ارزیابی و اصلاح موقعیت مکانی ایستگاه‌های شبکهٔ قطار شهری با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی و تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعهٔ موردی خط سه قطار شهری تهران)

حامدرضا خرم‌روز[1]*، محمد طالعی[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استادیار سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

دریافت: ۹۰/۱۱/۱۲ پذیرش: ۹۱/۱۰/۱۷

چکیده

باوجود مزایای زیادی مانند استفاده از سوخت پاک، استقلال از شبکهٔ راه‌های شهری و ظرفیت بالا در جابه‌جایی مسافر، در برخی موارد به‌علت مکان‌سنجی نامناسب ایستگاه‌ها، قطار شهری فاقد کارایی بهینه است. بنابراین، ضروری است تا در طراحی شبکهٔ ایستگاه‌ها و خطوط قطار شهری- که مهم‌ترین وسیلهٔ نقلیهٔ عمومی و در عین حال پرهزینه‌ترین ازنظر احداث و راه‌اندازی است- تا حد امکان از دانش و فناوری روز استفاده کنیم. روش پیشنهادی این تحقیق شامل شناسایی معیارهای تأثیرگذار در مکان‌یابی ایستگاه‌ها و به‌کارگیری روش تحلیل سلسله‌مراتبی در وزن‌دهی به هریک از آن‌ها، استفاده از سیستم اطلاعات مکانی برای ارزیابی مکان ایستگاه‌ها در نقشهٔ طرح اولیه، شناسایی ایستگاه‌های نیازمند اصلاح مکان و در ادامه پیشنهاد چند گزینه برای تغییر موقعیت فعلی ایستگاه‌های نامناسب و درنهایت به‌کارگیری مدل تصمیم‌گیری نزدیکی به گزینهٔ ایدئال با هدف انتخاب بهترین گزینهٔ پیشنهادی است. این روش توانست با دقت مناسب، وضعیت نقشهٔ طرح فعلی خط سه قطار شهری تهران- حدفاصل میدان راه‌آهن و بزرگراه شهید صیاد شیرازی- را ارزیابی و با اعمال تغییرات محلی در شبکه، نقشهٔ موجود را اصلاح کند. خروجی نهایی این تحقیق بیانگر بهبود کارایی شبکهٔ قطار شهری براساس اصلاح مکان ایستگاه‌های نامناسب است.

---

* نویسندهٔ مسئول مقاله: Email: h.khoramrooz@gmail.com

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

واژه‌های کلیدی: سیستم اطلاعات مکانی، مکان‌یابی- مسیریابی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، مدل نزدیکی به گزینه ایدئال، قطار شهری.

۱- مقدمه

پیامد افزایش جمعیت شهرها با وقوع انقلاب صنعتی و توسعهٔ شهرنشینی، افزایش حجم سفرهای درون‌شهری است. افزایش ترافیک و درنتیجه افزایش زمان سفرها و نارضایتی مسافران از عدم کفایت نظام حمل‌ونقل موجود، افزایش مصرف سوخت، آلودگی هوا، آلودگی صوتی و عوارض بهداشتی و روحی- روانی بخشی از نتایج افزایش جمعیت در کلان‌شهرهاست. به‌علاوه، پراکندگی ناهمگون مراکز اصلی جذب‌کنندهٔ سفر در سطح شهر ازجمله مراکز اداری، مراکز تجاری، مکان‌های تفریحی (مانند پارک‌ها، تالارها، سینماها و مجموعه‌های بزرگ ورزشی)، مراکز فرهنگی، آموزشی و مراکز بهداشتی، افزایش سفرها و معضلات ناشی از آن را تشدید می‌کند.

در این شرایط وجود سیستم حمل‌ونقل کارآمد و متناسب با ویژگی‌های خاص کلان‌شهر باید در اولویت سیاست‌گذاری‌ها و اهداف مرتبط با آن باشد. در این میان، نقش سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، به‌عنوان مهم‌ترین بخش سیستم حمل‌ونقل شهری، انکارناپذیر است. در حال حاضر، در میان سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی موجود، سیستم حمل‌ونقل قطار شهری[1] از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. ایمنی بسیار بالا، راحتی و آسایش مسافران، استفاده از سوخت پاک، کاهش مصرف انرژی، سرعت مناسب و قیمت پایین حمل مسافر در مقایسه با خودروهای شخصی از مزیت‌های قطار شهری نسبت به سایر وسایل نقلیهٔ عمومی است.

از چندین دههٔ گذشته تا به امروز، در اغلب کلان‌شهرهای جهان فناوری قطار شهری به‌عنوان یک سیستم کارآمد حمل‌ونقل درون‌شهری مورد استفاده قرار گرفته است. نخستین قطار شهری جهان در سال ۱۸۶۳م در شهر لندن آغاز به کار کرد و پس از آن شهرهای پاریس، بوداپست و گلاسکو به سیستم قطار شهری مجهز شدند (Leung, 2009).

در چند سال اخیر در کشورمان نیز شاهد احداث و بهره‌برداری از قطارهای شهری تهران، مشهد، اصفهان، تبریز، شیراز و اهواز بوده‌ایم. باوجود تلاش‌های بسیار در این زمینه، به‌نظر

1. metro, subway

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

می‌رسد به‌علت وجود برخی کاستی‌ها و عدم ارزیابی و مکان‌سنجی مناسب برپایهٔ دانش و روش‌های نوین برای تعیین مکان قرارگیری ایستگاه‌ها و همچنین عدم به‌روز رسانی نقشه‌های طراحی‌شدهٔ خطوط قطار شهری در کلان‌شهری مانند تهران، شاهد بروز مشکلات در برخی از ایستگاه‌های بهره‌برداری‌شده هستیم. حجم زیاد مسافران در تعدادی از ایستگاه‌ها و درمقابل، نبود تقاضای مورد انتظار در برخی ایستگاه‌های دیگر، سبب شده است این سیستم تا حد زیادی بازده خود را از دست بدهد.

