



بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات بال سوراخ شده تیر با آرایش مایل سوراخ‌ها

پیمان شادمان حیدری^۱، آرمن عظیمی نژاد^{۱*}، عبدالرضا سروقد مقدم^۲، محمد علی جعفری صحنه سرائی^۳

۱- گروه مهندسی عمران سازه، زلزله و ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

کلمات کلیدی:

آرایش سوراخ‌کاری مایل بال تیر

رفتار چرخه‌ای

شاخص کرنش پلاستیک معادل

شاخص فشار

شاخص میسر

خلاصه: اتصالات گیردار جوشی تقویت نشده در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج در ناحیه جوش‌های نفوذی بال تیر به ستون دچار شکست ترد و زودرس شدند، محققان به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات صلب، اتصالات با مقطع کاهش یافته تیر را پیشنهاد دادند. شکست ترد جوش نفوذی و کماتش پیچشی جانبی بال تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک در اتصالات کاهش یافته بال تیر، سبب شد تا شکل‌های اصلاح شده از این نوع اتصالات پیشنهاد گردند. از شکل‌های نوین این نوع اتصالات می‌توان به اتصالات سوراخ‌کاری شده بال تیر با ردیف‌های سوراخ‌کاری موازی اشاره کرد. در این مطالعه، به منظور بهبود عملکرد اتصالات با ردیف‌های سوراخ‌کاری موازی بال تیر، از آرایش‌های سوراخ‌کاری مایل بال تیر نسبت به محور تیر همراه با تغییر قطر سوراخ‌ها استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که در آرایش سوراخ‌کاری مایل، مقدار دوران پلاستیک مقطع در این نوع اتصال ۰/۰۵۹ رادیان است که ۷/۳ درصد بیشتر از دوران پلاستیک اتصال برش دایره‌ای بال تیر می‌باشد. همچنین در مناسب‌ترین نمونه آرایش سوراخ‌کاری مایل، شاخص کرنش پلاستیک معادل مرکز و گوشه خط جوش نفوذی به ترتیب تا ۹۲/۳ و ۸۷/۷ درصد نسبت به اتصال برش دایره‌ای بال تیر، کاهش یافته است. شاخص میسر مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال سوراخ‌کاری مایل به ترتیب تا ۴۵/۵ و ۳۹/۹ درصد نسبت به اتصال برش دایره‌ای بال تیر، کاهش یافته است که نمایانگر عملکرد مناسب‌تر و حساسیت کمتر این نوع اتصال در مقابل شکست ترد جوش نفوذی اتصال تیر به ستون در مقایسه با اتصال برش دایره‌ای بال تیر و اتصالات با آرایش سوراخ‌کاری موازی می‌باشد.

۱- مقدمه

رفع مشکل اتصالات صلب به کار گرفته شد، ایجاد فاصله در محل تشکیل مفصل پلاستیک از نواحی بحرانی اتصال تیر به ستون بود. یکی از روش‌های دستیابی به این شرایط کاهش مقطع تیر در فاصله مناسب از بر اتصال بود که این راهکار منجر به ایجاد اتصالاتی جدید به نام اتصالات با مقطع کاهش یافته تیر (RBS) گردید. هندسه‌های متنوع کاهش بال تیر برای جابه‌جا کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک در اتصالات با مقطع کاهش یافته جهت حفاظت جوش نفوذی تیر به ستون در برابر کرنش پلاستیک بیش از حد و بهبود ظرفیت شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌ای اتصال ارائه شده‌اند. یانگ و پوپوف [۴] برای کاهش مقطع تیر استفاده از سوراخ‌های دایره‌ای در بال تیر جهت کاهش تنش در اتصال تیر به ستون را پیشنهاد دادند. سوراخ‌کاری مناسب در بال تیر احتمال کماتش موضعی در بال تیر را کاهش می‌دهد. آن‌ها با هشت نمونه آزمایشگاهی الگوهای مختلفی از سوراخ‌کاری بال تیر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که آرایش سوراخ‌های ایجاد شده در بال تیر که نزدیک به جان تیر هستند، قادرند تا از امکان کماتش بال

در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج ساختمان‌های فولادی با اتصالات گیردار متحمل خسارات شدید شدند. بسیاری از محققین این خسارات را ناشی از رفتار ترد و شکننده جوش در اتصالات قاب‌های خمشی فولادی در اثر وجود تنش‌های چند محوری در ناحیه نزدیک به اتصال بال تیر به ستون تشخیص دادند. پس از زلزله نورتریج محققین تحقیقاتی را بر روی اتصالات قاب‌های خمشی فولادی شروع کردند. هدف آن‌ها بررسی نقاط شکست و شکل‌های پارگی در اتصالات جوشی بود [۲ و ۱]. هان و همکارانش [۳] رفتار چرخه‌ای اتصال مستقیم تیر به ستون و با اتصال جان پیچی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این اتصالات با نسبت‌های مقاومت چشمه اتصال بین ۰/۹ تا ۱/۶ قادر بودند تا ظرفیت تغییر شکل‌های دوران حدود ۰/۰۲ را فراهم کنند. این ظرفیت تغییر شکل نمی‌توانست عملکرد لرزه‌ای مناسب برای قاب‌های خمشی ویژه را تامین نماید. راهکاری که برای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Arminaziminejad@srbiiau.ac.ir



کاهش دهد. همچنین وجود چشمه اتصال قوی در قاب باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات بال سوراخ‌کاری شده تیر شده بود. در مدل‌های مورد بررسی اتصالات بال سوراخ‌کاری شده تیر با دو ردیف موازی، تمرکز تنش بر روی خط جوش نفوذی کامل تیر به ستون را کاهش داده بود. در مطالعه عددی دیگر رهنورد و همکارانش [۱۰] با تحلیل عددی هشت مدل اجزا محدود اتصال بال سوراخ‌کاری شده بال تیر با دو ردیف موازی، رفتار غیرخطی این اتصالات را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل سازی عددی نشان داد که تغییر شکل پلاستیک چشمه اتصال به میزان حدود ۲ تا ۳ درصد چرخش کل اتصال می‌باشد. علاوه بر این، جذب انرژی اتصال بال سوراخ‌کاری شده تیر با دو ردیف موازی در مقایسه با سایر انواع اتصالات مقطع کاهش یافته بیشتر بوده و امکان کم‌انرژی پیچشی جانبی در بال تیر سوراخ‌کاری شده به حداقل رسیده است. با توجه به بررسی مطالعات انجام شده، کم‌انرژی پیچشی جانبی بال تیر در ناحیه حفاظت شده تیر در اتصالات متداول RBS باعث افت مقاومت و سختی خمشی تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک و کاهش جذب انرژی در این ناحیه می‌گردد. در حالی که در اتصالات با مقطع سوراخ شده بال تیر (DFC) به شرط جلوگیری از شکست زود هنگام ناحیه بین سوراخ‌ها، می‌توان مقدار کم‌انرژی پیچشی جانبی را با تغییر موقعیت سوراخ‌ها و آرایش مناسب سوراخ‌کاری در بال تیر به حداقل رساند و میزان جذب و استهلاک انرژی و عملکرد لرزه‌ای اتصال را بهبود داد. احمدی جزنی [۱۱] در تحلیلی نشان داد که اتصال سوراخ‌کاری شده بال تیر با پیکربندی سوراخ‌های با قطر متفاوت می‌تواند جذب انرژی بیشتری در مقایسه با اتصال ورق بال سوراخ شده با سوراخ‌هایی با قطر مشابه داشته باشد. پیمان شادمان حیدری و همکارانش [۱۲] الگوی سوراخ‌کاری دندان‌اره‌ای به همراه سوراخ‌کاری میانی بال تیر معرفی کردند. آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی، رفتار لرزه‌ای این نوع اتصال را بررسی کردند و شاخص‌های خسارت را برای جوش نفوذی اتصال تیر به ستون را به دست آوردند. در اتصالات WUF، مقدار کرنش پلاستیک بر روی خط جوش نفوذی اتصال بال تیر به ستون مقدار قابل ملاحظه‌ای است که باعث تمرکز تنش و شکست ترد در جوش نفوذی اتصال تیر به ستون می‌گردد که با ایده تغییر موقعیت سوراخ‌ها و آرایش مناسب سوراخ‌کاری در بال تیر، می‌توان مقدار کرنش پلاستیک را در جوش نفوذی اتصال تیر به ستون حتی نسبت به اتصالات RBS متداول به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. هان کوک و مکزی [۱۳] مفهوم شکست و مکانیسم‌های محتمل آن را در فولادهای پرمقاومت بر اساس تنش چند محوره بیان کردند. کوینده و درلیان [۱۴ و ۱۵] برای پیش‌بینی شروع ترک

