# طبقه‌بندی انواع ساختمانها و برآورد تابع خسارت برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در شهر بم

محمدرضا قایمقامیان، دانشیار پژوهشکده مدیریت خطرپذیری پژوهشگاه
خسرو خان‌زاده، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه

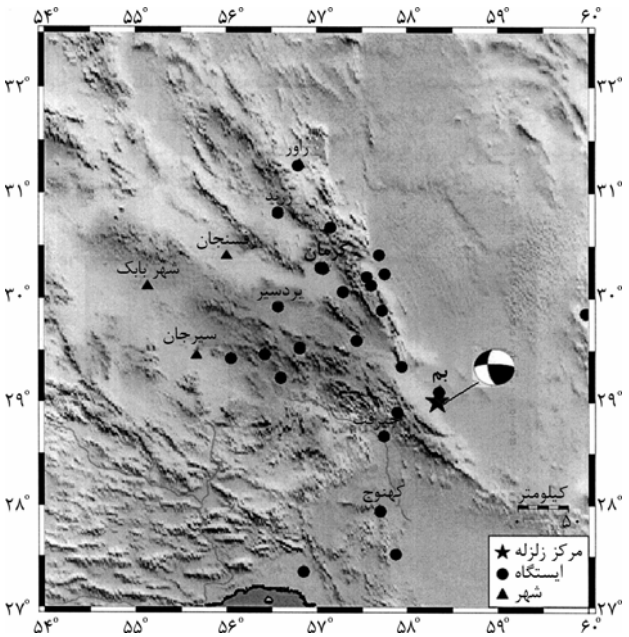
## ۱- چکیده

در این تحقیق، برداشتهای میدانی از خسارات وارد آمده بر ساختمانهای مختلف در زمین‌لرزه ۱۳۸۲ بم، بررسی، پردازش و در بانک اطلاعاتی گردآوری گردیده است. بر اساس این داده‌ها ساختمانهای موجود در شهر بم به شش گروه ساختمانی خشتی- گلی، مصالح بنایی، بنایی نیمه اسکلت فلزی، ساختمانهای بنایی با کلاف بتنی مسلح، ساختمانهای اسکلت فلزی و ساختمانهای بتنی مسلح طبقه‌بندی گردیده است. میزان خسارت انواع ساختمانها بر اساس دستورالعمل *EMS-98* به پنج درجه خرابی ناچیز، متوسط، زیاد، خیلی زیاد و تخریب کامل تقسیم‌بندی شده است. سپس شدت زمین‌لرزه در نقاط مختلف شهر بم با توجه به درجه آسیب‌پذیری هر نوع سازه بر حسب مقیاس *MSK* تعیین شده است. از آنجایی که بیش از ۶۵ درصد ساختمانهای خسارت‌دیده در بم از نوع ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز (خشتی- گلی، مصالح بنایی و بنایی نیمه اسکلت فلزی) بوده و با توجه به پراکندگی یکنواخت این نوع ساختمانها در سطح شهر بم، در برآورد شدت زمین‌لرزه، درصد خسارات وارد به این گونه ساختمانها مدّ نظر قرار گرفته است. در انتها، با بررسی رابطه بین شدت و میزان خسارت، تابع خسارت برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز بم ارائه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** *شدت زمین‌لرزه، زلزله بم، تابع خسارت، ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز*

## ۲- مقدمه

زلـزله بـم در تاریـخ پنـجم دی ۱۳۸۲ (۲۶ دسـامبر ۲۰۰۳) در ساعت ۵:۲۶:۲۶ بامـداد به وقـت محلی (۱:۵۶:۵۶ به وقت *GMT*) به بزرگای *Mw=6.5* در نزدیکی بم در جنوب شرقی ایران واقع در استان کرمان رخ داد [۱]. موقعیت کانونی این زمین‌لرزه مطابق با داده‌های شبکه زلزله‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ۲۹/۰۱ درجه عرض شمالی، ۵۸/۲۶ درجه طول شرقی و در حدود ۱۰ کیلومتری جنوب غربی شهر بم گزارش شده است. در شکل (۱) موقعیت کانون زلزله، ساز وکار گسلش و ایستگاههایی که این زلزله را ثبت کرده‌اند، نشان داده شده است. مطالعات انجام یافته توسط قایمقامیان و هیسادا با استفاده از مدلسازی حرکات توانمند زمین در شهر بم و تحلیل برگشتی پراکندگی لغزش در سطح گسل نشان داد که سناریوی گسلش در این شهر شامل لغزش در دو قطعه گسلی واقع در جنوب و درست زیر شهر بم است. نقطه شروع گسلش نیز در عمق هشت کیلومتری از سطح زمین تخمین‌زده شد [۲]. این زمین‌لرزه در ساعات آغازین بامداد اتفاق افتاد و طبق آمار رسمی موجب کشته شدن بیـش از ۲۶,۰۰۰ نفر، مجروح شدن هزاران نفر، بی‌خانمانی بیـش از ۱۰۰,۰۰۰ نفر و خسارات مالی فراوان گردید.




