

# برآورد احتمال انسداد مسیر در شبکه حمل و نقل درون شهری پس از وقوع زلزله با استفاده از الگوریتم بیزی

مطالعه موردی: شهر بابل

میشم مغیثی: دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوسیروانی بابل، مازندران، ایران.

حمیدرضا توکلی\*: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوسیروانی بابل، مازندران، ایران. Email: tavakoli@nit.ac.ir.

الناز پیغاله: مدرس دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کلمسون، کارولینای جنوبی، آمریکا.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

چکیده

برنامه ریزان مدیریت بحران برای مناطق مستعد وقوع سوانح طبیعی به دنبال تصمیم‌گیری‌هایی قبل و پس از وقوع خطر به منظور کاهش عواقب ناشی از وقوع آن و بازگرداندن هر چه سریع‌تر شهر به حالت اولیه هستند. شبکه حمل و نقل درون شهری به عنوان یکی از آسیب‌پذیرترین شریان‌های حیاتی نقش راهبردی در قابلیت برگشت پذیری شهر داراست. بدین ترتیب ابزارهای کارآمدی برای شناسایی این نقش در صورت وقوع بلایای طبیعی مورد نیاز است.

در این پژوهش مدلی تحت GIS توسعه یافته که با کمک آن می‌توان عملکرد شبکه راه‌های درون شهری را به‌طور احتمالاتی پس از وقوع زلزله و با کمک الگوریتم بیزی بررسی کرد. این مدل می‌تواند خسارات ناشی از وقوع رویداد لرزه‌ای شامل خرابی ساختمان‌ها و پل‌های مجاور هر مسیر که منجر به انسداد آن مسیر می‌شود و همچنین احتمال انسداد مسیرها را تعیین کند. در این روش سناریوهای مختلف زلزله که در آن منابع مختلف عدم قطعیت‌های موجود در توزیع مکانی و زمانی وقوع زلزله‌ها در نظر گرفته شده، به منطقه مورد بررسی اعمال می‌شود. خسارات وارده به ساختمان و پل‌های موجود در منطقه به همراه فاکتورهای مختلف کنترل خسارت لرزه‌ای شبکه راه‌ها برآورد شده است. تحلیل‌های انجام شده منجر به تولید نقشه‌های احتمال انسداد مسیرهای موجود در شبکه راه برای حالات مختلف انسداد (بدون انسداد، کم، متوسط، زیاد) شده است. این نقشه‌ها شرایط راه‌ها را بلافاصله پس از زلزله نشان می‌دهد. با بررسی نتایج این تحقیق به وضعیت بسیار پیچیده انسدادهای مسیر شهر بابل پی خواهیم برد و انجام چنین تحلیل‌ها و تولید این نقشه‌ها برای زلزله‌های محتمل آینده می‌تواند به مدیران شهری نقطه ضعف‌های شبکه حمل و نقل را نشان دهد. در ضمن برای بهبود شبکه و برنامه‌ریزی جهت یافتن مسیر مطلوب به منظور امداد و کمک‌رسانی مؤثر خواهد بود و به برنامه‌ریزی برای بازگردان شهر به حالت اولیه پس از زلزله‌ای محتمل کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: زلزله، شبکه حمل و نقل، انسداد مسیر، الگوریتم بیزی

## Estimating the Probability of Closure in the Intra-Urban Transport Network After the Earthquake Using Bayesian Algorithm, A Case Study of Babol

Meissam Mogheisi<sup>1</sup>, Hamid Reza Tavakoli<sup>\*2</sup>, Elnaz Peyghaleh<sup>3</sup>

### Abstract

Crisis management planners for natural disaster-prone areas are looking for pre- and post-hazard decisions to reduce the consequences and bring the city back to normal as soon as possible. The intra-city transportation network, as one of the most vulnerable arteries, has a strategic role in the city's reversibility. Thus, effective tools are needed to identify this role in the event of a natural disaster.

In this research, a model has been developed under GIS with the help of which the performance of the urban road network can be investigated after the earthquake with the help of Bayesian algorithm. This model can determine the damage caused by a seismic event, including the collapse of buildings and adjacent bridges in any path that leads to the blockage of the route and the probability of blockage of the routes. In this method, different earthquake scenarios in which different sources of uncertainties in the spatial and temporal distribution of earthquakes are considered, are applied to the study area. Damage to buildings and bridges in the area, along with various seismic damage control factors of the road network, has been estimated. The performed analyses have led to the production of maps of the possibility of obstruction of the existing routes in the road network for different cases of obstruction (no obstruction, low, medium, high). These maps show the condition of the roads immediately after the earthquake. By examining the results of this research, we will found out the very complex situation of roadblocks in the city of Babol, and by conducting such analyzes and producing these maps for possible future earthquakes, the weaknesses of transportation network can easily be spotted by city managers, and authorities will be assisted to improve the network effectively while finding a suitable route for relief and help. Moreover, the results can be used in planning for the return of the city to its original state after a possible earthquake.

**Keywords:** Earthquake, Transport Network, Route Closure, Bayesian Algorithm

1- PhD student, Faculty of Civil, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Assoc. Prof., Faculty of Civil, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- Instructor, Department of Civil Engineering, Clemson, United States

۴۹

شماره ۲۱

بهار و تابستان

۱۴۰۱

دوفصلنامه علمی و پژوهشی



برآورد احتمال انسداد مسیر در شبکه حمل و نقل درون شهری پس از وقوع زلزله با استفاده از الگوریتم بیزی / حمیدرضا توکلی



## ۱. مقدمه و بررسی پژوهش‌های گذشته

زلزله می‌تواند در مدت زمان کوتاهی خسارات و تلفات بسیار گسترده‌ای بر جای بگذارد. آنچه که از این پدیده فاجعه‌ای می‌سازد، پیشگیری نکردن از تأثیرات آن و آماده نبودن برای پاسخ مناسب به آن است. واقع شدن ایران بر روی کمربند زلزله خیز آلپ-همیالیا موجب شده که زمین‌لرزه به عنوان یکی از زیان‌بارترین بلايا در کشور مطرح شود. چنین رخدادهایی همواره موجب تغییرات محیطی بسیاری شده و خسارات فراوانی بر جای می‌گذارند. [۱]

ایمنی شریان‌های حیاتی در برابر سوانح طبیعی از قبیل زمین‌لرزه، سیل و طوفان نه تنها از لحاظ عملکرد و خدمت‌رسانی اهمیت دارد، بلکه از این نظر هم دارای اهمیت است که وارد آمدن صدمه به برخی از آن‌ها مانند شبکه حمل و نقل، خطوط لوله گاز، آب و یا کابل‌های برق می‌تواند وخامت اوضاع در موقع بروز یک سانحه طبیعی را تشدید کند. [۲]

سیستم شبکه حمل و نقل که جزئی ضروری در حیات امروزی مردم شده، بخشی مهم از شریان‌های حیاتی است. سیستم حمل و نقل شهری یک سیستم شبکه‌ای متغیر به شکل گسترده است که از خرابی ناشی از حوادث زلزله به‌سادگی آسیب می‌بیند و منجر به خسارات جانی شدید مستقیم، غیرمستقیم و خسارت‌های مالی می‌شود که مشکلات بسیاری را برای برگشت‌پذیری این شبکه پس از وقوع زلزله به همراه دارد. [۲]

شبکه حمل و نقل درون‌شهری نقشی تعیین‌کننده در موفقیت عملیات نیروهای امداد و نجات در شرایط بحرانی پس از زلزله به ویژه در شهرهای بزرگ را دارد. در بسیاری از کشورها شبکه بزرگراه‌ها و خیابان‌های شهری که در شرایط عادی دارای مشکلات متعدد به‌ویژه در ساعات اوج سفرهای درون‌شهری هستند، یقیناً پس از وقوع زلزله‌ای بزرگ وضعیتی بسیار بحرانی پیدا می‌کنند. اندازه‌گیری عملکرد این شبکه خصوصاً به خاطر مشخصات مکانی شبکه، تعدد کاربران و ماهیت بحرانی خدمات حیاتی برای اصلاح و پاسخگویی بسیار پیچیده است. این مشکل بر سایر تحقیقات مانند یافتن مناطق امن و مسائل مسیریابی بهینه هم تأثیر می‌گذارد. [۳]

بعد از وقوع زلزله بدنه راه و ابنیه مجاور آن ممکن است دچار آسیب شوند که موجب می‌شود شبکه حمل و نقل درون‌شهری دچار اختلال شده و یا حتی از بین برود. عواملی که باعث اختلال در شبکه حمل و نقل ناشی از وقوع زلزله می‌شود را می‌توان به شکل زیر دسته‌بندی کرد:

- آسیب دیدن پل‌ها که در صورت شدید بودن می‌تواند به مسدود شدن ۲ مسیر اصلی منجر شود؛
- ناپایداری شیب‌های مشرف که می‌تواند منجر به مسدود شدن جزئی یا کامل مسیرها شود؛
- فروریزش ساختمان‌های مجاور یک مسیر که می‌تواند آن را مسدود و یا ناامن کند؛
- آسیب دیدن شبکه‌های آب، گاز و فاضلاب که نه تنها خیابان‌ها و بزرگراه‌ها بلکه تونل‌ها را هم تهدید می‌کند؛

- سقوط دکل‌های برق و مخابرات که علاوه بر مسدود کردن مسیرها احتمال وقوع آتش‌سوزی را هم افزایش می‌دهد؛
- رها شدن خودروها در سطح خیابان‌ها توسط مردم به علت نبود امکان حرکت و تمایل آن‌ها دسترسی به مناطق امن؛
- اختلال در عملکرد چراغ‌های راهنمایی به علت قطع برق که بی‌نظمی ناشی از بحران زلزله را تشدید می‌کند؛ [۴]

چن و اگوچی (۲۰۰۳) آسیب‌پذیری شبکه و قابلیت اعتمادپذیری مسیرهای مسدود نشده نسبت به کارایی پیش‌بینی شده آنها را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها تأثیر فروریزش ساختمان‌ها در مجاورت شبکه که سبب اختلال و گسیختگی در جریان ترافیک می‌شود را برای نخستین بار بررسی کردند. [۵]

در مطالعه‌ای دیگر توسط کرمیجان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) خطرپذیری شبکه حمل و نقل در ناحیه سانفرانسیسکو ارزیابی شد و اثر خسارات وارده به ۲ هزار و ۶۴۰ پل بر آسناد مسیرها و در نتیجه زمان تأخیر در سفرهای روزانه درون‌شهری محاسبه شد. [۶]

روش‌های شبیه‌سازی استفاده شده بر حرکات فردی و ارتباط بین آنها به منظور تخلیه مسیر تمرکز می‌کند که این فرآیند بسیار پیچیده و برای سناریوهای بزرگ تخلیه نامناسب است. در حالی که این رویکردها بینش مفیدی را ارائه می‌دهند، فقدان ابزارهایی برای بهبود مقیاس‌پذیری آنها را به‌طور ذاتی برای برنامه‌ریزی اضطراری در دنیای واقعی غیرعملی می‌کند. [۷]

مطالعه دیگری توسط ویسوانث و پیتا<sup>۳</sup> (۲۰۰۳) انجام شد که طی آن با فرمول‌بندی مسائل طراحی شبکه، هزینه سفر (مسیریابی) OD<sup>۴</sup> به عنوان ماتریس عملکرد برای شناسایی مسیرهای بحرانی پس از وقوع زلزله استفاده شد. [۸]

جانکوسکی و ریچارد<sup>۵</sup> یکی از نخستین محققانی بودند که با ادغام GIS و روش‌های تصمیم‌گیری برای اجرای سامانه پشتیبانی تصمیم‌گیری مکانی کار می‌کردند. [۹]

بونو و گوتیرز<sup>۶</sup> فاصله هزینه محاسبه شده از هر سلول تک در GIS بر اساس امپدانس تعریف شده از هر لینک را برای شبکه منطقه‌ای از هائیتی بررسی کردند و در آن تنزل درجه هر لینک را لحاظ کردند. [۱۰]

جنلیوس و متسون<sup>۷</sup> مدلی را برای شبکه راه سوئد توسعه دادند که در آن اهمیت سلول و شاخص‌های قرار گرفتن در منطقه بر اساس زمان انتظار و افزایش زمان واقعی سفر (به علت اختلال) محاسبه می‌شد و در آن تنزل درجه هر لینک محاسبه نمی‌شد. [۱۱]

برای مدیریت خطرپذیری لریزه‌ای در یک منطقه و تصمیم‌گیری‌های لازم درباره آن، آسناد مسیر که عملکرد شبکه حمل و نقل درون‌شهری را مختل می‌کند، بسیار مهم است.

