ارائه یک روش ابتکاری برای طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل 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

دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۲۰ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۳

چکیده

طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی کارآمد، یکی از ابزارهای مؤثر مدیران شهری برای پاسخ‌گویی به نیاز جابجایی در شهرها است. کارآمدی شبکه حمل‌ونقل همگانی وابسته به شیوه طراحی آن است. طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی از مسائل پیچیده در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل همگانی در یک شهر، کارآمدی شبکه حمل‌ونقل همگانی آن شهر را افزایش می‌دهد. در این مقاله روش جدیدی برای طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی مبتنی بر این الگوریتم پیشنهاد می‌شود که معیار فاصله برای هر دو گره از مسیر و معیار کمینه زمان سفر را نیز درنظر 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 حمل‌ونقل همگانی بردارند.

واژه های کلیدی : تولید مسیر، حمل‌ونقل همگانی، طراحی شبکه

Archive of SID

www.SID.ir

۱. مقدمه

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 کارآیی زیاد و سرویس‌دهی مناسب، با درنظر 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 فلوید وارشال[۱] استفاده می‌کنند. در سالهای اخیر برای بهبود الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر، پیشتهادهایی عنوان شده است، مانند الگوریتم ابتکاری تولید مسیر[۲] 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 نظرگرفتن هزینه‌های گرداننده[۳] می‌پردازد. الگوریتم حل پیشنهادی به بررسی مجموعه‌ای 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 برروی 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

Archive of SID

www.SID.ir

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 etal, 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 حمل‌ونقل همگانی، باعث آن شده که استفاده از روش‌های کلاسیک پاسخ‌گوی حل این مسائل نباشند. از این‌رو هنگامی‌که صحبت از طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی در اندازه واقعی- که در آن پارامترهای زیادی باید در نظر گرفته شود- می‌شود، این رویکردها خیلی خوب جواب نمی‌دهند[Afandizadeh et al,]

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] ، سیپریانی 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 لاول [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 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 حمل‌ونقل همگانی پرداخته‌است، الگوریتم ورود زوج گره به مسیر 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 به‌صورتی‌که 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:

۱- کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد انتخابی

۲- 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:

۱- یکی از گره‌ها عضو مسیر ابتدایی باشد

در این حالت گره مزبور می‌تواند در، n+۱ حالت در مسیر، بین دو گره متوالی از مسیر وارد شود.

۲- هیچکدام از گره‌ها در مسیر ابتدایی نباشد.

در این حالت هر دو گره در n+۱ حالت در مسیر وارد می‌شوند و در بین این حالات مسیری با کمترین هزینه به عنوان مسیر نهایی انتخاب می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

با تشکیل مسیر نهایی هزینه مسیر با هزینه کوتاه‌ترین مسیر مقایسه می‌شود و در صورتی به‌عنوان 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 حمل‌ونقل همگانی

شبکه حمل‌ونقل همگانی به‌صورت مجموعه‌ای از کمان‌ها و گره‌ها تعریف می‌شود. در این مطالعه شرط انتخاب مسیر به‌صورت نسبت زمان سفر کاربران در یک مسیر به پوشش تقاضای مسیر تعریف می‌شود. داده‌های این مسأله به‌صورت 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 $t(shortestpath,i,j)$ نمایش داده می‌شود.

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

شرط انتخاب مسیر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min } Z = \frac{t(r)}{d(r)} \quad r \in R \qquad (۱)$$

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

محدودیت‌های طراحی به‌صورت زیر است:

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

$$\sum_{r\in R} d(r) > D_{min} \qquad (۲)$$

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

$$t_{min} < t_{(r)} < t_{ma} \qquad (۳)$$

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

ب: مستقیم بودن مسیر

$$\frac{t(r)}{t(shortestpath)} < r \qquad (٤)$$

این محدودیت از مجموعه محدودیت‌ها، شرطی برای جلوگیری از چرخش بیش از اندازه مسیر در شبکه برای جذب تقاضای بیشتر است و نسیت 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 هردوگره از مسیر

$$\frac{t(r,i,j)}{t(shortestpath,i,j)} < r \qquad \forall (i,j) \in r \qquad (۵)$$