***شکل( ۱): موقعیت کانون، سازوکار زلزلـه و ایـستگاههای ثبـت کننده آن***

با استفاده از داده‌های مربوط به خسارات وارد بر ساختمانها و تأثیر حرکت ناشی از زمین‌لرزه بر اشیاء و انسان می‌توان شدت زمین‌لرزه را در نقاط مختلف آسیب-دیده، که امکان ثبت حرکات توانمند زمین میسّر نیست، برآورد نمود. این اطلاعات بررسی رابطهٔ بین شدت حرکت زمین و میزان خسارت وارد بر انواع ساختمانها (تابع خسارت یا آسیب‌پذیری تجربی) را امکانپذیر می‌سازد. توابع خسارت، نقش بسزایی در بررسی خطرپذیری ساختمانها در زلزله‌های محتمل آتی دارد و با توجه به نوع سازه، مصالح بکار رفته و روشهای ساخت و ساز برای هر منطقه و یا برای هر کشور متفاوت است. علاوه بر آن، از توابع تجربی خسارت نیز می‌توان در تدقیق و کالیبره کردن توابع خسارت تحلیلی که بر اساس روشهای آزمایشگاهی تعیین می‌گردد، استفاده نمود؛ لذا، تعیین توابع تجربی خسارت با استفاده از آمار خرابی انواع ساختمانها و رابطه آن با شدت زمین‌لرزه در زلزله‌های گذشته از اهمیت خاصی برخوردار است.

در این بررسی، با تجمیع و تحلیل داده‌های مربوط به خسارت ساختمانی جمع‌آوری شده توسط سه گروه مرکب از محققان خارجی و ایرانی، ابتدا یک بانک اطلاعاتی کامل از خسارات سازه‌ای در شهر بم تشکیل شد. سپس، با طبقه‌بندی ساختمانها و تعیین میزان خسارت، با استفاده از دستورالعمل *EMS-98* شدت زمین‌لرزه در نقاط مختلف آسیب‌دیده شهر بم، برآورد و تابع آسیب‌پذیری یا خسارت برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز با توجه به تعداد زیاد این نوع ساختمانها در شهر بم مورد بررسی قرار گرفت.

## ۳- تابع تجربی خسارت

تحلیل خرابی و آسیب‌پذیری ساختمانها یکی از مباحث مهم در تخمین تلفات و خسارات ناشی از زمین‌لرزه‌های آتی است. این ارزیابی، اطلاعات با ارزشی را برای برنامه‌ریزیهای پس از زمین‌لرزه و کاهش خطرپذیری در شهرها و بویژه شهرهای بزرگ در اختیار قرار می‌دهد [۳]. یکی از روشهای موجود برای برآورد خطرپذیری لرزه‌ای شهرها، استفاده از منحنی‌های آسیب‌پذیری یا خسارت است که با استفاده از روشهای مختلف تحلیلی، آزمایشگاهی و تجربی بر حسب داده‌های موجود تعیین می‌گردد. توابع تجربی خسارت بر اساس داده‌های حاصل از بازدید ساختمانهای آسیب‌دیده در مناطق خسارت‌دیده از زمین-لرزه‌های قبل به دست می‌آیند. مزیت اصلی این روش، واقع‌بینانه بودن آن است؛ زیرا، منحنی‌ها بر اساس داده‌های واقعی شکل می‌گیرند. از طرفی، یکی از محدودیتهای این روش، ناهمگنی احتمالی داده‌های مورد استفاده است [۴]. از جمله عوامل ایجاد ناهمگنی، ترکیب اطلاعات زمین‌لرزه‌های مختلف با یکدیگر و یا اطلاعات جمع‌آوری شده توسط کارشناسان و گروههای مختلف است؛ اما، آنچه که اهمیت بیشتری در تشکیل منحنی‌های خسارت دارد، میزان داده‌های موجود است؛ به طوری که استفاده از مجموعه داده‌های ناهمگن بزرگ بر مجموعه داده‌های همگن کوچک ترجیح داده می‌شوند [۵ و ۶]. منحنی‌های خسارت، احتمال خرابی یک نوع مشخص از ساختمانها را بر حسب پارامتر جنبش زمین بیان می‌کنند. در واقع منحنی‌های خسارت رابطه بین پارامتر جنبش زمین و آسیب‌پذیری ساختمان را نشان می‌دهند [۷]؛ بنابراین، برای ایجاد منحنی‌های خسارت وجود سه پارامتر جنبش زمین، انتخاب سطح خرابی مورد نظر و تعیین نوع ساختمان ضروری است. از میان پارامترهای مختلف جنبش زمین، شدت مهلرزه‌ای و بیشینه شتاب جنبش زمین[1]، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تنها مطالعه موجود در تعیین تابع تجربی خسارت در ایران مربوط به زلزله ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ منجیل است. در مطالعه مذکور، بهروز و شهاب توکلی (۱۹۹۳) با استفاده از بررسی محدود خرابیها، تخمینی برای تابع خسارت ساختمانهای مسکونی غیر مهندسی‌ساز ارائه نمودند [۸]. همچنین آژانس همکاریهای بین‌المللی ژاپن به درخواست شهرداری تهران به ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ اقدام و در برآورد آسیب‌پذیری شهر تهران از این تابع خسارت و مقیاس نمودن آن برای ساختمانهای متداول شهر تهران بر اساس قضاوت مهندسی استفاده نمود [۹]. این امر خود دلیلی بر اهمیت توابع تجربی خسارت و ارجحیت آن نسبت به توابع تحلیلی خسارت در مطالعات خطرپذیری است.

