مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۹۳-۱۰۲، (یادداشت فنّی)

Research Note

رفتار چرخه‌یی اتصالات خمشی فولادی متعارف تحت پروتکل‌های بارگذاری متفاوت و گسترش‌یافته

علی رحیم‌زاده* **(کارشناس ارشد)**
مهدی قاسمیه (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد اتصال‌های قاب خمشی فولادی تحت بارگذاری‌های چرخه‌یی متفاوت، سه مدل اتصال خمشی فولادی مربوط به ساختمان‌های ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه تحت پروتکل‌های بارگذاری چرخه‌یی مختلف با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود تحلیل و سپس رفتار و پارامترهای ظرفیتی هر اتصال‌تحت هر یک از بارگذاری‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در انتها، پروتکل بارگذاری پیشنهادی با توجه به مقادیر هدف درخواستی تاریخچه‌ی بارگذاری تولید شده است. اتصال‌هایی که با پروتکل بارگذاری SAC تحلیل شده‌اند، انطباق بهتری را با مقادیر هدف پروتکل بارگذاری نشان داده‌اند. پروتکل‌های بارگذاری ATC و FEMA درخواست‌های بزرگ‌تری را به اتصال‌ها تحمیل کرده‌اند، که منجر به برآورد پارامترهای ظرفیتی کمتری نسبت به دیگر پروتکل‌ها در اتصال‌ها شده است. همچنین تعدادی از اتصال‌ها تحت بارگذاری جوزه‌ی نزدیک تحلیل شده و آنها رفتاری نزدیک به رفتار یک‌سویه‌ی اتصال را به نمایش گذاشته‌اند. اتصال‌هایی که تحت پروتکل بارگذاری پیشنهادی تحلیل شده‌اند، در پارامترهای ظرفیتی اتصال افزایش داشته‌اند.

واژگان کلیدی: پروتکل بارگذاری، رفتار چرخه‌یی، اتصال‌های خمشی فولادی، اجزاء محدود.

ali.rahimzadeh@ut.ac.ir
mghassem@ut.ac.ir

۱. مقدمه

به علت ذات و طبیعت زمین‌لرزه‌ها، هیچ دو زمین‌لرزه‌یی از لحاظ بزرگا، قدرت، زمان اثر و نیروهایی که به سازه وارد می‌کنند، یکسان نیستند و این تفاوت به عدم قطعیت‌ها برای پیش‌بینی و مقابله در برابر این‌گونه از تهییج‌ها می‌افزاید. به علت اثرات مخرب نیروهای لرزه‌یی در سازه‌ها و مؤلفه‌های سازه‌یی، برآوردی قابل قبول از این نیروها و لزوم ایجاد یک رویکرد هماهنگ برای آزمایش مؤلفه‌های سازه‌یی بیش از پیش اهمیت یافته است.

به‌منظور ایجاد رویکردی کلی برای آزمایش و تحلیل مؤلفه‌ها، تولید تاریخچه‌ی بارگذاری واحد حائز اهمیت است. پس از زمین‌لرزه‌ی نورث‌ریج و مشاهده‌ی خساراتی که به سازه‌های خمشی فولادی و اتصال این سازه‌ها وارد شده است، لزوم بهینه‌کردن اتصال‌های فولادی پیشین و تولید اتصال‌های جدید نزد پژوهشگران بیش از پیش اهمیت یافته است. در همین راستا و به منظور برآوردی صحیح از کارایی و مقادیر ظرفیتی اتصال‌های جدید، بهره‌گیری از تاریخچه‌ی بارگذاری که بتواند طیف وسیعی از نیروهای احتمالی را که در یک زمین‌لرزه به اتصال تحمیل می‌شود در برگیرد، مورد توجه قرار گرفته است. در این تاریخچه‌های بارگذاری، بر نزدیک‌کردن هر چه بیشتر درخواست‌های تحمیل‌شده در یک زمین‌لرزه به اتصال تأکید شده است. در سال‌های اخیر که بحث مقاومت ساختمان‌ها در برابر نیروهای لرزه‌یی اهمیت بیشتری پیدا کرده است، پروتکل‌های بارگذاری متعددی راه خود را به ادبیات فنی پیدا کرده‌اند، که از مهم‌ترین آنها می‌توان به پروتکل بارگذاری ATC-۲۴ (۱۹۹۲)، پروتکل آماده‌شده‌ی کراوینکلر و همکاران (۱۹۹۷) تحت نظر FEMA/SAC برای سازه‌ها و مؤلفه‌های سازه‌یی فولادی، پروتکل بارگذاری ریچاردز و یوانگ برای اتصال تیرهای پیوند کوتاه به ستون‌های سازه‌های فولادی که برای آیین‌نامه‌ی AISC صورت گرفته و پروتکل‌های دیوار برشی در سازه‌های چوبی کراوینکلر و همکاران که تحت برنامه‌ی CUREE انجام شده است، اشاره کرد.[۱-۶]

در بررسی اثر تاریخچه‌های بارگذاری در مؤلفه‌های غیرسازه‌یی که در سال ۲۰۰۸ صورت گرفته است، به ایجاد یک پروتکل بارگذاری برای مؤلفه‌های غیرسازه‌یی حساس به تغییرمکان پرداخته شده است. در مطالعه‌ی مذکور به این موضوع اشاره شده است که یافته‌های پژوهش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی به همراه مشاهدات از خسارت‌های رخ‌داده در زمین‌لرزه‌های پیشین نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که تاریخچه‌های بارگذاری تأثیرات قابل توجهی را در خسارت تحمیل‌شده در مؤلفه‌های غیرسازه‌یی ساختمان در رخدادهای لرزه‌یی دارند، و استفاده از یک پروتکل بارگذاری مناسب برای برآورد کارایی مؤلفه‌ها لازم است.[۷]

در مطالعه‌یی دیگر در سال ۲۰۰۶ میلادی، به ایجاد یک پروتکل بارگذاری برای لینک‌های کوتاه در قاب‌های مهاربندی برون‌محور پرداخته شده است. از آنجایی که ظرفیت چرخشی غیرکشسان لینک‌ها در قاب‌های مهاربندی برون‌محور وابسته به

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۶/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۳، پذیرش ۱۳۹۲/۱۲/۷.

Archive of SID
www.SID.ir

تاریخچه‌ی بارگذاری و دنباله‌ی تغییرشکلی مورد استفاده در آزمایش است و چرخش طراحی کنونی (هدف) برای تیرهای پیوند بر پایه‌ی مطالعات صورت‌گرفته در دهه‌ی ۸۰ میلادی است، در مطالعه‌ی مذکور بر لزوم بهبودبخشیدن و تولید تاریخچه‌ی بارگذاری جدید برای برآورد کارایی و ظرفیت تیرهای پیوند تأکید شده است. در آزمایش انجام‌شده‌ی دیگری (۲۰۰۵) بر روی ۶ نمونه با هر دو پروتکل AISC و پروتکل پیشنهادی ریچاردز و یوانگ مشخص شده است که تیرهای پیوندی که با پروتکل پیشنهادی ریچاردز و یوانگ آزمایش شده‌اند، دارای ۵۰٪ ظرفیت چرخش بیشتر نسبت به آنهایی هستند که با پروتکل AISC آزمایش شده‌اند، و به نظر می‌رسد که ظرفیت چرخشی طراحی لینک‌ها از آنچه که قبلاً تصور شده است، بیشتر است.[۷و۸]

در مطالعه‌یی دیگر نیز به بررسی اثرات پروتکل بارگذاری در پاسخ دیوار برشی در قاب‌های چوبی پرداخته شده است، که هدف از آن، مقایسه‌ی دو پروتکل بارگذاری استفاده‌شده‌ی قدیمی‌تر (ISO و SPD) به همراه بارگذاری یک‌سویه و دو پروتکل جدید ارائه‌شده‌ی کراوینکلر و همکاران (۲۰۰۰) تحت برنامه‌ی CUREE بوده است. در مطالعه‌ی مذکور، ۱۸ آزمایش بر روی دو نمونه‌ی مشابه با هم به‌صورت موازی انجام و به بررسی ۵ پارامتر: کارایی، مد گسیختگی، مقاومت، سختی، ظرفیت تغییرشکلی، و انرژی جذب‌شده‌ی نمونه‌های آزمایش پرداخته شده و این نتایج به‌دست آمده است که مدهای گسیختگی تحمیلی با استفاده از پروتکل بارگذاری CUREE، بیشترین تطابق را با رفتار لرزه‌یی دارند و توصیه به استفاده از این پروتکل به صورت استاندارد در آزمایش‌های آتی قاب‌های چوبی شده است.[۹-۱۱]

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۰۰ به بررسی اثرات تاریخچه‌ی بارگذاری در کارایی چرخه‌یی اتصال‌های خمشی با مقطع کاهش‌یافته‌ی فولادی پرداخته شده و رفتار چرخه‌یی اتصال‌های فولادی خمشی با مقطع کاهش‌یافته تحت تاریخچه‌های بارگذاری متفاوت مورد مطالعه قرارگرفته و در آن کارایی لرزه‌یی اتصال‌های خمشی فولادی با مقطع کاهش‌یافته‌ی تیر بسیار مطلوب گزارش شده است. هیچ‌گونه پارگی در جوش قبل از رسیدن به چرخش هدف ۰٫۰۳ رادیان مشاهده نشده و نمونه‌ی آزمایش‌شده با پروتکل حوزه‌ی نزدیک توانسته است به ظرفیت چرخش خمیری تا ۲ برابر آنچه با اعمال پروتکل استاندارد به‌دست آمده است، برسد. در نمونه‌هایی که به آنها پروتکل حوزه‌ی نزدیک اعمال شده است، پارگی در بال تیر در اثر خستگی ناشی از چرخه‌های کم و همچنین حساس‌نبودن ظرفیت زوال انرژی نمونه‌های اتصال فولادی با مقطع کاهش‌یافته به نوع پروتکل مشاهده نشده است. در یک سطح دریفت قابل مقایسه، دامنه‌ی کمانش در نمونه‌ی تحلیل‌شده با تاریخچه‌ی حوزه‌ی نزدیک نسبت به نمونه‌ی تحلیل‌شده با پروتکل استاندارد کمتر مشاهده شده است.[۱۲] در این مطالعه از دو جهت به بررسی پروتکل‌های بارگذاری اقدام شده است:

۱. از نظر درخواست‌هایی که هر یک از پروتکل‌ها روی اتصال ایجاد می‌کنند؛

۲. رفتار اتصال‌تحت هر یک از تاریخچه‌های بارگذاری و بررسی پارامترهایی همچون: ظرفیت تغییرشکلی، ظرفیت مقاومتی، کرنش معادل خمیری[1] و مد گسیختگی اتصال.

