایی از شبکه که مسیر  $r$  پوشش می‌دهد با  $d(r)$  و زمان سفر آن با  $t(r)$ ، زمان سفر بین دو گره  $(i,j)$  در مسیر  $r$  با  $t(r,i,j)$  و زمان کوتاه‌ترین مسیر بین این دو گره با  $t(\text{shortestpath},i,j)$  نمایش داده می‌شود.

معیار طراحی در این الگوریتم بهینه‌سازی شرایط برای گردانندگان شبکه و کاربران آن است. به همین منظور شرط انتخاب مسیرها به صورت کمینه کردن نسبت زمان سفر مسیر به تقاضای پوشش داده شده تعریف می‌شود.

شرط انتخاب مسیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

## ارائه یک روش ابتکاری برای طراحی خطوط شبکه حمل و نقل همگانی با استفاده از الگوریتم تولید مسیر

$$t_{finalpath} > t_{min} \quad (6)$$

و مسیرهای حاصل از طراحی به عنوان تنها خطوط شبکه

مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در الگوریتم پیشنهادی پس تشکیل کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد با تقاضای بالا، تلاش می‌شود تا گره‌های منتخب برای هر مسیر را به آن وارد کند و در ادامه بهترین حالت از ورود گره‌های منتخب به مسیر اولیه را به عنوان مسیر نهایی<sup>۱</sup> اعلام می‌کند. مجموعه گره‌های منتخب برای هر مسیر شامل گره‌هایی می‌شوند که از آن مسیر در فاصله ی ۱ کمان قرار دارند. ورود گره‌ها به مسیر نیز به این صورت است که گره منتخب در یکی از سه حالت زیر به گره‌ای که در فاصله ی ۱ از آن قرار دارد (گره  $i$ ) مرتبط شود و برای ورود بین دو گره از کوتاه‌ترین مسیر بین منتخب و هر کدام از گره‌ها استفاده می‌شود.

۱- اگر گره  $i$  مبدأ مسیر اولیه باشد، گره منتخب می‌تواند:

۱-۱- قبل از گره  $i$  وارد مسیر شود.

۲-۱- بین گره  $i$  و گره بعد از آن یعنی گره  $i+1$  ام مسیر

وارد شود.

۳-۱- بین گره  $i$  و دو گره بعد از آن یعنی گره  $i+2$  ام

مسیر وارد شود.

۲- اگر گره  $i$  مقصد مسیر اولیه باشد، گره منتخب می‌تواند:

۱-۲- بین گره  $i$  و گره قبل از آن یعنی گره  $i-1$  ام

مسیر وارد شود.

۲-۲- بین گره  $i$  و دو گره قبل از آن یعنی گره  $i-2$  ام

مسیر وارد شود.

۳- اگر گره  $i$  میانی از مسیر اولیه باشد، گره منتخب می‌تواند

بین دو گره زیر در مسیر وارد شود (شکل ۱).

۱-  $(i-1)$  و  $(i-2)$ ، ۲-  $(i-2)$  و  $(i-1)$ ، ۳-  $(i+1)$  و  $(i-1)$ ، ۴-  $(i+2)$  و  $(i-1)$

، ۵-  $(i+1)$  و  $(i-1)$ ، ۶-  $(i+1)$  و  $(i-2)$ ، ۷-  $(i+2)$  و  $(i-1)$ ، ۸-  $(i-2)$  و

$(i+2)$

که در آن  $t_{finalpath}$  زمان سفر مسیر نهایی پس از اعمال تمام تغییرات در کوتاه‌ترین مسیر و  $t_{min}$  کمینه زمان سفر مجاز مسیرهای شبکه است.

در حالت‌هایی از طراحی که کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ و مقصد دچار تغییر می‌شوند، نیاز است که فاصله زمانی بین هر دو گره بویژه فاصله مبدأ و مقصد جدید در مسیر بررسی شود. این فاصله با نسبت طول هر دو گره از مسیر به کوتاه‌ترین مسیر بین آن دو گره بیان می‌شود.

الگوریتم‌های بسیاری در مطالعات پیشین از روش‌های کوتاه‌ترین مسیر برای طراحی خطوط شبکه حمل و نقل همگانی استفاده کرده‌اند. ایجاد مسیر در این الگوریتم برای زوج گره با تقاضای بیشتر در اولویت قرار دارد، به این صورت که الگوریتم به ایجاد مسیر بین گره‌هایی با تقاضای بیشتر می‌پردازد و تا جایی مسیرهای جدید به شبکه اضافه می‌کند که محدودیت‌های مسأله برقرار شوند. برای طراحی در الگوریتم پیشنهادی فرض‌هایی به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