از دیرباز، مسئلهٔ یافتن مناسب‌ترین مکان برای استقرار منابع و مراکز جزء اساسی‌ترین مراحل برنامه‌ریزی شهری بوده است. به‌طور کلی، مکان بهینهٔ استقرار یک خدمت، مکانی است که در آن بیشترین کارایی (ازنظر کمّی) و در عین حال بهترین کارایی (ازنظر کیفی) به‌دست آید (مهدی‌پور، ۱۳۸٦: ۳). در مکان‌یابی ایستگاه‌های قطار شهری توجه به میزان تأثیر و تأثر کاربری‌های دیگر و بررسی روابط متقابل بین کاربری‌های مختلف شهری از اهمیت زیادی برخوردار است. این معیارها و شاخص‌های تأثیرگذار در فرایند مکان‌یابی نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

از آنجایی که مکان‌یابی هر فعالیتی در سطح شهر نیازمند اطلاعات مکانی است، باید حجم وسیعی از اطلاعات برای معرفی مکان‌های مختلف جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شود تا ارزیابی صحیحی از عواملی که ممکن است در انتخاب مؤثر باشند، صورت پذیرد. در این حالت، کار با چنین حجم وسیع اطلاعات و داده‌ها نیازمند استفاده از روش‌ها و ابزارهای نوینی است که علاوه‌بر قدرت و سرعت پردازش بالا، دقت‌های مورد نظر را نیز تأمین کند. یکی از دستاوردهای بزرگ پیشرفت کنونی فناوری، ظهور سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) به‌عنوان ابزاری قدرتمند درزمینهٔ مدیریت داده‌های مکانی است. با توجه به توانمندی‌های وسیعی که GIS در مسائل مکان‌یابی و تلفیق و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی دارد، می‌تواند برای ارزیابی شبکهٔ ایستگاه‌های قطار شهری گزینهٔ مناسبی باشد.

در چند سال گذشته، با روند توسعهٔ شهری به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه، تحقیقاتی درزمینهٔ مکان‌یابی ایستگاه‌های قطار شهری انجام شده است؛ اما این تحقیقات در مقایسه با دیگر پژوهش‌ها انگشت‌شمار است. البته، در مواردی مشابه مانند مکان‌یابی ایستگاه‌های راه‌آهن‌های بین‌شهری و ایستگاه‌های سامانهٔ اتوبوس‌های تندرو (BRT) موارد بیشتری یافت

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

می‌شود. بیشتر تحقیقات انجام‌شده دربارهٔ مکان‌یابی شبکهٔ قطار شهری به طراحی مسیر معطوف بوده و کمتر به مکان‌یابی ایستگاه‌های آن پرداخته شده است. برای مثال، در پژوهشی که دافورد[1] و همکارانش (1996: 1-19) انجام دادند، مکان‌یابی یک خط حمل‌ونقل سریع ریلی توسط الگوریتم جست‌وجوی ممنوع صورت گرفته است. تابع هدف در این الگوریتم، حداکثرسازی پوشش جمعیتی مسیر است. محدودیت‌های اعمال‌شده شامل تعداد معلوم ایستگاه در مسیر و حداقل و حداکثر فاصلهٔ بین‌ایستگاهی است که در آن فواصل بین‌ایستگاهی با محاسبهٔ فاصلهٔ پیاده‌روی در یک شبکهٔ دسترسی محاسبه شده است.

یکی از تحقیقاتی که بیشتر معطوف به مکان‌یابی ایستگاه‌های مترو بوده، فارکاس[2] (2009a) انجام داده است. در این تحقیق، با مطالعه و بررسی معیارهای مؤثر بر مکان‌یابی ایستگاه‌های قطار شهری، پنج معیار ویژگی‌های مهندسی و زمین‌شناسی، تناسب زیست‌محیطی، تراکم جمعیت، شاخص اتصال (میان شبکهٔ قطار شهری و دیگر سیستم‌های حمل ونقل، مراکز فعلی و بالقوّهٔ جاذب سفر) و معیار هزینهٔ احداث طرح درنظر گرفته شده است. در ادامه، به‌کمک GIS و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به مقایسه و تلفیق معیارها (با استفاده از روش هم‌پوشانی وزن‌دار) پرداخته شده است. درنهایت، با استفاده از یک پارامتر هزینه- که براساس دو کمیت طول مسیر و میانگین تناسب مکانی ایستگاه‌های هر مسیر تعریف شده- گزینهٔ نهایی از بین مسیرها و ایستگاه‌های میانی دو نقطهٔ مبدأ و مقصد تعیین شده است.

بائیک[3] و همکاران (2005: 292-302) با استفاده از تکنیک AHP به مکان‌یابی ایستگاه راه‌آهن پرداخته‌اند. آن‌ها برای حل مشکلات ذاتی AHP ازقبیل وابستگی پرسش‌نامه‌ها به یکدیگر و وابستگی نتایج به گروه‌هایی که مورد سؤال قرار می‌گیرند، از مقیاس فازی و همچنین تحلیل حساسیت وزن معیارهای مختلف استفاده کرده‌اند. در سال ۲۰۰۵م، ما[4] و همکارانش در آمریکا با استفاده از GIS مدلی برای تعیین مکان بهینهٔ سیستم‌های بیوانرژی که از کود حیوانی استفاده می‌کنند، طراحی و اجرا کردند. در این تحقیق، برای وزن‌دهی و تلفیق داده‌های مورد نیاز از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده کرده‌اند. نتایج مطالعهٔ آن‌ها

1. Dufourd
2. Farkas
3. Baek
4. Ma

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

نه‌تنها منابع قابل دسترس انرژی تجدیدشونده براساس توزیع دام‌پروری‌ها را ارائه می‌کند؛ بلکه بهترین مکان‌های دارای پتانسیل برای توسعهٔ چنین سیستم‌هایی را نیز نشان می‌دهد (Ma Et al., 2005: 591-600).

در ایران در پاره‌ای موارد، تحقیقات مبتنی‌بر تحلیل‌های مکانی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. برای نمونه، می‌توان به مکان‌یابی محل‌های دفن زباله‌های شهری، پارکینگ‌های عمومی و پمپ بنزین اشاره کرد. در این میان، مکان‌یابی کاربری مربوط به شبکهٔ ایستگاه‌های قطار شهری با توجه به مسائلی مانند بی‌توجهی به اهمیت موضوع و عدم بازبینی نقشه‌های طراحی قدیمی موجود تاحدودی مورد کم‌توجهی قرار گرفته است. البته، در این زمینه مطالعاتی صورت گرفته که به‌نظر می‌رسد با توجه به گستردگی ابعاد مسئله، نتوانسته است تمام اهداف و چشم‌اندازهای این نوع کاربری را تحت پوشش قرار دهد.

