

## طراحی شبکه تغذیه کننده خطوط حمل و نقل سریع

بیژن ابوعلیزاده بهبهانی<sup>۱</sup>، یوسف شفاهی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

### چکیده

ایجاد خطوط حمل و نقل سریع نظیر مترو در کریدورهایی توجیه پذیر است که تقاضای مورد نیاز آن وجود داشته باشد و از آنجایی که در کلان شهرها چنین تقاضایی ممکن است به خودی خود در هیچ یک از مسیرها وجود نداشته باشد، لازم است برای تأمین تقاضای مورد نیاز از خطوط تغذیه کننده استفاده شود. خطوط تغذیه کننده نقش مکمل خطوط حمل و نقل همگانی سریع را دارند که علاوه بر ایجاد دسترسی بهتر به این خطوط باعث پوشش بیشتر سیستم های حمل و نقل همگانی می شوند. با انتخاب مناسب مجموعه ای از خطوط تغذیه کننده و استفاده از تعداد مناسب وسیله در هر خط می توان ضمن تکمیل پوشش حمل و نقل همگانی، با کاهش زمان دسترسی مسافران به خطوط همگانی سریع زمان سفر مسافران را در استفاده از حمل و نقل همگانی کاهش داد. در این مطالعه به ارائه مدلی برای طراحی خطوط تغذیه کننده پرداخته شده و با استفاده از مدل پیشنهادی خطوط اتوبوس رانی تغذیه کننده شبکه شهر اصفهان، به عنوان یک شبکه واقعی، طراحی شده است. در این پژوهش سعی شده مدلی ارائه شود که ضمن سرعت بالا در حل دقیق مدل برای طراحی خطوط تغذیه کننده، امکان طراحی خطوط تغذیه کننده برای شبکه هایی با بیش از یک خط حمل و نقل سریع وجود داشته باشد. همچنین در مدل ارائه شده اجازه داشتن گره یا کمان مشترک در مسیرهای انتخاب شده وجود دارد.

واژگان کلیدی: خطوط تغذیه کننده اتوبوس رانی، حمل و نقل همگانی، مسیریابی.

### مقدمه و کلیات

نیومن و کنت ورسی<sup>۱</sup> [۱] ۱۹۸۹ روی شهرهای مختلف دنیا نشان می دهد که هر چه میزان زیرساخت های جاده ای و مقدار فضای تخصیص یافته به حمل و نقل درون شهری بیشتر باشد به همان اندازه میزان استفاده از اتومبیل، مصرف بنزین و تولید آلودگی بیشتر خواهد شد. از این رو مباحث مربوط به توسعه پایدار در حمل و نقل شهری مطرح شده است [۲]. امروزه، پژوهشگران سعی می کنند توسعه حمل و نقل بر مبنای الگویی ارائه دهند که با وجود گسترش جمعیت در شهرها و توسعه فعالیت های اقتصادی، اجتماعی - که طبیعتاً از عوامل ترافیک زا هستند - شهرها همچنان بدون بروز مشکل ترافیک، به نحو مطلوبی پاسخگوی جابجایی های مسافران باشند و با گسترش این فعالیت ها سیستم حمل و نقل با مشکل روبرو نشده و پایدار باقی بماند [۱۰]. در صورتی که بتوان مسافران را به استفاده از حمل و نقل همگانی، که هزینه کمیتری برای جامعه دارد، سوق داد در راستای توسعه پایدار گام برداشته شده است.

با افزایش جمعیت شهرها، تقاضا برای سفر رو به افزایش است. رشد سفرها مشکلاتی را برای شهرها به وجود آورده است. روند افزایشی تولید گازهای گلخانه ای، گسترش انتشار آلاینده ها و افزایش تصادفات رانندگی مثال هایی از این مشکلات هستند. در بین مشکلات ناشی از افزایش سفرها غالباً مسئله جابجایی مسافر در شهرها و کاهش ترافیک شهری بیشتر مورد توجه بوده و هست. مطالعات حمل و نقل شهری در راستای حل مشکلات گفته شده در طول ۵۰ سال گذشته گسترش یافته است، در دهه های اولیه شروع این مطالعات، تأکید اصلی مطالعات حمل و نقل بر افزایش ظرفیت برای پاسخگویی به روند افزایش تقاضای سفر با وسایل نقلیه موتوری استوار بوده است. مطالعات پس از آن، در پی نگرانی ها از تأکید بر توسعه ظرفیت معابر، نشان داد تعریض خیابان های شهری برخلاف تصور عموم به کاهش حجم و شدت ترافیک نمی انجامد. مطالعه

## طرح مسئله

با رشد شهرهای بزرگ و افزایش سفرهای شهری، تشویق مسافران به استفاده از سیستم‌های سریع باقابلیت جابه‌جایی حجم بالایی از مسافران مورد توجه بسیاری از برنامه‌ریزان حمل و نقل قرار گرفته است. در همین راستا بالا بردن مطلوبیت سیستم حمل و نقل همگانی می‌تواند تمایل مسافران را به استفاده از این سیستم در رقابت با خودروی شخصی افزایش داده و مانع از رشد بی‌رویه استفاده از خودروی شخصی شود. یکی از سیاست‌های افزایش مطلوبیت حمل و نقل همگانی بالا بردن سطح سرویس از راه جابه‌جایی سریع و راحت مسافران است. خطوط حمل و نقل سریع<sup>۱</sup> نظیر مترو و اتوبوس تندرو<sup>۲</sup> قابلیت جابه‌جایی حجم بالایی از مسافران را دارا هستند، این سیستم‌ها مسافران را با سرعت زیاد و قابلیت اطمینان بالا جابه‌جا می‌کنند، و مطلوبیت بالایی برای استفاده‌کنندگان ایجاد می‌کنند.