1. Peak Ground Acceleration (PGA)

## ۴- گردآوری داده‌های مربوط به خسارات سازه‌ای و تشکیل بانک اطلاعاتی از ساختمانهای آسیب‌دیده در شهر بم

بررسی خسارات ساختمانها در زمین‌لرزه ۱۳۸۲ بم با توجه به گستردگی خرابی، تنوع ساختمانهای خسارت‌دیده و درصد ساختمانهای صدمه‌دیده در درجات مختلف خسارت اطلاعات مهمی را در تعیین تابع تجربی خسارت فراهم می‌نماید؛ لذا، پس از وقوع زلزله، گروههای مختلفی در داخل و خارج از کشور به بررسی میدانی خسارات وارد و ثبت اطلاعات مربوط به خرابیها اقدام نمودند. در این میان، یکی از جامعترین مطالعات توسط گروه هیسادا و همکاران به انجام رسید [۱۰]. در این بررسی، مشخصات و میزان تخریب ساختمانها به طور دقیق، ثبت و موقعیت هر سازه در مقیاس پارسل بر روی نقشه‌های ماهواره‌ای اجرا شد. پس از هیسادا نیز مطالعات تکمیلی با نگرش ویژه بر تعداد کشته‌شدگان توسط اکادا (۲۰۰۵) و همکاران به انجام رسید [۱۱]. مصطفایی و کابه‌یاساوا (۲۰۰۴) نیز از معدود محققینی بودند که ضمن ثبت اطلاعات مربوط به تخریب ساختمانها، به ثبت موقعیت مکانی نقاط مورد بررسی در شبکه‌هایی به ابعاد یک کیلومتر در یک کیلومتر اقدام نمودند [۱۲]. نکته مشترک در بررسیهای میدانی این گروهها، ثبت دقیق موقعیت مکانی ساختمانهای مورد مطالعه علاوه بر ثبت خسارات ساختمانی بود. این مسأله امکان تجمیع مطالعات انجام شده توسط این گروهها را که عموماً به علت محدودیت زمانی تنها قادر به بررسی محدودی از خسارت در منطقه بوده‌اند را فراهم می‌نماید. لازم به ذکر است که در غالب بررسیهای انجام شده توسط محققین دیگر، اگرچه مشخصات ساختمانی و نحوه تخریب به تفصیل تشریح گردیده، اما موقعیت مکانی ساختمانهای مورد بررسی به درستی مشخص نیست. این امر سبب برآورد نادرست از تعداد ساختمانهای آسیب‌دیده در سطوح مختلف تخریب و خطای زیاد در تعیین توابع خسارت می‌شود.