## ۲. مبنای نظری تحقیق

یک مدل جامع از عملکرد شبکه حمل و نقل پس از زلزله باید بتواند علاوه بر خرابی‌های مستقیم وارده به بدنه جاده‌ها، خرابی‌های غیرمستقیم که بر شبکه وارد می‌شود (اثرات خرابی و فروریزش سازه‌های جانبی مانند پل و ساختمان) را در نظر بگیرد.

در شکل (۱) نمونه‌ای از خطرات لرزه‌ای که شبکه راه را مورد تهدید قرار می‌دهد و باعث انسداد مسیر می‌شود، نشان داده شده است. [۱۲]

در مدل‌هایی که تاکنون برای عملکرد شبکه حمل‌ونقل درون‌شهری توسعه یافته، فقط اثرات خسارات مستقیم یا غیرمستقیم به طور مجزا بررسی شده است. به عبارت دیگر خرابی ساختمان‌ها یا پل‌ها و یا حتی بدنه راه با هم در نظر گرفته نشده‌اند. فروریزش ساختمان در مجاور جاده‌های درون‌شهری و آوار ناشی از آن و همچنین خرابی پل‌ها می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد شبکه و یا حتی بسته شدن جاده‌ها شود. اثراتی از قبیل ارتفاع سازه، نوع سازه، فاصله از مسیر و هم‌عرضی با مسیر می‌تواند نقش مهمی در این بین بازی کند (شکل ۲).

در مدل توسعه یافته در این مقاله بر خلاف مدل‌های موجود (تحلیل عملکردی شبکه حمل‌ونقل پس از زلزله) مدلی احتمالاتی ارائه شده که در آن به هر دسته از خسارات لرزه‌ای وارده به شبکه به صورت مستقل نگاه می‌شود و نتایج ناشی از این اثرات آسیب با هم ترکیب می‌شوند و در نهایت در قالب خروجی گرافیکی (نقشه‌های پهنه‌بندی احتمالاتی انسداد مسیر) ارائه می‌شود. بدین صورت که اثرات خرابی و فروریزش آوار ساختمانی در مجاورت راه و خرابی پل‌های ارتباطی به عنوان عناصر تأثیرگذار بر انسداد جاده‌ای با کمک نظریه بیزی در نظر گرفته شده‌اند؛ سپس با توجه به تحلیل مدل نتایج به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی احتمالاتی انسداد مسیر به دست آمده است. از این نقشه‌ها می‌توان برای تصمیم‌گیری درباره بهسازی شبکه راه‌ها قبل از وقوع زلزله (کاهش خطر لرزه‌ای)

و یا درباره مدیریت بحران و بازگرداندن شبکه حمل‌ونقل شهری به حالت اولیه بعد از وقوع زلزله استفاده کرد.

شکل (۳) روند کلی تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه حمل‌ونقل و محاسبه خسارات وارده به هر یک از عناصر شبکه راه را نشان می‌دهد. اطلاعات ورودی مدل ارائه شده در این مقاله هم در این شکل معرفی شده‌اند. روش تحلیل آسیب‌پذیری در این مقاله مجموعه‌ای از پیچیدگی‌های احتمالاتی از عدم قطعیت‌های مربوط به توزیع زلزله در زمان و مکان، آسیب وارده به سازه‌ها و اختلال در عملکرد شبکه مورد بررسی را در نظر گرفته است. نتایج حاصل از نظریه شبکه بیزی برای استنتاج احتمال انسداد منجر به تولید توزیع احتمالی آوار سازه‌ای برای هر المان در سطح جاده می‌شود که شکل این تابع توزیع می‌تواند برای هر المان بر اساس سطح جنبش زمین و آسیب‌پذیری المان متفاوت باشد.

### ۴-۱. نظریه بیزی<sup>۸</sup>

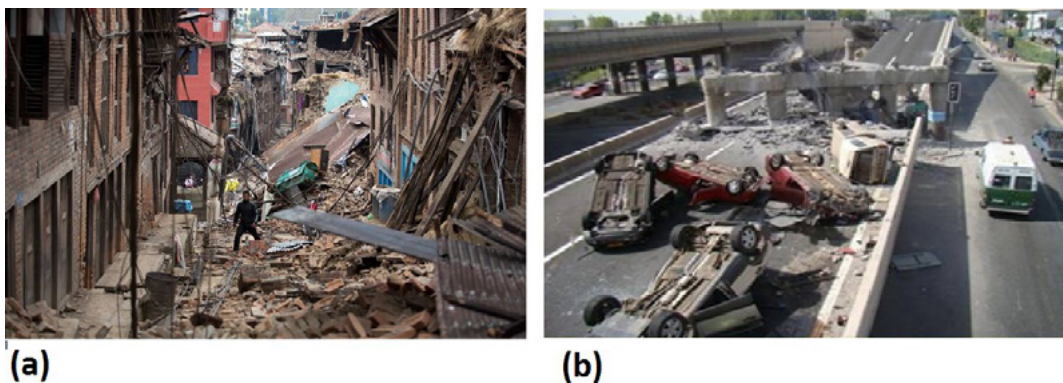
امروزه بسیاری از مشکلات انسان‌ها با کمک هوش مصنوعی حل می‌شود. یکی از مهمترین خصوصیات این مشکلات وجود عدم قطعیت در آنها است. اکثر روش‌هایی که در هوش مصنوعی برای کنترل عدم قطعیت پیشنهاد شده‌اند، بر پایه نظریه احتمالات و نظریه فازی بنا نهاده شده‌اند.

شبکه بیزی گرافی جهت‌دار است که رئوس آن شامل اطلاعات مقادیر احتمالات شرطی هستند. به طور دقیق‌تر این شبکه شامل اجزا و خصوصیات زیر است:

۱. یک مجموعه از متغیرهای تصادفی مجموعه رئوس گراف را تشکیل می‌دهند که این متغیرها می‌توانند گسسته یا پیوسته باشند.

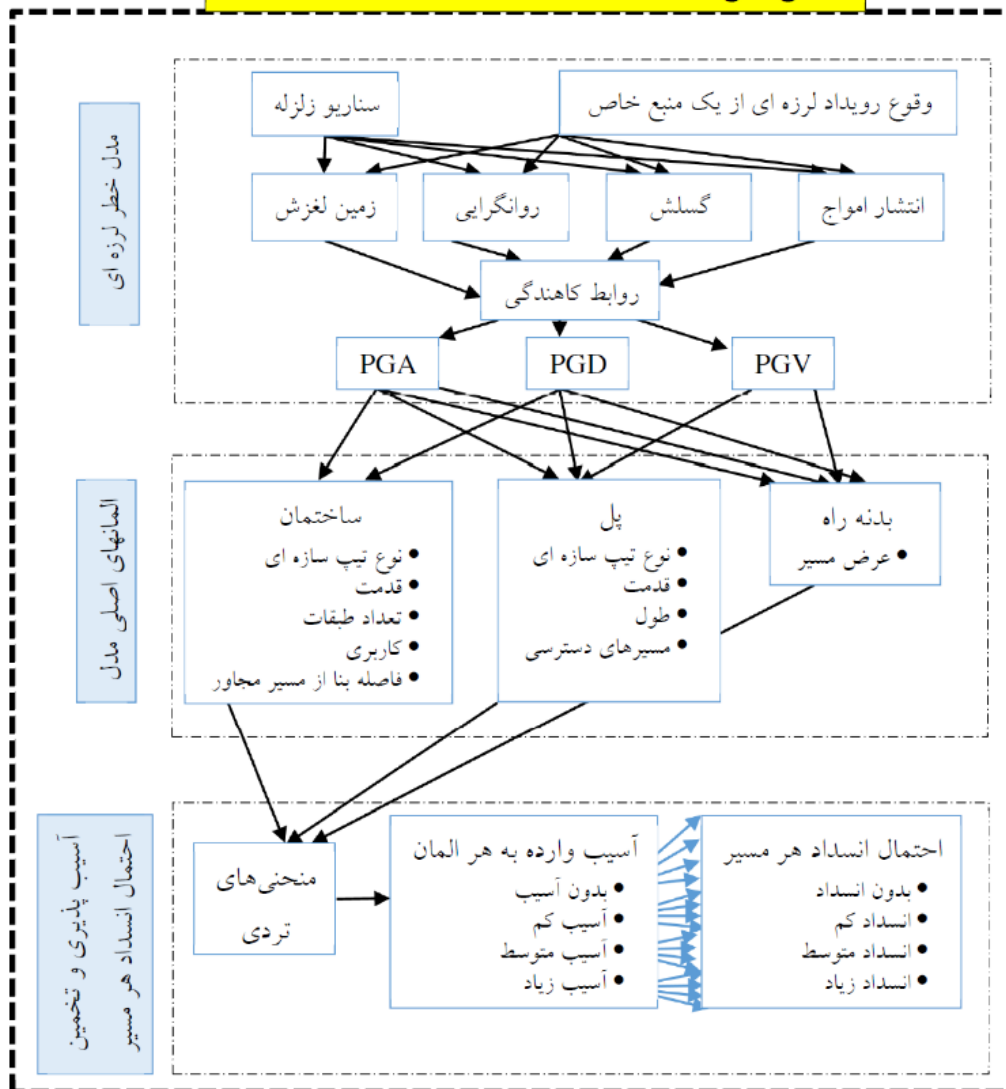


شکل ۱. خرابی راه در اثر (a) گسلش، (b) زمین لغزش و (c) روانگرایی



شکل ۲. انسداد مسیر در اثر (a) خرابی پل و (b) فروریزش ساختمان

## استنتاج نتایج احتمالی انسداد هر مسیر با استفاده از شبکه بیزی



شکل ۳. مدل پیشنهادی

استفاده از آن می توان توزیع توأم کامل را به دست آورد که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

برای یک شبکه بیزی ۲ مفهوم می توان در نظر گرفت. از دید مفهوم نخست می توان شبکه را تقریبی از توزیع توأم کامل قلمرو دید و از دید دوم می توان شبکه را به صورت ساختاری که وابستگی و استقلال متغیرها را نشان می دهد، دید. هر ۲ دید معادل هم هستند که دید نخست برای طراحی شبکه و دید دوم برای طراحی روال استنتاج مناسب است.