در بسیاری از نواحی شهرهای بزرگ امکان ایجاد چنین سیستم‌هایی از نظر اقتصادی وجود ندارد، زیرا معمولاً جمعیت تحت پوشش این سیستم‌ها بسیار کمتر از ظرفیت جابه‌جایی مسافر آن‌هاست، ایجاد خطوط حمل و نقل سریع در کریدورهای توجیه‌پذیر است که تقاضای مورد نیاز آن وجود داشته باشد، برای بهره‌وری کافی از چنین سیستم‌هایی یا باید تواتر به قدری کم باشد که ظرفیت این سیستم‌ها با تقاضا تقریباً برابر شود و یا این‌که تقاضای این سیستم‌ها را به نحوی بالا برد. حالت اول چندان مورد نظر برنامه‌ریزان حمل و نقل نیست زیرا افزایش سرفاصله‌ی زمانی مطلوبیت سیستم را کاهش می‌دهد. حالت دوم به نحوی به افزایش ناحیه تحت پوشش این سیستم‌ها مربوط می‌شود، یعنی برای تأمین تقاضای مورد نیاز سیستم حمل و نقل سریع از خطوط تغذیه‌کننده نظیر اتوبوس‌های تغذیه‌کننده<sup>۳</sup> استفاده شود. این خطوط از راه افزایش سطح دسترسی به خطوط حمل و نقل سریع نقش مکمل را ایفا می‌کنند و باعث پوشش بیشتر حمل و نقل همگانی در سطح شهر می‌شود. انتخاب مناسب مجموعه‌ای از خطوط تغذیه‌کننده هماهنگ با خطوط حمل و نقل سریع، باعث افزایش دسترسی مسافران و کاهش زمان سفر آن‌ها و در نتیجه افزایش مطلوبیت سیستم حمل و نقل همگانی در سطح شهر خواهد شد. در این مطالعه به مدل‌سازی خطوط تغذیه‌کننده برای سیستم‌های حمل و نقل سریع پرداخته خواهد شد.

## اهداف پژوهش

در کلان‌شهرهایی که از سیستم‌های حمل و نقل سریع با ظرفیت بالا نظیر مترو و اتوبوس تندرو استفاده می‌کنند، می‌توان تمایل به استفاده از سیستم‌های حمل و نقل همگانی را با ایجاد یک شبکه حمل و نقل همگانی کارا و یکپارچه افزایش داد. یکپارچگی شبکه حمل و نقل عمومی می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ی انتقال از راه حذف خطوط مشابه و همپوشانی‌ها و به‌کارگیری مناسب‌ترین خط در هر قطعه شود. همچنین با بهبود در کیفیت سرویس‌دهی علاوه بر کاهش هزینه‌های دسترسی، زمان سفر را نیز می‌توان کوتاه‌تر کرد. در این سیستم‌ها خطوط تغذیه‌کننده در صورت پوشش مناسب ناحیه‌ها و هماهنگی در زمان‌بندی به‌منظور کمینه کردن زمان انتقال و تغییر خط از حمل و نقل اصلی به خطوط تغذیه و برعکس می‌تواند نقش مهمی ایفا کند.

ایجاد یک شبکه تغذیه‌کننده منسجم و هماهنگ، با هدف کاهش زمان سفر مسافران و پوشش بیشتر ناحیه‌ها توسط شبکه حمل و نقل همگانی شرایطی را فراهم می‌کند تا مسافران بتوانند به راحتی و با صرف زمان کمتری جابه‌جا شوند. با نزدیک شدن به این هدف ضمن کاهش هزینه‌ی دسترسی مسافران و انتقال آن‌ها به سیستم حمل و نقل سریع می‌توانیم حجم زیادی از سفرهای شخصی را جذب حمل و نقل همگانی کرده و ضمن افزایش درآمد سیستم حمل و نقل همگانی شلوغی معابر را نیز کاهش دهیم.

هدف از این پژوهش ارائه مدلی کاربردی برای طراحی شبکه‌ای از خطوط تغذیه‌کننده برای شبکه‌ی حمل و نقل سریع به‌منظور افزایش دسترسی به این سیستم است. با طراحی شبکه‌ای منسجم و هماهنگ از خطوط تغذیه‌کننده، امکان دسترسی نواحی بیشتری برای سیستم حمل و نقل سریع فراهم می‌شود، همچنین از راه کاهش هزینه‌های دسترسی و زمان سفر، مطلوبیت سیستم حمل و نقل همگانی برای مسافران بیشتر شده و باعث جذب تعداد بیشتری از سفرهای شخصی به این سیستم می‌شود.

## مروری بر مطالعات پیشین

مطالعه و بررسی عملکرد حمل و نقل همگانی جهت بهبود شبکه از راه طراحی بهتر و منسجم‌تر شبکه اتوبوس‌رانی تغذیه‌کننده مورد توجه بسیاری از برنامه‌ریزان حمل و نقل است.

طراحی شبکه تغذیه‌کننده، اولین بار توسط کوآه و پرل<sup>۴</sup> در

1 Rapid Transit Network

2 Bus Rapid Transit

3 Feeder Bus

4 Kuah & Perl

قابل قبول، انتخاب طریقه و تخصیص ناوگان است.

فرض می‌شود شبکه خطوط حمل و نقل سریع از قبل طراحی شده و موجود است و باید با در نظر گرفتن تقاضای گره‌های شبکه به هر یک از خطوط حمل و نقل سریع، خطوط تغذیه‌کننده طراحی شود. فرض می‌شود، زمان سفر کمان‌ها مستقل از انتخاب شدن یا نشدن به‌عنوان خط تغذیه‌کننده قابل برآورد است. همچنین فرض می‌شود هزینه‌های هر شبکه تابعی از تعداد اتوبوس موردنیاز در آن شبکه است. بنابراین، محدودیت بودجه در مدل پیشنهادی می‌تواند بر اساس تعداد اتوبوس‌های در دسترس فرمول‌بندی شود.

$$\text{فرمول‌بندی این مدل به صورت زیر ارائه شود:}$$

$$\text{maximize } z = \sum_p G_p - \sum_d \sum_i E_d^i X_d^i \quad \text{s.t.} \quad (1)$$

$$\sum_f Y_{pf} \leq 1 \quad \forall p \quad (2)$$

$$\sum_p \sum_f Y_{pf} \leq K \quad (3)$$

$$\sum_p \sum_f Y_{pf} F_f \leq B \quad (4)$$

$$W_{pd}^i = \sum_f Y_{pf} \delta_{pd}^i \quad \forall i, p, d \quad (5)$$

$$G_p = \sum_d \sum_i X_d^i W_{pd}^i \quad \forall p \quad (6)$$

$$\sum_f Y_{pf} F_f c_p \geq G_p r (U_p + \alpha n_p + \beta) \quad \forall p \quad (7)$$

$$\sum_p W_{pd}^i - 1 - M \left( E_d^i - \sum_p W_{pd}^i + r \right) \leq 0 \quad \forall i, d \quad (8)$$

$$Y_{p,f}, W_{pd}^i = 0 \text{ or } 1 \quad \forall p, f, i, d \quad (9)$$

$$E_d^i = \text{integer}, G_p \geq 0$$

وقتی که:

$P$ : مجموعه مسیرهای قابل قبول و نامزد برای شبکه خطوط اتوبوس تغذیه‌کننده،  $i$ : برچسب گره‌های شبکه است،  $d$ : خطوط حمل و نقل سریع،  $G_p$ : مسافر پوشش داده‌شده در مسیر  $E_d^i, p$ : تعداد مسیرهای انتخاب‌شده‌ای که شامل گره  $i$  برای رسیدن به مقصد  $d$  هستند منهای یک،  $X_d^i$ : تقاضای گره  $i$  برای رسیدن به خط حمل و نقل سریع  $d$ ،  $Y_{pf}$ : متغیر دوتایی که مقدار آن: اگر مسیر  $p$  با تخصیص اتوبوس بر مبنای گزینه  $f$  انتخاب شود ۱ در غیر این صورت ۰،  $K$ : حداکثر تعداد مسیرهای قابل قبول برای ساخت خطوط تغذیه،  $F_f$ : تعداد اتوبوس دگزینه  $f$ ،  $B$ : حداکثر تعداد اتوبوس در دسترس،  $W_{pd}^i$ : یک متغیر کمکی برای ساده‌سازی است که اگر گره  $i$  توسط مسیر انتخاب‌شده  $p$  به خط  $d$  وصل

سال ۱۹۸۹ [۳] مدل شد. آن‌ها در مقاله خود به ارائه مدلی ریاضی برای طراحی شبکه تغذیه‌کننده خط ریلی و تعیین تواتر خطوط باهدف کمینه کردن هزینه‌های مسافر و بهره‌بردار پرداختند و با استفاده از یک روش فرایابنده<sup>۱</sup> آن را حل کردند.

مارتین و پاتو<sup>۲</sup> ۱۹۹۸ [۴] سه روش ابتکاری برای حل مدل کوآه و پرل (۱۹۸۹) ارائه کردند. این روش‌ها شامل الگوریتم سازنده<sup>۳</sup> جستجوی محلی<sup>۴</sup> و جستجوی ممنوعه<sup>۵</sup> بود. آن‌ها در مقاله خود به این نتیجه رسیدند که روش جستجوی ممنوعه یکی از روش‌های ابتکاری مفید در زمینه‌ی حل مسائل شبکه تغذیه‌کننده است.

شریواستاو و دهینگرا در سال ۲۰۰۶ [۵] یکپارچگی زمان‌بندی بین شبکه ریلی و اتوبوس تغذیه‌کننده را مورد مطالعه قرار دادند. محققین از یک الگوریتم مسیریابی ابتکاری برای ساخت شبکه استفاده کردند و سپس زمان‌بندی بهینه برای شبکه تغذیه‌کننده در حالی که زمان‌بندی خط ریلی از قبل تعیین شده و ثابت فرض می‌شود انجام می‌گردد.

شریواستاو اوماهونی (۲۰۰۷) [۶] طراحی شبکه تغذیه‌کننده با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و یک روش ابتکاری ثانویه را مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله الگوریتم ژنتیک ابتدا مسیرهای شبکه تغذیه‌کننده را طراحی می‌کند، سپس یک الگوریتم ابتکاری سعی می‌کند تقاضای تمام ایستگاه‌ها به خطوط ریلی را پوشش دهد.

شریعت و غلامی در سال ۲۰۱۰ [۷] مدلی را برای طراحی خطوط تغذیه‌کننده ارائه دادند در مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها دو وسیله ون و اتوبوس در خطوط تغذیه‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. مدل را بر روی شبکه‌ای با ۵۵ گره حل کردند.

## شرح مسئله و ارائه مدل

در این پژوهش رویکرد پرداختن به مسئله بر اساس پیش تولید خطوط امکان‌پذیر و انتخاب خطوط تغذیه‌کننده از بین آن‌ها همزمان با تخصیص ناوگان است. بنابراین حل مسئله در دو مرحله جداگانه انجام می‌شود، مرحله اول تولید خطوط قابل قبول بر اساس سه محدودیت پایانه، طول مجاز و مستقیم بودن (حداکثر افزایش طول از طول کوتاه‌ترین مسیر) است و مرحله دوم انتخاب خطوط تغذیه‌کننده از بین خطوط

- 1 Meta Heuristic method
- 2 Martins & Pato,
- 3 Construtive Algorithm
- 4 Local Search Heuristic
- 5 Tabu Search (TS)

داده می‌شود تا از بین آن‌ها خطوط تغذیه‌کننده را با هدف رسیدن به بیشترین پوشش مسافران در شبکه انتخاب کند. محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

#### • محدودیت طول خطوط

یکی از محدودیت‌های بهره‌برداری این است که طول خطوط باید در محدوده اجرایی قرار گیرد. خطوط خیلی طولانی و یا خیلی کوتاه هر دو از نظر اجرایی با مشکلاتی مواجه می‌شوند. خطوط خیلی کوتاه کارایی زیادی ندارند و معمولاً نمی‌توانند سفرهای زیادی را به صورت مستقیم پوشش دهند. در مقابل اگر خطی بیش از حد طولانی باشد به دلیل بیشتر شدن احتمال بروز اتفاقات در مسیر (به دلیل طول بیشتر و پتانسیل بیشتر برای بروز رخدادهای تصادفی) برنامه‌ریزی زمانی آن سخت‌تر می‌شود. از طرف دیگر تواتر حداقل خط، که بر اساس قطعه بحرانی تعیین می‌شود، باید در طول بیشتری فراهم شود و به این ترتیب هزینه ناوگان بیشتری به خط تحمیل می‌گردد. مقادیر حداکثر و حداقل طول مجاز خطوط با توجه به ابعاد شبکه بر اساس قضاوت کارشناسی فرض می‌شود.