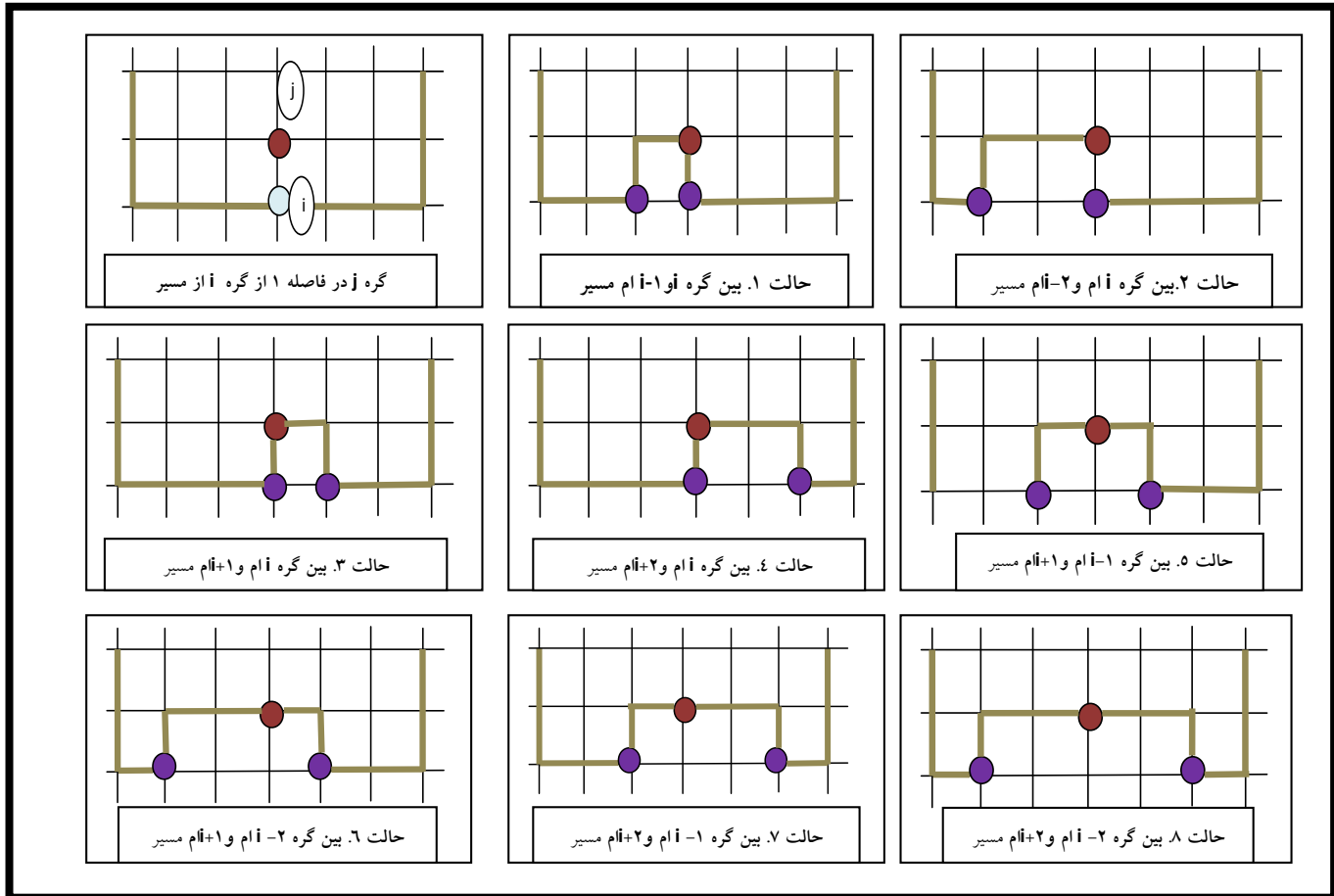
۱- تقاضا در کمان‌های شبکه تحت اثر شرایط طراحی و مسیر قرار ندارد. تقاضای مبدأ- مقصد به صورت ماتریس تقاضا موجود است.

۲- زمان سفر کمان‌ها در طول مراحل طراحی ثابت فرض می‌شود و اثراتی مانند تراکم در کمان‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند.

۳- اثر زمان‌بندی و برنامه‌ی حرکتی اتوبوس‌ها در مرحله طراحی در نظر گرفته نمی‌شود.

۴- در طراحی هر مسیر از یک کمان تنها یک بار می‌توان استفاده کرد.

۵- طراحی در این مطالعه برای ایجاد مجموعه‌ای از خطوط در شبکه گره و کمان‌هاست که مسیری بین آن‌ها موجود نبوده



شکل ۱. بهبود مسیر نوع ۱ برای گره مجاور یک گره از مسیر

در ۳ حالت مجزا بین ترکیب دوتایی از این کره‌ها وارد می‌شود. پس از ورود گره به مسیر در هرکدام از این سه حالت، مسیر حاصل از حالتی که کمترین مقدار را برای شرط انتخاب مسیر داشت به‌عنوان مسیر نهایی انتخاب می‌شود.

