اثر زلزله و پس‌لرزه‌های متوالی بر پاسخ غیرارتجاعی قاب بتن مسلح

سیدامین حسینی، علی معصومی*؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی

تاریخ: دریافت ۹٤/۹/۸ **پذیرش** ۹۵/۱/۱۵

چکیده

رخداد زلزله در مناطق زلزله‌خیز به‌صورت اتفاق تنها نیست، بلکه در اغلب موارد زلزله به‌صورت زنجیره‌ای از حرکات زمین با شدت‌های متفاوت و به‌صورت پی‌درپی در منطقه رخ می‌دهد. این سلسله زلزله‌ها اغلب به زلزله‌های پی‌درپی اصلی و پس‌لرزه‌ها یا زلزله‌های تکراری تعبیر می‌شود. در این پژوهش رفتار لرزه‌ای قاب بتن مسلح تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های مختلف حداکثر شتاب پس‌لرزه به زلزله اصلی ارزیابی می‌شود. در پژوهش حاضر تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی روی قاب بتن مسلح تحت اثر زلزله اصلی و زلزله‌ها متوالی اجرا شده است. به‌منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای قاب تحت اثر زلزله‌های متوالی از پارامتر جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات استفاده شده است. نتایج این تحقیق برای قاب بررسی شده نشان می‌دهد که، جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات به‌شدت حداکثر شتاب پس‌لرزه به زلزله اصلی وابسته است و با افزایش شدت پس‌لرزه این پارامتر افزایش می‌یابد. از طرفی رشد پاسخ ماندگار طبقات تحت اثر پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی در طبقات بالا محسوس‌تر بوده است.

واژه‌های کلیدی: زلزله‌های متوالی، قاب بتن مسلح، جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات، تحلیل تاریخچهٔ زمانی غیرخطی

* **نویسنده مسئول** massumi@khu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

مقدمه

در مناطق لرزه‌خیز اغلب علاوه بر زلزله اصلی یک‌سری پیش‌لرزه یا پس‌لرزه با شدت‌های متفاوت (ضعیف تا قوی) رخ می‌دهد. این زلزله‌های متوالی با فاصله زمانی کوتاه و یا حتی چند روز و تا چند ماه بعد از وقوع زلزله اصلی رخ می‌دهند. با توجه به تجربیات گذشته، پس‌لرزه‌ها اغلب به‌صورت ناگهانی بعد از زلزله‌اصلی و به‌دلیل تنش‌های استاتیکی و دینامیکی در طی فرآیند زلزله رخ خواهند داد [۱].

در این نوع رخدادها سازه‌هایی که تحت اثر زمین لرزه‌های اصلی خسارت دیده‌اند، در صورتی که پس‌لرزه‌ها با فاصله زمانی کوتاه به سازه اعمال شوند به‌دلیل این فاصله زمانی کوتاه بین زلزله اصلی و پس‌لرزه‌های متوسط و قوی و هم‌چنین با توجه به این‌که سازه‌های آسیب دیده تحت اثر زلزله اصلی هنوز تقویت و مقاوم‌سازی نشده‌اند امکان پیشرفت ناحیهٔ خسارت دیده در سازه تحت اثر پس‌لرزه افزایش می‌یابد [۱]، [۲]. حتی سازه‌ها تحت اثر پس‌لرزها می‌توانند بدون افزایش خسارت و فقط با افزایش جابه‌جایی دائمی تا حد تخریب پیش روند [۳]. این پدیده به‌صورت خسارت تجمعی در نتیجه زلزله‌های متوالی به‌وجود می‌آید که در بررسی‌های محلی زلزله‌های متوالی گذشته تأیید شده است. در زلزله متوالی طبیعی تعداد زیادی پس‌لرزه بعد از وقوع زلزله اصلی رخ می‌دهد که تحلیل سازه با در نظرگرفتن تمام پس‌لرزه‌ها زمان‌بر است و در نتیجه تنها تعدادی پس‌لرزه با شرایط مشخص و یا فقط بزرگ‌ترین پس‌لرزه در نظر گرفته می‌شود [۱].

به‌عنوان نمونه پس از وقوع زلزله اصلی ماموت لیکس[1] که در سال ۱۹۸۰ با حداکثر شتاب PGA=0.441g اتفاق افتاد حدود یک روز بعد پس‌لرزه‌ای با حداکثر شتاب PGA=0.390g به‌دنبال زلزله اصلی رخ داد. شکل ۱ شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله متوالی ماموت‌لیکس را نشان می‌دهد [٤].

