

تأثیر نامعینی بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن مسلح

رامین محمدی^۱، علی معصومی^{۲*}، افشین مشکوه‌الدینی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه خوارزمی

۲- دانشیار مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی

۳- استادیار مهندسی زلزله، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی

massumi@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۰۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۲۸

چکیده - نامعینی سازه‌ها یک مفهوم نامستقل در مهندسی سازه است که وابستگی ذاتی به عواملی چون مقاومت افزون و شکل‌پذیری سازه‌ها دارد؛ با این وجود بیشتر پژوهشگران افزایش نامعینی را خاصیتی مطلوب در سازه‌ها برای مقابله مؤثر در برابر بارهای تصادفی مانند بارهای زلزله می‌دانند. در این پژوهش برای تفکیک نقش نامعینی از مقاومت‌افزون، تعدادی سازه بتن مسلح با سیستم قاب خمشی که مقاومت نهایی یکسان دارند طرح شده است. رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها، از نقطه نظر پارامترهای پاسخ دینامیکی سازه‌ها، تحت شتاب‌نگاشت‌های طبیعی زلزله ارزیابی شده است؛ و کفایت ضرایب رفتار به دست آمده در این پژوهش، به عنوان شاخصی از کیفیت رفتار سازه‌ها در زلزله، بررسی شده است. نتایج حاصل بیانگر این است که: الف) افزایش نامعینی به تنهایی نمی‌تواند معیاری برای بهبود رفتار سازه‌ها تلقی شود و باید تأثیر نامعینی بر سایر پارامترهای مؤثر بر رفتار سازه‌ها لحاظ شود. ب) ضرایب رفتار به دست آمده در این پژوهش می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت رفتار سازه‌ها، برای بارگذاری‌هایی که در سازه تغییر مکان نسبی به میزان مشخصی ایجاد می‌کنند، باشد؛ اما برای بارگذاری‌هایی که تغییر مکان نسبی بیش از آن حد مشخص ایجاد می‌کنند، رفتار سازه‌ها به طور معمول از ضریب رفتار تبعیت نمی‌کند.

واژگان کلیدی: نامعینی، شکل‌پذیری، رفتار لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی با شتاب فزاینده

۱- مقدمه

نیروهای ارتجاعی به نیروهای طراحی به وسیله‌ی این ضریب صورت می‌پذیرد [۱]. پارامترهای یاد شده علاوه بر این که مستقل از یکدیگر نیستند، هر یک تابعی از نوع بارگذاری است. سازه‌های طراحی شده بر اساس نیروی کاهش یافته با ضریب رفتار، برای این که عملکرد مورد انتظار را از خود بروز دهند باید از نامعینی و مقاومت‌افزون کافی و شکل‌پذیری قابل قبول برخوردار باشند تا بتوانند انرژی ورودی زلزله را با رفتار

سازه‌ها به لحاظ ویژگی‌هایی مانند شکل‌پذیری، مقاومت افزون و نامعینی می‌توانند انرژی ورودی زلزله را با تغییر شکل‌های غیرارتجاعی و باز توزیع نیروها تحمل کرده و در زلزله‌های محتمل برای منطقه‌ای که در آن احداث می‌شوند، پایداری کلی خود را حفظ کنند. اثر ویژگی‌های یاد شده بر استهلاک انرژی ورودی زلزله در ضریب رفتار دیده شده است و کاهش

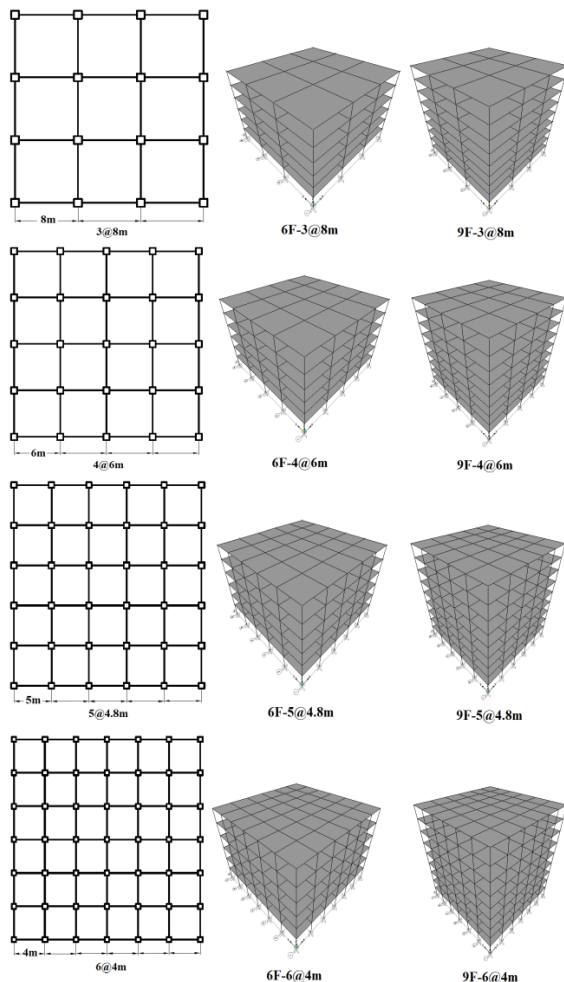
این صورت، اعضای بدون خرابی می‌توانند از تغییر مکان‌های سازه تبعیت کرده و به اعضای دیگر اجازه دهد که انرژی ورودی را مستهلک کند [۵ و ۶]. از دیگر سودمندی‌های نامعینی می‌توان به وجود مسیرهای جایگزین برای جابه‌جایی بار اعضای آسیب دیده در حوادث تصادفی مثل انفجار که منجر به حذف برخی اعضای سازه‌ای شده است، اشاره کرد [۷ و ۶]. در این مواقع، افزایش نامعینی می‌تواند از تخریب ناگهانی سازه جلوگیری کرده تا سازه به صورت تدریجی و پیشرونده دچار خرابی شود. رویکرد اخیر به نامعینی بعد از تخریب برج‌های دوقلو در ایالات متحده، بیشتر مورد توجه واقع شده است. پارامترهای تشکیل دهنده ضریب رفتار به طور معمول بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی برآورد می‌شوند که در آن سازه در معرض یک بارگذاری ثقلی ثابت و یک بارگذاری یکنواخت جانبی قرار می‌گیرد. اکنون سوال این است که بارگذاری یکنواخت در تحلیل استاتیکی غیرخطی تا چه میزان بیانگر رویداد واقعی لرزه‌ای است. از طرفی سازه‌ها تحت چه بارگذاری‌هایی می‌توانند با عملکرد هیسترتیک خمیری، انرژی زلزله را مستهلک نمایند و نقش نامعینی در این بین چیست؟ در مقاله حاضر برای پاسخ به این سوالات مفهومی و شفاف‌سازی نقش نامعینی، رفتار لرزه‌ای تعدادی قاب خمشی بتن مسلح که ضریب کاهش بر اثر مقاومت افزون (R_s) در آنها مقدار ثابتی است، ارزیابی شده است. بررسی پارامترهای پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌های مطالعه شده بیانگر محدودیت نسبی روش‌های محاسبه ضریب رفتار است. بررسی پارامترهای پاسخ دینامیکی سازه‌های این پژوهش نشان می‌دهد که دامنه کاربرد ضریب رفتار به عنوان شاخصی از کیفیت رفتار سازه‌ها در زلزله، را می‌توان بر اساس تغییر مکان نسبی ایجاد شده در سازه بیان کرد.

پایدار هیسترتیک مستهلک کنند [۱]. شرط تحقق ضریب رفتار و بهره‌گیری از آثار سودمند نامعینی، شکل‌پذیری و مقاومت افزون، این است که سازه در معرض عوامل برهم زننده رفتار پایدار هیسترتیک خمیری قرار نگیرد. این در حالی است که پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که رکورد برخی از زلزله‌ها به لحاظ ساختار و محتوای فرکانسی خاصی که دارند، اجازه رفتار پایدار هیسترتیک را به سازه نمی‌دهند [۲ و ۳]. ویژگی خاص این زلزله‌ها بیشتر وجود پالس‌های پر انرژی سرعت در ساختار آن‌ها است. مطابق مطالعات برترو در نظر گرفتن نامعینی آثار سودمندی در پاسخ سازه‌ها به برخی تحریک‌های لرزه‌ای دارد [۴ و ۵]. هر یک از اثرها باید در جای مناسب خود در فرآیند طراحی لحاظ شوند و نبایستی با ضریب کاهش بر اثر مقاومت افزون (R_s) و آثار احتمالاتی نامعینی بر شاخص قابلیت اعتماد سیستم، یکسان در نظر گرفته شود. برخی از آثار نامعینی بر پاسخ لرزه‌ای به صورت زیر بیان شده است:

۱- کاهش تأثیر اندازه در اجزای سازه‌ای؛ یعنی استفاده از تعداد عناصر کمتر برای مقاومت در برابر بارهای جانبی به استفاده از اعضا، گره‌ها و اتصالات با ابعاد بزرگتر منجر می‌شود و این امر منجر به کاهش دوران خمیری و ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود. ۲- کاهش نیاز شکل‌پذیری و تغییر مکان ناشی از پیچش غیرارتجاعی ۳- گسترش اتلاف انرژی بین عناصر متعدد و اجتناب از تمرکز آسیب. برای بهره‌گیری از سودمندی‌های نامعینی در سازه، لازم است به موارد زیر توجه شود:

الف- ضرایب تغییرات نیازهای سازه‌ای نسبت به ضرایب تغییرات ظرفیت‌ها کاهش یابد. ب- مقاومت افزون افزایش یابد. پ- ظرفیت دوران لولاهای خمیری (شکل‌پذیری) افزایش یابد. ت- یک ظرفیت دوران کمینه (ظرفیت دورانی بیشتر از نیاز دوران ضرب در یک ضریب اطمینان) در تمام اعضای سیستم سازه‌ای تضمین شود. در

دامنه زمانی بزرگ که حاوی انرژی جنبشی بسیار زیاد است، توجه ویژه شده است. پالس‌های سرعت پرانرژی یکی از عوامل مهم بر هم زنده رفتار پایدار هیسترتیک خمیری است. با توجه به این‌که در طرح لرزه‌ای مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۱] اثر فاصله حوزه ثبت رکورد زلزله و عامل PGV لحاظ نشده و نیز آن که برخی پژوهش‌ها نشان دهنده تعیین‌کنندگی عامل PGV و انرژی جنبشی در طرح لرزه‌ای است [۱۲ و ۱۳]، در این پژوهش از رکوردهایی که دارای ساختارهای پالس سرعت است در مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه‌ها استفاده شده است.



شکل ۱- شناسه و پیکربندی سازه‌های مورد مطالعه

۲- معرفی سازه‌های مطالعاتی

در این پژوهش رفتار لرزه‌ای هشت قاب خمشی بتن مسلح با مشخصات عنوان شده در جدول (۱) و پیکربندی مطابق شکل (۱) با نرم افزار SAP نسخه 14.2 [۸] ارزیابی شده است. این سازه‌ها مقاومت و ضریب برش پایه نهایی یکسان دارند و نامعینی آنها در یک پلان مشخص و ثابت به ابعاد ۲۴×۲۴ متر مربع تغییر کرده است.

جدول ۱- ویژگی‌های سازه‌های مطالعاتی

شناسه سازه‌ها	Ω	Y	R_s	μ	R_{II}	R_w	R
6F-3@8m	۱/۵۹۷	۱/۶۴۸	۲/۶۳۲	۴/۴	۵/۴۲	۱۴/۲۷	۸/۶۷
6F-4@6m	۱/۸۰۳	۱/۴۵۶	۲/۶۲۵	۴/۶	۵/۷۳	۱۵/۰۴	۱۰/۳۳
6F-5@4.8m	۱/۹۹۲	۱/۳۱۵	۲/۶۲۰	۴/۶	۵/۷۳	۱۵/۰۱	۱۱/۴۱
6F-6@4m	۱/۵۲۵	۱/۷۲۲	۲/۶۲۵	۳/۸	۴/۷۰	۱۲/۳۴	۷/۱۷
9F-3@8m	۱/۵۴۸	۱/۵۲۴	۲/۳۵۸	۴/۳	۴/۸۲	۱۱/۳۷	۷/۴۶
9F-4@6m	۱/۵۸۷	۱/۴۸۶	۲/۳۵۸	۵/۷	۶/۶۲	۱۵/۶۱	۱۰/۵۰
9F-5@4.8m	۱/۷۰۱	۱/۳۸۵	۲/۳۵۶	۵/۷	۶/۶	۱۵/۵۵	۱۱/۲۳
9F-6@4m	۱/۴۳۷	۱/۶۴۱	۲/۳۵۹	۴/۰	۴/۳۹	۱۰/۳۶	۶/۳۱

یکسان بودن ضریب کاهش بر اثر مقاومت افزون (R_s) در سازه‌های مورد مطالعه این پژوهش برای برجسته کردن آثار نامعینی در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها است [۹].

در جدول (۱)، Ω ضریب مقاومت افزون، Y ضریب تنش مجاز، R_s ضریب کاهش بر اثر مقاومت افزون، μ شکل پذیری کلی، R_{II} ضریب کاهش بر اثر شکل‌پذیری بر اساس روش میراندا- برترو [۱۰]، R_w ضریب رفتار با رویکرد تنش مجاز و R ضریب رفتار با رویکرد مقاومت نهایی است.

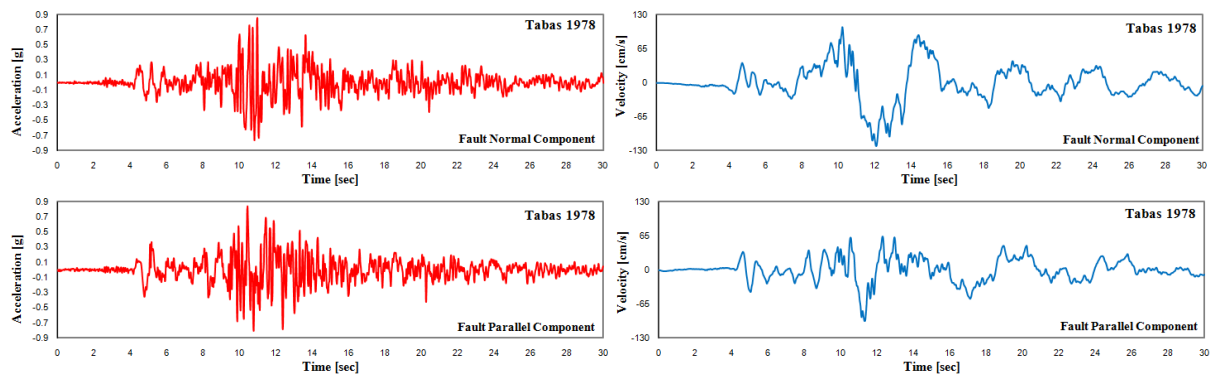
۳- انتخاب شتاب‌نگاشت‌های زلزله

شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل انواع زلزله‌های حوزه دور و نزدیک است که در انتخاب آنها به وجود و یا عدم وجود پالس‌های سرعت با دامنه بزرگ و

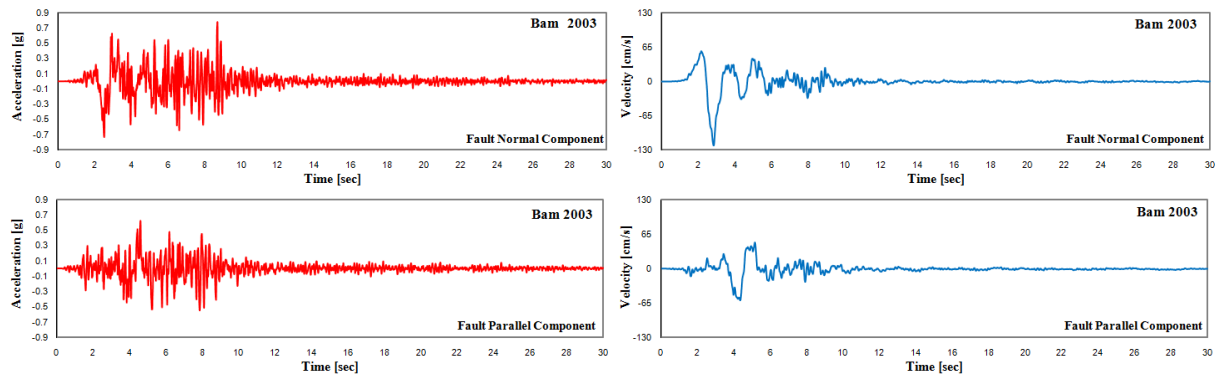
مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین تاریخچه شتاب و سرعت سه مورد از رکوردهای مورد استفاده که پالس سرعت بزرگ دارند در شکل (۲) آورده شده است. در شکل (۳) طیف سرعت تمام نگاشت‌های مورد استفاده دیده می‌شود.

