مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال دوازدهم،شمارهٔ بیست و سوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۳

ارزیابی و اولویت‌بندی سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل عمومی سریع در کلان‌شهر تهران با استفاده از مدل‌های کارآمد

احمد پوراحمد (استاد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه تهران، تهران، ایران)
apoura@ut.ac.ir
بهزاد عمران‌زاده (دانشجوی دکترای جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه تهران، تهران، ایران)
omranzadeh@ut.ac.ir
علی مهدی (دانشجوی دکترای جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه تهران،، تهران، ایران، نویسندهٔ مسئول)
a.mahdi@ut.ac.ir

چکیده

اهداف: حمل‌ونقل یکی از مهم‌ترین ارکان توسعهٔ شهری است که برای جابه‌جایی مردم و کالاها دربین فضاها و اماکن مختلف جغرافیایی به‌کار می‌رود. مقالهٔ حاضر درنظر دارد تا با توجه به اهمیت موضوع موردبحث و با بهره‌گیری از رویکرد MCDM به ارزیابی و اولویت‌بندی انواع سیستم‌های حمل‌ونقل سریع اتوبوسی و ریلی برای کلان‌شهر تهران بپردازد.

روش تحقیق: اساس تحقیق حاضر بر مطالعات و تجزیه‌وتحلیل کتابخانه‌ای استوار بوده است؛ به‌این‌صورت‌که ابتدا باتکیه برمطالعات کتابخانه‌ای و ادبیات نظری موجود که بیشتر برپایهٔ منابع خارجی می‌باشند، شاخص‌های متنوع موردنظر دررابطه با سیستم‌های حمل‌ونقل سریع استخراج گردید و در ادامه داده‌های مربوط به هرشاخص جمع‌آوری شد. در مرحلهٔ بعد، شاخص‌ها وارد الگوریتم TOPSIS شدند وسیستم‌های مختلف برای کلان‌شهر تهران اولویت‌بندی گردیدند.

یافته‌ها/ نتایج: براساس مطالعات موجود، سیستم مترو در کلان‌شهر تهران با دارابودن کمترین فاصله و بیشترین نزدیکی به صورت ایده‌آل، اولین رتبه را به‌خود اختصاص داده است. بعد از سیستم مترو، سیستم حمل‌ونقل BRT دومین رتبه را دارا می‌باشد. با محاسبات فوق، سیستم مونوریل آخرین رتبه را به‌خود اختصاص داده است. این مسئله نشان می‌دهد که با توجه به شاخص‌های موردنظر در مقالهٔ حاضر سیستم مترو بیشترین قابلیت و مطلوبیت را در رفع مشکلات حمل‌ونقل عمومی کلان‌شهر تهران دارا می‌باشد.

نتیجه‌گیری: با توجه به اهمیت و ضرورت ارزیابی و اولویت‌بندی سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل به‌ویژه سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی سریع در شهرها، در مقالهٔ حاضر با استفاده از رویکرد MCDM

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲ تاریخ تصویب:۱۳۹۳/۶/۱۱

و تکنیک‌های TOPSIS و آنتروپی شانون به اولویت‌بندی و ارزیابی سیستم‌های یادشده در کلان‌شهر تهران پرداخته شد که درنهایت، بررسی‌های صورت‌گرفته براساس شاخص‌های موردنظر نشان می‌دهد که سیستم مترو بیشترین قابلیت و مطلوبیت را در رفع مشکلات حمل‌ونقل عمومی کلان‌شهر تهران دارا می‌باشد. درمقابل، سیستم مونوریل قابلیت و اولویت بسیار پایینی است؛ برهمین‌اساس، مدیران شهری در کلان‌شهر تهران می‌توانند از سیستم مترو به‌عنوان گزینهٔ اصلی و بلندمدت و از سیستم‌های دیگر چون سیستم BRT به‌عنوان راهکارهای کوتاه‌مدت برای رفع مشکلات حمل‌ونقل عمومی در این شهر بهره گیرند.

کلیدواژه‌ها: کلان‌شهر تهران، حمل‌ونقل سریع عمومی، تکنیک TOPSIS، مترو، مونوریل، BRT، LRT

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت شهری با مهاجرت زیاد مردم به شهرها افزایش یافته است؛ به‌طوریکه با ادامهٔ روند فعلی، جمعیت شهری از ۲/۹ میلیارد نفر درسال ۲۰۰۰، به ۵ میلیارد نفر در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید (هان، یوشیتسو، ایکسین، و هیدفومی[1]، ۲۰۰۹، ص.۱۳۳). این سرعت خیره‌کننده در ۵۰ سال گذشته که روستاها، شهرک‌ها و شهرهای مختلف را در برگرفته (آل‌بوتهیی و ابن‌صالح[2]، ۲۰۰۲، ص. ۱)، موجب شکل‌گیری تغییرات زیست‌محیطی و جغرافیایی گسترده‌ای به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه شده است (کاتلن، دیوید، و پری[3]، ۲۰۰۸، ص. ۱۷٤) و درنهایت، به‌عنوان یک پدیدهٔ فیزیکی پرسرعت، تقاضاهای زیادی را نیز برای زیرساخت‌های اساسی و پایه به‌وجود آورده است (اسچوتن و متنگی[4]، ۲۰۱۰، ص. ۸۱۵)؛ براین‌اساس، ارائهٔ یک سیستم حمل‌ونقل عمومی، کارا، مؤثر، مطمئن و ارزان‌قیمت، از مهم‌ترین زیرساخت‌های یادشده به‌شمار می‌رود که باعث پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌شود (اونکویا[5]، ۲۰۰۸، ص. ۸٤٥).

این مهم، امروزه یکی از مهم‌ترین ارکان توسعهٔ شهری است که برای جابه‌جایی مردم و کالاها دربین فضاها و اماکن مختلف جغرافیایی به‌کار می‌رود. سیستم‌های حمل‌ونقل نقش عمده‌ای در حیات اقتصادی کشورها و نیز زندگی روزمرهٔ شهروندان ایفا می‌کنند. در این ارتباط، یکی از چالش-

1. Han, Yoshitsugu , Xin, & Hidefumi
2. Al-But’hie & Eben Saleh
3. Catalan, David, & Pere
4. Schouten & Mathenge
5. Ogunkoya

هایی که معمولاً درزمینهٔ توسعهٔ پایدار شهرها مطرح است، تعیین نوع سیستم حمل‌ونقل شهر است. کلان‌شهر تهران نیز درکنار مشکلات متعددی چون مسکن، بهداشت، آلودگی هوا، آلودگی محیط-زیست، مهاجرت، حاشیه‌نشینی، افزایش جرائم، کمبود فضاهای فرهنگی و تفریحی، کمبود فضای سبز و ... با مشکل ترافیک و حمل‌ونقل، به‌ویژه در حوزهٔ حمل‌ونقل عمومی مواجه است. درواقع، از عمده‌ترین و اصلی‌ترین مراحلی‌که برای حل معضل ترافیک درمقابل تصمیم‌گیران امر حمل‌ونقل قرار دارد، انتخاب سیستم بهینه و مناسب ازبین انواع سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی و رایج در کشور یا جهان است. در دنیا، سیستم‌های حمل‌ونقل کلان‌شهری ازلحاظ نوع به دو گروه موتوری و ریلی تقسیم شده‌اند؛ اما هریک از این دو مجموعه خود به زیرمجموعه‌هایی تقسیم می‌شوند که انتخاب هریک از آن‌ها به‌عنوان یک سیستم مناسب و بهینه برای هر شهری ازجمله کلان‌شهر تهران مستلزم امکان مقایسه‌های علمی آن‌ها با هم درتمام مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری است. با توجه به مباحث یادشده و با عنایت به اینکه طی سال‌های گذشته بحث انتخاب نوع سیستم حمل‌ونقل سریع[1] شهری برای کلان‌شهر تهران، بین مراجع مختلف مدیریت شهری (دولت و شهرداری) از موضوعات و اختلاف‌نظرهای اساسی در حوزهٔ مباحث شهری بوده است، مقالهٔ حاضر درنظر دارد تا با توجه به اهمیت موضوع موردبحث و با بهره‌گیری از رویکرد MCDM[2] به ارزیابی و اولویت‌بندی انواع سیستم‌های حمل‌ونقل سریع اتوبوسی و ریلی برای کلان‌شهر تهران بپردازد.

۲. پیشینهٔ تحقیق

سرچشمهٔ علوم را می‌توان در پیشینهٔ آن‌ها کاوش کرد (دمپی‌یر[3]، ۲۰۰٦، ص. ۱). جان دیوئی[4]، اعتقاد دارد که پیشینهٔ تحقیق به محقق کمک می‌کند تا بینش عمیقی نسبت به جنبه‌های مختلف موضوع تحقیق پیدا کند. مطالعهٔ منابع باید از منابعی باشد که به‌طور مستقیم در رابطه با موضوع تحقیق می‌باشند و نیز از منابعی باشد که به‌صورت غیرمستقیم با آن موضوع ارتباط دارند (دلاور، ۱۳۸۳، ص. ۱۸۲).