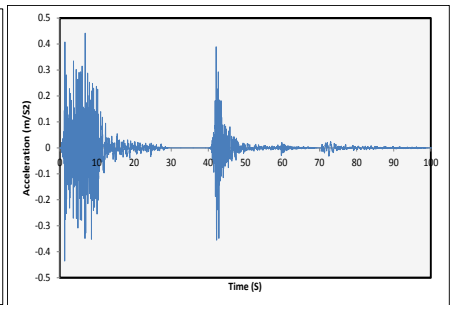
در شکل ۲ شتاب طیفی مربوط به زلزله متوالی ماموت لیکس در مقایسه با زلزله اصلی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ شتاب‌طیفی زلزله‌های متوالی به‌شدت این پارامتر

1. Mammoth Lakes

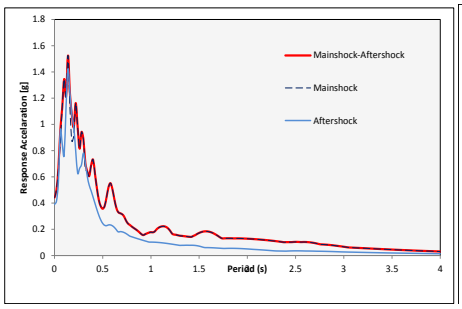
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

مربوط به زلزله اصلی خیلی نزدیک است، و می‌توان گفت که طیف شتاب زلزله متوالی به میزان چشم‌گیری به طیف زلزله اصلی وابسته است.



شکل۱. تاریخچهٔ شتاب زلزله متوالی ماموت لیکس(۱۹۸۰)



شکل۲. مقایسهٔ طیف شتاب زلزله متوالی ماموت لیکس(۱۹۸۰)

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته تقریباً در تمامی آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها هیچ‌گونه اشاره‌ای به تأثیر زلزله‌ای متوالی بر عمل‌کرد لرزه‌ای سازه‌ها نشده است. از طرفی در آیین‌نامه‌های ساختمانی موجود به‌منظور مقاصد تحلیل و طراحی فقط یک زلزله مشخص تحت عنوان «زلزله طرح» استفاده می‌شود. شایان ذکر است که در آیین‌نامه‌های موجود مقادیر مشخصی برای ارزیابی خسارت وارد بر سازه با استفاده از اندازه‌گیری جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات ارائه نشده است [۵]، [٦]، [۷].

در این مقاله پاسخ لرزه‌ای قاب بتن مسلح تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های مختلف حداکثر شتاب پس‌لرزه به زلزله اصلی (PGAas/PGAms) ارزیابی شده است. به‌منظور بررسی پاسخ غیرارتجاعی قاب بتن مسلح از پارامترجابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات[1](RIDR) استفاده شده است.

در این تحقیق به‌منظور بررسی عمل‌کرد لرزه‌ای قاب بتنی مورد نظر تحت اثر زلزله‌های متوالی در مقایسه با زلزله اصلی، تحلیل تاریخچهٔ زمانی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها IDARC-2D V.6.0، اجرا می‌شود. در مدل‌سازی قاب مورد نظر در نرم‌افزار IDARC از المان بر مبنای پلاستیسیته گسترده استفاده می‌شود، هم‌چنین در

1. Residual Interstory Drift Ratio

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

تمامی تحلیل‌ها اثرات P-Delta در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی پارامترهای هیسترتیک اختصاص داده شده به المان‌های قاب مذکور مطابق با مثال ٤,۲ راهنمای نرم‌افزار در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است در این مدل از ضرایب افت سختی و افت مقاومت ناچیزی استفاده شده است [۸].