جدول ۲- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی غیرخطی

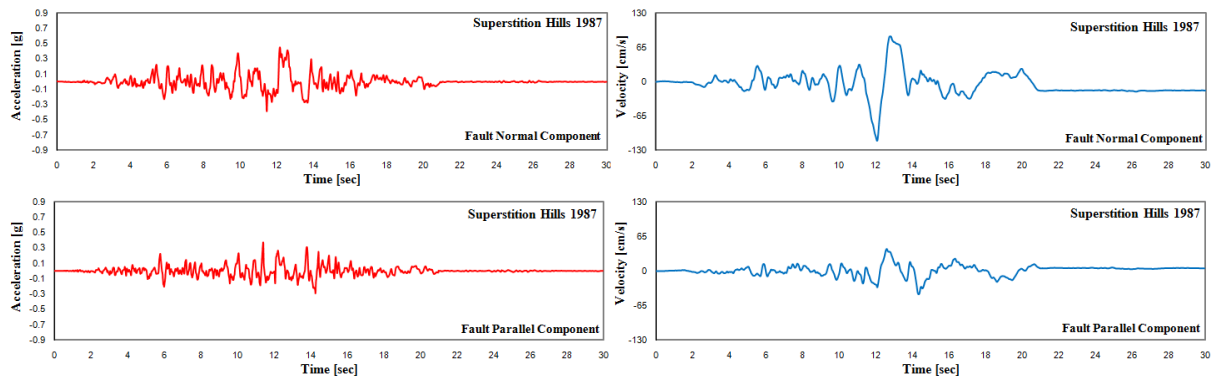
PGA (g)		PGV (cm/s)		PGD (cm)		فاصله (km)	مدت زمان (s)	نام زلزله و ایستگاه ثبت رکورد
TR	LN	TR	LN	TR	LN			
۰/۸۵۲	۰/۸۳۶	۱۲۱/۲	۹۷/۸	۹۵/۱	۳۶/۷	۳	۲۲	طَبَس ۱۹۷۸ - طَبَس
۰/۷۷۸	۰/۶۲۳	۱۲۱/۵	۵۹/۲	۳۴/۳	۲۴/۸	۱	۱۲	بَم ۲۰۰۳ - بَم
۰/۳۴۹	۰/۲۶۸	۶۲/۴۴	۶۶/۱	۵۵/۹	۶۴/۵	۲/۶	۱۳	Kocaeli 1999 - Yarimca
۰/۵۹۴	۰/۶۹۴	۷۳/۲۴	۳۳/۸	۱۱/۵	۳/۸۸	۲/۸	۱۰	North Palm Spring 1986 - NPS Station
۰/۴۵۵	۰/۳۷۷	۱۱۲	۴۳/۹	۵۲/۸	۱۵/۳	۰/۷	۱۸	Superstition Hills 1987 - Parachute Test Site
۰/۴۲۶	۰/۴۴۳	۳۷/۷	۲۱/۳	۲/۹۹	۳/۵۴	۱۰/۸	۲۰	Whittier Narrows 1987 - Santa Fe Springs
۰/۳۳۲	۰/۲۵۵	۶۱/۵۴	۴۲/۵	۳۶/۳	۱۹/۵	۱۳/۷	۱۲	Loma Prieta 1989 - Saratoga Valley
۰/۴۷۷	۰/۳۶۸	۶۱/۴۷	۲۸/۹	۲۲/۱	۸/۴۳	۱۳/۳	۱۴	Northridge 1994 - Saticoy St.
۰/۴۴۴	۰/۳۰۳	۳۸/۲۱	۲۲/۱	۱۰/۱	۷/۸۶	۱۲/۳	۱۲	Northridge 1994 - Sun Valley (Roscoe Blvd)



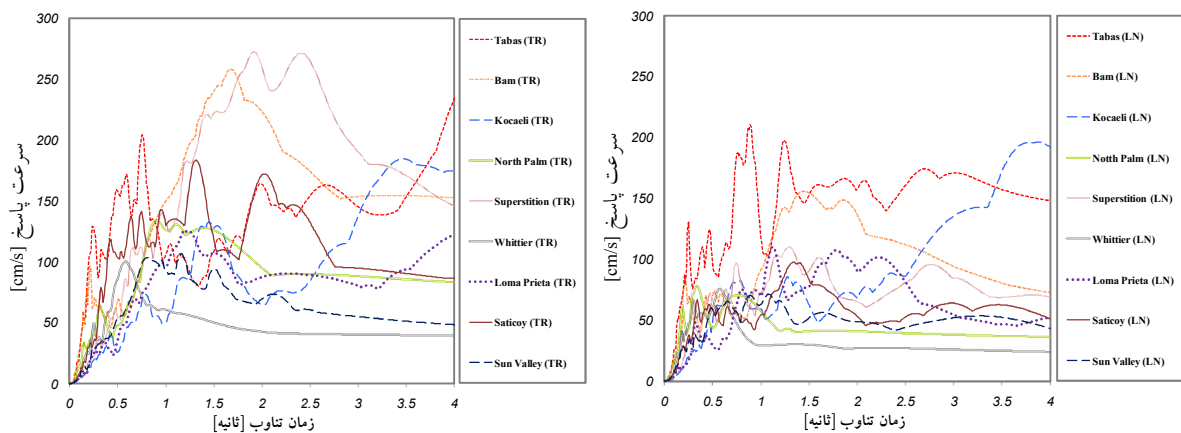
شکل ۲-الف- تاریخچه شتاب و سرعت دو مولفه افقی زلزله طَبَس



شکل ۲-ب- تاریخچه شتاب و سرعت دو مولفه افقی زلزله بَم



شکل ۲- تاریخچه شتاب و سرعت دو مولفه افقی زلزله Superstition



شکل ۳- طیف پاسخ سرعت رکوردهای استفاده شده، مولفه‌های موازی صفحه شکست (LN) و عمود بر صفحه شکست (TR)

از ضریب رفتار گزارش شده در جدول (۱)، و روش تحلیل دینامیکی غیرخطی با شتاب فزاینده استفاده شده است. به این منظور سازه‌های مطالعاتی در این پژوهش تحت تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی با رکوردهای دو مولفه‌ای ثبت شده در ۹ زلزله و با بیشینه شتاب زمین (PGA) متغیر برای هر رکورد، قرار گرفته‌اند. با توجه به وجود پالس سرعت در برخی نگاشت‌ها، میزان گام‌های افزایش شتاب در تحلیل دینامیکی غیرخطی با شتاب فزاینده در هر شتاب نگاشت به صورت متفاوت انتخاب شده است. دلیل اصلی این موضوع آن است که پاسخ سازه‌ها نسبت به رکوردهای دارای پالس بزرگ سرعت و نیز اعمال ضرایب مقیاس تحلیلی مختلف، دارای دگرگونی

۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی

اعداد ضریب رفتار و سایر پارامترهای مرتبط با آن که در جدول (۱) گزارش شده‌اند، بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی محاسبه شده‌اند [۹]. باید دانست که پارامترهای تشکیل دهنده ضریب رفتار هر یک تابعی از نوع بارگذاری است. بر این اساس ممکن است که بارگذاری یکنوا در تحلیل استاتیکی غیرخطی، شکل حقیقی بارگذاری دینامیکی ناشی از زلزله‌ها را بازتاب ندهد. از این رو کیفیت ضریب رفتار به دست آمده بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی به عنوان شاخصی از کیفیت رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، با بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ها ارزیابی شده است. در این پژوهش برای مطالعه میزان سازگاری رفتار غیرخطی سازه‌ها

این پژوهش بر اساس رکوردهای زلزله دو مؤلفه‌ای با سه ضریب متفاوت تنظیم شده‌اند. ضرایب اعمالی به رکوردها با سعی و خطا، طوری انتخاب شده‌اند که رفتار سازه‌ها را در سه محدوده عملکردی IO-LS، B-IO و LS-CP قرار گیرد. خروجی‌های وابسته به پاسخ دینامیکی سازه‌ها در دو جهت X و Y از پلان سازه مورد مطالعه قرار گرفته است که نمودارهای ارائه شده این مقاله مربوط به جهتی از سازه است که پاسخ‌ها بحرانی‌تر است. نمودارهای شکل‌های (۴) تا (۱۲) بیانگر بیشینه تغییر مکان نسبی طبقه‌ها، بیشینه سرعت طبقه‌ها و بیشینه شتاب طبقه‌ها در سه سطح زلزله است.

بررسی نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و مطالعه پارامترهای پاسخ سازه‌ها بیانگر محدودیت کفایت ضریب رفتار به عنوان شاخصی از کیفیت رفتار سازه‌ها در زلزله است.

