طراحی شبکه خطوط حمل و نقل عمومی (اتوبوسرانی) با استفاده از تکنیک شاخه و کرانه

شهریار افندی‌زاده
استادیار

مجید رضا افیونیان
دانشجوی کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

جهت حل مشکلات ترافیکی و مسائل اقتصادی-اجتماعی و زیست محیطی ناشی از آن در شهرهای بزرگ، نیاز به یک سیستم مجهز و کارآمد حمل و نقل عمومی می‌باشد. از آنجاکه عمده‌ترین قسمت سیستم حمل و نقل عمومی در کشورهای درحال توسعه را شبکه اتوبوسرانی شهری تشکیل می‌دهد، بنابراین طراحی بهینه شبکه اتوبوسرانی با هدف بهبود وضعیت حمل و نقل عمومی از اهمیت فراوانی برخوردار است. طراحی شبکه خطوط برروی تنظیم تواتر و زمان‌بندی اتوبوسها و بکارگیری پرسنل آنها تاثیر زیادی دارد. همچنین پس از طراحی و اجرای اولیه شبکه، بدلیل انعطاف‌ناپذیر بودن دستگاه‌های بهره‌برداری به‌ندرت می‌توان اقدامات اصلاحی انجام داد، بنابراین طراحی شبکه خطوط اتوبوسرانی مهمترین مرحله در روند برنامه‌ریزی حمل ونقل عمومی شهری می‌باشد. در این مقاله پس از تعریف مسئله مسیریابی خطوط شبکه حمل و نقل عمومی به ذکر روش حلی بر مبنای تکنیک شاخه و کرانه برای حل این مسئله پرداخته می‌شود. همچنین کارایی این روش حل و برنامه کامپیوتری نوشته شده برای آن به زبان Qbasic، برروی یک ناحیه مطالعاتی نمونه بررسی می‌گردد.

کلمات کلیدی

طراحی، شبکه، حمل و نقل عمومی، اتوبوس، تکنیک شاخه و کرانه.

Desgin of Bus Transit Network Based of Branch and Bound Technique

S. Afandizadeh
Assistant Professor

M. R. Afunian
Student

Civil Engineering Depatment
Iran University of Science and Technology

Abstract

In order to overcome the problems of traffic, socioeconomic, as well as ecological ones, especially in big cities, there is a need for an equipped system to promote the public transportation. Since the urban bus network is the crucial part of the public transportation in developing countries, optimal design of the bus network aiming to improve the current condition of public transportation enjoys its high importance.Route network design is the single most important planning step in the

urban bus transit planning process. This is because the route structure designed will invariably affect both frequency setting and bus and crew sheduling, and also due to the fact that operators have the least flexibility in altering the routes.

In this paper, beside defining an innovative way for solving the problem of route finding, a method based on the branch and bound technique is presented. This method is applied to a case study network and results are presented.

Keywords

Bus, Transit, Network, Design, Branch and Bound Technique.

مقدمه

توسعه روزافزون شهرنشینی، جابجایی انسان و کالا را بصورت مسئله‌ای درآورده کـه پیچیـدگی آن دائمـاً در حـال افزایـش می‌باشد. رشد شهری باعث افزایش تقاضای سفر بر روی تسهیلات ناکافی موجود حمـل و نقـل شـهر شـده اسـت کـه بـه تبـع شهرهای بزرگ دست به گریبان مشکلات عدیده‌ای در زمینه‌های تراکم ترافیکی، آلودگی هوا، اتلاف وقتهای طولانـی در مسـیر سفرهای روزانه افراد، افزایش مصرف سوخت و استهلاک وسایل نقلیه و غیره هستند [۱].

برای حل مشکلات ترافیکی و مسائل اقتصادی اجتماعی و زیسـت محیطـی ناشـی از آن در شـهرهای بـزرگ نیـاز بـه یـک سیستم مجهز و کارآمد حمل و نقل عمومی می‌باشد. بررسی سیستمهای حمل و نقل عمومـی درون شـهری نشـان‌دهنده ایـن موضوع است که قابلیت جابجایی مسافر اینگونه سیستمها در مقایسه با خودروهـای شـخصی بسـیار بیشـتر اسـت، در حالیکـه مصرف انرژی و عوارض زیست محیطی و آلودگی کمتری در بردارند. با توجه به حجم بالای سـرمایه‌گذاری لازم جـهت ایجـاد و راه‌اندازی سیستمهای نوین حمل و نقل عمومی که به‌عنوان یـک عـامل محدودکننـده شـناخته می‌شـود، نیـاز بـه مدیریـت و برنامه‌ریزی در جهت استفاده بهینه از تجهیزات موجود و اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در طرح و توسعه سیستم احساس می‌شـود [۵]. برای انجام یک برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح ابتدا باید مشخصات سیستم موجود را مورد مطالعه قرارداد و سـپس بـا یـک روش علمی اقدام به طراحی سیستم مناسب نمود. از آنجاکه عمده‌ترین قسمت سیستم حمل و نقـل عمومـی در کشـورهای در حال توسعه را شبکه اتوبوسرانی شهری تشکیل می‌دهد، بنابراین طراحی شبکه اتوبوسرانی با هدف بهبود وضعیت حمـل و نقـل عمومی از اهمیت فراوانی برخوردار است.

بدلیل اینکه تقاضای آینده برای حمل و نقل و بخصوص در کشورهای در حال توسعه، تنـها بوسـیله سیسـتم حمـل و نقـل عمومی می‌تواند برآورده شود، باید به سیستم حمل و نقل عمومی اهمیت بیشـتری داده شـود. معرفـی مدهـای حمـل و نقلـی جدید و سیستمهای حمل و نقل عمومی با حجم بالا، دورنمای روشنی را ارائه می‌کنند ولی نیاز بـه توسـعه زیربنـایی و تحمـل هزینه‌های اقتصادی قابل توجهی دارند. به همین دلیل نیاز به استفاده از اتوبوسها همچنان برای تحمل قسـمت عمـده تقاضـای حمل و نقل عمومی ادامه خواهد داشت.

