مجلهٔ مخاطرات محیط طبیعی، سال چهارم، شماره ششم، زمستان ۹۴
تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۸/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲۹
صفحات: ۱۳۷- ۱۰۵

ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر بَردَسْکن 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 مسائلِ اساسی جهان، پیشِ 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 بَردَسْکن به دلیل وجود چندین گسل فعّال 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 سطحِ 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 تعیینِ تأثیرِ هر کدام از معیارهای به‌کار رفته در میزان آسیب‌پذیری ارائه گردید. همچنین با ارائهٔ سناریوهای زلزله در شدت‌های مختلف به مدل‌سازی و ریزپهنه‌بندی آسیب وارده به ساختمان‌ها در برابر زلزله پرداخته شده‌است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با حرکت از سمت جنوب به طرف شمالِ 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 به‌ترتیب 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
٤- کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری

مقدمه

در طی قرن بیستم بیش از ۱۱۰۰ زلزله مخرب در نقاط مختلف کرۀ زمین روی داده است که بـر اثـر آن بـیش از ۱۵۰۰۰۰۰ نفر جان خود را از دست داده‌اند. ۹۰ درصد این تلفات عمدتاً ناشی از ریزش سـاختمان‌هـایی بـوده کـه 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 یافتـه تلفـات مالی حوادث طبیعی بیشتر از تلفات جانی است؛ اما در کشورهای در حال توسعه این امر عکس است که نشـان‌دهنـدۀ برنامه‌ریزی صحیح در کشورهای توسعه یافته است (*Ebert et al, 2008: 1307*). با ایـن حـال امکـان کنتـرل و یـا پیش‌بینی دقیق بلایای طبیعی وجود ندارد و آن چه امکان‌پذیر است گـام برداشـتن در مسـیر سـاخت شـهرهایی بـا آسیب‌پذیری کمتر در مواجه با یک بلای طبیعی است (*Moehle et al, 2009: 2*). زلزله، عاملی طبیعـی اسـت کـه آثار بلندمدت اجتماعی و اقتصادی بر محیط پیرامون خود می‌گذارد. ماهیت پیچیده و متغیر این آثـار را مـی‌تـوان بـه 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 اقتصـادی چنـین حـوادثی نتیجـۀ نبود برنامه‌ریزی و ضعف در استانداردهای ساختمانی و زیرساخت‌هـا اسـت (*Linares and Alejandra, 2012: 1*). در دو دهۀ گذشته مطالعات زیادی در خصوص سوانح طبیعی، به خصوص زلزله، به منظـور کـاهش آسـیب‌پـذیری آن انجام شده است. در ایران فرجزاده‌اصل و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی آسیب‌پذیری مساکن شـهری در برابـر زلزلـه در منطقه ۹ تهران پرداخته‌اند. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۲) مدل‌سازی ضریب آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله را بـا استفاده از روش تاپسیس مدل‌سازی کردند. شماعی و همکاران (۱۳۹۲) سنجش عوامل آسیب‌رسان ناشـی از زلزلـه را با استفاده از سیسـتم اطلاعـات جغرافیـایی بررسـی کردنـد. در جهـان نیـز، ابـرت[1] و همکـاران (۲۰۰۸) بـه بررسـی آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله پرداختند. راشد و ویک[2] (۲۰۰۳) میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله را با استفاده از روش سلسله مراتبی و نرم افزار GIS، مدل‌سازی کردند. آنیونیونی[3] و همکاران (۲۰۰۷) تـأثیرات زلزلـه بـر تأسیسـات صنعتی را با استفاده از اطلاعات زلزله‌های پیشین بررسی و الگویی را ارائه کردند. تانـگ و ون[4] (۲۰۰۹) بـا اسـتفاده از هوش مصنوعی و GIS، خطر زلزله را در شهر دیانگ چین ارزیابی کردنـد. لانتـادا و پوجـادس[5] (۲۰۰۹) در پژوهشـی ضمن مدل‌سازی آسیب‌پذیری شهر بارسلون، به ارزیابی خسارت انسانی و اقتصادی این شهر پرداختند.

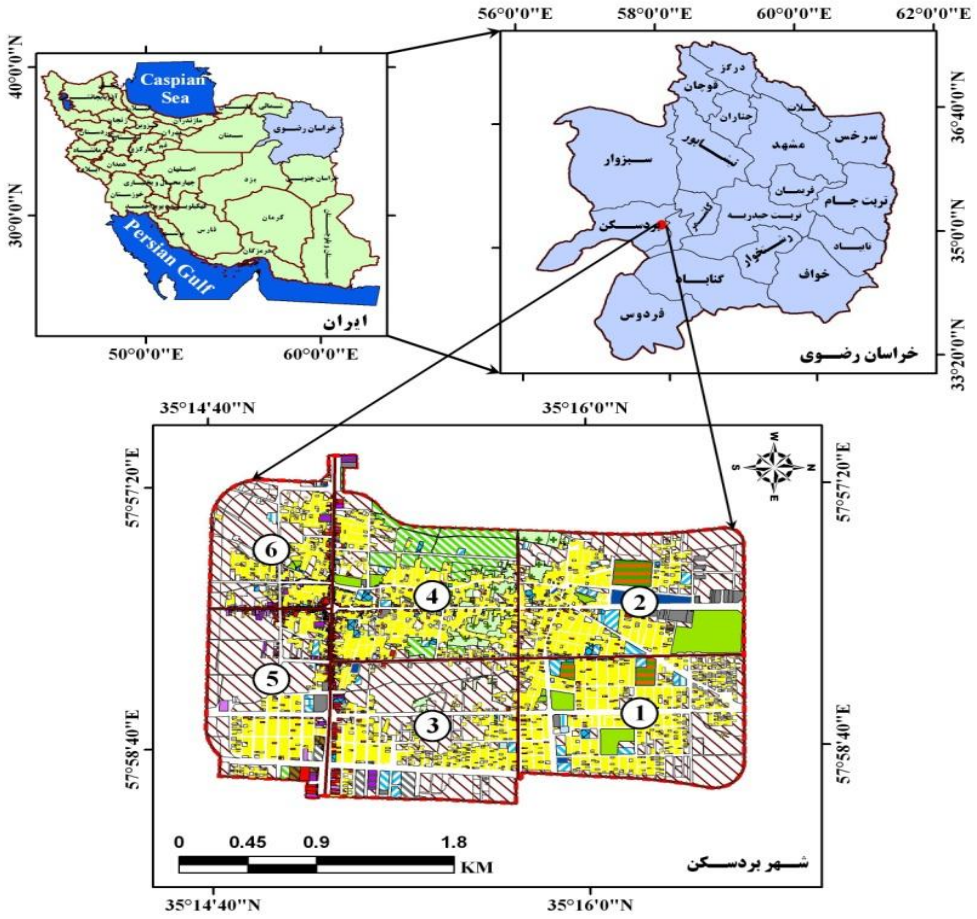
معیارهایی چون دوری و نزدیکی به گسل، شتاب افقی زمین، تعداد طبقات، دانه‌بندی قطعات، دوری و نزدیکی به مراکز درمانی، عمق سطح ایستابی، تراکم ساختمانی بنا، میـزان محصـوریت معـابر، قـدمت ابنیـه، فاصـله از مراکـز و تأسیسات خطرزا، عرض گذرگاه، دوری و نزدیکی به فضاهای بی‌کالبد، تراکم جمعیتی، کیفیت ابنیـه، مصـالح ابنیـه و همجواری کاربری‌ها در کاهش یا افزایش آسیب‌ها و خسارت‌های ناشی از زلزله تأثیر به‌سزایی دارنـد. بـه‌همـین دلیـل

1- Ebert
2- Rashed and Weeks
3- Antonioni
4- Tang and Wen
5- Lantada and Pujades

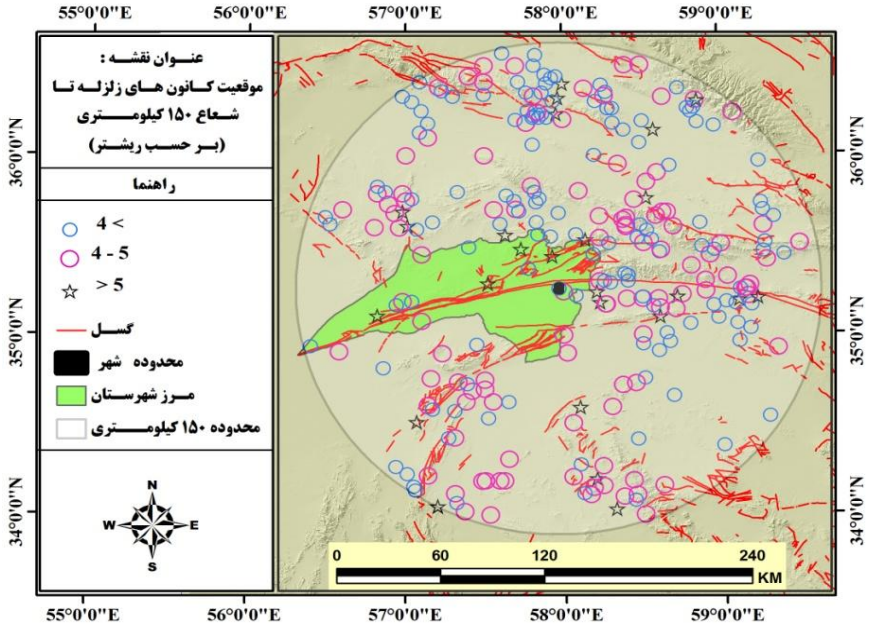
مطالعه درست آنها و مشخص کردن مسیرها و محدوده‌های آسیب‌پذیر و یا امن با توجه به معیارهای ذکر شده، هدف این مقاله است تا آسیب ناشی از زلزله در شهر بردسکن را کاهش داده و امکان برنامه‌ریزی درست را فراهم آورد.