با استفاده از قاعده بیزی می توانیم احتمال هر پیشامد را با شرطی کردن آن نسبت به رخ دادن یا ندادن پیشامدی دیگر تعیین کنیم. به عبارت دیگر قاعده بیزی می گوید که چگونه احتمال رویداد A با توجه به اطلاعاتی که در مورد وقوع رویداد B به دست آمده تغییر می کند. (Box and Tiao ۱۹۹۲)

$$\Pr(A|B) = \frac{\Pr(AB)}{\Pr(B)} = \frac{\Pr(B|A)}{\Pr(B)} \Pr(A) \quad (1)$$

۲. یک مجموعه از یال های جهت دار که اگر یک یال از راس X به راس Y باشد، X را والد Y می نامیم.

۳. هر گره  $X_i$  یک توزیع احتمال شرطی  $P(X_i | Parents(X_i))$  دارد که تأثیر گره های والد بر روی این گره را به صورت عددی نشان می دهند.

۴. گراف هیچ دور جهت داری ندارد و در واقع یک گراف بدون دور جهت دار است.

ساختار شبکه نشان دهنده وابستگی های شرطی در قلمرو است. به صورت شهودی معنی یک یال از X به Y وجود تأثیر مستقیم X بر Y و یا وابستگی مستقیم Y به X است. باید توجه داشت که تعیین این وابستگی های مستقیم برای یک فرد خبره قلمرو کار مشکلی نیست؛ بنابراین در صورت وجود فرد خبره تعیین ساختار شبکه آن چنان سخت نیست. پس از تعیین ساختار، تعیین توزیع شرطی گره ها، ساختمان داده شبکه بیزی را کامل می کند و با



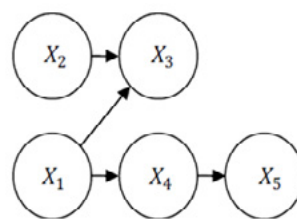
- تابع احتمال پسین<sup>۹</sup> (احتمال وقوع فرضیه با در نظر گرفتن شواهد موجود):  $Pr(A|B)$
- راست نمایی<sup>۱۰</sup> (احتمال مشاهده و وقوع شواهد موجود به شرط درستی فرضیه):  $Pr(B|A)$
- تابع احتمال پیشین<sup>۱۱</sup> (احتمال درستی فرضیه بدون در نظر گرفتن شواهد خاص):  $Pr(A)$
- تابع احتمال مرزی یا حاشیه‌ای<sup>۱۲</sup> (احتمال مشاهده و وقوع شواهد موجود با در نظر گرفتن همه فرضیات ممکن):  $Pr(B)$

در قاعده بیزی طبق شکل (۴)  $X_1$  و  $X_2$  والد  $X_3$  هستند. هر عنصر توزیع توأم به صورت ضرب تعدادی از عناصر جدول‌های احتمالات شرطی محاسبه می‌شود و این جدول‌ها به نوعی تجزیه توزیع توأم را انجام می‌دهند. توسط رابطه شماره (۳) می‌توان ایده‌ای برای ساختن ساختار شبکه بیزی به دست آورد. این فرمول مشخص می‌کند که یک شبکه بیزی چه معنی‌ای دارد؛ ولی به طور شفاف روش ساختن شبکه را طوری که نمایشی مناسب از قلمرو باشد، معلوم نمی‌سازد. باید توجه داشت در یک شبکه فرض بر نوع خاصی از وابستگی بین متغیرهاست که لزوماً با واقعیت تطابق ندارد. بنابراین ما تنها دنبال یک شبکه خوب می‌گردیم؛ نه شبکه‌ای که دقیقاً توزیع توأم را مدل کند (چون ممکن است امکان‌پذیر نباشد). [۱۳]

$$p(X) = \prod_{i=1}^n p(x_i | Pa(x_i)) \quad (2)$$

با توجه به قانون زنجیره‌ای<sup>۱۳</sup> در احتمالات می‌توانیم احتمال یک عنصر توزیع توأم را توسط رابطه (۴) بیان کنیم.

$$p(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = p(x_5 | x_4) p(x_4 | x_1) p(x_3 | x_1, x_2) p(x_1) p(x_2)$$



شکل ۴. رابطه بین فضای نمونه‌های  $\{X\}$

در واقع شبکه‌های بیزی راهی مناسب برای نشان دادن استقلال‌های شرطی که فرآیند استنتاج احتمالی را سریع می‌کند، هستند. شبکه‌های بیزی در واقع یک توزیع توأم هم برای قلمرو تعیین می‌کنند که هر عنصر توزیع به صورت ضرب تعدادی عناصر از جداول احتمالات شرطی رئوس است. در هر شبکه بیزی ساختار آن و جداول احتمالات شرطی تعیین‌کننده آن هستند. همچنین به طور کلی اندازه گره‌های شبکه بیزی به صورت نمایی کوچک‌تر از تعداد عناصر درون این جداول احتمالات شرطی است. بنابراین

برای نمایش کارآمد جداول توزیع‌های شرطی راه‌های زیادی طراحی شده که استفاده از توزیع‌های خاص با پارامترهای محدود از جمله این روش‌هاست. در نهایت پس از طراحی شبکه تنها نکته‌ای که باقی می‌ماند، استنتاج با این شبکه‌هاست که هدف اصلی ما از به‌کارگیری آنهاست. روش‌های زیادی برای استنتاج کارآمد در شبکه‌های بیزی طراحی شده؛ روش‌هایی که سعی در استنتاج دقیق دارند. مانند استنتاج به وسیله محاسبه تک‌تک عناصر احتمالی و الگوریتم حذف متغیر در قلمروهای پیچیده عملی نیستند و منجر به روش‌های استنتاج تقریبی مانند نمونه‌گیری با رد کردن، نمونه‌گیری وزن‌دار و نمونه‌گیری زنجیره مارکوفی می‌شوند. [۱۳]

در این مدل از استنتاج دقیق، استنتاج به وسیله محاسبه تک‌تک عناصر احتمالی که توضیح داده شده، انجام می‌شود.

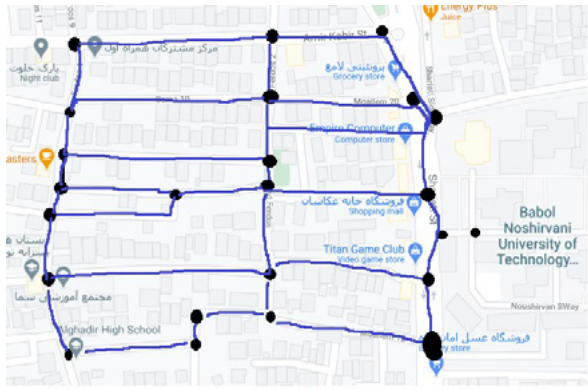
## ۲-۲. ساختار مدل توسعه یافته

برای نشان دادن خطر لرزه‌ای در این مدل ویژگی‌های لرزه‌ای منطقه‌ای هم می‌تواند از تحلیل خطر ساختگاه منطقه مورد بررسی و هم به صورت یک کاتالوگ زلزله شبیه‌سازی شده تاریخی و دستگاهی یا مصنوعی که شامل موقعیت‌های زمین لرزه، بزرگای و زمان بازگشت آن است، باشد. هر زلزله‌ای در چنین کاتالوگ معرف زلزله‌ای واقعی است که می‌تواند به طور بالقوه در مجاورت منطقه مدل‌سازی رخ دهد. جنبش‌های زمین شامل حداکثر شتاب زمین ( $PGA^{۱۴}$ )، حداکثر سرعت زمین ( $PGV^{۱۵}$ ) حداکثر تغییر مکان زمین ( $PGD^{۱۶}$ )، تغییر شکل مانگار زمین ( $PGD^{۱۷}$ ) را می‌توان از روابط کاهندگی برای هر سناریوی زلزله تخمین زده شود.

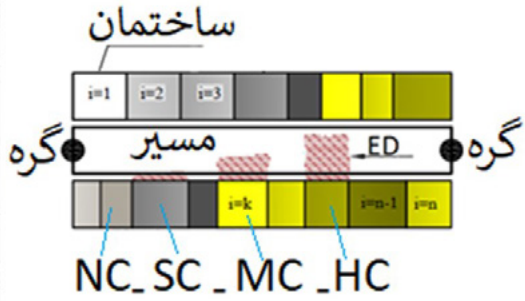
عدم قطعیت مرتبط با توابع کاهندگی با استفاده از فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو در نظر گرفته می‌شود. این فرآیند منجر به توزیع احتمالی جنبش زمین در ساختمان‌ها و سازه‌های جاده‌ای می‌شود.

عناصر تشکیل‌دهنده شبکه جاده‌ای شهری مانند پل‌های اصلی، ساختمان‌ها و هم بدنه راه به صورت اطلاعات مکانی با استفاده از لایه‌های داده‌های بردار GIS مدل‌سازی می‌شوند (شکل ۵). برای برآورد میزان آسیب ناشی از خطرات لرزه‌ای وارده به هر المان شبکه از منحنی‌های شکنندگی<sup>۱۸</sup> استفاده می‌شود. آوارهای سازه‌ای ناشی از خسارات لرزه‌ای می‌تواند در طول مسیر مجاورش گسترش یابد ( $ED^{۱۹}$ ).

در این مقاله برای هر نوع تیپ ساختمانی در مجاورت یک مسیر با کمک منحنی‌های شکنندگی آن و جنبش زمین استفاده شده در منطقه مورد مطالعه احتمال خسارات لرزه‌ای در ۴ سطح بدون خسارت، خسارت کم، خسارت متوسط و خسارت زیاد تخمین زده شده است. ماتریس احتمالاتی انسداد مسیر وابسته به ارتفاع ساختمان، نحوه فروریزش آن، فاصله آن از مسیر مجاور و عرض راه است که برای بیان انسداد مسیر تابع توزیع انسداد آن در ۴ سطح انسداد (بدون انسداد، انسداد کم، انسداد متوسط و انسداد زیاد) با توجه به شکل (۶) تقسیم‌بندی می‌شود. شکل‌های (۷ تا ۱۰) مثال‌هایی برای این تقسیم‌بندی با توجه به وقوع زلزله در بعضی از مناطق شهری را نشان می‌دهد.

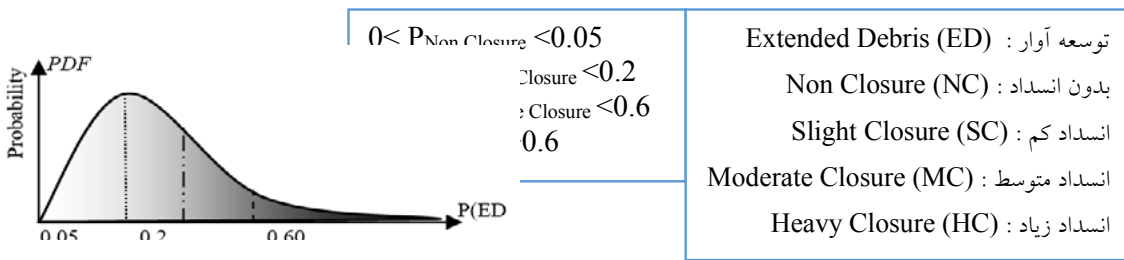


(a)



(b)

شکل ۵. مدل سازی شبکه راه (a) شامل گره، مسیر، ساختمان ها و پل های مجاور آن (b) نحوه پیشروی آوار در هر مسیر



شکل ۶. تقسیم بندی نمودار توزیع انسداد به سطوح مختلف [۲۰]



شکل ۷. حالت بدون انسداد - زلزله ۲۰۱۱ نیوزلند

شکل ۸. حالت انسداد کم - زلزله سال ۲۰۱۱ نیوزلند



شکل ۹. حالت انسداد متوسط - زلزله سال ۲۰۱۱ نیوزلند

شکل ۱۰. حالت انسداد زیاد - زلزله سال ۱۹۹۹ در Chi Chi تایوان

با توجه به توضیحات ارائه شده و در نظر گرفتن تمام شرایط احتمالاتی معرفی شده احتمال توسعه آوار برای هر المان توسط رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$P(ED = ED_i) = \sum_{k=1}^{n_{IM}} \sum_{j=1}^{n_{DS}} \sum_{i=1}^{n_{ED}} P(ED = ED_i | DS_j) P(DS = DS_j | IM_k) P(IM_k)$$

که در اینجا  $n_{DS}$ ،  $n_{IM}$  و  $n_{DE}$  به ترتیب بیانگر شماره جنبش زمین، شماره خرابی المان (ساختمان، پل و یا بدنه راه) و شماره حالت توسعه آوار در الگوریتم شکل ۳ است.

