مجله علمی – پژوهشی
عمران مدرس
دوره چهاردهم، شماره چهار، زمستان ۱۳۹۳

نیاز و ظرفیت اجزای سازه‌ای قاب‌های خمشی فولادی در حوزه نزدیک گسل

محسن گرامی[۱]، داود عبدالله‌زاده[۲*]

۱-دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲-دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه سمنان

*davood.abdollahzadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۷/٦]　　**تاریخ پذیرش:** [۱۳۹۲/۹/۱۱]

چکیده- در حوزه نزدیک گسل هنگامی که گسترش شکست گسل به سمت ساختگاه باشد و سرعت انتشار امواج زلزله با سرعت گسترش شکست گسل تقریبا یکسان شود، مولفه افقی عمود بر سطح شکست گسل برای نگاشت سرعت زلزله حاوی ۱ تا ۳ پالس با دامنه زیاد و دوره تناوب بالا است. که این مسئله منجر به تحمیل نیاز بیشتر مقاومتی و شکل پذیری به سازه در جهت عمود بر خط گسل می‌شود. در این مطالعه با انجام ۱۰۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک گسل برای ۵ مدل قاب خمشی فولادی با ارتفاع ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ طبقه، تغییرات ظرفیت و نیاز مقاومتی و شکل پذیری اجزای سازه‌ای براساس نشریه FEMA356 در سطح عملکرد ایمنی جانی برای قاب‌های خمشی فولادی تحت اثر جهت پذیری پیشرونده تخمین زده شده است. نتایج نشان داد جهت پذیری پیشرونده باعث افزایش نسبت نیاز به ظرفیت اجزای سازه‌ای در حدود ۱،۱ تا ۱،۷۵ برابر در مدل‌های کوتاه مرتبه (کوتاه تر از ۷ طبقه) و در حدود ۱،۵ تا ۵ برابر در مدل‌های بلند مرتبه شده است.

واژگان کلیدی- اثر زلزله، جهت پذیری شکست، ارزیابی لرزه‌ای، شکل پذیری، نسبت ارتفاع به عرض.

۱-مقدمه

پژوهش‌ها نشان داده است در حوزه نزدیک گسل اثر جهت پذیری پیشرونده بیشترین تاثیر را بر سازه‌ها دارد [۱]. بررسی اثر جهت پذیری پیشرونده نشان داده است با افزایش نسبت پریود پالس حوزه نزدیک گسل به پریود طبیعی سازه و افزایش نسبت اوج شتاب زمین به سختی جانبی سازه، پاسخ غیر خطی و خسارت سازه افزایش می یابد [۲]. به گونه‌ای که تمرکز تغییر شکل‌ها در پایین سازه باعث افزایش نیروی محوری ستون‌ها و تشدید آثار P-Δ در پایین سازه شده است [۲]. پژوهش‌ها نشان داده است وجود مقاومت باقیمانده در اتصالات شکسته شده، عدم آسیب به بخشی از اتصالات سازه، اندرکنش دال و سازه، مقاومت محوری تیرها، مقاومت اتصالات ساده قاب‌های ثقلی، مقاومت بیشتر فولاد و کرنش سخت شدگی باعث پایداری سازه‌ها پس از زلزله در حوزه نزدیک گسل بوده است [۳]. بررسی آسیب پذیری ساختمان‌های شهر بم پس از زلزله سال ۱۳۸۲، نشان دهنده تغییرشکل‌های بزرگ طبقه همکف ساختمان‌ها در جهت عمود بر خط گسل بوده است [٤]. پس از وقوع زلزله‌های مخربی مانند زلزله ۱۹۹۲ لندرز، زلزله ۱۹۹٤ نورث ریج، ۱۹۹۵ کوبه ژاپن آیین نامه

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

UBC97 در سال ۱۹۹۷ نخستین ضوابط طرح لرزه‌ای در حوزه نزدیک گسل را ارائه کرد [۵]. این آیین نامه برای شرایط مختلف ساختگاهی و لرزه‌خیزی مناطق لرزه‌ای در فواصل مختلف از گسل طیف طرح جداگانه‌ای ارائه کرده است [۵]. در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم توصیه شده است از احداث ساختمان در مجاورت و یا نزدیک گسل‌های فعالی که احتمال بوجود آمدن شکستگی در سطح زمین در هنگام وقوع زلزله وجود دارد، باید اجتناب شود و در مواردی که در محدوده گسل، احداث ساختمان مورد نظر باشد، باید علاوه بر رعایت ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، تمهیدات فنی ویژه‌ای منظور شود که در استاندارد ۲۸۰۰ به آنها اشاره‌ای نشده است [٦]. با توجه به اهمیت زلزله‌های حوزه نزدیک گسل و قرار گرفتن تعدادی از شهرهای بزرگ ایران در مجاورت گسل‌های فعال [۷] در این مطالعه با بررسی ۵ مدل قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ طبقه با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی، اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیاز و ظرفیت محوری، خمشی و شکل‌پذیری تیرها و ستون‌ها در ارتفاع قاب‌های خمشی فولادی تخمین زده شده است.

۲-فرضیات تحقیق و مدلسازی

۲-۱-انتخاب نگاشت‌های زلزله

در هنگام زلزله در اطراف گسل‌های لرزه‌زا آثار متفاوتی از لحاظ شکل و نوع ارتعاش در زمین دیده شده است [۸، ۹] که وابسته به نوع و جهت گیری انتشار شکست گسل است[۸، ۹]. جهت گیری انتشار شکست[1] گسل نسبت به ساختگاه می‌تواند به صورت پیشرونده و یا پسرونده باشد. در شرایطی که سرعت انتشار شکست گسل با سرعت انتشار امواج زلزله یکسان باشد و جهت انتشار شکست گسل به سمت ساختگاه باشد، تجمع موجک‌های ایجاد شده در هر شکست باعث ایجاد یک تا سه پالس با پریود بلند و دامنه بزرگ در مولفه عمود بر صفحه گسل می‌شود که در مدت زمان موثر کوتاهی منطقه مورد نظر را تحت ارتعاش قرار می‌دهند. به این حالت جهت پذیری پیشرونده گفته می‌شود [۹]. در حالتی که انتشار شکست گسل به سمت دور شدن از ساختگاه باشد، زمین تحت نوسانات رفت و برگشتی نسبتا زیاد با دامنه کم قرار می‌گیرد. که به این حالت اثر جهت‌پذیری پس رونده گفته می شود[۸]. در مناطق دیگر که اثر جهت پذیری پیشرونده و یا پسرونده وجود نداشته باشد، مناطق با جهت پذیری خنثی گفته می‌شود [۹].

