Incidents and Disasters Resilience

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

Development of a modified road blockage index for analyzing the seismic resilience of urban road networks; case study: district 16, Tehran

Tahereh Ghaemi Rad[1]✉

1. Corresponding author, Assistant Professor, Geoinformation Tech. Center of Excellence, Faculty of Geomatics Eng, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: t.ghaemirad@kntu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 24 July 2025
Received in revised form 23 September 2025
Accepted 21 December 2026
Available online 30 December 2025

Keywords:
Seismic Resilience,
Road Blockage Index,
Urban Road Network,
Emergency Access,
Geographic Information System (GIS).

ABSTRACT

Objective: Urban road networks serve as critical lifelines in emergency response during disasters; however, their functionality is severely threatened by building collapses caused by earthquakes. This study develops a Geographic Information System (GIS)-based framework to assess the probability of route blockage within the urban road network of District 16 of Tehran, an area characterized by high building density and deteriorated urban fabric.

Method: A modified road blockage index (BIadj) was developed by integrating four morphological indicators—slope (up to 69.95%), road width (minimum 0.24 m), building height (up to eight stories), and network connectivity (edge-to-node ratio)—with the structural stability of the surrounding urban fabric. To account for structural deterioration, weighting coefficients ranging from 1 to 2 were assigned to stable, unstable, and deteriorated urban fabrics.

Results: The results indicate significant spatial variation in risk distribution. While major arterial roads remain relatively resilient, approximately 54% of the study area consists of vulnerable urban fabric, and 77% of the total road length is located within unstable zones. By applying a critical threshold (BIadj > 0.5), the model identified 13 high-risk corridors leading to the isolation of 19 residential parcels. Demographic analysis of these isolated areas, based on the 2016 census data, revealed that 72 residents—including 17 highly vulnerable individuals—could potentially become trapped due to route blockage, thereby losing access to emergency services during an earthquake. Visual validation using high-resolution satellite imagery further confirmed the hazardous blockage index values in these hotspots, particularly in the Naziabad neighborhood of District 16, Tehran.

Conclusions: The proposed blockage index provides an operational roadmap for urban planners to prioritize structural retrofitting measures and optimize emergency access routes. The findings demonstrate that integrating road morphology with structural vulnerability assessment can shift disaster management approaches from generalized evaluations toward targeted spatial interventions aimed at enhancing urban resilience against earthquakes.

Cite this article: Ghaemi Rad., T. (2025). Development of a modified road blockage index for analyzing the seismic resilience of urban road networks; case study: district 16, Tehran. ***Incidents and Disasters Resilience***, *1*(4), 3-14.

© Author(s) retain the copyright.

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir

توسعه شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده برای تحلیل تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه معابر شهری؛ مطالعه موردی: منطقه ۱۶ تهران

طاهره قائمی‌راد[۱]✉

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: t.ghaemirad@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

کلیدواژه‌ها:
تاب‌آوری لرزه‌ای،
شاخص انسداد مسیر،
شبکه معابر شهری،
دسترسی اضطراری،
سیستم اطلاعات مکانی.

چکیده

هدف: شبکه معابر شهری، شریان‌های حیاتی در پاسخ‌گویی به بحران محسوب می‌شوند؛ بااین‌حال، کارایی آن‌ها به‌واسطه ریزش ساختمان‌های ناشی از زلزله به‌شدت تهدید می‌شود. این پژوهش، چهارچوبی مبتنی بر سیستم اطلاعات مکانی (GIS) را برای ارزیابی احتمال انسداد مسیر در شبکه معابر شهری در منطقه ۱۶ تهران توسعه می‌دهد؛ منطقه‌ای که با تراکم ساختمانی بالا و بافت شهری فرسوده شناخته می‌شود.

روش پژوهش: در این پژوهش، یک شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده (BI_{adj}) پیشنهاد شده است که چهار شاخص مورفولوژیک شامل شیب (تا ۶۹/۹۵ درصد)، عرض معبر (حداقل ۰/۲۴ متر)، ارتفاع ساختمان (تا ۸ طبقه) و اتصال شبکه (نسبت یال به گره) را با پایداری سازه‌ای بافت پیرامونی ادغام می‌کند. به‌منظور لحاظ کردن فرسودگی سازه‌ای، ضرایب وزنی (۱ تا ۲) به بافت‌های پایدار، ناپایدار و فرسوده اختصاص یافت.

یافته‌ها: نتایج پژوهش، حاکی از تفاوت فضایی قابل‌توجه در میزان خطر است؛ درحالی‌که شریان‌های اصلی، تاب‌آور باقی می‌مانند، تقریباً ۵۴ درصد از مساحت منطقه را بافت‌های آسیب‌پذیر تشکیل داده و ۷۷ درصد از کل طول معابر در مناطق ناپایدار واقع شده‌اند. با اعمال یک حد آستانه بحرانی ($BI_{adj} > 0.5$)، این مدل ۱۳ کریدور پرخطر را شناسایی کرد که منجر به انزوای ۱۹ قطعه (پلاک) مسکونی می‌شوند. تحلیل جمعیت‌شناختی این مناطق محصورشده بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ نشان می‌دهد که براثر انسداد مسیر، احتمال محبوس شدن ۷۲ نفر (شامل ۱۷ نفر با آسیب‌پذیری بالا) وجود داشته و در صورت وقوع زلزله، دسترسی آن‌ها به خدمات اضطراری قطع خواهد شد. اعتبارسنجی بصری ازطریق تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا، مقادیر مخاطره‌آمیز شاخص انسداد را در این نقاط داغ، به‌ویژه در محله نازی‌آباد در منطقه ۱۶ تهران، تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری: محاسبه شاخص معرفی‌شده در این پژوهش، یک نقشه راه عملیاتی در اختیار برنامه‌ریزان شهری قرار می‌دهد تا اولویت‌بندی مقاوم‌سازی سازه‌ای و بهینه‌سازی مسیرهای دسترسی اضطراری را انجام دهند و مدیریت بحران را از ارزیابی‌های کلی به سمت مداخلات فضایی هدفمند سوق دهند.

استناد: قائمی‌راد، طاهره. (۱۴۰۴). توسعه شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده برای تحلیل تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه معابر شهری؛ مطالعه موردی: منطقه ۱۶ تهران. *تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۱ (۴)، ۳-۱۴.

CC BY NC

© نویسندگان.

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

مقدمه

مخاطرات طبیعی و سوانح مرتبط با آن‌ها در سراسر جهان رو به افزایش است (Gaillard & Texier, 2010). در آغاز قرن حاضر، پژوهشگران متعددی از توزیع نابرابر جهانی سوانح طبیعی و پیامدهای آن‌ها خبر داده‌اند (Rus, Kilar, & Koren, 2018; Dragovi´c et al., 2019). مطالعات نشان می‌دهند که تفاوت در میزان آسیب‌پذیری و تاب‌آوری باعث توزیع نابرابر آثار و پیامدهای سوانح طبیعی می‌شود (Shen et al., 2018). تاب‌آوری و آسیب‌پذیری مفاهیمی مرتبط هستند که هر دو بر ظرفیت‌های انطباقی متمرکز هستند؛ ظرفیت‌هایی که سیستم‌ها را قادر می‌سازند تا آمادگی بهتری کسب کرده و توانایی کاهش آثار منفی را داشته باشند. درحالی‌که آسیب‌پذیری بر عوامل فشارزای ایستا مانند «مواجهه[1]» و «حساسیت[2]» تأکید دارد، تاب‌آوری مفهومی پویا است که جنبه‌های تحولی نظیر یادگیری، بازاندیشی انتقادی یا بازسازمان‌دهی را نیز شامل می‌شود (Becker et al., 2015).