منطقه مورد مطالعه

شهر بردسکن با مساحت ۷/۳۲ کیلومتر مربع واقع بر گستره جغرافیایی استان خراسان رضوی است که بین ۳۲ ۱۴ °۳۵ تا ۱۰ ۱۶ °۳۵ عرض شمالی و ۳۹ ۵۷ °۵۷ تا ۵۷ ۵۸ °۵۷ طول شرقی در ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). جمعیت این شهر از ۵۰۵۸ نفر در سال ۱۳۳۵ به ۲۶۱۰۷ نفر در سال ۱۳۹۰ افزایش یافته است. این شهر بین ناحیهٔ 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 آهوبم از جنوب به تپه‌های ماهورهای نئوژن، از شرق به دشت کاشمر و از غرب به دشت انابد محدود می‌گردد. فعّالیّت‌های تکتونیکی منطقه بسیار شدید است که از دلایل اصلی آن عبور گسل درونه از شمال شهر بردسکن می‌باشد. با توجه به داده‌های ثبت شدهٔ زلزله تا شعاع ۱۵۰ کیلومتری این شهر طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ میلادی، تعداد ۲۷۴ زمین‌لرزه در این محدوده به ثبت رسیده است (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها) (شکل ۲).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه



شکل ۲: رو مرکز[1] زمین‌لرزها و گسل‌ها تا شعاع ۱۵۰ کیلومتری شهر بردسکن

داده ها و روش شناسی

موادی که در این پژوهش به کار گرفته می‌شود، مشتمل بر نقشه‌ها یا آرشیوهای اطلاعاتی مربوط به معیارهایی هستند که در تعیین ضریب آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله به کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وارون[2] (IHWP) آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل ابتدا نقشه‌های اصلی که در تخریب ناشی از زلزله مؤثر هستند از نظر اهمیت درجه‌بندی و امتیازدهی می‌شوند، در مرحله دوم این نقشه‌ها با استفاده از توابع فازی به نقشه‌های فازی تبدیل و در مرحله سوم با توجه به امتیازات هر نقشه، نقشه‌های فازی بر پایه مدل (IHWP) با هم ترکیب می‌شوند (شکل ۳). این مدل منطقی برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف بر پایهٔ وارون رتبه و اهمیت آنها است. در این روش لایه‌ها طبق امتیازاتی که بر پایه وارون درجه اهمیت هر یک به آنها نسبت داده شده بود با توجه به رابطهٔ (۱) با یکدیگر تلفیق می‌شوند.

رابطهٔ ۱:

$$p(\mathrm{v}) = \sum_{i=1}^{n} w_i (f(\chi_i))$$

1- Epicenter
2- Inversion Hierarchical Weight Process

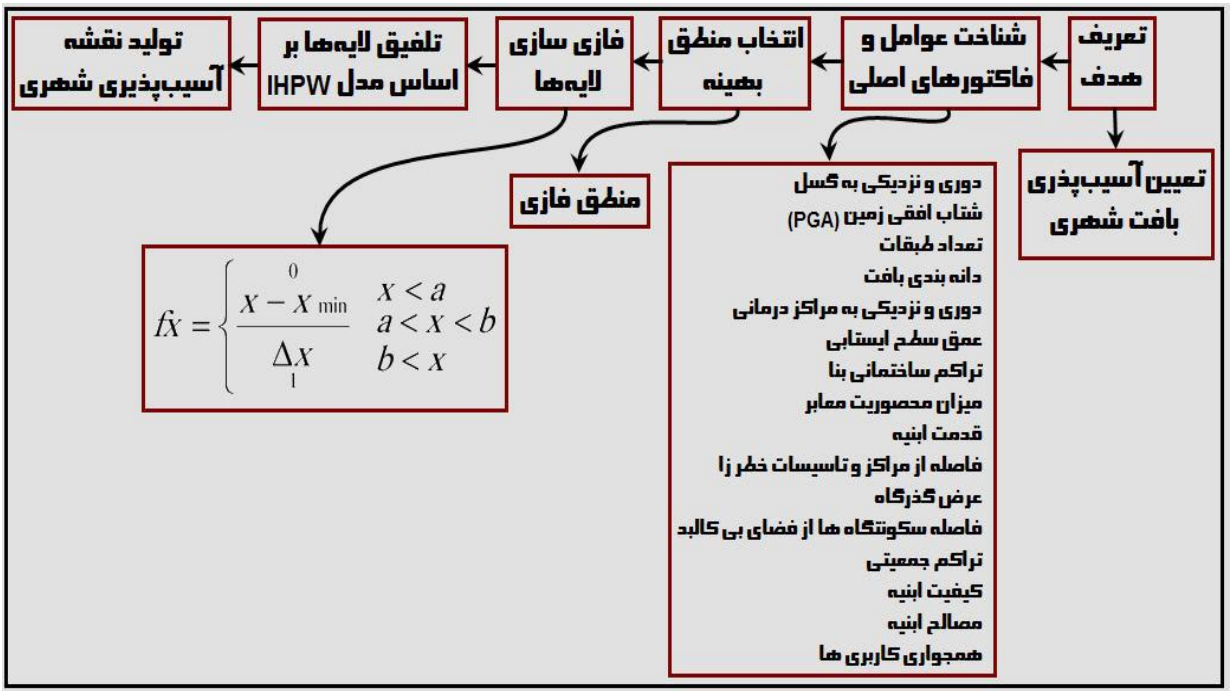
در این فرمول؛ $p(v)$: امتیاز آسیب‌پذیری، n : تعداد لایه‌های مورد استفاده در مدل IHWP، w_i: وارون رتبه لایه i که به عنوان وزن لایه در نظر گرفته می‌شود و $f(x_i)$: مقادیر فازی لایه i هستند.

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 رابطهٔ (۲) تبدیل می‌کند.

رابطهٔ ۲:

$$f(X)=\begin{cases}0 & x<a\\ \dfrac{X-X_{\min}}{\Delta x_1} & a<x<b\\ 1 & b<x\end{cases}$$

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 نقشهٔ آسیب‌پذیری شهر بردسکن

یافته‌های پژوهش

معیارهای مؤثر در تخریب ساختمان‌ها بر اثر زلزله

به منظور بررسی میزان آسیب‌پذیری منطقهٔ 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، بیشینهٔ شتاب زمین در هنگام وقوع زلزله می‌باشد که مقیاسی از نیروی وارده بر سازه است (اسفندیاری‌درآباد و همکاران، ۱۳۹۲: ۵۹). مدت دوام حرکات شدید تأثیر بسیاری بر شدت جنبش و تکانِ سازه دارد. هرچه که زمین‌لرزه 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 زمین‌لرزه 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). نقشهٔ حداکثر شتاب برای منطقهٔ مورد مطالعه با توجه به رابطهٔ (۳) تهیه گردید که در این رابطه نقشه فاصله از گسل به جای مؤلفهٔ R و نقشهٔ به‌دست آمده از بزرگی زلزله با توجه به روابط (۴) و (۵) به جای مؤلفهٔ M از معادلهٔ فوق قرار داده شد. واحد نقشه حداکثر شتاب زلزله سانتی‌متر بر مجذور ثانیه (cm/s^2) است.

رابطهٔ ۳:

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

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 زمین‌لرزه‌ها). برای تعیین شدت زمین‌لرزه در محل شهر یا ساختگاه، رابطهٔ (۴) مورد استفاده قرار گرفت.