برای در نظر گرفتن اثر جهت پذیری پیشرونده، ۱۰ نگاشت در فواصل کمتر از ۱۵ کیلومتر از گسل‌های فعال مطابق مرجع [۱۰] انتخاب شدند که دارای ماهیت پالسگونه با دامنه بزرگ و پریود بالا در نگاشت سرعت بودند. از دو مولفه افقی ثبت شده در هر ایستگاه لرزه نگاری مولفه‌ای که دارای مقادیر بیشتری در طیف پاسخ شبه شتاب در محدوده پریود بلند ($T>1s$) بود، انتخاب شد [۵]. به منظور مقایسه، ۱۰ نگاشت نیز در محدوده دور از گسل با جهت پذیری خنثی انتخاب شدند. تمام نگاشت‌های انتخاب شده در جدول (۱) از زلزله‌های مهم دنیا با لنگر لرزه‌ای بیش از ٦،۵ است. برای جلوگیری از خطای حاصل از نگاشت‌های ثبت شده در مناطق با فاصله بسیار زیاد از گسل، کمینه اوج شتاب زمین $0.1g$ در نظر گرفته شده است [۵]. با توجه به آثار بیشتر جهت پذیری پیشرونده در خاک‌های با تراکم متوسط و نرم کلیه نگاشت‌ها از ساختگاه‌های نوع ۳ در دسته‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ انتخاب شد.

۲-۲- جزئیات طراحی مدل‌های سازه‌ای

۵ مدل قاب خمشی فولادی ویژه با فرض اتصالات صلب با دهانه $5m$ و ارتفاع طبقات $3.2m$ براساس آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم در مناطق با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد در

1 Rupture Directivity

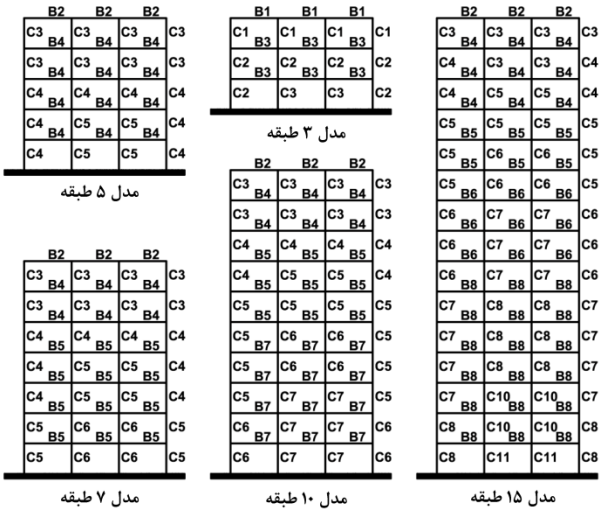
[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

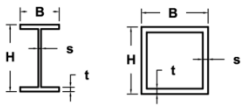
جدول (۱) نگاشت‌های مورد استفاده در این مطالعه

نگاشت‌های دارای اثر جهت پذیری پیشرونده (نزدیک گسل)				
ردیف	محل زلزله	سال	ایستگاه	فاصله(km)
1	Denali, Alaska	2002	PumpStation #10	2.74
2	Bam,Iran	2003	Bam	15>
3	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	9.96
4	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU068	0.32
5	Imperial Valley	1979	CDMG 5158	1.35
6	Northridge	1994	DWP 74	5.35
7	Silakhor ,Iran	2006	Chalan Choolan	15>
8	Kocaeli, Turkey	1999	Yarimca	4.83
9	Zanjiran,Iran	1994	Meymand	15>
10	Kobe, Japan	1995	Takatori	1.47
نگاشت‌های محدوده جهت پذیری خنثی (دور از گسل)				
ردیف	محل زلزله	سال	ایستگاه	فاصله(km)
1	**Chi-Chi, Taiwan**	**1999**	**CHY065**	**83.43**
2	**Chi-Chi, Taiwan**	**1999**	**TAP095**	**109.01**
3	**Loma Prieta**	**1989**	**CDMG 58224**	**72.2**
4	**Loma Prieta**	**1989**	**CDMG 58472**	**74.26**
5	**Kobe, Japan**	**1995**	**HIK**	**95.72**
6	**Loma Prieta**	**1989**	**CDMG 58223**	**58.65**
7	**Manjil, Iran**	**1990**	**Qazvin**	**49.97**
8	**Northridge**	**1994**	**CDMG 13122**	**82.32**
9	**Tabas, Iran**	**1978**	**Ferdows**	**91.14**
10	**Kocaeli, Turkey**	**1999**	**Bursa Tofas**	**60.43**

خاک نوع ۳ طراحی شد. بار مرده و زنده طبقات بجز بام برای کل مدل‌ها به ترتیب 2500kg/m و 1000kg/m و بار مرده بام برای مدل‌های ۳ و ۵ طبقه، 1750kg/m، برای مدل‌های ۷ و ۱۰ طبقه 2083kg/m و برای مدل ۱۵ طبقه 2250kg/m است. همچنین بار زنده بام برای همه مدل‌ها 750kg/m در نظر گرفته شده است. درجه اهمیت ۱، ضریب رفتار ۱۰ و اوج شتاب زمین 0.35g فرض شده است. آثار P-Δ در تحلیل و طراحی سازه اعمال شده است. برای طراحی مدل‌های سازه‌ای از نرم افزار Etabs V9 و آیین نامه UBC97-ASD استفاده شده است. شکل (۱) جزئیات مدل‌ها را نشان می‌دهند. بررسی نیاز طراحی اجزای سازه‌ای تحت نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک گسل نشان داد هنگامی که ساختگاه تحت تاثیر دو منبع لرزه‌ای دور و نزدیک گسل با سطح خطر یکسان و PGA یکسان قرار دارد، باید از پوش طیف ویژه ساختگاه حوزه دور و نزدیک گسل به منظور طراحی لرزه‌ای استفاده شود.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]





