

چکیده

زلزله‌های حوزه نزدیک گسل که حاوی اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده^۱ هستند به دلیل وجود پالس در رکورد سرعت، باعث ایجاد نیازهای قابل توجهی بر قاب‌های فولادی، در مقایسه با زلزله‌های معمولی می‌شوند. بنابراین بررسی رفتار قاب‌های فولادی و همچنین اثرات مودهای بالاتر تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل ضروری است. به همین منظور تعداد پنج قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و تعداد ۴، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه، تحت ۲۰ شتاب‌نگاشت دور و نزدیک گسل با اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با بررسی پاسخ‌های ارتجاعی سازه تک درجه آزاد (SDOF) تحت شتاب‌نگاشت‌های مورد بررسی، ضرایب تبدیل پاسخ سازه SDOF به MDOF ارائه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اثرات مودهای بالاتر تحت زلزله‌های دور از گسل در مقایسه با زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر است. همچنین در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد از ارتفاع سازه در طبقات فوقانی، زاویه دررفت حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده، بیشتر از زلزله‌های دور از گسل است.

واژگان کلیدی: اثرات مودهای بالاتر، نزدیک گسل، جهت‌پذیری پیش‌رونده، سازه یک درجه آزاد، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی.

اثرات چند درجه آزادی در قاب‌های خمشی فولادی تحت زلزله‌های نزدیک گسل با اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده

محسن گرامی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

امیرحسام مشایخی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه سمنان،

سمنان، ایران

نوید سیاه‌پلو (نویسنده مسئول)

استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان،

ایران، siahpolo@acecr.ac.ir

۱- مقدمه

در مجاورت گسل‌های فعال، حرکت زمین به شدت متأثر از سازوکار گسلش، راستا و حرکت پارگی با توجه به سایت (به‌طور مثال جهت‌پذیری پیش‌رونده) و تغییر شکل استاتیکی ماندگار در محل گسلش است که به‌عنوان اثر پرتابه‌ای^۲ شناخته می‌شود. بنابراین پارامترهای زلزله نزدیک گسل باعث می‌شود که مقدار قابل توجهی انرژی پارگی گسل به شکل یک تحریک پالس‌گونه با پیوند بلند نمایان گردد (لازم به ذکر است که اثرات جهت‌پذیری پس‌رونده^۳ فاقد ماهیت پالس‌گونه است). حرکت زمین دارای چند ماهیت پالس‌گونه غالباً در ابتدای شتاب‌نگاشت نمایان شده و تمایل دارد که بخش پیوند بلند طیف پاسخ شتاب را افزایش دهد. در این حالت سازه مقدار قابل توجهی انرژی زلزله را با تعداد اندکی اغتشاش با دامنه بزرگ مستهلک نموده و نیازهای قابل توجهی بر سازه تحمیل می‌شود. در نتیجه خطر ایجاد شکست ترد در المان‌های سازه با

جزئیات اجرایی ضعیف تقویت می‌گردد. تأثیرات تعیین‌کننده چنین پدیده‌ای در خلال بسیاری از زمین‌لرزه‌های به وقوع پیوسته در نقاط مختلف دنیا دیده شده است که از آن جمله می‌توان به زلزله ارزنجان (۱۹۳۹)، لندرز (۱۹۹۲)، نورتریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، کوچالی (۱۹۹۹)، چی‌چی تایوان (۱۹۹۹) نام برد.

آسیب‌های وارد شده بر ساختمان‌های مهندسی بر اساس ضوابط جدید در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج مؤید این موضوع است که ساختمان‌های فولادی موجود می‌توانند در برابر ماهیت پالس‌گونه جنبش زمین به شدت آسیب‌پذیر باشند. به‌علاوه اثرات جهت‌پذیری مشاهده شده در زلزله‌های کوچالی، ریورز و چی‌چی تایوان بار دیگر موضوع تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل را بر سازه‌ها به خاطر آورد. بنابراین ارزیابی پاسخ ساختمان‌های موجود در برابر زلزله نزدیک گسل یک موضوع مهم و اساسی است. استفاده از رکوردهای با ماهیت پالس‌گونه حاوی اثرات جهت‌پذیری و

پرتابه‌ای می‌تواند بسیار مفید باشد.

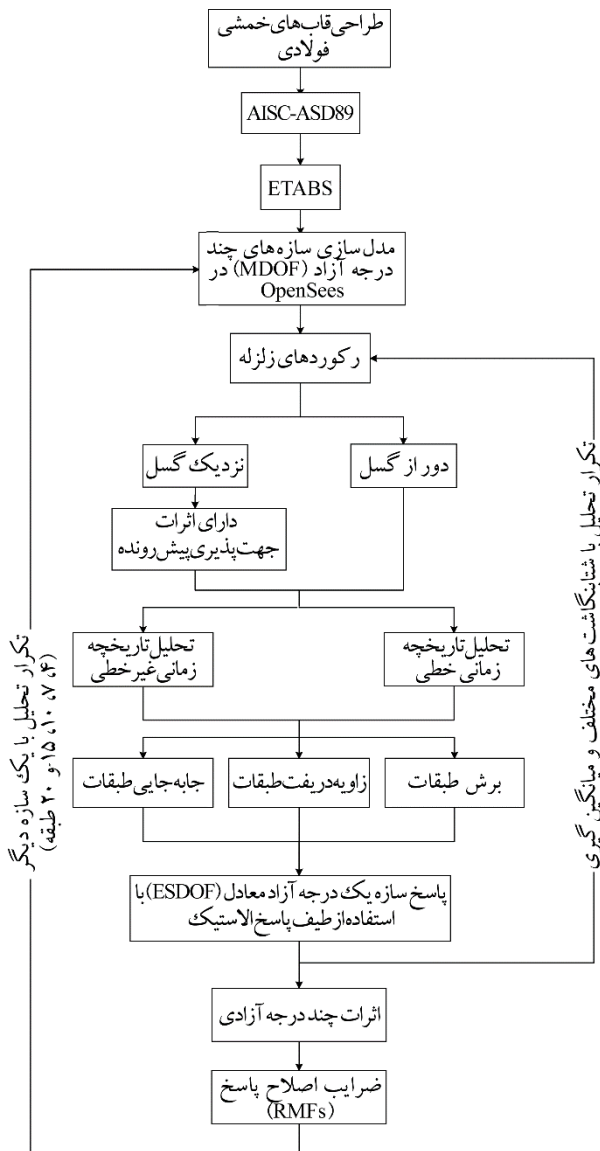
دوره تناوب اصلی است، بسیار حساس است. وسترگارد [۳] ضمن مطالعه رفتار ساختمان‌های بلند در برابر زلزله نزدیک، به کمک تئوری انتشار موج، نشان داد که تغییر مکان تراز بام ساختمان به دلیل تغییر شکل یا بازتاب موج تقویت می‌گردد. ایشان همچنین نشان داد اگر دوره تداوم پالس به پیوند اصلی سازه نزدیک باشد، برخورد موج‌های رفت و برگشت در طبقات میانی سازه، نیازهای قابل توجهی را به سازه تحمیل می‌نماید. بررسی‌ها نشان می‌دهند بسته به خصوصیات زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل و مشخصات ارتعاشی سازه، توزیع حداکثر نیاز شکل‌پذیری طبقات در ارتفاع سازه متفاوت خواهد بود [۴-۷]. به طوری که در بعضی موارد پایین سازه و در برخی دیگر قسمت‌های بالای سازه بحرانی بوده است. بعضی از مطالعات نحوه توزیع تغییر شکل‌های سازه در ارتفاع را وابسته به نسبت پیوند سازه به پیوند پالس سرعت در حوزه نزدیک گسل می‌دانند [۴، ۸].

