

# تخمین مدل تقاضای لرزه‌ای برای سطوح خرابی متوسط و زلزله‌های نزدیک گسل پالسگونه

کامران نوبخت و کیلی<sup>۱\*</sup>، کوثر یزدان نجاد<sup>۲</sup>، آزاد یزدانی<sup>۳</sup>

۱. مربی گروه مهندسی عمران، دانشگاه کردستان

۲. پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه کردستان

۳. استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه کردستان

\*k.vakili@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۲۳

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

## چکیده

تخمین مدل تقاضای لرزه‌ای که معیار شدت حرکت زمین را به معیار خرابی سازه‌ها مرتبط می‌سازد، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در طراحی سازه‌ها بر مبنای عملکرد است. در مدل تقاضای لرزه‌ای ارتباط بین پاسخ سازه و یک پارامتر لرزه‌ای که بیانگر ماهیت تصادفی زلزله می‌باشد، در قالب یک ساختار ریاضی بیان می‌شود. پس انتخاب مناسب شاخص شدت زلزله به عنوان پارامتر لرزه‌ای و تشخیص درست چگونه ارتباط آن با خسارت سازه می‌تواند نقش مهمی در کاهش خطاها در ارزیابی‌های لرزه‌ای داشته باشد. در بسیاری از مطالعات، شتاب طیفی مود اول ( $Sa(t_1)$ ) یا حداکثر شتاب زمین (PGA) به عنوان شاخص شدت مناسب معرفی شده، در حالیکه عدم کفایت این شاخص‌ها در برخی موارد مشاهده شده است. از طرفی انتخاب روشی مناسب برای سنجش کفایت شاخص‌های شدت با توجه به عدم قطعیت‌های موجود و همچنین بررسی کفایت مدل‌های تک‌خطی برای تقاضا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و باید مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه، میزان مناسب بودن شاخص‌های شدت مختلف با استفاده از مفاهیم تئوری اطلاعات و آنتروپی مورد ارزیابی قرار گرفته و از شتاب طیفی مود اول به عنوان شاخص مبنا استفاده شده است. برای این منظور، چندین سازه قاب خمشی بتنی با تعداد طبقات و ارتفاع متفاوت در نظر گرفته شده و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با مجموعه‌ای از رکوردهای پالس‌دار زلزله توسط نرم‌افزار IDARC انجام شده است. برای پاسخ سازه از شاخص خسارت پارک-انگ که کاربرد بسیاری به ویژه در سازه‌های بتنی دارد، استفاده شده است. با توجه به اینکه احتمال رفتار متفاوت شاخص‌های شدت در سطوح مختلف خسارت وجود دارد، بحث مدل‌های تقاضای چند خطی مطرح شده و عملکرد چندین مدل چندخطی با آزمون‌های آماری مورد سنجش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های شدت بر پایه سرعت، از کفایت لازم برای سطوح خرابی کم و متوسط، تحت رکوردهای پالس‌دار برخوردار هستند. در این سطوح استفاده از شاخص‌های شدت شتاب طیفی مود اول یا شاخص‌های بر مبنای شتاب مانند حداکثر شتاب زمین می‌تواند باعث ایجاد خطا شود. همچنین مطالعات انجام شده در این مقاله نشان داده که استفاده از مدل تک خطی برای تمام سطوح خسارت مناسب نبوده و استفاده از یک مدل سه خطی با توجه به سطوح خسارت می‌تواند باعث کاهش خطا در ارزیابی‌های لرزه‌ای شود.

**واژگان کلیدی:** مدل تقاضای لرزه‌ای، شاخص شدت زلزله، آنتروپی نسبی، سطوح خسارت.

## ۱- مقدمه

پیش‌بینی احتمالاتی پاسخ سازه ناشی از حرکات زمین امری مهم در طراحی بر مبنای عملکرد (PBD) سازه‌ها می‌باشد [1]. مدل تقاضای لرزه‌ای کی از اجزای مهم فرایند ارزیابی احتمالی بر مبنای عملکرد است. مدل تقاضا در واقع یک مدل ریاضی است که معیار شاخص شدت ( $IM^2$ ) زلزله را به پاسخ سازه که به‌عنوان شاخص‌خرابی ( $DM^3$ ) شناخته می‌شود، مرتبط می‌کند [2]. به عبارتی با ارتباط شاخص شدت به پارامتر تقاضای لرزه‌ای، مساله تخمین تقاضای لرزه‌ای به دو مسئله لرزه‌ای و سازه‌ای و قابل حل تفکیک می‌شود. مسئله تخمین تقاضای لرزه‌ای را می‌توان به صورت رابطه (۱) توصیف کرد [3]:

$$\lambda_{DM}(z) = \int P[DM > z | IM = x] \cdot |d\lambda_{IM}(x)| \quad (1)$$

که در آن  $\lambda_{DM}(z)$  بیانگر احتمال تجاوز سالیانه تقاضا از مقدار مشخص  $Z$  بوده و با توجه به پارامتر تقاضای لرزه‌ای انتخاب شده در قالب منحنی‌های خطر تقاضا تعریف می‌شود. جزء  $\lambda_{IM}(x)$  در رابطه (۱) تابع احتمال وقوع سالیانه پارامتر شاخص شدت بوده و با استفاده از روش‌های شناخته شده تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای محاسبه می‌شود. جزء دیگر  $P[DM > z | IM = x]$  است که احتمال تجاوز پارامتر تقاضای لرزه‌ای از مقدار  $Z$  به شرط اینکه شاخص شدت برابر  $X$  باشد، تفسیر می‌شود. این جزء وظیفه ارتباط پارامتر شاخص شدت و پارامتر تقاضای لرزه‌ای را به عهده دارد و با یک مدل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای قابل محاسبه است. با ترکیب نتایج حاصل از تحلیل سازه‌ها در قالب یک مدل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای و نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای می‌توان به منحنی‌های خطر تقاضا دست یافت که نقش مهمی در روش طراحی بر اساس عملکرد دارند [3].

انتخاب شاخص شدت مناسب زلزله که بتواند عدم قطعیت‌های ناشی از زلزله را به خوبی توصیف کند و

همچنین چگونگی ارتباط آن با تقاضای لرزه‌ای در قالب یک ساختار ریاضی می‌تواند اهمیت قابل توجهی در کاهش خطاهای طراحی لرزه‌ای داشته باشد. این ارتباط ریاضی بیشتر به صورت یک رابطه خطی (در مقیاس لگاریتمی) فرض شده است. در حالی که با توجه به رفتارهای مختلف سازه در سطوح خسارت مختلف، احتمال عدم کفایت مدل‌های تک خطی برای مدل تقاضای لرزه‌ای وجود داشته و نیاز به بررسی بیشتر احساس می‌شود که در این مطالعه مورد توجه قرار می‌گیرد.

## ۲- پیشینه تحقیق

یزدانی و همکاران [4] نشان دادند که عدم قطعیت در حرکت زمین، منبع اصلی عدم قطعیت در تحلیل نتایج PBD است. در ارزیابی مبتنی بر عملکرد، عدم قطعیت در حرکت زمین بیشتر با توصیف احتمالاتی یک مقدار اسکالر یا برداری از چند پارامتر، که به‌عنوان  $IM$  شناخته می‌شود، به جای توصیف احتمالاتی کامل تاریخچه زمانی حرکت زمین نشان داده می‌شود [5]. در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، پارامترهای لرزه‌ای مختلفی به عنوان  $IM$  مورد استفاده قرار می‌گیرند.  $IM$ ‌های مناسب که از کفایت لازم برخوردار باشند، می‌توانند به اندازه تاریخچه زمانی حرکت زمین، اطلاعات در مورد عملکرد پارامتر لرزه‌ای ارائه دهند.

شتاب طیفی مد اول  $(Sa(T_1))^4$  دارای بیشترین کاربرد در بین  $IM$ ‌های مختلف در تحلیل خطر لرزه‌ای و ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها می‌باشد [6-8]. کاباناس و همکاران [9] اثربخشی سرعت مطلق تجمعی  $(CAV^5)$  و شدت آریاس  $(I_a^6)$  را بررسی کردند. مجموعه‌ای از داده‌های لرزه‌ای در ایتالیا مورد توجه قرار گرفته و میزان همبستگی بین شاخص شدت و تقاضای سازه برای مدل‌های مختلف سازه‌ای متفاوت بوده است. کوردووا و همکاران [10] ترکیبی از شتاب‌های طیفی مدهای اول و دوم سازه را به عنوان یک

۵. cumulative absolute velocity

۶. Arias intensity

1. performance based design

2. intensity measure

3. damage measure

4. spectral acceleration value at first mode

امیرسرداری و همکاران عملکرد چندین شاخص شدت مختلف را بر سازه‌های بتن مسلح با ارتفاع کوتاه و متوسط بررسی کردند. در مطالعه آنها از داده‌های استرالیا استفاده شده و شاخص‌های شدت PGD و PGV همبستگی بهتری با پاسخ سازه از خود نشان دادند [19]. آرمسترنگ و همکاران نشان دادند که شاخص شدت  $I_a$  از کارایی مناسبی برای مدل تقاضای لرزه‌ای سدهای خاکی برخوردار است [20]. در مطالعات دیگری، پژوهشگران شاخص‌های شدت مختلفی بر پایه شتاب، سرعت و تغییر مکان ارائه کردند [21].