۲. مشخصات اتصالات مورد بررسی

اتصال‌های مورد استفاده در این مطالعه، از اتصال‌های طراحی‌شده‌ی ساختمان‌های قاسمیه و همکاران[۱۳و۱۴] به‌صورت گیردار توسط ورق روسری و زیرسری انتخاب و مشخصات ساختمان‌های طراحی‌شده در جدول ۱ ارائه شده است. برای تحلیل‌ها، نصف طول تیر و دو برابر نصف ارتفاع ستون (یک ارتفاع کامل ستون) در نظرگرفته شده است، که در آن دو انتهای ستون مفصلی و انتهای تیر مفصل برشی است، تا در هنگام تحلیل رفتار مشابهی با واقعیت داشته باشد.[۱۵و۱۶]

جدول ۱. جزئیات ساختمان‌های طراحی‌شده.

تعداد طبقات	تعداد دهانه		طول دهانه‌ی (داخل به داخل m)	ارتفاع طبقات (m)
	راستای x	راستای y		
۷	۵	۵	۵	۳
۱۲	۵	۵	۵	۳
۲۰	۵	۵	۵	۳

مطابق شرایط اجرایی ایران، ارتفاع ستون‌ها تقریباً ۳ متر و طول دهانه‌ی تیرها با توجه به نمونه‌های طراحی‌شده به ترتیب برای اتصال‌های سبک، متوسط، و سنگین برابر ۲٫۶۵، ۲٫۷ و ۲٫۷۵ متر بوده و مهار جانبی در فاصله‌های ۱ متری مناسب فرض شده است. همچنین برای جلوگیری از آسیب به جک‌ها، یک مهار دیگر نزدیک محل بارگذاری در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها به شکل T ساخته و در محل تکیه‌گاه‌های ستون از سخت‌کننده استفاده و در محل بارگذاری تیر نیز یک سخت‌کننده در نظرگرفته شده است؛ تا در محل بارگذاری، گسیختگی موضعی اتفاق نیفتد.

۳. تاریخچه‌های بارگذاری

در ابتدا به منظور ایجاد یک خط پایه‌ی اطلاعات، هر اتصال‌تحت بارگذاری یک سویه قرار گرفته است. تاریخچه‌های بارگذاری چرخه‌یی مورد استفاده در این مطالعه، تاریخچه‌ی بارگذاری ATC-۲۴، SAC پایه، حوزه‌ی نزدیک SAC [2]، و FEMA-۴۶۱ بوده‌اند، که هر اتصال‌تحت این بارگذاری‌های چرخه‌یی قرارگرفته و تحلیل شده است. تاریخچه‌های بارگذاری مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۱ ارائه شده‌اند.

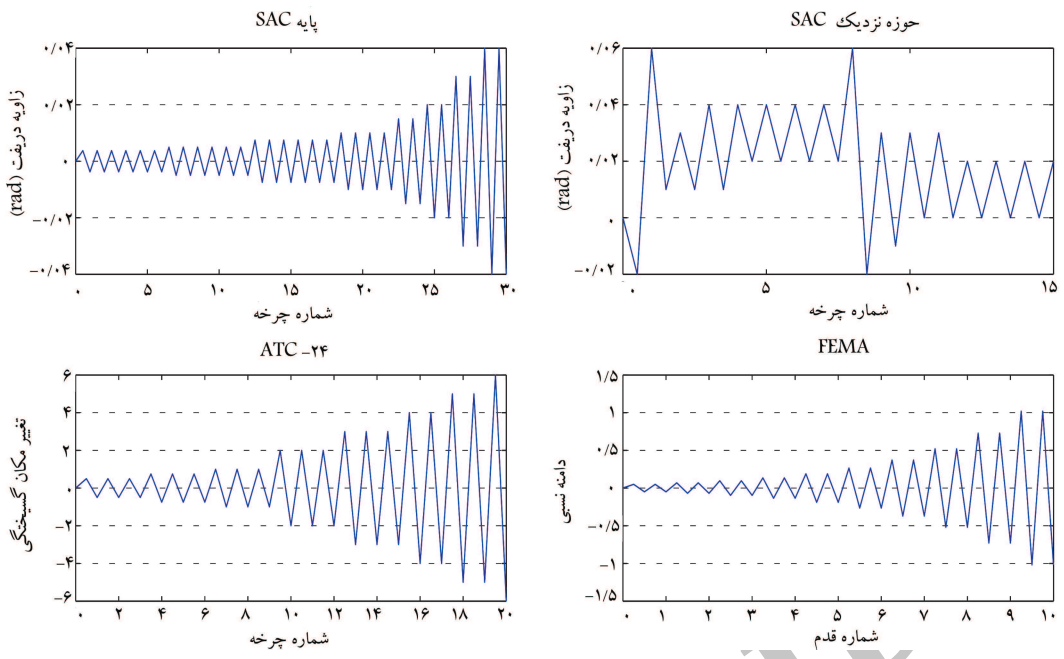
در تاریخچه‌ی بارگذاری SAC، بارگذاری پارامترکنترلی زاویه‌ی دریفت داخلی طبقه[3] بوده و دنباله‌ی بارگذاری با ۶ چرخه‌ی تغییرشکلی با دریفت‌های ۰٫۳۵، ۰٫۵ و ۰٫۷۵ درصد آغاز شده و با ۴ چرخه با دامنه‌ی تغییرشکلی ۱٪ ادامه یافته است. در گام بعدی، ۲ چرخه‌ی ۱٫۵٪ دریفت و در قدم‌های بعدی هر قدم با ۲ چرخه با دامنه‌های تغییرشکلی ۲، ۳، ۴ درصد و... را پشت سر گذاشته است.

تاریخچه‌ی بارگذاری حوزه‌ی نزدیک SAC با یک دامنه‌ی تغییرشکلی ۲٪ در جهت منفی آغاز و با دریفتی به میزان ۶٪ در جهت مثبت دنبال شده است. پس از آن نوسانی بین دریفت ۱ و ۵ درصد و سپس بین ۲ تا ۴ درصد و مجدداً با یک دریفت ۶٪ ادامه یافته است. دنباله سپس در میان صفر و منفی ۲٪ ادامه یافته و به ۳٪ افزایش یافته، بعد به منفی ۱٪ کاهش یافته و در نهایت بین ۰ و ۳٪ و نیز بین ۰ و ۲٪ چند چرخه را اعمال کرده است.

در تاریخچه‌ی بارگذاری ATC دریفت جاری‌شدن طبقه، پارامترکنترلی است. این تاریخچه‌ی بارگذاری با ۶ چرخه‌ی تغییرشکلی کوچک‌تر از دریفت جاری‌شدن آغاز شده است. در قدم دوم، ۳ چرخه با دامنه‌ی جاری‌شدن را اعمال کرده، سپس ۳ چرخه را با دامنه‌ی تغییرشکلی ۲ برابر و ۳ برابر جاری‌شدن اعمال کرده و در نهایت، تاریخچه‌ی بارگذاری قدم‌های خود را با ۲ چرخه و با افزایشی به میزان δy (تغییرشکل جاری‌شدن) در دامنه‌ی تغییرشکلی ادامه داده است.[۱۷و۱۸]

تاریخچه‌ی بارگذاری FEMA، ۲ چرخه در هر قدم بارگذاری دارد. میزان افزایش دامنه‌ی بارگذاری در هر قدم ۰٫۴ برابر دامنه‌ی تغییرشکلی قدم قبلی است. Δ_0 کوچک‌ترین دامنه‌ی تغییرشکلی هدف تاریخچه‌ی بارگذاری است و باید به‌صورت

Archive of SID
www.SID.ir



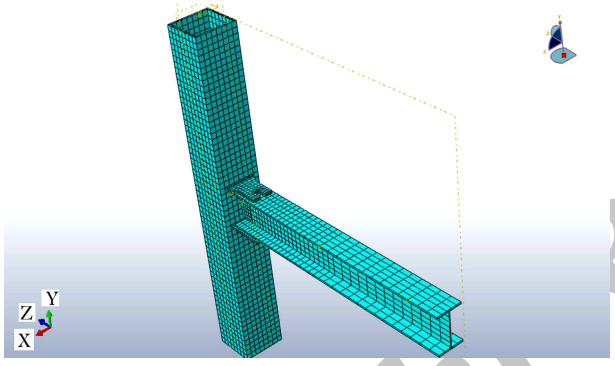
شکل ۱. پروتکل‌های بارگذاری چرخه‌یی مورد استفاده در مطالعه.