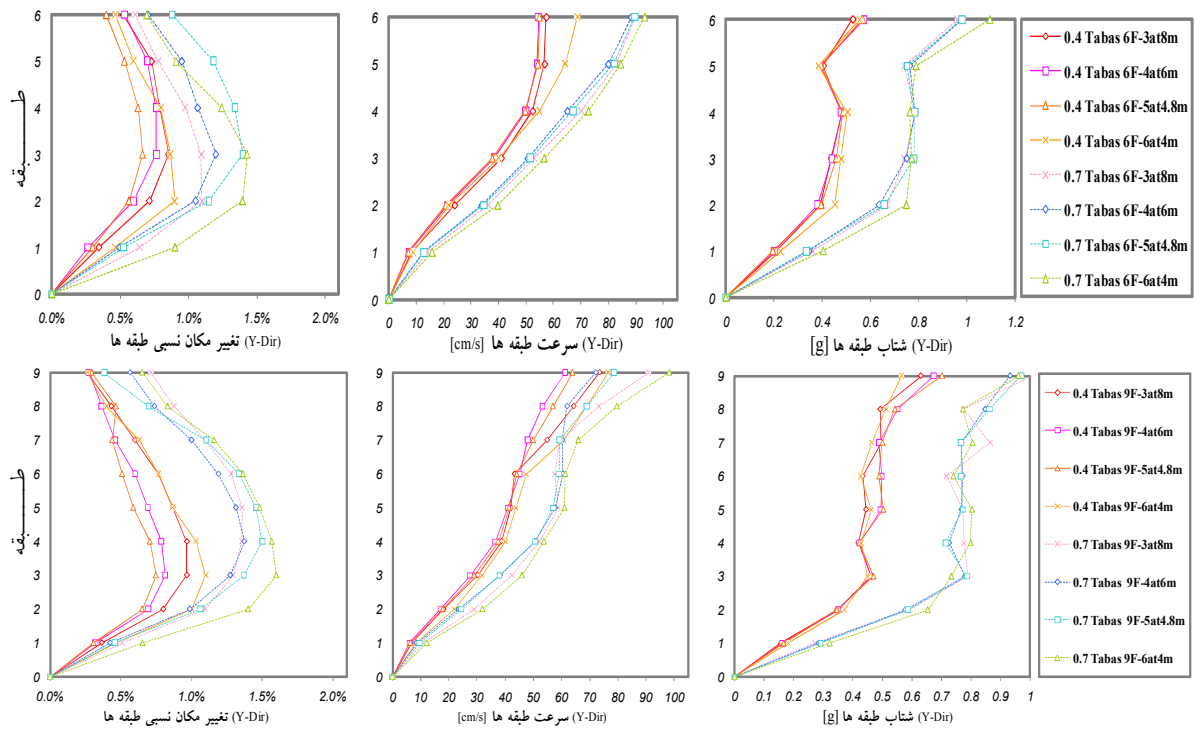
انتظار منطقی از ضریب رفتار این است که سازه‌های دارای ضریب رفتار بزرگتر، عملکرد مطلوب‌تری در زلزله‌ها داشته باشند. اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار سازه‌ها همواره از ضریب رفتار تبعیت نمی‌کند. یک نتیجه عمومی آن است که تحت تحریکات رکوردهایی که تغییر مکان نسبی طبقه‌ها را تا حدود ۱.۵٪ می‌رسانند، رفتار سازه‌ها در بیشتر مواقع از مقدار ضریب رفتار تبعیت می‌کند. همچنین تحت اثر رکوردهایی نیرومندتری که تغییر مکان نسبی طبقه‌ها به حدود ۱.۵٪ تا ۲٪ می‌رسد، بسته به ویژگی‌های این گونه رکوردها اغلب، پارامترهای پاسخ سازه‌ها از ضریب رفتار تبعیت نمی‌کنند.

افزون بر موضوع فوق، یک نتیجه جامع دیگر آن است که برای رکوردهای بسیار نیرومند که سبب افزایش تغییر مکان نسبی به بیش از حدود ۲٪ می‌شوند، قانون‌مندی خاصی مشاهده نمی‌شود.

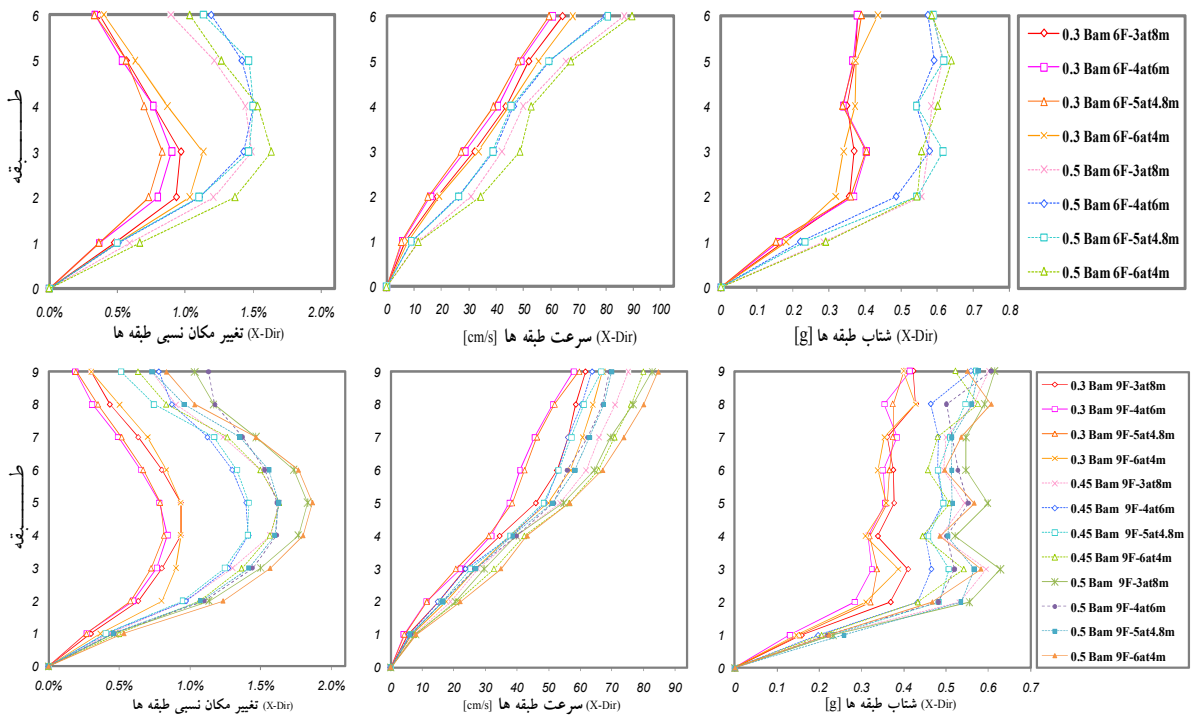
بسیار وسیع‌تری نسبت به پاسخ سازه‌ها در برابر شتاب نگاشت‌های بدون پالس سرعت بزرگ است. در این پژوهش مؤلفه با PGA بزرگتر در راستا X پلان سازه و همچنین مؤلفه با PGA کوچکتر در راستا Y پلان سازه اعمال شده‌اند. پارامترهای رفتار لرزه‌ای در حوزه تغییر شکل‌های غیرخطی سازه از قبیل تغییر مکان نسبی طبقه‌ها، سرعت طبقه‌ها و شتاب طبقه‌ها ارزیابی شده‌اند. در این پژوهش نتایج و پارامترهای پاسخ یاد شده برای سه ضریب مختلف از هر شتاب نگاشت بیان شده‌اند. معیار انتخاب این ضرایب به گونه‌ای است که سازه تحت این نگاشت‌ها تا رسیدن به سه محدوده عملکردی اصلی IO-LS، B-IO و LS-CP بر اساس دستورالعمل FEMA356 بارگذاری شوند [۱۴]. مطالعه روی پارامترهای پاسخ در سه محدوده عملکرد پیش گفته نشان می‌دهد که سازه‌هایی که ضریب رفتار بزرگتری داشته‌اند، تحت تحریکات لرزه‌ای، عملکرد نسبی بهتری از خود نشان داده‌اند. همچنین بعد از رسیدن سازه به سطح عملکرد خاصی، دیگر نمی‌توان قضاوت خاصی در مورد عملکرد سازه‌ها داشت. بنابراین نتایج تحلیل‌های دینامیکی بیانگر محدودیت ضریب رفتار در بازتاب رفتار سازه‌ها در زلزله‌ها است.

