

توسعه پروتکل بارگذاری ملی و بررسی آزمایشگاهی اتصالات خمشی جوشی WUF-W و RBS تحت پروتکل‌های بارگذاری ایران و SAC

محمد حسنی سوخته‌سرایي^۱، مهدی قاسمیه^{۲*}، سید رسول میرقادرى^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳، m.ghassemieh@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸)

چکیده

در این مطالعه و برای تدوین پروتکل بارگذاری پیشنهادی برای ایران؛ مطالعات لرزه‌ای، عددی، آماری، اجزا محدودی و بررسی‌های دقیق آزمایشگاهی متناسب با شرایط منطقه صورت گرفته است. در نهایت پروتکل بارگذاری پیشنهادی شده است که شبیه‌سازی مناسبی از تقاضای لرزه‌ای منطقه در اختیار قرار داده است؛ همچنین منطبق با شرایط ساخت و طراحی سازه‌ها در منطقه نیز بوده است و قابلیت اعمال به مولفه‌های خمشی سازه‌ای علی‌الخصوص اتصالات خمشی را در حالت کلی و آزمایشگاهی را دارا است. شایان ذکر است که پروتکل بارگذاری منطقه ضوابطی برای ارزیابی عملکرد اتصالات خمشی در مقادیر هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه‌ی فروریزش اتصالات خمشی ارائه کرده است. برای دستیابی به اهداف مطالعه و به منظور بررسی و تطبیق شرایط عملکردی پروتکل بارگذاری پیشنهادی، دو جفت نمونه‌های مشابه و یکسان از اتصالات خمشی جوشی WUF-W و RBS در آزمایشگاه تحت پروتکل بارگذاری منطقه و SAC مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. شایان ذکر است در بررسی‌های آزمایشگاهی و اجزا محدود این مطالعه ضمن تطبیق و کنترل شرایط و ضوابط ارائه شده در پروتکل بارگذاری پیشنهادی (ملی)، پارامترهای خسارتی و تقاضای اعمالی ناشی از هر دو پروتکل بارگذاری نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است اتصالات خمشی جوشی این مطالعه شرایط و ضوابط عملکردی پروتکل بارگذاری ملی و SAC را به خوبی ارضا کردند و تطبیق مناسبی بین ضوابط و توصیه‌های عملکردی پروتکل بارگذاری ملی با رفتار اتصالات خمشی جوشی مشاهده گردیده است.

واژگان کلیدی

پروتکل بارگذاری ملی، پروتکل بارگذاری SAC، اتصال RBS، اتصال WUF-W، کنترل آستانه فروریزش

Development of national loading protocol and laboratory study of WUF-W and RBS welded moment connections subjected to Iranian and SAC loading protocols

M. Hassani Sokhtesaraei, M. Ghassemieh, S.R. Mirghaderi

Abstract

In this study, to develop the Iranian loading protocol in the region, the detailed seismic, numerical, statistical, finite element and laboratory studies were conducted according to the region's conditions. Finally, a loading protocol was proposed that provided a proper simulation of the region's seismic demand. It also complied with the construction and design conditions of structures in the region and can apply to structural moment components, especially moment connections in the laboratory conditions. It is noteworthy that the region's proposed loading protocol provided some criteria for evaluating the performance of moment connections in the target values level, qualifying conditions, and collapse threshold control of moment connections. To achieve the objectives of this study and to evaluate and match the proposed loading protocol's performance conditions, two pairs of identical specimens of WUF-W and RBS welded moment connections were examined and evaluated in the laboratory subjected to the proposed loading protocol of the region and SAC loading protocol. It should be noted in the laboratory and numerical studies that the damage parameters and applied demand resulting from both loading protocols were evaluated and compared while matching and controlling the conditions and criteria presented in the proposed loading protocol of the region. It is noteworthy that the present study's welded moment connections well satisfied the performance conditions and criteria of the proposed and SAC loading protocols.

Keywords

Iran loading protocol, SAC loading protocol, RBS connection, WUF-W connection, Collapse threshold control

پروتکل‌های بارگذاری شبیه سازی تاریخچه بارگذاری هر منطقه هستند، که برای ارزیابی عملکرد المان‌های مختلف سازه‌ها در آزمایشگاه پیشنهاد شده‌اند. در حقیقت پروتکل‌های بارگذاری باید طیف کاملی از نیروهای تحمیلی، به المان‌های سازه‌ای که بر اساس شرایط ساخت منطقه طراحی و ساخته شدند؛ را در بر داشته باشند. شایان ذکر است که نیروهای تحمیلی باید با توجه به عوامل زمین‌شناسی، تکتونیکی، بزرگا و پارامترهای دامنه‌ای و طیفی از زلزله‌های منطقه انتخاب و پیشنهاد شده‌باشند. المان‌های سازه‌ای دارای یک حافظه دائمی از خسارت‌ها و رخداد‌های گذشته هستند و کارایی آن‌ها نیز به تاریخچه خسارتی گذشته که در کاهش سلامت آن‌ها دخالت داشتند، وابسته می‌باشد. به عبارتی ظرفیت تغییرشکلی و مقاومتی مولفه‌های سازه‌ای به خسارت تجمعی تحمیلی وابسته است. بنابراین راه منطقی برای برآورد صحیح ظرفیت‌های المان‌های سازه‌ای شبیه سازی تاریخچه بارگذاری است که مولفه‌ها حین زلزله‌های آن منطقه، تجربه می‌کنند.

Krawinkler [۱] در مطالعه‌ای به بررسی پروتکل‌های موجود در ادبیات فنی پرداخته‌است. در این مطالعه پروتکل‌های بارگذاری ATC-24 [۲]، پایه و حوزه نزدیک SAC [۳]، FEMA-461 [۴]، SPD [۵]، QUREE [۶] و ISO [۷] که برای ارزیابی اتصالات سازه‌های فولادی، بتابی و چوبی استفاده می‌شوند؛ مورد بررسی قرار گرفته‌است. ایشان با بررسی تفاوت‌های پروتکل‌های موجود به این نتیجه رسیده‌است که تقاضاهای اعمالی بسیاری از این پروتکل‌ها مشابه یکدیگر می‌باشند، هیچ یک از آن‌ها کامل و منحصر به فرد نمی‌باشد و تضمینی برای برتری پروتکل‌های فعلی به پروتکل‌های دیگر وجود ندارد. همچنین از لزوم توجه به مقادیر فروریزش علاوه بر پیشنهاد مقادیر هدف و پذیرش برای پروتکل‌های بعدی نیز سخن گفته‌است؛ که در پروتکل‌های بارگذاری فعلی بدان اشاره نشده‌است. به طبع در بررسی‌های آزمایشگاهی، بارگذاری نمونه‌ها پس از رسیدن به مقادیر هدف و پذیرش ادامه پیدا نمی‌کند که این مورد امکان بررسی عملکرد مولفه‌های سازه‌ای را در تغییر مکان‌های بزرگ و قرار گرفتن در آستانه‌ی فروریزش را نمی‌دهد. در حالی که رفتار مولفه‌ها در تغییر مکان‌های بزرگ و نزدیک به شرایط فروریزش بسیار مهم است.

واقع گرای پروتکل‌های بارگذاری بیش از هر چیز به روش اجرا، ساخت و طراحی مولفه‌های سازه‌ای و کاتالوگ لرزه‌ای منطقه وابسته است؛ این دو عامل تاثیر بسزایی در تقاضای

اعمالی همچنین ویژگی پروتکل‌های بارگذاری دارند. برای تدوین پروتکل‌های بارگذاری مطالعات لرزه‌ای، عددی، آماری، تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی غیرخطی و در نهایت بررسی‌های آزمایشگاهی دقیق متناسب با شرایط منطقه نیاز است؛ و بر همین مبنا مطالعات بسیار برای تدوین و بررسی پروتکل‌های بارگذاری برای مولفه‌های مختلف سازه‌ای صورت گرفته است؛ در ادامه به برخی از مطالعات در این زمینه اشاره می‌شود.

Gatto و Uang [۸] در مطالعه‌ای به بررسی تقاضاهای اعمالی پروتکل‌های بارگذاری بر پاسخ دیوار برشی در قاب خمشی چوبی پرداختند. در این مطالعه نمونه‌های آزمایشگاهی تحت پروتکل‌های بارگذاری SPD، ISO و QUREE که برای ارزیابی مولفه و سازه‌های چوبی پیشنهاد شده بودند؛ مقایسه و بررسی شدند؛ شایان ذکر است که پارامترهای کارایی، مد گسیختگی، مقاومت، سختی و ظرفیت تغییرشکلی در نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند. Richards و Uang [۹] در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۶ پروتکل بارگذاری برای لینک‌های کوتاه در EBF پیشنهاد کردند. ایشان با مطالعات لرزه‌ای و تهیه کاتالوگ مناسب از زلزله‌های حوزه دور در لس آنجلس و تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی بر روی مدل‌های مطالعاتی این منطقه، پارامترهای هدف برای تدوین پروتکل را به دست آوردند. شایان ذکر است مدل‌های مطالعاتی ریچارد و یوانگ شامل ساختمان‌های ۳ و ۱۰ طبقه با دو آرایش متفاوت مهاربند EBF بوده‌است. در ادامه با بررسی‌های آماری بر روی پارامترهای هدف پروتکل بارگذاری برای مولفه سازه‌ای مدنظر را پیشنهاد کردند. Shafei و Zareian [۱۰] در سال ۲۰۰۸ بر اساس همین اصول و روش، پروتکل بارگذاری برای مولفه‌های غیر سازه‌ای حساس به تغییر مکان را پیشنهاد کردند.

در حال حاضر از پروتکل پیشنهادی Clark و همکارانش [۳] معروف به پروتکل بارگذاری SAC برای بررسی‌های آزمایشگاهی اتصالات خمشی فولادی بسیار استفاده می‌گردد. شایان ذکر است این پروتکل پیشنهادی از سال ۲۰۰۰ برای کنترل شرایط پذیرش اتصالات خمشی، در طرح لرزه‌ای AISC-341 [۱۱] و دستورالعمل FEMA-350 [۱۲ و ۱۳] نیز آمده است. این پروتکل بر مبنای تاریخچه لرزه‌ای و شرایط توپوگرافی و تکتونیکی غرب آمریکا تدوین شده‌است. مدل‌های مطالعاتی کلارک و همکاران شامل سازه‌های خمشی ۳، ۹ و ۲۰ طبقه بوده‌است، که بر مبنای شرایط ساخت و اجرای منطقه لس آنجلس و سیاتل، طراحی و در ادامه مورد مطالعه و تحلیل‌های تاریخچه زمانی قرار گرفته‌است؛ شایان ذکر که



مدل‌های قاب خمشی پروژه شامل ستون‌های H شکل و تیرهای I شکل بوده است. برای تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی و تعیین پارامترهای خسارتی از رکوردهایی استفاده گردید که بزرگای گشتاوری بین ۵/۵ تا ۷/۵ داشتند؛ شایان ذکر است که برای کنترل رکوردهای حوزه‌ی دور در پروتکل بارگذاری پایه از شتاب‌نگاشت‌هایی که فاصله بیش از ۱۳ کیلومتر از شهر لس‌آنجلس داشتند؛ استفاده گردید. در نهایت با مطالعات لرزه‌ای، عددی و آماری پروتکل بارگذاری SAC پیشنهاد گردید.

در ادامه روند مطالعاتی پروژه SAC نمونه‌های آزمایشگاهی بسیاری برای انصباک مقادیر هدف و پذیرش با شرایط آزمایشگاه و همچنین ارزیابی اتصالات مختلف خمشی توسط Kasai و همکارانش و Gilton و همکارانش صورت گرفته است [۱۴] و [۱۵]. گام‌های پروتکل بارگذاری SAC بر اساس زاویه تغییرمکان نسبی طبقه تدوین شده‌است و مقادیر هدف پیشنهاد شده Clark و همکارانش بعد از ۲۸ چرخه بارگذاری برابر ۰/۰۳ رادیان بوده‌است؛ این در حالی است که آیین‌نامه AISC-341 [۱۶] شرایط پذیرش اتصالات خمشی را این گونه بیان می‌کند، که نمونه خمشی باید بتواند حداقل ۰/۰۳ رادیان تغییرشکل نسبی طبقه را تحمل نماید و در ۰/۰۴ رادیان، ظرفیت خمشی نمونه در وجه ستون از ۸۰ درصد مقدار لنگر پلاستیک اسمی تیر کمتر نگردد. در ادامه به برخی از این مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی اتصالات خمشی مبتنی بر پروتکل پیشنهادی SAC صورت گرفته‌است، اشاره می‌شود.

Yu و همکارانش [۱۷]، چهار اتصال خمشی RBS را تحت پروتکل‌های پایه و حوزه‌ی نزدیک SAC مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه دو نمونه آزمایشگاهی که تحت پروتکل بارگذاری پایه SAC آزمایش شدند؛ مقدار هدف ۰/۰۳ رادیان را ارضا نمودند و هیچ پارگی در جوش تا این سیکل بارگذاری گزارش نگردید. دو نمونه‌ی آزمایشگاهی دیگر که تحت پروتکل بارگذاری حوزه‌ی نزدیک SAC قرار گرفته بودند نیز مقادیر هدف را ارضا نمودند. یو و همکاران در این مطالعه بیان کردند که ظرفیت انرژی مستهلک شده در هر چهار نمونه آزمایشگاهی تقریباً مشابه بوده‌است. Engelhardt و همکارانش [۱۸] و [۱۹] در مطالعاتی دیگر به بررسی آزمایشگاهی و عددی اتصال خمشی RBS در ستون‌های H شکل تحت پروتکل بارگذاری SAC پرداختند. ایشان میزان کرنش طولی در وجه ستون اتصالات خمشی RBS با چشمه اتصال قوی را نسبت به اتصالات مستقیم بسیار کمتر ارزیابی کردند؛ و عملکرد اتصال RBS در تشکیل محل مفصل پلاستیک را خوب ارزیابی کردند. این در حالی

است که پارامتر کرنش طولی در اتصالات خمشی RBS با ضعیف شدن چشمه اتصال بسیار افزایش می‌یابد؛ در واقع چشمه اتصال در عملکرد لرزه‌ای اتصال خمشی RBS بسیار حایز اهمیت است. از طرفی در این مطالعات آزمایشگاهی و عددی اثر تفاوت در میزان حداکثر تنش در اتصالات خمشی RBS و اتصالات مستقیم چندان مشهود نبوده‌است.

شایان ذکر است که در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی بسیاری بر روی اتصالات خمشی با ابعاد واقعی صورت گرفته‌است. بسیاری از این نمونه‌های آزمایشگاهی دارای ستون‌های H شکل بوند و شرایط مهار جانبی اتصال بدون دال بتنی تامین شده بود. در این مطالعات ارزیابی اتصالات در مقادیر هدف و پذیرش پروتکل بارگذاری SAC صورت گرفته‌است. با این حال مطالعاتی نیز برای کنترل و ارزیابی اتصالات خمشی در ستون‌های قوطی نیز صورت گرفته‌است؛ که در ادامه بدان‌ها اشاره می‌شود.

Saneei Nia و همکارانش [۲۰ و ۲۱] در برنامه‌ای آزمایشگاهی نمونه‌های اتصال خمشی جوشی WUF-W را در ستون‌های قوطی تحت پروتکل بارگذاری SAC مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بیان‌گر تامین ظرفیت چرخش پلاستیک در مقادیر هدف و پذیرش برای نمونه‌ها و همچنین عملکرد لرزه‌ای قابل قبول اتصالات خمشی WUF-W در ستون‌های قوطی بوده‌است.

Hasani و همکارانش [۲۲] در مطالعاتی اجزا محدودی عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی جوشی در ستون‌های قوطی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در این مطالعه دوازده نمونه عددی از اتصالات خمشی جوشی WUF-W و RBS تحت پروتکل‌های بارگذاری SAC و ATC-24 در شرایط تغییرمکانی پذیرش آیین‌نامه‌ای و همچنین تغییرمکانی بزرگ آستانه‌ی فروریزش مورد بررسی و ارزیابی لرزه‌ای قرار دادند. لازم به ذکر است که ایشان عملکرد لرزه‌ای اتصال خمشی جوشی را در ستون‌های قوطی شکل در دو سطح تغییرمکانی مطلوب ارزیابی کردند. Farooghi Mehr و Ghobadi [۲۳] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی عملکرد اتصالات خمشی با ورق زیرسری و روسری (WFP) را ارزیابی کردند. ایشان در این مطالعه به منظور بهبود عملکرد این نوع اتصال در ستون‌های باکس توصیه‌های برای استفاده از ورق‌های سخت‌کننده ارائه کردند. شایان ذکر است اتصالات خمشی در این مطالعه تحت پروتکل بارگذاری SAC قرار گرفتند؛ ضمن ارضا شرایط هدف و پذیرش، عملکرد چشمه اتصال نیز مطلوب ارزیابی شده‌است.