جدول ۱.پارامترهای هیسترتیک متناظر با نتایج آزمایشگاهی [۸]

پارامتر افت سختی (HC)	پارامتر افت مقاومت (بر مبنای شکل‌پذیری) (HBD)	پارامتر افت مقاومت (بر مبنای انرژی) (HBE)	پارامتر لغزش (لهیدگی) (HS)
۲۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۱/۰
کاهندگی ناچیز	افت ناچیز	افت ناچیز	بدون له‌شدگی

پژوهش‌های پیشین در زمینهٔ زلزله‌های متوالی

اموری درسال ۱۸۹۵ بررسی روی اثرات پس‌لرزه‌ها را بر پاسخ غیرارتجاعی سازه‌ها شروع کرد، نتیجه کار اموری نشان داد که میزان پس‌لرزه‌ها با افزایش زمان بعد از زلزله اصلی کاهش می‌یابد [۹]. پس از این پژوهش، مهین (۱۹۷۲) اولین بررسی تحلیلی بر سازه‌های تک درجهٔ آزاد و غیرخطی را تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده زلزله‌های متوالی سال ۱۹۷۲ ماناگوا انجام داده است، او مشاهده کرد که جابه‌جایی و شکل‌پذیری تقاضا (μ) که برابر نسبت حداکثر جابه‌جایی غیرارتجاعی نرمال شده به جابه‌جایی تسلیم سیستم، در مورد سیستم‌های الاستوپلاستیک با سرعت کمی در انتهای پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی افزایش می‌یابد. هم‌چنین وی به این نتیجه رسید که مدت زمان زلزله‌های قوی می‌تواند اثرات چشم‌گیری بر تغییر شکل غیر ارتجاعی و اتلاف انرژی تقاضا داشته باشد [۱۰].

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، علاوه بر پژوهش‌های یاد شده، چندین محقق بررسی‌های خود را روی ارزیابی عمل‌کرد سازه‌های تحت اثر زلزله‌های متوالی انجام دادند. بعضی از این محققان مانند آمادیو و همکاران (۲۰۰۳)، هاتزیجورجیو و بسکاس (۲۰۰۹)، دی‌سارنو (۲۰۱۳) و ژی و همکاران (۲۰۱٤) تحقیقات خود را بر پاسخ غیر ارتجاعی سازه‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

تک درجهٔ آزاد تحت اثر زلزله‌ای متوالی مانند نسبت جابه‌جایی غیرارتجاعی، شکل‌پذیری تقاضا و طیف خسارت متمرکز کرده‌اند [۲]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. از طرفی گارسیا (۲۰۱۲)، فیصل و همکاران (۲۰۱۳)، گارسیا و همکاران (۲۰۱٤)، گارسیا و آگیار (۲۰۱٤)، جیون و همکاران (۲۰۱۵) بررسی‌هایی بر پاسخ سازه‌های چند درجهٔ آزاد تحت اثر زلزله‌های متوالی انجام داده‌اند. در ایران رضایی و معصومی (۱۳۹۱) و معصومی و حسینی (۲۰۱۵) در زمینه ارزیابی عملکرد سازه‌های چند درجهٔ آزاد تحت اثر زلزله‌های متوالی پژوهش‌هایی را انجام داده‌اند [۱]، [۳]، [۵]، [۱٤]–[۱۷].

سازهٔ بررسی شده تحت اثر زلزله‌های متوالی

در این پژوهش، یک قاب میانی از ساختمان شش طبقه و سه دهانه بتنی با کاربری بیمارستان و در محل شهر تهران در نظر گرفته شده است. قاب مذکور دارای دهانه ۵ متری و ارتفاع آزاد ۳/۲۰ متر است. سیستم سقف از نوع تیرچه‌بلوک و سیستم باربر جانبی از نوع قاب خمشی ویژه انتخاب شده است. اتصال تیر به ستون به‌صورت کاملاً صلب و اتصال پای ستون‌ها گیردار است (شکل ۳).

طراحی قاب یاد شده مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و تحت اثر بارهای مرده، زنده و زلزله تعیین‌شده بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ صورت گرفته است. همهٔ قاب‌ها دارای عرض باربر ۵ متر و در تمام طبقات سازه دارای بار مرده ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع هستند. در فرآیند تحلیل و طراحی این قاب، مقاومت فشاری بتن برابر ۲۸ مگاپاسکال، مقاومت کشش آرماتور طولی ٤۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی آرماتور عرضی ۳۰۰ مگاپاسکال فرض شده‌اند.