1. Rapid Transit
2. Mutiple Criteria Decision Making (MCDM)
3. Demie Yieer
4. Jan Dioti

احدی، قاسمی‌صاحبی، و ذاکری سردرودی (۱۳۹۲)، در مقاله‌ای باعنوان «اولویت‌بندی روش‌های حمل‌ونقل عمومی در شهر تهران به‌منظور اصلاح نظام تخصیص بودجه» بااستفاده از روش تحلیل سلسله-مراتبی گروهی (AHP[1])، اولویت‌های گزینهٔ حمل‌ونقل عمومی شهر تهران را شناساسایی نمودند. سپس، با استفاده از معیارهای ارزیابی و به‌کارگیری روش AHP، گزینه‌های حمل‌ونقل عمومی را بررسی کردند. نتیجهٔ این مطالعه نشان داد گزینهٔ مترو دارای بالاترین اولویت دربین گزینه‌های دیگر حمل‌ونقل عمومی شهر تهران است و گزینه‌های BRT[2]، اتوبوس، ون و تاکسی در رده‌های بعدی قرار دارند.

افتخاری (۱۳۸۵) در پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد خود با عنوان «نقش و تأثیر خطوط ویژه در حمل-ونقل عمومی: نمونهٔ موردی مسیر بهارستان – جمهوری اتوبوسرانی تهران» به بررسی میزان تأثیر خطوط ویژه در حمل‌ونقل عمومی و بررسی میزان کارآمدی مدیریت خطوط ویژه برعملکرد آن، به-همراه تبیین نحوهٔ استفادهٔ کاربران از این خطوط و تأثیر نوع مصالح در ساماندهی خطوط ویژه و اثرات آن بر منظر شهری پرداخته است. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد خطوط ویژهٔ ایجادشده بر روی شبکهٔ حمل‌ونقل عمومی تأثیر مثبت داشته است و نحوهٔ مدیریت خطوط ویژه در استفادهٔ بهتر از آن مؤثر بوده و نحوهٔ استفادهٔ کاربران خطوط ویژه از آن در نوع عملکرد آن مؤثر است؛ ولی نوع مصالح به‌کاررفته در ساماندهی خطوط ویژه متناسب با منظر شهری نمی‌باشد.

بانسیو و فلوریا[۳] (۲۰۰۹)، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MADM[4])، تحقیق در مورد سیستم پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت حمل و نقل شهری انجام دادند که مهم‌ترین معیارهای این مطالعه، معیارهایی جون جغرافیای مسیر، شرایط آب و هوایی، حجم ترافیک، ظرفیت جابجایی، متوسط زمان سفر و تعداد توقف بود.

عمران‌زاده (۱۳۸۸) در پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد خود باعنوان «ارزیابی عملکرد سیستم حمل‌و نقل BRT درکلان‌شهر تهران»، علاوه‌بر معرفی وبررسی ساختار تجهیزاتی، معیارها و استانداردهای سیستم حمل‌ونقل عمومی براساس روش مطالعات کتابخانه‌ای و پژوهش میدانی، به ارزیابی عملکرد سیستم

5. Analytical Hierarchy process
2. Bus Rapid Transit
3. Bancio & Floria
4. Multiple Attribute Decision making

یادشده در کلان‌شهر تهران پرداخته است. برای بررسی نمونهٔ موردی، خط یک سیستم عمومی BRT تهران برسی شد. در این مطالعه، اساس تجزیه‌وتحلیل‌های انجام‌شده بر تحلیل پرسشنامه و اطلاعات سازمان‌های مربوطه و نیز بهره‌گیری از آزمون‌های نرم‌افزار SPSS استوار بوده است. نتیجهٔ این پژوهش، علاوه‌بر نمایش مشکلات کارکردی و شکلیِ سیستم ذکرشده در کلان‌شهر تهران، حاکی از تأثیر مثبت این سیستم بر حمل‌و نقل عمومی و تأثیرات مطلوب زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی آن در این شهر می‌باشد؛ به‌طوری‌که رضایت مردم را در سطح بالایی تأمین کرده است.

درنهایت، عبداللهی، سالک‌قهفرخی، قاسم‌زاده، و فتح‌بقالی (۱۳۹۲) در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی کارآیی عملکردی سیستم حمل‌ونقل تندرو شهر تبریز»، اولین گام مهم و ضروری شناسایی سیستم حمل‌ونقل عمومی را، بررسی میزان توانایی سیستم در پاسخ‌گویی به تقاضای موجود و تعیین مشخصات کارکردی سامانهٔ حمل‌ونقل عمومی می‌دانند. دراین مقاله، ارزیابی مؤلفه‌های کارآیی سیستم حمل‌ونقل عمومی BRT شهر تبریز در چهار عامل عمدهٔ کاربری اراضی، قابلیت دسترسی پیاده، تراکم جمعیتی در محدودهٔ پیرامونی مسیر و سرعت حرکت اتوبوس‌ها، براساس روش تحلیل فضایی در محیط Arc/GIS تجزیه‌وتحلیل شد و میزان انطباق تقاضای سفر با وضعیت موجود سیستم مقایسه گردید. براساس یافته‌های تحقیق، این سامانه با مشکلاتی نظیر انطباق کم مسیر با کاربری‌های موجود، محدودشدن قابلیت دسترسی به طیف خاصی از شهروندان در فضاهای پیرامونی مسیر و نبود امکان استفاده از آن در محورهای شمالی- غربی و جنوبی- غربی شهر، کاهش سرعت براثر محدویت‌های مسیر مواجه است و نیازمند بازنگری و اصلاح مسیر در چهار عامل یادشده می‌باشد. درپایان، برمبنای نتایج و یافته‌های تحقیق، ایجاد محورهای موازی با محور موجود در شعاع حداقل یک کیلومتری و با افزایش تقاضای سفر، توسعهٔ آن به محورهای شمالی—جنوبی ارائه شده است.

۳. روش‌شناسی تحقیق

۳. ۱. روش تحقیق

در این مطالعه، ابتدا با تکیه بر مطالعات کتابخانه‌ای و ادبیات نظری موجود که بیشتر برپایهٔ منابع خارجی می‌باشند، شاخص‌های متنوع موردنظر در رابطه با سیستم‌های حمل‌ونقل سریع استخراج

گردیدند و در ادامه، داده‌های مربوط به هر شاخص جمع‌آوری شدند. در مرحلهٔ بعد؛ یعنی، مطالعات پیمایشی، پرسشنامهٔ باز و بستهٔ بی‌نامی درقالب تلفیقی طراحی گردید و تعداد ۳۸٤ پرسشنامهٔ آماری براساس مدل کوکران، از مسافران سیستم حمل‌ونقل BRT، به‌عنوان موارد اصلی مطالعات میدانی موردسنجش قرار گرفتند. از دیگر روش‌هایی که در مرحلهٔ مطالعات میدانی برای کسب اطلاعات استفاده شد، مشاهده است که محققان طی مراحل مختلف و باحضور در محدودهٔ موردمطالعه (خط آزادی- تهران پارس BRT) به مشاهدهٔ علمی، به‌ویژه تهیهٔ عکس پرداخته‌اند. درنهایت، مصاحبهٔ علمی با مسئولان امر از دیگر روش‌هایی بود که در ارتباط با موضوع پژوهش مورداستفاده و بهره‌برداری قرار گرفت. در مرحلهٔ بعد، شاخص‌ها وارد الگوریتم TOPSIS[1] شدند وسیستم‌های مختلف برای کلان‌شهر تهران اولویت‌بندی شدند. برای ارزیابی اوزان نیز از تکنیک آنتروپی شانون[2] و تلفیق آن با نظرها و قضاوت کارشناسی DM[3] استفاده شده است که در زیر مراحل مدل TOPSIS به‌اختصار تشریح می‌گردد:

مرحلهٔ اول: تشکیل ماتریس داده‌ها؛

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

مرحلهٔ دوم: تشکیل ماتریس استاندارد یا بی‌مقیاس؛

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}^{2}}}$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

مرحلهٔ سوم: تعیین w_j براساس $\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$ و تعدیل w_j محاسبه‌شده ازطریق آنتروپی شانون با قضاوت کارشناسی DM از اهمیت شاخص‌ها؛

1. Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution
2. Shannon
3. Decision Maker

$$w'_j = \text{وزن تعدیل شده} = \frac{\lambda_j . w_j}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j . w_j}$$

مرحلهٔ چهارم: ایجاد ماتریس بی‌مقیاس وزین (V) با اعمال بردار w'_j به‌عنوان ورودی به الگوریتم؛

$$V_{ij} = R_{ij} . W_{m \times n} = \begin{bmatrix} v_{11} \dots v_{1j} \dots & v_{1n} \\ \cdot \quad \cdot & \cdot \\ \cdot \quad \cdot & \cdot \\ v_{m1} \dots v_{mj} \dots & v_{mn} \end{bmatrix}$$