شماره	نام مقطع سازه ای	B	t	H	S
B1	2PL150X12PL276X8	15	1.2	30	0.8
B2	2PL150X15PL270X8	15	1.5	30	0.8
B3	2PL200X15PL270X8	20	1.5	30	0.8
B4	2PL200X20PL260X8	20	2	30	0.8
B5	2PL200X20PL310X10	20	2	35	1
B6	2PL200X20PL360X10	20	2	40	1
B7	2PL250X20PL310X10	25	2	35	1
B8	2PL250X20PL360X10	25	2	40	1
C1	BOX150X150X10	15	1	15	1
C2	BOX200X200X12	20	1.2	20	1.2
C3	BOX200X200X15	20	1.5	20	1.5
C4	BOX200X200X20	20	2	20	2
C5	BOX250X250X20	25	2	25	2
C6	BOX250X250X25	25	2.5	25	2.5
C7	BOX300X300X25	30	2.5	30	2.5
C8	BOX300X300X30	30	3	30	3
C9	BOX350X350X20	35	2	35	2
C10	BOX350X350X25	35	2.5	35	2.5
C11	BOX350X350X30	35	3	35	3

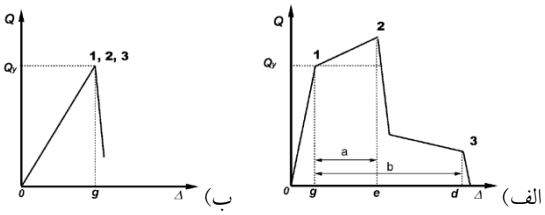
ابعاد مقاطع برحسب سانتیمتر است.
ارتفاع طبقات ۳،۲ متر و طول دهانه ها ۵ متر است.

شکل (۱) جزئیات مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی در این مطالعه

۲-۳- جزئیات تحلیل دینامیکی غیر خطی

برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مدل‌ها از نرم‌افزار Perform 3D v4 مطابق فرض‌های زیر استفاده شده است.

الف-رابطه نیرو و تغییرمکان به صورت ۳ خطی با در نظر گرفتن از بین رفتن مقاومت مطابق دستورالعمل FEMA356 است [۱۱]، شکل (۲) جزئیات مفاصل پلاستیک اعضای شکل پذیر و ترد را نشان می دهد.



شکل (۲) منحنی رفتار الف)عضو شکل پذیر، ب)عضو ترد

ب-گام‌های زمانی برای شتابنگاشت‌ها 0.005s اعمال شده است و برای کنترل توقف تحلیل برای هر گام زمانی بیشینه ۱۰۰۰ زیر بازه در نظر گرفته شده است.

ج-در تحلیل دینامیکی غیر خطی آثار P-Δ منظور شده است.

د- برای اعمال میرایی ثابت ۵٪، نسبت T_A/T_1 حدود ۱،۲ و نسبت T_B/T_1 حدود ۲،٤ انتخاب شده است.

ر-در حوزه نزدیک‌گسل به غیر از آثار جهت‌پذیری، اوج شتاب زمین نیز بیش از حوزه دور از گسل است که این موضوع باعث افزایش پاسخ سازه‌ها می‌شود، بنابراین برای این‌که فقط اثر جهت پذیری در نظر گرفته شود تمامی نگاشت‌ها به اوج شتاب 0.35g همپایه شده‌اند.

۳- رابطه نسبت ارتفاع به عرض سازه با اثر جهت پذیری پیشرونده بر ستون‌ها

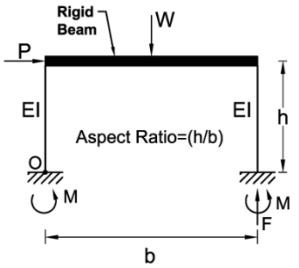
برای بررسی اثر نسبت ارتفاع به عرض ساختمان بر افزایش نیروی محوری ستون‌های کناری ناشی از بار جانبی در شکل (۳)، رابطه لنگر خمشی و نیروی محوری با استفاده از رابطه تعادل $\sum M_o = 0$ مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$M = \frac{Ph}{4} \quad (۱)$$

$$F = \frac{P}{2}\left(\frac{h}{b}\right) + \frac{W}{2} \quad (۲)$$

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

در روابط (۱) و (۲)، M لنگر خمشی ستون‌ها، F نیروی محوری ستون، P بار جانبی زلزله، W وزن سقف، h ارتفاع قاب، b عرض قاب است، با توجه به روابط (۱) و (۲) مشاهده می‌شود تغییرات نسبت ارتفاع به عرض $(\frac{h}{b})$ تاثیری بر لنگر خمشی ستون‌ها ندارد اما نسبت ارتفاع به عرض رابطه مستقیمی با نیروی محوری ستون‌ها دارد. به گونه‌ای که به ازاء یک واحد تغییر در نسبت ارتفاع به عرض $(\frac{h}{b})$ نیروی محوری ستون‌ها نیز به میزان $(\frac{P}{2})$ تغییر می کند.



شکل (۳) قاب یک درجه آزاد خمشی

برای تعیین ارتباط نسبت ارتفاع به عرض $(\frac{h}{b})$ با آثار جهت پذیری پیشرونده بر نیروی محوری ستون‌ها، رابطه (۲) یک‌بار بدون اثر جهت پذیری پیشرونده و یک‌بار با اثر جهت پذیری پیشرونده باز نویسی شده است. رابطه (۳) نیروی محوری ستون بدون اثر جهت پذیری و رابطه (٤) نیروی محوری ستون با اثر جهت پذیری پیشرونده را نشان می‌دهند. با تفاضل رابطه (۳) از رابطه (٤)، ارتباط نسبت ارتفاع به عرض $(\frac{h}{b})$ با اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیروی محوری ستون‌ها در رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$F_{ND} = \frac{P_{ND}}{2}\left(\frac{h}{b}\right) + \frac{W}{2} \qquad (۳)$$

$$F_{FD} = \frac{(P_{ND}+\Delta P_{FD})}{2}\left(\frac{h}{b}\right) + \frac{W}{2} \qquad (٤)$$

$$\Delta P_{FD} = F_{FD} - F_{ND} = \frac{(P_{ND}+\Delta P_{FD})}{2}\left(\frac{h}{b}\right) + \frac{W}{2} - \frac{P_{ND}}{2}\left(\frac{h}{b}\right) - \frac{W}{2} = \frac{\Delta P_{FD}}{2}\left(\frac{h}{b}\right) \qquad (۵)$$

