

تأثیر بازه‌ی زمانی زلزله بر شدت آسیب‌پذیری ساختمان‌های بتنی

لیلا مجتهدی: کارشناس ارشد مهندسی عمران، زلزله، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

حمید صفاری*: استادیار دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، تهران، ایران، h_saffari@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۶

چکیده

بازه‌ی زمانی زلزله تأثیر بسزایی در مقدار خرابی سازه‌ها دارد. از این رو ضرورت دارد مطالعات دقیقی برای شناخت منابع لرزه‌ای با امکان تولید زلزله‌های با دوام زیاد در ایران انجام گیرد و تأثیرات دوام بر کاهش مقاومت سازه‌ها به هنگام طراحی لحاظ گردد. این مسئله نه تنها در زلزله‌های با دوام بالا ممکن است باعث خرابی سازه‌ها شود، بلکه در صورت رخداد پس لرزه‌های نسبتاً شدید نیز می‌تواند منجر به خرابی آن‌ها گردد. در این مقاله به بررسی عملکرد سازه‌های بتنی تحت تأثیر زلزله‌های با مدت زمان مؤثر متفاوت پرداخته می‌شود و تأثیر کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه در اثر حرکات رفت و برگشتی زلزله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور سه ساختمان بتنی ۳، ۹ و ۱۵ طبقه توسط نرم‌افزار اجزای محدود Seismostruct 2016 مدل‌سازی شده و تحت تأثیر رکوردهایی که از نظر انرژی مقیاس شده و شرایط خاک یکسانی دارند قرار می‌گیرند. این رکوردها از نظر مدت دوام مؤثر متفاوت است تا بتوان تفاوت رفتار سازه را در دوام‌های مختلف بررسی نمود. نتایج تحلیل غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی روی سازه با رکوردهای اشاره شده نشان می‌دهد که تعداد مفاصل پلاستیک ایجاد شده و تغییر مکان بیشینه در زلزله‌های با دوام بالا به مراتب بیشتر از زلزله‌های با دوام کم است. همچنین مطالعه‌ی رفتار ساختمان‌ها طی زلزله‌های با دوام مختلف نشان می‌دهد که نمی‌توان زلزله‌ها را صرفاً بر اساس دوام ظاهری آن‌ها مرتب نمود. بلکه هر چه تعداد سیکل‌های زلزله که دارای دامنه‌ی شتاب بیشتر از یک حد مشخص باشد اثرات آن بر سازه بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: مدت زمان مؤثر زلزله، سازه بتنی، زوال سختی، کاهش مقاومت

The Effect of Earthquake Duration on vulnerability of Concrete Buildings

Lila Mojtahedi¹, Hamid Saffari^{2*}

Abstract

The earthquake duration has a significant effect on the amount of destruction of structures. Some samples of The earthquake duration has a significant effect on the amount of destruction of structures. Therefore, it is important to study seismic sources that can produce earthquakes with a long duration in Iran, and the effects of long duration on structures should be considered at the design time. This problem is not just due to a long duration earthquake, but also some large aftershocks can make destruction. In this article, the performance of concrete structures affected by different durations is studied and the effects of stiffness degradation and strength loss of the structural members under cyclic movements of the earthquake are assessed. For this purpose, three concrete buildings like 3, 9 and 15 stories have been modeled by finite element software Seismostruct 2016 modeling and have been affected by energy scaled records and same soil conditions. These records are different in terms of effective duration to can study the behavior of the structure in different durations. The results of non-linear time history analysis of the structure under mentioned records indicate that the number of plastic hinges and maximum displacement caused by earthquakes with a long duration is much higher than those with low duration. Also, the study of the behavior of buildings under earthquakes with different duration shows that earthquakes should not be arranged according to their apparent durations. The number of cycles of the earthquake with high accelerations to a certain limit increases, the more effects on structures is increased.

Keywords: *Effective Duration, Concrete Structure, Stiffness Degradation, Strength Loss*

1. M.Sc. Civil Engineering – Earthquake Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

2. Assistant Professor, University of Shahid Beheshti, Faculty of Water and Environmental Engineering, Tehran, Iran; Email: h_saffari@sbu.ac.ir

ساده‌ترین تعریف زمان دوام، زمان دوام بازه‌ای^۱ است که در این تعریف فاصله‌ی زمانی بین اولین و آخرین مرتبه‌ای که شتاب حرکات زمین از یک مقدار معین بیشتر می‌شود به منزله‌ی مدت زمان زلزله در نظر گرفته می‌شود. در این رابطه پیچ [۱۲]، مدت زمان زلزله را بر اساس شتاب آستانه $0.05g$ در نظر گرفته است. در این تعریف شکل رکورد در قسمت حرکات شدید به هیچ وجه لحاظ نشده نیست و ممکن است دو زلزله‌ی کاملاً متفاوت با یک شتاب آستانه‌ی یکسان یک زمان دوام برابر را نشان دهند.

مدت دوام یکنواخت

تعریف دیگر که خصوصیات کلی رکورد را در نظر می‌گیرد، مدت زمان یکنواخت نامیده می‌شود. این مدت زمان جمع فواصل زمانی است که شتاب از یک مقدار معین بیشتر می‌شود. بولت [۱۳] این تعریف را با دو مقدار آستانه $0.05g$ و $0.10g$ مطرح نموده است.

مدت دوام معنی دار

اساس دسته‌ی سوم از تعریف‌ها، توزیع تجمعی انرژی زلزله که با استفاده از شتاب نگاشت تعیین می‌گردد است. این تعریف مدت زمان معنی دار^۲ خوانده می‌شود. مدت زمان معنی دار بر اساس انتگرال مربع شتاب زمین محاسبه می‌شود. در اکثر این تعریف‌ها از شدت آریاس استفاده شده که شدت آریاس به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^T a^2(t) dt \quad \text{رابطه‌ی ۱:}$$

در این رابطه $a(t)$ شتاب در زمان t است که توسط رکورد شتاب نگاشت مشخص می‌شود و I_A نشان دهنده‌ی میزان انرژی وارد بر سازه است. نمودار تغییرات شدت آریاس بر حسب زمان را نمودار هیوسید [۱۴] می‌نامند و تصویر ۱ نمونه‌ای از آن را نشان می‌دهد. نمودار هیوسید معمولاً از یک قسمت با شیب کم تشکیل شده است که مربوط به رسیدن امواج P است. قسمت میانی نمودار دارای شیب تندی است و مربوط به انرژی ورودی اصلی در اثر امواج S و امواج سطحی است. شیب قسمت انتهایی نمودار نسبتاً کم است و به امواج حجمی و سطحی که به طور غیر مستقیم به شتاب نگاشت می‌رسند مربوط می‌شود. شیب هر قسمت از نمودار هیوسید در حقیقت میانگین مربع شتاب است.

زمان دوام معنی دار به صورت فاصله‌ی زمانی که درصد معینی از شدت آریاس را شامل می‌شود تعریف می‌گردد. این درصد توسط محققان مختلف به صورت‌های متفاوتی در نظر گرفته شده است. متداول‌ترین تعریف توسط تریفناک و برادی بر اساس فاصله‌ی زمانی بین ۵٪ تا ۹۵٪ شتاب آریاس ارائه شده است [۱۵].