مرحلهٔ پنجم: مشخص‌نمودن راه‌حل ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی (بالاترین و پایین‌ترین عملکرد هر شاخص)؛

$$\text{گزینهٔ ایده‌آل مثبت} = A^+ = \left\{ \left(\max V_{ij} \middle| j \in J \right), \left(\min V_{ij} \middle| j \in J' \right) i = 1,2, \dots m \right\} = \left\{ V_1^+, V_2^+, \dots, V_j^+, \dots, V_n^+ \right\}$$

$$\text{گزینهٔ ایده‌آل منفی} = A^+ = \left\{ \left(\min V_{ij} \middle| j \in J \right), \left(\max V_{ij} \middle| j \in J' \right) i = 1,2, \dots m \right\} = \left\{ V_1^-, V_2^-, \dots, V_j^-, \dots, V_n^- \right\}$$

به‌طوریکه $J = \left\{ j = 1,2, \dots, n \middle| \text{زهای مربوط به سود} j \right\}$ و $J' = \left\{ j = 1,2, \dots, n \middle| \text{زهای مربوط به هزینه} j \right\}$

مرحلهٔ ششم: محاسبهٔ اندازهٔ جدایی (فاصلهٔ گزینهٔ i ام باایده‌آل‌ها، با استفاده از روش اقلیدسی)؛

$$d_{i+} = \text{فاصله گزینه‌ام از ایده‌آل مثبت} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(V_{ij} - V^+_j \right)^2} \; ; i = 1,2, \dots, m$$

$$d_{i-} = \text{فاصله گزینه‌ام از ایده‌آل منفی} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(V_{ij} - V^-_j \right)^2} \; ; i = 1,2, \dots, m$$

مرحلهٔ هفتم: محاسبهٔ نزدیکی نسبی گزینهٔ i (A_i) به راه‌حل ایده‌آل؛

$$cl_{i+} = \frac{d_{i-}}{d_{i+} + d_{i-}} \; ; 0 \leq cl_{i+} \leq 1 \; ; \; i = 1,2, \dots, m$$

ملاحظه می‌شود اگر $A^i = A^+$گردد، آن‌گاه $d_{i+}=0$ است و $cl_{i+}=1$ و درصورتی‌که $A_i = A^-$ شود، آن‌گاه $d_{i-}=O$ می‌باشد و $cl_{i+}=0$ خواهد شد؛ بنابراین، هر اندازه گزینهٔ A_i به راه‌حل ایده‌آل نزدیک‌تر باشد، ارزش l_{i+} به واحد نزدیک‌تر خواهد بود.

مرحلهٔ هشتم: رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس ترتیب نزولی cl_{i+}. این میزان بین صفر و یک در نوسان است. دراین‌راستا، $cl_{i+}=1$ نشان‌دهندهٔ بالاترین رتبه و $cl_{i+}=0$ نیز نشان‌دهندهٔ کمترین رتبه است.

۳. ۲. منطقهٔ موردمطالعه

شهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران و یکی از بزرگ‌ترین شهرهای جهان، در ۵۱ درجه و٤ دقیقه تا ۵۱ و ۳۳ دقیقهٔ طول‌شرقی و ۳۵ و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ و ۵۰ دقیقهٔ عرض‌شمالی واقع شده است. نقطهٔ عطف در تغییرات کالبدی و ساختاری این شهر به دوران پهلوی بازمی‌گردد که روند شتابان دگرگونی بافت‌های شهری با تفکر مدرنیسم بوده است که با احداث شبکه‌های شطرنجی و عناصر جدید زندگی شهری، مفهوم شهرنشینی را دگرگون کرده است. این شهر در حدود سال‌های ۱۲۱۲ تا ۱۲۲۰ خورشیدی دارای ۵۰۰۰۰ نفر جمعیت بود. درحدود سال ۱۲۸۰، جمعیت به ۱٦۰۰۰۰ نفر و در سال ۱۳۰۲، به ۱۹٦۰۰۰ نفر رسید. این جمعیت در سال ۱۳۱۹ به ۵٤۰۰۰۰، در سال ۱۳۲۵ به ۸۸۰۰۰۰، در سال ۱۳٤۵ به ۲۷۲۰۰۰۰، در سال ۱۳۵۵ به ٤۵۰۰۰۰۰ و در سال ۱۳٦۵ به ٦۰۵۸۲۰۷ نفر افزایش یافته است. برطبق آمار سال ۱۳۷۵، جمعیت تهران ٦۷۵۸۸٤۵ نفر بوده است و در آخرین سرشماری در سال ۱۳۹۰ نیز جمعیت تهران، ۱۲۲۲۳۵۹۸ نفر بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰) که مسلماً این تعداد عظیم جمعیت، نیازمند خدمات گسترده‌اند که دراین‌میان مقولهٔ حمل‌ونقل از اهمیت بسیاری برخوردار است.

٤. مبانی نظری تحقیق

با افزایش سهم جمعیت جهانی که در شهرها زندگی می‌کنند، شهرنشینی به فرایند غالب معاصر تبدیل شده است. با توجه به این مسئله، حمل‌ونقل شهری اهمیت فراوانی می‌یابد. در مناطق شهری، با توجه به انواع مدل‌ها، کثرت مبدأ و مقصدها و میزان ترافیک، حمل‌ونقل پیچیدگی زیادی دارد (رودریگو، کومتویس، و اسلَک[1]، ۲۰۰٦). به‌طورکلی، حمل‌ونقل عبارت است از حرکت و جابه‌جایی مردم و کالاها بین نقاط مختلف داخل شهر و بین شهرها (عابدین درکوش، ۱۳۸۳، ص. ۱٦۲). به‌طورمعمول یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های حمل‌ونقل این است که به‌خودی خود، برای آن تقاضایی وجود ندارد. معمولاً سفرها به‌قصد بهره‌گیری از فرصت‌های اجتماعی، تفریحی، آموزشی یا تجاری موجود و با مقاصد ویژه‌ای انجام می‌شوند (فیلد و

1. Rodrigue, Comtois, & Slack

مک‌گریگور، ۱۳۷٦، ص. ۱۷۹). امروزه، زندگی در شهرها که سکونتگاه‌های سازمان‌یافتهٔ انسانی[1] هستند، صرفاً به‌خاطراینکه مردم توان تحرک[2] روزانه دارند، ممکن است. یکی از خصوصیات اصلی شهر این است که از فعالیت‌های ویژه، متناوب و مجموعه‌ای تشکیل شده‌اند که به‌صورت جدا از هم عمل می‌کنند. این فعالیت‌ها باید دارای قابلیت دسترسی[3] باشند (گراوا،[4] ۲۰۰۳، ص. ۱۵-۲). حمل‌ونقل شهری به‌عنوان بخشی از کل سیستم حمل‌ونقل، یکی از اجزای سیستم ارتباطات شهری است که با هدف دسترسی به کاربری‌های مختلف در محدودهٔ یک شهر، کار عبورومرور و جابه‌جایی انسان و کالا را بین این فضاهای انطباق‌یافته (کاربری‌ها) برعهده دارد. معمولاً در سیستم‌های حمل‌ونقل شهری و انتخاب مدل‌های مختلف فاصلهٔ زمانی[5] مهم‌تر از فاصلهٔ مکانی و جغرافیایی[6] است (گراوا، ۲۰۰٤، ص. ۸). درکل، منظور از حمل‌ونقل شهری جابه‌جایی مردم و کالاها در داخل شهرها است. این جابجایی‌ها که متأثر از وجود مبادلات کالاها و خدمات و فعالیت‌های اجتماعی و تفریحی در سطح شهرها هستند، نه‌تنها بر روی ساخت شهری و اندازه و توسعهٔ شهرها اثر می‌گذارند، بلکه انتخاب سیستم مطلوب حمل‌ونقل به اندازهٔ شهر و چگونگی ساختار شهری منطقهٔ موردبررسی بستگی دارد (عابدین درکوش، ۱۳۸۳، ص. ۱٦۲). تحول و تکامل حمل‌ونقل که معمولاً در پاسخ به تقاضاهای موجود و تحولات اجتماعی- اقتصادی و تکنولوژیک صورت می‌گیرد، به‌طورکلی به تغییراتی در شکل و فرم شهری منجر می‌شود. پدیدارشدن شهرنشینی سریع و گسترده

1. Organized Human Settlements

۲. تحرک، Mobility، به‌معنای توانایی حرکت یک شخص بین نقاط مختلف شهر است که ازطریق وسایل حمل‌ونقل عمومی یا شخصی و خصوصی صورت می‌گیرد. موانع معمول تحرک مردم عبارت‌اند از: فاصلهٔ زیاد، شرایط آب‌وهوایی نامناسب، تپه‌های شیب‌دار و ...؛ اما غیر از موارد یادشده، دردسترس‌نبودن خدمات، کرایهٔ بالا و سایر شرایط و محدودیت-های خاص بسیار مؤثرتر هستند (گراوا، ۲۰۰۳، ص.۱).