انسداد مسیر می‌تواند به علت توسعه آوار یک ساختمان و یا اینکه چندین ساختمان در مجاورت مسیری خاص باشد. بنابراین احتمال انسداد مسیر به علت توسعه آوار حداقل یک ساختمان در مسیر مجاورش با توجه به رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$P_{MC} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(MC)) \quad (6)$$

رابطه (۶) بیانگر وقوع احتمال انسداد یک مسیر ناشی از توسعه آوار حداقل یک ساختمان مجاور آن مسیر در حالت انسداد مسیر متوسط است.

علاوه بر توسعه آوار ساختمانی قابلیت کارکرد شبکه حمل و نقل درون شهری بستگی به رفتار لرزه‌ای پل‌ها و دیگر سازه‌های جاده‌ای دارد. در بسیاری از مطالعات مشابه برای شبکه حمل و نقل شهری توجه ویژه‌ای به پل‌ها به عنوان مهم‌ترین عامل کنترل عملکرد شبکه شده است. با استفاده از منحنی‌های شکنندگی برای پل‌ها می‌توان احتمال وقوع سطوح مختلف آسیب برای هر پل را تخمین زد. قابلیت استفاده از پل‌ها پس از زلزله نیاز به بازرسی دیداری و برآورد خسارات وارده را دارد. یک پل با آسیب کمی حتی می‌تواند باعث بسته شدن جزئی یا کل از یک یا هر چند مسیر مرتبط با آن شود. بنابراین برای هر سطح خرابی می‌توان فرض کرد که مسیرهای مرتبط با آن پل یا نقطه تقاطع آنها دچار انسداد و در پی آن اختلال در عملکرد شبکه شود.

بدین ترتیب، احتمال ترکیبی از انسداد مسیر ناشی از توسعه آوار ساختمانی ( $P_i$ )، خسارت لرزه‌ای وارده به پل‌ها ( $P_j$ ) و بدنه راه ( $P_k$ ) را می‌توان توسط رابطه (۷) بیان کرد.

$$P_{(MC)} = 1 - \left[ \prod_{i=1}^n (1 - P_i(MC)) \right] \times \left[ \prod_{j=1}^n (1 - P_j(MC)) \right] \times \left[ \prod_{k=1}^n (1 - P_k(MC)) \right] \quad (7)$$

### ۳. مطالعه موردی

در این تحقیق شهر بابل با توجه به شرایط لرزه‌خیزی نسبتاً شدید و همچنین جمعیت شهری قابل توجه آن برای نشان دادن

کاربرد مدل پیشنهادی انتخاب شده است. در ادامه ابتدا به معرفی این شهر و ارائه مشخصات لرزه‌ای آن و سپس به شرح عناصر شبکه حمل و نقل شهری و سایر عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد این شبکه و نحوه تأثیرگذاری آنها پرداخته شده است. در این مطالعه از بین آن مولفه‌ها تأثیرگذارترین آنها یعنی ساختمان‌ها و پل‌ها برای بررسی اخلاص عملکردی شبکه حمل و نقل شهری بابل در نظر گرفته شده است.

#### ۳-۱. مشخصات شهری و لرزه‌ای ساختگاه شهر بابل

شهرستان بابل پرجمعیت‌ترین شهرستان استان مازندران با مساحت ۱۵۷۸٫۱ کیلومتر مربع است. در سرشماری سال ۱۳۹۵ جمعیت شهر بابل ۳۰۵٫۵۷۸ نفر و جمعیت شهرستان بابل ۵۳۱٫۹۳۰ نفر برآورد شده است. [۱۴]

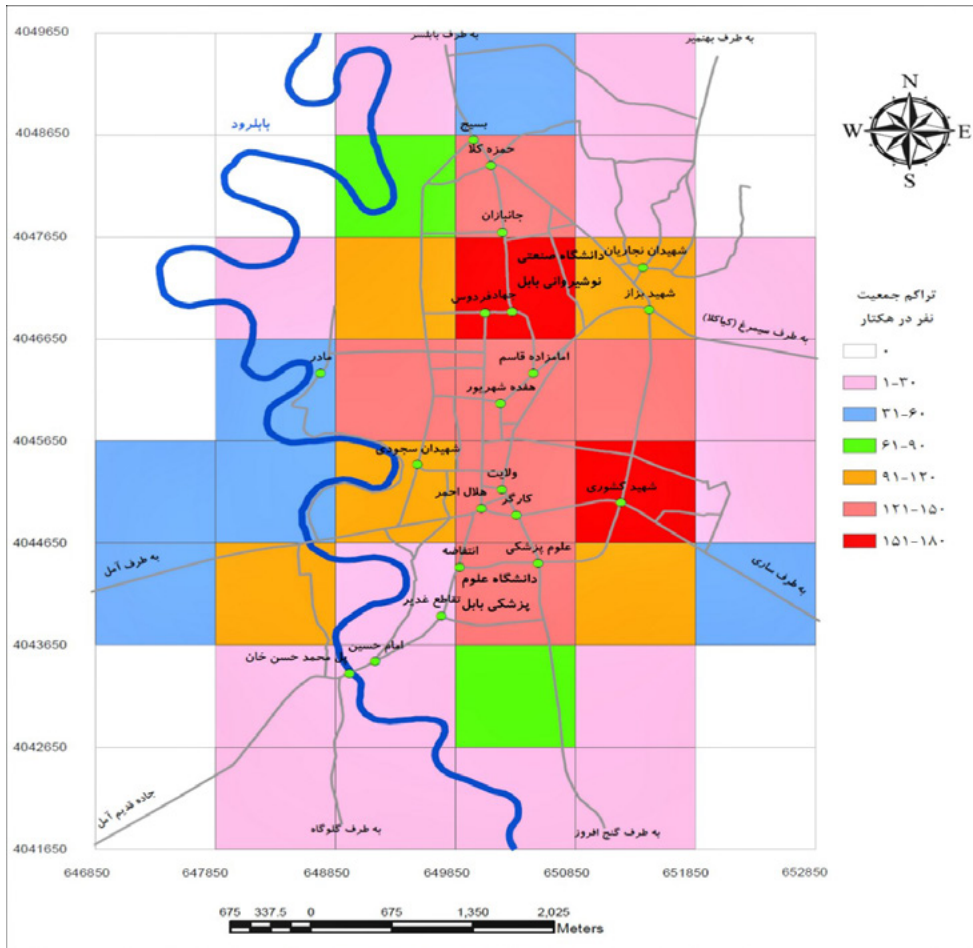
با توجه به نقشه پراکندگی جمعیت در شکل (۱۱) مناطق اطراف میدان‌های کشوری و باغ فردوس بیشترین میزان تراکم جمعیت بوده و مناطق پیرامونی این شهر کمترین تراکم جمعیت را دارا هستند.

شرایط لرزه‌ای زمین‌شناسی بابل تحت تأثیر شرایط صفحات تکتونیکی ایران در خاورمیانه قرار دارد. مهمترین و اصلی‌ترین گسل‌های اطراف شهر بابل عبارتند از: خزر، شمال البرز، کندوان، مشا، شمال تهران، آستانه، آتاری [۱۶] که در شکل (۱۲) به نمایش درآمده‌اند.

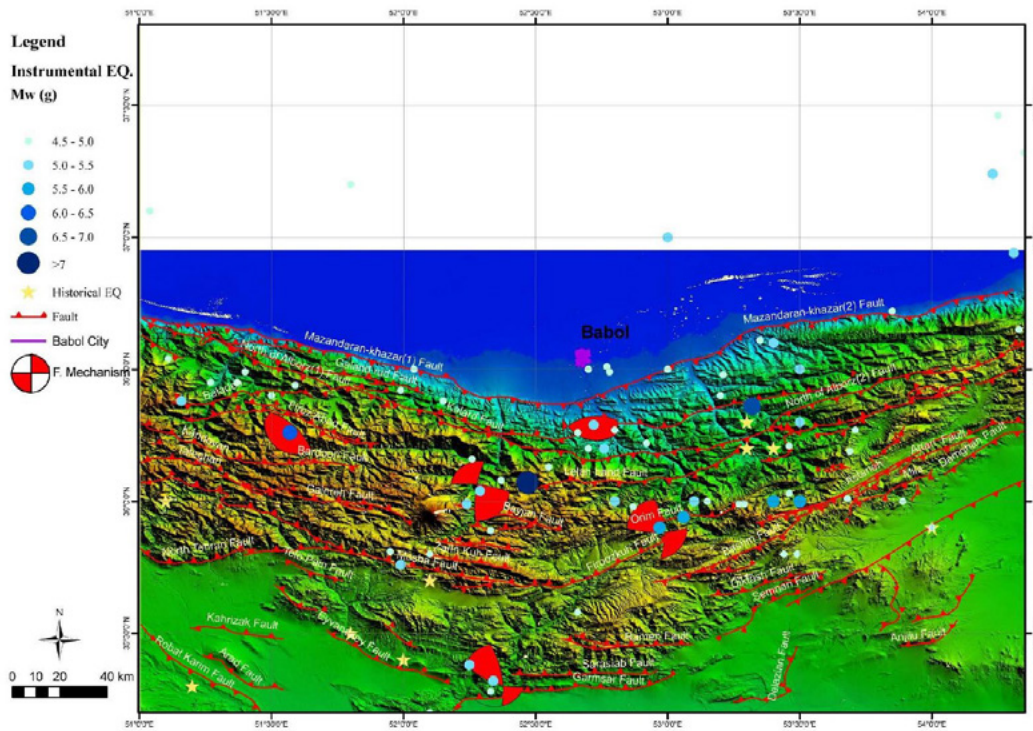
برای تحلیل خطرپذیری ناشی از خطر زمین‌لرزه در یک منطقه، داده‌های لرزه‌خیزی و روابط کاهندگی جنبش قوی زمین مورد نیاز است. عدم قطعیت‌های مربوط به روابط کاهندگی امواج لرزه‌ای از مهمترین عدم قطعیت‌ها در تجزیه و تحلیل خطر زلزله هستند. مطالعات گسترده‌ای در این خصوص در نقاط مختلف جهان انجام شده که این مطالعات منجر به نتایج گسترده متفاوتی از حداکثر شتاب زمین به علت استفاده از پایگاه داده‌های مختلف و روابط کاهندگی تجربی شده است. بنابراین انتخاب یک رابطه کاهندگی برای منطقه‌ای خاص بسیار وابسته به ویژگی‌های زمین‌شناسی و تکتونیکی آن منطقه بوده و استفاده از هر رابطه‌ای بدون توجه به این ویژگی‌ها ممکن است منجر به محاسبه مقادیر نادرست شود. در این مدل ۲ روابط کاهندگی مناسب پیشنهاد شده توسط کمپیل و بزرگنیا (۲۰۰۶) [۲۳] و آمبراسیس و داگلاس (۲۰۰۵) [۲۴] به کار برده شده که با توجه به نوع گسل‌ها و خاک منطقه مورد مطالعه و نزدیکی آن با نوع گسل‌ها و خاکی که در مقالات مرتبط با روابط کاهندگی بیان شده و با منطقه مورد مطالعه تطابق قابل قبولی دارند.