رابطهٔ ۴:

$$I_R = I. + 6.453 - 0.00121(R) - 4.960\log(R+20)$$

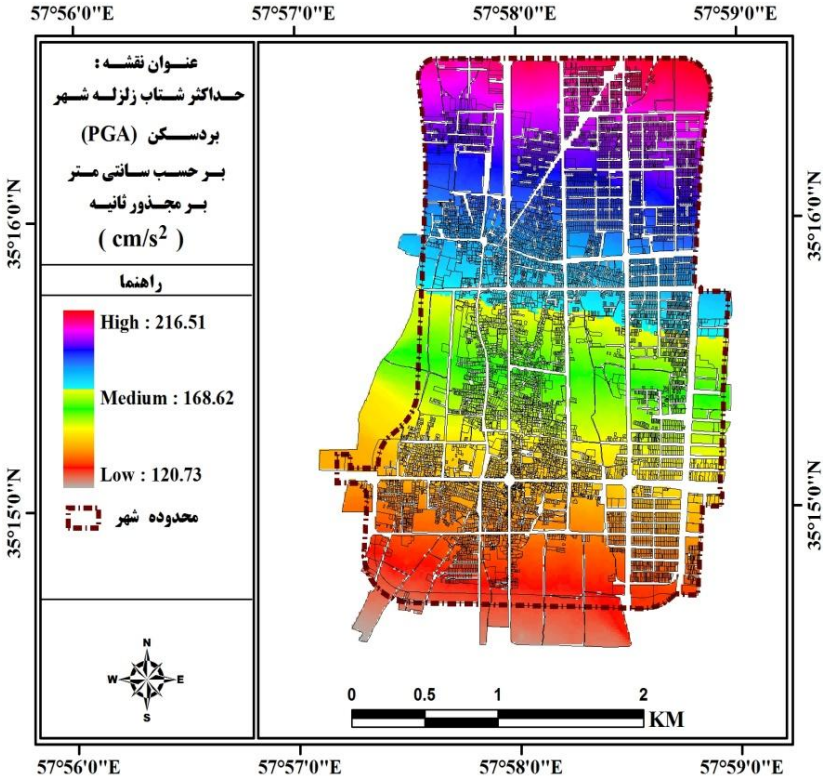
در این رابطه؛ I_R: شدت زمین‌لرزه در محل سازه در مقیاس مرکالی، I.: شدت زمین‌لرزه در محل کانونِ زمین‌لرزه در مقیاس مرکالی و R: فاصلهٔ کانونی بر حسب کیلومتر است. برای تبدیل شدت زلزله به بزرگی رابطهٔ (۵) به کار گرفته شده است.

رابطهٔ ۵:

$$I = 1.7Ms - 2.8$$

در این رابطه I: شدت زلزله در مقیاس مرکالی و Ms: بزرگی زلزله در مقیاس ریشتر است. با توجه به تهیهٔ نقشه‌ها در هر مرحله نقشهٔ رستری حداکثر شتاب زلزله برای شهر بردسکن ساخته شد که درجهٔ مطلوبیت بر پایهٔ حداکثر شتاب کاهش می‌یابد (شکل۴).

۱- Peak Ground Acceleration



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[1] (۲۰۱۰) اصطلاح «شهر دوم»[2] 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:

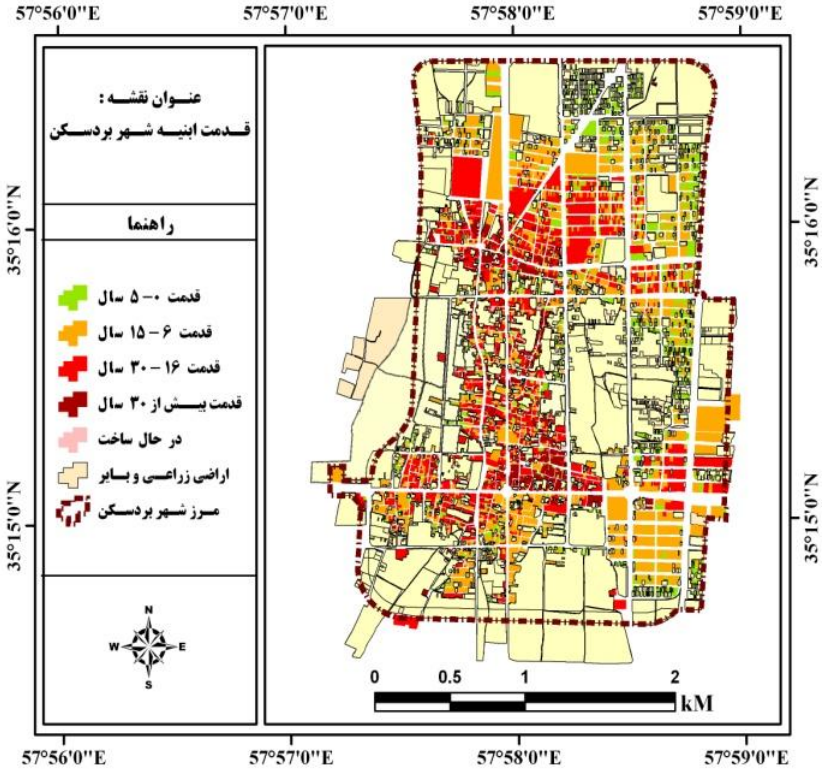
1- Allan and Bryant
2- Second City



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

قدمت ابنیه (عمر بنا)

به‌طور 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، شاخصِ بسیار مهمی در بررسی آسیب‌پذیری زلزله می‌باشد. با بالا رفتن درجهٔ محصوریت (ارتفاع بیشتر ساختمان نسبت به عرض کم معبر) احتمال بسته شدن معابر افزایش می‌یابد؛ زیرا باعث می‌شود با ریختن آوارِ 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 نقشِ مهمی در میزان آسیب‌پذیری بناها دارد. با افزایش تراکم، میزان نخالهٔ ناشی از تخریب ساختمان نیز بیشتر خواهد شد که این بر میزان آسیب‌پذیری بافت تأثیر مستقیم دارد. در واقع تراکم ساختمانی درصدی از مساحت زمین است که به صورت عمودی برای ساختمان‌سازی استفاده می‌شود و با بیشتر شدن آن، احتمال تخریب و آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود (شیعه و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۹). شکل (۸) تراکم ساختمانی بناها را در شهر بردسکن نشان می‌دهد:



شکل ۸: تراکم ساختمانی بناها در شهر بردسکن بر حسب درصد

احتمال آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف در برابر زلزله

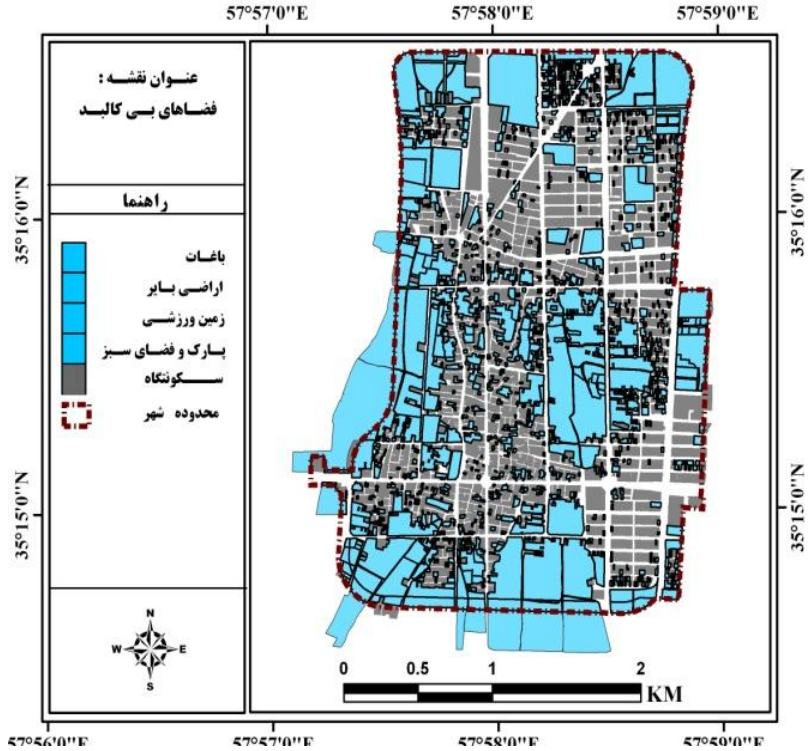
بسته به نوع کاربری، احتمال آسیب‌پذیری بیشتر یا کمتر می‌شود. به همین خاطر کاربری‌های محدودهٔ مورد مطالعه به سه دستهٔ " کاربری‌های پرخطر، کاربری‌های با خطرِ متوسط و کاربری‌های کم‌خطر" در برابر زلزله تقسیم شده‌اند. در عین حال کاربری‌هایی در شهر وجود دارند که در بحث چگونگی کنترل بحران ناشی از زلزله و کاهش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



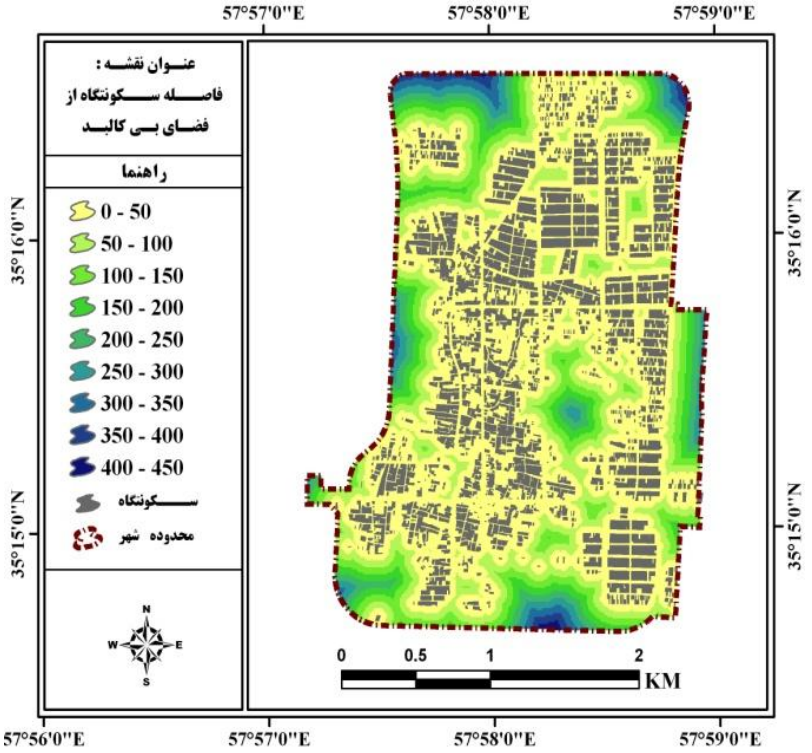
شکل ۹: احتمال آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف در برابر زلزله

