

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 پالس گونه با پرپود بلند نمایان گردد (لازم به ذکر است که اثرات جهت‌پذیری پس‌رونده^۳ فاقد ماهیت پالس گونه است). حرکت زمین دارای چند ماهیت پالس گونه غالباً در ابتدای شتاب‌نگاشت نمایان شده و تمایل دارد که بخش پرپود 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 پالس گونه 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 پالس گونه حاوی اثرات جهت‌پذیری و

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 ۴ بیشتر از ۶/۵ 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

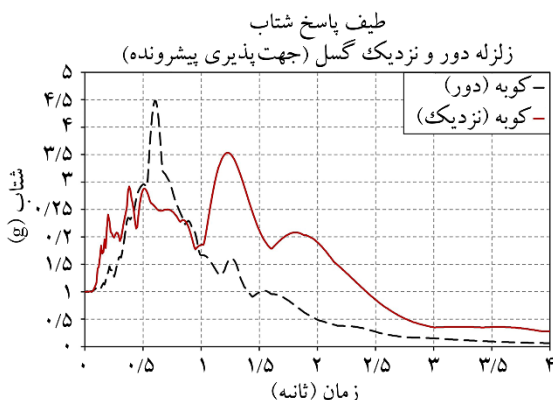
* برای مقاطع ستون‌ها، عدد اول معرف ابعاد ستون برحسب سانتی‌متر و عدد دوم معرف ضخامت برحسب میلی‌متر است.

* 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.