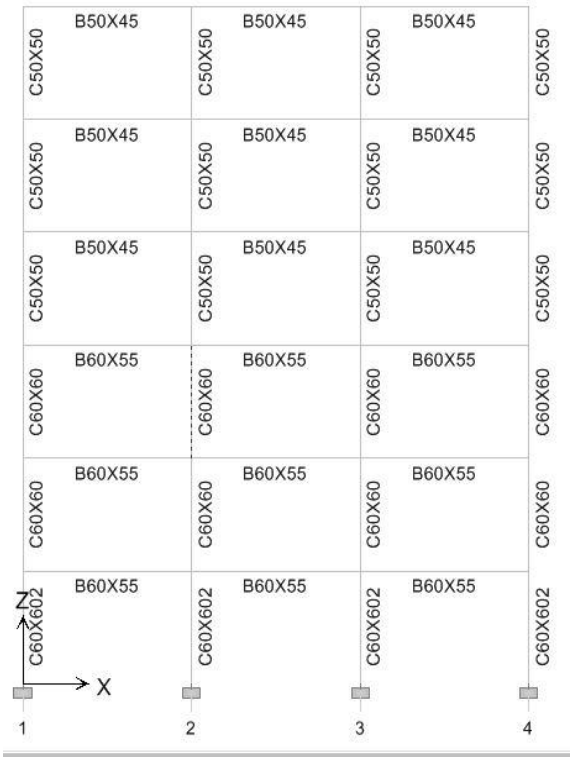
نگاشت‌های زلزله‌های متوالی انتخاب شده

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی پاسخ غیرارتجاعی قاب بتن مسلح تحت اثر زلزله‌های متوالی، سه دسته زلزله متوالی که فاصله وقوع زلزله اصلی با بزرگ‌ترین پس‌لرزه متناظر با آن کم‌تر از یک هفته بوده است، از پایگاه اطلاعات زمین‌لرزه‌های قوی (PEER) انتخاب شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

است (جدول ۲). در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها سعی شده است از رکوردهای حوزه دور و فاقد پالس استفاده شود. باید توجه داشت که بر اساس تجربیات گذشته، در بعضی از موارد سازه خسارت دیده از زلزله اصلی تحت اثر پس‌لرزه‌هایی با شدت‌های مختلف قرار می‌گیرد، و این در حالی است که عملیات ترمیم و به‌سازی بر سازه خسارت دیده هنوز صورت نگرفته است.



شکل ۳. قاب بررسی شده

بر اساس پیشنهاد گارسیا و همکاران (۲۰۱٤) به‌منظور بررسی عمل‌کرد لرزه‌ای سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های مختلف، از زلزله‌های متوالی با حداکثر شتاب پس‌لرزه به زلزله اصلی متفاوتی استفاده شده است [۳]. در این بررسی نسبت حداکثر شتاب زمین مربوط به پس‌لرزه (PGAas) به حداکثر شتاب زمین مربوط به زلزله اصلی (PGAms) به‌صورت نسبت‌های (PGAas/PGAms=0.35, 0.7, 1.0) در نظر گرفته شده است و هم‌چنین از رکورد واقعی زلزله متوالی (As-Recorded) در تحلیل‌ها استفاده شده است

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

(شکل٤). طی بررسی‌های صورت گرفته در زلزله‌های ثبت شده مشخص شد که در زلزله‌های متوالی نیوزلند ۲۰۱۰/۲۰۱۱، رخداد پس‌لرزه با حداکثر شتاب مساوی و یا حتی بیش‌تر از زلزله اصلی اتفاق افتاده است. این ویژگی پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی با ماهیت تعریف زلزله اصلی و پس‌لرزه در تناقض نیست زیرا با وجود حداکثر شتاب بیش‌تر پس‌لرزه، بزرگای پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی عدد کوچک‌تری بوده است [۱۸].

باید توجه داشت که پس‌لرزه‌ها با فاصله زمانی مختلف نسبت به زلزله اصلی رخ می‌دهند که در نظرگرفتن این فاصله موجب افزایش زمان تحلیل می‌شود و بدین منظور بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته انتخاب فاصلهٔ زمانی ۱۰ ثانیه با شتاب صفر بین دو تحریک به‌منظور ساکن شدن قاب تحت اثر تحریک زلزله اصلی مناسب به‌نظر می‌آید.