برادلی [17] دریافت که استفاده از یک مدل تقاضای تک خطی (ارتباط تک خطی بین پارامتر لرزه‌ای و پاسخ سازه) کافی نبوده، پس یک مدل تقاضای چند خطی با توجه به سطح خرابی سازه، توصیه کرد. کوه‌رنگی و همکاران [22] معتقد بودند که استفاده از یک IM برای تمام سطوح خرابی در مطالعه آنها کافی نبوده، اما استفاده از IMهای متعدد را نیز به دلیل نیاز به حجم زیاد محاسبات توصیه نکردند. استفاده از IMهای مختلف مناسب برای سطوح خرابی مختلف، نیاز به تحلیل‌های متعدد دارد که شاید برای اهداف ارزیابی چندان مناسب نباشد [23].

اگرچه مطالعاتی در خصوص شاخص شدت زلزله و تخمین مدل تقاضای لرزه‌ای انجام شده، ولی مطالعات دقیق و گسترده‌ای در داخل کشور انجام نشده و نیاز به مطالعات گسترده‌تر احساس می‌شود. در اغلب مطالعات گذشته ابزار سنجش برتری شاخص‌های شدت، ضرایب همبستگی ساده ای از جمله ضریب همبستگی پیرسون بوده که ممکن است چندان مناسب نباشد. از طرفی مدل تقاضا، تک خطی فرض شده و از ترکیب داده‌های خسارت به دست آمده در تمام سطوح، برای تخمین برتری مدل‌های تقاضای لرزه‌ای استفاده شده که با توجه به رفتار متفاوت سازه در خسارت‌های مختلف، ممکن است با خطا همراه باشد. علاوه بر این در بسیاری از مطالعات فقط عملکرد چند شاخص شدت

IM اسکالر ارائه کردند. در این مطالعه عدم قطعیت در حرکات زمین و پاسخ غیرخطی سازه مد نظر قرار گرفت. جلاپر و همکاران [5] در مطالعات خود از میانگین هندسی شتاب‌های طیفی در مدهای اول و دوم سازه‌ها به عنوان شاخص شدت استفاده کردند.

مطالعات دیگر نشان داده‌اند که استفاده از میانگین هندسی شتاب‌های طیفی در بازه‌های مختلف دوره‌های تناوب از کم تا زیاد، در مقایسه با مد اول، می‌تواند کارایی و کفایت IM را بهبود بخشد. این افزایش کارایی برای سازه‌های با رفتار غیرخطی بالا، محسوس‌تر بوده است [11-12]. الناس [13] آثار برخی از IMهای اسکالر، مانند  $Sa(T_1)$ ،  $I_a$  انرژی لرزه‌ای ورودی، معیار شدت هاوسنر  $(SI_H)$ ، و بیشینه سرعت زمین  $(PGV)$  را بر سازه‌های بتنی مسلح در نظر گرفت. در این مطالعه از ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن برای توصیف همبستگی بین پارامتر لرزه‌ای و پاسخ سازه استفاده شد. بیکر و کرنل [14] تحقیقات جامعی در مورد استفاده از IMها در پیش‌بینی فروپاشی سازه ارائه کردند. برادلی [15] نشان داده که برخی از IMها، مانند شدت طیف سرعت  $(VSI^2)$  و CAV، پیش‌بینی‌کننده‌های خوبی برای پاسخ سازه‌های دارای پی شمعی در خاک‌های روانگرا هستند. جلاپر و همکاران [5] و ابراهیمیان و همکاران [16] کفایت IMهای مختلف را نسبت به  $Sa(T_1)$  برای نمایش عدم قطعیت حرکت زمین مطالعه کرده و چندین شاخص شدت کارایی بهتری نسبت به  $Sa(T_1)$  از خود نشان دادند. همبستگی بین  $I_a$  و معیارهای شدت تجمعی توسط برادلی [17] بررسی شده است. آدام و همکاران [12] یک IM مبتنی بر شتاب برای ارزیابی فروپاشی لرزه‌ای سازه‌ها ارائه کردند. گوا و همکاران در مطالعه خود برتری شاخص‌های شدت PGV و VSI را برای سازه‌های زیرزمینی نشان دادند که این برتری برای خاک‌های مختلف متفاوت بوده است [18].

برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در محتوای اطلاعاتی متغیرهای تصادفی است. هنگامی که آنتروپی یک متغیر تصادفی بزرگ می‌باشد، به این معنی است که عدم قطعیت در مقدار آن متغیر تصادفی بزرگ است و بالعکس [27]. در این مطالعه از رویکرد آنتروپی نسبی در تعیین شاخص شدت مناسب زلزله برای سطح خسارت متوسط که کاربرد بسیاری در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها دارد، استفاده شده است. شاخص‌های شدت مناسب‌تر، اطلاعات بیشتری در مورد عدم قطعیت حرکت زمین به دست می‌دهند [5]. آنتروپی شانون برای یک متغیر تصادفی گسسته  $X$  با توزیع  $p(x)$  به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود [26-27]:

$$h(X) = \sum_{x \in X} p(x_i) \log \frac{1}{p(x_i)} \quad (2)$$

آنتروپی یک متغیر تصادفی، نشان‌دهنده مقدار اطلاعاتی است که برای توصیف مقدار یک متغیر تصادفی مورد نیاز می‌باشد. آنتروپی نسبی، معیاری برای سنجش فاصله بین دو توزیع است. اطلاعات متقابل  $I(X;Y)$  از دو متغیر تصادفی  $X$  و  $Y$ ، آنتروپی نسبی بین تابع توزیع احتمال مشترک  $p(x,y)$  و توزیع  $p(x)p(y)$  را نمایش می‌دهد.  $I(X;Y)$  نشان‌دهنده کاهش عدم قطعیت  $X$  به دلیل دانستن  $Y$  است و به شرح رابطه (۳) محاسبه می‌شود [4, 21, 22]:

$$I(X;Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x,y) \log_2 \frac{p(x,y)}{p(x)p(y)} = (3)$$

$$\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x,y) \log_2 \frac{p(x,y)}{p(x)} = h_b(X) - h_b(X|Y)$$

این روش که می‌تواند اطلاعات کاملی برای نشان دادن عدم قطعیت مرتبط با یک متغیر تصادفی را در نظر بگیرد، برای نمایش عدم قطعیت حرکت زمین و انتخاب شاخص شدت مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲-۲- مدل تقاضای لرزه‌ای

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها به شدت به انتخاب IM بستگی دارد. شاخص شدت مناسب قادر است آن دسته ویژگی‌هایی از حرکت زمین را که در تحلیل سازه مهم هستند، کمی‌سازی کند [28]. تعیین شاخص شدت و شاخص خسارت مناسب کارآمد برای یک مدل تقاضا کار آسانی نیست.

مورد بررسی قرار گرفته و پاسخ سازه، تغییر مکان نسبی طبقات انتخاب شده است.

هدف از این تحقیق، تخمین مدل تقاضای لرزه‌ای برای سطح خسارت متوسط (با توجه به کاربرد بسیار در تحلیل و ارزیابی سازه‌های مختلف) با IMهای مناسب و تحت حرکات پالس‌دار زمین است. بدین منظور از مفاهیم آنتروپی نسبی که ابزاری قدرتمند در توصیف اطلاعات کامل برای نشان دادن عدم قطعیت ناشی از متغیرهای تصادفی است، استفاده می‌شود [24]. با توجه به اینکه حرکات پالس‌دار زمین در نزدیکی گسل می‌توانند تقاضای زیادی به ویژه بر سازه‌های انعطاف‌پذیر اعمال کرده و خطر فروپاشی ناشی از زلزله را افزایش دهند، پس مطالعات روی این رکوردها انجام شده است [25]. برای تخمین بهترین مدل تقاضا در سطوح خسارت کم و متوسط، مدل‌های تقاضای چندخطی مختلفی با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی شده و بهترین مدل چندخطی انتخاب شده است.