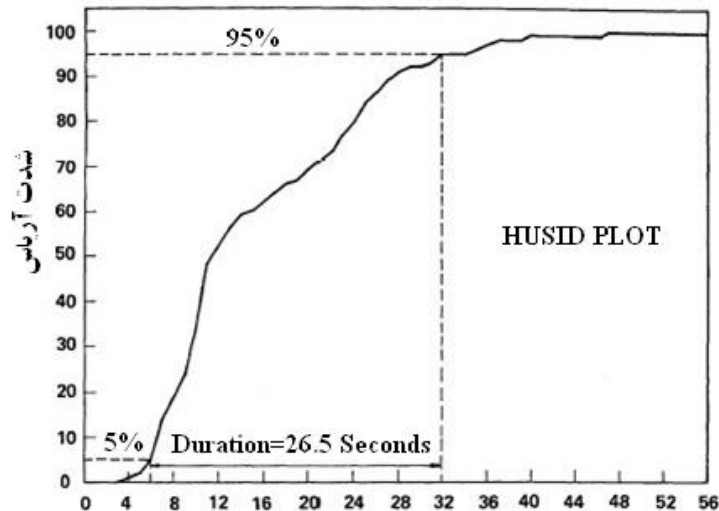
در یک تحقیق همبستگی پارامترهای مختلف دوام لرزه‌ای با شاخص‌های خسارت روی سازه‌های بتن مسلح بررسی شده است [۱۶]. همچنین تعداد زیادی از برنامه‌های مدت دوام وابسته به مهندسی سازه برای ارزیابی بهبود لرزه‌ای را می‌توان در مقالات یافت. هاوسنر [۱۷] از اولین محققانی بود که پیشنهاد کرد که سازه‌ها باید طوری طراحی شوند که دارای ظرفیت جذب کافی انرژی برای مقاومت در برابر انرژی‌های اعمال شده به وسیله‌ی

مدت حرکات و جنبش نیرومند زمین تأثیر قابل توجهی بر میزان آسیب‌های ناشی از زلزله بر ساختمان‌ها دارد. بسیاری از فرایندهای فیزیکی مانند کاهش سختی و مقاومت انواع سازه‌ها به تعداد سیکل‌های بار یا تنش که در حین زلزله به وجود می‌آید بستگی دارند. یک حرکت با مدت کوتاه حتی اگر دامنه‌ی بزرگی داشته باشد ممکن است تعداد کافی سیکل بار، برای رسیدن سازه به گسیختگی ایجاد نماید. از طرف دیگر یک حرکت با دامنه‌ی متوسط اما مدت طولانی سیکل‌های بارگذاری کافی برای ایجاد خرابی در سازه‌ها ایجاد خواهد کرد. تحریکات زمین که از رویدادهای با بزرگا و شدت زیاد تولید شده‌اند و گزارشات ثبت شده در محل‌هایی که در فواصل دور از کانون زمین‌لرزه قرار دارند همگی یادآور مدت زمان‌های طولانی زمین‌لرزه هستند. از این رو سازه‌های ساخته شده در این مناطق باید ظرفیت تحمل و باربری در مقابل تحریکات طولانی زمین را نیز با توجه به شرایط خاک ساختگاه داشته باشند [۱].

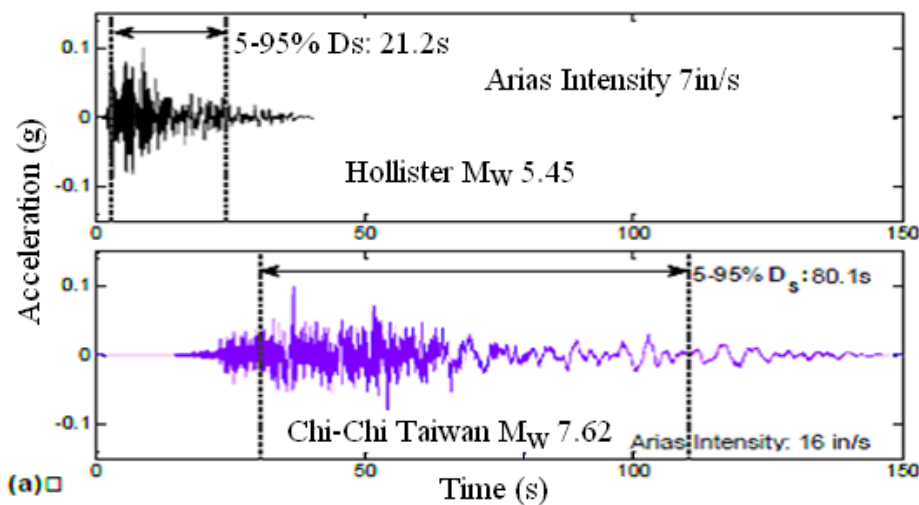
دوام زلزله ارتباط مستقیمی با بزرگای لرزه‌ای دارد [۲]. از سوی دیگر پژوهشگران متعددی رابطه‌ی میان خرابی سازه‌ها با مدت دوام جنبش نیرومند زمین را مطالعه نموده‌اند. چای و همکاران، پیشنهاد داده‌اند که یک مدت حرکت زمین بزرگ‌تر، برش پایه‌ی طراحی غیر الاستیک را افزایش می‌دهد [۳]. با وجود مطالعات مختلف برای بررسی مشخصات مدت دوام حرکت قوی زمین و وجود چندین تعریف متفاوت از مدت دوام هنوز نیاز به مطالعه‌ی بیشتری در ارتباط با نحوه‌ی تأثیر دوام زلزله بر سازه‌ها وجود دارد. عدم لحاظ مدت دوام در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، دلیلی برای توجه نسبتاً کم به معادلات پیش‌بینی برای مدت دوام در مقایسه با معادلات میرایی، برای شتاب‌های طیفی شده است [۴]. دستورالعمل FEMA 440 اطلاعات به‌روز شده‌ای راجع به مدل‌سازی سازه‌ها از جمله ساختمان‌های بتن مسلح با در نظر گرفتن زوال سختی، کاهش مقاومت و پاسخ دینامیکی غیر خطی ارائه داده است [۵]. در یک تحقیق زوال سختی سه بعدی و کاهش مقاومت با در نظر گرفتن خرابی پیش‌رونده‌ی سازه‌های بتن مسلح بررسی شده است [۶]. باید افزود بررسی دوام زلزله گاه به صورت اثر زلزله‌های پیاپی و پس‌لرزه‌ها بر سازه‌ها بررسی شده است [۷، ۸، ۹]. علاوه بر مدل‌های شبیه‌سازی شده‌ی آزمایشگاهی و نظری، کاهش مقاومت و سختی در اثر زلزله‌های پیاپی واقعی نیز بر روی سازه‌های بتن مسلح بررسی شده است [۱۰].

انواع مدت دوام لرزه‌ای

در رابطه با تعیین مدت زمان دوام حرکات شدید روش‌های متفاوتی با استفاده از خصوصیات و پارامترهای مؤثر منحنی شتاب- زمان زلزله وجود دارد. روش‌هایی که تعریف زمان دوام حرکات شدید را با استفاده از خصوصیات شتاب نگاشت‌های ثبت شده‌ی زمین‌لرزه‌ها مطرح می‌کنند می‌توان به سه دسته مطابق زیر تقسیم کرد [۱۱]:



تصویر ۱: نمودار هیوسید [۱۴]



تصویر ۲: مقایسه‌ی دو نداشت با PGA یکسان و زمان دوام متفاوت [۱]

انرژی ایجاد شده بیشتر از انرژی وارد شده باشد، تمام انرژی وارد شده به سازه در طول مدت زمان حرکت زمین، توسط میرایی و چرخه‌ی عملکرد هیستریزیس اتلاف می‌گردد. این چرخه‌ی رفتاری غیر الاستیک باعث خسارات جزئی به سازه می‌شود و اثرات تجمعی این خسارات جزئی باعث فروپاشی سازه می‌گردد [۲۱]. باید افزود بررسی افت مقاومت و سختی با توجه به شرایط سازه از جمله شکل‌پذیری آن متفاوت باشد. در چند تحقیق بررسی رفتار تنزل یافته‌ی چرخه‌های هیستریزیس در تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌های بتن آرمه با شکل‌پذیری مختلف بررسی شده است [۲۲]، [۲۳].

درک اثر مدت زمان حرکت زمین در آسیب تجمعی و مکانیزم شکست ما را یک گام به جلوگیری از فروپاشی ناشی از زلزله در آینده نزدیک خواهد کرد و همچنین می‌تواند در بهبود آئین‌نامه‌های ساختمانی کمک کند.

سازه‌های بتن مسلح در برابر تحریکات زلزله‌های متعدد نیز بسیار آسیب‌پذیر هستند. محققان عمدتاً بر روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها تحت زلزله‌های مخرب، با صرف نظر از تأثیر

جنبش زمین را داشته باشند. تقاضای انرژی حرکت زمین نیز تابعی از شدت و مدت دوام زلزله است. هاوسنر همچنین پیشنهاد کرد که در دو حرکت زمین با طیف شدت یکسان، اگر مدت دوام یک حرکت بیشتر از دیگری باشد، دو حرکت ممکن است دارای اثرات خرابی متفاوتی باشند. تصویر ۲ نشان می‌دهد که ۲ نداشت مقدار شتاب ماکزیمم (PGA) مشابه دارند در حالی که زمان دوام آن‌ها متفاوت است [۱].