مناسبی از دامنه‌ی تغییرشکلی، که در آن کوچک‌ترین سطح خطر اتفاق می‌افتد، کوچک‌تر باشد. FEMA توصیه به انجام دست کم ۶ چرخه با این دامنه دارد و اگر هیچ اطلاعاتی در مورد اینکه چه دامنه‌ی تغییرشکلی موجب شروع خسارت می‌شود، در دست نباشد، توصیه می‌شود مقدار Δ_0 (به معنی دریفت طبقه) در حدود ۰٫۰۰۱۵ باشد. Δ_m بیشینه‌ی‌دامنه‌ی تغییرشکلی هدف از تاریخچه‌ی بارگذاری و نیز یک مقدار برآوردشده از تغییرشکل تحمیلی است، که در آن شروع بیشترین سطح خسارت انتظار می‌رود. این مقدار باید قبل از انجام آزمایش تعیین شود (این مقدار توسط انجام یک آزمایش یک‌سویه تعیین می‌شود). مقدار پیشنهادی FEMA برای Δ_m(بیشینه‌ی دریفت طبقه) با توجه به نبود دیگر شواهد، ۰٫۰۳ است. FEMA توصیه می‌کند که اگر شدیدترین سطح خسارت در هنگام رسیدن به مقدار هدف هنوز اتفاق نیفتاده باشد، تاریخچه‌ی بارگذاری باید با افزایش بیشتری در هر قدم به اندازه‌ی $0.3\Delta_m$ ادامه پیدا کند.

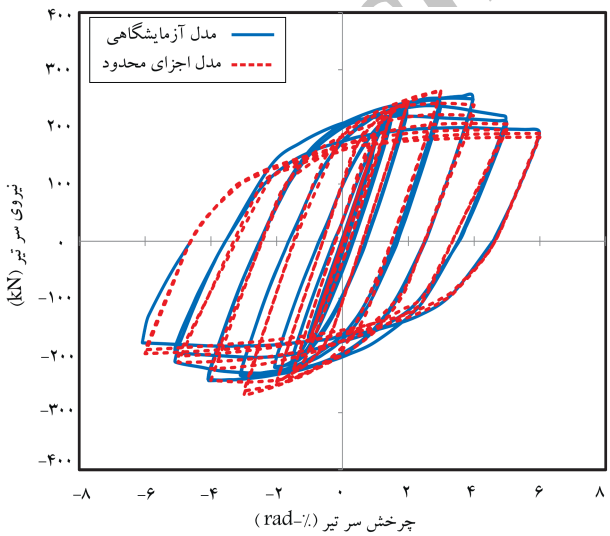
۴. مدل‌سازی مدل اجزاء محدود اتصال

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هر اتصال‌در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل و با استفاده از نرم‌افزار مذکور تحلیل شده است.[۱۹] المان مورد استفاده در این مطالعه، یک المان سه بُعدی با ۲۰ گره و در هر گره ۳ درجه‌ی آزادی است، که به‌صورت درجه‌ی دوم (C3D20R) انتخاب شده است. علاوه بر این، چون در این مدل در ناحیه‌ی اتصال تیر به ستون تمرکز تنش وجود داشته است، از حالت انتگرال کاهش‌یافته‌ی المان استفاده نشده است. در مدل‌سازی اتصال، در نقاط دور از اتصال و در جاهایی که تمرکز تنش کمتر بوده است، از المان‌های سه بُعدی با ۸ گره و در هر گره ۳ درجه‌ی آزادی (C3D8R) استفاده شده است.[۱۹]

در ادامه، به‌منظور صحت‌سنجی رفتار اتصال در نرم‌افزار اجزاء محدود، رفتار مدل اجزاء محدود اتصال‌ها با رفتار آزمایشگاهی همان اتصال تحت پروتکل بارگذاری SAC مقایسه شده است. طی این مقایسه همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود،



شکل ۲. شبکه‌بندی مدل اجزاء محدود.



شکل ۳. ارزیابی مدل از طریق مقایسه‌ی نمودار چرخه‌یی مدل رایانه‌یی و نمونه‌ی آزمایشگاهی.

www.SID.ir

رفتار واقعی اتصال و رفتار مدل اجزاء محدود به نحو مناسبی نزدیک به هم هستند. پس از اطمینان از صحت مدل‌های ساخته‌شده در نرم‌افزار اجزاء محدود، بارگذاری‌های یک‌سویه و چرخه‌یی به نمونه‌ی اجزاء محدود اعمال شده است.

۵. مقادیر هدف تاریخچه‌ی بارگذاری

در انتخاب مقادیر هدف تاریخچه‌ی بارگذاری از مطالعه‌ی صورت‌گرفته‌ی کراوینکلر و همکاران، که منجر به تولید پروتکل بارگذاری SAC شده استفاده شده است. در تولید پروتکل بارگذاری SAC، قاب‌های طراحی‌شده‌ی SAC (۳، ۵ و ۱۲ طبقه) تحت تهییج لرزه‌یی پایه با چند مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت قرارگرفته‌اند. از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی قاب‌ها، مقادیر زاویه‌ی دریفت داخلی طبقات در برابر زمان استخراج و سپس با استفاده از روش شمارش چرخه‌های رین فلو[4] بازه‌های تغییرشکلی پاسخ به دنباله‌یی با بازه‌های تغییرشکلی متقارن تبدیل شده است. در ادامه، با استفاده از توزیع آماری و توابع پخش تجمعی[5]، طبقه‌ی بحرانی مشخص شده است. در قدم نهایی، مقادیر هدف برای تولید پروتکل بارگذاری از مقادیر ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصدی طبقه‌ی بحرانی برگزیده شده‌اند. مقادیر هدف تاریخچه‌ی بارگذاری شامل: تعداد چرخه‌های خسارتی N_t، بازه‌ی تغییرشکلی بیشینه ($\Delta\theta_{\max}$)، دامنه‌ی تغییرشکلی بیشینه ($\theta_{\max}$) و بازه‌ی تغییرشکل تجمعی ($\sum \Delta\theta_i$) است، که در جدول ۲ ارائه شده‌اند. تعداد چرخه‌های خسارتی، چرخه‌هایی هستند که یک اتصال در یک زمین‌لرزه‌ی فرضی باید قادر به تحمل آنها باشد. چرخه‌های خسارتی، چرخه‌هایی با بازه‌ی تغییرشکلی بزرگ‌تر از ۰٫۰۰۰۵ رادیان هستند. بازه‌ی تغییرشکلی بیشینه به بزرگ‌ترین بازه‌ی تغییرشکلی، که اتصال باید دست‌کم یک چرخه‌ی کامل آن را به‌منظور تأیید کارایی پشت سر بگذارد، اطلاق می‌شود. دامنه‌ی تغییرشکلی بیشینه، نصف بازه‌ی تغییرشکلی بیشینه به‌صورت متقارن در جهت مثبت و منفی تاریخچه‌ی بارگذاری است. بازه‌ی تغییرشکلی تجمعی به مجموع بازه‌های تغییرشکلی در هر چرخه، که اتصال باید به منظور دست‌یابی به کارایی مناسب پشت سر بگذارد، گفته می‌شود.

۶. درخواست‌تحمیلی پروتکل‌ها

پروتکل بارگذاری SAC بر پایه‌ی مطالعه‌ی کراوینکلر و همکاران (۱۹۹۷) شکل گرفته و اساس تولید آن، مقادیر هدف به‌دست‌آمده از این مطالعه روی قاب‌های ساختمان‌های ۳، ۵ و ۱۲ طبقه بوده است، که قبلاً به آنها اشاره شده است. اتصال‌هایی که تحت پروتکل بارگذاری SAC تحلیل شده‌اند، به منظور رسیدن به چرخش بیشینه‌ی هدف تاریخچه‌ی بارگذاری (۰٫۰۴ رادیان) و تحمل یک چرخه‌ی کامل در این بازه‌ی تغییرشکلی نیاز به تحمل ۲۹ چرخه‌ی تغییرشکلی خسارتی داشتند؛ که در این چرخش، چرخش تجمعی هدف تاریخچه‌ی بارگذاری ۰٫۴۷ رادیان ارضاء شده است (۰٫۵۹ رادیان). با توجه به اینکه این پروتکل بارگذاری مستقیماً از مقادیر هدف مطالعه‌ی کراوینکلر و همکاران (۱۹۹۷) شکل گرفته است، در نتیجه تطابق مناسبی را با مقادیر هدف نشان داده است. این پروتکل در بازه‌ی تغییرشکلی بیشینه‌ی هدف (۰٫۰۴ رادیان)، علاوه بر اینکه نیاز تغییرشکلی اعمالی را به‌صورت مناسب و به همراه اندکی محافظه‌کاری (۰٫۱۲ رادیان بیشتر از مقدار هدف) به اتصال اعمال کرده است، در ضمن درخواست تعداد چرخه‌های خسارتی را نیز در این چرخش به طرز مناسبی در نظر گرفته است (۲۹ چرخه‌ی خسارتی).

جدول ۲. مقادیر هدف پارامترهای درخواست تاریخچه‌ی بارگذاری.