## ۲- روش تحقیق

در این مقاله از معیار کفایت نسبی مبتنی بر مفهوم آنتروپی نسبی برای سنجش میزان مناسب بودن IMهای مختلف استفاده شده است. با توجه به کاربرد گسترده شتاب طیفی مود اول، از این شاخص به عنوان شاخص مبنا استفاده شده است. انتخاب مناسب شاخص شدت زلزله و شاخص خسارت سازه و تعیین رابطه بین آنها برای داشتن یک مدل تقاضای لرزه‌ای قدرتمند، امری حیاتی است. بر اساس مطالعات گسترده قبلی، یک مدل نمایی برای نشان دادن این رابطه در نظر گرفته شده است. در ادامه، جزئیات روش تحقیق و مدل تقاضای لرزه‌ای تشریح شده است.

## ۲-۱- تئوری اطلاعات و روش آنتروپی نسبی

در سال‌های اخیر یک روند روبه رشدی در استفاده از اصول تئوری اطلاعات برای بررسی و رسیدگی به مسائل پیچیده مهندسی سازه وجود دارد. تئوری اطلاعات یک ابزار ریاضی است که نشان می‌دهد چگونه عدم قطعیت باید کمی‌سازی، دست‌کاری و نمایش داده شود [26]. آنتروپی شانون معیاری

### ۳- ارزیابی مدل‌های تقاضا و کفایت شاخص های شدت

مفاهیم آنتروپی را می‌توان برای تعیین مقدار اطلاعات به دست آمده از  $DI_{PA}$  با  $IM$ ‌های مختلف بکار برده و برتری نسبی  $IM$ ‌ها را با محاسبه تفاوت بین آنتروپی‌های آنها برآورد کرد. از آنجایی که  $Sa(T_1)$  در بسیاری از کارهای قبلی به عنوان یک  $IM$  مناسب ارائه شده است، پس در این مطالعه به عنوان  $IM$  مرجع استفاده شده و برتری  $IM$ ‌های مختلف نسبت به  $Sa(T_1)$  اندازه‌گیری می‌شود.  $IM$ ‌های مختلفی در دسته بندی‌های شتاب، سرعت، تغییر مکان، طیفی، انتگرال و چند پارامتری مورد توجه قرار گرفته و شاخص‌هایی که در مطالعات قبلی عملکرد مناسبی نداشتند حذف شدند. شاخص‌های شدت مورد بررسی در این مطالعه، در بخش دیگر مقاله معرفی شده‌اند.

اگر  $I(DI_{PA}|IM^*|Sa(T_1))$  نشان‌دهنده مقدار اطلاعات اضافی باشد که در مورد پارامتر نامعین پاسخ سازه  $DI_{PA}$  با دانستن  $IM^*$  به جای  $Sa(T_1)$  به دست می‌آید، آنگاه خواهیم داشت [5]:

$$I(DI_{PA}|IM^*|Sa(T_1)) = (V) \int \log_2 \frac{P[DI_{PA}(\ddot{x}_g)|IM^*(\ddot{x}_g)]}{P[DI_{PA}(\ddot{x}_g)|Sa(T_1)(\ddot{x}_g)]} \cdot P(\ddot{x}_g) \cdot d\ddot{x}_g$$

که در آن  $\ddot{x}_g$  تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین و  $p(\ddot{x}_g)$  تابع چگالی احتمال نظیر آن است. با فرض توزیع لگ‌نرمال برای مدل تقاضا و کمی ساده‌سازی، می‌توان معیار کفایت نسبی  $I(DI_{PA}|IM^*|Sa(T_1))$  را به صورت رابطه (۸) بیان کرد:

$$I(DI_{PA}|IM^*|Sa(T_1)) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_2 \left[ \frac{\sigma_{\ln(DI_{PA})|Sa(T_1)}}{\sigma_{\ln(DI_{PA})|IM^*}} \cdot e^{-0.5 \left[ \frac{\ln(DI_{PA})_i - \ln(\mu_{DI_{PA}}|IM^*)_i}{\sigma_{\ln(DI_{PA})|IM^*}} \right]^2} - \left( \frac{\ln(DI_{PA})_i - \ln(\mu_{DI_{PA}}|Sa(T_1))_i}{\sigma_{\ln(DI_{PA})|Sa(T_1)}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

در رابطه ۸،  $(DI_{PA})_i$  مقدار  $DI_{PA}$  به ازای  $i$  امین داده است که از طریق تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای مجموعه‌ای از رکوردهای مختلف محاسبه می‌شود.  $n$  تعداد کل داده‌های خرابی است که می‌توان با ضرب تعداد

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، معیار خرابی (DM)، پارامتر مهم دیگری است که بر مدل تقاضا تأثیر می‌گذارد. امروزه، شاخص‌های خرابی (DIs) به‌عنوان یک ابزاری قدرتمند برای ارزیابی کمی خرابی سازه‌های در معرض زلزله به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [24]. در بسیاری از مطالعات گذشته، مقایسه‌ای از میزان اثربخشی  $DI$ ‌های مختلف مشاهده شده و شاخص خرابی پارک-انگ ( $DI_{PA}$ ) که شکل‌پذیری و انرژی هیسترتیک جمعیتی را ترکیب می‌کند، به عنوان  $DI$  مناسب و کارا توصیه شده است [29]. به طور کلی برای مدل تقاضای لرزه‌ای از یک مدل خطی در فضای لگاریتمی به شرح رابطه (۴) استفاده می‌شود:

$$\ln(DM) = \theta_0 + \theta_1 \ln IM \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $DM$  معیار مناسب در ارزیابی میزان خرابی سازه‌ها و  $\theta = (\theta_0, \theta_1)$  پارامترهای نامعلومی هستند که باید تخمین زده شوند. مشخصات مدل‌های تقاضای لرزه‌ای برای شاخص‌های شدت اسکالر و برداری (با دو پارامتر لرزه‌ای) به شرح روابط (۵) و (۶) است:

$$\ln \mu_{DI_{PA}|IM} = \ln DI_{PA} = \theta_0 + \theta_1 \ln IM \quad (5)$$

$$\sigma_{\ln(DI_{PA})|IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\ln DI_{PA})_i - \theta_0 - \theta_1 (\ln IM)_i]^2}{n-2}} \quad (6)$$

در روابط فوق  $\mu_{DI_{PA}|IM}$  و  $\sigma_{\ln(DI_{PA})|IM}$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار مدل تقاضا هستند. همچنین  $\ln(DI_{PA})_i$  و  $\ln(IM)_i$  به ترتیب مقادیر  $DI_{PA}$  و  $IM$  مربوط به داده  $i$ ام را در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهند. پارامترهای آماری مدل‌های تقاضای لرزه‌ای بر اساس داده‌های به دست آمده از ۴۰ رکورد پالس‌دار زلزله که از پایگاه داده NGA-West 2 انتخاب شده و شناسایی آنها بر مبنای الگوریتم شاهی و بیکر بوده، تعیین می‌شوند [30] با توجه به عنوان تحقیق و نیاز به وجود خسارت‌های مختلف سازه‌ای برای ارزیابی، از رکوردها با شدت و دوره غالب مختلفی استفاده می‌شود که البته از نظر نوع خاک ثبت شده با سازه هماهنگی قابل قبولی داشته باشند.

شود. انتظار می‌رود که مدل‌ها در مواجهه با تقاضای بالا رفتار قابل قبولی داشته باشند [35]. برای طراحی اولیه از نرم افزار Etabs و به منظور انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی از نرم‌افزار IDARC-2D [36] استفاده شد.

حرکت زمین نزدیک به گسل به عنوان حرکت زمین پالس‌دار نامیده می‌شود که به طور قابل توجهی با آنچه که دورتر از منبع لرزه‌ای مشاهده می‌شود، متفاوت است [37]. حرکات پالس‌دار نیازهای شدیدی را بر سازه‌ها تحمیل کرده و مشخص شده که در زلزله‌های قبلی خرابی‌های شدیدی ایجاد کرده‌اند [38-39]؛ بنابراین با توجه به رفتارهای متفاوت و مخرب رکوردهای پالس‌دار، برآورد نیازهای لرزه‌ای سازه و تخمین IM‌های مناسب برای این رکوردها اهمیت ویژه‌ای داشته و در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور، یک زیرمجموعه از پایگاه داده-NextGeneration Attenuation-West2 (NGA- West2) با سرعت موج‌برشی ۱۷۵-۳۷۵ متر بر ثانیه که شامل رکوردهای پالس‌دار هستند، در نظر گرفته شده است. الگوریتم طبقه‌بندی پیشنهاد شده توسط شاهی و بیکر برای طبقه‌بندی حرکات زمین در مجموعه داده‌ها (پالس‌دار و بدون پالس) در نظر گرفته شده است. بخش عمده‌ای از رکوردهای انتخاب شده مربوط به زلزله‌های Imperial Valley، Northridge، Loma Prieta، Chi-Chi و New Zealand بوده است. مشخصات رکوردهای پالس-دار انتخابی در جدول (۱) نشان داده شده است.