در روابط (۳) تا (۵)، F_{ND} نیروی محوری ستون در مناطق با جهت پذیری خنثی (بدون اثر جهت پذیری پیشرونده) و F_{FD} نیروی محوری ستون با در نظر گرفتن آثار جهت پذیری پیشرونده است. P_{ND} نیروی جانبی بدون اثر جهت پذیری پیشرونده، ΔP_{FD} مقدار تغییرات نیروی جانبی ناشی از آثار جهت پذیری پیشرونده و ΔF_{FD} مقدار تغییرات نیروی محوری ستون ناشی از جهت پذیری پیشرونده است. رابطه (۵) نشان می‌دهد نسبت ارتفاع به عرض $(\frac{h}{b})$ با تغییرات نیروی محوری ستون‌ها ناشی از آثار جهت پذیری پیشرونده رابطه مستقیمی دارد. به گونه‌ای که به ازاء افزایش نسبت ارتفاع به عرض به میزان یک واحد، اثر جهت پذیری پیشرونده باعث تغییر نیروی محوری ستون‌ها به میزان $\frac{\Delta P_{FD}}{2}$ می‌شود.

٤- بررسی ستون‌ها

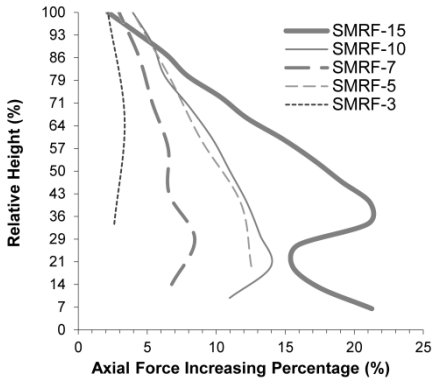
٤-۱- اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیاز ستون‌ها

بررسی اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیروهای داخلی ستون‌های کناری و میانی نشان می‌دهد که در مدل‌های کوتاه‌تر از ۱۰ طبقه نیروی محوری ستون‌های خارجی بین ۲،۷ تا ۹،٤۷٪ افزایش پیدا کرده است. در حالی‌که درصد افزایش نیروی محوری ستون‌های داخلی کمتر از ۰،۵۷٪ است؛ در مدل ۱۵ طبقه هم مشاهده می‌شود، جهت پذیری پیشرونده باعث افزایش ۱۳،۷۷٪ نیروی محوری ستون‌های خارجی و افزایش ۷،۵٪ ستون‌های داخلی شده است. شکل (٤) میانگین درصد افزایش نیروی محوری ستون‌های خارجی را تحت اثر جهت پذیری پیشرونده در ارتفاع نسبی مدل‌های سازه‌ای نشان می‌دهد. مطابق شکل (٤) تاثیر جهت پذیری پیشرونده بر افزایش نیروی محوری ستون‌های خارجی برای مدل‌های کوتاه مرتبه (کمتر از ۵ طبقه) کمتر از ۵٪، برای مدل‌های میان مرتبه (۵ تا ۱۰ طبقه) بین ۵ تا ۱۵٪ و برای مدل‌های بلند مرتبه (بیش از ۱۵طبقه) تا ۵۰٪ ارتفاع در پایین سازه بین ۱۵ تا ۲۰٪ است. نتایج نشان می دهد افزایش نسبت ارتفاع به عرض (AR)[2] باعث افزایش

2 Aspect Ratio

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

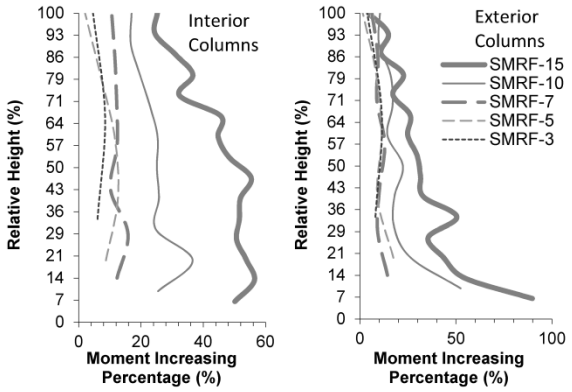
اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیروی محوری ستون‌های خارجی می‌شود. به گونه‌ای که با بررسی نیروی محوری ستون‌های خارجی در مدل‌های ۷ طبقه و بلندتر مشاهده می‌شود با دو برابر شدن نسبت ارتفاع به عرض، اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیروی محوری ستون‌های خارجی نیز حدودا ۲،۲ برابر می‌شود.



شکل (٤) میانگین درصد افزایش نیروی محوری ستون‌های خارجی طبقات مدل‌ها

بررسی میانگین درصد افزایش بیشینه لنگر خمشی ستون‌ها در مدل‌های سازه نشان می‌دهد که در مدل‌های کوتاه مرتبه میانگین درصد افزایش لنگر خمشی ناشی از جهت پذیری پیشرونده در ستون‌های میانی بین ٦،٤ تا ۹،۵۱٪ بیش از حوزه دور از گسل است. همچنین نتایج ستون‌های خارجی با اختلاف کمتر از ۱،۵٪ مشابه ستون‌های داخلی است؛ با افزایش ارتفاع اختلاف درصد افزایش لنگر خمشی ستون‌های داخلی و خارجی بیشتر می‌شود. به گونه‌ای که در مدل ۱۵ طبقه لنگر خمشی ستون‌های داخلی حدود ٤۳،۸۹٪ و ستون‌های خارجی ۳۲،٦۱٪ افزایش پیدا کرده است.

مطابق شکل (۵)، میزان افزایش لنگر خمشی ستون‌ها برای مدل‌های کوتاه‌تر از ۷ طبقه بسیار مشابه یکدیگر و بین ۱۰ تا ۲۰٪ برای ستون‌های خارجی و ٤ تا ١٦٪ برای ستون‌های داخلی است که با افزایش ارتفاع، درصد افزایش لنگر ۱۰ خمشی ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند به گونه‌ای که در مدل طبقه میانگین درصد افزایش لنگر خمشی ستون‌ها بین ۳۰ تا ۵۰٪ و برای مدل ۱۵ طبقه بین ٤۰ تا ٥٦٪ می باشد. نتایج شکل (۵) نشان می دهد میانگین درصد افزایش لنگر خمشی برای ستون‌های میانی بین ۳ تا ۱۲٪ بیش از ستون‌های خارجی است و بیشترین درصد افزایش لنگر خمشی ناشی از جهت پذیری در طبقات اول و دوم مدل‌های بلند مرتبه در ستون‌های خارجی رخ داده است.