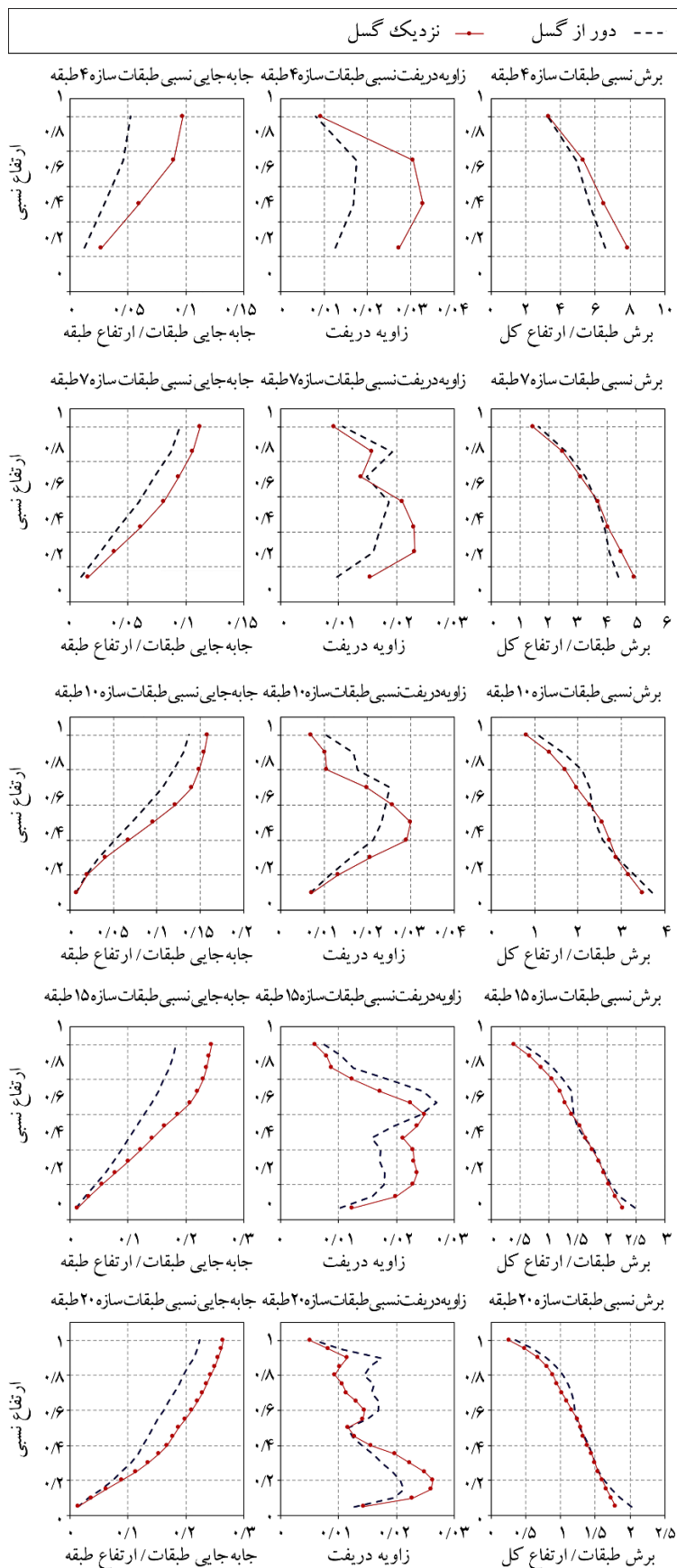


شکل (۴): مقایسه طیف پاسخ زلزله کوبه با و بدون اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده.

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 تاریخیچه زمانی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌منظور انجام تمامی تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی در این مطالعه از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است.

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

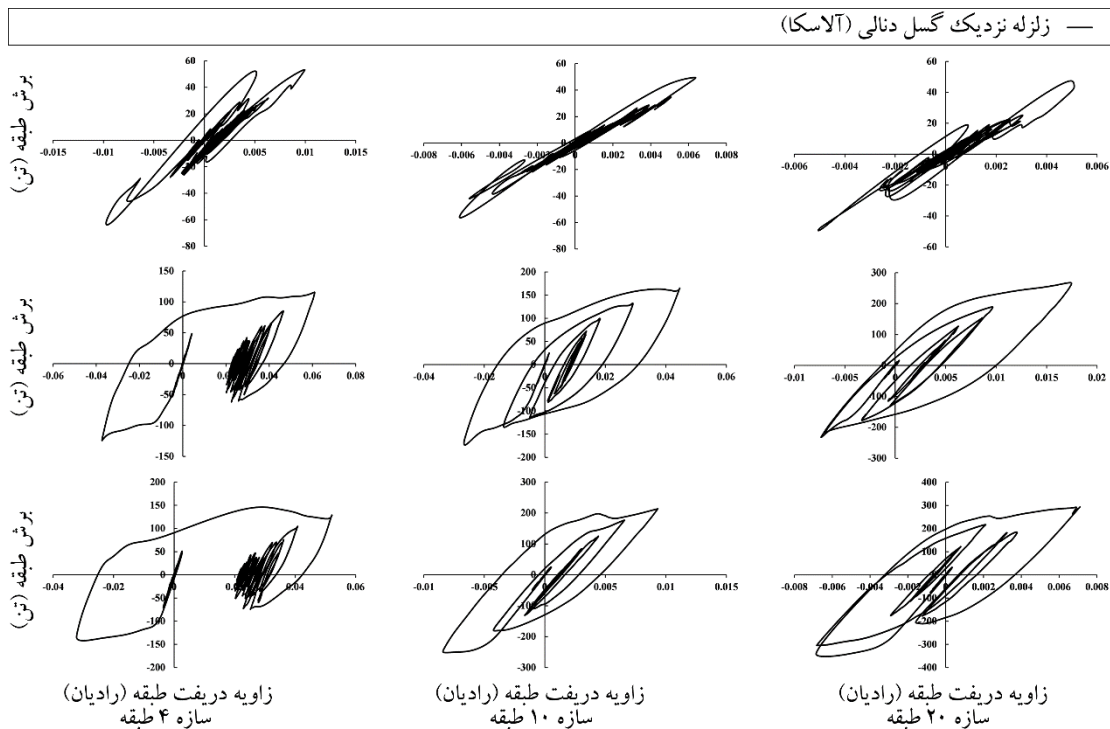
به‌منظور بررسی اثرات موده‌های بالاتر تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل از ۲۰ شتاب‌نگاشت دور و نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده (مطابق جدول ۲) استفاده شده است. مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق تعداد پنج قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و در طبقات ۴، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و تعداد پنج دهانه است. همه‌ی تحلیل‌های تاریخیچه 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 دریافت طبقات سازه‌های مختلف نشان می‌دهد در طبقات فوقانی مقادیر زاویه دریافت 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 دریافت 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.