رکوردها در تعداد قاب سازه‌ای به دست آورد. اگر معیار کفایت نسبی مثبت باشد، به این معنی است که  $IM^*$ ، به طور متوسط، اطلاعات بیشتری نسبت به  $Sa(T_1)$  در مورد  $DI_{PA}$  ارائه می‌دهد و بنابراین  $IM^*$  از  $Sa(T_1)$  با کفایت‌تر است [5].

### ۳-۱- مدل‌های سازه‌ای و انتخاب رکورد

برای برآورد مدل تقاضای لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح (RC)، پنج سازه قاب خمشی با تعداد طبقات مختلف ۲، ۴، ۶، ۸، و ۱۰ طبقه و ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شده و پلان و جزئیات طراحی در شکل (۱) نشان داده شده است. این سازه‌ها بر اساس آیین‌نامه‌های ایران (مبحث ششم، مبحث نهم و استاندارد ۲۸۰۰) [31-33] طراحی شده‌اند. قاب A در پلان انتخاب شده و دوره تناوب اول قاب‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ طبقه به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۶۱، ۰/۵۲، ۰/۷۵ و ۰/۸۳ ثانیه بوده است. جزئیات قاب‌ها، مقاطع تیر و ستون و آرماتورها در شکل (۲) آورده شده است. عناصر ستون با نظر گرفتن مدل‌های ماکرو با تغییر شکل‌های خمشی غیر الاستیک و تغییر شکل‌های برشی و محوری الاستیک مدل شده‌اند. برای المان‌های تیرها، مدل سختی خمشی غیرخطی با تغییر شکل برشی الاستیک منظور شد. مدل کنت و پارک برای بتن محصور شده [34] به منظور منحنی تنش - کرنش بتن مورد استفاده قرار گرفت. برای هر سطح مقطع، رابطه گشتاور - انحنای به عنوان یک پوش سه خطی نامتقارن با سه پارامتر هیسترتیک کاهنده مشخص می‌

شکل ۱. پلان و جزئیات طراحی

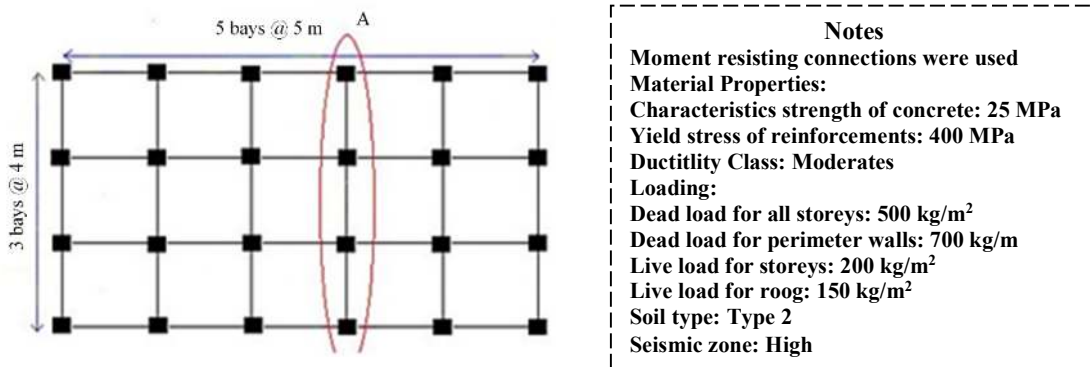
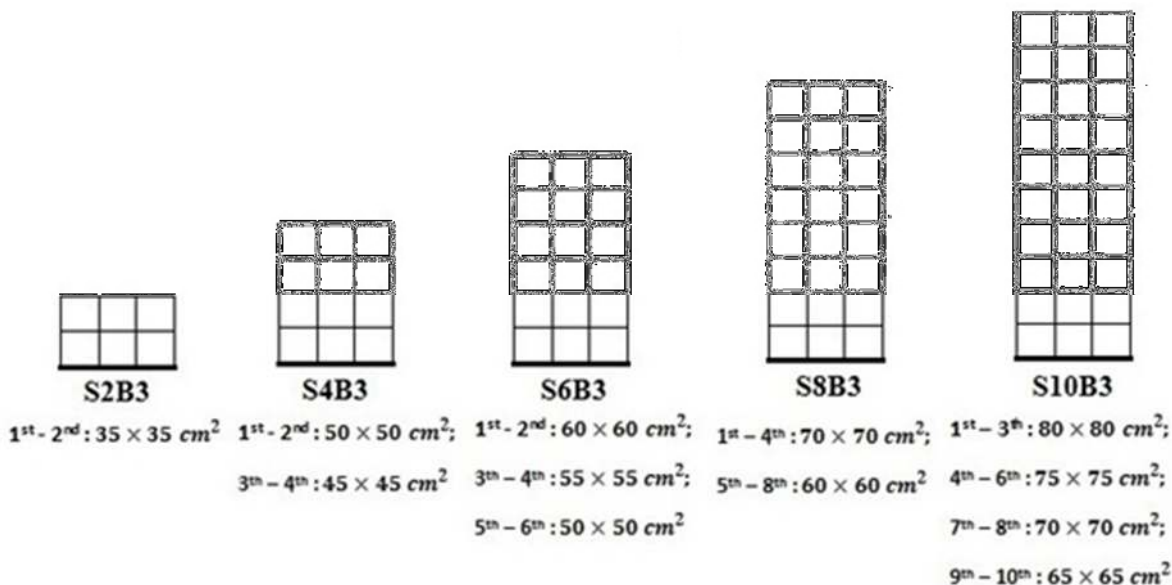


Fig. 1. Plan and design details

شکل ۲. مشخصات قاب های مدل



Column (cm × cm)	Longitudinal Bars (cm <sup>2</sup> )
35 × 35	36.19
45 × 45	60.82
50 × 50	76.53
55 × 55	88.72
60 × 60	96.51
65 × 65	132.83
70 × 70	145.27
75 × 75	167.51
80 × 80	226.82

Fig. 2. Specifications of model frames

جدول ۱. مجموعه‌ای از ۴۰ رکورد انتخابی پالس‌دار

NGA No.	Earthquake Name	Year	Station	Magnitude	Closest Distance (km)	Pulse index
159	Imperial Valley-06	1979	Agrarias	6.5	0.7	7.487
161	Imperial Valley-06	1979	Brawley Airport	6.5	10.4	1.458
170	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	6.5	7.3	12.743
171	Imperial Valley-06	1979	El Centro-MelolandGeot. Array	6.5	0.1	17.187
173	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #10	6.5	8.6	6.975
178	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #3	6.5	12.9	8.699
179	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	6.5	7	20.061
180	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	6.5	4	25.502
181	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	6.5	1.4	39.183
182	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	6.5	0.6	28.660
184	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array	6.5	5.1	7.445
185	Imperial Valley-06	1979	Holtville Post Office	6.5	7.5	15.247
147	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #2	5.7	9	1.878
149	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #4	5.7	5.7	1.137
316	Westmorland	1981	Parachute Test Site	5.9	16.7	5.917
723	Superstition Hills-02	1987	Parachute Test Site	6.5	0.9	31.443
803	Loma Prieta	1989	Saratoga - W Valley Coll.	6.9	9.3	6.987
900	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.3	23.6	8.048
982	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	6.7	5.4	16.401
1044	Northridge-01	1994	Newhall - Fire Sta	6.7	5.9	9.799
1045	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	6.7	5.5	25.142
1063	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	6.7	6.5	27.257
1084	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	6.7	5.3	8.941
1085	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	6.7	5.2	14.754
1106	Kobe, Japan	1995	KJMA	6.9	1	4.117
1114	Kobe, Japan	1995	Port Island (0 m)	6.9	3.3	11.472
1119	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	6.9	0.3	6.619
1120	Kobe, Japan	1995	Takatori	6.9	1.5	8.731
1244	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7.6	9.9	23.398
1481	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU038	7.6	25.4	7.497
1483	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU040	7.6	22.1	7.495
1491	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU051	7.6	7.6	5.878
1498	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU059	7.6	17.1	5.814
1503	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	7.6	0.6	8.485
4102	Parkfield-02, CA	2004	Parkfield - Cholame 3W	6	3.6	5.177
4107	Parkfield-02, CA	2004	Parkfield - Fault Zone 1	6	2.5	19.064
4113	Parkfield-02, CA	2004	Parkfield - Fault Zone 9	6	2.9	1.169
4115	Parkfield-02, CA	2004	Parkfield - Fault Zone 12	6	2.6	8.708
6942	Darfield, New Zealand	2010	NNBS	7	26.8	3.727
6966	Darfield, New Zealand	2010	SHLC	7	22.3	4.377

Table 1. A set of 40 selected pulse-liked records

## ۳-۲- انتخاب مناسب‌ترین مدل تقاضا

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها به میزان زیادی به انتخاب شاخص شدت لرزه‌ای بستگی دارد. در این مطالعه، مناسب بودن IM‌های مختلف با استفاده از معیار کفایت نسبی، نسبت به شاخص  $Sa(T_1)$  مقایسه شده‌اند. جدول

(۲). IM‌های اسکالر مختلف در نظر گرفته شده در این مطالعه را تشریح می‌کند.



