نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴

Vol.13, No.3, Autumn 2025

۱۹ -٤٦

مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص‌های قابلیت پیاده‌روی مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی؛ مطالعه موردی شهر نیویورک

سارا جوکار[۱]، محمد طالعی[۲*]، سید احسان صدوقی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استاد گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشجوی دکتری، گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

چکیده

با توجه به اهمیت پیاده‌روی و نقش آن در ارتقای سلامت جسمی و روانی شهروندان، در سال‌های اخیر شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی در محیط‌های شهری ارائه شده‌اند. شاخص واک‌اسکور *(Walkscore)* یکی از مراجع شناخته‌شده در این زمینه است که مبتنی بر معیار دسترسی به برخی مراکز خاص توسعه یافته است و ابعاد مختلف موضوع پیاده‌روی را در بر نمی‌گیرد. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه‌ی سنجه‌ای برای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی، با بهره‌گیری از مجموعه‌ای وسیع‌تر از شاخص‌های متنوع مربوط به جنبه‌های مختلف پیاده‌روی و بررسی کاربرد روش‌های وزن‌دهی و تلفیق در یک فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی طراحی و پیاده‌سازی شده است. در این راستا، در گام نخست مجموعه‌ای شامل ۲۴ شاخص مرتبط با ابعاد مختلف قابلیت پیاده‌روی انتخاب شده و در گام‌های بعد، وزن‌دهی طی سه سناریوی مختلف و دو روش تلفیق شاخص‌ها (تاپسیس و ترکیب‌خطی‌وزن‌دار) به‌منظور تحلیل حساسیت مدل و تعیین بهترین ترکیب وزنی استفاده شده است. در نهایت، عملکرد روش پیشنهادی با رویکرد ارزیابی عینی، بر مبنای سنجه‌های آماری و شاخص‌های پیاده‌روی توسعه‌یافته در مطالعات پیشین ارزیابی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که فراوانی پارکینگ خودرو، مراکز خدماتی، اختلاط کاربری، سطح اتصال معابر، چگالی مسکونی و بیشینه سرعت مجاز معابر از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تسهیل قابلیت پیاده‌روی در منطقه مطالعاتی هستند. مقایسه سناریوهای مختلف نشان داد که سناریوی دوم (کاهش ابعاد شاخص‌ها به ۱۶ شاخص مبتنی بر تحلیلِ‌اجزای‌اصلی) رویکردی خوش‌بینانه‌تر در مقایسه با سناریوی اول که مبتنی بر رویکرد بدبینانه است، به کار گرفته و سناریوی سوم (کاهش ابعاد شاخص‌ها به ۵ بعد اصلی) به‌عنوان گزینه‌ای متعادل شناخته شد. در ادامه، مقایسه شاخص‌های محاسبه‌شده با نقشه *Walkscore* انجام شد. نتایج این مقایسه نشان داد که بهره‌گیری از روش ترکیب خطی وزن‌دار در سناریوی سوم (مبتنی بر معیارهای اصلی) نسبت به تاپسیس، همخوانی بیشتری با*Walkscore* دارد. نتایج پژوهش تأثیر انتخاب استراتژی وزن‌دهی و تلفیق در تحلیل چندمعیاره برای ارائه شاخص قابلیت پیاده‌روی را برجسته می‌سازد.

کلیدواژه‌ها : شاخص قابلیت پیاده‌روی، تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، تحلیل حساسیت، *Walkscore*.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی .

تلفن: ۰۲۱-۸۸۸۷۷۰۷۱

Email: taleai@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

۱- مقدمه

پیاده‌روی طبیعی‌ترین شکل جابجایی انسان در سفرهای شهری است. بخش عمده‌ای از سفرهای درون شهری به صورت پیاده انجام می‌شود و هر سفر شهری سواره هم حداقل در دو انتهای خود با پاره‌ای از سفرهای پیاده تکمیل می‌گردد [۱ و ۲]. یکی از دلایل عدم علاقه به پیاده‌روی، فقدان محیط مناسب و جذاب برای پیاده‌روی است. بنابراین بهبود کیفیت زیرساخت های پیاده‌روی می‌تواند در ترغیب مردم به تغییر سبک زندگی و بهره‌گیری از پیاده‌روی به عنوان یک روش سفر سبز، موثر واقع شود. از این رو، انجام تحقیقاتی در خصوص ارائه ابزارهایی برای کشف و بارزسازی نقاط ضعف زیرساخت‌های پیاده‌روی، ضروری به نظر می‌رسد. در راستای نیل به این هدف، شناسایی و معرفی شاخص‌های مکانی و و بهره‌گیری از روش‌های ارزیابی جهت سنجش تناسب پیاده‌راه‌ها یکی از راهکارهای کارآمد است [۱].

بر اساس نتایج تحقیقات پیشین، یکی از رویکردهای کارآمد برای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی، بهره‌گیری از روش‌های تحلیل چند معیاره مکانی است [۳ و ۴]. این روش‌ها امکان بررسی جامع و چندبعدی از قابلیت پیاده‌روی را فراهم می‌کنند و به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کنند تا بهبودهای لازم را شناسایی کنند.

تحقیقات قبلی در زمینه قابلیت پیاده‌روی عمدتاً بر شاخص‌های زیرساختی پیاده‌راه مانند دسترسی و اتصال متمرکز شده‌اند. این شاخص‌ها، اگرچه مهم هستند، اما نمی‌توانند تمامی ابعاد مهم تجربه پیاده‌روی را پوشش دهند. بسیاری از مطالعات گذشته نتوانسته‌اند به طور جامع و کامل تمام عوامل تاثیرگذار بر قابلیت پیاده‌روی را مورد بررسی قرار دهند [۵]. همچنین عدم دسترسی به داده‌های زیرساخت پیاده‌راه‌ها از چالش‌های مهم مطالعات بررسی شاخص قابلیت پیاده‌روی است. تعدادی از مطالعات به دلیل کمبود داده‌های دقیق و کامل از زیرساخت‌های پیاده‌روی، از داده‌های جایگزین مانند شبکه‌های معابر استفاده کرده‌اند [۵ و ۶]. این روش‌ها معمولاً منجر به کاهش دقت تحلیل‌ها می‌شوند، چرا که شبکه‌های معابر نمی‌توانند به طور کامل نمایانگر شبکه پیاده‌راه باشند. همچنین، بررسی حساسیت مدل به رویکردهای مختلف وزن‌دهی وتلفیق معیارها نیز غالباً مغفول مانده‌اند.

بنابراین با وجود مطالعات صورت گرفته، همچنان شکاف‌های مهمی در دانش فعلی وجود دارد که نیازمند بررسی‌های بیشتر است. این پژوهش با هدف برطرف کردن این شکاف‌ها و ارائه راهکارهای بهبود قابلیت پیاده‌روی در مناطق شهری انجام شده است. سوال اصلی پژوهش این است که چگونه می‌توان با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی و داده‌های مناسب، شاخص‌های مؤثر را از میان شاخص‌های موجود شناسایی و از آن‌ها برای ارزیابی پتانسیل پیاده‌روی در مناطق مختلف شهری بهره‌برداری کرد.

مدل پیشنهادی این پژوهش، روشی مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی (مبتنی بر *GIS*) را برای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی در مناطق شهری ارائه می‌کند. در این مطالعه تلاش شده است تا مجموعه‌ای متنوع از شاخص‌های تاثیرگذار بر ارزیابی قابلیت پیاده‌روی در مناطق شهری، به طور جامع و از ابعاد مختلف بررسی شده و شاخص‌های موثر، در چهارچوب فرآیندی نظام‌مند، شناسایی، وزن‌دهی و با روش‌های مختلف تلفیق شوند. با اتکا به این مجموعه شاخص متنوع و جامع، امکان بهره‌گیری از این شاخص در ارزیابی میزان همبستگی پیاده‌روی با دیگر پدیده‌های مکانمند فراهم می‌شود (که میتواند موضوع تحقیقات آتی باشد). ضمن اینکه میزان انطباق شاخص‌ها با شاخص‌های شناخته‌شده ارزیابی خواهد شد تا امکان مقایسه این شاخص با شاخص‌های شناخته شده و معتبر فراهم شود. شهر نیویورک، با شبکه گسترده خیابان‌ها و سیستم حمل‌ونقل پیشرفته، نمونه‌ای برجسته برای مطالعه و ارزیابی قابلیت پیاده‌روی در زندگی شهری به شمار می‌رود و در این پژوهش به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

در این پژوهش، ابتدا در بخش پیشینه تحقیق به بررسی ادبیات موجود در زمینه قابلیت پیاده‌روی پرداخته می‌شود. سپس منطقه مطالعاتی معرفی می‌گردد. در ادامه، در بخش ارائه و پیاده‌سازی روش پیشنهادی، روش‌شناسی تحقیق
شرح داده می‌شود و در بخش بعد، نتایج به دست آمده از تحلیل‌های مختلف تشریح می‌شود. در نهایت، در بخش بحث و نتیجه‌گیری، خلاصه نتایج این مطالعه و پیشنهاداتی برای بهبود مطالعات قابلیت پیاده‌روی و برنامه‌ریزی شهری ارائه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

ارزیابی قابلیت پیاده‌روی مناطق شهری، به عنوان یک عامل تاثیرگذار درطراحی شهری، یک مسئله چند بعدی مکانی است. یکی از روش‌های مواجهه با اینگونه مسائل بهره‌گیری از تحلیل‌های چندمعیاره مکانی است [۷ و ۸]. از میان این ابعاد مختلف، معیارهای فیزیکی مرتبط با محیط نقش اساسی ایفا می‌کنند. در مطالعات گوناگون، معیارهای فیزیکی متعددی برای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی مطرح شده است. در نخستین مطالعات، کرورو (۱۹۹۷)، سه معیار تراکم[1] تنوع[2] و طراحی[3] را معرفی کرد که به عنوان «*3Ds*»[4] شناخته می‌شدند [۹]. به مرور زمان، معیارهای بیشتری به فهرست ویژگی‌های محیطی افزوده شد و بسیاری از عوامل مهم دیگر، مرتبط با شکل و فرم شهری، همچنین ویژگی‌های رفتاری و ترجیحات عابران پیاده مورد توجه قرار گرفتند. فیروه[5] و همکاران (۱۹۹۷) پنج معیار اتصال[6]، سهولت[7]، راحتی[8]، وضوح[9] و جذابیت[10] را برای ارزیابی کیفیت شبکه‌های پیاده‌روی معرفی کردند [۱۰]. این معیارها که به عنوان «*5Cs*» شناخته می‌شوند، به عنوان چارچوبی معتبر برای بررسی و بهبود قابلیت پیاده‌روی استفاده می‌شوند.

در مطالعات اخیر، با توجه به پیشرفت فن‌آوری و دسترسی به مجموعه داده‌های بیشتر، تعداد عوامل مؤثر بیشتری برای ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی لحاظ شدند. مطالعات در این زمینه همچنان ادامه دارد و تلاش می‌شود تا با شناسایی و ادغام عوامل جدید، شاخص‌های پیاده‌روی کارآمد توسعه یافته و به تبع آن مدل‌هایی غنی و بهبودیافته ارائه شوند. جدول (۱)، تعدادی از مطالعات سال‌های اخیر را از منظر شاخص‌های مورد استفاده بررسی می‌کند.

تاکنون شاخص‌های پیاده‌روی و مدل‌های متعددی در سراسر جهان پیشنهاد شده‌اند. سامانه واک‌اسکور[11] یکی از ابزارهای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی است که به صورت برخط در دسترس است و میزان سهولت پیاده‌روی در یک موقعیت مشخص را تعیین می‌کند [۱۱]. این سامانه با بهره‌گیری از روشی ویژه، به هر آدرس امتیازی بین ۰ تا ۱۰۰ اختصاص می‌دهد. این امتیاز بر اساس دسترسی پیاده به امکانات مختلف از جمله فروشگاه‌ها و خوراک‌فروشی‌ها، آموزشگاه و دانشگاه‌ها، پارک‌ها و فضاهای سبز، مراکز حمل‌ونقل همگانی و مراکز بهداشتی و درمانی محاسبه می‌شود. این ابزار بر اساس نزدیکی مکان‌ها قابلیت پیاده‌روی را ارزیابی می‌کند، اما به کیفیت مسیرها، وقوع جرم و جنایت، توپوگرافی، الگوی آب‌وهوا و کیفیت پیاده‌راه‌ها توجه نمی‌کند. همچنین، ممکن است تفاوت‌های فرهنگی و منطقه‌ای را در اولویت‌های پیاده‌روی نادیده بگیرد [۱۲ و ۱۳]. علیرغم این محدودیت‌ها، واک‌اسکور ابزاری مفید و پرکاربرد برای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی و بهبود کیفیت زندگی در مناطق شهری در ایالات متحده، کانادا و سایر مناطق جهان است که در

[1] *Density*
[2] *Diversity*
[3] *Design*
[4] *Density, Diversity, Design*
[5] *Tim Pharoah*
[6] *Connected*
[7] *Convenient*
[8] *Comfortable*
[9] *Conspicuous*
[10] *Convivial*
[11] *Walkscore*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴, ۱۵ و ۱۶]. در این پژوهش تلاش شده است تا علاوه بر بررسی دسترسی به امکانات شهری و عوامل مرتبط با جمعیت، معیارهایی نظیر تجهیزات مبلمان شهری، شیب و ایمنی عابران پیاده نیز در محاسبه شاخص قابلیت پیاده‌روی لحاظ شوند.