۵- پاسخ دینامیکی غیر خطی سازه‌ها

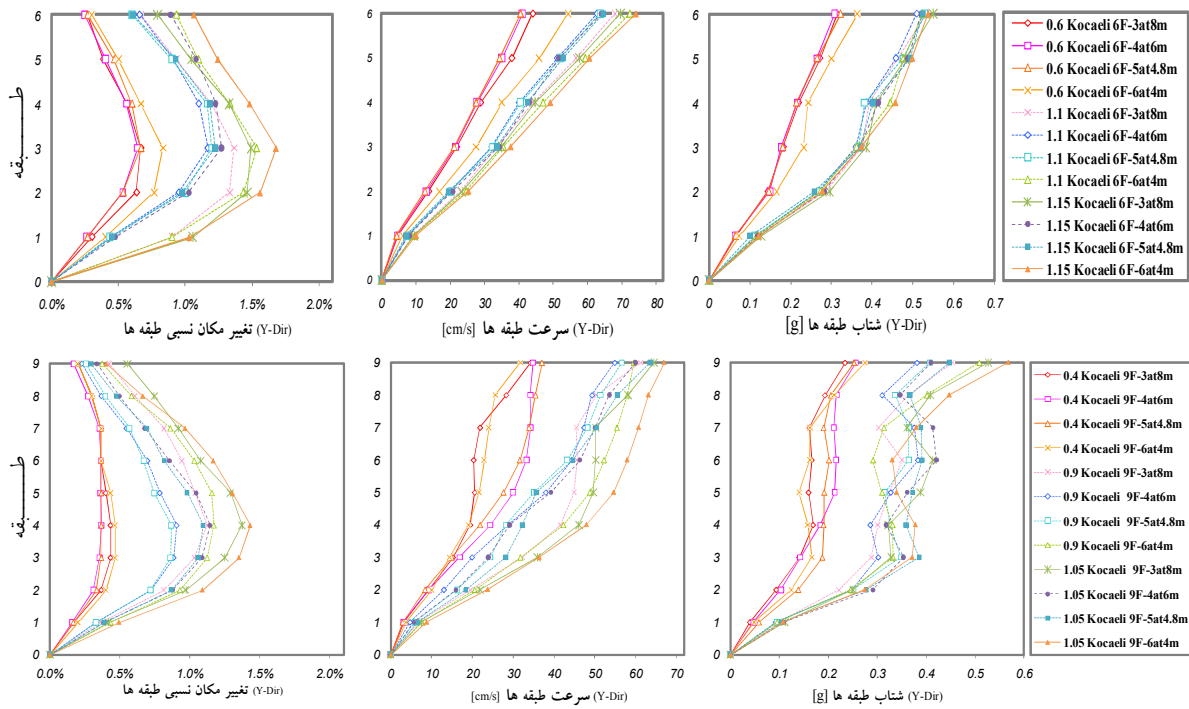
در این پژوهش رفتار دینامیکی سازه‌های طراحی شده تحت تاثیر رکوردهای زلزله با ویژگی‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین گزیده‌ای از پارامترهای پاسخ سازه‌ها بر اساس تحلیل دینامیکی غیرخطی با شتاب فزاینده استخراج شده‌اند. خروجی‌های حاصل از تحلیل در این پژوهش عبارت از بیشینه تغییر مکان نسبی طبقه‌ها، بیشینه سرعت و بیشینه شتاب طبقه‌ها. شایان ذکر است که نمودارهای پارامترهای پاسخ ارائه شده در



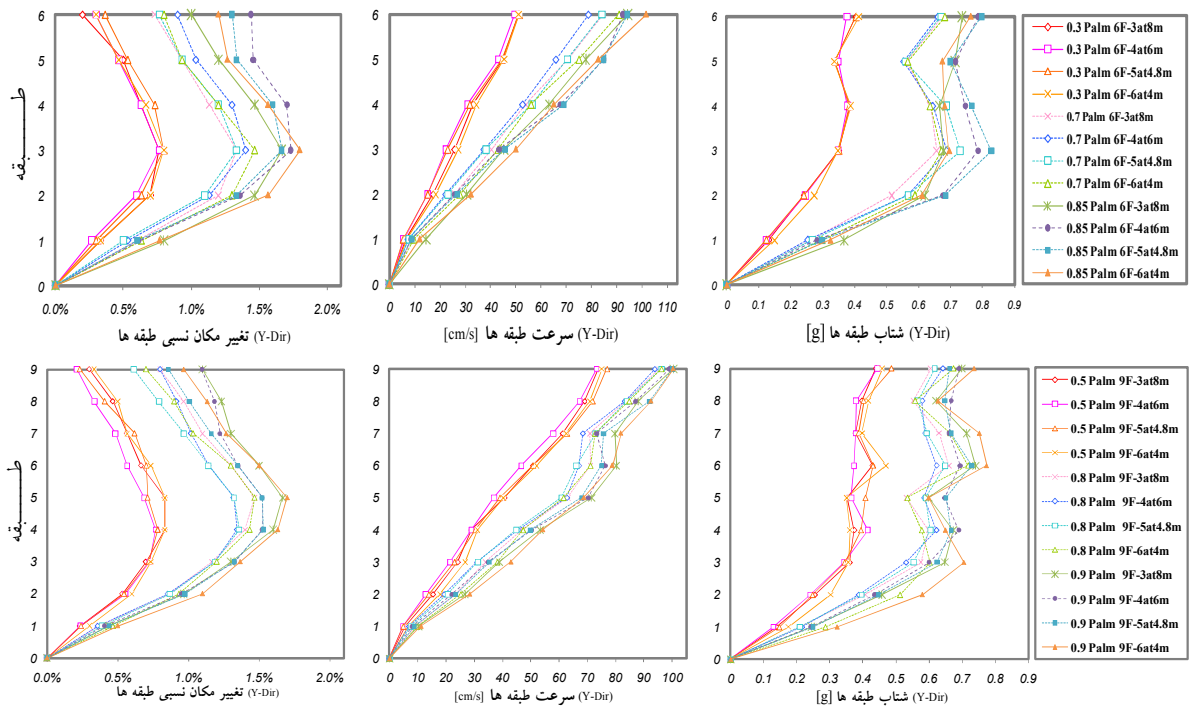
شکل ۴- بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله طیس برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



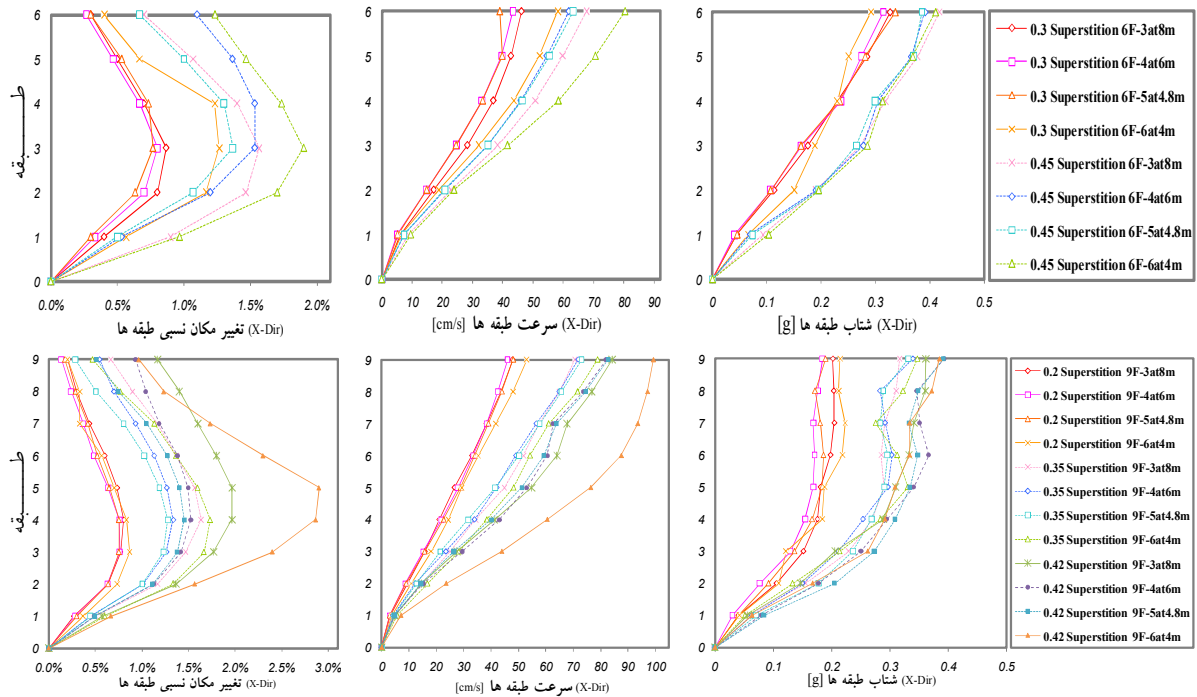
شکل ۵- بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله بم برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