جدول ۲. جزئیات شاخص‌های شدت اسکالر در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر

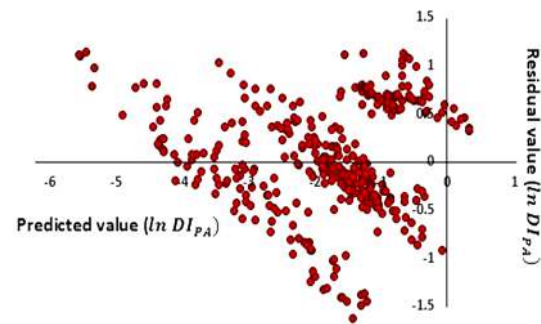
No	IMs	Description the IM	Definition	Notes
1	PGA	peak ground acceleration	$\max \ddot{x}(t) $	$\ddot{x}(t)$ = acceleration time history
2	PGV	peak ground velocity	$\max \dot{x}(t) $	$\dot{x}(t)$ = velocity time history
3	PGD	peak ground displacement	$\max x(t) $	$x(t)$ = Displacement time history
4	$V_{\max}/A_{\max}$	maximum velocity to maximum acceleration ratio	-	-
5	$S_a(T_1)$	spectral acceleration value at first mode	-	-
6	$S_a^*$	a geometric mean of the spectral acceleration values at $T_1$ and $T_2$	$[S_a(T_1) \cdot S_a(T_2)]^{0.5}$	-
7	$S_{a, gm}(0.2 T_1, 1.6 T_1)$	a geometric mean of $S_a$ 's at multiple periods ranging from $0.2 T_1$ to $1.6 T_1$	$[\prod_{i=1}^n S_a(T^{(i)})]^{1/n}$	$T^{(1)}=0.2T_1$ $T^{(n)} = 1.6T_1$ $n=5$
8	ARMS	root mean square of acceleration	$\sqrt{\frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \dot{x}^2 dt}$	$t_e$ = total duration of record
9	VRMS	root mean square of velocity	$\sqrt{\frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \dot{x}^2 dt}$	-
10	DRMS	root mean square of displacement	$\sqrt{\frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} x^2 dt}$	-
11	ARIAS( $I_a$ )	Arias intensity	$\frac{\pi}{2g} \int_0^{t_e} \dot{x}^2 dt$	-
12	ASI	acceleration spectrum intensity	$\int_{0.1}^{0.5} S_a(T, \xi) dT$	-
13	VSI	velocity spectrum intensity	$\int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT$	$S_v$ = the spectrum velocity curve
14	CAV	cumulative absolute velocity	$\int_0^{t_e}  \dot{x}  dt$	-
15	SED	specific energy density	$\frac{\beta_s \rho_s}{4} \int \dot{x}^2 dt$	$\beta_s$ = the wave velocity, $\rho_s$ = the mass density of the recording site
16	$I_c$	characteristic intensity	$ARMS^{1.5} t_p^{0.5}$	-
17	$SI_H$	Housner intensity	$\int_{0.1}^{2.5} P S_v(T, \xi) dT$	$P S_v$ = pseudo spectrum velocity
18	SMA	sustained maximum acceleration	-	$SMA$ = the third highest absolute peak in the acceleration time history
19	SMV	sustained maximum velocity	-	$SMV$ = the third highest absolute peak in the velocity time history
20	$A_{95}$	acceleration parameter	-	$A_{95}$ = the level of acceleration which contains up to 95% of the Arias intensity
21	$T_m$	mean period	$\frac{\sum (\frac{C_i^2}{f_i})}{\sum C_i^2}$	$C_i$ = Fourier amplitude for each frequency $f_i$ within the range 0.25–20 Hz
22	$T_p$	predominant period	-	The period(s) at which maximum spectral amplitudes are shown on response spectra

Table 2. Details of scalar IMs considered in this study

باقیمانده  $DI_{PA}$  را در برابر مقادیر پیش‌بینی شده آنها نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها به طور تصادفی توزیع نشده‌اند و  $SLM$  تناسب خوبی برای داده‌های پاسخ تحت حرکات پالس‌دار زمین فراهم نمی‌کند.

برای دستیابی به یک پیش‌بینی خوب از مدل تقاضای سازه ای برای سطوح خسارت مدنظر، کفایت مدل خطی منفرد ( $SLM$ ) توسط نمودارهای باقیمانده برای  $S_a(T_1)$  به عنوان یک  $IM$  مرجع، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۳) مقادیر

شکل ۳. مقادیر باقیمانده خرابی ( $DI_{PA}$ ) در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای مدل تک‌خطی



del using pulse-liked records.  
**Fig. 3.** Residual damage values ( $DI_{PA}$ ) against predicted damage values in single linear mo

#### ۴- اعتبارسنجی مدل‌ها

برای اعتبارسنجی از مدل قاب بتن آرمه ۴ طبقه با دهانه ۳ متر از مرجع [41] استفاده شد. بتن مورد استفاده دارای مقاومت فشاری ۳۰ مگا پاسکال و فولاد مصرفی دارای مقاومت تسلیم ۴۱۴ مگاپاسکال بوده است. بار گسترده یکنواخت ۲۰ کیلونیوتن بر متر به عنوان بار ثقلی روی تیرهای تمام طبقات اعمال شد. پای ستون‌ها به صورت گیردار مدل شده و از آثار شالوده صرف نظر شد. از مدل چرخه‌ای چندخطی برای مدل سازی المان تیر و ستون استفاده شد. تحلیل و طراحی اولیه توسط نرم‌افزار IDARC انجام شد. در تحلیل اولیه دوره تناوب مود اول و دوم برای قاب مورد نظر توسط نرم افزار IDARC به ترتیب برابر ۰٫۵۱ و ۰٫۱۷۸ بوده که با نتایج مرجع [41]، (۰٫۵ و ۰٫۱۷) همخوانی خوبی داشته است. پلان موردنظر برای اعتبارسنجی در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۵) منحنی نیرو-تغییر مکان برای مدل مذکور با منحنی نیرو-تغییر مکان در مرجع [41] که توسط نرم افزار opensees بدست آمد، مقایسه شده است. مطابق شکل (۵) هماهنگی قابل قبولی بین نتایج دو مطالعه مشاهده می‌شود.

شکل ۴. مدل مبنا جهت اعتبارسنجی [۴۱]

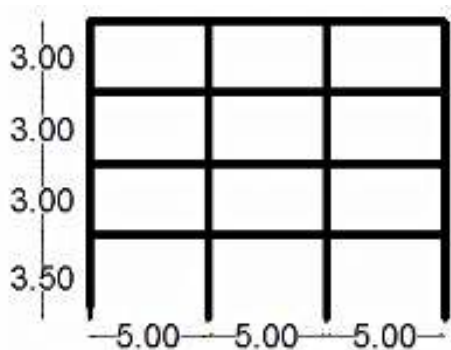


Fig4. Base model for validation

در ادامه با توجه به اینکه سازه‌ها رفتارهای متفاوتی در سطوح خرابی مختلف به‌ویژه تحت رکوردهای پالس‌دار دارند، مدل‌های چند خطی مختلفی مطابق با نارسایی‌های مدل خطی برای انتخاب مناسب‌ترین مدل تقاضا در نواحی با خسارت متوسط توسعه داده شده‌اند. زیرا احتمال عدم کفایت مدل خطی در خسارت متوسط وجود دارد. رابطه بین  $DI_{PA}$ ، سطوح خرابی و سطوح عملکرد مربوطه، در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. ارتباط بین شاخص پارک-انگ، سطوح خسارت و سطوح عملکردی [۴۰]

Damage index range	$DI_{PA} < 0.1$	$0.1 \leq DI_{PA} < 0.2$	$0.2 \leq DI_{PA} < 0.5$	$DI_{PA} > 0.5$
Damage state	Slight	Minor	Moderate	Sever
Performance level	Operational	Immediate occupancy	Life safety	Collapse prevention

**Table 3.** The relationship between Park–Ang damage ranges, damage states and performance levels

مدل‌های چندخطی مختلفی با توجه به مقادیر شاخص خسارت پارک-انگ (در مرزهای تغییر سطح خسارت)، بر اساس شاخص‌های آماری از جمله مجموع مربعات خطا (SSE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، انحراف استاندارد خطاها ( $\sigma$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و آزمون F ارزیابی شده و کفایت مدل‌های چندخطی برای محدوده خسارت متوسط بررسی می‌شود. منظور از خسارت‌های متوسط در این مطالعه، خسارت‌های بین ۰٫۱ تا ۰٫۵ از شاخص خسارت پارک-انگ ( $0.1 \leq$ )