به منظور انجام تجزیه و تحلیل پاسخ یک بعدی سایت از نرم‌افزار دیپ‌سویل<sup>۲۰</sup> استفاده می‌شود. دیپ‌سویل یک برنامه تجزیه و تحلیل پاسخ یک بعدی سایت است که می‌تواند هر ۲ مورد (الف) یک بعدی غیرخطی و (ب) تجزیه و تحلیل خطی معادل یک بعدی را انجام دهد. دیپ‌سویل توسط پروفیسور یوسف<sup>۲۱</sup> هاشاش با همکاری چندین دانشجوی کارشناسی ارشد و کارشناسی در دانشگاه ایلینوی توسعه داده شد. (هاشاش و پارک ۲۰۱۱). [۱۷]





شکل ۱۱. نقشه پراکندگی جمعیت شهر بابل [۱۵]



شکل ۱۲. گستره مورد بررسی به شعاع ۱۵۰km شهر بابل [۱۶]



برای هر لایه خاک در پروفیل‌های خاک، وزن کل واحد، ضخامت، سرعت موج برشی و روابط  $G/G_{max}$  به عنوان توابع کرنش برشی و درصد میرایی<sup>۲۳</sup> به عنوان ورودی با منحنی‌های نقاط گسسته که فقط برای تجزیه و تحلیل خطی معادل قابل استفاده است، ارائه می‌شود. در مطالعه خاک‌های رسی از منحنی‌های  $G/G_{max}$  و میرایی پیشنهاد شده توسط وستیک و دابری<sup>۲۴</sup> (۱۹۹۱) و برای لایه‌های آبرفتی از منحنی‌های سید و ادريس<sup>۲۵</sup> (۱۹۹۱) برای لایه‌های رسی استفاده می‌شود. [۱۸]

امواج لرزه‌ای که از سمت لایه‌های زیرین آبرفتی حرکت می‌کنند و به سطح می‌رسند، باعث تغییر در مشخصات فرکانسی و دامنه خاک می‌شوند و بنابراین سبب تغییر شتاب و نمودارهای مختلف فوریه نشان داده شده با حرکت زمین لرزه‌ای می‌شوند.

برای تحلیل بزرگنمایی شتاب منطقه مورد بررسی<sup>۲۳</sup> شتاب‌نگار از پایگاه داده‌های موجود ملی و بین‌المللی انتخاب شده است. پس از تحلیل ساختگاه با نرم افزار دپ سویل دامنه شتاب افقی طیف فوریه سنگ بستر با خصوصیات دینامیکی آبرفت یا خصوصیات هندسی سطح ترکیب شده و طیف فوریه تازه به دست آمده را تشکیل می‌دهند. سرانجام تابع تقویت با تقسیم طیف فوریه سطح بر طیف فوریه سنگ بستر به دست می‌آید. با توجه به

نسبت‌های بزرگ‌نمایی<sup>۲۶</sup> آبرفتی، می‌توان با ضرب نسبت متوسط تشدید آبرفتی در مقادیر پراکندگی و شتاب‌های بستر مربوط به دوره‌های مختلف بازگشت مقادیر شتاب حداکثر زمین را برای دوره‌های مختلف بازگشت محاسبه کرد. جزئیات مربوط به این محاسبه با وارد کردن مقادیر شتاب سنگ بستر و نسبت تقویت آبرفت حاصل در فرآیند محاسبه در جدول یک گزارش شده است. [۱۶]

با توجه به اطلاعات نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی ساختگاه و هم روابط کاهندگی به کار گرفته شده برای گستره شهر بابل شتاب حداکثر زمین برای دوره بازگشت‌های مختلف با کمک ضرایب بزرگ‌نمایی به دست آمده و می‌توان آنها را به ۳ محدوده برای هر دوره بازگشت طبق جدول (۲) تقسیم بندی کرد و پهنه بندی جغرافیایی آن در گستره مورد بررسی در شکل (۱۳) را نمایش داد. [۱۶]

مدل توسعه یافته در این مقاله قابلیت در نظر گرفتن خطر زلزله به ۲ حالت سناریوی زلزله‌ای خاص و کاتالوگی شامل مجموعه‌ای از زلزله‌ها را دارد. در هر ۲ حالت موقعیت مکانی و خصوصیات لرزه‌ای زلزله‌های در نظر گرفته شده با شتاب حداکثر زمین (PGA) روی خاک بستر بیان و با ریزنمایی مشخص شده، مانند آنچه در

جدول ۱. مقادیر شتاب سنگ بستر و نسبت‌های تقویت آبرفتی و شتاب اوج زمین که در فرآیند محاسبه استفاده می‌شود [۱۶]

دوره بازگشت	ایستگاه زلزله	شتاب سنگ بستر	ضریب بزرگنمایی دامنه	ضریب بزرگنمایی متوسط آبرفتی	ماکزیمم شتاب زمین	میانگین ماکزیمم شتاب زمین
۲۵۰۰ ساله	بم	۰.۳۷۳	۲.۴۲	۲.۲۸	۰.۸۵	۰.۷۲
	سانفرناندو <sup>۲۷</sup>	۰.۳۶۴	۲.۲۸		۰.۸۳	
	پول <sup>۲۸</sup>	۰.۳۳۷	۲.۴۶		۰.۷۷	
	ابر <sup>۲۹</sup>	۰.۳۰۷	۲.۰۱		۰.۷	
	دیپوک <sup>۳۰</sup>	۰.۲۶۹	۲.۰۳		۰.۶۱	
	نورثریج <sup>۳۱</sup>	۰.۲۷۹	۲.۲۹		۰.۶۳	
۹۵۰ ساله	آوج <sup>۳۲</sup>	۰.۲۹۹	۲.۰۹	۲.۳۶	۰.۶۸	۰.۵۸
	بم	۰.۲۸۴	۲.۴۷		۰.۶۷	
	سانفرناندو	۰.۲۷۸	۲.۰۵		۰.۶۶	
	پول	۰.۲۶۲	۲.۴۸		۰.۶۲	
	ابر	۰.۲۳۵	۲.۱۱		۰.۵۵	
	دیپوک	۰.۲۰۵	۲.۰۲		۰.۴۸	
۴۷۵ ساله	نورثریج	۰.۲۱	۲.۵۷	۲.۵۲	۰.۵	۰.۵۴
	آوج	۰.۲۳۱	۲.۰۲		۰.۵۵	
	بلده	۰.۲۴	۲.۰۵		۰.۶	
	بم	۰.۲۲۷	۲.۰۵		۰.۵۷	
	تالش	۰.۲۲۳	۲.۴۸		۰.۵۶	
	قائن	۰.۱۹۶	۲.۵۳		۰.۴۹	
۱۰۹ ساله	سوزا <sup>۳۳</sup>	۰.۱۸۶	۲.۵۷	۳.۶۹	۰.۴۷	۰.۳۶
	خان زینو <sup>۳۴</sup>	۰.۱۰۸	۳.۷۷		۰.۴	
	میمند	۰.۰۹۴	۳.۶۶		۰.۳	
	کلور	۰.۰۸۷	۳.۶۱		۰.۳۲	
	قائن	۰.۱۰۲	۳.۷۱		۰.۳۸	

شکل (۱۳) نشان داده شده، تشدید می‌شود. برای این مطالعه موردی از حالت دوم استفاده شده است.

در این مقاله با توجه به ریزتقسیم‌بندی<sup>۳۵</sup> انجام شده برای شهر بابل برای هر مختصات جغرافیایی حداکثر شتاب زمین برای دوره بازگشت‌های مختلف به عناصر تأثیرگذار (ساختمان، پل و بدنه راه) با توجه به داده‌های شکل ۱۳ اعمال شده است.

### ۲-۳. مشخصات ساختمان‌های شهر بابل و تابع آسیب‌پذیری آنها

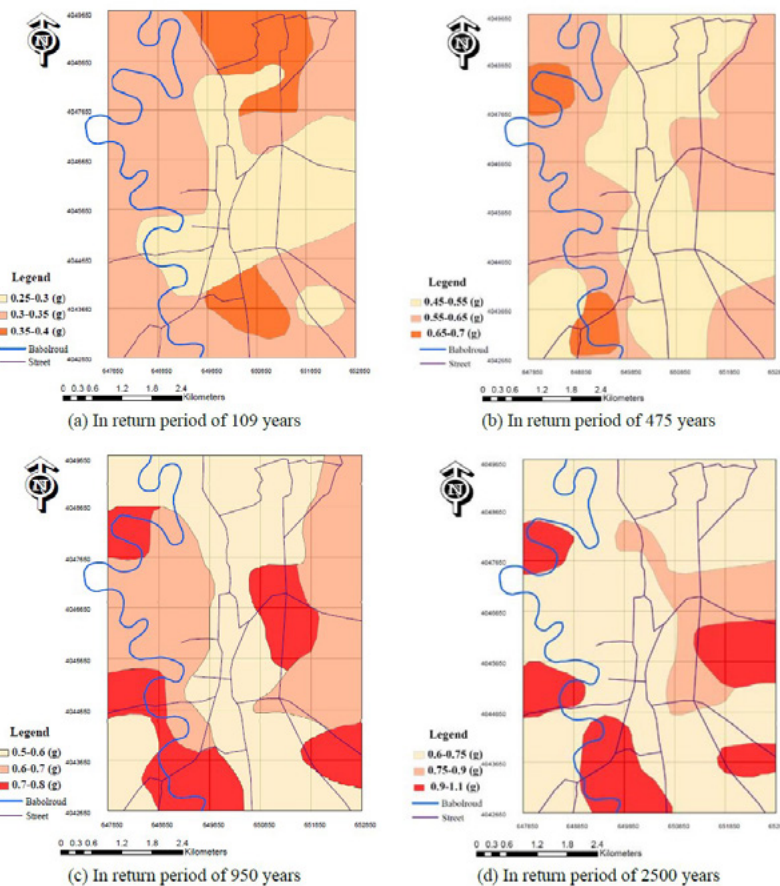
تعداد کل ساختمان‌های مسکونی در شهر بابل حدود ۱۰ هزار بلوک است. شکل (۱۴) نحوه طبقه‌بندی اولیه این ساختمان‌ها از نظر سیستم سازه‌ای، تعداد طبقات و سال ساخت که از عوامل تأثیرگذار در برآورد خسارات لرزه‌ای است را نشان می‌دهد. در شکل (۱۵) پراکندگی ساختمان‌ها از نظر تقسیمات کاربری در گستره مورد بررسی به نمایش درآمده است. [۱۵] شکل (۱۶) تعداد ساختمان‌های مسکونی بر اساس سازه و دوره زمانی ساخت را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی، برای برآورد خسارت ساختمان‌ها مطلوب است که از پارامترهای دینامیک مانند پیوندهای طبیعی هر ساختمان نسبت به ارتفاع و نوع سازه آن که مشخص‌کننده پاسخ دینامیکی ساختمان در هنگام وقوع زلزله است، استفاده شود؛ اما در ایران چنین پارامترهایی برای ساختمان‌ها در دسترس نیست. وقتی مشخصات نیروی زلزله مانند شتاب مؤثر زمین و شدت زلزله در مقیاس MMI وجود داشته باشد و سازه ساختمان هم مشخص باشد، میزان خسارت را می‌توان به‌طور قطعی برآورد کرد. با توجه به اطلاعات موجود برای برآورد خسارت لرزه‌ای ساختمان‌های شهر بابل طبقه‌بندی جزئی‌تری در ۹ گروه [۱۵] با در نظر گرفتن توأم تقسیمات سازه‌ای، تعداد طبقات و سال ساخت انجام شده که برای هر تیب ساختمانی با توجه به شکل (۱۶) منحنی شکنندگی خاصی ارائه شده است.