Mirghaderi و همکارانش [۲۴-۲۶] در مطالعاتی آزمایشگاهی و اجزا محدودی به بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی تیر به ستون قوطی پرداختند. با توجه به این که در این اتصالات جان تیر و جان ستون در یک صفحه قرار ندارند، چشمه اتصال باید مسیر مناسبی را برای انتقال نیرو از بال تیر به بال ستون را فراهم آورد؛ ایشان دو راهکار، استفاده از سخت‌کننده‌های خارجی یا استفاده از ورق پیوستگی داخلی در چشمه اتصال را پیشنهاد کردند. همچنین ایشان به منظور کاهش سطح تنش دو محوره در ورق‌های پیوستگی ستون‌های قوطی شکل میانی، حداقل ضخامت $1/4$ برابری نسبت به ضخامت بال تیر را برای ضخامت ورق‌های پیوستگی توصیه کردند. این در حالی است که Alostaz و Schneider [۲۷] ضخامت ورق‌های پیوستگی در ستون‌های H شکل را حداقل نصف ضخامت بال تیر توصیه کردند. Ghobadi و Jazany [۲۸] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی و عددی عملکرد ورق‌های پیوستگی در ستون‌های H شکل را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در این مطالعه با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی اتصالات خمشی در تیرها با عمق‌های مختلف، تقاضاهای اعمالی بر روی چشمه اتصال را ارزیابی کردند. منطبق بر نتایج عددی و آزمایشگاهی، قبادی و جزانی تقاضاهای اعمالی بر روی ورق‌های پیوستگی در چشمه اتصال در تیرهای عمیق را بیشتر از ضوابط مطروحه در آیین‌نامه برآورد کردند.

در مطالعه‌ای دیگر Pachoumis و همکارانش [۲۹] اتصال خمشی RBS را در بر اساس مقاطع تیر و ستون اروپایی طراحی، و بر اساس پروتکل بارگذاری SAC مورد بررسی و ارزیابی لرزه‌ای قرار دادند و برای تامین شرایط پذیرش آیین‌نامه توصیه و ضوابطی را مطرح کردند. Song و همکارانش [۳۰ و ۳۱] رفتار برخی از اتصالات خمشی را در ستون‌های مربع شکل و لوله‌ای مورد بررسی قرار دادند. و ظرفیت تغییرشکلی و مقاومتی این اتصالات را در شرایط هدف و پذیرش پروتکل ارزیابی کردند.

ایران از نظر لرزه‌خیزی در منطقه فعال جهان قرار دارد؛ به گواهی اطلاعات و مستندات علمی از خطرپذیرترین مناطق جهان محسوب میشود. در سال‌های اخیر به طور متوسط هر پنج سال یک زلزله با صدمات جانی و مالی بسیار بالا در نقطه‌ای از این منطقه رخ داده است. با توجه به زلزله خیز بودن ایران در اختیار داشتن تاریخچه بارگذاری مناسب از رکوردهای زلزله منطقه و تولید یک پروتکل بارگذاری، به منظور برآورد صحیح مولفه‌های سازه، با در نظر داشتن شرایط اجرا و ساخت در منطقه یکی از ضروریات امر احساس شده‌بود. در این پروژه

پروتکل بارگذاری پیشنهادی شده است که شبیه‌سازی مناسبی از تقاضای زلزله‌های منطقه در اختیار قرار دهد، و منطبق با شرایط ساخت و طراحی در منطقه نیز باشد و در نهایت قابلیت اعمال به مولفه‌های سازه‌ای علی‌الخصوص اتصالات خمشی را در حالت کلی و آزمایشگاهی داشته باشد. در ابتدای این مقاله روند تدوین پروتکل بارگذاری پیشنهادی این منطقه به طور کامل تشریح شده‌است و در ادامه با بررسی‌های آزمایشگاهی مقادیر هدف، پذیرش و فروریزش پروتکل پیشنهادی (ملی) در اتصالات خمشی WUF-W و RBS مورد بررسی قرار گرفته‌است. شایان ذکر است پارامترهای خسارتی و تقاضاهای اعمالی پروتکل بارگذاری ملی و پروتکل بارگذاری SAC نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌است.

۲- پروتکل بارگذاری پیشنهادی (ملی) برای منطقه

۲-۱- مدل‌های مطالعاتی

در این فصل به طور اجمال روند تدوین پروتکل بارگذاری منطقه بیان شده‌است. پروتکل بارگذاری پیشنهادی ارائه شده مبتنی بر مطالعات لرزه‌ای، عددی و آماری متناسب با شرایط منطقه پیشنهاد شده‌است. سازه‌های ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه‌ی این مطالعه متناسب با شرایط ساخت و اجرا در منطقه تحلیل و طراحی شدند. این سازه‌ها در یک راستا دارای پنج دهانه و در راستای دیگر دارای سه دهانه با طولی برابر ۵ متر هستند، و در هر دو جهت قاب خمشی ویژه طراحی شدند. در این پروژه با توجه به شرایط ساخت فولاد در کارخانه‌های منطقه و همچنین استفاده چشمگیر مهندسین و طراحان منطقه از مقاطع تیورق برای تیرها و مقاطع قوطی ساخته شده از ورق، برای ستون‌ها استفاده شده‌است. شایان ذکر است که طراحی و کنترل سازه‌های مطالعه مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و مسکن [۳۲] و همچنین کنترل با ضوابط عمومی و لرزه‌ای آیین‌نامه AISC [۱۶ و ۳۳] صورت پذیرفته‌است. در جدول (۱) اطلاعات کلی سازه‌های پروژه و در جدول (۲) اطلاعات مقاطع سازه ۷ طبقه برای نمونه ارائه شده‌است.

جدول ۱- اطلاعات کلی سازه‌های مطالعاتی

طبقه	تعداد دهانه در راستای X	تعداد دهانه در راستای Y	طول دهانه (متر)	ارتفاع طبقات (متر)
۷	۳	۵	۵	۳/۲
۱۲	۳	۵	۵	۳/۲
۲۰	۳	۵	۵	۳/۲



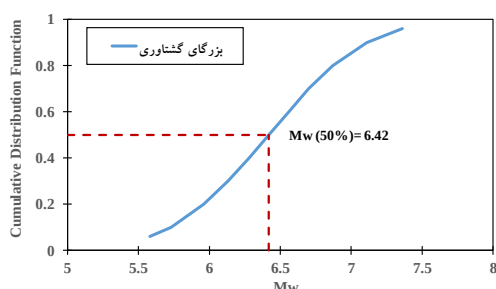
جدول ۲- مشخصات مقاطع ستون‌ها و تیرها در قاب ۷ طبقه

مقاطع	PL-G1	PL-G2	PL-G3	300X20	250X20
عرض بال	۱۵۰	۲۰۰	۲۴۰	۳۰۰	۲۵۰
ضخامت بال	۱۰	۱۵	۱۵	۲۰	۲۰
ضخامت جان	۸	۸	۸	۲۰	۲۰
ارتفاع جان	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۶۰	۲۱۰
ارتفاع مقطع	۳۲۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۰۰	۲۵۰
مساحت	۵۴۰۰	۸۴۰۰	۹۶۰۰	۲۲۴۰۰	۱۸۴۰۰

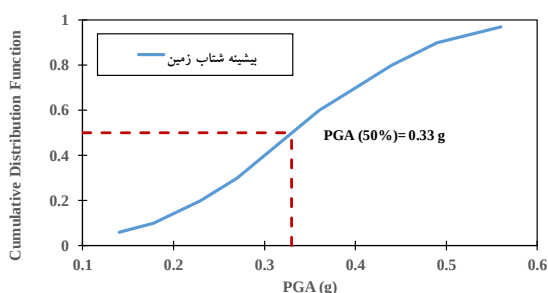
۲-۲- فهرست شتاب‌نگاشتی منطقه

برای تدوین پروتکل بارگذاری بیش از هر چیز باید تاریخچه‌ی زلزله‌های منطقه در اختیار باشد؛ از طرفی این تاریخچه زلزله‌ها باید انطباق مناسبی از شرایط لرزه‌خیزی و تکتونیکی منطقه را در خود داشته باشد. بدین منظور زلزله‌هایی که در چند دهه اخیر در منطقه اتفاق افتاده است؛ مورد ارزیابی قرار گرفتند و فهرست مناسبی از شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌ی دور که انطباق مناسبی با شرایط لرزه‌خیزی و توپوگرافی منطقه را دارند، پیشنهاد گردیده است. برای دستیابی به این هدف، پارامترهای کمی و کیفی زلزله‌ها، توپوگرافی منطقه، گسل‌های فعال منطقه همچنین مکانیزم گسل‌های که در این منطقه باعث زلزله شدند، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. شایان ذکر است که در این مطالعه در تمایز قابل شدن بین زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک و دور علاوه بر پارامتر فاصله‌ی رومرکز زلزله‌ها، به ویژگی‌هایی چون جهت‌گیری پیشرونده، اثرات مسیر و ساختگاه، سطح انرژی و محتوی فرکانسی نیز توجه گردید [۳۴ و ۳۵]. در نهایت فهرستی از شتاب‌نگاشت‌های حوزه‌ی دور متناسب با شرایط لرزه‌خیزی و توپوگرافی منطقه که انطباق مناسبی نیز با طیف طرح استاندارد منطقه [۳۶] دارد، پیشنهاد شده است. در ادامه برخی از ویژگی‌های توپوگرافی، تکتونیکی و دامنه‌ای فهرست پیشنهادی ارائه می‌گردد. ایستگاه‌های ثبت رکورد دارای سرعت موج برشی بین ۲۵۰ m/s و ۷۵۰ m/s می‌باشند. مکانیزم گسل‌های امتداد لغز و فشاری بیشترین سهم را در زلزله‌های پیشنهادی به خود اختصاص دادند. بزرگای گشتاوری بین ۵/۵ تا ۷/۵، و مدت زمان حرکت شدید زمین (Duration time) نیز از سه برابر پریرود

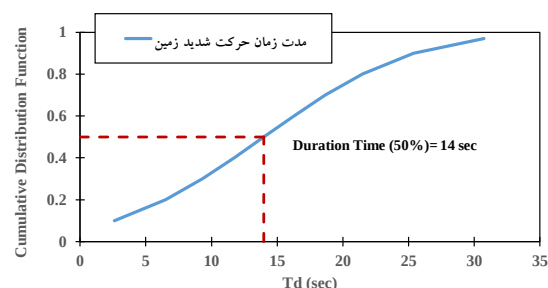
تجربی بزرگترین مدل مطالعه (حدود ۶ ثانیه) بیشتر بوده است. شایان ذکر است برای تخمین مدت زمان حرکت شدید زمین از رابطه **Trifunac** و **Brady** [۳۷] استفاده شده است. در فهرست شتاب‌نگاشتی منطقه میانگین بیشینه شتاب زمین (PGA) برابر $0.33g$ ، میانگین بیشینه سرعت زمین (PGV) برابر $19/2 \text{ m/s}$ و میانگین فرکانس غالب برابر $2/44 \text{ Hz}$ می‌باشد. در شکل‌های (۱) تا (۳) نمودارهای توزیع تجمعی نرمال برخی از پارامترهای کمی فهرست پیشنهادی ارائه شده است. در جدول (۳) ویژگی‌های تکتونیکی، توپوگرافی و پارامترهای دامنه‌ای و فرکانسی فهرست پیشنهادی ایران ارائه شده است.



شکل ۱- منحنی CDF بر اساس تابع توزیع نرمال برای پارامتر بزرگای گشتاوری فهرست پیشنهادی



شکل ۲- منحنی CDF بر اساس تابع توزیع تجمعی نرمال برای پارامتر بیشینه شتاب زمین فهرست پیشنهادی



شکل ۳- منحنی CDF بر اساس تابع تجمعی نرمال برای پارامتر مدت زمان حرکت شدید فهرست پیشنهادی

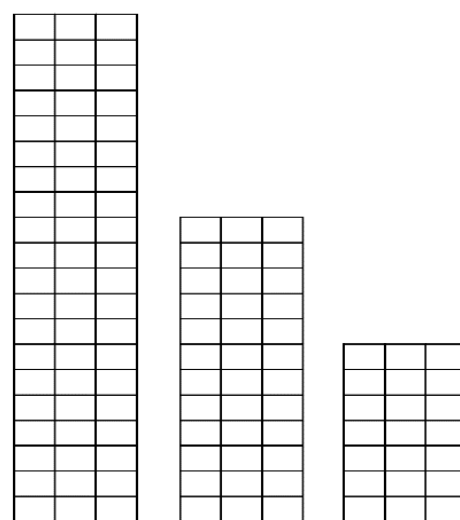
جدول ۳- اطلاعات کلی فهرست شتاب‌نگاشتی ایران

زلزله	ایستگاه	مولفه	سرعت موج برشی (m/s)	نوع خاک براساس استاندارد ۲۸۰۰	ساز و کار گسل	مدت زمان حرکت شدید زمین (s)	حرکت شتاب زمین (g)	حرکت سرعت زمین (cm/s)	عمق کانونی (km)	فاصله رومرکز (km)	پریود غالب (s)
چنگوره	اوج	امتداد با گسل	۶۲۰-۷۶۰	۱ و ۲	فشاری	۶	۰/۴۹۴	۲۳۶۶	۱۵	۲۸/۱	۰/۳۱۵
چنگوره	اوج	امتداد با گسل	۶۲۰-۷۶۰	۱ و ۲	فشاری	۶/۸	۰/۴۶۵	۱۹/۳۳	۱۵	۲۸/۱	۰/۲۳۸
چنگوره	رازان	امتداد با گسل	۱۸۰-۳۶۰	۳	فشاری	۱۴/۲۲	۰/۱۸۵	۱۱/۳۸	۱۵	۳۳/۵۳	۰/۷۵۲
چنگوره	رازان	متعامد با گسل	۱۸۰-۳۶۰	۳	فشاری	۱۲/۶۸	۰/۲۰۴	۹/۸۶۷	۱۵	۳۳/۵۳	۰/۳۴۴
خولی‌بانی آباد	قاین	امتداد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	امتداد لغز و کششی	۱۰/۶۴	۰/۲۱۵	۱۰/۹۹	۲۵	۵۲	۰/۶۲۱
رودبار	آب‌بر	امتداد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	کششی	۲۸/۲۱	۰/۵۹۷	۴۴/۹۲	۱۵	۳۹/۴	۰/۳۵
رودبار	آب‌بر	متعامد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	کششی	۲۸/۳۱	۰/۵۴	۵۷/۸۶	۱۵	۳۹/۴	۰/۲۱۸
رودبار	قزوین	امتداد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	کششی	۱۸/۲۹	۰/۲۰۶	۲۹/۷۲	۱۵	۹۴/۱	۰/۲۲۹
زنجیران	فیروزآباد	امتداد با گسل	۶۲۰-۷۶۰	۱ و ۲	امتداد لغز	۸/۸۳	۰/۲۵۳	۹/۰۴	۱۵	۱۵/۲۷	۰/۱۵۹
زنجیران	فیروزآباد	متعامد با گسل	۶۲۰-۷۶۰	۱ و ۲	امتداد لغز	۸/۹۳	۰/۲۸۹۳	۹/۱۲	۱۵	۱۵/۲۷	۰/۱۶۲
زنجیران	میمند	امتداد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	امتداد لغز	۵/۵۶	۰/۴۴۸	۱۷/۸۸	۱۵	۱۶/۹۳	۰/۱۸۴
زنجیران	میمند	متعامد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	امتداد لغز	۵/۶۶	۰/۵۰۲	۱۹/۳۲	۱۵	۱۶/۹۳	۰/۲۳۴
زرند	زرند	امتداد با گسل	۱۸۰-۳۶۰	۳	فشاری	۱۷/۳۹	۰/۳۲۶	۲۶/۵۱	۱۲	۱۶/۷	۱/۴۸
زرند	زرند	متعامد با گسل	۱۸۰-۳۶۰	۳	فشاری	۱۹/۳۸	۰/۲۴۱	۲۲/۱۸۶	۱۲	۱۶/۷	۱/۰۲۴
سیلاخور	توشک آب سرد	امتداد با گسل	۶۲۰-۷۶۰	۱ و ۲	امتداد لغز	۵/۴۳	۰/۳۲۵	۸/۸۹	۱۷	۳۱/۸۶	۰/۰۹۱
سیلاخور	توشک آب سرد	متعامد با گسل	۶۲۰-۷۶۰	۱ و ۲	امتداد لغز	۵/۳۴	۰/۳۸۲	۸/۵۹۶	۱۷	۳۱/۸۶	۰/۰۹۹
سیلاخور	چغالوندی	امتداد با گسل	۶۲۰-۷۶۰	۱ و ۲	امتداد لغز	۱۹/۳۲	۰/۱۷۵	۱۲/۲۲	۱۷	۲۶/۷۲	۰/۹۹۹
طبس	دیپوک	امتداد با گسل	۳۰۰-۴۹۰	۲ و ۳	فشاری	۳۳/۳۱	۰/۳۲۵	۲۰/۵۸	۱۱	۱۰/۵۱	۰/۵۱
طبس	دیپوک	متعامد با گسل	۳۰۰-۴۹۰	۲ و ۳	فشاری	۳۴/۷۳	۰/۴۰۲	۲۶/۶۸۶	۱۱	۱۰/۵۱	۰/۷۸
کجور	معلم کلایه	امتداد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	فشاری	۷/۶۴	۰/۲۹۷	۲۱/۰۱	۲۲	۹۹/۱	۰/۴۱۸
کجور	معلم کلایه	متعامد با گسل	۳۶۰-۴۹۰	۲	فشاری	۱۰/۵۸	۰/۲۷۵	۲۶/۱۷	۲۲	۹۹/۱	۰/۵۶۹
کجور	پل	امتداد با گسل	۱۸۰-۳۶۰	۳	فشاری	۱۳/۹۸	۰/۲۹۶	۱۰/۸۳	۲۲	۱۱/۴۸	۰/۱۲۸
کجور	پل	متعامد با گسل	۱۸۰-۳۶۱	۳	فشاری	۱۳/۶۵	۰/۱۷	۶/۲۸	۲۲	۱۱/۴۸	۰/۱۳
کره بس	بلده	امتداد با گسل	۳۰۰-۴۹۰	۲ و ۳	امتداد لغز و کششی	۶/۹۷	۰/۳۳۸	۱۶/۸۷	۱۷/۴	۲۴/۱	۰/۱۵۱
کره بس	بلده	متعامد با گسل	۳۰۰-۴۹۰	۲ و ۳	امتداد لغز و کششی	۸/۱۱	۰/۴۰۵	۹/۹۵	۱۷/۴	۲۴/۱	۰/۱۱۳

