

نیاز و ظرفیت اجزای سازه‌های 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: [۱۳۹۱/۷/۶]

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 تقریباً 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 می‌یابد [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 تغییر شکل‌های بزرگ طبقه همکف ساختمان‌ها در جهت عمود بر خط گسل بوده است [۴]. پس از وقوع زلزله‌های مخربی مانند زلزله ۱۹۹۲ لندرز، زلزله ۱۹۹۴ نورث ریج، ۱۹۹۵ کوبه ژاپن آیین نامه

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 ساختمان باشد، زمین تحت نوسانات رفت و برگشتی نسبتاً زیاد با دامنه کم قرار می‌گیرد. که به این حالت اثر جهت‌پذیری پس‌رونده گفته می‌شود [۸]. در مناطق دیگر که اثر جهت‌پذیری پیشرونده و یا پسرونده وجود نداشته باشد، مناطق با جهت‌پذیری خنثی گفته می‌شود [۹].

برای در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری پیشرونده، ۱۰ نگاشت در فواصل کمتر از ۱۵ کیلومتر از گسل‌های فعال مطابق مرجع [۱۰] انتخاب شدند که دارای ماهیت پالسیگونه 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 جهت‌پذیری خنثی انتخاب شدند. تمام نگاشت‌های انتخاب شده در جدول (۱) از زلزله‌های مهم دنیا با لنگر لرزه‌ای بیش از ۶.۵ 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 جهت‌پذیری پیشرونده در خاک‌های با تراکم متوسط و نرم کلیه نگاشت‌ها از ساختمان‌های 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 ۵m و ارتفاع طبقات 3.2m براساس آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم در مناطق با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد در

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 [۶]. 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 جهت‌پذیری پیشرونده بر نیاز و ظرفیت محوری، خمشی و شکل‌پذیری تیرها و ستون‌ها در ارتفاع قاب‌های خمشی فولادی تخمین زده شده است.

۲-۲-۱- فرضیات تحقیق و مدل‌سازی

۲-۱-۱- انتخاب نگاشت‌های زلزله

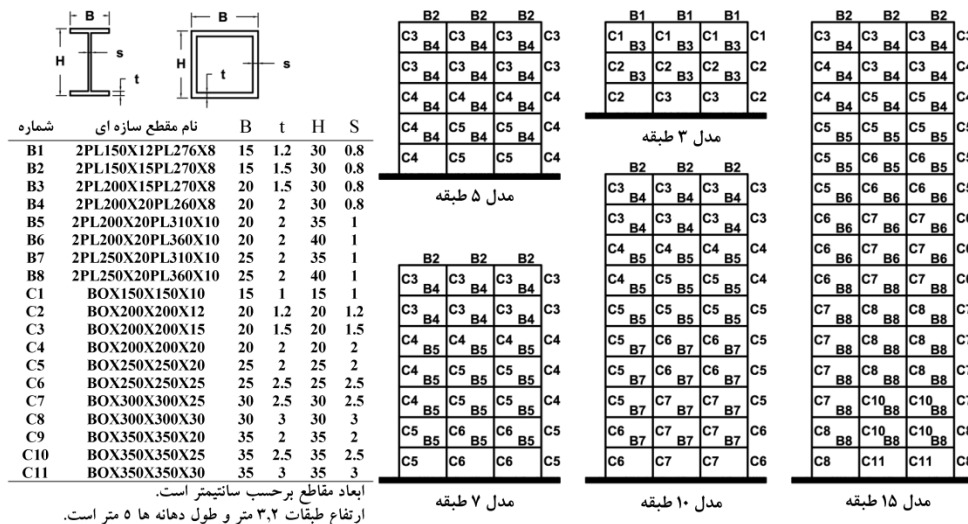
در هنگام زلزله در اطراف گسل‌های لرزه‌زا آثار متفاوتی از لحاظ شکل و نوع ارتعاش در زمین دیده شده است [۸، ۹] که وابسته به نوع و جهت‌گیری انتشار شکست گسل است [۸، ۹]. جهت‌گیری انتشار شکست^۱ گسل نسبت به ساختمان می‌تواند به صورت پیشرونده و یا پسرونده باشد. در شرایطی که سرعت انتشار شکست گسل با سرعت انتشار امواج زلزله یکسان باشد و جهت انتشار شکست گسل به سمت ساختمان باشد، تجمع موجک‌های ایجاد شده در هر شکست باعث ایجاد یک تا سه پالس با پریود بلند و