شکل (۵) میانگین درصد افزایش لنگر خمشی ستون‌های خارجی و داخلی در ارتفاع قابها

٤-۲- اثر جهت پذیری پیشرونده بر ظرفیت ستون‌ها

در این بخش اثر جهت پذیری پیشرونده بر ظرفیت تحمل نیرو و ظرفیت شکل پذیری خمشی ستون‌ها در قاب‌های خمشی بررسی شده است. مطابق ضوابط نشریه FEMA356، ستون‌هایی که نسبت نیروی محوری به کران پایین مقاومت فشاری ستون کمتر از ۰،۵ است، دارای رفتار خمشی شکل پذیر و ستون‌هایی که نسبت نیاز محوری به کران پایین ظرفیت محوری آنها بیش از ۰،۵ است، دارای رفتار خمشی ترد است، که این دستورالعمل برای ارزیابی ستون‌هایی که دارای رفتار خمشی شکل پذیر است، معیارهای کنترل تغییرشکل خمیری و کنترل نیرویی و برای ستون‌هایی که دارای رفتار خمشی ترد است، معیار کنترل نیرویی را ارائه کرده است. روابط (٦) تا (۸) برای ارزیابی ستون‌ها در ترکیب نیروهای محوری و خمشی به وسیله‌ی نشریه FEMA356 برای تحلیل‌های خطی ارائه شده است.

برای حالت $\frac{P_{UF}}{P_{CL}} < 0.2$:

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

$$\frac{P_{UF}}{2P_{CL}}+\frac{M_x}{m_xM_{CEx}}+\frac{M_y}{m_yM_{CEy}}\leq 1.0 \qquad (٦)$$

برای حالت $0.2\leq\frac{P_{UF}}{P_{CL}}\leq 0.5$:

$$\frac{P_{UF}}{P_{CL}}+\frac{8}{9}\left[\frac{M_x}{m_xM_{CEx}}+\frac{M_y}{m_yM_{CEy}}\right]\leq 1.0 \qquad (٧)$$

برای حالت $\frac{P_{UF}}{P_{CL}}>0.5$:

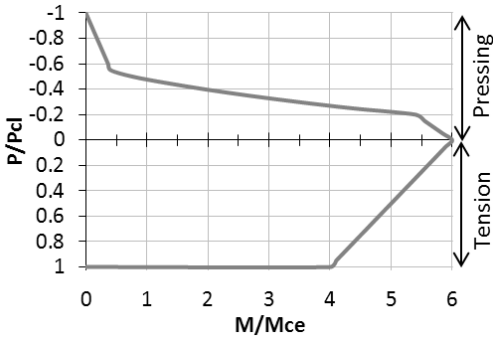
$$\frac{P_{UF}}{P_{CL}}+\frac{Mu_{Fx}}{M_{CLx}}+\frac{Mu_{Fy}}{M_{CLy}}\leq 1 \qquad (٨)$$

در روابط (٦) تا (٨)، P_{UF} نیروی محوری ستون، P_{CL} کرانه پائین مقاومت فشاری، M_x و M_y به ترتیب لنگر خمشی حول محور x و y، M_{CEx} و M_{CEy} مقاومت خمشی مورد انتظار حول محور x و y، M_{CLx} و M_{CLy} کران پایین مقاومت خمشی ستون حول محور x و y، m_x و m_y ضرایب معیار پذیرش برای ستون‌ها در جهت خمش حول محور x و y است.

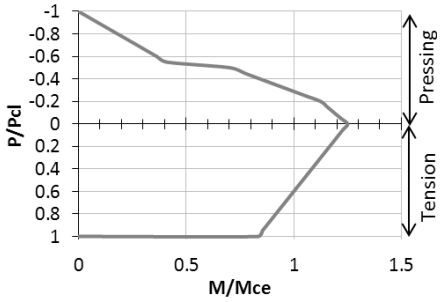
با فرض خمش یک جهته ($M_y=Mu_{Fy}=0$) و $M_{CE}=1.1M_{CL}$ نمودار مقیاس شده اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی برای ستون‌های با جدار غیر لاغر و لاغر مطابق روابط (٦) تا (٨) در شکل (٦) رسم شده است. همچنین در شکل(٧) نمودار درصد کاهش ظرفیت خمشی ستون با افزایش نیروی محوری برای ستون‌های با جدار غیر لاغر و لاغر آورده شده است.

مقایسه شکل (٦-الف) با شکل (٦-ب) نشان می دهد بسته به میزان نیروی محوری ستون استفاده از اجزای سازه‌ای با ضخامت جدار لاغر باعث کاهش ظرفیت خمشی ستون در حدود ٠،٢ تا ٠،٧ برابر اجزای سازه‌ای با جدار غیر لاغر می‌شود و مطابق اشکال (٨) و (٩) مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی محوری به میزان ٣٠٪ کران پایین ظرفیت محوری ستون‌ها، ظرفیت خمشی ستون‌ها بین ٣٠ تا ٨٠٪ کاهش پیدا می‌کند پس افزایش نیروی محوری ستون‌ها بین ٥ تا ٢٠٪ ناشی از جهت پذیری پیشرونده مطابق شکل (٤) می‌تواند باعث کاهش ظرفیت خمشی ستون بین ١٢،٥ تا ٥٠٪ شود. از طرف دیگر مطابق شکل (٥) جهت‌پذیری پیشرونده باعث افزایش لنگر خمشی در حدود ١٠ تا ٥٦٪ شده است. که این مسئله می تواند آسیب جدی به ستون‌های سازه به خصوص در طبقات پایین اعمال نماید.