در پژوهش ابطحی و ملاپور (۱۳۸۸) برای تعیین مناسب‌ترین گزینه از بین چند گزینهٔ مسیر مطرح‌شده در یک سیستم ریلی درون‌شهری، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است که در آن چهار معیار اصلی و دوازده زیرمعیار برای مقایسهٔ گزینه‌های پیشنهادی در تصمیم‌گیری شرکت داده شد. در تحقیق هاشمی (۱۳۸۹) نیز سعی شده است تا شبکه‌ای بهینه از خطوط طراحی شود. روش این پژوهش شامل دو مرحلهٔ اصلی است: در مرحلهٔ اول با توجه به اهداف و محدودیت‌هایی مانند حداقل و حداکثر فواصل بین‌ایستگاهی مجاز، زاویهٔ شکست مجاز مسیر و حداکثر تعداد کمان‌های یک مسیر، مسیرهای مناسب تولیدمی‌شود. در مرحلهٔ دوم با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ترکیبی از خطوط به‌عنوان جواب نهایی برگزیده می‌شود (هاشمی، ۱۳۸۹). از آنجایی که این روش کل شبکهٔ مترو را بررسی می‌کند، می‌تواند در طراحی مسیرهای شبکه مفید واقع شود. گرچه در این پژوهش در ابتدا مکان ایستگاه‌های مترو مشخص شده است، مکان‌یابی جامعی در این مورد صورت نگرفته و فقط تعدادی از گره‌های شبکهٔ خیابانی موجود به‌عنوان مکان ایستگاه‌ها درنظر گرفته شده‌اند.

۲- مواد و روش تحقیق

احداث شبکهٔ قطار شهری نیازمند درنظر گرفتن پارامترها و معیارهای زیادی است و شناسایی تمام این معیارها به مطالعه و تحقیقات میدانی و آماریِ زمان‌بر نیاز دارد. سیاست‌گذاری مناسب

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

حمل‌ونقل شهری از ساختاری شبیه به اهداف و معیارهای نمایش داده‌شده در جدول شمارهٔ یک تبعیت می‌کند (Farkas, 2009a).

جدول ۱ سلسله‌مراتب اهداف

مکان‌یابی ایستگاه قطار شهری	اهداف مهندسی	بازده
		ساخت و زمین‌شناسی
		زیرساخت‌های مناسب دربردارنده برنامه‌های عمومی
		مشخصه‌های مهندسی و ترازبندی
	اهداف اقتصادی	بازده سرمایه
		ارزش خالص فعلی
		هزینه‌های ساخت
		کمینه کردن مالکیت زمین
		کمینه کردن خرابی کار
	اهداف سازمانی	بیشینه کردن دسترسی به نواحی
		بیشینه کردن اتصال نواحی
		بیشینه کردن ارتباطات به مراکز رشد استراتژیک
		کمینه کردن سلب مالکیت از شهروندان
		بیشینه کردن ارتباط به سیستم‌های دیگر حمل‌ونقل
	اهداف اجتماعی	افزایش جابه‌جایی
		کمینه کردن اختلال به جامعه
		بیشینه کردن دسترسی به مناطق مسکونی و خرید
		بیشینه کردن ارتباطات به مناطق اداری و آموزشی
		خدمت‌رسانی به مناطق محروم
	اهداف زیست‌محیطی	نگهداری از مناطق حفاظت‌شدهٔ زیست‌محیطی
		کمینه‌سازی تجاوز به نواحی حساس و بافت‌های فرسوده
		کمینه‌سازی آلودگی‌های صوتی
		کمینه‌سازی مصرف سوخت

(sourse: Farkas, 2009b: 719-734)

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

میزان دست‌یابی به کاربری‌های مختلف در یک مسئلهٔ مکان‌یابی با استفاده از توابع دسترسی مشخص می‌شود. یک تابع دسترسی امکان محاسبهٔ میزان دسترس‌پذیری مکان‌های مختلف محدودهٔ مورد مطالعه را به یک یا چند کاربری فراهم کند. برای ارزیابی دسترسی‌پذیری کاربری‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌های رایج، استفاده از مدل گرانش است. با استفاده از این مدل می‌توان میزان نسبی دسترسی مکان‌های مختلف را به مراکز اصلی جذب‌کنندهٔ سفر از طریق سیستم حمل‌ونقل اندازه‌گیری کرد. این مدل براساس رابطهٔ ۱ تعریف می‌شود:

$$A_g = (\sum_{h=1} P_h . e^{-\beta T_{gh}}) \qquad \text{رابطهٔ ۱}$$

A_g میزان دسترسی هر نقطه g از منطقه، P_h وزن مربوط به معیار h، T_{gh} زمان دسترسی از هر نقطه g در منطقه به معیار h، و β بیانگر روند نزولی دسترسی با افزایش زمان دسترسی است. با استفاده از این مدل می‌توان میزان دسترسی به مراکز را براساس درجهٔ اهمیت هریک به‌دست آورد. همچنین، این مدل قابلیت هماهنگی با روش‌های تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، مانند مدل هم‌پوشانی وزن‌دار را داراست.

در این تحقیق، پس از تهیهٔ نقشهٔ فواصل شبکه‌ای (کوتاه‌ترین مسیر) در محیط GIS، فواصل محاسبه‌شده به‌عنوان پارامتر ورودی برای محاسبهٔ تابع دسترسی به هر کاربری به‌کار گرفته شد. در تابع دسترسی مورد استفاده، پارامتر زمان از حاصل‌ضرب پارامتر فاصله در سرعت پیاده‌روی به‌دست آمده است (رابطهٔ ۲). در این تحقیق، سرعت پیاده‌روی براساس متوسط استاندارد جهانی، سه کیلومتر بر ساعت درنظر گرفته شده است (Handy, 1997: 1175-1194).

$$T_{gh} = \frac{d_{gh}}{V_{gh}} = \frac{1}{3000} d_{gh} \qquad \text{رابطهٔ ۲}$$

d_{gh} فواصل تحت شبکهٔ معابر برحسب متر است. با جایگزینی نتیجهٔ رابطهٔ ۲ در رابطهٔ ۱، مدل گرانش به‌شکل رابطهٔ ۳ قابل بازنویسی است:

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

رابطهٔ ۳ $$A_g = (\sum_{h=1} P_h . e^{-\frac{1}{3000}\beta d_{gh}})$$

در این رابطه، براساس الگوی دسترسی‌پذیری و همچنین نظرات کارشناسان، مقدار پارامتر β برابر عدد یک درنظر گرفته شده است.

در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین گزینه از بین m گزینهٔ موجود به تعیین ارجحیت (یا مطلوبیت) هر معیار در تأمین هدف نهایی از تصمیم‌گیری و درنهایت تلفیق نتایج هر معیار جهت شاخص ارزیابی نهایی گزینه‌ها (ایستگاه‌های قطار شهری) نیاز است. در این مقاله، از روش AHP[2] برای وزن‌دهی معیارها و از مدل نزدیکی به گزینهٔ ایدئال[3] (TOPSIS) برای مقایسهٔ گزینه‌های پیشنهادی استفاده شده است.