جدول (۱) نگاشت‌های مورد استفاده در این مطالعه

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

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.

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 $P-\Delta$ در تحلیل و طراحی سازه اعمال شده است. برای طراحی مدل‌های سازه‌ای از نرم افزار Etabs V9 و



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

د- برای اعمال میرایی ثابت ۰.۵٪، نسبت T_A/T_1 حدود ۱.۲ و

نسبت T_B/T_1 حدود ۲.۴ انتخاب شده است.

ر- در حوزه نزدیک گسل 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 جهت‌پذیری در نظر گرفته شود تمامی نگاشت‌ها به اوج شتاب ۰.۳۵g همپایه شده‌اند.

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

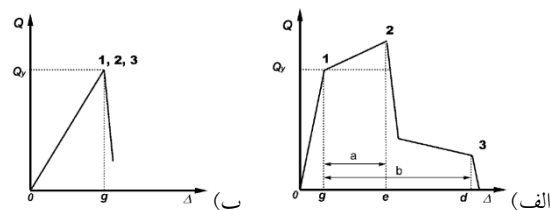
برای بررسی اثر نسبت ارتفاع به عرض ساختمان بر افزایش نیروی محوری ستون‌های کناری ناشی از بار جانبی در شکل (۳)، رابطه لنگر خمشی و نیروی محوری با استفاده از رابطه تعادل $\sum M_o = 0$ مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$M = \frac{Ph}{4} \quad (1)$$

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

۳-۲- 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 تغییر مکان به صورت ۳ خطی با در نظر گرفتن از بین رفتن مقاومت مطابق دستورالعمل FEMA356 است [۱۱]، شکل (۲) جزئیات مفصل پلاستیک اعضای شکل پذیر و ترد را نشان می‌دهد.

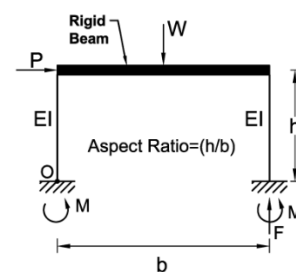


شکل (۲) منحنی رفتار الف) عضو شکل‌پذیر، ب) عضو ترد

ب- گام‌های زمانی برای شتاب‌نگاشت‌ها ۰.۰۰۵s 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 $P-\Delta$ منظور شده است.

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 $(\frac{h}{b})$ تأثیری 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 می‌کند.



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 (۴) نیروی محوری ستون با اثر جهت پذیری پیشرونده را نشان می‌دهند. با تفاضل رابطه (۳) از رابطه (۴)، ارتباط نسبت ارتفاع به عرض $(\frac{h}{b})$ با اثر جهت پذیری پیشرونده بر نیروی محوری ستون‌ها در رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$F_{ND} = \frac{P_{ND}}{2} \left(\frac{h}{b} \right) + \frac{W}{2} \quad (3)$$

$$F_{FD} = \frac{(P_{ND} + \Delta P_{FD})}{2} \left(\frac{h}{b} \right) + \frac{W}{2} \quad (4)$$

$$\Delta P_{FD} = F_{FD} - F_{ND} = \frac{(P_{ND} + \Delta P_{FD})}{2} \left(\frac{h}{b} \right) + \frac{W}{2} - \frac{P_{ND}}{2} \left(\frac{h}{b} \right) - \frac{W}{2} = \frac{\Delta P_{FD}}{2} \left(\frac{h}{b} \right) \quad (5)$$