برای بررسی اثر جهت پذیری پیشرونده روی شکل‌پذیری ستون‌ها رابطه نیرو و تغییرشکل اجزای سازه‌ای مطابق با

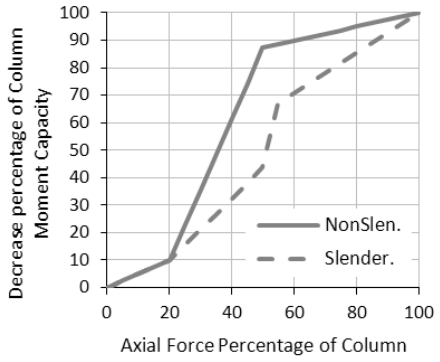


شکل (٦-الف) ستون‌های با جدار غیر لاغر



شکل (٦-ب) ستون‌های با جدار لاغر

شکل (٦) نمودار مقیاس شده اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی



شکل (٧) درصد کاهش‌ظرفیت خمشی ستون با افزایش نیروی محوری

ضوابط و معیارهای پذیرش اجزای سازه‌ای فولادی نشریه FEMA356 در اشکال (٨) و (٩) آورده شده است. شکل‌های (٨) و (٩) رابطه نسبت لنگر خمشی ستون به

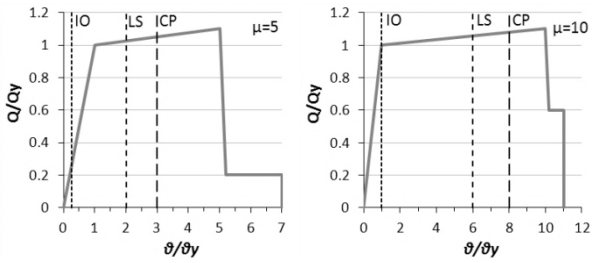
[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

لنگر تسلیم و نسبت چرخش ستون به چرخش تسلیم را برای دو حالت $\frac{P_{UF}}{P_{CL}} < 0.2$ و $0.2 \le \frac{P_{UF}}{P_{CL}} \le 0.5$ نشان می دهند؛ همچنین شکل پذیری ستون‌ها مطابق رابطه ۹ برای هر یک از حالات ستون‌ها در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده است.

$$\mu = \frac{\theta_{max}}{\theta_{yield}} \qquad (۹)$$

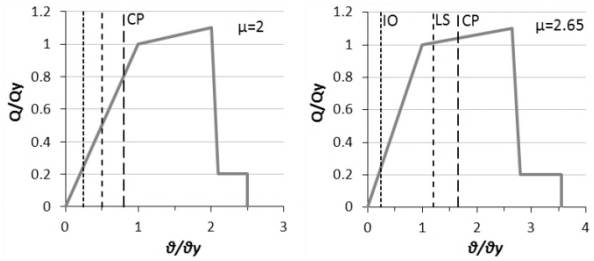
در رابطه (۹)، $\boldsymbol{\mu}$ شکل پذیری و θ چرخش انتهای عضو سازه‌ای است که نمادهای *max* و *yield* هم به ترتیب بیشینه چرخش قابل تحمل عضو و چرخش تسلیم عضو است.

مطابق اشکال (۸) و (۹) مشاهده می‌شود استفاده از مقاطع سازه‌ای با اجزای لاغر می‌تواند بین ۲۵ تا ۵۰٪ شکل‌پذیری ستون‌ها را در خمش کاهش دهد. همچنین مقایسه اشکال (۸) و (۹) و بررسی شکل (۱۰) نشان می دهد افزایش نیروی محوری ستون می‌تواند باعث کاهش شکل پذیری خمشی ستون شود. به گونه‌ای که بسته به نوع مقطع سازه‌ای (جدار لاغر یا غیر لاغر) افزایش ۳۰٪ نیروی محوری می‌تواند ٦۰ تا ۷۳،۵٪ ظرفیت شکل پذیری خمشی ستون‌ها را کاهش دهد. از طرفی هم بررسی چرخش گره‌ها در ارتفاع سازه نشان می‌دهد جهت پذیری پیشرونده باعث افزایش چرخش گره‌های سازه در حدود ۱،۱ تا ۱،۷ برابر در مدل‌های کوتاه مرتبه و ۱،٤ تا ۳،۵ برابر در مدل‌های بلند مرتبه شده است. پس نتایج نشان می‌دهد جهت پذیری پیشرونده دو اثر عمده بر ستون‌ها دارد. اول اینکه جهت پذیری پیشرونده بسته به ارتفاع و نسبت ارتفاع به عرض باعث افزایش ۵ تا ۲۰٪ نیروی محوری و افزایش ۱۰ تا ٥٦٪ لنگر خمشی وارد بر ستون‌ها می شود و دوم اینکه بسته به محل قرار گیری ستون و نسبت ارتفاع به عرض سازه باعث کاهش ۱۲،۵ تا ۵۰٪ مقاومت و کاهش ۲۵ تا ۵۰٪ شکل پذیری خمشی ستون‌ها می‌شود. نتایج این بخش نشان می دهد استفاده از مقاطع فشرده لرزه‌ای و طراحی ستون‌ها با در نظر گرفتن $\frac{P_{UF}}{P_{CL}} \le 0.5$ (یا به طور محافظه کارانه $\frac{P_{UF}}{P_{CL}} \le 0.2$) تحت آثار جهت پذیری پیشرونده باعث افزایش شکل پذیری خمشی ستون‌ها در قاب‌های خمشی فولادی در حوزه نزدیک گسل می‌شود. لازم به ذکر است در این پژوهش آثار لنگر خمشی ستون در راستای دیگر سازه، آثار جابه‌جایی سازه در راستای عمود، مولفه قائم زلزله و اثر مهاربند بر تغییرات نیروی محوری ستون‌ها در راستای دیگر در نظر گرفته نشده است که با توجه نتایج این بخش می تواند آثارچشم‌گیری بر ظرفیت مقاومتی و شکل‌پذیری ستون به ویژه ستون‌های واقع شده در گوشه‌های ساختمان داشته باشد.