N_t	$\Delta\theta_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\sum \Delta\theta_i$
۳۰	۰٫۰۸	۰٫۰۴	۰٫۴۷

پروتکل بارگذاری ATC-۲۴ مبنای چرخه‌های تغییرشکلی خود را بر تغییرشکل در لحظه‌ی گسیختگی قرار می‌دهد. در نتیجه با توجه به اینکه هر یک از اتصال‌ها، تغییرشکل خاص خود در لحظه‌ی گسیختگی را دارد و این تاریخچه‌ی بارگذاری نیاز به یک تحلیل اولیه‌ی یک‌سویه داشته است، تحت این پروتکل بارگذاری، اتصال‌ها در زمانی که یک چرخه‌ی کامل در بیشینه‌ی بازه‌ی تغییرشکلی هدف (۰٫۰۴ رادیان) را پشت سر قرار دادند، متحمل چرخشی تجمعی به میزان ۰٫۴۸ تا ۰٫۵۵ رادیان شده‌اند. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در چرخه‌یی که بیشینه‌ی بازه‌ی تغییرشکلی پروتکل بارگذاری به مقدار هدف پروتکل بارگذاری (۰٫۰۴ رادیان) رسیده است، پروتکل بارگذاری ATC چرخش تجمعی هدف بارگذاری را ارضاء کرده است. این پروتکل بارگذاری درخواست چرخش تجمعی را اندکی همراه با محافظه‌کاری در نظر می‌گیرد (۰٫۰۱ تا ۰٫۰۸ رادیان). اتصال‌ها تحت این پروتکل بارگذاری تا رسیدن به بازه‌ی تغییرشکلی بیشینه، تعداد چرخه‌ی خسارتی بسیار کمتری را تحمل می‌کنند و چرخه‌های این پروتکل غالباً دارای بازه‌ی تغییرشکلی بزرگ‌تر نسبت به پروتکل‌های بارگذاری SAC و FEMA هستند. با توجه به اینکه در یک زمین‌لرزه، تعداد چرخه‌ها با بازه‌ی تغییرشکلی کوچک از تعداد چرخه‌ها با بازه‌ی تغییرشکلی بزرگ بیشتر است، این پروتکل بارگذاری از این حیث دچار ضعف است؛ که این موضوع در کم‌شدن چرخه‌های خسارتی اعمالی این پروتکل بر اتصال‌ها نسبت به مقدار هدف (۱۳ الی ۱۵ چرخه‌ی کمتر) تأثیر می‌گذارد.

اتصال‌هایی که تحت پروتکل بارگذاری FEMA قرارگرفتند، به منظور رسیدن به بازه‌ی تغییرشکلی هدف پروتکل بارگذاری (۰٫۰۴ رادیان)، ۱۷ چرخه‌ی تغییرشکلی خسارتی را بر اتصالات تحمیل کرده‌اند. این تذکر لازم است که چرخه‌های ابتدایی این پروتکل بارگذاری با بازه‌ی تغییرشکلی کوچک‌تر از ۰٫۰۰۵ رادیان بودند، که این چرخه‌ها از نوع خسارتی نیستند. در نتیجه این چرخه‌های کوچک مقداری از بازه‌ی تجمعی تحمیلی این پروتکل بارگذاری خسارتی را بر اتصال وارد نکرده‌اند، که در این صورت احتمال برآورد بالاتری از پارامترهای ظرفیتی در اتصال‌های تحلیل‌شده با این بارگذاری می‌رفت. در ضمن به دلیل اینکه چرخه‌ها با بازه‌ی تغییرشکلی کوچک‌تر از ۰٫۰۰۵ رادیان، خسارتی بر اتصال وارد نکرده‌اند، تعداد چرخه‌های خسارتی این پروتکل بارگذاری نسبت به مقدار هدف بسیار کمتر مشاهده شده است (۱۳ چرخه کمتر). اتصال‌های تحت این بارگذاری در بازه‌ی تغییرشکلی هدف تاریخچه‌ی بارگذاری، مقادیر تجمعی بین ۰٫۵۶ الی ۰٫۵۸ رادیان را تحمل کرده‌اند، که اندکی محافظه‌کاری نسبت به مقدار هدف این پارامتر در پروتکل بارگذاری FEMA مشاهده شده است (۰٫۰۹ الی ۰٫۱۱ رادیان).

۷. بررسی رفتار اتصال‌ها

با توجه به تحلیل اتصال‌ها، پارامترهای رفتاری آن‌ها در جدول ۳ طبقه‌بندی و در آن به مقایسه‌ی بین کمیت‌های مذکور در هر یک از اتصال‌های تحت بارگذاری‌های مطالعه پرداخته شده است. پارامترهایی که در این مطالعه مد نظر قرارگرفته‌اند، شامل: مد گسیختگی غالب، ظرفیت مقاومتی، ظرفیت تغییرشکلی و کرنش معادل خمیری اتصال‌ها هستند، که در ادامه، به تشریح آن‌ها پرداخته شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳. پارامترهای پروتکل‌های بارگذاری.

پروتکل بارگذاری SAC

قدم‌های بارگذاری	تعداد چرخه‌ها در هر قدم	مجموع چرخه‌ها از ابتدا	پیک تغییرمکانی زاویه دریفت داخلی طبقه به رادیان	مجموع بازه‌های تغییرشکلی به رادیان
۱	۶	۶	۰/۰۰۳۷۵	۰/۰۲۲۵
۲	۶	۱۲	۰/۰۰۵	۰/۰۸۲۵
۳	۶	۱۸	۰/۰۰۷۵	۰/۱۷۲۵
۴	۴	۲۲	۰/۰۱	۰/۲۵۲۵
۵	۲	۲۴	۰/۰۱۵	۰/۳۱۲۵
۶	۲	۲۶	۰/۰۲	۰/۳۹۲۵
۷	۲	۲۸	۰/۰۳	۰/۵۱۲۵
۸	۲	۳۰	۰/۰۴	۰/۶۷۲۵
۹	۲	۳۲	۰/۰۵	۰/۸۷۲۵
۱۰	۲	۳۴	۰/۰۶	۱/۱۱۲۵

پروتکل بارگذاری ATC

قدم‌های بارگذاری	تعداد چرخه‌ها در هر قدم	چرخه‌های اتصال (رادیان)			بازه‌ی تغییرشکلی تجمعی (رادیان)		
		سبک	متوسط	سنگین	اتصال سبک	اتصال متوسط	اتصال سنگین
۱	۳	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۳۲۵	۰/۰۲۴۱	۰/۰۲۴
۲	۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۸۱۳	۰/۰۶۰۴	۰/۰۶۰۲
۳	۳	۰/۰۱۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۱۴۶۴	۰/۱۰۸۸	۰/۱۰۸۳
۴	۳	۰/۰۲۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۲۷۶۶	۰/۲۰۵۵	۰/۲۰۴۷
۵	۳	۰/۰۳۲	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۴۷۱۹	۰/۳۵۰۶	۰/۳۴۹۲
۶	۲	۰/۰۴۳	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	۰/۶۴۵۵	۰/۴۷۹۵	۰/۴۷۷۶
۷	۲	۰/۰۵۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۸۶۲۵	۰/۶۴۰۷	۰/۶۳۸۲
۸	۲	۰/۰۶۵	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۱/۱۲۲۹	۰/۸۳۴۲	۰/۸۳۰۸

پروتکل بارگذاری FIMA۴۶۱

قدم‌های بارگذاری	پروتکل بارگذاری فیما ۴۶۱	چرخه‌های اتصال (رادیان)			بازه‌ی تغییرشکلی تجمعی (رادیان)		
		سبک	متوسط	سنگین	اتصال سبک	اتصال متوسط	اتصال سنگین
۱	۲	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۷۱	۰/۰۰۷۰۲	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۶۸۵
۲	۲	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۲۳۹	۰/۰۱۶۸۴	۰/۰۰۸۶۴	۰/۰۱۶۴۵
۳	۲	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۳۳۵	۰/۰۳۰۶	۰/۰۱۵۶۹	۰/۰۲۹۸۸
۴	۲	۰/۰۰۴۸۱	۰/۰۰۲۴۶	۰/۰۰۴۷	۰/۰۴۹۸۷	۰/۰۲۵۵۷	۰/۰۴۸۶۹
۵	۲	۰/۰۰۶۷۴	۰/۰۰۳۴۵	۰/۰۰۶۵۸	۰/۰۷۶۸۳	۰/۰۳۹۴	۰/۰۷۵۰۲
۶	۲	۰/۰۰۹۴۱	۰/۰۰۴۸۴	۰/۰۰۹۲۱	۰/۱۱۴۵۹	۰/۰۵۸۷۶	۰/۱۱۱۸۹
۷	۲	۰/۰۱۳۲۶	۰/۰۰۶۷۲	۰/۰۱۲۹	۰/۱۶۷۴۵	۰/۰۸۵۸۷	۰/۱۶۳۵
۸	۲	۰/۰۱۸۵	۰/۰۰۹۴۸	۰/۰۱۸۰۶	۰/۲۴۱۴۵	۰/۱۲۳۸۲	۰/۲۳۵۷۵
۹	۲	۰/۰۲۵۹	۰/۰۱۳۲۸	۰/۰۲۵۲۱	۰/۳۴۵۰۵	۰/۱۷۶۹۴	۰/۳۳۶۹۱
۱۰	۲	۰/۰۳۶۲۶	۰/۰۱۸۵۹	۰/۰۳۵۴	۰/۴۹۰۰۹	۰/۲۵۱۳۲	۰/۴۷۸۵۳
۱۱	۲	۰/۰۵۰۷۶	۰/۰۲۶۰۳	۰/۰۴۹۵۶	۰/۶۹۳۱۴	۰/۳۵۵۴۶	۰/۶۷۶۷۹
۱۲	۲	۰/۰۷۱۰۶	۰/۰۳۶۴۴	۰/۰۶۹۳۹	۰/۹۷۷۴۲	۰/۵۰۱۲۴	۰/۹۵۴۳۷
۱۳	۲	۰/۰۹۹۴۹	۰/۰۵۱۰۲	۰/۰۹۷۱۵	۱/۳۷۵۴۱	۰/۷۰۵۳۴	۱/۳۴۲۹۷