جدول۱ : شاخص‌های دخیل در ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی در مطالعات اخیر

شاخص‌های موثر بر ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی	مانزولی و همکاران [۴]	فرناندو و همکاران [۱۷]	الشماس و همکاران [۱۸]	یامتراکول و همکاران [۱۹]	ترولز و همکاران [۲۰]
عرض پیاده‌راه	✓	✓			✓
چراغ روشنایی		✓	✓		✓
درختان	✓	✓		✓	
علائم راهنمایی	✓	✓			✓
میانگین شیب	✓	✓			
نسبت بستر پیاده‌راه				✓	
استراحت‌گاه		✓			✓
مساحت نسبی فضای سبز	✓	✓		✓	✓
فراوانی مراکز آموزشی			✓	✓	✓
فراوانی پارکینگ‌ها			✓	✓	✓
دسترسی به بانک			✓	✓	✓
فراوانی مراکز فرهنگی/تفریحی	✓		✓	✓	✓
فراوانی مراکز درمانی			✓	✓	✓
فراوانی مراکز خدماتی	✓		✓	✓	✓
فراوانی مترو	✓			✓	
فراوانی تاکسی				✓	
فراوانی ایستگاه اتوبوس	✓			✓	
سطح اتصال	✓	✓	✓		
چگالی خرده فروشی			✓		
چگالی مسکونی			✓		✓
اختلاط کاربری		✓		✓	
تعداد خطوط معابر					✓
فراوانی تصادفات				✓	
بیشینه سرعت مجاز معابر	✓				

علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر در روش‌های جمع‌آوری داده و تسهیل دسترسی به آن‌ها که امکان در نظر گرفتن معیارها و عوامل مختلف را فراهم کرده است، همچنان برخی شاخص‌ها به دلیل فقدان داده‌های مربوطه مغفول می‌مانند و در برخی مطالعات از داده‌های جایگزین مانند داده‌های معابر به جای

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

داده‌های پیاده‌راه استفاده می‌شود (مانند مطالعه مانزولی و همکاران (۲۰۲۱) که به دلیل فقدان داده شیب در بستر پیاده‌راه از شیب بستر معابر استفاده شده است [۴].)

این مسئله انگیزه‌ای برای انجام مطالعاتی نظیر پژوهش حاضر است تا با بهره‌گیری از داده‌های مناسب، به بررسی جامع‌تر شاخص‌های مختلف در ابعاد گوناگون پرداخته شود. این ابعاد شامل ایمنی، شرایط فیزیکی پیاده‌راه‌ها، فراوانی خدمات شهری، وجود و کیفیت مبلمان شهری و سایر عوامل مؤثر بر قابلیت پیاده‌روی هستند. پژوهش حاضر با لحاظ کردن این ابعاد گسترده، دیدگاهی جامع‌تر از وضعیت پیاده‌روی در مناطق شهری ارائه می‌دهد و امکان تحلیل تعاملات میان این شاخص‌ها را فراهم می‌سازد. این ویژگی، امکان بررسی همبستگی پیاده‌روی با سایر پدیده‌های مکان‌مند نظیر سلامت عمومی، کیفیت محیط‌زیست و رفتارهای اجتماعی را فراهم می‌کند. این در حالی است که شاخص‌های تک‌بعدی، نمی‌توانند چنین چشم‌اندازی را ارائه دهند و محدود به تحلیل‌های ساده‌تر خواهند بود.

از سوی دیگر، این پژوهش تأثیر روش‌های مختلف وزن‌دهی و استراتژی‌های گوناگون تلفیق معیارها در نتایج تحلیل را بررسی کرده است. این مسئله نه‌تنها دقت ارزیابی قابلیت پیاده‌روی را افزایش می‌دهد، بلکه حساسیت مدل‌سازی به تفاوت‌های روش‌شناختی را آشکار می‌سازد. تحلیل حساسیت مدلسازی، که کمتر در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفته، در این پژوهش از طریق طراحی و تحلیل سناریوهای مختلف وزن‌دهی و روش‌های تلفیق اجرا شده است و درک بهتری از تأثیر این استراتژی‌ها فراهم کرده است. این رویکرد، علاوه بر شناسایی نقاط ضعف و قوت واحدهای مکانی در حوزه پیاده‌روی، دیدگاه جامعی از وضعیت فعلی پیاده‌روی ارائه می‌دهد و به تصمیم‌گیران امکان ارائه راهکارهای دقیق‌تر برای بهبود زیرساخت‌ها و ارتقای کیفیت زندگی شهری را می‌دهد.

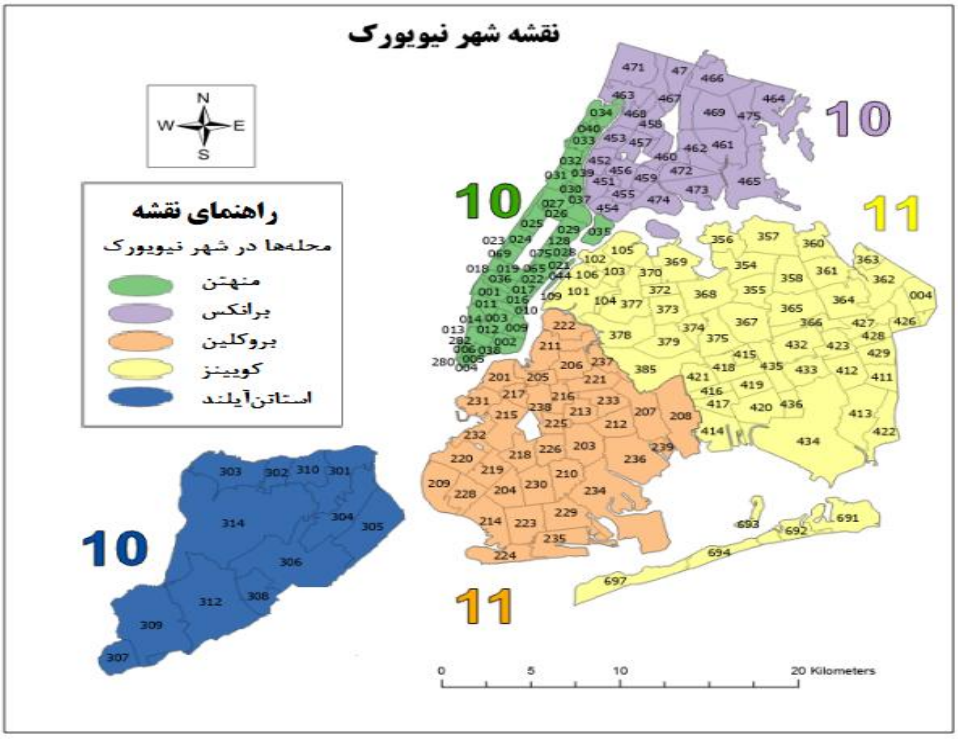
۳- منطقه مطالعاتی

به‌منظور ارزیابی ارتباط شاخص‌های موثر بر ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی، شهر نیویورک، واقع در ایالات متحده آمریکا، مورد بررسی قرار گرفت. شهر نیویورک در شمال شرقی ایالات متحده واقع شده و در جنوب ایالت نیویورک قرار دارد. محدوده مطالعاتی دارای جمعیت حدودی ۷ الی ۸ میلیون نفری در سال ۲۰۲۰ بوده است. این شهر، وسعتی در حدود ۳۰۰ مایل مربع (معادل ۷۷۷ کیلومتر مربع) را شامل می‌شود. با این حال، به دلیل عدم وجود داده‌های مربوطه، این مطالعه بر محدوده کوچک‌تری با وسعت ۲۹۲ مایل مربع از این محدوده تمرکز دارد. واحد مکانی این پژوهش، زیپ‌کد[1] های اصلی شهر نیویورک است. بنابراین ۱۷۷ زیپ‌کد در محدوده موردنظر، فضای مطالعاتی این پژوهش را تشکیل می‌دهند (شکل (۱)). در شکل (۱)، نقشه منطقه مورد مطالعه در شهر نیویورک نمایش داده شده است. هر یک از واحدهای مکانی دارای یک کد منحصربه‌فرد پنج‌رقمی هستند؛ به‌طوری‌که دو رقم ابتدایی (۱۰ یا ۱۱) در کنار نام محله و سه رقم انتهایی در داخل محدوده واحد مکانی مشخص شده‌اند. این شیوه نمایش به‌منظور افزایش خوانایی و سهولت در درک ساختار فضایی نقشه به کار گرفته شده است. همچنین، ۵ محله اصلی شهر نیویورک با استفاده از ۵ رنگ متفاوت از یکدیگر متمایز شده‌اند تا تفکیک مناطق شهری به‌صورت بصری قابل‌تشخیص باشد.

شهر نیویورک، به دلیل قابلیت پیاده‌روی بالا و امکان انجام بسیاری از فعالیت‌ها با پای پیاده، به «بهشت عابران پیاده» مشهور است [۲۱]. این شهر دارای محله‌های پرجمعیت و شبکه خیابان‌های به‌هم‌پیوسته است و همچنین از سیستم حمل‌ونقل عمومی گسترده و کارآمدی برخوردار است که در اکثر مواقع نیاز به استفاده از خودروی شخصی را از بین می‌برد. تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌تواند به درک بهتر تأثیر طراحی شهری بر سلامت عمومی و ارائه راهبردهایی برای افزایش قابلیت پیاده‌روی کمک کند.

[1] *Zip code*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل۱: نقشه منطقه مورد مطالعه واقع در شهر نیویورک

۴-ارائه و پیاده‌سازی روش پیشنهادی تحقیق

مطابق با شکل (۲) که روند کلی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد، در ابتدا و بر اساس مجموعه داده‌های در دسترس، تعداد ۲۴ شاخص، در قالب ۵ معیار اصلی مرتبط با ابعاد مختلف ارزیابی قابلیت پیاده‌روی، انتخاب شده و سپس نقشه‌های معیار[1] متناسب با ماهیت سود یا هزینه‌ای هر شاخص تهیه می‌شوند. سپس، فرآیند وزن‌دهی شاخص‌ها بر اساس سه سناریو مختلف انجام می‌شود. در مرحله بعد، شاخص‌ها با استفاده از دو روش ترکیب خطی وزن‌دار[2] و روش تاپسیس[3] تلفیق می‌شوند. در نهایت، با استفاده از شاخص معتبر واک‌اسکور، میزان تطابق نتایج آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در این پژوهش، داده‌های مربوط به ابعاد مختلف شاخص قابلیت پیاده‌روی، داده‌های مکانی کاربری اراضی شهری، دسترسی به خدمات شهری (مانند فراوانی پارکینگ‌ها، بانک‌ها، مراکز آموزشی، درمانی، خدمات عمومی، فرهنگی و تفریحی)، شبکه معابر شهری شامل پیاده‌راه‌ها (شامل اطلاعات توصیفی عرض و مساحت پیاده‌راه‌ها) و شبکه سواره‌راه‌ها (شامل اطلاعات توصیفی عرض و بیشینه سرعت مجاز سواره‌راه‌ها)، تجهیزات مبلمان شهری (شامل علائم راهنمایی، چراغ روشنایی و استراحتگاه‌ها)، شبکه حمل‌ونقل عمومی (شامل مترو، تاکسی، ایستگاهای اتوبوس)، ایمنی مسیر (نرخ تصادفات) و شرایط فیزیکی مسیر پیاده‌روی (مدل رقمی ارتفاعی و وجود درختان) مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌روزترین داده‌های منتشرشده مربوط به موارد فوق‌الذکر از طریق درگاه‌های معتبر *NYC.gov*، *sidewalkwidths.nyc* و *Open Street Map* تهیه و در این پژوهش به کار گرفته شده است.

[1] *Criteria Map*
[2] *Weighted Linear Combination (WLC)*
[3] *TOPSIS*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

شکل۲: روندنمای مطالعه

۴-۱-ارزیابی چند معیاره

رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی به طور گسترده در مطالعات مربوط به قابلیت‌پیاده‌روی به کار گرفته شده است [۲۲, ۲۳, ۲۴ و ۲۵]. رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره در این مطالعه، از چهار مرحله اصلی تشکیل شده است: (۱) انتخاب و ارزیابی شاخص؛ (۲) وزن‌دهی شاخص‌ها در راستای هدف؛ (۳) تلفیق نقشه‌های معیار و تهیه شاخص قابلیت پیاده‌روی و (۴) ارزیابی عملکرد شاخص قابلیت پیاده‌روی به دست آمده و مقایسه آن با عملکرد شاخص واک اسکور. مراحل انجام شده در این چهار مرحله در زیربخش‌های زیر توضیح داده شده‌اند.

۴-۱-۱-انتخاب و ارزیابی شاخص‌ها

با توجه به مطالعه جامع ادبیات پژوهش و داده‌های در دسترس، ۲۴ شاخص در این مطالعه انتخاب شده است تا قابلیت پیاده‌روی در ۱۷۷ کد پستی اصلی نیویورک ارزیابی شود. در این مطالعه، با توجه به ماهیت این شاخص‌ها، ۵ بُعد ارزیابی (معیار اصلی) تعریف شدند: دسترسی، کاربری، سطح اتصال معابر، امکانات پیاده‌راه و ایمنی. معیارهای فوق‌الذکر منجر به ایجاد یک شبکه پیاده‌روی راحت، متصل، ایمن و جذاب می‌شوند.

در فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره، شاخص‌ها به دو دسته شاخص‌های با اثر مستقیم (مثبت) و شاخص‌های با اثر معکوس (منفی) تقسیم شده و سپس تمامی نقشه‌های معیار استانداردسازی می‌شوند. معیارهای مثبت به بازه ۰ تا ۱ و معیارهای منفی به بازه ۱ تا ۰ نگاشت می‌شوند. شایان ذکر است که شاخص‌های این بخش، به استثنای شاخص‌های شیب، تعداد خطوط معابر، بیشینه سرعت مجاز معابر و تصادفات، به عنوان شاخص‌های مثبت لحاظ شده‌اند. معیارهای مورد توجه در این پژوهش به شرح زیر هستند:

۱) فراوانی وسایل حمل‌ونقل عمومی: فاصله‌های کوتاه به ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، شهروندان را تشویق می‌کند تا به جای استفاده از خودروهای شخصی، پیاده‌روی کنند و سفرهای شهری خود را با ترکیب پیاده‌روی و وسایل حمل‌ونقل عمومی به انجام برسانند [۲۶ و ۲۷]. در این مطالعه، فراوانی مترو، اتوبوس و تاکسی به عنوان رایج‌ترین اشکال حمل‌ونقل عمومی در منطقه مورد مطالعه، هر یک به صورت مجزا، بررسی شده‌اند (جدول (۲)).

برای شاخص فراوانی مترو استفاده از تعداد ایستگاه‌های مترو در هر واحد مکانی و یا تعداد ورودی‌های ایستگاه مترو در هر واحد مکانی، امکان‌پذیر است. هر ایستگاه مترو در نیویورک بین یک تا هشت ورودی دارد. با توجه به منطق طراحی ورودی‌ها و با فرض اینکه ایستگاه‌های مهم و پرتردد در شبکه مترو از تعداد ورودی‌های بیشتری برخوردار هستند، تعداد ورودی هر ایستگاه معیاری بر میزان تردد و مراجعه مسافران به آن لحاظ شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

۲) فراوانی پارکینگ خودرو: فراهم بودن پارکینگ‌های خودرو در هر واحد مکانی، افراد را ترغیب می‌کند که سفرهای شهری خود را با ترکیب پیاده‌روی و خودروهای شخصی تکمیل کنند [۲۸]. تعداد پارکینگ‌ها در هر واحد مکانی جهت ارزیابی این معیار مورداستفاده قرار گرفته است.