تیر جلوگیری نمایند، اما به علت تمرکز تنش در اطراف سوراخ‌ها، کرنش پلاستیک خیلی زود در سطح کوچکی در اطراف سوراخ‌ها افزایش می‌یابد و سبب تمرکز خسارت در این نواحی می‌گردند. آن‌ها کاهش سختی ناشی از سوراخ‌کاری بال تیر را بین ۲ تا ۸ درصد محدود کردند. نتایج بررسی‌های تجربی نشان دهنده ظرفیت چرخش پلاستیک اتصال به میزان قابل قبول ۰/۰۴۸ رادیان بود. این مطالعه نشان داد استفاده از مقاطع کاهش یافته با سوراخ‌کاری می‌تواند عملکرد لرزه‌ای مناسب برای قاب‌های خمشی فولادی ویژه را فراهم کند. فرخی و همکاران [۵] اتصال صلب با ورق پوششی سوراخ شده را بررسی کردند. در این مطالعه قطر سوراخ‌ها برابر ۰/۸ برابر ضخامت ورق پوششی و فاصله سوراخ‌ها ۱/۲۵ برابر ضخامت ورق پوششی در نظر گرفته شد. در بررسی‌های آزمایشگاهی این نوع اتصال، ظرفیت شکل‌پذیری دورانی بیش از مقدار هشت را از خود نشان دادند. وتر و همکارانش [۶ و ۷] با تست چهار نمونه آزمایشگاهی، عملکرد لرزه‌ای اتصال مستقیم بال سوراخ شده به ستون را با انجام سوراخ‌کاری منظم در دو ردیف موازی تحت بارگذاری رفت و برگشتی مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های آزمایشگاهی با دو الگوی سوراخ‌کاری موازی، در دو حالت با چشمه اتصال ضعیف و قوی آزمایش شدند. این مطالعه نشان داد که کاهش مقطع تیر از طریق سوراخ‌کاری بال تیر به تنهایی می‌تواند باعث ایجاد ظرفیت چرخش پلاستیک اتصال تا مقدار ۰/۰۵ رادیان شود. همچنین چشمه اتصال می‌تواند دوران پلاستیک تا میزان ۰/۰۵۷ رادیان را بدون شکست در وجه ستون تحمل نماید. لی و همکاران [۸] رفتار لرزه‌ای اتصالات مقطع کاهش یافته با سوراخ‌کاری را توسط چهار نمونه آزمایشگاهی تمام مقیاس و پیشنهاد چهار الگوی سوراخ‌کاری متفاوت بال تیر بررسی نمودند. در این آزمایشات از اتصال پیچی ورق انتهایی با پیچ‌های پر مقاومت برای اتصال تیر به ستون استفاده شده بود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که دوران پلاستیک اتصالات کاهش یافته با سوراخ‌کاری بال تیر بیشتر از اتصالات با مقطع کاهش یافته متداول از طریق برش دایره‌ای است. آتش‌زبان و همکاران [۹] در مطالعه عددی در اتصال مستقیم تیر به ستون، پارامترهایی خسارت نظیر کرنش پلاستیک معادل، شاخص سه محوره و شاخص گسیختگی را برای اتصالات با مقطع کاهش یافته با سوراخ‌کاری بال تیر با دو ردیف موازی و اتصالات مقطع کاهش یافته با برش دایره‌ای، مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج عددی نشان داد که اتصالات بال سوراخ‌کاری شده تیر با دو ردیف موازی می‌تواند بیش از ۴۰ درصد از کرنش پلاستیک معادل و شاخص گسیختگی را بر روی جوش‌های شیاری اتصال تیر به ستون در مقایسه با اتصال مستقیم

رفتار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان اتصال ترسیم گردید. همچنین شاخص‌های خسارت کرنش پلاستیک معادل، شاخص فشار، شاخص میسر بر روی خط جوش نفوذی اتصال بال تیر به ستون برای الگوهای موازی و مایل سوراخ‌کاری بال تیر با تحلیل‌های عددی مقایسه گردید. همچنین در این اتصالات تامین شرایط مورد نظر آیین‌نامه در قاب‌های خمشی فولادی ویژه بررسی شد و نتایج آن برای اتصالات سوراخ‌کاری شده بال تیر DFC با اتصالات مستقیم WUF و اتصالات متداول کاهش یافته RBS با برش دایره‌ای بال تیر مقایسه گردید. تغییر آرایش سوراخ‌کاری از موازی به مایل و بهره‌گیری از افزایش سطح مقطع خالص بال تیر در محل‌های سوراخ‌کاری با استفاده از مسیرهای مایل گسیختگی، ظرفیت خمشی تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک افزایش داد و توزیع کرنش پلاستیک را بر روی ناحیه طول مفصل پلاستیک بهبود بخشید و گسترده‌تر کرد. با توجه با امکان اجرای سوراخ‌کاری با مگنتیک دریل‌های موجود شرایط برای هر نوع سوراخ‌کاری از بابت شکل و قطر سوراخ و موقعیت قرارگیری با سرعت و دقت مناسبی فراهم می‌باشد. سرعت و دقت اجرا در روش‌های سوراخ‌کاری نسبت به روش برش دایره‌ای بال تیر RBS متداول بالاتر بوده و در روش‌های مقاوم‌سازی اتصالات بسیار کارآمد و اقتصادی می‌باشد.

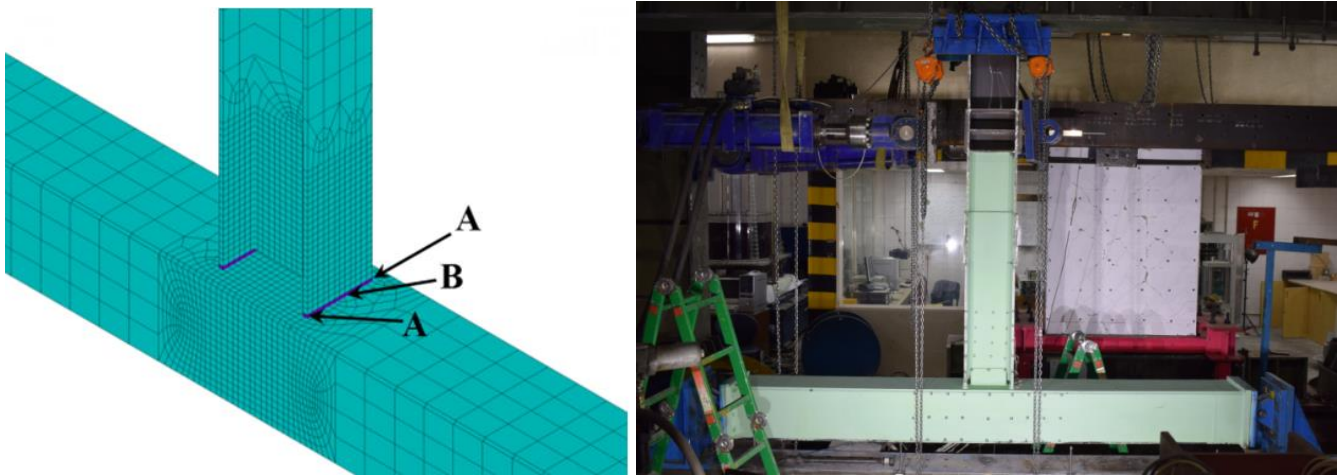
۲- بررسی آزمایشگاهی اتصال مستقیم بال تیر به ستون

به منظور بررسی دقت و راستی آزمایشی نتایج تحلیلی و ارزیابی دقیق رفتار لرزه‌ای اتصال سوراخ‌شده بال تیر با مقطع I شکل به ستون با مقطع باکس، یک نمونه آزمایشگاهی تمام مقیاس اتصال WUF ساخته شد. این نمونه به صورت اتصال مستقیم بال تیر به ستون (WUF) بدون سوراخ‌کاری بال تیر ساخته شد. شکل ۱ تصویر و شمای کلی پیکربندی نمونه‌های آزمایشگاهی را در قاب عکس العمل پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) نشان می‌دهد.

با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و مشخصات هندسی قاب عکس العمل طول ستون برابر ۳۰۹۰ میلی‌متر و طول تیر ۲۱۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. محل اثر نیروی جک از بر ستون برابر ۱۵۳۷ میلی‌متر بود. با توجه به حداکثر ظرفیت جک ۵۰ تن و ضوابط طراحی آیین‌نامه ۱۶-۳۶۰ AISC [۱۷ و ۱۶]، ۱۶-۳۴۱ AISC [۱۸] و FEMA۳۵۵d [۱۹] ابعاد و ضخامت ورق‌های مورد نیاز تیر و ستون محاسبه گردید. برای تامین مقاومت برشی اتصال از ورق برش‌گیر جوشی استفاده شد. در طراحی چشمه اتصال با توجه به شرایط FEMA۳۵۵d [۱۹] نسبت $\frac{PZ}{V_y}$ برابر ۰/۷ در نظر گرفته شد.

خوردگی در مصالح شکل‌پذیر مانند فولاد، مدلی تحت عنوان CVGM ارائه دادند. بر اساس این مدل پتانسیل ترک شکست در نقطه‌ای از فلز زمانی آغاز می‌شود که کرنش معادل پلاستیک (EPEQ) از حد معینی از کرنش که بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی بیشتر شود. این حد از کرنش بر اساس مدل پیشنهادی تابعی است از شرایط تنش سه محوره و تنش وون میسر می‌باشد.

در این تحقیق به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات مقطع کاهش یافته تیر از طریق سوراخ‌کاری بال تیر در دو ردیف موازی با جلوگیری از کماتش موضعی و شکست زودرس بال تیر در حد فاصل بین سوراخ‌ها و چیدمان مناسب سوراخ‌های بال تیر سعی گردید تا رفتار چرخه‌ای اتصال بهبود یابد. برای این منظور اتصالات با مقطع کاهش یافته با سوراخ‌کاری بال در دو ردیف در راستای طولی تیر با آرایش مایل و سوراخ‌کاری با قطرهای متغیر ایجاد گردیدند تا توزیع کرنش‌های پلاستیک در محدوده وسیع‌تر بال تیر نسبت به سوراخ‌کاری با ردیف موازی سوراخ‌ها انجام گرفته و از تمرکز تنش و شکست زود هنگام نواحی بین سوراخ‌ها جلوگیری شود. همچنین با این آرایش تلاش گردید تا شاخص‌های خسارت در نواحی بحرانی اتصال، نظیر ناحیه جوش‌های نفوذی اتصال بال تیر به ستون در مقایسه با آرایش‌های مطالعه شده پیشین به شکل سوراخ‌های موازی کاهش یابد. آرایش سوراخ‌کاری مایل بال تیر با قطرهای متغیر و ایجاد خروج از مرکزیت در موقعیت مراکز سوراخ‌ها، می‌تواند سطح مقطع موثر مسیرهای بحرانی در حد فاصل سوراخ‌ها را افزایش داده که پیامد آن افزایش مقاومت خمشی ناحیه مفصل پلاستیک، جلوگیری از کاهش شدید سختی تیر، بهبود رفتار غیرخطی مصالح در ناحیه مفصل پلاستیک، توزیع مناسب کرنش پلاستیک در محدوده مفصل پلاستیک و بین سوراخ‌های ایجاد شده در بال تیر، کاهش کرنش پلاستیک در محل جوش نفوذی اتصال بال تیر به ستون و در نهایت حداکثر جذب انرژی توسط مفصل پلاستیک می‌باشد. برای بررسی این موضوع از مدل‌سازی عددی و انجام تحلیل‌های غیرخطی این اتصالات به کمک نرم افزار اجزا محدود استفاده شد. برای کنترل صحت نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی مدل‌های نرم افزاری اجزا محدود، نتایج به دست آمده با نمونه اتصال مستقیم با مقطع ستون باکس که مورد آزمایش قرار گرفته بود، مقایسه شد. سپس با تغییر موقعیت سوراخ‌ها و قطر آن‌ها در مدل‌های عددی، تلاش گردید تا عملکرد لرزه‌ای و رفتار چرخه‌ای اتصال با مقطع سوراخ‌کاری شده بال تیر با آرایش مایل سوراخ‌ها بررسی شود و مناسب‌ترین آرایش آن مشخص گردد. برای بررسی عملکرد چرخه‌ای اتصالات پیشنهادی منحنی