تک خطی و جزئیات بیشتر در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به جدول (۴) کاهش قابل توجه مقادیر  $MSE_{TLM2}/MSE_{SLM}$ ،  $SSE_{TLM2}/SSE_{SLM}$  و  $\sigma^2/\sigma_1$  مقادیر بالای ضرایب  $R^2$  برای سطوح مختلف خرابی در TLM2 انتخابی بیانگر عملکرد قابل قبول این مدل تقاضا می‌باشد. آزمون F اغلب برای مقایسه مدل‌های آماری هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که به منظور بررسی قابلیت اطمینان مدل‌های تقاضا، به یک مجموعه داده برازش شده‌اند. در این آزمون، مقادیر F به عنوان نسبت MSR به MSE در مقایسه با مقدار بحرانی  $F_{\alpha}$  تعریف می‌شوند، که در آن  $\alpha$  سطح خطا را نشان می‌دهد و به صورت درصد بیان می‌شود. اگر نسبت  $F/F_{\alpha}$  بالا باشد، قابلیت اطمینان مدل، در سطح خطای  $\alpha$  درصد، بالا است و احتمال تصادفی بودن آن پایین است. اگر نسبت  $F/F_{\alpha}$  کمتر از  $1/0$  باشد، به این معنی است که مدل قابل اطمینان نیست. این نسبت برای TLM2 ( $DI_{PA} < 0.5$ )  $< 0.1$ ) نسبت به SLM و  $Sa(T_1)$  به عنوان IM،  $65\%$  است، که نشان دهنده اطمینان بیشتر در TLM2 است. نمودار باقیمانده‌ها برای مدل TLM2 با استفاده از داده‌های پالس‌دار و  $Sa(T_1)$  به عنوان IM، در شکل (۶) نشان داده شده است. در این مدل، باقیمانده‌ها در کلیه سطوح خرابی، کاملاً تصادفی بوده و در نتیجه کفایت مدل را نشان می‌دهند. پس در محدوده خسارت‌های کم و زیاد نیاز به چند خطی کردن مدل تقاضا نبوده و برای این ناحیه می‌توان ارتباط خطی (در مقیاس لگاریتمی) بین شاخص‌های شدت و خسارت در نظر گرفت.

جدول ۴. مقایسه مدل سه خطی انتخابی و مدل تک خطی با کمک آزمون‌های آماری

Model No.	Description of model	Damage level	$SSE_{TLM2}/SSE_{SLM}$	$MSE_{TLM2}/MSE_{SLM}$	$R^2_{TLM2}/R^2_{SLM}$	$\sigma_{TLM2}/\sigma_{SLM}$	$(\frac{F}{F_{\alpha}})_{TLM2} / (\frac{F}{F_{\alpha}})_{SLM}$
SLM	Single linear	-	-	-	-	-	-
TLM 2	Trilinear	$DI_{PA} < 0.1$	8%	8.24%	87%	5.47%	1010%
		$0.1 \leq DI_{PA} < 0.5$	2.8%	17%	75%	7.40%	650%
		$DI_{PA} \geq 0.5$	1.1%	5.6%	108%	27.1%	77%

Table 4. Comparison of selected three-liner model and single-liner model using statistical indicators

شکل ۵. مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان برای مدل مرجع و مدل شبیه سازی شده

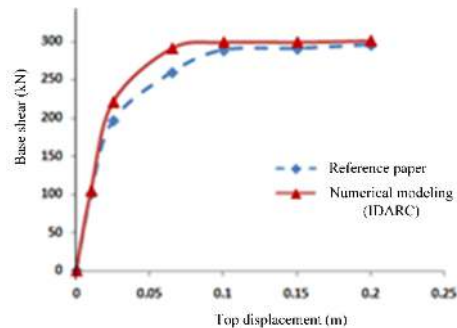


Fig. 5. Comparison of force-displacement curve for reference model and simulated model

## ۵- بحث و تحلیل نتایج

برای تخمین مدل تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی برای یک مجموعه حرکت پالس‌دار زمین انجام شده و برای سازه‌های RC مختلف محاسبه شد. به منظور انتخاب بهترین مدل تقاضا برای سطح خرابی متوسط که بیشترین کاربرد را در ارزیابی‌های لرزه‌ای دارد، کفایت مدل تک خطی توسط نمودار باقیمانده برای  $Sa(T_1)$  مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد و مطابق شکل (۳)، مدل تک خطی عملکرد مناسبی نداشته و بنابراین، برای به دست آوردن یک پیش‌بینی بهتر از مدل تقاضا در محدوده خسارت‌های ذکر شده، چندین مدل چند خطی (دوخطی و سه خطی) با توجه به  $DI_{PA}$  برای سطوح مختلف عملکرد بررسی شده و مدل سه خطی TLM(2) با توجه به آزمون‌های آماری به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. نتایج آزمون‌های آماری برای این مدل نسبت به مدل

شکل ۶. مقادیر باقیمانده خرابی ( $DI_{PA}$ ) در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای مدل TLM و شاخص شدت  $Sa(T_1)$

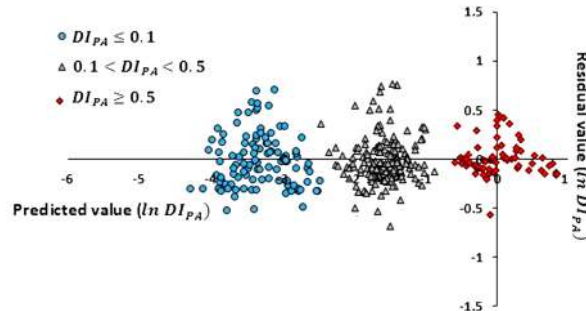


Fig. 6. Residual damage values ( $DI_{PA}$ ) against predicted damage values in TLM model and Intensity measure  $Sa(T_1)$

به منظور اطمینان بیشتر از درستی نتایج، در شکل (۷)، نمودارهای باقیمانده مدل‌های SLM و TLM2 برای شاخص شدت VSI به عنوان نمونه‌ای دیگر از IM نشان داده شده که بیانگر آن است که تغییرات کلی باقیمانده‌ها مستقل از IM انتخاب شده است. در ادامه کفایت نسبی IMهای مختلف نسبت به  $Sa(T_1)$  با استفاده از مفاهیم آنتروپی نسبی بررسی شده است. شکل (۸) نشان می‌دهد که در سطح خرابی متوسط که مربوط به سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه و ایمنی جانی است، تعداد زیادی از IMهای ذکر شده در جدول (۲)، مناسب‌تر از  $Sa(T_1)$  هستند. شاخص‌های شدت  $Sa(T_1)$ ، Housner ( $SI_H$ )، برای این محدوده خرابی هستند. بر اساس میزان اطلاعات اضافی به دست آمده از IMهای مختلف،  $SI_H$  و PGV به عنوان بهترین شاخص‌های شدت به جای  $Sa(T_1)$  توصیه می‌شود. در سطح خرابی متوسط، پارامترهای مبتنی بر سرعت، بیشتر تحت تأثیر رکوردهای پالس‌دار قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، سازه‌های با دوره تناوب متوسط که با ناحیه سرعت - ثابت طیف پاسخ هماهنگی دارند، بیشتر تحت تأثیر IMهای مبتنی بر سرعت قرار می‌گیرند که می‌تواند از دلایل مناسب‌تر بودن شاخص‌های شدت بر پایه سرعت در این محدوده خسارت باشد.

شکل ۷. نمودارهای باقیمانده مدل‌های SLM و TLM برای شاخص شدت VSI

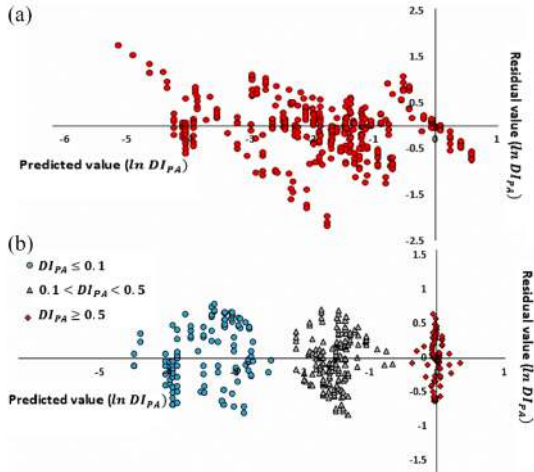


Fig. 7. Residual diagrams of SLM and TLM models for intensity measure of VSI

مناسب‌ترین مدل تقاضا در این سطح خرابی تحت رکوردهای پالس‌دار در شکل (۹) نشان داده شده است.