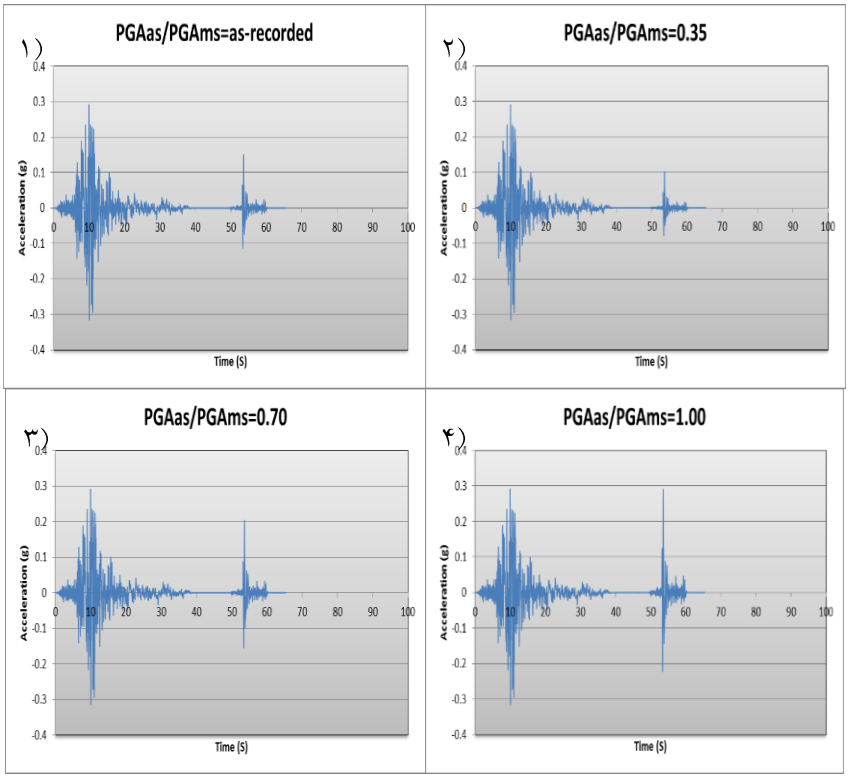
جدول ۲. زلزله‌های متوالی انتخاب شده از پایگاه اطلاعات (PEER)

شمارهٔ زلزله متوالی	نام رکورد	ایستگاه	تاریخ	ساعت	PGA (g)	نوع زلزله
۱	Imperial Valley	EL Centro Array #2	۱۹۷۹.۱۰.۱۵	۲۳:۱٦	۰/۳۱۵	زلزله اصلی
۱	Imperial Valley	EL Centro Array #2	۱۹۷۹/۱۰/۱۵	۲۳:۱۹	۰/۱۵۰	پس‌لرزه
۲	Mammoth Lakes	54301 Mammoth Lakes	۱۹۸۰/۰۵/۲۵	۱٦:٤۹	۰/٤٤۱	زلزله اصلی
۲	Mammoth Lakes	54301 Mammoth Lakes	۱۹۸۰/۰۵/۲٦	۱۸:۵۸	۰/۳۹۰	پس‌لرزه
۳	Coalinga	46T04 CHP	۱۹۸۳/۰۷/۲۲	۰۳:٤۳	۰/۷۳۳	زلزله اصلی
۳	Coalinga	46T04 CHP	۱۹۸۳/۰۷/۲۵	۲۲:۳۱	۰/٤۳۱	پس‌لرزه

نتایج تحلیل سازه تحت اثر زلزله‌های متوالی

زمانی که یک‌سری زلزله متوالی در منطقه‌ای اتفاق می‌افتد میزان جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات در اغلب سازه‌های آن منطقه افزایش می‌یابد. از طرفی جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات می‌تواند به‌عنوان معیار مناسبی برای بیان میزان خسارت وارده بر سازه تحت اثر زلزله اصلی تعیین گردد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]



شکل ٤. تاریخچهٔ شتاب زلزله متوالی امپریال ولی (۱۹۷۹): ۱) ثبت‌شده، ۲) PGAas/PGAms=0.35، ۳) PGAas/PGAms=0.70، ٤) PGAas/PGAms=1.00

این پارامتر به‌راحتی و بدون نیاز به امکانات و آزمایش‌های زمان‌بر و پیشرفته محاسبه می‌شود. این ارزیابی بدین‌صورت است که به‌منظور برآورد خسارت وارده بر سازه تحت اثر زلزله اصلی، یک گروه متخصص مهندسی عمران به محل وقوع زلزله اعزام شده و میزان جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات را اندازه‌گیری کرده و با مقادیر موجود در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مقایسه می‌کنند، پس از این ارزیابی اولیه ظرفیت سازه خسارت دیده بررسی می‌شود و در صورت وجود ظرفیت قابل قبول برای پس‌لرزه‌های متوالی احتمالی اجازه استفاده از سازه به کاربران داده می‌شود. لازم به ذکر است که در آیین‌نامه‌های موجود معیار مشخصی برای ارزیابی خسارت وارد بر سازه، با استفاده از اندازه‌گیری جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات، به