اهمیت طراحی شبکه اتوبوسرانی در سیستم حمل و نقل عمومی

طراحی شبکه خطوط اتوبوسرانی مهمترین مرحله در روند برنامه‌ریزی حمل و نقل عمومی شهری می‌باشد. طراحـی شـبکه خطوط برروی تنظیم تواتر و زمان‌بندی اتوبوسها و بکارگیری پرسنل آنها تاثیر زیادی دارد. پس از طراحی واجرای اولیه شـبکه، بدلیل انعطاف‌ناپذیر بودن دستگاههای بهره‌برداری به ندرت می‌توان اقدامات اصلاحی انجـام داد، و یـا در صـورت امکـان انجـام اصلاحات، اجرای آنها مستلزم صرف هزینه و اتلاف وقت خواهد بود. لذا با توجه به محدودیتـهای موجـود، بـرای دسـتیابی بـه سطح سرویس مورد نظر، طراحی بهینه شبکه خطوط اتوبوسرانی ضـروری می‌باشـد [۵]. طراحـی شـبکه خطـوط اتوبوسـرانی شهری مستلزم انتخاب خطوط و تعیین ناوگان مربوط به آنها می‌باشد بطوریکه اهداف مورد نظرتـأمین شـوند. در ادامـه پـس از تعریف مسئله مسیریابی که مهمترین مرحله در مسئله طراحی شبکه خطوط اتوبوسـرانی می‌باشـد، بـه ارائـه راه حلـی کـارا بـا استفاده از تکنیک شاخه و کرانه برای آن مبادرت می‌گردد.

تعریف مسئله و انتخاب تابع هدف

در این مقاله سعی می‌شود مسیریابی خطوط اتوبوسرانی که از مهمترین مراحل طراحی شبکه خطوط اتوبوسرانی است به‌عنوان یک مسئله تعریف و مورد بررسی قرار گیرد و راه حلی کارا برای آن ارائه شود. بنابراین تعریف مسئله عبارت است از مسیریابی خطوط اتوبوسرانی بین زوج پایانه‌های داده شده‌ای از یک شبکه حمل و نقلی مورد نظر به طوری‌که هدف مورد نظر بهینه شود.

اما بهترین هدف چه می‌تواند باشد؟ این هدفها در عمل فراوانند و می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

۱ـ کمینه نمودن هزینه‌ها.

۲ـ بیشینه نمودن منافع.

۳ـ بیشینه نمودن سود خالص.

۴ـ بیشینه نمودن نسبت منافع به هزینه‌ها.

قبل از انتخاب، بی‌مناسبت نیست که تعریفی از منافع و هزینه‌های سیستم ارائه شود.

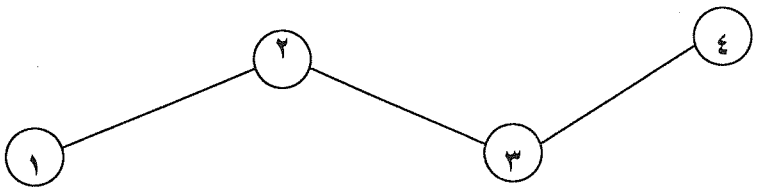
شاید مهمترین پارامتر هزینه برای استفاده‌کنندگان از سیستم، مدت زمان سفر باشد. این مدت با طول مسیر و بسیاری هزینه‌های دیگر نسبت مستقیم دارد. از طرف دیگر پارامتر هزینه برای شرکت واحد اتوبوسرانی شامل کلیه هزینه‌های آن از جمله خرید اتوبوس، خرید وسایل و قطعات یدکی، سوخت، حقوق کارکنان، چاپ بلیط اتوبوس و ... می‌شود که با میزان کارکرد و ارائه خدمت ارتباطی تنگاتنگ دارد و این خود به مسافت طی شده بستگی دارد. از این‌رو، طول مسیر از مهمترین عواملی است که می‌تواند نمایانگر هزینه‌های شرکت واحد اتوبوسرانی باشد.

بدیهی است که میزان منافع سیستم اتوبوسرانی با تعداد مسافر یا مسافر- کیلومتر رابطه مستقیم دارد. اگرچه از دید استفاده‌کنندگان سیستم میزان مسافر- کیلومتر حمل شده شاخص مطلوبتری است، ولی گرداننده سیستم میزان مسافر حمل شده را مناسبتر می‌داند. با توجه به اینکه انتخاب پارامتر مسافر ـ کیلومتر بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید، تعداد مسافر حمل شده به عنوان میزانی از منافع سیستم در نظر گرفته می‌شود. با چنین انتخابی، عملاً به شرکتهای حمل و نقل همگانی به صورت شرکتی که قصد بهینه سازی منافع خود را دارد نگریسته می‌شود.

در این مطالعه بیشینه کردن نسبت منافع به هزینه‌ها به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. بدلیل اینکه هر دو پارامتر منافع و هزینه‌ها را همزمان در نظر گرفته، نیازی به تبدیل این دو پارامتر به شکل یک پارامتر واحد و تعیین ضرایب وزنی برای این منظور که بسیار مشکل می‌باشد نخواهد بود. اگرچه انتخاب چنین تابع هدفی باعث پیچیدگی مسئله و حل آن می‌گردد. ابتدا لازم است به تعریف منفعت و هزینه برای هر کمان پرداخته شده و سپس تعریف ریاضی مسئله مسیریابی ارائه می‌گردد.

تعریف منفعت و هزینه برای هر کمان

در این رابطه می‌توان تابع هدف مورد نظر را بیشینه کردن نسبت کل تقاضای برآورده شده به کل مسافت طی شده، در همه مسیرها قرار داد. در این راستا، طول هر کمان به عنوان هزینهٔ آن کمان و منفعت آن، حجم تجمعی تقاضای سفر گره‌های پیش از گرهٔ ابتدای آن کمان می‌باشد که در مسیر منتهی به کمان مورد نظر واقع می‌باشد. به عبارت دیگر، اگر یک مسیر متشکل از سه کمان مطابق شکل زیر باشد، منفعت هر یک از کمانها به صورت زیر تعیین می‌شود:



فرض می‌شود که D_{ij} تقاضای گره مبدا i به گره مقصد j باشد، در این صورت:

D_{12} = منفعت کمان (۲ و ۱)

$D_{13} + D_{23}$ = منفعت کمان (۳ و ۲)

$D_{14} + D_{24} + D_{34}$ = منفعت کمان (۴ و ۳)

با این تعریف از منفعت کمان، مجموع منافع سه کمان، درست برابر کل تقاضای مسیر فوق است و مجموع هزینه سه کمان، برا بر طول کل مسیر است. فرض بر این است که تعویض وسیله نقلیه (تعویض خط یا انتقال) قابل توجه نیست و همگی سعی در رسیدن به مقصد با یک بار سوار شدن به اتوبوس را دارند.

