تحلیلی شبکه‌مبنا از وضعیت آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر شهری و قابلیت دسترسی پس از وقوع زلزله

مطالعه‌ی موردی: شهر الیگودرز

عنایت اله میرزایی*: دانشجوی دکتری شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،
E_mirzaei@arch.iust.ac.ir

مهران علی الحسابی: استادیار شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۱

چکیده

بر اساس چرخه‌ی مدیریت بحران، شبکه‌ی معابر در مرحله‌ی واکنش بلافاصله بعد از زلزله، به‌منظور عملیات امداد و نجات و در مرحله‌ی بازسازی برای بازگرداندن جابه‌جایی‌ها به حالت عادی، نقش اساسی ایفا می‌کند. در همین راستا هدف این پژوهش تحلیل وضعیت آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر شهر الیگودرز و پس از آن ارزیابی قابلیت دسترسی نقاط مختلف شهر پس از وقوع زلزله است. برای این منظور از ترکیب دو روش تحلیل شبکه و تحلیل فضایی (تحلیل‌های همپوشانی و تحلیل هزینه‌ی مسافت) استفاده شده است. در این پژوهش در گام اول با مروری بر پیشینه‌ی تحقیق و با تمرکز بر رویکردهای شبکه‌مبنا، سه دسته متغیر مربوط به ویژگی‌های بافت پیرامون معابر، ساختار توپولوژیکی شبکه و ویژگی‌های عملکردی آن تبیین شده است. برخلاف مطالعات قبلی در انتخاب این متغیرها وضعیت هر معبر در پیوند با کل شبکه مد نظر قرار گرفته است. در گام دوم پس از ترسیم ساختار انتزاعی (گراف) شبکه و وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از ترکیب دو روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و توابع تحلیل همپوشانی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌ی آسیب‌پذیری معابر شهر در مقیاسی چهار درجه‌ای ارائه شده است. نتایج این مرحله نشان می‌دهد حدود ۴۲ پیوند که مجموعاً حدود ۱۱٫۵ درصد طول کل معابر شهر را تشکیل داده در بالاترین درجه‌ی آسیب‌پذیری قرار دارند. در نهایت نیز با استفاده از تابع تحلیل فضایی هزینه‌ی مسافت و با سناریوی حذف آسیب‌پذیرترین معابر، وضعیت قابلیت دسترسی پس از وقوع زلزله تحلیل شده است. با حذف این معابر از شبکه، قابلیت دسترسی در برخی از نقاط شهر- عمدتاً مناطق مرکزی شهر- بین۴۰ تا ۱۲۰ متر کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: *شبکه‌ی معابر، زمین‌لرزه، آسیب‌پذیری، قابلیت دسترسی، هزینه‌ی مسافت*

A network-based analysis of road network vulnerability and urban space accessibility following earthquake

(Case study: the city of Aligoodarz)

Enayat Mirzaei[1]*, Mehran Alalhesbi[2]

Abstract

According to crisis-management cycle, road network substantially plays the important role in reduction of negative impact of earthquake. In fact, road network fundamentally promotes emergency aids during earthquake and facilitates mobility for citizens after the earthquake. This study aims to analyze vulnerability of Aligoodarz's road network and then evaluates urban space accessibility following earthquake. In this regard, combinations of graph-theory concepts and GIS-based spatial analysis are used. In the first step, three categories of criteria for the vulnerability of road network have been identified based on the relevant the theoretical foundation. These criteria are relating to vulnerability of build-up area surrounding of roads, topological properties of road network, and functional properties of road network. In the second step, real-world road network is converted to graph network and then the importance of each criterion is achieved based on Analytic Hierarchy process (AHP). In continues, by using AHP's results in GIS spatial analysis, vulnerability map for road network is produced, on a four-point ordinal scale. This map shows that about 42 links, which constitute 11.5 percent of total length of roads have the highest degree of vulnerability. In final step, the highest vulnerable roads (links) are eliminated, and then urban space accessibility is computed using a cost-distance algorithm. The accessibility map also shows that accessibility in some urban areas - mainly central areas - reduces between 40 to 120 meters.

Key words: *Road network, Earthquake, Vulnerability, Accessibility, Cost-distance.*

1 Ph.D. Candidate, Faculty of Architecture and Environmental design, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran; Email: E_mirzaei@arch.iust.ac.ir
2 Assistant Professor, Faculty of Architecture and Environmental design, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

مقدمه

کشور ما و به تبع آن شهر الیگودرز به دلیل قرارگیری در کمربند لرزه‌خیز همواره در معرض تهدید زلزله قرار داشته است. به همین علت برنامه‌ریزی با هدف مدیریت بحران و کاهش آسیب‌پذیری همواره از دغدغه‌های برنامه‌ریزان و مسئولان شهری بوده است. در همین راستا آسیب‌پذیری کالبدی شهر به‌منزله‌ی مشهودترین شکل آسیب‌پذیری ناشی از زمین‌لرزه در بسیاری از مطالعات مورد توجه بوده است [۱، ۲، ۳، ۴]. شناخت و ارزیابی آسیب‌پذیری شهر پس از وقوع زلزله بستگی به شناخت جامع از نحوه‌ی آسیب‌پذیری عناصر مختلف کالبدی تشکیل‌دهنده‌ی شهر دارد. در این میان آسیب‌پذیری شبکه‌ی ارتباطی به‌منزله‌ی یکی از اجزای کالبدی شهر به علت عملکرد و نقش آن در ساختار کالبدی - فضایی شهر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴]. با رجوع به چرخه‌ی مدیریت بحران و پس از وقوع زلزله، شبکه‌ی ارتباطی در دو مرحله‌ی واکنش و بازسازی نقش اساسی ایفا می‌کند. در مرحله‌ی واکنش باید به نحو مطلوبی عملیات امداد و نجات شهروندان، عملیات آواربرداری و پاک‌سازی، انتقال شهروندان از محیط‌های خطرزا و غیره را تسهیل کند و در مرحله‌ی بازسازی نیز باید امکان سفر و جابه‌جایی افراد به نقاط مختلف شهر را مانند شرایط قبل از وقوع زلزله تأمین کند. بنابراین در صورت آسیب و اختلال در شبکه‌ی معابر، قابلیت دسترسی به‌منزله‌ی مهم‌ترین وظیفه‌ی شبکه‌ی ارتباطی به‌طور عمده کاهش می‌یابد. انسداد شبکه‌ی معابر یکی از مصادیق آسیب‌پذیری و اختلال در شبکه‌ی معابر است که می‌تواند به دلایل مختلفی به وجود آید. در شرایط عادی انسداد و قطع برخی معابر ممکن است به دلایل عوامل درونی از جمله تصادفات، نقص فنی، حجم بالای ترافیک و غیره اتفاق افتد، اما در شرایط بحران ناشی از زلزله نیز هم به دلیل عوامل بیرونی مانند تخریب ساختمان‌های اطراف و هم به دلیل عوامل درونی مانند غیرعادی شدن نحوه‌ی عبور و مرور، میزان آسیب‌پذیری و احتمال انسداد به‌شدت افزایش می‌یابد. در همین راستا پژوهش پیش روی دو هدف اساسی دارد: ابتدا تلاش دارد آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر شهر را پس از وقوع زلزله تحلیل کند و سپس با فرض انسداد مستعدترین معابر، قابلیت دسترسی نقاط مختلف شهر را تحلیل و ارزیابی کند. مسلماً در دست‌یابی به این اهداف، تعیین عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر از چالش‌های اساسی است، زیرا ضمن درهم‌تنیدگی عوامل اخلال‌کننده، در حالی‌که آسیب‌پذیری در مقیاس معبر[1] مطرح است اما نمی‌توان یک معبر را عنصری مجرد و بدون ارتباط با سایر معابر شبکه تحلیل کرد. لذا این مقاله با رویکردی شبکه‌مبنا و در فرایند پژوهش تلاش دارد به‌صورت مشخص به سه سؤال کلیدی پاسخ دهد:

۱. با چه رویکردها و شاخص‌هایی می‌توان به‌صورت شبکه‌مبنا آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر را پس از زلزله تحلیل کرد؟
۲. با ترکیب نهایی شاخص‌های متنوع، کدام معابر شهر الیگودرز در معرض آسیب‌پذیری بیشتری قرار دارد؟
۳. با فرض انسداد آسیب‌پذیرترین معابر قابلیت دسترسی نقاط مختلف شهر الیگودرز چگونه تغییر می‌یابد؟