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

وضوح ارائه نشده است. به‌نظر می‌رسد در مورد این گونه ارزیابی‌های سریع، با استفاده از پارامترهای میدانی قابل اندازه‌گیری، روند تصمیم‌گیری در مورد وضعیت سازه خسارت دیده تسریع می‌شود.

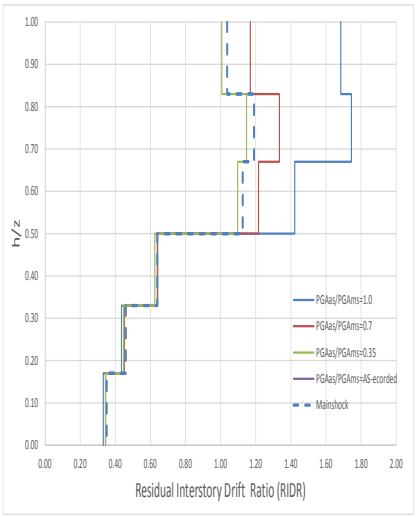
بر این اساس در این مقاله پارامتر جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات به‌عنوان پارامتر کلیدی برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب تحت اثر زلزله‌های متوالی استفاده شده است. در ادامه قاب موردنظر تحت اثر سه نوع زلزله متوالی با نسبت حداکثر شتاب پس‌لرزه به زلزله اصلی مختلف تحلیل‌شده است، پس از اجرای تحلیل‌های تاریخچه زمانی زلزله‌ای متوالی نتایج حاصل‌شده را با پارامترهای مشابه در انتهای زلزله اصلی مقایسه شده است.

در شکل ۵ جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی شمارهٔ ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات قاب موردنظر تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های بیش‌تر پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی رشد محسوسی داشته است. به‌عنوان نمونه، تحت اثر زلزله متوالی با پس‌لرزه‌های بسیار شدید (PGAas/PGAms=1.0) در طبقات چهارم، پنجم و ششم قاب جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات پس از زلزله متوالی نسبت به زلزله اصلی رشد چشم‌گیری (تقریباً تا ٦٠ درصد) داشته است؛ این در حالی است که میزان رشد طبقات پایین‌تر محسوس نیست.

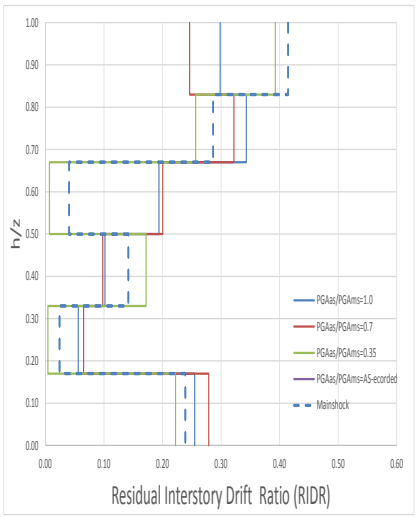
در شکل ٦ جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی شمارهٔ ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ٦، جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات قاب موردنظر تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های بیش‌تر پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی در بعضی از طبقات افزایش دارد. به‌عنوان نمونه، تحت اثر زلزله متوالی با پس‌لرزه نسبت شدید (PGAas/PGAms=0.7) در طبقات اول، دوم، چهارم و پنجم قاب جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات پس از زلزله متوالی نسبت به زلزله اصلی افزایش یافته است؛ این درحالی‌که است که با توجه به شکل ٦ رشد جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر پس‌لرزه‌های خفیف (PGAas/PGAms=0.35) نسبت به زلزله اصلی قابل صرف‌نظر است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