شکل ۸. مقادیر آنتروپی نسبی شاخص‌های شدت مختلف نسبت به  $Sa(T_1)$

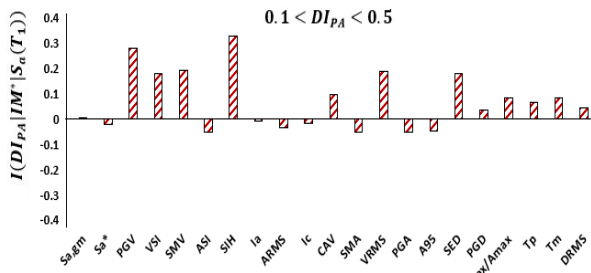


Fig. 8. The relative entropy values of different intensity measures relative to  $Sa(T_1)$

شکل ۹. مناسب‌ترین مدل تقاضا برای سطح خطر متوسط و پالس‌دار و برای IM اسکالر

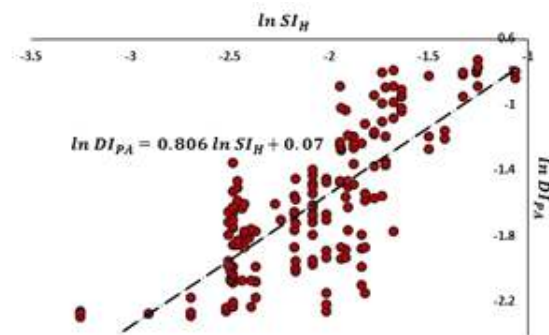


Fig. 9. The most appropriate demand model for moderate damage level and pulse-like records for scalar Intensity measure

شکل ۱۰. مقایسه میزان آنتروپی نسبی شاخص‌های شدت مختلف به‌ازای قاب‌های دو و ده طبقه

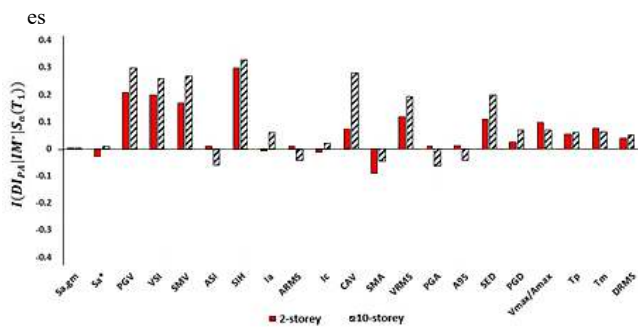


Fig. 10. Comparison of relative entropy of different intensity measures for two- and ten-story frame

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل تقاضای لرزه‌ای با IM‌های مناسب برای سازه‌های قاب خمشی بتنی با دوره تناوب متوسط تحت حرکات پالس‌دار زمین برآورد شده است. معیار  $Sa(T_1)$  به‌عنوان یک IM مرجع انتخاب شده و کیفیت نسبی مجموعه‌ای از IM‌های اسکالر مختلف نسبت به  $Sa(T_1)$  با استفاده از آنتروپی نسبی برای رکوردهای زلزله پالس‌دار ارزیابی شده است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که یک خطی قابل قبول از IM مناسب در ارتباط با  $DIP_A$  در مدل تقاضا، به سطح خرابی سازه بستگی داشته و استفاده از یک شاخص شدت برای تمام سطوح خسارت در بسیاری از مواقع مناسب به نظر نمی‌رسد. در سطح خرابی متوسط، شاخص‌های مبتنی بر سرعت، مناسب‌ترین IM تحت رکوردهای پالس‌دار هستند و استفاده از شاخص‌هایی مانند  $Sa(T_1)$  یا PGA که کاربرد زیادی دارند، می‌تواند خطای زیادی در ارزیابی‌های لرزه‌ای ایجاد کند. پارامترهای بر مبنای سرعت بیش از همه تحت تاثیر پالس سرعت قرار می‌گیرند. از طرفی سازه‌های با دوره تناوب متوسط که متناظر با ناحیه سرعت ثابت طیف پاسخ هستند، بیشتر تحت تاثیر شاخص‌های بر مبنای سرعت قرار می‌گیرند. در این ناحیه از خسارت، اغلب شاخص‌های شدت بر مبنای شتاب عملکرد مناسبی نداشتند. از طرفی پالس‌دار بودن رکوردها نیز بر کاهش کیفیت پارامترهای لرزه‌ای بر مبنای شتاب افزود.

یافته‌های فوق بر اساس ادغام تمامی نتایج محاسبه شده از قاب‌های سازه‌های مختلف به دست آمده است. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که رتبه‌بندی IM‌ها بر اساس برتری، برای قاب‌های دو طبقه و ده طبقه یکسان است، اگرچه مقدار اطلاعات به دست آمده از آنها متفاوت است. به عبارتی با توجه به سازه‌های انتخاب شده در این مطالعه، نتایج خیلی وابسته به ارتفاع سازه نبوده است.

نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مدل تک خطی برای مدل تقاضای لرزه‌ای کافی نبوده و بنابراین مدل سه خطی به عنوان مدل مناسب با توجه به سطوح خسارت توصیه می‌شود. مدل‌های تقاضای چند خطی را می‌توان به دو روش مختلف مورد استفاده قرار داد. در روش اول یک IM منحصر به فرد در مدل تقاضا انتخاب می‌شود، اما از شیب‌های مختلف در سطوح خرابی‌های مختلف در مدل تقاضا استفاده می‌شود. در این حالت، از آنجایی که پارامترهای مدل تقاضا در مناطق مختلف خرابی تغییر می‌کنند، معمولاً یک جهش در منحنی شکنندگی مشاهده می‌شود. از آنجایی که تخمین شکنندگی پیوسته برای کاربردهای عملی ترجیح داده می‌شود، می‌توان یک تابع لگ‌نرمال را برای به دست آوردن تخمین شکنندگی پیوسته در کل محدوده IM انتخاب کرد. روش دیگر مدل تقاضای چند خطی استفاده از IM‌های مختلف برای سطوح خرابی‌های مختلف است. با اعمال IM‌های مختلف در مدل تقاضای لرزه‌ای با توجه به سطوح خرابی، خط کاهش می‌یابد و عدم قطعیت مناسب برای اهداف طراحی به دست می‌آید [10، 11، 18، 35]. اگر بخواهیم از مدل تقاضای تک خطی استفاده کنیم، بهتر است IM‌ای را انتخاب کنیم که تا حدودی برای تمام سطح خرابی مناسب باشد، اما لزوماً بهترین IM برای آن سطوح نیست. در این مطالعه، با مطالعات انجام شده استفاده از مدل تک خطی برای خسارت‌های ۰/۱ تا ۰/۵ از شاخص پارک و انگ مناسب بوده و در این ناحیه از مدل تک خطی استفاده شده است.

- [9] Cabanas L, Benito B and Herraiz M. An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1997; 26(1): 79–92.
- [10] Cordova P, Deierlein G, Mehanny S and Cornell CA. Development of a two parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. *Proceedings of the Second U.S.-Japan workshop on performance-based earthquake engineering for reinforced concrete building structures*, Sapporo, Japan, 187-206, 2000.
- [11] Kohrangi M, Bazzurro P, Vamvatsikos D. Vector and Scalar IMs in Structural Response Estimation, Part I: Hazard Analysis. *Earthquake Spectra* 2016; 32(3): 1507-1524.
- [12] Adam C, Kampenhuber D, Ibarra LF and Tsantaki S. Optimal Spectral Acceleration-based Intensity Measure for Seismic Collapse Assessment of P-Delta Vulnerable Frame Structures. *Journal of Earthquake Engineering* 2017; 21(7): 1-7.
- [13] Elenas A. Correlation between seismic acceleration parameters and overall structural damage indices of buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2000; 20: 93-100.
- [14] Baker JW and Cornell CA. Vector-valued intensity measures incorporating spectral shape for prediction of structural response. *Journal of Earthquake Engineering* 2008; 12(4): 534–554.
- [15] Bradley BA. The seismic demand hazard and importance of the conditioning intensity measure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2012; 41(11): 1417–1437.
- [16] Ebrahimian H, Jalayer F, Lucchini A, Mollaioli F and Manfredi G. Preliminary ranking of alternative scalar and vector intensity measures of ground shaking. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2015; 13(10): 2805-2840.
- [17] Bradley BA. Correlation of Arias intensity with amplitude, duration and cumulative intensity measures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2105; 78: 89–98.
- [18] Guo J, Alam A, Wang J and Yuan W. Optimum intensity measures for probabilistic seismic demand model of subway stations with different burial depths. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020; 131.
- [19] Amirsardari A, Rajeev P, Lumantarna E and Goldsworthy H.M. Suitable intensity measure for probabilistic seismic risk assessment of non-ductile Australian reinforced concrete

لازم به ذکر است که نتایج به دست برای قاب‌های RC منظم با دوره متوسط به دست آمده و برای قاب‌های نامنظم، به ویژه قاب‌های RC با دوره تناوب بالا احتمال بروز رفتار متفاوت وجود داشته و باید ملاحظات بیشتری در نظر گرفته شود.

## ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان از داوران محترم که نظرات ارزنده آنها باعث بهبود مقاله شده است، کمال تشکر را دارند.

## مراجع

- [1] Baker JW and Cornell CA. Uncertainty specification and propagation for loss estimation using FOSM methods. PEER Technical Report, Berkeley, California, 2003.
- [2] Luco N and Cornell CA. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions. *Earthquake Spectra* 2007; 23(2): 357–392.
- [3] Luco N. Probabilistic seismic demand analysis, SMRF connection fractures and near source effect, Ph.D. Thesis, Department of civil and environmental engineering, Stanford university, 2002.
- [4] Yazdani A, Nicknam A, Yousefi Dadras E and Eftekhari SN. Entropy-based sensitivity analysis of global seismic demand of concrete structures. *Engineering Structures* 2017; 146: 118-126.
- [5] Jalayer F, Beck JL and Zareian F. Analyzing the sufficiency of alternative scalar and vector intensity measures of ground shaking based on information theory. *Journal of Engineering Mechanics* 2012; 138(3), 307–316.
- [6] Shome N, Cornell CA, Bazzurro P and Carballo JE. Earthquakes, Records and Nonlinear Responses. *Earthquake Spectra* 1998; 14(3): 469 – 500.
- [7] Gardoni P, Mosalam KH-M and Kiureghian A-D. Probabilistic seismic demand models and fragility estimates for R.C. bridges. *Journal of Earthquake Engineering* 2003; 7(1): 79-106.
- [8] Jalayer F. Direct probabilistic seismic analysis: Implementing nonlinear dynamic assessments. Ph.D Thesis, Department of civil and environmental engineering, Stanford University, 2003.

- [31] Iranian National Building Codes, Part 6- Design Loads for Buildings, Building and Housing Research Center, Iran, 2013 (In Persian).
- [32] Iranian National Building Codes, Part 9- design and construction of R.C. buildings, Building and Housing Research Center, Iran, 2013 (In Persian).
- [33] Standard No. 2800-5, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, 4rd Revision, Building and Housing Research Center, Iran, 2014 (In Persian).
- [34] Kent DC and Park R. Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division ASCE* 1971; 97(7): 1969-1990.
- [35] Ibarra LF, Medina RA and Krawinkler H. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2005; 34: 1489-1511.
- [36] Reinhorn AM, Roh H, Sivaselvan M, Kunnath SK, Valles RE, Madan A, Li C, Lobo R, and Spillatura A. IDARC2D Version 7.0: A program for the inelastic damage analysis of structures. Technical Report Mceer-09-0006, University at Buffalo, 2009.
- [37] Abdollahzadeh M and Gerami M. Demand and capacity of steel moment frame structures in near field area. *Tarbiatmodares journal* 2014; 14(4): 115-125 [in persian].
- [38] Siahpolo N, Gerami M and Vahdani R. The effect of near field and far field earthquakes on the reduction coefficient of resistance and inelastic to elastic deformation ratio with ductility demand approach. *Tarbiatmodares journal* 2018; 17(1): 115-127 [in persian].
- [39] Yazdani A, Nicknam A, Eftekhari SN and YousefiDadrasE. Sensitivity of near-fault PSHA results to Input Variables Based on Information Theory. *Bulletin of the Seismological Society of American* 2016; 106: 1858-1866.
- [40] Komeili M, Milani A and Tesfamariam S. Performance-based earthquake engineering design of reinforced concrete structures using black-box optimization, *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2012; 6(1): 1:25
- [41] Pinho B.F. R., Savoia M, Francia R. Verification of displacement-based adaptive pushover through multi-ground motion incremental dynamic analyses. *Engineering Structures*, 2009; 31(8), 1789-1799.
- buildings *Bulletin of Earthquake Engineering*; 2019; 17:3753-3775 .
- [20] Armstrong R, Kishida T and Park D.S. Efficiency of ground motion intensity measures with earthquake-induced earth dam deformations. *Earthquake Spectra*, 2021); 37 (1): 5-25.
- [21] Liu T.T, Lu D.G, Yu X.H. Development of a compound intensity measure using partial least-squares regression and its statistical evaluation based on probabilistic seismic demand analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019; 125, 105725
- [22] Kohrangi M, Bazzurro P, Vamvatsikos D and Spillatura A. Conditional Spectrum based ground motion record selection using average spectral acceleration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2017; 46(10): 1667-1685.
- [23] Cover TM and Thomas JA. *Elements of information theory*. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [24] Alavi B and Krawinkler H. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2004; 33(6): 687-706.
- loading with information entropy-based analysis. *Engineering Structures* 2018; 165: 359-367.
- [25] Harte H and Vere-Jones D. The entropy score and its uses in earthquake forecasting. *pure and applied geophysics* 2005; 162(6): 1229-1253.
- [26] Marsh C. *Introduction to continuous entropy*. Department of Computer Science, Princeton University, 2013.
- [27] Kostinakis KG, Fontaral-Kandathanatopoulou AM. Scalar structure-specific ground motion intensity measures for assessing the seismic performance of structures: A review. *Journal of Earthquake Engineering* 2018; 22(4): 630-665.
- [28] Jeong S-H and Elnashai AS. New three-dimensional damage index for RC buildings with planar irregularities. *Journal of Structural Engineering* 2006; 132(9): 1482-1490.
- [29] Park YJ, Reinhorn A and Kunnath SK. Inelastic damage analysis of reinforced concrete wall frame structures. Report NCEER-87-0008, NCEER/SUNY/ Buffalo, 1998.
- [30] Shahi SK and Baker JW. An Efficient Algorithm to Identify Strong-Velocity Pulses in Multicomponent Ground Motions. *Bull Seismol Soc Am* 2014; 104: 2456-2466.

## Estimation of the seismic demand model in moderate damage level for pulse-like records

Kamran Nobakht Vakili<sup>1\*</sup>, Kowsar Yazdannejad<sup>2</sup>, Azad Yazdani<sup>3</sup>

1. Instructor, Civil Engineering Group, University of Kurdistan
2. Postdoctoral researcher, Civil Engineering Group, University of Kurdistan
3. Professor, Civil Engineering Group, University of Kurdistan

### Abstract

The estimation of seismic demand that connects the ground motion intensity measure and the damage measure of structures is one of the most important components in the performance-based design. In the seismic demand model, the relationship between the structural response and a seismic parameter that expresses the random nature of earthquake is expressed in the mathematical form. Therefore, proper choice of earthquake intensity measure as a seismic parameter and identifying how it is related to structural damage can play an important role in reducing errors in seismic assessments. The random nature of earthquake ground motion with great uncertainties in structural properties has posed challenges before this estimation. In many studies, the first mode spectral acceleration ( $S_a(t_1)$ ) or maximum ground acceleration (PGA) has been introduced as an appropriate intensity measure. However, some recent studies indicate that these IMs are insufficient in some circumstances. On the other hand, choosing a suitable method for measuring the sufficiency of intensity measure is of particular importance due to the existing uncertainties. In this study, the suitability of different intensity measures of ground motion is quantified by using information theory and relative entropy concepts in the representation of ground motion uncertainty. Due to the high application of the first mode spectral acceleration, this intensity measure has been introduced as the base index and the sufficiency of other intensity measures compared to this index. A set of intensity measures based on velocity, acceleration, displacement and combination have been selected based on previous studies for this purpose.

The relative entropy of an intensity measure relative to the base intensity measure indicates the amount of additional information can be obtained from ground motion uncertainty. Therefore, intensity measures with positive relative entropy have better performance than the first mode spectral acceleration intensity measure. The Park-Ang damage index, which has many applications, especially in concrete structures, has been used for structural response. Given that there is a possibility of different behavior of intensity measures at different damage levels, the discussion of multilinear demand models is proposed and the performance of several multilinear models has been evaluated by statistical tests. Due to the wide application of moderate performance level in seismic design and evaluation, the operation of different intensity measures has been considered for these levels and the demand model has been developed for pulse liked ground motions that have more destructive effects. The results show that velocity-based intensity measures are sufficient for moderate damage level under pulse liked records. At these damage levels, the use of first mode spectral acceleration or acceleration-based intensity measures such as maximum ground acceleration can cause errors. Also, studies conducted in this paper have shown that the use of single linear model is not suitable for all damage levels and the use of a three linear model with respect to damage levels can reduce errors in seismic assessments. The use of multilinear models, although reducing uncertainties, has complexities in computation and their use requires special considerations. If these models are used, the amount and time of calculations can be reduced in some ways.

**Keywords:** Seismic demand model, earthquake intensity measure, relative entropy, damage levels