شکل ۱. نمونه آزمایشگاهی اتصال WUF، مدل‌سازی اتصال WUF در نرم افزار اجزاء محدود و نقاط بحرانی

Fig. 1. Laboratory example of WUF connection, WUF connection modeling in finite element software and critical points

جدول ۱. مشخصات هندسی مقاطع تیر و ستون و ورق‌های استفاده شده

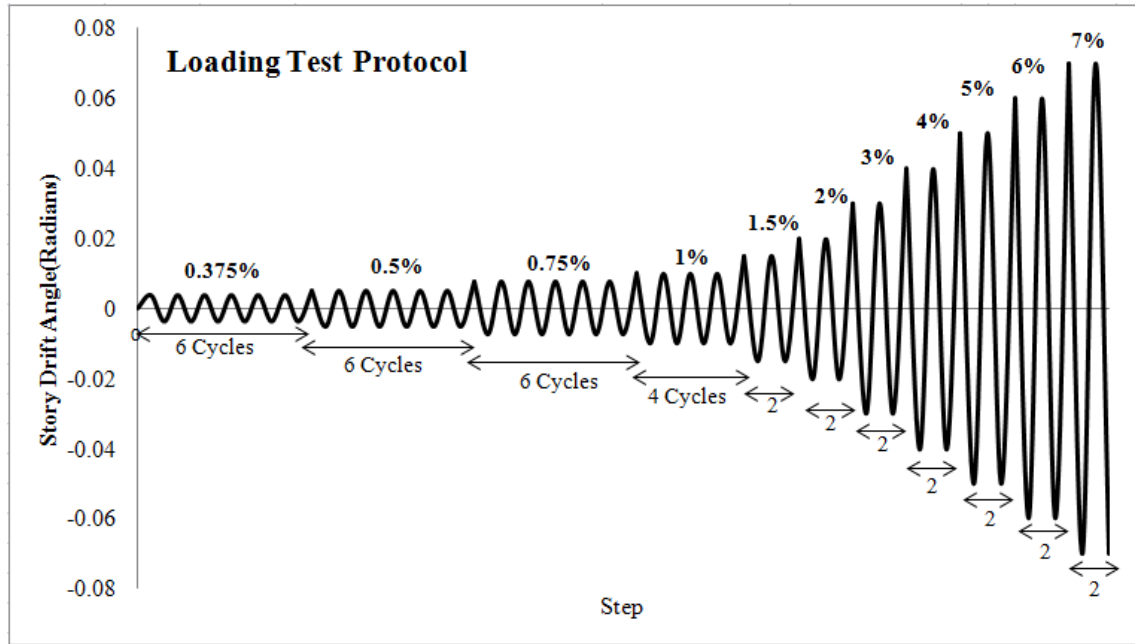
Table 1. Geometric specification of beam, column and steel plates

عمق	ارتفاع	عرض	ضخامت	ضخامت	ضخامت	ضخامت	ضخامت	ضخامت	ضخامت	نمونه
مقطع ستون (میلی‌متر)	مقطع تیر (میلی‌متر)	بال تیر (میلی‌متر)	ورق انتهایی (میلی‌متر)	ورق پیوستگی (میلی‌متر)	ورق برش‌گیر (میلی‌متر)	جان ستون (میلی‌متر)	بال ستون (میلی‌متر)	جان تیر (میلی‌متر)	بال تیر (میلی‌متر)	WUF
۴۰۰	۳۰۰	۲۲۰	۳۰	۱۵	۱۰	۱۵	۱۵	۱۰	۱۵	

آیین‌نامه ۱۶-۳۴۱ AISC [۱۸] یک سری مقادیر تغییر مکانی با سیکل‌های تکراری معرفی کرده است. این بارگذاری‌ها از نوع تغییر مکان می‌باشد که عموماً بر حسب دوران بین طبقه تعریف شده است. این آیین‌نامه برای بررسی آزمایشگاهی لرزه‌ای حوزه دور زلزله اتصالات یک الگوی مشخص بارگذاری به عنوان استاندارد تعیین کرده است. در شکل ۲، محوری عمودی میزان بارگذاری، برحسب میزان تغییر مکان نسبی طبقه و محوری افقی پله‌های بارگذاری می‌باشد. بر این اساس سه دسته پله شش تایی بارگذاری با زاویه‌های چرخش طبقه ۰/۳۷۵ در صد رادیان، ۰/۵ در صد رادیان، ۰/۷۵ در صد رادیان در ابتدای الگوی بارگذاری قرار داده شده است تا پتانسیل شکست در چرخه‌های رفتار خطی بررسی گردد. پله چهارم و پنجم به ترتیب

با توجه به ضوابط طراحی شکل‌پذیر آیین‌نامه ۱۶-۳۴۱ AISC [۱۸] و آیین‌نامه طراحی اتصالات ۱۶-۳۸۵ AISC [۲۰] از ورق پیوستگی استفاده شد. بر اساس طراحی انجام شده، مشخصات هندسی مقاطع تیر، ستون، جزئیات ورق‌های استفاده شده در برش‌گیر و ورق پیوستگی در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به اهمیت رفتار لرزه‌ای اتصالات خمشی و همچنین ارزیابی دقیق مقادیر سختی، مقاومت و شکل‌پذیری این نوع اتصالات فولادی نیاز به منحنی‌های هیستریزس لنگر-دوران آن‌ها می‌باشد. برای این منظور از الگوی بارگذاری چرخه‌ای مطابق استاندارد ۱۶-۳۴۱ AISC [۱۸] (شکل ۲) استفاده شده است. برای شبیه‌سازی بارهای لرزه‌ای، ویرایش لرزه‌ای



شکل ۲. الگوی بارگذاری به کار رفته برای انجام آزمایش

2. Loading pattern used to perform the test

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح به کار رفته در نمونه‌های آزمایشگاهی

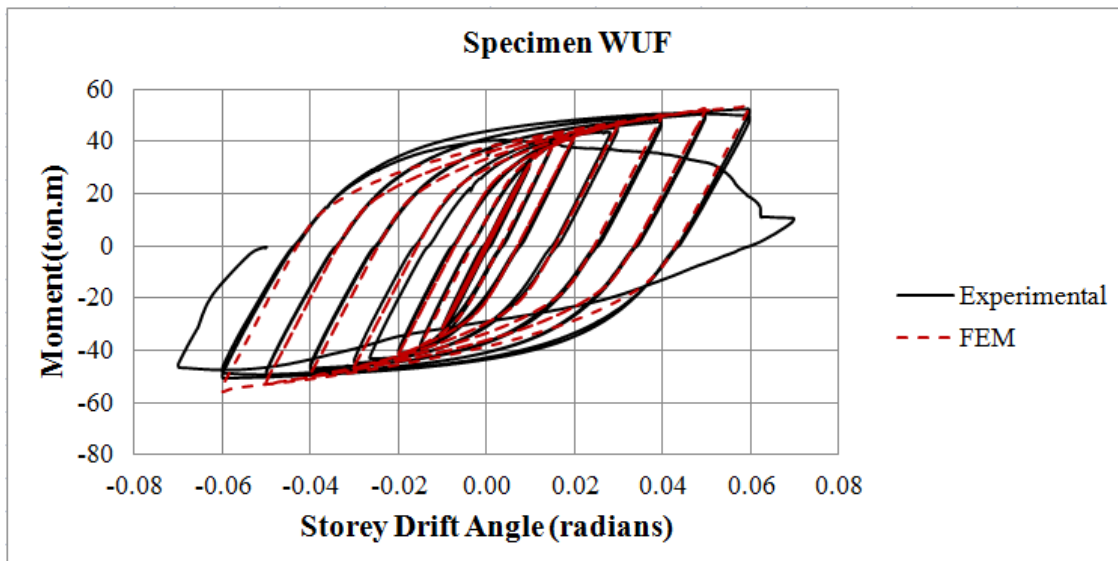
Table 2. Mechanical properties of the construction materials

جوش (ER70S-6,1.2mm)			جوش (EM12,4mm)			جان ستون		جان تیر		تست کشش	نمونه آزمایشگاهی
ازیاد طول (%)	F_u	F_y	ازیاد طول (%)	F_u	F_y	F_u	F_y	F_u	F_y		
۲۲	۵۷۳/۷	۴۲۱/۷	۲۶	۵۰۵	۴۱۱/۹	۴۰۱/۷	۲۴۸/۲	-	-	C1-t15	WUF
						-	-	۳۹۹/۸	۲۸۱/۲	C1-t10	

واحد: مگاپاسکال، N/mm^2

شد. جهت تعیین مشخصات مکانیکی ورق‌ها نمونه‌های لازم گرفته شده و بر اساس استاندارد ASTM-A۳۷۰-۱۴ [۲۱] آزمایش کشش بر روی آن‌ها انجام شد. برای اتصال ورق‌های بال و جان در تیر و ستون از جوش گوشه استفاده شده است. مشخصات مقاومت مصالح ورق‌های فولادی و فلز جوش‌ها به شرح جدول ۲ است.