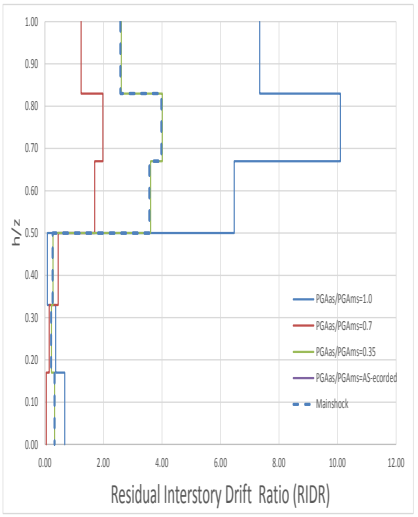
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]



شکل۵. جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی شمارهٔ ۱



شکل٦. جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی شمارهٔ ۲



شکل۷. جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی شمارهٔ ۳

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

در شکل ۷ جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی شماره ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷، جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات قاب موردنظر تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های بیش‌تر پس‌لرزه نسبت به زلزله اصلی در طبقات بالاتر رشد کاملاً متفاوتی داشته است. به‌عنوان نمونه، تحت اثر زلزله متوالی با پس‌لرزه شدید (PGAas/PGAms=1.0) در طبقات چهارم، پنجم و ششم رشد محسوسی داشته است و این در حالی است که، تحت اثر زلزله متوالی با پس‌لرزه نسبتا شدید (PGAas/PGAms=0.7) در طبقات چهارم، پنجم و ششم جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات کاهش یافته است، از طرفی کماکان رشد جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر پس‌لرزه‌های خفیف (PGAas/PGAms=0.35) نسبت به زلزله اصلی قابل صرف‌نظر است.

با توجه به شکل‌های ۵، ٦ و ۷ مشخص می‌شود که تحت اثر زلزله‌های متوالی با نسبت پس‌لرزه به زلزله اصلی خفیف (PGAas/PGAms=0.35, As-recorded) رشد جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات در اکثر طبقات ناچیز است، در این موارد تنها در نظر گرفتن زلزله اصلی برای بررسی عمل‌کرد سازه قابل‌قبول است.

هم‌چنین از شکل‌های ۵، ٦ و ۷ مشخص است، رشد جابه‌جایی ماندگار نسبی طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی با نسبت پس‌لرزه به زلزله اصلی شدید و نسبتاً شدید (PGAas/PGAms=1.0, 0.7) بسیار چشم‌گیر است و در مقاصد مهندسی باید به اثر زلزله‌ای متوالی شدید و نسبتاً شدید بر عمل‌کرد لرزه‌ای سازه‌های حیاتی مانند بیمارستان و مراکز امدادی مورد توجه قرار گیرد، بر این اساس به‌نظر می‌رسد ارزیابی رفتار لرزهٔ ساختمان‌های حیاتی خسارت دیده از زلزله اصلی، تحت اثر زلزله‌ای متوالی مهم است، و نیاز به بررسی تحلیلی مجدد این‌گونه از ساختمان‌ها ضروری است و در صورت نیاز، اقدامات لازم به‌منظور به‌سازی ساختمان‌های حیاتی تحت اثر پس‌لرزه‌ها انجام شود.

علاوه برموارد فوق، با توجه به بررسی رشد جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های مختلف پس‌لرزه به زلزله اصلی می‌توان دریافت که در قاب ٦ طبقه تحلیل‌شده، میزان رشد جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات بالاتر به‌مراتب بیش‌تر از طبقات

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

پایین قاب بوده است؛ و این در حالی است که در طبقات پایین‌تر قاب، رشد جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌ای متوالی با شدت‌های مختلف نسبت به زلزله اصلی رشد چشم‌گیری نداشته است. این نکته قابل مشاهده است که، تقریباً در اکثر نسبت‌های شدت پس‌لرزه به زلزله اصلی جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات پایین‌تر تحت اثر زلزله‌های متوالی نسبت به زلزله اصلی رشد چشم‌گیری نداشته است.