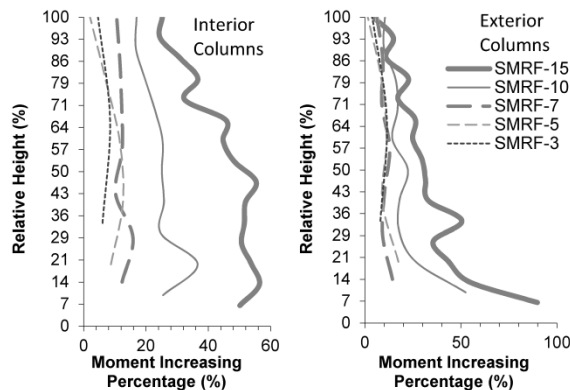
در روابط (۳) تا (۵)، F_{ND} نیروی محوری ستون در مناطق با جهت پذیری خشی (بدون اثر جهت پذیری پیشرونده) و

۴- بررسی ستون‌ها

۴-۱- 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 ۲۰٫۷ تا ۹۰٫۴٪ افزایش پیدا کرده است. در حالی که درصد افزایش نیروی محوری ستون‌های داخلی کمتر از ۰٫۵٪ 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 (۴) میانگین درصد افزایش نیروی محوری ستون‌های خارجی را تحت اثر جهت پذیری پیشرونده در ارتفاع نسبی مدل‌های سازه‌ای نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴) تأثیر 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 ۱۵ طبقه) تا ۵۰٪ ارتفاع در پایین سازه بین ۱۵ تا ۲۰٪ است. نتایج نشان می‌دهد افزایش نسبت ارتفاع به عرض (AR) باعث افزایش

۵۰٪ و برای مدل ۱۵ طبقه بین ۴۰ تا ۵۶٪ 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.



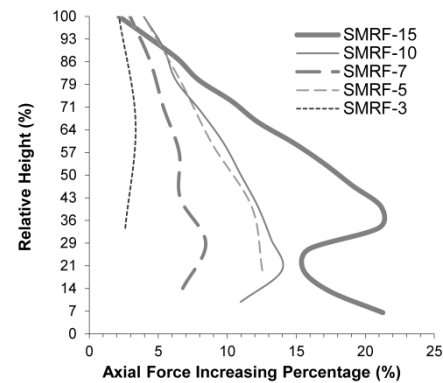
شکل (۵) میانگین درصد افزایش لنگر خمشی ستون‌های خارجی و داخلی در ارتفاع قابها

۴-۲- 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 (۶) تا (۸) برای ارزیابی ستون‌ها در ترکیب نیروهای محوری و خمشی به وسیله نشریه FEMA356 برای تحلیل‌های خطی ارائه شده است.

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

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 حدوداً ۲٫۲ برابر می‌شود.