الف–ستون با اجزای غیر لاغر ب–ستون با اجزای لاغر

شکل (۸) رابطه نسبت چرخش ستون به چرخش تسلیم با نسبت لنگر خمشی ستون به لنگر خمشی تسلیم در حالتی که $\frac{P_{UF}}{P_{CL}} < 0.2$



الف–ستون با اجزای غیر لاغر ب–ستون با اجزای لاغر

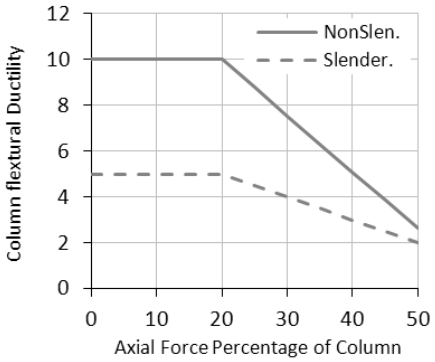
شکل (۹) رابطه نسبت چرخش ستون به چرخش تسلیم با نسبت لنگر خمشی ستون به لنگر خمشی تسلیم در حالتی که $0.2 \le \frac{P_{UF}}{P_{CL}} \le 0.5$

۵- بررسی تیرها

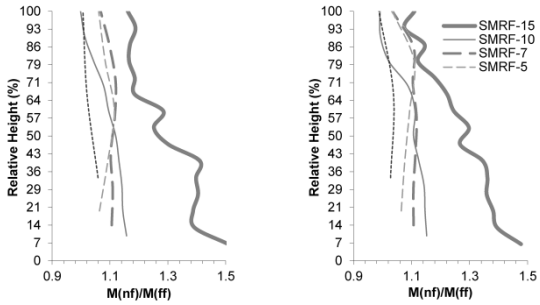
براساس فلسفه طراحی لرزه‌ای قابهای خمشی فولادی، مفاصل پلاستیک ناشی از تغییرشکل‌های زلزله باید در تیرهای سازه رخ دهد [۱۲]. بنابراین تیرها در قاب‌های خمشی فولادی مقاوم در برابر زلزله، نقش مهمی را در استهلاک انرژی زلزله ایفا می‌کنند. با توجه به اینکه در

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

تیرهای طویل لنگر خمشی در طراحی تعیین کننده‌تر از برش است، برای بررسی اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیروهای وارد بر تیرها، بیشینه لنگر خمشی تیرهای میانی و کناری تیرهای سازه یکبار برای حوزه دور از گسل و یکبار برای حوزه نزدیک گسل تحت آثار جهت پذیری پیشرونده با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی به دست آمده است. سپس میانگین نتایج حوزه نزدیک و دور از گسل در ارتفاع نسبی مدل‌ها مطابق شکل (۱۱) رسم شد.



شکل (۱۰) تغییرات شکل پذیری خمشی ستون با تغییرات درصد نیروی محوری ستون نسبت به کران پایین ظرفیت نهایی محوری ستون



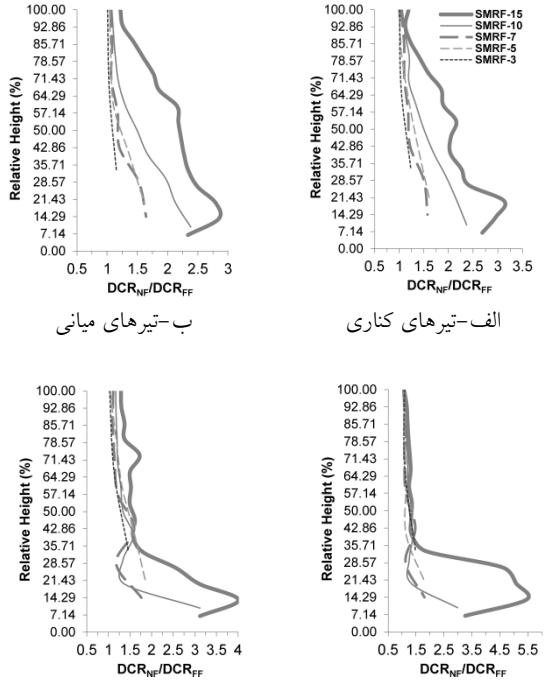
الف-تیرهای کناری ب-تیرهای میانی

شکل (۱۱) نسبت بیشینه لنگر خمشی حوزه نزدیک گسل به لنگر خمشی حوزه دور از گسل

مطابق شکل (۱۱)، برای مدل‌های ۱۰ طبقه و کوتاه‌تر افزایش لنگر خمش ناشی از آثار جهت پذیری پیشرونده در حدود ۲ تا ۱۶٪ است در حالی‌که در مدل ۱۵ طبقه بین ۱۰ تا ۵۰٪ لنگر خمشی تیرها افزایش داشته است. این مسئله نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع اثر جهت پذیری پیشرونده برای قاب‌های خمشی بلند مرتبه به شدت (در حدود ۳ تا ۵ برابر) افزایش پیدا می‌کند. با بررسی روابط تعیین مقاومت و منحنی نیرو تغییرمکان تیرها مطابق ضوابط و معیارهای پذیرش نشریه FEMA356 مشاهده می‌شود. ظرفیت خمشی و شکل پذیری تیرها به پارامترهای هندسی مقطع وابسته است و جهت پذیری پیشرونده بر تیرهای سازه تاثیری ندارد.

۶-اثر جهت پذیری پیشرونده بر نسبت نیاز به ظرفیت اجزای سازه‌ای

برای بررسی عملکرد اجزای سازه‌ای در سطح عملکرد ایمنی جانی، نسبت نیاز به ظرفیت تیرها و ستون‌های سازه مطابق با ضوابط FEMA356 برای هر یک از نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک گسل در ارتفاع نسبی سازه در اشکال (۱۲-الف) تا (۱۲-د) آورده شده است.



الف-تیرهای کناری ب-تیرهای میانی

ج-ستون‌های خارجی د-ستون‌های داخلی

شکل (۱۲) نسبت نیاز به ظرفیت حوزه نزدیک گسل به حوزه دور از گسل برای اجزای سازه‌ای در ارتفاع نسبی