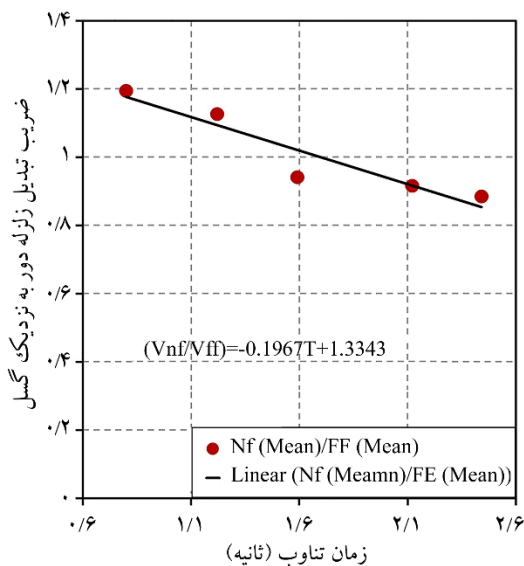
بررسی نتایج نشان می‌دهد در همه‌ی سازه‌های مورد بررسی جابه‌جایی طبقات حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل بیشتر از زلزله‌ی دور از گسل است. این در حالی است که اختلاف میان جابه‌جایی طبقات حاصل از زلزله‌های دور و نزدیک گسل با افزایش تعداد طبقات سازه‌های مختلف کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از جابه‌جایی طبقات سازه‌های 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.

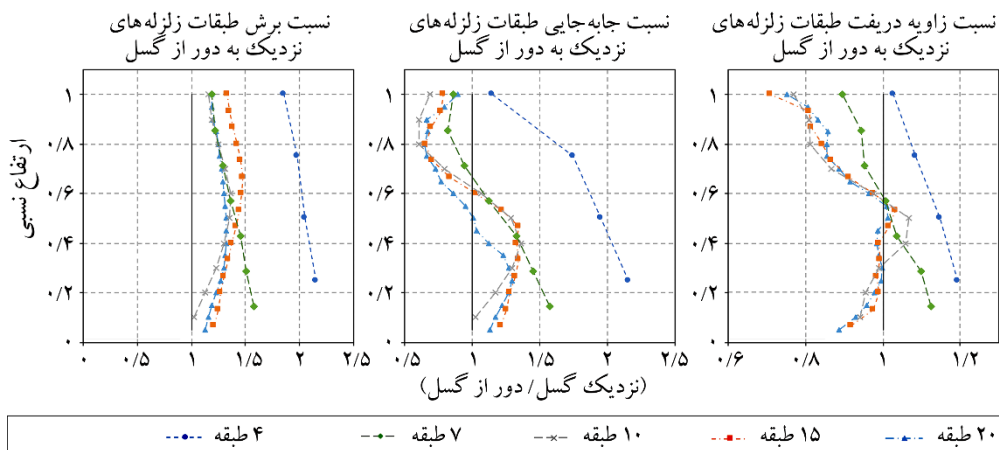
ضریب تبدیل برش پایه (دور به نزدیک گسل)



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.

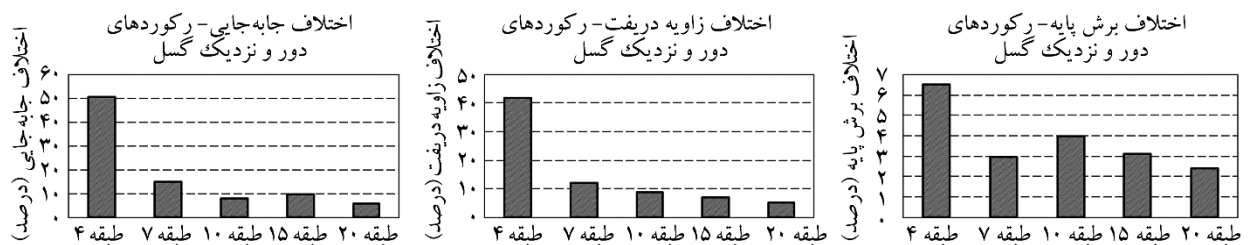
جدول (۳): مقادیر ضریب تبدیل برش پایه زلزله‌های دور به نزدیک برای سازه‌های مختلف.