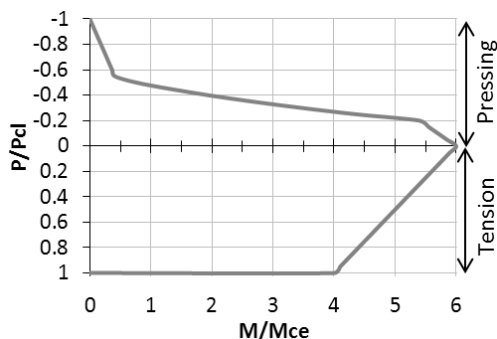


شکل (۶) میانگین درصد افزایش نیروی محوری ستون‌های خارجی طبقات مدل‌ها

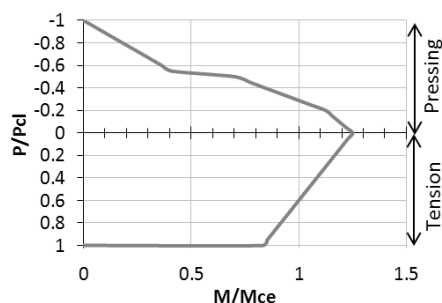
بررسی میانگین درصد افزایش بیشینه لنگر خمشی ستون‌ها در مدل‌های سازه نشان می‌دهد که در مدل‌های کوتاه مرتبه میانگین درصد افزایش لنگر خمشی ناشی از جهت پذیری پیشرونده در ستون‌های میانی بین ۶٫۴ تا ۹٫۵۱٪ بیش از حوزه دور از گسل است. همچنین نتایج ستون‌های خارجی با اختلاف کمتر از ۱٫۵٪ مشابه ستون‌های داخلی است؛ 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 ۴۳٫۸۹٪ و ستون‌های خارجی ۳۲٫۶۱٪ 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 ۴ تا ۱۶٪ 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

شده است. که این مسئله می‌تواند 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

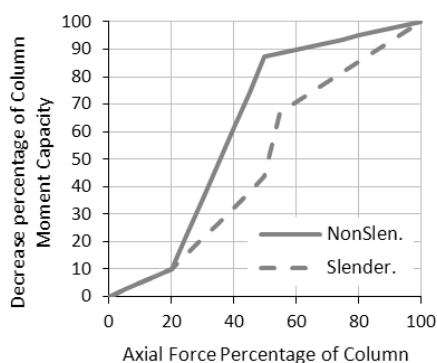


شکل (۶-الف) ستون‌های با جدار غیر لاغر



شکل (۶-ب) ستون‌های با جدار لاغر

شکل (۶) نمودار مقیاس شده اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی



شکل (۷) درصد کاهش ظرفیت خمشی ستون با افزایش نیروی محوری

ضوابط و معیارهای پذیرش اجزای سازه‌ای فولادی نشریه FEMA356 در اشکال (۸) و (۹) آورده شده است. شکل‌های (۸) و (۹) رابطه نسبت لنگر خمشی ستون به

$$\frac{P_{UF}}{2P_{CL}} + \frac{M_x}{m_x M_{CEX}} + \frac{M_y}{m_y M_{CEY}} \leq 1.0 \quad (6)$$

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

$$\frac{P_{UF}}{P_{CL}} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_x}{m_x M_{CEX}} + \frac{M_y}{m_y M_{CEY}} \right] \leq 1.0 \quad (7)$$

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

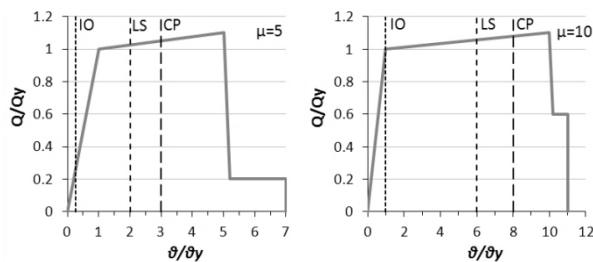
$$\frac{P_{UF}}{P_{CL}} + \frac{Mu_{Fx}}{M_{CLx}} + \frac{Mu_{Fy}}{M_{CLy}} \leq 1 \quad (8)$$

در روابط (۶) تا (۸)، 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 (۶) تا (۸) در شکل (۶) رسم شده است. همچنین در شکل (۷) نمودار درصد کاهش ظرفیت خمشی ستون با افزایش نیروی محوری برای ستون‌های با جدار غیر لاغر و لاغر آورده شده است.

