

مجله مخاطرات محیط طبیعی، سال چهارم، شماره ششم، زمستان ۹۴

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲۹

صفحات: ۱۰۵ - ۱۳۷

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر بردسکن در برابر زلزله با استفاده از مدل سلسله مراتبی وارون (IHPW)

مجید ابراهیمی^۱، دکتر محمد سلمانی مقدم*^۲، دکتر ابوالقاسم امیر احمدی^۳، مریم نوری^۴

چکیده

امروزه آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله به عنوان یکی از مسائل اساسی جهان، پیش روی متخصصان رشته‌های گوناگون قرار دارد. مطالعات تکنیکی و تاریخی زلزله در ایران نشان می‌دهد که زلزله‌های ویرانگر در راستای گسل درونه، در موارد بسیاری سبب خرابی و کشته شدن صدها و گاهی هزاران نفر شده‌است. شهر بردسکن به دلیل وجود چندین گسل فعال در اطراف و درون آن، ریسک بالایی در برابر خطر زلزله دارد. هدف از این پژوهش شناسایی میزان آسیب‌پذیری اجزاء و عناصر شهری با استفاده از مدل‌ها و روش‌های موجود در کاهش آسیب‌پذیری در برابر زلزله می‌باشد. برای رسیدن به این هدف ۱۶ شاخص کالبدی- فضایی مؤثر بر آسیب‌پذیری شهرها در سطح جهانی شناسایی شد؛ سپس در قالب مدل‌های برنامه‌ریزی و تلفیقی فازی و تحلیل سلسله مراتبی وارون، برآورد مناسبی از آسیب‌پذیری شهر در برابر زلزله با استفاده از داده‌های مکانی و توصیفی اجزاء، عناصر اصلی و رفتاری ساختمانی و تعیین تأثیر هر کدام از معیارهای به‌کار رفته در میزان آسیب‌پذیری ارائه گردید. همچنین با ارائه سناریوهای زلزله در شدت‌های مختلف به مدل‌سازی و ریزپهنه‌بندی آسیب‌ورده به ساختمان‌ها در برابر زلزله پرداخته شده‌است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با حرکت از سمت جنوب به طرف شمال شهر بردسکن بر میزان آسیب‌پذیری قطعات ساختمانی افزوده می‌شود. همچنین مدل‌سازی سناریوهای زلزله در شدت ۶ و ۸ مرکالی نشان می‌دهد که میزان آسیب‌پذیری بر اساس تعداد ساختمان‌ها به ترتیب در محلات ۳، ۱، ۶، ۵، ۴ و ۲ می‌باشد. مهم‌ترین دلایل این وضعیت نزدیکی به گسل، بالا بودن شتاب افقی زمین (PGA)، بالا بودن تراکم ساختمانی بنا و پایین بودن کیفیت و مصالح ساختمانی است.

کلید واژه‌ها: آسیب‌پذیری، زلزله، مرکالی، مدل سلسله مراتبی معکوس، بردسکن.

۱- دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری

۲- *استادیار برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری (نویسنده مسئول) ml_moghadam@hsu.ac.ir

۳- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری

۴- کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری

مقدمه

در طی قرن بیستم بیش از ۱۱۰۰ زلزله مخرب در نقاط مختلف کره زمین روی داده است که بر اثر آن بیش از ۱۵۰۰۰۰۰ نفر جان خود را از دست داده‌اند. ۹۰ درصد این تلفات عمدتاً ناشی از ریزش ساختمان‌هایی بوده که از اصول مهندسی و ایمنی کافی برخوردار نبوده‌اند (Lantada and Pujades, 2008: 2). آسیب‌پذیری شهر نسبت به حوادث طبیعی چون زلزله می‌تواند برآیندی از نقش رفتارهای انسانی باشد که اهمیت نظام‌های برنامه‌ریزی در کاهش اثرات مخرب حوادث طبیعی را نشان می‌دهد (Rashed and Weeks, 2003: 1). در کشورهای توسعه یافته تلفات مالی حوادث طبیعی بیشتر از تلفات جانی است؛ اما در کشورهای در حال توسعه این امر عکس است که نشان‌دهنده برنامه‌ریزی صحیح در کشورهای توسعه یافته است (Ebert et al, 2008: 1307). با این حال امکان کنترل و یا پیش‌بینی دقیق بلایای طبیعی وجود ندارد و آن چه امکان‌پذیر است گام برداشتن در مسیر ساخت شهرهایی با آسیب‌پذیری کمتر در مواجهه با یک بلای طبیعی است (Moehle et al, 2009: 2). زلزله، عاملی طبیعی است که آثار بلندمدت اجتماعی و اقتصادی بر محیط پیرامون خود می‌گذارد. ماهیت پیچیده و متغیر این آثار را می‌توان به ماهیت متغیر توزیع خطر (به ویژه شدت لرزش)، تعداد جمعیت در معرض خطر، آسیب‌پذیری محیط مصنوع و میزان مقاومت جوامع نسبت داد (Wald et al, 2011: 125). بیشتر خسارت فیزیکی و اقتصادی چنین حوادثی نتیجه نبود برنامه‌ریزی و ضعف در استانداردهای ساختمانی و زیرساخت‌ها است (Linares and Alejandra, 2012: 1). در دو دهه گذشته مطالعات زیادی در خصوص سوانح طبیعی، به خصوص زلزله، به منظور کاهش آسیب‌پذیری آن انجام شده است. در ایران فرج‌زاده‌اصل و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی آسیب‌پذیری مسکن شهری در برابر زلزله در منطقه ۹ تهران پرداخته‌اند. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۲) مدل‌سازی ضریب آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله را با استفاده از روش تاپسیس مدل‌سازی کردند. شمعی و همکاران (۱۳۹۲) سنجش عوامل آسیب‌رسان ناشی از زلزله را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی بررسی کردند. در جهان نیز، ابرت^۱ و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله پرداختند. راشد و ویک^۲ (۲۰۰۳) میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله را با استفاده از روش سلسله‌مراتبی و نرم افزار GIS، مدل‌سازی کردند. آنیونیونی^۳ و همکاران (۲۰۰۷) تأثیرات زلزله بر تأسیسات صنعتی را با استفاده از اطلاعات زلزله‌های پیشین بررسی و الگویی را ارائه کردند. تانگ و ون^۴ (۲۰۰۹) با استفاده از هوش مصنوعی و GIS، خطر زلزله را در شهر دیانگ چین ارزیابی کردند. لانتادا و پوجادس^۵ (۲۰۰۹) در پژوهشی ضمن مدل‌سازی آسیب‌پذیری شهر بارسلون، به ارزیابی خسارت انسانی و اقتصادی این شهر پرداختند.

معیارهایی چون دوری و نزدیکی به گسل، شتاب افقی زمین، تعداد طبقات، دانه‌بندی قطعات، دوری و نزدیکی به مراکز درمانی، عمق سطح ایستایی، تراکم ساختمانی بنا، میزان محصوریت معابر، قدمت ابنیه، فاصله از مراکز و تأسیسات خطرزا، عرض گذرگاه، دوری و نزدیکی به فضاهای بی‌کالبد، تراکم جمعیتی، کیفیت ابنیه، مصالح ابنیه و همجواری کاربری‌ها در کاهش یا افزایش آسیب‌ها و خسارت‌های ناشی از زلزله تأثیر به‌سزایی دارند. به‌همین دلیل

1- Ebert

2- Rashed and Weeks

3- Antonioni

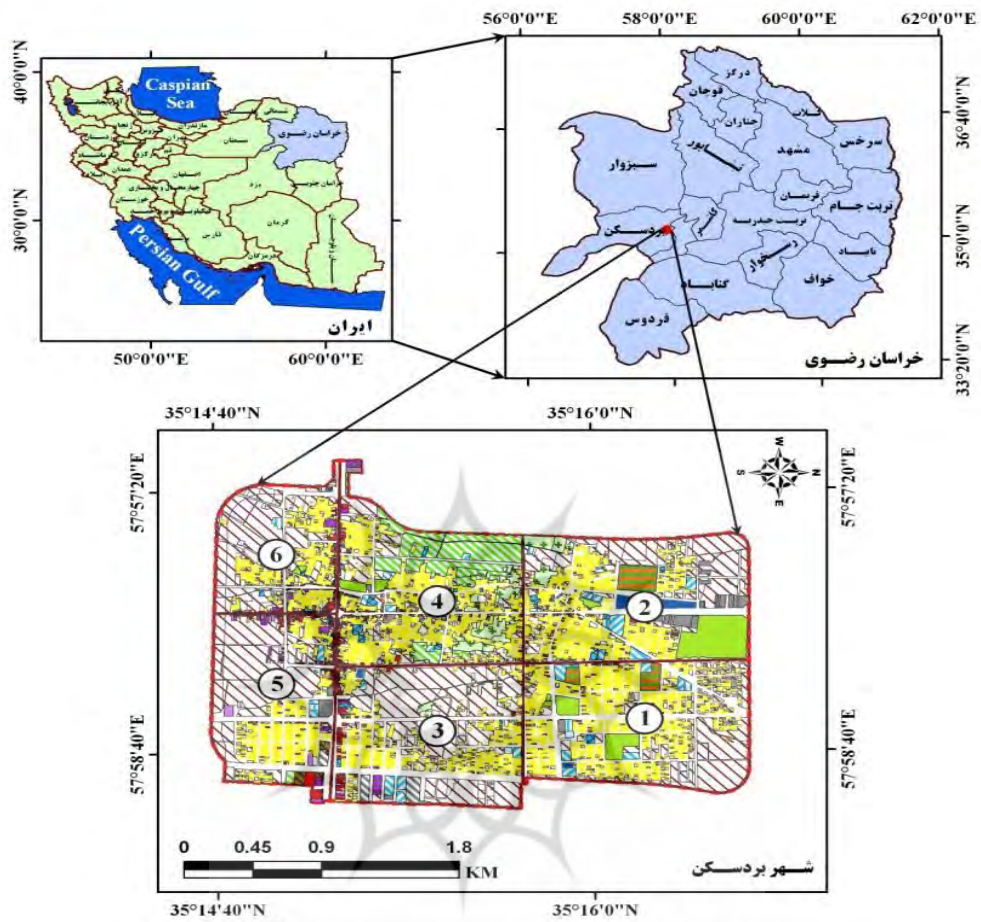
4- Tang and Wen

5- Lantada and Pujades

مطالعه درست آنها و مشخص کردن مسیرها و محدوده‌های آسیب‌پذیر و یا امن با توجه به معیارهای ذکر شده، هدف این مقاله است تا آسیب ناشی از زلزله در شهر بردسکن را کاهش داده و امکان برنامه‌ریزی درست را فراهم آورد.