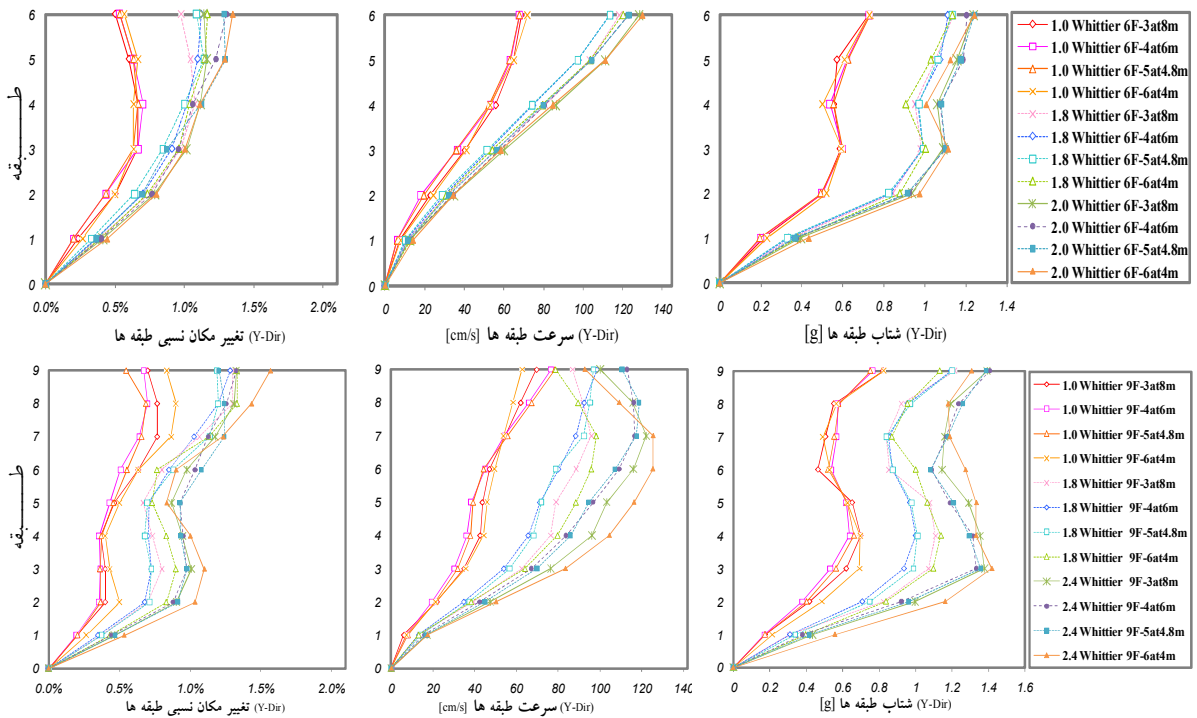
شکل ۶- بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله Kocaeli برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



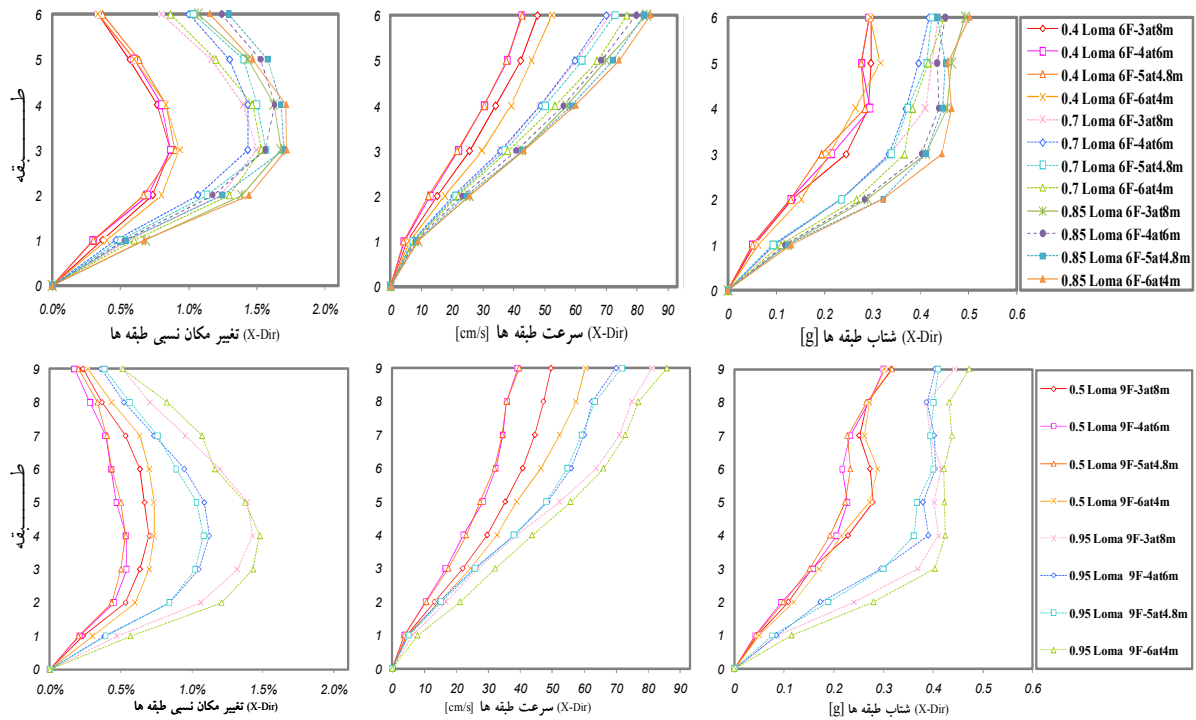
شکل ۷- بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله North Palm Spring برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



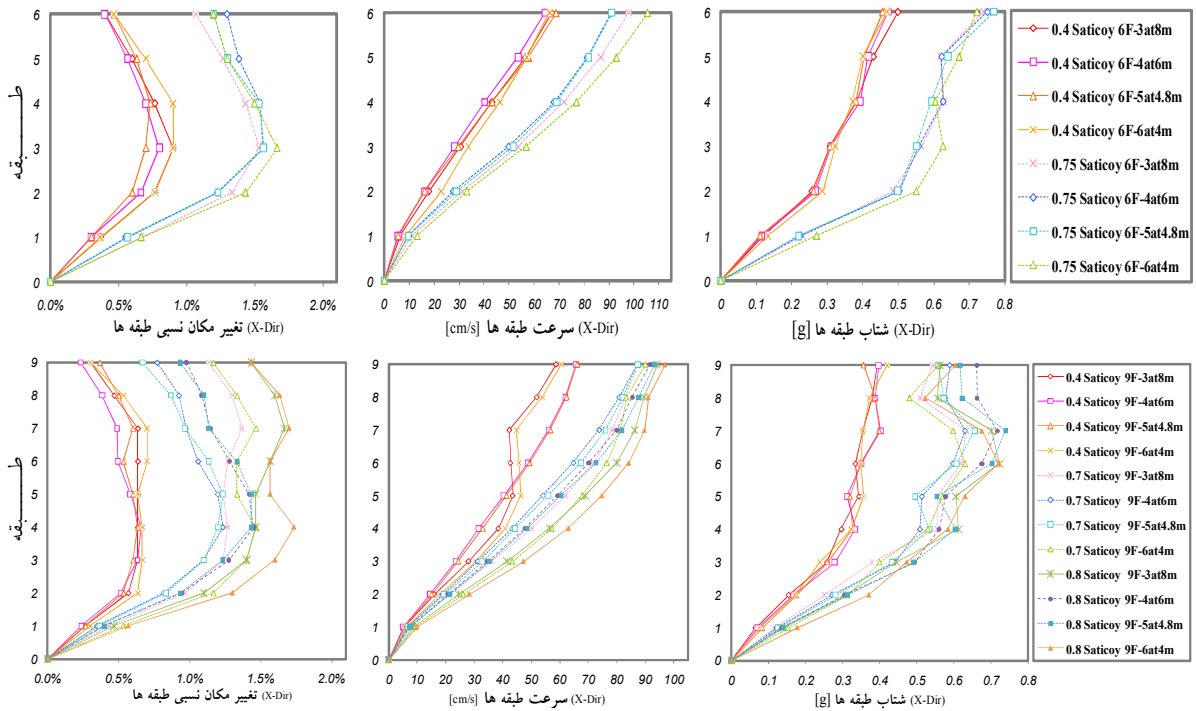
شکل ۸- پیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله Superstition Hills برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



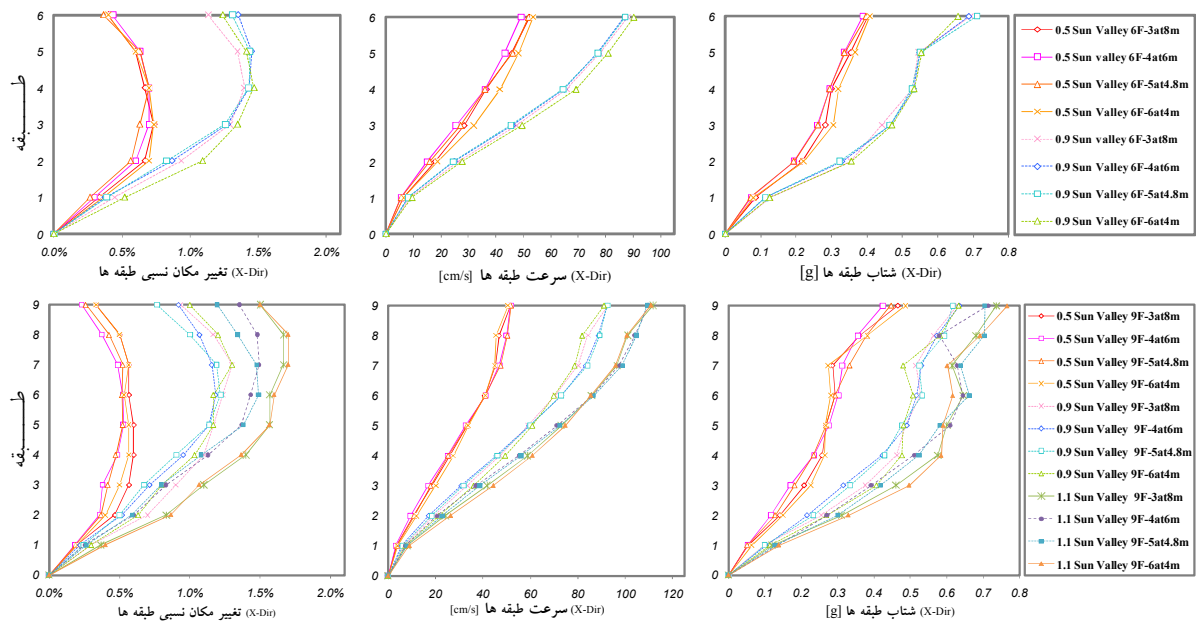
شکل ۹- پیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله Whittier Narrows برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



