فصلنامه علمی مهندسی ترافیک
| JOURNAL OF TRAFFIC ENGINEERING |

ارائه مدلی برای طراحی شبکه خطوط همگانی سریع با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت در فناوری‌های مختلف

شهاب الدین کرمانشاهی[۱]، یوسف شفاهی[۲]

۱- استادیار دانشکده شهرسازی، دانشگاه تهران

۲-دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

طراحی شبکه‌ای از خطوط همگانی سریع با در نظر گرفتن تنوع تکنولوژی خطوط که بتواند پوشش مناسبی برای سفرهای شهری ایجاد کند در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. فرمول‌بندی مدل طراحی شبکه خطوط همگانی سریع در قالب یک برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح با هدف بیشینه کردن پوشش خدمات برای شهروندان بیان شده و سپس این مدل برای یک شبکه مثال حل شده است. اهمیت نظری این پژوهش، ارائه فرمولبندی جدید برای مسأله طراحی شبکه خطوط همگانی سریع است که در آن تنوع تکنولوژی‌های خطوط سریع و محدودیت ظرفیت متناظر با هر تکنولوژی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از حل مدل روی یک شبکه مثال که به وسیله نرم افزار GAMS حل شده است نشان می‌دهد در نظر گرفتن تنوع تکنولوژی برای سیستم‌های سریع و محدودیت ظرفیت برای خطوط روی جوابهای مدل اثرگذار است. بنابراین اضافه شدن محدودیت ظرفیت به مدل طراحی شبکه خطوط همگانی سریع که در این مقاله به آن پرداخته شده، هم از جنبه نظری و هم از جنبه عملی اهمیت دارد. با توجه به نتایج عددی بدست آمده در شبکه مثال اهمیت در نظر گرفتن تنوع تکنولوژی و محدودیت ظرفیت نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: شبکه حمل و نقل همگانی، خطوط همگانی سریع، محدودیت ظرفیت، تکنولوژی خطوط.

۱- مقدمه

از اواخر قرن بیستم با جدی شدن مشکلات زیست محیطی، مباحث مربوط به توسعه پایدار در زمینه‌های مختلف فعالیت‌های بشری مطرح شده است [۱]. مباحث مربوط به در نظرگرفتن اثرات زیست محیطی و توسعه پایدار در کارخانه‌ها و صنایع، در تولید مسکن، در توسعه شهرها، در حمل‌ونقل و غیره در این سال‌ها در کانون توجهات بوده است. توسعه پایدار به صورت ساده: "رفع نیازهای امروز بشر به گونه‌ای که امکان مرتفع کردن همین نیاز برای نسل‌های بعدی نیز فراهم باشد" تعریف شده است [۲].

بخش حمل‌ونقل با توجه به سهم ۲۶٪ در تولید گاز CO_2، یکی از بخش‌های عمده‌ای است که روند تولید گازهای گلخانه‌ای در آن افزایشی است [۳-۲]. برای کاهش اثرات ناشی از عملکرد سیستم حمل‌ونقل، نظیر مصرف منابع تجدید ناپذیر سوخت، انتشارآلاینده‌ها و تصادفات رانندگی، تلاش‌های زیادی توسط محققین و متخصصین این حوزه انجام شده است [۳]. راهکارهای مدیریت تقاضای حمل‌ونقل از درون این تلاش‌ها برآمده‌اند [۴-۴]. در صورتی‌که بتوان مسافران را به استفاده از وسایلی سوق داد که هزینه‌های کمتری برای جامعه داشته باشند، در راستای توسعه پایدار گام برداشته شده است [۵]. متأسفانه، تغییر عادت استفاده‌کنندگان در استفاده از وسیله شخصی (شیوه پر هزینه‌تر) به حمل‌ونقل همگانی (شیوه کم هزینه‌تر) به سادگی مقدور نیست [۶ و ۷].

با توسعه خدمات حمل‌ونقل همگانی هم استفاده‌کنندگان موجود و هم مسافران جدید این سیستم منتفع می‌شوند [۸]. مسافران جدید سیستم همگانی کسانی هستند که به واسطه اعمال سیاست‌های بازدارنده برای وسایل نقلیه شخصی، حاضر به آزمایش شیوه حمل‌ونقل همگانی برای دسترسی به مقاصد

خود شده‌اند. در صورتی‌که خدمات ارائه شده به این گروه مسافران در حد قابل قبول بوده و عوامل ناراحتی آنها در حد قابل تحمل باشد، به طور طبیعی، احتمال تثبیت شدن شیوه سفر آنها و استفاده مجدد از سیستم حمل‌ونقل همگانی افزایش خواهد یافت [۹].

هدف فعالیت‌هایی که تحت عنوان کلی طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی دسته‌بندی می‌شوند، استفاده از مدل‌سازی و روش‌های تحقیق در عملیات برای ایجاد بهبود در عملکرد این سیستم است. سدر [۱۰-۱۰] فرآیند طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی را در چهار مرحله دسته‌بندی کرده است: طراحی شبکه خطوط، تعیین برنامه زمان‌بندی، برنامه‌ریزی وسایل و برنامه‌ریزی خدمه.