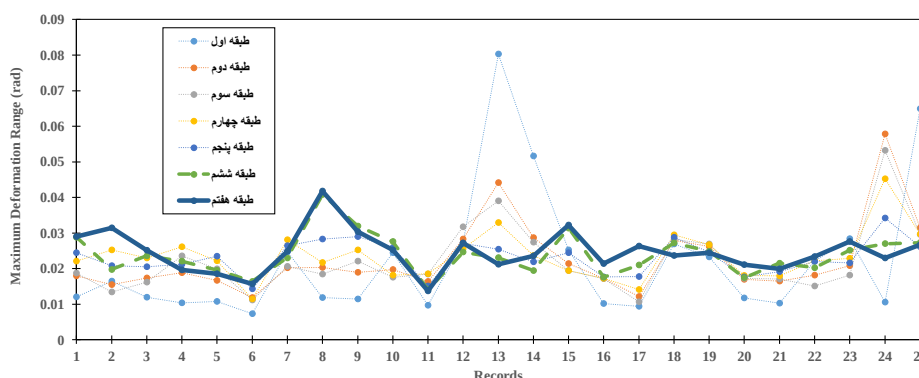


۳-۲- تحلیل و نتایج

در ادامه روند پروژه مدل‌های سه بعدی مطالعه تحت تحلیل‌های استاتیکی خطی قرار گرفتند و پارامتر دریافت طبقات این مدل‌ها بررسی گردید. هدف از تحلیل‌های استاتیکی، انتخاب قاب‌های بحرانی برای تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی بوده‌است. در شکل (۴) قاب‌های بحرانی سازه‌های ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه برای ادامه روند مطالعه و مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees [۳۸] انتخاب شدند، ارائه شده‌است. در ادامه و بعد از محاسبه ضرایب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های فهرست پیشنهادی منطبق بر طیف طرح استاندارد منطقه، تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی غیرخطی قاب‌های مطالعه در نرم‌افزار صورت گرفت؛ و دریافت طبقات قاب‌ها تحت اثر فهرست پیشنهادی به دست آمد. شایان ذکر است ضرایب مقیاس متناسب با طیف طرح استاندارد منطقه، برای پهنه‌بندی با خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد همچنین نوع خاکی متناسب با شرایط توپوگرافی قسمت اعظم منطقه، تعیین و محاسبه شده‌است.



شکل ۴- قاب‌های بحرانی ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه

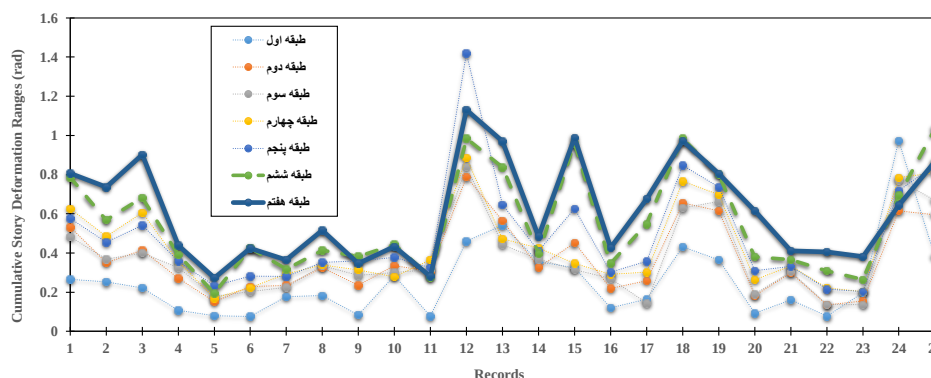


شکل ۵- مقایسه پارامتر بیشینه دامنه تغییرشکلی در طبقات قاب ۷ طبقه

۴-۲- چرخه‌های خسارتی و مطالعات آماری

در این پروژه برای تعیین پارامترهای خسارتی از روش شمارش چرخه‌های رین فلو ساده شده استفاده شده‌است؛ بدین منظور دریافت طبقات منتج از تحلیل تاریخچه‌زمانی هر طبقه بر اساس الگوی رین فلو شمارش شدند. در همین راستا چرخه‌های تغییرشکلی با دامنه‌هایی برابر و بزرگتر از ۰/۰۰۵ رادیان (بازه‌های برابر و بزرگتر ۰/۰۰۲۵ رادیان) به عنوان چرخه‌های تغییرشکلی خسارتی (Nt) در نظر گرفته شده‌است؛ همچنین چرخه‌های تغییرشکلی با بازه‌های برابر و بزرگتر از ۰/۰۱ رادیان نیز به عنوان چرخه‌های پلاستیک فرض شده‌است. به طور کلی پارامترهای مهم خسارتی هر طبقه شامل: تعداد چرخه‌های تغییرشکلی خسارتی (Nt)، تعداد چرخه‌های تغییرشکلی پلاستیک (Np)، بیشینه دامنه‌ی تغییرشکلی ($\Delta\theta_{max}$) و مجموع دامنه‌های تغییرشکلی ($\sum \Delta\theta_i$) بوده‌است. در ادامه مطالعه با در اختیار داشتن پارامترهای خسارتی هر طبقه، طبقات بحرانی هر قاب نیز تعیین گردید. از طرفی با توجه به این که پارامتر مجموع دامنه‌های تغییرشکلی مبین تاریخچه خسارتی برای طبقه است؛ در تعیین طبقه بحرانی پارامتر فوق با دقت بیشتری لحاظ شده است. برای نمونه در شکل‌های (۵) و (۶) مقایسه‌ای بین پارامترهای بیشینه دامنه‌ی تغییرشکلی و مجموع دامنه‌های تغییرشکلی طبقات قاب ۷ طبقه ارائه شده‌است؛ همان گونه در شکل‌ها مشخص است طبقه هفتم قاب ۷ طبقه در قست اعظم فهرست شتاب‌نگاشتی دارای بیشترین مقدار پارامتر مجموع دامنه‌های تغییرشکلی بوده‌است.

با بررسی پارامترهای خسارتی برای طبقات مدل‌های مطالعاتی، طبقات آخر قاب‌ها، به عنوان طبقات بحرانی انتخاب و برای بررسی‌های آماری انتخاب شدند. برای مطالعات آماری پارامترهای تغییرشکلی از تابع توزیع احتمالاتی لگ‌نرمال که بهترین تطبیق را نشان داده‌است؛ استفاده شده‌است.



شکل ۶- مقایسه پارامتر خسارتی مجموع دامنه‌های تغییرشکلی در طبقات قاب ۷ طبقه

جدول ۶- مقادیر ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصدی احتمالاتی پارامترهای خسارتی طبقه بحرانی قاب ۲۰ طبقه

مقادیر توزیع احتمالاتی لگ نرمال	$F(./50)$	$F(./75)$	$F(./90)$
مجموع دامنه‌های تغییرشکلی			
بیشینه دامنه تغییرشکلی			
چرخه‌های خسارتی			
چرخه پلاستیک			

در همین راستا برای هر یک از مجموعه داده‌های تغییرشکلی طبقات بحرانی، مقادیر تابع توزیع احتمالی لگ نرمال به دست آمد و با استفاده از گراف تابع توزیع تجمعی مقادیر ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصدی پارامترهای تغییرشکلی به دست آمده‌است. در جدول (۴) تا (۶) مقادیر ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصدی تمام پارامترهای تغییرشکلی تغییرشکلی با استفاده از گراف تابع توزیع تجمعی لگ نرمال برای قاب‌های مطالعه ارائه شده‌است.

جدول ۴- مقادیر ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصدی احتمالاتی پارامترهای خسارتی طبقه بحرانی قاب ۷ طبقه

مقادیر توزیع احتمالاتی لگ نرمال	$F(./50)$	$F(./75)$	$F(./90)$
مجموع دامنه‌های تغییرشکلی	۰/۵۶	۰/۷۴	۰/۹۵۶
بیشینه دامنه تغییرشکلی	۰/۰۲۴	۰/۰۲۸	۰/۰۳۲
چرخه‌های خسارتی	۵۵	۷۱	۹۰
چرخه پلاستیک	۷	۱۲	۲۰

جدول ۵- مقادیر ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصدی احتمالاتی پارامترهای خسارتی طبقه بحرانی قاب ۱۲ طبقه

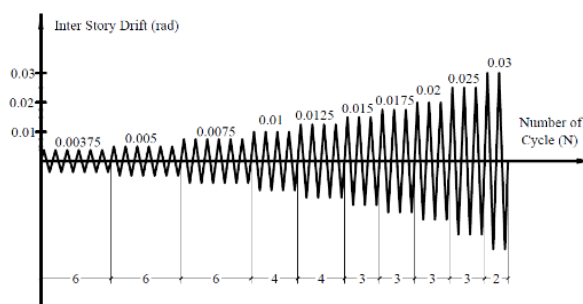
مقادیر توزیع احتمالاتی لگ نرمال	$F(./50)$	$F(./75)$	$F(./90)$
مجموع دامنه‌های تغییرشکلی	۰/۷۷۲	۱/۰۹۳	۱/۴۹۴
بیشینه دامنه تغییرشکلی	۰/۰۲۹۸	۰/۰۳۷۶	۰/۰۴۶۳
چرخه‌های خسارتی	۷۰	۹۳	۱۱۹
چرخه پلاستیک	۱۱	۲۲	۴۰

۲-۵- مقادیر هدف و شرایط پذیرش و کنترل فروریزش

در ادامه و با استفاده از مطالعات آماری که بر روی طبقات بحرانی قاب‌های مطالعه صورت گرفته‌است، مقادیر هدف پروتکل بارگذاری منطقه تعیین شده‌است. برای تعیین تعداد



بارگذاری لحاظ شده است. در شکل (۷) پروتکل بارگذاری ملی برای ارزیابی لرزه‌ای اتصالات خمشی در ایران تا رسیدن به مقادیر هدف برای زلزله‌های حوزه‌ی دور ارائه شده است.



شکل ۷- پروتکل بارگذاری ملی تا رسیدن به مقادیر هدف برای زلزله‌های حوزه دور برای ارزیابی اتصالات خمشی در ایران

همان طور که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد، مقادیر هدف پارامترهای تغییرشکلی پروتکل بارگذاری با تعداد چرخه های تغییرشکلی ۴۰، تعداد چرخه پلاستیک ۲۲، مجموع بازه‌های تغییرشکلی ۰/۹۶ رادیان و بیشینه دامنه‌ی تغییرشکلی برابر ۰/۰۶ و بیشینه بازه تغییرشکلی برابر ۰/۰۳ رادیان پیشنهاد شده است. گام‌های تغییرشکلی و تعداد تکرار هر گام با در نظر

گرفتن مقادیر هدف منتج از برآورد آماری، نسبت‌های آماری گام‌های تغییرشکلی و همچنین تطابق مناسب با مقادیر واقعی پارامترهای تغییرشکلی نمونه‌های مطالعاتی قضاوت تعیین شدند. در جدول (۷) چرخه‌های پروتکل بارگذاری ملی تا رسیدن به شرایط کنترل آستانه فروریزش اتصالات خمشی ارائه شده است.

برای شرایط پذیرش اتصالات در قاب‌های خمشی ویژه توصیه می‌شود؛ بعد از ارضای مقادیر هدف پروتکل در تغییرمکان نسبی ۰/۰۳ رادیان، اتصالات خمشی حداقل یک چرخه با تغییرمکان نسبی ۰/۰۴ رادیان بارگذاری شوند و مقاومت خمشی اتصال، کمتر از ۸۰ درصد مقاومت خمشی اسمی تیر نگردد. گام‌های پروتکل ملی بعد از تغییرمکان نسبی هدف یعنی ۰/۰۳ رادیان به میزان ۰/۰۱ رادیان افزایش، و ۲ بار تکرار برای هر گام تعیین شده است. برای کنترل آستانه‌ی فروریزش در اتصالات خمشی نیز توصیه می‌شود؛ اتصالات خمشی در آزمایشگاه باید حداقل یک چرخه با تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان را تحمل نمایند و مقاومتی خمشی بیش از ۵۰ درصد مقاومت خمشی اسمی تیر داشته باشد. شایان ذکر است مجموع دامنه‌های تغییرمکانی در این گام بارگذاری پروتکل ملی، معادل حداکثر مجموع دامنه‌های تغییرشکلی در طبقات بحرانی قاب‌های مطالعه بوده است.