۳) فراوانی امکانات شهری: فراوانی امکانات شهری از آن جهت حائز اهمیت است که شهروندان برای نیازهای روزانه به این مراکز مراجعه می‌کنند. وجود تعداد مناسبی از این امکانات در هر واحد مکانی، احتمال استفاده از سفرهای فعال را افزایش داده و نقش مهمی در بهبود دسترسی شهری دارد [۲۹].

۴) اختلاط کاربری[1]: تنوع کاربری زمین با کاهش فاصله سفرها، پیاده‌روی را تسهیل می‌کند. اختلاط کاربری‌های مسکونی، تجاری و خدمات عمومی که به وسیله شاخص آنتروپی سنجیده می‌شود، می‌تواند منجر به افزایش رضایت ساکنان و ارتقای پیاده‌روی در محیط‌های شهری گردد [۳۰]. کاهش این سنجه به عنوان کاهش تنوع کاربری و افزایش آن به عنوان تنوع کاربری در محدوده مورد بررسی و افزایش مطلوبیت تفسیر می‌شود (رابطه (۱)). P^j به عنوان مساحت نسبی کاربری j در واحد مکانی مورد بررسی و k تعداد کاربری‌های موجود در واحد مکانی است. کاربری‌ها در شش دسته: مراکز فرهنگی و تفریحی، اداری و خدمات عمومی، مسکونی، خرده‌فروشی‌ها، فضای سبز و هم‌چنین سایر کاربری‌ها قرار گرفته‌اند.

$$Entropy = -\left(\sum_{j=1}^{k} P^j \ln P^j\right) \Big/ \ln k \qquad \text{رابطه(۱)}$$

۵) چگالی مسکونی[2]: مناطق با چگالی سکونت بالا معمولاً فعالیت‌های پیاده‌روی بیشتری دارند [۳۱].

در این پژوهش، با توجه به ساختار معماری بلندمرتبه‌سازی در منطقه مورد مطالعه، از شاخص تراکم جمعیت به منظور ارزیابی چگالی مسکونی بهره گرفته شده است و نسبت جمعیت هر واحد مکانی بر مساحت آن (برحسب کیلومترمربع) به عنوان شاخصی برای سنجش این معیار استفاده شده است.

۶) چگالی خرده‌فروشی[3]: مناطق با چگالی خرده‌فروشی بالا برای عابران پیاده جذاب‌تر هستند چراکه نیازهای روزانه مختلف را مرتفع می‌کنند [۳۲]. این ویژگی از طریق نسبت مساحت کاربری خرده فروشی بر مساحت واحد مکانی مربوطه ارزیابی شده است.

۷) سطح اتصال معابر[4]: ارتباط معابر نقش حیاتی در ارزیابی قابلیت پیاده‌روی در محیط‌های شهری دارد. شبکه‌های معابری که به‌خوبی یکدیگر متصل هستند به‌طور قابل توجهی دسترسی عابران پیاده را بهبود می‌بخشند [۳۳ و ۳۴]. که به تبع آن، مسافت‌های پیاده‌روی به مقاصد کاهش می‌یابد. به بیان ساده، درجه بالایی از اتصال به این معنی است که انتخاب‌های بیشتری برای مسیریابی در محدوده موردنظر (چه به عنوان مبدا و چه به عنوان مقصد) وجود دارد. در مطالعات مرتبط، از شاخص‌هایی مانند تراکم تقاطع[5] در واحد مکانی برای ارزیابی سطح اتصال استفاده شده است [۳۵ و ۳۶]. باید توجه داشت که ارتباط با راه‌های شریانی در راستای بررسی تناسب محیطی برای عابران پیاده، مناسب نیست. چرا که تردد از این معابر انتخاب غالب عابران پیاده (چه به عنوان سفرفعال و چه به عنوان پیاده‌روی تفریحی) نخواهد بود. ضمن اینکه از لحاظ ایمنی نیز توجیه‌پذیر نیست. بنابراین به

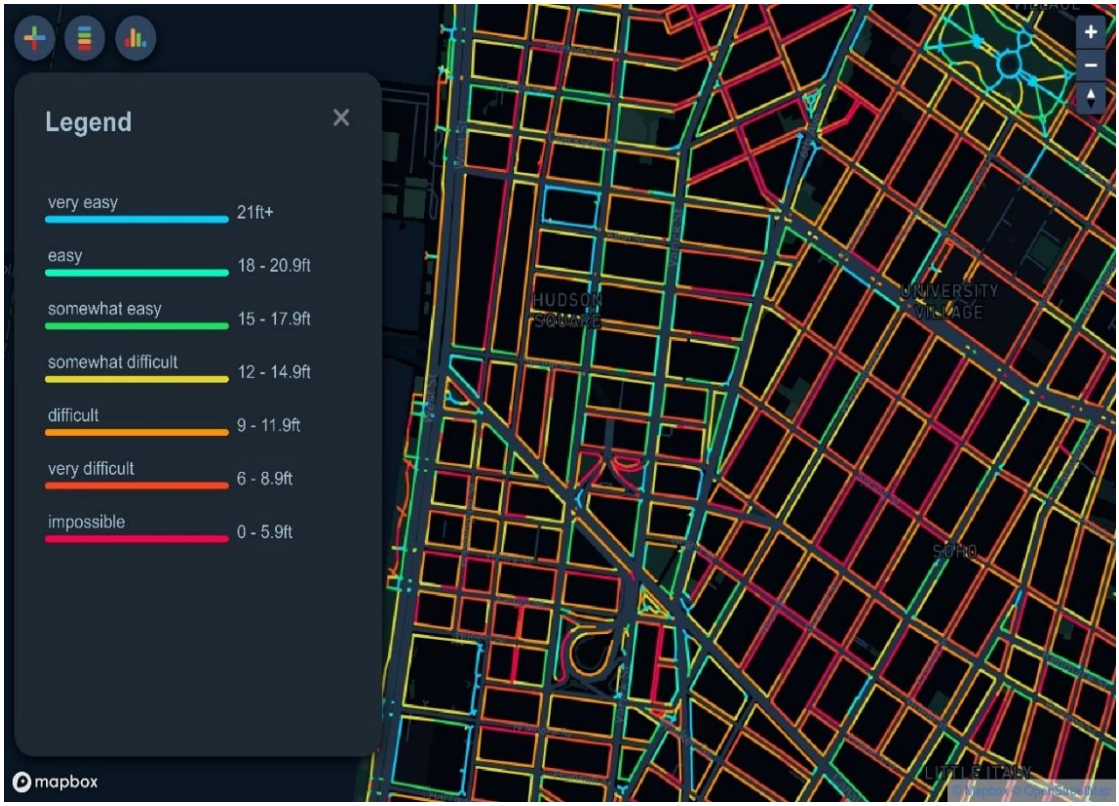
[1] *Land use Mix*
[2] *Residential Density*
[3] *Retail Density*
[4] *Street connectivity*
[5] *Intersection Density*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

منظور محاسبه سطح دسترسی معابر برای عابران پیاده، آزادراه‌ها و بزرگراه‌ها (بیشینه سرعت مجاز ۵۵ و ۶۵ مایل بر ساعت) از شبکه معابر حذف و مابقی مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، به کمک تحلیل‌های شبکه‌ای، تعداد تقاطع‌های با درجه اتصال بیش از سه، مورد استفاده قرار گرفت و نسبت مجموع درجات تقاطع‌ها به تعداد تقاطع‌ها (سرانه تقاطع) در هر واحدمکانی، به عنوان شاخصی برای سنجش این معیار استفاده شده است.

۸) عرض پیاده‌راه: عرض پیاده‌راه، عامل مهمی در ارتقای قابلیت پیاده‌روی و کیفیت زندگی شهری است. عرض مناسب پیاده‌راه‌ها جریان حرکت عابرین را تسهیل کرده و تجربه کلی پیاده‌روی را با حفظ حریم خصوصی و فراهم کردن فضای استراحت بهبود می‌بخشد [۳۷]. پیاده‌راه‌های با عرض حداقل ۱/۵ متر، علاوه بر تسهیل حرکت و ایجاد فضای استراحت، امکان عبور دو نفر در کنار هم را فراهم کرده و نیازهای افراد معلول را برآورده می‌کنند [۳۸]. علاوه بر این، پیاده‌راه‌ها با ایجاد فضایی برای فعالیت‌های تجاری، فضاهای سبز و تجهیزات مبلمان شهری، به سرزندگی و جذابیت محیط شهری کمک می‌کنند و همچنین از حمل‌ونقل چندوجهی مانند دوچرخه‌ها و اسکوترهای الکتریکی نیز پشتیبانی می‌کنند. در این مطالعه میانگین وزن‌دار عرض پیاده‌راه‌ها به عنوان شاخص ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته است (رابطه (۲)) (شکل (۳)). در این رابطه، l_i طول قطعه پیاده‌راه i، w_i عرض قطعه پیاده‌راه i و k تعداد قطعات پیاده‌راه در واحد مکانی و M میانگین وزن‌دار عرض پیاده‌راه است.

رابطه(۲)
$$M = \frac{\sum_{i=1}^{k}(w_i . l_i)}{\sum_{i=1}^{k} l_i}$$



شکل۳: نمایی از عرض پیاده‌راه‌ها در منطقه مورد مطالعه [۳۹]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

۹) فراوانی درختان: درختان با ایجاد سایه، افزایش آسایش حرارتی، بهبود کیفیت هوا و کاهش آلودگی صوتی، محیطی سالم‌تر و آرام‌تر برای پیاده‌روی فراهم می‌کنند [۴۰]. درختان با زیباسازی فضا، لذت پیاده‌روی را افزایش داده و با ایجاد مرز طبیعی و زیستگاه، خطر تصادفات را کاهش و تنوع زیستی را حفظ می‌کنند [۴۱]. در این مطالعه تعداد درختان در هر واحد مکانی برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته است.

۱۰) شیب: شیب پیاده‌راه بر سرعت و تلاش عابران تأثیر دارد و نقشی مهم در ارزیابی قابلیت پیاده‌روی ایفا می‌کند [۴۲]. در این مطالعه، میانگین شیب پیاده‌راه در هر واحد مکانی با استفاده از مدل رقمی زمین با دقت ۳۰ سانتی‌متر به‌عنوان شاخص سنجش به‌کار گرفته شده است.

۱۱) مبلمان شهری: وجود تجهیزات مبلمان شهری، شامل نیمکت‌ها، چراغ‌های خیابانی، سطل‌های زباله و علائم راهنمایی، نقش قابل‌توجهی در راحتی، جذابیت و امنیت محیط‌های پیاده‌روی ایفا می‌کند [۴۳]. در این پژوهش، سه نوع از مبلمان شهری بر اساس داده‌های موجود ارزیابی شده است.

۱۲) «نسبت بستر پیاده‌راه به بستر سواره‌راه»[1]: یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی تناسب محیط شهری برای عابران پیاده است. نسبت بالاتر مساحت پیاده‌راه به مساحت سواره‌راه می‌تواند تاثیر قابل‌توجهی بر افزایش ایمنی، راحتی و جذابیت مسیرهای پیاده‌روی داشته باشد [۴۴].

۱۳) مساحت فضای سبز: افزایش فضای سبز در شهرها، شامل پوشش گیاهی و مجاورت با فضاهای سبز، محیط‌های دلپذیرتری برای پیاده‌روی ایجاد کرده و باعث کاهش دما و بهبود کیفیت هوا می‌شود. این عوامل تمایل به پیاده‌روی را افزایش می‌دهند [۴۵]. در این پژوهش، نسبت مساحت فضای سبز به واحد مکانی به‌عنوان شاخصی جامع برای ارزیابی این ویژگی استفاده شده است. این شاخص شامل ترکیبی از فضای سبز عمومی (مانند پارک‌ها، بوستان‌ها و باغ‌های عمومی) و فضای سبز خیابانی (مانند حاشیه خیابان‌ها، بلوارها و فضاهای سبز کنار معابر) است و با هدف ارائه تصویری کامل‌تر از توزیع و دسترسی به فضای سبز شهری تعریف شده است. هر دو نوع فضای سبز نقش مهمی در بهبود کیفیت محیط پیاده‌روی، کاهش آلودگی هوا، افزایش سایه طبیعی و ارتقای سلامت جسمی و روانی عابران ایفا می‌کنند.

۱۴) فراوانی تصادفات: کاهش تصادفات به عنوان معیاری برای افزایش ایمنی و اعتماد به محیط، تمایل به پیاده‌روی را افزایش می‌دهد [۵]. این معیار با نسبت تعداد تصادفات در یک بازه زمانی مشخص به جمعیت هر واحد مکانی ارزیابی شده است.

۱۵) بیشینه سرعت مجاز معابر: سرعت بالای خودروها به شدت خطر مصدومیت و مرگ برای عابران پیاده را افزایش می‌دهد [۴۶ و ۴۷] و به همین دلیل عابران پیاده ترجیح می‌دهند که در خیابان‌های آرام با سرعت ترافیک پایین تردد داشته باشند [۴۸]. این ویژگی با در نظر گرفتن میانگین وزن‌دار بیشینه سرعت مجاز در هر واحد مکانی ارزیابی شده است (رابطه (۳)). در رابطه (۳)، l_i طول قطعه مسیر i ، s_i بیشینه سرعت مجاز در مسیر i و k تعداد قطعات مسیر در محدوده مورد مطالعه است.