شکل ۱۰- بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله Loma Prieta برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



شکل ۱۱- بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله Northridge-Saticoy برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه



شکل ۱۲- بیشینه تغییر مکان نسبی، سرعت طبقه و شتاب طبقه در زلزله Northridge-Sun Valley برای سازه‌های ۶ و ۹ طبقه

الف- رکوردها بدون اعمال ضریب مقیاس باشند. در این حالت سازه‌ها در مقابل رکورد زلزله‌های حاوی پالس‌های پرانرژی و بلند مدت سرعت، قادر به تحقق ضریب رفتار محاسبه شده نخواهند بود. سازه در مقابل این رکوردها به دلیل وجود پالس‌های پر انرژی سرعت در مدت زمان خیلی کوتاهی مکانیزم می‌شود. در این حالت عملکرد چرخه‌ای و هیسترتیک مفصل با مشکل مواجه خواهد شد و مفاصل به صورت نسبی، نیرو کنترل عمل خواهند کرد. بدین ترتیب سازه از ظرفیت شکل‌پذیری بالقوه و میرایی هیسترتیک خود بی‌بهره می‌شود. همچنین در این زلزله‌ها روند تشکیل مفاصل خمیری از قاعده ستون قوی و تیر ضعیف تبعیت نمی‌کند و تعداد زیادی مفاصل خمیری به صورت یک جا ایجاد می‌شود که باعث ناکارآمدی نامعینی سازه و عدم تحقق مقاومت افزون آن می‌شود. رکورد زلزله‌های طبس و بم و Superstition Hills از جمله این رکوردها هستند. در مورد زلزله‌های ضعیف و متوسط که در آنها به طور تقریبی انرژی زلزله، در مدت

شکل‌های (۴) تا (۱۲) نشان می‌دهد که تغییر مکان نسبی و سرعت طبقه سازه‌های با ضریب رفتار بزرگتر نسبت به سازه‌های دارای ضریب رفتار کوچکتر تحت اثر بیشتر رکوردهای زلزله، دارای مقادیر به نسبت کمتری است. این در حالی است که نتیجه فوق قابل تعمیم به تغییرات شتاب طبقات نیست. همچنین برای زلزله‌های قوی‌تر که تغییر مکان نسبی بیش‌تر از ۲ درصد را ایجاد می‌کنند، نمی‌توان قضاوت خاصی در مورد کیفیت رفتار سازه‌های مورد مطالعه داشت. این نتایج به صورت کلی بیان شده و محدود به رکورد زلزله خاصی نیست. این موضوع به این دلیل است که در اعمال ضرایب کاهشده و یا فزاینده در رکوردها، فقط معیار عملکرد سازه‌ها مد نظر بوده است.

۶- بررسی آثار نوع رکورد زلزله بر مبانی ضریب رفتار

بررسی تحقق ضریب رفتار در انواع زلزله‌ها را در دو قسمت جداگانه می‌توان بررسی کرد.

طیس با مشکل مواجه خواهد شد. شکل (۱۳) SRSS طیف شتاب رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش که نسبت به PGA همپایه شده‌اند را در کنار طیف خاک نوع دو با اعمال ضریب شتاب مبنای طرح و ضریب ۱.۴ نشان می‌دهد.

جدول (۳) نیز نتایج مقیاس کردن رکوردهای این پژوهش را بر اساس روش ارائه شده استاندارد ۲۸۰۰ گزارش می‌کند. اساس این روش بر این استوار است که طیف میانگین تمام رکوردها در یک بازه‌ی زمانی خاص پایین‌تر از طیف استاندارد آیین‌نامه قرار نگیرد.

مقایسه ضرایب مقیاس جدول (۳) با ضرایب استفاده شده در این پژوهش برای رسیدن به سطح عملکرد (LS-CP)، نشان می‌دهد که زلزله‌های دارای پالس‌های پرنرژری سرعت در صورتی که PGA و PGV بزرگی داشته باشند، ضریب مقیاس آنها به نسبت منطقی بوده و مطالعه ضریب رفتار با آنها عملی خواهد بود. این در حالی است که در مورد رکوردهایی مانند Superstition Hills که PGV بزرگ و PGA کوچک دارند، ضریب مقیاس غیر منطقی است.

زمان حرکت قوی آنها توزیع شده است (انرژی جنبشی متمرکز در یک یا چند پالس نباشد)، ضریب رفتار سازه به طور معمول محقق می‌شود.

ب- رکوردها با اعمال ضریب مقیاس باشند. ضرایب رفتار گزارش شده در جدول (۱) بر اساس تحلیل استاتیکی غیرخطی و برای سطح نیروهای متناسب با طیف استاندارد ۲۸۰۰ با اعمال ضریب شتاب مبنای طرح منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد ($A=0.35$) محاسبه شده‌اند [۸]. بنابراین برای مطالعه کفایت این ضرایب رفتار در تحلیل دینامیکی غیرخطی، منطقی است که سطح نیروهای وارد شده بر سازه به نوعی منطبق بر طیف استاندارد ۲۸۰۰ باشند. بدین منظور آیین‌نامه‌ها از جمله استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس کردن رکوردها را پیشنهاد می‌کنند. هدف آیین‌نامه از مقیاس کردن رکوردها این است که نیروی وارد بر سازه در تحلیل دینامیکی غیرخطی به نوعی متناسب با طیف در نظر گرفته شده برای ساختگاه محل احداث سازه باشد. در صورت عدم مقیاس کردن رکوردها واضح است که مطالعه کفایت ضریب رفتار با رکوردهای بسیار نیرومندی مثل رکوردهای زلزله بم و

جدول ۳- ضرایب مقیاس رکوردها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و ضرایب استفاده شده در این تحقیق

PGA (g)		ضریب مقیاس سازه‌های ۶ طبقه		ضریب رکورد (LS-CP) ۶ طبقه		ضریب مقیاس سازه‌های ۹ طبقه		ضریب رکورد (LS-CP) ۹ طبقه		نام زلزله
TR	LN	TR	LN	TR	LN	TR	LN	TR	LN	
۰/۸۵۲	۰/۸۳۶	۰/۵۵	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۷	۰/۷	طیس
۰/۷۷۸	۰/۶۲۳	۰/۶	۰/۸	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۸۷	۰/۵	۰/۵	بم
۰/۳۴۹	۰/۲۶۸	۱/۳۴	۱/۷	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۵۶	۲/۰۳	۱/۰۵	۱/۰۵	Kocaeli
۰/۵۹۴	۰/۶۹۴	۰/۷۹	۰/۷	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۷۸	۰/۹	۰/۹	North Palm Spring
۰/۴۵۵	۰/۳۷۷	۱/۰۳	۱/۲	۰/۴۵	۰/۴۵	۱/۱۹	۱/۴۴	۰/۴۲	۰/۴۲	Superstition Hills
۰/۴۲۶	۰/۴۴۳	۱/۱	۱/۱	۲	۲	۱/۲۸	۱/۲۳	۲/۴	۲/۴	Whittier Narrows
۰/۳۳۲	۰/۲۵۵	۱/۴۱	۱/۸	۰/۸۵	۰/۸۵	۱/۶۴	۲/۱۳	۰/۹۵	۰/۹۵	Loma Prieta
۰/۴۷۷	۰/۳۶۸	۰/۹۸	۱/۳	۰/۷۵	۰/۷۵	۱/۱۴	۱/۴۸	۰/۸	۰/۸	Saticoy
۰/۴۴۴	۰/۳۰۳	۱/۰۵	۱/۵	۰/۹	۰/۹	۱/۲۲	۱/۷۹	۱/۱	۱/۱	Sun Valley

تصادفی که تغییر مکان نسبی بیشتر ایجاد می‌کنند، رفتار سازه‌ها به طور معمول از ضریب رفتار تبعیت نمی‌کنند.