جدول ۷- گام‌های پروتکل بارگذاری در مقادیر هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه فروریزش اتصالات خمشی

قدم بارگذاری	بیشینه بازه تغییرمکان نسبی	تعداد چرخه	مجموع تعداد چرخه	مجموع دامنه‌های تغییرشکلی
۱	۰/۰۳۷۵	۶	۶	۰/۰۴۵
۲	۰/۰۰۵	۶	۱۲	۰/۱۰۵
۳	۰/۰۰۷۵	۶	۱۸	۰/۱۹۵
۴	۰/۰۱	۴	۲۲	۰/۲۷۵
۵	۰/۰۱۲۵	۴	۲۶	۰/۳۷۵
۶	۰/۰۱۵	۳	۲۹	۰/۴۶۵
۷	۰/۰۱۷۵	۳	۳۲	۰/۵۷
۸	۰/۰۲۰	۳	۳۵	۰/۶۹
۹	۰/۰۲۵	۳	۳۸	۰/۸۴
۱۰	۰/۰۳	۲	۴۰	۰/۹۶ → مقادیر هدف
۱۱	۰/۰۴	۲	۴۲	۱/۱۲ → پذیرش
۱۲	۰/۰۵	۲	۴۴	۱/۳۲
۱۳	۰/۰۶	۲	۴۶	۱/۵۶
۱۴	۰/۰۷	۱	۴۷	۱/۷ → کنترل آستانه فروریزش

این نکته قابل ذکر است که حداکثر مقدار پارامتر مجموع بازه‌های تغییرشکلی منتج از تحلیل‌های تاریخچه زمانی فهرست منطقه در طبقه بیستم قاب بحرانی قاب ۲۰ طبقه و برابر ۱/۶۴ رادیان به دست آمده است؛ بر همین مبنا شرایط کنترلی اتصال خمشی در آستانه‌ی فروریزش توصیه گردیده است. برای بررسی مناسب عملکرد لرزه‌ای اتصال خمشی توصیه می‌شود گام‌های پروتکل بارگذاری ملی تا رسیدن به افت‌های مقاومتی ادامه پیدا کند؛ و نمونه‌ها در آزمایشگاه بعد از رسیدن به شرایط پذیرش همچنان بارگذاری شوند تا عملکرد اتصال در محدوده‌ی تغییر مکان‌های بزرگ و آستانه‌ی فروریزش بررسی گردد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- جزئیات طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در ادامه پروژه به منظور تطبیق و کنترل مقادیر هدف، پذیرش و آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی، بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. بدین منظور اتصالات خمشی جوشی پیش‌پذیرفته WUF-W و RBS متناسب با مدل‌های مطالعاتی طراحی و با مقیاس واقعی در آزمایشگاه تحت بارگذاری قرار گرفتند؛ تا مقادیر هدف، پذیرش و فروریزش پیشنهادی پروتکل بارگذاری ملی مورد بررسی قرار گیرند. از طرفی به منظور مقایسه تقاضای اعمالی پروتکل ملی و پروتکل بارگذاری SAC، همچنین بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال خمشی تحت دو پروتکل بارگذاری مذکور؛ لازم به بررسی و تست

حداقل دو نمونه اتصال خمشی مدنظر در آزمایشگاه بوده است. به همین منظور یک جفت اتصال WUF-W و یک جفت اتصال RBS با شرایط ساخت و برپایش کاملاً یکسان در آزمایشگاه تحت پروتکل‌های بارگذاری ملی و SAC قرار گرفتند و عملکرد این اتصالات در شرایط هدف، پذیرش و فروریزش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

طراحی و ساخت اتصالات خمشی WUF-W و RBS بر اساس ویژگی و مشخصات تپ سنگین از مقاطع ستون‌ها و تیرهای قاب ۷ طبقه صورت گرفته است. با توجه به ارتفاع ۳/۲ متری طبقات و طول دهانه ۵ متری، طول ستون و تیر در این زیرسازه کناری متناسب با نقاط عطف در دهانه و طبقات در نظر گرفته شده است. این اتصالات دارای ستون قوطی مربع شکل با بعد ۳۰۰ میلیمتر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر همچنین تیر ورقی با مشخصات PL-G3 بوده است. در طراحی چشمه اتصال در ستون قوطی مطابق توصیه Mirghaderi و همکارانش [۲۶] از ورق‌های پیوستگی با ضخامتی حدود ۱/۴ برابر ضخامت بال تیر استفاده شده است. شایان ذکر است که طراحی و کنترل‌های لازم برای اتصال خمشی مطابق با ضوابط AISC-341 [۱۶] و AISC-358 [۴۱] و در حالت حدی صورت گرفته است. جزئیات کلی طراحی این اتصالات خمشی WUF-W و RBS در جدول‌های (۸) و (۹) ارائه شده است و در شکل‌های (۸) و (۹) نیز جزئیات ابعاد این اتصالات در قاب ۷ طبقه ارائه شده است.

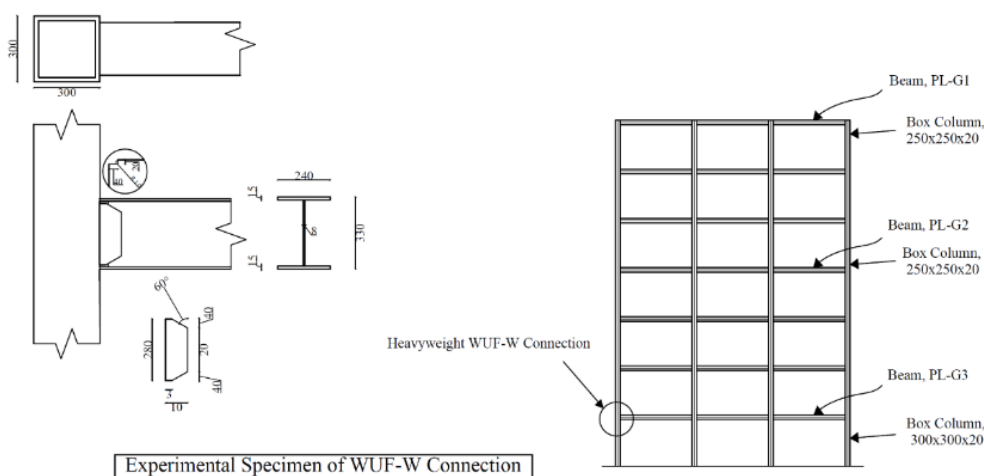
جدول ۸- جزئیات طراحی نمونه آزمایشگاهی اتصال WUF-W

۲۴۰	b_{bf} (mm)	عرض بال تیر
۱۵	t_{bf} (mm)	ضخامت بال تیر
۳۳۰	d (mm)	عمق تیر
۸	t_w (mm)	ضخامت جان تیر
۱۳۱۴۰۰۰	Z_b (mm ³)	اساس مقطع پلاستیک
۴۹۸/۱	M_{pr} (kN.m) = $C_{pr} R_y Z_b F_y$	خمش محتمل در بر ستون
۶۰/۸۲	$V_{gravity}$ (kN)	برش ناشی از ترکیب بارهای ثقلی
۵۰۰۰	L_h (mm)	فاصله مفصل‌های پلاستیک در دهانه
۲۷۲/۷۷	V_u (kN) = $\frac{2M_{pr}}{L_h} + V_{gravity}$	برش در بر ستون
۳۷۲/۹۳	V_n (kN) = $0.6F_y A_w C_v$	ظرفیت برشی تیر در بر ستون
o.k.	V_u (kN) < V_n	کنترل برش در بر ستون
o.k.	$\frac{\sum M_{pc}}{\sum M_{bc}} > 1$	کنترل تیر ضعیف ستون قوی

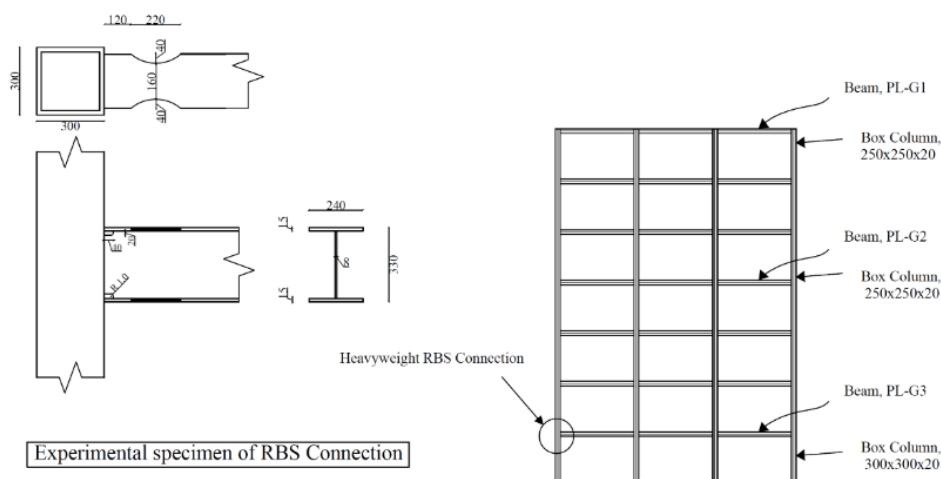


جدول ۹- جزئیات طراحی نمونه آزمایشگاهی اتصال RBS

۲۴۰	b_{bf} (mm)	عرض بال تیر
۱۵	t_{bf} (mm)	ضخامت بال تیر
۳۳۰	d (mm)	عمق تیر
۸	t_w (mm)	ضخامت جان تیر
۱۳۱۴۰۰۰	Z_b (mm ³)	اساس مقطع پلاستیک، مقطع کامل
۱۲۰	$0.5 b_{bf} < a$ (mm) $< 0.75 b_{bf}$	فاصله از وجه ستون تا شروع شعاع برش
۲۲۰	$0.6 d < b$ (mm) $< 0.85 d$	طول برش
۴۰	$0.1 b_{bf} < C$ (mm) $< 0.25 b_{bf}$	عرض بال برداشته شده
۱۷۱/۲۵	R (mm) $= \frac{4C^2 + b^2}{8C}$	شعاع برش
۹۳۶۰۰۰	Z_{RBS} (mm ³) $= Z_b + 2Ct_{bf}(d - t_{bf})$	اساس مقطع پلاستیک، مقطع کاهش یافته
۳۰۴/۱	M_{pr} (kN.m) $= C_{pr} R_y Z_{RBS} F_y$	حداکثر لنگر محتمل در مرکز مفصل پلاستیک
۶۰/۵۴	$V_{gravity}$ (kN)	برش ناشی از ترکیب بار ثقلی
۴۲۴۰	L_h (mm)	فاصله بین مفصل‌های پلاستیک دهانه
۲۰۴	V_{RBS} (kN) $= \frac{2M_{pr}}{L_h} + V_{gravity}$	برش در مرکز مفصل پلاستیک
۳۵۱/۰۳	M_f (kN.m) $= M_{pr} + V_h(a + \frac{b}{2})$	خمش محتمل در بر ستون
۳۵۵/۷۷	M_{pe} (kN.m) $= R_y F_y Z_{IBS}$	ظرفیت خمشی مورد انتظار در مقطع کامل
o.k.	$M_f < \phi_d M_{pe}$	کنترل خمش در بر ستون
۱۳۹/۴۴	M_u (kN.m)	خمش در مفصل پلاستیک ناشی از ترکیب بارهای زلزله
o.k.	$M_u < \phi R_y Z_{RBS}$	کنترل خمش در مفصل پلاستیک
۳۷۲/۹۳	V_n (kN) $= 0.6 F_y A_w C_v$	ظرفیت برشی تیر در بر ستون
o.k.	$V_{RBS} < \phi V_n$	کنترل برش در بر ستون
۱۰۹/۲۲	V_u (kN)	برش در مفصل پلاستیک ناشی از ترکیب بارهای زلزله
o.k.	$V_u < \phi V_n$	کنترل برش در مفصل پلاستیک
o.k.	$\frac{\sum M_{pc}}{\sum M_{bc}} > 1$	کنترل تیر ضعیف ستون قوی



شکل ۸- جزئیات نمونه آزمایشگاهی اتصال WUF-W در قاب ۷ طبقه (ابعاد بر حسب سانتی متر هستند).



شکل ۹- جزئیات نمونه آزمایشگاهی اتصال RBS در قاب ۷ طبقه (ابعاد بر حسب سانتی متر هستند).

برش ورق‌های مورد نیاز، فرآیند ساخت چهار نمونه اتصالات خمشی جوشی WUF-W و RBS صورت پذیرفت. در فرآیند جوشکاری ورق‌ها در ستون‌های قوطی همچنین ورق‌های پیوستگی در چشمه اتصال از ورق پشت بند به منظور تامین جوش نفوذی کامل استفاده گردید. در تیرورق‌ها ضمن رعایت نکات و تعبیه سوراخ دسترسی در جان تیر، فرآیند مونتاژ به بال ستون نیز مطابق با ضوابط آیین‌نامه [۴۰ و ۴۱] صورت گرفت.

برای تامین تشابه کامل خواص مکانیکی یک جفت اتصال WUF-W و یک جفت اتصال RBS، ضخامت‌های مختلف فولادهای مصرفی در ابتدا از یک ورق (Sheet) برش داده شدند و در ادامه نیز در شرایط کارگاهی کاملاً مشابه ساخته شدند. در جدول (۱۰) نتایج تست کشش برای ضخامت‌های مختلف فولاد مصرفی برای ساخت چهار نمونه اتصال از آن‌ها استفاده شده‌است؛ ارائه گردید. بعد از طراحی زیرسازه‌های کناری و

جدول ۱۰- مشخصات تست کشش ورق‌های مصرفی چهار نمونه اتصال خمشی WUF-W و RBS

ورق‌های مصرفی	بال تیر	جان تیر	ورق برشی	ستون	ورق پیوستگی
ضخامت (میلی‌متر)	۱۵	۸	۸	۲۰	۲۵
Yield strength (MPa)	۲۶۱	۲۶۹/۵	۲۶۹/۵	۲۷۲/۹	۲۵۴
Tensile strength (MPa)	۳۹۷	۴۳۰/۴۲	۴۳۰/۴۲	۴۳۰/۸۵	۴۲۹
F_y/F_u	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۵۹
Elongation (%)	۳۵	۱۹	۱۹	۲۰	۱۷

در شکل (۱۱)، جزئیات جوشکاری برای هر یک از نمونه‌های اتصالات خمشی RBS نیز ارائه شده‌است.

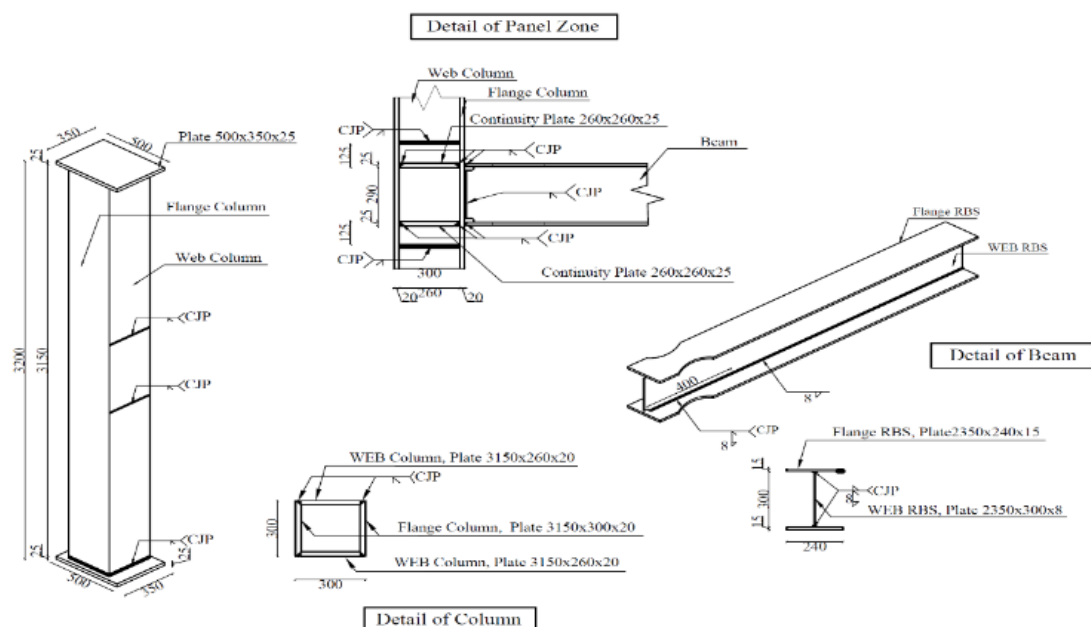
۳-۲- برپایش نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های ساخته شده به منظور بارگذاری تحت پروتکل‌های ملی و SAC بر روی کف صلب و در قاب مثلی در آزمایشگاه سازه بر پا شدند. به منظور شبیه‌سازی شرایط تکیه‌گاهی زیر سازه‌ها با سازه‌های واقعی، از تکیه‌گاه‌های مفصلی در دو انتهای ستون در آزمایشگاه استفاده گردید. همچنین محل اعمال بار در سر تیر نیز از شرایط تکیه‌گاه غلتکی برخوردار بوده‌است؛

در فرآیند جوشکاری اتصالات از الکتروود نوع E-6013 برای پاس ریشه و از الکتروود E-7018 برای سایر پاس‌های جوشکاری استفاده گردید. شایان ذکر است قبل از استفاده از الکتروود E-7018 برای جوشکاری پیش گرمایش مطلوب نیز صورت پذیرفت. در تمامی مراحل جوشکاری چهار نمونه اتصال، دقت لازم برای تامین جوش نفوذی کامل صورت گرفته‌است؛ و بعد از ساخت چهار نمونه به منظور کنترل و صحت جوش‌های نفوذی تست (UT) نیز انجام گردید. در شکل (۱۰) چهار نمونه اتصالات خمشی WUF-W و RBS که در شرایط کارگاهی مونتاژ گردیده، به تصویر کشیده شده‌است. در ادامه برای نمونه



شکل ۱۰- ساخت و مونتاژ چهار نمونه آزمایشگاهی (یک جفت اتصال خمشی WUF-W و یک جفت اتصال خمشی RBS)



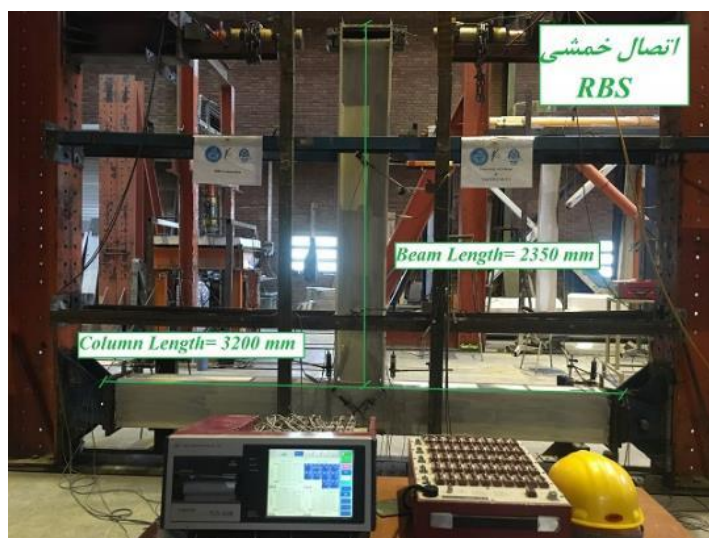
شکل ۱۱- جزئیات فرآیند جوش در تیر، ستون و چشمه اتصال زیرسازه RBS (ابعاد بر حسب سانتی متر هستند).