رابطه(۳) $$M = \frac{\sum_{i=1}^{k}(s_i . l_i)}{\sum_{i=1}^{k} l_i}$$

۱۶) تعداد خطوط معابر: ویژگی‌های محیط ساخته شده، از جمله تعداد خطوط سواره‌راه‌ها، بر ادراک عابران پیاده از قابلیت پیاده‌روی تأثیر می‌گذارد. معابر عریض‌تر و تعداد خطوط بیشتر برای عبور وسایل نقلیه موتوری طراحی شده‌اند و برای نیازهای عابران ایمن نیستند [۴۹]. این ویژگی با

[1] *Sidewalk Roadbed Ratio*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

در نظـر گـرفتن میـانگین وزن‌دار بیشـینه تعـداد خطـوط در هـر واحـد مکـانی ارزیـابی شـده اسـت (رابطه(۴)). در رابطه (۴)، l_i طول قطعه معبر i، n_i تعداد خطوط معبر i و k تعـداد قطعـات معـابر در محدوده مورد مطالعه است. عرض هر خـط عبـوری در نیویورک به طور استاندارد ۱۲ فوت اعـلام شـده است.

رابطه(۴) $$M = \frac{\sum_{i=1}^{k}(n_i . l_i)}{\sum_{i=1}^{k} l_i}$$

در ادامه، جدول (۲) لیسـت معیارهـای نهـایی منتخـب جهت ارزیابی قابلیت پیاده‌روی و شکل (۴)، نقشه معیار تولید شده برای هر یـک از معیارهـا را ارائـه مـی‌دهـد.

جدول۲: ابعاد و شاخص‌های موثر بر ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی و شاخص مورد ارزیابی

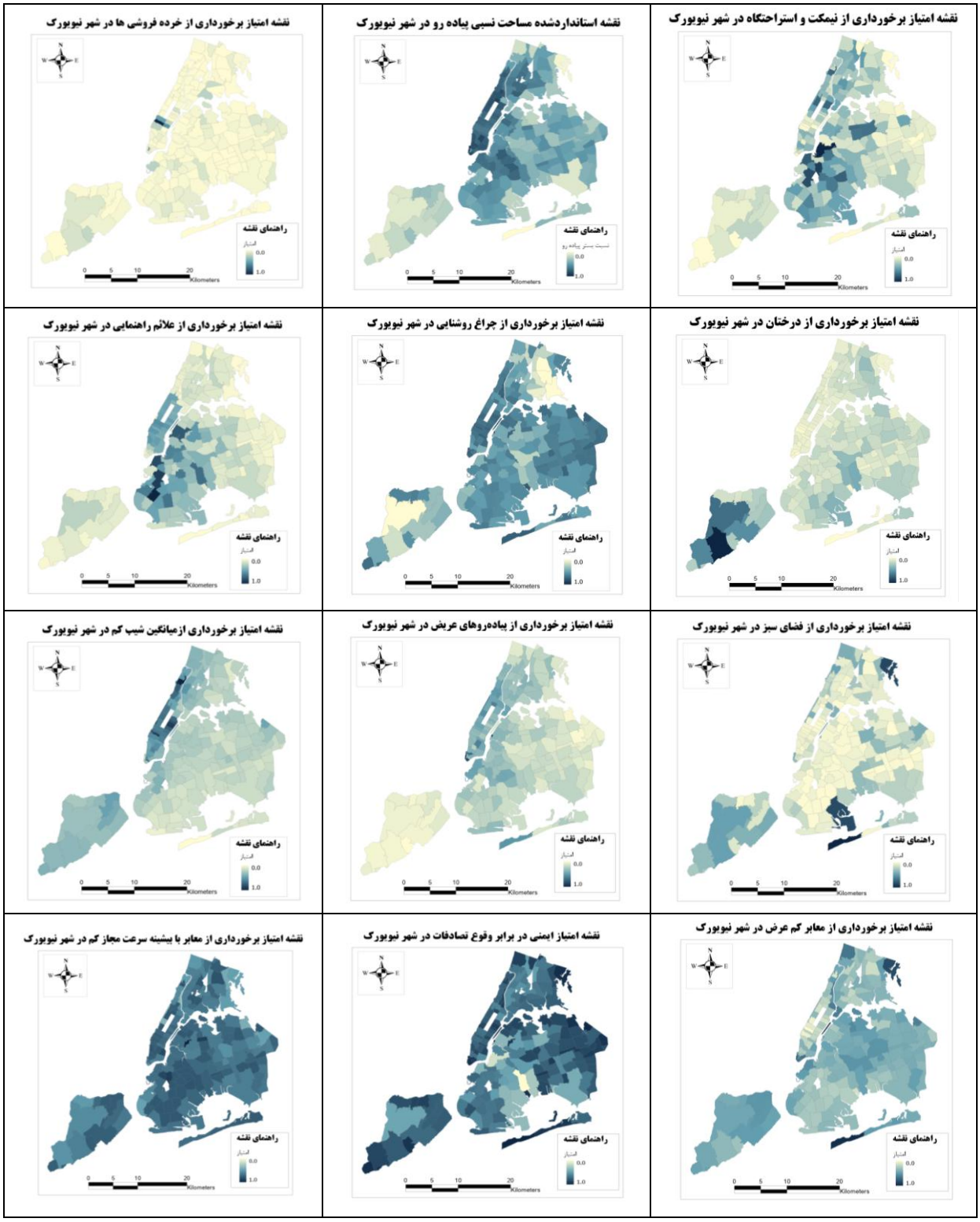
ردیف	معیار اصلی	زیر معیار	نوع زیرمعیار (+/−)	شاخص مورد ارزیابی
۱	دسترسی	فراوانی مراکز آموزشی	+	تعداد مراکز آموزشی در هر واحدمکانی
		فراوانی مراکز درمانی	+	تعداد مراکز درمانی در هر واحدمکانی
		فراوانی مراکز فرهنگی و تفریحی	+	تعداد مراکز فرهنگی و تفریحی در هر واحدمکانی
		فراوانی مراکز خدماتی عمومی	+	تعداد مراکز خدماتی عمومی در هر واحدمکانی
		فراوانی بانک و مؤسسات مالی	+	تعداد بانک‌ها در هر واحدمکانی
		فراوانی پارکینگ خودرو	+	تعداد پارکینگ خودرو در هر واحدمکانی
		فراوانی مترو	+	تعداد ورودی‌های مترو در هر واحدمکانی
		فراوانی تاکسی	+	تعداد سفرهای انجام شده با تاکسی در هر واحدمکانی
		فراوانی ایستگاه اتوبوس	+	تعداد ایستگاه‌های اتوبوس در هر واحدمکانی
۲	امکانات پیاده‌راه	نسبت بستر پیاده‌راه به بستر سواره‌راه	+	نسبت مساحت سطح پیاده‌راه بر سواره‌راه در هر واحدمکانی
		استراحتگاه	+	تعداد نیمکت و استراحت‌گاه در هر واحدمکانی
		تابلوها و علائم راهنمایی	+	تعداد تابلوها و چراغ‌های راهنمایی و رانندگی در هر واحدمکانی
		چراغ روشنایی	+	تعداد چراغ‌های روشنایی در هر واحد مکانی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

ردیف	معیار اصلی	زیر معیار	نوع زیرمعیار (+/-)	شاخص مورد ارزیابی
		درختان	+	تعداد درختان در هر واحد مکانی
		شیب	-	میانگین شیب بستر پیاده‌راه در هر واحد مکانی
		عرض پیاده‌راه	+	میانگین وزن‌دار عرض پیاده‌راه در هر واحد مکانی(استفاده از طول قطعه پیاده‌راه به عنوان وزن)
		مساحت نسبی فضای سبز	+	نسبت مساحت فضای سبز به مساحت واحد مکانی
۳	کاربری	اختلاط کاربری	+	شاخص آنتروپی در هر واحد مکانی:
		چگالی مسکونی	+	تراکم جمعیت (نسبت جمعیت هر واحدمکانی بر مساحت آن (برحسب کیلومترمربع))
		چگالی خرده‌فروشی	+	نسبت مساحت کاربری خرده‌فروشی بر مساحت واحد مکانی
۴	سطح اتصال	تراکم تقاطع	+	نسبت مجموع درجات تقاطع‌ها به تعداد تقاطع‌ها در هر واحد مکانی (پس از حذف: • معابر آزادراهی و بزرگراهی • تقاطع‌های با سطح اتصال ۱و ۲)
۵	ایمنی	تعداد خطوط سواره‌رو	-	میانگین وزن‌دار تعداد خطوط معابر در هر واحد مکانی (استفاده از طول قطعه مسیر به عنوان وزن)
		بیشینه سرعت مجاز سواره‌راه	-	میانگین وزن‌دار بیشینه سرعت مجاز معابر در هر واحد مکانی (استفاده از طول قطعه مسیر به عنوان وزن)
		سرانه تصادفات	-	نسبت تعداد تصادفات وقوع‌یافته بر جمعیت در هر واحد مکانی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل۴: نقشه‌های معیارهای موثر بر شاخص قابلیت پیاده‌روی با طیف رنگی کرم تا سرمه‌ای (۰ = کمترین امتیاز، ۱ = بیشترین امتیاز)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

۴-۱-۲-وزن‌دهی به معیارها

وزن‌دهی گامی تعیین‌کننده از تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره است که همواره با عدم قطعیت مواجه است [۵۰]. عدم قطعیتی که می‌تواند ناشی از تفاوت در ذهنیت و ترجیحات تصمیم‌گیرندگان و یا پیچیدگی سیستم‌های مکانی باشد. برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی مانند تحلیل حساسیت و سناریوپردازی برای بررسی تأثیر تغییرات وزن‌ها بهره برد [۵۱]. سناریوپردازی در روش‌های وزن‌دهی شاخص‌ها، به‌عنوان ابزاری برای تحلیل حساسیت مدل تصمیم‌گیری به تغییرات وزندهی، این امکان را فراهم می‌کند که تصمیم‌گیرندگان تأثیر روش‌های مختلف وزندهی و تغییرات وزن معیارها را بر نتایج نهایی به‌دقت ارزیابی کنند. این فرآیند به مدیریت عدم قطعیت‌ها کمک می‌کند و اطمینان بیشتری به تصمیم‌گیرندگان می‌دهد که وزن‌های انتخاب شده مناسب و معتبر هستند [۵۲]. نتیجه این رویکرد در موضوع این پژوهش می‌تواند با کاهش تاثیر مدل تصمیم‌گیری، امکان اتخاذ استراتژی‌های بهینه برای بهبود قابلیت پیاده‌روی در مناطق شهری را فراهم آورد [۵۳]. از این رو، در این پژوهش، پس از پیش‌پردازش داده‌ها و تهیه نقشه‌های معیار، سناریوهای وزن‌دهی مختلف با هدف ارزیابی حساسیت مدل به فنون مختلف تعیین وزن معیارها، پیاده‌سازی شده است.

در این پژوهش که به بررسی شاخص قابلیت پیاده‌روی پرداخته، تعدد معیارها تحلیل و تصمیم‌گیری را پیچیده می‌کند و می‌تواند منجر به کاهش کارایی مدل شود. به همین دلیل، استفاده از روش‌های کاهش ابعاد مثل تحلیل مؤلفه‌های اصلی[1] ضروری است، زیرا با کاهش ابعاد داده‌ها و حذف معیارهای غیرضروری، معیارهای اصلی و تأثیرگذار را بدون از دست دادن اطلاعات مهم حفظ کرده و پیچیدگی تحلیل را کاهش می‌دهد.

این روش به‌ویژه در مطالعات چندمعیاره مانند ارزیابی قابلیت پیاده‌روی مفید است؛ زیرا می‌تواند واریانس اصلی داده‌ها را در نظر گرفته و معیارهای مختلف را به شکلی ساده‌تر و قابل مدیریت‌تر تبدیل کند. با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، علاوه بر حفظ اطلاعات اساسی، همبستگی بین متغیرها کاهش می‌یابد، که این امر به افزایش کارایی و دقت مدل‌های تصمیم‌گیری کمک می‌کند.

در تحلیل مؤلفه‌های اصلی، وزن متغیرها با محاسبه بردارهای ویژه ماتریس کواریانس داده‌ها تعیین می‌شود. این بردارها جهت‌های اصلی یا مؤلفه‌هایی هستند که بیشترین واریانس داده‌ها را پوشش می‌دهند. هرچه مقدار یک متغیر در این بردارهای ویژه منتخب بیشتر باشد، وزن آن متغیر بالاتر خواهد بود. وزن نهایی هر متغیر از مجموع مقادیر مطلق آن در بردارهای ویژه منتخب محاسبه می‌شود، به طوری که متغیرهای با وزن کمتر نشان‌دهنده تأثیر کمتر در تحلیل و قابل حذف‌اند.

- در سناریوی اول، برای تمامی شاخص‌ها وزن یکسان در نظر گرفته شده است.
- در سناریوی دوم، ابتدا با بهره‌گیری از روش «تحلیل مؤلفه‌های اصلی» وزن هر یک از شاخص‌ها استخراج شده است. سپس، شاخص‌هایی که وزن کمتری از ۰/۰۲ داشته‌اند، حذف شده‌اند و تحلیل مؤلفه‌های اصلی مجدداً اعمال شده است تا وزن‌دهی معیارها دقیق‌تر شود [۵۴]. طی این فرآیند، معیارهای درختان، علائم راهنمایی، چراغ روشنایی، عرض پیاده‌راه، فراوانی مترو، تاکسی و اتوبوس، و تعداد خطوط معابر به دلیل وزن کمتر از ۰/۰۲ کنار گذاشته شده‌اند. این سناریو با هدف بهینه‌سازی معیارهای پراثر و حذف معیارهای کم‌اهمیت طراحی شده است تا شاخص‌ها به شکل بهتری بازنمایی شوند و تأثیر معیارهای اصلی بر پیاده‌پذیری افزایش یافته است.
- در سناریوی سوم، تحلیل مؤلفه‌های اصلی تنها در سطح ابعاد ارزیابی (معیارهای اصلی) محاسبه شده

[1] *Principal Component Analysis (PCA)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

است و وزن زیرمعیارهای مربوط به هر بُعد یکسان در نظر گرفته شده است.