۲- تعریف مسأله و اهداف تحقیق

در این پژوهش مرحله اول از مراحل طراحی شبکه مورد توجه قرار گرفته است و برای طراحی شبکه خطوط همگانی سریع در شهر مدلی ارائه شده است. در مرحله اول طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی، خطوط این شبکه، یعنی مسیر حرکت برنامه‌ریزی شده وسایل سیستم حمل‌ونقل همگانی برای سرویس‌دهی به شهروندان، تعیین می‌شود. نتیجه این مرحله طرح شبکه خطوط و تعیین تکنولوژی هر خط است. معیارهای مختلفی برای ارزیابی خطوط شامل کمینه کردن زمان سفر مسافران، کمینه کردن هزینه گردانندگان به شرط تأمین تقاضای موجود یا پیش‌بینی شده و مجموع وزن‌دار این دو شاخص، معمول‌ترین این معیارها هستند. تصمیم‌گیری در این مرحله در سطح راهبردی است و از نظر افق زمانی بلند مدت (بین ۵ تا ۱۰ سال) محسوب می‌شود.

ارائه مدلی برای طراحی شبکه خطوط که در آن تنوع تکنولوژی‌های توسعه خطوط سریع در نظر گرفته شده باشد و تابع هدف و محدودیت‌های مدل از دیدگاه کاربردی قابل قبول باشد هدف این مطالعه بوده است.

۳- مطالعات پیشین

با مطالعات در زمینه طراحی شبکه حمل‌ونقل همگانی از اواخر دهه ۶۰ میلادی آغاز شده و در دهه‌های اخیر با توجه به رشد تقاضا، افزایش شلوغی شهرها و اجرای سیاست‌های مدیریت تقاضا بر اهمیت و نیاز به انجام پژوهش در این زمینه افزوده شده است. سدر[1] [۱۰] مرور نسبتاً کاملی روی مطالعات پیش از سال ۲۰۰۵ داشته است. در دو مطالعه جدیدتر کپاپستوغلو[2] و کارلافتیس[3] [۱۱-۱۱] و شوبل [۱۲] مطالعات انجام شده در زمینه طراحی شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی را بررسی و دسته‌بندی کرده‌اند.

کپاپستوغلو و کارلافتیس حدود ۶۰ تحقیق منتشرشده بین سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۰۷، در مورد طراحی شبکه خطوط همگانی را بررسی کرده‌اند [۱۱]. آنها روش‌های منتشر شده در مطالعات پیشین را از ۵ منظر مورد مطالعه قرار داده‌اند: ۱- تابع هدف ۲-متغیرهای تصمیم ۳-ساختار شبکه ۴-تقاضای همگانی ۵- روش حل. تمامی مطالعات مورد بررسی در مطالعات کپاپستوغلو و کارلافتیس به طراحی شبکه خطوط اتوبوسرانی اختصاص دارد و سیستم‌ها و تکنولوژی‌های دیگر مورد بررسی قرار نگرفته است.

شوبل[4] [۱۲] خروجی مسأله طراحی شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی را تعیین تعداد، مسیر خطوط و تواتر مربوط به هریک از خطوط تعریف می‌کند. وجود مدل‌های متنوع از این مسأله از نظر شوبل، دلیل انتخاب اهداف و محدودیت‌های مختلف توسط محققین است. این تعریف از سوی محققین دیگر کمابیش در عمل پذیرفته شده است و در اغلب مطالعات طراحی شبکه خطوط همگانی، در کنار تعیین تعداد خطوط و مسیر آنها، تواتر خطوط نیز مشخص شده است. در این تعریف انتخاب تکنولوژی خط منتخب تصریح نشده است و شوبل [۱۲] دلیل این مسأله را امکان جداسازی تکنولوژی‌های مختلف و حل مسأله جداگانه مربوط به هر تکنولوژی به صورت مجزا می‌داند. وی تصریح می‌کند در شرایطی که جداسازی مسأله تکنولوژی‌های مختلف امکان‌پذیر نباشد، نیاز به تعمیم مدل‌های موجود وجود خواهد داشت [۱۲].