نتایج اشکال (۱۲-الف) تا (۱۲-د) نشان می دهند جهت

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

پذیری پیشرونده باعث افزایش نسبت نیاز به ظرفیت اجزای سازه‌ای در حدود ۱،۱ تا ۱،۷۵ برابر در مدل‌های کوتاه‌تر از ۷ طبقه و در حدود ۱،۵ تا ۵ برابر در مدل‌های بیش از ۷ طبقه شده است. چنانکه در مدل‌های کوتاه مرتبه (۷ طبقه و کوتاه‌تر) نسبت نیاز به ظرفیت تیرها و ستون‌ها تحت تاثیر جهت پذیری پیشرونده تقریبا به طور یکسان در ارتفاع سازه بیشینه ۱،۷۵ برابر شده است در حالی‌که در مدل‌های بلند مرتبه، ستون‌ها در حدود ۳۵ تا ۷۰٪ بیشتر از تیرها تحت اثر جهت پذیری پیشرونده قرار گرفته‌اند. چنانکه مطابق شکل-های (۱۲–الف) تا (۱۲–د) مشاهده می‌شود جهت پذیری پیشرونده نسبت نیاز به ظرفیت ستون‌ها را بین ۱،۵ تا ۵ برابر و نسبت نیاز به ظرفیت تیرها را بین ۱،۵ تا ۳،۲ برابر افزایش داده است. نتایج فوق نشان می دهد نسبت ارتفاع به عرض سازه نقش مهمی را در تشدید آثار جهت پذیری پیشرونده برای ستون‌های سازه (به ویژه ستون‌های خارجی) دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی ۵ مدل قاب خمشی با ارتفاع ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت ۱۰ نگاشت حوزه دور و ۱۰ نگاشت حوزه نزدیک گسل با اثرات جهت پذیری پیشرونده با فرض اتصالات صلب مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با بررسی نتایج اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیاز و ظرفیت اجزای سازه‌ای نتایج ذیل حاصل شد.

۱- جهت پذیری پیشرونده دو اثر عمده بر ستون‌ها دارد. اول اینکه بسته به نسبت ارتفاع به عرض سازه باعث افزایش ۵ تا ۲۰٪ نیروی محوری و افزایش ۱۰ تا ۵۶٪ لنگر خمشی وارد بر ستون‌ها می شود و دوم اینکه بسته به محل قرار گیری ستون و نسبت ارتفاع به عرض سازه باعث کاهش ۱۲،۵ تا ۵۰٪ مقاومت و کاهش ۲۵ تا ۵۰٪ شکل پذیری خمشی ستون‌ها می‌شود. بنابراین برآیند افزایش نیاز و کاهش ظرفیت ستون‌ها باعث ۱،۵ تا ۵ برابر شدن نسبت نیاز به ظرفیت ستون‌ها در سطح عملکرد ایمنی جانی می‌شود.

۲- جهت پذیری پیشرونده باعث افزایش لنگر خمشی تیرها در حدود ۲ تا ۵۰٪ می‌شود و با فرض عدم وجود نیروی محوری در تیرها ظرفیت خمشی و شکل پذیری تیرها به پارامترهای هندسی مقطع وابسته است و جهت پذیری پیشرونده بر ظرفیت تیرهای سازه تاثیری ندارد.

۳- با استفاده از مقاطع فشرده لرزه‌ای برای تیرها و ستون‌ها و طراحی ستون‌ها با در نظر گرفتن بیشینه نسبت نیروی محوری موجود به کران پایین مقاومت فشاری کمتر از ۰،۵ ($\frac{P_{UF}}{P_{CL}} \leq 0.5$) تحت آثار جهت پذیری پیشرونده می‌توان شکل پذیری خمشی ستون‌ها و تیرها را در قاب‌های خمشی فولادی در حوزه نزدیک گسل افزایش داد.

٤- با توجه به تشدید اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیروی محوری ستون‌ها با افزایش نسبت ارتفاع به عرض در مدل‌های بلندمرتبه (به ویژه با نسبت ارتفاع به عرض بیش از ۲) توصیه می‌شود جهت گیری سازه نسبت به خط گسل در حوزه نزدیک گسل به گونه‌ای باشد که بعد طولانی تر سازه در جهت عمود بر گسل قرار گیرد.

۵- مقایسه شکل توزیع و بیشینه مقادیر نسبت تنش موجود به مجاز و نسبت نیاز به ظرفیت اجزای سازهای در ارتفاع سازه نشان می دهد روش استاتیکی دارای خطای زیادی برای تحلیل و طراحی سازه‌ها در حوزه نزدیک گسل است.

۸- مراجع

[1] Bruce A.; Bolt; “Seismic input motions for nonlinear structural analysis”; *Journal of Earthquake Technology*; 41(2-4), Dec 2004, page 223-232 .

[2] Bozorgnia; Yousef; Bertero; Vitelmo V.; *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*; Florida, CRC Press LLC, 2004.

[3] Hall; John F.; *Seismic response of steel frame buildings to near-fault ground motions*; A report of the California Institute of Technology, Report No.EERL 97-05, Pasadena, California, 1997.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]

[٤] سلطان زاده؛ حمید رضا؛ واهبی؛ مرادعلی؛ زربخش؛ حبیب الله؛ مکانیسم خرابی ساختمانهای شهر بم و روشهای کسب آمادگی در مقابل زلزله؛ سازمان نظام مهندسی ساختمان استان خوزستان، ۱۳۸۳.

[5] Gerami; M.; Abdollahzadeh; D. ; "Estimation of Forward Directivity Effect on Design Spectra in Near Field of Fault", *Journal of Basic and Applied Scientific Research;* Textroad Journals; 2nd year, No.9, 2012.

[٦] هیئت نویسندگان؛ آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ٨٤-٢٨٠٠ ویرایش سوم؛ نشریه ض-٢٥٣؛ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ١٣٨٤.

[٧] عبداله زاده؛ غلامرضا؛ آل هاشم؛ اردلان؛ "توزیع انرژی در طبقات قابهای فولادی مهاربندی هم مرکز تحت نگاشتهای حوزه دور و نزدیک"؛ *نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد*؛ انجمن سازه و فولاد؛ سال ششم، شماره هفتم، بهار و تابستان ۱۳۸۹.

[8] Stewart; Jonathan P.; Chiou; Shyh-Jeng; Bray; Jonathan D.; Graves; Robert W.; Somerville; Paul G. and Abrahamson; Norman A.; *Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design;* National Science Foundation, University of California, Berkeley, CA 94720-1792, 2001.

[9] Naeim; Farzad; *THE SEISMIC DESIGN HANDBOOK, 2nd Edition;* Kluwer Academic Publishers, 2001.

[10] International Conference of Building Officials; *1997, Uniform Building Code*; Whittier, CA, 1997.

[11] Federal Emergency Management Agency (FEMA); No.356; *PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS;* prepared by the SEAOC, ATC, and CUREE Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (FEMA Publication No. 356), 2000.

[١٢] شاهوردیان؛ کوروش؛ *مروری بر طرح و اجرای سازه‌های فولادی مقاوم دربرابر زلزله*؛ مرکز نشردانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، چاپ اول، بهار ۱۳۸۱.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-07-15]