در این پروژه به منظور اجتناب از ناپایداری کلی نمونه‌ها، مطابق ضوابط عمومی و لرزه‌ای AISC [۱۶ و ۳۳] مهار جانبی در طول مناسب تامین گردید؛ همچنین برای جلوگیری کماتش پیچشی جانبی تیر نیز بلافاصله بعد از مفصل پلاستیک مهار جانبی اضافه تعبیه شده‌است [۱۶]. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) برپایش یکی از زیر سازه‌های اتصال خمشی WUF-W و RBS در آزمایشگاه سازه ارائه شده‌است.

تا ضمن تامین شرایط تکیه‌گاهی، بارگذاری تغییرمکانی نیز دقیقاً در راستای خود اعمال گردد. شایان ذکر است در طول روند بارگذاری برای هر چهار نمونه عکس‌العمل جک به گونه‌ای تنظیم گردید که تغییرشکل اضافی به نمونه‌ها تحمیل نگردد. به منظور ارزیابی و کنترل رفتار نمونه‌ها حین آزمایش نیز، تغییرمکان‌سنج‌های مختلفی در مکان‌های مناسب بر روی نمونه‌ها تعبیه شدند.



شکل ۱۲- برپایش یکی از زیرسازه‌های اتصال خمشی WUF-W در آزمایشگاه سازه



شکل ۱۳- برپایش یکی از زیرسازه‌های اتصال خمشی RBS پروژه در آزمایشگاه سازه

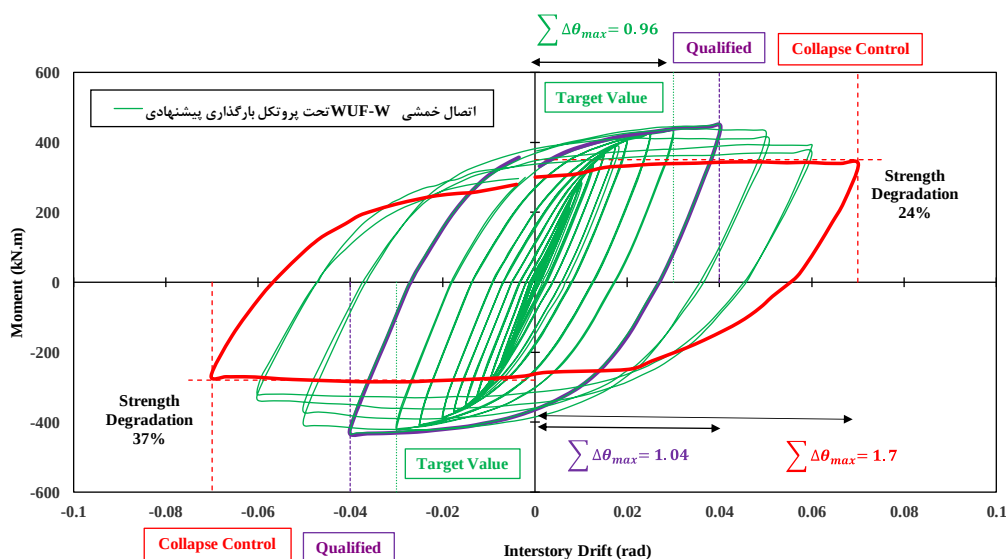
۳-۳- اتصال خمشی WUF-W

با برپایی نمونه‌های اتصالات خمشی WUF-W در آزمایشگاه سازه بارگذاری رفت و برگشتی بر اساس گام‌های پروتکل بارگذاری بر روی یکی از نمونه‌ها صورت گرفت. در جدول (۷) گام‌های تغییرمکان نسبی پروتکل بارگذاری ملی ارائه شده است. بر همین مبنا و با توجه به نقطه عطف دهانه‌ها برای زیر سازه کناری بارگذاری تغییرمکانی چرخه ای، توسط جک‌های به تیر نمونه اول اتصال خمشی WUF-W برای بررسی رفتار لرزه‌ای اعمال گردید. شایان ذکر است بارگذاری بر روی نمونه اول تا رسیدن به مقادیر کنترل آستانه فروریزش فروریزش پروتکل بارگذاری یعنی تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان صورت

گرفت و کنترل و بررسی‌های لازم بر روی اتصال در هریک از شرایط هدف، پذیرش و فروریزش صورت پذیرفت. در شکل (۱۴) منحنی رفتاری اتصال خمشی WUF-W تحت پروتکل بارگذاری ملی ارائه شده است. همان گونه که در شکل مشخص می‌باشد اتصال خمشی پیش پذیرفته فوق شرایط پذیرش و فروریزش پروتکل ملی را ارضا کرده است. شایان ذکر است که شرایط هدف پروتکل بارگذاری ملی دارای بازه‌ی تغییرشکلی ۰/۰۳ رادیان و مجموع بازه‌های تغییرشکلی ۰/۹۶ رادیان بوده است. همان گونه که در شکل (۱۴) نیز مشخص است، منحنی رفتاری آزمایشگاهی در شرایط هدف پروتکل ملی افت مقاومتی نداشته و عملکرد مناسب و مطلوبی از

که ریزش آب آهک در محل مفصل پلاستیک که از گام‌های بارگذاری قبل شروع شده بود، کاملاً مشهود است.

اتصال خمشی WUF-W نیز مشاهده شده‌است؛ و اعوجاج موضعی در بال و جان تیر اندک بوده‌است. این در حالی است



شکل ۱۴- منحنی رفتاری نمونه اول آزمایشگاهی اتصال WUF-W تحت پروتکل بارگذاری ملی

مختلف تا رسیدن به شرایط هدف، پذیرش و کنترل آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی به تصویر کشیده‌است.

نمونه دوم اتصال خمشی WUF-W مطابق با پروتکل بارگذاری SAC بارگذاری گردید، تا ضمن بررسی عملکرد اتصال خمشی در ستون‌های قوطی در شرایط هدف و پذیرش؛ تفاوت‌های تقاضاهای اعمالی دو پروتکل برای دو نمونه مشابه نیز مورد بررسی قرار گیرد. بارگذاری نمونه دوم مطابق با جدول (۱۱) تا تغییرمکان نسبی ۰/۰۸ رادین و مجموع بازه‌های تغییرشکلی ۱/۵۷۵ رادین انجام گرفته‌است.

در شکل (۱۶) منحنی رفتاری آزمایشگاهی اتصال دوم WUF-W تحت پروتکل بارگذاری SAC ارائه شده‌است. همان گونه که در شکل نیز مشخص است این اتصال با ستون قوطی شرایط هدف و پذیرش را کاملاً ارضا کرده‌است و در تغییرمکان پذیرش ضمن عملکرد مطلوب، افت مقاومتی نیز مشاهده نشده‌است.

شایان ذکر است که پروتکل بارگذاری SAC دارای مقدار هدف با بازه‌ی تغییرشکلی ۰/۰۳ رادین و مجموع بازه‌های تغییرشکلی ۰/۵۳۵ رادین است و آیین‌نامه AISC-341 شرایط پذیرش منطبق با این پروتکل را در بازه‌ی تغییرشکلی ۰/۰۴ رادین با مقامت بیش از ۸۰ درصد مقاومت بیشینه بیان کرده‌است. در شرایط پذیرش، اعوجاج موضعی در بال‌ها و جان تیر مشاهده نشده‌است و اولین افت مقاومتی در تغییرمکان نسبی

برای کنترل شرایط پذیرش پروتکل بارگذاری، منطبق با جدول (۷) بارگذاری تا تغییرمکان نسبی ۰/۰۴ رادین ادامه پیدا کرد و کنترل‌های لازم نیز انجام پذیرفت. در شرایط پذیرش، اعوجاج موضعی بال و جان تیر رشد کرده‌بود و ریزش آب آهک در محدوده مفصل پلاستیک نیز کاملاً مشهود بوده‌است. ضمن این که جوش‌های تمامی مناطق در محدوده مفصل پلاستیک و اتصال تیر به بال ستون نیز کاملاً سالم بوده و هیچ گونه آسیبی نیز در آن‌ها مشاهده نگردید و افت مقاومتی در رفتار چرخه‌ای اتصال مشاهده نگردید.

شایان ذکر است که اعوجاج موضعی در بال‌ها و جان تیر در محدوده مفصل پلاستیک از تغییرمکان نسبی ۰/۰۵ رادین و مجموع بازه‌تغییرشکلی حدود ۱/۲۲ رادین با سرعت بیشتری گسترش و رشد پیدا کرد؛ و اولین افت مقاومت در رفتار اتصال در سیکل اول تغییرمکان نسبی ۰/۰۵ رادین مشاهده گردید. علی‌رغم گستردگی اعوجاج موضعی در تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادین؛ اتصال همچنان توان تحمل بارگذاری را داشته و وارد فاز فروریزش نگردید. شایان ذکر است که اتصال در این محدوده تغییرمکانی افت مقاومتی حدود ۳۷ درصد را تجربه کرد که با توجه به عملکرد اتصال، عدم افت مقاومتی ۵۰ درصدی، و همچنین دارا بودن پایداری کلی مطلوب، شرایط مدنظر پروتکل بارگذاری ملی برای عدم فروریزش کاملاً ارضا گردید. در شکل (۱۵) اتصال خمشی WUF-W را در تغییرمکان‌های نسبی

پروتکل SAC تا دررفت‌های بالا ادامه پیدا کند. در شکل (۱۷) تصاویری از اتصال خمشی WUF-W با ستون قوطی در آزمایشگاه در تغییر مکان نسبی‌های مختلف پروتکل بارگذاری SAC ارائه گردید.

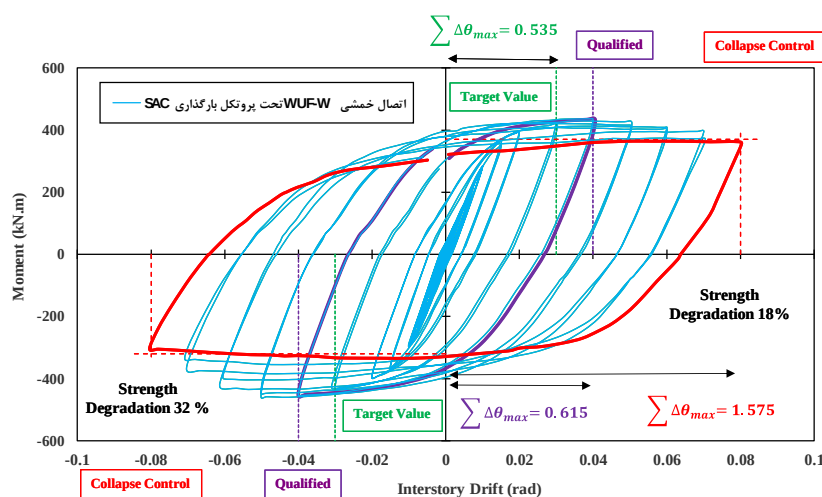
۰/۰۶ رادیان مشاهده گردید. شایان ذکر است برای شرایط فروریزش، پروتکل بارگذاری SAC مقدار مشخصی بیان نکرده است. با این حال کراوینکلر یکی از اعضا تدوین این پروتکل، توصیه کرده است به منظور بررسی عملکرد اتصالات خمشی در تغییر مکان‌های بزرگ و آستانه‌ی فروریزش گام‌های بارگذاری



شکل ۱۵- نمونه اول اتصال خمشی WUF-W در مقادیر هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه فروریزش پروتکل ملی

جدول ۱۱- گام‌های تغییر مکانی پروتکل بارگذاری SAC

قدم بارگذاری	تغییر تغییر مکان نسبی (رادیان)	تعداد چرخه	مجموع تعداد چرخه	مجموع دامنه‌های تغییر شکلی (رادیان)
۱	۰/۰۰۳۷۵	۶	۶	۰/۰۴۵
۲	۰/۰۰۵	۶	۱۲	۰/۱۰۵
۳	۰/۰۰۷۵	۶	۱۸	۰/۱۹۵
۴	۰/۰۰۱	۴	۲۲	۰/۲۷۵
۵	۰/۰۱۵	۲	۲۴	۰/۳۳۵
۶	۰/۰۲	۲	۲۶	۰/۴۱۵
۷	۰/۰۳	۲	۲۸	۰/۵۳۵
۸	۰/۰۴	۲	۳۰	۰/۶۹۵
۹	۰/۰۵	۲	۳۲	۰/۸۹۵
۱۰	۰/۰۶	۲	۳۴	۱/۱۳۵
۱۱	۰/۰۷	۲	۳۶	۱/۴۱۵
۱۲	۰/۰۸	۱	۳۷	۱/۵۷۵



شکل ۱۶- منحنی رفتاری نمونه دوم آزمایشگاهی اتصال WUF-W تحت پروتکل بارگذاری SAC



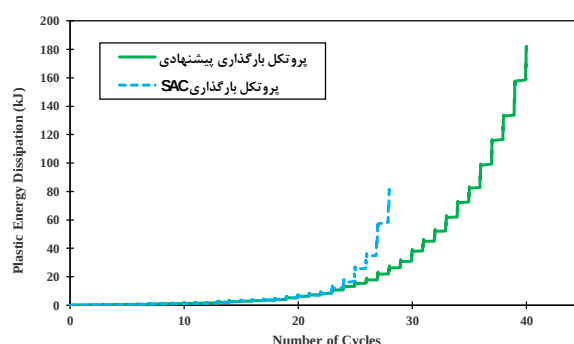
شکل ۱۷- نمونه دوم اتصال خمشی WUF-W تا رسیدن به بیشینه بازه تغییرشکلی ۰/۰۸ رادین پروتکل بارگذاری SAC

شایان ذکر است که تقاضای لرزه‌ای منطقه، دامنه‌های تغییرشکلی با دامنه متوسط و تعداد بالا را به سازه‌های منطقه تحمیل کرده‌است؛ بر همین اساس در تدوین پروتکل بارگذاری ملی گام‌های تغییرشکلی با دامنه و تعداد مناسب در نظر گرفته شده‌است. در شکل (۱۸) میزان انرژی مستهلک شده در دو نمونه مشابه در آزمایشگاه تحت پروتکل‌های بارگذاری ملی و SAC ارائه شده‌است. نمونه اول در شرایط هدف حدود ۱۸۲ کیلو ژول و نمونه دوم نیز حدود ۸۱ کیلو ژول انرژی را

مستهلک کردند که این نشان از تقاضای انرژی اعمالی حدود ۲/۲۵ برابری برای دو پروتکل بارگذاری است. بنابراین توانایی استهلاک انرژی در اتصالات خمشی باید به طور جدی برای طراحی و ساخت اتصالات در نظر گرفته شود. البته این امر بیشتر باید در خصوص اتصالاتی که جز اتصالات پیش‌پذیرفته آیین‌نامه‌ای نمی‌باشند، مورد ملاحظه قرار گیرد. ممکن است بسیاری از اتصالات مبتنی با بیشینه‌های تغییرشکلی پروتکل بارگذاری SAC شرایط هدف را ارضا نمایند ولی توان استهلاک

انرژی برای رسیدن به شرایط هدف پروتکل بارگذاری منطقه را نداشته باشند.