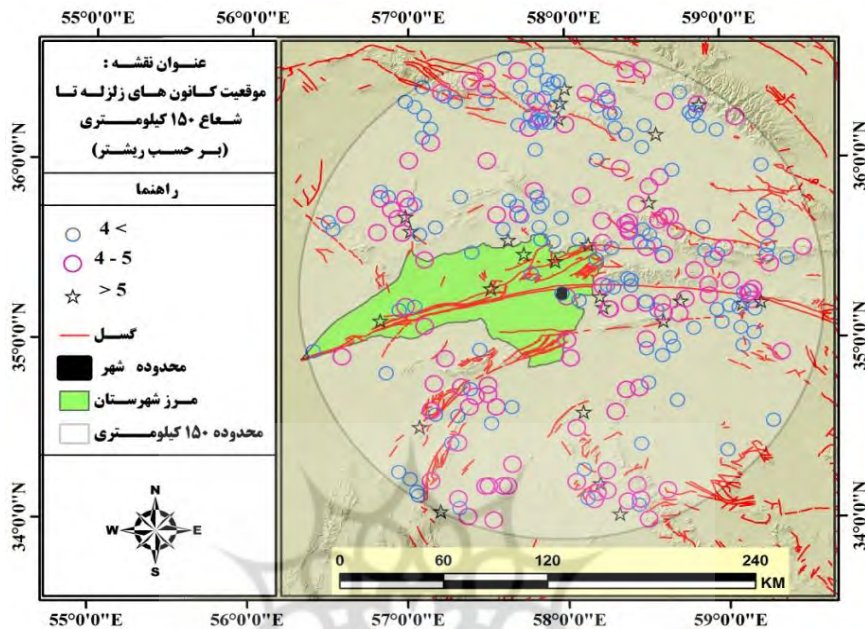
منطقه مورد مطالعه

شهر بردسکن با مساحت $7/32$ کیلومتر مربع واقع بر گستره جغرافیایی استان خراسان رضوی است که بین 32 تا 14 عرض شمالی و 39 تا 57 طول شرقی در ارتفاع 985 متری از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). جمعیت این شهر از 5058 نفر در سال 1335 به 26107 نفر در سال 1390 افزایش یافته است. این شهر بین ناحیه کوهستانی در شمال و منطقه کویری جنوب واقع شده و گسترش آن طولی و در امتداد شمالی-جنوبی است. در جهت طولی است. از لحاظ زمین‌شناسی این شهر در دشت آبرفتی وسیعی قرار دارد. این دشت از شمال به ارتفاعات کوه آهوبیم از جنوب به تپه‌های ماهورهای نئوژن، از شرق به دشت کاشمر و از غرب به دشت انابد محدود می‌گردد. فعالیت‌های تکتونیکی منطقه بسیار شدید است که از دلایل اصلی آن عبور گسل درونه از شمال شهر بردسکن می‌باشد. با توجه به داده‌های ثبت شده زلزله تا شعاع 150 کیلومتری این شهر طی سال‌های 1990 تا 2014 میلادی، تعداد 274 زمین‌لرزه در این محدوده به ثبت رسیده است (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها) (شکل ۲).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

پژشک گل محمدی
رتال جامع علوم انسانی



شکل ۲: رو مرکز زمین لرزه ها و گسل ها تا شعاع ۱۵۰ کیلومتری شهر بردسکن

داده ها و روش شناسی

موادی که در این پژوهش به کار گرفته می شود، مشتمل بر نقشه ها یا آرشیوهای اطلاعاتی مربوط به معیارهایی هستند که در تعیین ضریب آسیب پذیری شهرها در برابر زلزله به کار گرفته می شوند. در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وارون^۲ (IHWP) آسیب پذیری ساختمان ها در برابر زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل ابتدا نقشه های اصلی که در تخریب ناشی از زلزله مؤثر هستند از نظر اهمیت درجه بندی و امتیازدهی می شوند، در مرحله دوم این نقشه ها با استفاده از توابع فازی به نقشه های فازی تبدیل و در مرحله سوم با توجه به امتیازات هر نقشه، نقشه های فازی بر پایه مدل (IHWP) با هم ترکیب می شوند (شکل ۳). این مدل منطقی برای تلفیق لایه های اطلاعاتی مختلف بر پایه وارون رتبه و اهمیت آنها است. در این روش لایه ها طبق امتیازاتی که بر پایه وارون درجه اهمیت هر یک به آنها نسبت داده شده بود با توجه به رابطه (۱) با یکدیگر تلفیق می شوند.

رابطه ۱:

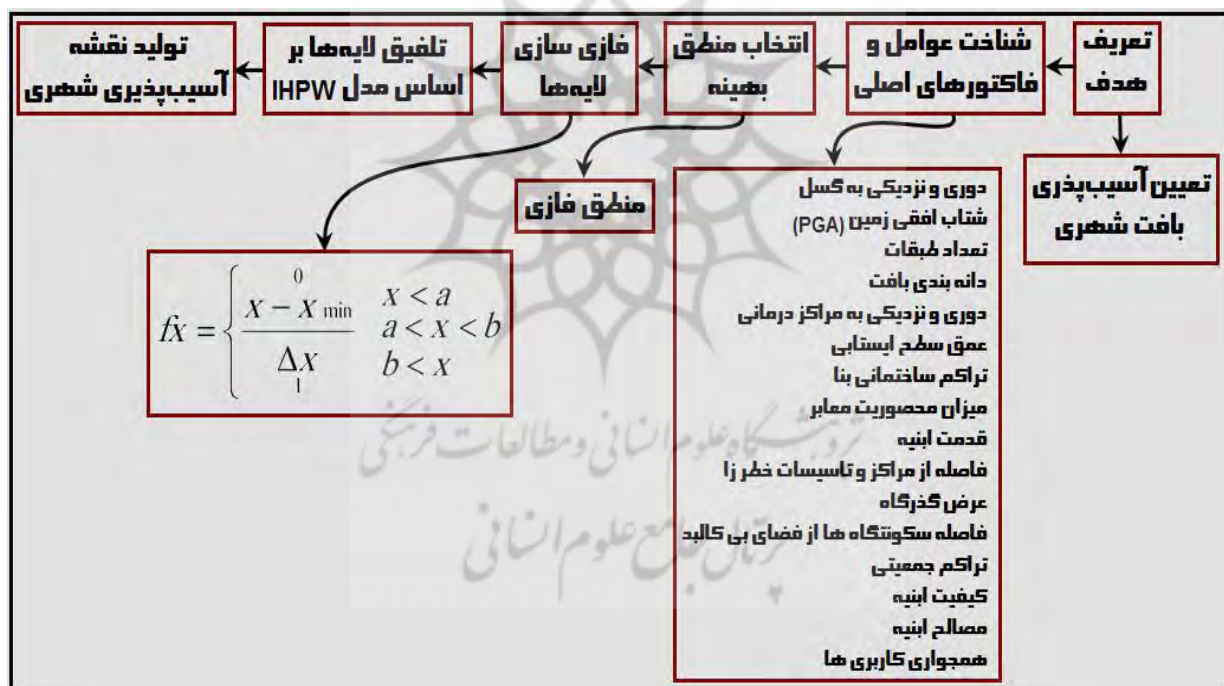
$$p(v) = \sum_{i=1}^n W_i (f(x_i))$$

- 1- Epicenter
- 2- Inversion Hierarchical Weight Process

در این فرمول؛ $p(v)$: امتیاز آسیب‌پذیری، n : تعداد لایه‌های مورد استفاده در مدل IHPW w_i : وارون رتبه لایه i که به عنوان وزن لایه در نظر گرفته می‌شود و $f(x_i)$: مقادیر فازی لایه i هستند.
تابع فازی مورد استفاده در این پژوهش از نوع خطی بوده که داده‌ها را به صورت خطی و با شیب یکسان از حالت کلاسیک به حالت فازی با توجه به رابطه (۲) تبدیل می‌کند.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x - X_{\min}}{\Delta x} & a < x < b \\ 1 & b < x \end{cases} \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این فرمول؛ $f(x)$: تابع فازی، x : عامل آسیب‌پذیری، a و b کمینه و بیشینه میزان قابل قبول برای آسیب‌پذیری و Δx : اختلاف x_{\min} و x_{\max} هستند.



شکل ۳: مراحل انجام پژوهش جهت تولید نقشه آسیب‌پذیری شهر بردسکن

یافته‌های پژوهش

معیارهای مؤثر در تخریب ساختمان‌ها بر اثر زلزله

به منظور بررسی میزان آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه در برابر زلزله، ۱۶ معیار مورد بررسی قرار گرفتند که عبارتند از:

حداکثر شتاب زلزله^۱ (PGA)

از معیارهای مهم در طراحی و علت اصلی آسیب‌ها، بیشینه شتاب زمین در هنگام وقوع زلزله می‌باشد که مقیاسی از نیروی وارده بر سازه است (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۳۹۲: ۵۹). مدت دوام حرکات شدید تأثیر بسیاری بر شدت جنبش و تکان سازه دارد. هرچه که زمین لرزه دارای حداکثر شتاب متوسط و مدت دوام طولانی باشد، خسارات بیشتری از زمین لرزه‌ای با شتاب بزرگ‌تر اما مدت دوام کوتاه‌تر بر جای می‌گذارد (قدرتی، ۱۳۸۶: ۱۹). پژوهشگران وابستگی حداکثر شتاب زمین با فاصله تا مرکز زمین لرزه را به صورت کاهیدگی تعریف می‌کنند. بر این اساس مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله تا مرکز زلزله، حداکثر شتاب زمین کاهش می‌یابد (تهرانی‌زاده و حامدی، ۱۳۸۱: ۳۹). نقشه حداکثر شتاب برای منطقه مورد مطالعه با توجه به رابطه (۳) تهیه گردید که در این رابطه نقشه فاصله از گسل به جای مؤلفه R و نقشه به دست آمده از بزرگی زلزله با توجه به روابط (۴) و (۵) به جای مؤلفه M از معادله فوق قرار داده شد. واحد نقشه حداکثر شتاب زلزله سانتی‌متر بر مجذور ثانیه (cm/s²) است.

$$a = \frac{1080e^{0.5M}}{(R+25)^{1.32}} \quad \text{رابطه ۳}$$

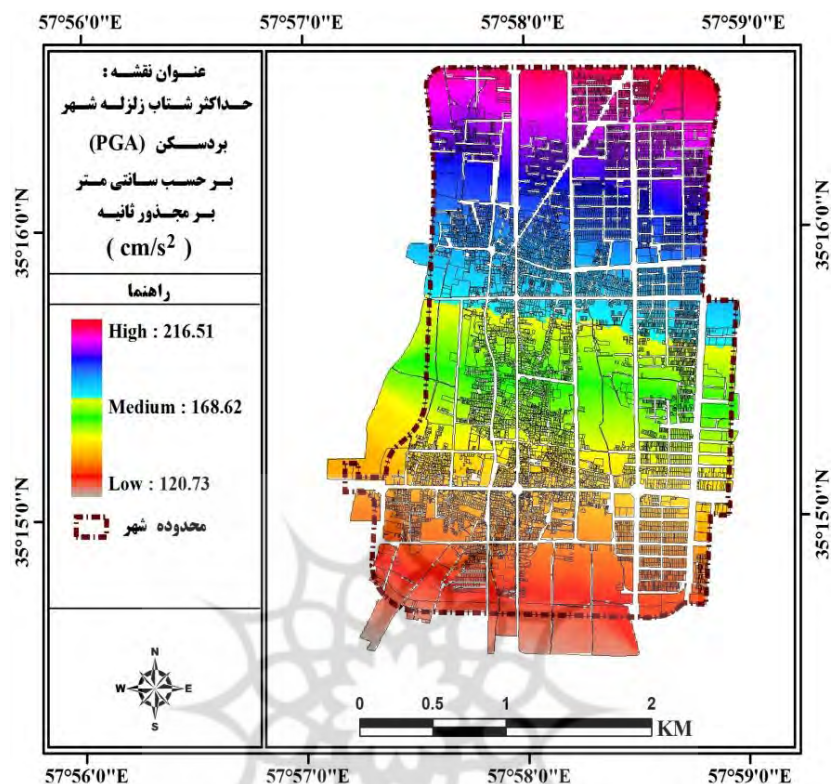
در این رابطه a : حداکثر شتاب در مقیاس گال، e : ضریب ثابت و برابر با مقدار $۲/۷۱۸$ ، M : بزرگی زلزله در مقیاس ریشتر و R : فاصله از گسل بر حسب کیلومتر است (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، کاتالوگ زمین لرزه‌ها). برای تعیین شدت زمین لرزه در محل شهر یا ساختگاه، رابطه (۴) مورد استفاده قرار گرفت.

$$I_R = I + 6.453 - 0.00121(R) - 4.960 \log(R+20) \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه؛ I_R : شدت زمین لرزه در محل سازه در مقیاس مرکالی، I : شدت زمین لرزه در محل کانون زمین لرزه در مقیاس مرکالی و R : فاصله کانونی بر حسب کیلومتر است. برای تبدیل شدت زلزله به بزرگی رابطه (۵) به کار گرفته شده است.

$$I = 1.7Ms - 2.8 \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه I : شدت زلزله در مقیاس مرکالی و Ms : بزرگی زلزله در مقیاس ریشتر است. با توجه به تهیه نقشه‌ها در هر مرحله نقشه رستری حداکثر شتاب زلزله برای شهر بردسکن ساخته شد که درجه مطلوبیت بر پایه حداکثر شتاب کاهش می‌یابد (شکل ۴).