۳. قابلیت دسترسی، Accessibility، عبارت است از امکان دسترسی به هر فعالیت، ساختمان یا کاربری در شهر توسط مردم یا توسط حاملان کالا و اطلاعات که دلیلی برای مراجعت به آنجا دارند. دسترسی یکی از سنجه‌ها یا شاخص‌های کیفیت و کارایی عملکردی یک سکونتگاه است (گراوا، ۲۰۰۳، ص. ۱).

4. Grava
5. Time Distance
6. Geographical Space

درسراسر جهان، شامل افزایش تعداد سفرها و تحرکات در مناطق شهری نیز می‌شود. شهرها نیز به‌طورمعمول با ساخت راه‌ها، بزرگراه‌ها و زیرساخت‌های جدید حمل‌ونقل و با ایجاد خطوط حمل‌ونقل عمومی به این رشد پاسخ می‌دهند که در این فرایند، درنهایت ساخت شهرها صورت می‌گیرد (رودریگو و همکاران، ۲۰۰٦، ص. ۱۷٦-۱۷۲). اصولاً حمل‌ونقل شهری در سه گروه عمده تعریف می‌شود که عبارت‌اند از: حمل‌ونقل همگانی، حمل‌ونقل فردی و حمل‌ونقل کالا. دراین‌بین، هدف حمل‌ونقل همگانی یا عمومی فراهم‌کردن تحرک و دسترسی دسته‌جمعی در بخش‌های خاصی از شهر می‌باشد. کارایی این شکل از حمل‌ونقل به‌دلیل تعداد زیاد افرادی است که جابه‌جا می‌کند (رودریگو و همکاران، ۲۰۰٦، ص. ۱۷۲). درواقع، سیستم حمل‌ونقل عمومی به سیستمی اطلاق می‌شود که هر فردی می‌تواند تحت شرایطی مشخص و تعریف‌شده، مثل خرید بلیط از آن استفاده نماید (خادمی، ۱۳۸۵، ص. ٤). سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی یکی از زیرمجموعه‌های حمل‌ونقل‌های درون‌شهری هستند که از دیدگاه مهندسان ترافیک، در اولویت درجهٔ یک راهکارهای بهبود وضعیت تردد و توسعهٔ شهری محسوب می‌شوند (لقمانی، ۱۳۸٦، ص. ۲). امروزه، سیستم حمل‌ونقل عمومی برای داشتن عملکردی بهتر باید به ارائهٔ خدمات سطح بالا بپردازد و تاجایی‌که امکان دارد، باید دردسترس باشد و برای افراد بیشتری خدمات‌رسانی کند (هنریک هال[1]، ۲۰۰٦، ص. ۱). روش‌های متنوع حمل‌ونقل عمومی عبارت‌اند از: تاکسی‌ها، ون‌ها، تاکسی یا اتوبوس تلفنی، مسافرکش‌های شخصی، اتوبوس‌های اجاره‌ای، خودروی اشتراکی، اتوبوس‌های منظم، حمل‌ونقل سریع (حمل‌ونقل ریلی سریع سبک)، حمل‌ونقل سریع چرخ لاستیکی، حمل‌ونقل ریلی سریع سنگین (صفارزاده، ۱۳۸۱، ص. ٤۲). در سطح جهان، به‌خصوص در دههٔ ۱۹۹۰ و به‌دنبال رواج سیاست طرفداری از محیط‌زیست و حفاظت از آن در سطح بین‌المللی، گسترش حمل‌ونقل سریع در شهرهای بزرگ، جزو خط‌مشی اصلی مدیریت شهری شهرهای بزرگ جهان قرار گرفته است. به‌کارگیری سیستم‌های سریع حمل‌ونقل عمومی در جهان، به‌سرعت درحال‌رشد است؛ زیرا، این سیستم‌ها باعث افزایش سرعت و کاهش ازدحام و ایجاد راه‌بندان

1. Henrik Hall

در شبکهٔ شهری می‌شوند. دراصل، دربرابر وضعیت نامناسب سیستم‌های موجود، ایجاد سیستم حمل‌ونقل عمومی جدیدتر نیازی ضروری بوده است (کامیلو[1]، ۲۰۰۳، ص. ۹۹). سیستم‌های سریع در دو دستهٔ عمدهٔ ریلی و چرخ لاستیکی جای می‌گیرند که انواع آن عبارت‌اند از: مترو، قطار سبک شهری[2] و تراموا، مونوریل[3] و سیستم سریع اتوبوسی[4]. مشکل انبوهی ترافیک[5]، رشد پراکندهٔ شهری[6]، رکود اقتصادی مرکز شهر و آلودگی هوا همه مشکلاتی هستند که به وابستگی بیش‌ازحد به ماشین‌های شخصی مربوط می‌شوند. این شرایط باعث شده‌اند که نیاز به خدمات حمل‌ونقل عمومی با کیفیت بالا برای اصلاح یا ازبین‌بردن چنین شرایطی مطرح شود (ادارهٔ حمل‌ونقل فدرال: موافقتنامه[7]، ۲۰۰۳، ص.۲). درمجموع، می‌توان بیان کرد که امروزه، مجموعهٔ شرایط حاکم بر شهرها، از مشکلات ترافیک، ناکارکردی سیستم‌های معمولی و ضرورت جابه‌جایی سریع و راحت شهروندان گرفته تا لزوم توجه به مسائل زیست‌محیطی در کنار پیشرفت‌های تکنولوژیک، همه شرایط پیدایش و توجه به سیستم‌های حمل‌ونقل سریع را فراهم کرده‌اند. برای انتخاب و اولویت‌بندی سیستم‌های حمل‌ونقل سریع می‌توان از مدل‌های تصمیم‌گیری مختلفی بهره گرفت. در مدل‌های کلاسیک تصمیم‌گیری، بر وجود یک معیار سنجش (یا یک تابع هدف) تأکید می‌شد؛ اما در دهه‌های اخیر، توجه محققان معطوف به مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[8] برای تصمیم‌گیری‌های پیچیده شده است. در این تصمیم-گیری‌ها به‌جای استفاده از یک معیار سنجش از چندین معیار سنجش استفاده می‌شود. این مدل‌های تصمیم‌گیری به دو دستهٔ عمده تقسیم می‌گردند (طاهرخانی، ۱۳۸٦، ص. ٦۲):

۱. مدل‌های تصمیم‌گیری دارای چند هدف[9]؛ ۲. مدل‌های تصمیم‌گیری دارای چندشاخص[10].

1. Camilo
2. Light Rail
3. Mono Rail
4. BRT
5. Traffic congestion
6. Urban sprawl
7. Federal Transit Administration: FTA
8. Multiple Criteria Decision Making (MCDM)
9. Multiple Objective Decision Making (MODM)
10. Multiple Attribute Decision Making (MADM)

مدل‌های دارای چند هدف بیشتر با هدف طراحی به‌کار گرفته می‌شوند؛ درحالیکه مدل‌های دارای چند شاخص برای انتخاب گزینهٔ برتر استفاده می‌گردند (اصغرپور، ۱۳۸۵، ص. ۱؛ ملک-زاده، ۱۳۸۷، ص. ۱۳۷). TOPSIS (روش اولویت‌بندی ترجیحی براساس تشابه به پاسخ ایده‌آل)، یکی از روش‌های کارآمد زیرگروه سازشی مدل جبرانی MADM است که در سال ۱۹۹۲، چن و هوانگ[1] ارائه کرده‌اند. به‌طوراجمال، در روش تاپسیس، ماتریس n×m که دارای m گزینه و n معیار می‌باشد، ارزیابی می‌شود. در این الگوریتم، فرض می‌شود که هر شاخص و معیار در ماتریس تصمیم‌گیری دارای مطلوبیت افزایشی یا کاهشی یکنواخت است. به‌بیان‌دیگر، مقادیر زیادتری که معیارها در این ماتریس کسب می‌کنند، اگر از نوع سود بود، هرچه مقدار آن بیشتر باشد، دارای مطلوبیت بالاتر و اگر از نوع هزینه بود، دارای مطلوبیت پایین‌تری می‌باشد. از امتیازات مهم این روش آن است که به‌طورهمزمان می‌توان از شاخص‌ها و معیارهای عینی و ذهنی استفاده نمود (آفیسکو[2]، ۱۹۹۸، ص. ۲). بااین‌حال، لازم است دراین مدل برای محاسبات ریاضی، تمامی مقادیر نسبت‌داده‌شده به معیارها از نوع کمی باشند و درصورت کیفی بودن نسبت داده‌شده به معیارها، بایستی آن‌ها را به مقادیر کمی تبدیل نمود (لولاچی، ۱۳۸٤، ص. ۲). بااین‌وجود، پیشنهاد می‌شود از روش TOPSIS هنگامی استفاده شود که تعداد شاخص‌های دردسترس محدود هستند (نومن و فلیکس[3]، ۲۰۰۳، به‌نقل از (طاهرخانی، ۱۳۸٦، ص. ٦٤).