در مراحل تشکیل هرکدام از این زیرمسیرها، کوتاه‌ترین مسیر نیز به‌عنوان گزینه برتر مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورتی که مقدار شرط انتخاب برای زیرمسیر از آن کمتر بود به‌عنوان مسیر نهایی در این بخش (مسیر کاندیدا) انتخاب می‌شود. با شکل گرفتن مسیر نهایی با ورود گره اول از مجموعه گره‌های منتخب، این مجموعه به‌روز می‌شود. مجموعه‌ای برای گره‌های با فاصله ۱ از مسیر جدید تشکیل می‌شود و اشتراک آن با مجموعه‌ای از

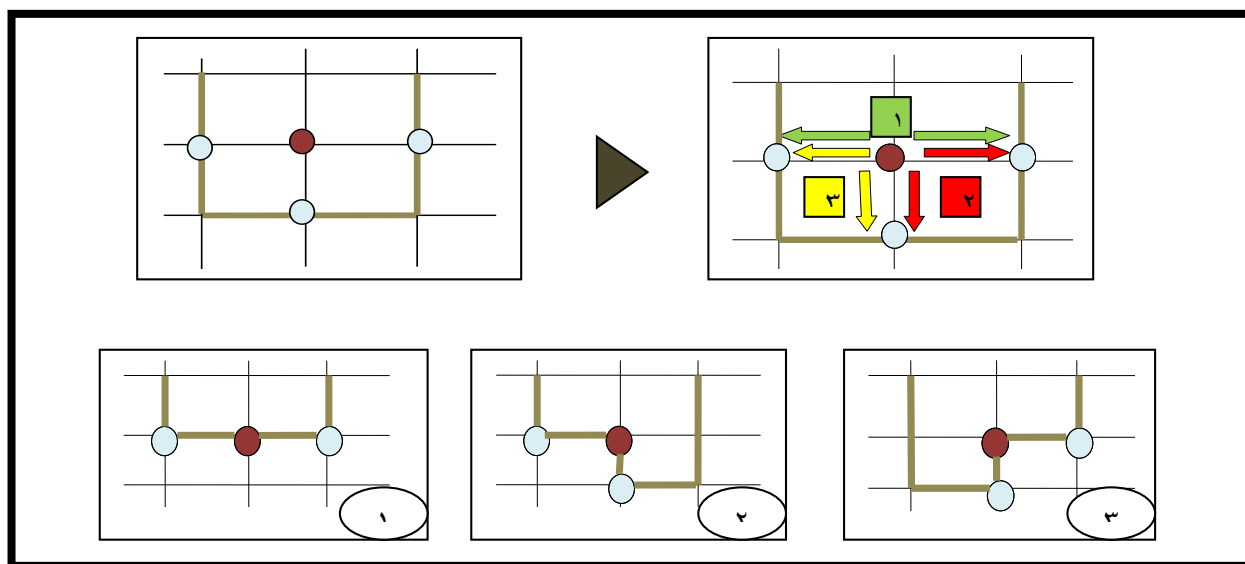
حالت دیگر ورود گره منتخب به کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد زمانی است که گره منتخب از دو (یا بیشتر) گره از مسیر اولیه در فاصله یک کمان باشد در این حالت گره بین آن دو گره از مسیر وارد شده و در انتها بهترین حالت برای ورود که کمترین مقدار را برای شرط انتخاب مسیر، همان نسبت زمان سفر مسیر به پوشش تقاضای آن، دارد به‌عنوان مسیر نهایی انتخاب می‌شود. ورود گره منتخب بین دو گره از مسیر با پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر بین گره منتخب با هرکدام از این دو گره و حذف کمان‌های اولیه بین آن‌ها، به منظور جلوگیری از تشکیل حلقه در مسیر صورت می‌گیرد. در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود که گره با رنگ بنفش ۳ گره از مسیر در فاصله یک کمان قرار دارد (گره‌های آبی رنگ) و