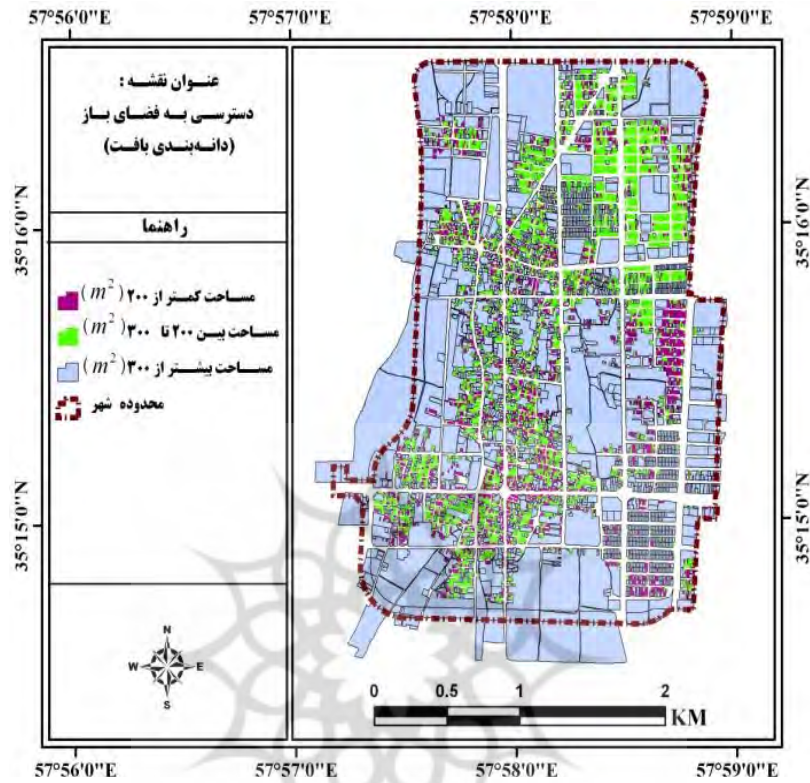


شکل ۴: حداکثر شتاب زلزله (PGA) شهر بردسکن

دسترسی به فضاهای باز شهری (دانه‌بندی بافت)

دسترسی به فضاهای باز شهری به همراه تفکیک قطعات زمین در آسیب‌پذیری مؤثر است؛ چراکه با کوچک شدن قطعات، فضای باز میان قطعات کوچک‌تر می‌شود. این مکان‌ها فضاهایی برای پناه‌گیری، تجمع و استقرار جمعیت‌های آسیب‌دیده، گروه‌های امداد و نجات و ارائهٔ سرویس‌ها و خدمات شهری را فراهم می‌آورند. فضاهای باز توانایی جداسازی بخش‌های با آسیب‌پذیری مختلف را از یکدیگر دارند (عزیزی و اکبری، ۱۳۸۷: ۳۴). آلن و برایانت^۱ (۲۰۱۰) اصطلاح «شهر دوم»^۲ را برای فضاهای باز شهری به کار می‌گیرند (Allan and Bryan, 2010: 38). آن‌ها معتقدند که بعد از یک زلزلهٔ بزرگ، شبکهٔ فضاهای باز شهری خانه‌ای موقت برای افرادی محسوب می‌شوند که نیاز به انطباق سریع با محیط جدید برای روزها، ماه‌ها و حتی سال‌ها دارند. شکل (۵) دسترسی به فضاهای باز شهری را در شهر بردسکن نشان می‌دهد:

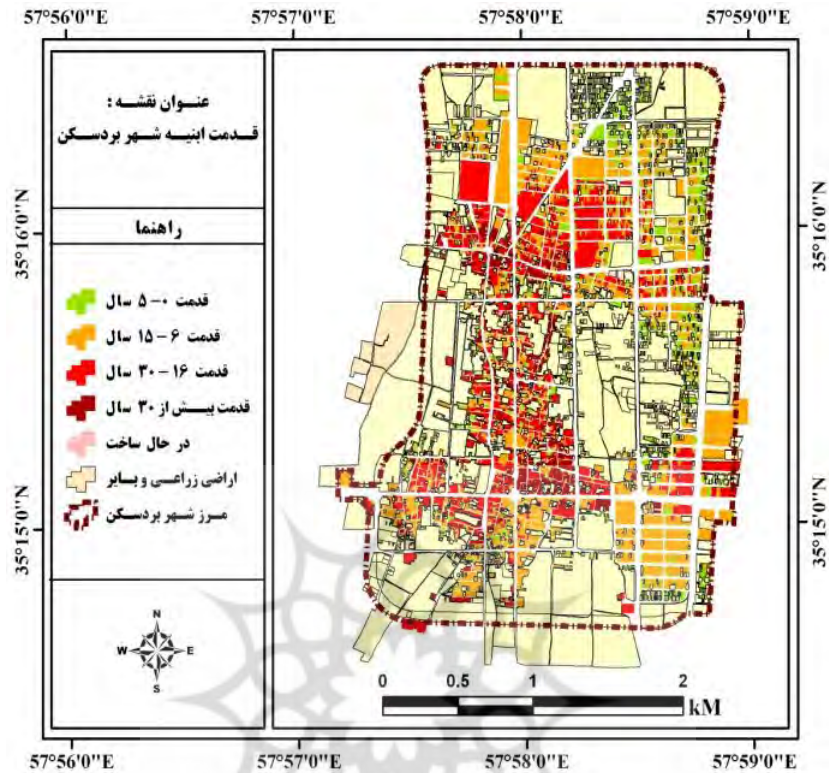
1- Allan and Bryant
2- Second City



شکل ۵: نقشه فضاهای باز شهر بردسکن به حسب متر مربع

قدمت ابنیه (عمر بنا)

به طور نسبی، عمر مفید ساختمان در ایران ۳۰ سال برآورد شده است (حسینی، ۱۳۸۱: ۹). به گونه‌ای که هر چه عمر ساختمان بیشتر باشد، میزان آسیب‌پذیری نیز بیشتر خواهد بود. شکل (۶) عمر بناهای موجود در شهر بردسکن را نشان می‌دهد:



شکل ۶: قدمت ابنیه (عمر بنا) در شهر بردسکن

نسبت عرض راه به ارتفاع جداره (درجه محصوریت)

این شاخص، شاخص بسیار مهمی در بررسی آسیب‌پذیری زلزله می‌باشد. با بالا رفتن درجه محصوریت (ارتفاع بیشتر ساختمان نسبت به عرض کم معبر) احتمال بسته شدن معابر افزایش می‌یابد؛ زیرا باعث می‌شود با ریختن آوار ساختمان‌ها بر خیابان‌ها و بسته شدن آنها، عملیات امداد و نجات و پناه‌گیری با مشکل رو به رو شود (حبیبی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸۵). شکل (۷) نسبت عرض راه به ارتفاع ساختمان در شهر بردسکن را نشان می‌دهد:



شکل ۷: نسبت عرض راه به ارتفاع جداره (درجه محصوریت)

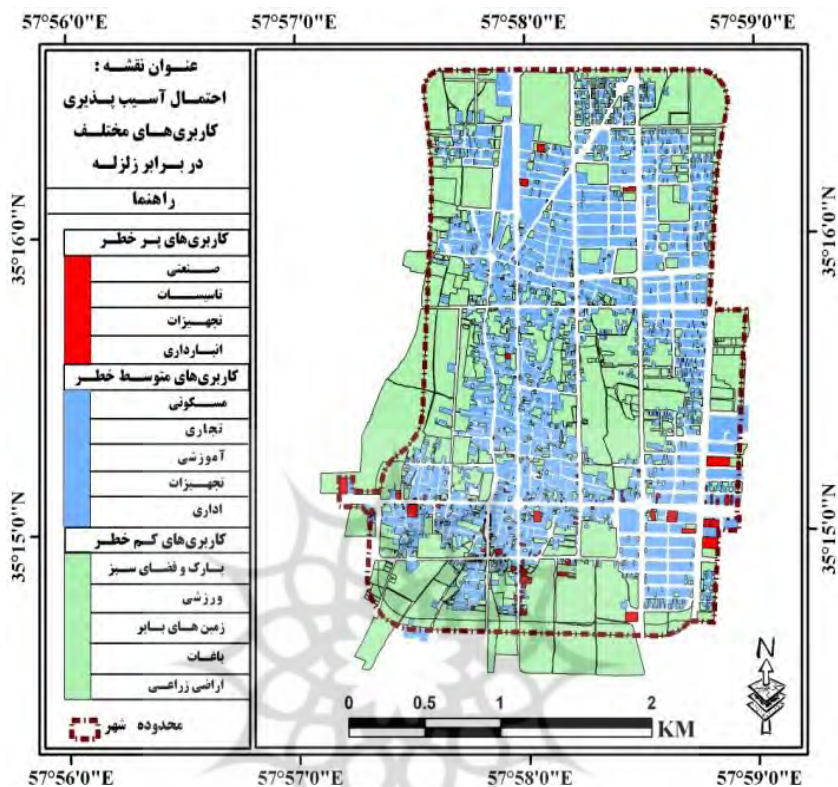
تراکم ساختمانی بناها

این عامل نقش مهمی در میزان آسیب پذیری بناها دارد. با افزایش تراکم، میزان نخاله ناشی از تخریب ساختمان نیز بیشتر خواهد شد که این بر میزان آسیب پذیری بافت تأثیر مستقیم دارد. در واقع تراکم ساختمانی درصدی از مساحت زمین است که به صورت عمودی برای ساختمان سازی استفاده می شود و با بیشتر شدن آن، احتمال تخریب و آسیب پذیری بیشتر می شود (شیعه و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۹). شکل (۸) تراکم ساختمانی بناها را در شهر بردسکن نشان می دهد:



احتمال آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف در برابر زلزله

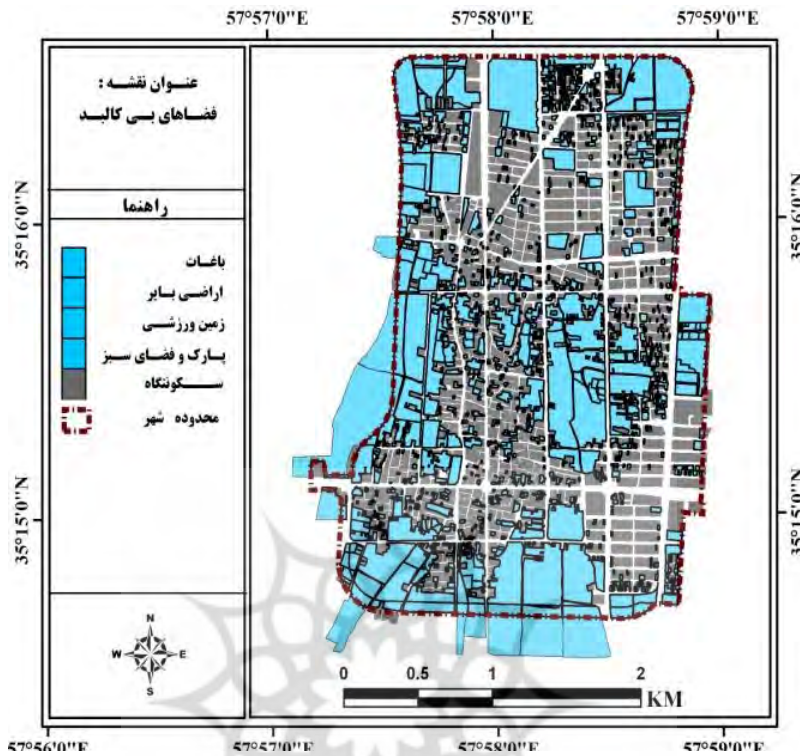
بسته به نوع کاربری، احتمال آسیب‌پذیری بیشتر یا کمتر می‌شود. به همین خاطر کاربری‌های محدوده مورد مطالعه به سه دسته " کاربری‌های پرخطر، کاربری‌های با خطر متوسط و کاربری‌های کم‌خطر" در برابر زلزله تقسیم شده‌اند. در عین حال کاربری‌هایی در شهر وجود دارند که در بحث چگونگی کنترل بحران ناشی از زلزله و کاهش اثرات سوء آن، اهمیت حیاتی پیدا می‌کنند. از این رو است که در این مواقع، اهمیت بنا مطرح می‌شود (احدنژاد روستی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۷۸). شکل (۹) احتمال آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف در برابر زلزله را نشان می‌دهد:



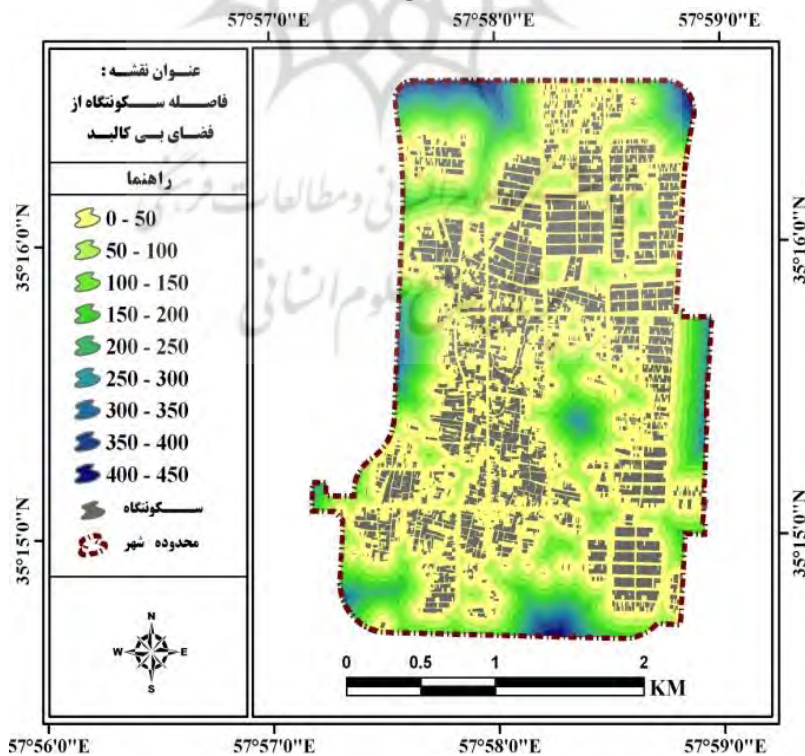
شکل ۹: احتمال آسیب پذیری کاربری های مختلف در برابر زلزله

فاصله سکونت گاه ها از فضاهای بی کالبد

فضاهای بی کالبد می توانند در زمانی که احتمال وقوع زلزله وجود دارد به عنوان فضای پناه گیری و پس از رخداد زلزله نیز برای دایر کردن مراکز امدادی و درمانی و یا برای فرود اضطراری هلیکوپتر استفاده شوند. این فضاها باید در مکان های کم خطر زلزله قرار گیرند. نداشتن پوشش گیاهی امکان استفاده در مواقع امداد رسانی، به ویژه برپایی اسکان اضطراری را بالا می برد. نزدیکی این مکان به مراکز درمانی به دلیل انتقال سریع تر کمک های فوری بسیار مطلوب خواهد بود (حبیبی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸۵). شکل (۱۰) فضاهای بی کالبد شهر بردسکن و شکل (۱۱) فاصله سکونت گاه از فضاهای بی کالبد را نشان می دهد:

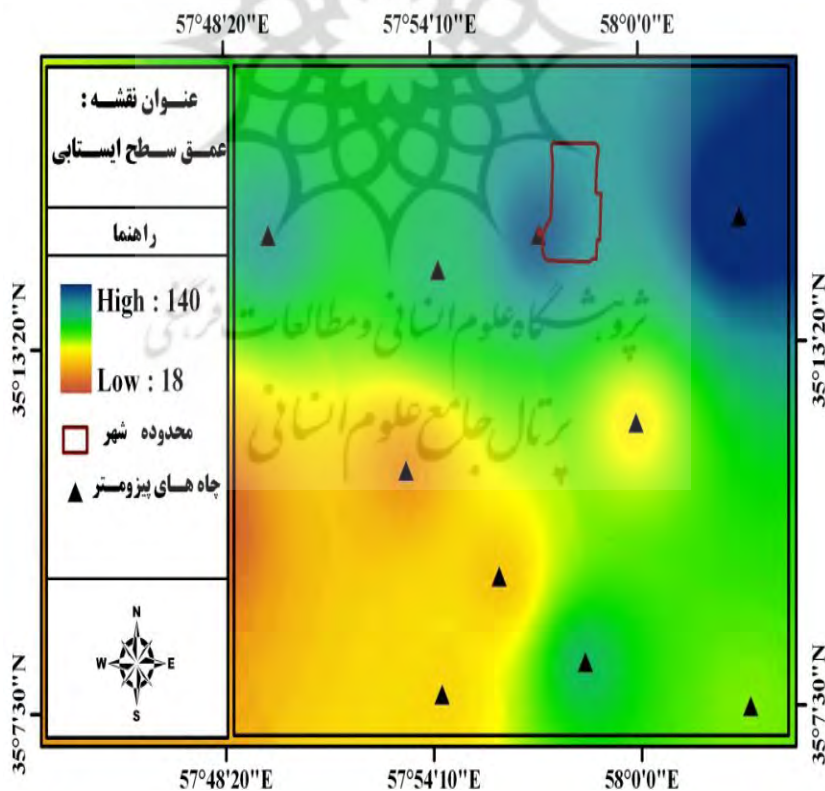


شکل ۱۰: فضاهای بی کالبد شهر بردسکن



شکل ۱۱: فاصله سکونتگاه از فضاهای بی کالبد

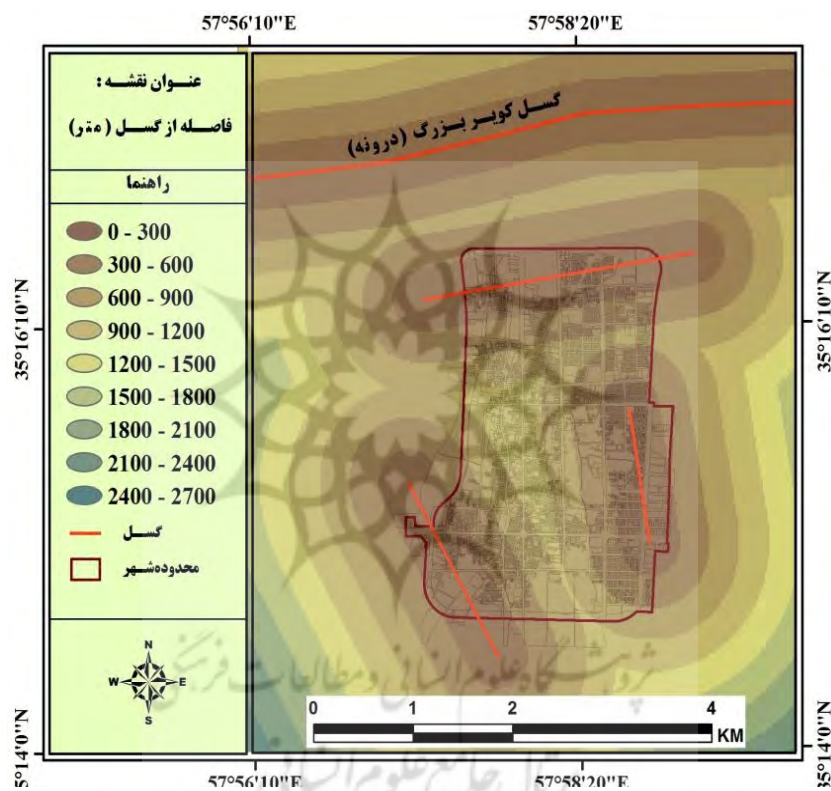
توجه به عمق سطح ایستابی برای پهنه‌بندی مناطق در برابر خطر زلزله و تأثیر مشترک آب و خاک در بررسی مسائل ژئوتکنیک و توان باربری خاک، حائز اهمیت ویژه است. اگرچه در خاک‌هایی با دانه‌بندی پیوسته، وجود آب در خاک به‌خودی خود کم اهمیت است؛ اما در بعضی از لایه‌های خاک، درصد بسیاری از مواد ریزدانه به خصوص ذرات رُس دیده می‌شود که وجود آب در این لایه‌ها، عامل مهمی در تقلیل خصوصیات مکانیکی خاک و کاهش توان باربری و افزایش نشست خاک تحت بارگذاری است. از این رو بررسی اثرات توأم آب و خاک در نقاطی با سطح آب زیرزمینی زیاد، لازم است (گتیمیری، ۱۳۸۳: ۲۵). در ارزش‌گذاری نقشه معیار عمق سطح ایستابی، مناطقی که در آن عمق سطح ایستابی به‌سطح زمین نزدیکتر بود، جزء مناطقی با ضریب آسیب‌پذیری بالا طبقه‌بندی شدند، چون که آب موجود در خاک در هنگام بروز زلزله، در مقابل تغییر شکل یا شکست به صورت سطح بی‌اثر و خنثی عمل می‌کنند (خانلری، ۱۳۷۷: ۲۲۴). در تهیه نقشه سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، از اطلاعات چاه‌های پیژومتری سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی استفاده گردید (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۹). شکل (۱۲) نقشه درونی‌یابی شده عمق سطح ایستابی را نشان می‌دهد:



شکل ۱۲: نقشه عمق سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه

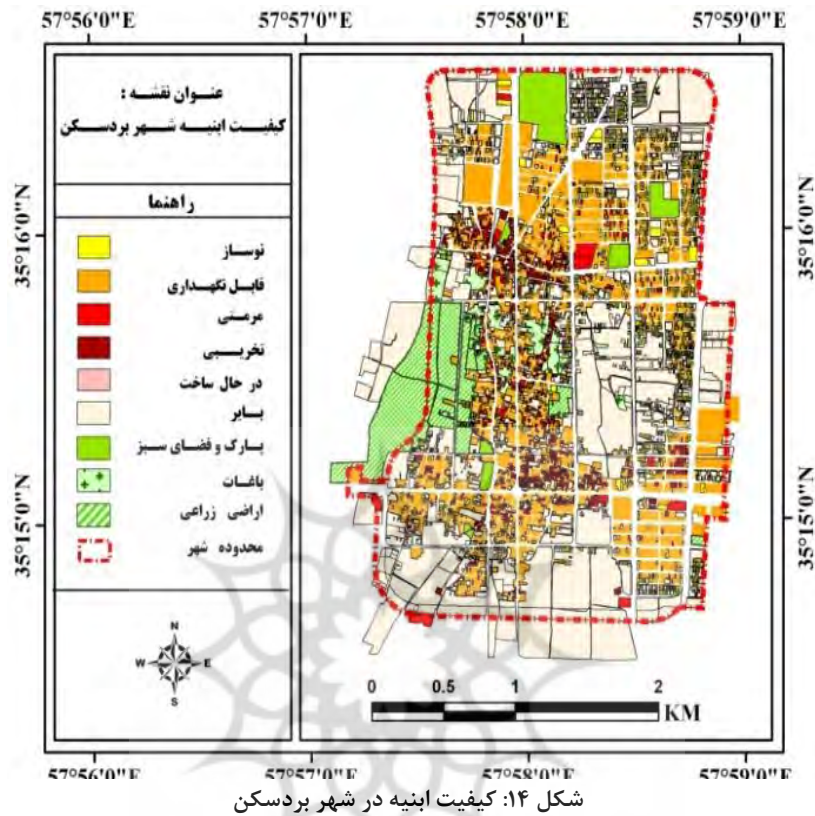
دوری و نزدیکی به گسل

بسترهای اختصاص یافته به ساخت و سازهای شهری و صنعتی باید در محدوده‌هایی انتخاب شوند که در آنها حریم خطوط گسل رعایت شده و از پایداری لازم به منظور کاهش خطرات ناشی از زمین‌لرزه احتمالی برخوردار باشند. در مجموع می‌توان گفت با فاصله گرفتن از خطوط گسل، شاهد افزایش سطح مطلوبیت در رابطه با موضوع خطر زلزله هستیم (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۳۹۲: ۶۱). شکل (۱۳) فاصله گسل‌های شهر بردسکن را نشان می‌دهد:



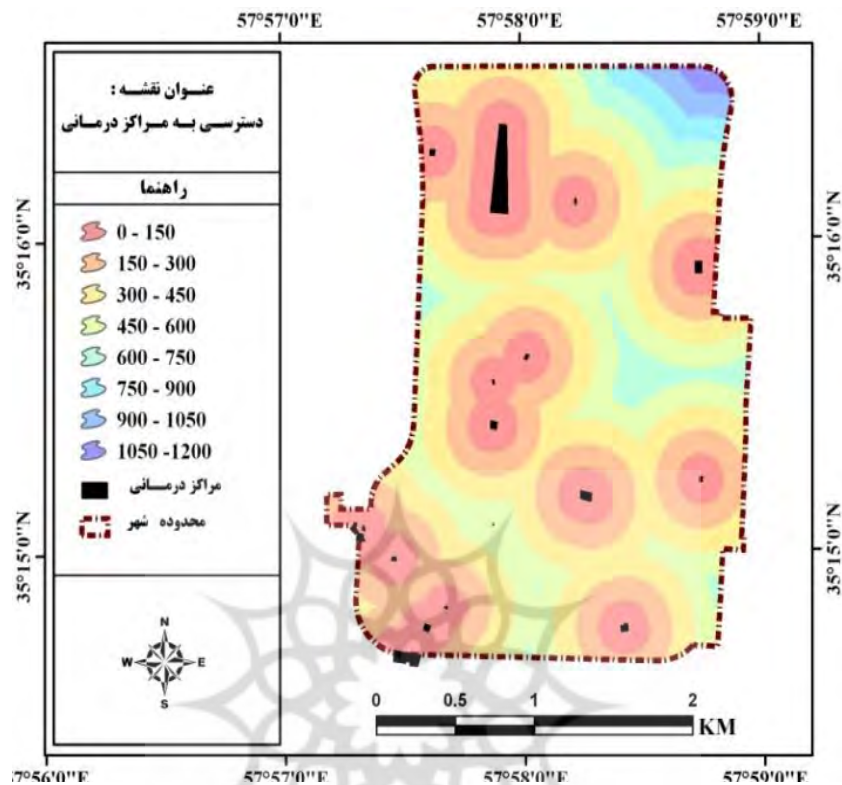
کیفیت ابنیه

احتمال مقاومت ساختمان‌های با کیفیت بالا (نوساز) در مقابل زلزله نسبت به ساختمان‌های مخروبه و مرمتی بیشتر است. قدمت یک سازه الزاماً رابطه مستقیمی با کیفیت ندارد؛ اما در بیشتر موارد ساختمان‌هایی با سن بیش از ۳۰ سال، نیاز به تعمیر اساسی دارند (ستوده، ۱۳۸۰: ۱۷۰). در این پژوهش کیفیت ابنیه با توجه به موقعیت کلی یک ساختمان به بناهای نوساز، قابل نگهداری، مرمتی و تخریبی از نظر میزان طول عمر آن و قابل استفاده بودنش تقسیم شده است. شکل (۱۴) کیفیت بناهای شهر بردسکن را نشان می‌دهد:



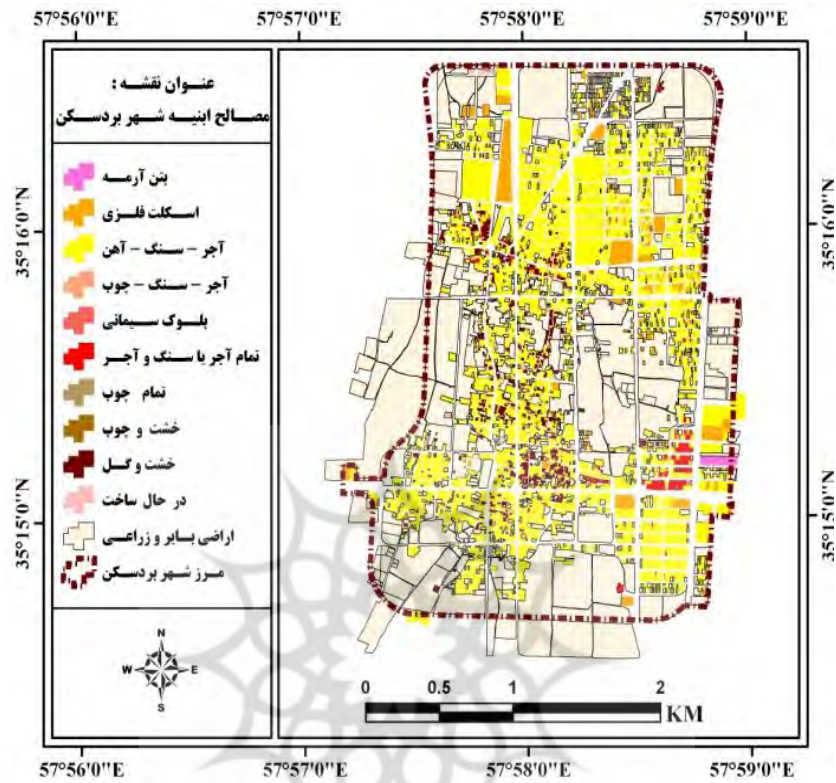
دسترسی به مراکز درمانی

این شاخص بیشتر با زمان بعد از وقوع حادثه در ارتباط است. دسترسی به مراکز درمانی موجب سرعت بخشیدن به عملیات امداد و نجات و خدمات رسانی می شود. به این ترتیب با دور شدن از مراکز درمانی، احتمال آسیب پذیری بیشتر می شود (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۳۹۲: ۵۴). شکل (۱۵) نقشه فاصله از مراکز درمانی را در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد:



نوع مصالح ساختمانی (مصالح ابنیه)

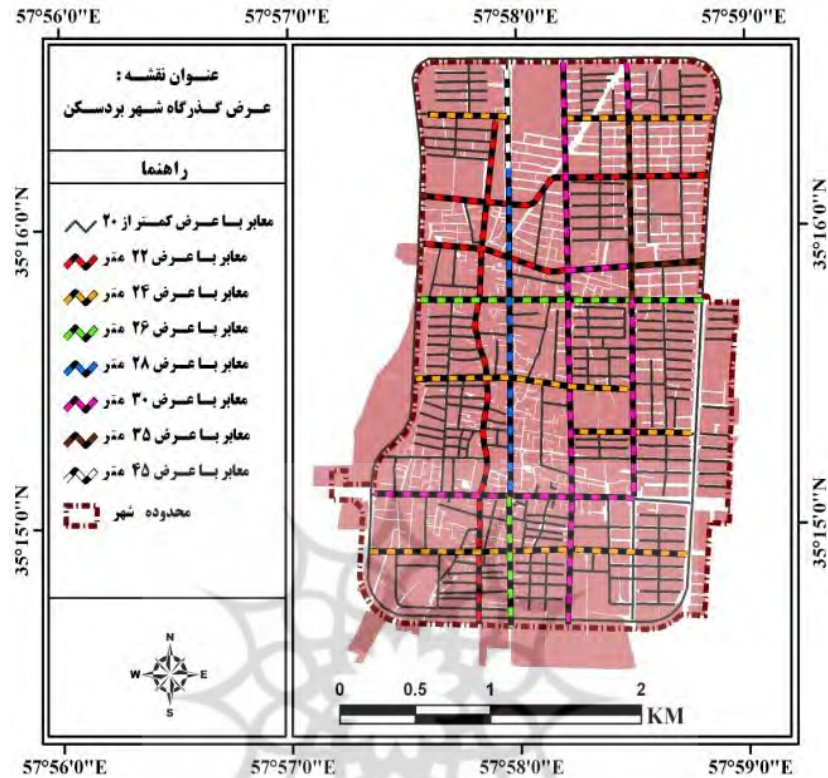
نوع مصالح سازه‌ها یکی از معیارهای مهم و مؤثر در تعیین ضریب آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله محسوب می‌شود. بدیهی است سازه‌هایی که با مصالح مقاوم و استاندارد بالا ساخته شده‌اند، ایمنی مناسبی در برابر زلزله داشته و امنیت بالایی برای ساکنان فراهم می‌کنند (احدنژاد روشتی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۷۸). بر اساس مصالح غالب مورد استفاده در ساخت و ساز ابنیه در سطح کشور، چهار گروه از انواع مصالح قابل شناسایی است که شامل مصالح با دوام (اسکلت فلزی و اسکلت بتن)، متوسط دوام (آجر و چوب، سنگ و چوب و بلوک سیمانی، آجر و آهن سنگ و آهن)، کم دوام (چوب و خشت و چوب و خشت و گل) و بی دوام (چادر و حصیر) می‌باشد. شکل (۱۶) مصالح ساختمانی به‌کار رفته در شهر بردسکن را نشان می‌دهد:



شکل ۱۶: نوع مصالح ساختمانی (مصالح ابنیه) در شهر بردسکن

عرض گذرگاهها

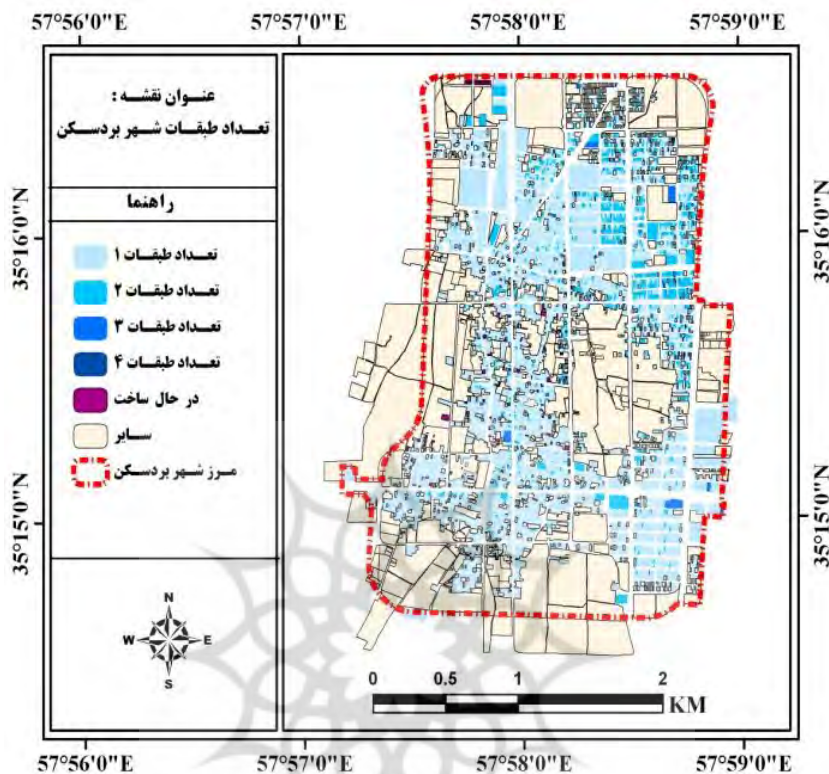
این شاخص نقش بسیار مهمی در هنگام گریز، پناه، تخلیه و امداد رسانی دارد؛ چرا که حجم بیشتری از بازماندگان یا گروه‌های امدادگری می‌توانند منتقل شوند. هرچه عرض گذرگاه‌ها بیشتر باشد امکان ایجاد ترافیک عبوری کمتر خواهد شد. در واقع شبکه ارتباطی کارآمد، شبکه‌ای است که عرض بیشتری دارد، سطح آن نسبت به سطوح ساخته شده شهری بیشتر است و با شبکه‌های خارج از شهر در ارتباط و معابر آن مستقیم و پیچ و خم کمتری دارد (شریف‌زادگان و فتحی، ۱۳۹۰: ۱۱۵).



شکل ۱۷: عرض گذرگاه‌های شهر بردسکن

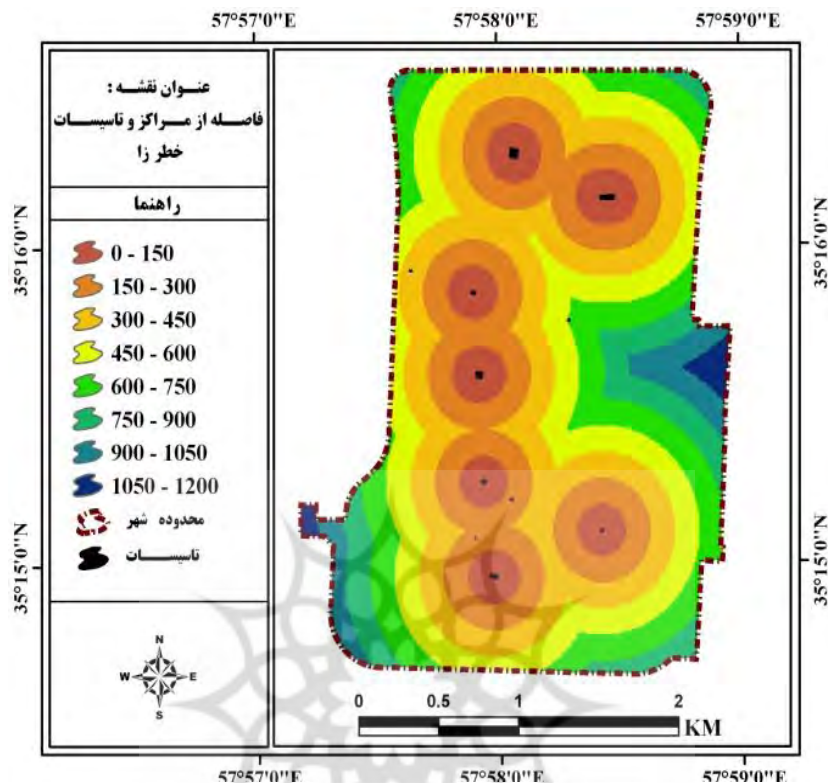
تعداد طبقات

با بالا رفتن تعداد طبقات ساختمانی، احتمال بسته شدن معابر به دلیل ریختن آوار ساختمان‌های بلندمرتبه بالا می‌رود و موجب اختلال در امر امداد رسانی می‌شود. همچنین به دلیل جمعیت زیاد ساکن در ساختمان‌های چند طبقه، در زمان بروز حادثه تخلیه ساکنان در این واحدها کندتر انجام می‌گیرد و به علت حجم آواربرداری بسیار زیاد، نجات جان ساکنان ساختمان‌های بلند بسیار مشکل و دشوارتر است و احتمال آسیب‌پذیری را در این‌گونه ساختمان‌ها بالا می‌برد (قائدرحمتی و قانعی‌بافقی، ۱۳۹۰: ۱۱۶). شکل (۱۸) تعداد طبقات موجود در شهر بردسکن را نشان می‌دهد:



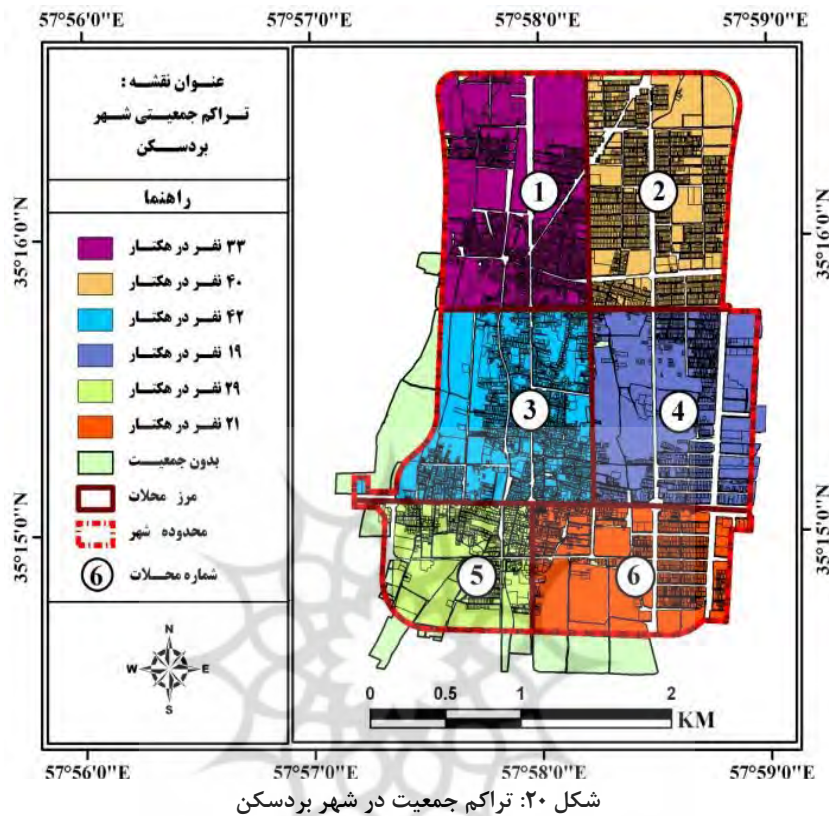
فاصله از مراکز و تأسیسات خطرزا

تأسیسات خطرزا به آن گروه از تأسیساتی گفته می‌شود که در ارتباط با مواد خطرناک قرار دارند. این تأسیسات می‌توانند باعث خطرهای ثانویه‌ای چون آتش‌سوزی و انفجار شوند. استقرار کاربری‌هایی با پتانسیل بالای آسیب‌رسانی در کنار کاربری‌ها، میزان آسیب‌پذیری را افزایش می‌دهد. بنابراین انتقال این‌گونه تأسیسات به خارج از شهر یا در نظر گرفتن حریم مناسب برای آنها، می‌تواند راه‌حل مناسبی برای کاهش میزان آسیب محسوب شود. در این پژوهش موقعیت پمپ‌های بنزین، ایستگاه تقلیل فشار گاز، پمپ گاز (CNG)، مخزن آب‌رسانی و ایستگاه‌های حمل و نقل و انبارداری به عنوان تأسیسات خطرزا شناسایی شده‌است. شکل (۱۹) نقشه فاصله از مراکز و تأسیسات خطرزا را در سطح شهر بردسکن نشان می‌دهد:



تراکم جمعیت

شاخصی برای مشخص کردن بار جمعیتی در مواقع زلزله است و در نتیجه با بیشتر شدن تراکم جمعیت، سرعت پناه‌گیری، خدمات‌رسانی و امداد پایین می‌آید و بالعکس (شیعه و همکاران، ۱۳۸۹: ۵). تراکم جمعیت را می‌توان در هر قلمروی نظیر تراکم جمعیتی کشور، تراکم جمعیتی شهری و تراکم جمعیت در محله اندازه‌گیری کرد؛ اما به طور معمول این شاخص را در قلمرو شهر یا مناطق درون شهری و به نام تراکم ناخالص مسکونی به کار می‌برند. هر چه تراکم جمعیت کمتر باشد آسیب‌پذیری نیز کمتر می‌شود. بر این اساس و برای محاسبه این شاخص در منطقه مورد مطالعه، از رابطه نفر در هکتار استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود شهر بردسکن از لحاظ تراکم به ۶ رده تقسیم شده است. در این شکل محلات ۳ و ۲ به ترتیب با ۴۲ و ۴۰ نفر در هکتار دارای تراکم بالای جمعیتی و بیشترین آسیب‌پذیری و محلات ۶ و ۴ به ترتیب با تراکم ۲۱ و ۱۹ نفر در هکتار دارای کم‌ترین تراکم جمعیتی است و در رده‌بندی آسیب‌پذیری کم جای می‌گیرد. سایر محلات نیز در گروه آسیب‌پذیری متوسط قرار می‌گیرند.



میزان اثرگذاری هر یک از عوامل مؤثر در آسیب پذیری شهر بردسکن به یک اندازه نخواهد بود و هر کدام تأثیر متفاوتی در آسیب پذیری خواهند داشت. به این ترتیب پس از شناسایی معیارهای مورد نیاز، اهمیت هر معیار در آسیب پذیری یک مکان مشخص و سپس رتبه بندی می شوند. مبنای این کار نظرات کارشناسی است. جدول (۱) وزن مربوط به هر یک از متغیرها را نشان می دهد.

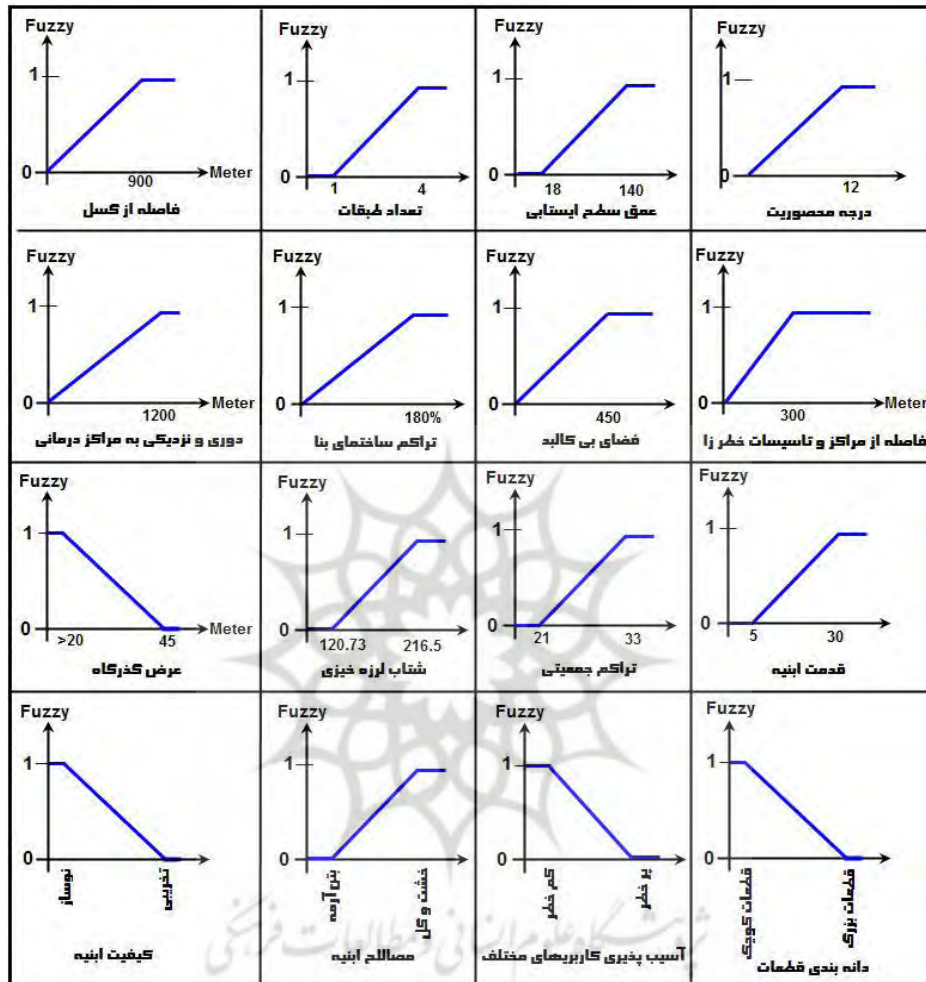
فازی سازی عوامل مؤثر در میزان خطر ناشی از زلزله

بر این اساس که معیارهای ارزیابی با مقیاس های مختلف اندازه گیری می شوند، برای این که بتوان آنها را با یک مقیاس مشترک تبدیل نمود، نیاز به استانداردسازی دارند. با توجه به این که منطق فازی دامنه وسیعی از تابع عضویت را در مقایسه با سایر متدهای استانداردسازی ارائه می دهد، این مدل می تواند با به کارگیری توصیفات غیر عددی یک روش بسیار قوی در مورد برهان شباهت های انسانی در استفاده از داده ها و اطلاعات تقریبی و غیر خطی برای تصمیم گیری ارائه نماید (Rashed and Weeks, 2003: 3). معیار درجه عضویت هر یک از کلاس ها نیز بر پایه مقایسه زوجی است که در آن یک شاخص نسبت به شاخص های دیگر با عناوینی چون غیر قابل مقایسه، اهمیت خیلی بیشتر، اهمیت بیشتر، یکسان و اهمیت خیلی کمتر سنجش می شوند و طیفی از امتیازات را کسب می کنند

(جدول ۱). شکل (۲۱) درجه عضویت هر یک از معیارهای مؤثر بر آسیب پذیری زلزله را بر پایه تابع فازی خطی ممدانی نشان می‌دهد:

جدول ۱: فازی سازی عوامل مؤثر در میزان آسیب پذیری ناشی از زلزله و وزن و رتبه معیارها

بدون فازی	مقادیر فازی سازی شده	فازی کامل	امتیاز لایه	ردیف	عوامل مؤثر در میزان آسیب پذیری ناشی از زلزله در شهر بردسکن
بیش از ۱۵۰۰ متر	مقادیر میان ۰ تا ۱۵۰۰ متر	۰	۱۶	۱	دوری و نزدیکی به گسل
بیش از ۲۱۶/۵۱	مقادیر میان ۱۲۰/۷۳ تا ۲۱۶/۵۱	کمتر از ۱۲۰/۷۳	۱۵	۲	شتاب افقی زمین
بیش از ۳۳ نفر در هکتار	تراکم بین ۲۱ تا ۳۳ نفر در هکتار	۰	۴	۱۳	تراکم جمعیتی
بیش ۳۰ سال	سن میان ۰ تا ۳۰ سال	نوساز	۸	۹	قدمت ابنیه
نوساز	قطعات تخریبی تا نوساز	تخریبی	۳	۱۴	کیفیت ابنیه
بتن آرمه	قطعات بتن آرمه تا خشت و گل	خشت و گل	۲	۱۵	مصالح ابنیه
بیش از ۱۴۰ متر	فاصله میان ۱۸ تا ۱۴۰ متر	کمتر از ۱۸ متر	۱۱	۶	عمق سطح ایستابی
تراکم ۰ درصد	تراکم میان ۰ تا ۱۸۰ درصد	تراکم ۰ درصد	۱۰	۷	تراکم ساختمانی بنا
بدون طبقه	خانه‌های ۴ طبقه تا بدون طبقه	بیش از ۴ طبقه	۱۴	۳	تعداد طبقات
عرض ۴۵ متر	عرض بین ۲۰ تا ۴۵ متری	کمتر از ۲۰ متر	۶	۱۱	عرض گذرگاه
بدون محصوریت	مقادیر میان ۴ برابر تا صفر	۴ برابر	۹	۸	میزان محصوریت معابر
بیش از ۳۰۰ متر مربع	فاصله میان ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر مربع	کمتر از ۲۰۰ متر مربع	۱۳	۴	دسترسی به فضاهای باز شهری
بیش از ۱۲۰۰ متر	فاصله میان ۰ تا ۱۲۰۰ متر	۰	۱۲	۵	دوری و نزدیکی به مراکز درمانی
بیش از ۴۵۰ متر	فاصله بین ۰ تا ۴۵۰ متر	۰	۵	۱۲	فاصله سکونتگاه‌ها از فضای بی کالبد
--	کاربری‌های کم خطر و پر خطر	کاربری‌های کم خطر	۱	۱۶	همجواری کاربری‌ها
بیش از ۱۲۰۰ متر	فاصله بین ۰ تا ۱۲۰۰ متر	۰	۷	۱۰	فاصله از مراکز و تاسیسات خطر زا