در این تحقیق اثرات مودهای بالاتر در قاب‌های خمشی فولادی تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل (با اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده) مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور تعداد پنج قاب خمشی فولادی پنج دهانه با شکل‌پذیری متوسط و تعداد ۴، ۷، ۱۵ و ۲۰ طبقه، تحت ۲۰ شتاب‌نگاشت دور و نزدیک گسل ارزیابی می‌شود. نیازهای لرزه‌ای خطی و غیرخطی مورد بحث در این تحقیق عبارتند از: جابه‌جایی طبقات، زاویه دررفت طبقات، برش طبقات و برش پایه. همچنین در این مقاله گراف‌های کاربردی به همراه ضرایب تبدیل پاسخ الاستیک (جابه‌جایی بام) سازه یک درجه آزاد (SDOF) به پاسخ‌های خطی و غیرخطی سازه‌های چند درجه آزاد (MDOF) مورد بحث، تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف، در حوزه مدل‌های این تحقیق ارائه می‌شود. این گراف‌ها به منظور تخمین اولیه از نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها تحت زلزله‌های نزدیک گسل و همچنین بررسی اثرات مودهای بالاتر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این ضرایب اصلاح (RMFs) را می‌توان در ارزیابی سریع نیازهای غیرخطی سازه به کار گرفت به نحوی که با معلوم بودن تغییر مکان الاستیک طیفی (طیف پاسخ یا طیف طرح) برای یک میرایی معلوم در سازه تک درجه آزادی معادل، می‌توان تخمین سریعی از نیازهای سازه‌های چند درجه آزاد ارائه نمود. از دیگر کاربردهای RMFs، محاسبه تغییر مکان هدف مورد نیاز روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (NSPs) در اثر زلزله‌های نزدیک گسل است که قبلاً کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

۲- تاریخچه تحقیقات

مشاهدات دیگر حاکی از این است که اثرات حوزه نزدیک گسل با در نظر گرفتن اثر پرتابه‌ای (جابه‌جایی ماندگار زمین در راستای موازی با گسل در گسل‌های امتدادلغز)، باعث تحریک سازه در مود اول و ارتعاشات موج‌گونه بدون اثر پرتابه‌ای باعث تحریک مودهای بالاتر سازه می‌گردد [۹]. بررسی اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده در ارتفاع قاب‌های خمشی فولادی نشان داد که ۷۰ الی ۹۰ درصد از اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده در یک سوم پایین یا نیمه پایین سازه‌هاست [۷]. بررسی زلزله‌های نزدیک گسل دارای پالس سرعت بزرگ‌تر از ۰/۷ ثانیه بر روی قاب‌های خمشی فولادی نشان داد اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده، نیازهای کلی و محلی را به ترتیب در حدود ۱/۱ - ۲/۶ و ۱/۲ - ۳/۵ برابر افزایش می‌دهد [۱۰].

حال و همکاران [۱] نشان دادند که تغییر مکان ایجاد شده در اثر پالس زلزله نزدیک گسل، نیازهای لرزه‌ای قابل توجهی را بر سازه تحمیل نمود. اندرسون و همکاران [۲] با ارزیابی قاب خمشی فولادی در اثر رکورد نزدیک گسل، نشان دادند که پاسخ سازه نسبت به زمان تداوم پالس شتاب که متناسب با



شکل (۱): فلوجارت تحقیق.

مطالعات پیشین است [۱۱]. ارتباط بین پاسخ دستگاه‌های SDOFs و MDOFs برای اولین بار توسط ولتسوس و وان [۱۲] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعه ناسار و کراوینکلر [۱۳] بر وجود تفاوت کیفی در نتایج حاصل از نیاز مقاومت سازه MDOFs نسبت به سیستم SDOFs دلالت نمود. مطالعه رهگذر و هومار نشان داد که برای سطوح شکل‌پذیری زیاد، نیاز شکل‌پذیری جابه‌جایی در بسیاری از طبقات سازه MDOFs می‌تواند نسبت به شکل‌پذیری سیستم SDOFs معادل، افزایش قابل توجهی داشته باشد. آنها همچنین نتیجه گرفتند پایین‌ترین طبقه در اغلب سازه‌ها، طبقه بحرانی است. هرچند که طبقات بالاتر نیز می‌توانند در اثر دخالت مودهای بالاتر، مقادیر نیاز شکل‌پذیری بیشتری را از خود نشان دهند [۱۴].

با بررسی مطالعات صورت گرفته پیشین مشخص می‌شود که اثرات مودهای بالاتر در زلزله‌های نزدیک گسل با اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین ضرایب اصلاح برای سازه‌های تک درجه آزاد معادل (ESDOF) در تخمین نیازهای لرزه‌ای سازه‌های چند درجه آزاد (MDOF) تحت شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل کمتر بررسی شده است. به همین منظور هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثرات مودهای بالاتر تحت زلزله‌های نزدیک گسل و ارائه ضرایب اصلاح (RMFs) کاربردی پاسخ سازه‌های SDOF معادل تحت زلزله‌های نزدیک گسل است. در شکل (۱) فلوجارت این تحقیق ارائه شده است.

در یک تقسیم‌بندی ساده مهم‌ترین ویژگی‌ها و وجوه تمایز این مطالعه با تحقیقات پیشین را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

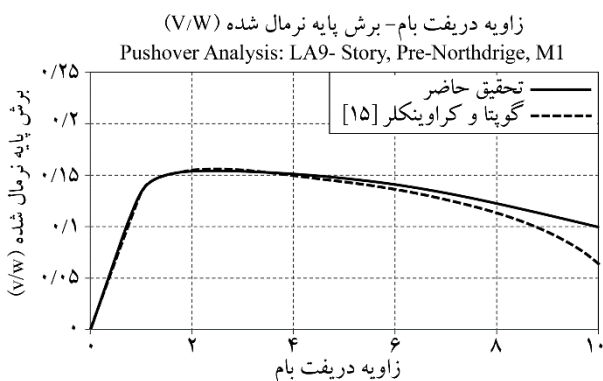
- مقایسه نیازهای لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل (با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده)
- ارزیابی اثرات مودهای بالاتر تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل (با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده)
- بررسی اثرات مودهای بالاتر با افزایش ارتفاع سازه‌ها تحت زلزله‌های نزدیک گسل

- ارائه ضرایب اصلاح پاسخ الاستیک سازه SDOF به پاسخ‌های خطی و غیرخطی سازه‌های MDOF تحت زلزله‌های نزدیک دور و نزدیک گسل
- ارائه ضرایب تبدیل پاسخ‌های الاستیک سازه MDOF به پاسخ‌های غیر الاستیک سازه‌های MDOF تحت زلزله‌های نزدیک گسل
- تخمین جابه‌جایی هدف سازه‌های MDOF مورد استفاده در تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت زلزله‌های نزدیک گسل