فاصلهٔ سکونت‌گاه‌ها از فضاهای بی‌کالبد

فضاهای بی‌کالبد می‌توانند در زمانی که احتمال وقوع زلزله وجود دارد به عنوان فضای پناه‌گیری 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 مکان‌های کم‌خطر زلزله قرار گیرند. نداشتن پوشش گیاهی امکان استفاده در مواقع امدادرسانی، به‌ویژه برپایی اسکان اضطراری را بالا می‌برد. نزدیکی این مکان به مراکز درمانی به‌دلیل انتقال سریع‌تر کمک‌های فوری بسیار مطلوب خواهد بود (حبیبی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸۵). شکل (۱۰) فضاهای بی‌کالبد شهر بردسکن و شکل (۱۱) فاصله سکونت‌گاه از فضاهای بی‌کالبد را نشان می‌دهد:



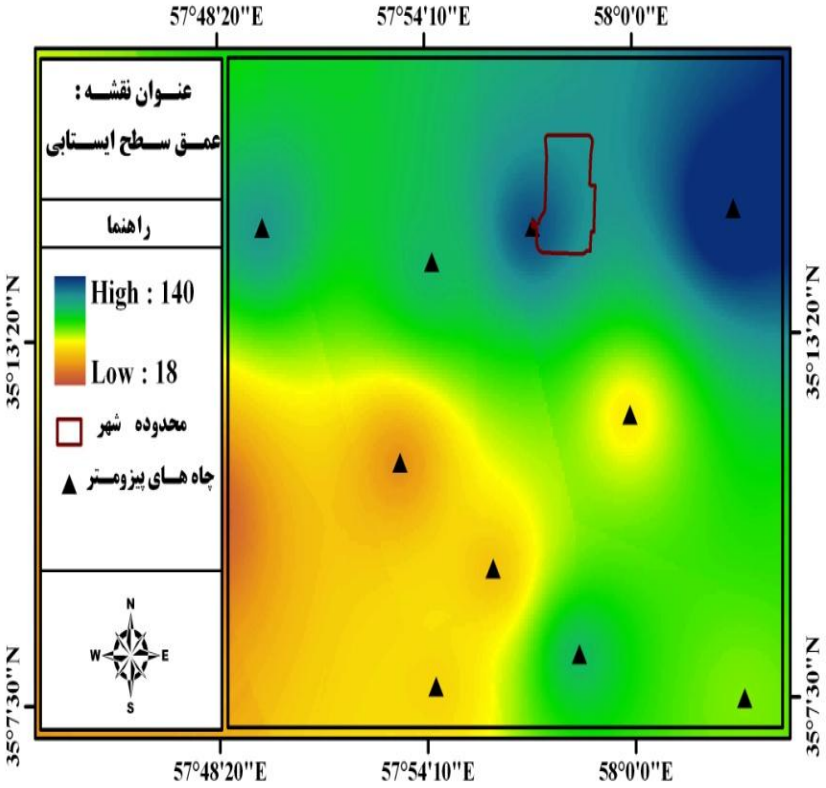
شکل ۱۰: فضاهای بی‌کالبد شهر بردسکن



شکل ۱۱: فاصله سکونتگاه از فضاهای بی‌کالبد

عمق سطح ایستابی

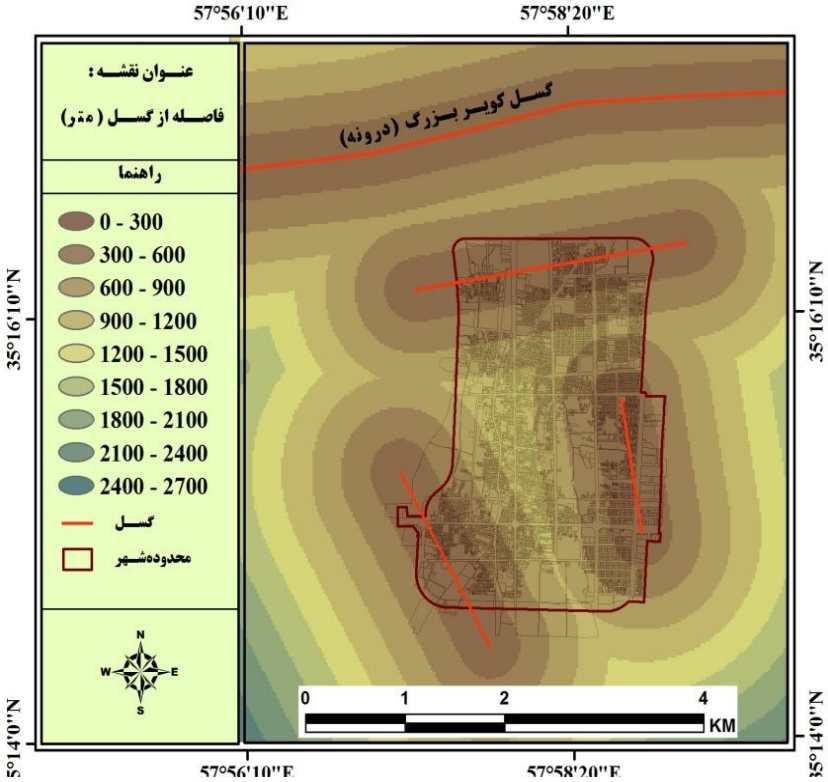
توجه به عمق سطح ایستابی برای پهنه‌بندی مناطق در برابر خطر زلزله و تأثیر مشترک آب و خاک در بررسی مسائل ژئوتکنیک و توان باربری خاک، حائز اهمیت ویژه است. اگرچه در خاک‌هایی با دانه‌بندی پیوسته، وجود آب در خاک به‌خودی خود کم اهمیت است؛ اما در بعضی از لایه‌های خاک، درصد بسیاری از مواد ریزدانه به خصوص ذرات 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 تهیهٔ نقشه سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه، از اطلاعات چاه‌های پیزومتری سازمان آب مطقه‌ای خراسان رضوی استفاده گردید (سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۸۹). شکل (۱۲) نقشهٔ درون‌یابی‌شدهٔ عمق سطح ایستابی را نشان می‌دهد:



شکل ۱۲: نقشه عمق سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه

دوری و نزدیکی به گسل

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



شکل ۱۳: فاصلهٔ گسل‌ها بر حسب متر در شهر بردسکن

کیفیت ابنیه

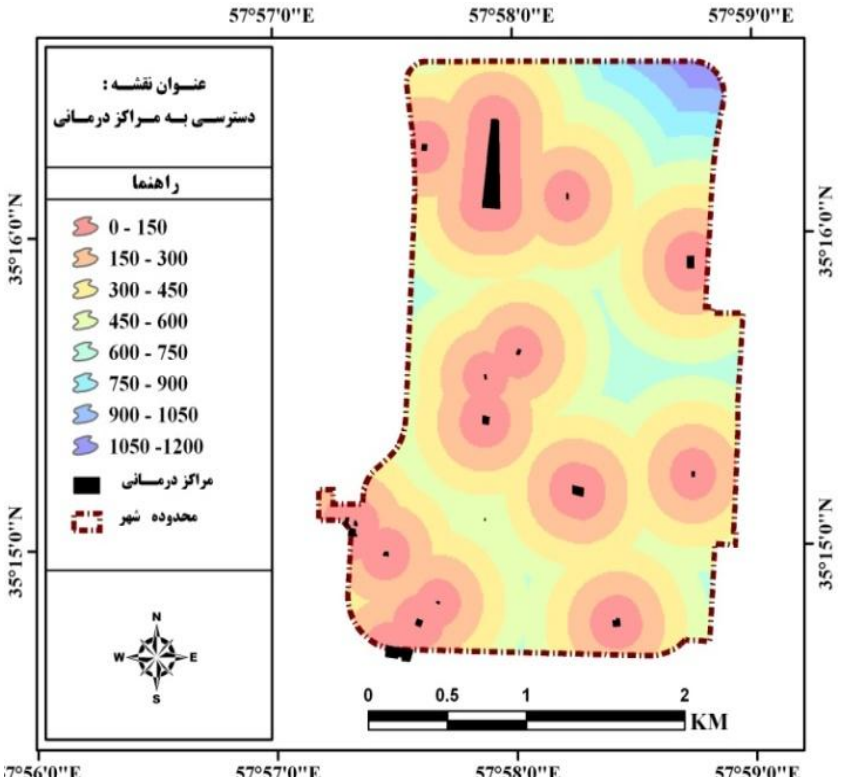
احتمال مقاومت ساختمان‌های با کیفیت بالا (نوساز) در مقابل زلزله نسبت به ساختمان‌های مخروبه و مرمتی بیشتر است. قدمت یک سازه الزاماً رابطهٔ مستقیمی با کیفیت ندارد؛ اما در بیشتر موارد ساختمان‌هایی با سن بیش از ۳۰ سال، نیاز به تعمیر اساسی دارند (ستوده، ۱۳۸۰: ۱۷۰). در این پژوهش کیفیت ابنیه با توجه به موقعیت 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:



شکل ۱۴: کیفیت ابنیه در شهر بردسکن

دسترسی به مراکزِ درمانی

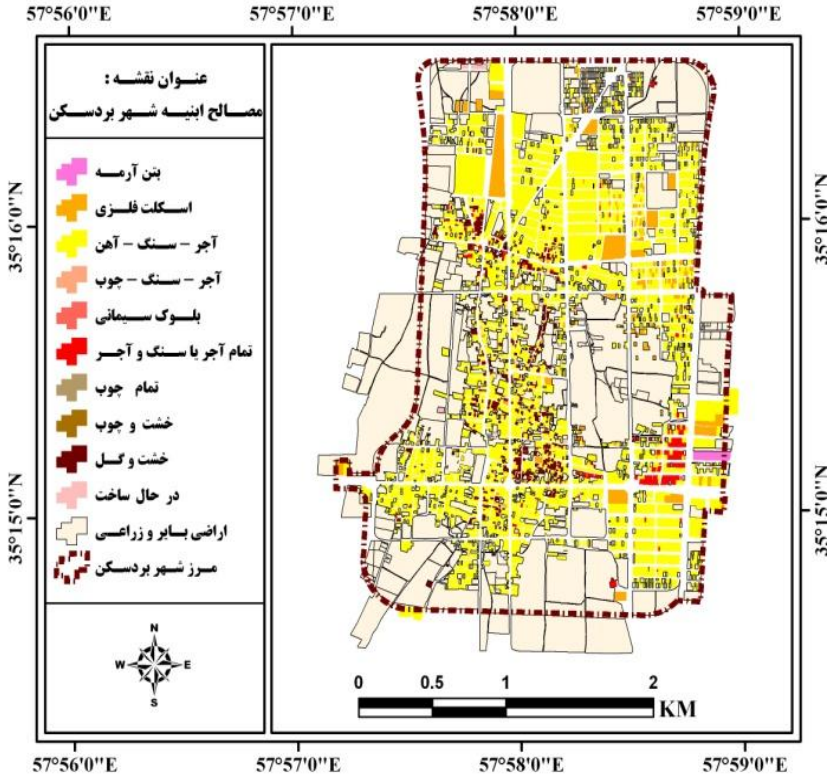
این شاخص بیشتر با زمان بعد از وقوع حادثه در ارتباط است. دسترسی به مراکز درمانی موجب سرعت بخشیدن به عملیات امداد و نجات و خدمات‌رسانی می‌شود. به این ترتیب با دور شدن از مراکزِ درمانی، احتمال آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود (اسفندیاری‌درآباد و همکاران، ۱۳۹۲: ۵۴). شکل (۱۵) نقشهٔ فاصله از مراکز درمانی را در منطقهٔ مورد مطالعه نشان می دهد:



شکل ۱۵: فاصله تا مراکزِ درمانی در شهر بردسکن

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

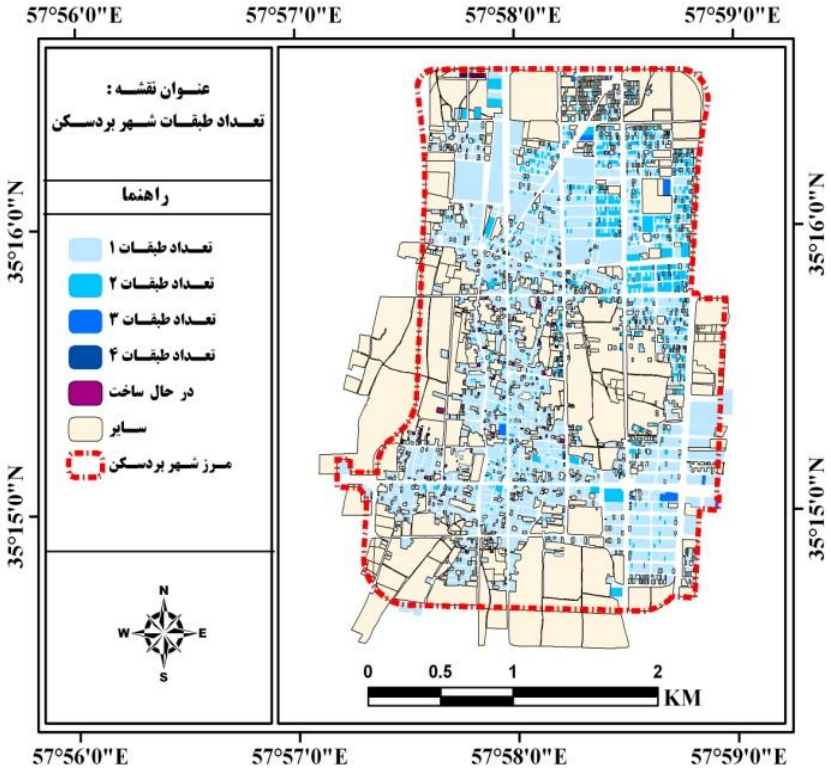
این شاخص نقش بسیار مهمی در هنگام گریز، پناه، تخلیه و امدادرسانی دارد؛ چرا که حجم بیشتری از بازماندگان یا گروه‌های امدادگری می‌توانند منتقل شوند. هرچه عرض گذرگاه‌ها بیشتر باشد امکان ایجاد ترافیک عبوری کمتر خواهد شد. در واقع شبکهٔ ارتباطی کارآمد، شبکه‌ای است که عرض بیشتری دارد، سطح آن نسبت به سطوح ساخته شدهٔ 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

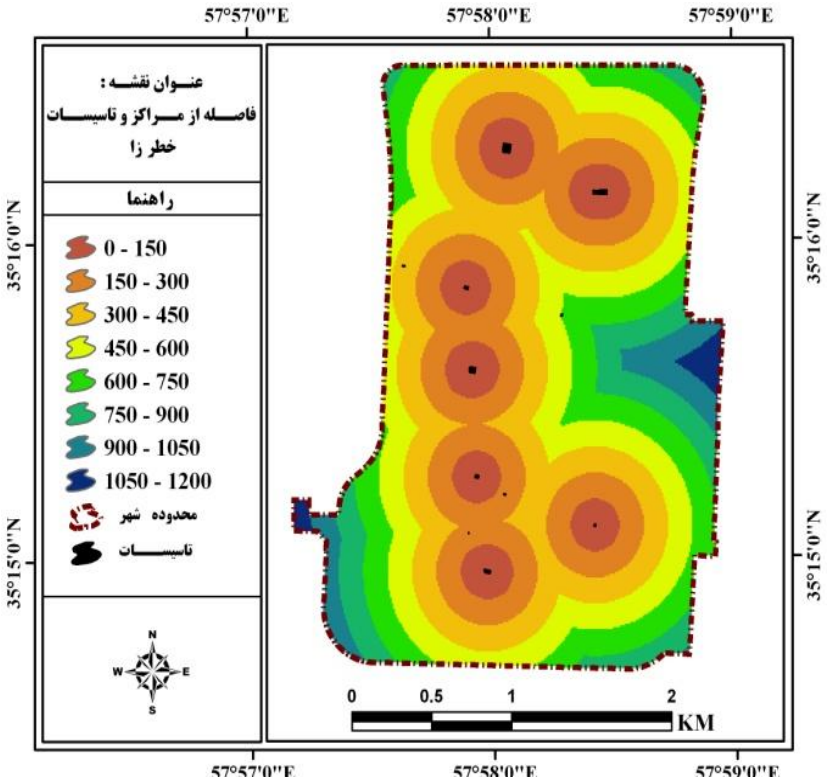
با بالا رفتن تعداد طبقات ساختمانی، احتمال بسته‌شدن معابر به دلیل ریختنِ آوارِ ساختمان‌های بلندمرتبه بالا می‌رود و موجب اختلال در امر امدادرسانی می‌شود. همچنین به دلیل جمعیت زیاد ساکن در ساختمان‌های چندطبقه، در زمان بروز حادثه تخلیهٔ ساکنان در این واحدها کندتر انجام می‌گیرد و به علت حجم آواربرداری بسیار 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:



شکل ۱۸: تعداد طبقات شهر بردسکن

فاصله از مراکز و تأسیسات خطرزا

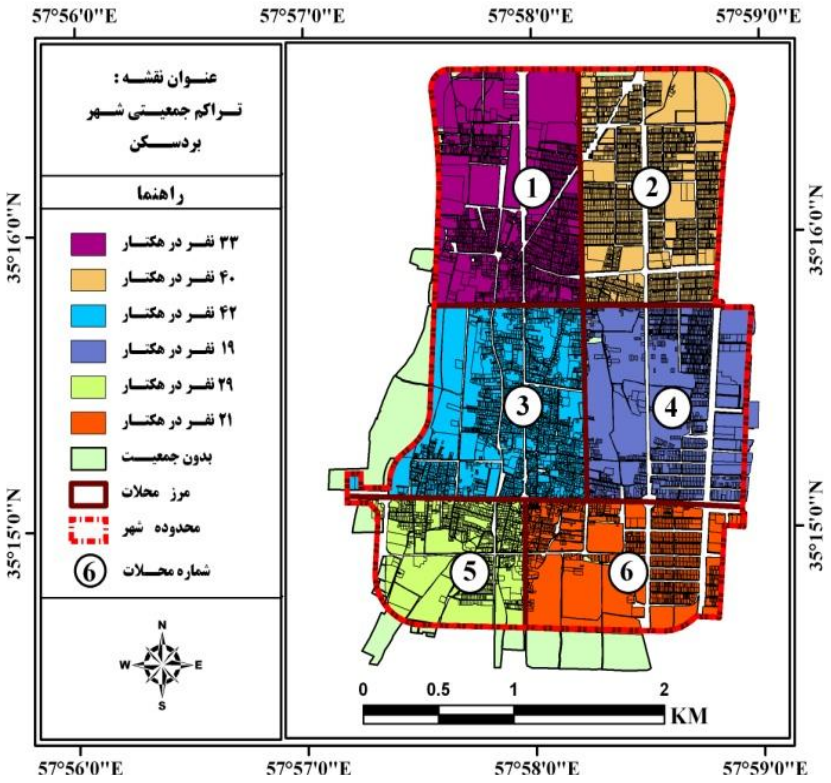
تأسیسات خطرزا به آن گروه از تأسیساتی گفته می‌شود که در ارتباط با مواد خطرناک قرار دارند. این تأسیسات می‌توانند باعث خطرهای ثانویه‌ای چون آتش‌سوزی و انفجار شوند. استقرار کاربری‌هایی با پتانسیل بالای آسیب‌رسانی در کنار کاربری‌ها، میزان آسیب‌پذیری را افزایش می‌دهد. بنابراین انتقال این‌گونه تأسیسات به خارج 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) نقشهٔ فاصله از مراکز و تأسیسات خطرزا را در سطح شهر بردسکن نشان می‌دهد:



شکل ۱۹: فاصله از مراکز و تأسیسات خطرزا

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 محاسبهٔ این شاخص در منطقهٔ مورد مطالعه، از رابطهٔ 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.



شکل ۲۰: تراکم جمعیت در شهر بردسکن

میزان اثرگذاری هر یک از عوامل مؤثر در آسیب‌پذیری شهر بردسکن به یک اندازه نخواهد بود و هر کدام تأثیر متفاوتی در آسیب‌پذیری خواهند داشت. به این ترتیب پس از شناسایی معیارهای مورد نیاز، اهمیت هر معیار در آسیب‌پذیری یک مکان مشخص و سپس رتبه‌بندی می‌شوند. مبنای این کار نظرات کارشناسی است. جدول (۱) وزن مربوط به هریک از متغییرها را نشان می‌دهد.

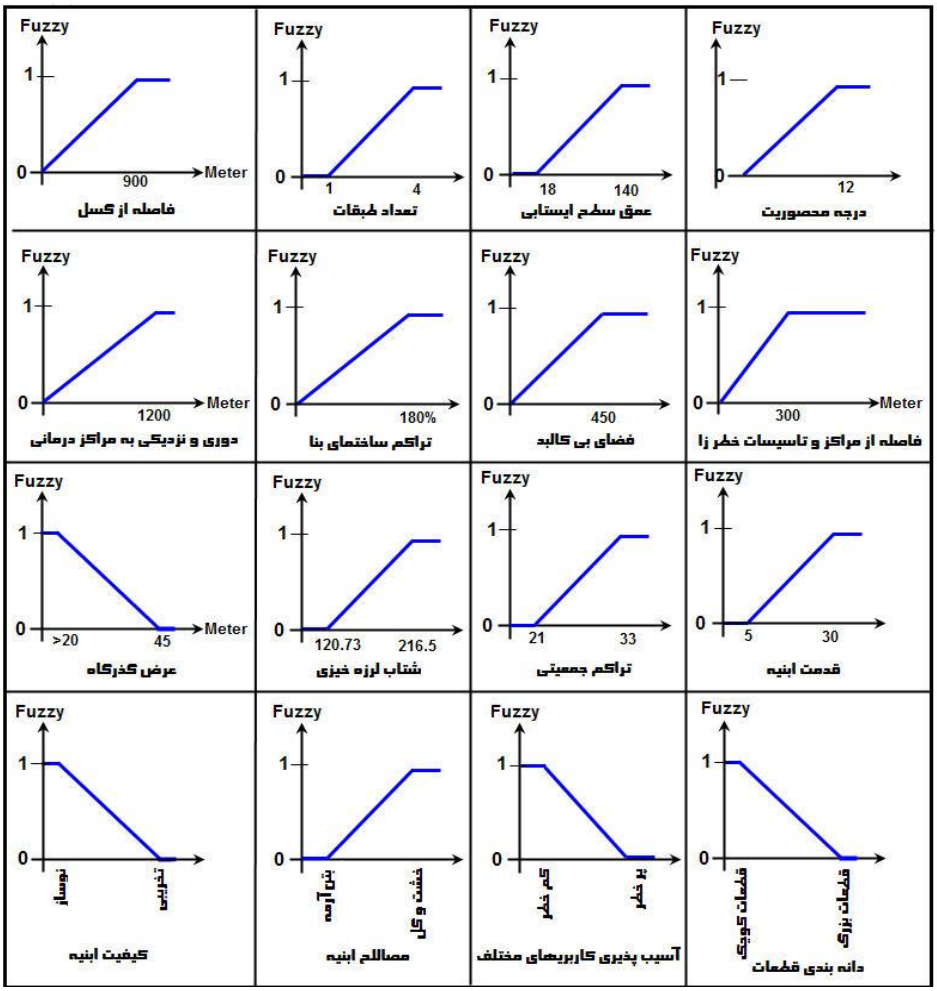
فازی‌سازی عوامل مؤثر در میزان خطرِ ناشی از زلزله

بر این اساس که معیارهای ارزیابی با مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شوند، برای این‌که بتوان آنها را با یک مقیاس مشترک تبدیل نمود، نیاز به استانداردسازی دارند. با توجه به این‌که منطقِ فازی دامنهٔ وسیعی از تابع عضویت را در مقایسه با سایر متدهای استانداردسازی ارائه می‌دهد، این مدل می‌تواند با به‌کارگیری توصیفات غیر عددی یک روش بسیار قوی در مورد برهان شباهت‌های انسانی در استفاده از داده‌ها و اطلاعات تقریبی و غیرِ خطی برای تصمیم گیری ارئه نماید (Rashed and Weeks, 2003: 3). معیار درجهٔ عضویت هر یک از کلاس‌ها نیز بر پایهٔ مقایسه زوجی است که در آن یک شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر با عناوینی چون غیر قابل مقایسه، اهمیت خیلی بیشتر، اهمیت بیشتر، یکسان و اهمیت خیلی کمتر سنجش می‌شوند و طیفی از امتیازات را کسب می‌کنند

(جدول ۱). شکل (۲۱) درجهٔ عضویت هر یک از معیارهای مؤثر بر آسیب‌پذیری زلزله را بر پایهٔ تابعِ فازی خطی ممدانی نشان می‌دهد:

جدول ۱: فازی سازی عوامل مؤثر در میزان آسیب‌پذیری ناشی از زلزله و وزن و رتبهٔ معیارها

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



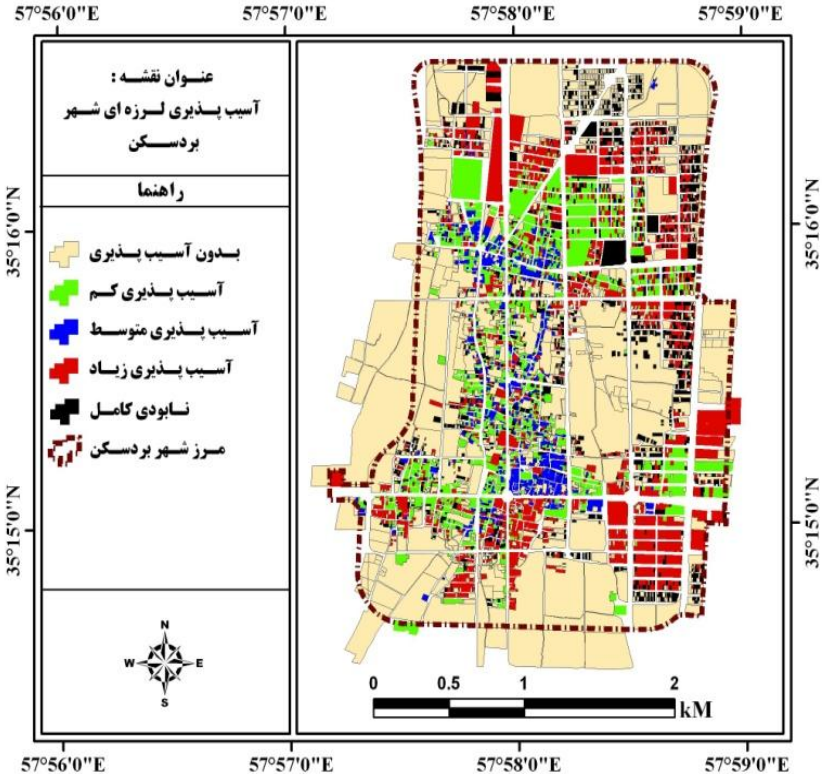
شکل ۲۱: تعیین درجهٔ عضویت معیارهای مؤثر بر آسیب‌پذیری زلزله بر پایهٔ تابعِ فازی خطی ممدانی