در مدل ارائه‌شده در این مقاله به کمک رابطه معرفی‌شده توسط لیپولت لینکیمر<sup>۳۶</sup> MMI به شتاب متناظر آن تبدیل

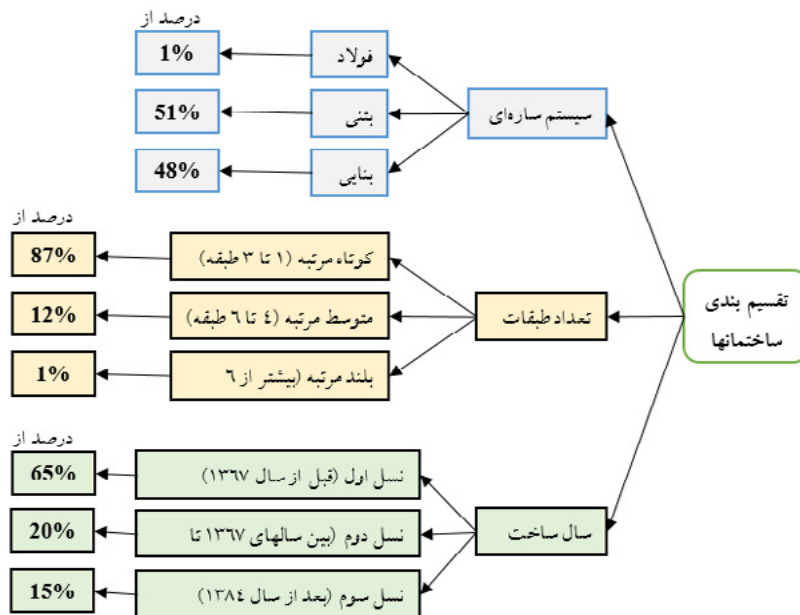
جدول ۲. محدوده شتاب حداکثر در هر دوره بازگشت سالانه

دوره بازگشت	محدوده شتاب حداکثر سطح زمین (PGA)		
۱۰۹ ساله	۰.۲۵g - ۰.۳۰g	۰.۳۰g - ۰.۳۵g	۰.۳۵g - ۰.۴۰g
۴۷۵ ساله	۰.۴۵g - ۰.۵۵g	۰.۵۵g - ۰.۶۵g	۰.۶۵g - ۰.۷۰g
۹۵۰ ساله	۰.۵۰g - ۰.۶۰g	۰.۶۰g - ۰.۷۰g	۰.۷۰g - ۰.۸۰g
۲۵۰۰ ساله	۰.۶۰g - ۰.۷۵g	۰.۷۵g - ۰.۹۰g	۰.۹۰g - ۱.۰g

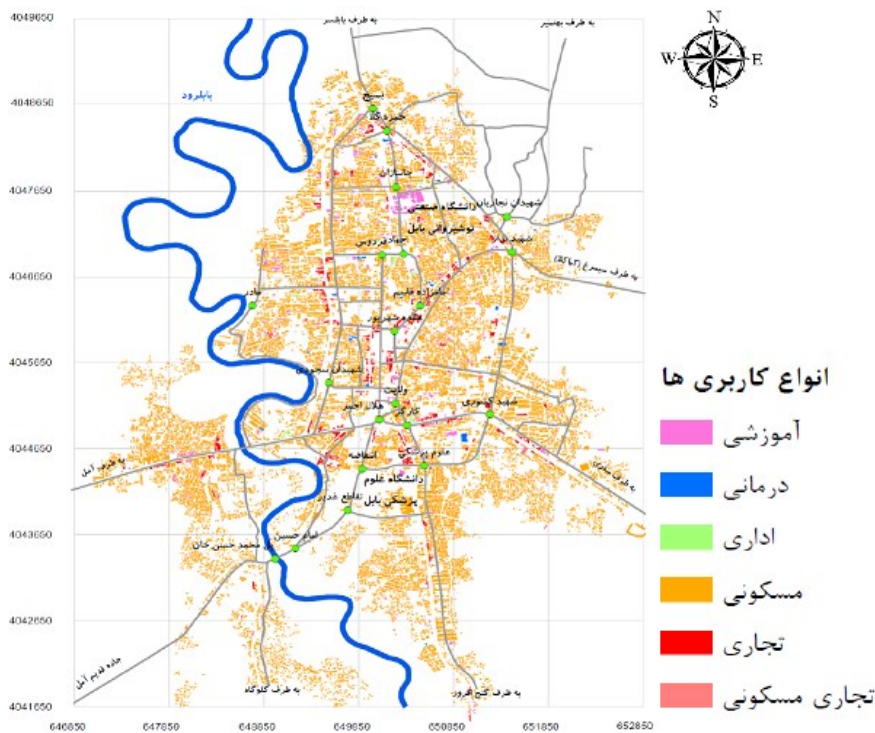


شکل ۱۳. نقشه نسبت بزرگنمایی شتاب در دوره بازگشت‌های (a) ۱۰۹، (b) ۴۷۵، (c) ۹۵۰ و (d) ۲۵۰۰ ساله [۱۶]

- شده (رابطه ۸ و ۹) و نمودارهای MMI اصلاح و سپس استفاده شده‌اند. [۱۹]
- (۸)  $MMI=2.33\log(PGA)+0.76$  (2<MMI<5)
- (۹)  $MMI=2.33\log(PGA)+0.76$  (2<MMI<5)
۱. سازه بنایی
  ۲. سازه فولادی نوع ۱: سازه فولادی ساخته شده بعد از سال ۱۳۸۴
  ۳. سازه فولادی نوع ۲: سازه فولادی ساخته شده بین سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۴ با یک تا ۳ طبقه
  ۴. سازه فولادی نوع ۳: سازه فولادی ساخته شده بین سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۴ با بیش از ۳ طبقه



شکل ۱۴. تقسیم بندی ساختمان‌ها [۱۵]



شکل ۱۵. پراکندگی ساختمان‌ها از نظر کاربری در گستره مورد بررسی (شهر بابل) [۱۵]



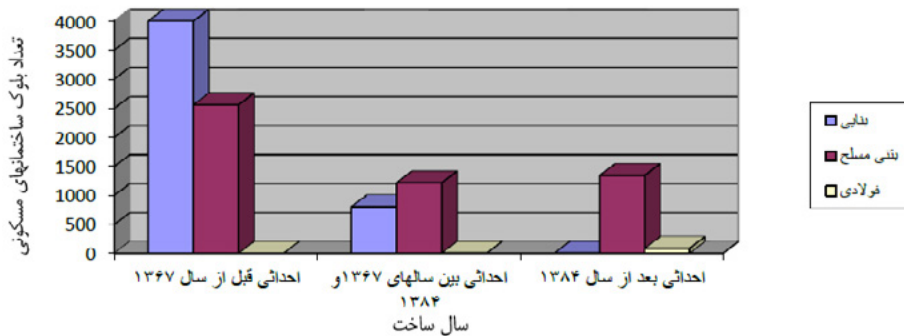
۵. سازه فولادی نوع ۴: سازه فولادی ساخته شده قبل از سال های ۱۳۶۷
۶. سازه بتنی نوع ۱: سازه بتنی ساخته شده بعد از سال ۱۳۸۴
۷. سازه بتنی نوع ۲: سازه بتنی ساخته شده بین سال های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۴ با یک تا ۳ طبقه
۸. سازه بتنی نوع ۳: سازه بتنی ساخته شده بین سال های ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۴ با بیش از ۳ طبقه
۹. سازه بتنی نوع ۴: سازه بتنی ساخته شده قبل از سال های ۱۳۶۷

### ۳-۳. پیشروی آوار ساختمان ها و احتمال انسداد مسیر

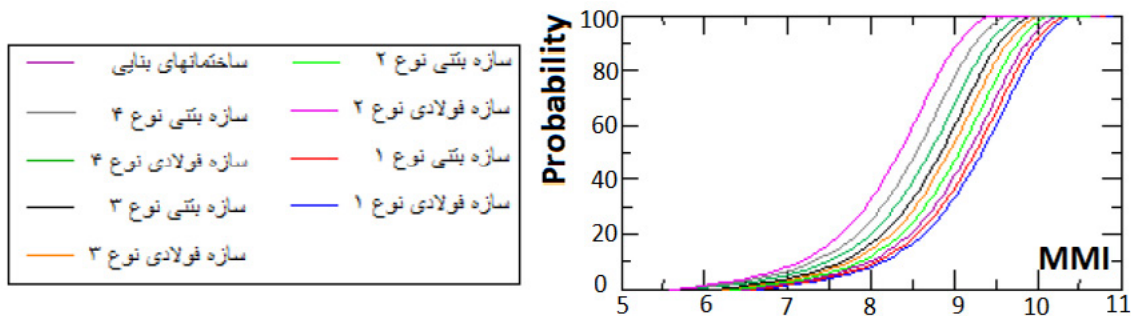
پس از محاسبه شدت خسارات لرزه ای وارده به ساختمان ها باید رابطه ای برای طول پیشروی آوار در هر یک از سطوح خرابی ارائه شود. بدین منظور ماتریسی احتمالاتی از حالات مختلف خرابی و انسداد با توجه به جدول (۳) پیشنهاد داده شده است. به طور مثال اگر خسارت وارده به ساختمان در سطح SD (خرابی

کم) باشد، احتمال رویداد حالات بدون انسداد، انسداد کم، انسداد متوسط و انسداد زیاد به ترتیب ۲۰٪، ۶۰٪، ۱۰٪ و ۱۰٪ است. برای ساختمانی آسیب دیده ۲ فاکتور عرض راه و ارتفاع سازه نقش مهمی در انسداد مسیر مجاورش دارند. بدیهی است که این احتمال انسداد با عرض راه نسبت عکس و ارتفاع سازه نسبت مستقیم دارد  $(W/H)^{۳۶}$ . همچنین آوار و فروریزش ساختمانی به صورت زیر تقسیم بندی میشود: [۲۰]

۱. بدون خرابی
۲. ریزش قسمتی از نما
۳. ترک بین دیوارهای عمود بر هم در گوشه یا بین دیوار و کلاف یا بین دیوار و سقف و ریزش نما با وسعت کم
۴. شکست پنجره ها
۵. خرابی جزئی در خرپشته و جان پناه
۶. ریزش نما با وسعت زیاد
۷. ریزش قسمت هایی از سقف
۸. خرابی دیوار و خرابی در اطراف بازشوها
۹. خرابی خرپشته و جان پناه
۱۰. خرابی قسمتی از ساختمان



شکل ۱۶. تعداد ساختمان های مسکونی بر اساس سازه و دوره زمانی ساخت [۱۵]



شکل ۱۷. منحنی شکنندگی برای تیپ های مختلف ساختمانی در گستره مورد بررسی [۱۵]

جدول ۳. ماتریس احتمالاتی انسداد و خرابی ساختمان [۲۰]

NC		انسداد			انسداد زیاد
		بدون انسداد SC	انسداد کم MC	انسداد متوسط HC	
بدون خرابی	ND	۱۰۰	۰	۰	۰
خرابی کم	SD	۲۰	۶۰	۱۰	۱۰
خرابی متوسط	MD	۰	۳۰	۵۵	۱۵
خرابی زیاد	HD	۰	۲۰	۳۰	۵۰

۱۱. خرابی کامل

۱۲. طبقه نرم

۱۳. خرابی پن کیک

### ۳-۳. مشخصات پل های شهر بابل و تابع آسیب پذیری آنها

شهر بابل دارای ۴ پل بزرگ است که موقعیت مکانی آنها در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

۱. پل شهید کشوری در قسمت شرقی شهر برای کمک به ترافیک این ناحیه و یکی از محورهای ارتباطی با مرکز استان مازنداران بنا شده است.