در این تحقیق، ۱۶۶۳ داده مربوط به خرابی ساختمانهای شهر بم، که حاصل بررسیهای میدانی سه گروه مطالعاتی هیسادا و همکاران [۱۰]، مصطفایی و کابه‌یاساوا [۱۲] و اکادا و همکاران [۱۱] می‌باشد، جمع‌آوری، پردازش و تجمیع گردیده است. بدین منظور داده‌های مورد نظر با توجه به پارامترهای لازم در این تحقیق همسان و هم‌ارزش گردیده است. برآورد میزان خسارت توسط هر سه گروه بر اساس دستورالعمل *EMS-98* صورت گرفته است که در بخش چهارم به اختصار راجع به این دستورالعمل توضیحاتی ارائه شده است. طبقه‌بندی ساختمانهای آسیب‌دیده، از دیدگاه سازه‌ای بین گروه مصطفایی و کابه‌یاساوا با دو گروه هیسادا و همکاران و اکادا و همکاران متفاوت می‌باشد. از آنجایی که لازم است تا کلیه داده‌های ساختمانی بر اساس یک الگوی یکسان طبقه‌بندی شوند، طبقه‌بندی ارائه شده توسط هیسادا و همکاران به عنوان الگو انتخاب شده است (توضیحات لازم در بخش چهارم مقاله). سپس کلیه داده‌های جمع‌آوری شده توسط مصطفایی و کابه‌یاساوا بازنگری و بر اساس طبقه‌بندی هیسادا و همکاران مورد ارزیابی مجدد قرار گرفته است. در تهیه بانک اطلاعاتی، داده‌هایی که در آنها پارامترهایی نظیر موقعیت مکانی دقیق هر سازه، نوع سازه، تعداد طبقات، نحوه خرابی و ... موجود بود انتخاب و داده‌ها با پارامترهای ناقص و یا موقعیت مکانی نامشخص، حذف گردیده است. در انتها، کلیه داده‌های هم ارزش با پارامترهای آنها در یک پایگاه اطلاعاتی گردآوری شده است. نظر به تعداد زیاد و پراکندگی یکنواخت ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در شهر بم، در این بررسی داده‌های مربوط به ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز مورد تحلیل قرار گرفته است و داده‌های مربوط به ساختمانهای مهندسی‌ساز با توجه به اهمیت و تعداد محدود در مقاله‌ای جداگانه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد [۵]. منظور از ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در این پایگاه اطلاعاتی، سه‌گونه ساختمانی (خشتی- گلی، مصالح بنایی و بنایی نیمه اسکلت فلزی) است که از لحاظ تعداد، شامل ۱۱۲۴ داده موجود در بانک اطلاعاتی نهایی است.

## ۵- مقیاس مهلرزه‌ای اروپایی EMS-98

برای تعیین خسارت وارد بر ساختمانها از مقیاس روزآمد *EMS-98* به دلیل وضوح بیشتر در تعیین درجه خسارت و تطبیق آن با روشهای جدید ساخت و ساز، استفاده شده است. در این مقیاس، به منظور تعیین شدت زمین‌لرزه از حسگرهایی همچون صدمه به ساختمانها،

تـأثیر بـر اشـیا و انـسان اسـتفاده شـده اسـت. در ایـن دسـتورالعمل، ضـمن تعریـف انـواع سـاختمانها، میـزان آسـیب‌پذیری به شش رده از $A$ (خـطرپذیرترین) تا $F$ (کـم خـطرپذیرترین) متناسب با نوع ساختمان مطابق جدول (۱) تقسیم‌بندی شـده است [۱۳].

***جدول (۱): طبقه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمانها در EMS98 [۱۳]***

| نوع سازه | | طبقه‌بندی آسیب‌پذیری | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *A* | *B* | *C* | *D* | *E* | *F* |
| بنایی | از قلوه‌سنگ نتراشیده | O | | | | | |
| | خشتی | O | | | | | |
| | از سنگ ساده | | O | | | | |
| | از سنگ حجیم | | | O | | | |
| | غیر مسلح (همراه با قطعات سنگی کارگاهی و تراشیده شده ) | | O | | | | |
| | غیر مسلح همراه با کفهای اتاق بتنی مسلح | | | O | | | |
| | مسلح شده با اسکلتی | | | | O | | |
| بتنی مسلح *(RC)* | قاب بتنی مسلح (بدون طراحی برای مقاومت در برابر زمین‌لرزه) | | O | | | | |
| | قاب بتنی مسلح با سطح متوسطی از *ERD* | | | O | | | |
| | قاب بتنی مسلح با سطح بالایی از (*ERD*) | | | | O | | |
| | دیوارهای بتنی مسلح بدون *ERD* | | O | | | | |
| | دیوارهای بتنی مسلح با سطح متوسطی از *ERD* | | | O | | | |
| | دیوارهای بتنی مسلح با سطح بالایی از *ERD* | | | | O | | |
| فولادی | سازه‌های فولادی | | | O | | | |

در *EMS-98* خرابی سـاختمانها بـه پـنج درجـه (*Grade*) طبقه‌بندی گردیده است:

۱- خرابی ناچیز؛

۲- خرابی متوسط؛

۳- خرابی زیاد؛

۴- خرابی خیلی زیاد؛

۵- ویرانی کامل.

شـدت زلزله در *EMS-98* به دوازده درجه مقیاس گردیـده است و بر حسب *MSK* بیان مـی‌گـردد. بـه منظـور تعیـین شدت می‌توان از جدول (۲)، که خلاصه شـده دسـتورالعمل *EMS-98* بر اساس رده آسـیب‌پـذیری و درصـد خرابـی در درجات مختلف تخریب می‌باشد، استفاده نمود.