بیشتر مدل‌های تاب‌آوری بر عواملی نظیر ایجاد مهارت‌های فردی، تأمین منابع و دسترسی به خدمات ضروری تأکید می‌کنند که همگی در کاهش آسیب‌پذیری و ارتقای تاب‌آوری جامعه نقش دارند (Ardebili Pour, Ghiasi, & Karkehabadi, 2025). در میان چهار بعد اصلی تاب‌آوری (اجتماعی، اقتصادی، کالبدی و نهادی) (Bruneau et al., 2003; Aydin et al., 2018)، به بعد کالبدی و استحکام ساختاری شهرها کمتر توجه شده است (Meimandi Parizi, Taleai, & Sharifi, 2022). این در حالی است که مؤلفه‌های کالبدی برای حفظ عملکرد شهری پس از زلزله ضروری هستند (Sharifi, 2019; Bitarafan et al., 2025).

«دسترسی‌پذیری[3]» و «اتصال‌پذیری[4]» دو شاخص کلیدی تاب‌آوری کالبدی هستند که دسترسی مناسب به مراکز امدادی مانند ایستگاه‌های آتش‌نشانی و بیمارستان‌ها و همچنین فضاهای باز ایمن برای تخلیه اضطراری در هنگام بحران را تضمین می‌کنند. در حین زلزله و پس‌ازآن، وجود دسترسی و اتصال‌پذیری مناسب برای فرار و ارائه خدمات امدادی امری ضروری است (Alizadeh et al., 2021; Deshkar, Hayashi, Mori, 2011; Wang et al., 2024). مطالعات اخیر نیز تأکید می‌کنند که انسداد راه‌ها به‌طور قابل‌توجهی باعث تأخیر در پاسخ‌گویی اضطراری و کاهش کارایی تخلیه می‌شود (Sorrentino & Giresini, 2024; Wang et al., 2024). از همین رو، انسداد معابر در هنگام زلزله به‌طور گسترده به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر دسترسی‌پذیری شهری و کارایی پاسخ اضطراری شناخته شده است.

پیشینه پژوهش

مطالعات پیشین، عوامل متعددی را به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده انسداد مسیر بررسی کرده‌اند. چاپاگین (۲۰۱۶) نشان داد که فروپاشی ساختمان‌ها و تجمع آوار در کوچه‌های باریک می‌تواند موانع شدیدی برای تخلیه ایجاد کند (Chapagain, 2016). سورنتینو و جیرزینی (۲۰۲۴)، چهارچوبی برای ارزیابی ریسک توسعه دادند که بر مخاطرات پس از رویداد، ازجمله حجم آوار و احتمال فروریزش تمرکز دارد (Sorrentino & Giresini, 2024). ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) یک روش یکپارچه ارزیابی لرزه‌ای برای ساختمان‌ها و معابر شهری پیشنهاد کردند که بر تأثیرات متقابل آسیب‌دیدگی ساختمان‌ها و آسیب‌پذیری راه‌ها تأکید دارد (Zhang et al., 2024). به‌طور مشابه، دشکار و همکاران (۲۰۱۱) و علیزاده و همکاران (۲۰۲۱) نیز عرض معبر و شیب را به‌عنوان شاخص‌های کالبدی کلیدی مؤثر بر کارایی تخلیه شناسایی کردند (Alizadeh et al., 2021; Deshkar, Hayashi, & Mori, 2011)، درحالی‌که وانگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که شیب و ارتفاع ساختمان‌های مجاور معبر، در صورت ترکیب با انسداد ناشی از آوار، می‌تواند عملیات امداد و نجات را با تأخیر مواجه سازد (Wang et al., 2024).

1. Exposure
2. Sensitivity
3. Accessibility
4. Connectivity

بااین‌حال، اکثر شاخص‌های انسداد موجود، عمدتاً بر تجمع آوار پس از رویداد و ریسک فروریزش ساختمان‌ها تمرکز دارند (Sorrentino & Giresini, 2024)، درحالی‌که به ویژگی‌های ساختاری و مورفولوژیک شبکه معابر پیش از وقوع حادثه توجه کمتری شده است. از سوی دیگر، در برخی مقالات نیز، شاخص انسداد را به نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان، محدود نموده و از سایر ویژگی‌های مورفولوژیکی معابر، چشم‌پوشی شده است (Meimandi Parizi, Taleai, & Sharifi, 2022; Silva et al., 2017; Zekry et al., 2020).

در همین راستا، پژوهش پیش‌رو، به معرفی یک شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده (BI_{adj}[5]) می‌پردازد که عناصر کالبدی فرم شهری شامل شیب معبر، عرض معبر، متوسط ارتفاع ساختمان‌های مجاور معبر و اتصال‌پذیری شبکه را در کنار پایداری سازه‌ای، در نظر می‌گیرد. برخلاف شاخص‌هایی که تنها احتمال انسداد پس از زلزله را اندازه‌گیری می‌کنند، شاخص انسداد پیشنهادی یک دیدگاه پیش‌بینانه و شبکه‌محور ارائه می‌دهد که امکان ارزیابی آسیب‌پذیری پیش از حادثه را فراهم می‌سازد. به‌این‌ترتیب، تعداد و موقعیت قطعات مسکونی که احتمالاً به دلیل انسداد مسیر ناشی از وقوع زمین‌لرزه با محدودیت دسترسی نیروهای امدادی مواجه می‌شوند، شناسایی شده و امکان برنامه‌ریزی پیش‌دستانه قبل از وقوع حادثه، برای آن‌ها فراهم می‌گردد. به‌این‌ترتیب، پژوهش پیش‌رو، به سه پرسش زیر، پاسخ خواهد داد:

– شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده با ادغام مؤلفه‌های مورفولوژیک و پایداری سازه‌ای، چگونه می‌تواند دقت شناسایی نقاط بحرانی را نسبت به شاخص‌های مرسوم (مبتنی بر نسبت ارتفاع به عرض) بهبود بخشد؟

– با به‌کارگیری شاخص اصلاح‌شده در منطقه ۱۶ تهران، توزیع فضایی قطعات مسکونی و جمعیت محاصره‌شده ناشی از انسداد معابر، چه الگویی را در سطح محلات نشان می‌دهد؟

– شناسایی و اولویت‌بندی نقاط بحرانی بر اساس شاخص انسداد پیشنهادی، چگونه می‌تواند به تدوین راهکارهای برنامه‌ریزی پیش‌دستانه برای مدیریت بحران و ارتقای دسترسی‌پذیری نیروهای امدادی کمک کند؟

مقاله پیش‌رو، در چهار بخش تدوین شده است. پس از تعریف مسئله و بررسی پیشینه موضوع در بخش اول، روش‌شناسی در بخش دوم ارائه شده است. بخش سوم به ارائه و ارزیابی نتایج و در نهایتاً، بخش چهارم به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

روش‌شناسی پژوهش

معرفی شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده

شاخص BI پیشنهادی بر اساس چهار معیار کلیدی زیر ساخته شده است:

– شیب معبر (S): شیب‌های تند احتمال حرکت آوار را افزایش داده و فرایند تخلیه را دشوار می‌کنند.