۲. پل موزیرج در قسمت غربی که به منظور محور ارتباطی جدید با شهر آمل بر روی بابلرود احداث شده است.

۳. پل کناری پل تاریخی محمدحسن خان بر روی رودخانه بابلرود ساخته شده و علاوه بر جاده قدیمی شهر بابل و آمل، محور ارتباطی بخش های گناب، بندپی شرقی و بندپی غربی با شهر بابل هم به شمار می آید.

۴. پل روگذر جدیدالحداث برای کمک به ترافیک قسمت غربی و شمال غربی این شهر جنب ایستگاه آمل

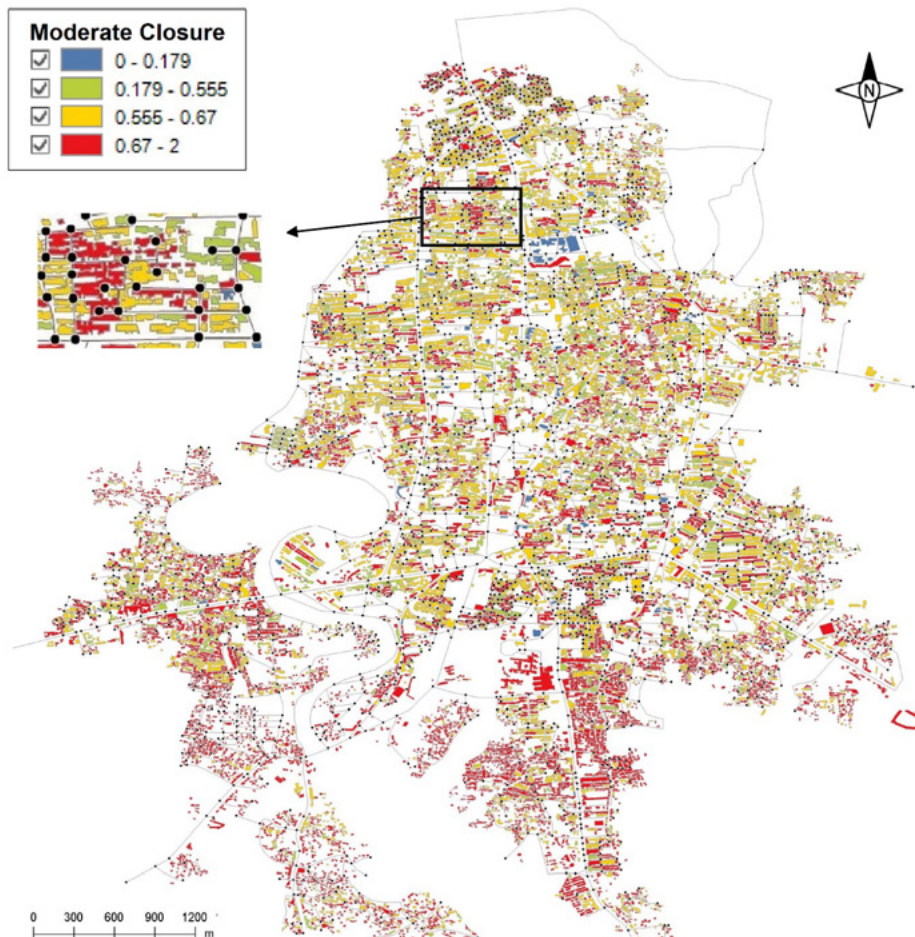
با توجه به پراکندگی این پل ها در صورت وقوع رویداد لرزه ای و خرابی آنها علاوه بر اختلال در عملکرد شبکه حمل و نقل درون شهری، بر روی شبکه ارتباطی بین شهری هم تأثیرگذار خواهد بود و به این دلیل امداد رسانی از شهرهای اطراف به این شهر را دچار وقفه و مشکل خواهد کرد.

در مورد نحوه فروریزش آوار ساختمانی پژوهشی توسط دکتر ذوالفقاری و همکاران [۲۰] انجام شده که می توان با کمک آن برای هر سطح آسیب لرزه ای ساختمانی و هر تیپ ساختمانی به طور مجزا احتمال وقوع هر یک از ۱۳ مورد بالا را تخمین زد. پس اعداد جدول (۳) می بایستی با توجه فاکتورهای عرض مسیر و ارتفاع ساختمان مجاور هر مسیر و هم احتمال وقوع هر یک از نحوه های ۱۳ گانه فروریزش آوار اصلاح شوند. برای نمونه احتمال وقوع هر یک از نحوه های ۱۳ گانه فروریزش آوار برای تیپ ساختمانی خاص (سازه فولادی نوع یک: سازه فولادی ساخته شده بعد از سال ۱۳۸۴) در ۲ سطح خرابی متوسط و زیاد در جدول (۴) آمده است.

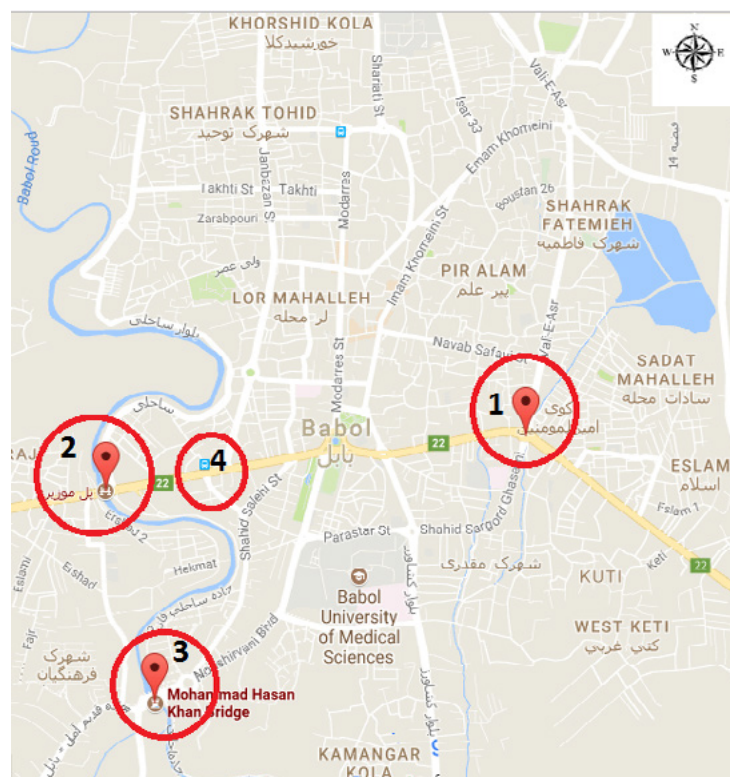
پس از آنالیز لرزه ای شهر بابل به کمک مدل مبتنی بر نظریه بییزی توسعه یافته برای حالات مختلف انسداد و دوره بازگشت های مختلف زلزله با توجه به رویدادهای لرزه ای معرفی شده، احتمال انسداد هر مسیر ناشی از ساختمان های اطراف آن حاصل خواهد شد. شکل (۱۸) احتمال اینکه خرابی هر بلوک ساختمانی برای زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله باعث انسداد متوسط مسیر مجاورش شود را برای شهر بابل نشان می دهد.

جدول ۱۰۴. احتمال وقوع پیشروی آوار اصلاح شده [۲۰]

Moderate Damage (1) Type			Heavy Damage (1) Type		
حالات خرابی	احتمال وقوع	احتمال طول پیشروی آوار (ضریبی از ارتفاع ساختمان)	حالات خرابی	احتمال وقوع	احتمال طول پیشروی آوار (ضریبی از ارتفاع ساختمان)
بدون خرابی	۰	۰	بدون خرابی	۰	۰
ریزش قسمتی از نما	۰	۰,۲۵	ریزش قسمتی از نما	۰	۰,۲۵
ترک بین دیوارهای عمود بر هم در گوشه یا بین دیوار و کلاف یا بین دیوار و سقف و ریزش نما با وسعت کم	۰	۰,۰۸	ترک بین دیوارهای عمود بر هم در گوشه یا بین دیوار و کلاف یا بین دیوار و سقف و ریزش نما با وسعت کم	۰	۰,۰۸
شکست پنجره ها	۰	۰,۳۳	شکست پنجره ها	۰	۰,۳۳
خرابی جزئی در خریشته و جان پناه	۰	۰,۳۳	خرابی جزئی در خریشته و جان پناه	۰	۰,۳۳
ریزش نما با وسعت زیاد	۰,۴۵	۰,۶۷	ریزش نما با وسعت زیاد	۰	۰,۶۷
ریزش قسمت هایی از سقف	۰,۰۵	۰,۲	ریزش قسمت هایی از سقف (طاق ضریبی)	۰	۰,۲
خرابی دیوار و خرابی در اطراف بازشوها	۰,۲۵	۰,۳۳	خرابی دیوار و خرابی در اطراف بازشوها	۰	۰,۳۳
خرابی خریشته و جان پناه	۰,۲۵	۰,۶۷	خرابی خریشته و جان پناه	۰	۰,۶۷
خرابی یک قسمت از ساختمان	۰	۰,۸۵	خرابی یک قسمت از ساختمان	۰,۴	۰,۸۵
خرابی کامل	۰	۰,۸۵	خرابی کامل	۰,۳	۰,۸۵
طبقه ی نرم	۰	۰,۶۷	طبقه ی نرم	۰,۱۵	۰,۶۷
خرابی پن کیک	۰	۰,۵	خرابی پن کیک	۰,۱۵	۰,۵



شکل ۱۸. احتمال خرابی هر بلوک ساختمانی برای زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله برای حالت انسداد متوسط مسیر مجاورش

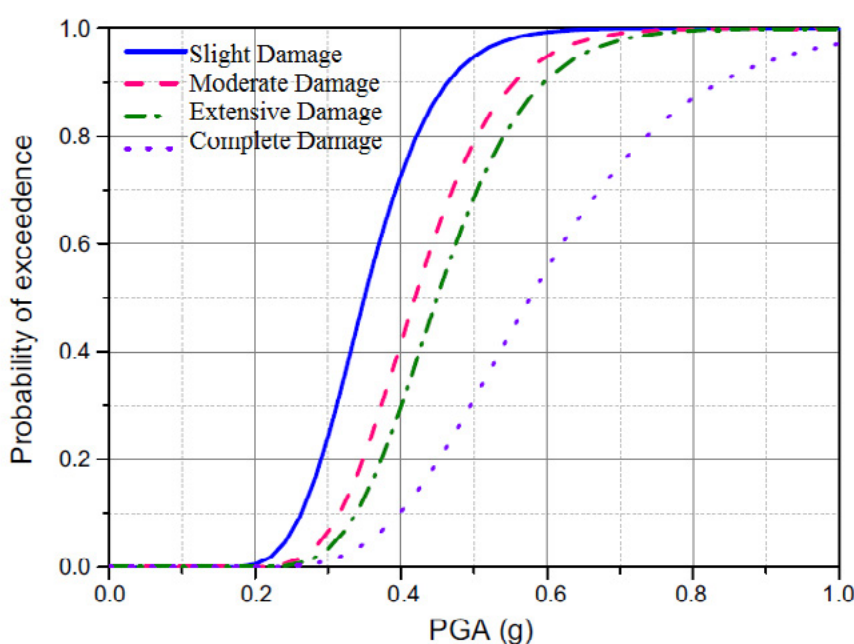


شکل ۱۹. موقعیت مکانی پل های شهر بابل



جدول ۵. دسته‌بندی کلی پل‌ها

پیوسته (MSC)	چند دهانه با تکیه‌گاه ساده (MSSS)	تک دهانه با تکیه‌گاه ساده (SS)
بتنی	بتنی	بتنی
بتنی با مقطع جعبه‌ای	بتنی با مقطع جعبه‌ای	فلزی
فلزی	فلزی	
دالی شکل	دالی شکل	



شکل ۱۹. منحنی شکنندگی پل‌های پیوسته چند دهانه بتنی [۲۲]

دشواری صورت می‌گیرد، پس فرض می‌شود که در صورت خرابی کم انسداد کامل رخ نمی‌دهد. در حالت خرابی متوسط به بالاتر برای پل‌ها تردد از پل ناممکن خواهد شد؛ به همین علت فقط یک حالت انسداد زیاد (کامل) برای پل‌ها در نظر گرفته شده که احتمال آن ۱۰۰ است.