۰/۰۱ و ۰/۰۱۵ رادیان می‌باشد. از این پله به بعد یک درصد یک درصد به زاویه چرخش طبقه اضافه می‌شود که با توجه به امکانات و تجهیزات آزمایشگاه و ظرفیت اتصال می‌تواند تا ۰/۰۷ رادیان چرخش اتصال، نمونه‌ها را مورد آزمایش قرار داد. برای ساخت قطعات فولادی تیر و ستون از فولاد ST۳۷ استفاده



شکل ۳. مقایسه رفتار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی اتصال WUF

Fig. 3. Comparison of cyclic behavior of experimental and analytical samples of WUF connection

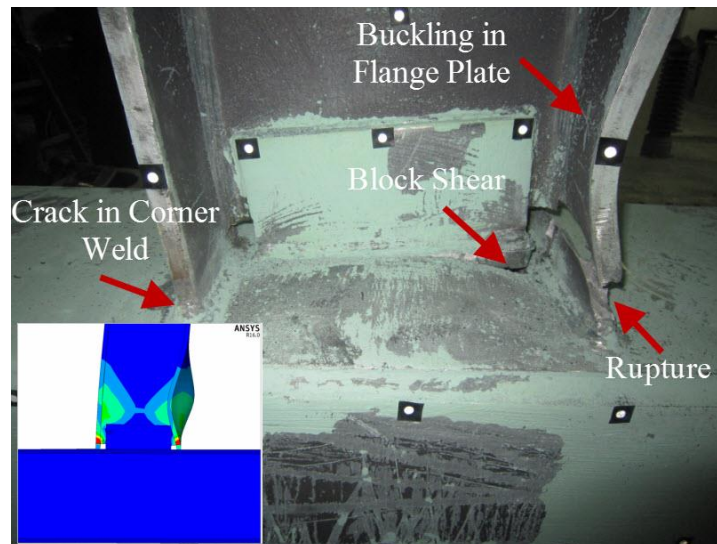
گردید. مدل‌های تحلیلی تمرکز کرنش پلاستیک معادل را در محل‌های گسیختگی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده که بیانگر تطابق مناسب بین مدل‌های عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. در شکل ۴ نحوه پارگی هر دو نوع اتصال در نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است.

مقایسه پاسخ لنگر-دوران مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی نشان دهنده تطابق مناسب در میزان چرخش پلاستیک، مقاومت خمشی مقطع، سختی الاستیک و شیب قسمت سخت شدگی مجدد این مدل‌ها می‌باشد. همچنین در شکل ۵ نحوه توزیع کرنش پلاستیک معادل مدل‌های تحلیلی و شکل ناحیه ریزش آهک ناشی از تغییر شکل پلاستیک فولاد در نمونه آزمایشگاهی WUF نشان داده شده است. الگوی کرنش پلاستیک مدل تحلیلی و شکل ریزش آهک بروی آزمایش نشانگر توزیع کرنش‌ها در مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی است. همچنین همخوانی قابل توجهی بین رنگ پدیدگی آهک در آزمایش و توزیع کرنش پلاستیک در شکل مدل تحلیلی وجود دارد.

در نمونه آزمایشگاهی WUF بیشترین مقدار کرنش در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال بال تیر به بال ستون در راستای طول تیر در دوران $0/06$ رادیان به ترتیب برابر $9555 \mu m/m$ و $5686 \mu m/m$ رخ داده است. همچنین در نمونه آزمایشگاهی WUF بیشترین مقدار کرنش در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی در راستای خط جوش نفوذی اتصال بال تیر به بال

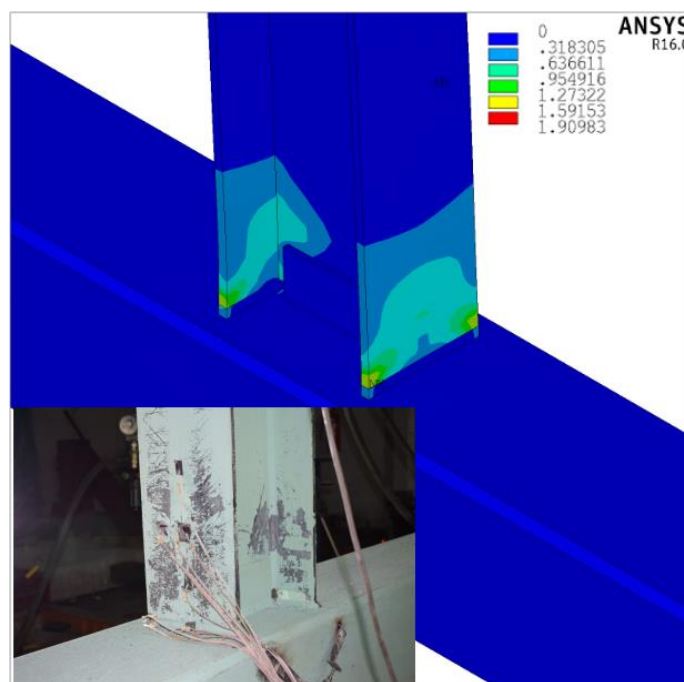
نمونه‌های مورد بررسی در نرم افزار اجزاء محدود ANSYS R۱۶.۰ [۲۲] مدل‌سازی شدند. در شکل ۱ مدل تحلیلی اتصال WUF نشان داده شده است. در این مدل‌ها بخش‌های فولادی با استفاده از المان SOLID۱۸۵ ID۱۸۵ مدل‌سازی شد. المان SOLID۱۸۵ یک المان هشت گرهی با سه درجه آزادی در هر گره است. این المان برای تجزیه و تحلیل پوسته‌های نازک و نسبتاً ضخیم مناسب است [۲۲]. جهت راستی آزمایشی مدل تحلیلی اجزا محدود غیرخطی، رفتار چرخه‌ای به دست آمده از مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی مقایسه شدند. منحنی‌های چرخه‌ای به دست آمده از آزمایش و مدل‌های عددی در شکل ۳ نشان داده شده اند. نتایج بیانگر دقت مناسب و انطباق قابل قبول مقادیر به دست آمده از مدل‌های عددی در مقایسه با نتایج به دست آمده از بررسی‌های تجربی است.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در پاسخ لرزه‌ای آزمایشگاهی و تحلیلی اتصال WUF کاهش مقاومت و سختی ناچیز تا دوران پلاستیک ۶ درصد رادیان مشاهده گردید. نتایج آزمایش نشان داد که در اتصال WUF حداکثر دوران نسبی طبقه به ۶ درصد رسیده است. گسیختگی در اتصال WUF در لبه جوش نفوذی بال تیر به ستون همراه با قلوله کن شدن بال ستون در محل اتصال ورق برش‌گیر اتفاق افتاده است. همچنین در نزدیکی بر ستون کمانش بال تیر در لحظه گسیختگی مشاهده



شکل ۴. نحوه شکست اتصالات مورد بررسی اتصال WUF

Fig. 4. Examining rupture WUF connection

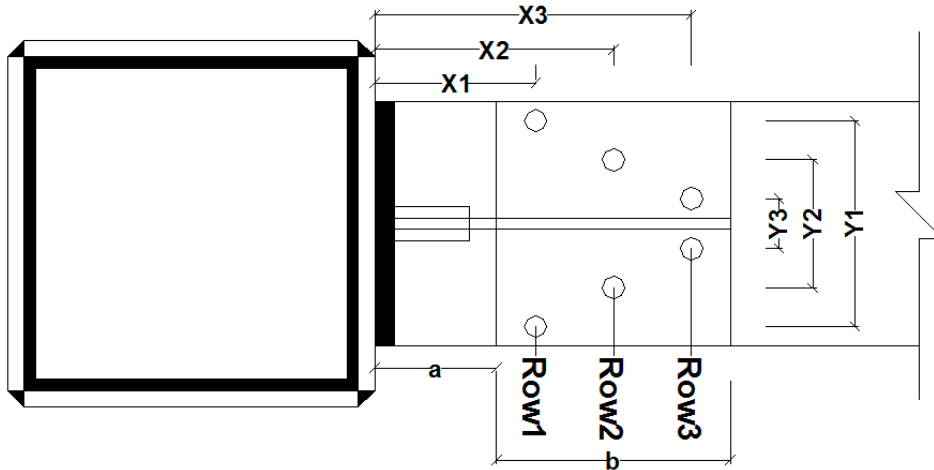


شکل ۵. توزیع کرنش پلاستیک معادل مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در دوران ۰/۰۴ رادیان

5. Equivalent plastic strain in numerical and experimental models of WUF connection in the story drift angle of 0.04 radians

داده است. همچنین در نمونه آزمایشگاهی WUF بیشترین مقدار کرنش در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی در راستای خط جوش نفوذی اتصال بال تیر به بال ستون در دوران ۰/۰۶ رادیان به ترتیب برابر $458 \mu m/m$ و $1020 \mu m/m$ رخ داده است.