بررسی پیشینه‌ی تحقیق نشان می‌دهد که مطالعات داخلی کمتر آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر را با رویکرد شبکه‌مبنا مد نظر قرار داده‌اند و عمدتاً به آسیب‌پذیری بافت شهری، مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اورژانسی در مواقع بحران پرداخته‌اند [۱، ۲، ۳]. در ارتباط با شبکه‌ی حمل‌ونقل، عزیزی و همافر [۴] بر اساس ۱۰ معیار آسیب‌پذیری که صرفاً به ویژگی‌های معبر مرتبط است به آسیب‌شناسی لرزه‌ای معابر شهری در مقیاس محله پرداخته‌اند. بر اساس مطالعه‌ی آن‌ها از میان ۱۰ معیار آسیب‌پذیری منتخب پژوهش، معیارهای جمعیت مرتبط با معبر، موقعیت و ویژگی‌های زیرساخت‌های شهری و شیب معبر از بیشترین اهمیت و معیارهای دسترسی و کیفیت کف معبر از کمترین اهمیت در تعیین سطح آسیب‌پذیری معبر برخوردار هستند. مطالعات خارجی نیز به صورت مشخص‌تر با دو رویکرد توپولوژیکی و سیستم‌مبنا به بررسی آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر پرداخته‌اند. دمسار و همکاران [۵] با استفاده از رویکرد توپولوژیکی شبکه‌ی معابر متروپل هلسینکی فنلاند را مطالعه کرده‌اند. این شبکه شامل تقریباً ۷۰۰۰۰ معبر است و به‌منزله‌ی یک شبکه‌ی غیر جهت‌دار و غیر وزن‌دار تحلیل شده است. نویسندگان چنین بحث می‌کنند که معابر قطع‌کننده (معابری که اگر حذف شود شبکه به دو زیر شبکه‌ی غیرمتصل تبدیل می‌شود) یا معابری با بالاترین درجه‌ی میانی[2] عناصر حیاتی هستند که باید در مطالعه‌ی آسیب‌پذیری مشخص گردند. همچنین ماری توییت و ماهمسانی [۶] یک شاخص آسیب‌پذیری ارائه می‌کنند که جریان ترافیک، ظرفیت لینک‌ها، زمان سفر و قابلیت دسترسی به سایر مسیرهای جایگزین[3] را مورد توجه قرار می‌دهد. تیلور و همکاران [۷] معیارهای متنوعی از کاهش قابلیت دسترسی ارائه می‌دهند که اثرات معابر مختل شده را ارزیابی می‌کند.

در مجموع پژوهش کاربردی پیش روی تلاش دارد با ترکیب رویکردهای تحلیل فضایی[4] و تحلیل شبکه‌ای[5] ابتدا با مروری بر پیشینه‌ی تحقیق از جمله رویکردهای مختلف آسیب‌پذیری شبکه‌ی حمل‌ونقل، شاخص‌های متنوع آسیب‌پذیری معابر را تعیین کند و سپس با وزن‌دهی و ترکیب نهایی آن‌ها میزان آسیب‌پذیری هر یک از معابر شهر را درجه‌بندی کند. در گام بعدی نیز سعی دارد با فرض انسداد معابر با بالاترین درجه‌ی آسیب‌پذیری، قابلیت دسترسی نقاط مختلف شهر را با استفاده از الگوریتم هزینه‌ی مسافت[6] قبل و بعد از وقوع زلزله تحلیل و ارزیابی کند.

پیشینه‌ی تحقیق

تاب‌آوری و آسیب‌پذیری سیستم حمل‌ونقل

به علت وابستگی بسیاری از زیرساخت‌ها و عملکردهای یک جامعه به سیستم حمل‌ونقل ضرورت دارد تا آسیب‌پذیری و تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل تحلیل و بر آن اساس راه‌حل‌های استقامت و تاب‌آوری ارائه گردد. در اینجا به‌صورت خلاصه به

مفاهیم تاب‌آوری و آسیب‌پذیری به‌ویژه در حوزه‌ی حمل‌ونقل اشاره می‌شود.

در پیشینه‌ی تحقیق دو تعریف موازی از تاب‌آوری ارائه شده است. تعریف اول مربوط به مدت زمانی است که یک سیستم بعد از اختلال به حالت تعادل بر می‌گردد [۸]. بنابراین تاب‌آوری می‌تواند به‌وسیله‌ی یک زمان بازگشت- زمان مورد نیاز برای تغییر از حالت زوال به یک موقعیت خاص از ارزش اولیه- تخمین زده شود. تعریف دوم مربوط به استقامت سیستم‌ها و توانایی آن‌ها در جذب تغییرات و اختلالات و همچنین حفظ همان روابط بین مردم یا متغیرهای کشور است [۹]. معانی متفاوت از تاب‌آوری، دیدگاه‌های متفاوتی درباره‌ی شرایط پایداری یا شرایط تعادل یک سیستم منعکس می‌کند. از یک طرف، تعریف اول از تاب‌آوری رفتار سیستم را نزدیک به یک شرایط پایدار شناخته شده بررسی می‌کند و بر حفظ کارایی در عملکرد تأکید می‌کند. از طرف دیگر، تعریف دوم دیگر وضعیت‌های پایداری و خصوصیات مرزهای بین این وضعیت‌ها را بررسی می‌کند و روی حفظ عملکرد در سیستم تمرکز می‌کند. تفاوت در رویکردها روی درک، مدیریت یا پایداری سیستم‌ها تأثیر می‌گذارد.

تصویر ۱ ویژگی‌های کلیدی از تعریف تاب‌آوری را نشان می‌دهد. این رویکرد عمدتاً به‌منظور اندازه‌گیری تاب‌آوری یک زیرساخت (مانند سیستم حمل‌ونقل) در هنگام یک سانحه‌ی طبیعی مثل زلزله استفاده شده است. این نمودار کیفیت یا عملکرد زیرساخت‌ها را با از دست رفتن ۵۰ درصد از میزان آن ترسیم می‌کند. مثلث نشان داده شده در نمودار میزان فقدان عملکرد ناشی از آسیب‌دیدگی یا اختلال و همچنین الگوی ترمیم و بهبودی آن را در طول زمان نشان می‌دهد. در واقع از این نمودار استفاده شده است تا عملکرد یک سیستم را بعد از حادثه و همچنین مقدار زمانی که طول می‌کشد تا یک سیستم به سطح عملکردی قبل از حادثه برسد، اندازه‌گیری کند [۱۰].

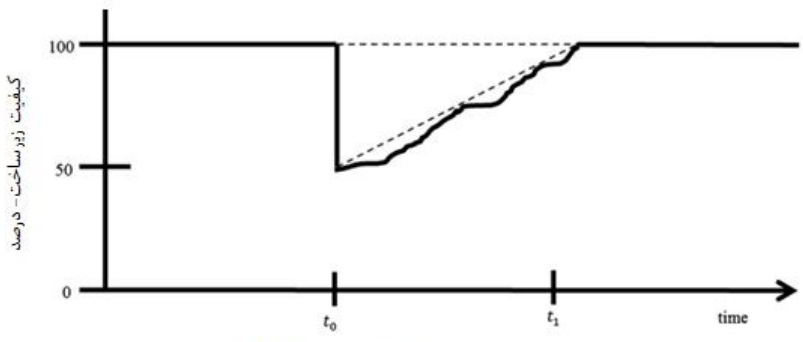
تاب‌آوری و آسیب‌پذیری دو مفهوم بسیار نزدیک به هم است که در ادبیات مربوط به حمل‌ونقل نیز به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۱]. برای آسیب‌پذیری سیستم حمل‌ونقل تعریف پذیرفته‌شده‌ی رایجی وجود ندارد. اما تعریف پیشنهادی بردیکا [۱۲] غالباً در ادبیات تحقیق بیان شده است. بر اساس آن «آسیب‌پذیری در سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای استعداد یک حادثه است که می‌تواند منجر به کاهش قابل ملاحظه در قابلیت سرویس‌دهی شبکه شود». این تعریف از آسیب‌پذیری به‌نوعی برای دیگر گزینه‌های حمل‌ونقل نیز معتبر است. در مقایسه‌ی تحلیل آسیب‌پذیری و تاب‌آوری، مهندسان تاب‌آوری چارچوب‌های اجتماعی- تکنیک (روش) گسترده‌تری را پیشنهاد می‌کنند تا از عهده‌ی تهدیدها و اختلالات زیرساختی برآیند. این چارچوب شامل آمادگی[۷]، واکنش[۸] ، بهبود[۹] و انطباق[۱۰] است [۱۱]. هولناگل[۱۱][۱۳] برای این موضوع از تعبیر چهار شالوده‌ی تاب‌آوری استفاده می‌کند: دانستن چیزی که باید انجام شود (واکنش)، چیزی که باید جستجو شود (پایش)، چیزی که قابل انتظار است (پیش‌بینی) و دانستن چیزی که اتفاق افتاده است (یادگیری). بر اساس این تعریف، تحلیل آسیب‌پذیری در ارتباط با قابلیت دانستن چیزی است که قابل انتظار است. آسیب‌پذیری یکی از پیش‌نیازهای مهم برای اقدامات عملیاتی است [۱۳]. این چارچوب بیانگر نقش مطالعات آسیب‌پذیری در هدف کلی تقویت تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل است [۱۱].

رویکردهای تحلیل آسیب‌پذیری شبکه‌ی حمل‌ونقل

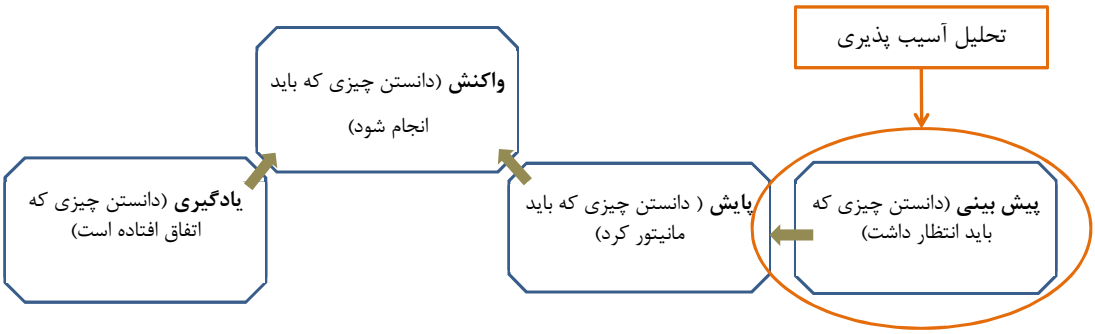
در دهه‌های اخیر پژوهش‌های زیادی درباره‌ی آسیب‌پذیری سیستم حمل‌ونقل صورت گرفته است. با مطالعه‌ی آن‌ها می‌توان گفت دو رویکرد با برهم‌کنش کم قابل تبیین است.