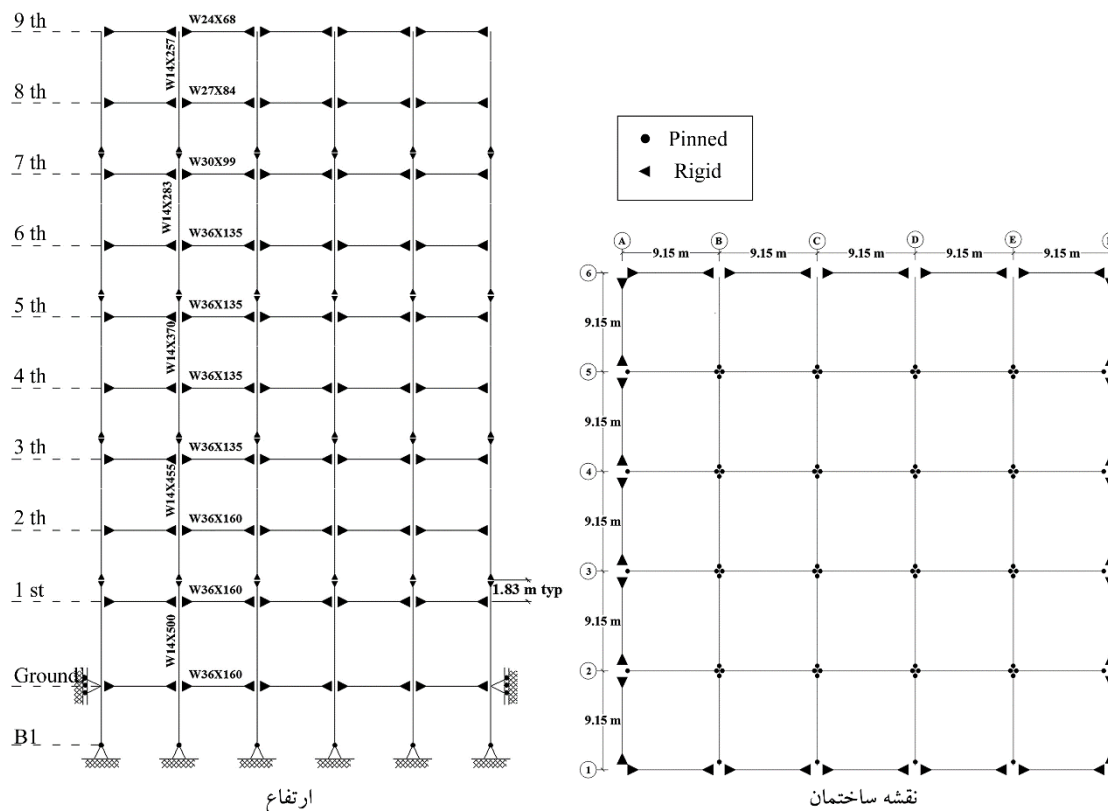
۳- معرفی مدل‌ها

نرم‌افزار مورد استفاده توسط گوپتا شبیه‌سازی اثر $P-\Delta$ توسط یک ستون مجازی که بر آن بار ثقلی وارد شده و با یک عضو خرپایی با سختی قابل توجه به قاب اصلی متصل می‌شود، انجام گرفته است، درحالی‌که در این مطالعه اثرات غیرخطی شدن هندسه توسط ماتریس‌های انتقال که از ویژگی‌های برنامه OpenSees است تعریف شده است.

صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی یکی از مهم‌ترین گام‌های یک مطالعه است. در مطالعات عددی و به‌خصوص زمانی که باید یک بانک اطلاعات قابل توجه برای استخراج روابط تجربی تهیه شود، عدم اطمینان از صحت مدل ساخته شده می‌تواند به نتایج غیردقیق بیانجامد. برای پرهیز از چنین پیشامدی در این مقاله، تمامی مدل‌ها بر اساس مدل ۹ طبقه نشان داده شده در شکل (۲) صحت‌سنجی شده‌اند [۱۵]. بعد از مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees [۱۶]، نمودار بار افزون حاصل از مطالعه گوپتا به همراه مدل دو بعدی ساخته شده توسط نویسندگان این مقاله در شکل (۳) نمایش داده شده است. مقایسه بین دو نمودار نشان‌دهنده دقت قابل قبول در فاز مدل‌سازی این تحقیق است. دلیل اختلاف نیز در دو موضوع مستتر است. اول اینکه گوپتا در مدل‌سازی از ایده مفصل پلاستیک متمرکز استفاده کرده است درحالی‌که در این مطالعه از خاصیت پلاستیسیته گسترده که توسط المان فیبر مدل‌سازی می‌شود، استفاده شده است. ثانیاً در



شکل (۳): مقایسه نمودار بار افزون مدل M1 در مطالعه گوپتا با نمودار عددی مطالعه حاضر در دررفت سرتاسری ۱۰ درصد [۱۴، ۱۸].



شکل (۲): نمای جانبی و پلان طبقه ساختمان SAC9 [۱۵].

۴- رکوردهای مورد استفاده

در این مطالعه ۱۰ شتاب‌نگاشت دور از گسل و ۱۰ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل مطابق جدول (۲) به منظور استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انتخاب شده است. شتاب‌نگاشت‌های نزدیک گسل دارای اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده، زمان مؤثر کوتاه و دوره تناوب پالس سرعت بالا می‌باشند و از ایستگاه‌هایی که در فاصله کمتر از ۱۵Km از گسل قرار دارند، انتخاب شده‌اند. همه شتاب‌نگاشت‌های انتخابی در این مطالعه، دارای بزرگای $\frac{4}{5}$ بیشتر از $\frac{6}{5}$ می‌باشند و مشخصات مربوط به خاک کلاس D بر اساس طبقه‌بندی دستورالعمل [۱۸] FEMA 356 است و از سایت PEER دریافت شده است.

در این پژوهش، از مدل‌های ۴، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۴ متر و تعداد پنج دهانه به طول ۵ متر استفاده شده است. قاب‌های مورد نظر قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط می‌باشند. به منظور طراحی سازه‌ها از آیین‌نامه AISC-ASD89 و آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ [۱۷]) استفاده شده است و فرضیه‌های طراحی شامل خاک نوع III و منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد است. مقاطع مورد استفاده در این قاب‌ها شامل مقاطع جعبه‌ای و تیر ورق به ترتیب برای ستون‌ها و تیرها است. در جدول (۱) مقاطع مورد استفاده برای سازه‌های مختلف ارائه شده است.

جدول (۱): مقاطع سازه‌های مورد استفاده در تحقیق.

طبقات	سازه ۴ طبقه		سازه ۷ طبقه		سازه ۱۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۲۰ طبقه	
	ستون‌ها	تیرها	ستون‌ها	تیرها	ستون‌ها	تیرها	ستون‌ها	تیرها	ستون‌ها	تیرها
1	Box 40×10	PG 40×15	Box 40×15	PG 40×20	Box 40×20	PG 50×20	Box 50×20	PG 50×20	Box 50×25	PG 60×20
2	Box 40×10	PG 40×15	Box 40×15	PG 40×20	Box 40×20	PG 50×20	Box 50×20	PG 50×20	Box 50×25	PG 60×20
3	Box 30×10	PG 40×10	Box 40×15	PG 40×20	Box 40×20	PG 40×20	Box 50×20	PG 50×20	Box 50×25	PG 60×20
4	Box 30×10	PG 40×10	Box 40×10	PG 40×15	Box 40×15	PG 40×20	Box 50×20	PG 50×20	Box 50×25	PG 60×20
5			Box 30×10	PG 40×15	Box 40×15	PG 40×15	Box 50×20	PG 50×20	Box 50×25	PG 60×20
6			Box 30×10	PG 40×10	Box 40×15	PG 40×15	Box 40×20	PG 50×20	Box 50×25	PG 60×20
7			Box 30×10	PG 40×10	Box 40×10	PG 40×15	Box 40×20	PG 50×20	Box 50×20	PG 60×20
8					Box 40×10	PG 40×15	Box 40×20	PG 40×20	Box 50×20	PG 60×20
9					Box 35×10	PG 40×10	Box 40×20	PG 40×20	Box 50×20	PG 60×20
10					Box 35×10	PG 40×10	Box 40×15	PG 40×20	Box 50×20	PG 60×20
11							Box 40×15	PG 40×20	Box 40×20	PG 50×20
12							Box 40×15	PG 40×20	Box 40×20	PG 50×20
13							Box 40×15	PG 40×20	Box 40×20	PG 50×20
14							Box 40×10	PG 40×10	Box 40×20	PG 50×20
15							Box 40×10	PG 40×10	Box 40×15	PG 50×20
16									Box 40×15	PG 50×20
17									Box 40×15	PG 40×20
18									Box 40×10	PG 40×20
19									Box 40×10	PG 40×20
20									Box 40×10	PG 40×20