شایان ذکر است پارامتر مدت زمان حرکت شدید زلزله‌ها در فهرست لرزه‌ای منطقه در میزان تقاضای انرژی و همچنین تعداد گام‌های خسارتی پروتکل‌های بارگذاری تأثیر گذار است. این در حالی است که تأثیرگذاری این پارامتر در بسیاری از پروتکل‌های بارگذاری به دقت بررسی و لحاظ نشده‌بود. در این مطالعه حداقل مدت زمان حرکت شدید زمین برای رکوردهای فهرست سه برابر پرید بزرگترین سازه مطالعه در نظر گرفته شده‌است. همان‌گونه که در شکل (۳) مشخص است؛ میانگین مدت زمان حرکت شدید زمین در فهرست شتاب‌نگاشتی منطقه برابر ۱۴ ثانیه بوده‌است.



شکل ۱۸- انرژی پلاستیک مستهلک شده در نمونه‌های آزمایشگاهی WUF-W در مقادیر هدف پروتکل‌های بارگذاری ملی و SAC

۳-۴- اتصال خمشی RBS

با برپایش نمونه‌های اتصال خمشی RBS در آزمایشگاه، بررسی و ارزیابی این اتصالات تحت پروتکل‌های بارگذاری ملی و SAC صورت گرفته‌است. در شکل (۱۹) منحنی رفتاری آزمایشگاهی نمونه اول اتصال خمشی RBS تحت پروتکل بارگذاری ملی ارائه شده‌است. همان‌گونه که در شکل به تصویر کشیده شده‌است اتصال فوق مقدار هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی را به خوبی ارضا کرده‌است. نمونه در مقدار هدف و تحمیل مجموع بازه‌های تغییرمکانی ۰/۹۶ رادیان افت مقاومتی نداشته است و در تغییرمکان پذیرش نیز اتصال با عملکردی مناسب و بدون افت بوده‌است و ناپایداری خاصی نیز در نمونه مشاهده نشده‌است.

شروع روند افت مقاومت در تغییرمکان مکان نسبی ۰/۰۵ رادیان بوده‌است؛ لازم به ذکر است که در چرخه دوم این مرحله بارگذاری افت درون سیکلی اندکی در نمونه مشاهده شده‌است.

با ادامه روند بارگذاری منطبق با پروتکل ملی در تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان و مجموع بازه‌های تغییرمکانی ۱/۷ رادیان، افت مقاومت اتصال برابر ۲۴/۷ درصد ظرفیت خمشی گردید؛ که شرایط کنترل آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی را به خوبی ارضا کرده‌است. در ادامه در شکل (۲۰) نمونه اول آزمایشگاه در مقدار هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی به تصویر کشیده شده‌است.

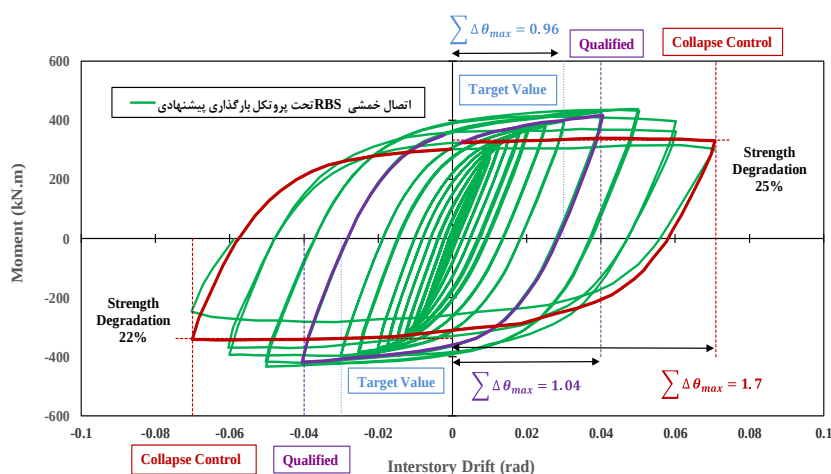
با توجه به گام‌های پروتکل بارگذاری ملی، شروع تکیدگی پوشش آهک و غیرخطی شدن مصالح در بال‌ها و جان تیر در محدوده‌ی عرض کاهش یافته، از تغییرمکان نسبی ۰/۰۱ رادیان بوده‌است. سرعت غیرخطی شدن و همچنین ریزش پوشش آهک در تغییرمکان‌های نسبی ۰/۰۱۲۵، ۰/۰۱۵، ۰/۰۱۷۵ و ۰/۰۲ رادیان در جان تیر بیشتر از بال‌های تیر بوده‌است. با شروع کمناش موضعی در یکی از بال‌های تیر در تغییرمکان نسبی ۰/۰۲۵ رادیان، سرعت غیرخطی شدن و ریزش پوشش آهک در بال‌های تیر نیز گسترش پیدا کرد. لازم به ذکر است که الگوی جاری شدگی و ریزش آهک در بال‌ها و جان تیر نمونه اول در محدوده‌ی عرض کاهش یافته و در مرکز آن متمرکز گردیده‌است. در سیکل اول تغییرمکان نسبی ۰/۰۳ رادیان و تحمیل مجموع بازه‌های تغییرشکلی ۰/۹ رادیان به نمونه اول، کمناش موضعی بال دیگر تیر نیز آغاز گردید. روند افزایش دامنه کمناش موضعی در بال‌های تیر در تغییرمکان‌های نسبی ۰/۰۳ و ۰/۰۴ رادیان اندک بوده‌است و از چرخه دوم تغییرمکان نسبی ۰/۰۵ رادیان این روند افزایش پیدا کرده‌است. با توجه به افزایش دامنه کمناش موضعی در بال‌ها تیر و با شروع کمناش موضعی در جان تیر، افت مقاومت در رفتار اتصال در چرخه دوم تغییرمکان نسبی ۰/۰۵ رادیان مشاهده گردید. با افزایش گام‌های تغییرمکانی، نمونه اول اتصال خمشی RBS در تغییرمکان‌های نسبی ۰/۰۶ و ۰/۰۷ رادیان افت مقاومت‌هایی برابر ۱۶/۷ و ۲۴/۷ درصد را تجربه کرده‌است.

ترک جزئی در جوش‌های اتصال ورق یکی از بال‌ها به جان تیر، در چرخه دوم تغییرمکان نسبی ۰/۰۶ رادیان مشاهده گردیده‌است. لازم به ذکر است که این نقص در محدوده‌ی ناحیه عرض کاهش یافته و با فاصله حدود ۱۸ سانتی‌متری از برستون رخ داده‌است. در این مرحله مجموع بازه‌های تغییرمکانی تحمیلی به نمونه اول برابر ۱/۵۶ رادیان بوده‌است. در گام بعدی بارگذاری و به منظور بررسی عملکرد اتصال RBS در شرایط کنترل آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی، نمونه تحت ۱ چرخه با تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان قرار گرفته‌است و مجموع



ارضا کرده‌است. در ادامه و به منظور بررسی تاثیر گسترش ترک و پارگی جوش، در عملکرد اتصال، بارگذاری نمونه ادامه پیدا کرده‌است. بدین منظور ۱ چرخه دیگر با تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان به نمونه اعمال شده‌است و مجموع بازه‌های تغییرمکانی تحمیلی برابر ۱/۸۴ رادیان گردید. در این مرحله پارگی جوش در گام قبلی گسترش پیدا کرده‌است و منجر به پارگی ورق بال و جان در محل اتصال با جوش گردید. با این وجود افت مقاومت اتصال حدود ۴۳/۲ درصد ظرفیت خمشی بوده‌است.

بازه‌های تغییرمکانی تحمیلی برابر ۱/۷ رادیان گردید. در این گام بارگذاری با گسترش ترک در جوش‌های اتصال بال به جان، پارگی قائم در جوش رخ داده‌است، با این حال افت مقاومت از ۱۶/۷ درصد در تغییرمکان نسبی ۰/۰۶ رادیان به ۲۴/۷ درصد در تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان رسیده‌است. با توجه به مهار جانبی مناسبی که در برپایش نمونه صورت گرفته‌بود، ناپایداری خاصی در این مرحله در نمونه اول مشاهده نگردید و اتصال شرایط کنترل آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی را به خوبی



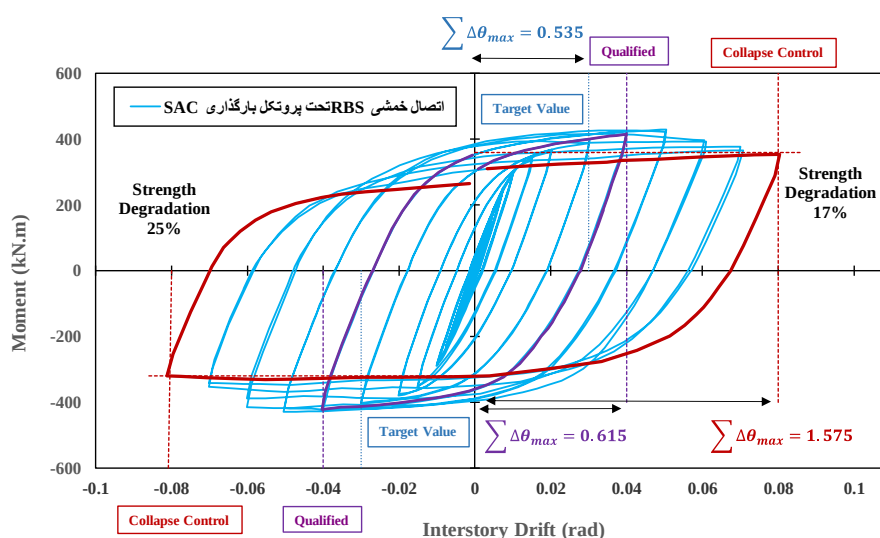
شکل ۱۹- منحنی رفتاری نمونه اول اتصال خمشی RBS تحت پروتکل بارگذاری ملی



شکل ۲۰- نمونه اول اتصال RBS در مقادیر هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه‌ی فروریزش پروتکل بارگذاری ملی

در ادامه بررسی‌های آزمایشگاهی این مطالعه نمونه دوم اتصال خمشی RBS تحت پروتکل بارگذاری SAC مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که پروتکل بارگذاری SAC ارزیابی و کنترل عملکرد اتصالات را در مقدار هدف و شرایط پذیرش صورت می‌دهد. در این مطالعه و به منظور بررسی عملکرد اتصالات خمشی در ستون‌های قوطی در تغییرمکان نسبی‌های بزرگ و همچنین امکان مقایسه تقاضای

پروتکل‌های بارگذاری، روند و گام‌های بارگذاری تا تغییرمکان نسبی ۰/۰۸ رادیان و تحمیل مجموع بازه‌های تغییرمکانی ۱/۵۷۵ رادیان ادامه پیدا کرده است. در شکل (۲۱) منحنی رفتاری آزمایشگاهی اتصال RBS تحت پروتکل بارگذاری SAC ارائه شده است. نمونه دوم اتصال خمشی در مقدار هدف و شرایط پذیرش افت مقاومتی نداشته است و رفتار و عملکرد اتصال مطلوب ارزیابی شده است.



شکل ۲۱- منحنی رفتاری نمونه دوم اتصال خمشی RBS تحت پروتکل بارگذاری SAC

در شکل (۲۲) رفتار اتصال در آزمایشگاه سازه تا رسیدن به مقدار هدف و شرایط پذیرش در آزمایشگاه سازه به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه در شکل ارائه شده است در مقدار هدف و شرایط پذیرش الگوی جاری شدگی و ریزش پوشش آهک در بال‌ها و جان تیر در محدوده‌ی عرض کاهش یافته متمرکز شده است و کمناش موضعی در بال‌های تیر در شرایط پذیرش بسیار ناچیز بوده است. شروع کمناش در یکی از بال‌های نمونه دوم در تغییرمکان نسبی ۰/۰۳ رادیان مشاهده شده است؛ و بال دیگر در تغییرمکان نسبی ۰/۰۴ رادیان نیز دچار کمناش موضعی ناچیز گردیده است. سرعت افزایش دامنه کمناش در تغییرمکان‌های نسبی ۰/۰۴ و ۰/۰۵ رادیان کم بوده است و از چرخه نخست تغییرمکان نسبی ۰/۰۶ رادیان سرعت افزایش دامنه کمناش زیاد گردید و منجر به افت مقاومت ۹/۲ درصدی در اتصال گردید. با افزایش مجموع بازه‌های تغییرمکانی در گام‌های تغییرمکانی میزان افت مقاومت در مجموع بازه‌های ۱/۴۱۵ و ۱/۵۷۵ رادیان برابر ۲۰ و درصد ۲۴/۶ ظرفیت خمشی بوده است.

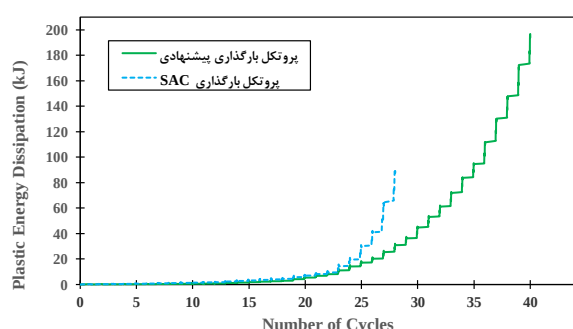
ترک‌ها و نقض‌ها در جوش‌های اتصال بال به جان تیر نمونه دوم در تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان و مجموع بازه‌های تغییرمکانی ۱/۴۱۵ رادیان در وسط ناحیه عرض کاهش یافته مشاهده شده است. با افزایش مجموع بازه‌های تغییرمکانی طول ترک در جوش‌های گسترش پیدا کرده است و در چرخه نخست تغییرمکان نسبی ۰/۰۸ رادیان پارگی در جوش مشاهده رخ داده است. پارگی جوش در فاصله حدود ۲۳ سانتی‌متری از بر-ستون و در ناحیه عرض کاهش یافته بوده است. لازم به ذکر است با وجود پارگی در جوش افت مقاومت در نمونه دوم اتصال خمشی RBS از ۲۰ درصد تغییرمکان نسبی ۰/۰۷ رادیان به ۲۴/۶ درصد تغییرمکان نسبی ۰/۰۸ رادیان رسیده است و ناپایداری کلی در زیرسازه مشاهده نشده است.

در ادامه مقایسه‌ای بین میزان انرژی پلاستیک مستهلک شده نمونه‌های آزمایشگاهی تحت پروتکل‌های بارگذاری ملی و SAC ارائه شده است. بر همین اساس در شکل ۲۳ میزان انرژی پلاستیک مستهلک شده در دو نمونه در مقادیر هدف دو پروتکل مقایسه شده است. نمونه اول در شرایط هدف پروتکل



شکل ۲۲- نمونه دوم اتصال RBS تا رسیدن به بیشینه بازه تغییرشکلی ۰/۰۸ رادیان پروتکل بارگذاری SAC

که پروتکل بارگذاری SAC شرایط خاصی را برای کنترل اتصالات در شرایط آستانه فرویزش پیشنهاد کرده‌است.