ستون در دوران ۰/۰۶ رادیان به ترتیب برابر $623 \mu m/m$ و $1282 \mu m/m$ رخ داده است. در نمونه تحلیلی WUF بیشترین مقدار کرنش در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال بال تیر به بال ستون در راستای طول تیر در دوران ۰/۰۶ رادیان به ترتیب برابر $850 \mu m/m$ و $6726 \mu m/m$ رخ



شکل ۶. نحوه مشخص کردن موقعیت و قطر سوراخ‌ها در بال تیر

Fig. 6. Determination of the location of holes and their diameters

خطی از بر ستون انجام شده است. شایان ذکر است الگوی سوراخ‌ها به گونه‌ای بوده است که در هر ردیف از سوراخ‌ها با افزایش فاصله مرکز سوراخ نسبت به بر ستون قطر سوراخ افزایش پیدا کند. این الگو بر این اساس انتخاب شده است که لنگر تقاضای لرزه‌ای با فاصله گرفتن از بر ستون کاهش پیدا می‌کند و ممان اینرسی موثر در مقطع سوراخ‌کاری شده بال تیر با افزایش فاصله از بر ستون کاهش پیدا کند، که این هدف با افزایش قطر سوراخ ایجاد شده در بال تیر با فاصله گرفتن از بر ستون تامین می‌گردد. در الگوهای سوراخ‌کاری بال تیر از دو ردیف موازی و مایل سوراخ‌کاری در راستای طولی بال تیر با قطرهای ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ میلی‌متر استفاده شده است که به ترتیب ۱۸٪، ۲۳٪، ۲۷٪، ۳۶٪، ۴۱٪، ۴۵٪ و ۵۰٪ کاهش در سطح مقطع بال تیر ایجاد می‌کنند. بر اساس استاندارد ملی آمریکا ۱۶-۳۵۸ [۲۰] فاصله سوراخ‌ها نسبت به بال ستون و نسبت به یکدیگر به گونه‌ای لحاظ شد که ضوابط $0.5b_{bf} \leq a \leq 0.75b_{bf}$ و $0.65d_b \leq b \leq 0.85d_b$ تامین گردد. مقادیر a و b در شکل ۶ نشان داده شده است. جهت مشخص کردن موقعیت سوراخ‌ها و همچنین تعیین قطر سوراخ‌های استفاده شده در مدل‌سازی الگوهای پیشنهادی سوراخ‌کاری بال تیر از شکل ۶ استفاده شده است. با توجه به طول مفصل پلاستیک، میزان کاهش در سطح مقطع بال تیر و همچنین تامین حداقل فاصله بین سوراخ‌ها می‌توان از آرایش پیشنهاد شده در شکل ۶ استفاده کرد. در جدول ۳ و ۴، قطر و موقعیت سوراخ در الگوهای پیشنهادی سوراخ‌کاری بال تیر نشان داده شده است.

۳- مدل‌سازی اتصالات مقطع کاهش یافته با سوراخ‌کاری دو ردیف موازی و مایل در راستای طولی بال تیر

به منظور بررسی آرایش‌های متنوع سوراخ‌کاری در عملکرد اتصالات سوراخ‌کاری شده DFC، ۱۲ مدل تحلیلی اجزا محدود با آرایش‌های متفاوت در قطر و فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر و و یک مدل RBS در نرم افزار ANSYS R۱۶.۰ [۲۲] مدل‌سازی شد.

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای و مقایسه نتایج عددی حاصل از تحلیل غیرخطی اتصالات سوراخ‌کاری شده بال تیر با اتصالات WUF و RBS متداول، بر اساس آیین‌نامه ۱۶-۳۵۸ AISC [۲۰] یک نمونه از اتصالات RBS در قاب‌های خمشی ویژه طراحی گردید. در نمونه تحلیلی RBS طول تیر و ستون به ترتیب برابر ۱۵۳۷ و ۳۰۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین مقطع تیر و ستون مانند نمونه‌های آزمایشگاهی WUF لحاظ گردید. در این اتصال، فاصله افقی بر ستون تا شروع محل کاهش مقطع (a)، طول قسمت برش دایره‌ای RBS (b) و عمق برش در مرکز مقطع کاهش یافته تیر (c) به ترتیب برابر ۱۱۰، ۲۱۰ و ۴۷/۳ میلی‌متر طراحی گردید. الگوی آرایش سوراخ‌ها شامل بر قطر سوراخ‌ها، شکل ردیف سوراخ‌ها و فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر مشابه با آزمایش وتر و همکاران [۶ و ۷] قرار داده شده است. در این مطالعه صرفاً شکل ردیف سوراخ‌ها و ترکیب گزینه‌های متفاوت موقعیت سوراخ‌های استاندارد در بال تیر مورد مطالعه تحلیلی قرار گرفته است و الگوی قطر سوراخ‌ها و توالی و ترتیب آن‌ها از نظر بزرگی و کوچکی بر اساس کاهش مقطع بال تیر به صورت

جدول ۳. قطر سوراخ و درصد کاهش مقطع بال تیر در الگوهای پیشنهادی سوراخ کاری بال تیر (میلی متر)

Table 3. Diameter of the holes and reduction percentage of flange cross-sectional area in proposed drilling patterns

نمونه تحلیلی	قطر سوراخ ردیف ۱	قطر سوراخ ردیف ۲	قطر سوراخ ردیف ۳
DFC1	۲۰ (۱۸٪)	۲۵ (۲۳٪)	۳۰ (۲۷٪)
DFC2	۲۵ (۲۳٪)	۲۵ (۲۳٪)	۲۵ (۲۳٪)
DFC3	۳۰ (۲۷٪)	۲۵ (۲۳٪)	۲۰ (۱۸٪)
DFC4	۴۵ (۴۱٪)	۵۰ (۴۵٪)	۵۵ (۵۰٪)
DFC5	۵۰ (۴۵٪)	۵۰ (۴۵٪)	۵۰ (۴۵٪)
DFC6	۵۵ (۵۰٪)	۵۰ (۴۵٪)	۴۵ (۴۱٪)
DFC7	۴۵ (۴۱٪)	۵۰ (۴۵٪)	۵۵
DFC8	۵۰ (۴۵٪)	۵۰ (۴۵٪)	۵۰ (۴۵٪)
DFC9	۵۵ (۵۰٪)	۵۰ (۴۵٪)	۴۵ (۴۱٪)
DFC10	۴۵ (۴۱٪)	۵۰ (۴۵٪)	۵۵ (۵۰٪)
DFC11	۵۰ (۴۵٪)	۵۰ (۴۵٪)	۵۰ (۴۵٪)
DFC12	۵۵ (۵۰٪)	۵۰ (۴۵٪)	۴۵ (۴۱٪)

قطر سوراخ بر حسب میلی متر است.

جدول ۴. موقعیت سوراخ در الگوهای پیشنهادی سوراخ کاری بال تیر

Table 4. Location of the holes in proposed drilling patterns

نمونه تحلیلی	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
DFC1	۱۲۰	۲۱۲/۵	۳۰۵	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
DFC2	۱۲۲/۵	۲۱۵	۳۰۷/۵	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
DFC3	۱۲۵	۲۱۷/۵	۳۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
DFC4	۱۳۲/۵	۲۱۲/۵	۲۹۲/۵	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
DFC5	۱۳۵	۲۱۵	۲۹۵	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
DFC6	۱۳۷/۵	۲۱۷/۵	۲۹۷/۵	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
DFC7	۱۳۲/۵	۲۱۲/۵	۲۹۲/۵	۷۲	۱۱۰	۱۴۴
DFC8	۱۳۵	۲۱۵	۲۹۵	۷۲	۱۱۰	۱۴۴
DFC9	۱۳۷/۵	۲۱۷/۵	۲۹۷/۵	۷۲	۱۱۰	۱۴۴
DFC10	۱۳۲/۵	۲۱۲/۵	۲۹۲/۵	۱۴۴	۱۱۰	۷۲
DFC11	۱۳۵	۲۱۵	۲۹۵	۱۴۴	۱۱۰	۷۲
DFC12	۱۳۷/۵	۲۱۷/۵	۲۹۷/۵	۱۴۴	۱۱۰	۷۲

ابعاد بر حسب میلی متر است.

در رابطه فوق ε_{ij}^{pl} ، ε_x^{pl} ، ε_y^{pl} ، ε_z^{pl} و مولفه‌های کرنش پلاستیک γ_{xy}^{pl} ، γ_{yz}^{pl} و γ_{zx}^{pl} کرنش برشی پلاستیک و U ضریب پواسون است. شاخص کرنش پلاستیک معادل (۱) از تقسیم کرنش پلاستیک معادل (۲) بر کرنش تسلیم (ε_y) حاصل می‌شود. از این شاخص برای اندازه‌گیری شکل‌پذیری موضعی استفاده می‌شود که مطابق رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$EPEQI = \frac{\varepsilon_{eqv}^{pl}}{\varepsilon_y} \quad (4)$$

شاخص فشار نسبت تنش هیدرواستاتیک بر تنش تسلیم است که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$PI = \frac{\sigma_m}{\sigma_y} \quad (5)$$

در رابطه فوق σ_m ، تنش هیدرواستاتیک و σ_y ، تنش تسلیم می‌باشد. از این شاخص برای تعیین مقدار شکل‌پذیری جوش و فولاد استفاده می‌گردد. چنانچه مقدار شاخص فشار کاهش یابد، شکل‌پذیری در آن موضع کاهش می‌یابد. شاخص میسر نسبت تنش فون میسر بر تنش تسلیم است که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$MI = \frac{\sigma_e}{\sigma_y} \quad (6)$$

در رابطه فوق σ_e ، تنش فون میسر می‌باشد. به وسیله شاخص میسر می‌توان وضعیت تسلیم در موضع مورد نظر را مشخص کرد. چنانچه این شاخص کمتر از یک باشد موضع مورد نظر در حالت ارتجاعی است. اگر این شاخص برابر عدد یک باشد موضع مورد نظر دچار تسلیم شده است. در صورتی که این شاخص بزرگ‌تر از یک باشد موضع مورد نظر وارد سخت شدگی مجدد شده است.