آنگ و برترو [۱۸] یک تحقیق وسیع درباره‌ی تقاضای انرژی سازه‌ها تحت زلزله انجام داده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهد که تقاضای انرژی از حرکت زمین به وسیله‌ی سازه به شکل میرایی و کرنش الاستیک برگشت‌پذیر تلف می‌شود. روابط میان انرژی ورودی و اوج سرعت طیفی با مدت دوام حرکت قوی زمین مرتبط است. این نتیجه با یافته‌های شوم [۱۹] و رهنما و مانوئل [۲۰]، که نشان‌دهنده‌ی وجود رابطه‌ای میان تقاضای انرژی ورودی و انرژی چرخه‌ای (انرژی تلف شده به وسیله‌ی رفتار چرخه‌ای سازه، که به تغییر شکل پلاستیک غیرقابل جبران سازه مرتبط است)، با مدت دوام حرکت زمین است، تقویت می‌گردد. در یک سازه اگر

۷

شماره شانزدهم

پاییز و زمستان
۱۳۹۸

دوفصلنامه
علمی و پژوهشی

میرایی

تأثیر بازه‌ی زمانی زلزله بر شدت آسیب‌پذیری ساختمان‌های

خمش می‌گردد، زیرا در این صورت ساختمان‌ها دچار خسارت شدید و غیر قابل تعمیر گردیده‌اند [۲۵].

هدف از این تحقیق مطالعه‌ی تغییرات سختی و مقاومت ساختمان‌های با اسکلت بتنی است که تحت تأثیر زلزله‌های با دوام مختلف قرار گرفته‌اند. این کار با تأثیر کلیه‌ی پارامترهای مؤثر بر کاهش مقاومت و سختی ساختمان‌های بتنی و شبیه‌سازی سازه‌ی بتنی و رفتار آن در نرم‌افزار تحلیل غیرخطی سازه‌ی بتنی صورت می‌گیرد. با استفاده از نتایج این مطالعات می‌توان قضاوت مناسبی بر ظرفیت باقی‌مانده‌ی سازه‌های آسیب‌دیده از زلزله برای استفاده‌ی مجدد یا تخریب و نوسازی آن‌ها نمود.

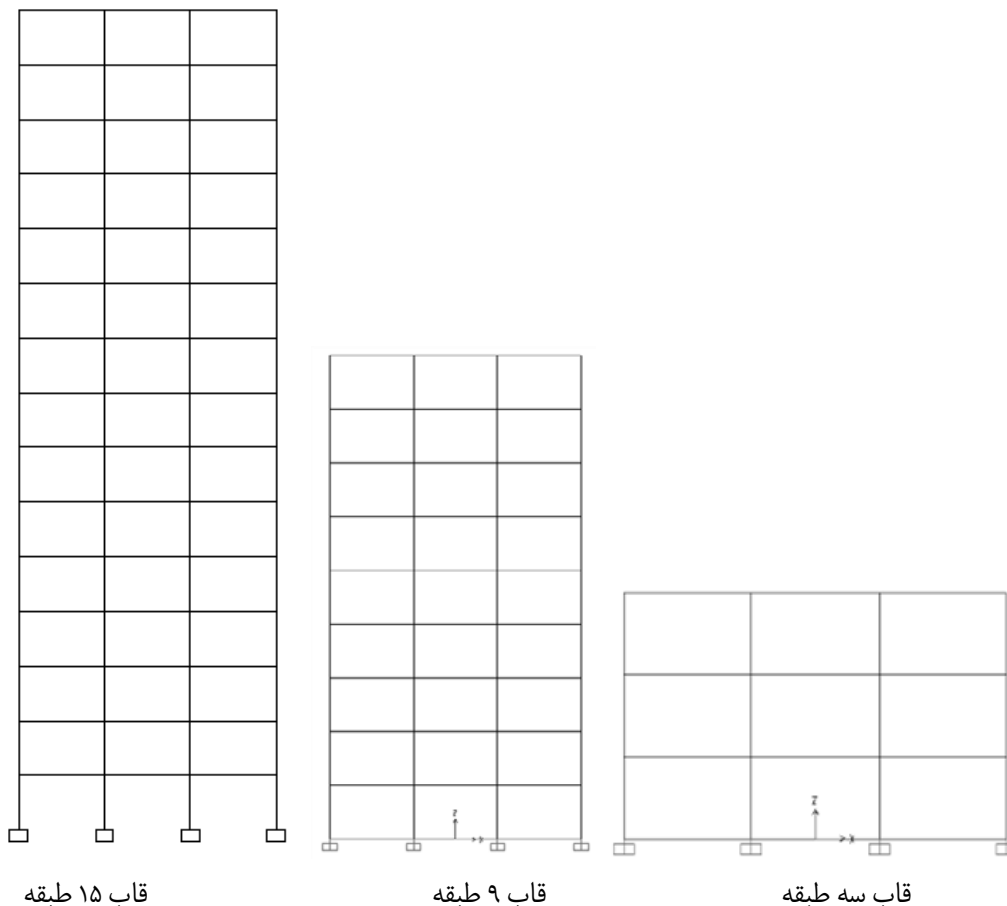
روش تحقیق

در این مطالعه از سه قاب بتن مسلح ۳، ۹ و ۱۵ طبقه استفاده شده است. قاب‌ها در راستای X دارای سه دهانه‌ی ۵ متری است و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر است. این قاب‌های دوبعدی در راستای XZ توسط نرم‌افزار SeismoStruct 2016 مطابق تصویر ۳ مدل‌سازی شده‌اند. در ارتباط با صحت‌سنجی تحلیل‌های انجام یافته خاطر نشان می‌گردد کلیه‌ی تحلیل‌های انجام یافته با این نرم‌افزار تحت لایسنس آکادمیک و ثبت شده صورت گرفته است و خروجی‌ها به دور از خطاهای محتمل مربوط به عدم استفاده از نسخه‌ی اصلی سایر نرم‌افزارها است. همچنین مقایسه‌ی

زلزله‌های قبلی، تمرکز کرده‌اند. این تأثیرات شامل کاهش سختی و مقاومت ناشی از تجمع آسیب‌ها در مصالح ساختمانی تحت چرخه‌های سیکلیک با دامنه‌ی بزرگ و همچنین تأثیر $\Delta - P$ است که در اثر جابجایی باقی‌مانده ناشی از زلزله‌های قبلی ایجاد می‌شود. کاهش سختی و مقاومت به طور مؤثری مشخصات دینامیکی سازه‌ی آسیب‌دیده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه بر روی پاسخ سازه‌ها در زلزله‌های آینده نیز تأثیرگذار خواهد بود. نتایج نشان داده است که توالی پس‌لرزه تجمع آسیب در سازه‌ها را افزایش خواهد داد؛ علاوه بر این، توالی‌های مختلف زلزله با انرژی ورودی یکسان، مودهای خرابی یکسانی را در سازه‌ها باعث خواهد شد [۲۴].

اعضای بتنی مسلح تحت تغییر شکل غیر الاستیک سیکلی ممکن است هم کاهش سختی و هم کاهش مقاومت نشان دهند. در تحلیل غیرخطی، انتخاب مدل هیستریزس در پیش‌بینی دقیق پاسخ دینامیکی سازه اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل انتخاب شده باید بتواند رفتاری مشابه با رفتار هیستریزس واقعی ایجاد نماید و در آن عواملی مانند کاهش مقاومت را بتوان در نظر گرفت.