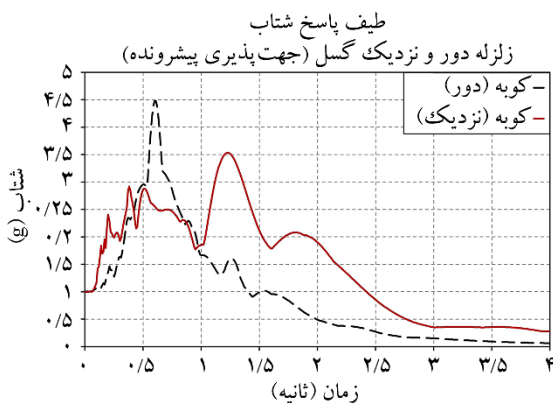
* برای مقاطع ستون‌ها، عدد اول معرف ابعاد ستون برحسب سانتی‌متر و عدد دوم معرف ضخامت برحسب میلی‌متر است.

* برای مقاطع تیرها، عدد اول معرف عمق تیروورق برحسب سانتی‌متر و عدد دوم معرف عرض تیروورق برحسب سانتی‌متر است. ضخامت همه‌ی ورق‌ها ۱۰ میلی‌متر است.

جدول (۲): شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده (زلزله‌های دور و نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده).

Tm (s)	Tp (s)	CAV (m/s)	PGV/PGA (s)	PGA (g)	R (Km)	Station	Date (yy-mm-dd)	Earthquake name	Number
0.79	0.56	9.88	0.14	0.1	83.43	CHY065	99-09-20	Chi Chi, Taiwan	1
0.84	0.98	56.56	0.18	0.15	109.01	TAP095	99-09-20	Chi Chi, Taiwan	2
0.86	0.32	27.69	0.15	0.24	72.2	CDMG58224	89-10-18	Loma Prieta	3
0.85	0.64	28.35	0.16	0.26	74.26	CDMG58472	89-10-18	Loma Prieta	4
0.76	0.6	45.02	0.11	0.14	95.72	HIK	95-01-16	Kobe, Japan	5
0.53	0.3	33.26	0.11	0.23	58.65	CDMG58223	89-10-18	Loma Prieta	6
0.46	0.16	59.48	0.09	0.13	49.97	Qazvin	90-06-20	Manjil, Iran	7
0.44	0.38	31.22	0.07	0.1	82.32	CDMG13122	94-01-17	Northridge	8
0.29	0.24	48.38	0.08	0.1	91.14	Ferdows	78-09-16	Tabas, Iran	9
0.93	0.68	100.9	0.21	0.1	60.43	Bursa Tofas	99-08-17	Kocaeli, Turkey	10
1.52	0.94	47.83	0.43	0.32	2.74	Pump st.10	02-11-03	Denali, Alaska	11
0.91	0.78	118.26	0.43	0.59	R<15	Bam	03-12-26	Bam, Iran	12
0.98	0.9	48.15	0.27	0.44	9.96	CHY101	99-09-20	Chi-Chi, Taiwan	13
1.51	0.42	30.52	0.32	0.56	0.32	TCU068	99-09-20	Chi-Chi, Taiwan	14
1.31	0.24	23.33	0.26	0.43	1.35	CDMG	79-10-15	Imperial Valley	15
0.72	0.22	25.50	0.15	0.49	5.19	DWP 75	94-01-17	Northridge	16
1.82	1.52	93.81	0.33	0.45	R<15	Chalan Cho.	06-03-31	Silakhor, Iran	17
1.29	0.52	39.12	0.25	0.26	4.83	Yarimca	99-08-17	Kocaeli, Turkey	18
1.73	1.36	123.41	0.28	0.42	R<15	Meymand	94-06-20	Zanjiran, Iran	19
1.10	1.22	42.52	0.21	0.61	1.47	Takatori	95-01-16	Kobe, Japan	20

شتاب‌نگاشت‌های مختلف، نتایج در ادامه ارائه خواهد شد. در شکل (۴) طیف پاسخ حاصل از رکورد زلزله کوبه با و بدون اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در ناحیه سرعت ثابت طیف‌ها، مقادیر طیف پاسخ حاصل از رکورد نزدیک گسل دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده بیشتر از مقادیر طیف رکورد بدون اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده است که علت آن وجود پالس سرعت در رکوردهای نزدیک گسل دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده است. در شکل‌های (۵) نتایج حاصل از زلزله‌های دور و نزدیک گسل، به تفکیک برای سازه‌های مختلف ارائه شده است.