#### • محدودیت مستقیم بودن خطوط

هرچقدر طول مسیر یک خط نسبت به کوتاه‌ترین مسیر بین پایانه‌های آن طولانی‌تر باشد، این خط غیرمستقیم‌تر است. خطوط اتوبوس‌رانی معمولاً مستقیم هستند و مسیر آن‌ها بین پایانه‌های ابتدا و انتها انحراف زیادی از خط مستقیم ندارد. در این محدودیت فرض می‌شود طول هر مسیر بین دو گره حداکثر می‌تواند به اندازه ضریبی از طول کوتاه‌ترین مسیر بین آن دو گره باشد.

#### • محدودیت پایانه

با توجه به هدف از طراحی خطوط تغذیه‌کننده که رساندن مسافران به ایستگاه‌های حمل و نقل سریع است، می‌توان گفت از بین تمام مسیرهای شبکه فقط آن مسیرهایی که انتهایشان ایستگاه حمل و نقل سریع است بایستی امکان انتخاب شدن داشته باشند.

#### الگوریتم پیشنهادی برای مسئله یافتن مسیرهای قابل قبول

الگوریتم ارائه‌شده در این بخش جهت یافتن مسیرهایی که هر ۳ محدودیت گفته‌شده را رعایت کنند پیشنهاد شده است. این الگوریتم در هر تکرار، برای هر گره دلخواه از کل گره‌های

شود ۱ در غیر این صورت  $\delta_{pd}^i$ : پارامتر دوتایی که اگر گره‌ی  $i$  در مسیر  $p$  به خط حمل و نقل سریع  $d$  وصل شود ۱ در غیر این صورت  $c_{0p}$ : ظرفیت مسافر در اتوبوس،  $p$ : حداکثر ضریب اشغال اتوبوس،  $n_p$ : تعداد ایستگاه‌ها در مسیر  $p$ ،  $\alpha$ : متوسط زمان توقف در ایستگاه،  $\beta$ : متوسط زمان توقف در ابتدا و انتهای مسیر و  $U_p$ : زمان سفر در مسیر  $p$ .

رابطه (۱) تابع هدف مسئله است و سعی در بیشینه کردن مسافران پوشش داده‌شده دارد. محدودیت (۲) باعث می‌شود که برای هر مسیر فقط یکی از تواتر حرکت‌های ممکن انتخاب شود. محدودیت (۳) حداکثر تعداد مسیرهای انتخاب‌شده را به  $k$  محدود می‌کند. محدودیت (۴) تعداد اتوبوس‌های انتخاب‌شده را به تعداد اتوبوس‌های در دسترس،  $B$ ، (بودجه) محدود می‌کند. محدودیت (۵) گره‌های موجود در هر مسیر انتخاب‌شده را مشخص می‌کند. محدودیت (۶) مسافر پوشش داده‌شده در هر مسیر را محاسبه می‌کند. در محدودیت (۷) تخصیص اتوبوس به مسیر بر اساس تقاضای آن مسیر، زمان حرکت وسیله و توقف‌های آن در ایستگاه‌ها انجام می‌دهد. محدودیت (۸) جهت مشخص کردن مقدار  $E^i$  است و رابطه (۹) متغیرهای استفاده شده در مدل را تعریف می‌کند.

#### مسئله یافتن مجموعه مسیرهای قابل قبول

در طراحی شبکه حمل و نقل همگانی سه رویکرد متفاوت برای تولید خطوط در فرآیند طراحی شبکه همگانی به چشم می‌خورد. ۱. پیش‌تولید مجموعه خطوط ۲. پیش‌تولید مجموعه خطوط و اصلاح آن‌ها در فرآیند طراحی شبکه ۳. تولید خطوط در فرآیند طراحی شبکه.

در این مطالعه رویکرد اول، مبتنی بر پیش‌تولید مجموعه خطوط در ابتدای فرآیند حل، مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل ارائه‌شده، فرض بر این بود که مجموعه مسیرهای نامزد برای طراحی خطوط تغذیه‌کننده به عنوان ورودی به مدل داده‌شده است. برای حل مسائل واقعی، این رویکرد با توجه به محدودیت‌های عملی در توسعه خطوط و امکان بهره‌گیری از قضاوت کارشناسی در مرحله پیش‌تولید خطوط مناسب به نظر می‌رسد. در روش ارائه‌شده در این پژوهش فرض می‌شود، مجموعه کمان‌های قابل استفاده در شبکه مشخص شده‌اند و با در نظرگیری تعدادی محدودیت، از بین تمام مسیرهای ممکن در شبکه، مجموعه‌ای از مسیرها که قابلیت استفاده به عنوان خطوط تغذیه‌کننده را دارند به عنوان مسیرهای نامزد برای طراحی خطوط تغذیه‌کننده به مدل طراحی شبکه تغذیه‌کننده

ب) کمان بین گره  $m[n]$  ام و  $m+1$  ام مسیر  $A[n]$  را از مجموعه  $V[n]$  حذف کرده و در یک مجموعه با نام  $NL[n]$  قرار دهید.

پ) کوتاه‌ترین مسیر از گره  $m[n]$  ام مسیر  $A[n]$  تا مقصد  $d$  بدون عبور از کمان‌های مجموعه  $NL[n]$  را محاسبه کرده و آن را ادامه مسیر  $C[n]$  بنامید. اگر مسیری بین گره  $m[n]$  ام مسیر  $A[n]$  تا مقصد  $d$  موجود نبود به گام ۴ بروید. (لازم به ذکر است که با استفاده از مجموعه کوتاه‌ترین مسیرها که از الگوریتم فلویید وارشل تولید شده، کوتاه‌ترین مسیر از تمام گره‌های مجاور گره  $m[n]$  ام مسیر  $A[n]$  تا مق  $d$  در اختیار است.)

گام ۳: طول بریده مسیر  $S[n]$  ( $L(S[n])$ ) محاسبه کنید، طول ادامه مسیر  $C[n]$  ( $L(C[n])$ ) را محاسبه کنید.