تحقیقات نشان داده است که پارامتر زوال بر خسارت لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی مسلح تأثیر بسزایی دارند به گونه‌ای که افت مقاومت بیش از ۴۰٪ منجر به نا ایمن شدن ساختمان‌های قاب



تصویر ۳: قاب‌های مورد تحلیل

جدول ۱: مشخصات زلزله‌های مقیاس شده به انرژی براساس طیف خاک نوع II و شتاب $g/0.35$

| ردیف | نام رویداد | ایستگاه | سال | بزرگا (Mw) | مدت زمان مؤثر (Sec) | PGA |
|------|------------|--------------------|------|------------|---------------------|-------|
| ۱ | Bam | Kerman | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۳۰,۹۷ | ۰,۲۶۴ |
| ۲ | Bam | Gale Ganj | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۱۶,۱۹ | ۰,۳۲۰ |
| ۳ | Bam | Golbaf | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۳۷,۴۸ | ۰,۳۳۲ |
| ۴ | Bam | Andoohjerd | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۲۳,۳۳ | ۰,۳۵۳ |
| ۵ | Bam | Baft | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۱۷,۸۱ | ۰,۲۶۸ |
| ۶ | Bam | Horjand | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۱۲,۵۳ | ۰,۳۰۳ |
| ۷ | Bam | Rayen | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۲۲,۵۳ | ۰,۳۲۸ |
| ۸ | Elmayor | North Shore | ۲۰۱۰ | ۷,۲ | ۴۷,۱۴ | ۰,۳۲۱ |
| ۹ | Elmayor | Moreno Valley | ۲۰۱۰ | ۷,۲ | ۳۳,۴۴ | ۰,۳۴۴ |
| ۱۰ | Coalinga | Parkfield-Cholame | ۱۹۸۳ | ۶,۴ | ۴۰,۹۴ | ۰,۳۵۷ |
| ۱۱ | Coalinga | Parkfield-Vineyard | ۱۹۸۳ | ۶,۴ | ۴۴,۸۰ | ۰,۲۷۹ |

جدول ۲: مشخصات زلزله‌های گزینش شده‌ی نهایی

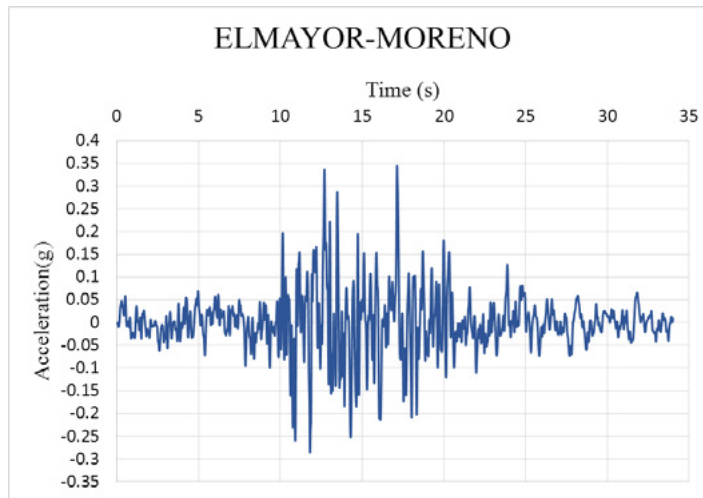
| ردیف | نام رویداد | ایستگاه | سال | بزرگا | مدت زمان مؤثر (Sec) | PGA |
|------|------------|---------------------|------|-------|---------------------|-------|
| ۱ | Bam | Andoohjerd | ۲۰۰۳ | ۶,۶ | ۲۳,۳۳ | ۰,۳۵۳ |
| ۲ | Elmayor | Moreno Valley | ۲۰۱۰ | ۷,۲ | ۳۳,۴۴ | ۰,۳۴۴ |
| ۳ | Landers | Inglewood-Union Oil | ۱۹۹۲ | ۷,۲ | ۴۴,۸۰ | ۰,۳۲۳ |

که نخست ساختگاه هدف از نوع خاک نوع ۲ آئین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ و در شهری با لرزه‌خیزی بسیار زیاد که مطابق آئین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران شتاب مبنای آن $g/0.35$ است، انتخاب گردید. سپس طیف طرح این ساختگاه مطابق روابط ارائه شده در آئین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) محاسبه و به نرم‌افزار Seismo Artif معرفی گردید. در ادامه با این نرم‌افزار کلیه‌ی رکوردهای انتخاب شده در محدوده‌ی دوره ۰,۰۴ تا ۵ ثانیه و با توجه به مشخصه‌های طیف طرح هدف (شتاب ماکزیمم $g/0.35$) در دامنه‌ی زمان اصلاح و مقیاس گردیدند. با این کار تأثیر انرژی ورودی زلزله‌ها و شرایط خاک در تمام شتاب‌نگاشت‌ها یکسان گردید. از آنجا که با این اصلاح در حوزه‌ی زمان امکان تغییر جزئی شتاب‌نگاشت‌ها و شتاب ماکزیمم آن‌ها وجود داشت، شتاب‌نگاشت‌های ویرایش شده مجدداً توسط نرم‌افزار Seismo Signal در محدوده فرکانسی بین ۰/۲ و ۲۵ هرتز فیلتر شدند. در ادامه زلزله‌هایی که دارای شتاب ماکزیمم تقریباً یکسان (در محدوده شتاب مبنای انتخاب شده $g/0.35$) و با زمان دوام مختلف بودند (۳ شتاب‌نگاشت مطابق جدول ۲) انتخاب شدند و توسط نرم‌افزار Siesmo Struct بر سازه اعمال گردیدند.

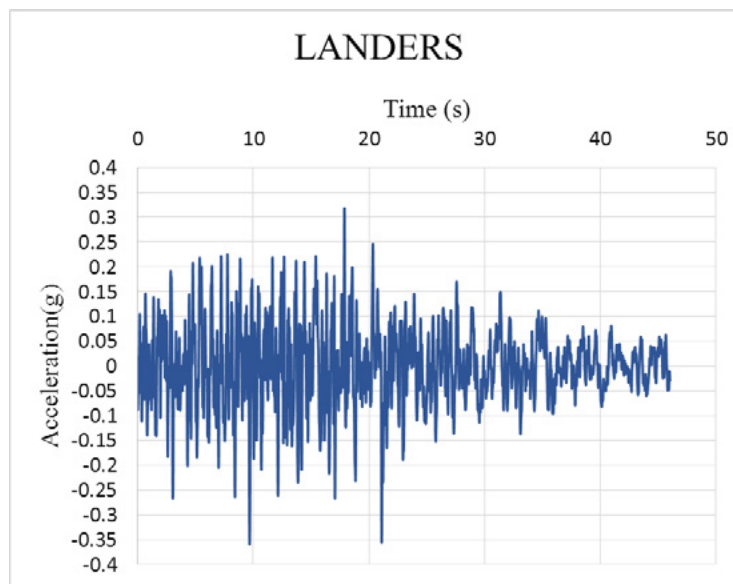
تحلیل‌ها با تحلیل‌های نرم‌افزار Sap، Etabs و Perform3D بیانگر تطابق نسبی خروجی‌ها است، لکن به دلیل پیشرفته بودن نرم‌افزار SeismoStruct در لحاظ نمودن اثرات زوال سختی و کاهش مقاومت با مدل‌های مختلف از آن در تحلیل نهایی استفاده گردید. قاب‌ها از نوع بتن مسلح و سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی از نوع قاب خمشی است. بارگذاری لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس خاک نوع ۲ و منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد انجام یافته است. طراحی اعضا بر اساس آیین‌نامه‌ی ACI ۰۵-۳۱۸ صورت گرفته است. بارگذاری بر مبنای مبحث ششم مقررات ملی ساختمان است و بار زنده‌ی طبقات و بام به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع است.

سازه ابتدا به روش استاتیکی معادل مورد تحلیل قرار گرفته و مقاطع بهینه استخراج شده و سپس توسط ۳ نگاشت از زلزله‌های مختلف با مدت دوام‌های متفاوت، تحت آنالیز غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفته است.