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

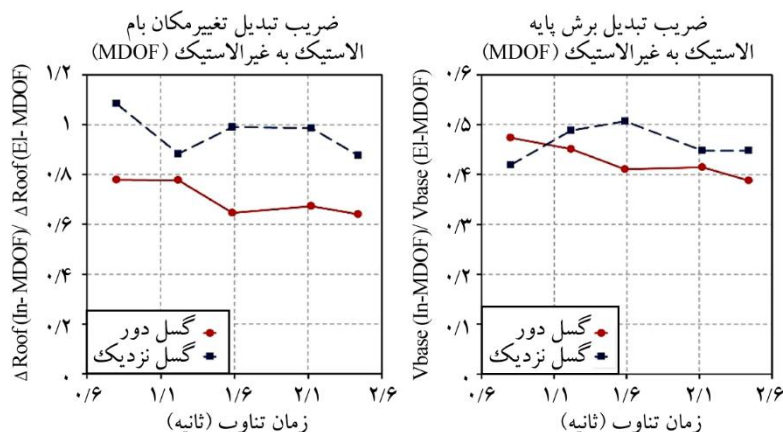
در شکل (۹) اختلاف مقادیر زلزله‌های دور و نزدیک گسل در سازه‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع سازه اختلاف مقادیر جابه‌جایی و زاویه دررفت طبقات، تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از برش طبقات در سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع 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.

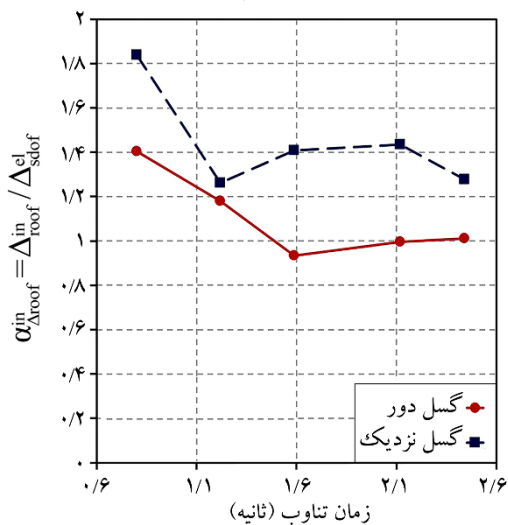


شکل (۱۰): ضرایب اصلاح پاسخ تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی در مقایسه با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه‌های MDOF مورد مطالعه تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل.

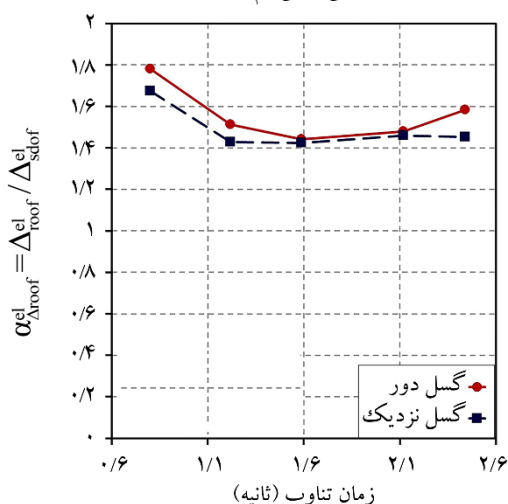
جدول (۴): مقادیر تحلیل تاریخیچه زمانی خطی برای سازه‌های MDOF مورد مطالعه و تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف.

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.

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

$$\alpha_{\Delta_{\text{roof}}}^{\text{in-FF}} = -0.2282 T + 1/4782 \quad (2)$$

$$\alpha_{\Delta_{\text{roof}}}^{\text{el-NF}} = -0.0959 T + 1/6448 \quad (3)$$

$$\alpha_{\Delta_{\text{roof}}}^{\text{el-FF}} = -0.1026 T + 1/7268 \quad (4)$$

۸- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش به بررسی اثرات موده‌های 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 به‌دست آمده از تحلیل‌های غیرخطی، مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- اثرات موده‌های بالاتر تحت زلزله‌های دور از گسل بیشتر از زلزله‌های راستای نزدیک گسل با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده است.
- با افزایش ارتفاع طبقات اثرات موده‌های 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

MDOF Effects on Steel Moment Resisting Structures Under Near-fault Earthquakes with Forward Directivity Effect