Archive of SID

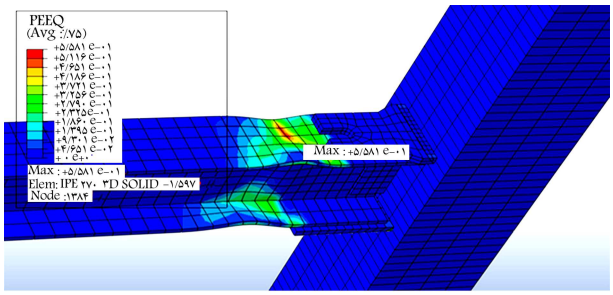
www.SID.ir

۱.۷. مد گسیختگی غالب اتصال

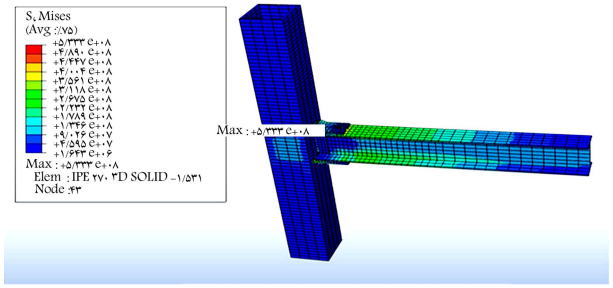
از آنجا که اتصال‌های مورد بررسی از اتصال‌های تیر به ستونی که درگذشته آزمایش شده و عملکرد آن‌ها مورد تأیید قرارگرفته بود، انتخاب شده بودند؛ رفتار مناسبی از این اتصال‌ها در برابر بارگذاری چرخه‌یی انتظار می‌رفت. همان‌گونه که در شکل ۴الف مشاهده می‌شود، مقادیر بیشینه‌ی کرنش معادل خمیری در اتصال، در بال تیر و منطقه‌یی بعد از ورق‌های زیرسری و روسری رخ داده است. مد گسیختگی سایر اتصال‌ها تحت بارگذاری‌های چرخه‌یی و یک‌سویه نیز کمانش موضعی بال تیر در مقطعی بعد از ورق‌های زیرسری و روسری بوده است، با این‌حال در برخی موارد بیشینه‌ی کمانش موضعی در بال تیر و در مجاورت ستون و همچنین جان تیر نیز مشاهده شده است. در شکل ۴ب، نمایی از تنش‌ها در اتصال و در لحظه‌ی گسیختگی قابل مشاهده است. با توجه به شکل مذکور در لحظه‌ی گسیختگی، تنش‌ها در جوش هیچ‌یک از اتصال‌ها به مقدار تنش نهایی جوش نرسیده است. شروع گسیختگی نیز در مقاطعی از اتصال مشاهده شده و در هیچ‌یک از اتصال‌ها شروع گسیختگی در جوش‌ها مشاهده نشده است، که نشان از عدم وجود پتانسیل شکست ترد در اتصال است.

۲.۷. ظرفیت مقاومتی اتصال

با درنظرداشتن اینکه خسارت به‌صورت تجمعی است و اتصال در هر بارگذاری و باربرداری که در ناحیه‌ی خمیری خود صورت گیرد، در سطح سلامت پایین‌تری نسبت به قبل خود خواهد بود؛ اتصال‌ها در تحلیل‌با بارگذاری‌های یک‌سویه، به علت اینکه بارگذاری‌های و باربرداری‌های متعددی را تجربه نمی‌کنند، در تمامی نمونه‌ها بالاترین سطح ظرفیت مقاومتی اتصال از تحلیل‌ها با بارگذاری یک‌سویه حاصل شده است. با توجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳ مشخص است که پس از اتصال‌هایی که تحت بارگذاری یک‌سویه تحلیل شده‌اند، اتصال‌هایی‌که تحت بارگذاری چرخه‌یی



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) کانتور کرنش معادل خمیری در لحظه شروع گسیختگی، ب) کانتور تنش در لحظه شروع گسیختگی.

حوزه‌ی نزدیک SAC قرارگرفته‌اند، نزدیک‌ترین رفتار را به رفتار یک‌سویه‌ی اتصال داشته و نیز توانایی دست‌یابی به مقاومت بالاتری را از خود نشان داده‌اند. اتصال‌هایی که تحت بارگذاری FEMA تحلیل شده‌اند، توانسته‌اند به مقاومتی اندکی بیشتر (تا ۳٪) نسبت به اتصال‌هایی که تحت پروتکل‌های بارگذاری ATC و SAC تحلیل شده‌اند، دست یابند. در تحلیل‌هایی که اتصال تحت پروتکل‌های بارگذاری ATC و SAC صورت گرفته است، ظرفیت مقاومتی اتصال‌ها به‌صورت نسبتاً برابر مشاهده شده است. همان‌گونه که رفتار چرخه‌یی اتصال متوسط تحت بارگذاری‌های مختلف در شکل ۵ نمایش داده شده است، روند انجام تحلیل و بارگذاری تحمیلی به اتصال، در رفتار آن و مقدار مقاومت بیشینه‌یی که اتصال توانسته است به آن دست یابد، بسیار تأثیرگذار بوده است.

۳.۷. ظرفیت تغییرشکلی اتصال

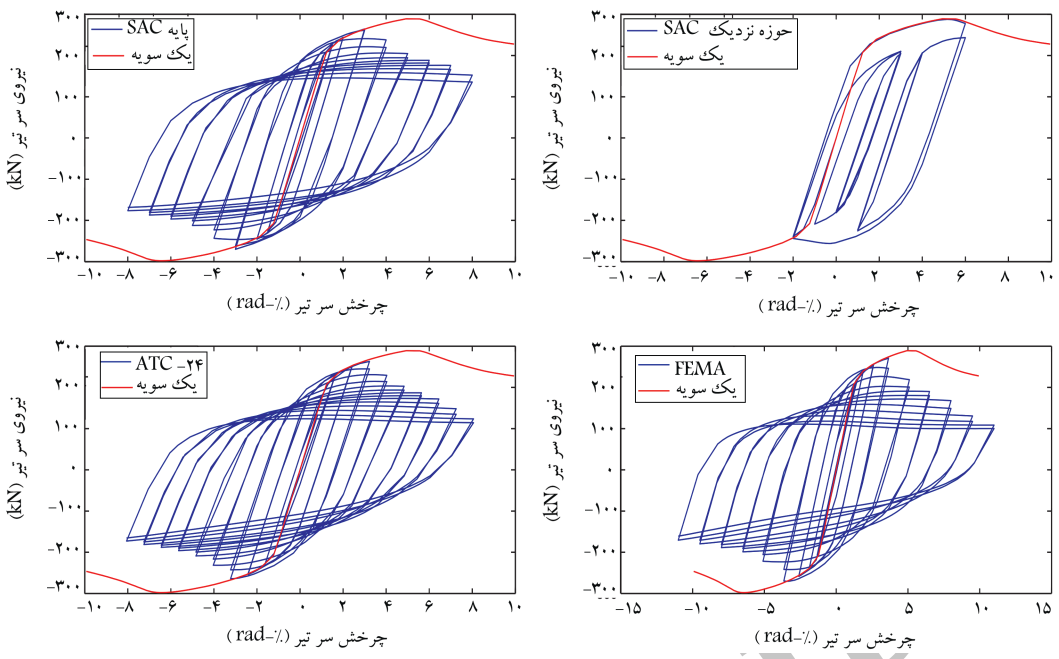
ظرفیت تغییرشکلی اتصال‌ها در دو سطح افت بررسی شده است: سطح اول هنگامی که اتصال‌ها افتی در مقاومت خود به میزان ۸۰٪ بیشینه‌ی مقاومت را تجربه کرده‌اند؛ و سطح دوم که آستانه‌ی فروریزش است، یعنی مقاومت اتصال به ۵۰٪ مقاومت بیشینه کاهش یافته است. با توجه به شکل ۵، اتصال‌هایی که تحت بارگذاری یک‌سویه قرارگرفته‌اند، توانایی دست‌یابی به چرخش بالاتری نسبت به بارگذاری‌های چرخه‌یی را به نمایش گذاشته‌اند. با توجه به اینکه پروتکل بارگذاری حوزه‌ی نزدیک SAC از زاویه‌ی دریفت داخلی طبقه به‌عنوان پارامتر تغییرمکان کنترل استفاده می‌کند، تمامی اتصال‌هایی که با این پروتکل بارگذاری تحلیل شده‌اند، به سادگی به چرخش نهایی ۶٪ هدف این پروتکل دست یافته‌اند و اتصال‌ها پس از اتمام تاریخچه‌ی بارگذاری همچنان توانایی دستیابی به چرخش‌های بالاتر را داشته‌اند.