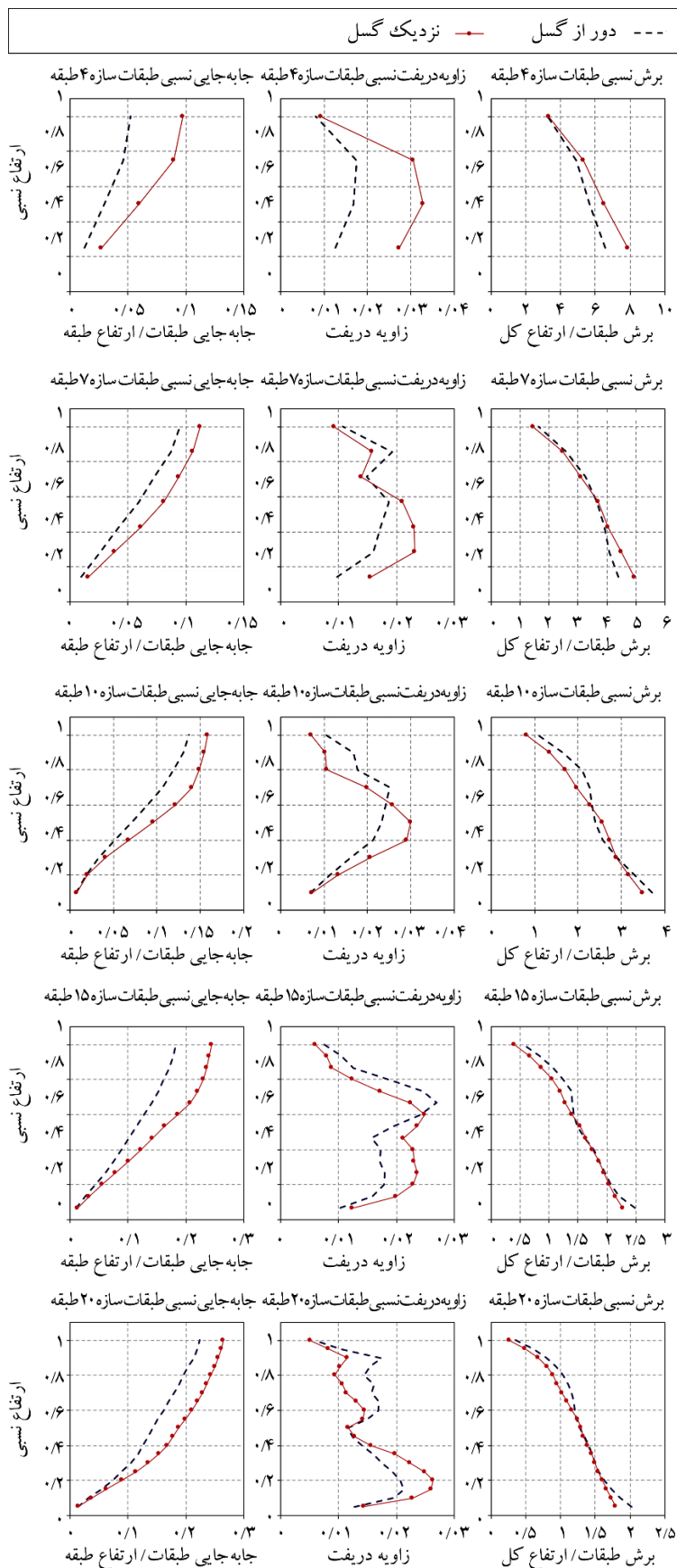


شکل (۴): مقایسه طیف پاسخ زلزله کوبه با و بدون اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده.

برای ترسیم طیف پاسخ ارتجاعی از نرم‌افزار SeismoSignal استفاده شده است و همه شتاب‌نگاشت‌ها قبل از مقیاس‌سازی، به مقدار حداکثر شتاب (PGA) خود هم‌پایه شده‌اند. همه شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این تحقیق به روش ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) مقیاس شده‌اند و در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌منظور انجام تمامی تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی در این مطالعه از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است.

۵- ارزیابی اثرات موده‌های بالاتر تحت زلزله‌های نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده

به‌منظور بررسی اثرات موده‌های بالاتر تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل از ۲۰ شتاب‌نگاشت دور و نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده (مطابق جدول ۲) استفاده شده است. مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق تعداد پنج قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و در طبقات ۴، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و تعداد پنج دهانه است. همه‌ی تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی تحت شتاب‌نگاشت‌های مذکور، توسط نرم‌افزار OpenSees انجام شده است. در نهایت با میانگین‌گیری از پاسخ‌های

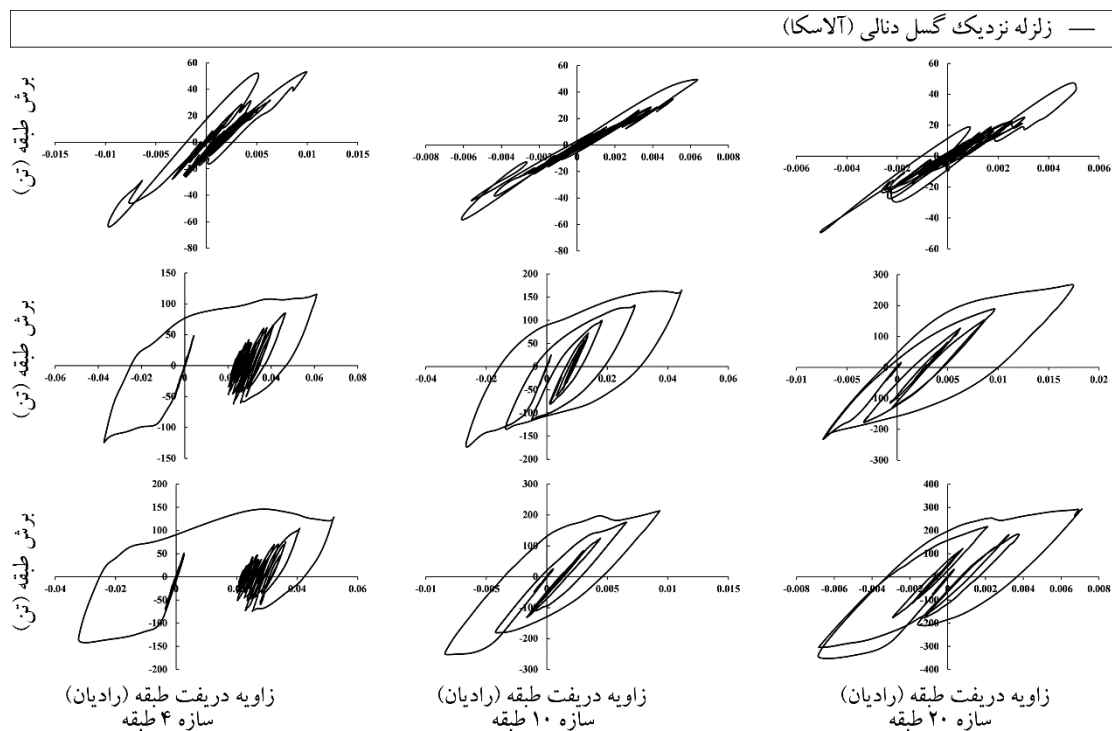


شکل (۵): نتایج حاصل از جابه‌جایی، زاویه دررفت و برش طبقات تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل برای سازه‌های مورد مطالعه.

گسل کاهش می‌یابد و این کاهش در طبقات تحتانی سازه‌های مذکور مشاهده می‌شود.

بررسی نتایج حاصل از زاویه دررفت طبقات سازه‌های مختلف نشان می‌دهد در طبقات فوقانی مقادیر زاویه دررفت حاصل از زلزله‌های دور از گسل بیشتر از زلزله‌های نزدیک گسل است که این امر به دلیل اثرات مودهای بالاتر است. در حقیقت با افزایش ارتفاع سازه اثرات مودهای بالاتر تحت زلزله‌های حوزه دور از گسل افزایش می‌یابد. این در حالی است که در سازه ۴ طبقه زاویه دررفت حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل در تمام طبقات از زلزله‌های دور از گسل بیشتر است. در حقیقت به دلیل بیشتر بودن انرژی ورودی به سازه در اثر زلزله‌های نزدیک گسل در کلیه سازه‌های مورد بحث جابه‌جایی ناشی از زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از جابه‌جایی ناشی از زلزله‌های دور از گسل است. در شکل (۶) منحنی هیستریزس سازه‌های مختلف در طبقات و تحت نمونه‌ای از زلزله‌های نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده ارائه شده است. سطح زیر این منحنی در طبقات مختلف بیانگر میزان جذب انرژی توسط سازه است.