اگر  $(L_a \text{ و } L_{max} < \max(L(S[n]) + L(C[n]))$  آنگاه:

الف) اولین درایه صفر برچسب  $[n]$  را به ۱ تبدیل کنید و مسیر حاصل از چسباندن بریده مسیر و ادامه مسیر با برچسب  $[n]$  قبل از تغییر را  $(S[n] + C[n])$   $A[n]$  بنامید.

ب) چنانچه طول  $A[n]$  از مقدار کمینه بیشتر بد به مجموعه مسیرهای قابل قبول اضافه کنید.

پ) کمان‌های مسیر  $C[n]$  با برچسب  $[n]$  قبل ایبر را در مجموعه  $V[n]$  قرار دهید و  $NL[n]$  و  $m[n]$  جدید را نیز برابر با  $NL[n]$  و  $m[n]$  با  $[n]$  قبل از تغییر قرار داده و به گام ۲ بروید.

در این صورت ادامه دهید.

اگر  $V[n]$ ، تهی باشد به گام ۵ بروید، در غیر این صورت به آخرین درایه غیر صفر  $[n]$  یک واحد اضافه کرده و مقادیر  $V[n]$ ،  $NL[n]$  و  $A[n]$  با برچسب  $[n]$  قبل از تغییر را در  $V[n]$ ،  $NL[n]$  و  $A[n]$  قرار داده، سپس کمان بین گره  $m[n]$  ام و  $m+1$  ام با برچسب  $[n]$  قبل از تغییر  $A[n]$  با برچسب  $[n]$  قبل از تغییر را از مجموعه جدید  $NL[n]$  حذف کنید و  $m[n]$  با برچسب  $[n]$  جدید را برابر  $+1$  با برچسب  $[n]$  قبل از تغییر قرار داده و به گام ۲ بروید.

شبکه به‌عنوان یک پایانه ابتدایی و گره دیگر از مجموعه گره‌های ایستگاهی حمل و نقل سریع، به‌عنوان یک پایانه انتهایی مسیرهای قابل قبول را تولید می‌کند. به‌عنوان مثال، اگر شبکه دارای ۸ گره باشد که ۲ گره از ۸ گره ایستگاهی حمل و نقل سریع باشند، این الگوریتم در ۱۴ بار تکرار مسیرهای مختلف قابل قبول را تولید می‌کند. روش جستجو به این شکل است که در یک مسیر قابل قبول یکی یکی در گره‌ها مسیر را بریده، قبل از آن گره را به‌عنوان بریده‌مسیر ذخیره و کمان بعد از آن گره را از مجموعه کمان‌های شبکه حذف می‌کند، سپس از آن گره کوتاه‌ترین مسیر تا مقصد را یافته و با نام ادامه‌مسیر ذخیره می‌کند. سپس مسیر جدیدی را با چسباندن بریده مسیر و ادامه مسیر تولید و شرایط مربوط به طول و مستقیم بودن را بررسی می‌کند.

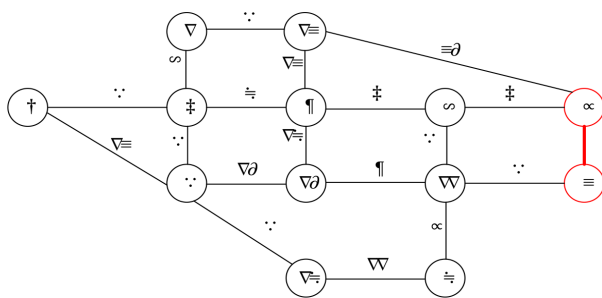
گام‌های اصلی این الگوریتم به شرح زیر است:  
فرض کنید،

$[n]$ : برچسب مسیر، که به‌صورت یک بردار که تعداد درایه‌های آن حداکثر به اندازه گره‌های شبکه است، مشخص می‌شود.  
 $A[n]$ : مسیر با برچسب  $[n]$ ، مجموعه کمان‌های بررسی نشده در مسیر با برچسب  $[n]$ ،  $V[n]$ : مجموعه کمان‌های بررسی نشده در مسیر با برچسب  $[n]$ ،  $NL[n]$ : مجموعه کمان‌های ممنوعه با برچسب  $[n]$ ،  $m[n]$ : شمارنده گره‌های مسیر با برچسب  $[n]$ ،  $S[n]$ : بریده مسیر با برچسب  $[n]$ ،  $C[n]$ : ادامه مسیر با برچسب  $[n]$  و  $L_{max}$ : حداکثر طول مجاز هر مسیر در شبکه.

گام ۰: الگوریتم تکمیل شده فلویید وارشل را برای یافتن کوتاه‌ترین مسیرهای بین همه گره‌ها اجرا کنید. مقدار حداکثر طول مسیر ( $L_{max}$ ) را مشخص کنید و قرار دهید  $[n] = [0, 0, \dots, 0]$ . سپس برای هر گره  $i$  به پایانه  $d$  گام‌های زیر را انجام دهید.

گام ۱: قرار دهید  $[n] = [1, 0, \dots, 0]$ ، کوتاه‌ترین مسیر از گره  $i$  به پایانه  $d$  را برچسب  $n$  بزنید ( $A_{[1, 0, \dots, 0]}$ )، طول مسیر  $A[n]$  ( $L(A[n])$ )، را با استفاده از ماتریس کوتاه‌ترین فاصله محاسبه کنید.  $L_a$  برابر با  $(1 + \alpha) \times L(A[n])$  قرار دهید. مجموعه کمان‌های مسیر  $A[n]$  را  $V[n]$  بنامید و قرار دهید  $m[n] = 1$ .

گام ۲: الف) مسیر  $A[n]$  از گره  $m[n]$  ام مسیر بریده، بریده مسیر از ابتدای مسیر تا گره  $m[n]$  ام را  $S[n]$  بنامید.



شکل (۱): شبکه نگین

در شبکه شکل (۱)، ۵۹۲۴ مسیر بین هر مبدأ و مقصد وجود دارد که با استفاده از الگوریتم یافتن مسیرهای قابل قبول و پیاده‌سازی آن در محیط نرم‌افزار ++C، ۱۸۵۹ مسیر در محدوده طول مجاز بوده، انتهای ۴۲۲ مسیر ایستگاه‌های ۲ و ۸ است و ۵۶۴ مسیر محدودیت مستقیم بودن را دارند. در نهایت ۱۰۱ مسیر از ۵۹۲۴ مسیر هر ۳ محدودیت را ارضا می‌کنند.