***جدول (۲): تعیین شدت بـر اسـاس درصـد خرابـی و طبقـه‌بنـدی آسیب‌پذیری ساختمانها***

| شدت | خسارت | رده *A* (درصد) | رده *B* (درصد) | رده *C* (درصد) | رده *D* (درصد) | رده *E* (درصد) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۶ | درجه ۱ | ۶۰-۲۰ | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - | - |
| | درجه ۲ | ۲۰-۰ | ۲۰-۰ | - | - | - |
| ۷ | درجه ۱ | - | - | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - |
| | درجه ۲ | - | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - | - |
| | درجه ۳ | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - | - | - |
| | درجه ۴ | ۲۰-۰ | - | - | - | - |
| ۸ | درجه ۲ | - | - | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - |
| | درجه ۳ | - | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - | - |
| | درجه ۴ | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - | - | - |
| | درجه ۵ | ۲۰-۰ | - | - | - | - |
| ۹ | درجه ۲ | - | - | - | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ |
| | درجه ۳ | - | - | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - |
| | درجه ۴ | - | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - | - |
| | درجه ۵ | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | - | - | - |
| ۱۰ | درجه ۲ | | | | | ۶۰-۲۰ |
| | درجه ۳ | | | | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ |
| | درجه ۴ | | | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | |
| | درجه ۵ | ۱۰۰-۶۰ | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | | |
| ۱۱ | درجه ۲ | | | | | |
| | درجه ۳ | | | | | ۶۰-۲۰ |
| | درجه ۴ | | | ۱۰۰-۶۰ | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ |
| | درجه ۵ | | ۱۰۰-۶۰ | ۶۰-۲۰ | ۲۰-۰ | |
| ۱۲ | درجه ۵ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰-۶۰ | ۱۰۰-۶۰ |

## ۶- طبقه‌بندی انواع ساختمانها و بررسی آسیب‌پذیری آنها در بم

طبقه‌بندی ساختمانها در داده‌های گردآوری شده توسط محققین مختلف، یکسان نیست و هر گروه، بسته به سـلیقه و قضاوت مهندسی، طبقه‌بندی خاصی از سازه‌هـای موجـود در بم را ارائه نموده است. به عنوان مثال، مصطفایی و کابه-یاساوا [۱۲] ساختمانهای موجود در شهر بم را به ۹ طبقه و

هیسادا و همکاران [۱۰] بـه همـراه اوکـادا و همکـاران [۱۱] این ساختمانها را به شش طبقه تقسیم‌بندی نموده‌اند؛ لذا به منظور یکسان‌سازی داده‌های جمع‌آوری شده در بانک اطلاعاتی، لازم است تا تمام ساختمانها با الگوی واحد طبقه‌بندی گردد. بدین منظور، ساختمانهای شهر بم به لحاظ سازه‌ای به شش دسته مطابق با الگوی هیسادا و همکاران [۱۰] طبقه‌بندی شده است.

## ۶-۱- ساختمانهای خشتی – گلی[۲]

این ساختمانها عمدتاً از مصالح خشتی-گلی، سنگ و آجر نپخته ساخته شده‌اند (تصویر ۱). از نظر آسیب‌پذیری جزء ساختمانهای رده $A$ و غیر مهندسی‌ساز محسوب می‌گردند. این ساختمانها بخش وسیعی از سازه‌های موجود در بافت بسیار قدیمی و فرسوده از شهر بم را تشکیل می‌دهد.

*تصویر (۱): یک نمونه ساختمان خشتی- گلی در شهر بم*

## ۶-۲- ساختمانهای بنایی[۳]

ساختمانهای بنایی از مصالح آجری (پخته شده) یا بلوک‌های سیمانی با ملات ماسه و سیمان ساخته می‌شوند. دیوارهای باربر دارند و سقف آنها غالباً از نوع طاق ضربی می‌باشد. این ساختمانها از نظر آسیب‌پذیری جزء ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز و از رده $B$ بوده و ضعیف محسوب می‌گردند (تصویر ۲).

## ۶-۳- ساختمانهای بنایی، نیمه اسکلت فلزی[۴]

در ساخت این ساختمانها از مصالح آجر پخته و یا بلوک همراه با ملات ماسه سیمان و قابهای ساده و بدون مهار جانبی و به صورت نیمه اسکلت با ستونهای فلزی استفاده شده است. سیستم باربری آن استفاده از قاب ساده (نیمه اسکلت) و دیوارهای باربر می‌باشد (تصویر ۳). این ساختمانها از نظر آسیب‌پذیری در رده $C$ و غیر مهندسی-ساز است.