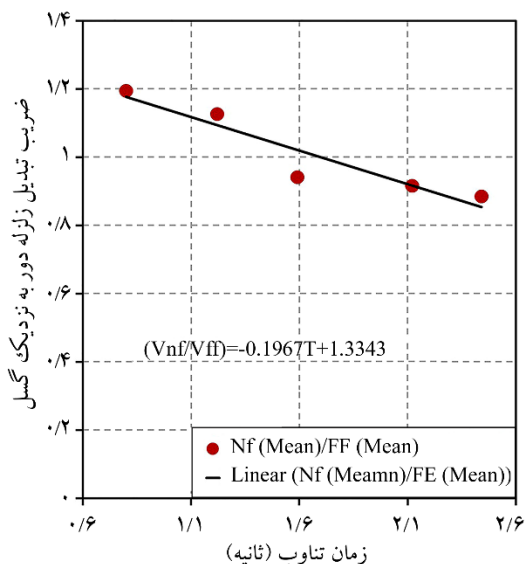
بررسی نتایج نشان می‌دهد در همه‌ی سازه‌های مورد بررسی جابه‌جایی طبقات حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از زلزله‌ی دور از گسل است. این در حالی است که اختلاف میان جابه‌جایی طبقات حاصل از زلزله‌های دور و نزدیک گسل با افزایش تعداد طبقات سازه‌های مختلف کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از جابه‌جایی طبقات سازه‌های مختلف نشان می‌دهد با افزایش تعداد طبقات اثرات مودهای بالاتر در طبقات فوقانی سازه بیشتر شده و این موضوع برای زلزله‌های دور و نزدیک یکسان است. به‌عنوان نمونه در سازه ۲۰ طبقه در طبقات پایین رفتار سازه متأثر از مود اول نوسان سازه است این در حالی است که در طبقات میانی و فوقانی تغییرات رفتار سازه ناشی از اثر مودهای بالاتر است. در سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه جابه‌جایی طبقات تحتانی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل اثرپذیری بیشتری در مقایسه با زلزله‌های حوزه دور از مود اول نوسان سازه داشته است. در حقیقت اثرات مودهای بالاتر در سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در مقایسه با زلزله‌های دور از



شکل (۶): منحنی هیستریزس در طبقات مختلف (تحتانی، میانی و فوقانی) سازه‌های ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه تحت زلزله نزدیک گسل دنالی آلاسکا.

دوره تناوب سازه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. دوره تناوب‌های قاب‌های مختلف به ترتیب مقادیر ۰/۸، ۱/۲۲، ۱/۵۹، ۲/۱۲ و ۲/۴۴ ثانیه است. همچنین در جدول (۳) مقادیر ضریب تبدیل برش پایه زلزله‌های دور به نزدیک برای سازه‌های مختلف ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب تبدیل برای سازه‌های کوتاه‌مرتبه (۴ و ۷ طبقه) بزرگ‌تر از یک است. در حقیقت برش پایه زلزله نزدیک گسل بیشتر از زلزله دور از گسل است. این در حالی است که با افزایش دوره تناوب سازه‌ها مقدار این ضریب کاهش می‌یابد به نحوی که برای سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه (۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه) مقدار این ضریب کوچک‌تر از یک است.

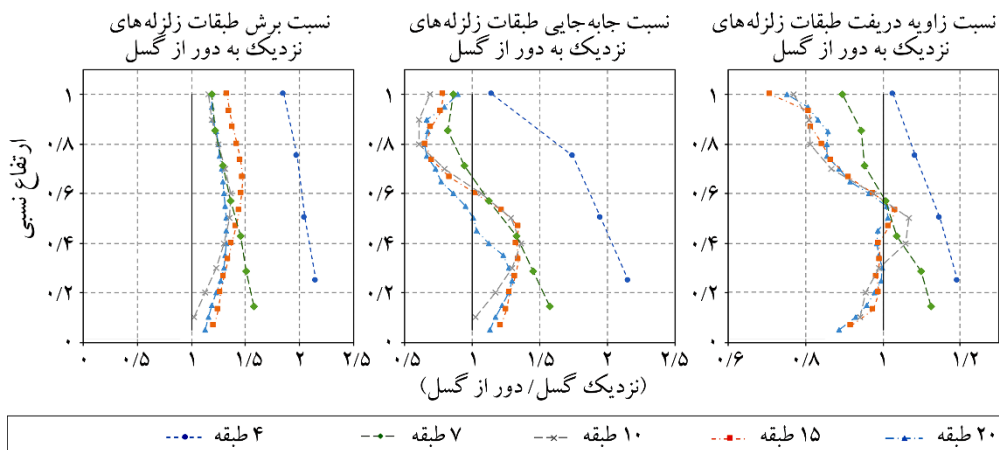
ضریب تبدیل برش پایه (دور به نزدیک گسل)



شکل (۸): نسبت برش پایه حاصل از زلزله‌های نزدیک به دور، بر حسب دوره تناوب سازه‌های مورد مطالعه.

در زلزله‌های نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده انرژی ورودی به سازه در طبقات پایین مستهلک شده و انرژی کمتری در مقایسه با زلزله دور از گسل به طبقات فوقانی سازه منتقل می‌شود. به همین دلیل زاویه دررفت طبقات فوقانی سازه‌های مورد بحث تحت زلزله‌های دور از گسل بیشتر از زلزله‌های نزدیک گسل است. این اثر با افزایش ارتفاع سازه افزایش می‌یابد به نحوی که در همه طبقات سازه چهار طبقه زاویه دررفت حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از زلزله‌های دور گسل است، در سازه هفت طبقه در سه طبقه فوقانی (حدود ۰/۳ ارتفاع)، زاویه دررفت حاصل از زلزله‌های دور از گسل افزایش می‌یابد، در سازه ۱۰ طبقه این افزایش در چهار طبقه فوقانی (حدود ۰/۴ ارتفاع) و در سازه ۱۵ طبقه در شش طبقه فوقانی (حدود ۰/۴ ارتفاع) رخ می‌دهد. همچنین در سازه ۲۰ طبقه در ده طبقه فوقانی (۰/۵ ارتفاع) زاویه دررفت حاصل از زلزله‌های دور از گسل بیشتر از زلزله‌های نزدیک گسل است. در شکل (۶) نسبت نتایج حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل به زلزله‌های دور از گسل برای سازه‌های مختلف به صورت خلاصه ارائه شده است. نتایج حاصل از برش طبقات در شکل (۷) نشان می‌دهد در طبقات تحتانی و فوقانی سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه (۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه)، برش حاصل از زلزله‌های نزدیک دور از گسل بیشتر از زلزله‌های نزدیک گسل است.

به منظور ساده‌سازی و تخمین اولیه از مقادیر برش پایه سازه‌ها تحت زلزله‌های نزدیک گسل با استفاده از نتایج برش پایه حاصل از زلزله‌های دور از گسل، در شکل (۸) نسبت برش پایه زلزله‌های نزدیک به دور، بر حسب



شکل (۷): نسبت نتایج حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل به زلزله‌های دور از گسل برای سازه‌های مختلف.

و زمان بر بودن کمتر توسط مهندسیین مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی روش‌های تحلیل خطی سازه‌ها از جمله روش تحلیل تاریخچه زمانی خطی به دلیل نداشتن محدودیت‌های روش NTHA کاربرد بیشتری در طراحی سازه‌ها دارد و در اکثر نرم‌افزارهای طراحی سازه وارد شده است. به همین دلیل در این تحقیق با انجام تحلیل تاریخچه زمانی خطی در نرم‌افزار OpenSees و تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف، مقایسه نتایج با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده است و در نهایت ضرایب اصلاحی بر حسب دوره تناوب سازه‌های مختلف در شکل (۱۰) برای زلزله‌های دور و نزدیک گسل ارائه شده است. استفاده از این گراف‌ها به درک بهتر رفتار سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه‌ها و تخمین پاسخ‌های آنها تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل کمک می‌کند. در جدول (۴) نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی خطی برای سازه‌های مورد مطالعه و تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف ارائه شده است.