جهت دستیابی به ماکزیمم لنگر خمشی مقاوم تیر نیاز به تعیین مقدار کاهش سطح مقطع بال تیر و فاصله مناسب سوراخ‌ها را در بال تیر می‌باشد. از آنجایی که با فاصله گرفتن از بر ستون، مقدار لنگر خمشی نهایی حاصل از بارهای ثقلی و جانبی در تیر، کاهش می‌یابد، با فاصله گرفتن از بر ستون نیاز به کاهش مقطع بیشتر می‌باشد. بنابراین می‌توان با کاهش مقطع بال تیر به صورت خطی از بر ستون مقاومت خمشی تیر را کاهش داد. با توجه به کاهش مقطع بال تیر به میزان ۱۸ تا ۵۰ درصد، می‌توان با توجه به موقعیت و فاصله سوراخ مورد نظر، مقدار درصد کاهش سطح مقطع بال تیر را از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$P.R = \left(\frac{x - a}{3.125b} + 0.18 \right) \times 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق، P.R درصد کاهش سطح مقطع بال تیر، x فاصله مرکز سوراخ تا بر ستون، a فاصله بر ستون تا لبه اولین سوراخ، b طول مفصل پلاستیک است.

۴- شاخص‌های کرنش پلاستیک معادل، فشار و میسر

از شاخص‌های بررسی خسارت در اتصالات قاب‌های خمشی که توسط El-Tawil [۲۳] پیشنهاد شده است، می‌توان به شاخص کرنش پلاستیک معادل (EPEQI)، شاخص فشار (PI) و شاخص میسر (MI) اشاره کرد. در این تحقیق شاخص‌های خسارت جهت مطالعه شکل‌پذیری موضعی، وضعیت تسلیم در جوش نفوذی اتصال تیر به ستون و اجزا مقطع فولادی تیر و ستون مورد بررسی قرار گرفتند. کرنش پلاستیک معادل (EPEQ) بر اساس رابطه زیر تعریف می‌شود:

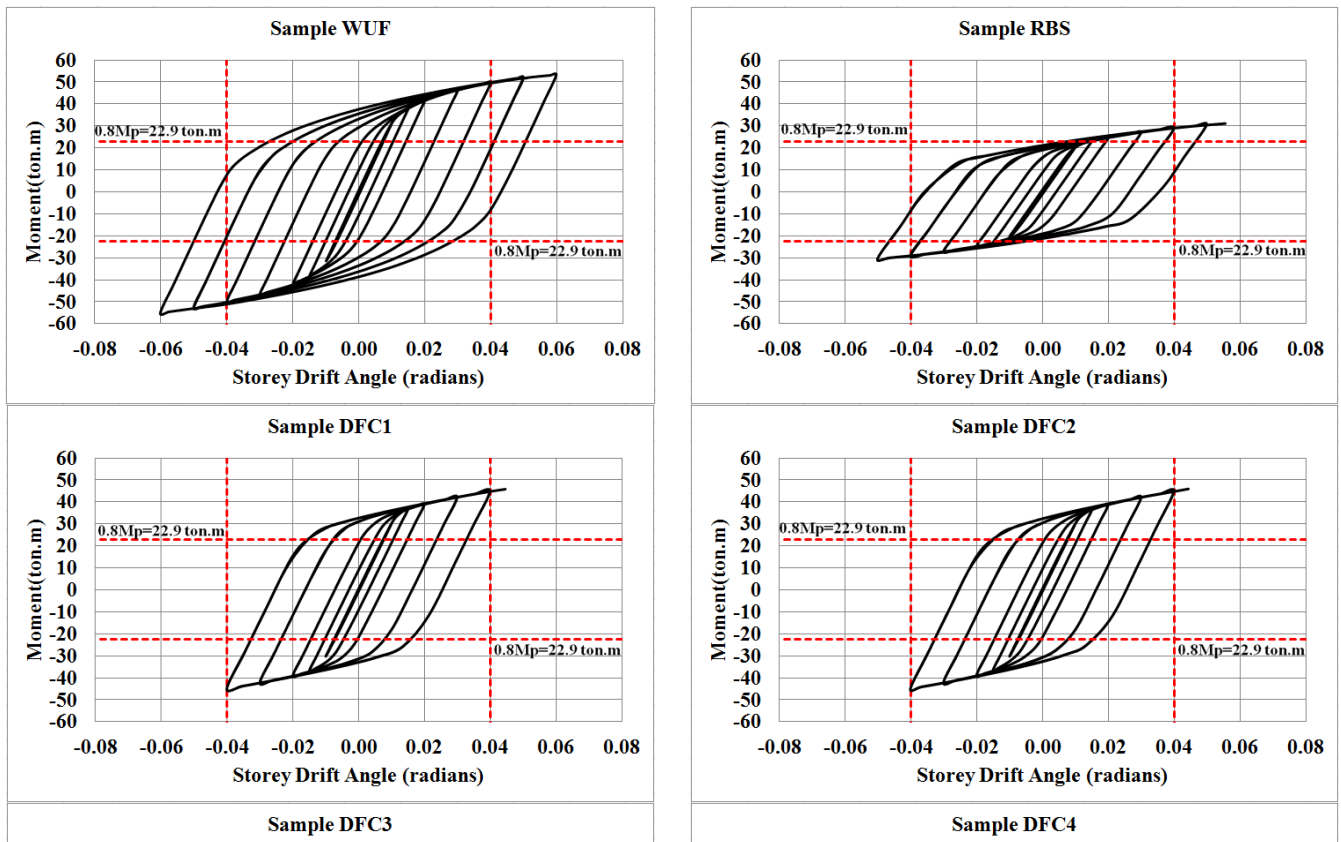
$$EPEQ = \varepsilon_{eqv}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^{pl} \varepsilon_{ji}^{pl}} \quad (2)$$

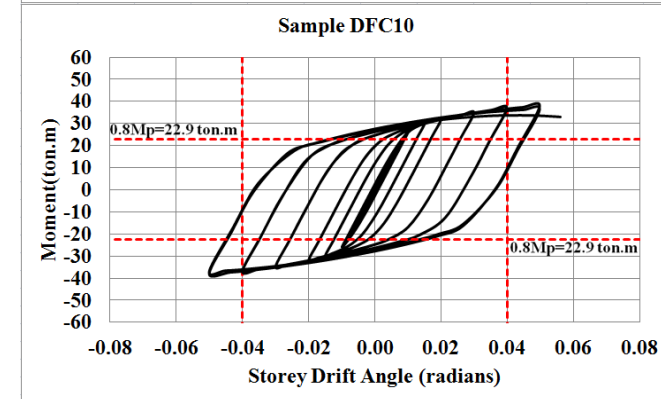
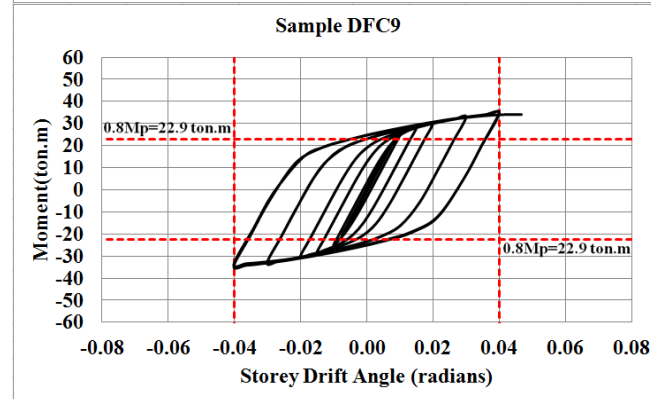
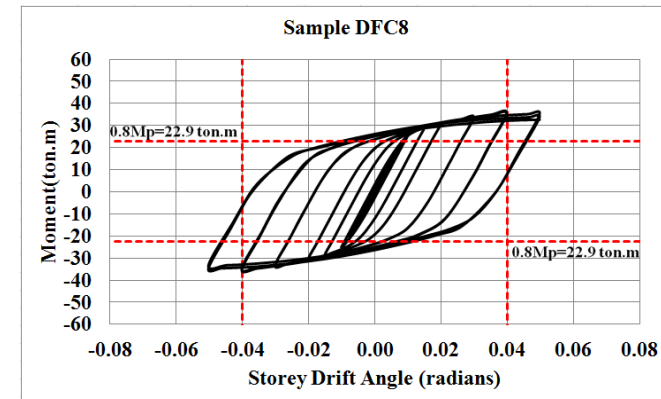
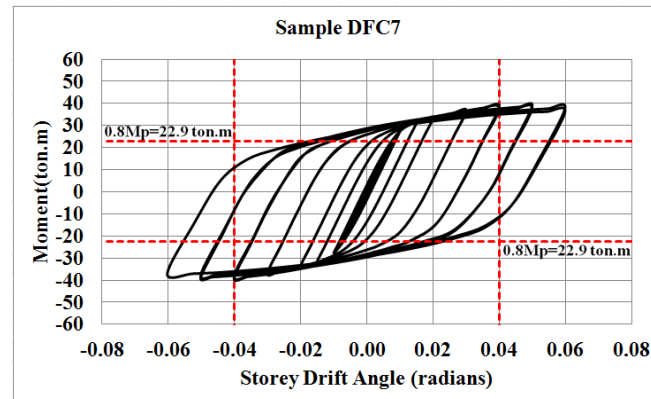
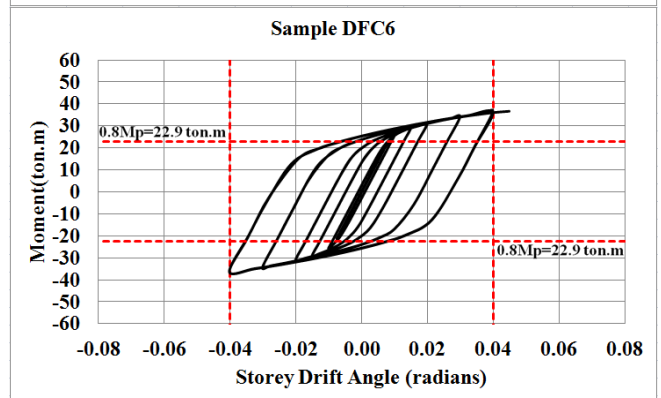
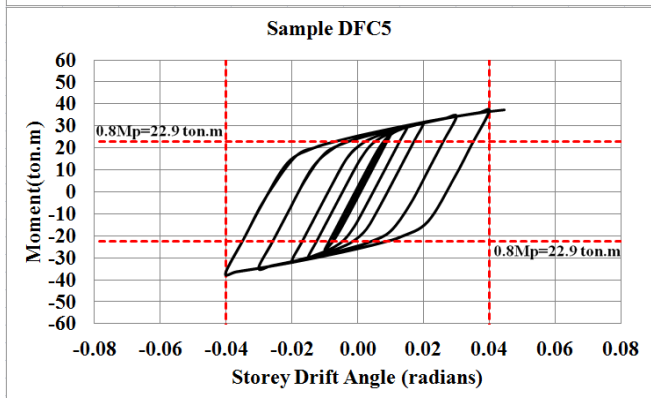
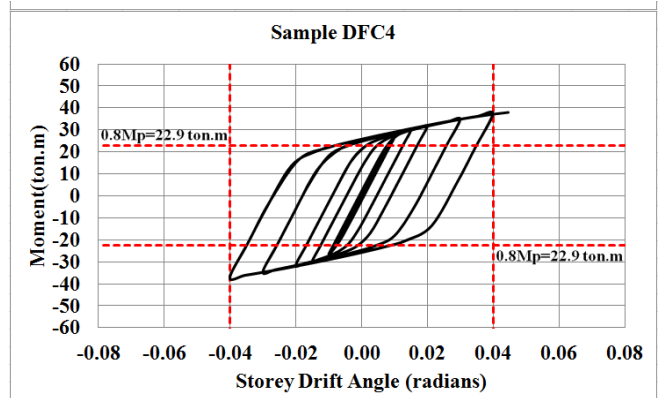
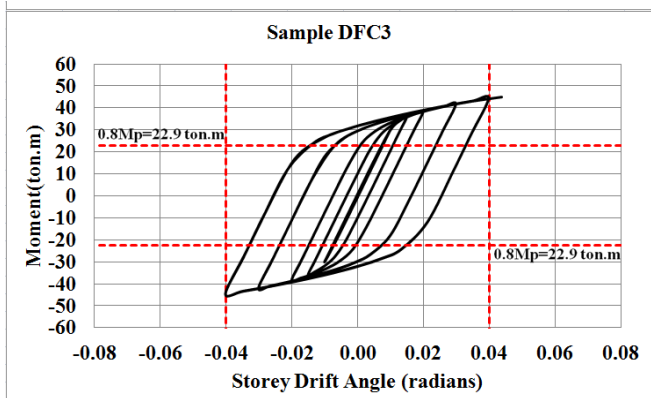
$$EPEQ = \varepsilon_{eqv}^{pl} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \left[\begin{array}{l} (\varepsilon_x^{pl} - \varepsilon_y^{pl})^2 + \\ (\varepsilon_y^{pl} - \varepsilon_z^{pl})^2 + \\ (\varepsilon_z^{pl} - \varepsilon_x^{pl})^2 + \\ \frac{2}{3} (\varepsilon_{xy}^{pl^2} + \varepsilon_{yz}^{pl^2} + \varepsilon_{zx}^{pl^2}) \end{array} \right] \quad (3)$$