شکل ۲۳- انرژی پلاستیک مستهلک شده در نمونه‌های آزمایشگاهی RBS در مقادیر هدف پروتکل‌های بارگذاری

۴- بررسی عددی

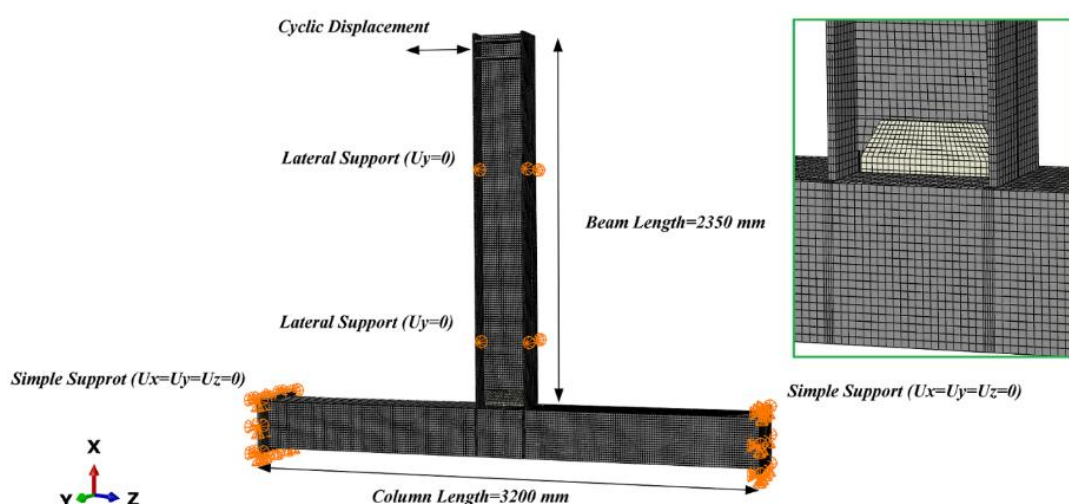
در ادامه این پروژه عملکرد تپ‌های دیگر اتصالات خمشی WUF-W و RBS متناظر با سازه‌ی ۷ طبقه این مطالعه، در شرایط هدف، پذیرش و فرویزش پروتکل ملی مورد بررسی و ارزیابی عددی قرار گرفته‌است. برای نیل به این هدف، ابتدا تپ آزمایشگاهی اتصالات خمشی WUF-W و RBS در نرم‌افزار عددی ABAQUS [۴۲] به صورت سه بعدی مدل‌سازی شد و منحنی‌های رفتاری عددی با منحنی‌های رفتاری آزمایشگاهی تحت پروتکل‌های بارگذاری ملی بررسی و مقایسه

بارگذاری ملی حدود ۱۹۶ کیلو ژول و نمونه دوم در شرایط هدف پروتکل بارگذاری SAC حدود ۸۹ کیلو ژول انرژی را مستهلک کرده‌است. این موضوع نشان از تقاضای انرژی اعمالی حدود ۲/۲ برابری پروتکل بارگذاری ملی نسبت به پروتکل بارگذاری SAC دارد. توانایی مستهلک کردن انرژی در روند پذیرش اتصالات خمشی مسئله بسیار مهمی است که باید در پذیرش اتصالات خمشی مبتنی بر پروتکل بارگذاری SAC مورد توجه ویژه قرار گیرد. ممکن است بسیاری از اتصالات مبتنی با دامنه‌های تغییرشکلی پروتکل بارگذاری SAC شرایط هدف را ارضا نمایند ولی توان استهلاک انرژی برای رسیدن به شرایط هدف پروتکل بارگذاری ملی را به خوبی نداشته باشند. همان طور که به تفصیل بیان گردید بیشینه دامنه تغییرشکلی دو پروتکل بارگذاری در شرایط هدف برابر ۰/۰۳ رادیان است. این در حالی است که پروتکل بارگذاری ملی منطبق با شرایط لرزه‌خیزی منطقه و همچنین در نظر داشتن پارامتر مدت زمان حرکت شدید زمین در انتخاب کاتالوگ لرزه‌ای منطقه، تعداد بالاتر از دامنه‌های تغییرشکلی متوسط را برای رسیدن به شرایط هدف در نظر گرفته‌است. مسئله حائز اهمیت دیگر دقت به موضوع کنترل آستانه فرویزش اتصالات خمشی بوده‌است، پروتکل بارگذاری ملی مبتنی بر تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی و مطالعات آماری شرایط کنترلی را برای بررسی اتصالات خمشی در تغییرمکان‌های بزرگ پیشنهاد کرده‌است؛ این در حالی است

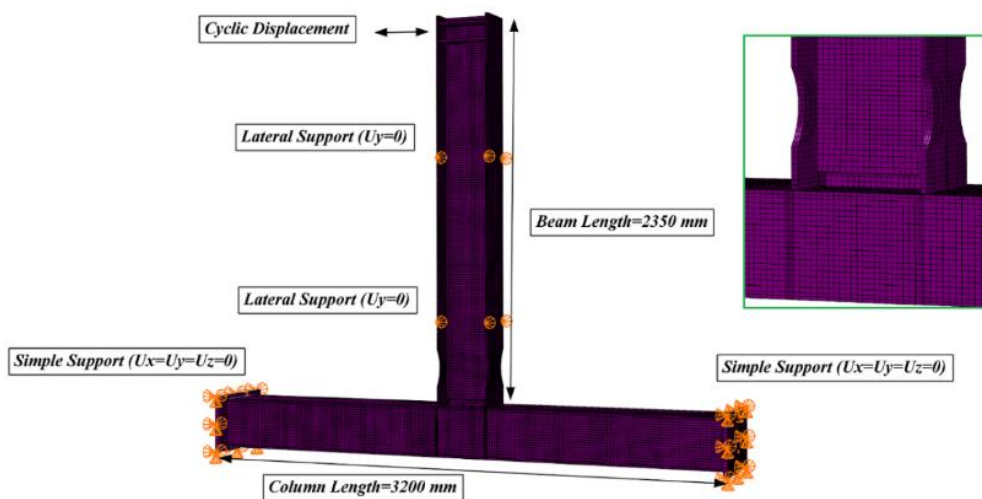
آزمایشگاه لحاظ شده است. برای مش بندی ضخامت های ورق ها در مدل سه بعدی حداقل ۳ شبکه مش در نظر گرفته شده است. شایان رفتار مصالح فولادی بر اساس نتایج تست کشش ورق های فولادی در نرم افزار عددی اختصاص یافت و مدول الاستیسیته فولاد و ضریب پواسون نیز به ترتیب ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. در شکل های (۲۴) و (۲۵) مدل عددی تیپ های آزمایشگاهی WUF-W و RBS در نرم افزار ارائه شده است.

شدند و پس از اطمینان از صحت مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی سایر تیپ های اتصالات خمشی نیز در نرم افزار مدلسازی و ارزیابی شدند.

شایان ذکر است برای مدلسازی تیپ آزمایشگاهی در نرم افزار، از المان های سه بعدی هشت گره ای با سه درجه آزادی استفاده شده است؛ در واقع المان های استفاده شده برای مدلسازی سه بعدی در نرم افزار از نوع C3D8R بوده است. شرایط تکیه گاهی و مهارجانبی زیر سازه، همچنین خصوصیات مصالح در مدل عددی کاملاً مطابق با شرایط واقعی نمونه در



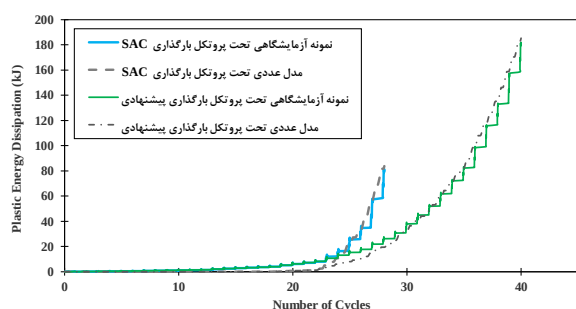
شکل ۲۴- مدل عددی تیپ آزمایشگاهی اتصال WUF-W در نرم افزار ABAQUS



شکل ۲۵- مدل عددی تیپ آزمایشگاهی اتصال RBS در نرم افزار ABAQUS

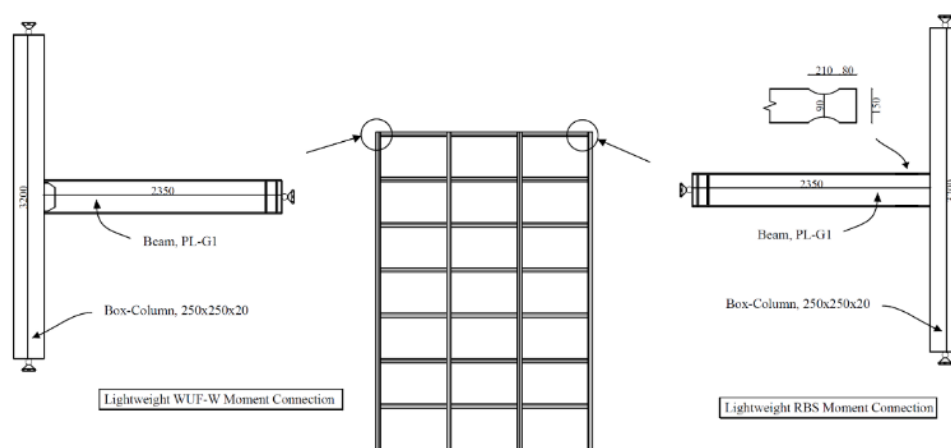
همچنین میزان انرژی مستهلک شده توسط دو پروتکل در مدل عددی بررسی گردید و در ادامه نتایج بررسی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. شایان ذکر است نتایج عددی انطباق

در ادامه تحلیل مدل سه بعدی در نرم افزار تحت پروتکل های بارگذاری ملی و SAC صورت گرفت و عملکرد لرزه ای این مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور منحنی های رفتاری



شکل ۲۷- مقایسه انرژی پلاستیک مستهلک شده در مدل عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال WUF-W در شرایط پذیرش پروتکل‌های بارگذاری ملی و SAC

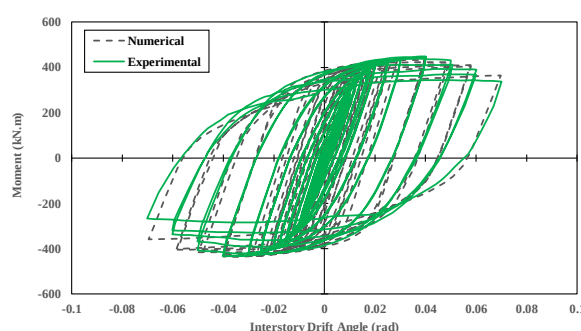
آزمایشگاهی تیپ‌های دیگر اتصالات خمشی WUF-W و RBS در قاب ۷ طبقه مطالعه، مطابق با شرایط مرزی زیرسازه در آزمایشگاه و خصوصیات رفتاری مصالح در نرم‌افزار مدل‌سازی شدند و عملکرد این تیپ‌ها نیز در شرایط هدف و پذیرش تحت دو پروتکل مورد بررسی قرار گرفته‌است. شایان ذکر است که همه‌ی مدل‌های عددی اتصالات خمشی پیش‌پذیرفته WUF-W و RBS شرایط هدف، پذیرش و فروریزش پروتکل ملی را ارضا کردند؛ لازم به ذکر است که تیپ‌بندی اتصالات مبتنی بر ابعاد مقاطع تیرهای و ستون‌های قاب مطالعه صورت گرفته‌است. در ادامه و برای نمونه بررسی‌های عددی صورت گرفته بر روی اتصال خمشی سبک WUF-W و RBS در قاب ۷ طبقه ارائه شده‌است. در شکل (۲۸) جزئیات ابعادی اتصالات سبک WUF-W و RBS به تصویر کشیده شده‌است.



شکل ۲۸- جزئیات مقاطع در اتصالات سبک WUF-W و RBS در قاب ۷ طبقه (ابعاد بر حسب میلیمتر هستند.)

متناظر با مشخصات تیر ورق PL-G1 است. با مدل‌سازی عددی تیپ سبک اتصالات خمشی WUF-W و RBS در نرم‌افزار عملکرد این اتصال در شرایط هدف و پذیرش پروتکل ملی

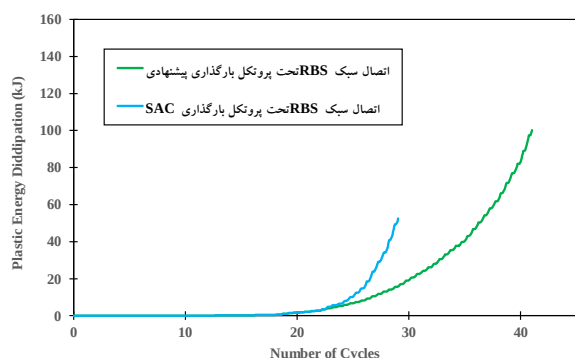
مناسبتی با نتایج واقعی نمونه‌ها در آزمایشگاه داشته‌است؛ همچنین مقایسه انرژی مستهلک شده در بررسی‌های عددی تفاوت میزان تقاضای انرژی دو پروتکل را برای اتصالات خمشی تصدیق کرده‌است. برای نمونه در شکل (۲۶) مقایسه منحنی رفتاری عددی و آزمایشگاهی اتصال خمشی WUF-W تحت پروتکل بارگذاری ملی ارائه شده‌است؛ و در شکل (۲۷) نیز، مقایسه میزان انرژی مستهلک شده در مدل عددی و آزمایشگاهی در شرایط هدف پروتکل بارگذاری ملی و SAC ارائه شده‌است. همان‌گونه که شکل‌های (۲۶) و (۲۷) به تصویر کشیده شده‌است. منحنی رفتاری مدل‌های عددی با نمونه‌های آزمایشگاهی انطباق قابل قبولی داشته‌است.



شکل ۲۶- منحنی رفتاری نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی اتصال خمشی WUF-W تحت پروتکل بارگذاری ملی

با توجه به انطباق و صحت مناسب نتایج عددی با نتایج

شایان ذکر است در تیپ سبک اتصالات خمشی WUF-W و RBS بعد ستون مربع قوطی شکل برابر ۲۵۰ میلیمتر و ضخامت آن برابر ۲۰ میلیمتر بوده‌است؛ همچنین ابعاد تیر نیز



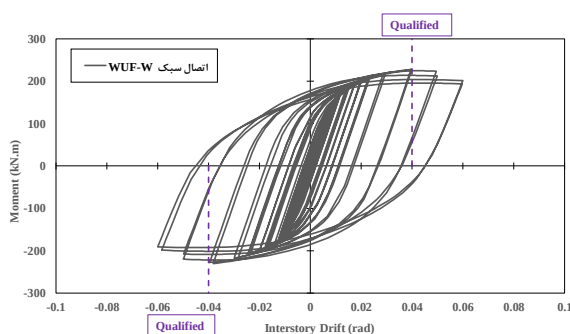
شکل ۳۲- انرژی پلاستیک مستهلک شده در تیپ سبک RBS در شرایط پذیرش پروتکل های بارگذاری و SAC

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

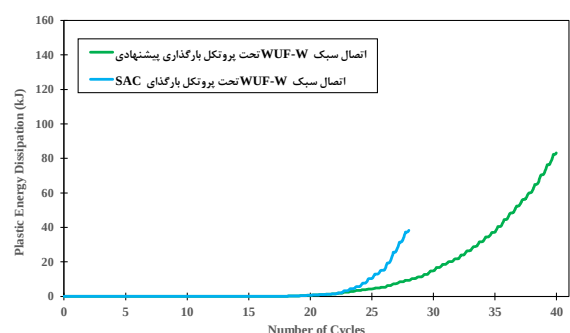
در این مطالعه ضمن تشریح روند تدوین پروتکل بارگذاری پیشنهادی (ملی) برای ارزیابی اتصالات خمشی فولادی، مطالعات آزمایشگاهی و عددی مختلفی به منظور کنترل و تطبیق مقادیر هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه فروریزش این پروتکل بر روی اتصالات خمشی پیش پذیرفته WUF-W و RBS صورت گرفته است. از طرفی با توجه به این که بررسی تفاوت تقاضای پروتکل ملی در مقادیر هدف و شرایط پذیرش با پروتکل بارگذاری SAC دارای اهمیت بوده است؛ دو نمونه اتصال WUF-W و دو نمونه اتصال RBS در شرایط کاملاً مشابه ساخته و تحت دو پروتکل بارگذاری مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفتند. شایان ذکر است که پروتکل بارگذاری ملی مبتنی بر مطالعات لرزه ای، عددی و آماری ضمن بررسی اتصالات خمشی در مقادیر هدف و پذیرش؛ شرایطی نیز برای کنترل آستانه فروریزش نیز پیشنهاد کرده است.