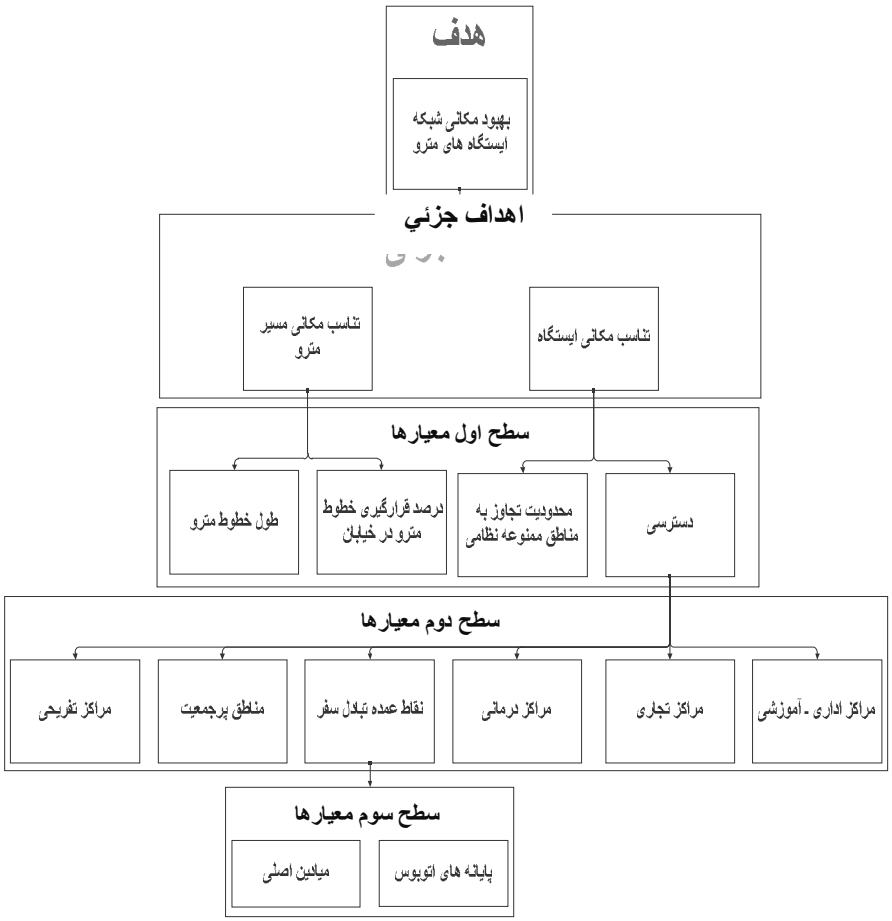
روش AHP را توماس ل. ساعتی[4] (1977: 234-281) در دههٔ ۱۹۷۰م پیشنهاد کرد. این روش با انجام مقایسات زوجی بین معیارهای مختلف، اقدام به برآورد وزن نسبی معیارها می‌کند. AHP بر چهار اصل ایجاد ساختار سلسله‌مراتبی برای مسئله، معرفی ترجیحات از طریق مقایسات زوجی معیارها، محاسبهٔ وزن‌های نسبی معیارها و اندازه‌گیری سازگاری میان نظرات کارشناسی بیان‌شده دربارهٔ اهمیت معیارهای مختلف استوار است. در این ساختار، هر عنصر در یک سطح معین تحت تسلط برخی یا تمام عناصر موجود در سطح بلافاصله بالاتر از آن است. یک ماتریس مقایسهٔ زوجی به‌صورت رابطهٔ زیر نشان داده می‌شود که در آن a_{ij} ترجیح عنصر iام نسبت به عنصر jام است:

رابطهٔ ٤
$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$
$$A = [a_{ij}] \quad i,j = 1,2,\dots,n$$

شکل شمارهٔ یک ساختار درختی تصمیم‌گیری مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد:

1. Multi Attribute Decision Making (MADM)
2. Analytic Hierarchy Process
3. Technique for Order– Preference by Similarity to Ideal Solution
4. Saaty

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]



شکل ۱ ساختار سلسله‌مراتبی معیارهای استفاده‌شده در تحقیق

براساس پرسش‌های انجام‌شده از کارشناسان مربوط و انجام مقایسات زوجی، نتایج حاصل از وزن‌دهی سطوح مختلف و همچنین میزان ناسازگاری هر سطح در جدول شـمارهٔ دو آورده شده است. محاسبهٔ شاخص ناسازگاری مدل AHP نشان می‌دهد مقایسات زوجی از سازگاری مناسبی (کمتر از ۰.۱) برخوردارند که سازگاری نظرات کارشناسان در تعیین میـزان ارجحیـت نسبی دوبه‌دوی معیارها را نشان می‌دهد.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

جدول ۲ وزن معیارهای مختلف

میزان ناسازگاری	وزن معیارها	معیارها	سطوح وزن‌دهی
۰	۰/۵	تناسب مکانی ایستگاه	اهداف جزئی
	۰/۵	تناسب مکانی خط	
۰	۰/٦٦٧	طول خط	سطح اول معیارها
	۰/۳۳۳	درصد تطابق خط بر خیابان	
۰/۰۳	۰/۳۵۲	اداری- آموزشی	سطح دوم معیارها
	۰/۲۱۱	تجاری	
	۰/۱٦٦	تراکم جمعیت	
	۰/۱۱۷	تفریحی	
	۰/۱	نقاط اصلی تبادل سفر	
	۰/۰۵۳	بهداشتی	
۰	۰/٦٦٧	پایانهٔ اتوبوس	سطح سوم معیارها
	۰/۳۳۳	میدان‌های اصلی	

پس از تعیین وزن نسبی هر معیار، نتایج معیارهای مختلف برای ارائهٔ شاخص مناسب جهت ارزیابی گزینه‌ها تلفیق می‌شود. ترکیب نقشه‌ای معیار براساس درجهٔ اهمیت آن‌ها برای رسیدن به نقشه‌ای است که تلفیقی از مقادیر تک‌تک معیارهاست. در این مقاله، از روش هم‌پوشانی شاخص چندگانه در مرحلهٔ تلفیق معیارها استفاده شده است. این روش در عین برخورداری از منطقی ساده، با انعطاف‌پذیری بالایی لایه‌های ورودی را ترکیب می‌کند و به‌دلیل داشتن ماهیت خطی، اجرای آن زمان کوتاهی را صرف می‌کند. در این روش، کلاس‌های هر لایه براساس اهمیت آن‌ها در مکان‌یابی تفکیک می‌شود و وزن متفاوتی می‌گیرد. درنهایت، هریک از معیارها نیز وزن جداگانه‌ای را که در مرحلهٔ

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

وزن‌دهی معیارها حاصل شده است، دریافت می‌کند. ارزش‌های مکانی نهایی از رابطهٔ ۵ محاسبه شده است.