Mohsen Gerami¹, Amir Hesam Mashayekhi² and Navid Siahpolo^{3*}

1. Associate Professor, Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
 2. M.Sc. Graduate, Earthquake Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
 3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Institute for Higher Education, ACECR, Khuzestan, Iran,
- * Corresponding Author, email: siahpolo@acecr.ac.ir

INTRODUCTION

In recent years, various studies have been performed on the nonlinear responses of steel moment resisting frames under the near-fault earthquakes. Due to the event of near-fault earthquake, a significant amount of energy is exerted upon the structure, in a very short time. For this reason, the nonlinear distribution of demands differ with respect to those of the far-fault earthquakes. Investigating previous damages due to near-fault earthquakes indicated that significant inter-story drift demands are formed within the structure, which endanger its safety and stability. Near-field earthquakes containing forward directivity effects, due to the pulse in the velocity record, cause significant demands on the steel frames with respect to the ordinary earthquakes. Therefore, investigating the steel frames behavior as well as the higher modes effects under near-fault earthquakes is essential. For this purpose, five intermediate (ductility) steel moment resisting frames with 4, 7, 10, 15 and 20 stories under 20 far and near-fault accelerogram have been investigated. Finally, by examining the elastic responses of the single degree of freedom structure (SDOF) under considered accelerograms, the coefficients for transforming response of the SDOF structure to that of the MDOF structure are presented. The results of this research show that higher modes effects under the far-fault earthquakes are greater in comparison to those of the near-fault earthquakes. Besides, for about 30%-50% of the height of upper stories of the structures, the drift angle resulting from the near-fault earthquakes with the forward directivity effect is greater than that of far-fault earthquakes.

RESEARCH METHOD

Validation of analytical models is one of the most important steps of a study. In numerical studies, especially when a considerable database should be prepared for the extraction of the empirical expressions, lack of certainty concerning the validity of that created model could lead to inaccurate results. To avoid this issue in this article, all models are validated. In order to investigate the higher modes effects, 4, 7, 10, 15 and 20 stories 5-span 2D frames selected. Each model has 4 m story height and 5 m span length. The frames are intermediate (ductility) moment resisting frames. The structures being investigated in this research are designed completely based on the ANSI/AISC 341-05 and ASCE/SEI7-05 codes for gravity and seismic loads. Both the equivalent static lateral force and the modal response spectrum analysis were used for the models. ST37-type steel is used in design of the structures with the yield stress of $2400 \frac{\text{Kg}}{\text{Cm}^2}$ and the ultimate stress of $3600 \frac{\text{Kg}}{\text{Cm}^2}$ and the Poisson's ratio is 0.30. The lateral drift values in all the structures are compared with the allowable value in the ASCE/SEI7-05 code. All elements have been chosen as compact sections (limiting local buckling) assuming enough lateral supports.

In this study, 10 far-fault accelerograms and 10 near-fault acceleration time history with forward directivity effect have been chosen to be used in the nonlinear time history analysis. The near-fault earthquakes have effects of forward directivity and low effective duration as well as high velocity pulse period, chosen from the stations located less than

15 km from the fault. All chosen accelerograms in this research have the moment magnitude greater than 6.5 and the soil properties are of the Class D soil type based on the Fema 356 classification guidelines and are taken from the PEER website. The elastic response spectrum created by Seismosignal software. Besides, all acceleration time history has been normalized to their peak ground acceleration (PGA) before being scaled. All used accelerograms in this research are scaled according to the method presented in the Iranian Seismic Code (Standard 2800) and used in the NTHA method. Nonlinear time history analysis is also conducted by OpenSEES.

CONCLUSION

- The higher modes effects under far-fault earthquakes are greater than those of the near-fault earthquakes with the forward directivity effect.
- By an increase in the structure height (period), the difference in seismic demands values of structures under the far and near-fault earthquakes decreases.
- Investigating the drift angle over the height of various structures shows that for about 30%-50% of the height of structure, at the upper stories, the response obtained from the near-fault earthquakes with forward directivity effect is greater than the response obtained from the far-fault earthquakes.

The buildings' lateral load-resisting system is steel special moment-resisting frame. All buildings are 15 m in width.

Keywords: Higher Mode Effect, Forward Directivity, Near Fault Earthquake, Seismic Demands.