۵. یافته‌های تحقیق

یکی از نکته‌های اساسی که در انتخاب شاخص‌ها باید مدنظر قرار گیرد، بهره‌گیری از شاخص‌های مختلف در زمینه‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی- مهندسی می‌باشد که در مقالهٔ حاضر سعی گردیده است تا این اصل رعایت گردد. در ادامه، به تشریح شاخص‌های مورداستفاده و داده‌های آن‌ها پرداخته می‌شود.

1. Chen & Hwang
2. Affisco
3. Naumann & Felix

شاخص‌های فنی- مهندسی: با توجه به اهمیت شاخص‌های فنی- مهندسی در پروژه‌های عمرانی، بیشترین تعداد شاخص‌هایی‌که استفاده شده‌اند، مربوط به این بخش است.

- **تعداد شهرهای دارای سیستم:** میزان و سطح بهره‌گیری از یک سیستم و ساخت جهانی آن می‌تواند نشانگر قابلیت‌ها و تجارب فراوان درمورد آن باشد. به‌همین‌دلیل است که تعداد شهرهای دارای سیستم‌های سریع به‌عنوان شاخصی درجهت انتخاب سیستم سریع به‌کار گرفته شده‌اند.

- **وابستگی تکنولوژیک:** استفاده از دانش، تجارب و تکنولوژی ملی و جلوگیری از خروج ارز از کشور، در احداث پروژه‌های عمرانی دارای اهمیت فراوان هستند. به‌همین‌دلیل میزان بیشتر خودکفایی در ایجاد یک سیستم می‌تواند معیار قابل‌قبولی باشد.

- **مدت زمان ساخت:** با توجه به اهمیت مدت زمان ساخت انواع سیستم‌ها در رفع معضلات ترافیکی شهر تهران، جدول (۱) اولویت سیستم‌های حمل‌ونقل سریع را براساس این معیار ارائه می‌دهد:

جدول ۱- اولویت سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل سریع و دلایل آن در کلان‌شهر تهران

مآخذ: خادمی، ۱۳۸۵، ص. ۸۷؛ نگارندگان، ۱۳۹۲

سیستم	رتبه	دلیل رتبهٔ سیستم
BRT	اول	پیش‌ساخته بودن قطعات و سهولت نصب تجهیزات سیستم در یک زیرساخت آماده
Monorail	دوم	پیش‌ساخته بودن قطعات تیر و بستر ریل و تنها استفاده از پایه‌های عمیق بتنی در مسیر
LRT	سوم	حجم زیاد عملیات زیرساختی و تحکیم مناسب بستر در کل مسیر و حجم پایین قطعات پیش‌ساخته
Metro	چهارم	حجم عظیم عملیات ساخت و حفاری تونل و جاگذاری تجهیزات

- **سرعت عملکردی:** امروزه، معمولاً تمامی سیستم‌های سریع دارای سرعت بالایی هستند؛ ولی سرعت عملکردی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. واحد سرعت سیستم‌ها کیلومتر در ساعت (kph) می‌باشد.

– **سابقهٔ ساخت در شهر تهران:** یکی از مهم‌ترین عوامل و معیارهای انتخاب یک سیستم حمل‌ونقل مطلوب، وجود یا نبود تجربهٔ ساخت در شهر موردنظر می‌باشد؛ بنابراین، یک پروژهٔ ساخته‌شده بر پروژهٔ ساخته‌نشده ارجحیت دارد. در کلان‌شهر تهران، درخصوص ساخت سیستم BRT و مترو، سابقه و تجربهٔ زیاد وجود دارد. درمورد سیستم مونوریل نیز با توجه به انجام مطالعات و نصب ستون‌های این سیستم در مسیر صادقیه تجربهٔ مختصری وجود دارد.

– **ظرفیت سیستم:** ظرفیت سیستم عبارت است از تعداد مسافری که یک سیستم در مدت زمان مشخص و در مسیر معین جابه‌جا می‌کند. مطمئناً هر سیستمی به‌ویژه در کلان‌شهر تهران دارای ظرفیت بیشتری باشد، از اولویت و ارزش بیشتری برخوردار خواهد بود. واحد ظرفیت مسافر سیستم نفر در ساعت (pph) است.

شاخص اجتماعی؛ آسایش مسافرین (سهولت دسترسی): سهولت دسترسی به سیستم‌های سریع را از دو جنبه می‌توان درنظر گرفت. یکی دسترسی به ایستگاه (فاصلهٔ ایستگاه‌ها از یکدیگر) و دیگری طرز ورود به ایستگاه؛ براین‌اساس، سیستم‌های BRT وLRT نسبت به سیستم‌های مترو و مونوریل دارای فواصل ایستگاهی کمتر و نیز ایستگاه‌های سطح زمین هستند؛ بنابراین، سهولت دسترسی به این سیستم‌ها خیلی بیشتر از مترو و مونوریل می‌باشد.

شاخص‌های زیست‌محیطی

نظر به شرایط خاص کلان‌شهر تهران از نظر مسائل زیست‌محیطی و وجود انواع آلودگی‌ها در آن، این شاخص‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. با توجه به نبود آمار و اطلاعات درزمینهٔ انواع شاخص‌های آلودگی، در زیر صرفاً به دو شاخص اشاره شده است:

– **آلودگی دید و منظر:** هریک از سیستم‌های حمل‌ونقل باتوجه به نحوهٔ اجرا و میزان تأسیساتی که در فضای شهر بارگذاری می‌کنند، تاحدودی باعث آلودگی دید و منظر می‌شوند. جدول (۲) میزان این آلودگی و علل آن را ازطرف سیستم‌های موردنظر بررسی می‌کند:

جدول ۲- میزان و عوامل دید آلودگی سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل سریع

مآخذ: خادمی، ۱۳۸۵، ص. ۸۷؛ نگارندگان، ۱۳۹۲

سیستم	نوع اجرا	تاثیر بر فضای بصری شهر	میزان آلودگی دید و منظر
BRT	در سطح	تقریباً بدون اثر سوء بر منظر شهر؛ جز در موارد جدول‌کشی‌ها	خیلی کم
Metro	زیرزمین	تقریباً بدون اثر سوء بر منظر شهری؛ جز در موارد تهویه‌ها و پست‌های برق	خیلی کم
LRT	در سطح	دکل‌های برق موجود در مسیر به‌همراه سیم‌ها و پانتوگراف	متوسط
Monorail	در ارتفاع	تیرها و ستون‌های بتنی با ابعاد بزرگ در ارتفاع، دید به منازل و اماکن، ایجاد سایه در معابر زیر مسیر	زیاد

- **آلودگی صوت:** در این شاخص، معیار اصلی میزان بالابودن صدای تولیدی سیستم‌های حمل‌ونقل از سطح استاندارد می‌باشد که به درصد بیان می‌شود. سیستم مترو به‌دلیل اجرای آن در زیرزمین فاقد این آلودگی می‌باشد. درمقابل، میزان صدای تولیدی سیستم‌های BRT، LRT و مونوریل، به‌ترتیب ۲۰٪، ٤۲٪ و ۲۵٪ بیشتر از سطح استاندارد است.

شاخص‌های اقتصادی؛ هزینهٔ ساخت سیستم: سیستم‌ها با توجه به نحوهٔ اجرا، ظرفیت و سطح تکنولوژی، دارای هزینه‌های متفاوتی هستند. جدول (۳) متوسط هزینهٔ ساخت سیستم‌های موردنظر را نشان می‌دهد.

- **هزینهٔ نگهداری:** علاوه‌بر هزینهٔ ساخت سیستم که هزینه‌ای سرمایه‌ای است و قبل از اجرای سیستم باید تأمین شود، هرکدام از سیستم‌ها دارای هزینه‌های جاری نگهداری نیز می‌باشند.