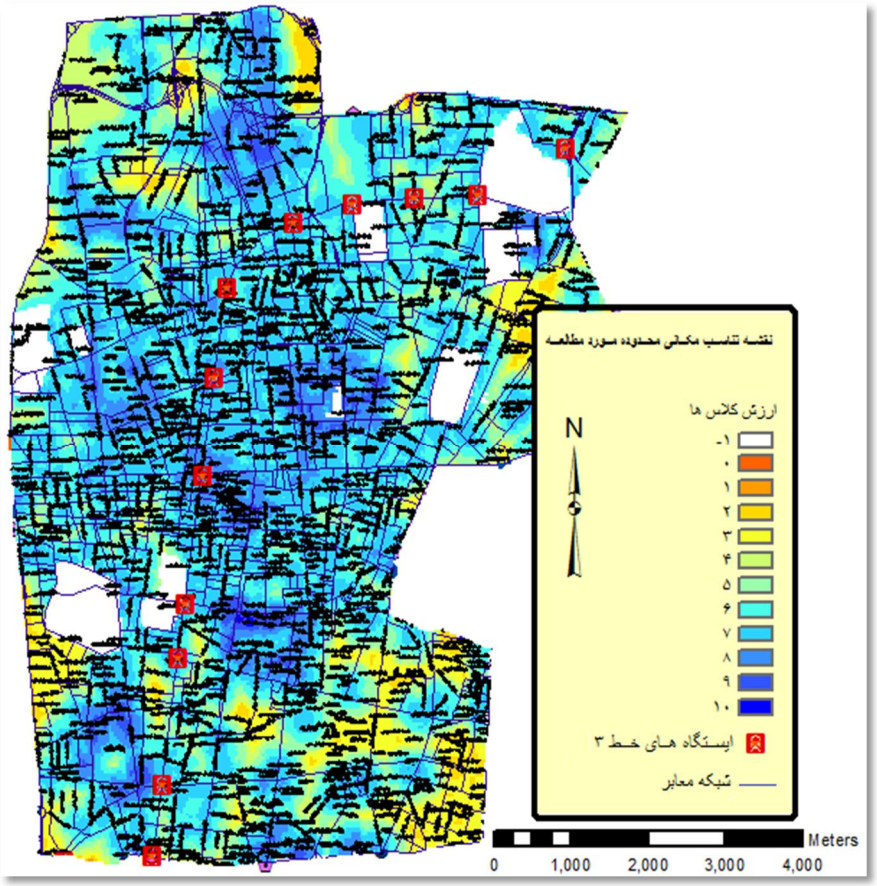
رابطهٔ ۵

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i . S_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} W_i} \quad \prod_{j=1}^{m} C_j$$

در این رابطه $\bar{S}$ ارزش‌های نهایی داده‌شده به هریک از گزینه (ایستگاه قطار شهری)، W_i وزن iامین نقشه (معیار) ورودی، S_{ij} ارزش jامین کلاس از iامین نقشه (معیار) و C_j لایه محدودیت‌هاست.

معیارهای مورد استفاده در این تحقیق، شامل دسترسی به مراکز جذب سفر و نقاط اصلی تبادل سفر، تراکم جمعیت، عوامل محدودکننده و شاخص‌های مربوط به طراحی مسیر قطار شهری است. داده‌های این تحقیق شامل موقعیت فعلی ایستگاه‌ها و خط سه قطار شهری شهر تهران، لایه‌های مربوط به کاربری‌های مختلف شهر تهران، بلوک‌های جمعیتی، خیابان‌ها و عوارض نقطه‌ای مانند میدان‌ها و پایانه‌های اتوبوس‌رانی و نقاط اصلی تبادل سفر است که از شهرداری تهران اخذ شده است. با استفاده از لایهٔ مربوط به بلوک‌های جمعیتی و محاسبهٔ میزان تراکم جمعیت از تقسیم جمعیت هر بلوک بر مساحت آن، لایهٔ تراکم جمعیت به‌دست آمده است. با توجه به وجود مناطق ممنوعهٔ نظامی در محدودهٔ مورد مطالعه، این لایه به‌عنوان محدودیت اعمال شده است. خروجی حاصل از این مرحله، یک نقشهٔ رستری با داده‌های طبقه‌بندی‌شده است که هر کلاس مقدار عددی بین ۱ تا ۱۰ گرفته است؛ همچنین دارای کلاس ۱- نواحی دارای محدودیت است. با توجه به ویژگی‌ها و روش اجرای مدل هم‌پوشانی شاخص، پیکسل‌های خروجی قابلیت اولویت‌بندی براساس مقادیر حاصل را دارد. خروجی حاصل از این مرحله در شکل شمارهٔ دو آمده است.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]



شکل ۲ نقشهٔ تناسب مکانی محدودهٔ مورد مطالعه

همان‌طور که اشاره شد، در این مقاله برای مقایسهٔ گزینه‌های پیشنهادی (ایستگاه‌های قطار شهری) جهت جایگزینی با ایستگاه‌های نامناسب از مدل TOPSIS استفاده شده است. روش TOPSIS در ردهٔ روش‌های تصمیم‌گیری جبرانی است؛ به این معنا که مبادلهٔ بین شاخص‌ها در این مدل مجاز است و ضعف یک شاخص می‌تواند توسط امتیاز شاخص دیگری جبران شود. از ویژگی‌های این مدل تصمیم‌گیری، سازگاری بالای آن در تصمیم‌گیری‌های مربوط به مکان‌یابی است. این روش با درنظر گرفتن مقادیر ایدئال مثبت

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

و منفی، علاوه‌بر درنظر گرفتن فاصلهٔ یک گزینه از نقطهٔ ایدئال مثبت، فاصلهٔ آن را از نقطهٔ ایدئال منفی نیز درنظر می‌گیرد؛ به این معنا که گزینهٔ انتخابی باید دارای کمترین فاصله از راه‌حل ایدئال (مثبت) و در عین حال دارای دورترین فاصله از راه‌حل ایدئال منفی باشد. اطلاعات ورودی به روش TOPSIS شامل بردار وزن‌ها (W) برای شاخص‌ها بوده و خروجی آن به‌صورت رتبه‌بندی گزینه‌ها ارائه می‌شود. فرض این روش این است که مطلوبیت برای هریک از شاخص‌ها به‌طور یکنواخت افزایشی (یا کاهشی) است؛ این فرض برای بیشتر موارد نیز فرض معتبر است (اصغرپور، ۱۳۸۹: ۲٦۰).

۳- یافته‌های تحقیق

چهار منطقهٔ شش، هفت، یازده و دوازده شهر تهران با توجه به تنوع کاربری‌ها و قرارگیری ایستگاه‌های مهم تقاطعی و تبادلی موجود و همچنین قرارگیری خط سه قطار شهری، به‌عنوان محدودهٔ مورد مطالعه انتخاب شد. همچنین، شروط زیر براساس نظر کارشناسان شرکت قطار شهری تهران لحاظ شد (شرکت قطار شهری تهران و حومه، ۱۳۸۹: ۳٦):

– فاصلهٔ ایستگاه‌های خطوط ریلی ترجیحاً بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر باشد. تا حد امکان طول خطوط گذرنده از ایستگاه‌ها کوتاه باشد.