## ارائه یک روش ابتکاری برای طراحی خطوط شبکه حمل و نقل همگانی با استفاده از الگوریتم تولید مسیر

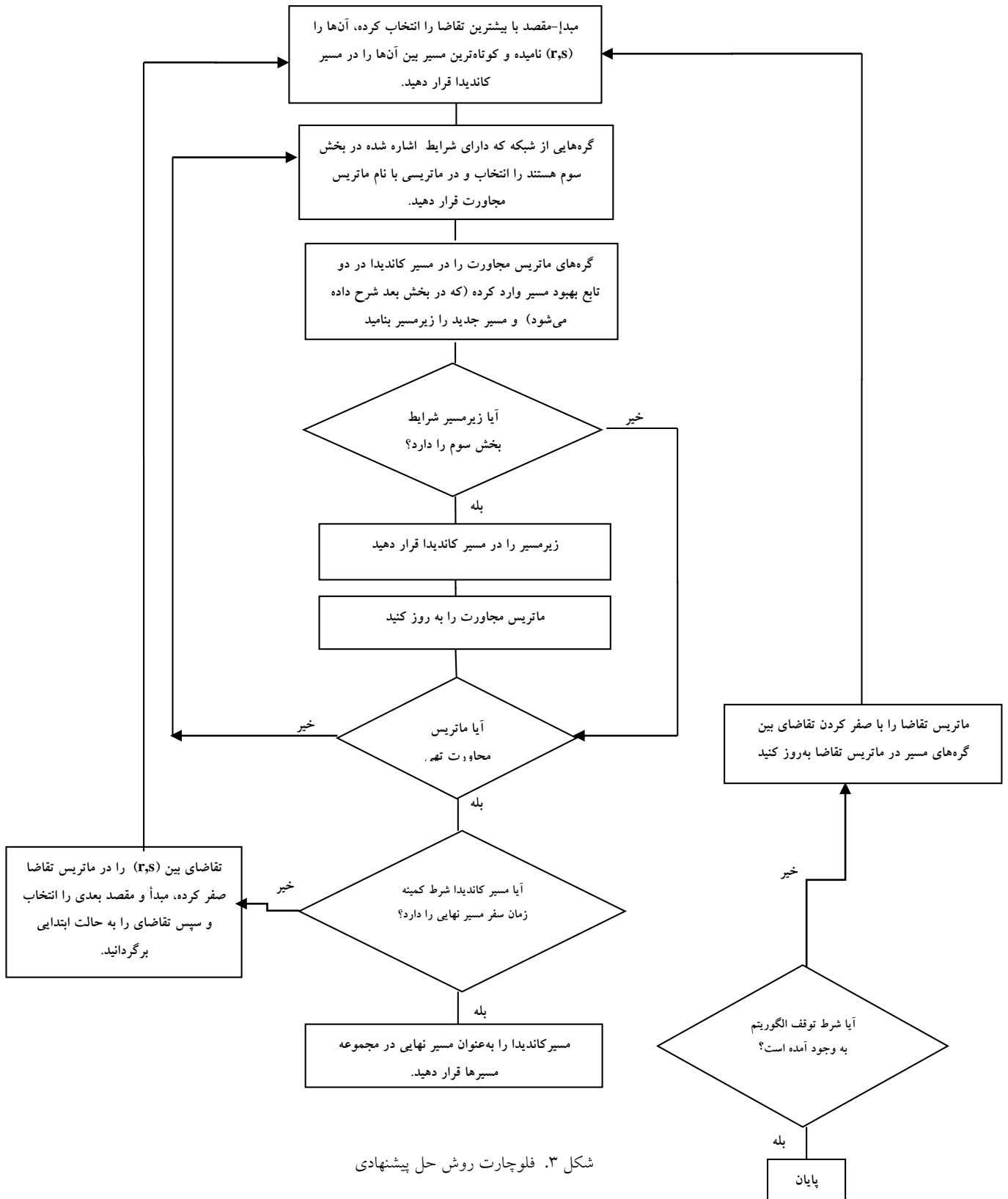
کاندیداً) باید برای شرط کمینه زمان سفر مسیر مورد ارزیابی قرار گیرد. در صورت برقراری شرط کمینه زمان سفر برقرار بود مسیر به شبکه اضافه شده و در غیر این صورت مبدأ و مقصد بعدی، با بیشترین تقاضا، مورد بررسی قرار می گیرند.

روش حل پیشنهادی در این مطالعه با نرم افزار MATLAB در زمان های اجرای میانگین ۱۵ دقیقه پیاده سازی شد. برای این پیاده سازی روش حل توابعی مجزا برای بدنه ی کد، که مسیرهای نهایی شبکه را به عنوان خروجی چاپ می کند، و هرکدام از دستورهای بهبود مسیر نوشته شد. فلوچارت روش حل پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.

گره های منتخب که برای کوتاه ترین مسیر (مسیر اولیه) تشکیل شده بود به عنوان مجموعه جدید برای گره منتخب مورد استفاده قرار می گیرد. با ورود گره منتخب به مسیر اولیه و تشکیل مسیر جدید، این مسیر برای مرحله بعد به عنوان مسیر اولیه مورد استفاده قرار می گیرد و گره بعدی باید بین گره های این مسیر وارد شود. در این مرحله همان طور که در مفروضات مسأله عنوان شده است تمام تقاضای مربوط به گره های مسیر پوشش داده شده و در نتیجه برای تشکیل مسیرهای جدید باید از تقاضای مربوط به این گره ها صرف نظر کرد. به روز شدن تقاضا در این مرحله به معنی حذف این مقادیر از ماتریس تقاضا برای تکرارهای بعدی الگوریتم است. با پایان بهبود مسیر با ورود گره منتخب به آن و بررسی شروط پذیرش مسیر و انتخاب مسیر، مسیر نهایی (مسیر



شکل ۲. بهبود مسیر نوع ۲ برای گره ای از شبکه در مجاورت بیشتر از دو گره از مسیر



شکل ۳. فلوچارت روش حل پیشنهادی



#### ۴. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی شبکه

##### سوفالز

شبکه سوفالز دارای ۲۴ گره و ۷۶ کمان دو جهته است. طراحی مسیر برای این شبکه با در دست داشتن داده‌های تقاضا و زمان سفر انجام شده و برای محدودیت‌های مسئله (بخش ۳) تحلیل حساسیت صورت گرفت. در جدول ۱ یک تکرار از حلقه اول الگوریتم و در جدول ۲ و ۳ نتایج حاصل از تغییر پارامترهای مسئله نمایش داده شده است.