لاپورت و همکاران [۱۳] زمینه‌های مختلف استفاده از دانش تحقیق در عملیات در زمینه طراحی و ارزیابی شبکه حمل‌ونقل همگانی سریع را به سه دسته تقسیم کرده‌اند: ارزیابی شبکه، مدل‌سازی طراحی شبکه و استفاده از روش‌های ابتکاری. آنها در هر دسته، آخرین مطالعات انجام شده و نتایج حاصل را به صورت مختصر ارائه کرده‌اند. کرمانشاهی [۱۴] مطالعات مربوط به مسأله طراحی شبکه خطوط حمل‌ونقل همگانی (RLTND[5]) از هشت جنبه مورد بررسی قرار داده است: ۱- تابع هدف ۲- تنوع تکنولوژی خطوط ۳- نمایش شبکه همگانی ۴- تقاضای

1 Ceder

2 Kepaptsoglou
3 Karlaftis
4 Schobel
5 Route Layout Transit Network Design

سیستم حمل‌ونقل همگانی ۵- روش ارزیابی شبکه همگانی ۶- روش تولید خطوط همگانی ۷- روش حل ۸- مثال‌های حل شده. مدلهای طراحی شبکه همگانی هنوز در حل مسائل در مقیاس عملی ناتوان هستند [۱۴].

۴- رویکرد مطالعه

مدل طراحی شبکه خطوط همگانی سریع در این پژوهش با هدف انتخاب بهترین زیرمجموعه از مجموعه خطوط نامزد که ضمن رعایت محدودیت بودجه، بیشترین پوشش خدمات حمل‌ونقل همگانی را برای شهروندان فراهم نماید، فرمول‌بندی شده است. خطوط موجود در مجموعه خطوط نامزد می‌توانند دارای تکنولوژی‌ها متفاوت باشند. تفاوت در تکنولوژی می‌تواند باعث تفاوت در حداقل یکی از پارامترهای خطوط شامل سرعت، هزینه ابنیه، هزینه ناوگان و ظرفیت آن شود. با این تفاوت، فرمول‌بندی پیشنهادی این پژوهش برای مدل طراحی شبکه خطوط همگانی سریع (C_RTND) به صورت زیر است:

$$\max \quad z = \sum_{od}\sum_{k} v_{od}^{k} \tag{۱}$$

$$\sum_{k} v_{od}^{k} + R_{od} = D_{od} \quad od \in OD \tag{۲}$$

$$V^{s,l} = \sum_{od}\sum_{k}\left(v_{od}^{k}.\delta_{od}^{k,s,l}\right) \quad s \in E,\ l \in CL \tag{۳}$$

$$V^{s,l} \le M y^{l} \quad s \in NE,\ l \in CL \tag{۴}$$

$$F^{l} \ge \frac{V^{s,l}}{VCap^{l}} \quad s \in E,\ l \in CL \tag{۵}$$

$$Flt^{l} \ge RTT^{l}.F^{l} \quad l \in CL \tag{۶}$$

$$F_{min}^{l}.y^{l} \le F^{l} \le F_{max}^{l}.y^{l} \quad l \in CL \tag{۷}$$

$$\sum_{l}\left(y^{l}.FixC^{l} + VCst^{l}.Flt^{l}\right) \le B \tag{۸}$$

$$R_{od} \le M\left(۱ - w_{od}^{k}\right) \quad od \in OD \tag{۹}$$

$$v_{od}^{k}.Exp\left(V_{p_{od}^{r}}\right) - v_{od}^{r}.Exp\left(V_{p_{od}^{k}}\right) \le M\left(۲ - w_{od}^{k} - w_{od}^{r}\right) \quad k,r \in P_{od} \tag{۱۰}$$

$$v_{od}^{k}.Exp\left(V_{p_{od}^{r}}\right) - v_{od}^{r}.Exp\left(V_{p_{od}^{k}}\right) \le M\left(۱ + w_{od}^{k} - w_{od}^{r}\right) \quad k,r \in P_{od} \tag{۱۱}$$

$$\frac{g^{s,l}}{M} \le \left(VCap^{l}.F_{max}^{l}.y^{l} - V^{s,l}\right) \le M.g^{s,l} \quad s \in NE,\ l \in CL \tag{۱۲}$$

$$\forall (s,l):\ \delta_{od}^{k,s,l} = ۱,\ k \in P_{od},\ od \in OD$$

$$w_{od}^{k} \le g^{s,l} \tag{۱۳}$$

$$w_{od}^{k} \ge \sum_{\forall (s,l):\ \delta_{od}^{k,s,l}=۱} (g^{s,l} - ۱) + ۱$$

$$k \in P_{od},\ od \in OD \tag{۱۴}$$

$$F^{l},\ Flt^{l},\ V^{s,l},\ R_{od},\ v_{od}^{k} \ge ۰$$

$$l \in CL,\ s \in NE,\ k \in P_{od},\ od \in OD \tag{۱۵}$$

$$y^{l}, g^{s,l},\ w_{od}^{k},\ = ۰ \text{ or } ۱$$

$$l \in CL,\ s \in NE,\ k \in P_{od},\ od \in OD \tag{۱۶}$$

مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای این فرمول‌بندی عبارتند از:

OD: مجموعه زوج‌های مبدأ - مقصد

od: عضوی از مجموعه زوج‌های مبدأ - مقصد

CL: مجموعه خطوط نامزد

E: مجموعه کمان‌های شبکه همگانی

s: کمان s از شبکه کمان‌های همگانی

P_{od}: مجموعه مسیرهای مقبول بین زوج مبدأ - مقصد od

S_{od}^{k}: مجموعه کمان‌های ویژه مسیر k بین زوج مبدأ - مقصد od

B: میزان بودجه در دسترس (میلیارد ریال)