رویکرد اول تحلیل آسیب‌پذیری توپولوژیکی از شبکه‌ی حمل‌ونقل است. در این رویکرد شبکه‌ی حمل‌ونقل واقعی به شکل یک شبکه‌ی انتزاعی (گراف) نمایش داده می‌شود. در واقع این شبکه یک مجموعه از گره‌ها (V) و مجموعه‌ای از پیوندها (L) با مختصات $G = (V, L)$ است. شبکه می‌تواند بدون جهت (ترتیب خاصی بین گره‌های هر پیوند فرض نمی‌شود) یا جهت‌دار (یک گره شروع و پایان برای هر پیوند وجود دارد) باشد. همچنین هر شبکه می‌تواند غیر وزن‌دار (شبکه‌ای از پیوندها با طول یکسان) یا وزن‌دار (شبکه‌ای از پیوندها با طول غیریکسان) باشد.

در رویکرد توپولوژیکی با در نظر گرفتن یک شبکه‌ی به هم پیوسته G، فاصله‌ی d_{ij} بین هر جفت گره i و j می‌تواند به‌منزله‌ی کوتاه‌ترین فاصله بین همه‌ی مسیرهای ممکن بین گره‌ها تعریف شود که این فاصله در شبکه‌ی غیر وزن‌دار برابر تعداد پیوندهای تشکیل‌دهنده‌ی مسیر و در شبکه‌ی وزن‌دار برابر مجموع فاصله‌ی پیوندها است.



تصویر ۱: مثلث تاب‌آوری [۱۰]



تصویر ۲: جایگاه تحلیل آسیب‌پذیری در تحلیل تاب‌آوری [۱۱]

بنابراین شاخص کارایی (هزینه) برای شبکه، فاصله‌ی میانگین بین همه‌ی جفت گره‌ها است و بر اساس رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود [۱۱]:

رابطه‌ی ۱ :

$$c = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j} dij$$

در رابطه‌ی ۱، n تعداد گره‌های شبکه است. در صورت اختلال در شبکه ممکن است که شبکه پیوسته نباشد و در نتیجه اندازه‌ی فوق نامتناهی شود [۱۱]. لاتورا و مارچیوری [۱۴] یک شاخص کارایی را معرفی کردند که میانگین معکوس فاصله بین جفت گره‌ها را محاسبه می‌کند (رابطه‌ی ۲). در این شاخص در صورتی که دو گره i و j متصل نباشند معکوس فاصله معادل صفر است.

رابطه‌ی ۲:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j} \frac{1}{dij}$$

رویکرد دوم که می‌تواند تحلیل آسیب‌پذیری سیستم‌مبنا از شبکه‌ی حمل‌ونقل نامیده شود، ساختار بیشتری از سیستم حمل‌ونقل واقعی را در مدل‌های عرضه و تقاضا بیان می‌کند. اما در این رویکرد نیز شبکه‌ی حمل‌ونقل همچنان به شکل یک شبکه‌ی انتزاعی (گراف) مدل می‌شود. شبکه معمولاً وزن‌دار است و وزن پیوندها معادل طول واقعی، زمان و هزینه‌های سفر در هر پیوند یا ترکیبی از آن‌ها تحت عنوان هزینه‌های تعمیم داده شده است [۱۵]. تقاضای سفر نیز غالباً از حیث تولید و جذب سفر، مقصد سفر و وسیله‌ی سفر نیز در این رویکرد مدل می‌شود. علاوه بر این، مسیر انتخابی نیز می‌تواند با تعادل شبکه پس از در نظر گرفتن برهم‌کنش ازدحام‌ها و تأخیرها مدل شود.

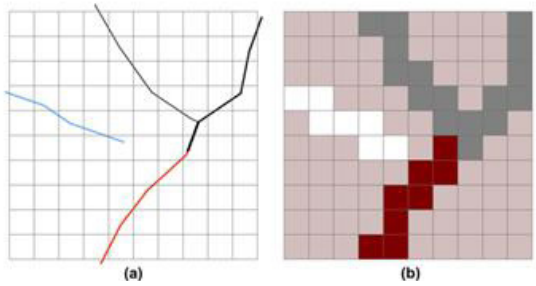
مهم‌ترین مزیت رویکرد توپولوژیکی مربوط به استفاده‌ی آن در هنگام محدودیت داده‌ها است. سناریوهای آسیب‌پذیری به‌وسیله‌ی حذف تصادفی گره‌ها یا پیوندها با توجه به برخی از استراتژی‌های حمله بر پایه‌ی معیارهای مرکزیت یا میانه بودن به‌آسانی قابل محاسبه است. علاوه بر این وضوح در متدلوژی (روش) و نیاز محدودتر به داده، این رویکرد را به‌صورت محاسباتی واقع‌گراتر می‌سازد.

اما به علت سادگی تبدیل سیستم حمل‌ونقل به یک شبکه‌ی انتزاعی، بسیاری از راه‌حل‌ها واقعی نیستند، زیرا در واقعیت پیامدهای یک سناریوی آسیب‌پذیری به دوره‌ی زمانی اختلال، تعداد مسافران متأثر شده، تعداد افرادی که می‌توانند مسیرشان و یا گزینه‌ی حمل‌ونقل را تغییر دهند و یا اینکه سفرشان را به تعویق اندازند و دیگر موارد بستگی دارد.

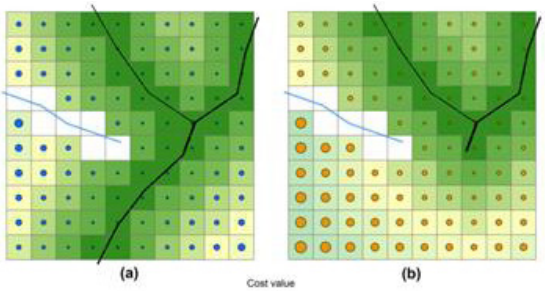
رویکرد سیستم‌مبنا در پاسخ به برخی محدودیت‌های پیش‌گفته استفاده می‌شود. این رویکرد به داده‌های بیشتری نیاز دارد و از طریق آن پاسخ‌های مسافران و دیگر عکس‌العمل‌های آنان به‌صورت منطقی پیش‌بینی می‌شود. در مجموع در مطالعات سیستم‌مبنا نسبت به مطالعات توپولوژیکی طیف وسیع‌تری از پیامدهای اختلال قابل بررسی است. در پایان ذکر این نکته ضروری است که در بسیاری از موارد می‌توان با استفاده از شاخص‌های هر دو رویکرد به صورت جامع‌تری آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر را تحلیل و ارزیابی نمود [۱۱].

روش تحقیق

بر اساس اهداف و آنچه در پیشینه‌ی تحقیق بیان گردید، به‌منظور تحلیل تجربی وضعیت آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر و به دنبال آن قابلیت دسترسی مناطق مختلف شهر پس از وقوع زلزله سه گام اساسی ضرورت دارد. در گام اول، شبکه‌ی معابر شهر به یک شبکه‌ی انتزاعی (گراف) تبدیل می‌شود. بر اساس شبکه‌ی گراف‌شکل، یک شبکه‌ی حمل‌ونقل در صورتی کاملاً به هم پیوسته است که یک مسیر از هر گره به گره‌ی دیگر وجود داشته باشد و همه‌ی گره‌ها قابل دسترس باشند و در صورتی که کاملاً به هم پیوسته نباشند یک شبکه به چند زیر شبکه‌ی متصل اما مستقل تبدیل شده است. بنابراین اگر یک یا چند پیوند یا خیابان در یک شبکه بلوکه شود یا آسیب ببیند، پیوستگی گره‌ها از دست می‌رود و ممکن است یک گراف به چندین زیر گراف دیگر تبدیل شود. در گام دوم وضعیت آسیب‌پذیری لرزه‌ای هر یک از پیوندهای شبکه‌ی معابر تحلیل می‌شود. مسلم است که در این گام بر اساس پیشینه‌ی تحقیق به‌ویژه رویکردهای تحلیل آسیب‌پذیری شاخص‌هایی تعریف می‌گردد. در گام سوم ابتدا قابلیت دسترسی نقاط مختلف شهر به شبکه‌ی معابر در شرایط قبل از وقوع زلزله تحلیل می‌شود و سپس با فرض وقوع زلزله و حذف معابر با بالاترین درجه‌ی آسیب‌پذیری نیز قابلیت دسترسی تحلیل می‌شود. نهایتاً با مقایسه‌ی این دو وضعیت، مناطقی که قابلیت دسترسی آن‌ها به صورت محسوسی کاهش می‌یابد مشخص می‌شود. روش تحلیل قابلیت دسترسی بر مبنای تحلیل هزینه‌ی مسافت[۱۲] است. از این روش عموماً به‌منظور بیان اختلاف در سطوح جغرافیایی استفاده