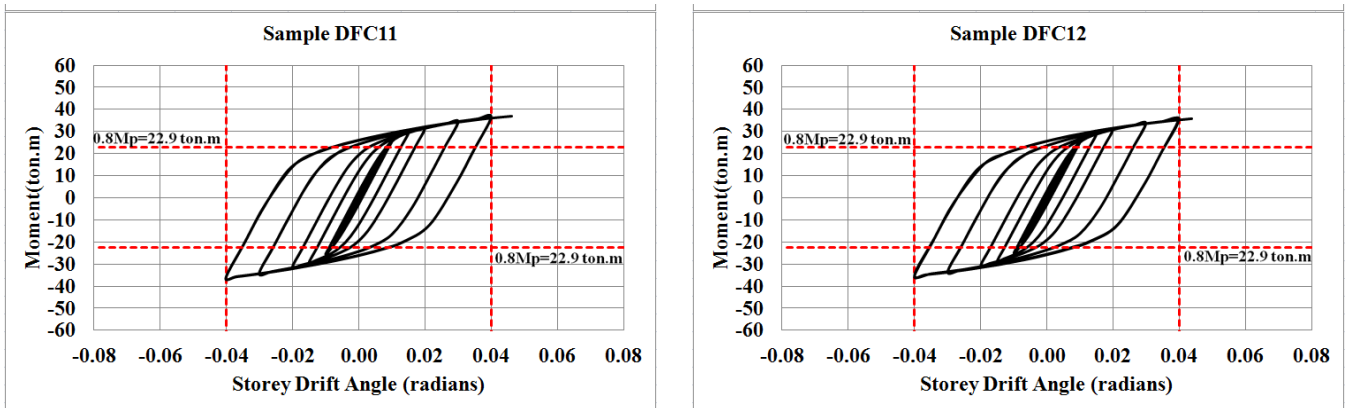
۵- مقایسه رفتار چرخه‌ای و شاخص‌های خسارت مدل‌های تحلیلی

حفاظت شده تیر نسبت به اتصال $\square\square\square$ متداول را داشته باشد. همچنین در اتصالات سوراخ‌کاری مایل بال تیر با توجه به پایداری محل مفصل پلاستیک ناشی از عدم کماتش موضعی بال تیر در مفصل پلاستیک این امکان فراهم می‌گردد که مطابق منحنی رفتار چرخه‌ای این نوع اتصالات، حداکثر چرخش 0.06 رادیان را تحمل و انتقال دهند. مطابق شکل ۹ مقدار دوران پلاستیک مقطع در اتصال نمونه DFC۷ برابر 0.059 رادیان بوده که $7/3$ درصد بیشتر از دوران پلاستیک اتصال RBS متداول می‌باشد. همچنین با استفاده از آرایش سوراخ‌کاری مایل بال تیر و ایجاد خروج از مرکزیت در موقعیت مراکز سوراخ‌ها، می‌توان سطح مقطع موثر و طول مسیرهای بحرانی در حد فاصل سوراخ‌ها را در بال تیر افزایش داد که پیامد آن گسترش ناحیه پلاستیک شده در سطح بال تیر بوده و در نتیجه آن میزان استهلاک انرژی، بهبود رفتار غیرخطی مصالح در ناحیه مفصل پلاستیک، توزیع مناسب کرنش پلاستیک در محدوده مفصل پلاستیک، کاهش کرنش پلاستیک در محل جوش نفوذی بال تیر به ستون و در نهایت حداکثر جذب انرژی توسط مفصل پلاستیک می‌تواند مورد انتظار باشد.

طبق مقررات لرزه‌ای ۱۶-۳۴۱ AISC [۱۸] اتصالات فولادی خمشی ویژه باید بتوانند تغییر شکل نسبی معادل 0.04 رادیان در چرخش اتصال را تحمل کند و همچنین مقاومت خمشی اتصال در بر ستون در چرخش پلاستیک 0.04 رادیان باید بیشتر از 80 درصد لنگر پلاستیک اسمی باشد. در شکل ۷ رفتار چرخه‌ای مدل‌های تحلیلی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با توجه به کاهش 41% ، 45% و 50% در هر ردیف از سطح مقطع بال تیر در بین اتصالات DFC۴ تا DFC۱۲، بیشترین مقدار افزایش مقاومت برابر $22/2$ درصد در اتصال سوراخ‌کاری مایل بال تیر نمونه DFC۷ نسبت به اتصال RBS اتفاق افتاده است. همچنین مطابق شکل ۸ در اتصالات سوراخ‌کاری مایل بال تیر با توجه به رعایت حداقل فاصله سوراخ‌ها، امکان کماتش موضعی مقطع بال تیر در حد فاصل بین سوراخ‌ها به حداقل رسیده و این امر باعث می‌گردد که مقطع بال تیر بیشترین مقاومت در برابر کماتش موضعی در محل مفصل پلاستیک و ناحیه

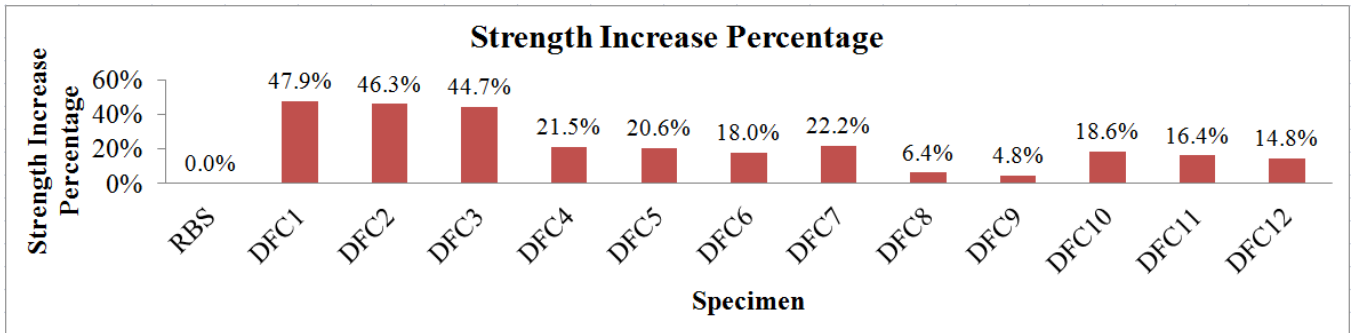






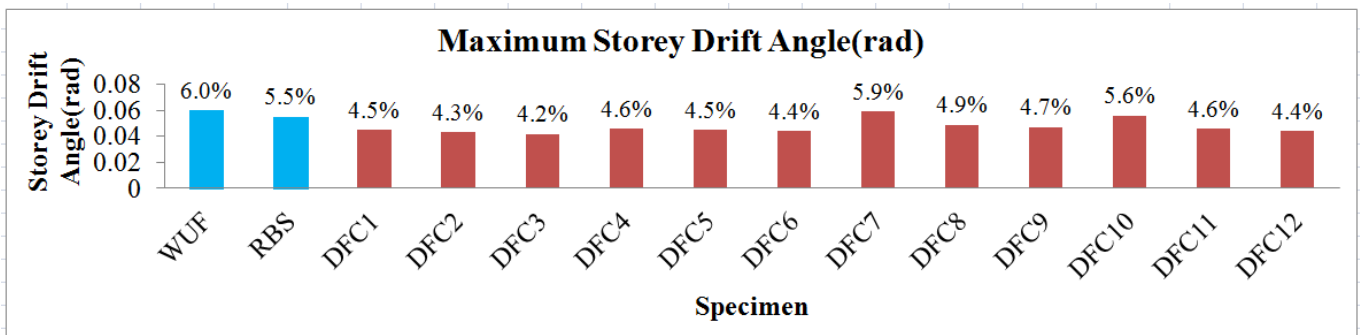
شکل ۷. رفتار چرخه‌ای لنگر- دوران مدل‌های تحلیلی