روشن است که منفعت هر کمان به گره‌های پیش از آن کمان در مسیر مربوطه بستگی دارد. یعنی هر کمان از شبکه دارای منفعت‌های متغیر ولی هزینه ثابت است. از این رو برای حل مسأله باید دستور حلی را انتخاب و یا طراحی کرد که در هر مرحله قادر به یادآوری گره‌های پیش از هر گره در مسیر مورد نظر باشد تا بدان وسیله امکان محاسبه منفعت کمان را بوجود آورد.

بیان ریاضی مسأله مسیریابی شبکه خطوط اتوبوسرانی

فرض می‌شود مجموعه T دارای n زوج پایانه است، همچنین:

M = حد بالایی تعداد مسیرهای مورد نیاز

P_I = مجموعه مسیرهای ممکن بین زوج پایانه i ام ; $i = 1,2,....,n$

m_i = تعداد مسیرهای (عناصر) مجموعه P_i ; $i = 1, 2, \dots, n$

P_{ij} = مسیر j ام از زوج پایانه i ام ; $j = 1, 2, \dots, m_i ; i = 1, 2, \dots, n$;

B_{ij} = منفعت مسیر P_{ij} ; $j = 1, 2, \dots, m_i ; i = 1, 2, \dots, n$;

C_{ij} = هزینه مسیر P_{ij} ; $j = 1, 2, \dots, m_i ; i = 1, 2, \dots, n$;

X_{ij} = { 1، اگر مسیر P_{ij} انتخاب شود. ; 0 در غیر این صورت. } ; $j = 1, 2, \dots, m_i ; i = 1, 2, \dots, n$;

هدف مسأله عبارت است از بیشینه کردن نسبت "مجموع منافع به مجموع هزینه‌های" مسیرها با توجه به محدودیت‌های زیر:

- بین هر زوج پایانه حداکثر یک مسیر انتخاب شود.
- تعداد کل مسیرها از حد معینی بیشتر نشود.

به عبارت دیگر:

$$MAX\left\{\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij}\cdot B_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij}\cdot C_{ij}}\right\} \qquad (۱)$$

S. T:

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} \le 1 \qquad ;i = 1,2,....,n \qquad (الف_۱)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} \le m \qquad (ب-۱)$$

$$X_{ij} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad ; i = 1,2,....,n \; ; \; j = 1,2,....,m_i \qquad (ج-۱)$$

B_{ij} در واقع، تابعی از X_{ij} است. همچنین ملاحظه می شود مدل فوق یک مدل برنامه‌ریزی با اعداد صحیح از نوع غیر خطی(INLP) است که حل آن، بسیار مشکل، وقت‌گیر و در شبکه‌های واقعی غیر عملی است (از جمله بدست آوردن عناصر مجموعه P_i که نیاز به شمارش کامل دارد).

از اینرو جای بحثی برای چگونگی حل مدل فوق با استفاده از روشهای معمول و روشهای تحلیلی باقی نمی‌ماند.

در این مطالعه کوشش می‌گردد که با ساده سازی مسأله و با انجام یک سری فرضیات معقول و نیز با استفاده از تکنیکهای حل موجود، راه‌حلی عملی در جهت رسیدن به "جوابی مناسب" ارائه شود. در این قسمت، پس از بیان صورت ریاضی مسأله مسیریابی، روشی برای جهت‌دار کردن شبکه توضیح داده می‌شود. سپس دستور حلی به منظور بدست آوردن جواب مسأله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

بدست آوردن زیر شبکه بدون حلقه جهت‌دار از شبکه اصلی

واضح است که مسیرهای اتوبوسرانی نمی‌توانند دارای هر شکل اختیاری باشند. انتظار می‌رود که با طی کمانهای مختلف مسیرها، مسافرین همواره از مبدإ دورتر و به مقصد نزدیکتر شوند. از اینرو طبیعی است که کمانهای شبکه در همه جهتهای ممکن، مناسب تشکیل مسیر نباشند.

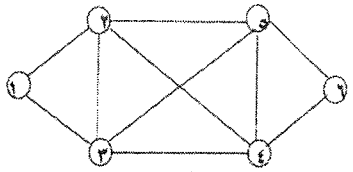
حذف جهتهای "نامعقول" از کمانهای یک شبکه موجب عدم تشکیل مسیرهای "نامعقول" یاد شده، و کاهش حجم محاسبات می‌گردد. دستیابی به زیر شبکه بدون حلقه جهت‌دار در این راستا دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. این زیر شبکه دو ویژگی یاد شده اخیر را در اختیار می‌گذارد.

طبق تعریف، شبکه بدون حلقه جهت‌دار، شبکه‌ای است که "از هر گرهٔ آن در جهت کمانها، حرکت آغاز شود، نتوان به آن گره بازگشت". برای روشن‌تر شدن مطلب اخیر به شکلهای (۱) و (۲) مراجعه کنید.

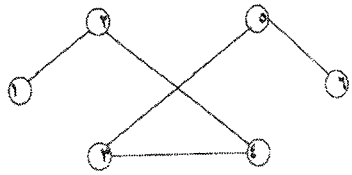
اکنون اگر با روشی مطلوب و منطقی شبکه را به شکلی جهت‌دار کرد که بدون حلهقه جهت‌دار شود، می‌توان تعداد مسیرهای بین هر زوج پایانه را تا سطح بسیار محدودی کاهش داد. این عمل در ارائه راه‌حل و سرعت رسیدن به جواب کمک شایانی خواهد کرد. بحث زیر روشی است برای تبدیل یک شبکه به زیر شبکه بدون حلقه جهت‌دار:

دایال که این روش را برای دستور حل تخصیص ترافیک احتمالی خود بکار گرفته است، از آن برای تعیین مسیرهای کارا از یک مبدإ k به مقصد مورد نظر s استفاده کرده است [۳].