– میانگین ارتفاع ساختمان‌های مجاور معبر (B_H): ساختمان‌های مرتفع‌تر، ریسک فروریزش و حجم آوار بیشتری ایجاد می‌کنند.

– عرض معبر (W): معابر عریض‌تر احتمال انسداد را کاهش داده و دسترسی نیروهای امدادی را تسهیل می‌کنند.

– اتصال‌پذیری معبر (C): میزان پیوستگی شبکه معابر محلی و توان آن‌ها در پشتیبانی از مسیرهای جایگزین در شرایط اضطراری را نشان می‌دهد؛ اتصال‌پذیری بالاتر، امکان انتخاب مسیرهای جایگزین را فراهم کرده و تاب‌آوری شبکه را افزایش می‌دهد. در این پژوهش، اتصال‌پذیری هر قطعه معبر بر اساس نسبت یال به گره در محدوده زون‌های ترافیکی (TAZ) متناظر با آن، محاسبه شده و مقدار شاخص حاصل به تمامی معابر واقع در همان TAZ اختصاص داده شده است.

به‌این‌ترتیب، شاخص BI با استفاده از معادله ۱ به دست می‌آید:

$$BI = \frac{\mathrm{S} \times B_H}{\mathrm{W} \times \mathrm{C}} \qquad (۱)$$

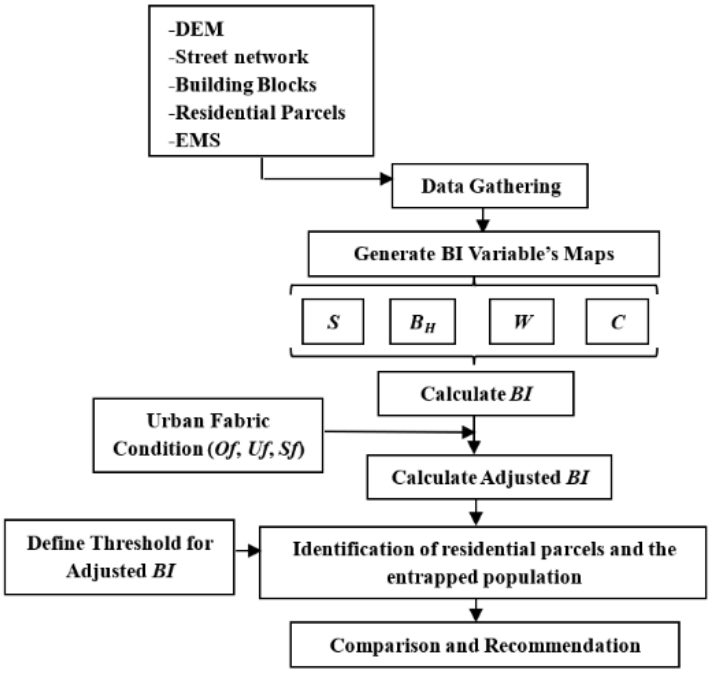
در این رابطه، صورت کسر بیانگر عوامل تشدیدکننده و مخرج کسر نمایانگر عوامل کاهنده خطر است. مقادیر بالاتر BI نشان‌دهنده پتانسیل انسداد بیشتر بوده و مقادیر پایین‌تر، بیانگر معابر تاب‌آورتر و دسترس‌پذیرتر هستند.

5. Adjusted Blockage Index

علاوه بر این، وضعیت بافت شهری پیرامون معبر نیز نقش مهمی در تعدیل ریسک انسداد ایفا می‌کند. معابری که در بافت‌های فرسوده یا ناپایدار قرار دارند، به دلیل ضعف سازه‌ای ساختمان‌ها و عرض کم معابر، بیشتر در معرض انسداد هستند. برای لحاظ کردن این موضوع، شاخص BI با اعمال یک ضریب تعدیل‌کننده بر اساس نوع بافت شهری (F)، طبق رابطه ۲ اصلاح شده است:

$$BI_{adj} = \left(\frac{\mathrm{S} \times B_H}{\mathrm{W} \times \mathrm{C}}\right) \times F \quad where\ F = \begin{cases} 2 & \text{Old fabric } (Of) \\ 1.5 & \text{Unstable fabric (Uf)} \\ 1 & \text{Stable fabric (Sf)} \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن (Of)[6] بافت فرسوده، (Uf)[7] بافت ناپایدار و (Sf)[8] بافت پایدار شهری هستند. بر اساس تعاریف موجود، بافت فرسوده به مناطقی اطلاق می‌شود که به‌طور هم‌زمان دارای سه شاخص «ریزدانگی قطعات»، «نفوذناپذیری» و «ناپایداری سازه‌ای» باشند. بافت ناپایدار نیز به بلوک‌های شهری اطلاق می‌شود که در آن‌ها حداقل ۵۰ درصد از ساختمان‌ها ازنظر سازه‌ای غیرمقاوم هستند. شکل ۱، فرایند محاسبه شاخص BI_{adj} را نشان می‌دهد.



شکل ۱. فرایند محاسبه شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده

جمع‌آوری داده و تخمین متغیرها

به‌منظور اجرای تحلیل، مجموعه‌ای از داده‌های مکانی، سازه‌ای و جمعیت‌شناختی از منابع رسمی ملی و شهری گردآوری شد. هندسه قطعات، اطلاعات کاربری اراضی، داده‌های مربوط به ارتفاع ساختمان‌ها (تعداد طبقات) و اطلاعات مرتبط با بافت شهری از اداره GIS شهرداری تهران اخذ شد که شامل شیپ‌فایل‌های قطعات مسکونی با طبقه‌بندی دقیق کاربری اراضی است. داده‌های جمعیتی نیز بر اساس آخرین سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵ از مرکز آمار ایران استخراج شد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از پایگاه داده Copernicus Global Digital Elevation Model (GLO-30) دریافت شد تا پارامترهای ارتفاع و شیب زمین از آن استخراج شوند. داده‌های شبکه معابر و عرض خیابان‌ها از پایگاه OpenStreetMap (OSM) استخراج و برای اطمینان از دقت هندسی و جامعیت اطلاعات، با نقشه‌های مهندسی

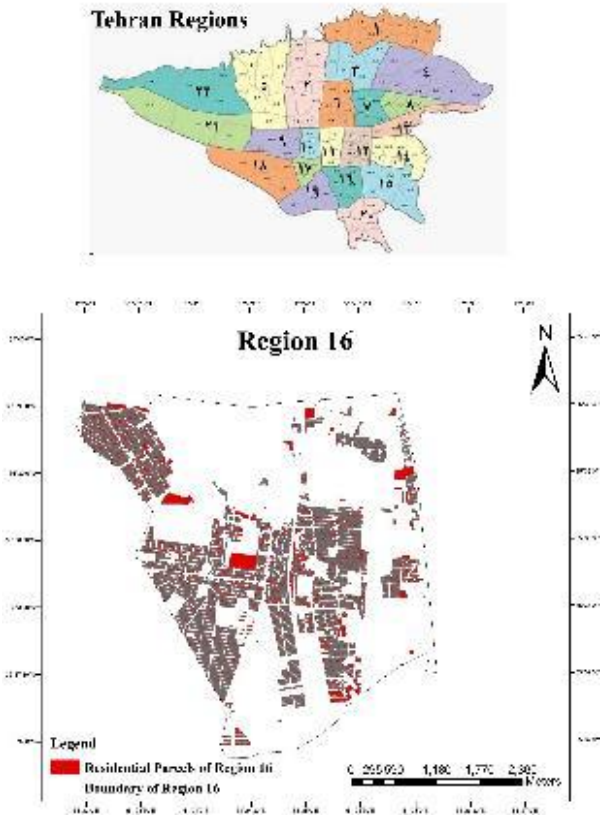
6. Old fabric
7. Unstable fabric
8. Stable fabric

ارائه‌شده توسط شهرداری تهران، تطبیق و اعتبارسنجی شدند.