دلیل تعریف سناریوهای سه‌گانه در این پژوهش، فراهم کردن زمینه‌ای برای بررسی تأثیر روش‌های مختلف وزن‌دهی بر نتایج نهایی شاخص پیاده‌روی بوده است. سناریوی اول با تخصیص وزن‌های برابر به تمامی معیارها به عنوان نقطه مرجع و پایه بی‌طرفانه طراحی شده است تا اثرات سایر روش‌های وزن‌دهی به وضوح قابل تحلیل باشد. سناریوی دوم از روش تحلیل مؤلفه اصلی برای تعیین وزن معیارها استفاده می‌کند، به‌گونه‌ای که وزن‌ها براساس سهم واریانس هر معیار در داده‌ها تعیین شوند و از قضاوت‌های ذهنی اجتناب شود. این روش علمی داده‌محور، معیارهای کلیدی را برجسته کرده و پیچیدگی مدل را کاهش می‌دهد. در سناریوی سوم، ترکیبی از دو رویکرد به‌کار گرفته شده است: ابتدا زیرمعیارها وزن‌های مساوی دریافت می‌کنند تا تأثیر تمامی زیرمعیارها به‌طور متوازن لحاظ شود و سپس وزن‌دهی معیارهای اصلی با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی انجام می‌شود. این رویکرد ترکیبی توازن بین زیرمعیارها و معیارهای اصلی را تأمین کرده و از مزایای هر دو روش بهره‌مند می‌شود. در مجموع، این سه سناریو با هدف ارائه رویکردهای متنوع وزن‌دهی و مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها طراحی شده‌اند تا تحلیل حساسیت مدل به وزن‌دهی‌های مختلف ممکن شود و بهترین روش شناسایی گردد.

۴-۱-۳- تلفیق معیارها

به منظور تلفیق شاخصهای منتخب از دو روش تلفیق ترکیب خطی وزن‌دار و تاپسیس بهره گرفته شده است. ابتدا شاخص‌های قابلیت پیاده‌روی با ترکیب وزن‌های حاصل از سناریوهای سه‌گانه به روش ترکیب خطی وزن‌دار ترکیب شدند و نتیجه‌ی این فرآیند، تولید سه نقشه‌ی قابلیت پیاده‌روی با امتیاز ۰ تا ۱ بود که بر اساس معیارهای مختلف ارزیابی شده‌اند. با هدف بررسی تأثیر روش‌های مختلف تلفیق بر شاخص قابلیت پیاده‌روی، سناریوی سوم یک‌بار نیز با استفاده از روش تاپسیس تلفیق و ارزیابی شد. سپس نتایج حاصل از این روش با نتایج روش ترکیب خطی وزن‌دار مقایسه گردید. این مقایسه به منظور شناسایی تفاوت‌ها و مشابهت‌های موجود بین این دو روش در ارزیابی و وزن‌دهی شاخص‌های مؤثر بر قابلیت پیاده‌روی انجام گرفت تا روش بهینه و تأثیرگذارتر برای تحلیل نهایی انتخاب شود (شکل (۵)).

روش ترکیب خطی وزن‌دار با ترکیب خطی وزنی، معیارها را به‌صورت ساده و بدون توجه به حالت‌های ایده‌آل مثبت و منفی ترکیب می‌کند، در حالی که روش تاپسیس بر نزدیکی به ایده‌آل مثبت و دوری از ایده‌آل منفی تأکید دارد. ضمن اینکه شاخص‌های با وزن بیشتر اثر بیشتری در محاسبه فاصله‌ها دارند و همچنین به مقادیر مرزی یا نزدیکی به مقادیر حدی حساس‌تر است. این تفاوت در رویکرد، تاپسیس را برای شناسایی نقاط با عملکرد متفاوت مناسب‌تر می‌سازد، در حالی که ترکیب خطی وزن‌دار نتایج یکنواخت‌تری ارائه می‌دهد. تحلیل این تفاوت‌ها می‌تواند به درک پایداری مدل و تأثیر تغییر روش ترکیب معیارها کمک کند و بینش‌های ارزشمندی درباره حساسیت و پایداری نتایج مدل فراهم آورد.

۴-۱-۴- ارزیابی عملکرد شاخص پیشنهادی

ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی یکی از گام‌های مهم در فرآیند مدلسازی است که به افزایش اطمینان از کفایت دقت و کارایی این شاخص پیشنهادی کمک می‌کند. در مطالعه سبزعلی و آل‌شیخ (۱۳۹۴) در منطقه مطالعاتی شهر قم، ارزیابی عملکرد شاخص، مبتنی بر رویکرد ارزیابی ذهنی[1]، با تکیه بر ادراک، قضاوت تجربه افراد از پیاده‌روی و مقایسه عملکرد شاخص با نظر عابران پیاده انجام گرفته است [۳۳]. این روش علیرغم اینکه می‌تواند به خوبی بیانگر انطباق شاخص پیشنهادی با واقعیت منطقه مورد مطالعه باشد؛ اما اجرای آن در محدوده مطالعاتی این تحقیق (شهر

[1] *Subjective Assessment*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

نیویورک) امکان‌پذیر نبود. لذا در این پژوهش با اتخاذ رویکرد ارزیابی عینی[1] و داده مبنا، عملکرد شاخص پیشنهادی با واک‌اسکور که به عنوان یک شاخص جهانی معتبر برای برآورد سریع میزان پیاده‌محوری در مقیاس شهری شناخته می‌شود، مورد مقایسه قرار گرفته است [۵۴ و ۵۶]. اگرچه این شاخص محدودیت‌های ذاتی خود را دارد و تنها بخش محدودی از ابعاد اصلی قابلیت پیاده‌روی (مانند دسترسی به خدمات اصلی) را می‌سنجد، اما به‌عنوان یک شاخص استاندارد، امکان ارزیابی نسبی را فراهم می‌آورد [۵۷ و ۵۸]. پژوهش‌هایی مانند مطالعه دنگ و همکاران، با وجود ارائه شاخص‌های چندمعیاره پیچیده برای سنجش قابلیت پیاده‌روی، از مقایسه با واک‌اسکور به‌عنوان یک منبع معتبر مرجع غفلت نکرده‌اند و تفاوت‌های مشاهده‌شده را به‌معنای نامعتبر بودن شاخص‌های جدید تلقی نکرده‌اند [۵۴]. این امر نشان می‌دهد که حتی در مطالعاتی با ابزارهای تحلیل پیشرفته، واک‌اسکور همچنان به‌عنوان معیار جهانی پذیرفته‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، مقایسه شاخص پیشنهادی با واک‌اسکور صرفاً در چارچوب یک سنجش کمی و تعیین کارایی نسبی انجام شده و نتایج این بخش از مطالعه باید با لحاظ کردن این محدودیت‌ها تفسیر گردد. بدین ترتیب، این رویکرد نه‌تنها به مدیران شهری و برنامه‌ریزان در تصمیم‌گیری‌های آگاهانه برای بهبود فضاهای پیاده‌محور و پاسخ به نیازهای متنوع شهروندان کمک می‌کند، بلکه امکان مطالعه همبستگی میان پیاده‌روی و پدیده‌های دیگر را نیز فراهم می‌آورد.

برای ارزیابی شاخص پیشنهادی، ۱۹۸ نقطه با پراکندگی مناسب از منطقه مطالعه انتخاب و امتیاز متناظر هر نقطه در واک‌اسکور با شاخص‌های پیاده‌روی ارائه شده مقایسه شد (شکل (۶)). این نقاط بر اساس دو معیار اصلی برگزیده شدند: نخست، از هر واحد مکانی حداقل یک نقطه انتخاب شود تا توزیع متوازن و نمایانگر وضعیت پیاده‌روی در تمامی بخش‌های منطقه مطالعه حاصل شود. این امر به تضمین این موضوع کمک می‌کند که ارزیابی قابلیت پیاده‌روی به‌طور جامع تمام نواحی را دربرگیرد و تنها محدود به بخش‌های خاصی از شهر نشود. دوم، در واحدهای مکانی بزرگ‌تر یا با اهمیت بیشتر، نظیر محله منهتن، تعداد نقاط بیشتری انتخاب شود. این واحدها به دلیل اهمیت ویژه‌شان در ساختار شهری و تأثیر بالایی که بر جریان‌های پیاده‌روی و حمل‌ونقل عمومی دارند، نیازمند بررسی دقیق‌تر و جامع‌تری هستند. در این واحدها، تعداد نقاط بیشتری انتخاب شده تا بتوان ارزیابی کاملی از شرایط پیاده‌روی در این نواحی به‌دست آورد.

برای این مقایسه، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا[2] *(RMSE)* و میانگین قدر مطلق خطا[3] *(MAE)* استفاده شده است. این دو شاخص با اندازه‌گیری تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی، عملکرد مدل را ارزیابی می‌کنند. *MAE* میانگین اختلافات مطلق را محاسبه کرده و به خطاها به طور مساوی وزن می‌دهد و شاخصی ساده و قابل فهم برای میانگین خطاها ارائه می‌کند. از سوی دیگر، *RMSE* به دلیل مربع کردن خطاها، به خطاهای بزرگتر وزن بیشتری می‌دهد و پراکندگی خطاها و تأثیر خطاهای بزرگ را بارزتر می‌کند [۵۹ و ۶۰]. ترکیب این دو معیار امکان ارزیابی جامع‌تری از دقت مدل را فراهم کرده و نقاطی را که در آن‌ها مدل با اختلاف بیشتری مواجه است، به‌خوبی شناسایی می‌کند.

۵- نتایج

در این مطالعه، ۲۴ شاخص تحت ۵ معیار اصلی شامل دسترسی، کاربری، سطح اتصال معابر، امکانات پیاده‌راه و ایمنی مورد بررسی قرار گرفتند. هدف این بررسی

[1] *Objective Assessment*

[2] *Root Mean Square Error*

[3] *Mean Absolute Error*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی در سه سناریوی وزن‌دهی مختلف و دو سناریوی تلفیق شاخص‌ها در شبکه پیاده‌روی نیویورک بوده است. این بخش به تحلیل نتایج به دست آمده از ارزیابی این معیارها و تاثیر آن‌ها بر شاخص کلی قابلیت پیاده‌روی می‌پردازد.

در بخش وزن‌دهی، به‌منظور تحلیل حساسیت مدل نسبت به روش‌های مختلف وزن‌دهی، سه سناریوی وزن‌دهی بر اساس راهبردهای متفاوت اجرا شد (جدول(۳)). پس از وزن‌دهی معیارها و شاخص‌ها مطابق با سناریوهای مختلف، سناریوی سوم وزن‌دهی با استفاده از روش‌های تلفیق ترکیب خطی وزن‌دار و تاپسیس پیاده‌سازی شد. به این ترتیب، منطقه مورد مطالعه از لحاظ پتانسیل پیاده‌روی مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل(۵)).

عملکرد سناریوهای اول و دوم بسیار شبیه به هم بوده است؛ به‌طوری‌که بیشترین اختلاف میان شاخص‌های محاسبه‌شده در این دو سناریو در واحد شماره ۰۴۴-۱۰ واقع در محله منهتن، برابر ۰/۰۷ است که اختلاف قابل‌توجهی به‌شمار نمی‌آید. در ۴۳ واحد مکانی (معادل ۲۴ درصد موارد)، این اختلاف کمتر از ۰/۰۱ مشاهده شده و این نقاط به‌طور پراکنده در سراسر منطقه مطالعه، به‌جز محله استاتن آیلند، توزیع شده‌اند. در محله استاتن آیلند، اختلاف شاخص میان دو سناریو می‌تواند ناشی از امتیاز پایین برخی معیارها مانند فراوانی درختان، علائم راهنمایی، چراغ‌های روشنایی، عرض پیاده‌راه، تعداد خطوط معابر و فراوانی وسایل حمل‌ونقل عمومی باشد. با حذف این معیارها در سناریوی دوم، این نقاط ضعف در محاسبه شاخص قابلیت پیاده‌روی تأثیری نداشته و در نتیجه امتیاز این شاخص در این مناطق افزایش یافته است. در مقایسه، سناریوی اول در ۱۳۱ واحد مکانی، امتیاز کمتری نسبت به سناریوی دوم دارد که بیشتر در محله استاتن آیلند و به‌طور پراکنده در سایر نقاط شهر دیده می‌شود. ۴۶ واحد مکانی باقی‌مانده عمدتاً در محله کوییز و جنوب منهتن قرار دارند.

شاخص مطلوبیت پیاده‌روی محاسبه‌شده در سناریوی سوم، در ۵۷ درصد از واحدهای مکانی، مقداری بیشتر از سناریوی اول نشان می‌دهد. این مناطق در محله‌های منهتن، نیمه شمالی برانکس و کوییز واقع شده‌اند که با واکاوی نتایج شاخص‌ها، به دلیل اهمیت بیشتر معیارهای ایمنی در سناریوی سوم است که در این مناطق از امتیاز بالایی برخوردارند. در مقابل، ۴۳ درصد دیگر از مناطق که در آن‌ها سناریوی اول امتیاز بیشتری نسبت به سناریوی سوم دارد، در محله‌های استاتن آیلند، بروکلین و جنوب برانکس قرار دارند. این نتیجه ناشی از تراکم کمتر مسکونی و خرده‌فروشی در این مناطق است که نقطه ضعف آن‌ها محسوب می‌شود و در سناریوی اول وزن کمتری برای این معیارها در نظر گرفته شده است. بیشترین اختلاف میان این دو سناریو در واحد مکانی ۰۱۹-۱۰ در محله منهتن با مقدار ۰/۰۸ مشاهده شده است. همچنین، در ۸۳ واحد مکانی (معادل ۴۶ درصد موارد)، این اختلاف کمتر از ۰/۰۱ بوده که بیشتر در محله‌های برانکس، بروکلین و کوییز دیده می‌شود.

در مقایسه بین سناریوهای دوم و سوم، اختلاف بیشتری مشاهده شده است. در محله‌های منهتن، بروکلین و کوییز، شاخص محاسبه‌شده در سناریوی سوم در ۶۲ واحد مکانی بیشتر از سناریوی دوم است و بیشینه اختلاف در واحد مکانی ۰۱۹-۱۰ به میزان ۰/۱۲ دیده می‌شود. این اختلاف ممکن است به دلیل وزن بالاتر معیارهای ایمنی در سناریوی سوم باشد که در این واحدها امتیاز بیشتری دارند. همچنین، فراوانی وسایل حمل‌ونقل عمومی که در این مناطق امتیاز بالایی دارد، در سناریوی دوم حذف شده است. در مقابل، در ۱۱۵ واحد مکانی دیگر که بیشتر خارج از محله منهتن واقع شده‌اند، سناریوی دوم امتیاز بیشتری نسبت به سناریوی سوم کسب کرده که می‌تواند به دلیل وزن کمتر معیارهای مربوط به امکانات پیاده‌راه، فراوانی وسایل حمل‌ونقل عمومی و ایمنی در سناریوی دوم باشد؛ معیارهایی که نقاط قوت محله منهتن

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

محسوب می‌شوند و کاهش اهمیت آن‌ها باعث کاهش شاخص قابلیت پیاده‌روی در این محله شده است. به‌طور کلی، ۵۷ واحد مکانی اختلاف کمتر از ۰/۱ را میان این دو سناریو نشان داده‌اند که عمدتاً در محله‌های بروکلین و کوییز واقع شده‌اند.