*تصویر (۲): نمونه‌ای از ساختمان مصالح بنایی در شهر بم*

*تصویر (۳): نمونه‌ای از ساختمان نیمه اسکلت فلزی در بم*

## ۶-۴- ساختمانهای بنایی با کلاف بتنی مسلح[۵]

این ساختمانها از مصالح آجر پخته و یا بلوک سیمانی همراه با ملات ماسه سیمان و بتن ساخته شده‌اند. دیوارهای آنها از آجر و یا بلوک با کلافهای افقی و قائم وسقف آنها غالباً تیرچه بلوک است؛ ولی بعضاً طاق ضربی نیز دیده می‌شود (تصویر ۴). این ساختمانها از نظر آسیب‌پذیری در رده ساختمانهای $C$ یا $D$ بوده و در برابر زلزله عملکرد تقریباً قابل قبولی نسبت به ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز دارد و خود جزء ساختمانهای مهندسی‌ساز محسوب می‌گردد.

2. Adobe
3. Masonry
4. Masonry with Steel Frame
5. Masonry with Reinforced Concrete Frame

تصویر (۴): نمونه‌ای از ساختمان بنایی با کلاف بتن مسلح در بم

## ۶-۵- ساختمانهای اسکلت فلزی[6]

ساختمانهای اسکلت فلزی، به ساختمانهای فلزی با مهاربند و ساختمانهای فلزی قاب خمشی، که در آنها بار جانبی توسط قاب تحمل می‌شود، تقسیم‌بندی می‌شوند (تصویر ۵). این ساختمانها از نظر آسیب‌پذیری در ردهٔ ساختمانهای $D$ یا $E$ و ساختمانهای مهندسی‌ساز محسوب می‌شوند.

تصویر (۵): نمونه‌ای از ساختمان اسکلت فلزی در شهر بم

## ۶-۶- ساختمانهای بتنی مسلح[7]

این ساختمانها اسکلت بتنی دارند و به منظور مهار نیروهای جانبی از قاب خمشی در آنها استفاده می‌شود و بارهای آن توسط سازه بتنی تحمل می‌گردد (تصویر ۶). سقف این نوع ساختمانها تیرچه بلوک و از نظر آسیب‌پذیری در زمره ساختمانهای رده $D$ یا $E$ بوده و جزء ساختمانهای مهندسی‌ساز است.

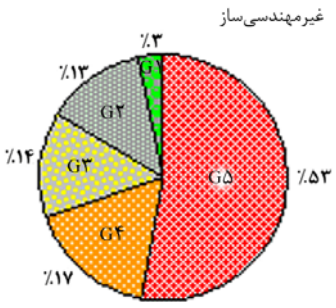
تصویر (۶): نمونه‌ای از ساختمان بتنی مسلح در شهر بم

## ۷- برآورد شدت زمین‌لرزه در بم

آمار ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در بانک اطلاعاتی نهایی و همسان شده، بالغ بر ۱۱۰۰ داده می‌باشد که در جدول (۳) تعداد هر سازه به تفکیک درجه خسارت ارائه شده است [۱۴]. در شکل (۲) توزیع ساختمانها بر حسب درصد در درجه‌های مختلف خسارت نشان داده شده است.

جدول (۳): تعداد داده‌های ساختمانی به تفکیک درجه خسارت برای سازه‌های غیر مهندسی‌ساز

| نوع | G۵ | G۴ | G۳ | G۲ | G۱ | مجموع |
|---|---|---|---|---|---|---|
| غیر مهندسی ساز | ۵۹۴ | ۱۹۰ | ۱۵۵ | ۱۴۸ | ۳۷ | ۱۱۲۴ |




شکل (۲): توزیع ساختمانهای غیرمهندسی‌ساز در درجات مختلف خسارت

به منظور تعیین شدت زمین‌لرزه بر حسب دستورالعمل *EMS-98* لازم است تا آسیب‌پذیری ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز بم تعیین گردد. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش سوم و مطالعات میدانی در خصوص ساز و کار خرابی این ساختمانها، جدول (۴) به عنوان معیار تعیین آسیب‌پذیری ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز شامل ساختمانهای خشتی- گلی، مصالح بنایی و نیمه اسکلت فلزی در بم تعیین و در این بررسی به کار گرفته شده است.

6. Steel Frame
7. Reinforced Concrete Frame

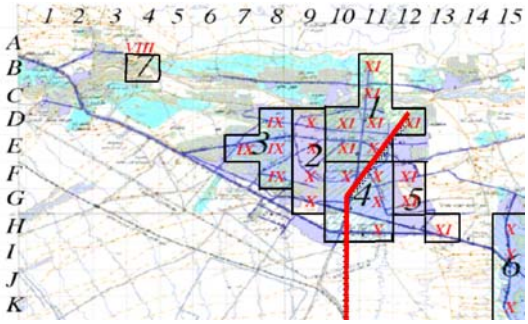
پس از برآورد آسیب‌پذیری، درصد خرابی در هر درجه خسارت ($G1$ الی $G5$) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و به کمک جدول (۲)، شدت برای پهنه‌های مختلف تعیین شده است.