جدول ۳- هزینهٔ ساخت و نگهداری سیستم‌های حمل‌ونقل سریع

مآخذ: بانک جهانی[1]، ۲۰۰۹؛ گریو، ۲۰۰٤، ص. ۵۳۰؛ دفتر حسابدهی دولت[2]، ۲۰۰۳، ص. ۱۲

نوع هزینه	BRT	Monorail	LRT	Metro
هزینه ساخت (میلیون دلار در هر km)	۸/۵	۱۰۰	۲۲	۱۸۵
هزینه نگهداری(دلار به ازای هر نفر درkm)	۰/۵۲	۳/۰۷	۱/۳۱	۱/۱٤

جدول (٤) انواع شاخص‌های موردنظر و داده‌ها و اطلاعات مربوط به هرکدام را که حاصل مطالعات پیشینه و مبانی نظر تحقیق می‌باشد، نشان می‌دهد:

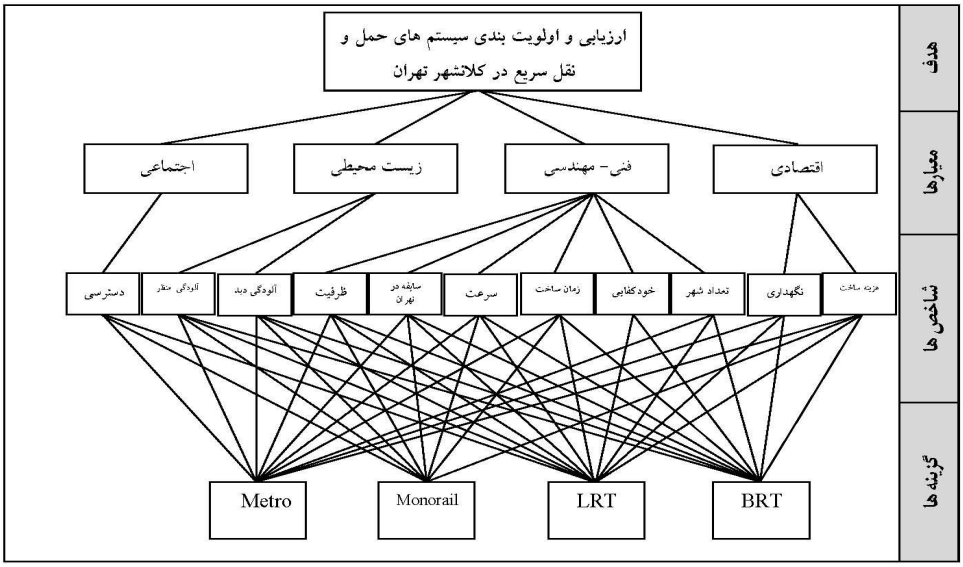
1. World Bank
2. GAO

جدول ٤- شاخص‌ها و معیارهای سنجش سیستم‌های حمل‌ونقل سریع

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

نوع شاخص	شاخص‌ها	BRT	Monorail	LRT	Metro
فنی- مهندسی	تعداد شهرهای دارای سیستم	۱۸۳	۷۲	۳٤۱	۱۵۲
	وابستگی تکنولوژیک (میزان خودکفایی)	٪۵۰	٪۲۰	٪۲۰	٪۲۰
	مدت زمان ساخت	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
	سرعت عملکردی (kph)	۲۰	۲۵	۲۰	۳۵
	سابقهٔ ساخت در تهران	زیاد	خیلی کم	-	زیاد
	ظرفیت (pph)	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۱۰۰۰	٦۰۰۰۰
اجتماعی	آسایش مسافرین (دسترسی)	خیلی زیاد	متوسط	خیلی زیاد	متوسط
زیست‌محیطی	آلودگی دید و منظر	خیلی کم	زیاد	متوسط	خیلی کم
	آلودگی صوت	۲۰	۲۵	٤۲	-
اقتصادی	هزینهٔ ساخت (mdpk)	۸,۵	۱۰۰	۲۲	۱۸۵
	هزینهٔ نگهداری (dpppk)	۰,۵۲	۳,۰۷	۱,۳۱	۱,۱٤

شکل زیر نیز سلسله‌مراتب ارزیابی و اولویت‌بندی سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل عمومی سریع را در سطوح مختلف نشان می‌دهد:



شکل ۱- سلسله‌مراتب اولویت‌بندی سیستم‌های حمل‌ونقل سریع در کلان‌شهر تهران

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

اولین مرحلهٔ بهره‌گیری از مدل TOPSIS، تشکیل ماتریس داده‌ها (A_{ij}) می‌باشد. همانطورکه مشخص است، شاخص‌های مورداستفاده در تحقیق شامل شاخص‌های کمی ونیز شاخص‌های کیفی می‌شوند؛ بنابراین، قبل از تشکیل ماتریس (A_{ij}) تمامی مقادیر شاخص‌ها باید تبدیل به کمی گردد. برای تبدیل شاخص‌های کیفی به کمی، از مقیاس فاصله‌ای دوقطبی استفاده شده است. شاخص‌های مورداستفاده در مدل TOPSIS می‌توانند دارای مطلوبیت افزایشی و نیز دارای مطلوبیت کاهشی باشند.

جدول ۵- ماتریس کمی (A_{ij}) شاخص‌های الویت‌بندی سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی سریع

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

ماتریس A_{ij}		فنی- مهندسی						اجتماعی	زیست‌محیطی		اقتصادی	
		تعداد شهرهای دارای سیستم	میزان وابستگی تکنولوژیک	مدت زمان ساخت	سرعت عملکردی	داشتن سابقهٔ ساخت در تهران	ظرفیت	آسایش مسافرین	آلودگی دید و منظر	آلودگی صدا	هزینهٔ ساخت	هزینهٔ نگهداری
		X_1^+	X_2^+	X_3^+	X_4^+	X_5^+	X_6^+	X_7^+	X_8^+	X_9^-	X_{10}^-	X_{11}^-
BRT	A_1	۱۸۳	۵۰	۹	۲۰	۷	۱۵۰۰۰	۹	۹	۲۰	۸/۵	۰/۵۲
monorail	A_2	۷۲	۲۰	۷	۲۵	۱	۲۰۰۰۰	۵	۳	۲۵	۱۰۰	۳/۰۷
LRT	A_3	۳۴۱	۲۰	۵	۲۰	۰	۱۱۰۰۰	۹	۵	۴۲	۲۲	۱/۳۱
metro	A_4	۱۵۲	۲۰	۳	۳۵	۷	۶۰۰۰۰	۵	۹	۰	۱۸۵	۱/۱۴

ازآنجایی‌که هرکدام از شاخص‌های مورداستفاده در الگوریتم تاپسیس دارای مقیاس‌های متفاوت می‌باشند، در مرحلهٔ دوم با استفاده از فرمول زیر، ماتریس (۴×۱۱) (A_{ij}) ذکرشده در بالا استاندارد می‌شود و ماتریس (R_{ij}) بی‌مقیاس تشکیل می‌گردد. درواقع، با تشکیل ماتریس (R_{ij}) تمامی شاخص‌ها هم‌ارزش یا هم‌مقیاس می‌شوند و می‌توانند مقایسه شوند.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}^2}}$$

$R_{ij}=$

	X_1^+	X_2^+	X_3^+	X_4^+	X_5^+	X_6^+	X_7^+	X_8^+	X_9^-	X_{10}^-	X_{11}^-
A_1	0/024	0/033	0/089	0/064	0/041	0/063	0/030	0/006	0/015	0/005	0/008
A_2	0/009	0/013	0/069	0/081	0/006	0/084	0/016	0/002	0/019	0/059	0/046
A_3	0/044	0/013	0/050	0/064	0/000	0/046	0/030	0/004	0/032	0/013	0/020
A_4	0/020	0/013	0/030	0/113	0/041	0/253	0/016	0/006	0/000	0/108	0/017

شاخص‌های مورداستفاده در ارزیابی حاضر دارای اهمیت یکسانی نیستند و درجهٔ ارجح-بودن و تأثیر هرکدام ازآن‌ها در تعیین سیستم حمل‌ونقل سریع در کلانشهر تهران متفاوت می-باشد؛ بنابراین، درمرحلهٔ بعد، باید میزان اهمیت نسبی هر شاخص را نسبت به بقیه شاخص‌ها سنجید. برای این‌کار اوزان یا مفروض ازنظر DM می‌باشند یا اینکه از تکنیک‌های مختلف ارزیابی اوزان برای شاخص‌ها که عبارت‌اند ازروش آنتروپی، روش Linmap، روش کم‌ترین مجذورات و روش بردار ویژه، استفاده می‌شود. در مقالهٔ حاضر، برای ارزیابی اوزان شاخص‌ها از تلفیق نظر کارشناسی DM و روش آنتروپی شانون استفاده شده است.

در این روش ترکیبی، به‌ترتیب P_{ij} ، E_j ، d_j ، w_j و درنهایت، وزن تعدیل‌شده (w_j') محاسبه می‌گردد و خروجی الگوریتم درقالب ضرب ماتریسی وارد الگوریتم TOPSIS می‌شود. جدول (٦) محاسبات ذکرشده را نشان می‌دهد:

$$(1)\ P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}} ; \forall i,j \qquad (2)\ E_j = -k \sum_{i=1}^{m} [p_{ij} . \mathrm{Ln}\, p_{ij}] ; \forall j \qquad (3)\ d_j = 1 - E_j ; \forall j$$

$$(4)\ w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^{n} d_j} ; \forall j \qquad \text{وزن تعدیل شده} = w'_j = \frac{A_j . w_j}{\sum_{j=1}^{n} A_j . w_j} \quad (5)$$

جدول ٦- ارزیابی اوزان درقالب الگوریتم آنتروپی شانون و ترکیب آن با نظر DM

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

	X1+	X2+	X3+	X4+	X5+	X6+	X7+	X8+	X9-	X10-	X11-
Ej	0/903	0/929	0/948	0/979	0/643	0/829	0/970	0/938	0/756	0/693	0/867
Dj	0/097	0/071	0/052	0/021	0/357	0/171	0/030	0/062	0/244	0/307	0/133
Wj	0/063	0/046	0/034	0/013	0/231	0/111	0/019	0/040	0/158	0/199	0/086
DM	0/035	0/035	0/15	0/5	0/01	0/1	0/1	0/01	0/01	0/025	0/025
wj*DM	0/0022	0/0016	0/00506	0/00665	0/0023	0/011098	0/00193	0/0004	0/00158	0/00497	0/0021594
W_j'	0/055	0/040	0/127	0/166	0/058	0/278	0/048	0/010	0/040	0/124	0/054