در بررسی نتایج سه سناریوی تعریف‌شده برای ارزیابی قابلیت پیاده‌روی در محدوده مطالعه، مشاهده شد که سناریوی اول در بیشتر واحدهای مکانی کمترین امتیاز را دارد و به‌عنوان سناریوی سخت‌گیرانه (بدبینانه) شناخته می‌شود؛ درحالی‌که سناریوی دوم با حذف ابعاد شاخص‌ها از ۲۴ به ۱۶، رویکردی خوش‌بینانه‌تر دارد. همچنین، تمامی سناریوها در واحد مکانی شماره ۲۰۱-۱۱ واقع در محله بروکلین به امتیاز کامل قابلیت پیاده‌روی دست یافته‌اند و در محله کوییز نیز امتیازهای تقریباً مشابهی کسب شده است. در این میان، سناریوی سوم به‌عنوان گزینه‌ای متعادل شناخته شده است.

در ادامه، به‌منظور تحلیل حساسیت مدل به روش تلفیق، سناریوی سوم به دلیل دیدگاه متعادل آن نسبت به شاخص قابلیت پیاده‌روی، با روش تاپسیس نیز ارزیابی شد و نتایج آن با روش ترکیب خطی وزن‌دار برای تعیین بهترین روش تحلیل مقایسه گردید.

در روش تلفیق تاپسیس، بررسی بردار شاخص ایده‌آل مثبت نشان داد که شاخص‌هایی مانند چگالی خرده‌فروشی با مقدار ۰/۰۵۳۶ و تعداد خطوط ترافیکی با مقدار ۰/۰۲۸ بالاترین مقادیر را در میان شاخص‌های موجود دارند. این دو شاخص نشان‌دهنده شرایط مطلوب در مناطق با زیرساخت‌های قوی اقتصادی و ترافیکی هستند. وجود چگالی خرده‌فروشی بالا بیانگر مناطق اقتصادی فعال‌تر و تعداد خطوط معابر نشان‌دهنده ظرفیت مناسب‌تر معابر برای مدیریت جریان ترافیک سواره‌رو و پیاده‌رو است. این مقادیر بالا دستیابی به شرایط ایده‌آل مثبت را برای بسیاری از واحدهای مکانی دشوار می‌کند، چرا که این شاخص‌ها اغلب در مناطق پیشرفته‌تر و با زیرساخت‌های قوی‌تر مشاهده می‌شوند.

در مقابل، شاخص‌هایی مانند شیب پیاده‌راه و مساحت پیاده‌راه با مقدار ۰/۰۰۱ کمترین مقادیر را در بردار ایده‌آل مثبت دارند. این تفاوت قابل‌توجه بین مقادیر شاخص‌ها در بردار ایده‌آل مثبت نشان می‌دهد که عوامل اجتماعی-اقتصادی و زیرساخت‌های حمل‌ونقل در تعیین ایده‌آل مثبت، اهمیت بیشتری دارند. از طرفی، شاخص‌های مرتبط با ویژگی‌های امکانات پیاده‌راه مانند شیب زمین و مساحت پیاده‌راه اثر محدودتری بر دستیابی به شرایط ایده‌آل دارند.

مقایسه میانگین فاصله‌ها از بردار شاخص ایده‌آل مثبت و منفی مشخص می‌کند که میانگین فاصله از ایده‌آل مثبت برابر با ۰/۰۵۸۷۲ و میانگین فاصله از ایده‌آل منفی مقدار کمتر ۰/۰۲۳۱۴ است. این فاصله بیشتر از ایده‌آل مثبت بیانگر آن است که دستیابی به شرایط ایده‌آل مثبت برای بسیاری از واحدهای مکانی دشوارتر بوده و مستلزم تحقق شاخص‌های مطلوبی است که در اغلب مناطق به‌طور کامل فراهم نشده‌اند. از سوی دیگر، پراکندگی کمتر فاصله‌ها از ایده‌آل منفی، که با انحراف معیار ۰/۰۰۴۲۶ در مقابل ۰/۰۰۳۸ برای فاصله از ایده‌آل مثبت اندازه‌گیری شده است، گویای همگنی بیشتر وضعیت واحدهای مکانی نسبت به ایده‌آل منفی و تفاوت محدودتر در میان این مناطق از نظر شاخص‌های ضعیف‌تر است.دامنه اختلافات میان دو روش تلفیق تاپسیس و ترکیب خطی وزن‌دار از ۰/۳۲- تا ۰/۱۹ متغیر است که نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در برخی مناطق است. از بین این واحدهای مکانی، ۳۵ مورد امتیاز بیشتر تاپسیس را نسبت به ترکیب خطی وزن‌دار به دست آورده‌اند که بیشتر در شرق محله کوئینز قرار دارند، در حالی که هیچ‌کدام از واحدهای مکانی محله بروکلین این ویژگی را ندارند. یکی از دلایل اصلی تفاوت نتایج میان روش‌های ارزیابی به ویژگی‌های خاص مناطق شرقی کوئینز بازمی‌گردد. این مناطق از نظر شاخص‌هایی همچون اختلاط کاربری، تراکم خرده‌فروشی، وقوع تصادفات و روشنایی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

معابر، شرایط مطلوبی دارند که در محاسبات شاخص‌ها نیز بازتاب یافته است. به‌طور خاص، این ویژگی‌ها در بردار شاخص ایده‌آل مثبت، مقادیر قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که نزدیکی به ایده‌آل مثبت را برای این مناطق افزایش داده‌اند. روش تاپسیس، که مبتنی بر محاسبه فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی است، این ویژگی‌های مطلوب را بیشتر برجسته کرده و اثرگذاری آن‌ها را در نتایج نهایی افزایش داده است. در مقابل، روش ترکیب خطی وزن‌دار، با توزیع یکنواخت‌تر وزن‌ها میان شاخص‌ها، از تأکید بیش‌ازحد بر ویژگی‌های خاص جلوگیری کرده و نتایج متوازن‌تری را ارائه داده است. بنابراین، روش تاپسیس با تمرکز بیشتر بر نقاط قوت واحدهای مکانی مانند شرق کوئینز، تمایل به برجسته‌سازی این مزایا دارد، در حالی که روش ترکیب خطی وزن‌دار با متعادل‌سازی اثر شاخص‌ها، دیدگاه کلی‌تری را ارائه می‌دهد که به تفاوت در نتایج نهایی منجر شده است.

همچنین، ۱۹ واحد مکانی اختلاف کمتر از ۰٫۰۱ بین این دو روش داشته‌اند که نشان‌دهنده نتایج تقریباً مشابه آن‌هاست. میانگین اختلافات ۰٫۰۷- است، که به طور کلی حاکی از تمایل تاپسیس به ارائه نتایج پایین‌تر نسبت به ترکیب خطی وزن‌دار است، هرچند این تفاوت‌ها در مناطق مختلف متغیر هستند. انحراف معیار ۰٫۰۷ نیز پراکندگی نسبی این اختلافات حول میانگین را نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها ممکن است به دلیل تفاوت در نحوه ترکیب معیارها در این دو روش باشد؛ چرا که تاپسیس بر اساس فاصله از ایده‌آل محاسبه می‌شود، در حالی که ترکیب خطی وزن‌دار معیارها را به‌صورت خطی و بدون توجه به فاصله از ایده‌آل ترکیب می‌کند.

توزیع امتیازات در روش تلفیق تاپسیس نشان می‌دهد که بیشتر امتیازات در بازه‌ای نزدیک به میانگین (۰٫۶۵) متمرکز هستند و پراکندگی کمی (انحراف معیار ۰٫۰۴) دارند. پیش از استانداردسازی نتایج، دامنه امتیازات از ۰٫۵ تا ۱ متغیر است و تعداد کمی از واحدها امتیازات بسیار بالا (بیش از ۰٫۸) دارند که به‌عنوان مناطق برجسته با شرایط مطلوب (نزدیک به ایده‌آل مثبت) ظاهر می‌شوند.

برای ارزیابی عملکرد شاخص‌های به‌دست‌آمده، از شاخص محاسباتی واک‌اسکور استفاده شد. ۱۹۸ نقطه در سراسر منطقه مطالعاتی انتخاب و امتیازات آن‌ها با شاخص‌های پیشنهادی مقایسه شدند. انتخاب این نقاط بر اساس دو معیار بود: نخست، از هر واحد مکانی حداقل یک نقطه انتخاب شد تا توزیع متوازن و نمایانگر وضعیت پیاده‌روی در کل منطقه فراهم شود؛ دوم، در واحدهای بزرگ‌تر و مهم‌تر مانند منهتن، نقاط بیشتری انتخاب شدند تا ارزیابی دقیق‌تری از شرایط پیاده‌روی به‌دست آید.

جدول(۴) نشان می‌دهد که دقت مدل در سناریوهای مختلف از نظر *RMSE* و *MAE* تفاوت‌هایی دارد. سناریوی وزن‌دهی ۳ با روش تلفیق ترکیب خطی وزن‌دار با کمترین *RMSE* (۰٫۱۶) عملکرد بهتری در کاهش خطاهای بزرگ نسبت به شاخص واک‌اسکور دارد، در حالی که سناریو سوم وزن‌دهی با روش تلفیق تاپسیس با *RMSE* بالاتر (۰٫۲) در کاهش خطاهای بزرگ موفقیت کمتری داشته است. از نظر *MAE*، سناریوی وزن‌دهی ۲ با روش تلفیق ترکیب خطی وزن‌دار و سناریوی وزن‌دهی ۳ با روش تلفیق تاپسیس، با مقدار ۰٫۱۴ کمترین خطای کلی را نشان می‌دهند که بیانگر توزیع یکنواخت‌تر خطاها و مناسب بودن آن‌ها برای مناطقی با توزیع یکنواخت‌تر قابلیت پیاده‌روی است. در مجموع، این تحلیل تأثیر وزن‌دهی و روش‌های مختلف تلفیق بر دقت شاخص قابلیت پیاده‌روی را نشان می‌دهد. تطابق بیشتر «سناریوی وزن‌دهی ۳ با روش تلفیق ترکیب خطی وزن‌دار» با شاخص واک‌اسکور، مبیّن این نتیجه است که عملکرد شاخص پیشنهادی از دیدگاه معیارهای اصلی تشابه بیشتری با شاخص واک‌اسکور دارد. در مقابل افزایش ابعاد شاخص‌ها (در سناریوهای دیگر) و در نظر گرفتن شاخص‌هایی تفضیلی و با جزئیات بیشتر، منجر به

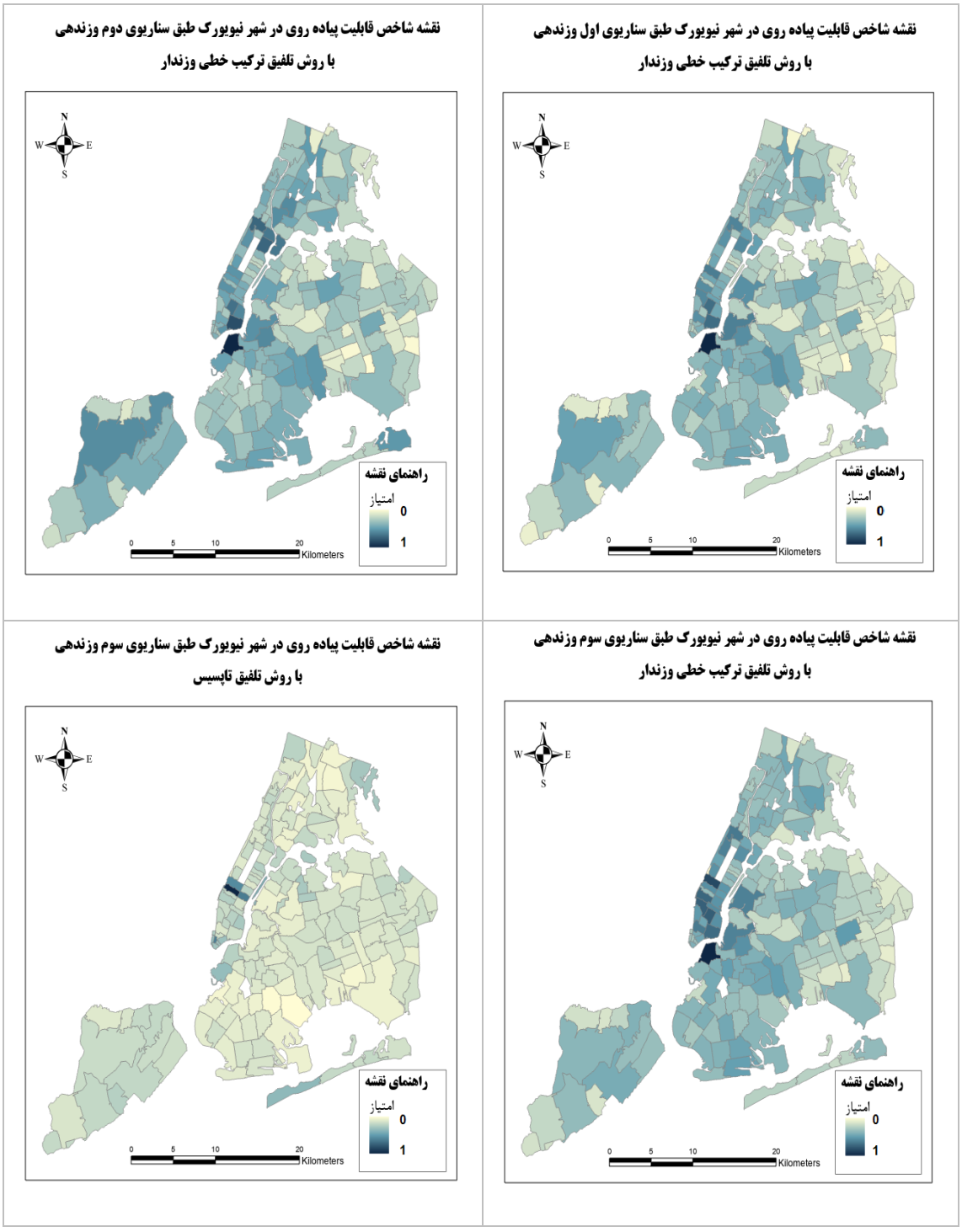
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

افزایش اختلاف میان عملکرد سنجه پیشنهادی با شاخص واک اسکور شده است. اختلاف حداکثر یک درصدی بین شاخص‌ها در سه سناریوی اول که با روش ترکیب خطی وزن‌دار تلفیق شده‌اند نیز نشان‌دهنده آن است که استفاده از ترکیب خطی وزن‌ها به همگرایی نتایج کمک کرده و باعث توزیع متوازن تأثیر معیارها شده است.