یافته‌های پژوهش

منطقه مطالعاتی

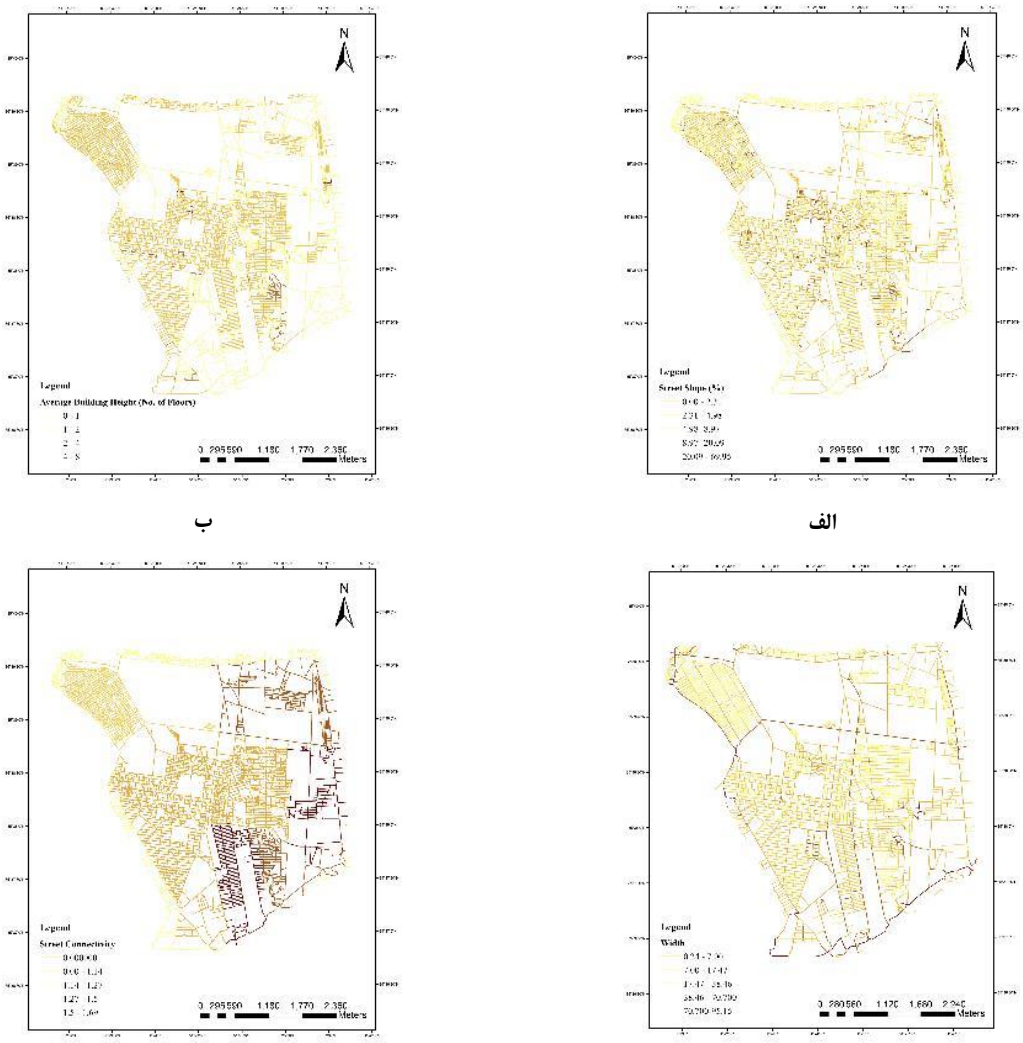
منطقه ۱۶ شهر تهران، پایتخت ایران، در بخش جنوبی شهر واقع شده و با محله‌های مسکونی متراکم، معابر باریک و سهم قابل‌توجهی از بافت‌های قدیمی و فرسوده شهری شناخته می‌شود. این منطقه، جمعیت قابل‌توجهی را در خود جای داده و دارای کاربری‌های مختلط اراضی است که در صورت وقوع یک زلزله شدید، آسیب‌پذیری آن را افزایش می‌دهد. انتخاب منطقه ۱۶ به‌عنوان محدوده موردمطالعه، به‌ویژه به دلیل مجاورت آن با چندین گسل فعال، ازجمله گسل ری، حائز اهمیت است؛ گسلی که پتانسیل ایجاد زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالا را دارد. در کنار فراوانی ساختمان‌های آسیب‌پذیر و کمبود فضاهای باز، این شرایط موجب می‌شود که منطقه در هنگام رخدادهای لرزه‌ای، مستعد آسیب‌های شدید و انسداد گسترده معابر باشد. ازاین‌رو، تحلیل دسترسی‌پذیری و مسیریابی اضطراری در این منطقه، بینش‌های ارزشمندی برای ارتقای تاب‌آوری شهری و راهبردهای مدیریت بحران در تهران و سایر شهرهای زلزله‌خیز فراهم می‌کند. نقشه جغرافیایی محدوده موردمطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. توزیع فضایی قطعات مسکونی، شبکه معابر و مراکز اورژانس (EMS) در منطقه ۱۶ تهران

محاسبه شاخص انسداد مسیر اصلاح‌شده

به‌منظور محاسبه شاخص BI_{adj}، پردازش‌های مقدماتی داده‌های مکانی انجام شد تا چهار شاخص کلیدی برای هر قطعه معبر استخراج شود؛ این شاخص‌ها شامل شیب معبر، عرض معبر، میانگین ارتفاع ساختمان‌های مجاور و اتصال‌پذیری شبکه معابر هستند. این شاخص‌ها با دقت بالا محاسبه شدند تا ویژگی‌های فیزیکی متمایز شبکه معابر شهری را به‌خوبی بازنمایی کنند. توزیع فضایی و تغییرات این شاخص‌ها در سطح منطقه ۱۶ در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.