در سطح اول بررسی، اتصال‌هایی که با تاریخچه‌ی بارگذاری FEMA مورد تحلیل قرارگرفته‌اند، توانایی دست‌یابی به چرخش‌های بالاتری را نسبت به اتصال‌هایی که تحت تاریخچه‌ی بارگذاری ATC و SAC تحلیل شده‌اند، از خود نشان داده‌اند. اتصال‌هایی که تحت بارگذاری چرخه‌یی با پروتکل‌های بارگذاری ATC و SAC قرارگرفته‌اند، در اتصال متوسط و سنگین به چرخش‌های برابر ۴٪ رادیان دست یافته‌اند؛ ولی در اتصال سبک، اتصالی که تحت تاریخچه‌ی بارگذاری SAC قرار گرفته است، به چرخش بیشتری به میزان ۰/۶٪ دست یافته است. در سطح دوم بررسی (آستانه‌ی فروریزش)، اتصال‌هایی که تحت تاریخچه‌ی بارگذاری FEMA تحلیل شده‌اند، توانایی دست‌یابی به چرخش‌های بزرگ‌تر را از خود نشان داده‌اند. در دو اتصال متوسط و سنگین، اتصال‌ها تحت بارگذاری با پروتکل‌های FEMA و SAC قادر به دست‌یابی به چرخش‌هایی به ترتیب برابر ۸ و ۷ درصد شده‌اند. در حالت کلی، اتصال‌های تحلیل‌شده با پروتکل بارگذاری ATC به چرخش‌هایی کمتر از اتصال‌هایی که با دو پروتکل بارگذاری FEMA و SAC تحلیل شده‌اند، دست یافته‌اند؛ لیکن اتصال سبک تحت بارگذاری با پروتکل ATC، توانسته است به چرخشی بزرگ‌تر از اتصال تحت بارگذاری با پروتکل SAC دست پیدا کند.

۴.۷. کرنش معادل خمیری

کرنش معادل خمیری در چرخش هدف ۰/۰۴ رادیان و در لحظه‌ی گسیختگی قرائت شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌ها و جدول ۴ مشخص است که محل وقوع و مقدار بیشینه‌ی کرنش معادل خمیری در اتصال‌های مورد مطالعه، به روند آزمایش و تاریخچه‌ی بارگذاری اعمالی به اتصال بسیار حساس است.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۵. رفتار چرخه‌یی اتصال متوسط تحت پروتکل‌های بارگذاری متفاوت.

جدول ۴. پارامترهای رفتاری و ظرفیتی اتصال‌ها.

پروتکل بارگذاری	کرنش معادل خمیری		ظرفیت تغییرشکلی (رادیان)		ظرفیت مقاومتی
	لحظه‌ی وقوع گسیختگی	چرخش ۰٫۰۴ و محل وقوع	مقاومت ۸۰٪	مقاومت ۵۰٪	(kN.m)
اتصال سبک					
یک‌سویه	۰٫۰۳	—	۰٫۱۵۴	بیش از ۰٫۳۰۰	۵۳۱٫۶
ATC	۰٫۳۰ در بال فوقانی تیر	۰٫۴۹ در بال تحتانی تیر	۰٫۰۵۴	۰٫۰۷۵	۵۰۳٫۲
SAC	۰٫۳۴ در بال فوقانی تیر	۰٫۳۵ در جوش تحتانی	۰٫۰۶۰	۰٫۰۷۰	۴۹۰
FEMA	۰٫۲۸ در بال فوقانی تیر	۰٫۵۴ در جوش تحتانی	۰٫۰۷۱	۰٫۱۰۰	۴۹۵٫۸
حوزه‌ی نزدیک SAC	—	بیشینه‌ی ۰٫۴۰ در جوش تحتانی	۰٫۰۶۰	۰٫۰۶۰	۴۹۸٫۷
اتصال متوسط					
پروتکل بارگذاری	کرنش معادل خمیری		ظرفیت تغییرشکلی (رادیان)		ظرفیت مقاومتی
	لحظه‌ی وقوع گسیختگی	چرخش ۰٫۰۴ و محل وقوع	مقاومت ۸۰٪	مقاومت ۵۰٪	(kN.m)
یک‌سویه	۰٫۰۴ در جوش تحتانی	—	۰٫۰۹۴	بیش از ۰٫۰۳	۸۷۰٫۳
ATC	۰٫۲۹ در جوش تحتانی	۰٫۵۲ در بال فوقانی	۰٫۰۴	۰٫۰۷۲۵	۷۱۰٫۱
SAC	۰٫۱۹ در بال تحتانی	۰٫۴۰ در بال فوقانی تیر	۰٫۰۴	۰٫۰۸	۷۱۴٫۲
FEMA	۰٫۳۴ در جوش تحتانی	۰٫۵۹ در بال تحتانی تیر	۰٫۰۵۱	۰٫۰۸	۷۳۰٫۹
حوزه‌ی نزدیک SAC	—	بیشینه ۰٫۴۴ در جوش تحتانی	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۷۷۹٫۵
اتصال سنگین					
پروتکل بارگذاری	کرنش معادل خمیری		ظرفیت تغییرشکلی (رادیان)		ظرفیت مقاومتی
	لحظه‌ی وقوع گسیختگی	چرخش ۰٫۰۴ و محل وقوع	مقاومت ۸۰٪	مقاومت ۵۰٪	(kN.m)
یک‌سویه	۰٫۱۶ در بال تحتانی	—	۰٫۱۰۰	۰٫۱۳۷	۱۱۵۸٫۹
ATC	۰٫۷۰ در بال فوقانی	۰٫۴۳ در بال فوقانی تیر	۰٫۰۴۲	۰٫۰۶۶	۱۰۷۲٫۲
SAC	۰٫۵۳ در بال فوقانی	۰٫۴۳ در بال فوقانی تیر	۰٫۰۴۰	۰٫۰۷۰	۱۰۸۶٫۸
FEMA	۰٫۶۳ در جوش تحتانی	۰٫۶۴ در بال فوقانی تیر	۰٫۰۴۹	۰٫۰۶۹	۱۰۸۷٫۹
حوزه‌ی نزدیک SAC	—	بیشینه‌ی ۰٫۴۴ در جوش تحتانی	۰٫۰۶۰	۰٫۰۶۰	۱۰۰۶٫۷

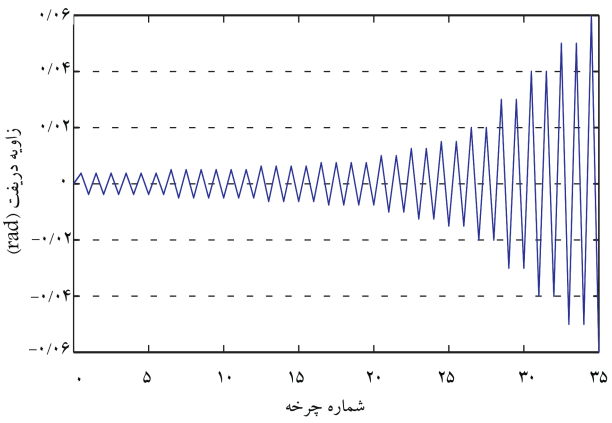
Archive of SID
www.SID.ir

۸. پروتکل بارگذاری پیشنهادی

در انتهای این مطالعه، یک پروتکل بارگذاری با هدف هر چه نزدیک‌ترکردن تاریخچه‌ی بارگذاری اتصال‌های خمشی فولادی به درخواست‌هایی‌که در یک زمین‌لرزه بر اتصال تحمیل می‌شود، تولید شده است. در تولید این پروتکل بارگذاری به چند مسئله‌ی مهم توجه ویژه‌یی شده است: ۱. در یک زمین‌لرزه‌ی طبیعی احتمال وقوع بازه‌های تغییرشکلی بزرگ بسیار کمتر از بازه‌های تغییرشکلی کوچک‌تر است. به منظور در نظرگرفتن این مسئله در پروتکل بارگذاری با هر افزایش در بازه‌ی تغییرشکلی از تعداد چرخه‌های هر قدم بارگذاری کاسته شده است. تعداد چرخه‌ها در بازه‌های تغییرشکلی کوچک بیشتر از تعداد چرخه‌ها در بازه‌های تغییرشکلی بزرگ انتخاب شده است. ۲. به منظور عدم تحمیل شرایط خستگی، چرخه‌های اولیه‌ی پروتکل بارگذاری از بازه‌هایی با دامنه‌یی نزدیک به دامنه‌ی تغییرشکلی گسیختگی انتخاب شده است. در عین حال، تمامی چرخه‌های پروتکل بارگذاری از چرخه‌هایی با ماهیت خسارتی (بازه‌ی تغییرشکلی بزرگ‌تر از ۰٫۰۰۵ رادیان) انتخاب شده است. ۳. مهم‌ترین موضوع در تولید پروتکل بارگذاری دست‌یابی پروتکل به مقادیر هدف انتخابی بوده است، که اتصال تحت این پروتکل بارگذاری ملزم به ارضاء درخواست تحمیل‌شده از جانب پروتکل بارگذاری است. ۴. پروتکل بارگذاری پیشنهادی به منظور دست‌یابی هر چه بیشتر به اهداف ذکرشده، در قدم‌هایی با بازه‌های تغییرشکلی که در شکل ۶ قابل مشاهده است، تولید شده است.