مقایسه شکل (۶-الف) با شکل (۶-ب) نشان می‌دهد بسته به میزان نیروی محوری ستون استفاده از اجزای سازه‌ای با ضخامت جدار لاغر باعث کاهش ظرفیت خمشی ستون در حدود ۰.۲ تا ۰.۷ برابر اجزای سازه‌ای با جدار غیر لاغر می‌شود و مطابق اشکال (۸) و (۹) مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی محوری به میزان ۳۰٪ کران پایین ظرفیت محوری ستون‌ها، ظرفیت خمشی ستون‌ها بین ۳۰ تا ۸۰٪ کاهش پیدا می‌کند پس افزایش نیروی محوری ستون‌ها بین ۵ تا ۲۰٪ ناشی از جهت‌پذیری پیشرونده مطابق شکل (۴) می‌تواند باعث کاهش ظرفیت خمشی ستون بین ۱۲.۵ تا ۵۰٪ شود. از طرف دیگر مطابق شکل (۵) جهت‌پذیری پیشرونده باعث افزایش لنگر خمشی در حدود ۱۰ تا ۵۶٪

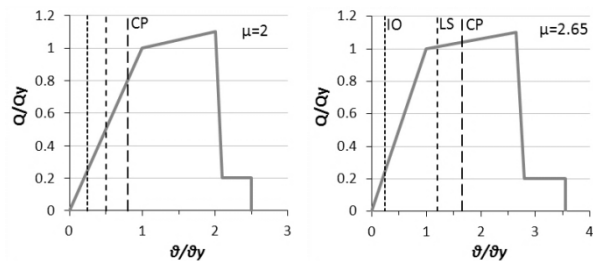
تحت آثار جهت پذیری پیشرونده باعث افزایش شکل پذیری خمشی ستون‌ها در قاب‌های خمشی فولادی در حوزه نزدیک گسل می‌شود. لازم به ذکر است در این پژوهش آثار لنگر خمشی ستون در راستای دیگر سازه، آثار جابه‌جایی سازه در راستای عمود، مولفه قائم زلزله و اثر مهاربند بر تغییرات نیروی محوری ستون‌ها در راستای دیگر در نظر گرفته نشده است که با توجه نتایج این بخش می‌تواند آثار چشم‌گیری 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 $0.2 \leq \frac{P_{UF}}{P_{CL}} \leq 0.5$

۵- بررسی تیرها

براساس فلسفه طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی، مفاصل پلاستیک ناشی از تغییر شکل‌های 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

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

$$\mu = \frac{\theta_{max}}{\theta_{yield}} \quad (9)$$

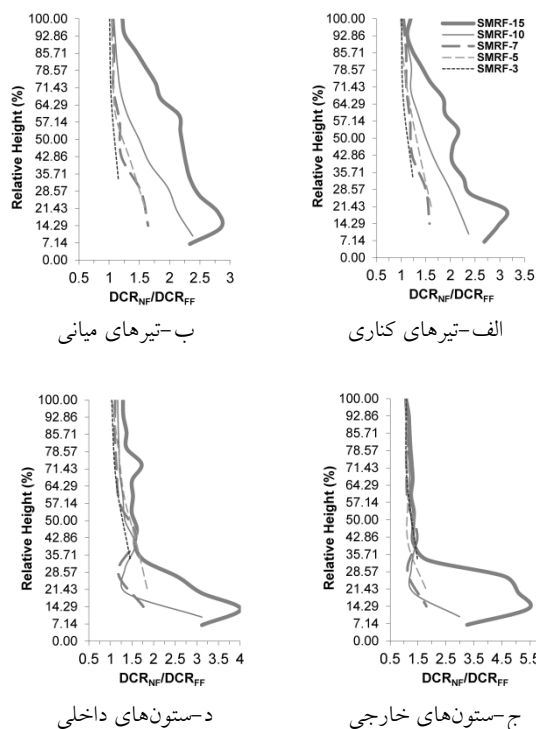
در رابطه (۹)، μ شکل پذیری و θ چرخش انتهای عضو سازه‌ای است که نمادهای max و $yield$ هم به ترتیب بیشینه چرخش قابل تحمل عضو و چرخش تسلیم عضو است.