از طرفی مطابق با شکل‌های مذکور باید توجه داشت که جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات به‌عنوان پارامتر کلیدی در ارزیابی سریع میدانی پاسخ سازه به زلزله اصلی و وضعیت سازه خسارت‌دیده می‌تواند مفید باشد و از طرفی باید توجه داشت که بزرگی جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات می‌تواند نشان از وضعیت بحرانی سازه پس از وقوع زلزله را داشته باشد و این درحالی است که، کوچک بودن این پارامتر نمی‌تواند نشان از خسارت کم سازه باشد، زیرا ممکن است سازه پس از حرکت چرخه‌ای در حداکثر مقدار جابه‌جایی به حالت سکون نرسیده باشد. در نهایت ذکر این نکته قابل تأمل است که، این پارامتر هیچ برداشتی از پاسخ دینامیکی و چرخه‌ای سازه به مهندس ارزیابی نخواهد داد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عمل‌کرد لرزه‌ای قاب بتنی تحت اثر زلزله‌های متوالی با شدت‌های متفاوت پس‌لرزه به زلزله اصلی بررسی شده است. برای مقایسه پاسخ سازه تحت اثر زلزله‌های متوالی با زلزله اصلی جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات ارزیابی شد. نتایج تحلیل تاریخچهٔ زمانی غیرخطی در سازه استفاده شده در این تحقیق و در مقابل زلزله‌های متوالی در نظر گرفته شده در این پژوهش نشان می‌دهد جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات تحت اثر زلزله‌های شدید و نسبتاً شدید چشم‌گیر است، و این در حالی است که زلزله‌های متوالی خفیف تأثیر چندانی در افزایش جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات نداشته است.

به عنوان نتیجه‌گیری دیگر می‌توان اشاره کرد که پس‌لرزه‌ای شدید در طبقات بالاتر قاب نسبت به طبقات پایین‌تر تأثیر بیش‌تر داشته‌اند و این درحالی است که، تاثیر پس‌لرزه‌های شدید

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

بر جابه‌جایی نسبی ماندگار طبقات پایین قاب محسوس نیست و نسبت به زلزلـه اصـلی رشـد چشم‌گیری نداشته است.

منابع

1. Ruiz-García J., "Issues on the response of existing buildings under mainshock–aftershock seismic sequences", in 15th World conference on earthquake engineering (2012).
2. Zhai C.H., et al., "The damage investigation of inelastic SDOF structure under the mainshock-aftershock sequence-type ground motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **59** (2014) 30-41.
3. Ruiz-García J., Marín M.V., Terán-Gilmore A., "Effect of seismic sequences in reinforced concrete frame buildings located in soft-soil sites", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **63** (2014) 56-68.
4. PEER Ground Motion Database.
5. Hosseini S.A., Massumi A., "Evaluation of Essential Structures Performance Under Mainshock-AfterShocks Sequence-Type Ground Motions in 7th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering (SEE7) (2015) Iran.
6. IBC(2000), "International Building Code,2000", International Code Council, U.S.A. (2000).

۷. *استاندارد طراحـی ساختمان‌ها در برابـر زلزلـه* (اسـتاندارد ۲۸۰۰)، ویـرایش سـوم، مرکـز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی (۱۳۸٤).

8. Park Y.J., Reinhorn A.M., Kunnath S.K., "IDARC: Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures" (1987).
9. Omori F., "On the after-shocks of earthquakes" (1895).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]

10. Mahin S.A., "Effects of duration and aftershocks on inelastic design earthquakes", in Proceedings of the 7th world conference on earthquake engineering (1980).
11. Amadio C., Fragiacomo M., Rajgelj S., "The effects of repeated earthquake ground motions on the non-linear response of SDOF systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **32** (2003) (2) 291-308.
12. Hatzigeorgiou G.D., Beskos D.E., "Inelastic displacement ratios for SDOF structures subjected to repeated earthquakes", Engineering Structures (2009) 2744-2755.
13. Di Sarno L., "Effects of multiple earthquakes on inelastic structural response", Engineering Structures, **56** (2013) 673-681.
14. Faisal A., Majid T.A., Hatzigeorgiou G.D., "Investigation of story ductility demands of inelastic concrete frames subjected to repeated earthquakes", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **44** (2013) 42-53.
15. Ruiz-García J., Aguilar J.D., "Aftershock seismic assessment taking into account postmainshock residual drifts", Earthquake Engineering & Structural Dynamics (2014).
16. Jeon J.S., et al., "Framework of aftershock fragility assessment-case studies: older California reinforced concrete building frames", Earthquake Engineering & Structural Dynamics (2015).
۱۷. رضایی ح.، ارزیابی عملکرد سازه‌های بتن مسلح تحت اثر زلزله‌های متوالی، راهنما دکتر علی معصومی، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی (۱۳۹۱).
18. Ruiz-García J., "Three-dimensional building response under seismic sequences".

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.5.3.1]