فرض می‌شود که d (i) کوتاه‌ترین فاصله از مبدإ مورد نظر k تا گرهٔ i، l(i) کوتاه‌ترین فاصله از گره i تا مقصد s و همچنین p^k_s، مسیری از مبدإ k به مقصد s است. بر طبق تعریف، مسیر p^k_s از یک شبکه، کارا است اگر برای هر کمان (i, j) آن d (i) > d (j) و l (i) > l (j) باشد. به عبارت دیگر، مسیر p^k_s کارا است اگر حرکت در آن همواره موجب دور شدن از مبدإ k و نزدیک شدن به مقصد s شود. در این صورت اگر همه مسیرهای موجود در یک شبکه این خاصیت را داشته باشند، آن شبکه بدون حلقه جهت‌دار خواهد بود. در این گونه شبکه‌ها، شماره گره‌ها را می‌توان به گونه‌ای تغییر داد که رابطه $\forall(i,j) \in A \Rightarrow i < j$ بر قرار باشد. اکنون اگر همه کمانهای شبکه مورد نظر بررسی شود و آنهایی که دارای خاصیت یاد شده هستند نگهداشته و سایرین حذف شوند، شبکه به یک زیر شبکه بدون حلقه جهت‌دار تبدیل خواهد شد.



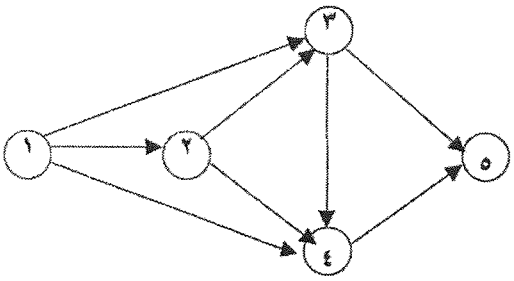
الف ـ شبکهٔ اصلی



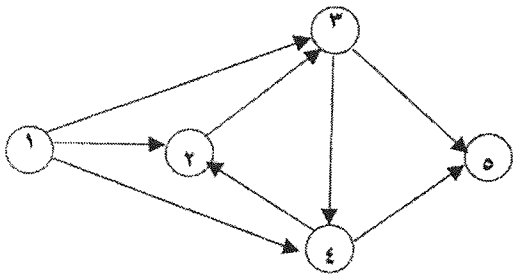
ب ـ یک مسیر نامعقول بین گرهٔ ۱ و ۶

ج ـ یک مسیر معقول بین گرهٔ ۱ و ۶

شکل (۱) شبکه فرضی و یک مسیر معقول و یک مسیر نامعقول بین یکی از زوج پایانه‌ها.



الف ـ شبکه بدون حلقه جهت‌دار



ب ـ شبکه با حلقه جهت‌دار (حلقه ۲و۴و۳و۲)

شکل (۲) نمونه‌ای از شبکه با و بدون حلقه جهت‌دار.

استفاده از روش شاخه و کرانه برای حل مسأله مسیریابی

روش بدست آوردن مسیر بهینه بین هر زوج پایانه، استفاده از روش های شمارشی است. برای پرهیز از شمارش همهٔ مسیرها که عملاً خیلی زمانبر است باید از دستور حلی سود جست که مسیرهای با تابع هدف دور از جواب بهینه را به سرعت حذف کند. استفاده از روش شاخه و کرانه در همین جهت و بر همین مبنا است. بدین ترتیب که سعی می‌شود با استفاده از حد پایینی مناسبی، هرچه سریعتر مسیرهای نامناسب حذف شوند. بدین منظور، در آغاز برای هر زوج پایانه مورد نظر، شبکه به صورتی که توضیح داده شد و از مبدإ به مقصد، به زیر شبکه بدون حلقه جهت‌دار تبدیل می‌شود. باز شماره‌گذاری گره‌ها نیز به ترتیب افزایشی از گره مبدإ (با شماره یک) به سمت گره مقصد، انجام می‌شود. سپس با استفاده از دستور حل زیر، مسیر بهینه رفت بین آن زوج را بدست آورده و پس از آن برای تعیین مسیر بهینه برگشت، اعمال یاد شده در جهت مقصد به مبدإ تکرار می‌شود. تقاضای برآورده شده توسط مسیر رفت و بر گشت را از جدول تقاضای مبدإ ـ مقصد حذف نموده و به همین ترتیب برای زوجهای بعدی هم این کار تکرار می‌شود تا این‌که یا زوج پایانه دیگری باقی نماند و یا تعداد مسیرها به حد مجاز خود برسد. دستور حل پیشنهادی برای تعیین بهترین مسیر رفت و برگشت بین یک زوج پایانه، به شرح زیر است:

گام ۱ـ $0 \leftarrow k$ ، 1 (شماره گره مبدإ) $\leftarrow i$ ، یک حد پایینی برای تابع هدف مسأله بدست آورید (LB)

گام ۲ـ $k+1 \leftarrow k$ ، همه گره‌هایی که با یک کمان به گره I متصل هستند را در مجموعه N^k قرار دهید.

گام ۳ـ اگر مجموعه N^k تهی است به گان ۹ بروید در غیر این صورت یک عنصر از آن را انتخاب کنید (گره i).

گام ۴ـ گرهٔ I را از مجموعه N^k حذف و در مجموعه p قرار دهید.

گام ۵ ـ اگر گرهٔ i، همان گره مقصد است، آنگاه مقدار تابع هدف را برای مسیری که از گرهٔ مبدإ توسط گره‌های مجموعه p به مقصد رسیده، بدست آورید و سپس به گام ۶ بروید. در غیر این صورت به گام ۷ بروید.

گام ۶ ـ اگر مقدار تابع هدف بزرگتر از LB است آن را جایگزین حد پایینی کنونی کرده و گرهٔ i را از مجموعه p حذف کنید و به گام ۳ بروید، در غیر این صورت گرهٔ i را از مجموعه p حذف کنید و به گام ۳ بروید.

گام ۷ ـ برای همه مسیرهایی که از مبدإ و از طریق گره‌های مجموعه p به مقصد ختم می‌شوند، یک حد بالایی بدست آورید (UB).

گام ۸ ـ اگر UB >LB آنگاه تمام مسیرهای مذکور را از مجموعه مسیرهای ممکن حذف و گرهٔ i را نیز از مجموعه p حذف کنید و سپس به گام ۳ بروید، در غیر این صورت به گام ۲ بروید.

گام ۹ ـ اگر k >1، آنگاه $k \leftarrow k-1$ به گام ۳ بروید، در غیر این صورت به گام بعد بروید.

گام ۱۰ـ مسیری که حد پایینی به آن تعلق دارد، جواب بهینه مسئله است، جمع آوری اطلاعات لازم، پایان.

نماد جریان عملیاتی (فلوچارت) دستور حل مسیریابی در شکل(۳) ارائه شده است.