– موقعیت ایستگاه‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شود تا علاوه‌بر پوشش مناسب تقاضا- تا حد امکان- با مراکز مهم جاذب و مولد سفر از فاصلهٔ مناسبی برخوردار باشد. این فاصله بهتر است از ۵۰۰ متر کمتر باشد.

– درصورت امکان، مسیرهای طراحی‌شدهٔ خطوط قطار شهری از معابر و خیابان‌های اصلی عبور کند.

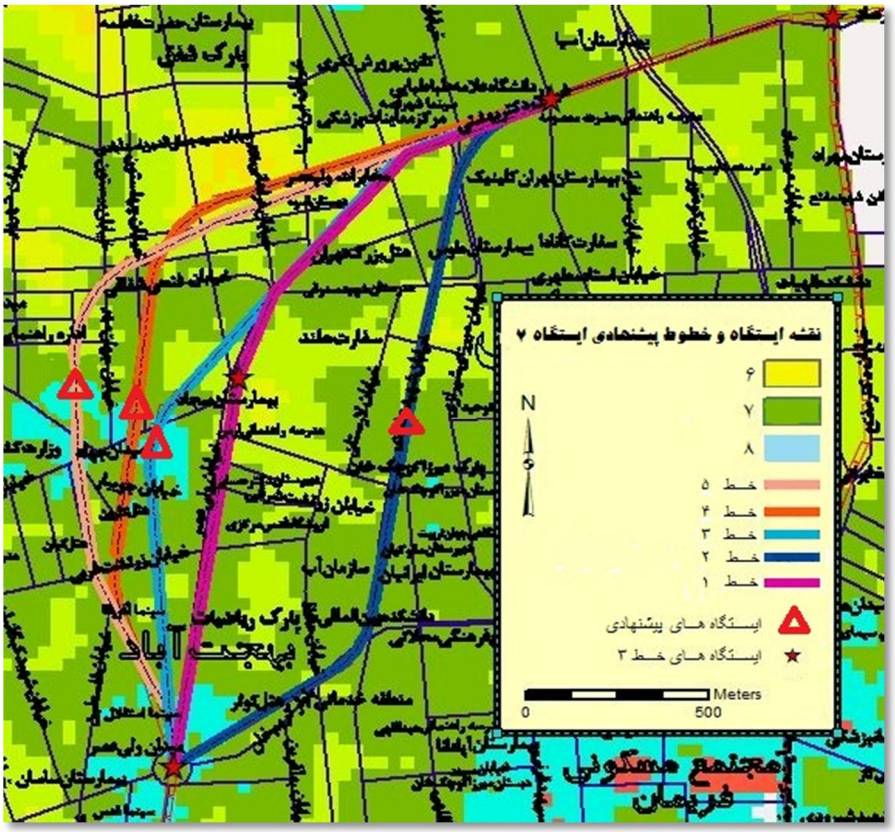
– محل قرارگیری ایستگاه‌ها باید به‌گونه‌ای باشد تا خطوط قطار شهری عبوری از آن‌ها دارای قوس‌های مناسب و با پیچ‌های ملایم باشد. برای این منظور باید کمترین شعاع مجاز برای قوس‌های خطوط قطار شهری ۳۰۰ متر درنظر گرفته شود.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

به‌منظور بررسی میزان تناسب مکانی ایستگاه‌های منطقهٔ مورد مطالعه در این بخش، مکان فعلی ایستگاه‌ها با خروجی حاصل از مرحلهٔ هم‌پوشانی وزن‌دار- که در مرحلهٔ قبل تهیه شد- مقایسه شد. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، با توجه به ویژگی‌های مدل هم‌پوشانی شاخص، پیکسل‌های خروجی را می‌توان براساس وزن‌های به‌دست آمده از این روش اولویت‌بندی کرد. با مقایسهٔ وزن‌های ایستگاه‌ها در نقشهٔ خروجی، از ۱۲ ایستگاه خط ۳ محدودهٔ مطالعه، ٦ ایستگاه در مناطق با کلاس برابر یا بالاتر از ارزش مکانی ۸ قرار دارند و سایر ایستگاه‌ها دارای ارزش مکانی ٦ یا ۷ هستند. در این تحقیق، با توجه به دامنهٔ کلاس‌ها، کلاس‌های با ارزش‌های ۸، ۹ و ۱۰ به‌عنوان کلاس‌های با تناسب مکانی بالا انتخاب شده است. بنابراین، از ۱۲ایستگاه موجود، ٦ ایستگاه دارای موقعیت مناسب بوده و ایستگاه‌های دیگر نیازمند اصلاح هستند.

در این مقاله از بین ایستگاه‌های نیازمند اصلاح، ایستگاه هفتم برای بررسی امکان اصلاح موقعیت مورد بازبینی قرار گرفت. در این مرحله ابتدا به‌منظور تسریع در یافتن مکان‌های حاوی تناسب بالا در حوالی ایستگاه هفتم، به مرکز این ایستگاه و به شعاع ۵۰۰ متر بافر زده شد (علت انتخاب بافر ۵۰۰ متری، توجه به فاصلهٔ مجاز دو ایستگاه قبل و بعد از ایستگاه فعلی است). در ادامه، با بررسی سه شرط ذکرشده برای طراحی خطوط قطار شهری، یعنی میزان تطابق خطوط بر خیابان‌ها، حداقل شعاع قوس مجاز و فاصلهٔ قرارگیری ایستگاه از دو ایستگاه قبل و بعد، از بین مسیرهای ممکن در حدفاصل دو ایستگاه ششم و هشتم، چهار مسیر به‌عنوان مسیرهای پیشنهادی برای قرارگیری ایستگاه هفتم انتخاب شد. شکل شمارهٔ دو نمایی از محدودهٔ قرارگیری مسیرها و ایستگاه‌های جایگزین پیشنهادی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]



شکل ۲ نقشهٔ ایستگاه‌ها و خطوط پیشنهادی برای اصلاح مکان فعلی ایستگاه هفتم

ماتریس وزن معیارها براساس حاصل‌ضرب وزن هر معیار در وزن‌های اهداف کلی به‌دست‌آمده از روش AHP تشکیل شد. همچنین، عناصر ماتریس تصمیم‌گیری شامل تناسب مکانی ایستگاه‌ها و طول هریک از مسیرها به‌همراه درصد قرارگیری آن‌ها بر روس مسیرهای اصلی، از نقشهٔ مسیرهای پیشنهادی استخراج شد. معیار طول مسیر معیار هزینه (کاهش مطلوبیت با افزایش طول مسیر) و دو معیار دیگر معیار فایده (افزایش مطلوبیت) هستند (جدول ۳).