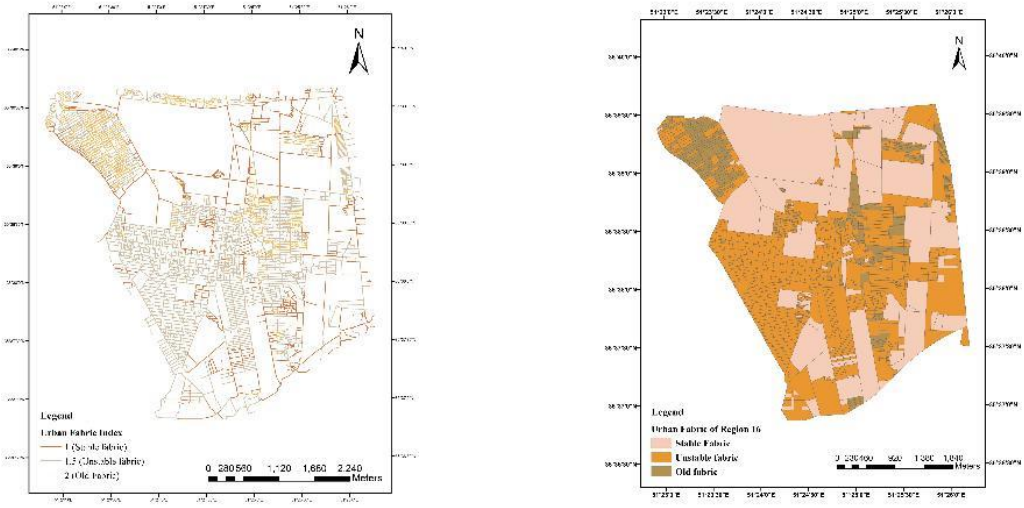
شکل ۳. توزیع فضایی معیارهای: الف. شیب (S)، ب. ارتفاع متوسط ساختمان‌ها (B_H)، ج. عرض معبر (W)، د) اتصال‌پذیری شبکه (C) در منطقه ۱۶ تهران

توزیع معیارها در منطقه ۱۶ تهران نشان‌دهنده چشم‌اندازی با آسیب‌پذیری مورفولوژیک قابل‌توجه است. ازنظر توپوگرافی، هرچند بخش عمده منطقه نسبتاً هموار است، اما وجود شیب‌های تند تا ۶۹/۹۵ درصد در بخش‌های مرکزی و شمال غربی، پتانسیل لغزش آوار را افزایش داده و مانور نیروهای امدادی را با اختلال مواجه می‌کند. ارتفاع ساختمان‌ها، با خوشه‌هایی تا ۸ طبقه، به‌عنوان شاخصی از حجم بالای آوار عمل می‌کند؛ به‌ویژه زمانی که این ساختمان‌ها در مجاورت معابر باریک قرار می‌گیرند، نسبت نامتوازن میان ارتفاع ساختمان‌ها و عرض معابر، به‌طور چشمگیری احتمال مسدود شدن مسیرها را تشدید می‌کند و در بافت‌های مسکونی متراکم، دسترسی در مقیاس خرد و مرحله نهایی امدادرسانی را با اختلال جدی مواجه می‌سازد. اتصال‌پذیری شبکه نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تاب‌آوری معابر ایفا می‌کند. TAZها از شبکه‌های تاب‌آور با الگوهای شطرنجی و پیوسته (نسبت ۱/۶۹) تا ساختارهای آسیب‌پذیر و شبه‌درختی (کمتر از ۱/۱۴) متغیر هستند. در نواحی با اتصال‌پذیری پایین، نبود افزونگی مسیرها موجب می‌شود که انسداد یک معبر واحد بتواند کل یک محله را از دسترس خارج کند. هم‌افزایی این چهار معیار، منجر به شناسایی کریدورهای بحرانی می‌شود که در آن‌ها ترکیب شیب زیاد، عرض کم معبر، ارتفاع بالای ساختمان‌ها و اتصال‌پذیری ضعیف، عملیات امدادی را در ساعت طلایی پس از زلزله به‌طورجدی تهدید می‌کند.

به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای، مقادیر پایه شاخص BI با در نظر گرفتن کیفیت بافت شهری پیرامون معابر (شکل ۴–الف) اصلاح شد. انواع بافت شهری شامل «فرسوده»، «ناپایدار» و «پایدار» به ترتیب ضرایب وزنی ۲، ۱/۵ و ۱ دریافت کردند تا احتمال بالاتر شکست سازه‌ای و تولید آوار در محلات فرسوده و ناپایدار در مدل منعکس شود. این شاخص، کریدورهایی را مشخص می‌کند که در آن‌ها، آسیب‌پذیری فیزیکی با فرسودگی سازه‌ای هم‌پوشانی دارد (شکل ۴–ب) و بدین ترتیب، بخشی از اطلاعات حیاتی برای برنامه‌ریزی هدفمند آمادگی در برابر سوانح، پیش از وقوع آن را فراهم می‌آورد.

توزیع فضایی انواع بافت شهری در منطقه ۱۶ (شکل ۴–الف) نشان‌دهنده حضور قابل‌توجه ساختارهای آسیب‌پذیر است که به‌طور مستقیم در تعدیل BI نقش دارد. تحلیل کمی محدوده موردمطالعه بیانگر آن است که اگرچه بافت‌های پایدار ۴۶ درصد از مساحت منطقه را پوشش می‌دهند، اما سهم منطقه از بافت‌های ناپایدار و فرسوده، درمجموع، بیشتر است (۵۴ درصد). این آسیب‌پذیری در درون شبکه معابر حتی برجسته‌تر است (شکل ۴–ب)؛ به‌طوری‌که از کل طول معابر مورد تحلیل، ۵۹ درصد، از مناطق ناپایدار عبور می‌کنند و ۱۸ درصد، در بافت‌های فرسوده واقع شده‌اند، درحالی‌که تنها ۲۳ درصد از معابر در محدوده بافت‌های پایدار قرار دارند.

همان‌گونه که در شکل ۴–الف مشاهده می‌شود، بافت‌های فرسوده عمدتاً در بخش‌های مرکزی و غربی نواحی مسکونی تمرکز یافته‌اند. این مناطق ازآن‌جهت نگران‌کننده هستند که اغلب با باریک‌ترین قطعات معبری و بالاترین تراکم ساختمانی که پیشتر شناسایی شده بود، هم‌پوشانی دارند. در این پژوهش، بافت فرسوده به‌عنوان بالاترین سطح ریسک در نظر گرفته شده است؛ چراکه به دلیل فرسایش سازه‌ای و فقدان مقاومت لرزه‌ای، بیشترین ضریب وزنی (۲) به آن اختصاص یافته است. در مقابل، بافت‌های پایدار با ضریب ۱ مشخص شده‌اند که بیانگر استحکام سازه‌ای بالاتر آن‌ها است. این طبقه‌بندی نشان می‌دهد که برای ۷۷ درصد از شبکه معابر منطقه، کیفیت نامطلوب بافت پیرامونی، احتمال انسداد مسیر را بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهد و این محلات را به پهنه‌های اولویت‌دار بحرانی برای نوسازی شهری و آمادگی در برابر سوانح تبدیل می‌کند.