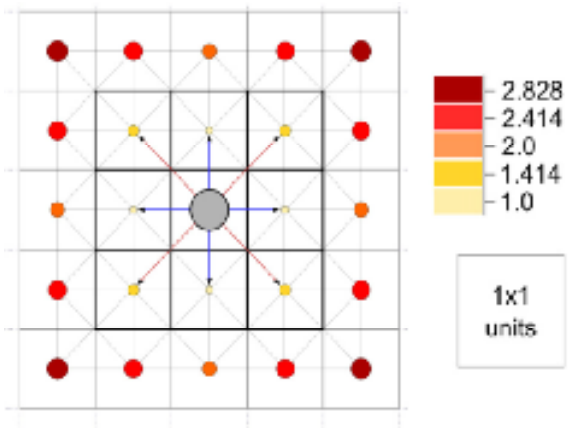
تصویر ۳: تبدیل ساختار برداری شبکه‌ی معابر به ساختار رستری



تصویر ۴: تغییر هزینه‌ی مسافت قبل و بعد از حذف یک معبر

می‌شود. به عبارتی هزینه به یک مانع مشخص در واحد جغرافیایی دلالت دارد که یکی از این هزینه‌ها می‌تواند فاصله‌ی فیزیکی باشد [۱۱]. در این مقاله برای انجام تحلیل هزینه‌ی مسافت ابتدا باید لایه‌ی منبع و لایه یا لایه‌های اختلاف (مانند کاربری زمین، شیب، موانع و غیره) تعیین شوند. بر اساس این لایه‌ها، فاصله تا یک سلول در لایه‌ی منبع بر اساس ترکیب هزینه‌ی همه‌ی لایه‌های اختلاف صورت می‌گیرد. در این مقاله شبکه‌ی معابر لایه‌ی اطلاعاتی منبع و لایه‌ی کاربری اراضی لایه‌ی اختلاف است. در ابتدا لایه‌ی شبکه‌ی معابر با ساختار وکتوری به لایه‌ی رستری تبدیل می‌شود (تصویر ۳). در مرحله‌ی بعد نیز هزینه‌ی تجمعی مسافت از این لایه محاسبه می‌شود. با حذف برخی پیوندها که ناشی از آسیب است و بر مبنای یک متدلوژی خاص صورت گرفته، هزینه‌ی مسافت نسبت به حالت قبل تغییر می‌کند (تصویر ۴).

سنجش هزینه‌ی مسافت از یک سلول به سلول مجاور بر پایه‌ی شبکه‌ی شطرنجی رستری انجام می‌گیرد. مرکز هر سلول گره بوده و پیوندها، لینک‌های متصل‌کننده‌ی گره‌های مجاور است. در تصویر ۵ در مجاورت هر سلول ۸ سلول دیگر قرار دارد. از قبل ارزش هر سلول تعریف شده است، لذا بر مبنای ارزش تعریف شده هزینه‌ی مسافت از هر سلول به سلول دیگر محاسبه می‌شود. در این تصویر هزینه‌ی مسافت برای مسیرهای مستقیم و مسیرهای مورب مطابق رابطه‌های تصویر ۵ محاسبه می‌شود:



هزینه‌ی مسیر قائم‌الزاویه =(Cost 1+Cost2)/2

هزینه‌ی مسیر مورب =√2(Cost 1+Cost2)/2

تصویر ۵: الگوریتم محاسبه‌ی هزینه‌ی فاصله در داده‌ی رستری

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که تابع هزینه‌ی مسافت کوتاه‌ترین مسافت وزن‌دار یا هزینه‌ی انباشتی مسافت را از هر سلول به سلول دیگر تعیین می‌کند [۱۶].

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش این پژوهش، ترکیب دو رویکرد تحلیل شبکه و تحلیل فضایی هزینه‌ی مسافت است؛ زیرا در الگوریتم هزینه‌ی مسافت، ساختار کل شبکه‌ی معابر مد نظر قرار می‌گیرد و بر همین اساس فاصله تا همه‌ی معابر شبکه محاسبه می‌شود. نکته‌ی دیگر اینکه در انتخاب شاخص‌های آسیب‌پذیری نیز سعی شده است ارتباط هر معبر با سایر معابر شبکه نیز در نظر گرفته شود.

داده‌های تحقیق

سنجش ویژگی‌های شبکه‌ی معابر شهر الیگودرز و آماده‌سازی آن

به‌منظور تحلیل تجربی آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر، شهر الیگودرز نمونه‌ی موردی این پژوهش انتخاب شده است. این شهر در شرق استان لرستان واقع شده است و جمعیت آن بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۰ برابر با ۸۵۴۰۰ نفر و مساحت آن نیز حدود ۱۳۴۵ هکتار است. شهر به دلیل بستر جغرافیایی- طبیعی از جمله توپوگرافی در شمال و زمین‌های کشاورزی در جنوب ساختار نسبتاً خطی به خود گرفته است و ساختار کلی معابر درونی آن به صورت شطرنجی نامنظم است. نکته‌ی بارز دیگر این که شهر دارای یک محور تجاری و مرکزی در راستای جنوب شرقی ـ شمال غربی است که در حاشیه‌ی آن کاربری‌های تجاری با تراکم بالا استقرار یافته‌اند. به همین دلیل این محور به لحاظ ترافیک سواره و پیاده بسیار شلوغ و پر تداخل است (خیابان امام خمینی(ره)). به‌طور کلی شهر الیگودرز دارای یک خیابان شریانی درجه‌ی یک است که مانند کمربندی از شمال شهر می‌گذرد. علاوه بر محور تجاری مذکور، دو محور شریانی درجه‌ی ۲ به‌صورت نسبتاً موازی در راستای جنوب شرقی- شمال غربی و حدود ۱۷ محور جمع و پخش‌کننده‌ی عمدتاً متقاطع با محورهای شریانی درجه‌ی ۲ شاکله‌ی اصلی شهر الیگودرز را تشکیل می‌دهد. سایر معابر نیز در دسته‌ی دسترسی‌های محلی قرار می‌گیرند. تصویر ۶ وضعیت کلی شبکه‌ی معابر شهر را نشان می‌دهد.

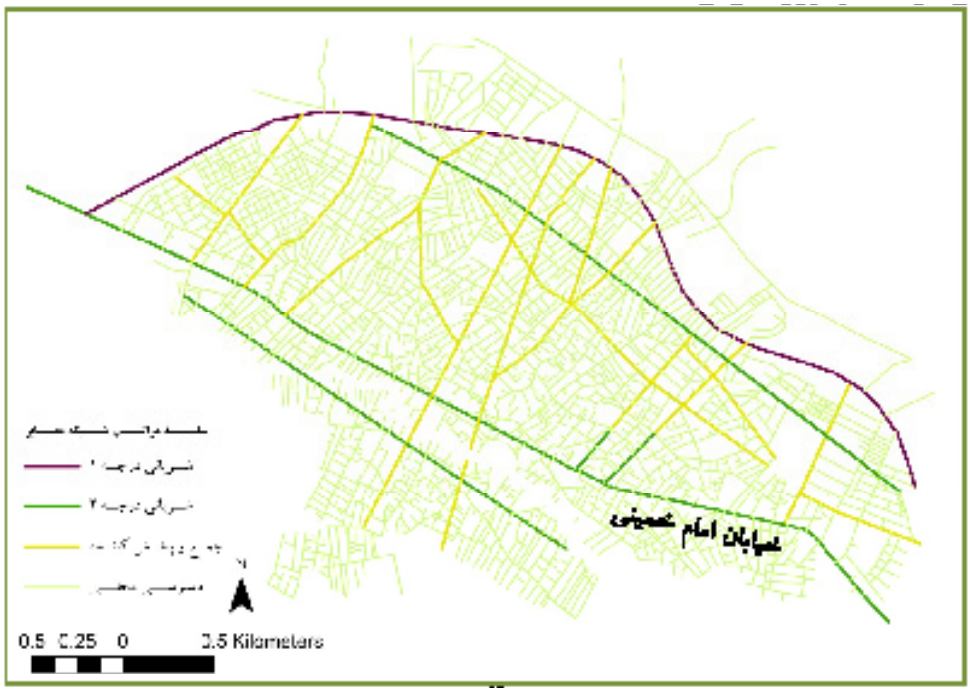
از آنجایی‌که هدف اصلی مقاله تحلیل آسیب‌پذیری معابری است که نقشی ساختاری در شبکه‌ی حمل‌ونقل دارند و اختلال در آن‌ها سبب کاهش عمده در قابلیت دسترسی می‌شود، لذا برای تشکیل شبکه‌ی گراف معابر از دسترسی‌های محلی با عرض کمتر از

۱۰ متر صرف‌نظر شده است، زیرا ضمن اینکه در هنگام وقوع سانحه احتمال آسیب و بلوکه شدن آن‌ها زیاد است، در صورت اختلال نیز قابلیت دسترسی در محدوده‌ی وسیعی کاهش نمی‌یابد.