۲- مسیر نهایی برای ورود به مجموعه مسیرهای شبکه (R) نباید زمانی کمتر از کمینه زمان سفر مجاز داشته باشد:

Archive of SID
www.SID.ir

$$t_{finalpath} > t_{min} \quad (٦)$$

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 هردو 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 حمل‌ونقل همگانی استفاده کرده‌اند. ایجاد مسیر در این الگوریتم برای زوج گره با تقاضای بیشتر در اولویت قرار دارد، به این‌صورت 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 به‌صورت زیر در نظرگرفته شده‌اند:

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

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

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

٤- 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 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 به‌عنوان مسیر نهایی اعلام می‌کند. مجموعه گره‌های منتخب برای هر مسیر شامل گره‌هایی می‌شوند که از آن مسیر در فاصله‌ی 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 فاصله‌ی ۱ از آن قرار دارد (گره i) مرتبط شود و برای ورود بین دو گره از کوتاه‌ترین مسیر بین منتخب و هرکدام از گره‌ها استفاده می‌شود.

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

۱-۱- قبل از گره iام وارد مسیر شود.

۱-۲- بین گره iام و گره بعد از آن یعنی گره i+۱ ام مسیر وارد شود.

۱-۳- بین گره iام و دو گره بعد از آن یعنی گره i+۲ ام مسیر وارد شود.

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

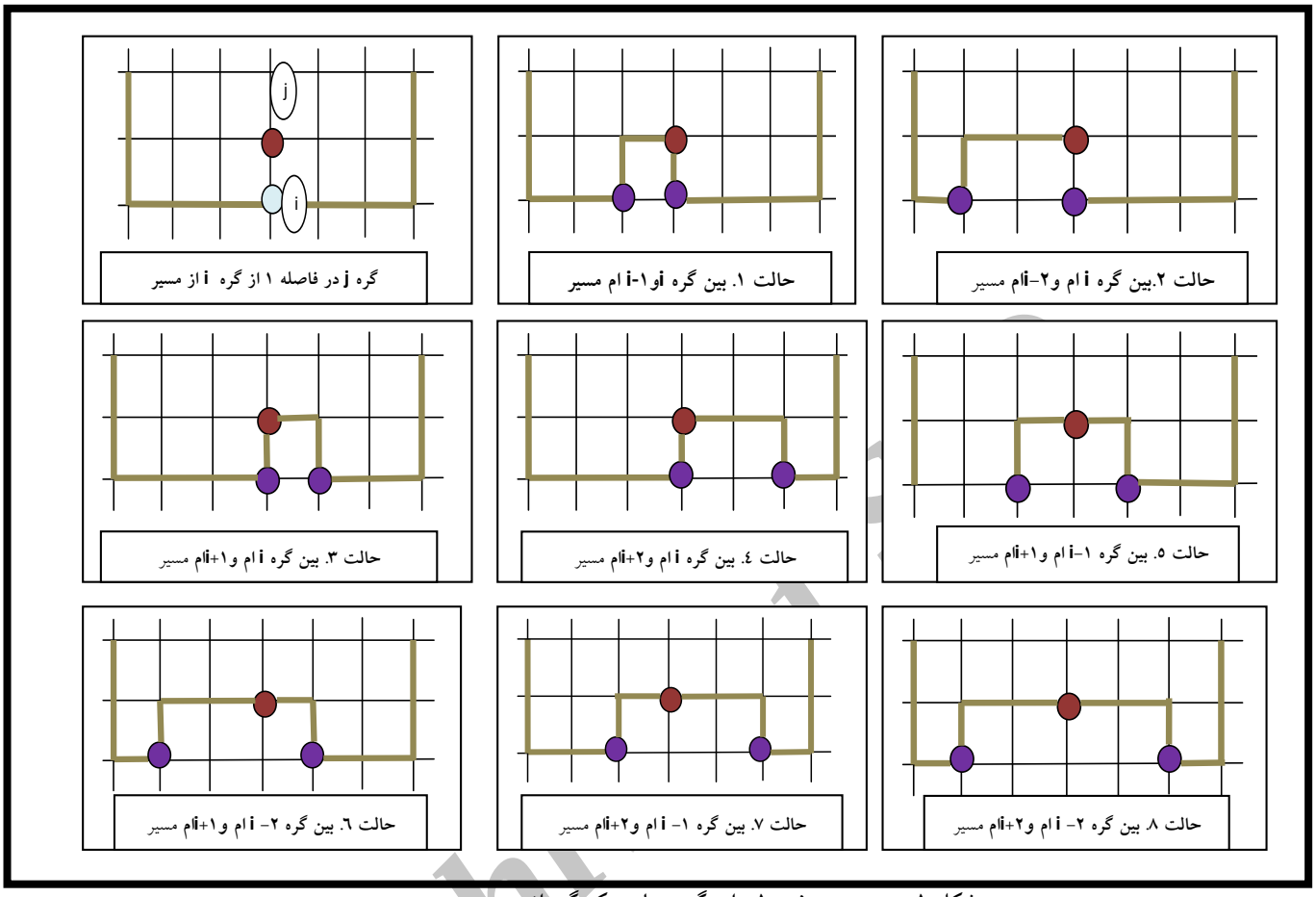
۲-۱- بین گره iام و گره قبل از آن یعنی گره i -۱ ام مسیر وارد شود.