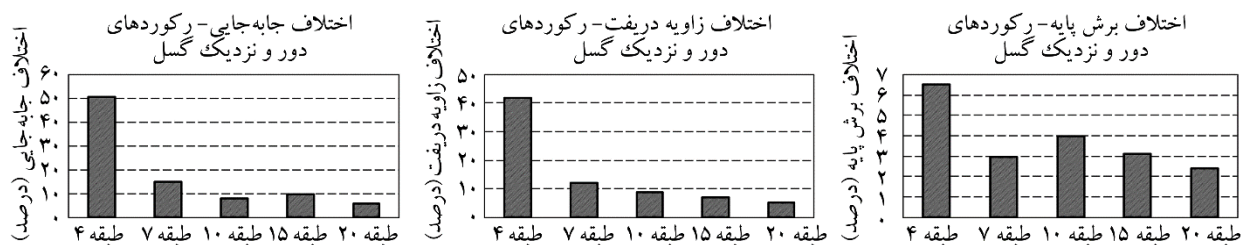
جدول (۳): مقادیر ضریب تبدیل برش پایه زلزله‌های دور به نزدیک برای سازه‌های مختلف.

ضریب تبدیل	طبقه ۴	طبقه ۷	طبقه ۱۰	طبقه ۱۵	طبقه ۲۰
V_{nf}/V_{ff}	۱/۲۰	۱/۱۳	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۸۹

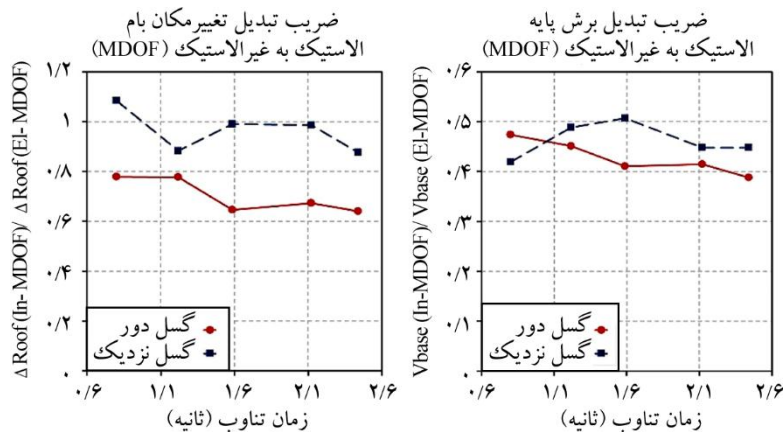
در شکل (۹) اختلاف مقادیر زلزله‌های دور و نزدیک گسل در سازه‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع سازه اختلاف مقادیر جابه‌جایی و زاویه دررفت طبقات، تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از برش طبقات در سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع سازه اختلاف میان زلزله‌های دور و نزدیک گسل در تخمین برش طبقات کاهش می‌یابد به نحوی که کمترین میزان این اختلاف به مقدار ۲/۴ درصد و مربوط به سازه ۲۰ طبقه است. بیشترین مقدار این اختلاف نیز مربوط به سازه ۴ طبقه و به مقدار ۶/۵ درصد است.

۶- ضرایب اصلاح پاسخ تحلیل تاریخچه زمانی خطی

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (NTHA) به دلیل پیچیدگی



شکل (۹): مقادیر اختلاف پاسخ‌های حاصل از زلزله‌های دور و نزدیک گسل برای سازه‌های مورد مطالعه.

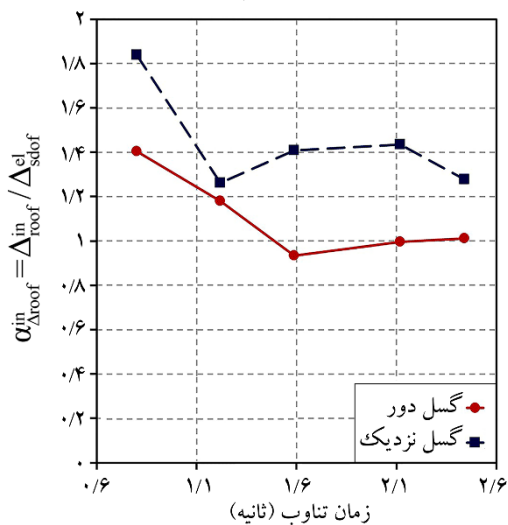


شکل (۱۰): ضرایب اصلاح پاسخ تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی در مقایسه با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه‌های MDOF مورد مطالعه تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل.

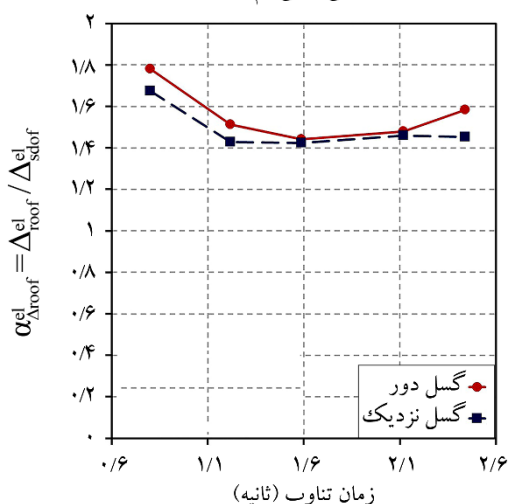
جدول (۴): مقادیر تحلیل تاریخیچه زمانی خطی برای سازه‌های MDOF مورد مطالعه و تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف.

نتایج تحلیل خطی	رکورد	طبقه ۴	طبقه ۷	طبقه ۱۰	طبقه ۱۵	طبقه ۲۰
جابه‌جایی بام (متر)	دور از گسل	۰/۲۷	۰/۴۹	۰/۸۵	۱/۰۹	۱/۴
	نزدیک گسل	۰/۳۶	۰/۵۱	۰/۶۴	۰/۹۹	۱/۲۱
حداکثر زاویه دریفت (رادیان)	دور از گسل	۰/۰۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۳	۰/۰۳۲	۰/۰۳۶
	نزدیک گسل	۰/۰۲۹	۰/۰۲۲	۰/۰۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۲
برش پایه (تن)	دور از گسل	۲۳۸	۳۷۴	۵۹۰	۷۴۱	۹۹۹/۴
	نزدیک گسل	۳۲۱/۴	۳۸۹	۴۵۰/۴	۶۲۹	۷۶۷

ضرایب تبدیل جابه‌جایی خطی بام سازه SDOF به جابه‌جایی غیرخطی بام سازه MDOF



ضرایب تبدیل جابه‌جایی خطی بام سازه SDOF به جابه‌جایی خطی بام سازه MDOF



شکل (۱۱): ضرایب تبدیل جابه‌جایی خطی بام سازه SDOF به جابه‌جایی غیرخطی بام سازه MDOF و ضرایب تبدیل جابه‌جایی خطی بام سازه SDOF به جابه‌جایی خطی بام سازه MDOF را بر حسب دوره تناوب سازه‌های مختلف.

۷- ضرایب اصلاح پاسخ سازه‌های تک درجه آزاد معادل (ESDOF)

سازه SDOF معادل، سازه‌ای است که دوره تناوب آن معادل اولین دوره تناوب سازه چند درجه آزادی (MDOF) است. همچنین جرم سازه یک درجه آزادی معادل برابر جرم سازه MDOF تعریف می‌شود. بنابراین برای مدل‌سازی سازه یک درجه آزادی معادل، به مشخصات دینامیکی سازه چند درجه آزادی نیاز است. در این مطالعه پاسخ سازه‌های SDOF به‌ازای دوره تناوب سازه‌های MDOF از نتایج حاصل از طیف پاسخ الاستیک شتاب‌نگاشت‌های مورد بحث به‌ازای میرایی ۵ درصد که از نرم‌افزار SeismoSignal استخراج شده است.