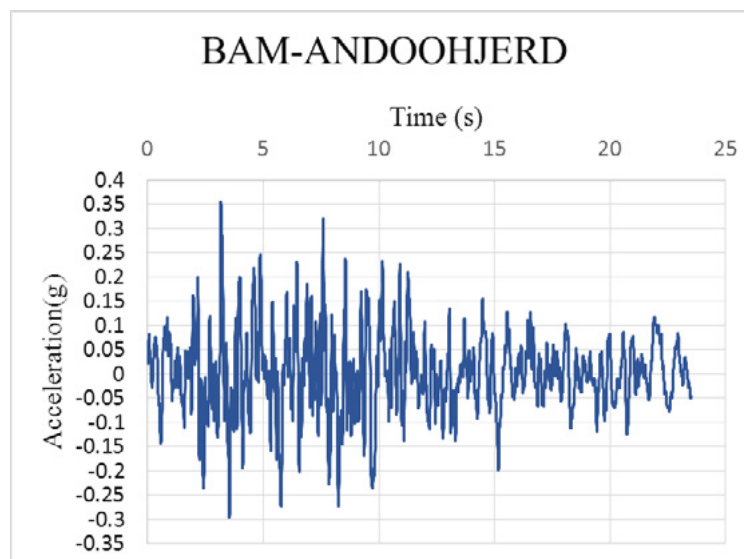
در آغاز ۱۱ رکورد با زمان‌های متفاوت انتخاب گردید، رکوردهای انتخابی ابتدا در نرم‌افزار Seismo Signal فیلتر شده سپس توسط نرم‌افزار Seismo Artif شتاب‌نگاشت‌ها مقیاس گردیدند. نحوه‌ی مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها بدین صورت است



الف. رکورد زلزله Elmayor-Moreno

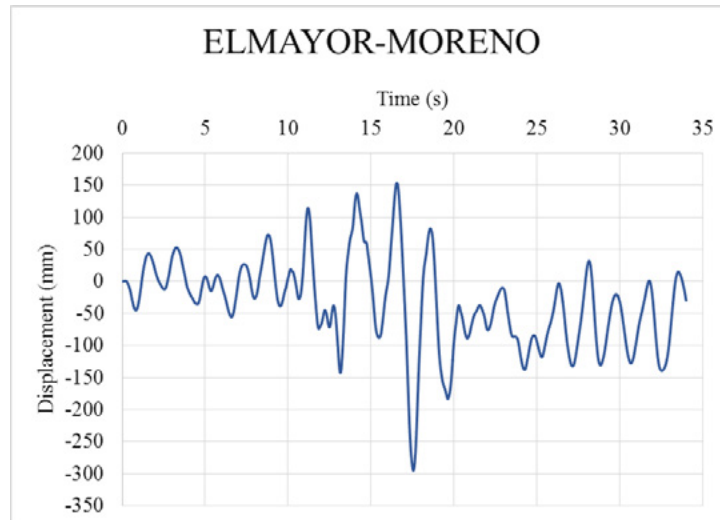


ب. رکورد زلزله Landers

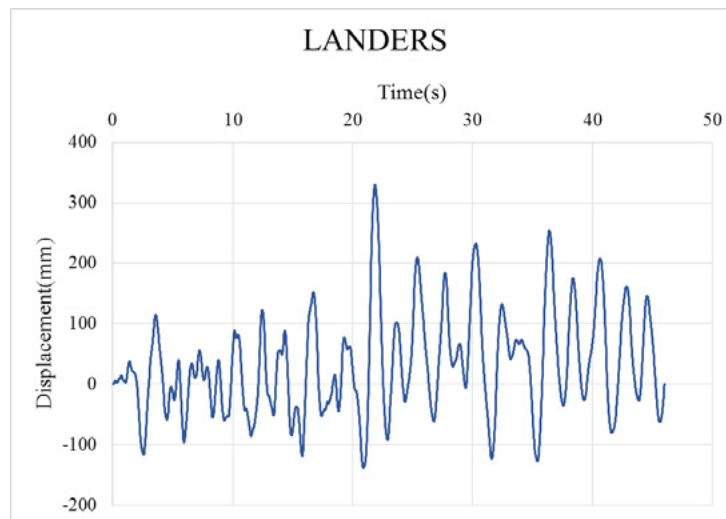


ج. رکورد زلزله Bam-Andoohjerd

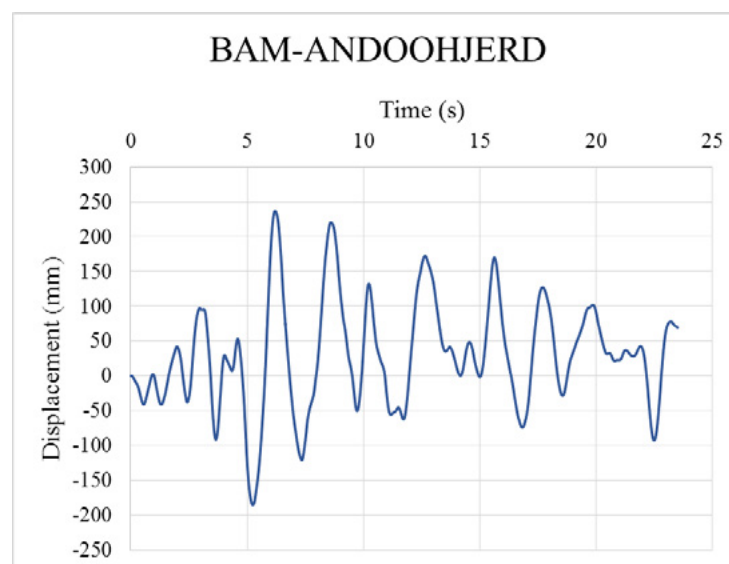
تصویر ۴: رکورد زلزله‌های انتخابی



الف. تغییر مکان بام تحت زلزله Elmayor-Moreno



ب. تغییر مکان بام تحت زلزله Landers

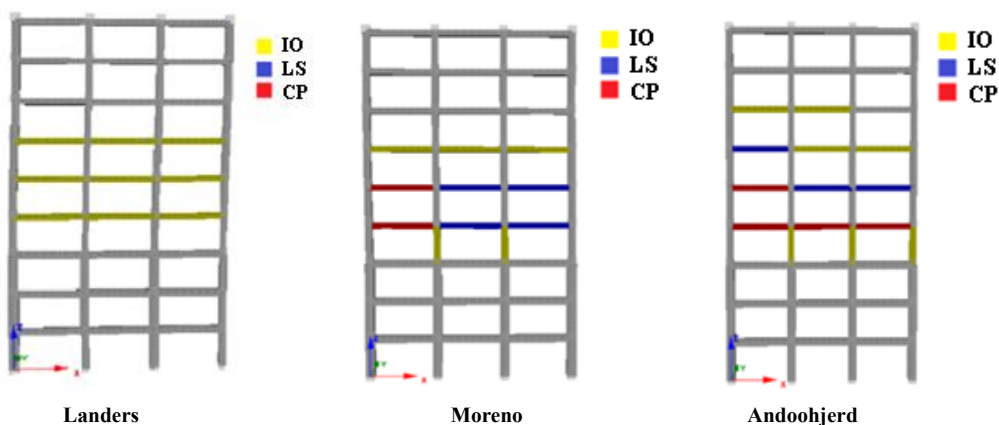


ج. تغییر مکان بام تحت زلزله Bam-Andoohjerd

تصویر ۵: تغییر مکان بام قاب ۹ طبقه تحت زلزله های انتخابی

گیرایی در اتصال تیر-ستون، نسبت نیروی محوری به ظرفیت فشاری و سایر ملاحظات صورت می‌پذیرد. در صورت تجاوز زاویه‌ی دوران از حدود مشخص شده می‌توان سطوح عملکردی را با توجه به میزان دوران در سه دسته عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه‌ی فروریزش (CP) تعریف نمود. در جدول ۳ مفاصل تشکیل شده در قاب ۹ طبقه تحت زلزله‌های انتخابی در سه سطح عملکرد اشاره شده آورده شده است. نتیجه‌ی ۱: مطابق تصویر ۷ با افزایش دوام لرزه‌ای، مقدار تغییر مکان‌های حداکثر بام افزایش می‌یابد. نتیجه‌ی ۲: مطابق جدول ۳ با افزایش دوام لرزه‌ای، تعداد مفاصل و نیز رفتار غیر ارتجاعی سازه افزایش می‌یابد.