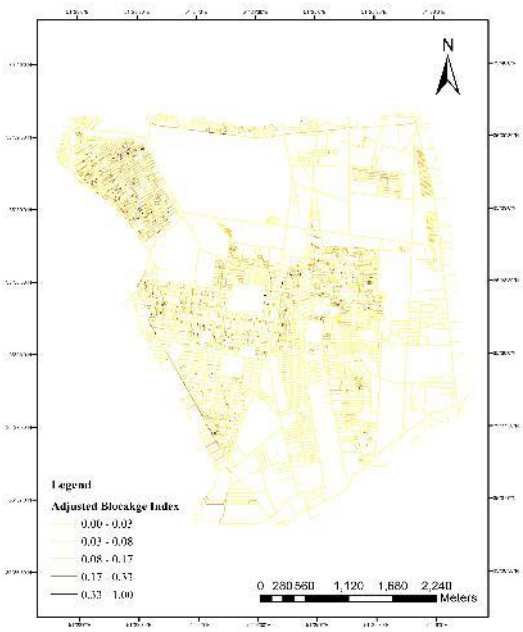
ب الف

شکل ٤. الف. طبقه‌بندی انواع بافت شهری؛ ب. وضعیت قرارگیری معابر در انواع بافت شهری در منطقه ١٦ تهران

پس از ادغام شاخص‌های فیزیکی استانداردشده با ضرایب وزنی مربوط به کیفیت بافت شهری، شاخص انسداد اصلاح‌شده (BI_{adj}) برای کل شبکه معابر منطقه ۱۶ محاسبه شد. این شاخص، مدل پیش‌بینانه نهایی احتمال انسداد مسیر را ارائه می‌دهد. شاخص BI_{adj} با هم‌افزایی آسیب‌پذیری‌های مورفولوژیک و پایداری سازه‌ای، تصویری فضایی و دقیق از نواحی مستعد اختلال عملکرد شبکه معابر در هنگام رخدادهای لرزه‌ای فراهم می‌سازد. نقشه نهایی حاصل، که در شکل ۵ ارائه شده است، قطعات معبری را در سطوح مختلف ریسک، از احتمال انسداد پایین تا بحرانی، طبقه‌بندی می‌کند.

شکل ۵، انجام ارزیابی فضایی از آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه معابر منطقه ۱۶ را امکان‌پذیر می‌سازد. اگرچه بخش قابل‌توجهی از شبکه معابر در بازه کم‌خطر (۰/۰۸–۰) قرار دارد، اما کانون‌های با انسداد بیشتر ($BI_{adj} > 0.33$) به‌وضوح قابل‌شناسایی هستند. این کانون‌ها عمدتاً در بافت‌های مسکونی متراکم بخش‌های شمال غربی و میانی–غربی منطقه تمرکز یافته‌اند. این قطعات پرخطر، که با طیف رنگی تیره‌تر مشخص شده‌اند، نواحی‌ای را نشان می‌دهند که در آن‌ها آسیب‌پذیری‌های مورفولوژیک (شیب زیاد، عرض کم معبر، ارتفاع بالای ساختمان‌ها و اتصال‌پذیری ضعیف شبکه) با ناپایداری سازه‌ای بافت شهری تشدید شده است.

شکل ۵، تضاد آشکاری میان شبکه مویرگی داخلی و معابر شریانی پیرامونی منطقه را آشکار می‌سازد. درحالی‌که کریدورهای اصلی عبوری از تاب‌آوری بالایی برخوردار بوده و مقادیر BI_{adj} نزدیک به صفر را نشان می‌دهند، معابر محلی داخلی، الگویی گسسته از احتمال بالای انسداد را به نمایش می‌گذارند. این الگو بیانگر آن است که در هنگام وقوع یک رویداد لرزه‌ای، اگرچه دسترسی منطقه‌ای به مرزهای منطقه احتمالاً حفظ می‌شود، اما در مقیاس خرد و در مرحله نهایی دسترسی، شبکه معابر محلی توان تأمین ارتباط با قطعات مسکونی را از دست خواهند داد. در این نقاط داغ، احتمال انسداد کامل مسیر در بیشترین مقدار خود قرار دارد؛ به‌طوری‌که تیم‌های امدادی قادر نخواهند بود ازطریق مسیرهای متعارف سواره به جمعیت آسیب‌دیده دسترسی پیدا کنند. این یافته‌ها تمرکز تحلیل را از تاب‌آوری عمومی شهری به سمت مداخلات فضایی هدفمند سوق می‌دهد و قطعات معبری مشخصی را برجسته می‌کند که نیازمند مقاوم‌سازی فوری سازه‌ای یا تعریض هستند تا دسترسی نجات‌بخش در «ساعت طلایی» تضمین شود.



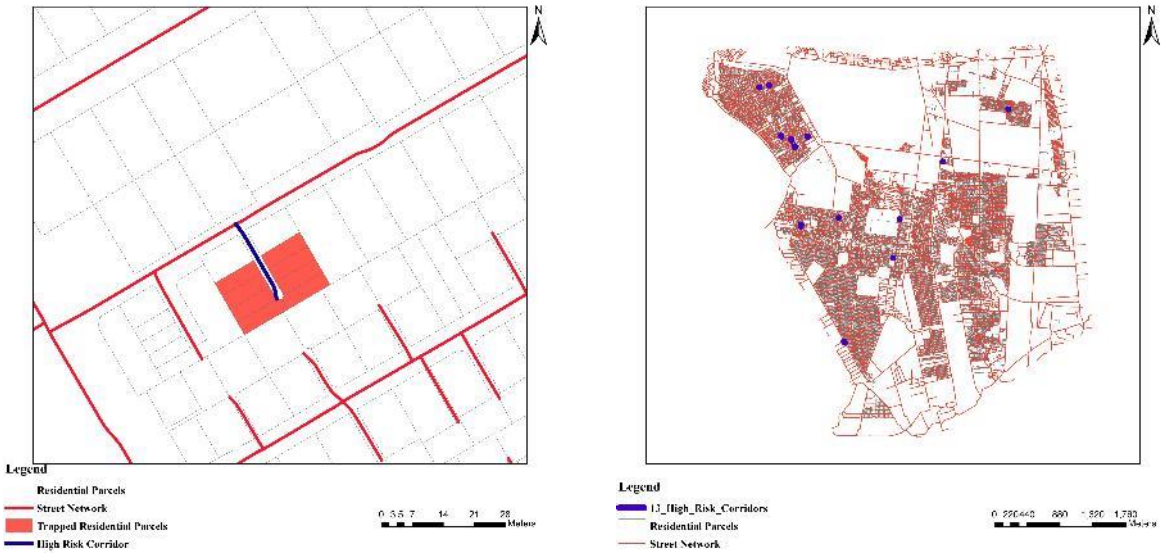
شکل ۵. توزیع فضایی شاخص انسداد اصلاح‌شده (BI_{adj}) در منطقه ۱۶

بحث

به‌منظور شناسایی بحرانی‌ترین پهنه‌های اولویت‌دار برای مداخله اضطراری، آستانه ($BI_{adj} > 0.5$) به‌عنوان معیار انسداد پرخطر تعریف شد. بر اساس این معیار، ۱۳ کوچه مشخص به‌عنوان معابر در معرض ریسک بسیار بالای انسداد کامل، شناسایی شدند. تحلیل هم‌پوشانی فضایی نشان می‌دهد که انسداد این معابر مستقیماً منجر به انزوای ۱۹ قطعه مسکونی شده و ساکنان آن‌ها را به‌طور مؤثر محصور می‌کند. طبق آمار سرشماری سال ۱۳۹۵ تهران، این شرایط، درمجموع، منجر به محروم شدن ۷۲ نفر از دسترسی به خدمات امدادی خواهد شد. بررسی دقیق ترکیب جمعیتی این افراد، نشان‌دهنده توزیع تقریباً برابر جنسیتی شامل ۳۷

زن و ۳۵ مرد است. مهم‌تر آنکه، ۱۷ نفر از این جمعیت در گروه‌های آسیب‌پذیر پرخطر (کودکان زیر ۶ سال و سالمندان بالای ۶۵ سال) قرار دارند که معمولاً در شرایط بحرانی نیازمند رسیدگی پزشکی فوری و تخصصی‌تری هستند. این نتایج نشان می‌دهد که انسداد مسیر صرفاً یک تأخیر لجستیکی نیست، بلکه مانعی تهدیدکننده برای حفظ حیات است که به‌طور نامتناسبی بر افرادی اثر می‌گذارد که کمترین توانایی تخلیه مستقل را دارند؛ امری که ضرورت اتخاذ راهبردهای کاهش ریسک محلی و فوری را برای این ۱۳ کریدور شناسایی‌شده، برجسته می‌سازد.