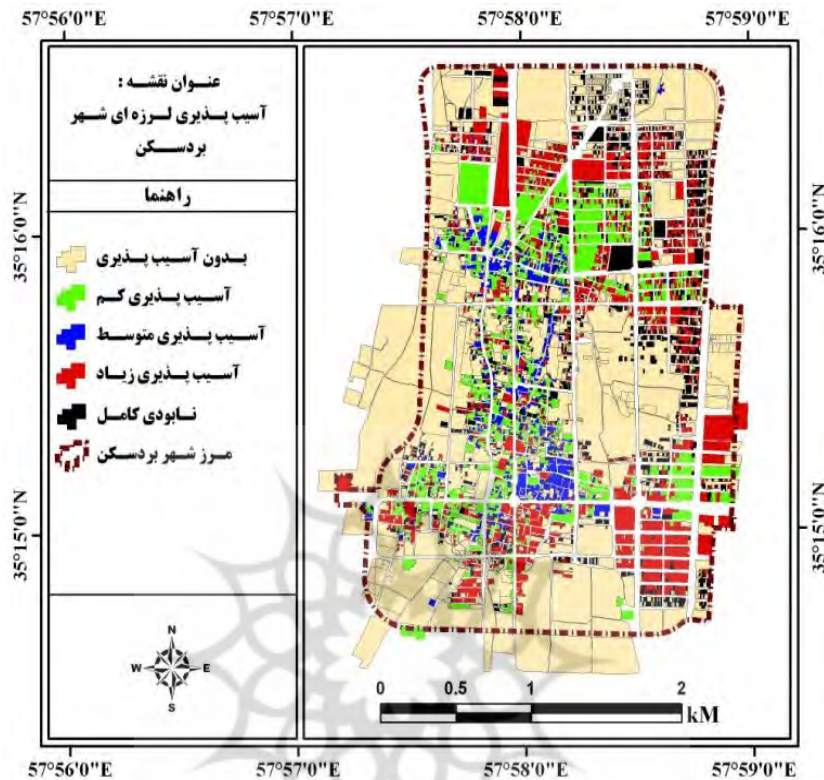
شکل ۲۱: تعیین درجه عضویت معیارهای مؤثر بر آسیب پذیری زلزله بر پایه تابع فازی خطی ممدانی

تلفیق لایه‌ها بر پایه مدل (IHWP)

در این مرحله لایه‌ها طبق امتیازاتی که در مرحله اول بر پایه وارون درجه اهمیت هر یک به آنها نسبت داده شده بود با یکدیگر با توجه به رابطه (۱) تلفیق می‌شوند. جدول (۲) توزیع آماری آسیب پذیری ساختمان‌ها را به تفکیک محلات و شکل (۲۲) نقشه توزیع فضایی میزان آسیب پذیری کلی را بر اساس معیارهای به کار رفته نشان می‌دهد:

جدول ۲: توزیع آماری آسیب پذیری کلی شهر بردسکن در برابر زلزله

محلۀ ۶		محلۀ ۵		محلۀ ۴		محلۀ ۳		محلۀ ۲		محلۀ ۱		میزان آسیب پذیر ی
درصد در منطقه ه	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	
۵/۷۱	۲۱۴	۵/۱۰	۲۸۵	۵/۵۷	۳۹۹	۶/۱۰	۸۷۱	۴/۴۱	۹۸۱	۶/۵۵	۶۴۰	بدون آسیب پذیر ی
۴/۱۵	۱۳۹	۴/۱۰	۱۲۰	۳/۲۵	۱۲۰	۴/۱۰	۵۳۰	۱/۲۱	۳۷۰	۴/۱۵	۳۱۸	آسیب پذیر ی کم
۳/۷۸	۱۵۹	۲/۰۵	۲۲۰	۳/۶۹	۱۰۲	۵/۱۲	۵۹	۱/۷۳	۳۰۱	۶/۱۰	۱۷۰	آسیب پذیر ی متوسط
۲/۷۸	۸۰	۱/۰۱	۴	۱/۲۰	۹۹	۵/۱۰	۱۱	۳	۱۱	۳/۰۱	۱۰۱	آسیب پذیر ی زیاد
۱/۱۰	۱۳	۰/۳۲	۹	۰/۷۲	۱۲	۳/۱۴	۷۲	۰/۰۱	۶	۰/۴۱	۸۳	نابودی کامل
۱/۵۲ ۱۷	۶۰۵	۱/۵۸ ۱۲	۶۳۸	۱/۴۳ ۱۴	۷۳۲	۱/۵۶ ۲۳	۱۵۴۳	۱/۳۶ ۱۰	۱۶۶۸	۱/۲۲ ۲۰	۱۳۱۲	مجموع



طراحی سناریو برای ارزیابی آسیب پذیری شهر بردسکن در برابر شدت های مختلف زلزله

نقشه فازی سازی شده از روش تحلیل فرآیند سلسله مراتبی وارون (IHWP) صرفاً نشان دهنده میزان آسیب پذیری کلی با در نظر گرفتن معیارهای مورد استفاده می باشد. برای ارزیابی دقیق آسیب پذیری لازم است که با استفاده از روابط موجود در این زمینه، از جمله روش میزان متوسط آسیب پذیری به طراحی سناریوهای زلزله برای شدت های مختلف پرداخت تا با توجه به تحلیل های به دست آمده، ارزیابی دقیقی از خسارت وارد شده به ساختمان ها میسر شود. برای این منظور ابتدا با توجه به رابطه شماره (۶) به محاسبه متوسط درجات آسیب ساختمان ها در برابر شدت های مختلف زلزله پرداخته شد (Milutinovic and Trendafiloski, 2003: 65).

$$\alpha_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 \times \bar{V}_i - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad \text{رابطه ۶:}$$

این رابطه α_D : متوسط درجه آسیب پذیری، I : عامل شدت زلزله بر اساس واحد مرکالی اصلاح شده، \bar{V}_i : مقدار آسیب پذیری حاصله از اعمال روش تحلیل سلسله مراتبی وارون (IHWP) می باشد.

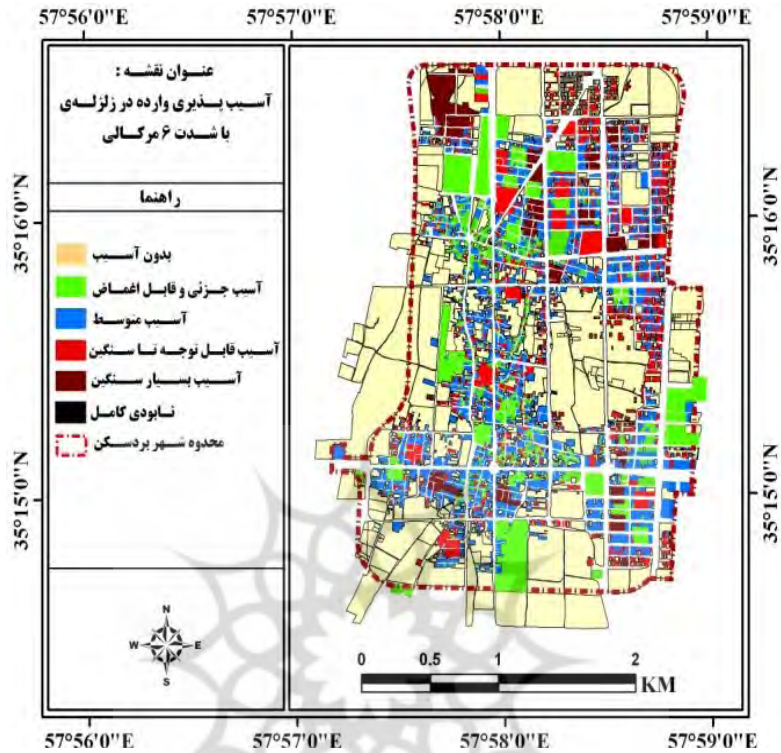
با توجه به این رابطه مقدار آسیب وارد به هر واحد ساختمانی را می‌توان در ۶ گروه عمده بر طبق جدول (۳) طبقه‌بندی کرد:

جدول ۳: درجه‌بندی آسیب وارد به ساختمان‌ها

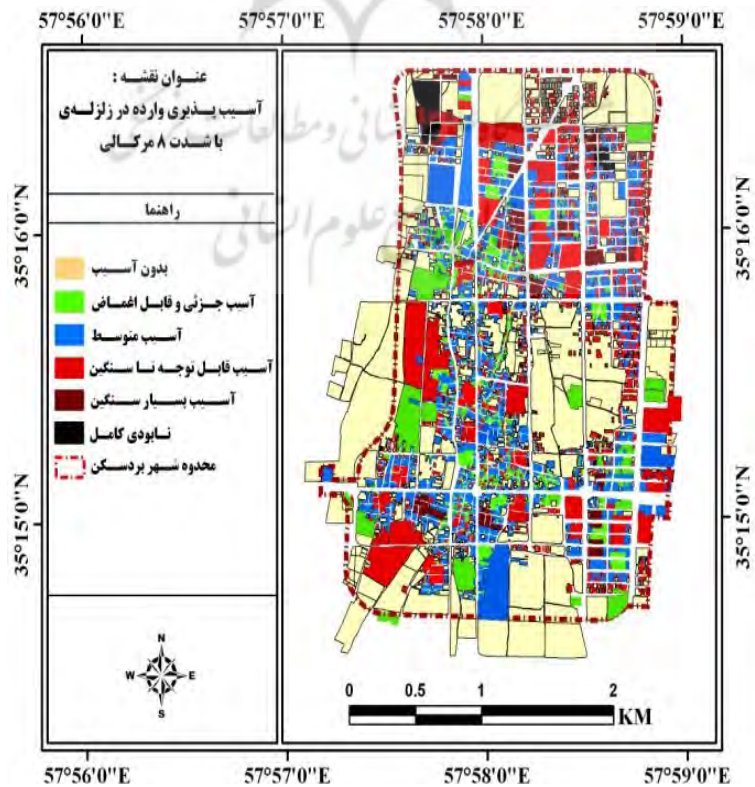
میزان آسیب وارد به ساختمان (%)	میزان آسیب	محدوده (دامنه)	درجه آسیب
٪ ۰	بدون آسیب	۰	D ₀
٪ ۰	آسیب جزئی و قابل اغماض	۰/۲ - ۰/۲	D ₁
٪ ۲	آسیب متوسط	۰/۲ - ۰/۴	D ₂
٪ ۱۰	آسیب قابل توجه تا سنگین	۰/۴ - ۰/۶	D ₃
٪ ۵۰	آسیب بسیار سنگین	۰/۶ - ۰/۸	D ₄
٪ ۱۰۰	نابودی کامل	۰/۸ - ۰/۱	D ₅

مأخذ: Andrew and Robin, 2002: 322

در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن نتایج حاصل شده از روش بالا، تحلیل آسیب‌پذیری شهر بردسکن در دو سناریو مختلف زلزله با شدت‌های ۶ و ۸ مرکالی انجام گردید (شکل‌های ۲۳ و ۲۴). جدول (۴) توزیع فضایی آسیب وارد به ساختمان‌ها را نشان می‌دهد:



شکل ۲۳: نقشه آسیب پذیری ساختمان های شهر بردسکن در زلزله هایی با قدرت ۶ مرکالی



شکل ۲۴: نقشه آسیب پذیری ساختمان های شهر بردسکن در زلزله هایی با قدرت ۸ مرکالی
جدول ۴: توزیع آماری آسیب وارده به ساختمان ها در برابر زلزله هایی با شدت های ۶ و ۸ مرکالی