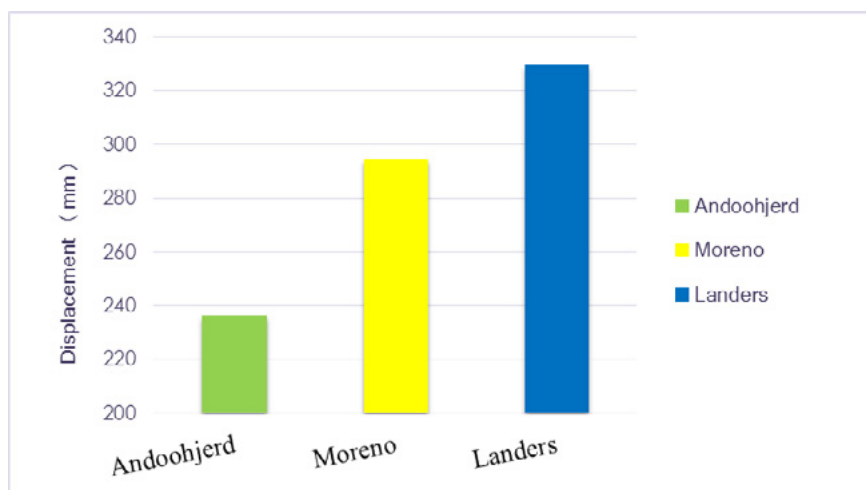
برای بررسی رفتار واقعی سازه‌ها در اثر بارهای وارده خصوصاً بارهای ناشی از زلزله‌هایی که بالاتر از حد تحمل الاستیک سازه باشند استفاده از روش‌های غیرخطی ناگزیر است. در این راستا رفتار غیرخطی اعضا اعم از تیرها و ستون‌ها با منحنی‌های چند خطی برازش داده می‌شود. سپس پتانسیل ایجاد نقاطی با جاری شدن یا لهیدگی در سراسر مقطع (مفصل پلاستیک) در نقاط کنترل سازه (نظیر نقاط با تلاش‌های خمشی، برشی و محوری ماکزیمم) مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی رفتار غیر خطی این نقاط کنترل (شامل زاویه‌ی دوران خمیری و نسبت مقاومت باقیمانده) با توجه به خصوصیت مقاطع مربوطه، نظیر درصد آرماتور به‌کار برده شده در تیرها نسبت به درصد آرماتور بالانس، شرایط استفاده از میلگردهای عرضی در محدوده‌ی مفاصل پلاستیک و در طول



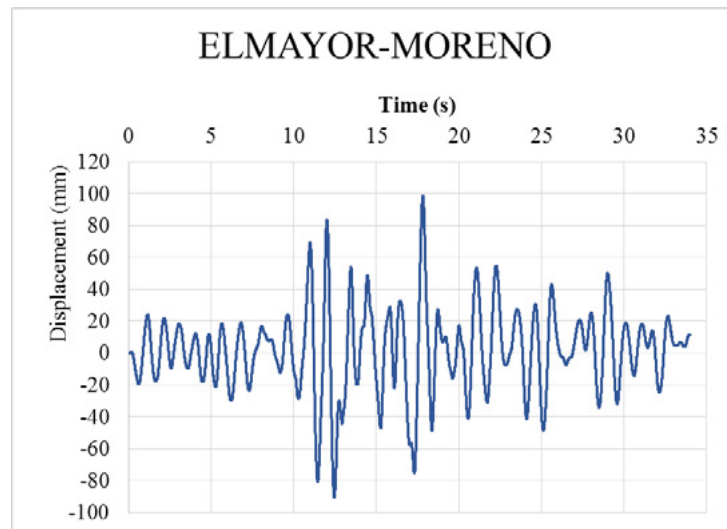
تصویر ۶: مفاصل پلاستیک تشکیل شده در قاب ۹ طبقه تحت اثر زلزله

جدول ۳: مقایسه‌ی مفاصل تشکیل شده در قاب ۹ طبقه تحت زلزله‌های انتخابی

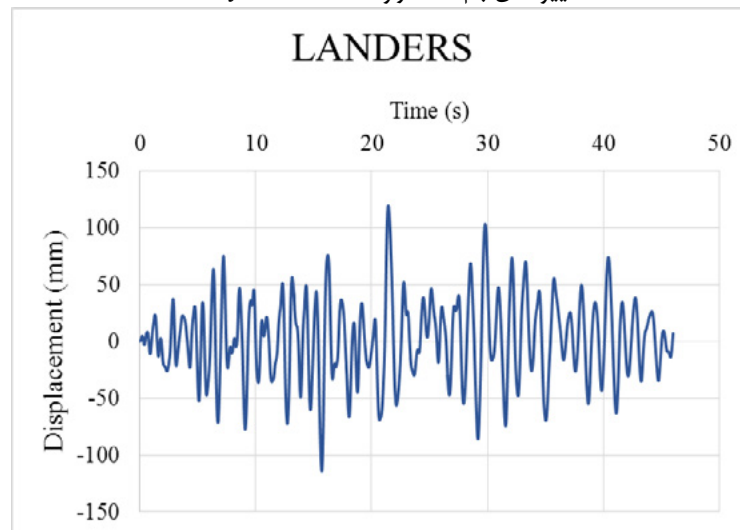
| نام رکورد | دوام ظاهری رکورد (۵٪ تا ۹۵٪) | IO | LS | CP | نوع مفصل پلاستیک |
|------------|------------------------------|----|----|----|-----------------------|
| Andoohjerd | ۲۳/۳ | ۹ | ۰ | ۰ | تعداد مفاصل تشکیل شده |
| Moreno | ۳۳/۴ | ۵ | ۴ | ۲ | |
| Landers | ۴۴/۸ | ۷ | ۳ | ۴ | |



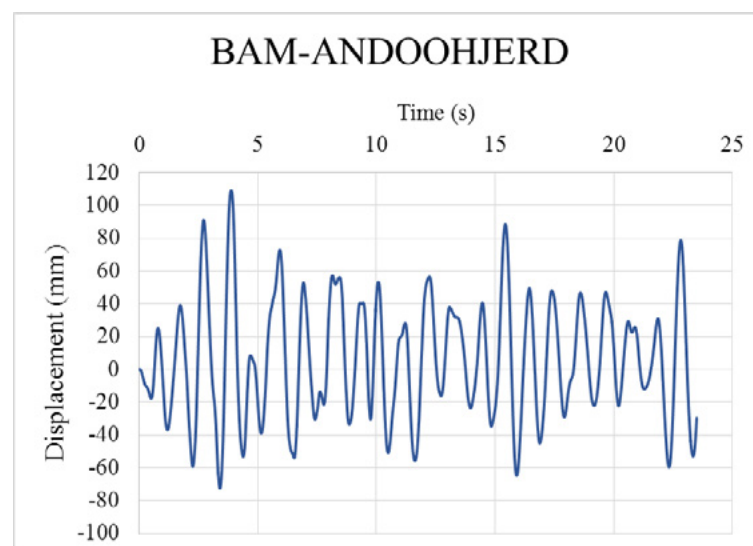
تصویر ۷: مقایسه‌ی تغییر مکان‌ها در سازه ۹ طبقه