در جدول ۱ سه حالت اشاره شده برای ورود گره به‌قرار زیر است:

۱- حالت اول برای زمانی است که گره در فاصله ۱ از دو گره از مسیر دارد و بین آن دو گره وارد می‌شود.

۲- حالت دوم برای ورود گره در ۸ موقعیت حالت دوم ورود گره (شکل ۱) است.

۳- حالت سوم برای ورود گره در ابتدا با انتهای مسیر ابتدایی است.

با به‌روز شدن گره‌های مجاور که در مرحله بعد گره‌های ۸ و ۹ و ۱۱ و ۱۵ و ۱۸ هستند، گره با بیشترین تقاضا به گره‌های مسیر که گره ۱۵ است، برای ورود به مسیر در سه حالت اشاره شده انتخاب می‌شود. حالت اول برای ورود گره ۱۵ به مسیر برقرار نیست،

بنابراین بین گره‌های (۱۰ و ۱۶)، (۱۷ و ۱۰)، (۱۷ و ۱۶) و پیش از گره ۱۰ به مسیر وارد می‌شود.

با تشکیل هر کدام از مسیرهای بالا شرط پذیرش مسیر بررسی شده و اگر مورد قبول بود مقدار شرط انتخاب آن با سایر مسیرهای پذیرفته شده و همچنین کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد مقایسه می‌شود و در نهایت مسیری با کمترین مقدار برای شرط انتخاب مسیر برای آن مبدأ- مقصد به‌عنوان مسیر نهایی انتخاب می‌شود.

در این مقاله مقدار ۲۰ برای  $t_{min}$  به‌عنوان کمینه زمان سفر مجاز مسیر نهایی انتخاب شد که اساس انتخاب آن بر مقدار تقریبی قطر زمانی شبکه بوده‌است. همچنین تلاش شده اثر مورد سوم از محدودیت دوم، کوتاه‌ترین زمان بین هر دو گره از مسیر را در نتایج طراحی نشان داد. مقدار یک برای این نسبت همان کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ و مقصد است و نسبت دو نیز برای مسیر طولانی به‌نظر می‌رسد. از این‌رو در این مقاله دو مقدار  $1/8$  و  $1/2$  که مابین این دو حالت هستند برای نسبت زمان سفر هر دو گره از مسیر به زمان کوتاه‌ترین مسیر بین آن دو گره در نظر گرفته شده است.

برای بررسی اثر این شروط، سناریوهایی برای بررسی میزان اثرگذاری این شروط به تنهایی و با هم برای جواب مسئله تعریف شده‌است.

جدول ۱. مثالی برای حالات ورود گره به مسیر (فرض  $\Gamma = 1.8$ )

مبدأ- مقصد	مسیر ابتدایی	زمان سفر همگانی	گره‌های منتخب	گره با بیشترین تقاضا به مسیر	تشکیل زیر مسیرها	پذیرش مسیر
با بیشترین تقاضا	مسیر ابتدایی	زمان سفر همگانی	گره‌های منتخب	گره با بیشترین تقاضا به مسیر	حالت ورود گره به مسیر	در حالت وارد شده
			۸ و ۹ و ۱۱	۱	۱۰-۱۷-۱۶	پذیرفته
(۱۰ و ۱۶)	۱۰-۱۶	۴	۱۸ و ۱۷ و ۱۵	۲	۱۰-۱۶-۱۷	پذیرفته نیست
				۳	۱۷-۱۰-۱۶	پذیرفته نیست

در سناریو شماره یک حالتی مشابه به الگوریتم تولید مسیر باج و مهمسانی بدون شروط پیشنهادی در این مسأله و تنها با در نظر گرفتن حالات ورود گره به مسیر و بررسی شروط پذیرش و انتخاب مسیر عنوان شده است.

طراحی در این مقاله با ورودی‌هایی به صورت جدول ۲ در ۶ سناریو صورت گرفت.

برای مقایسه نتایج حاصل شده از سناریوهای تعریفی برای طراحی شبکه، شش پارامتر تعداد مسیرها در شبکه، میزان هم‌پوشانی مسیرها در شبکه بر حسب تعداد کمان، میزان هم‌پوشانی مسیرها در شبکه بر حسب مایل، طول کلی مسیرهای شبکه، پارامتر تکرار گره‌ها و میانگین نسبت زمان سفر مسیرهای نهایی در شبکه به کوتاه‌ترین مسیر آن مبدأ-مقصد برای مسیرهای شبکه در نظر گرفته شده است.