جدول ۳: نقشه حرارتی اوزان معیارها در سناریوهای سه‌گانه (هر ستون نمایانگر یک سناریو و هر سطر نمایانگر یک معیار است. وزن صفر به معنای عدم لحاظ معیار مذکور در سناریو است. رنگ کرم تا آبی نشان‌دهنده وزن کمینه (۰) تا بیشینه (۰/۱۵۶)

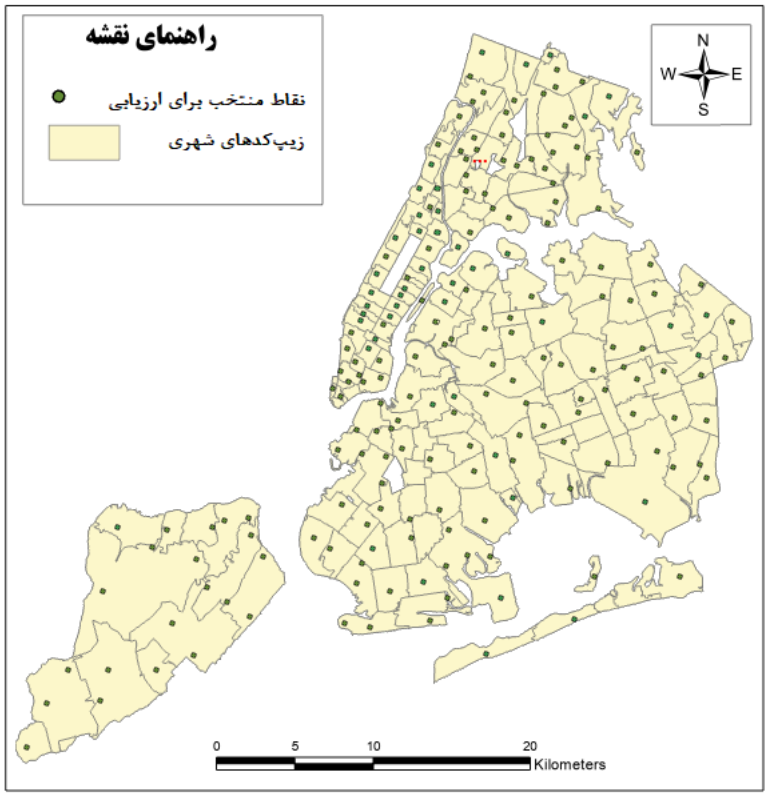
زیر معیارهای ارزیابی	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
عرض پیاده‌راه	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۰۱۲۶۲۵
چراغ روشنایی	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۰۱۲۶۲۵
درختان	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۰۱۲۶۲۵
علائم راهنمایی	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۰۱۲۶۲۵
شیب	۰/۰۴۱۶	۰/۰۲۱	۰/۰۱۲۶۲۵
مساحت سطح پیاده‌راه	۰/۰۴۱۶	۰/۰۳۱	۰/۰۱۲۶۲۵
استراحت‌گاه	۰/۰۴۱۶	۰/۰۱	۰/۰۱۲۶۲۵
فضای سبز	۰/۰۴۱۶	۰/۰۶۶	۰/۰۱۲۶۲۵
فراوانی مراکز آموزشی	۰/۰۴۱۶	۰/۰۳۴	۰/۰۱۳۵
فراوانی پارکینگ خودرو	۰/۰۴۱۶	۰/۱۳۵	۰/۰۱۳۵
فراوانی بانک	۰/۰۴۱۶	۰/۰۰۷	۰/۰۱۳۵
فراوانی مراکز فرهنگی و تفریحی	۰/۰۴۱۶	۰/۰۷۵	۰/۰۱۳۵
فراوانی مراکز درمانی	۰/۰۴۱۶	۰/۰۴۹	۰/۰۱۳۵
فراوانی خدمات عمومی	۰/۰۴۱۶	۰/۱۳۴	۰/۰۱۳۵
فراوانی مترو	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۰۲۵۶۶۷
فراوانی تاکسی	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۰۲۵۶۶۷
فراوانی اتوبوس	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۰۲۵۶۶۷
سطح اتصال معابر	۰/۰۴۱۶	۰/۰۸۹	۰/۰۲۸
چگالی خرده‌فروشی	۰/۰۴۱۶	۰/۰۲۹	۰/۰۸۰۶۶۷
چگالی مسکونی	۰/۰۴۱۶	۰/۰۶۷	۰/۰۸۰۶۶۷
اختلاط کاربری	۰/۰۴۱۶	۰/۱۱۲	۰/۰۸۰۶۶۷
تعداد خطوط معابر	۰/۰۴۱۶	۰	۰/۱۵۶۳۳۳
وقوع تصادفات	۰/۰۴۱۶	۰/۰۴۹	۰/۱۵۶۳۳۳
بیشینه سرعت مجاز معابر	۰/۰۴۱۶	۰/۰۸۸	۰/۱۵۶۳۳۳

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل۵: نقشه‌های شاخص قابلیت پیاده‌روی در سناریوها (رنگ کرم تا سرمه‌ای نشانگر امتیاز شاخص از پایین تا بالا است؛ رنگ سرمه‌ای بیانگر قابلیت پیاده‌روی بالاتر و نزدیک به ۱ می‌باشد.)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل۶: نقاط منتخب برای ارزیابی شاخص قابلیت پیاده‌روی پیشنهادی

جدول۴: مقایسه شاخص قابلیت پیاده‌روی با نقشه *walkscore*

	سناریو ۱ وزندهی + ترکیب خطی وزن‌دار	سناریو۲ وزندهی + ترکیب خطی وزن‌دار	سناریو ۳ وزندهی + ترکیب خطی وزن‌دار	سناریو ۳ وزندهی + تاپسیس
RMSE	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۲
MAE	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۴

۶- بحث و نتیجه‌گیری

ترویج پیاده‌روی به عنوان روشی کم‌هزینه در سفرهای شهری که می‌تواند به کاهش ترافیک، بهبود کیفیت هوا و افزایش سلامت عمومی کمک کند، یکی از ارکان اساسی شهر پایدار در بخش حمل‌ونقل پایدار است. مطالعه حاضر با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، به ارزیابی ۲۴ شاخص مؤثر بر قابلیت پیاده‌روی در ۵ بُعد ارزیابی اصلی دسترسی، کاربری شهری، امکانات پیاده‌راه، سطح اتصال و ایمنی در شبکه پیاده‌روی شهر نیویورک ایالات متحده پرداخته است. نتایج این ارزیابی در ۱۷۷ کدپستی اصلی این شهر، به عنوان واحد مکانی این مطالعه، بررسی شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که فراوانی پارکینگ خودرو، فراوانی مراکز خدماتی، اختلاط کاربری، سطح اتصال، چگالی مسکونی و بیشینه سرعت مجاز معابر از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر قابلیت پیاده‌روی در محدوده مورد مطالعه هستند.

وزن‌دهی معیارها در تصمیم‌گیری چندمعیاره اهمیت

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

زیادی دارد و با عدم قطعیت‌هایی همراه است که تأثیرات قابل‌توجهی بر نتایج نهایی تصمیم‌گیری دارند. سناریوپردازی به عنوان یک راهکار موثر، به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا وزن معیارها را با در نظر گرفتن شرایط مختلف و تأثیرات آن‌ها بهتر تعیین کنند. به همین منظور سه سناریوی مختلف در وزن‌دهی معیارها تعریف و پیاده‌سازی شد. تفاوت‌های محاسباتی میان سناریوها حاکی از این نکته است که حذف یا افزودن معیارهای خاص می‌تواند به طور چشمگیری شاخص قابلیت پیاده‌روی را تغییر دهد. به عنوان مثال، در سناریوی دوم (کاهش تعداد معیارهای موثر به ۱۶ مورد با حذف معیارهایی مانند درختان، علائم راهنمایی و فراوانی وسایل حمل‌ونقل عمومی) منجر به بهبود شاخص در محله‌هایی با امتیاز پایین در این معیارها شد.

اهمیت روش‌های تلفیق معیارها در تصمیم‌گیری چندمعیاره به دلیل توانایی آن‌ها در ارزیابی جامع و متوازن گزینه‌ها بر اساس معیارهای متعدد است. این روش‌ها به تصمیم‌گیران کمک می‌کنند تا با تلفیق مناسب معیارها، به تحلیل دقیق‌تری از گزینه‌ها دست یابند و انتخابی آگاهانه داشته باشند. در این پژوهش، از دو روش تاپسیس و ترکیب خطی وزن‌دار برای تلفیق معیارها استفاده شده است. هر کدام از این روش‌ها ویژگی‌های خاص خود را دارند. به‌طور کلی، روش تاپسیس تمایل دارد واحدهای مکانی را که به شاخص‌های مطلوب نزدیک‌تر هستند، در مقایسه با دیگر روش‌ها، به‌طور برجسته‌تری تفکیک کند. به عنوان مثال واحد مکانی ۰۳۶-۱۰ که بیشترین امتیاز را در این روش تلفیق کسب کرده است، نتیجه مستقیم قرابت شاخص‌هایی همچون چگالی خرده‌فروشی و سایر معیارهای مرتبط با بردار ایده‌آل مثبت است. در مقابل، روش ترکیب خطی وزن‌دار با ادغام موزون اما یکنواخت معیارها (بدون تاثیر فاصله تا ایده آل مثبت یا منفی)، امتیاز نهایی هر گزینه را محاسبه می‌کند. انتخاب این دو روش در این پژوهش، امکان مقایسه و تحلیل بهتر تأثیر تلفیق‌های مختلف معیارها را فراهم آورده است.

مقایسه نتایج این مطالعه با شاخص محاسباتی سامانه واک‌اسکور نشان داد که سناریوی سوم بیشترین تطابق را با نتایج مدل واک‌اسکور دارد. این نتایج نشان‌دهنده تشابه عملکرد شاخص پیشنهادی با شاخص واک‌اسکور از دیدگاه معیارهای اصلی است. نقشه نهایی نشان داد که اغلب مناطق با شاخص قابلیت پیاده‌روی بالا در مناطق مهم و پرتردد شهر نیویورک، مثل محله منهتن واقع شده‌اند. این محله در بیشتر معیارها امتیاز بالایی کسب کرده است. صحت این نتیجه در دنیای واقعی نیز منطقی بنظر می‌رسد.

تحلیل شاخص‌های قابلیت پیاده‌روی در سناریوهای اول، دوم و سوم نشان داد که در هر سه سناریو، مناطق مرکزی شهر بالاترین شاخص را دارند، اما تفاوت‌هایی در شدت و توزیع شاخص‌ها به چشم می‌خورد. در سناریوی دوم، مناطق با شاخص بالا گسترده‌تر و پیوسته‌تر هستند، در حالی که سناریوی سوم با روش تلفیق ترکیب خطی وزن‌دار توزیعی متوازن‌تر از شاخص‌ها ارائه می‌دهد. سناریوی اول نیز تمرکز بیشتری بر بخش‌های خاصی از جنوب و شرق شهر دارد. این یافته‌ها بر اهمیت بهبود زیرساخت‌ها و امکانات شهری در نواحی حاشیه‌ای و کمتر توسعه‌یافته تأکید دارد.

نتایج این مطالعه، محدود به شبکه پیاده‌روی نیویورک است. تحقیقات آینده می‌توانند با استفاده از داده‌های گسترده‌تر و مقایسه با شهرهای دیگر، نتایج جامع‌تری ارائه دهند. همچنین، با در اختیار داشتن داده خط سیر عابرین پیاده و بررسی تأثیر فصلی و زمان‌بندی پیاده‌روی می‌توان شاخص پیاده‌روی را از جنبه‌های مختلف دیگر مبتنی بر روش‌های یادگیری ماشین نیز ارزیابی نمود تا به نتایج دقیق‌تری منجر شود. استفاده از داده‌های آب‌وهوایی و افزودن معیارهایی مثل وضعیت روسازی پیاده‌راه، موانع موجود در آن و زیبایی بصری فضای اطراف مسیر پیاده‌روی، می‌تواند وجوه بیشتری از معیارهای دخیل در فرآیند پیاده‌روی را

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

مورد توجه قرار دهد؛ که به دلیل فقدان داده‌های موردنیاز، از به‌کارگیری این معیارها در مطالعه حاضر صرف نظر شده است. هم‌چنین، مطالعات بعدی می‌تواند با واحد مکانی ریزدانه‌تر همچون «قطعه پیاده‌راه» انجام پذیرد. بهره‌گیری از سایر روش‌های وزن‌دهی داده‌مبنا و ترکیب آن با روش‌های کارشناس‌مبنا نیز می‌تواند گام موثری در ارتقا شاخص‌قابلیت پیاده‌روی باشد.