۲-۲- بین گره iام و دو گره قبل از آن یعنی گره i -۲ ام مسیروارد شود.

۳- اگر گره i گره میانی از مسیر اولیه باشد، گره منتخب می‌تواند بین دو گره زیر در مسیر وارد شود (شکل ۱).

۱-(i و i-۱)، ۲- (i و i-۲)، ۳- (i و i+۱) ، ٤-(i و i+۲) ، ۵- (i-۱ و i+۱) ، ٦- (i-۲ و i+۱) ، ۷-(i-۱ و i+۲) ، ۸- (i-۲ و i+۲)

Archive of SID
www.SID.ir



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

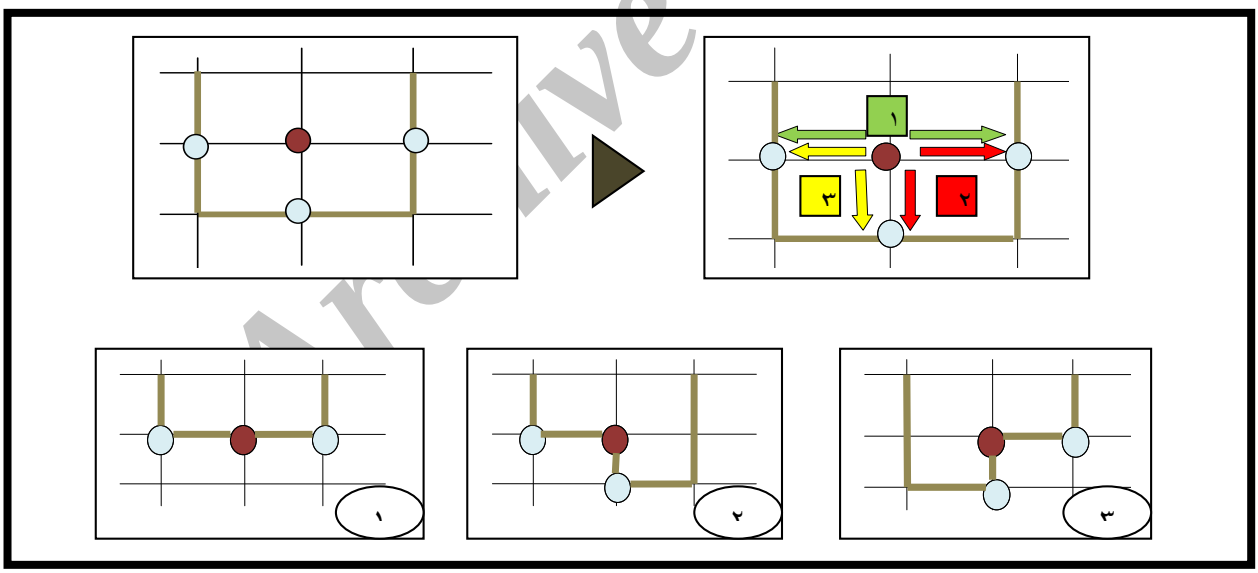
حالت دیگر ورود گره منتخب به کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ- مقصد زمانی است که گره منتخب از دو (یا بیشتر) گره از مسیر اولیه در فاصله یک کمان باشد در این حالت گره بین آن دو گره از مسیر وارد شده و در انتها بهترین حالت برای ورود که کمترین مقدار را برای شرط انتخاب مسیر، همان نسبت زمان سفر مسیر به پوشش تقاضای آن ، دارد به عنوان 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 در ۳ حالت مجزا بین ترکیب دوتایی از این کره‌ها وارد می- شود. پس از ورود گره به مسیر در هرکدام از این سه‌حالت، 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 صورتی‌که 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