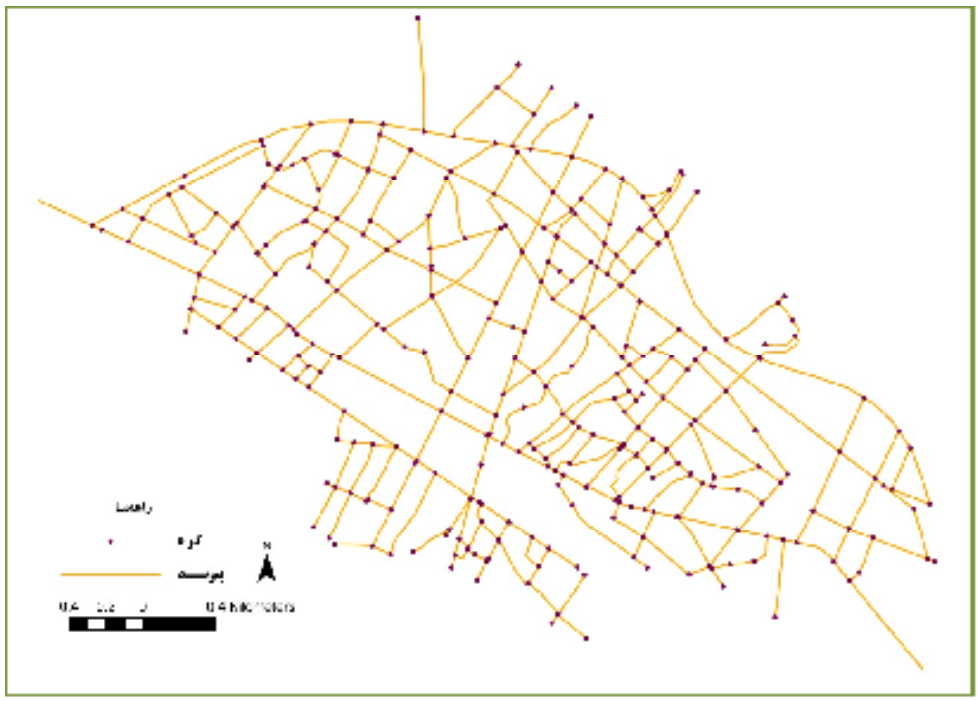
شبکه‌ی گراف فوق دارای ۸۶۳ گره و ۱۲۶۷ پیوند است و در آن هیچ زیرشبکه‌ی ناپیوسته‌ای وجود ندارد. از آنجایی‌که عموماً در مواقع اورژانسی (اضطراری) حرکت در شبکه‌ی معابر بر اساس قوانین ترافیکی محدود نمی‌شود، در مطالعه‌ی موردی حاضر همه‌ی پیوندهای گراف شبکه‌ی معابر، غیرجهت‌دار فرض شده است؛ بدین معنی که امکان حرکت از هر گره به گره‌ی دیگر در هر دو جهت امکان‌پذیر است؛ هر چند که در شبکه‌ی واقعی شهر یک خیابان یک طرفه است. تصویر ۶ و ۷ شبکه‌ی واقعی و انتزاعی (گراف) معابر شهر را نشان می‌دهد.

شناسایی معابر آسیب‌پذیر پس از وقوع زلزله

اولین گام در راستای دست‌یابی به میزان آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر و به تبع آن ارزیابی قابلیت دسترسی، تعیین و تدوین معیارها و شاخص‌های مؤثر در آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه‌ی ارتباطی است. برای انجام یک تحلیل یکپارچه این معیارها و شاخص‌ها باید منعکس‌کننده‌ی همه‌ی عوامل احتمالی مختل‌کننده باشد و



تصویر۶: معابر شهر الیگودرز بر اساس نقش عملکردی



تصویر ۷: شبکه‌ی گراف (انتزاعی) معابر شهر الیگودرز

جدول ۱: شاخص‌های منتخب آسیب‌پذیری معابر

		شاخص	منبع
شاخص‌های ساختار توپولوژیکی		درجه‌ی هر پیوند	[۱۷، ۱۸]
		طول پیوند	[۱۶]
		شیب معبر	[۱۹، ۲۰، ۴، ۲۱]
		زاویه‌ی داخلی معبر	[۲۰، ۲۱، ۲۲]
		نسبت ارتفاع جداره به عرض معبر	[۱، ۴، ۲۳]
شاخص‌های عملکردی		سطح سرویس معبر	[۲۴]
		سلسله‌مراتب دسترسی	[۲۰، ۲۳، ۲۵]
شاخص‌های مربوط به جداره‌های پیرامون معابر	زمین مبنا	کاربری زمین	[۲۱، ۲۶]
		مساحت قطعه‌ی تفکیکی	[۲۰، ۲۶]
		شکل هندسی قطعه	[۲۷، ۲۸]
		وضعیت قرارگیری قطعه در بلوک	[۲۹]
	بنا مبنا	نوع سازه	[۲، ۳۰]
		کیفیت بنا	[۲، ۳۰]
		تعداد طبقات	[۲، ۳۰]

جدول ۲: نحوه‌ی امتیازدهی آسیب‌پذیری بر اساس معیارهای بافت پیرامون معابر

شاخص بافت پیرامون	امتیاز آسیب‌پذیری			
	۱	۲	۳	۴
کاربری زمین	بر اساس میزان خطرزا بودن هر نوع کاربری			
مساحت قطعه‌ی تفکیکی	بیشتر از ۵۰۰ متر	۲۵۰ تا ۵۰۰ متر	۱۰۰ تا ۲۵۰ متر	کمتر از ۱۰۰ متر
شکل هندسی قطعه	نامنظم (اشکال ترکیبی)	منظم، چندضلعی	منظم (قائم‌الزاویه) مربع	
نحوه‌ی قرارگیری قطعه در بلوک	وسط	کنار	منفرد	
نوع سازه	اسکلت فلزی	بتنی	آجر و آهن	آجر و چوب
کیفیت بنا	نوساز	قابل نگهداری	مرمتی	تخریبی و مخروبه
تعداد طبقات	یک طبقه	دو طبقه	سه طبقه	چهار طبقه

مهم‌ترین سناریوهای احتمالی اختلال را مد نظر داشته باشد. در این پژوهش بر اساس رویکردهای تحلیل آسیب‌پذیری شبکه‌مبنا از جمله رویکرد توپولوژیکی و رویکرد سیستم‌مبنا و همچنین دخیل نمودن ویژگی‌های بافت حاشیه‌ی معابر بر آسیب‌پذیری آن‌ها سه دسته معیار پیشنهاد شده است. سپس برای هر یک از معیارها زیرمعیارها یا شاخص‌هایی تعریف شده است. این نکته قابل ذکر است که بر اساس مطالعات مختلف طیف متنوعی از شاخص‌ها وجود دارد اما مسلماً به دلیل محدودیت‌های دسترسی به داده‌ها امکان استفاده از همه‌ی آن‌ها نیست. لذا در این تحقیق ۱۴ معیار به دلیل اتفاق نظر غالب پژوهش‌ها در نقش کلیدی آن‌ها در تعیین سطح آسیب‌پذیری معبر، به‌عنوان معیارهای این پژوهش انتخاب گردیده‌اند. دو دسته‌ی اول مربوط به ویژگی‌ها و ساختار شبکه‌ی معابر است. در واقع دسته‌ی اول آسیب‌پذیری معابر را بر اساس ساختار توپولوژیکی آن‌ها مد نظر قرار داده و دسته‌ی دوم نیز بر اساس رویکرد تحلیل سیستم‌مبنا ویژگی‌های عملکردی معبر را مورد سنجش قرار می‌دهد. دسته‌ی سوم نیز معیارهای مربوط به آسیب‌پذیری بافت پیرامون هر یک از معابر است.

نکته‌ی قابل ذکر دیگر اینکه در انتخاب شاخص‌های آسیب‌پذیری معابر تلاش شده است، ضمن اینکه ویژگی‌های هر معبر سنجیده شود، در عین حال جایگاه هر معبر نیز در ساختار کل شبکه مد نظر قرار گیرد.

پس از تدوین شاخص‌ها، لازم است هر یک از پیوندهای شبکه‌ی گراف شهر الیگودرز به‌صورت روش‌مند و بر اساس شاخص‌های پیش‌گفته تحلیل و ارزیابی شود. برای این منظور در این پژوهش از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در ترکیب با تحلیل همپوشانی[۱۳] در نرم‌افزار GIS استفاده شده است. در اینجا به دلیل محدودیت حجم مقاله و استفاده‌ی متعدد از این روش از تشریح آن به‌صورت تفصیلی خودداری می‌شود و به گام‌های اساسی تحلیل اشاره می‌شود. در وهله‌ی اول بر اساس مطالعات مختلف و یا با استدلال‌های منطقی نحوه‌ی محاسبه‌ی امتیاز آسیب‌پذیری بر اساس هر معیار مشخص شده است.