در مرحلهٔ بعد، با اعمال بردار (w_j') به‌عنوان ورودی به الگوریتم، ماتریس بی‌مقیاس وزین (V) ازطریق ضرب ماتریسی تشکیل می‌گردد:

$$V = R_{ij}.w'_{n\times n} = \begin{matrix} 0/024 & 0/033 & 0/089 & 0/064 & 0/041 & 0/063 & 0/030 & 0/006 & 0/015 & 0/005 & 0/008 \\ 0/009 & 0/013 & 0/069 & 0/081 & 0/006 & 0/084 & 0/016 & 0/002 & 0/019 & 0/059 & 0/046 \\ 0/044 & 0/013 & 0/050 & 0/064 & 0/000 & 0/046 & 0/030 & 0/004 & 0/032 & 0/013 & 0/020 \\ 0/020 & 0/013 & 0/030 & 0/113 & 0/041 & 0/253 & 0/016 & 0/006 & 0/000 & 0/108 & 0/017 \end{matrix} \times \begin{matrix} 0/055 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0/040 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0/127 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0/166 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0/058 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/278 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/048 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/010 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/040 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/124 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0/054 \end{matrix}$$

$$V = \begin{matrix} 0/024 & 0/033 & 0/089 & 0/064 & 0/041 & 0/063 & 0/030 & 0/006 & 0/015 & 0/005 & 0/008 \\ 0/009 & 0/013 & 0/069 & 0/081 & 0.006 & 0/084 & 0/016 & 0/002 & 0/019 & 0/059 & 0/046 \\ 0/044 & 0/013 & 0/050 & 0/064 & 0.000 & 0/046 & 0/030 & 0/004 & 0/032 & 0/013 & 0/020 \\ 0/020 & 0/013 & 0/030 & 0/113 & 0/041 & 0/253 & 0/016 & 0/006 & 0/000 & 0/108 & 0/017 \end{matrix}$$

در مرحلهٔ پنجم بعد از تشکیل ماتریس V، راه‌حل ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی (بالاترین و پایین‌ترین عملکرد هر شاخص) مشخص می‌گردد:

$$A^+ = \{0.044, 0.033, 0.089, 0.113, 0.041, 0.253, 0.030, 0.006, 0, 0.005, 0.008\}$$
$$A^- = \{0.009, 0.013, 0.030, 0.064, 0, 0.046, 0.016, 0.002, 0.032, 0.108, 0.046\}$$

قدم ششم، محاسبهٔ اندازهٔ جدایی(d_i) یا فاصلهٔ گزینهٔ iام با ایده‌آل‌ها با استفاده از روش اقلیدسی است. در این مرحله، فاصلهٔ هریک از سیستم‌های حمل‌ونقل سریع با حد ایده‌آل محاسبه می‌شود و امکان مقایسه و نتیجه‌گیری را فراهم می‌کند:

$d_1^+ =$ 0/197 $d_1^- =$ 0/137
$d_2^+ =$ 0/193 $d_2^- =$ 0/077
$d_3^+ =$ 0/223 $d_3^- =$ 0/108
$d_4^+ =$ 0/124 $d_4^- =$ 0/221

درنهایت در مرحلهٔ هفتم، نزدیکی نسبی (cl_{i+}) هرگزینهٔ i (A_i) به راه‌حل ایده‌آل محاسبه می‌گردد تا تفاوت بین گزینه‌های مختلف را آشکار کند و امکان انتخاب گزینهٔ برتر یا مطلوب را فراهم کند. با مشخص‌شدن میزان نزدیکی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل، گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند:

$$cl_{i+} = \frac{d_{i-}}{d_{i+} + d_{i-}} ; 0 \leq cl_{i+} \leq 1 ; i = 1,2, \dots, m$$

جدول ۷- نزدیکی نسبی گزینه‌ها به راه‌حل ایده‌آل و رتبه‌بندی آن‌ها

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

رتبهٔ هر سیستم	سیستم‌های سریع	فاصلهٔ سیستم از گزینهٔ ایده‌آل	کد سیستم
۲	BRT	۰/٤۱۰	cl_{1+}
٤	Monorail	۰/۲۸٥	cl_{2+}
۳	LRT	۰/۳۲٦	cl_{3+}
۱	Metro	۰/٦٤۱	cl_{4+}

همانگونه‌که در جدول بالا مشخص است، گزینه‌های مختلف براساس ترتیب نزولی cl_{i+} رتبه‌بندی شده‌اند. در این مرحله، هر گزینه‌ای‌که کمترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل داشته باشد و به عدد یک نزدیک‌تر باشد، اولین رتبه را به‌خود اختصاص می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که سیستم مترو در کلانشهر تهران، با دارابودن کمترین فاصله و بیشترین نزدیکی به حد ایده‌آل، اولین رتبه را به‌خود اختصاص داده است. بعد از سیستم مترو، سیستم حمل‌ونقل BRT دومین رتبه را دارا می‌باشد. با محاسبات بالا، سیستم مونوریل آخرین رتبه را به‌خود اختصاص داده است. این مسئله نشان می‌دهد که با توجه به شاخص‌های موردنظر در مقالهٔ حاضر، سیستم مترو بیشترین قابلیت و مطلوبیت را در رفع مشکلات حمل‌ونقل عمومی کلانشهر تهران دارا می‌باشد. درمقابل، سیستم مونوریل قابلیت و اولویت بسیار پایینی دارد. نتیجهٔ پژوهش حاضر نشان می‌دهد مدیران شهری کلانشهر تهران باید توسعهٔ سیستم حمل‌ونقل مترو را به‌عنوان اصلی‌ترین و مطلوب‌ترین گزینه در رفع مسائل حمل‌ونقل عمومی تهران درنظر بگیرند؛ البته با توجه به زمانبر و پرهزینه‌بودن راه‌اندازی و تجهیز سیستم مترو در کشور، می‌توان از گزینه‌های دیگر که در مراتب بعدی قرار دارند، ازجمله سیستم BRT برای رفع مشکلات موجود به‌صورت موقت بهره برد.

٦. نتیجه‌گیری

سیستم‌های حمل‌ونقل نقش عمده‌ای در حیات اقتصادی کشورها و نیز زندگی روزمره شهروندان ایفا می‌کنند. موضوع حمل‌ونقل و ترافیک جدای از موضوعات تخصصی شهری، امروزه به‌عنوان پدیده‌ای اجتماعی- سیاسی و مسئلهٔ شهری، نقش بسیار حساس و مهمی در

کیفیت و ساختار اجتماعی- اقتصادی یک جامعه ایفا می‌نماید. اساس زندگی نوین شهری نیازهای جابه‌جایی انسان را شکل می‌دهد. یکی از چالش‌هایی که معمولاً درزمینهٔ توسعهٔ پایدار شهرها مطرح است، تعیین نوع سیستم حمل‌ونقل شهر است؛ سیستم حمل‌ونقلی که الگو و ساختار شهر نیز تاحد بسیار زیادی از آن تأثیر می‌پذیرد. با توجه به اهمیت و ضرورت ارزیابی و اولویت‌بندی سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل، به‌ویژه سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی سریع در شهرها، در مقالهٔ حاضر با استفاده از رویکرد MCDM و تکنیک‌های TOPSIS و آنتروپی شانون به اولویت‌بندی و ارزیابی سیستم‌های یادشده در کلانشهر تهران پرداخته شد.