D_{od}: تقاضای سفر بین زوج مبدأ - مقصد od (نفر-سفر)

$\delta_{od}^{k,s,l}$: پارامتر دودویی تعلق کمان s از خط همگانی l به مسیر مقبول k بین زوج مبدأ - مقصد od

RTT^{l}: زمان سفر یک دور کامل خط l (ساعت)

F_{min}^{l}: کمینه تواتر خط l (وسیله در ساعت)

F_{max}^{l}: بیشینه تواتر خط l (وسیله در ساعت)

M: عددی به اندازه کافی بزرگ

$FixC^{l}$: هزینه ثابت احداث خط l (میلیارد ریال)

$VCst^{l}$: هزینه یک وسیله بکار گرفته شده در خط l (میلیارد ریال)

$VCap^{l}$: ظرفیت ناوگان خط l (نفر بر وسیله)

$V_{p_{od}^{k}}$: مطلوبیت مسیر مقبول k بین زوج مبدأ - مقصد od

z: شاخص پوشش خدمات مقبول شبکه همگانی (نفر-سفر)

v_{od}^{k}: حجم پوشش داده شده توسط مسیر k بین زوج مبدأ - مقصد od (نفر-سفر)

R_{od} : حجم تقاضای سفر پوشش داده نشده بین زوج مبدأ - مقصد od (نفر-سفر)

$V^{s,l}$: حجم سفرهای روی کمان s از خط همگانی l (نفر-سفر)

F^{l} : تواتر خط l (وسیله در ساعت)

Flt^{l} : تعداد ناوگان خط l

y^{l} : متغیر دودویی انتخاب خط l در ترکیب شبکه همگانی

$g^{s,l}$: متغیر دودویی که مقدار آن در صورت وجود ظرفیت باقیمانده در کمان s از خط l برابر ۱، در غیر اینصورت ۰ است

w^{k}_{od} : متغیر دودویی که مقدار آن در صورت وجود ظرفیت باقیمانده روی مسیر k بین زوج od برابر ۱، در غیر اینصورت ۰ است

تابع هدف در این مدل بیشینه کردن پوشش مسافران توسط سیستم همگانی در نظر گرفته شده است (رابطه (۱)). فرض می‌شود نظر مسافران در مورد قابل قبول بودن سفر با سیستم همگانی معلوم است و بر اساس آن می‌توان مسیرهای قابل قبول در شبکه همگانی را برای آنها تعیین کرد. برای هر زوج مبدأ - مقصد فقط مسیرهایی روی شبکه در نظر گرفته می‌شوند که از نظر مسافران قابل قبول باشند (اعضاء مجموعه P_{od}). مدل C_RTND بر اساس مسیر بین زوج‌های مبدأ - مقصد نوشته شده و حجم اختصاص یافته به هر مسیر در این مدل به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. در محدودیت‌های (۲) مجموع حجم اختصاص داده شده به مسیرهای قابل قبول بین هر زوج مبدأ - مقصد (v^{k}_{od}) و متغیر کمبود مربوط به آن زوج مبدأ - مقصد (R_{od}) برابر تقاضای بین آن زوج (D_{od}) قرار داده شده است.

محدودیت‌های (۳) تضمین می‌کند که حجم روی هر کمان از هر خط برابر با مجموع حجم‌های اختصاص داده شده به مسیرهایی که از آن کمان بگذرند قرار داده شده است. در مدل C_RTND خط‌های قابل استفاده برای ساخت شبکه همگانی سریع معلوم فرض می‌شوند و به‌ازای هر خطi یک متغیر دودویی y^{i} در نظر گرفته شده است. محدودیت‌های (۴) تضمین می‌کنند که اگر مقدار y^{i} برابر «۰» باشد، حجم مسافران عبوری از کمان‌های خط l حتماً صفر شود. به این ترتیب در صورتی کمان‌های شبکه همگانی که متعلق به خط l هستند دارای حجم خواهند بود که خط متناظر با آن‌ها در زمره خطوط منتخب باشد.