سپس بر اساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی معیارها سپس زیرمعیارها توسط کارشناسان به‌صورت دو به دو با هم مقایسه شده است و بر اساس آن وزن معیارها و سپس زیرمعیارها نسبت به هم مشخص شده است. در نهایت با ضرب وزن معیارها در زیرمعیارها

جدول ۳: نحوه‌ی امتیازدهی آسیب‌پذیری بر اساس معیارهای مربوط به ساختار توپولوژیکی معابر

شاخص توپولوژیکی		امتیاز آسیب‌پذیری			
		۱	۲	۳	۴
درجه‌ی لینک	گره ۱ لینک	سه لینک و بیشتر	دو لینک	یک لینک	صفر
	گره ۲ لینک	سه لینک و بیشتر	دو لینک	یک لینک	صفر
طول لینک		کمتر از ۵۰ متر	۵۰ تا ۱۰۰ متر	۱۰۰ تا ۱۵۰ متر	بالای ۱۵۰متر
زاویه‌ی داخلی لینک		صفر تا ۳۰ درجه	۳۰ تا ۶۰ درجه	۶۰ تا ۱۲۰ درجه	بالای ۱۲۰ درجه
شیب لینک		صفر تا ۵ درصد	۵ تا ۸ درصد	۸ تا ۱۰ درصد	بالای ۱۰ درصد
محصوریت لینک*		D بین صفر تا ۰٫۲	D بین ۰٫۲ تا ۰٫۶	D بین ۰٫۴ تا ۰٫۱	D بالای ۱٫۲

* در این رابطه a و b ارتفاع جداره‌های شمالی و جنوبی و c نیز عرض معبر است. $D = \frac{0.5(a+b)}{c-3}$

جدول ۴: نحوه‌ی امتیازدهی آسیب‌پذیری بر اساس معیارهای عملکردی معابر

شاخص‌های عملکردی	معیار سنجش و امتیاز آسیب‌پذیری			
	۱	۲	۳	۴
سطح سرویس پیوند (LOS)	(A) : ۰ -۰/۴	(C,B):۰/۴ -۰/۸	(E):۰/۸-۰/۹	(F):۰ /۹-۱
سلسله‌مراتب دسترسی	شریانی درجه ۱	شریانی درجه ۲ اصلی	جمع و پخش‌کننده	دسترسی محلی

جدول ۵: وزن نهایی هر یک از شاخص‌ها

شاخص‌های آسیب‌پذیری	وزن نهایی	شاخص‌های آسیب‌پذیری	وزن نهایی
کاربری زمین	۰/۰۲۷	طول پیوند	۰/۰۶۹
مساحت قطعه‌ی تفکیکی	۰/۰۴۸	زاویه‌ی داخلی پیوند	۰/۰۴۸
شکل هندسی قطعه	۰/۰۳۴	شیب پیوند	۰/۰۹۵
موقعیت قطعه در بلوک	۰/۰۵۲	محصوریت پیوند	۰/۱۱۴
نوع سازه	۰/۱۰۲	سطح سرویس پ یوند (LOS)	۰/۰۷۲
کیفیت بنا	۰/۰۹۲	سلسله‌مراتب دسترسی	۰/۰۳۵
تعداد طبقات	۰/۰۹۳		
درجه‌ی پیوند	۰/۱۲۱		
نرخ ناسازگاری= ۰٫۰۰۴			

وزن نسبی هر یک از زیرمعیارهای چهارده‌گانه به دست آمده است. گفتنی است که از نرم‌افزار Expert Choice برای انجام تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است.

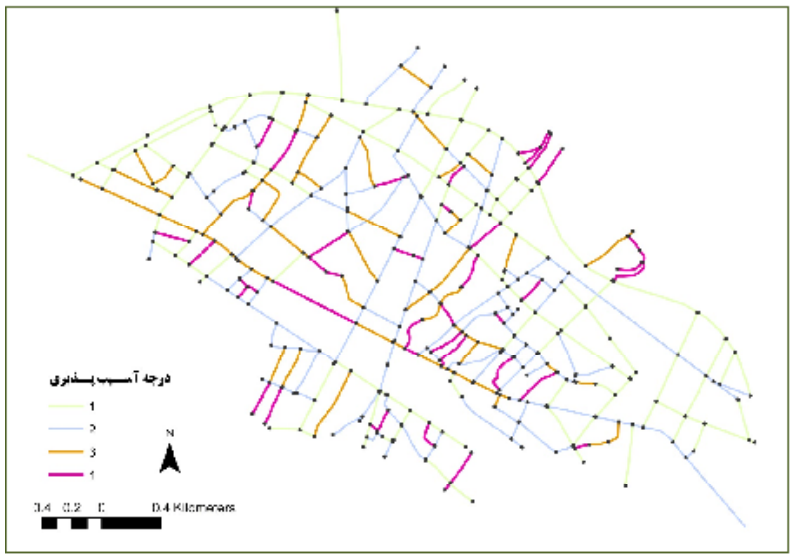
در نهایت پس از انجام فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی وزن نهایی شاخص‌های چهارده‌گانه مشخص شده و در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول، شاخص‌های درجه و محصوریت پیوند بیشترین وزن و شاخص کاربری زمین و سلسله‌مراتب دسترسی کمترین وزن را دارا است.

در گام بعدی، به‌منظور تعیین آسیب‌پذیری معابر شهر، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار GIS، میزان آسیب‌پذیری بافت مجاور هر یک از معابر بر اساس هفت لایه‌ی متناظر با شاخص‌های پژوهش محاسبه و به معابر تخصیص داده شد. در ادامه نیز میزان آسیب‌پذیری از حیث شاخص‌های مربوط به ساختار توپولوژیکی و عملکردی معابر- بر اساس جداول امتیاز شاخص‌ها در میزان آسیب‌پذیری- محاسبه گردید. در گام آخر با استفاده از تحلیل همپوشانی وزن‌دار، ضرایب حاصل از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در امتیاز خام هر یک از لایه‌ها ضرب و نهایتاً همه‌ی لایه‌ها ترکیب شده‌اند. بر اساس ترکیب نهایی لایه‌ها، نقشه‌ی آسیب‌پذیری معابر شهر الیگودرز حاصل شده است. درجه‌ی آسیب‌پذیری در ۴ مقیاس محاسبه شد که در تصویر ۸ نشان داده شده است. بر این اساس معابری که دارای درجه‌ی ۴ است، بیشترین میزان آسیب‌پذیری را دارد. در مجموع ۴۲ پیوند دارای آسیب‌پذیری درجه‌ی ۴ است که عمدتاً در محدوده‌ی مرکزی شهر واقع شده‌اند.

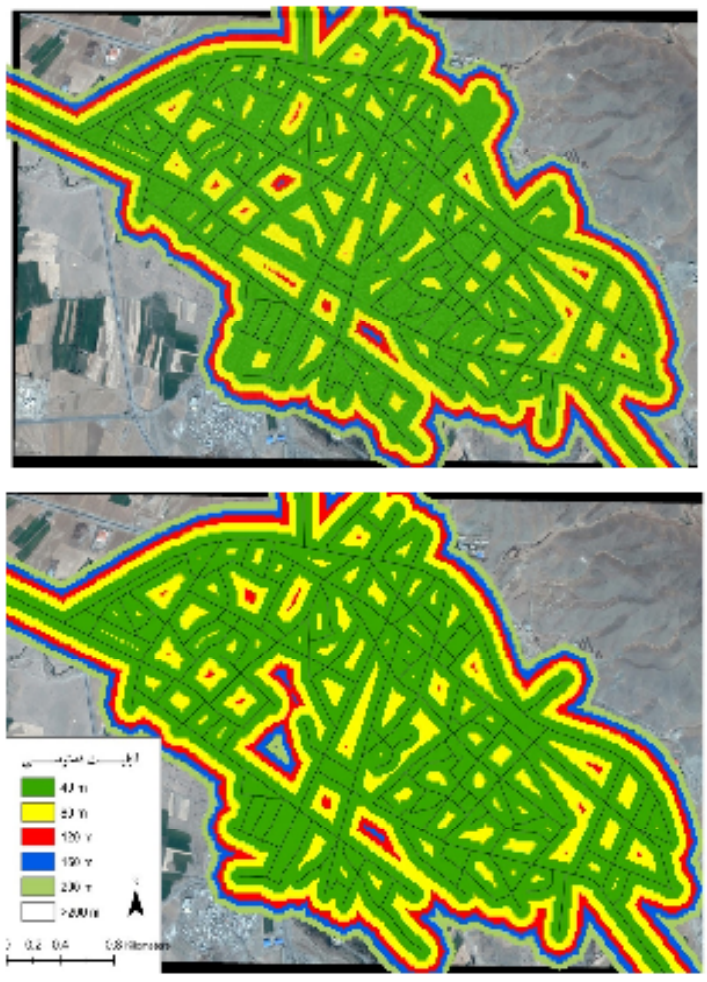
تحلیل قابلیت دسترسی در بافت شهری

بعد از وقوع زلزله و انسداد برخی معابر مناطقی از شهر کاملاً ایزوله می‌شود یا اینکه قابلیت دسترسی به آن‌ها کاهش می‌یابد. اصطلاح دسترسی در زمینه‌های مختلف و با معانی متفاوتی استفاده شده است تا موقعیت‌ها و هدف‌های متفاوتی را بیان کند. در نتیجه معیارهای مختلفی برای محاسبه‌ی قابلیت دسترسی تعریف شده است [۳۱، ۳۲]. در این مقاله منظور از قابلیت دسترسی کوتاه‌ترین فاصله (زمان) از یک نقطه‌ی شهری به نقطه‌ی دیگر است.