۳- با فرض پذیرش ضریب رفتار به عنوان شاخصی از کیفیت رفتار سازه‌ها، ضریب رفتار به دست آمده از روش مقاومت نهایی در این پژوهش نسبت به ضریب رفتار به دست آمده از روش تنش مجاز دارای تطابق بیشتری با نتایج تحلیل‌های دینامیکی و پارامترهای پاسخ در حوزه تغییر شکل‌های غیرخطی است. علت این امر آن است که در محاسبه پارامتر C_w در روش تنش مجاز، به ضریب رفتار تجربی آیین‌نامه‌ها استناد شده است.

۴- پارامترهای پاسخ سازه در حوزه تغییر شکل‌های غیرخطی شامل تغییر مکان نسبی و سرعت طبقه‌ها در سازه‌های با ضریب رفتار بزرگتر در محدوده‌ی بیان شده در بند ۲ نتیجه‌گیری، مقادیر کمتری نسبت به سازه‌های با ضریب رفتار کمتر دارند. این موضوع در مورد شتاب طبقه با چنین قانون‌مندی ملاحظه نمی‌شود.

۵- ضرایب رفتار محاسبه شده در این پژوهش در برابر زلزله‌های نیرومند حوزه نزدیک که دارای پالس‌های پرنانرژی سرعت هستند، قابل تحقق نخواهد بود.

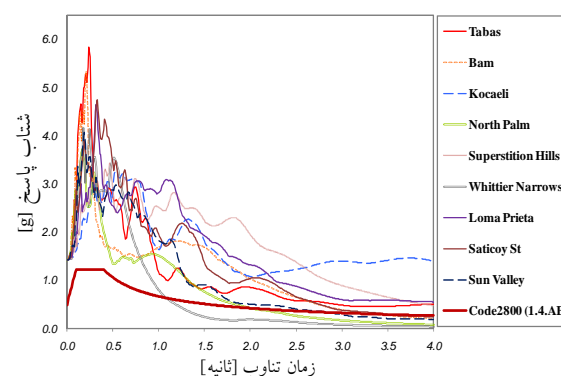
۸- مراجع

[۱] معصومی، علیو تسنیمی، عباسعلی؛ «چه وقت می‌توان به ضرایب رفتار سازه‌ها اعتماد کرد؟»؛ چهارمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، ۱۳۸۲.

[2] Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Effective Cyclic Energy as a Measure of Seismic Demand", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 11, pp. 725-751, 2007.

[3] Mollaioli, F. and Decanini, L.D. "Characterization of the Dynamic Response of Structures to Damaging Pulse-Type Near-Fault Ground Motions". *Meccanica*, Vol. 41, pp. 23-46, 2006.

این پدیده به صورت تقریبی در زلزله Loma Prieta نیز دیده می‌شود. همچنین می‌توان ملاحظه کرد رکوردهای ضعیفی چون Whittier Narrows، برای این‌که سازه را به سطح عملکرد (LS-CP) برساند، مستلزم اعمال ضرایب بسیار بزرگتری نسبت به ضریب مقیاس بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ است.



شکل ۱۳- طیف پاسخ ارتجاعي برای رکوردهای مورد استفاده و طیف استاندارد خاک نوع II

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر نامعینی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌هایی که ضریب مقاومت افزون یکسان دارند و همچنین بررسی آثار نوع رکورد زلزله بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن مسلح کوتاه مرتبه، بررسی و ارزیابی شده است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

۱- هر افزایش نامعینی در سازه‌ها، نمی‌تواند موجب بهبود رفتار سازه‌ها شود.

۲- ضرایب رفتار محاسبه شده در این پژوهش تحت بارگذاری یکنوا فزاینده می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری‌های تصادفی (زلزله) که در سازه‌ها تغییر مکان نسبی حدود ۱.۵ درصد ایجاد می‌کنند، باشد. این در حالی است که برای بارگذاری‌های

- [10] Miranda, E. and Bertero, V.V. "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design", *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 2, pp. 357-379, 1994.
- [۱۱] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰/ایران)، ویرایش ۳، نشریه شماره ض-۲۵۳، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.
- [12] Movahed, H., Meshkat-Dini, A. and Tehranizadeh, M. "Seismic Response of Dual Systems Consisted of Steel Moment-Resisting Frames with Shear Wall under Influencing Pulse Type Ground Motion", *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Retrofitting*, Paper Code. EE. 743, Tabriz, Iran, 2012.
- [13] Movahed, H., Meshkat-Dini, A. and Tehranizadeh, M. "Seismic Behavior of Steel Special Moment Resisting Frames Affected by Strong Ground Motions in Near Fault Areas", *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 3887, Lisbon, Portugal, 2012.
- [14] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "FEMA-356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Washington D.C., 2000.
- [4] Bertero, R.D. and Bertero, V.V. "Redundancy in Earthquake-Resistant Design", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, pp. 81-88, 1999.
- [5] Bertero, R.D. and Bertero, V.V. "Redundancy in Earthquake-Resistant Design: How to Define it and Quantify Its Effects", *Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, CD, 1998.
- [6] Marhadi, K. and Venkataraman, S. "Surrogate Measures to Optimize Structures for Robust and Predictable Progressive Failure", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 39, pp. 245-261, 2009.
- [7] Starossek, U. "Disproportionate Collapse: A Pragmatic Approach", *Structures & Buildings*, Vol. 160, No. SB6, pp. 317-325, 2007.
- [8] SAP2000 Version 14.2.0: A Computer Program for Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, University of California, Berkeley, 2010.
- [۹] محمدی، رامین؛ «لامعینی در قاب‌های خمشی بتن مسلح سه بعدی تحت تحریکات لرزه‌ای»؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه خوارزمی به راهنمایی دکتر علی معصومی، ۱۳۹۲.

Effects of Redundancy on Seismic Behavior of RC Moment Resisting Frames

R. Mohammadi¹, A. Massumi^{2*}, A. Meshkat-Dini³

1- MSc. in Structural Engineering, School of Engineering. Kharazmi University

2- Associate Prof. in Structural Eng., School of Engineering. Kharazmi University

3- Assistant Prof. in Earthquake Eng., School of Engineering. Kharazmi University

massumi@khu.ac.ir

Abstract:

Structural redundancy is a non-independent concept in structural engineering and has inherent dependence on structural parameters such as overstrength and ductility, so that both of overstrength and ductility capacities should change corresponding to any variation in structural redundancy. Nevertheless, most of researchers notified that taking any increase in structural redundancy should be a desirable property to deal with more effectively against earthquake loading. Furthermore, this issue can reduce structural sensitivity to abnormal loads. In this research to clarify the pure role of redundancy in earthquake resistant design and to distinguish the role of redundancy from total overstrength capacity, a number of 3D reinforced concrete special moment resistant frames (RC-SMRF) with equal ultimate base shear coefficient were designed. The dynamic behavior parameters of the designed structures under natural strong ground motion were evaluated, especially with regards to configuration of nonlinear deformations. The analytical outputs obtained from analyzed structures are illustrated ensembles of maximum acceleration, maximum velocity and maximum drift of each story. Furthermore, adequacy and accuracy of response modification factor which should be assigned as general indicator of quality of total seismic behavior has been studied conceptually. The results of this research indicate that: (i) Assigning an increase in structural redundancy would not always lead to efficient improvement in structural seismic behavior. Furthermore, notification to process of increased redundancy should not be consider as a criterion for any basic improvement in structural performance. This issue means that it is better to consider the effects of redundancy on important seismic parameters such as both the structural member ductility and the overstrength capacity. (ii) The calculated response modification factors as mentioned in this research, can consider as an index of quality of structural dynamic performance which is corresponding to a certain level of redundancy. Accordingly, the above statement should be notified in general cases of those earthquake loadings which would cause a certain level of story drift. This certain level of story drift would denote the structural behavior typically follows the calculated response modification factor. Oppositely, if an earthquake loading causes more story drift from that assigned certain level, structural behavior typically does not follow the calculated response modification factor. (iii) The codified procedure of calculation of response modification factor which were discussed and assessed in this study, cannot be realized subjected to those input strong ground motions that able to display high amplitude and long period pulse or pulses in their velocity time history. It is important to know that strong near-fault ground motions often have an impulsive feature and impose large amounts of sudden intense kinematic energy which must be dissipated by structural system during a short period of time. This issue causes amplified deformation demands in structures which are associated with very few cycles of cumulative plastic deformations. Hence, the earthquake damages due to these seismic load cases are effectively related to maximum deformation as well as maximum ductility. Yet, structures cannot accomplish based on the calculated response modification factor in the mentioned cases.

Keywords: Redundancy, Ductility, Seismic Behavior, Nonlinear Incremental Dynamic Analysis.