تواتر خط همگانی l باید به میزانی باشد که ظرفیت کافی برای حجم عبوری از کمان‌های آن را فراهم کند (محدودیت‌های (۵)). ناوگان هر خط نیز تابعی از تواتر آن خط و زمان چرخه کامل آن است. مطابق محدودیت‌های (۶) هر چه تواتر خط و زمان چرخه کامل خط بیشتر باشد، تعداد ناوگان مورد نیاز برای آن خط نیز بیشتر است. در محدودیت‌های (۶) برای هر خط، محدودیت‌های عملی برای مقدار تواتر در نظر گرفته شده که می‌تواند بسته به تکنولوژی خطوط متفاوت باشد. این رابطه در صورتی که مقدار $y^{l}y^{l}$ برابر یک باشد (خط l انتخاب شده باشد)، تواتر خط l را بین دو مقدار حداقل و حداکثر محدود می‌کند. همچنین، درهمین حالت، هزینه خط l (شامل هزینه ابنیه و هزینه ناوگان) در هنگام کنترل محدودیت بودجه در نظر گرفته می‌شود (رابطه (۸)). محدودیت‌های (۹) تا (۱۴) نیز برای در نظر گرفتن انتخاب بین مسیرهای موازی و محدودیت ظرفیت در نظر گرفته شده‌اند. توضیحات مبسوط مربوط به این محدودیت‌ها در مرجع [۱۴] بیان شده است. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) نیز شرایط متغیرهای پیوسته و گسسته را بیان می‌کنند.

فرضیات انجام شده برای مدل C_RTND در این بخش ارائه شده است:

۱. مجموعه خطوط نامزد برای توسعه شبکه همگانی سریع معلوم فرض می‌شود. همچنین مشخصات عملکردی خطوط، نظیر سرعت بهره‌برداری، هزینه ابنیه، هزینه ناوگان، هزینه‌های بهره‌برداری و ظرفیت آنها نیز مشخص است (فرض معلوم بودن خطوط نامزد و مشخصات آنها).

۲. جدول کل سفرهای محدوده مورد مطالعه داده شده فرض می‌شود (فرض معلوم بودن جدول تقاضای سفر).

۳. زمان سفر خطوط سیستم‌های مختلف همگانی روی کمان‌های شبکه ثابت فرض شده است (فرض معلوم بودن زمان سفر روی کمان‌های خطوط نامزد).

۴. زمان انتظار خطوط همگانی سریع ثابت و معلوم فرض شده است (معلوم بودن زمان انتظار خطوط سریع).

۵. در صورتی‌که مسیر دو خط در یک کمان مشترک باشد، هزینه ابنیه کمان برای هر دو محاسبه می‌شود و ظرفیت خطوط کاهش نمی‌یابد.

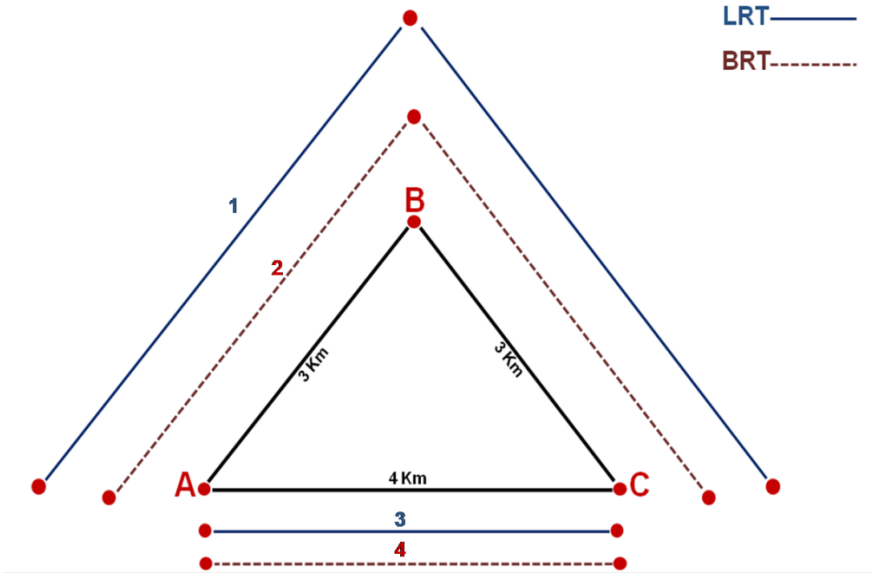
فرضیات ۱ و ۲ به صورت معمول در مطالعات طراحی شبکه انجام می‌شوند. فرض ثابت بودن زمان سفر برای خطوط سریع (فرض ۳) با توجه به اینکه خطوط سریع یا به صورت کامل یا در بخش عمده‌ای از مسیر از جریان ترافیک سایر وسایل جدا

هستند فرض دور از واقعیتی نیست. این فرض باعث می‌شود وابستگی زمان سفر روی شبکه همگانی نسبت به حجم استفاده‌کننده از آن حذف شود و به این ترتیب فرمولبندی و حل مسأله طراحی شبکه خطوط همگانی سریع ساده‌تر می‌شود. با توجه به اینکه خطوط حمل و نقل همگانی سریع معمولاً در ساعت اوج با سرفاصله کوتاه (کمتر از ۷ دقیقه) خدمات می‌دهند، می‌توان فرض کرد که تفاوت زمان انتظار روی خطوط مختلف قابل توجه نیست و بنابراین مقدار ثابتی برای زمان انتظار روی خطوط مختلف می‌توان در نظر گرفت (فرض ۴). و در پایان فرض (۵) نیز هم در مورد سیستم‌های ریلی و هم جاده‌ای فرض قابل قبولی است زیرا نباید خطوطی که از زیر ساخت مشترکی استفاده می‌کنند، هزینه زیر ساخت کامل را برای هر یک از خطوط در نظر گرفت.