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

جدول ۳ عناصر ماتریس تصمیم‌گیری (معیارها و گزینه‌ها)

ماتریس تصمیم‌گیری (D)			
درصد حرکت بر خیابان (+)	تناسب ایستگاه (+)	طول مسیر* (−)	معیارها/ گزینه‌ها
۱۰۰	٦	۲۳۰۰	گزینهٔ ۱
٦٤	۷	۲۳۰۰	گزینهٔ ۲
٦۰	۸	۲٤۰۰	گزینهٔ ۳
٤۹	۸	۲٦٥۰	گزینهٔ ٤
٤۱	۸	۲۷٥۰	گزینهٔ ٥

* علامت‌های (+) و (−) روند کاهشی یا افزایشی مطلوبیت آن معیار را نشان می‌دهد.

در این مرحله، با استفاده از روش بی‌مقیاس‌سازی، ماتریس تصمیم‌گیری به ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس‌شده (N) تبدیل شده است. در ادامه، مقادیر ایدئال‌های مثبت و منفی از ضرب ماتریس N در ماتریس W به‌دست آمده است. سپس فاصلهٔ هر گزینه از ایدئال‌های مثبت و منفی محاسبه شده است. در پایان، میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایدئال طبق رابطهٔ ٦ به‌دست آمده است.

رابطهٔ ٦

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

مقادیر CL برای گزینه‌های مختلف در جدول شمارهٔ چهار آمده است.

جدول ۴ میزان نزدیکی نسبی گزینه‌ها به جواب ایدئال

نزدیکی نسبی (CL)	گزینه‌ها
۰.٥٤۹	گزینهٔ ۱
۰.٤۸٥	گزینهٔ ۲
۰.٥۹۲	گزینهٔ ۳
۰.٤۹٦	گزینهٔ ٤
۰.٤٥۱	گزینهٔ ٥

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

مقدار CL، بین صفر و یک است. هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، به جواب ایدئال نزدیک‌تر است. همان‌گونه که در جدول شمارهٔ چهار مشاهده می‌شود، گزینهٔ سوم (ایستگاه سوم) و مسیر گذرنده از آن، بالاترین مقدار CL را دارد. بنابراین، گزینهٔ سوم بهترین گزینهٔ انتخابی برای اصلاح مکانی ایستگاه هفتم و مسیر گذرنده از آن در این تصمیم‌گیری است. با توجه به دیگر مقادیر، گزینهٔ اول- که همان ایستگاه و مسیر اولیه است- در اولویت دوم قرار گرفته است؛ علت آن را می‌توان در کوتاهی مسیر و درصد بالای قرارگیری آن در خیابان دانست. با اتمام این مرحله از پیاده‌سازی، مکان ایستگاه‌های با تناسب مکانی پایین با درنظر گرفتن معیارهای تناسب مکانی ایستگاه و مسیر حرکت خطوط آن بهبود یافته است. مشابه مراحل اصلاح مکانی ایستگاه هفتم، دیگر ایستگاه‌ها را نیز می‌توان بررسی، ارزیابی و اصلاح کرد.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در دو دههٔ اخیر، در شهرهای بزرگ جهان هم در حیطهٔ توسعهٔ شهرسازی و هم در سیستم حمل‌ونقل عمومی تغییرات گسترده‌ای رخ داده است. در این میان، راه‌اندازی قطار شهری از مهم‌ترین تغییرات ساختاری در حمل و نقل شهری بوده است. در این پژوهش، مکان فعلی طراحی‌شده برای ایستگاه‌های خط ۳ قطار شهری تهران در محدودهٔ مناطق ٦، ۷، ۱۱ و ۱۲ تهران ارزیابی شد. در ادامه، روش پیشنهادی برای اصلاح مکانی ایستگاه‌های با تناسب پایین و مسیر گذرنده از آن‌ها بیان می‌شود. فرایند اجرای روش پیشنهادی تحقیق را می‌توان در قالب مراحل زیر بازگو کرد:

- شناسایی معیارهای تأثیرگذار بر میزان مطلوبیت یا عدم مطلوبیت مکان ایستگاه‌های قطار شهری: در این تحقیق هدف کلی- که همان بهبود ساختار مکانی شبکهٔ ایستگاه‌های مترو بود- به دو هدف جزئی‌تر یعنی تناسب مکانی ایستگاه و تناسب مکانی مسیر ایستگاه تقسیم شد.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

– وزن‌دهی اهداف و معیارها: در این مرحله برای وزن‌دهی از روش AHP استفاده شد.

– ارزیابی مکانی ایستگاه‌ها: در این مرحله با استفاده از تلفیق توابع دسترسی و امکانات GIS، نقشه‌های فواصل و دسترسی معیارها تهیه شد. سپس به‌کمک روش‌های طبقه‌بندی مجدد، نقشه‌های دسترسی استانداردسازی شد و درنهایت با استفاده از روش هم‌پوشانی وزن‌دار تلفیق شد. در این تحقیق با استفاده از خروجی حاصل از تلفیق لایه‌های دسترسی کاربری و اعمال عوامل محدودیت موفق شدیم میزان تناسب مکانی ایستگاه‌های فعلی را بررسی و همچنین محدوده‌های با تناسب مکانی بالا برای تصحیح ایستگاه‌های نامناسب را شناسایی کنیم. نتایج مدل نشان می‌دهد کلاس‌های با تناسب مکانی ٦ و ٧ دارای بالاترین فراوانی‌ها در محدودهٔ تحقیق هستند؛ درنتیجه محدودهٔ مطالعه از تناسب نسبی بالایی برای احداث شبکهٔ ایستگاه‌های مترو برخوردار بوده است. همچنین، این نتیجه با در مرکزیت شهر قرار داشتن محدودهٔ مطالعه قابل توجیه و پیش‌بینی بوده است.