مقادیر هدف پارامترهای تغییرشکلی پروتکل بارگذاری با تعداد چرخه های تغییرشکلی ۴۰، تعداد چرخه پلاستیک ۲۲، مجموع بازه های تغییرشکلی ۰/۹۶ رادیان و بیشینه دامنه تغییرشکلی برابر ۰/۰۶ و بیشینه بازه تغییرشکلی برابر ۰/۰۳ رادیان پیشنهاد شده است. در پروتکل بارگذاری ملی برای شرایط پذیرش اتصالات در قاب های خمشی ویژه توصیه شده است، بعد از ارضای مقادیر هدف پروتکل بارگذاری در تغییر مکان نسبی ۰/۰۳ رادیان، اتصالات خمشی حداقل یک چرخه با تغییر مکان نسبی ۰/۰۴ رادیان بارگذاری شوند و مقاومت خمشی اتصال، کمتر از ۸۰ درصد مقاومت خمشی اسمی تیر نگردد. برای شرایط کنترل آستانه فروریزش نیز توصیه شده است، اتصالات خمشی در آزمایشگاه باید حداقل یک چرخه با تغییر مکان نسبی ۰/۰۷ رادیان یا در حقیقت حداقل

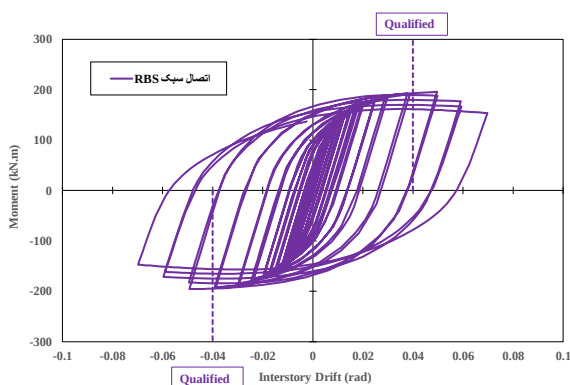
بررسی گردید. همان گونه که در شکل های (۲۹) و (۳۱) ارائه شده است؛ این اتصالات در مقدار هدف پروتکل بارگذاری ملی افت مقاومتی نداشتند و شرایط پذیرش را به خوبی ارضا کرده است. شایان ذکر است میزان انرژی مستهلک شده توسط اتصالات سبک تحت پروتکل بارگذاری ملی بیشتر از پروتکل بارگذاری SAC بوده است. که این مورد در شکل های (۳۰) و (۳۲) به خوبی مشخص شده است.



شکل ۲۹- منحنی رفتاری اتصال سبک WUF-W تحت پروتکل بارگذاری ملی



شکل ۳۰- انرژی پلاستیک مستهلک شده در اتصالات سبک WUF-W در مقادیر هدف پروتکل های بارگذاری ملی و SAC



شکل ۳۱- منحنی رفتاری اتصال سبک RBS تحت پروتکل بارگذاری ملی



مجموع بازه‌های تغییرشکلی $1/7$ رادیان را تحمل نمایند و ضمن دارا بودن پایداری کلی، مقاومتی خمشی کمتر از ۵۰ درصد مقاومت خمشی اسمی تیر نداشته باشند.

شایان ذکر است در بررسی‌های آزمایشگاهی، اتصالات خمشی WUF-W و RBS مقادیر هدف، شرایط پذیرش و کنترل آستانه فروریزش پروتکل بارگذاری ملی را به خوبی ارضا کرده‌است و مقادیر توصیه شده در پروتکل ملی با نتایج نمونه‌ها در آزمایشگاه تطبیق مناسبی داشته است. اتصالات خمشی در مقدار هدف و شرایط پذیرش بدون افت مقاومت بوده‌اند. و در شرایط کنترل آستانه فروریزش اتصال WUF-W افت مقاومتی ۳۷ درصدی و اتصال RBS افت مقاومتی ۲۵ درصدی را تجربه کرده‌است.

در این مطالعه ضمن بررسی و کنترل ویژگی‌های لرزه‌ای پروتکل بارگذاری ملی در اتصالات خمشی، تفاوت تقاضا این پروتکل با پروتکل بارگذاری SAC نیز مورد بررسی آزمایشگاهی و عددی قرار گرفت. تقاضای انرژی اعمالی، شروع و گسترش کمانش موضعی و الگوی جاری‌شدگی در محدوده مفصل پلاستیک در مقدار هدف و شرایط پذیرش پروتکل‌های بارگذاری ملی و SAC به دقت بررسی و مقایسه شدند؛ به عبارتی اثرات تفاوت تقاضای این دو پروتکل بارگذاری بر روی پارامترهای ظرفیتی و تغییرشکلی به خوبی بررسی و مقایسه شده‌است. لازم به ذکر است، شروع کمانش موضعی در بال‌ها و جان تیر و همچنین افت مقاومت در نمونه‌ی تحت پروتکل بارگذاری ملی نسبت به نمونه‌ی تحت بارگذاری SAC زودتر اتفاق افتاده‌است و عملکرد چشمه اتصال ستون‌های قوطی در محدوده‌ی تغییرمکان‌های بزرگ تحت دو پروتکل بارگذاری بسیار مطلوب ارزیابی شده‌است.

مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی و عددی؛ میزان انرژی پلاستیک مستهلک تحمیلی پارامتر تاثیر گذاری است که تاثیر مستقیم بر روی عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی دارد. در توسعه پروتکل بارگذاری ملی اثر پارامتر مدت زمان حرکت شدید زمین برای انتخاب کاتالوگ لرزه‌ای منطقه به خوبی در نظر گرفته شده‌است و با تحمیل دامنه‌های تغییرشکلی متوسط با تکرار بالا این اثر در گام‌های پروتکل بارگذاری نیز به خوبی لحاظ شده‌است. این در حالی است که سایر پروتکل‌های بارگذاری توجه ویژه به اثر گذاری مدت زمان حرکت شدید زمین در کاتالوگ لرزه‌ای بر روی میزان انرژی پلاستیک تحمیلی در تدوین پروتکل‌های بارگذاری نداشته‌اند. بر همین اساس تفاوت تقاضای انرژی دو پروتکل در مقدار هدف و پذیرش باید در بررسی‌های لرزه‌ای

اتصالات و مولفه‌های خمشی که پیش‌پذیرفته نیستند و با پروتکل بارگذاری SAC ارزیابی می‌شوند؛ دقت بیشتری لحاظ گردد. ممکن است بسیاری از مولفه‌های خمشی مقادیر دامنه‌ای هدف و پذیرش پروتکل بارگذاری SAC را ارضا نمایند ولی توانایی مستهلک کردن تقاضای انرژی پروتکل بارگذاری ملی را در شرایط پذیرش نداشته‌باشند.

نکته قابل ذکر دیگر در خصوص کنترل آستانه فروریزش در اتصالات خمشی است؛ با بررسی‌های لرزه‌ای و عددی بر روی سازه‌های این مطالعه، اتصالات خمشی باید مجموع بازه‌های تغییرشکلی حدود $1/7$ رادیان را بدون افت مقاومت ۵۰ درصدی تحمل نمایند تا عدم فروریزش این اتصالات تایید گردد. شایان ذکر است ذکر است که شرایط پیشنهادی پروتکل بارگذاری ملی برای کنترل آستانه‌ی فروریزش اتصالات خمشی تطبیق مناسبی با روند عملکرد اتصال پیش‌پذیرفته RBS و WUF-W داشته‌است. لازم است توجه بیشتری نسبت به شرایط اتصالات در تغییرمکان‌های بزرگ توسط پروتکل‌های بارگذاری دیگر نیز صورت گیرد. پروتکل بارگذاری SAC برای کنترل آستانه فروریزش شرایطی را توصیه نکرده‌است؛ با این حال با توجه بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی در این مطالعه و در نظر گفتن تفاوت گام‌های پروتکل بارگذاری ملی و SAC، توصیه می‌شود که اتصالات خمشی تحت پروتکل بارگذاری SAC باید حداقل یک چرخه با بازه تغییرشکلی $0/08$ رادیان بارگذاری شوند و ضمن دارا بودن پایداری کلی، افت مقاومت ۵۰ درصدی نداشته‌باشند.

مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی و عددی اتصالات خمشی و به منظور تامین شرایط کنترل آستانه‌ی فروریزش در اتصالات خمشی توصیه می‌گردد که الکترودهای فلز جوش در محدوده‌ی محافظت شده تیر از سری E-70 باشند. الکتروده فلز جوش دسته E-60 تنها برای کنترل اتصالات در مقدار هدف و شرایط پذیرش مناسب هستند.

در این مطالعه ضمن صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل عددی اتصال خمشی WUF-W و RBS، بررسی‌های عددی مختلف بر روی سایر تیپ‌های اتصال خمشی WUF-W و RBS تحت پروتکل بارگذاری ملی نیز صورت گرفته‌است؛ و مقادیر هدف، پذیرش و کنترل آستانه فروریزش پروتکل ملی بر روی این اتصالات خمشی نیز بررسی شده‌است. شایان ذکر است تیپ‌های مختلف عددی اتصالات خمشی شرایط و ضوابط پروتکل بارگذاری ملی را به خوبی ارضا کرده‌است. از نکات قابل توجه این مطالعه توجه به شرایط و عملکرد



- Standards Council of Canada.
- [8] Gatto, K. and Uang, C.M. (2003), "Effects of loading protocol on the cyclic response of wood frame shear walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 129, pp. 1384-1393.
- [9] Richards, P.W. and Uang, C.M. (2006), "Testing protocol for short links in eccentrically braced frames", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 132, pp. 1181-1182.
- [10] Shafei, B. and Zareian, F. (2008), "Development of a quasi-static loading protocol for displacement-sensitive nonstructural building components", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- [11] AISC/ANSI 341, (2000), *Seismic provisions for structural steel buildings*, Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, Inc.
- [12] FEMA-350, (2000), *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*, Prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [13] FEMA 355, (2000), *State of the art report on connection performance*, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency Management Agency, Washington, DC.
- [14] Kasai, K., Maison, B.F. and Mayangarum, A. (1999), "Effects of partially restrained connection stiffness and strength on frame seismic performance", *SAC/BD-99/17*, SAC Joint Venture.
- [15] Gilton, C.S., Chi, B. and Uang, C.M. (2000), "Cyclic testing of RBS moment connections: Weak axis configuration and deep column effects", *SAC report 00/23*, SAC Joint Venture.
- [16] AISC/ANSI 341-16, (2016), *Seismic provisions for structural steel buildings*, Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, Inc.
- [17] Yu, Q.S., Gilton, C.S. and Uang, C.M. (1999), "Cyclic response of RBS moment connections: Loading sequence and lateral bracing effects", *Report No. SSRP 99-13*, University of California at San Diego, La Jolla, CA.
- [18] Engelhardt, M.D., Winneberger, T., Zekany, A.J. and Potiraj, T.J. (1998), "Experimental investigations of dogbone moment connections", *Engineering Journal, AISC*, Vol. 35, pp. 128-139.
- [19] Engelhardt, M.D., Venti, M., Fry, G.T., Jones, S. and Holliday, S. (2000), "Behavior and design of radius cut reduced beam section connections", *A draft report of SAC task, 7.07a*, SAC Joint Venture.
- [20] Saneei Nia, Z., Ghassemieh, M. and Mazroi, A. (2013), "WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 88, pp. 90-108.
- [21] Saneei Nia, Z., Mazroi, A., Ghassemieh, M. and Pezeshki, H. (2014), "Seismic performance and comparison of three different I beam to box column joints", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 13, pp. 717-729.
- [۲۲] حسینی سوخته سربازی، م.، قاسمی، م. و میرقادر، س.ر. (۱۳۹۸)، "مقایسه عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی WUF-W و RBS در ستون‌های قوطی شکل تحت پروتکل‌های بارگذاری SAC و ATC-24"، *نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد*، شماره ۲۶، ص. ۹۱-۱۰۹.
- [23] Farooghi Mehr S.M.R. and Ghobadi, M.S. (2017), "Seismic

اتصالات خمشی در تغییرمکان نسبی‌های بزرگ بوده‌است، پروتکل بارگذاری ملی ضمن توجه به این شرایط عملکردی، توصیه‌هایی برای ارزیابی اتصالات در آستانه فروریزش ارائه داده‌است. توجه ویژه به عملکرد اتصالات خمشی در تغییرمکان‌های بزرگ در برنامه‌های آزمایشگاهی آینده محققان از موارد مهم و کاربری خواهد بود. با توجه به اهمیت و ویژگی‌های زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک از الزامات مطالعات آینده برای محققان توجه و توسعه پروتکل‌های بارگذاری حوزه‌ی نزدیک برای منطقه می‌باشد. که این امر در یک برنامه جامع که شامل فازهای مطالعاتی لرزه‌ای، عددی، آماری، اجزا محدود و آزمایشگاهی میسر خواهد شد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مطالعه از آقای مهندس جواهری رئیس هیئت مدیره کارخانه الکترو یزد بابت بذل توجه به پروژه علمی حاضر، کمال تشکر و قدردانی را بعمل می‌آورند؛ از مدیریت کارخانه الکترو یزد آقای سالم و مهندس عسگری و پرسنل و تکنسین‌های زحمت‌کش این کارخانه نیز سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین از پرسنل و تکنسین‌های آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

- [1] Krawinkler, H. (2009), "Loading histories for cyclic tests in support of performance assessment of structural components", *3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*. San Francisco, 15-16.
- [2] ATC-24, (1992), *Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures for buildings*, ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [3] Clark, P., Frank, K., Krawinkler, H. and Shaw, R. (1997), "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.
- [4] Federal Emergency Management Agency, (2007), *Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components*, FEMA Report 461, Washington.
- [5] Porter, L.M. (1987), "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.
- [6] Krawinkler, H., Parisi, F., Ibarra, L., Ayoub, A. and Medina, R. (2001), "Final report, development of a testing protocol for wood frame structures", *CUREE-Caltech Wood frame Project Report*, Stanford University, Stanford CA.
- [7] ISO, (1998), *Timber structures - joints made with mechanical fasteners - Quasi static reversed-cyclic test method*. ISO/TC 165 WD 16670, Sec-retariat, Ottawa:



- [37] Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975), "A study on the duration of strong earthquake ground motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, pp. 581–626.
- [38] McKenna, F., Fenves, G.L., Scott, M.H. and Jeremic, B. (2000), "Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees)", Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, CA.
- [39] AISC/ANSI 358-05s2-14, (2016), *Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications*, Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, Inc.
- [40] AWS, (2015), *Structural welding code-steel*. ANSI/AWS D1.1:2015, Miami, (FL): American Welding Society.
- [41] AWS, (2016), *Structural welding code-seismic supplement*. ANSI/AWS D1.8/D1.8M:2016, Miami, (FL): American Welding Society.
- [42] HKS, (2003), *ABAQUS user's manual version 6.3*, Pawtucket, RI: Habbit, Karlson and Sorensen, Inc.
- performance of retrofitted WFP connections joined to box column using ribs", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 137, pp. 297–310.
- [24] Mirghaderi, S.R. and Moradi, M. (2006), "Seismic behavior of panel zones in beam to column connections with non-planner webs in moment resisting steel frames", 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taiwan.
- [25] Mirghaderi, S.R., Torabian, S. and Keshavarzi, F. (2010), "I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column", *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 2034–2048.
- [۲۶] میرقادری، س.ر.، قاسمی، م. و سیفان، ف. (۱۳۹۲)، "بررسی حادی تقاضاهای موجود در چشمه اتصال تیر I شکل به ستون قوطی تحت خمش دوماحوره"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربرد فولادهای پراستحکام در صنعت سازه، تهران.
- [27] Alotaz, Y. and Schneider, S. (1996), "Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 40, pp. 95–127.
- [28] Ghobadi, M.S. and Jazany, R.A. (2019), "Seismic demand assessment of code-designed continuity plate in panel zone", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 17, pp. 891–926.
- [29] Pachoumis, D.T., Galoussis, E.G., Kalfas, C.N. and Christitsas, A.D. (2009), "Reduced beam section moment connection subjected to cyclic loading: Experimental analysis and FEM simulation", *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 216–223.
- [30] Song, Q.Y., Heidarpour, A., Zhao, X.L. and Han, L.H. (2015), "Performance of unstiffened welded steel I-beam to hollow tubular column connections under seismic loading", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 15, pp. 14500331–145003323.
- [31] Song, Q.Y., Heidarpour, A., Zhao, X.L. and Han, L.H. (2016), "Performance of double-angle bolted steel I-beam to hollow square column connections under static and cyclic loadings. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 16, pp. 14500981–145009820.
- [۳۲] مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲)، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمانهای فولادی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.
- [33] AISC/ANSI 360-16, (2016), *Commentary on the specification for structural steel buildings*. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, Inc.
- [34] Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.H. and Wald, D.J. (1995), "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake spectra*, Vol. 11, pp. 569–605.
- [35] Baker, J.W. (2007), "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, pp. 1486–1501.
- [۳۶] استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۳)، آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، ویرایش چهارم.