در بخش قبل با در نظر گرفتن شاخص‌های متنوعی درجه‌ی آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر شهر الیگودرز در یک طیف ۴ درجه‌ای محاسبه گردید. با توجه به نقشه‌ی آسیب‌پذیری با حذف نقاط با درجه‌ی آسیب‌پذیری بالا (درجه‌ی ۴) پیوستگی شبکه‌ی معابر همچنان برقرار می‌ماند و به‌نوعی هیچ زیرشبکه‌ی ایزوله‌ای

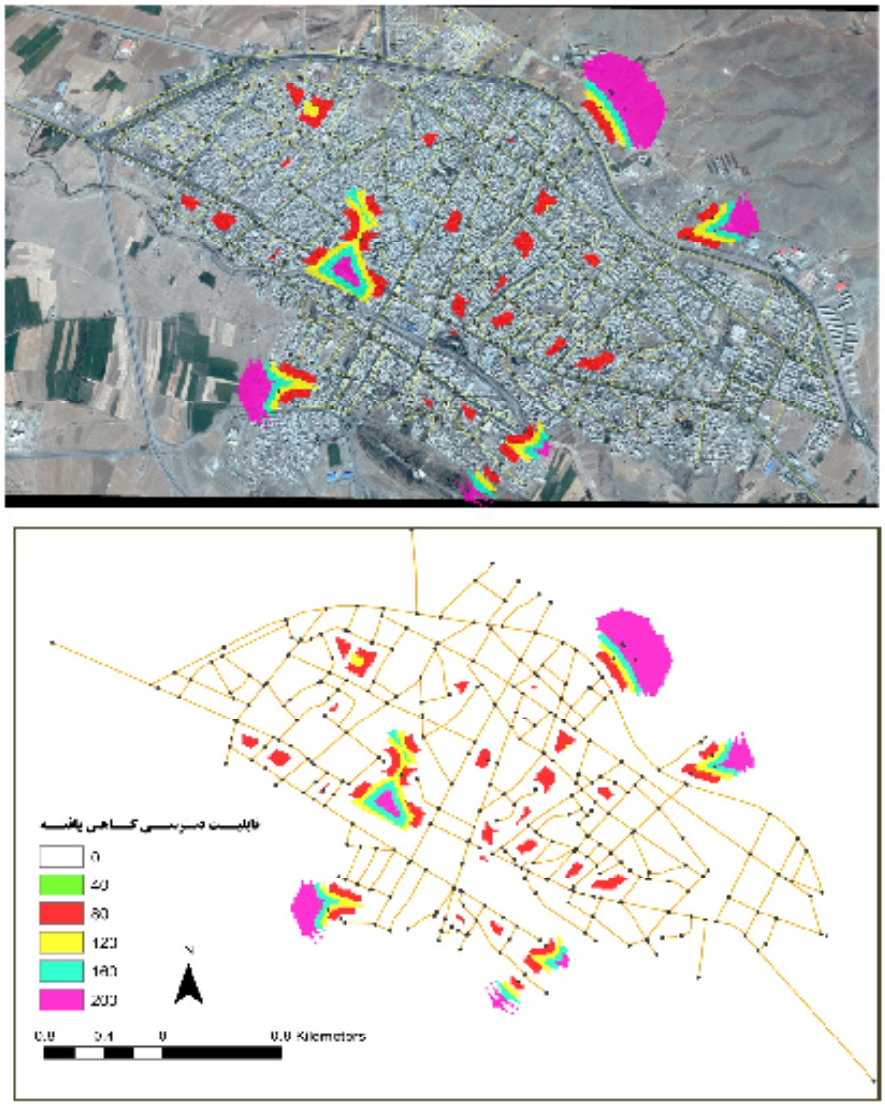


تصویر ۸ : نقشه‌ی آسیب‌پذیری پیوندهای (معابر) شهر الیگودرز بر اساس ترکیب نهایی معیارها



تصویر ۹: قابلیت دسترسی در شرایط عادی (تصویر بالا) و پس از حذف معابر با آسیب‌پذیری بالا (درجه‌ی ۴)، (تصویر پایین)

به وجود نمی‌آید. هدف از این بخش تحلیل قابلیت دسترسی و شناسایی مناطقی از شهر است که پس از وقوع زلزله دسترسی به آن‌ها کاهش می‌یابد. برای این منظور از الگوریتم هزینه‌ی مسافت استفاده شده است که در بخش ۳ به‌تفصیل توضیح داده شده است. بنابراین ابتدا در وضعیت عادی هزینه‌ی مسافت (معادل قابلیت دسترسی) همه‌ی نقاط محدوده‌ی شهر از شبکه‌ی اصلی معابر محاسبه شد که در تصویر ۹ (قسمت بالا) نشان داده شده است. سپس برای شرایط پس از وقوع زلزله، معابر با درجه‌ی



تصویر ۱۰ : تغییرات میزان کاهش دسترسی پس از وقوع زلزله نسبت به وضعیت قبل از وقوع زلزله

آسیب‌پذیری بالا (درجه‌ی ۴) از شبکه حذف شده و هزینه‌ی مسافت مجدداً محاسبه شده است (تصویر ۹، قسمت پایین). در تصویرهای نشان داده شده هزینه‌ی مسافت در یک طیف ۶ رنگی مشخص شده که هر رنگ معادل ۴۰ متر بر روی زمین است.

مقایسه‌ی قابلیت دسترسی قبل و بعد از وقوع زلزله نشان می‌دهد در بخش عمده‌ای از محدوده‌ی شهر قابلیت دسترسی تغییری نکرده اما در بخش جنوبی شهر تغییرات قابل ملاحظه است.

در اینجا به‌منظور تعیین دقیق‌تر وضعیت قابلیت دسترسی در مناطق مختلف شهر، با استفاده از توابع تحلیل فضایی در نرم‌افزار GIS دو نقشه با هم مقایسه و مناطقی که قابلیت دسترسی آن تغییر نکرده حذف و مناطقی که قابلیت دسترسی به آن کاهش یافته به همراه میزان تغییر آن مشخص شده است.

در مجموع بر اساس محاسبات صورت گرفته بیشترین میزان کاهش قابلیت دسترسی در محدوده‌ی مرکزی شهر اتفاق افتاده است. در سایر مناطق میزان کاهش قابلیت دسترسی کمتر از محدوده‌ی مرکزی است، زیرا طول پیوندهای آسیب‌پذیر آن بسیار کمتر است. در مجموع تصویر ۱۰ مناطقی از شهر را نشان می‌دهد که پس از وقوع زلزله میزان قابلیت دسترسی به آن‌ها کاهش یافته است. میزان قابلیت دسترسی پس از زلزله در ۵ طیف رنگی (غیر از رنگ سفید) نشان داده شده است که هر رنگ نسبت به رنگ قبلی، کاهش دسترسی را به میزان ۴۰ متر نشان می‌دهد. بنابراین در بیشتر نقاط شهر که قابلیت دسترسی تغییر داشته، مقدار کاهش حدود ۴۰ متر بوده است. البته در برخی محدوده‌ها نیز مقدار کاهش به حدود ۱۲۰ متر نیز رسیده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر و سپس از طریق آن تحلیل وضعیت قابلیت دسترسی در محدوده‌ی شهر الیگودرز پس از وقوع زلزله صورت گرفته است. نتایج این پژوهش نکات ارزشمندی را مشخص می‌سازد. نکته‌ی اول اینکه اگرچه آسیب‌پذیری در مقیاس معبر انجام می‌گیرد، اما هر معبر را

باید در ارتباط با کل شبکه‌ی معابر تحلیل کرد. بر همین اساس در بیشتر مطالعات رویکرد شبکه‌مبنا، رویکرد غالب در تحلیل آسیب‌پذیری است. بر اساس ادبیات تحقیق رویکرد شبکه‌مبنا شامل دو رویکرد توپولوژیکی و سیستم‌مبنا بوده است که بر مبنای اهداف و داده‌های تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرند. در هر دو رویکرد شبکه‌ی واقعی معابر به یک شبکه‌ی انتزاعی (گراف) تبدیل شده و ارتباط هر پیوند با سایر پیوندها در نظر گرفته می‌شود. در مقایسه، رویکرد سیستم‌مبنا داده‌های بیشتری از جمله حجم ترافیک، سطح سرویس، استقامت شبکه و غیره را مدل می‌کند. نکته‌ی دیگر اینکه آسیب‌پذیری صرفاً متأثر از یک یا چند معیار نیست، بلکه طیفی از شاخص‌ها در آسیب‌پذیری شبکه‌ی معابر مؤثر هستند. بنابراین لازم است مجموعه‌ای از شاخص‌ها بر اساس رویکردهای شبکه‌مبنا در نظر گرفته شود، اگرچه محدودیت داده‌ها و کیفیت آن‌ها همواره از چالش‌های اساسی این‌گونه پژوهش‌ها است. نکته‌ی آخر اینکه در رویکردهای شبکه‌مبنا نیز از آسیب‌پذیری بافت مجاور معابر غفلت شده است، درحالی‌که تخریب ساختمان‌های اطراف نیز می‌تواند سبب انسداد و اختلال شبکه‌ی معابر شود.