۵- حل مدل روی یک شبکه نمونه

در این بخش برای تبیین بهتر مدل C_RTND و محدودیت‌های آن، این مدل روی یک مثال کوچک حل می‌شود. برای حل مثال، مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط در محیط نرم‌افزار GAMS۲۳.۷ نوشته شده است. در ادامه برای مقایسه، حالت دیگری که در آن ظرفیت خطوط، نامحدود است ($F'_{max}=M$) نیز در مورد بررسی قرار گرفته است.

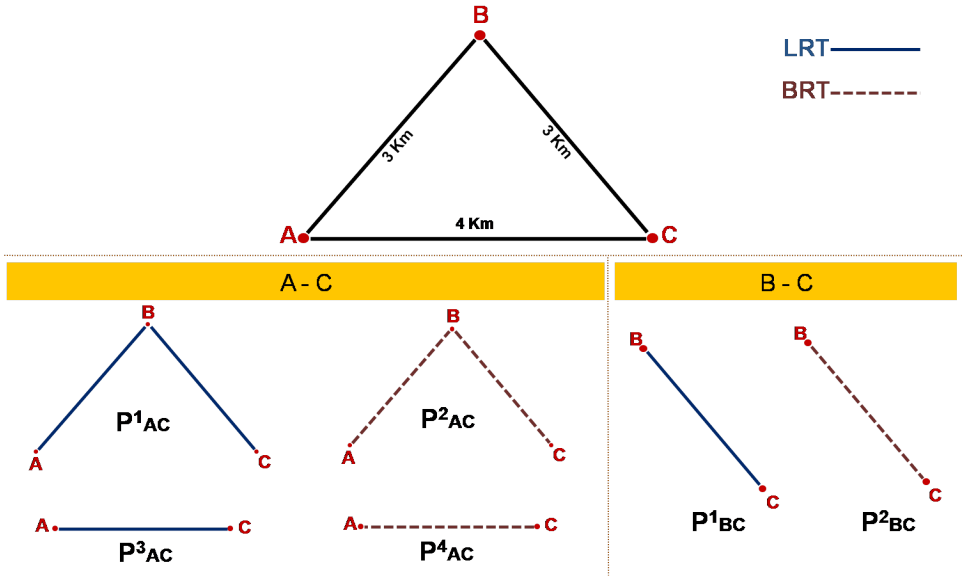
شبکه نشان‌داده شده در شکل ۱ که بعد از این شبکه مثال نامیده می‌شود، شامل ۳ گره و ۳ کمان است. در این مثال دو تکنولوژی ریلی و اتوبوسرانی تندرو برای طراحی شبکه همگانی مورد نظر است. مطابق شکل ۱برای هر یک از این دو تکنولوژی دو خط به عنوان خطوط نامزد برای حضور در شبکه در نظر گرفته شده است. بنابراین مجموعه خطوط کاندید شامل ۴



شکل ۱- شبکه پایه مثال

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل در شبکه مثال

پارامترهای ورودی	شماره خطوط			
	۱	۲	۳	۴
تکنولوژی	ریلی	اتوبوسرانی تندرو	ریلی	اتوبوسرانی تندرو
حداقل سرفاصله (دقیقه)	۲	۱	۲	۱
حداکثر سرفاصله (دقیقه)	۶	۵	۶	۵
ظرفیت وسیله (نفر بر وسیله)	۱۰۰۰	۱۵۰	۱۰۰۰	۱۵۰
(نفر بر ساعت بر جهت) ظرفیت خط	۳۰۰۰۰	۹۰۰۰	۳۰۰۰۰	۹۰۰۰
هزینه ناوگان (میلیارد ریال بر وسیله)	۵۰	۱۰	۵۰	۱۰
هزینه احداث ابنیه (میلیارد ریال بر کیلومتر)	۲۰۰	۲۰	۲۰۰	۲۰
زمان چرخه کامل (ساعت)	۳/۰	۵/۰	۲/۰	۳/۰



شکل ۲- مسیرهای مقبول برای سفرهای A-C و B-C در شبکه مثال

عضو است (خطوط ۱ و ۳ با تکنولوژی ریلی و خطوط ۲و۴ با تکنولوژی اتوبوسرانی تندرو). زیر مجموعه‌ای از این مجموعه ۴ عضوی، خروجی مدل C_RTND است. پارامترهای ورودی مدل برای حل مدل روی شبکه مثال درجدول ۱ ارائه شده است.