پارامتر تکرار گره‌ها در شبکه به صورت مجموع حاصل ضرب میزان موجود از هر گره در مسیرهای شبکه در تعداد تکرار آن در کل شبکه است که می‌توان آن را به صورت زیر نیز نشان داد:

$$(7) \quad \text{تعداد گره با آن تکرار} \times \text{تعداد هر تکرار} = \sum \text{تعداد تکرار گره‌های شبکه}$$

برای مثال در حالت اول اجرای برنامه (سناریو اول) ۱۱ گره در هیچ مسیری نبوده‌اند به این معنی که ۰ تکرار داشته‌اند و ۷ گره با یک تکرار، ۴ گره با دو تکرار در مسیرها و برای هر کدام از تعداد تکرارهای ۱۱ و ۴ و ۵ و ۳ تنها یک گره بوده‌اند که در مجموع ۳۸ تکرار در شبکه حاصل شده است.

میزان هم‌پوشانی در این مطالعه به صورت تعداد کمان‌هایی است که در مسیرهای شبکه بیش از یک بار تکرار شده‌اند. استفاده بیش از اندازه از یک کمان در مسیرهای متعدد یا اشتراک زیاد دو یا چند مسیر در کمان‌های تشکیل دهنده آنها از نشانه‌های ضعف طراحی به‌شمار می‌آید. همچنین برای این طراحی میزان پوشش حداقل تقاضا ۳۰ درصد کل تقاضای مستقیم شبکه، بدون انتقال خط، در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مقادیر مفروض برای ورودی‌های شبکه سوزالز (  $t_{min}=t_0=20, t_{max}=30$  )

نسبت $\Gamma$	شماره سناریو	شرط اول	شرط دوم
	(مسیر)	(شرط حداقل زمان سفر)	(شرط فاصله هر دو گره از مسیر)
۱/۲	۱	×	×
۱/۲	۲	×	✓
۱/۲	۳	✓	×
۱/۲	۴	✓	✓
۱/۸	۵	✓	×
۱/۸	۶	✓	✓

ارائه یک روش ابتکاری برای طراحی خطوط شبکه حمل و نقل همگانی با استفاده از الگوریتم تولید مسیر

جدول ۳. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای مقادیر متفاوت داده‌های ورودی

شماره سناریو	تعداد مسیر	تعداد کمان	طول	طول کل مسیرها (مایل)	تکرار گره‌ها در شبکه*	xz
۱	۱۴	۱۰	۶۶	۱۰۱	۳۸	۱
۲	۱۴	۱۰	۶۶	۱۰۱	۳۸	۱
۳	۶	۱۶	۸۹	۱۳۴	۳۹	۱/۰۷
۴	۶	۱۶	۷۵	۱۲۹	۳۸	۱/۰۴
۵	۳	۰	۰	۹۵	۱۸	۱/۳۶
۶	۴	۶	۲۲	۸۷	۲۵	۱/۲۳

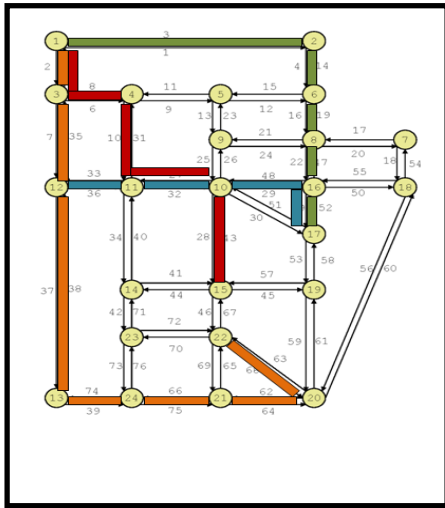
\* مجموع حاصل ضرب میزان موجود از هر گره در مسیرهای شبکه در تعداد تکرار آن در کل شبکه

بیشترین تقاضا در شبکه بین این دو گره که با فاصله یک کمان از هم قرار دارند، است).

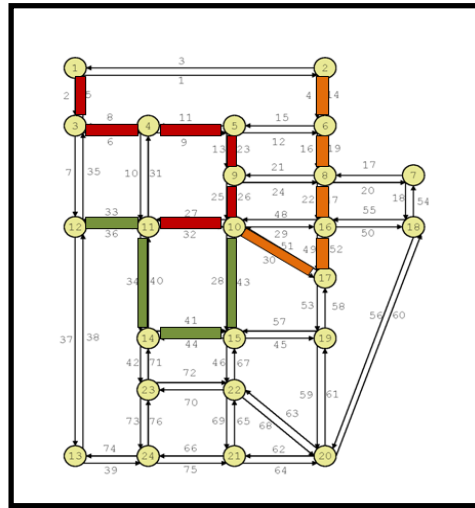
از طرفی در دو سناریوی ۵ و ۶ مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن نسبت ۱/۸ برای  $t$ ، اضافه شدن شرطی برای نسبت کمینه هر دو گره از مسیر نتایج مثبتی برای خروجی‌ها به دنبال ندارد و حذف این شرط در این سناریو بهترین حالت را برای پارامترهای مربوط به هم‌پوشانی مسیرها به دنبال دارد. این حالت را می‌توان نشان دهنده تقابل دو شرط برای کاربران و گرداندگان سیستم دانست.