پراکندگی شدت تعیین شده در گستره شهر بم در شکل (۳) نشان داده شده است. با اتصال شبکه‌های هم شدت در نقاط مختلف، شهر بم به هفت پهنه با شدت $VIII$ تا $XI$ در مقیاس $MSK$ مطابق شکل (۳) و جدول (۵) تقسیم‌بندی شده است. بیشترین شدت در شمال و شرق شهر بم بود و از میزان آن به سمت غرب و جنوب کاسته می‌شد (شکل ۳). این روند با سناریوی گسلش پیشنهادی توسط قایمقامیان و هیسادا [۲] بر اساس شبیه‌سازی حرکات توانمند زمین در ایستگاه بم تطابق بسیار خوبی دارد که حاکی از دقت و صحت نتایج ارائه شده است.

$$DR=\frac{\text{تعداد ساختمانهای خراب شده از نوع } i}{\text{تعداد کل ساختمانها از نوع } i} \qquad (۱)$$

***جدول (۴): طبقه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمانهای بم***

| نوع سازه | طبقه آسیب پذیری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $A$ | $B$ | $C$ | $D$ | $E$ |
| خشتی- گلی | ○ | | | | |
| ساختمانهای بنایی | | ○ | | | |
| ساختمانهای بنایی نیمه اسکلت | | ○—○ | | | |




***شکل (۳): موقعیت گسل جدید [۲] و شدت تعیین شده برای پهنه‌های مختلف در گستره شهر بم***

***جدول (۵): شدتهای تعیین شده برای پهنه‌های مختلف***

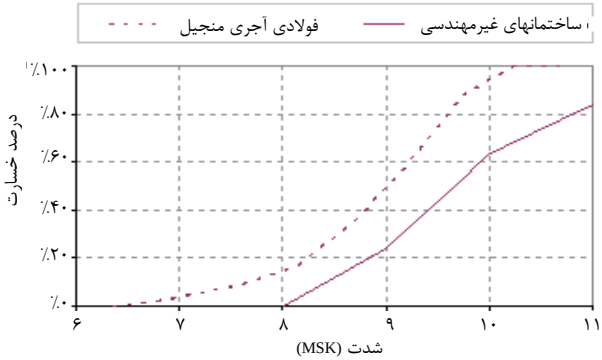
| پهنه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شدت | ۱۱ | ۱۰ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۰ | ۸ |

## ۸- تابع خسارت برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز

با توجه به اهمیت خرابیهای خیلی زیاد ($G4$) و ویرانی کامل($G5$) در برآورد آسیب‌پذیری ساختمانی، درصد خرابی سنگین به عنوان مجموع خرابی خیلی زیاد و ویرانی کامل ($G5+G4$) تعریف و در هر پهنه از شدت محاسبه شده است. درصد خرابیهای سنگین مربوط به داده‌های ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز موجود در گستره مورد مطالعه در جدول (۶) آورده شده است. همچنین در شکل (۴) رابطهٔ بین شدت در هر پهنه با میزان خسارات سنگین نشان داده شده است. به عبارت دیگر، شکل (۴) بیانگر تابع آسیب‌پذیری برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز بر اساس داده‌های خسارت ساختمانی در زمین‌لرزه ۱۳۸۲ بم می‌باشد.

***جدول (۶): درصد خرابیهای به دست آمده با توجه به شدتهای تعیین شده***

| شدت | درصد خسارت غیر مهندسی‌ساز |
|---|---|
| ۸ | ۰ |
| ۹ | ۲۴ |
| ۱۰ | ۶۳ |
| ۱۱ | ۸۴ |




***شکل (۴): تابع آسیب‌پذیری برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در زمین‌لرزه بم (۱۳۸۰) و مقایسه آن با تابع آسیب‌پذیری ساختمانهای فولادی و آجری غیر مهندسی‌ساز در زمین‌لرزه ۱۳۶۹ منجیل [۸]***

علاوه بر آن، در این شکل تابع آسیب‌پذیری به دست آمده برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز بم با تنها تابع آسیب‌پذیری تجربی ارائه شده برای ساختمانهای مشابه در زمین‌لرزه ۱۳۶۹ منجیل [۸] مقایسه شده است. در این شکل مشخص است که ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در زمین‌لرزه بم عملکرد به مراتب بهتری را از ساختمانهای فولادی و آجری غیر مهندسی‌ساز در زمین‌لرزه منجیل داشته است؛ به طوری که آستانه خرابی برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در زمین‌لرزه منجیل از شدت ۶ و برای ساختمانهای مشابه در زمین‌لرزه بم از شدت ۸ آغاز شده است. به همین ترتیب، دیگر مقادیر خسارت در زمین‌لرزه