– بهبود مکانی ایستگاه‌های نیازمند اصلاح: برای یک نمونه از ایستگاه‌های نیازمند اصلاح، گزینه‌هایی که مبتنی‌بر معیارها و شرایط طراحی شبکهٔ قطار شهری هستند، پیشنهاد شد. با بررسی شروط طراحی، از بین مسیرهای ممکن، چهار مسیر با توجه به ویژگی‌های هرکدام به‌عنوان مسیرهای پیشنهادی انتخاب شد. در ادامه، برای مقایسه و انتخاب بهترین گزینه از میان این گزینه‌های پیشنهادی، از مدل TOPSIS استفاده شد. سه معیار تناسب مکانی، طول مسیر و درصد تطابق مسیر بر خیابان مورد توجه قرار گرفت و براساس این، گزینهٔ سوم یعنی ایستگاه طراحی‌شده در محدودهٔ میدان جهاد و مسیر گذرنده از آن به‌عنوان گزینهٔ نهایی برای اصلاح مکانی ایستگاه هفتم و مسیر گذرنده از آن انتخاب شد. این گزینه دارای طول مسیر نسبتاً کوتاه، درصد تطابق نسبی متوسط بر خیابان و قرارگیری ایستگاه در محدوده با تناسب مکانی بالا (ارزش ٨) است.

خروجی نهایی این تحقیق بهبود موقعیت مکانی شبکهٔ قطار شهری براساس اصلاح مکانی ایستگاه‌های با تناسب مکانی پایین و مسیرهای عبوری از آن را بیان می‌کند. با

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

توجه به خروجی این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی این تحقیق با قابلیت و دقت مناسبی می‌تواند وضعیت نقشهٔ طراحی فعلی ساختار شبکهٔ قطار شهری را مورد ارزیابی قرار دهد و با اعمال تغییرات محلی در شبکه، نقشهٔ موجود را اصلاح کند.

روش پیشنهادی این تحقیق برای بررسی تناسب مکانی ایستگاه‌ها در قالب کلی و در ادامه، اصلاح مکانی هریک به‌صورت محلی مطرح شده است. با تعمیم این روش و همچنین به‌کارگیری روش‌های دیگر مانند روش‌های بهینه‌سازی، می‌توان سیستم حمل‌ونقل قطار شهری را به‌صورت یک شبکهٔ کلی و به‌هم‌پیوسته بررسی و اصلاح کرد. همچنین، در این تحقیق با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های ترافیکی محدودهٔ تحقیق، داده‌های مربوط به تأسیسات زیرزمینی و همچنین داده‌های آماری مربوط به میزان تبادلات سفر بین مناطق مختلف محدودهٔ مورد مطالعه، از این‌گونه داده‌ها صرف‌نظر شد. بدیهی است به‌کارگیری این داده‌ها می‌تواند باعث بهبود نتایج این مطالعه و بالا رفتن اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده شود. همچنین، از آنجا که طرح احداث قطار شهری زمان‌بر است، علاوه‌بر به‌کارگیری داده‌های به‌روز، نیازمند پیش‌بینی‌های لازم دربارهٔ تغییرات احتمالی در کاربری‌ها و دیگر سیستم‌های حمل‌ونقل شهری با بررسی سیاست‌ها و چشم‌اندازهای آتی در محدودهٔ مورد تحقیق است. از سوی دیگر، استفاده از سیستم حمل‌ونقل قطار شهری درصورتی کارآمد خواهد بود که بتواند علاوه‌بر کاهش هزینه‌های سفر، در کاهش زمان سفر نیز مؤثر باشد. در این‌باره بررسی آماری سفرهای شهری به‌منظور یافتن نقاط اصلی مبدأ و مقصد سفرها و درنظر گرفتن سیستم‌های حمل‌ونقل چندگونه‌ای می‌تواند به بهبود طراحی مسیرهای خطوط قطار شهری به‌منظور کاهش مدت زمان سفرها بسیار کمک کند.

۵- منابع

- ابطحی، م و ملاپور، «بهینه‌سازی مسیر سیستم ریلی درون‌شهری به‌کمک روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی» در هشتمین *کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران*، ۱۳۸۸.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

– اصغرپور، محمدجواد، *تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره*، تهران: مؤسسهٔ انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۹.

– شرکت بهره‌برداری راه آهن شهری تهران و حومه، *گزارش کار نهایی وضعیت توسعهٔ خطوط قطار شهری تهران*، ۱۳۸۹.

– مهدی‌پور، فاطمه، *مکان‌یابی مجتمع‌های خدماتی رفاهی بین‌راهی وزارت راه و ترابری با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی با تأکید بر مدل الگوریتم ژنتیک*، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸٦.

– هاشمی، م، *مدل طراحی شبکهٔ مترو با استفاده از الگوریتم ژنتیک*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۸۹.

– Baek, J.H. Et al., "Development of the Feasibility Evaluation Model for Adding New Railroad Station Using AHP Technique", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies,* 6, Pp. 292-302, 2005.

– Dufourd, Michel H., "Locating a Transit Line Using TABU Search", *Location Science, 4 (1-2)*, Pp. 1-19, 1996.

– Farkas, A., "Route/ Site Selection of Urban Transportation Facilities: An Integrated GIS/ MCDM Approach", Budapest Tech, *Keleti Faculty of Economics*, 2009a.

– _____ "An Intelligent GIS-Based Route/ Site Selection Plan of a Metro-Rail Network", *Towards Intelligent Engineering and Information Technology*, Pp. 719-734, 2009b.

– Handy, S.L. & D.A. Niemeier, "Measuring Accessibility: An Exploration of Issues and Alternatives", *Environment and Planning A,* 29, Pp. 1175-1194, 1997.

– Leung, Y.H.P., *Rethink DC Metro Stations 2009*, ProQuest, 2009.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

– Ma, J. Et al., "Siting Analysis of Farm-based Centralized Anaerobic Digester Systems for Distributed Generation Using GIS", *Biomass and Bioenergy,* 28, Pp. 591-600, 2005.

– Saaty, T.L., "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures", *Journal of Mathematical Psychology*, *15(3)*, Pp. 234-281, 1977.

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]

Evaluation and Reform of the Location of Metro Stations Using GIS and Multi Criteria Decision Making: a Case Study of Tehran

Abstract:

Despite the benefits such as the use of clean fuel, the independence of the urban road network and high capacity in handling passengers, in some cases due to inappropriate places of stations, metro network is not efficient. Therefore, it is essential to plan the location of metro stations and networks, as the most important public transportation vehicle and also the most expensive ones (from the perspective of establishing and setting up), using of modern science and technology. This research proposes a methodology, including using geographic information system (GIS) to evaluate the initial plan, identifying influential criteria in locating metro stations, utilizing analytical hierarchy process (AHP) to determine the weights of criteria, identifying the metro station requires modifying the location, proposing a number of options to change the current position of the unsuitable metro stations and ultimately using of Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) model for choosing the best option. Proposed method was able to accurately evaluate current situation of planned metro stations for line-3 in Tehran city. The final output of this research demonstrates improvement of the metro network based on modification of the position of stations with low suitability and also the route passing through them.

Key words: GIS, Locating-Routing, MCDM, TOPSIS, Metro Network

[Downloaded from hsmsp.modares.ac.ir on 2024-11-30]