الف. تغییر مکان بام تحت زلزله Elmayor-Moreno

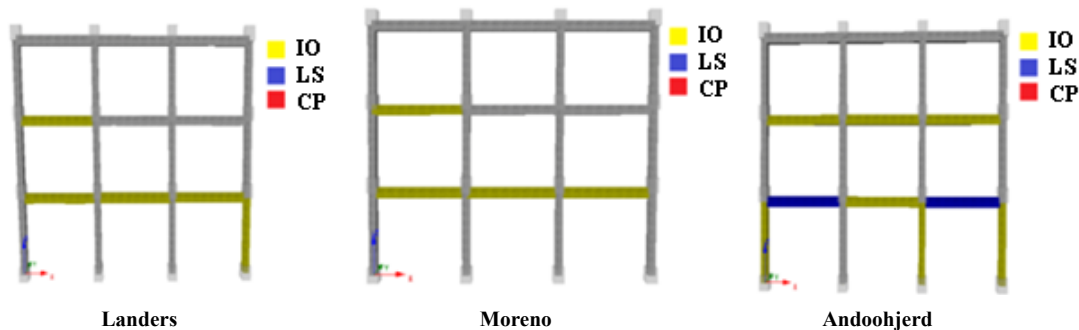


ب. تغییر مکان بام تحت زلزله Landers



ج. تغییر مکان بام تحت زلزله Bam-Andoohjerd

تصویر ۸: تغییر مکان بام قاب ۳ طبقه تحت زلزله های انتخابی

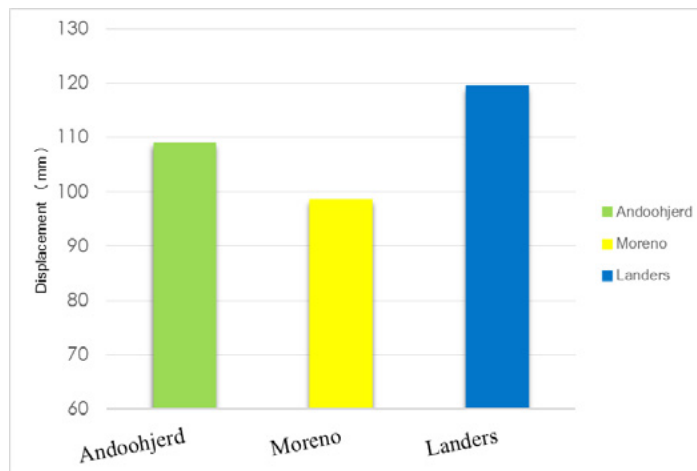


تصویر ۹: مفاصل پلاستیک تشکیل شده در قاب ۳ طبقه تحت اثر زلزله

(b)Andoohjerd (a)Moreno (c) Landers

جدول ۴: مقایسه‌ی مفاصل تشکیل شده در قاب ۳ طبقه در زلزله‌های انتخابی

| نام رکورد | دوام رکورد (۵ تا ۹۵٪ شدت آریاس) | IO | LS | CP | نوع مفصل پلاستیک |
|------------|---------------------------------|----|----|----|-----------------------|
| Andoohjerd | ۲۳/۳ | ۵ | ۰ | ۰ | تعداد مفاصل تشکیل شده |
| Moreno | ۳۳/۴ | ۴ | ۰ | ۰ | |
| Landers | ۴۴/۸ | ۷ | ۲ | ۰ | |



تصویر ۱۰: مقایسه‌ی تغییر مکان‌ها در سازه‌ی ۳ طبقه

جدول ۵: مقایسه‌ی مفاصل تشکیل شده در زلزله‌های انتخابی در سازه‌ی ۳ طبقه

| نام رکورد | دوام ظاهری رکورد (۵٪ تا ۹۵٪) | دوام اصلاح شده بر اساس تجاوز یا کاهش از $\pm 0.2g$ | IO | LS | CP | نوع مفصل پلاستیک |
|------------|------------------------------|--|----|----|----|-----------------------|
| Moreno | ۳۳/۴ | ۷/۶ | ۴ | ۰ | ۰ | تعداد مفاصل تشکیل شده |
| Andoohjerd | ۲۳/۳ | ۸/۸ | ۵ | ۰ | ۰ | |
| Landers | ۴۴/۸ | ۲۲/۲ | ۷ | ۲ | ۰ | |

شتاب $g \pm 0.2$ محاسبه گردید. در زیر مدت دوام اصلاح شده‌ی آن‌ها آورده شده است. مشخص می‌شود که با در نظر گرفتن مقدار دوام اصلاح شده بر پایه‌ی $g \pm 0.2$ ترتیب افزایش تغییر مکان‌های غیر ارتجاعی برقرار است.

خاطر نشان می‌گردد سازه‌های بلند (نظیر ۹ طبقه) به شتاب‌های پایین‌تری حساس هستند. در این تحقیق با در نظر گرفتن آستانه $g \pm 0.1$ ترتیب مشابهی (بدون تغییر) برای مدت

مطابق جدول ۴ با افزایش دوام لرزه‌ای، مقدار تغییر مکان‌های حداکثر بام و تعداد و محدوده‌ی مفاصل پلاستیک به ترتیب افزایش نیافته است. طی تحلیل‌های متعدد و با نرم‌افزارهای معتبر مختلف صحت نتایج آنالیز تأیید شد. با بررسی عمیق‌تر، مشخص گردید که با تعریف دوام مؤثر ۵ تا ۹۵ درصد شدت آریاس نمی‌توان مقایسه‌ی دقیقی بین دوام‌های کمتر و بیشتر انجام داد. از این رو یک آستانه‌ی شتاب حداقلی برابر با $g \pm 0.2$ انتخاب گردید و دوام شتابنگاشت‌ها از لحظه‌ی تجاوز از شتاب $g \pm 0.2$ تا کاهش از

جدول ۶: مقایسه‌ی مفاصل تشکیل شده در زلزله‌های انتخابی در سازه‌ی ۳ طبقه

| نام رکورد | دوام اصلاح شده بر اساس تجاوز یا کاهش از $g \pm 0.2$ | محدوده‌ی شدت آریاس معادل با زمان و دوام مشابه |
|------------|---|---|
| Moreno | ۷/۶ | ۱۴ تا ۷۸ درصد |
| Andoohjerd | ۸/۸ | ۱۲ تا ۷۴ درصد |
| Landers | ۲۲/۲ | ۱ تا ۷۰ درصد |

جدول ۷: مقایسه‌ی مفاصل تشکیل شده در زلزله‌های انتخابی در سازه‌ی ۱۵ طبقه

| نام رکورد | دوام ظاهری رکورد (%۵ تا %۹۵) | IO | LS | CP | نوع مفصل پلاستیک |
|------------|------------------------------|----|----|----|-----------------------|
| Andoohjerd | ۲۳/۳ | ۲ | ۴ | ۶ | تعداد مفاصل تشکیل شده |
| Moreno | ۳۳/۴ | ۱ | ۴ | ۸ | |
| Landers | ۴۴/۸ | ۰ | ۰ | ۱۳ | |

که با افزایش دوام لرزه‌ای، مقدار تغییر مکان‌های حداکثر سازه، تعداد مفاصل و نیز رفتار غیر ارتجاعی سازه افزایش می‌یابد. در تحلیل غیرخطی سازه‌ی سه طبقه نخست بررسی عمیق‌تری روی دوام انجام گرفت و آستانه‌ی شتاب حداقلی برابر با $g \pm 0.2$ در نظر گرفته شد و دوام شتاب نگاشت‌ها توسط نرم افزار Excel از لحظه‌ی تجاوز از شتاب $g \pm 0.2$ تا کاهش از شتاب $g \pm 0.2$ محاسبه گردید. با در نظر گرفتن مقدار دوام اصلاح شده بر پایه‌ی $g \pm 0.2$ ترتیب افزایش تغییر مکان‌های غیر ارتجاعی و مفاصل پلاستیک سازه محرز گردید.

خاطر نشان می‌گردد طبق تحلیل‌های متعدد نتیجه‌گیری گردید که سازه‌های بلند با شتاب‌های کمتر تحریک پذیر هستند. در صورت اصلاح دوام شتاب نگاشت‌ها برای سازه‌ی ۹ و ۱۵ طبقه بر اساس شتاب آستانه‌ی کمتر (نظیر $g \pm 0.1$)، تغییری در ترتیب دوام شتاب نگاشت‌ها ملاحظه نگردید. اما در سازه‌های کوتاه مرتبه، رتبه‌بندی دوام‌ها باید بر اساس شتاب‌های آستانه‌ی بیشتری نسبت به سازه‌های بلند انجام گیرد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که هر چه تعداد سیکل‌های یک شتاب نگاشت - که هم از نظر پریود متناظر نزدیک به پریود غالب سازه باشند و هم دامنه‌ی شتاب بیشتری داشته باشند - بیشتر باشد، آسیب پذیری سازه و افزایش تعداد مفاصل پلاستیک و حد آن‌ها بیشتر خواهد شد.

نتایج تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات زوال سختی و مقاومت در سازه‌های کوتاه و بلند مرتبه نشان داد:

۱. درصد تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب‌ها در زلزله‌های با دوام زیاد عموماً بیشتر از زلزله با دوام پایین است.
۲. با افزایش دوام لرزه‌ای، مقدار تغییر مکان‌های حداکثر سازه، تعداد مفاصل و نیز رفتار غیر ارتجاعی سازه افزایش می‌یابد.
۳. مشاهده گردید سازه‌های بلند نسبت به سازه‌های کوتاه به شتاب‌های پایه‌ی کمتری حساس اند و در نتیجه آسیب پذیرتر هستند و در این گونه سازه‌ها باید آستانه شتابی که در محاسبه‌ی دوام زلزله در نظر گرفته می‌شود را کمتر از ساختمان‌های کوتاه انتخاب نمود.
۴. آستانه‌ی شتاب برای در نظر گرفتن دوام واقعی باید با توجه به شرایط سازه از جمله هندسه و مقاطع و ارتفاع به گونه‌ای در نظر گرفته شود که آن شتاب باعث ایجاد رفتار غیرخطی در اعضا

دوام رکوردها ملاحظه گردید. از این رو به اصلاح دوام رکوردها برای سازه‌ی ۹ طبقه نیازی نیست.