یک حد پایینی برای دستور حل یاد شده، از مقدار تابع هدف (نسبت مجموع تقاضای برآورده شده توسط مسیر به طول مسیر) برای یک جواب امکان‌پذیر (یک مسیر ممکن) بدست می‌آید. بدیهی است هرچه این حد پایینی بزرگتر باشد، مسیرهای بیشتری حذف و دستور حل سریعتر به جواب بهینه می‌رسد.

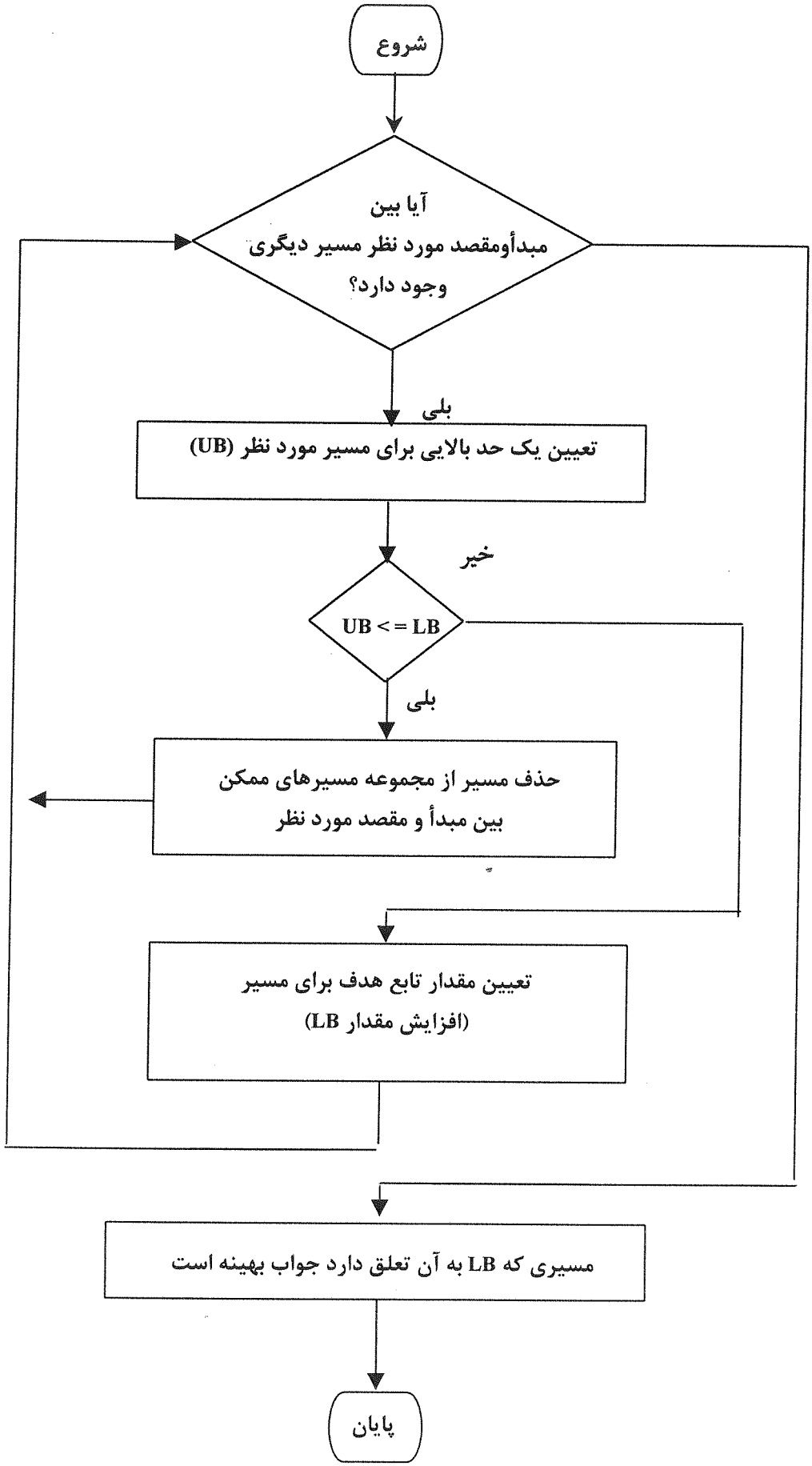
بدست آوردن یک حد پایینی مناسب برای دستور حل شاخه و کرانه

برای بدست آوردن حد پایینی مناسب باید از یک جواب امکان‌پذیر (یک مسیر ممکن) که دارای تابع هدف نسبتاً بالایی است استفاده نمود. برای این منظور می‌توان کوتاهترین مسیر بین زوج پایانه را مبنا قرار داد و میزان تابع هدف برای آن را محاسبه و به عنوان حد پایینی مناسبی مورد استفاده قرار داد.

بدین صورت که پس از یافتن کوتاهترین مسیر بین یک جفت گره، گره‌های واقع برروی این مسیر نیز مشخص گردد. در این مرحله می‌توان از مسیر مذکور استفاده کرد و میزان تابع هدف آن یعنی مجموع تقاضاهای برآورده شده توسط مسیر به طول مسیر را محاسبه نمود و به عنوان یک حد پایینی مناسب مورد استفاده قرار داد.