مراجع

[1] *M. Taleai and E. T. Amiri, "Multi-Criteria Evaluation of Walkability Potential in Urban Areas," JGST, pp. 75-88, May 2017.*

[2] *H. Shadabmehr, "Feasibility study for developing pedestrians in the city of Mashhad," presented at the Urban planning and management conference., Mashhad., 2012.*

[3] *S. Ibrahim, A. Younes and S. A. Abdel-Razek, "Impact of Neighborhood Urban Morphologies on Walkability Using Spatial Multi-Criteria Analysis," Urban Science, vol. 8, p. 70-81, 2024.*

[4] *J. A. Manzolli, A. Oliveira and M. d. C. Neto, "Evaluating Walkability through a Multi-Criteria Decision Analysis Approach: A Lisbon Case Study," Sustainability, vol. 13, pp. 1450-1462, 2021.*

[5] *F. Fonseca, E. Fernandes and R. Ramos, "Walkable Cities: Using the Smart Pedestrian Net Method for Evaluating a Pedestrian Network in Guimarães, Portugal," Sustainability, vol. 14, pp. 10306-10319, 2022.*

[6] *G. Sun, C. Webster and X. Zhang, "Connecting the city: A three-dimensional pedestrian network of Hong Kong," Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, vol. 48, pp. 60–75, 2019.*

[7] *A. Forsyth, "What is a walkable place? The walkability debate in urban design," URBAN DESIGN International, vol. 20, pp. 274–292, 2015.*

[8] *K. J. Krizek, "Operationalizing Neighborhood Accessibility for Land Use-Travel Behavior Research and Regional Modeling," Journal of Planning Education and Research, vol. 22, pp. 270–287, 2003.*

[9] *R. Cervero and K. Kockelman, "Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 2, pp. 199–219, 1997.*

[10] *T. Pharoah, "Developing a Pedestrian Strategy for London," London, 1997.*

[11] *"walkscore," Mike Mathieu, 2007. [Online]. Available: https://www.walkscore.com/methodology.shtml. [Accessed 12 October 2024].*

[12] *J. Koschinsky, E. Talen, M. Alfonzo and S. Lee, "How walkable is Walker's paradise?," Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, vol. 44, pp. 343–363, 2016.*

[13] *R. H. Lo, "Walkability: what is it?," Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability, vol. 2, pp. 145–166, 2009.*

[14] *C. M. Hall and Y. Ram, "Walk score® and its potential contribution to the study of active transport and walkability: A critical and systematic review," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 61, pp. 310–324, 2018.*

[15] *D. S. Vale, M. Saraiva and M. Pereira, "Active accessibility: A review of operational measures of walking and cycling accessibility," Journal of Transport and Land Use, 2015.*

[16] *A.-L. van der Vlugt, C. Gerten and J. Scheiner, "Integrating Perceptions, Physical Features and the Quality of the Walking Route into an Existing*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

Accessibility Tool: The Perceived Environment Walking Index (PEWI)," Active Travel Studies, vol. 4, pp. 1–12 2024.

[17] F. Alves, S. Cruz, A. Ribeiro, A. Bastos Silva, J. Martins and I. Cunha, "Walkability Index for Elderly Health: A Proposal," Sustainability, vol. 12, pp. 7360-7382, 2020.

[18] T. Al Shammas and F. Escobar, "Comfort and Time-Based Walkability Index Design: A GIS-Based Proposal," International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 16, pp. 2850-2864, 2019.

[19] P. Iamtrakul, S. Chayphong, P. Kantavat, Y. Hayashi, B. Kijsirikul and Y. Iwahori, "Exploring the Spatial Effects of Built Environment on Quality of Life Related Transportation by Integrating GIS and Deep Learning Approaches," Sustainability, vol. 15, pp. 2785-2801, 2023.

[20] M. Trolese, F. De Fabiis and P. Coppola, "A Walkability Index including Pedestrians' Perception of Built Environment: The Case Study of Milano Rogoredo Station," Sustainability, vol. 15, pp. 15389-15401, 2023.

[21] "walkfriendly," NYC.gov , UNC Highway Safety Research Center, [Online]. Available: https://www.walkfriendly.org/communities/new-york-city-ny/. [Accessed 10 October 2024].

[22] O. C. Yıldırım, A. Sungur and D. G. Ozer, "Exploring multidimensional aspects of walkability: An innovative analysis approach in Besiktas, Istanbul," Frontiers of Architectural Research, vol. 12, p. 1097–1126, 2023.

[23] A. Ruiz-Padillo, F. M. Pasqual, A. M. Larranaga Uriarte and H. B. B. Cybis, "Application of multi-criteria decision analysis methods for assessing walkability: A case study in Porto Alegre, Brazil," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 63, pp. 855–871, 2018.

[24] B. Babaei Morad, N. Elahi Mehr, N. Sahrakar, and S. A. Mousavian, "Evaluation of Indicators Affecting Walkability Toward Achieving Sustainable Urban Development (Case Study: Bu Ali Sina and Ekbatan Streets in Hamedan City)," Haft Hesar Environmental Studies, vol. 5, pp. 19–30, 2017.

[25] H. Vahidi, M. Ramezani Mehrian, H. Khosravi, A. Alihosseini, and A. Jalayer, "Walkability Index: An Approach to Sustainable Urban Development (Case Study: District 16 of Tehran Municipality)," Environmental Science Quarterly, vol. 20, pp. 259–276, 2022.

[26] M. Jabbari, F. Fonseca and R. Ramos, "Combining multi-criteria and space syntax analysis to assess a pedestrian network: the case of Oporto," Journal of Urban Design, vol. 23, pp. 23–41, 2017.

[27] F. Fonseca, E. Fernandes and R. Ramos, "Walkable Cities: Using the Smart Pedestrian Net Method for Evaluating a Pedestrian Network in Guimarães, Portugal," Sustainability, vol. 14, pp. 10306-10325, 2022.

[28] F. Fonseca, E. Conticelli, M. Jabbari, P. Ribeiro, S. Tondelli, G. Papageorgiou and R. Ramos, Smart Pedestrian Net: A Smart Approach to Evaluate Built Environment Attributes and their Influence on Walkability; Fundamentals, Assessment and Application, pp. 1-72, 2020.

[29] C. Moreno, Z. Allam, D. Chabaud, C. Gall and F. Pratlong, "Introducing the "15-Minute City": Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities," Smart Cities, vol. 4, pp. 93–111, 2021.

[30] R. Khoshnaw, "Evaluating Mixed Land Use and Connectivity: A Case Study of Five Neighborhoods in Erbil City, Iraq," Sustainability, vol. 15, pp. 14265-14279, 2023.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

[31] A. I. Ribeiro and E. Hoffimann, "Development of a Neighbourhood Walkability Index for Porto Metropolitan Area. How Strongly Is Walkability Associated with Walking for Transport?," International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 15, pp. 2767-2780, 2018.

[32] S. Ramezani, T. Laatikainen, K. Hasanzadeh and M. Kyttä, "Shopping trip mode choice of older adults: an application of activity space and hybrid choice models in understanding the effects of built environment and personal goals," Transportation, vol. 48, pp. 505–536, 2019.

[33] M. Jabbari, F. Fonseca and R. Ramos, "Combining multi-criteria and space syntax analysis to assess a pedestrian network: the case of Oporto," Journal of Urban Design, vol. 23, pp. 23–41, 2017.

[34] T. M. Lam, Z. Wang, I. Vaartjes, D. Karssenberg, D. Ettema, M. Helbich, E. J. Timmermans, L. D. Frank, N. R. den Braver, A. J. Wagtendonk, J. W. J. Beulens and J. Lakerveld, "Development of an objectively measured walkability index for the Netherlands," International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, vol. 19, pp. 50–71, 2022.

[35] B. M. Mengistie, W. Shi, M. S. Wong and R. Zhu, "Urban street network and data science based spatial connectivity evaluation of African cities: implications for sustainable urban development," GeoJournal, vol. 88, pp. 4753–4766, 2023.

[36] L. D. Frank, J. F. Sallis, B. E. Saelens, L. Leary, K. Cain, T. L. Conway and P. M. Hess, "The development of a walkability index: application to the Neighborhood Quality of Life Study," British Journal of Sports Medicine, vol. 44, pp. 924–933, 2009.

[37] R. Basu and A. Sevtsuk, "How do street attributes affect willingness-to-walk? City-wide pedestrian route choice analysis using big data from Boston and San Francisco," Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 163, pp. 1–19, 2022.

[38] F. Fonseca, E. Fernandes and R. Ramos, "Walkable Cities: Using the Smart Pedestrian Net Method for Evaluating a Pedestrian Network in Guimarães, Portugal," Sustainability, vol. 14, p. 10306, 2022.

[39] M. Harvey and C. Whong, "Sidewalk Widths NYC," 2024. [Online]. Available: http://www.sidewalkwidths.nyc/. [Accessed 7 October 2024].

[40] P. E. J. Vos, B. Maiheu, J. Vankerkom and S. Janssen, "Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?," Environmental Pollution, vol. 183, pp. 113–122, 2013.

[41] K. Stagoll, D. B. Lindenmayer, E. Knight, J. Fischer and A. D. Manning, "Large trees are keystone structures in urban parks," Conservation Letters, vol. 5, pp. 115–122, 2012.

[42] M. Meeder, T. Aebi and U. Weidmann, "The influence of slope on walking activity and the pedestrian modal share," Transportation Research Procedia, vol. 27, pp. 141–147, 2017.

[43] R. Dalton, S. Abbasi and S. Han, "On-Premise Signage and Placemaking: Aiding Lively Streetscapes to Maintain Signage Visibility," Interdisciplinary Journal of Signage and Wayfinding, vol. 7, pp. 37–52, 2023.

[44] D. Rhoads, C. Rames, A. Solé-Ribalta, M. C. González, M. Szell and J. Borge-Holthoefer, "Sidewalk networks: Review and outlook," Computers, Environment and Urban Systems, vol. 106, pp. 102031-102046, 2023.

[45] V. Juul and E. C. A. Nordbø, "Examining activity-friendly neighborhoods in the Norwegian context: green space and walkability in relation to physical activity and the moderating role of perceived safety," BMC Public Health, vol. 23, pp. 259-273, 2023.

[46] R. Basu and A. Sevtsuk, "How do street

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

attributes affect willingness-to-walk? City-wide pedestrian route choice analysis using big data from Boston and San Francisco," Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 163, pp. 1–19, 2022.

[47] A. Sevtsuk, R. Basu, X. Li and R. Kalvo, "A big data approach to understanding pedestrian route choice preferences: Evidence from San Francisco," Travel Behaviour and Society, vol. 25, pp. 41–51, 2021.

[48] S. Ferrer, T. Ruiz and L. Mars, "A qualitative study on the role of the built environment for short walking trips," Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, vol. 33, pp. 141–160, 2015.

[49] M. Trolese, F. De Fabiis and P. Coppola, "A Walkability Index including Pedestrians' Perception of Built Environment: The Case Study of Milano Rogoredo Station," Sustainability, vol. 15, pp. 15389-15402, 2023.

[50] B. Ayan, S. Abacıoğlu and M. P. Basilio, "A Comprehensive Review of the Novel Weighting Methods for Multi-Criteria Decision-Making," Information, vol. 14, pp. 285-301, 2023.

[51] J.-C. Pomerol, "Scenario development and practical decision making under uncertainty," Decision Support Systems, vol. 31, pp. 197–204, 2001.

[52] M. G. Delgado and J. B. Sendra, "Sensitivity Analysis in Multicriteria Spatial Decision-Making: A Review," Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, vol. 10, pp. 1173–1187, 2004.

[53] O. I. Nasef, "Walkability assessment using GIS-MCDAA case study of two counties Gävle and Uppsala in Sweden," MastersThesis , University of Gävle, 2021.

[54] C. Deng, X. Dong, H. Wang, W. Lin, H. Wen, J. Frazier, H. C. Ho and L. Holmes, "A Data-Driven Framework for Walkability Measurement with Open Data: A Case Study of Triple Cities, New York," ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 9, pp. 36-53, 2020.

[55] A. Sabzali Yameqani and A. A. Alesheikh, "Development and evaluation of a walkability index (Case Study: districts of the Ghom city)," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 5, pp. 159-174, 2015.

[56] S. Steiniger, C. Rojas and G. Vecchio, "Evaluating walkability with WalkMyPlace-Five reasons why the utility of Walkscore. com may be limited in South America," presented at Accepted Short Papers and Posters from the 22nd AGILE Conference on Geo-information Science. Cyprus University of Technology, 2019.

[57] J. A. Brown, K. D. Curtin, M. Thomson, J. Y. Kung and C. I. J. Nykiforuk, "Contributions and Limitations Walk Score® in the Context of Walkability: A Scoping Review," Environment and Behavior, vol. 55, pp. 468–519, 2023.

[58] B. Bereitschaft, "Walk Score® versus residents' perceptions of walkability in Omaha, NE," Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability, vol. 11, pp. 412–435, 2018.

[59] T. O. Hodson, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not," Geoscientific Model Development Discussions, vol. 2022, pp. 1–10, 2022.

[60] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature," Geoscientific model development, vol. 7, pp. 1247–1250, 2014.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.3, Autumn 2025

Research Paper

Spatial Multi-Criteria Decision-Making Approach in Evaluating Walkability Indices: A Case Study of New York City

Sara Jokar [1], Mohammad Taleai [2]*, Seyed Ehsan Sadooghi [3]

1- M.Sc. student in Department of Geodesy amd Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
2- Professor in Department of Geodesy amd Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
3- Ph.D. Candidate in Department of Geodesy amd Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

Given the importance of walking and its role in promoting the physical and mental well-being of the urban residents, various indices have been developed in recent years to assess walkability in the urban environments. Among these, the Walk Score is a widely recognized tool; however, it primarily focuses on access to some selected services and fails to capture the multifaceted nature of walkability. Accordingly, this study aims to develop a comprehensive walkability index by incorporating a broader range of indicators that reflect its various dimensions, using spatial multi-criteria decision-making methods for weighting and integration. To this end, a set of 24 indicators related to different aspects of walkability were selected. Subsequently, three weighting scenarios and two integration methods—TOPSIS and Weighted Linear Combination (WLC)—were employed to conduct the sensitivity analysis and determine the most effective weighting strategy. The performance of the proposed approach was evaluated using objective assessment methods based on the statistical measures and walkability indices developed in the previous studies. The results indicate that factors such as access to parking lots and public services, land-use mix, street connectivity, residential density, and maximum permissible street speed are among the most influential variables affecting walkability in the study area. Comparative analysis of the scenarios revealed that Scenario 2, which reduces the indicators to 16 using Principal Component Analysis (PCA), reflects a more optimistic approach than Scenario 1, which adopts a pessimistic perspective, while Scenario 3, which reduces the indicators into five principal dimensions, offers a balanced alternative. Furthermore the comparison of the computed indices with the Walk Score map was done. The results showed that the WLC method under Scenario 3, based on the main criteria, aligns more closely with Walk Score than TOPSIS. The results underscore the critical role of weighting and integration strategies in spatial multi-criteria analysis for constructing the effective walkability indices.

Key words: *Walkability Index, Spatial Multi-Criteria Decision-Making, Sensivity Analysis, Walkscore.*

Correspondence Address: *Geographic Information System Group, Department of Geomatics, College of Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel : +98 21 88877071.
Email : *taleai@kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]