بر اساس زمان سفر قابل قبول برای دسترسی بین گره‌های مبدأ - مقصد، با فرض حضور همه خطوط در شبکه، مسیرهای مقبول مسافران در شبکه همگانی قابل تعیین است. در تعیین مسیرهای مقبول فرض می‌شود مسیری که در آن نیاز به انتقال بین خطوط وجود داشته باشد از نظر مسافران مقبول نیست (حداکثر تعداد انتقال بین خطوط برابر صفر در نظر گرفته شده است). در شکل ۲ مسیرهای مقبول برای سفرها از A و B به C نشان داده شده است. در این شکل نام هر مسیر شامل شماره مسیر و گره مبدأ و گره مقصدی است که توسط آن مسیر بهم متصل می‌شوند. در شکل ۲ برای سفرهای از A به C و از B و Cو به ترتیب چهار و دو مسیر مقبول نشان داده شده است.

جدول ۲ مقایسه بین جواب‌های بدست آمده از حل مدل C_RTND در سناریوهای مختلف تقاضا و بودجه را ارائه می‌دهد. از ترکیب ۵ حالت بودجه (۱۵۰۰، ۳۰۰۰، ۴۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۵۰۰ میلیارد ریال) و ۳ سناریوی تقاضا (۲۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ نفر ـ سفر) ۱۵ سناریوی مختلف بدست آمده است. در سناریوهای تقاضا، کل تقاضا به صورت مساوی بین دو زوج مبدأ - مقصد A-C و B-C تقسیم شده است. به عنوان مثال در سناریوی ۶ که کل تقاضا ۵۰۰۰۰ واحد است، تقاضا از A به C و از B به C برابر ۲۵۰۰۰ نفر ـ سفر در نظر گرفته شده است. جواب‌های درج شده در جدول ۲ با استفاده از حل مدل C_RTND در نرم افزار GAMS ۲۳.۷ بدست آمده است. در این جدول، نتایج حل مدل پیشنهادی در حالتی که محدودیت ظرفیت در نظر گرفته نشده (F^{1}_{max}=M) نیز ارائه شده است.

مطابق جدول ۲، در همه سناریوها به جز سناریوهای ۶ و۱۱ خطوط منتخب در دو حالت با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و بدون آن متفاوت است. همچنین مقدار تابع هدف نیز برای این دو حالت در اکثر سناریوها با هم متفاوت است. این تفاوت در سناریوهای با بودجه‌های کمتر و تقاضای بالاتر، قابل ملاحظه است (سناریوهای ۱، ۶، ۷ و ۱۱ تا ۱۵). بنابراین همانطور که انتظار می‌رفت در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت در طراحی شبکه همگانی می‌تواند جواب و مقدار تابع هدف را تحت تأثیر قرار دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل برنامه ریزی ریاضی برای طراحی شبکه خطوط همگانی سریع ارائه شده است که تابع هدف آن بیشینه کردن پوشش خدمان مقبول برای مسافران است. تابع هدف معرفی شده دراین مطالعه به دلیل در نظر گرفتن قابل پذیرش بودن خدمات از دید مسافران برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران نیز ملموس است. نتایج بدست آمده از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

جدول ۲- نتایج حل مدل C_RTND در سناریوهای مختلف روی شبکه مثال و مقایسه با حالت بدون محدودیت ظرفیت

شماره سناریو	بودجه (میلیارد ریال)	تقاضای کل* (نفر ـ سفر)	C_RTND		C_RTND (بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت)	
			پوشش (نفر ـ سفر)	خطوط منتخب	پوشش (نفر ـ سفر)	خطوط منتخب
۱	۱۵۰۰	۲۰،۰۰۰	۱۴۰۰۰	۴،۲	۲۰۰۰۰	۲
۲	۳۰۰۰	۲۰،۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱	۲۰۰۰۰	۲
۳	۴۵۰۰	۲۰،۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱	۲۰۰۰۰	۲
۴	۶۰۰۰	۲۰،۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱	۲۰۰۰۰	۲
۵	۷۵۰۰	۲۰،۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱	۲۰۰۰۰	۲
۶	۱۵۰۰	۵۰،۰۰۰	۱۸۰۰۰	۴،۲	۴۹۰۰۰	۴،۲
۷	۳۰۰۰	۵۰،۰۰۰	۲۷۷۵۰	۴،۳،۲	۵۰۰۰۰	۲
۸	۴۵۰۰	۵۰،۰۰۰	۴۵۲۵۰	۴،۲،۱	۵۰۰۰۰	۲
۹	۶۰۰۰	۵۰،۰۰۰	۴۹۰۰۰	۳،۲،۱	۵۰۰۰۰	۲
۱۰	۷۵۰۰	۵۰،۰۰۰	۵۰۰۰۰	۴،۳،۲،۱	۵۰۰۰۰	۲
۱۱	۱۵۰۰	۱۰۰،۰۰۰	۱۸۰۰۰	۴،۲	۵۹۰۰۰	۴،۲
۱۲	۳۰۰۰	۱۰۰،۰۰۰	۴۸۰۰۰	۴،۳،۲	۱۰۰۰۰۰	۴،۲
۱۳	۴۵۰۰	۱۰۰،۰۰۰	۴۸۰۰۰	۴،۳،۲	۱۰۰۰۰۰	۲
۱۴	۶۰۰۰	۱۰۰،۰۰۰	۶۴۰۰۰	۴،۳،۲،۱	۱۰۰۰۰۰	۲
۱۵	۷۵۰۰	۱۰۰،۰۰۰	۶۴۰۰۰	۴،۳،۲،۱	۱۰۰۰۰۰	۲

۱- در مدل پیشنهادی تنوع تکنولوژی در خطوط سریع از نظر تفاوت در سرعت عملکردی، تفاوت در ظرفیت و تفاوت در هزینه‌های ساخت مسیر حرکت و ناوگان در نظر گرفته شده است.