بدست آوردن حد بالایی مناسب برای دستور حل شاخه و کرانه

برای بدست آوردن حد بالایی برای یک مسیر، فرض می‌شود که اکنون گرهٔ i مورد نظر است و چون مسیر از گرهٔ مبدإ k به گرهٔ i، مشخص است پس مقدار تابع هدف تا گرهٔ i معلوم است. از طرفی اگر n، تعداد گره‌های شبکه مورد نظر باشد، حداکثر n-1 گره و n-1 کمان در مسیر گرهٔ I تا مقصد s، وجود دارد. یاد آوری می‌شود که گره‌های شبکه به ترتیب از مبدإ با شمارهٔ یک به سمت مقصد با شمارهٔ n باز شماره گذاری شده‌اند. از اینرو به صورتِ کسرِ تابع هدف، حداکثر $\left(\frac{n-i}{2}\right)(n-i+1)+(n-i)(i-1)$ زوج تقاضای مبدإ ـ مقصد (از جدول تقاضای موجود) و به مخرجِ کسرِ تابع هدف، حداکثر (n-I) هزینه کمان اضافه می‌شود. حال برای آنکه حد بالایی برای مسیر بدست آورده شود، جدول تقاضای مبدإ ـ مقصد به ترتیب نزولی و طول کمانها به ترتیب صعودی مرتب می‌شود. سپس به ترتیب از بیشترین تقاضای مبدإ ـ مقصد، تعداد $\left(\frac{n-i}{2}\right)(n-i+1)+(n-i)(i-1)$ تقاضای مبدإ ـ مقصد و از کمترین هزینه به ترتیب (n-i) هزینه کمان انتخاب می‌شود تا بیشترین مقدار ممکن تابع هدف برای مسیر مورد نظر محاسبه شود. بدیهی است اگر بتوان با انجام ابتکارهایی حد بالایی کوچکتری را بدست آورد، دستور حل سریعتر می‌شود. برای مثال می‌توان از بردار افزایشی هزینه کمان، هزینه کمانهایی را که در مسیر از مبدإ k و به گرهٔ i وجود دارند و از بردار نزولی تقاضای مبدإ ـ مقصد، منفعت این کمانها را حذف نمود و با استفاده از وجود و عدم وجود کمانهای شبکه بین گره‌های مختلف، عملیات یاد شده را کوتاهتر نمود، ولی این امر مستلزم محاسبات اضافی است.

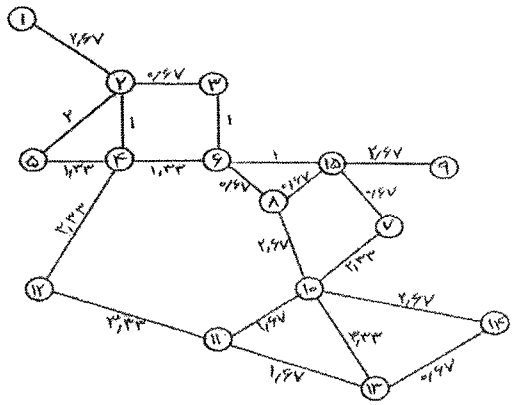


شکل (۳) نماد جریان عملیاتی (فلوچارت) دستور حل مسیریابی.

معرفی ناحیه مطالعاتی

برای نمایش نحوهٔ عملکرد روش و برنامه‌های کامپیوتری تهیه شده، از آنها بـر روی یـک شـبکه حمـل و نقلـی نمونـــه (Case Study) استفاده شد. این شبکه حمل و نقل قبلاً به‌عنوان ناحیه مطالعاتی در سایر مطالعات نظیر مطالعه منـدل در سـال ۱۹۷۹[۴] و مطالعه باج در سال ۱۹۹۲ [۲] مورد استفاده قرار گرفته و بنـابراین بـه عنـوان یـک شـبکه نمونـه جـهت مقایسـه روشهای حل ابتکاری پژوهشگران مختلف می‌باشد. همچنین شبکه نمونه یاد شده و اطلاعات مربوط بـه آن (از جملـه مـاتریس تقاضا، شماره گره‌ها و طول کمانها) می‌تواند نیازهای اطلاعاتی اولیه برای اجرای برنامه‌های کامپیوتری ارائه شده در این مطالعـه را برآورده سازد ضمن آن‌که امکان مقایسه نتایج روش ارائه شده در این تحقیق با مطالعات مذکور را نیز بوجود می‌آورد.

گره‌ها و کمانهای تشکیل دهنده شبکه در شکل(۴) نشان داده شده است (طول کمانها بـر حسـب کیلومـتر بـرروی کمانـها نشان داده شده است). جدول تقاضای حمل و نقل عمومی بین تمامی گره‌های شبکه و برای یک ساعت اوج در جدول(۱) آورده شده است.



شکل(٤) گره‌ها و کمانهای تشکیل‌دهنده ناحیه مطالعاتی [۲].

جدول(۱) تقاضای حمل و نقل عمومی شبکه ناحیه مطالعاتی در یک ساعت اوج [۲].

I \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
2	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
3	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
4	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
5	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
6	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
7	75	90	90	50	25	100	0	50	150	440	35	10	10	5	0
8	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
9	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
10	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
11	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
12	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
13	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0
14	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

مجموعه خطوط اولیه پیشنهادی بوسیله مندل که بین سـه زوج پایانـه (۱۱ و ۱)، (۷ و ۵) و (۱۲ و ۹) مسـیریابی شـده‌اند عبـــارتند از: (۱۱ و ۱۳ و ۱۴و ۱۱ و۱۰ و ۸ و ۱۵ و ۶ و ۲ و ۱) R1، (۷ و ۱۵ و ۶ و ۴ و ۵) R2 و (۱۲ و ۴ و ۶ و ۱۵ و ۹) R3 .
سپس مندل با انجام تغییراتی، خطوط پیشنهادی خودش را به صورت چهار خط زیر اصلاح می‌نماید:

(۱۳ و ۱۱ و ۱۰ و ۸ و ۶ و ۳ و ۲ و ۱)R1، (۷ و ۱۵ و ۸ و ۶ و ۴ و ۵)R2، (۹ و ۱۵ و ۶ و ۴ و ۱۲)R3 و (۱۰ و ۱۳ و ۱۴)R4.

این مجموعه از مسیرها ۱۰۰ درصد تقاضای کل را برآورده می‌سازند.

لازم به ذکر است که مندل برای تعیین مسیر، ابتدا کمانهای مورد قبولی از شبکه را تعیین نموده و سپس با به هم پیوستن این کمانها مسیرهایی را تعریف و مسیری که دارای بیشترین مقدار تابع هدف می‌باشد را به عنوان مسیر بهینه بین زوج پایانه معرفی می‌نماید [۴].

باج و همکارش نیز برای بررسی عملکرد روشی که برای طراحی خطوط اتوبوسرانی ارائه نموده بودند از شبکه مندل استفاده می‌نمایند. آنها در برنامه کامپیوتری خود، پارامتر حداقل تقاضای برآورده شده را برابر ۱۰۰ درصد تنظیم نموده و سپس با استفاده از سه استراتژی انتخاب و درج گره متفاوت، سه مجموعه متفاوت از خطوط اتوبوسرانی را بین سه زوج پایانه یاد شده پیشنهاد نمودند. در روش آنها ابتدا یک استخوان‌بندی اولیه برای مسیرهای اتوبوسرانی پیشنهاد می‌شود و در ادامه با استفاده از یک استراتژی انتخاب و درج گره، این استخوان‌بندی به یک مجموعه خطوط اتوبوسرانی تبدیل می‌گردد [۲].