به‌طور کلی نتایج برای مقدار ۱،۸ برای نسبت ۲ قابل قبول‌تر بوده و این موضوع نشان‌دهنده تأثیر منفی برای کاهش بازه محدودیت‌های مسأله است. نتایج برای مسیرهای سناریوهای پنجم و ششم مطابق شکل‌های ۴ الف و ب است:

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که برقرار نشدن شرط کمینه زمان سفر مسیر، جواب مناسبی برای شبکه نهایی حاصل از طراحی به دنبال ندارد و همان‌طور که در سناریوهای اول و دوم مشاهده می‌شود، در این دو شبکه ۱۴ مسیر وجود دارد که این تعداد برای پوشش ۳۰ درصد تقاضای بدون انتقال خط، رقم بالایی است. از طرفی سایر پارامترها از قبیل طول هم‌پوشانی و طول کل مسیرها در این دو سناریو نسبت به سناریوهای سوم و چهارم حدود ۲۵ درصد کمتر است که این موضوع را می‌توان با ستون آخر جدول ۳ توجیه کرد. همان‌طور که در ستون مربوط به میانگین نسبت زمان سفر مسیرهای نهایی به زمان کوتاه‌ترین مسیر مشاهده می‌شود، برای دو سناریوی اول این نسبت برابر ۱ بوده که این به معنی انتخاب کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد برای تعداد بالایی از زوج‌های شبکه به‌عنوان مسیر نهایی است. اضافه شدن کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد به شبکه با توجه به توزیع بالای تقاضا در شبکه سوفالز بین گره‌هایی با فاصله کم قابل انتظار است (مانند دو گره ۱۰ و ۱۶ که



۴.ب. شبکه حاصل از سناریو ششم



۴.الف. شبکه حاصل از سناریو پنجم

#### شکل ۴. نتایج الگوریتم پیشنهادی برای شبکه سوفالز

باعث بالارفتن دقت محاسبات و نزدیک شدن جواب مسأله به مقدار بهینه می‌شود. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم نشان می‌دهد که در تعداد کمی از تکرارها تمامی پارامترها مقدار مناسبی اختیار می‌کنند که این مسأله با اضافه شدن شروط جدید به مسأله تا میزان زیادی قابل حل است. همچنین اجرای الگوریتم بر روی شبکه سوفالز بیانگر این است که اعمال شرطی برای محدود شدن زمان سفر مسیر (که با کمینه زمان سفر مجاز مسیر عنوان شد)، در بهبود مسیرها مؤثر است، به طوری که در شرایط برابر مسأله تعداد مسیرها را از ۱۴ مسیر در سناریوی اول و دوم (که برای پوشش ۳۰ درصدی تقاضا تعداد زیادی است) به ۶ مسیر در سناریوی سوم و چهارم رسانده است. شرط دوم طراحی نیز در تنوری و با توجه به ساختار مسأله شرط مهمی برای طراحی به‌شمار می‌رود ولی نتایج پیاده‌سازی الگوریتم نشان می‌دهد که در شرایط خاص مسأله، حذف این شرط نتایج بهتری برای خروجی برنامه به‌دنبال دارد.

#### ۶. پی نوشتها

#### ۵. جمع‌بندی و پیشنهادها

توسعه جوامع شهری و رشد جمعیت به‌خصوص در کلان شهرها نقش مدیریت سیستم حمل و نقل را پررنگ‌تر می‌کند. مسیریابی مناسب برای شبکه به صورتی میسر می‌شود که بتواند رضایت کاربران شبکه و گرداننده سیستم را به دنبال داشته باشد. زمان سفر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در طراحی خطوط شناخته می‌شود و مطالعات بسیاری در زمینه بهینه‌سازی شبکه با استفاده از کوتاه‌ترین مسیرها در شبکه انجام گرفته‌است. در این مقاله نیز تلاش شده تا با پیشنهاد الگوریتم ابتکاری بتوان هم‌زمان با کاهش زمان سفر و افزایش پوشش تقاضا، از تشکیل مسیرهای زیاد در شبکه جلوگیری شود. الگوریتم با شکل گرفتن کوتاه‌ترین مسیر بین زوج مبدأ و مقصد شروع به کار کرده و با تشکیل مجموعه‌ای از گره‌ها با فاصله‌ی ۱ کمان از گره‌های مسیر و ورود گره‌ها در سه تابع متفاوت به مسیر ادامه پیدا می‌کند. در نظر گرفتن حالات متفاوت برای ورود گره به مسیر و شروط متفاوت برای پذیرش مسیر نهایی

large urban area” Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, Vol. 20, No. 1, pp. 3–14.