تلفیق لایه‌ها بر پایهٔ مدل (IHWP)

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

جدول ۲: توزیع آماری آسیب‌پذیری کلی شهر بردسکن در برابر زلزله

میزان آسیب‌پذیری	محله ۱		محله۲		محله ۳		محله ۴		محله ۵		محله ۶	
	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در منطقه
بدون آسیب‌پذیری	۶۴۰	۶/۵۵	۹۸۱	۴/۴۱	۸۷۱	۶/۱۰	۳۹۹	۵/۵۷	۲۸۵	۵/۱۰	۲۱۴	۵/۷۱
آسیب‌پذیری کم	۳۱۸	۴/۱۵	۳۷۰	۱/۲۱	۵۳۰	۴/۱۰	۱۲۰	۳/۲۵	۱۲۰	۴/۱۰	۱۳۹	۴/۱۵
آسیب‌پذیری متوسط	۱۷۰	۶/۱۰	۳۰۱	۱/۷۳	۵۹	۵/۱۲	۱۰۲	۳/۶۹	۲۲۰	۲/۰۵	۱۵۹	۳/۷۸
آسیب‌پذیری زیاد	۱۰۱	۳/۰۱	۱۱	۳	۱۱	۵/۱۰	۹۹	۱/۲۰	۴	۱/۰۱	۸۰	۲/۷۸
نابودی کامل	۸۳	۰/۴۱	۶	۰/۰۱	۷۲	۳/۱۴	۱۲	۰/۷۲	۹	۰/۳۲	۱۳	۱/۱۰
مجموع	۱۳۱۲	/۲۲ ۲۰	۱۶۶۸	/۳۶ ۱۰	۱۵۴۳	/۵۶ ۲۳	۷۳۲	/۴۳ ۱۴	۶۳۸	/۵۸ ۱۲	۶۰۵	/۵۲ ۱۷



شکل۲۲: میزان آسیب‌پذیری کلی لرزه‌ای شهر بردسکن

طراحی سناریو برای ارزیابی آسیب‌پذیری شهر بردسکن در برابر شدت‌های مختلف زلزله

نقشهٔ فازی‌سازی شده از روش تحلیل فرآیند سلسله مراتبی وارون (IHWP) صرفاً نشان دهندهٔ میزان آسیب‌پذیری کلّی با در نظر گرفتن معیارهای مورد استفاده می‌باشد. برای ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری لازم است که با استفاده از روابط موجود در این زمینه، از جمله روش میزان متوسط آسیب‌پذیری به طراحی سناریوهای زلزله برای شدت‌های مختلف پرداخت تا با توجه به تحلیل‌های به دست آمده، ارزیابی دقیقی از خسارت وارد شده به ساختمان‌ها میسر شود. برای این منظور ابتدا با توجه به رابطه شمارهٔ (۶) به محاسبه متوسط درجات آسیب ساختمان‌ها در برابر شدت‌های مختلف زلزله پرداخته شد (Milutinovic and Trendafiloski, 2003: 65).

رابطهٔ ۶:

$$\alpha_D = 2.5\left[1+\tanh\left(\frac{I+6.25\times\overline{Vi}-13.1}{2.3}\right)\right]$$

این رابطه α_D: متوسط درجه آسیب‌پذیری، I: عامل شدت زلزله بر اساس واحد مرکالی اصلاح شده، $\overline{Vi}$: مقدار آسیب‌پذیری حاصله از اعمال روش تحلیل سلسله مراتبی وارون (IHWP) می‌باشد.

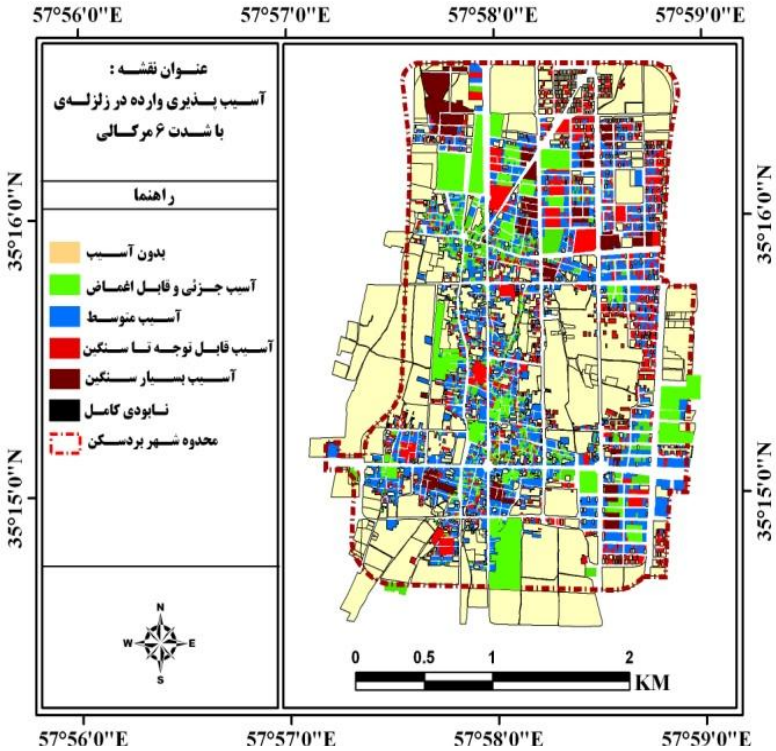
با توجه به این رابطه مقدار آسیبِ وارده به هر واحد ساختمانی را می‌توان در ۶ گروه عمده بر طبق جدول (۳) طبقه‌بندی کرد:

جدول ۳: درجه‌بندی آسیب وارده به ساختمان‌ها

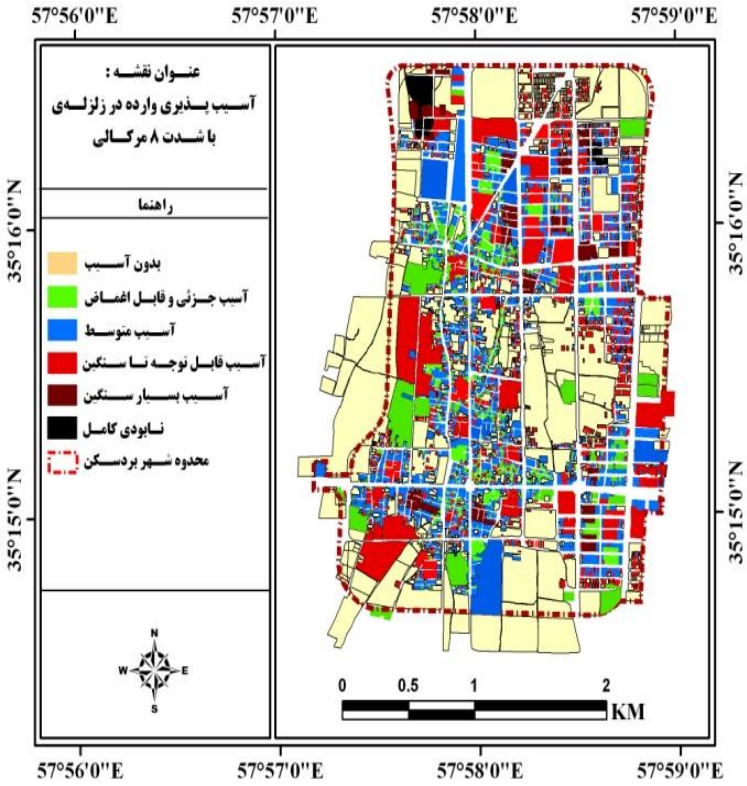
درجه آسیب	محدوده (دامنه)	میزان آسیب	میزان آسیب وارده به ساختمان (٪)
D_0	۰	بدون آسیب	٪ ۰
D_1	۰/۲ -۰/۲	آسیب جزئی و قابل اغماض	٪ ۰
D_2	۰/۲ -۰/۴	آسیب متوسط	٪ ۲
D_3	۰/۴ -۰/۶	آسیب قابل توجه تا سنگین	٪ ۱۰
D_4	۰/۶ -۰/۸	آسیب بسیار سنگین	٪ ۵۰
D_5	۰/۸ -۰/۱	نابودی کامل	٪ ۱۰۰