اجرای مدل برروی ناحیه مطالعاتی

برای نمایش عملکرد برنامه‌های کامپیوتری و روش‌های ارائه شده ابتدا اطلاعات شبکه به صورت بانک‌های اطلاعاتی و فایل‌های ورودی تبدیل شدند که در آن اطلاعات مربوط به شماره گره‌ها، تقاضای بین هر جفت گره و فاصله کمان بین آن دو گره (در صورت وجود) ذخیره شده است. بدلیل این‌که برای اجرای برنامه کامپیوتری مسیریابی، به کوتاه‌ترین مسیر بین هر جفت گره نیاز می‌باشد، در ابتدا برنامه کامپوتری دیگری که برای یافتن کوتاهترین مسیر بین همه گره‌های شبکه تهیه شده بود اجرا گردید. پس از آنکه کوتاه‌ترین مسیرهای بین گره‌ها و مسیرهای مربوط به آنها بدست آمد، نوبت به اجرای برنامه مسیریابی می‌رسد. اطلاعات مربوط به کوتاهترین مسیرها در چند قسمت برنامه مسیریابی استفاده خواهد شد:

۱ـ برای تعیین شبکه بدون حلقه جهت‌دار و پرهیز از ایجاد حلقه در مسیرهای بدست آمده.

۲ـ برای یافتن یک حد پایینی قابل قبول برای تکنیک شاخه و کرانه که در این روش مسیریابی استفاده شده است.

برای اجرای برنامه مسیریابی ابتدا باید زوج‌های پایانه یا گره‌های ترمینالی که قرار است بین آنها مسیریابی انجام شود را معرفی نمود. این عمل توسط فایل اطلاعاتی دیگری انجام می‌شود که در هر سطر آن یک زوج پایانه آورده شده است.

برای این که بتوان روش ارائه شده را با روشهای حل مندل و باج مقایسه نمود از همان زوج پایانه‌هایی که این دو محقق استفاده نمودند، استفاده می‌گردد.

پس از اجرای برنامه کامپیوتری، سه خط اتوبوسرانی به‌صورت زیر به‌عنوان خروجی بدست می‌آید:

(۱۱، ۱۰، ۸، ۶، ۳، ۲، ۱)R1 و (۷، ۱۰، ۸، ۶، ۴، ۵) R2 و (۹، ۱۵، ۶، ۴، ۱۲) R3 با بررسی این خطوط مشخص می‌گردد که مسیرهای پیشنهادی بوسیله الگوریتم و برنامه کامپیوتری ارائه شده از طول‌های نسبتاً مناسبی تشکیل شده و همچنین پوشش خوبی برروی شبکه ایجاد می‌نمایند. همچنین این خطوط به اندازه کافی دارای همپوشانی هستند تا بتوانند تعدادی از سفرها را بوسیله انتقال به مقصدشان برسانند. بدلیل این‌که شبکه پیشنهادی دو گره ۱۳ و ۱۴ را پوشش نمی‌دهد لذا با انجام تغییر کوچکی در شبکه بدست آمده، شبکه اصلاح شده دیگری به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد. ترکیب گرهی این مجموعه خطوط به صورت زیر می‌باشد:

(۱۱، ۱۳، ۱۴، ۱۰، ۸، ۶، ۳، ۲، ۱)R1 و (۷، ۱۰، ۸، ۶، ۴، ۵) R2 و (۹، ۱۵، ۶، ۴، ۱۲)R3

همچنین برای تخمین اولی‌ای از ناوگان مورد نیاز، برنامه کامپیوتری تعداد ناوگان را برای مجموعه خطوط اولیه برابر ۹۰ اتوبوس و برای خطوط اصلاح شده برابر ۱۰۰ عدد برآورد نموده است.

در ادامه به بررسی عملکرد روش حل ارائه شده و برنامه کامپیوتری و جوابهای حاصله پرداخته می‌شود.

بررسی عملکرد روش و برنامه کامپیوتری ارائه شده

جهت ارزیابی یک مجموعه خطوط و یا مقایسه چند مجموعه خطوط مختلف با یکدیگر، نیاز به یک روند ارزیابی می‌باشد که هسته مرکزی این روند را یک مکانیزم تخصیص تشکیل می‌دهد. بنابراین باید ماتریس تقاضای حمل و نقل عمومی را بر روی مجموعه خطوط بدست آمده تخصیص داد و سپس به محاسبه پارامترهای ارزیابی مورد نیاز پرداخت. از جمله این پارامترها می‌توان تقاضای برآورده شده و درصدهای مربوط به آن (درصد تقاضاهایی که به‌طور مستقیم برآورده شده‌اند و درصد تقاضاهایی که با یک یا دو انتقال برآورده شده‌اند) و همچنین درصد سفرهایی که نمی‌توانند برآورده شوند را نام برد. همچنین از مکانیزم تخصیص می‌توان پارامترهای ارزیابی مهم دیگری از جمله زمان سفر کل شبکه و اجزای آن که عبارتند از زمان سفر کل داخل وسیله نقلیه، زمان انتظار و زمان انتقالها را محاسبه نمود. بنابراین برنامه کامپیوتری دیگری که جهت تخصیص تقاضای حمل ونقل عمومی به شبکه‌های پیشنهادی در این مطالعه تهیه شده بر روی شبکه پیشنهادی اولیه و شبکه اصلاح شده اجرا شد. همچنین برای مقایسه میزان کارایی این مجموعه مسیرها، برنامه تخصیص بر روی شبکه مندل، شبکه اصلاح شده مندل و همچنین شبکه‌های پیشنهادی باج اجرا شده است که نتایج حاصله در جدول ۲ خلاصه شده‌اند. به این ترتیب می‌توان آنها را بهتر با یکدیگر مقایسه نمود.

جدول (۲) مقایسه نتایج روش حل ارائه شده با روشهای حل مندل و باج.