-Fan, W. and Machemehl, R. (2006a) “Optimal transit route network design problem with variable transit demand: A genetic algorithm approach”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 1, pp.40–51.

-Fan, W. and Machemehl, R. (2006b) “Using a simulated annealing algorithm to solve the transit route network design problem”, Journal of Transportation Engineering: Vol.132, No. 2, pp.122–132.

-Lee, Y.-J. and Vuchic, V. R. (2005) “Transit network design with variable demand”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 1, pp.1–10.

-Mauttone, A. and Urquhart, M. (2009) “A route set construction algorithm for the transit network design problem”, Computers & Operations Research, Vol. 36, No. 8, pp.2440-2449.

-Ngamchai, S. and Lovell, D. J. (2003) “Optimal time transfer in bus transit route network design using an genetic algorithm” Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 5, pp.510–521.

-Tom, V. M. and Mohan, S. (2003) “Transit route network design using frequency coded genetic algorithm”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 2, pp. 186–195.

-Ukkusuri, V. and Patil, G. (2009) “Multi-period transportation network design under demand uncertainty”, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 43, No. 6, pp. 625–642.

-Zanjirani Farahani, R., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y. and Rashidi, H. (2013) “A review of urban transportation network design problems”, European Journal of Operational Research, Vol. 229, No. 2, pp.281–302.

- 1- Dijkstra and Floyd-Warshall
- 2- Route Generation Design Algorithm (RGA)
- 3- Operator
- 4- Pair Insertion Algorithm (PIA)
- 5- Final path

## ۷. مراجع

- افندی زاده، شهریار، جوانشیر، حسن، الیاسی، رضا (۱۳۸۹) “طراحی خطوط شبکه اتوبوسرانی شهری با استفاده از روش جستجوی ممنوع”، مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره چهارم. ص ۱۳-۲۶.

- ذکایی آشتیانی، هدایت و حجازی، بهرنگ (۱۳۸۰) “کاربرد روش گرم و سرد کردن شبیه‌سازی شده در حل مسائل مکانیابی پایانه‌های شبکه اتوبوسرانی”، استقلال، سال ۲۰، شماره ۲، ص ۱۲۵-۱۴۰.

-Asadi Bagloee, S. and Ceder, A. (2011) “Transit-network design methodology for actual-size road networks” Transportation Research, Part B: Methodological, Vol.45, No. 10, pp.1787–1804.

-Baaj, M. H. and Mahmassani, H. S. (1991) “An AI-based approach for transit route system planning and design” Journal of Advanced Transportation: Vol.25, No.2, pp.187–210.

-Baxter, M., Elgindy, T., Ernst, A., Kalinowski, T. and Savelsbergh, M. (2014) “Discrete optimization incremental network design with shortest paths”, European Journal of Operational Research: Vol. 238, No. 3, pp.675–684.

-Cipriani, E., Gori, S. and Petrelli, M. (2012) “Transit network design: A procedure and an application to a

سید احسان سید ابریشمی، ایران خانزاد، امیرعلی زرین مهر، امیررضا ممدوحی

سید احسان سید ابریشمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل در سال ۱۳۸۴ را از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل از دانشگاه صنعتی شریف گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه ریزی حمل و نقل همگانی، ارزیابی پروژه های حمل و نقل و شبیه سازی در مهندسی حمل و نقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه تربیت مدرس است.



ایران خانزاد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-برنامه ریزی حمل و نقل در سال ۱۳۹۳ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، برنامه ریزی و طراحی شبکه حمل و نقل همگانی است.



امیرعلی زرین مهر، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشکده فنی دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل در سال ۱۳۹۰ را از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. در سال ۱۳۹۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، برنامه ریزی حمل و نقل همگانی، مدل ها و الگوریتم های تخصیص ترافیک، و طراحی شبکه است.



امیررضا ممدوحی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک (گرایش حرارت و سیالات) را در سال ۱۳۶۸ از دانشگاه صنعتی شریف، و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع، مهندسی سیستم های اقتصادی-اجتماعی (گرایش برنامه ریزی حمل و نقل) را در سال ۱۳۷۵ از مؤسسه عالی پژوهش در برنامه ریزی و توسعه اخذ نمود. در سال ۱۳۸۴ موفق به کسب درجه دکترای تخصصی در رشته مهندسی عمران (گرایش برنامه ریزی حمل و نقل) از دانشگاه صنعتی شریف گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه ریزی و مدیریت حمل و نقل، مدل سازی رفتاری و برآورد تقاضای حمل و نقل، مدل های رفتاری ایمنی حمل و نقل، مدل های انتخاب گسسته و مدل های کاربری زمین بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه تربیت مدرس است.