برای طراحی خطوط تغذیه‌کننده و تخصیص ناوگان در مرحله دوم فرض شد تقاضای گره‌ها به خط حمل و نقل سریع مطابق جدول (۱) است. وسیله تغذیه‌کننده اتوبوس با

آخرین درایه غیر صفر  $[n]$  را برابر صفر ندهید، تهی است پایان، وگرنه آخرین د  $[n]$  یک واحد اضافه کرده، مقادیر  $V[n]$ ،  $m[n]$ ،  $NL[n]$  و  $A[n]$  با برچسب  $[n]$  قبل از تغییر را در  $V[n]$ ،  $m[n]$ ،  $NL[n]$  و  $A[n]$  قرار بدهید و همچنین کمان بین گره  $m[n]$  ام و  $m[n]+1$  ام از مسیر  $A[n]$  را از مجموعه  $NL[n]$  حذف کنید و سپس قرار داد  $m[n]+1$ ، به کام ۲ برگردید.

### حل شبکه نگین

مرحله اول یافتن مسیرهای قابل قبول است. با توجه به شکل (۱) فرض شد که یک خط حمل و نقل سریع از گره‌های ۲ و ۸ عبور می‌کند و این دو گره ایستگاه اصلی این خط هستند. اعداد روی کمان‌ها طول کمان را نشان می‌دهند، فرض شد طول مجاز بین ۱۰ و ۶۰ و حداکثر ضریب افزایش طول از کوتاه‌ترین مسیر ۱ است.

جدول (۱): تقاضای گره‌های شبکه فرضی به خط حمل و نقل سریع

شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
تقاضا	۱۳۳	۰	۱۲۰	۱۲۳	۹۵	۱۱۰	۰	۰	۹۹	۱۱۱	۰	۸۴	۹۴

جدول (۲): مشخصات خطوط تغذیه‌کننده

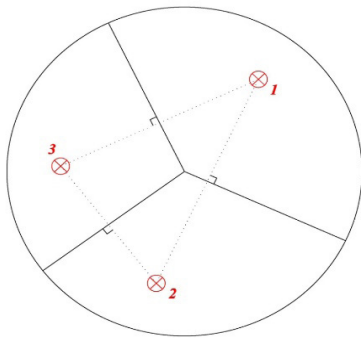
شماره مسیر	تعداد اتوبوس	گره‌ها	طول مسیر (دقیقه)	تعداد ایستگاه‌ها	مسافر جابه‌جاشده
۱	۳	۲-۱۱-۳	۱۷	۲	۱۲۰
۲	۲	۲-۱۱-۱۰	۱۵	۲	۱۱۱
۳	۴	۸-۷-۶-۵	۱۳	۳	۲۰۵

جدول (۳): مشخصات شبکه تغذیه‌کننده با پوشش تمام مسافران شبکه

شماره مسیر	تعداد اتوبوس	گره‌ها	طول مسیر (دقیقه)	تعداد ایستگاه‌ها	مسافر جابه‌جاشده
۱	۶	۲-۱۱-۱۰-۹	۲۵	۳	۲۱۰
۲	۷	۲-۱۱-۳-۱۳	۲۸	۳	۲۱۴
۳	۸	۸-۱۲-۱	۲۹	۳	۲۱۷
۴	۹	۸-۷-۶-۵-۴	۲۲	۴	۳۲۸

مرحله ۲: تعیین پارامترهای مدل برای هریک از مناطق به دست آمده از مرحله ۱.

مرحله ۳: تبدیل جدول تقاضای کل شبکه به زیرجدول تقاضای هر گره به خط حمل و نقل سریع. در این مرحله برای گره‌های هر منطقه و ایستگاه‌های اصلی، ناحیه تأثیری تعریف می‌شود که مقدار تقاضای هر نقطه تولید و جذب سفر که در ناحیه تأثیر آن گره یا ایستگاه اصلی قرار داشته باشد، به گره یا ایستگاه اصلی انتقال می‌یابد. برای یافتن ناحیه تأثیر، بین هر دو نقطه عمودمنصف خط واصل بین آن‌ها مرز ناحیه تأثیر آن‌ها را تعیین می‌کند. شکل (۲) به صورت شماتیک نتیجه این فرآیند را برای سه ایستگاه فرضی نشان می‌دهد.



شکل (۲): نحوه تعیین نواحی تأثیر ایستگاه‌های همگانی اصلی

مرحله ۴: ساخت مسیرهای قابل قبول.

مرحله ۵: حل زیر شبکه‌های حاصل و طراحی شبکه خطوط تغذیه‌کننده برای هر یک از مناطق.

با استفاده از مدل ارائه شده شبکه خطوط تغذیه‌کننده شهر اصفهان طراحی گردید، و در مجموع ۳۵ خط (خطوط) نقطه‌چین در شکل (۳) به عنوان خطوط تغذیه‌کننده معرفی گردید اطلاعات این خطوط در جدول (۴) ثبت شده است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهاد

این مطالعه به طراحی شبکه خطوط تغذیه‌کننده حمل و نقل سریع با فرض وجود یک سیستم حمل و نقل همگانی سریع فعال در شهر می‌پردازد. در این پژوهش سعی شده مدلی ارائه شود که ضمن سرعت بالا در حل دقیق مدل برای طراحی خطوط تغذیه‌کننده، امکان طراحی شبکه خطوط تغذیه‌کننده برای شبکه‌های با بیش از یک خط حمل و نقل سریع وجود داشته باشد همچنین در مدل ارائه شده اجازه داشتن گره مشترک یا کمان مشترک خطوط در مسیرهای انتخاب شده وجود دارد.

ظرفیت ۳۰ مسافر، و بودجه در دسترس ۹ اتوبوس در نظر گرفته شد. همچنین حداکثر ضریب اشغال اتوبوس ۱/۱، زمان توقف اتوبوس ابتدا و انتهای مسیر ۲ دقیقه و زمان توقف در ایستگاه‌ها ۳۰ ثانیه فرض گردید، فرض شده در گره‌هایی که تقاضایی برای استفاده از تغذیه‌کننده ندارند، توقفی انجام نمی‌شود. در حل شبکه حداکثر تعداد مسیر قابل قبول جهت ساخت خطوط تغذیه‌کننده (k) را مقداری بزرگ فرض کرده تا به نوعی این محدودیت حذف شود.