شکل ۶–الف توزیع فضایی ۱۳ کریدور پرخطر شناسایی‌شده در سطح منطقه ۱۶ تهران را نشان می‌دهد، درحالی‌که شکل ۶–ب نمایی در مقیاس خرد از یکی از این کریدورها ارائه می‌کند و واحدهای مسکونی مشخصی را نشان می‌دهد که دسترسی به آن‌ها براثر شکست پیش‌بینی‌شده ساختمان‌های مجاور، به‌طور کامل ازطریق شبکه معابر اصلی، قطع خواهد شد. شکل ۶–الف همچنین نشان می‌دهد که کریدورهای پرخطر به‌صورت تصادفی در منطقه پراکنده نشده‌اند، بلکه عمدتاً در بافت‌های متراکم و قدیمی بخش‌های شمال غربی و مرکزی منطقه خوشه‌بندی شده‌اند. تمرکز این نقاط داغ در محلات مشخص، بیانگر پهنه‌های موضعی با آسیب‌پذیری لرزه‌ای بالا است که در آن‌ها اثر تجمعی عرض کم معابر و ناپایداری سازه‌ای ساختمان‌ها، ریسک شکست شبکه معابر را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. با شناسایی دقیق این مکان‌ها، مدل ارائه‌شده از یک ارزیابی کلی در مقیاس منطقه عبور کرده و به یک نقشه عملیاتی دقیق تبدیل می‌شود که به برنامه‌ریزان شهری امکان می‌دهد این ۱۳ موقعیت مشخص را برای مداخلات سازه‌ای فوری یا ایجاد مسیرهای جایگزین دسترسی اضطراری در اولویت قرار دهند.



ب الف

شکل٦. الف. توزیع فضایی ۱۳ کریدور پرخطر شناسایی‌شده؛ ب. شناسایی قطعات مسکونی محصورشده (قرمز) در درون یک کریدور پرخطر (آبی) در منطقه ١٦ تهران

به‌منظور اعتبارسنجی بصری نتایج مدل، یکی از بحرانی‌ترین نقاط داغ شناسایی‌شده، انتخاب شد که در مختصات ۳۵٫۶۵۱۷ درجه شمالی و ۵۱٫۳۹۱۷ درجه شرقی و در محدوده محله نازی‌آباد قرار دارد. این موقعیت مشخص در بلوک‌های مسکونی متراکم واقع شده که از شرق به خیابان شهید رجایی و از غرب به خیابان اکبر مشهدی (پارس) محدود می‌شود. بررسی تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، وجود یک مورفولوژی به‌شدت آسیب‌پذیر را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که این کریدور یک کوچه مسکونی باریک با عرض تقریبی ۴ تا ۶ متر است که توسط ساختمان‌هایی با ارتفاع ۴ تا ۵ طبقه احاطه شده است.

مجاورت این محدوده با شریان‌های اصلی حمل‌ونقل نظیر خیابان شهید رجایی، یک ریسک راهبردی مهم را برجسته می‌سازد؛ به این معنا که اگرچه ممکن است مسیر اصلی همچنان باز بماند، اما دسترسی داخلی ازطریق این کوچه‌های باریک به هسته مسکونی نازی‌آباد به‌طور کامل قطع خواهد شد. این اعتبارسنجی در مقیاس میدانی با مقادیر بالای شاخص انسداد

اصلاح‌شده ($BI_{adj} > 0.5$) کاملاً همخوانی دارد و تأیید می‌کند که مقادیر بالاتر شاخص انسداد در این بخش از نازی‌آباد، یک سناریوی «بن‌بست عملکردی» برای خدمات امدادی ایجاد می‌کند.

نکته حائز اهمیت در تحلیل نتایج، کارآمدی برتر شاخص پیشنهادی در مقایسه با شاخص‌های سنتی مبتنی بر نسبت ارتفاع ساختمان به عرض معبر است. محاسبات انجام‌شده نشان داد که با استفاده از شاخص‌های متعارف مانند نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان، تنها دو مقطع بسیار محدود در کل منطقه ۱۶ به‌عنوان نقاط دارای ریسک انسداد شناسایی می‌گردند. این در حالی است که هیچ‌یک از این نقاط در بافت‌های متراکم و حیاتی محله نازی‌آباد (به‌عنوان یکی از قطب‌های جمعیتی و پر ریسک منطقه) قرار ندارند. در مقابل، شاخص انسداد مسیر پیشنهادی، با ادغام هم‌زمان پایداری سازه‌ای و ویژگی‌های مورفولوژیک، توانسته است به‌درستی شریان‌های منتهی به قطعات مسکونی محله نازی‌آباد را به‌عنوان نقاط بحرانی شناسایی کند. این تضاد در نتایج نشان می‌دهد که تکیه بر شاخص‌های ساده و تک‌بعدی، می‌تواند منجر به کم‌برآوردی خطر[9] در محلات مسکونی متراکم شود، درحالی‌که شاخص پیشنهادی با حساسیت بالاتر نسبت به پیچیدگی‌های فرم شهری، تصویر واقع‌گرایانه‌تری از محدودیت‌های دسترسی در سناریوی بحران ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با معرفی و به‌کارگیری شاخص انسداد اصلاح‌شده، گامی اولیه در جهت ارزیابی نظام‌مند آسیب‌پذیری شبکه معابر شهری در برابر مخاطرات لرزه‌ای برداشته است. با ادغام عوامل توپوگرافیک، مورفولوژی معابر و ویژگی‌های ساختمانی با شاخص پایداری سازه‌ای بافت شهری، این تحقیق توانسته است گلوگاه‌های بحرانی شبکه معابر منطقه ۱۶ تهران را به‌صورت فضایی و کمّی شناسایی کند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه شبکه شریانی منطقه از تاب‌آوری نسبی برخوردار است، حدود ۷۷ درصد از طول معابر محلی در پهنه‌های ناپایدار یا فرسوده قرار دارند و ۱۳ کریدور مشخص، ریسک بالایی از انسداد کامل مسیر را در سناریوی وقوع زلزله نشان می‌دهند. بررسی توزیع فضایی آسیب‌پذیری نشان داد که ۱۹ قطعه مسکونی شامل ۷۲ نفر ساکن، ازجمله ۱۷ فرد در گروه‌های آسیب‌پذیر پرخطر، در «ساعت طلایی» پس از رویداد لرزه‌ای، عملاً با قطع دسترسی به خدمات امدادی مواجه خواهند شد.

نتایج نشان داد که شاخص پیشنهادی با ترکیب مؤلفه‌های مورفولوژیک و سازه‌ای، قادر است گلوگاه‌هایی را شناسایی کند که در شاخص‌های متداول (صرفاً مبتنی بر آوار) به دلیل نادیده گرفتن شیب یا عرض معبر، ایمن تلقی می‌شدند. بنابراین، این شاخص با پوشش هم‌زمان ضعف‌های کالبدی و سازه‌ای، تحلیلی واقع‌گرایانه‌تر از پیچیدگی‌های انسداد در بافت‌های فرسوده ارائه می‌دهد.