	٪ تقاضای مستقیم	٪ تقاضای یک انتقال	٪ تقاضای دو انتقال	٪ تقاضای برآورده نشده	زمان سفر داخل وسیله	زمان انتظار	زمان انتقال	زمان سفر کل	تعداد اتوبوس
باج – ۱	۷۸،۶۱	۲۱،۳۹	۰	۰	۱۶۸۰۷۶	۲۰۹۳۰	۱۶۶۵۰	۲۰۵۶۵۶	۸۹،۳
باج – ۲	۷۹،۹۶	۲۰،۰۴	۰	۰	۱۶۹۱۰۱	۲۵۹۳۱	۱۵۶۰۰	۲۱۰۶۳۲	۷۶،۹
باج – ۳	۸۰،۹۹	۱۹،۰۱	۰	۰	۱۸۰۳۵۰	۲۷۷۱۹	۱۴۸۰۰	۲۱۷۸۶۹	۸۲،۲
مندل	۶۷،۴۰	۳۲،۵۹	۰	۰	۱۸۵۷۸۴	۲۵۷۰۶	۱۶۲۷۱	۲۲۷۶۶۱	۱۱۶
مندل اصلاح شده	۶۹،۰۱	۳۰،۷۳	۰،۲۴۹	۰	۱۶۷۸۰۹	۲۷۴۳۳	۲۰۵۹۳	۲۱۵۸۳۴	۹۹
این مطالعه	۶۷،۲۷	۱۸،۷۵	۰	۱۳،۹۷	۱۲۶۰۸۶	۱۳۷۸۲	۶۸۸۰	۱۴۶۷۴۸	۹۰
این مطالعه اصلاح شده	۷۹،۷۵	۲۰،۲۵	۰	۰	۱۷۰۴۹۵	۱۶۷۴۲	۸۳۲۵	۱۹۵۵۶۴	۱۰۰

همان‌طور که از جدول ۲ مشخص می‌گردد، خطوط اتوبوس پیشنهادی در این مطالعه دارای کارایی مطلوبی می‌باشند بدلیل این‌که در خطوط پیشنهادی اولیه حدود ۶۷ درصد از تقاضا به صورت مستقیم برآورده می‌شود که به میزان مشابه آن در مطالعه مندل نزدیک می‌باشد. تنها مقدار کمی از تقاضا به صورت برآوده نشده موجود می‌باشد که در شبکه اصلاح شده پوشش داده می‌شوند. میزان تقاضایی که در شبکه اصلاح شده این مطالعه برآورده می‌شود برابر ۸۰ درصد است که بسیار مطلوب بوده و از میزان مشابه آن در شبکه اصلاح شده مندل نیز بالاتر است. به تبع، تقاضای کمتری با انجام یک انتقال برآورده خواهند شد که این نیز از نکات مثبت طرح اصلاحی در این مطالعه می‌باشد. زمان انتظار و انتقال کل، در شبکه اصلاح شده این مطالعه کمتر از شبکه اصلاح شده مندل می‌باشد که این نیز از نکات قابل توجه این طرح است. تعداد اتوبوس‌های بدست آمده در دو مطالعه نیز تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین نتایج حاصله نشان می‌دهد که از نظر کارایی خطوط بدست آمده از این مطالعه همخوانی نسبتاً بالایی با مطالعه باج داشته و از بعضی جهات نیز برتر می‌باشند.

نتیجه‌گیری

همانطور که قبلاً عنوان شد، در مسأله طراحی شبکه خطوط، برنامه‌ریز به دنبال تعیین یک پیکر بندی شامل یک مجموعه از خطوط حمل و نقل عمومی و تواترهای مربوط به آنها می‌باشد به‌طوری‌که تعدادی از اهداف مورد نظر تحت محدودیتها و

قیود مسأله برآورده گردند. از این بابت در این مطالعه پس از تعریف مسئله مسیریابی خطوط حمل و نقل عمومی، به ارائه روشی ابتکاری برای حل آن و بر مبنای تکنیک شاخه و کرانه پرداخته شد.

بدلیل پیچیدگی و گستردگی مسأله طراحی شبکه خطوط حمل و نقل عمومی، اصولاً نمی‌توان روش حلی مطلق و بهینه برای آن ارائه نمود.

در این مطالعه سعی شد روشی ارائه شود که ضمن سادگی و احتیاج کم به اطلاعات آماری ورودی از سرعت اجرایی بالایی برخوردار بوده و جواب حاصله از آن از نظرعلمی قابل قبول باشد. ازخصوصیات روش ارائه شده می‌توان موارد زیر را نام برد:

۱ـ در نظر گرفتن ماتریس تقاضا از ابتدای روند مسیریابی که تضمین کننده بهینه بودن مسیرهای طراحی شده می‌باشد.

۲ـ استفاده از روش شاخه و کرانه برای حل مسأله مسیریابی که علاوه بر ارائه یک راه‌حل دقیق، از شمارش همه مسیرها اجتناب می‌نماید و در نتیجه زمانی که برای محاسبات پیچیده مسأله مسیریابی لازم است را بسیار کاهش می‌دهد.

۳ـ استفاده از دانش طراح جهت تعیین زوج پایانه‌های اولیه که سرعت طراحی و اطمینان از اجرایی بودن طرح را بالا می‌برد.

زیرنویس‌ها

۱ ـ چون اگر مسیری بین یک زوج پایانه بهترین باشد، مسیرهای دیگر نمی‌توانند ار آن بهتر باشند واز طرف دیگر انتخاب یک مسیر بین یک زوج پایانه باعث می‌شود که مسأله زیاد پیچیده نشود.

۲ ـ این امر باعث کاهش مشکلات مدیریتی و شناخت بهتر استفاده‌کنندگان از سیستم شبکه اتوبوسرانی می‌شود.

۳ ـ Integer Non- Linear Programming

۴ ـ Acyclic

۵ ـ Dial

۵ ـ Efficient

۶ ـ Branch and Bound Technique

۷ ـ یاد آوری می‌شود که مسأله مورد نظر یک مسأله بیشینه‌سازی است.

مراجع

[1] بهبهانی، حمید و همکاران ـ " مهندسی ترافیک: تئوری و کاربرد"ـ سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران ـ چاپ اول ـ ۱۳۷۴.

[2] Baaj, M.H. and Mahmassani, H.S., "An AI-Based Approach for Transit Route System Planning and Design", Journal of Advanced Transportation , Vol. 25, No. 2 , P.P. 187-210 , 1992.

[3] Dial, R. B., "A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration", Transp. Res. Vol. 5, P.P. 83-111,1971.

[4] Mandl, C. E. " Evaluation and Optimization of Urban Public Transportation Networks." Presented at EURO III in Amsterdam, The Netherlands, 9-11 April 1979.

[5] Pattnaik S. B., Mohan, and V. M. Tom, " Urban Bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm." Journal of Trannsp. Eng. Vol. 124, No. 4 July/Agust 1998, PP. 368-375.