پس از حل مدل در نرم‌افزار GAMS، ۳ خط تغذیه‌کننده به دست آمد که ۴۳۶ مسافر را پوشش دادند، مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

در صورت افزایش بودجه به ۳۰ اتوبوس و حل مدل تمام تقاضای موجود یعنی ۹۶۲ مسافر توسط ۴ خط تغذیه‌کننده پوشش داده می‌شود. مشخصات این چهار خط در جدول (۳) نشان داده شده است.

جهت آزمایش امکان‌سنجی طراحی شبکه تغذیه‌کننده خطوط حمل و نقل سریع یک شبکه بزرگ با استفاده از روش پیشنهادی و بررسی توانایی مدل برای حل شبکه‌ای واقعی با ابعاد بزرگ شبکه شهر اصفهان انتخاب شد. فرضیات اصلی برای طراحی عبارت‌اند از:

- شبکه معابر پیوسته‌ای به همراه اطلاعات کمان‌ها و گره‌های آن داده شده است.
- ماتریس تقاضای همگانی بین نقاط شبکه موجود است.
- شبکه خطوط حمل و نقل همگانی اصلی مانند مترو، LRT یا BRT داده شده است.
- طراحی خطوط حمل و نقل همگانی سریع مناسب، پوشا انجام شده است.
- جابه‌جایی مسافران بین خطوط تغذیه‌کننده مطلوب نبوده و صورت نمی‌گیرد.

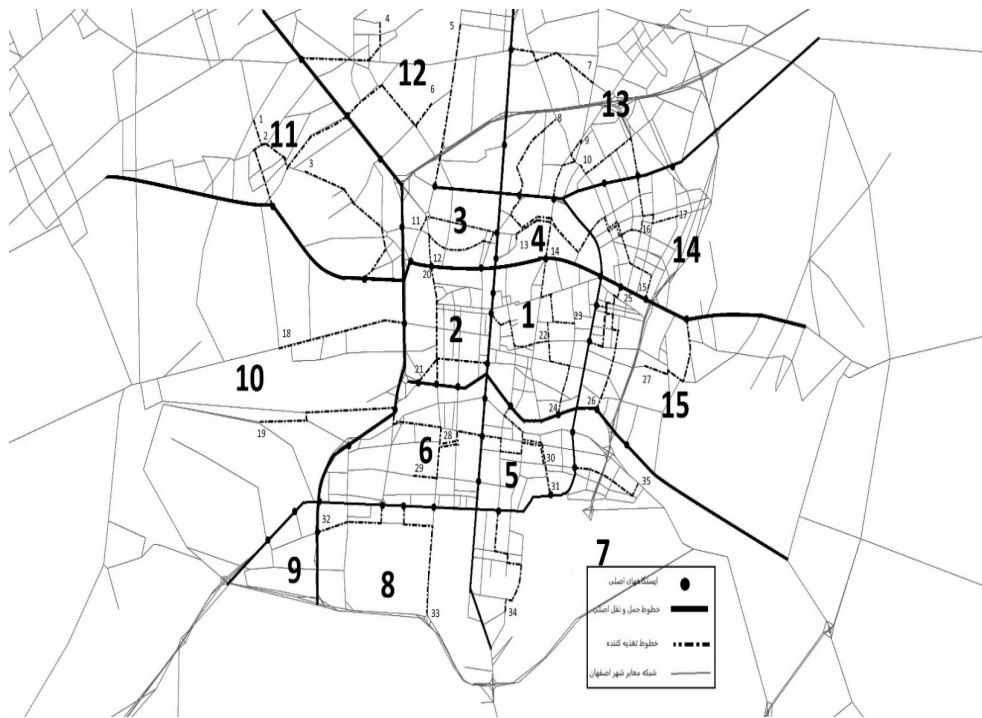
شبکه شهر اصفهان دارای ۷۹۱۷ کمان و ۲۷۷۰ گره است و ۶ خط حمل و نقل سریع برای آن در نظر گرفته شد.

طراحی خطوط تغذیه‌کننده در شبکه شهر اصفهان ۵ مرحله اصلی دارد:

مرحله ۱: تقسیم شبکه به مناطقی که محصور به خطوط حمل و نقل سریع هستند. شکل (۳) ۶ خط حمل و نقل سریع را نشان می‌دهد که شبکه را به ۱۵ منطقه تقسیم کرده است.

جدول (۴): مشخصات خطوط تغذیه‌کننده طراحی شده برای شهر اصفهان

تعداد خطوط اصلی	تعداد ایستگاه اصلی	شماره منطقه	تابع هدف	تعداد اتوبوس	طول خط (کیلومتر)	سرفاصله (دقیقه)	شماره خط تغذیه‌کننده
۲	۶	۱۱	۱۴۴۰	۸	۲/۳	۱/۶	۱
				۵	۲/۹۵	۲/۹	۲
				۶	۲/۶۵	۲/۳	۳
۳	۶	۱۲	۲۱۴۰	۱۰	۲/۵۲	۱/۴	۴
				۷	۲/۴۹	۱/۹	۵
				۸	۳/۱۳	۱/۹	۶
۲	۷	۱۳	۲۸۱۵	۹	۲/۴۴	۱/۴	۷
				۱۰	۲/۴۹	۱/۳	۸
				۶	۲/۱۴	۲	۹
				۹	۲/۵۳	۱/۵	۱۰
۴	۷	۳	۱۵۶۳	۹	۲/۱۵	۱/۳	۱۱
				۱۱	۲/۲	۱/۱	۱۲
۴	۷	۴	۱۶۰۸	۱۱	۲/۶	۱/۲	۱۳
				۹	۲/۵۷	۱/۵	۱۴
۳	۸	۱۴	۲۳۸۶	۶	۲/۱۸	۲/۲	۱۵
				۸	۲/۰۱	۱/۵	۱۶
				۱۱	۲/۴۵	۱/۲	۱۷
۳	۸	۱۰	۶۲۴	۹	۳/۶	۱/۸	۱۸
				۶	۵/۱۷	۳/۵	۱۹
۴	۹	۲	۲۴۵۷	۱۲	۲/۳۵	۱/۱	۲۰
				۸	۲/۰۹	۱/۵	۲۱
۴	۸	۱	۲۰۶۴	۶	۲/۰۸	۲	۲۲
				۱۲	۲/۸۴	۱/۲	۲۳
				۷	۲/۱۷	۱/۷	۲۴
۳	۷	۱۵	۲۵۱۸	۹	۲/۰۷	۱/۴	۲۵
				۱۴	۳/۱۳	۱/۱	۲۶
				۶	۲/۵۵	۲/۳	۲۷
۴	۱۰	۶	۱۵۶۳	۱۰	۲/۷۷	۱/۴	۲۸
				۸	۲/۲۱	۱/۶	۲۹
۳	۸	۵	۱۶۴۶	۹	۲/۶۱	۱/۶	۳۰
				۱۱	۲/۴۴	۱/۲	۳۱
۳	۴	۸	۱۲۶۱	۶	۲/۶۳	۲/۱	۳۲
				۷	۲/۹۴	۲	۳۳
۳	۸	۷	۱۹۳۷	۱۴	۲/۹۷	۱/۱	۳۴
				۶	۲/۰۹	۲	۳۵