پس از آنالیز خرابی برای هر بلوک ساختمانی و پل‌های اطراف یک مسیر، با توجه به روش درخت منطقی، ضرب احتمال‌ها در هر شاخه و کمک از قانون بی‌زی نمایش گرافیکی احتمال انسداد مسیرها برای هر حالت انسداد تعریف شده که ناشی از پیشروی آوار عناصر اطراف آن مسیر است (شکل ۲۰).

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتم احتمالاتی با کمک نظریه بی‌زی و با توجه به اینکه احتمال انسداد مسیری بر روی مسیر پیش روی آن هم تأثیرگذار است، برای برآورد احتمال انسداد راه‌ها که در تخمین

در مورد آسیب‌پذیری پل‌های شهر بابل مطالعاتی صورت نپذیرفته؛ ولی با بررسی‌های صورت‌گرفته بر روی مشخصات سازه‌ای آنها و با قضاوتی مهندسی می‌توان از منحنی شکنندگی ارائه شده برای پل‌های مشابه‌ای که در سایر مناطق ایران احداث شده، استفاده کرد.

با یک تقسیم‌بندی ساده بر اساس تعداد دهانه و شرایط تکیه‌گاهی پل‌ها به ۳ دسته، تک‌دهانه با تکیه‌گاه ساده (SS)، چند دهانه با تکیه‌گاه ساده (MSSS) و چند دهانه پیوسته (MSC) تقسیم‌بندی می‌شوند (جدول ۵) و همچنین بر اساس نوع جنس شاه‌تیر اصلی آن به ۲ دسته بتنی و فلزی تقسیم می‌شوند. [۲۱]

پل‌های شهر بابل جزو دسته چند دهانه پیوسته بتنی قرار می‌گیرند که منحنی شکنندگی آن در شکل (۱۹) به نمایش درآمده است.

برای احتمال انسداد مسیر ناشی از خسارت لرزه‌ای وارده به پل‌ها، با توجه به اینکه در حالت خرابی کم امکان تردد از پل به



شکل ۲۰. احتمال انسداد مسیر در حالت انسداد متوسط برای زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله

مراکز اضطراری جدید (ایستگاه‌های آتش‌نشانی، بیمارستان‌ها، مراکز بهداشتی و مراکز اورژانس) و هم اولویت‌بندی در مقاوم‌سازی عناصر اطراف هر مسیر و اصلاح یا معرفی جاده‌های تازه مفید باشد.

### ۵. پی‌نوشت

1. Chen & Eguchi
2. Kiremidjian et al
3. Viswanath & Peeta
4. Jankowski & Richard
5. Bono & Gutiérrez
6. Jenelius & Mattsson
7. Bayesian
8. Posterior
9. Likelihood
10. Prior
11. Marginal
12. Chain Rule
13. Peak Ground Acceleration
14. Peak Ground Velocity
15. Peak Ground Displacement
16. Permanent Ground Displacement
17. Fragility Curves
18. Extended Debris
19. DEEPSOIL

عملکرد شبکه حمل‌ونقل درون‌شهری پس از وقوع زلزله کاربرد دارد، ارائه شده است. این رویکرد اثرات هر ۲ آسیب ساختمان و همچنین آسیب‌های پل در هر مسیر را در نظر می‌گیرد. مدل مبتنی بر GIS توسعه یافته می‌تواند عناصر اطراف هر مسیر شامل ساختمان‌ها و پل‌ها را با کمک آنالیزهای جغرافیایی برای شهر بابل شناسایی کرده و مورد بررسی قرار دهد. نتایج اولیه برای شهر بابل نشان می‌دهد که صدمه به سازه‌های اطراف هر مسیر و پیشروی آوار آنها در مسیرهای مجاورش می‌تواند یک مسئله مهم برای اختلال در عملکرد شبکه حمل‌ونقل درون‌شهری به عنوان یکی از شریان‌های حیاتی شهر باشد. ساختمان‌های قدیمی و تراکم در بافت قدیم شهر از مهمترین علل اصلی چنین نتایجی است.

یکی از کاربردهای چنین مطالعه‌ای قابلیت استفاده از آن برای یافتن مسیر بهینه بین نقاط شهری خواهد بود. این نقاط می‌توانند مناطق آسیب دیده نیازمند کمک و مراکز امدادی باشند. کارایی پاسخ اضطراری در ساعت‌ها و روزهای پس از وقوع زلزله توسط مراکز امدادی به طور مستقیم به عملکرد شبکه راه‌های درون‌شهری و یافتن مسیرهای بهینه پس از وقوع زلزله مربوط می‌شود. بنابراین مشابه این مطالعات می‌توانند به مقامات تصمیم‌گیرنده و مدیران بحران کمک کند تا با شناخت از شهر، تصمیم‌گیری و اقدام به موقع و مناسب از خسارات بیشتر پس از زلزله جلوگیری کنند. چنین مطالعاتی همچنین می‌تواند در فرآیند انتخاب سایت برای

- for Earthquake Response. Transportation Research Board, 1-10.
- 9 . P Jankowski, L Richard (1994). Integration of GIS-Based Suitability Analysis and Multicriteria Evaluation in a Spatial Decision Support System for Route Selection. *Environment and Planning Journals B: Urban Analytics and City Science*, 323-340.
  - 10 . F. Bono, E. Gutiérrez (2010). GIS-BASED METHOD TO ASSESS SEISMIC VULNERABILITY OF INTERCONNECTED INFRASTRUCTURE A case of EU gas and electricity networks. Luxembourg: JRC Scientific and Technical Report.
  - 11 . Erik Jenelius, Lars-Göran Mattsson (2006). Developing a methodology for road network vulnerability analysis. Nectar Cluster 1 Seminar, 12th – 13th May 2006, Molde University College. Molde (Norway).
  - 12 . Liang, Chang (2011). Transportation system modeling and applications in earthquake. Illinois: Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign.
  - 13 . Gehl, Pierre (2017). Bayesian Networks for the Multi-Risk Assessment of Road Infrastructure. London: Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering EPICentre - Earthquake and People Interaction Centre.
  - 14 . (۱۳۹۵). سرشماری عمومی نفوس و مسکن. بابل: مرکز آمار ایران. Retrieved from <https://fa.wikipedia.org>
  - 15 . بابل، د. ص. (۱۳۹۳). گزارش آسیب پذیری و مدیریت بحران شهر بابل. بابل: اداره کل راه و شهرسازی استان مازندران
  - 16 . H.R. Tavakoli, M. T. (2016). Site effect microzonation of Babol, Iran. *Geomechanics and Engineering*, 821-845.
  - 17 . Hashash, Y.M.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D. and Musgrove, M. (2011), DEEPSOIL 5.0, User Manual and Tutorial; 107 p.
  - 18 . Seed, R.B., Dickenson, S.E. and Mok, C.M. (1991), "Seismic response analysis of soft and deep cohesive sites: A brief summary of recent findings", Proceedings of CALTRANS First Annual Seismic Response Workshop, Sacramento, CA, USA, December.
  - 19 . Linkimer, Lipolt (2008). "Relationship between Peak Ground Acceleration and Modified Mercalli Intensity". University of Arizona.
  20. Youssef M.A
  21. Hashash and Park
  22. Damping (%)
  23. Vucetic and Dobry
  24. Seed and Idriss
  25. Amplification Factor
  26. San Fernando
  27. Poul
  28. Abbar
  29. Deyhok
  30. Northridge
  31. Avaj
  32. Suza
  33. Khan zinu
  34. Micro zonation
  35. Lipolt Linkimer
  36. Weight of Road and Height of Building

## ۶. مراجع

- ۱ . پورمحمدی، م. (۱۳۸۷). آسیب پذیری شهرهای ایران در برابر زلزله و نقش. جغرافیا و توسعه ۱۱۸.
- 2 . Hosseini, M. (2008). A RISK MANAGEMENT MODEL FOR INTER-CITY ROAD SYSTEMS. The 14 World Conference on Earthquake Engineering (p. 2). Beijing: China.
- 3 . Chang, Liang (2010). Transportation system modeling and applications in earthquake. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- ۴ . مهینمی، ا. ش (۱۳۸۴). مدیریت بحران شبکه حمل و نقل در هنگام زلزله. تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران.
- 5 . Chen, Y., & Eguchi, a. R. (2003). Post-earthquake road unblocked reliability estimation based on analysis of randomness of traffic demands and road capacities. Sixth U. S. Conf. and Workshop on Lifetime Earthquake Engineering, (p. 3). Reston: ASCE.
- 6 . Anne Kiremidjian, James Moore , Yue Yue Fan , Ozgur Yazlali , Nesrin Basoz & Meredith Williams( 2007). Seismic Risk Assessment of Transportation Network Systems. *Earthquake Engineering*, 371-382.
- 7 . Pamela Murray-Tuite, Hani Mahmassani (2004). Methodology for Determining Vulnerable Links in a Transportation Network. Transportation Research Board, 88-96.
- 8 . Kannan Viswanath, Srinivas Peeta (2007). Multicommodity Maximal Covering Network Design Problem for Planning Critical Routes



- ۲۰ . محمدرضا ذوالفقاری، میثم مغیثی (۱۳۹۰). مدل سازی احتمالاتی انسداد شبکه حمل و نقل درون شهری پس از وقوع زلزله، مطالعه موردی منطقه ۳ شهری تهران. تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- 21 . Reginald DesRoches, J. P. (2008). Seismic Risk Assessment of the Transportation Network of Charleston, South Carolina. The Sixth National Seismic Conference on Bridges & Highways. Charleston, South Carolina.
- 22 . Araliya Mosleh, M. S. (2016). Seismic fragility analysis of typical pre-1990 bridges due to near and far-field ground motions. International Journal of Advanced Structural Engineering, 1-9.
23. Kenneth W. CAMPBELL and Yousef BOZORGNIA (2006). Campbell-Bozorgnia NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and SA at Selected Spectral Periods Ranging from 0.01–10.0 Seconds. C-B NGA Report (PEER).
24. N. N. Ambraseys, J. Douglas, S. K. Sarma & P. M. Smit (2005). Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration. Bulletin of Earthquake Engineering volume 3, pages1–53.