در پروتکل بارگذاری پیشنهادی، مقدار بیشینه‌ی بازه‌ی تغییرشکلی هدف تاریخچه‌ی بارگذاری ۰٫۰۴ انتخاب شده است. با توجه به جدول ۵، پروتکل بارگذاری پیشنهادی در قدم دهم و پس از ۳۰ چرخه‌ی کامل بارگذاری، به بازه‌ی تغییرشکلی هدف پروتکل بارگذاری دست یافته و در این چرخه‌ی اتصال، مجموع بازه‌های تغییرشکلی به میزان ۰٫۵۹ رادیان را تجربه کرده است. با توجه به اینکه مجموع بازه‌های تغییرشکلی درچرخه‌ی ۳۰اُم بارگذاری به مقدار ۰٫۱۲ رادیان بیش از مقدار هدف این پارامتر (۰٫۴۷ رادیان) است، پروتکل بارگذاری پیشنهادی به میزان مطلوبی محافظه‌کاری را درخصوص پارامتر بازه‌های تغییرشکلی تجمعی بر اتصال تحمیل کرده است. کوچک‌ترین بازه‌ی تغییرشکلی پروتکل بارگذاری ۰٫۰۰۷۵ رادیان انتخاب شده است، که از چرخش ۰٫۰۰۵ رادیان گسیختگی بزرگ‌تر است و اتصال انتخاب‌شده متحمل چرخه‌های خسارتی است، که از سلامت اتصال می‌کاهد و سلامت اتصال را در سطح پایین‌تری نسبت به قبل قرار می‌دهد.

در شکل ۷، رفتار چرخه‌یی اتصال‌ها تحت بارگذاری با پروتکل پیشنهادی معرفی



شکل ۶. پروتکل بارگذاری پیشنهادی.

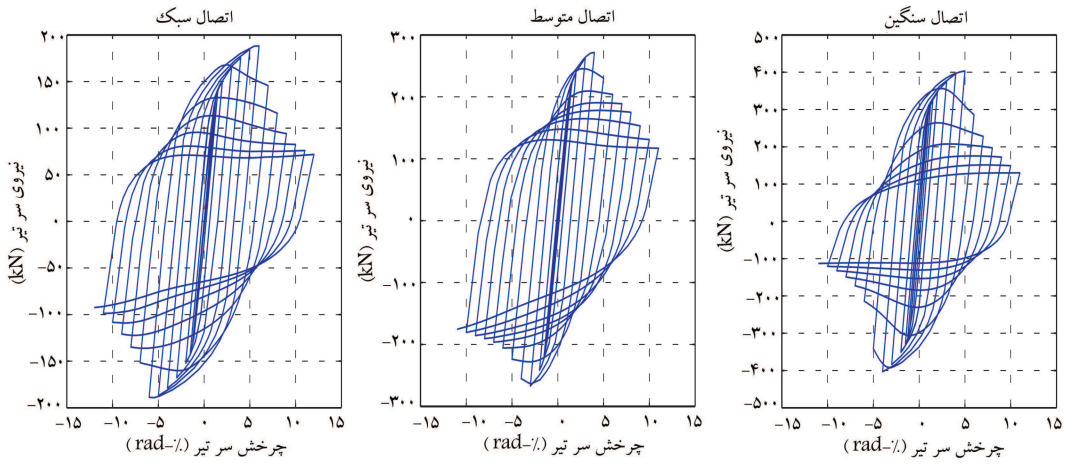
جدول ۵. تعداد چرخه‌ها و بازه‌ی تغییرشکلی هر قدم بارگذاری در پروتکل پیشنهادی.

قدم‌های بارگذاری	دامنه‌ی تغییرشکلی بیشینه	تعداد چرخه‌ها در هر قدم
۱	۰٫۰۰۳۷۵	۶
۲	۰٫۰۰۵	۶
۳	۰٫۰۰۶۲۵	۴
۴	۰٫۰۰۷۵	۴
۵	۰٫۰۱	۲
۶	۰٫۰۱۲۵	۲
۷	۰٫۰۱۵	۲
۸	۰٫۰۲	۲
۹	۰٫۰۳	۱
۱۰	۰٫۰۴	۱
۱۱	۰٫۰۵	۱
۱۲	۰٫۰۶	۱
۱۳	۰٫۰۷	۱
۱۴	۰٫۰۸	۱

شده است. با توجه به شکل و مقادیر به‌دست‌آمده و درنظرداشتن اینکه پروتکل پیشنهادی تمامی پارامترهای درخواستی هدف را ارضاء می‌کند (تعداد چرخه‌های خسارتی برابر ۳۰، دامنه‌ی بیشینه‌ی هدف ۰٫۰۴ رادیان و مجموع بازه‌های تغییرشکلی ۰٫۵۸۵ رادیان)، با این‌حال اتصال سبک تحت بارگذاری پیشنهادی توانسته است به میزان ۱٫۱۸٪، ظرفیت مقاومتی بیشتری نسبت به اتصال تحت پروتکل‌های بارگذاری دیگر از خود نشان دهد (۱۸۸٫۲ kN) در تحلیل اتصال سبک تحت بارگذاری پیشنهادی، ظرفیت تغییرشکلی ۰٫۰۶ رادیان در افت مقاومت ۸۰٪ حاصل شده است، که از اتصال تحلیل‌شده با پروتکل ATC بیشتر، ولی از اتصال تحلیل‌شده با پروتکل FEMA کمتر بوده است. همچنین ظرفیت مقاومتی اتصال در افت ۵۰٪ مقاومت، ۰٫۰۹ رادیان به‌دست آمده است، که این پارامتر نسبت به اتصال تحت پروتکل‌های ATC و SAC، به ترتیب به میزان ۱۸٫۵ و ۲۸٫۵ درصد بیشتر مشاهده شده است. در این اتصال تحت بارگذاری پیشنهادی، شروع گسیختگی المان‌ها در اتصال در چرخه‌ی ۳۰اُم بارگذاری و با دامنه‌ی ۰٫۰۴ رخ داده و تنش در المان‌هایی در بال فوقانی تیر و در منطقه‌یی خارج از ورق‌های زیرسری و روسری از مقدار مجاز عدول کرده است. تنش‌ها در المان‌های جوش در لحظه‌ی شروع گسیختگی به میزان ۱۵ تا ۲۵ درصد کوچک‌تر از تنش مجاز جوش گزارش شده است.

در تحلیل اتصال متوسط تحت بارگذاری پیشنهادی، اتصال توانسته است به مقاومت ۲۷۱٫۸ kN دست پیدا کند، که به میزان ۲٫۱٪ بیشتر از مقاومت میانگین اتصال تحت بارگذاری‌های دیگر بوده است. ظرفیت تغییرشکلی اتصال (۰٫۰۴ رادیان) در افت ۸۰٪ تحت این بارگذاری مشابه با اتصال‌هایی که با پروتکل‌های ATC و SAC و به میزان ۰٫۰۱ رادیان کمتر از اتصال تحلیل‌شده با پروتکل FEMA است، مشاهده شده است. در افت ۵۰٪ نیز اتصال تحت این بارگذاری توانسته است به تغییرشکلی بالاتر از ۰٫۱ رادیان دست پیدا کند، که به اندازه‌ی ۲۵ الی ۳۸ درصد بیشتر از اتصال‌های تحلیل‌شده با دیگر پروتکل‌ها بوده است. تنش‌ها در این اتصال

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷. رفتار چرخه‌یی اتصال‌ها تحت بارگذاری پیشنهادی.

و تحت پروتکل بارگذاری پیشنهادی ابتدا در چرخه‌ی ۲۱اُم با دامنه‌ی تغییرشکلی ۰٫۰۱ رادیان و در بال فوقانی تیر از تنش مجاز فولاد مصرفی تجاوز کرده‌اند، که این عدول در المان‌های بال تیر و در مجاورت ستون اتصال مشاهده شده است. در زمان شروع گسیختگی، تنش در المان‌های جوش به میزان ۱۲ تا ۲۵ درصد کوچک‌تر از تنش مجاز جوش گزارش شده است.

در تحلیل اتصال سنگین با این پروتکل نیز ظرفیت مقاومتی اتصال به میزان ۲٫۳٪ نسبت به اتصال‌های مشابه مشاهده شده است (۴۰۳ kN). ظرفیت تغییرشکلی در افت ۸۰٪ اتصال سنگین تحت بارگذاری پیشنهادی نیز مشابه با اتصال‌های تحلیل‌شده با دو پروتکل ATC و SAC به اندازه‌ی ۲۵٪ و برابر با اتصال تحلیل‌شده با پروتکل FEMA مشاهده شده است (۰٫۰۵ رادیان). در افت ۵۰٪ نیز ظرفیت تغییرشکلی اتصال ۰٫۰۷ رادیان به اندازه‌ی ۵٪ بیشتر از اتصال تحلیل‌شده تحت پروتکل ATC و برابر با اتصال‌های تحلیل‌شده تحت دو پروتکل دیگر مشاهده شده است. تنش‌ها در بال تحتانی تیر از تنش مجاز مصالح بیشتر شده و گسیختگی در بال فوقانی تیر رخ داده است. در این تحلیل هم تنش در جوش، کمتر از تنش مجاز جوش مشاهده شده است.

۹. نتیجه‌گیری

پس از انجام تحلیل‌ها مشخص شد که روند انجام تحلیل یک اتصال و تاریخچه‌ی بارگذاری تحمیلی بر اتصال‌ها برروی کارایی آنها بسیار تاثیرگذار می‌باشد. این مطالعه مشخص نمود که تاریخچه‌ی بارگذاری تحمیلی به تمامی اتصال‌های مطالعه در رفتار آنها و برآورد پارامترهای ظرفیتی این اتصال‌ها اثر زیادی داشته و انتخاب یک برنامه‌ی آزمایش مناسب کمک به درک مناسب‌تری از رفتار اتصال در یک تهییج لرزه‌یی می‌نماید.