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 می‌دهد افزایش نیروی محوری ستون می‌تواند باعث کاهش شکل‌پذیری خمشی ستون شود. به گونه‌ای که بسته به نوع مقطع سازه‌ای (جدار لاغر یا غیر لاغر) افزایش ۳۰٪ نیروی محوری می‌تواند ۶۰ تا ۷۳٫۵٪ ظرفیت شکل‌پذیری 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 ۱٫۴ 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 ۵۶٪ لنگر خمشی وارد بر ستون‌ها می‌شود و دوم اینکه بسته به محل قرارگیری ستون و نسبت ارتفاع به عرض سازه باعث کاهش ۱۲٫۵ تا ۵۰٪ مقاومت و کاهش ۲۵ تا ۵۰٪ شکل‌پذیری خمشی ستون‌ها می‌شود. نتایج این بخش نشان می‌دهد استفاده از مقاطع فشرده لرزه‌ای و طراحی ستون‌ها با در نظر گرفتن $\frac{P_{UF}}{P_{CL}} \leq 0.5$ (یا به طور محافظه کارانه

برای قاب‌های خمشی بلند مرتبه به شدت (در حدود ۳ تا ۵ برابر) افزایش پیدا می‌کند. با بررسی روابط تعیین مقاومت و منحنی نیرو تغییر مکان 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 تأثیری ندارد.

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

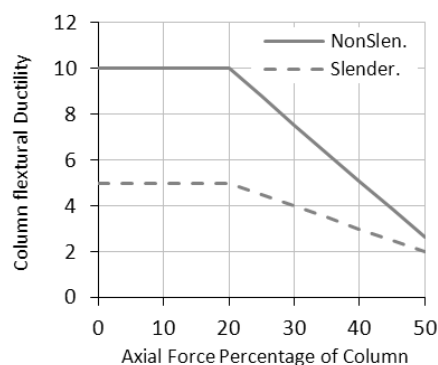
برای بررسی عملکرد اجزای سازه‌ای در سطح عملکرد ایمنی جانی، نسبت نیاز به ظرفیت تیرها و ستون‌های سازه مطابق با ضوابط FEMA356 برای هر یک از نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک گسل در ارتفاع نسبی سازه در اشکال (۱۲-الف) تا (۱۲-د) آورده شده است.



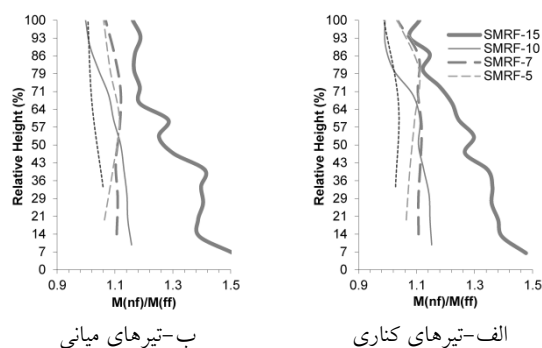
شکل (۱۲) نسبت نیاز به ظرفیت حوزه نزدیک گسل به حوزه دور از گسل برای اجزای سازه‌ای در ارتفاع نسبی

نتایج اشکال (۱۲-الف) تا (۱۲-د) نشان می‌دهند جهت

تیرهای طولی 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



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 خمشی ناشی از آثار جهت پذیری پیشرونده در حدود ۲ تا ۱۶٪ است در حالی که 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

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.

۴- 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 می‌دهد 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.

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 تقریباً به طور یکسان در ارتفاع سازه بیشینه ۱،۷۵ برابر شده است در حالی که 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 می‌دهد نسبت ارتفاع به عرض سازه نقش مهمی را در تشدید آثار جهت پذیری پیشرونده برای ستون‌های سازه (به ویژه ستون‌های خارجی) دارد.

۷- نتیجه گیری

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 می‌شود 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

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.

[۱۲] شاهوردیان؛ کوروش؛ *مروری بر طرح و اجرای سازه‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله*؛ مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، چاپ اول، بهار ۱۳۸۱.

[۴] 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.

[۶] هیئت نویسندگان؛ آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰ ویرایش سوم؛ نشریه ض-۲۵۳؛ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.

[۷] عبدالله 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.