شکل (۱۱) نمودار ضرایب تبدیل جابه‌جایی خطی بام سازه SDOF به جابه‌جایی غیرخطی بام سازه MDOF و نمودار ضرایب تبدیل جابه‌جایی خطی بام سازه SDOF به جابه‌جایی خطی بام سازه MDOF را بر حسب دوره تناوب سازه‌های مختلف تحت شتاب‌نگاشت‌های دور و نزدیک گسل نشان می‌دهد. دوره تناوب‌های سازه‌های مختلف به ترتیب مقادیر ۰/۸، ۱/۲۲، ۱/۵۹، ۲/۱۲، ۲/۴۴ ثانیه است. مهم‌ترین کاربرد گراف‌های ارائه شده در این بخش، به‌طور خلاصه عبارتند از:

- ساده‌سازی در تخمین جابه‌جایی بام سازه‌های MDOF با استفاده از سازه‌های SDOF معادل
- تخمین جابه‌جایی هدف سازه‌های MDOF مورد استفاده در تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت زلزله‌های نزدیک گسل همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد همه ضرایب محاسبه شده بزرگ‌تر از یک است. این موضوع نشان می‌دهد که اثرات چند درجه آزادی بر روی جابه‌جایی خطی و غیرخطی بام سازه‌های مورد بحث تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل افزایشی است.

• بررسی زاویه دررفت در ارتفاع طبقات سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که در حدود ۳۰-۵۰ درصد از ارتفاع سازه در طبقات فوقانی، پاسخ حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده بیشتر از پاسخ حاصل از زلزله‌های دور از گسل است.

• در زلزله‌های نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده انرژی ورودی به سازه در طبقات پایین مستهلک شده و انرژی کمتری در مقایسه با زلزله دور از گسل به طبقات فوقانی سازه منتقل می‌شود. به همین دلیل زاویه دررفت طبقات فوقانی سازه‌های مورد بحث تحت زلزله‌های دور از گسل بیشتر از زلزله‌های نزدیک گسل است. این اثر با افزایش ارتفاع سازه افزایش می‌یابد.

• نتایج حاصل از برش طبقات در سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع سازه اختلاف میان زلزله‌های دور و نزدیک گسل در تخمین برش طبقات کاهش می‌یابد به نحوی که کمترین میزان این اختلاف به مقدار ۲/۴ درصد و مربوط به سازه ۲۰ طبقه است.

• برش پایه حاصل از زلزله‌های دور از گسل برای سازه‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه بیشتر از زلزله‌های نزدیک گسل است.

مراجع

- Hall, J.F., Heaton, Th.H., Halling, M.W. and Wald, D.J. (1995) Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, **11**(4), 569-605.
- Anderson, J.C. and Bertero, V.V. (1987) Uncertainties in establishing design earthquakes. *Journal of Structural Engineering*, **113**(8), 1709-1724.
- Westergaard, H. (1933) Earthquake-shock transmission in tall buildings. *Eng. News-Rec*, **111**(22), 654-656.
- Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M., Cofer, W.F. (2011) Effects of near-fault ground

روابط حاصل از رگرسیون خطی گراف‌های ارائه شده در شکل (۱۱) به شرح زیر است.

$$\alpha_{\Delta_{\text{roof}}}^{\text{in-NF}} = 0.2216 T + 1/8.06 \quad (1)$$

$$\alpha_{\Delta_{\text{roof}}}^{\text{in-FF}} = -0.2282 T + 1/47.82 \quad (2)$$

$$\alpha_{\Delta_{\text{roof}}}^{\text{el-NF}} = -0.0959 T + 1/64.48 \quad (3)$$

$$\alpha_{\Delta_{\text{roof}}}^{\text{el-FF}} = -0.1026 T + 1/72.68 \quad (4)$$

۸- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش به بررسی اثرات مودهای بالاتر بر روی نیازهای لرزه‌ای (جابه‌جایی، زاویه دررفت و برش طبقات) قاب‌های خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل پرداخته شده است. به همین منظور تعداد پنج قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات ۴، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و تعداد پنج دهانه طراحی شد و با استفاده از نرم‌افزار OpenSees تحلیل‌های غیرخطی بر روی آنها انجام گرفت. با بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌های غیرخطی، مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- اثرات مودهای بالاتر تحت زلزله‌های دور از گسل بیشتر از زلزله‌های راستای نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده است.
- با افزایش ارتفاع طبقات اثرات مودهای بالاتر تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل افزایش می‌یابد.
- با افزایش تعداد طبقات (دوره تناوب) اختلاف مقادیر نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها، تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل کاهش می‌یابد. بیشترین میزان اختلاف زاویه دررفت طبقات حاصل از زلزله‌های دور و نزدیک گسل در حدود ۴۲ درصد و مربوط به سازه چهار طبقه و کمترین مقدار آن در حدود ۵/۲ درصد و برای سازه ۲۰ طبقه می‌باشد. بیشترین میزان اختلاف جابه‌جایی طبقات حاصل از زلزله‌های دور و نزدیک گسل در حدود ۵۱ درصد و مربوط به سازه چهار طبقه و کمترین مقدار آن در حدود ۵/۸ درصد و برای سازه ۲۰ طبقه می‌باشد.

- Moment Resisting Frame Structures*, Stanford University.
16. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L. (2006) *OpenSees Command Language Manual*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.
 17. Code 2800 (2800) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. Third Revision, Building and Housing Research Center, Iran (in Persian).
 18. Council, B.S.S. (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-356*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
 19. Siahpolo, N. and Gerami, M. (2014) *Practical Earthquake Engineering*. Semnan University publication, first edition.
 5. Soleimani Amiri, F., Ghodrati Amiri, G. and Razeghi, H. (2013) Estimation of seismic demands of steel frames subjected to near-fault earthquakes having forward directivity and comparing with pushover analysis results. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **22**(13), 975-988.
 6. Özhendekci, D. and Özhendekci, N. (2012) Seismic performance of steel special moment resisting frames with different span arrangements. *Journal of Constructional Steel Research*, **72**, 51-60.
 7. Gerami, M. and Abdollahzadeh, D. (2015) Vulnerability of steel moment-resisting frames under effects of forward directivity. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **24**(2), 97-122.
 8. Alavi, B. and Krawinkler, H. (2001) *Effects of Near-Fault Ground Motions on Frame Structures*. John A. Blume Earthquake Engineering Center.
 9. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. (2006) Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, **22**(2), 367-390.
 10. Gerami, M. and Abdollahzadeh, D. (2013) Local and global effects of forward directivity. *Gradevinar*, **65**(11), 971-985.
 11. Gerami, M. (2002) *The Effect of Higher Modes on Ductility Demand and Seismic Strength of SMRF*. University of Tarbiat-e-Modarres, Tehran, Iran.
 12. Veletsos, A.S. and Vann, W.P. (1971) Response of ground-excited elastoplastic systems. *Journal of the Structural Division*, **97**(4), 1257-1281.
 13. Nassar, A.A. and Krawinkler, H. (1991) *Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems*. John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Stanford University.
 14. Humar, J. and Rahgozar, M. (1996) Application of inelastic response spectra derived from seismic hazard spectral ordinates for Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **23**(5), 1051-1063.
 15. Gupta, A. and Krawinkler, H. (1999) *Seismic Demands for the Performance Evaluation of Steel*

واژه‌نامه

Forward Directivity	۱- جهت‌پذیری پیش‌رونده
Fling step	۲- اثر پرتابه‌ای
Backward Directivity	۳- جهت‌پذیری پس‌رونده
Magnitude	۴- بزرگی