پروتکل بارگذاری SAC از حیث درخواست‌های تحمیل‌کننده بر روی اتصالات، تطابق بهتری را با پارامترهای درخواست هدف پروتکل بارگذاری به نمایش گذاشته‌اند. در یک زمین‌لرزه‌ی واقعی، چرخه‌های کوچک با احتمال بیشتری نسبت به چرخه‌های بزرگ‌تر رخ می‌دهند، و چرخه‌های با بازه‌ی تغییرشکلی بزرگ‌تر افت بیشتری را در سلامت مؤلفه نسبت به چرخه‌های کوچک ایجاد می‌کنند. در نتیجه با توجه به اینکه پروتکل‌بارگذاری ATC عمدتاً دارای چرخه‌هایی با بازه‌های تغییرشکلی بزرگ هستند، درخواست‌های تحمیلی از طرف پروتکل بارگذاری بر اتصال‌ها به‌صورت دور از واقعیت (تعداد چرخه‌های خسارتی بسیار کمتر) مشاهده شده است. درخواست‌های تحمیل‌شده از طرف پروتکل بارگذاری FEMA بر روی اتصال‌ها در چرخه با بازه‌ی تغییرشکلی هدف پروتکل بارگذاری (۰٫۰۴ رادیان) دارای چرخه‌های بسیار کوچک هستند، که ماهیت خسارتی بر اتصال ندارند و تعداد چرخه‌های خسارتی این پروتکل بارگذاری کمتر از مقدار هدف پروتکل بوده است. زمانی که کارایی اتصال در حوزه‌یی نزدیک به مرکز گسلش موردنظر باشد، بهره‌گیری از پروتکل بارگذاری حوزه‌ی نزدیک SAC به جهت برآوردی متفاوت از پارامترهای ظرفیتی نسبت به دیگر پروتکل‌های بارگذاری چرخه‌یی در این اتصال‌ها مناسب تشخیص داده شده است.

اتصال‌ها تحت بارگذاری یک‌سویه، به بالاترین سطح ظرفیت مقاومتی و تغییرشکلی نسبت به اتصال مشابه، که با تاریخچه‌های بارگذاری چرخه‌یی تحلیل شده است، دست پیدا کرده‌اند. اتصالی که تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌یی حوزه‌ی نزدیک SAC قرارگرفته است، نزدیک‌ترین رفتار را از لحاظ ظرفیت مقاومتی اتصال نسبت به اتصال تحلیل‌شده تحت بارگذاری یک‌سویه از خود نشان داده است. اتصال‌های تحلیل‌شده با پروتکل بارگذاری FEMA توانسته‌اند به مقاومتی بیشتر از اتصال‌های مشابه، که تحت بارگذاری‌های چرخه‌یی دیگر بودند، دست یابند.

ظرفیت تغییرشکلی نمونه‌ها در دو سطح افت بررسی شده است. هر یک از اتصال‌ها تحت بارگذاری یک‌سویه، به چرخش بالاتری نسبت به اتصال مشابه، که تحت بارگذاری چرخه‌یی تحلیل شده‌اند، دست یافته‌اند. با توجه به اینکه پروتکل بارگذاری حوزه‌ی نزدیک SAC از زاویه‌ی دریفت داخلی طبقه به‌عنوان پارامتر تغییرمکان کنترل استفاده کرده است، تمامی اتصال‌های تحلیل‌شده با این پروتکل بارگذاری به سادگی به چرخش نهایی ۶٪ هدف این پروتکل بارگذاری در یک جهت (مثبت یا منفی) دست یافته‌اند و اتصال‌ها پس از تحمل کامل چرخه‌های این پروتکل بارگذاری، همچنان توانایی دستیابی به چرخش‌های بالاتر را نیز داشته‌اند. تمامی اتصال‌ها تحت بارگذاری‌های چرخه‌یی و یک‌سویه، دارای مد گسیختگی از نوع کمانش موضعی بال تیر بوده و در هیچ‌یک از آن‌ها، جوش اتصالات به مقادیر تنش نهایی خود نرسیده و هیچ‌گونه پارگی در جوش‌ها مشاهده نشده است.

پروتکل بارگذاری پیشنهادی با درنظرگرفتن برآورد تمامی مقادیر درخواستی هدف پروتکل بارگذاری از تحلیل دوبعدی غیرخطی قاب‌های SAC تحت مجموعه‌یی از زمین‌لرزه‌ها شکل گرفته است. اتصال‌هایی که با پروتکل پیشنهادی تحلیل شده‌اند، افزایش اندکی را در مقادیر ظرفیتی به نمایش گذاشته‌اند. ظرفیت تغییرشکلی متناظر با

Archive of SID
www.SID.ir

افت ۵۰٪ مقاومت اتصال (درآستانه‌ی فروریزش) تحت پروتکل بارگذاری پیشنهادی، افزایشی قابل ملاحظه در این پارامتر را نسبت به اتصال مشابه، که تحت پروتکل‌های بارگذاری SAC، ATC و FEMA قرارگرفته بودند، از خود نشان داده‌اند. می‌توان نتیجه گرفت که پروتکل بارگذاری پیشنهادی نه فقط مقادیر هدف تاریخچه‌ی بارگذاری اتصال‌های خمشی را ارضاء کرده‌اند، بلکه ظرفیت چرخشی اتصال‌های مورد مطالعه تحت این پروتکل بارگذاری، افزایش قابل توجهی را نسبت به اتصال مشابه نشان داده‌اند و پروتکل‌های بارگذاری SAC، ATC و FEMA با تحمیل درخواست‌های بزرگ‌تر روی اتصال، محافظه‌کاری زیادی را در برآورد پارامترهای ظرفیتی اتصال لحاظ کرده‌اند و در سه اتصال مورد بحث در این مطالعه، این پارامترها (خصوصاً ظرفیت تغییرشکلی معادل ۵۰٪ افت) را دست‌پایین برآورد کرده‌اند.

پانوشت‌ها

1. equivalent plastic strain
2. SAC near fault
3. interstory drift
4. Rain Flow
5. cumulative distribution function(CDF)

منابع (References)

1. ATC-24, *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures for Buildings*, ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA. (1994).
2. Clark, P., Frank, K., Krawinkler, H. and Shaw, R. "Protocol for fabrication, inspection, testing, and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens", SAC Steel Project Background Document, Report No. SAC/BD-97/02 (October 1997).
3. Federal Emergency Management Agency, *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*, FEMA Report 461, Washington (2007).
4. Richards, P. and Uang, C.M. "Testing protocol for short links in eccentrically braced frames", *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineer, **132**(8), pp. 1183-1191 (2006).
5. AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (2005).
6. Krawinkler, H., Parisi, F., Ibarra, L., Ayoub, A. and Medina, R. "Development of a testing protocol for wood frame structures", CUREE-Caltech Wood frame Project Report, Final Report, Stanford University, CA (2001).
7. Shafei, B. and Zareian, F. "Development of a quasi-static loading protocol for displacement-sensitive nonstructural building components", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (2008).
8. Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H.C. and Engelhardt, M.D. "Experimental study of local buckling, over strength and fracture of links in EBFs", *Journal of Structural Engineering*, **131**(10), pp. 1526-1535 (2005).
9. Gatto, K.S. and Uang, C.M. "Effects of loading protocol on wood frame shear wall response", *Journal of Structural Engineering*, **129**(10), pp. 1384-1393 (15 september 2003).
10. ISO, *Timber Structures Joints Made with Mechanical Fasteners Quasi-Static Reversed-Cyclic Test Method*, ISO/TC 165 WD 16670, Secretariat, Standards Council of Canada (1998).
11. Porter, M.L. "Sequential phased displacement (SPD) procedure for TCCMAR testing", *Proceedings 3rd Meeting of the Joint Technical Coordinating Committee on Masonry Research*, US-Japan Coordinated Research Program (1987).
12. Yu, Q.S., Gilton, C.S. and Uang, C.M. "Cyclic response of RBS moment connections: Loading sequence and lateral bracing effects", Report No. SSRP 99-13, University of California at San Diego, CA. (1999).
13. Ghassemieh, M., Saniei Nia, Z. and Mazroei, A. "Criteria development of rigid I beam to box column connection's seismic behavior", Building and House Research Center, Report NO. 1 (2010).
14. Ghassemieh, M., Saniei Nia, Z. and Mazroei, A. "Criteria development of rigid I beam to box column connection's seismic behavior", Building and House Research Center, Report NO. 2 (2010).
15. Standard 2800, *Formulation of Building Design Codes for Earthquakes*, Building and House Research Center (2010).
16. Iran National Building Code, Design and Construction of Steel Structure (2005).
17. Krawinkler, H. and Zohrei, M. "Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions", *Journal on Computers and Structures,* **16**(1-4), pp. 531-541 (1983).
18. Krawinkler, H. and et al. "Recommendations for experimental studies on the seismic behavior of steel components and materials", John A. Blume Earthquake Engineering, Center, Report No. 61, Department of Civil Engineering, Stanford University (1983).
19. Abaqus, *Analysis User's Manual*, **2**, Analysis. Version 6.9 (2010).

Archive of SID
www.SID.ir