۲- مدل پیشنهادی روی یک شبکه مثال حل شده است و نتایج عددی نشان می‌دهد در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و تنوع در تکنولوژی خطوط بر جواب بدست آمده اثرگذار است. بنابراین در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت در حل مسائل در دنیای واقعی نیز اثر گذار است. در حالتیکه محدودیت ظرفیت در نظر گرفته نشده تکنولوژی‌های با ظرفیت بالا (مترو) در مدل انتخاب نشده‌اند در حالیکه با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت توجیه برای تخصیص بودجه به برای انتخاب خطوط پرهزینه‌تر و پرظرفیت‌تر وجود داشته است.

۳- مطالعات قبلی نشان می‌دهد حل دقیق مدل‌های طراحی شبکه خطوط همگانی برای مسائل در مقیاس واقعی غیر عملی است [۱۲]، بنابراین نیاز است تا الگوریتمی تقریبی برای حل مدل پیشنهادی این مطالعه توسعه یابد و عملکرد آنها روی شبکه‌های در مقیاس واقعی بررسی شود.

۷- مراجع

1- World Commission on Environment and Development (WCED), “Our common future”, Oxford: Oxford University Press, p. 43, 1987.

2- Chapman, L., “Transport and climate change: a review”, Journal of transport geography, 15(5): 354-367, 2007.

3- Woodcock, J., P. Edwards, et al., “Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: urban land transport”, The Lancet 374(9705): 1930-1943, 2009.

9- Andreassen, T. W., "(Dis) satisfaction with public services: the case of public transportation", Journal of Services Marketing 9(5): 30-41, 1995.

10- Ceder, A., "Public transit planning and operation: theory, modeling and practice", Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2007.

11- Kepaptsoglou, K. and M. Karlaftis, "Transit route network design problem: Review", Journal of transportation engineering, 135(8): p. 491-505, 2009.

12- Schöbel, A., "Line planning in public transportation: models and methods" OR spectrum, p. 1-20, 2011.

13- Laporte, G., J. Mesa, et al., "Planning rapid transit networks", Socio-Economic Planning Sciences, 45(3): 95-104, 2011.

۱۴- طراحی شبکه خطوط حمل و نقل همگانی با هدف بیشینه کردن پوشش خدمات مقبول، شهاب‌الدین کرمانشاهی، رساله دکتری دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۲.

4- Ferguson, E.,"Transportation Demand Management Planning, Development, and Implementation", Journal of the American Planning Association, 56(4): 442-456, 1990.

5- Steg, L. and R. Gifford, "Sustainable transportation and quality of life", Journal of transport geography, 13(1): 59-69, 2005.

6- Meyer, M. D., "Demand management as an element of transportation policy: using carrots and sticks to influence travel behavior" Transportation Research Part A: Policy and Practice, 33(7): 575-599, 1999.

7- Tertoolen, G., D. van Kreveld, et al., "Psychological resistance against attempts to reduce private car use", Transportation Research Part A: Policy and Practice, 32(3): 171-181, 1998.

8- Litman, T., "Valuing transit service quality improvements", Journal of Public Transportation 11(2): 43-63, 2008.

Designing Rapid Transit Network Considering Capacity Constraint for Different line Technologies

Shahab Kermanshahi[1], Yousef Shafahi[2]

[1]Faculty member of Urban Planning and Design Department, University of Tehran. [2]Faculty member of Civil Engineering Department, Sharif University of Technology.

Abstract

Designing Rapid Transit Network layout, considering different capacities for different technologies is considered in this paper. Maximizing coverage of Acceptable coverage is set as the objective function of the model. The network design model is formulated as a mixed integer program. In the proposed model possibility of considering different technologies for different lines is provided. Proposing a new model containing capacity constraint for different technologies is the contribution of this study to the knowledge. The model is solved for an illustrative example by GAMS software. Computational results over various budget scenarios show that there is difference between the solution and resulted objective function with and without capacity constraint. Furthermore, considering different technologies with their corresponding cost has affected the solutions. It is shown by an illustrative example that it is worthy to consider different technologies in designing rapid transit network both from theoretical and practical viewpoints.

Keywords: Transit Network Design, Rapid Transit Lines, Capacity Constraint, Transit Technology.