www.SID.ir

گره‌های منتخب که برای کوتاه‌ترین مسیر(مسیر اولیه) تشکیل شده بود به‌عنوان مجموعه جدید برای گره منتخب مورد استفاده قرار می‌گیرد. با ورود گره منتخب به مسیر اولیه و تشکیل مسیر جدید، این مسیر برای مرحله بعد به‌عنوان مسیر اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد و گره بعدی باید بین گره‌های این مسیر وارد شود. در این مرحله همان‌طور که در مفروضات مسأله عنوان شده است تمام تقاضای مربوط به گره‌های مسیر پوشش داده شده و در نتیجه برای تشکیل مسیرهای جدید باید از تقاضای مربوط به این گره‌ها صرف نظر کرد. به‌روز 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 کاندیدا) 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 این‌صورت مبدأ و مقصد بعدی، با بیشترین تقاضا، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

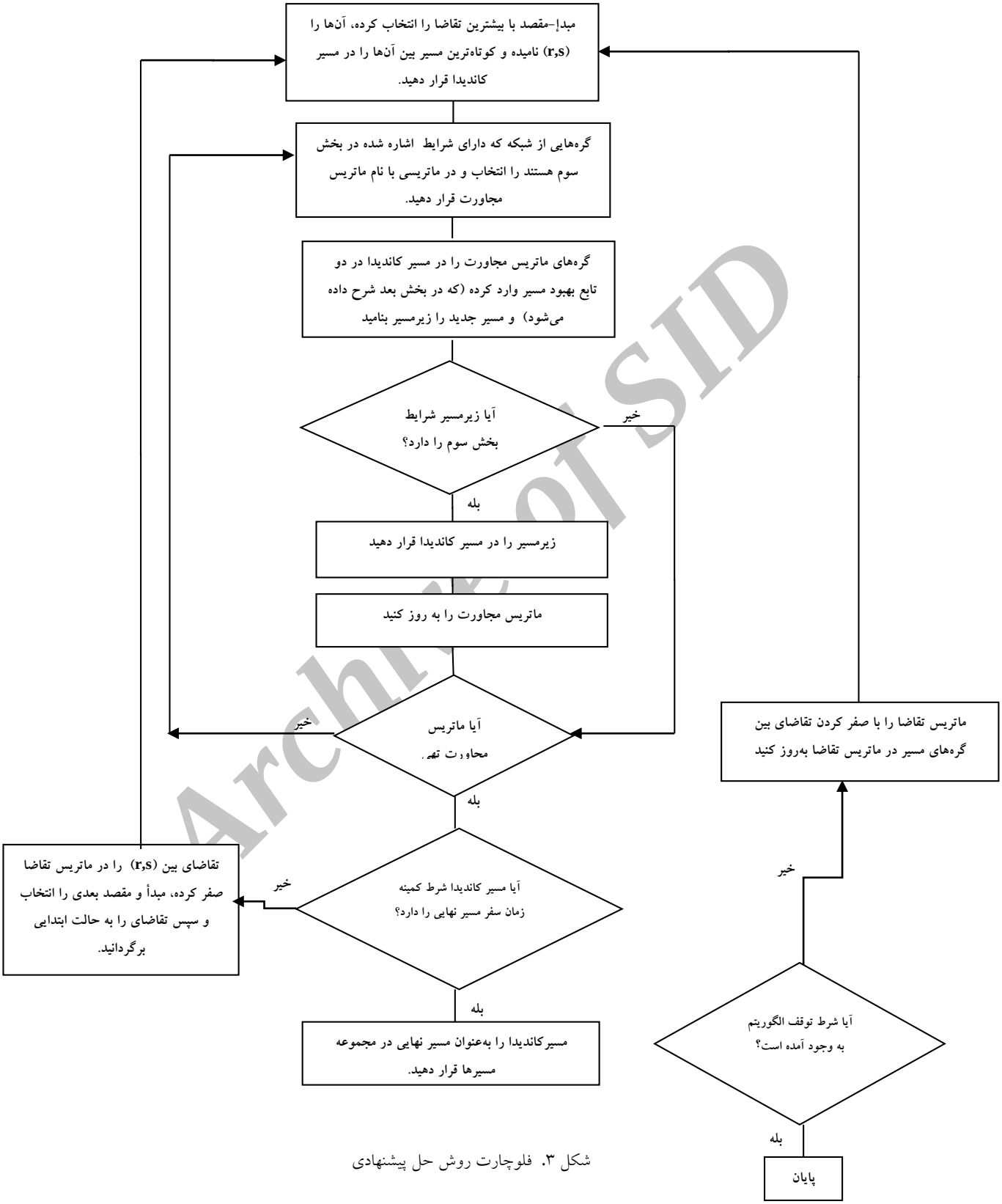
روش حل پیشنهادی در این مطالعه با نرم‌افزار MATLAB در زمان‌های اجرای میانگین ۱۵ دقیقه پیاده‌سازی شد. برای این پیاده‌سازی روش حل توابعی مجزا برای بدنه‌ی کد، که مسیرهای نهایی شبکه را به‌عنوان خروجی چاپ می‌کند، و هرکدام از دستورهای بهبود مسیر نوشته شد. فلوچارت روش حل پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است.