نتایج این پژوهش که با درنظرگرفتن شاخص‌های مختلفی مانند شاخص‌های فنی- مهندسی، مدت زمان ساخت، سرعت عملکردی، شاخص‌اجتماعی؛ آسایش مسافران (سهولت دسترسی)، شاخص‌های زیست‌محیطی و ... صورت گرفته، نتایج قابل‌تأملی را درپی داشته است؛ براین‌اساس و با توجه به مطالعات مختلف انجام‌شده مشخص گردید که سیستم مترو به‌دلیل اجرای آن در زیرزمین فاقد آلودگی صوتی است که این مهم یکی از مزیت‌های این صنعت به‌شمار می‌رود. درمقابل، میزان صدای تولیدی سیستم‌های BRT، LRT و مونوریل، به‌ترتیب ۲۰، ٤۲ و ۲۵ درصد بالاتر از سطح استاندارد می‌باشد. همچنین، نتایج مطالعه درزمینهٔ شاخص‌های اقتصادی و هزینهٔ ساخت سیستم‌ها با توجه به نحوهٔ اجرا، ظرفیت و سطح تکنولوژی نشان می‌دهد که سیستم‌های مختلف دارای هزینه‌های متفاوتی هستند؛ به‌طوری‌که هزینهٔ ساخت BRT (میلیون دلار در هر km)، مقادیری معادل ۸/۵ میلیون دلار در هر کیلومتر دارد و دارای کمترین هزینه است. در همین ارتباط و با توجه به مراحل مختلف عملیاتی که در بخش‌های پیشین به‌آن‌ها اشاره شد، مشخص گردید که سیستم حمل‌ونقل مترو با کد cl_{4+} و با گزینهٔ ایده‌آل ۰/٦٤۱ دارای کمترین فاصله و بیشترین نزدیکی به حد ایده‌آل است و اولویت اصلی سیستم حمل‌ونقل تهران با توجه به مجموع شاخص‌های موردمطالعه است. پس از سیستم مترو، همانطورکه در جدول شمارهٔ (۷) نیز مشخص گردیده است، BRT با فاصله‌ای معادل ۰/٤۱۰ نسبت به حد ایده‌آل، در رتبهٔ دوم اولویت سیستم حمل‌ونقل سریع شهر تهران قرار گرفت. همچنین، LRT و Monorail به‌ترتیب با ۰/۳۲٦ و ۰/۲۸۵، با داشتن فاصله نسبت

به حد ایده‌آل، در رتبه‌های سوم و چهارم الویت‌بندی سیستم‌های حمل‌ونقلی سریع این شهر قرار گرفتند. این نتایج که درقالب پیشنهادی بسیار کارآمد برای مدیریت شهری کلانشهر تهران مطرح می‌گردد، نشان می‌دهد که با توجه به شاخص‌های موردنظر در مقالهٔ حاضر، سیستم مترو بیشترین قابلیت و مطلوبیت را در رفع مشکلات حمل‌ونقل عمومی کلانشهر تهران دارا می‌باشد. در مقابل، سیستم مونوریل قابلیت و اولویت بسیار پایینی دارد. درمجموع، نتیجهٔ پژوهش حاضر نشان می‌دهد مدیران شهری کلانشهر تهران باید توسعهٔ سیستم حمل و نقل مترو را به‌عنوان اصلی‌ترین و مطلوب‌ترین گزینه در رفع مسائل حمل‌ونقل عمومی تهران درنظر بگیرند؛ البته با توجه به زمانبر و پرهزینه‌بودن راه‌اندازی و تجهیز سیستم مترو در کشور، می‌توان از گزینه‌های دیگر که در مراتب بعدی قرار دارند، ازجمله سیستم BRT برای رفع مشکلات موجود به‌صورت موقت بهره برد.

کتابنامه

۱. احدی، ح. ر.، قاسمی‌صاحبی، م.، و ذاکری سردرودی، ج. ع. (۱۳۹۲). اولویت‌بندی روش‌های حمل‌ونقل عمومی در شهر تهران به‌منظور اصلاح نظام تخصیص بودجه. *مجلهٔ مهندسی حمل‌ونقل*، ٤(۳)، ۲۰۰-۱۹۷.

۲. اصغرپور، م. ج .(۱۳۸۵). *تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۳. افتخاری، ح. (۱۳۸۵). *نقش و تأثیر خطوط ویژه در حمل‌ونقل عمومی (نمونهٔ موردی: مسیر بهارستان- جمهوری تهران)* (پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد منتشرنشده). دانشگاه آزاداسلامی، تهران مرکز، تهران، ایران.

٤. خادمی، ن. (۱۳۸۵). *نحوهٔ انتخاب سیستم حمل‌ونقل ریلی بهینه در یک کریدور شهری* (پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد منتشرنشده). دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۵. دلاور، ع. (۱۳۸۳). *روش‌های تحقیق پیشرفته*. تهران: انتشارات دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات.

٦. دمپی، ی. (۲۰۰٦). *تاریخ علم* (ع. ا. آذرنگ، مترجم). تهران: انتشارات سمت.

۷. صفارزاده، م.(۱۳۸۱). *مهندسی ترابری و ترافیک* (جلد ۲). تهران: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.

۸. طاهرخانی، م. (۱۳۸٦). کاربرد تکنیک TOPSIS در اولویت‌بندی استقرار صنایع تبدیلی کشاورزی در مناطق روستایی. *فصلنامهٔ پژوهش‌های اقتصادی*، *۷*(۳)، ۵۹-۷۱.

۹. عابدین درکوش، س .(۱۳۸۳). *درآمدی به اقتصاد شهری*. تهران: مرکز نشر دانشگاهی.

۱۰. عبداللهی، م.، سالک‌قهفرخی، ر.، قاسم‌زاده، ب.، و فتح‌بقالی، ع. (۱۳۹۲). ارزیابی کارآیی عملکردی سیستم حمل‌ونقل تندرو شهر تبریز. *دوفصلنامهٔ جغرافیا و توسعهٔ شهری*، ۲(۱)، ۸۰-٦۵.

۱۱. عمران‌زاده، ب. (۱۳۸۸). *ارزیابی عملکرد سیستم حمل‌ونقل BRT در کلان‌شهر تهران* (پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد منتشرنشده). دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۱۲. فیلد، ب.، و مک‌گریگور، ب. (۱۳۷٦). *فنون پیش‌بینی در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای* (ف. تقی-زاده، مترجم). تهران: انتشارات سازمان برنامه‌وبودجه.

۱۳. لقمانی، س. م. (۱۳۸٦). *انتخاب گزینهٔ بهینهٔ حمل‌ونقل عمومی شهری با نگاه ویژه به اندازهٔ شهر نمونهٔ موردی شهر تهران* (پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد منتشرنشده). واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

۱٤. لولاچی، م. (۱۳۸٤). استفاده از الگوریتم TOPSIS جهت انتخاب مراکز تعمیرات دپویی برتر. *سومین کنفرانس ملی نگهداری و تعمیرات*، تهران، ایران.

۱۵. مرکز آمار ایران. (۱۳۹۰). *درگاه ملی آمار ایران*. تهران.

۱٦. ملک‌زاده، غ. (۱۳۸۷). ارزیابی و رتبه‌بندی سطح فناوری شش شاخهٔ صنعتی منتخب استان خراسان با استفاده از روش TOPSIS. *مجلهٔ دانش و توسعه*، *۱۵*(۲۲)، ۱۵۰-۱۳۳.

17. Affisco, J. A. (1988). An empirical investigation of integrated spatial-proximity MCDM-behavioral problem solving technology group decision models. *Developments in Business Simulation & Experiential Exercises*, *15*, 56-60.

18. Al-But'hie, I. M., & Eben Saleh, M. A. (2002). Urban and industrial development planning as an approach for Saudi Arabia: The case study of Jubail and Yanbu, *Journal of Habitat International*, *26*(1), 1-20 .

19. Banciu, D. D. M., & Florea, M. C. G. (2009). Decision support system based on MADM for urban transport management. *Romanian Air Traffic Services Adm*, *2*, 128-130.

20. Camilo, G. (2003). *Bus rapid transit: Impacts on travel behavior in Bogota*. Unpublished Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Colombia.

21. Catalan, B., David, S., & Pere, S. (2008). Urban sprawl in the mediterranean? Patterns of growth and change in the Barcelona metropolitan region 1993–2000. *Journal of Landscape and Urban Planning, 85*(3-4), 174 -184.
22. Federal Transit Administration. (2009). *Characteristics of bus rapid transit decision-making*.
23. Federal Transit Administration: FTA. (2003). *Issues in bus rapid transit*. [Report online]; available from http:// www.fta .dot.gov/ documents /issues. pdf. Accessed on November 17, 2006.
24. GAO. (2003). *Bus rapid transit offers communities a flexible mass transit option*. Federal Transit Administration. United States General Accounting Office.
25. Grava, S. (2003). *Urban transportation system: Choices for communities* (15th ed.). New York: McGraw-Hill. Chicago.
26. Grave, S. (2004). *Urban transportation system*. Retrieved December 8, 2004, from www. Digital engineering library com.
27. Han, J., Yoshitsugu, H., Xin, C., & Hidefumi, I. (2009). Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. *Journal of Landscape and Urban Planning, 91*(3), 133-141.
28. Henrik Hall, C. (2006*). A framework for evaluation and design of an integrated public transportation*. Sweden: Department of Science and Technology, Linkopings University.
29. Naumann, F. (1998). *Data fusion and data quality*. Institute fur informatik .Humboldt –Universitat zu Berlin, Germany
30. Ogunkoya, A. O. (2008). Public transport innovation: The impact of BRT on passengers movement in lagos metropolitan area of Nigeria, Pakista. *Journal of Social Science*, *5*(8), 845-852.
31. Rodrigue, P. J., Comtois, C., & Slack, B. (2006). *The geography of transportation systems*. New York: Routledge.
32. Schouten, M. A., & Mathenge, R. W. (2010). Communal sanitation alternatives for slums: A case study of Kibera, Kenya. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth, 35*(13&14), 815-822.
33. World Bank. (2009). *Urban transport strategy review-mass rapid transit in developing countries*. Final Report 3. Available at: www; Worldbank .com.