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 وارده به ساختمان‌ها را نشان می‌دهد:



شکل ۲۳: نقشهٔ آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر بردسکن در زلزله‌هایی با قدرت ۶ مرکالی



شکل ۲۴: نقشهٔ آسیب‌پذیری ساختمان‌های شهر بردسکن در زلزله‌هایی با قدرت ۸ مرکالی

جدول ۴: توزیع آماری آسیبِ وارده به ساختمان‌ها در برابر زلزله‌هایی با شدت های ۶ و ۸ مرکالی

شدت ۶ مرکالی (سناریو ی اول)	محله ۱		محله۲		محله ۳		محله ۴		محله ۵		محله ۶	
	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در منطقه
D_1	۶۴۸	/۵۵ ۱۲	۹۹۴	/۴۱ ۴	۸۷۹	/۳۷ ۱۱	۴۴۰	۶/۵۷	۲۷۸	۵/۹۰	۲۱۸	۶/۷۱
D_2	۳۱۰	۴/۷۳	۳۵۷	/۲۱ ۱	۵۳۱	۷/۶۹	۱۲۱	۲/۴۱	۱۲۷	۳/۳۲	۱۴۲	۳/۲۳
D_3	۱۷۵	۲/۸۸	۳۱۰	/۷۳ ۱	۵۴	۳/۸۹	۸۷	۱/۶۹	۲۲۹	۴/۰۵	۱۵۸	۴/۴۵
D_4	۱۰۱	۲/۳۳	۰	۰	۶	۰/۵۶	۷۹	۱/۲۰	۴	۰/۰۱	۸۷	۱/۷۸
D_5	۷۸	۱/۵۴	۷	/۰۱ ۰	۷۳	۲/۱۴	۵	۰/۹۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۱۳۱۲	/۰۳ ۲۴	۱۶۶۸	۷/۳۶	۱۵۴۳	/۶۵ ۲۵	۷۳۲	/۷۷ ۱۲	۶۳۸	/۲۸ ۱۳	۶۰۵	/۱۷ ۱۶

شدت ۸ مرکالی (سناریو ی دوم)	محله ۱		محله ۲		محله ۳		محله ۴		محله ۵		محله ۶	
	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در محله	تعداد ساختمان	درصد در منطقه
D_1	۵۵۳	۷/۵۵	۶۵۲	/۴۰ ۲	۲۴۷	۳/۷۸	۱۴۶	۳/۱۱	۸۹	۲/۴۸	۲۸۵	۵/۳۵
D_2	۱۷۸	۴/۷۳	۲۸۷	/۲۱ ۱	۴۳۱	۶/۵۱	۱۰۹	۱/۰۱	۵۱	۱/۷۸	۱۲۱	۳/۰۹
D_3	۳۴۷	۶/۸۸	۱۰۶	/۷۳ ۰	۸۷	۱/۹۹	۱۲۱	۲/۲۱	۳۴۰	۶/۰۵	۱۳۱	۳/۲۱
D_4	۱۲۴	۳/۳۳	۶۲۰	/۳۲ ۲	۵۰۰	۷/۷۸	۱۳۷	۳/۰۱	۱۱۱	۳/۳۱	۶۴	۱/۷۸
D_5	۱۱۰	۳/۵۴	۳	/۰۳ ۰	۲۷۸	۳/۹۸	۲۱۹	۴/۱۱	۴۷	۱/۳۱	۴	۰/۰۱
مجموع	۱۳۱۲	/۰۳ ۲۶	۱۶۶۸	۷/۶۶	۱۵۴۳	/۶۵ ۲۴	۷۳۲	/۴۵ ۱۳	۶۳۸	/۹۳ ۱۴	۶۰۵	/۴۳ ۱۳

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای مشخص کردن میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر بردسکن ۱۶ شاخص که شامل: دوری و نزدیکی به گسل، شتاب افقی زمین، تعداد طبقات، دانه‌بندی قطعات، دوری و نزدیکی به مراکز درمانی، عمق سطح ایستابی، 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 انتخاب گردید و نقشه آسیب‌پذیری کلی شهر بردسکن در برابر زلزله تهیه شد؛ سپس به مدل‌سازی آسیب‌پذیری زلزله در شدت‌های ۶ و ۸ مرکالی پرداخته شد و میزان آسیب‌پذیری قطعات ساختمانی به تفکیک محلات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج آسیب‌پذیری کلی لرزه‌ای شهر بردسکن نشان می‌دهد که ۳۳/۴۴ درصد از ساختمان‌های شهر بدون آسیب‌پذیری، ۲۳/۲۴ درصد از ساختمان‌های شهر در طبقهٔ آسیب‌پذیری کم، ۲۳/۴۷ درصد در گروه آسیب‌پذیری متوسط، ۱۳/۰۱ درصد در رنجِ آسیب‌پذیری زیاد و ساختمان‌هایی که بسیار آسیب‌پذیر هستند ۵/۷ درصد از ساختمان‌های شهر را تشکیل می‌دهند. میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در سناریوی طراحی شدهٔ ۶ مرکالی به‌ترتیب محلات ۲۴/۰۳، ۷/۳۶، ۲۵/۶۵، ۱۲/۷۷، ۱۳/۲۸ و ۱۶/۱۷ درصد و در سناریوی طراحی شدهٔ ۸ مرکالی به‌ترتیب ۲۶/۰۳، ۷/۶۶، ۱۳/۲۴،۴۵/۶۵، ۱۴/۹۳ و ۱۳/۴۳ درصد است. بالاترین میزان آسیب‌پذیری بر اساس تعداد ساختمان‌ها به‌ترتیب در محلات ۳، ۱، ۶، ۵، ۴و ۲ شهر وجود دارند. به‌طور کلی ساختمان‌های موجود در شمال شهر نسبت به بقیهٔ مناطق دارای آسیب‌پذیری بیشتری هستند که از دلایل عمدهٔ آن نزدیکی به گسل، بالا بودن شتاب افقی زمین (PGA)، بالا بودن تراکم ساختمانی بنا و پایین بودن کیفیت و مصالح ساختمانی می‌باشد.

منابع

- احدنژاد روشتی، محسن؛ مهدی قرخلو؛ کرامت‌اله زیاری (۱۳۸۹). مدل‌سازی آسیب‌پذیری 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). مدل‌سازی ضریب آسیب‌پذیری شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش تاپسیس در محیط GIS مطالعهٔ موردی: شهر اردبیل، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال ۲، شماره ۲، صص ۷۹-۴۳.
- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها، سایت اینترنتی: http://www.iiees.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 پیش‌بینی ناپایداری بافت‌های کهن شهری در برابر زلزله با منطق سلسله مراتبی وارون(IHPW) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، علوم زمین، سال ۲۲، شماره۸۷، صص ۹۲ تا ۸۳.

- حسینی، مازیار(۱۳۸۱). چالش‌ها و راهبردهای مدیریت بحران در شهر تهران، سازمان مدیریت بحران، مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین المللی 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، شهر سازی - برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، استاد راهنما: فرانک سیف الدینی، دانشگاه شیراز.
- شریف‌زادگان، محمدحسین؛ حمید فتحی (۱۳۹۰). طراحی و کاربرد مدل‌های فضایی ارزیابی و تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، دو فصلنامهٔ مدیریت بحران، شماره ۴۶، صص ۱۲۴- ۱۱۰.
- شماعی، علی؛ نجمه حیدرزاده؛ لطفی بابک مقدم (۱۳۹۲). سنجش عوامل آسیب‌رسان ناشی از زلزله در منطقهٔ یک شهر تهران با استفاده از GIS، نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری (دانشکده جغرافیا)، سال۱۷، شماره۴۳، بهار ۱۳۹۲، صص ۱۲۲-۹۳.
- شیعه، اسماعیل؛ کیومرث حبیبی؛ کمال ترابی (۱۳۸۹). بررسی آسیب‌پذیری شبکه‌های ارتباطی شهرها در مقابل زلزله با استفاده از روشIHWP ، باغ نظر، بهار ۱۳۸۹، شماره۱۳، صص ۴۸-۳۵.
- عزیزی، محمدمهدی؛ رضا اکبری (۱۳۸۷). ملاحظات شهرسازی در سنجش آسیب‌پذیری شهرها از زلزله با کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه هنرهای زیبا، شماره۳۴، دانشگاه تهران.
- فرج‌زاده اصل، منوچهر؛ محسن احدنژاد؛ جمال امینی، (۱۳۹۰). ارزیابی آسیب‌پذیری مساکن شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی: منطقهٔ ۹ شهرداری تهران)، مطالعات و پژوهش‌های شهری منطقه‌ای، سال ۳، شماره ۹، تابستان ۱۳۹۰.
- قائدرحمتی، صفر؛ روح الله قانعی بافقی (۱۳۹۱). ارزیابی حریم امن شهری در ارتباط با آسیب‌پذیری لرزه‌ای (منطقهٔ 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، پلی کپی 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 وشهرسازی، 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 Eisk Triggered by Sesmic 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.wwwvll, 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, Apr 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.