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

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳. فلوچارت روش حل پیشنهادی

Archive of SID
www.SID.ir

٤. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی شبکه سوفالز

شبکه سوفالز دارای ٢٤ گره و ٧٦ کمان دو جهته است. طراحی مسیر برای این شبکه با در دست‌داشتن داده‌های تقاضا و زمان سفر اتجام شده و برای محدودیت‌های مسأله (بخش ٣) تحلیل حساسیت صورت گرفت. در جدول ١ یک تکرار از حلقه اول الگوریتم و در جدول ٢ و ٣ نتایج حاصل از تغییر پارامترهای مسأله نمایش داده شده است.

در جدول ١ سه حالت اشاره شده برای ورود گره به‌قرار زیر است:

١- حالت اول برای زمانی است که گره در فاصله ١ از دو گره از مسیر دارد و بین آن دو گره وارد می‌شود.

٢- حالت دوم برای ورود گره در ٨ موقعیت حالت دوم ورود گره (شکل ١) است.

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

با به‌روز شدن گره‌های مجاور که در مرحله بعد گره‌های ٨ و٩ و ١١و١٥و ١٨ هستند، گره با بیشترین تقاضا به گره‌های مسیر که گره ١٥ است، برای ورود به مسیر در سه حالت اشاره شده انتخاب می‌شود. حالت اول برای ورود گره ١٥ به مسیر برقرار نیست، بنابراین بین گره‌های (١٠ و ١٦)، (١٠و١٧)، (١٦و١٧) و پیش از گره ١٠ 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 ٢٠ 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 هردوگره 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 ١/٨ و ١/٢ 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 مسأله تعریف شده‌است.

جدول ١. مثالی برای حالات ورود گره به مسیر (فرض ١٫٨ =r)

مبدأ- مقصد با بیشترین تقاضا	مسیر ابتدایی	زمان سفر همگانی	گره‌های منتخب	گره با بیشترین تقاضا به مسیر	تشکیل زیر مسیرها			پذیرش مسیر	مسیر نهایی
					حالت ورود گره به مسیر	زیرمسیر حاصل شده	زمان مسیر	در حالت وارد شده	
			٨ و٩و١١		١	١٠-١٧-١٦	١٠	پذیرفته	
(١٦و١٠)	١٠-١٦	٤	١٥و١٧و١٨	١٧	٢	١٠-١٦-١٧	٦	پذیرفته نیست	١٧-١٦-١٠
					٣	١٧-١٠-١٦	١٢	پذیرفته نیست	