در این پژوهش با توجه به همه‌ی موضوعات فوق، ۱۴ معیار در نظر گرفته شده و بر اساس آن‌ها درجه‌ی آسیب‌پذیری معابر در ۴ مقیاس محاسبه شده است. حدود ۴۲ پیوند بیشترین درجه‌ی آسیب‌پذیری را دارا بوده‌اند که مجموعاً حدود ۱۱٫۵ درصد از طول کل معابر شهر را شامل می‌شود. این معابر عمدتاً در محدوده‌ی جنوبی و پرتراکم شهری قرار دارند. در گام بعدی پس از تعیین آسیب‌پذیری معابر، قابلیت دسترسی بر اساس الگوریتم هزینه‌ی مسافت تحلیل شده است. با فرض وقوع زلزله و سناریوی حذف معابر با بالاترین درجه‌ی آسیب‌پذیری، قابلیت دسترسی در مناطق مختلف شهر از ۴۰ تا ۱۲۰ متر کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نقشه‌ها مشاهده می‌شود کاهش قابلیت دسترسی عمدتاً در مناطق مرکزی و حاشیه‌های شمالی و جنوبی شهر اتفاق می‌افتد. مهم‌ترین دلایل کاهش قابلیت دسترسی تراکم بالای ساختمانی، بالا بودن تراکم کاربری‌های تجاری، ترافیک بالای عبوری در مناطق مرکزی و ناپایداری و فرسودگی ابنیه در مناطق حاشیه‌ای است. بر همین اساس در ادامه برخی راهبردهای اساسی به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری در سطح شهر الیگودرز ارائه می‌شود:

۱. ساماندهی توسعه‌ی فیزیکی شهر برای جلوگیری از گسترش غیراصولی شهر در راستای محورهای اصلی؛
۲. کاهش تراکم ساختمانی و تراکم تجاری در حاشیه‌ی معابر اصلی به‌ویژه محور شمال غربی- جنوب شرقی (محور امام خمینی) و توزیع متعادل آن‌ها در پهنه‌های مختلف شهر؛
۳. انجام اقدامات مدیریت ترافیکی و هندسی به‌منظور کاهش بار ترافیکی و افزایش سطح خدمت‌دهی معابر آسیب‌پذیر؛
۴. تعیین مسیرهای بهینه برای دسترسی سریع به مناطق آسیب‌پذیر شهر؛
۵. تسهیل و تسریع نوسازی و استحکام‌بخشی به بافت فرسوده، به‌ویژه در مناطق شمالی و جنوبی شهر؛
۶. تغییر معابر بن‌بست به باز در مناطق با خطر بالای کاهش قابلیت دسترسی؛
۷. تعریض معابر به‌منظور افزایش محصوریت در محدوده‌های مواجهه با خطر کاهش قابلیت دسترسی؛
۸. ساماندهی تقاطع‌ها در معابر با زاویه‌ی تند با هدف افزایش سطح سواره‌رو و کاهش انسداد در مواقع خطر؛
۹. افزایش میزان نفوذپذیری (با افزایش تعداد لینک‌ها) در بافت به‌منظور کاهش هزینه‌ی مسافت از نقاط مختلف به شبکه‌ی معابر؛
۱۰. پیشنهاد ضابطه‌ی مشخص در طرح‌های توسعه‌ی شهری در ارتباط با نحوه‌ی قطعه‌بندی بافت با توجه به اهمیت الگوی قطعه‌بندی در تخریب ابنیه هنگام وقوع زلزله؛
۱۱. پیشنهاد ضابطه‌ی مشخص در طرح‌های توسعه‌ی شهری در ارتباط با میزان محصوریت معابر اصلی شهر با مدل‌سازی چگونگی ریزش آوار.

پی‌نوشت

۱. بر اساس ادبیات تحقیق، هنگامی که شبکه‌ی واقعی معابر به شبکه‌ی انتزاعی تبدیل می‌شود، عموماً از اصطلاح پیوند (لینک) معادل معبر (خیابان) و از اصطلاح گره معادل تقاطع استفاده شده است. در این مقاله به‌منظور استفاده‌ی یکسان از واژگان عمدتاً از اصطلاح معبر و تقاطع استفاده می‌شود.

2. Betweenness
3. Alternative
4. Spatial Analysis
5. Network Analysis
6. Cost Distance
7. Preparedness
8. Response
9. Recovery
10. Adaptation
11. Hollnagel
12. Cost Distance
13. Overlay

منابع

۱. عزیزی، محمد مهدی؛ اکبری رضا (۱۳۸۷). ملاحظات شهرسازی در سنجش آسیب‌پذیری شهرها از زلزله، نمونه‌ی موردی: منطقه‌ی فرحزاد تهران. *نشریه‌ی هنرهای زیبا*، شماره‌ی ۳۴، ۳۶ - ۲۵ .

۲. حبیبی، کیومرث و همکاران (۱۳۸۷). تعیین عوامل سازه‌ای ساختمانی مؤثر در آسیب‌پذیری بافت کهن شهری زنجان با استفاده از GIS و Fuzzy Logic. *نشریه‌ی هنرهای زیبا*، شماره‌ی ۳۱، ۲۷- ۳۶.

۳. ارکات، جمال؛ زمانی، شکوفه؛ قدس، پرک (۱۳۹۳). مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اورژانسی با فرض احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی در زمان بحران. *دو فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی مدیریت بحران*، شماره‌ی ۸، ۹۵ – ۱۰۶.

۴. عزیزی، محمد مهدی؛ همافر، میلاد (۱۳۹۰). تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای معابر شهری (مطالعه‌ی موردی: محله‌ی کارمندان، کرج). *نشریه‌ی هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی*، دوره‌ی ۱۷ (۳)، ۵ - ۱۵.

5. Demšar, U., Špatenkov, O., Virrantaus, K. (2008). Identifying critical locations in a spatial network with

graph theory. *Trans*. GIS 12 (1), 61–82.

6. Murray-Tuite, P.M., Mahmassani, H.S. (2004). Methodology for the determination of vulnerable links in a transportation network. *Transp*. Res. Rec. 1882, 88–96.

7. Taylor, M.A.P., Sehkar, S.V.C., D'Este, G.M. (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. Netw. Spatial Econ. 6, 267–291.

8. Pimm, S.L., (1984). The complexity and stability of ecosystems. Nature 307, 321–326.

9. Holling, C.S., (1973). Resilience and stability of ecological systems. Annu. Rev. Ecol. Syst. 4, 1–23.

10. Bruneau, M., et al., (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19 (4), 733–752.

11. Mattsson L., Jenelius E., (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research, Transportation Research Part A 81, 16–34.

12. Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. Transp. Policy 9, 117–127.

13. Hollnagel, E., (2011). Prologue: the scope of resilience engineering. In: Hollnagel, E., Dédale, J.P., oods, D., Wreathall, J. (Eds.), Resilience Engineering in Practice: A Guidebook. Ashgate, pp. xxix–xxxix.

14. Latora, V., Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. Phys. Rev. Lett. 87 (19), 198701.

15. Cascetta, E. (2009). Transport Systems Analysis: Models and Applications. Springer, New York.

16. Bono, F., Gutierrez, E. (2011). A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks. J. Transp. Geogr. 19, 1443–1455.

17. Duan, Y., Lu, F. (2014). Robustness of city road networks at different granularities, Physica A, 1-33.

18. Iyer S., Killingback, T. Sundaram, B.. Wang, Z, (2013). Attack robustness and centrality of complex networks, PloS One, 8 , e59613.

۱۹. حبیب، فرح (۱۳۷۱). نقش فرم شهر در کاهش خطرات ناشی از زلزله. *مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین‌المللی بلایای طبیعی در مناطق شهری، بخش اول زلزله*، تهران، ۱۶۱۷ – ۱۶۰۷.

۲۰. بحرینی، حسین (۱۳۷۵). برنامه‌ریزی کاربری زمین در مناطق زلزله‌خیز، تهران، مرکز مقابله با سوانح طبیعی ایران.

۲۱. روستا، مجید (۱۳۸۹). *شهر و زمین‌لرزه*. گردآوری اعظم خاتم، تهران، انتشارات آگاه، تهران.

22. Jiang, B., Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. Environ. Plan. B: Plan. Des. 31, 151–162.

۲۳. کاظمی، مصطفی؛ زارعی، بهروز (۱۳۷۴). ارزیابی شبکه‌ی ارتباطی شهر رشت با هدف کاهش آسیب‌پذیری ناشی از زلزله. *مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*، تهران، ۱۶۲۷-۱۶۴۱.

24. Knoop, V.L., Snelder, M., van Zuylen, H.J., Hoogendoorn, S.P. (2012). Link-level vulnerability indicators for real-world networks. Transp. Res. Part A 46 (5), 843–854.

25. Tampère, M.J., Stada, J., Immers, L.H., (2007). Methodology for Identifying vulnerable section in a national road network. In: Proceedings of 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.

۲۶. عبدالهی، مجید (۱۳۸۳). *مدیریت بحران در نواحی شهری*. تهران، انتشارات سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور.

۲۷. حمیدی، ملیحه (۱۳۷۱). ارزیابی الگوهای قطعه‌بندی اراضی و بافت شهری در آسیب‌پذیری مسکن از سوانح طبیعی. *مجموعه مقالات سمینار سیاست‌های توسعه مسکن در ایران*، وزارت مسکن و شهرسازی.

۲۸. شایان، عباس (۱۳۹۰). *ارزیابی میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای ناشی از عوامل انسان ساخت با استفاده از تکنیک فرایند تحلیل شبکه‌ای*. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

۲۹. احدزاده روشتی، محسن و همکاران (۱۳۸۹). مدل‌سازی آسیب‌پذیری ساختمانی شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی. *مجله‌ی جغرافیا و توسعه*، شماره‌ی ۱۹. ۱۷۱- ۱۹۸.

۳۰. حاتمی‌نژاد، حسین و همکاران (۱۳۸۸). ارزیابی میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای در شهر. *نشریه‌ی پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، شماره‌ی ۶۸، ۱-۲۰.

31. Geurs, K.T., van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*. 12 (2), 127–140.

32. Makri, M., Folkesson, C. (1999). Accessibility measures for analyses of land-use and travelling with geographical information systems. In: Proceedings of 2nd KFBResearch Conference. Lund Institute of Technology, Lund.