محلۀ ۶		محلۀ ۵		محلۀ ۴		محلۀ ۳		محلۀ ۲		محلۀ ۱		شدت ۶ مرکالی (سناریو ی اول)
درصد در منطقه	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	
۶/۷۱	۲۱۸	۵/۹۰	۲۷۸	۶/۵۷	۴۴۰	۳/۳۷	۸۷۹	۱/۴۱	۹۹۴	۱/۵۵	۶۴۸	D ₁
						۱۱		۴		۱۲		
۳/۲۳	۱۴۲	۳/۳۲	۱۲۷	۲/۴۱	۱۲۱	۷/۶۹	۵۳۱	۱/۲۱	۳۵۷	۴/۷۳	۳۱۰	D ₂
								۱				
۴/۴۵	۱۵۸	۴/۰۵	۲۲۹	۱/۶۹	۸۷	۳/۸۹	۵۴	۱/۷۳	۳۱۰	۲/۸۸	۱۷۵	D ₃
								۱				
۱/۷۸	۸۷	۰/۰۱	۴	۱/۲۰	۷۹	۰/۵۶	۶	۰	۰	۲/۳۳	۱۰۱	D ₄
۰	۰	۰	۰	۰/۹۰	۵	۲/۱۴	۷۳	۱/۰۱	۷	۱/۵۴	۷۸	D ₅
								۰				
۱/۱۷	۶۰۵	۱/۲۸	۶۳۸	۱/۷۷	۷۳۲	۱/۶۵	۱۵۴۳	۷/۳۶	۱۶۶۸	۱/۰۳	۱۳۱۲	مجموع
۱۶		۱۳		۱۲		۲۵				۲۴		
محلۀ ۶		محلۀ ۵		محلۀ ۴		محلۀ ۳		محلۀ ۲		محلۀ ۱		شدت ۸ مرکالی (سناریو ی دوم)
درصد در منطقه	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	درصد در محلۀ	تعداد ساختمان ن	
۵/۳۵	۲۸۵	۲/۴۸	۸۹	۳/۱۱	۱۴۶	۳/۷۸	۲۴۷	۱/۴۰	۶۵۲	۷/۵۵	۵۵۳	D ₁
								۲				
۳/۰۹	۱۲۱	۱/۷۸	۵۱	۱/۰۱	۱۰۹	۶/۵۱	۴۳۱	۱/۲۱	۲۸۷	۴/۷۳	۱۷۸	D ₂
								۱				
۳/۲۱	۱۳۱	۶/۰۵	۳۴۰	۲/۲۱	۱۲۱	۱/۹۹	۸۷	۱/۷۳	۱۰۶	۶/۸۸	۳۴۷	D ₃
								۰				
۱/۷۸	۶۴	۳/۳۱	۱۱۱	۳/۰۱	۱۳۷	۷/۷۸	۵۰۰	۱/۳۲	۶۲۰	۳/۳۳	۱۲۴	D ₄
								۲				
۰/۰۱	۴	۱/۳۱	۴۷	۴/۱۱	۲۱۹	۳/۹۸	۲۷۸	۱/۰۳	۳	۳/۵۴	۱۱۰	D ₅
								۰				
۱/۴۳	۶۰۵	۱/۹۳	۶۳۸	۱/۴۵	۷۳۲	۱/۶۵	۱۵۴۳	۷/۶۶	۱۶۶۸	۱/۰۳	۱۳۱۲	مجموع
۱۳		۱۴		۱۳		۲۴				۲۶		

نتیجه گیری

در این پژوهش برای مشخص کردن میزان آسیب پذیری لرزه ای شهر بردسکن ۱۶ شاخص که شامل: دوری و نزدیکی به گسل، شتاب افقی زمین، تعداد طبقات، دانه بندی قطعات، دوری و نزدیکی به مراکز درمانی، عمق سطح ایستایی، تراکم ساختمانی بنا، میزان محصوریت معابر، قدمت ابنیه، فاصله از مراکز و تأسیسات خطرزا، عرض گذرگاه، دوری و نزدیکی به فضاهای بی کالبد، تراکم جمعیتی، کیفیت ابنیه، مصالح ابنیه و هم جواری کاربری ها انتخاب گردید و نقشه آسیب پذیری کلی شهر بردسکن در برابر زلزله تهیه شد؛ سپس به مدل سازی آسیب پذیری زلزله در شدت های ۶ و ۸ مرکالی پرداخته شد و میزان آسیب پذیری قطعات ساختمانی به تفکیک محلات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج آسیب پذیری کلی لرزه ای شهر بردسکن نشان می دهد که ۳۳/۴۴ درصد از ساختمان های شهر بدون آسیب پذیری، ۲۳/۲۴ درصد از ساختمان های شهر در طبقه آسیب پذیری کم، ۲۳/۴۷ درصد در گروه آسیب پذیری متوسط، ۱۳/۰۱ درصد در رنج آسیب پذیری زیاد و ساختمان هایی که بسیار آسیب پذیر هستند ۵/۷ درصد از ساختمان های شهر را تشکیل می دهند. میزان آسیب پذیری ساختمان ها در سناریوی طراحی شده ۶ مرکالی به ترتیب محلات ۲۴/۰۳، ۷/۳۶، ۲۵/۶۵، ۱۲/۷۷، ۱۳/۲۸ و ۱۶/۱۷ درصد و در سناریوی طراحی شده ۸ مرکالی به ترتیب ۲۶/۰۳، ۷/۶۶، ۴۵/۶۵، ۱۳/۲۴، ۱۴/۹۳ و ۱۳/۴۳ درصد است. بالاترین میزان آسیب پذیری بر اساس تعداد ساختمان ها به ترتیب در محلات ۳، ۱، ۶، ۵، ۴ و ۲ شهر وجود دارند. به طور کلی ساختمان های موجود در شمال شهر نسبت به بقیه مناطق دارای آسیب پذیری بیشتری هستند که از دلایل عمده آن نزدیکی به گسل، بالا بودن شتاب افقی زمین (PGA)، بالا بودن تراکم ساختمانی بنا و پایین بودن کیفیت و مصالح ساختمانی می باشد.

منابع

- احدنژاد روشتی، محسن؛ مهدی قرخلو؛ کرامت اله زیاری (۱۳۸۹). مدل سازی آسیب پذیری ساختمانی شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، جغرافیا و توسعه، پاییز ۱۳۸۹، شماره ۱۹، صص ۱۹۸-۱۷۱.
- اسفندیاری درآباد، فریبا؛ عطا غفاری گیلانده؛ خداداد لطفی (۱۳۹۲). مدل سازی ضریب آسیب پذیری شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش تاپسیس در محیط GIS مطالعه موردی: شهر اردبیل، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال ۲، شماره ۲، صص ۷۹-۴۳.
- پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، کاتالوگ زمین لرزه ها، سایت اینترنتی: <http://www.iiies.ac.ir/fa/eqcatalog>
- تهرانی زاده، محسن؛ فرزانه حامدی (۱۳۸۱). بررسی حداکثر حرکات زمین، مدت دوام حرکات شدید و محتوای فرکانسی زلزله چنگوره-آوج، مجله مهندسی ساختمان و علوم مسکن، سال ۱، شماره ۱، صص ۴۹-۳۷.
- حبیبی، کیومرث؛ مصطفی بهزادفر؛ ابوالفضل مشکینی؛ سعید نظری (۱۳۹۲). تهیه یک مدل پیش بینی ناپایداری بافت های کهن شهری در برابر زلزله با منطق سلسله مراتبی وارون (IHPW) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، علوم زمین، سال ۲۲، شماره ۸۷، صص ۹۲ تا ۸۳.

- حسینی، مازیار (۱۳۸۱). چالش‌ها و راهبردهای مدیریت بحران در شهر تهران، سازمان مدیریت بحران، مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، جلد دوم، تهران.
- خانلری، غلامرضا (۱۳۷۷). زمین‌شناسی مهندسی، چاپ اول، همدان: انتشارات دانشگاه ابوعلی سینا.
- ستوده، بابک (۱۳۸۰). برنامه‌ریزی کاربری زمین و اصلاح معابر جهت ایمن‌سازی در برابر زلزله (نمونه موردی محله باغ فردوس شهرداری منطقه یک تهران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، شهرسازی - برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، استاد راهنما: فرانک سیف‌الدینی، دانشگاه شیراز.
- شریف‌زادگان، محمدحسین؛ حمید فتحی (۱۳۹۰). طراحی و کاربرد مدل‌های فضایی ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، دو فصلنامه مدیریت بحران، شماره ۴۶، صص ۱۲۴-۱۱۰.
- شمعی، علی؛ نجمه حیدرزاده؛ لطفی بابک مقدم (۱۳۹۲). سنجش عوامل آسیب‌رسان ناشی از زلزله در منطقه یک شهر تهران با استفاده از GIS، نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری (دانشکده جغرافیا)، سال ۱۷، شماره ۴۳، بهار ۱۳۹۲، صص ۱۲۲-۹۳.
- شیعه، اسماعیل؛ کیومرث حبیبی؛ کمال ترابی (۱۳۸۹). بررسی آسیب‌پذیری شبکه‌های ارتباطی شهرها در مقابل زلزله با استفاده از روش IHWP، باغ نظر، بهار ۱۳۸۹، شماره ۱۳، صص ۴۸-۳۵.
- عزیزی، محمد مهدی؛ رضا اکبری (۱۳۸۷). ملاحظات شهرسازی در سنجش آسیب‌پذیری شهرها از زلزله با کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه هنرهای زیبا، شماره ۳۴، دانشگاه تهران.
- فرج‌زاده اصل، منوچهر؛ محسن احدنژاد؛ جمال امینی، (۱۳۹۰). ارزیابی آسیب‌پذیری مسکن شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی: منطقه ۹ شهرداری تهران)، مطالعات و پژوهش‌های شهری منطقه‌ای، سال ۳، شماره ۹، تابستان ۱۳۹۰.
- قائدرحمتی، صفر؛ روح‌الله قانعی بافقی (۱۳۹۱). ارزیابی حریم امن شهری در ارتباط با آسیب‌پذیری لرزه‌ای (منطقه مورد مطالعه: شهرهای استان یزد)، جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای، پاییز ۱۳۹۱، شماره ۴، صص ۴۰-۲۷.
- قدرتی امیری، غلامرضا (۱۳۸۶). تحلیل خطرپذیری سازه‌ها در برابر زلزله، پلی‌کی دانشگاه علم و صنعت ایران مرکز آمار ایران، سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۸۵، تهران.
- گتمیری، بهروز (۱۳۸۳). مجموعه شهری تهران، گزیده مطالعات محدودیت‌ها و امکانات طبیعی، وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت شهرسازی و معماری، مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران، تهران، چاپ گستر.

- Allan, P., Bryan, M (2010), the Critical Role of Open Space in Earthquake Recovery: A Case Study proceeding of 2010 NZSEE Conference, 26-28 March 2010, Wellington, pp:34-44.
- Andrew, C., Robin, S (2002), Earthquake Protection, second edition John iley and son, Ltd .W
- Antonioni, G., Gigliola, S., Cozzani, V (2007), A methodology for the Quantitative Risk Triggered by Sismic Events, Journal of hazardous Materials, vol.147, no.1-2, pp:48-59.
- Ebert, A., Karle, N., Stein, A (2008), Urban Social Vulnerability Assessment, urban social vulnerability assessment using object° oriented analysis of remot sensing

- and GIS data, A case study for tegucigalpa, Honduras, remote sensing and spatial information sciences, vol.wwvll, part B7, Beijing, pp:1307-1311.
- Lantada N., Pujades., L.S (2008), Vulnerability Index and Capacity Spectrum based method for Urban Seismic Risk Evaluation, Natural Hazards, DOI:10.007/s11069-007-9212-4.
 - Linares R., Alejandra. R (2012), Panama Prepares the City of david for Earthquakes, project highlights issue 9, panama, pp:1-4.
 - Moehle. J., Barkley. C., Bonowitz, D., Karlinsky, S., Maffei, J., Poland, C (2009) the Resilient City-A Way of Thinking about Preparedness, Mitigation, and Rebuilding, Proceeding of the NZSEE conference ¶ 3-5, Christchurch.
 - Milutinovic, Z.V., Trendafiloski., G.S (2003), an Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns, Riskue- Evk4-ct 2000-00014.
 - Rashed T., Weeks, J (2003), Assessing Vulnerability to Earthquake Hazards through Spatial Multicriteria Analysis of Urban areas, Geographica information science, vol.1, No.6, pp:547-567.
 - Tang, A., WEN, A (2009), an Intelligent Simulation System for Earthquake Disaster Assessment, Computers and Geosciences, vol.35, pp:871-879.
 - Wald, D.J., Jaiswal, K.S., ASCE, A.M.K., Marano, D., Bausch, D (2011), Earthquake Impact Scale, Natural Hazards Review, www .ascelibrary.org, pp:125-139.