Archive of SID
www.SID.ir

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 به‌صورت جدول۲ در ٦ 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 به‌صورت مجموع حاصل‌ضرب میزان موجود از هر گره در مسیرهای شبکه در تعداد تکرار آن در کل شبکه است که می‌توان آن را به‌صورت زیر نیز نشان داد:

$$\sum_{\text{تعداد تکرار گره‌های شبکه}} \text{تعداد گره با آن تکرار} \times \text{تعداد هر تکرار} \quad (۷)$$

برای مثال در حالت اول اجرای برنامه (سناریو اول) ۱۱ گره در هیچ مسیری نبوده اند به این معنی که ۰ تکرار داشته‌اند و ۷ گره با یک تکرار، ٤ گره با دو تکرار در مسیرها و برای هر کدام از تعداد تکرارهای ۱۱و٤ و۵ و۳ تنها یک گره بوده‌اند که در مجموع ۳۸ تکرار در شبکه حاصل شده است.

میزان هم‌پوشانی در این مطالعه به‌صورت تعداد کمان‌هایی‌است که در مسیرهای شبکه بیش از یک بار تکرار شده‌اند. استفاده بیش‌از 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 شده‌است.

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

شماره سناریو	شرط اول **(شرط حداقل زمان سفر مسیر)**	شرط دوم **(شرط فاصله هردو گره از مسیر)**	نسبت r
۱	×	×	۱/۲
۲	×	✓	۱/۲
۳	✓	×	۱/۲
٤	✓	✓	۱/۲
۵	✓	×	۱/۸
٦	✓	✓	۱/۸

Archive of SID
www.SID.ir

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

xz	تکرار گره‌ها در شبکه*	طول کل مسیرها (مایل)	طول هم‌پوشانی(مایل)	تعداد کمان مشترک در شبکه	تعداد مسیر	شماره سناریو
۱	۳۸	۱۰۱	٦٦	۱۰	۱٤	۱
۱	۳۸	۱۰۱	٦٦	۱۰	۱٤	۲
۱/۰۷	۳۹	۱۳٤	۸۹	۱٦	٦	۳
۱/۰۴	۳۸	۱۲۹	۷۵	۱٦	٦	٤
۱/۳۶	۱۸	۹۵	۰	۰	۳	۵
۱/۲۳	۲۵	۸۷	۲۲	٦	٤	٦

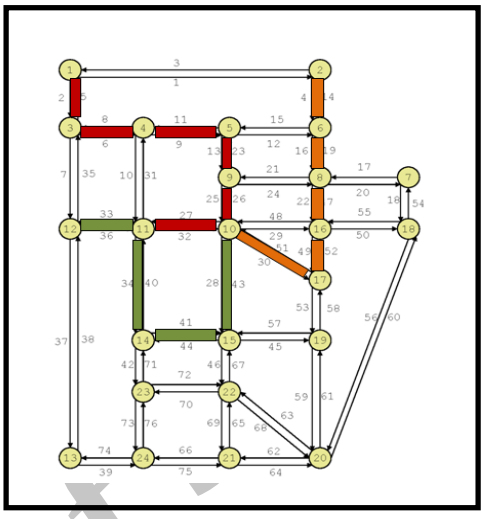
*** مجموع حاصل‌ضرب میزان موجود از هر گره در مسیرهای شبکه در تعداد تکرار آن در کل شبکه**

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که برقرار نشدن شرط کمینه زمان سفر مسیر، جواب مناسبی برای شبکه نهایی حاصل از طراحی به‌دنبال ندارد و همان‌طور که در سناریوهای اول و دوم مشاهده می‌شود، در این دو شبکه ١٤ 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 به‌معنی انتخاب کوتاه-ترین 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 ۱۰و١٦ که بیشترین تقاضا در شبکه بین این دو گره که با فاصله یک کمان از هم قرار دارند، است).