شکل (۳): شبکه خطوط تغذیه کننده شهر اصفهان

کمان‌ها می‌تواند پیشنهاد دیگری برای مطالعات آینده باشد. در این پژوهش پیاده‌روی مسافران در شبکه در نظر گرفته نشده، اما در واقعیت ممکن است مسافران حمل و نقل همگانی کل یا قسمتی از سفر خود را به صورت پیاده طی کنند. توجه به این موضوع می‌تواند در مطالعات آینده مورد نظر قرار گیرد. در مدل‌های ارائه شده طراحی خطوط بر اساس تقاضای یک طرفه از مراکز تولید سفر به خطوط همگانی انجام می‌شود، طراحی خطوط به صورت رفت و برگشت و مقایسه آن با خطوطی که فقط براساس تقاضای رفت یا برگشت طراحی می‌شود می‌تواند پیشنهادی برای مطالعات آینده باشد.

### منابع

- 1- Newman, P. G., and Kenworthy, J. R., 1989, Cities and automobile dependence, Vol. 388, an International Sourcebook.
- 2- World Commission on Environment and Development, 1987, Our common future, Vol. 383, Oxford University Press.
- 3- Kuah, G. K., and Perl, J., 1989, The feeder-bus network-design problem, Journal of The Operational Research Society, PP.751-767.

اطلاعات حاصل از طراحی خطوط تغذیه کننده مثال موردی نشان داد که مدل ارائه شده می‌تواند برای نمونه‌هایی در ابعاد واقعی به خوبی به کار برده شود.

با توجه به تنوع مسئله و فرضیات مختلف صورت گرفته برای فرموله کردن و حل مدل، ادامه این مطالعه در زمینه‌های متنوعی امکان پذیر است. از جمله این زمینه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مطالعه بر روی روش‌های به دست آوردن تقاضای گره‌ها برای استفاده از خطوط تغذیه کننده.

در این مطالعه فرض شد که تقاضای گره‌ها ثابت است، در حالی که در واقع با توجه به طریقه‌های متفاوت جهت رسیدن به مقصد، میزان تقاضا می‌تواند متفاوت باشد. مطالعات آتی می‌تواند بر روی طراحی خطوط تغذیه کننده با تقاضای انعطاف پذیر گره‌ها باشد.

همچنین در مدل‌های ارائه شده فرض بر این است که تخصیص ناوگان باید به گونه‌ای باشد که تمام تقاضای مسیر پوشش داده شود، به همین دلیل ممکن است به خاطر تعداد اندکی تقاضای پوشش داده نشده به تعداد ناوگان یک واحد اضافه شود و یا حتی مسیری انتخاب نشود. می‌توان با ایجاد تغییراتی در مدل الزام به پوشش تمام تقاضای مسیر را حذف کرد.

در نظرگیری عدم قطعیت در مورد تقاضای گره‌ها و زمان سفر

- bus route network at suburban railway station, Journal of Transportation Engineering, Vol. 135.1, pp. 1-8.
- 7- Shariat, A., and Gholami, A., 2010, Multimodal feeder network design problem: ant colony optimization approach, Journal of Transportation Engineering, Vol. 136.(4), pp. 323-331.
- ۸- شمسی ستاره، حشمتیان محترم و پریانی نوشین، ۱۳۹۲، دوچرخه‌سواری و مدیریت حمل و نقل، تعالی، سال سوم، شماره ۲۴ و ۲۵.
- 4- Martins, L. C., and Pato, V. M., 1998, Search strategies for the feeder bus network design problem, European Journal of Operational Research, Vol. 106(2), pp. 425-440.
- 5- Shrivastava, P. and O'Mahony, M., 2006, A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules A genetic algorithms approach, Transport policy, vol. 13(5), pp. 413-425.
- 6- Shrivastava, P., and O'Mahony, M., 2007, Use of a hybrid algorithm for modeling coordinated feeder

### feeder network design for rapid transit system

M.S. Bijan Aboalizadeh Behbahani, Sharif University of Technology

Prof. Yusef Shafahi, Sharif University of Technology

#### Abstract

Encouraging passengers in order to use public transportation facilities is one of the goals of transportation planners. The most effective way to increase the market share of public transportation is enhancing its Level of Service via faster and more comfortable transportation in comparison with private vehicles. Exploitation of rapid transportation lines (Subway, BRT, and etc.) is justifiable in corridors in which the demand exceeds a minimum value. While in most of metropolitans such demand may not be present inadvertently in any of corridors, generating the needed demand and increasing the accessibility to public transportation is possible using feeder lines like feeder buses. In fact, feeder networks play a complementary role for rapid public transit lines and they increase accessibility and coverage of these rapid public transit networks. Selecting the proper set of feeder bus lines from the candidate routes and using appropriate number of buses in each line not only completes the coverage of public transportation network, but also decreases the delay of passengers using public transportation via reducing the access time of passengers to public transportation facilities. In this study, modeling and solving of the problem of designing feeder networks for rapid transit systems will be discussed.

**Keywords:** Feeder desing, routing, public transportation, network designing.