بم نسبت به زمین‌لرزه منجیل بـه سـمت شـدتهای بیـشتر جابه‌جا شده است که تأکیدی بـر عملکـرد بهتـر ایـن نـوع ساختمانها در زلزله بم اسـت. ایـن امـر را شـاید بتـوان بـه افزایش کیفیت مصالح و نحوه ساخت و ساز پـس از زمـین-لرزه ۱۳۶۹ منجیل نسبت داد. اگرچه، بیان دلائل قطعی در این خصوص نیازمند بررسی و تحقیق بیشتری است.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بانک اطلاعاتی جامعی شامل ۱۱۲۴ داده از ساختمانهای غیرمهندسی‌ساز آسیب‌دیده در شهر بم با استفاده از پردازش و تجمیع آمار خرابیهای ساختمانی توسط سه گروه از محققین ژاپنی و ایرانی تهیه شده است. سپس درجه خرابی برای ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در شهر بم بر مبنای مشاهدات میدانی برآورد شده است. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در درجات مختلف خسارت‌ومیزان آسیب‌پذیری ساختمانها، شدت در پهنه‌های مختلف شهر بم بر اساس دستورالعمل *EMS-98* تعیین شده است.

اهم نتایج این تحقیق عبارتند از:

- پراکندگی شدت زمین‌لرزه در شهر بم بیانگر بیشتر بودن شدت در شمال شرق و شرق شهر بم نسـبت به جنوب و جنوب غرب آن می‌باشد. این امر تطابق خوبی با نتایج حاصل از سناریوی گسلش ارائه شده برای زمین‌لرزه بم بر اساس شبیه‌سازی حرکات توانمند زمین در ایستگاه بم دارد و تأکیدی بر دقت و صحت نتایج ارائه شده در این تحقیق است.
- مقایسه توابع خسارت ساختمانهای غیر مهندسی‌ساز در زمین‌لرزه بم با ساختمانهای آجری و فولادی غیر مهندسی‌ساز در زمین‌لرزه منجیل بیانگر عملکرد به مراتب بهتر این نوع ساختمانها در زمین‌لرزه بم است.
- نتایج حاصل از این تحقیق بر دست بالا بودن برآورد میزان خسارات ساختمانی با استفاده از این توابع و لزوم بازنگری در نتایج آن بر اساس اطلاعات زلزله-های اخیر ایران همچون زلزله بم تأکید می‌نماید.

## ۱۰- مراجع


1. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology of Iran. (2004). Available at: http://www. iiees.ac.ir/.
2. Ghayamghamian, M.R., Hisada, Y. (2007). Near-fault strong motion complexity of the 2003 Bam earthquake (Iran) and low-frequency ground motion simulation. *Geophysical Journal International, 170,* 679-686
3. Liao, W.I., Loh, C.H., Tsai, K.C. (2006). Study on the fragility of building structures in Taiwan. *Natural Hazards, 37,* 55-69.
4. Rota, M., Penna, A. Strobbia, C.L. (2008). Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28,* 933–947.
5. Sarabandi, P., Pachakis, D., King, S., Kiremidjian, A. (2004). Empirical fragility functions from recent earthquakes. *Proceedings of the 13th WCEE* (paper No. 1211). Vancouver, Canada.
6. Rossetto, T., Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering Structures, 25,* 1241–63.
7. Jozefiak, S. (2005). Fragility curves for simple retrofitted structures. Available at: http: //mae-ce.uiuc. edu/documents/s/c-online-magazine -2005-november-jozefiak. Pdf.
8. Tavakoli, B., Tavakoli, S. (1993). Estimating the valunerability and loss function of residential buildings. *Natural Hazards, 7,* 155-171.
9. آژانس همکاریهای بین‌المللی ژاپن (جایکا). (۱۳۸۰). *پروژه ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ* [گزارش]. تهران: مرکز مطالعات زلزله و زیست محیطی تهران بزرگ.
10. Hisada, Y., Shibayama, A., Ghayamghamian, M.R. (2005). Building damage and seismic intensity in Bam city from the 2003 Bam earthquake. *Bull. Earthquake Research Institute (ERI), 79,* 81-93.
11. Okada, S., Kagami, H., Hisada, Y., Aoki N., Ghayamghamian, M. R . (2005). *Data base construction and data mining for uncovering the mechanism of human injury in siesmic damage buildings. Grant*, No.14404008.
12. Mostafaei, H., Kabeyasawa, T. (2004). Investigation and analysis of damage to buildings during the 2003 Bam earthquake. *Bull. Earthquake Research Institute (ERI),79,* 107-132.
13. Grunthal, G. (1998). *European macroseismic scale 1998. Cahiers du centre Européen de géodynamique et de séismologie, 15, Centre*

*Européen de géodynamique et de séismologie, 99.*

۱۴. خان‌زاده، خسرو. (۱۳۸۵). *بررسی و طبقه‌بندی خسارات وارده بر ساختمانها و میزان مرگ و میر در شهر بم و رابطه آن با شدت زمین‌لرزه*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.