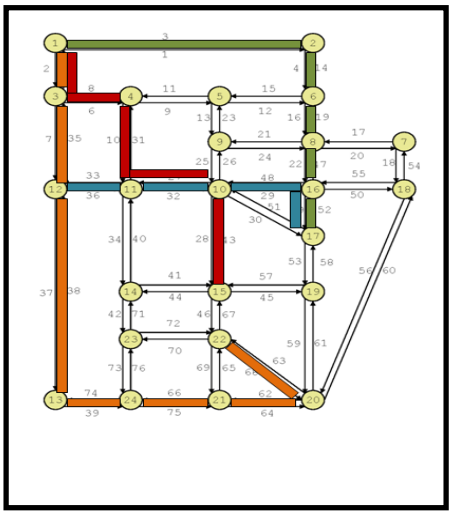
از طرفی در دو سناریوی ۵ و ٦ مشاهده می‌شود با درنظر گرفتن نسبت ۱/۸ برای r، اضافه شدن شرطی برای نسبت کمینه هردو گره ازمسیر نتایج مثبتی برای خروجی‌ها به‌دنبال ندارد و حذف این شرط در این سناریو بهترین حالت را برای پارامترهای مربوط به هم‌پوشانی مسیرها به‌دنبال دارد. این حالت را می‌توان نشان دهنده تقابل دو شرط برای کاربران و گردانندگان سیستم دانست.

به‌طور کلی نتایج برای مقدار ۱٫۸ برای نسبت r قابل قبول‌تر بوده و این موضوع نشان‌دهنده تأثیر منفی برای کاهش بازه محدودیت-های مسأله است. نتایج برای مسیرهای سناریوهای پنجم و ششم مطابق شکل‌های ٤ الف و ب است:

Archive of SID
www.SID.ir



٤.الف. شبکه حاصل از سناریو پنجم



٤.ب. شبکه حاصل از سناریو ششم

شکل ٤. نتایج الگوریتم پیشنهادی برای شبکه سوفالز

٥. جمع‌بندی و پیشنهادها

توسعه جوامع شهری و رشد جمعیت به‌خصوص در کلان شهرها نقش مدیریت سیستم حمل‌و نقل را پررنگ‌تر می‌کند. مسیریابی مناسب برای شبکه به‌صورتی 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 زمینه‌ی بهینه‌سازی شبکه با استفاده از کوتاه-ترین 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 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 برروی 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، به‌طوری که در شرایط برابر مسأله تعداد مسیرها را از ١٤ مسیردر سناریوی اول و دوم (که برای پوشش ٣٠ درصدی تقاضا تعداد زیادی است) به ٦ مسیر در سناریوی سوم و چهارم رسانده است. شرط دوم طراحی نیز در تئوری و با توجه به ساختار مسأله شرط مهمی برای طراحی به‌شمار می‌رود ولی نتایج پیاده-سازی الگوریتم نشان می‌دهد که در شرایط خاص مسأله، حذف این شرط نتایج بهتری برای خروجی برنامه به‌دنبال دارد.

٦. پی نوشتها

Archive of SID
www.SID.ir

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، شماره۲، ص ۱۴۰–۱۲۵.

-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 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, Nom. 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.

Archive of SID

www.SID.ir

سیداحسان سیدابریشمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل ونقل در سال ۱۳۸٤ را از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی برنامه ریزی حمل ونقل از دانشگاه صنعتی شریف گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه ریزی حمل ونقل همگانی، ارزیابی پروژه های حمل ونقل و شبیه سازی در مهندسی حمل ونقل 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 ونقل 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 ۱۳٦۸ از دانشگاه صنعتی شریف، و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع، مهندسی سیستم‌های اقتصادی- اجتماعی (گرایش برنامه‌ریزی حمل و نقل) را در سال ۱۳۷۵ از مؤسسهٔ عالی پژوهش در برنامه‌ریزی و توسعه اخذ نمود. در سال ۱۳۸٤ موفق به کسب درجه دکترای تخصصی در رشته مهندسی عمران (گرایش برنامه‌ریزی حمل و نقل) از دانشگاه صنعتی شریف گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی و مدیریت حمل و نقل، مدل‌سازی رفتاری و برآورد تقاضای حمل و نقل، مدل‌های رفتاری ایمنی حمل و نقل، مدل‌های انتخاب گسسته و مدل‌های کاربری زمین بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه تربیت مدرس است.

Archive of SID

www.SID.ir