به منظور تطبیق محدوده‌ی شتابی $g \pm 0.2$ با دامنه‌ی آریاس با سعی و خطا دامنه‌های مشابه زیر محاسبه گردید:

به طور مشابه و برای اطمینان بخشی از صحت استنتاج سه رکورد انتخاب شده بر مدل ساختمان ۱۵ طبقه اعمال گردیدند و تعداد مفاصل تشکیل شده به ازای هر زلزله و در هر سه سطح عملکرد محاسبه گردید. نتایج این تحلیل در جدول ۷ به طور خلاصه آمده است و نتایج همانند سازه‌ی ۹ طبقه نشانگر آن است که در سازه‌های بلند شتاب آستانه‌ی کمتر تأثیر بیشتری بر سازه دارد و همان ترتیب دوام آریاسی مطابق با ترتیب مفاصل ایجاد شده است.

یافته‌ها

در این تحقیق رکوردهای مختلفی بر اساس دوام‌های متفاوت انتخاب گردیدند و توسط نرم افزار SeismoArtif بر روی طیف خاک نوع ۲ آئین‌نامه ۲۸۰۰ و ساختگاه با لرزه‌خیزی بسیار زیاد ($g \pm 0.35$) مقیاس شدند. با این کار تأثیر انرژی ورودی زلزله‌ها و شرایط خاک در تمام شتاب نگاشت‌ها یکسان شد و مقایسه صرفاً روی دوام‌های مختلف قابل انجام گردید. در ادامه آن دسته از زلزله‌هایی که دارای شتاب تقریباً یکسان با زمان دوام مختلف بودند انتخاب شده و سازه‌های الگوی ۳، ۹ و ۱۵ طبقه توسط نرم افزار Siesmo Struct مدل سازی و تحت تحلیل غیر خطی با در نظر گرفتن اثرات زوال سختی و کاهش مقاومت قرار گرفتند. یافته‌ها نشانگر آن هستند که در سازه‌های کوتاه مرتبه افزایش دوام آریاسی الزاماً به معنی افزایش آسیب‌های وارد بر سازه نیست، بلکه آسیب‌های وارد بر سازه در سازه‌های کوتاه به مدت زمانی که سازه تحت شتاب آستانه‌ی بالاتری قرار گرفته است مرتبط است. در سازه‌های بلندتر سازه با شتاب‌های آستانه‌ی کمتری نیز آسیب پذیر می‌شود و افزایش دوام آریاسی می‌تواند نشانگر افزایش آسیب بیشتر باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات زوال سختی و مقاومت در سازه‌های نسبتاً بلند مرتبه (۹ و ۱۵ طبقه) نشان داد

12. Page, R.A., Boore, D.M., Joyner, W.B. and Caulter, H.W. (1972). *Ground Motion Values for use in the Seismic Design of the Trans-Alaska Pipeline System*, USGS Circular 672.
13. Bolt, B.A. (1969). *Duration of Strong Motion*, Proc. 4th World Conf. Earthquake Eng., 1304- 1315, Santiago, Chile.
14. Husid, L. R., (1969). Características de terremotos, Análisis general, Revista del IDIEM 8, Santiago del Chile, pp. 21-42.
15. Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975). *A study of the duration of strong earthquake ground motion*, Bulletin of the Seismological Society of America, 65, 581-626.
16. N. Nanos, A. Elenas and P. Ponterosso, (2008). *Correlation of Different Strong Motion Duration Parameters and Damage Indicators of Reinforced Concrete Structure*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
17. Housner, G.W. (1975). *Measures of the severity of ground shaking*. Proceedings U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Ann Arbor, Michigan, 25-33.
18. Uang, C.; Bertero, V. (1990). *Evaluation of seismic energy in structures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 77-90.
19. Shome, N.; Cornell, C.; Bazzurro, P. and Carballo, J. (1998). *Earthquakes, records, and nonlinear responses*, Earthquake Spectra 14 (3), 469-500.
20. Rahnema, M. and Manuel, L. (1996). *The effect of strong motion duration on seismic demands*, Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Mexico, Paper No. 924.
21. Khanzadi, M., Ghodrati Amiri, G. and Abdollahzadeh Darzi, G. (2007). *Earthquake Duration and Damping Effects on Input Energy*, college of civil Eng, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.
۲۲. قدرتی امیری، غلامرضا؛ محبی، بنیامین؛ حمیدی جمنانی، حامد (۱۳۸۸). بررسی رفتار تنزل یافته چرخه های هیستریزیس در تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه های بتن آرمه با شکل پذیری متوسط، دانشگاه علم و صنعت ایران. <http://fa.journals.sid.ir/ViewPaper.aspx?id=۱۲۴۸۳۶>
23. Gong, M. S. & Xie, L. (2004). *The Use Of Input Energy For Seismic Hazard Assessment With Different Ductility Level*, 13 th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, Canada www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1083.pdf
24. Huang, W., Qian, J., Zhuang, B. and Fu, Q. (2012). *Damage Assessment of RC Frame Structures under Multi-Earthquake Sequences*, Tongji University, P.R.China
۲۵. خوش رفتار، علی؛ عباس نیا، رضا (۱۳۸۵). مطالعه‌ی تأثیر کاهش مقاومت درآسیب پذیری لرزه‌ای سازه‌های بتنی، اولین کنفرانس ملی بهسازی و مقاوم سازی ایران، تهران، مرکز ملی مقاوم سازی ایران.

گردد. به عبارت دیگر در نظر گرفتن سیکل‌هایی از شتاب‌نگاشت که سازه در اثر آن‌ها فقط رفتار خطی نشان می‌دهد و نسبت نیرو به ظرفیت اعضا در حد کمی باشد در دوام واقعی سازه و مقایسه‌ی نسبی رکوردها با آن دوام درست نیست.

پی‌نوشت

1. Bracketed Duration
2. Significant

منابع

1. Raghunandan, M. (2013). *Influence of Long Duration Ground Shaking on Collapse of Reinforced Concrete Structures*, M.S., University of Colorado at Boulder.
2. Michael W.Salmon, Steven A.Short, (1992). *Strong Motion Duration and Earthquake Magnitude Relationships*, University of California www.osti.gov/servlets/purl/67453/
3. Chai Y.H., Fajfar P. and Romstad K.M. (1998). *Formulation of duration-dependent inelastic seismic design spectrum*. J.of Struct. Eng. 124(8): 913-921.
۴. هفت لنگ، مهدی (۱۳۹۰). تعیین رابطه میان مدت دوام زلزله با بزرگای فاصله و شرایط زمین شناسی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران.
5. FEMA P440A, (June 2009). *Effects of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response*, Applied Technology Council, California 94065, www.AT-Council.org
6. Silvena Stoeva Reshotkina (2015). *3D Stiffness and Strength Degradation Models for Seismic Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Structures – Formulations and Implementations Framework*, Dissertation for Doctor of Philosophy In Civil Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario.
7. Adel E. Abdelnaby (2012). *Multiple Earthquake Effects On Degrading Reinforced Concrete Structures*, Dissertation for Doctor Of Philosophy In Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
8. Bhargob Deka, Syed Nafifur Rahman, Pranjal Tamuly (2014). *Damage Assessment of RC Frame Structures under Long Duration Aftershock Ground Motion*, Guwahati, Assam, India, https://www.ijirset.com/upload/2014/september/50_Damage.pdf
9. A.E. Abdelnaby and A.S. Elnashai (2012). *Response of Degrading Reinforced Concrete Systems Subjected to Replicate Earthquake Ground Motions*, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa.
10. Adel E. Abdelnaby, Amr S. Elnashai (2014). *Performance of Degrading Reinforced Concrete Frame Systems Under the Tohoku and Christchurch Earthquake Sequences*, Journal of Earthquake Engineering, 18:7, 1009-1036, DOI: 10.1080/13632469.2014.923796
۱۱. تهرانی زاده، محسن؛ حامدی، فرزانه (۱۳۷۸). تعیین مدت زمان دوام زلزله‌های ایران و ارتباط آن با پارامترهای مختلف، سومین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، اردیبهشت ۱۳۷۸.