کمّی‌سازی ریسک انسداد مسیر ازطریق شاخص پیشنهادی، امکان شناسایی قطعات مسکونی و معابر بحرانی را فراهم می‌سازد که در شرایط اضطراری، بیشترین احتمال اختلال در دسترسی امدادی را دارند. بااین‌حال، باید توجه داشت که شاخص ارائه‌شده، نه به‌عنوان یک ابزار نهایی، بلکه به‌مثابه نقطه آغاز توسعه چارچوب‌های تحلیلی جامع‌تر قابل ارزیابی است. یافته‌های این پژوهش، بستری مناسب برای انجام مطالعات تکمیلی و چندبعدی فراهم می‌کند که در آن می‌توان داده‌های پیشرفته‌تری نظیر ارزیابی دقیق ایمنی سازه‌ای ساختمان‌ها، ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و اجتماعی–اقتصادی، الگوهای زمانی جمعیت، و کاربری‌های حساس شهری را به مدل اضافه نمود تا دقت و واقع‌گرایی شاخص‌های آینده افزایش یابد.

درنهایت، توسعه یک چهارچوب مکانی یکپارچه و چندلایه، مبتنی بر تلفیق شاخص‌های کالبدی، سازه‌ای و انسانی، می‌تواند نقشی کلیدی در تدوین راهبردهای پیش‌دستانه و هدفمند مدیریت بحران ایفا کند و به‌طور معناداری به ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر سوانح لرزه‌ای منجر شود. نقشه‌برداری با وضوح مکانی بالا از ۱۳ نقطه بحرانی شناسایی‌شده در این پژوهش، ابزار عملی ارزشمندی را در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان شهری قرار می‌دهد تا مداخلات نوسازی شهری، مقاوم‌سازی معابر و استقرار بهینه

[9] Risk Underestimation

منابع امدادی را به‌صورت اولویت‌دار هدایت کرده و از تداوم دسترسی نجات‌بخش حتی در آسیب‌پذیرترین محلات شهری اطمینان حاصل کنند.

شاخص BI_{adj} پیشنهادی، تنها یک شاخص اولیه و کم‌هزینه برای تشخیص سریع معابر شهری با احتمال انسداد بالاتر نسبت به سایر معابر با استفاده از داده‌های موجود و در دسترس است که می‌تواند در مطالعات آتی با به‌کارگیری پارامترهای مکمل دیگری مانند پارامترهای دقیق سازه‌ای، تراکم ساختمانی، تراکم شبکه معابر، تراکم جمعیت و غیره توسعه داده شود. همچنین با در دست داشتن اطلاعات کافی از میزان آثار به‌جامانده از وقوع زلزله بر انسداد معابر در مناطق شهری، می‌توان فرایند اعتبارسنجی و ارزیابی شاخص را اصلاح نمود. امری که در پژوهش پیش‌رو به دلیل فقدان داده، به‌صورت بصری و محدود و با استفاده از تصاویر Google Earth صورت گرفته است. از سوی دیگر، ترکیب پارامترها با استفاده از روش‌های وزن‌دهی مبتنی بر MCDM نیز می‌تواند منجر به تولید شاخص انسداد مسیر منطبق بر واقعیت منطقه شود.

References

Alizadeh, M., Zabihi, H., Rezaie, F., Asadzadeh, A., Wolf, I. D., Langat, P. K., Khosravi, I., Beiranvand Pour, A., Mohammad Nataj, M., & Pradhan, B. (2021). Earthquake vulnerability assessment for urban areas using an ANN and hybrid SWOT–QSPM model. *Remote Sensing, 13*(22), 4519.

Ardebili Pour, M., Ghiasi, M. B., & Karkehabadi, A. (2025). Applying machine learning tools for urban resilience against floods. *Proceedings of the International Conference on Applied Engineering and Computer Technologies (ICAECT)*. IEEE.

Aydin, N.Y., Duzgun, H.S., Wenzel, F., & Heinimann, H.R. (2018). Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards. *Nat. Hazards, 91*, 37–68.

Becker, D., Schneiderbauer, S., Forrester, J. M. & Pedoth, L. (2015) Guidelines for development of indicators, indicator systems and provide challenges. *CRED, Louvain*, 128pp.

Bitarafan, M., Amini Hosseini, K., Hashemkhani Zolfani, S., & Ziari, K. (2025). Evaluating earthquake resilience in urban areas: A fuzzy RANCOM approach. *Environment, Development and Sustainability*. Springer.

Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A., & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthq. Spectra, 19*, 733–752.

Chapagain, N.K. (2016). Reflections on the Built Environment and Associated Practices. *Master of Science in Energy for Sustainable Social Development (MSESSD) Programme: Kirtipur, Nepal, 2*.

Deshkar, S., Hayashi, Y., & Mori, Y. (2011). An alternative approach for planning the resilient cities in developing countries. *International Journal of Urban Sciences, 15(1)*, 1–14.

Dragovi´c, N., Vasiljevi´c, Đ., Stankov, U., & Vuji˘ci´c, M. (2019). Go social for your own safety! Review of social networks use on natural disasters–case studies from worldwide. *Open Geosci, 11*, 352–366.

Gaillard, J.-C., & Texier, P. (2010). Religions, natural hazards, and disasters: An introduction. *Religion, 40*(2), 81–84.

Meimandi Parizi, S., Taleai, M., & Sharifi, A. (2022). A GIS-based multi-criteria analysis framework to evaluate urban physical resilience against earthquakes. *Sustainability, 14*(9), 5034.

Rus, K., Kilar, V., Koren, D. (2018). Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: A new literature review. *Int. J. Disaster Risk Reduct, 31*, 311–330.

Sharifi, A. (2019). Resilient urban forms: A macro-scale analysis. *Cities, 85*, 1–14.

Shen, S., Cheng, C., Song, C., Yang, J., Yang, S., Su, K., Yuan, L., & Chen, X. (2018). Spatial distribution patterns of global natural disasters based on biclustering. *Nat. Hazards, 92*, 1809–1820.

Silva, M.C., Horta, I.M., Leal, V., Oliveira, V. (2017). A spatially-explicit methodological framework based on neural networks to assess the effect of urban form on energy demand. Appl. *Energy, 202*, 386–398.

Sorrentino, L., & Giresini, L. (2024). Risk assessment of road blockage after earthquakes. *Buildings, 14*(4), 984.

Wang, X., Wu, S., Zhao, Z., Guo, H., & Chen, W. (2024). Optimization of emergency rescue routes after a violent earthquake. *Natural Hazards, 121*(12), 4585–4613.

Zekry, M., Al Hagla, K., Saadallah, D.M. (2020). Urban Governance as a Tool for Enhancing Resilient Urban Form: Case Study Alexandria, Egypt. In Proceedings of the REAL CORP 2020, 25th International Conference on Urban Development, Vienna, Austria, 15–18 April 2020.

Zhang, S., Li, S., Zhai, C., & Xiao, J. (2024). An integrated seismic assessment method for urban buildings and roads. *International Journal of Disaster Risk Science, 15*(6), 935–953.