Fig.7. Moment-rotation responses of the DFC samples besides WUF and RBS connections



شکل ۸. درصد افزایش مقاومت اتصالات بال سوراخ‌کاری شده DFC نسبت به اتصال RBS

Fig. 8. Percentage increase in resistance of DFC connections compared to RBS connection



شکل ۹. دوران پلاستیک مدل‌های تحلیلی

Fig. 9. Plastic rotation of analytical models

جدول ۵. مقادیر سختی و ضریب شکل پذیری نمونه‌های تحلیلی

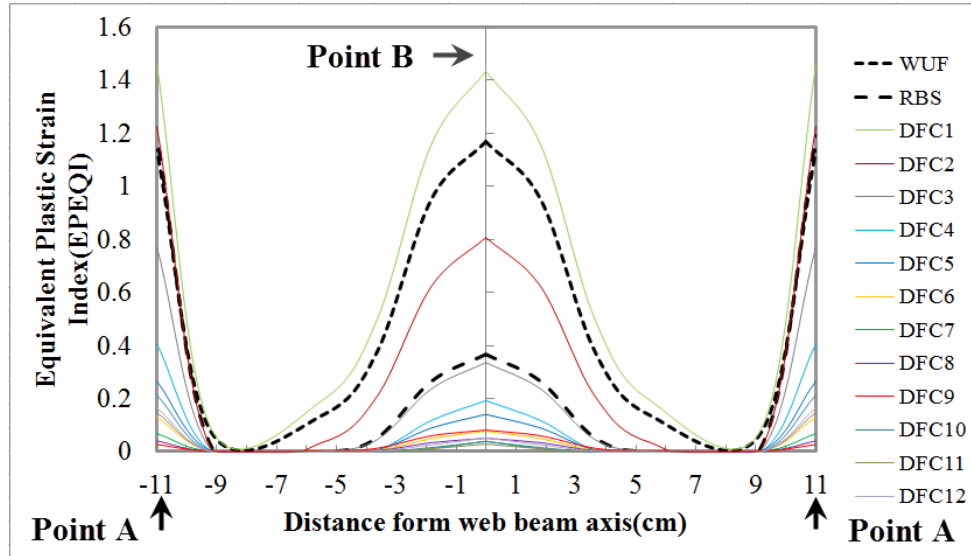
Table 5. Initial stiffness values and ductility ratio of numerical models

ضریب شکل پذیری μ	سختی اولیه $K_{initial}$ (kN/m)	نمونه تحلیلی
۵/۴۵	۳۰۳۹۹	WUF
۶/۱۱	۲۴۷۳۳	RBS
۴/۰۹	۲۹۹۵۳	DFC1
۳/۹۱	۲۹۵۰۷	DFC2
۳/۸۲	۲۸۸۸۳	DFC3
۴/۶۰	۲۶۷۷۰	DFC4
۴/۵۰	۲۶۴۷۶	DFC5
۴/۴۰	۲۵۱۰۳	DFC6
۵/۹۰	۲۸۶۳۴	DFC7
۴/۹۰	۲۵۹۸۶	DFC8
۴/۷۰	۲۵۳۹۸	DFC9
۵/۶۰	۲۶۳۷۸	DFC10
۴/۶۰	۲۵۹۸۶	DFC11
۴/۴۰	۲۵۵۹۴	DFC12

انتخاب مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون و ناحیه بین سوراخ‌ها در این نوع اتصالات برای مقایسه شاخص‌های خسارت به عنوان قسمت بحرانی اتصال، به دلیل وجود تمرکز خسارات سازه‌ای در این نواحی می‌باشد. بررسی شاخص‌های خسارت در این نواحی در آرایش‌های متنوع با دو ردیف موازی و مایل سوراخ‌کاری بال به شناخت بیشتر رفتار و عملکرد لرزه‌ای کمک می‌کند. مبنای مقایسه شاخص‌های خسارت در اتصالات با شکل‌پذیری ویژه، تغییر شکل نسبی طبقه ۰/۰۴ می‌باشد. شکل‌های ۱۰ تا ۱۶ توزیع مقادیر شاخص کرنش پلاستیک معادل، شاخص فشار و شاخص میسر را برای اتصال مستقیم در محل اتصال تیر به ستون، RBS و نمونه‌های اتصال با بال سوراخ‌کاری شده DFC نمایش می‌دهد. جهت بررسی توزیع تغییر شکل‌های پلاستیک می‌توان از نمودارهای شاخص کرنش پلاستیک معادل استفاده کرد. شاخص کرنش پلاستیک معادل یک معیار تحلیلی جهت تعیین مقدار تقاضای کرنش غیر الاستیک در ارزیابی و مقایسه پتانسیل شکل‌پذیری در جوش نفوذی اتصال تیر به ستون و اجزا فولادی تیر و ستون در الگوهای مختلف سوراخ‌کاری مفید است. بر اساس شکل ۱۰ نتایج حاصل از مقایسه شاخص کرنش پلاستیک معادل نمونه‌ها مشاهده می‌شود

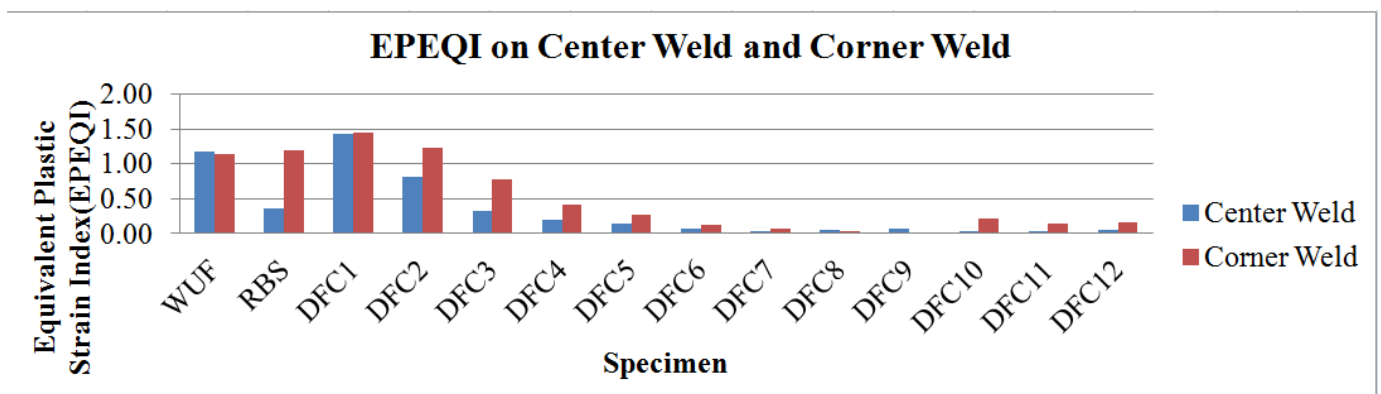
در اتصالات سوراخ‌کاری شده بال تیر با توجه با رعایت حداقل فاصله سوراخ‌ها، امکان کماتش موضعی مقطع بال تیر در حد فاصل بین سوراخ‌ها به حداقل رسیده و این امر باعث می‌گردد که مقطع بال تیر بیشترین مقاومت در برابر کماتش موضعی در محل مفصل پلاستیک نسبت به اتصال RBS را داشته باشد. همچنین در اتصالات سوراخ‌کاری شده بال تیر با توجه به پایداری محل مفصل پلاستیک ناشی از عدم کماتش موضعی بال تیر در مفصل پلاستیک، این امکان فراهم می‌گردد که مطابق منحنی رفتار چرخه‌ای این نوع اتصالات، حداکثر چرخش ۰/۰۶ رادیان را تحمل و انتقال دهند.

در جدول ۵ مقادیر سختی و ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های تحلیلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با تغییر آرایش سوراخ‌کاری بال تیر مقادیر سختی و ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های پیشنهادی تحلیلی تغییر خواهد کرد. بیشترین و کمترین مقدار سختی به ترتیب برای نمونه‌های WUF و RBS محاسبه شده است. همچنین بیشترین و کمترین مقدار ضریب شکل‌پذیری به ترتیب برای نمونه‌های RBS و DFC۳ حاصل شده است.



شکل ۱۰. توزیع شاخص کرنش پلاستیک معادل مدل‌های تحلیلی روی خط جوش نفوذی CJP در تغییر شکل نسبی طبقه ۴/۰ رادیان

Fig. 10. Distribution of the EPEQI of numerical models on CJP groove welds in the story drift angle 0.04 radians

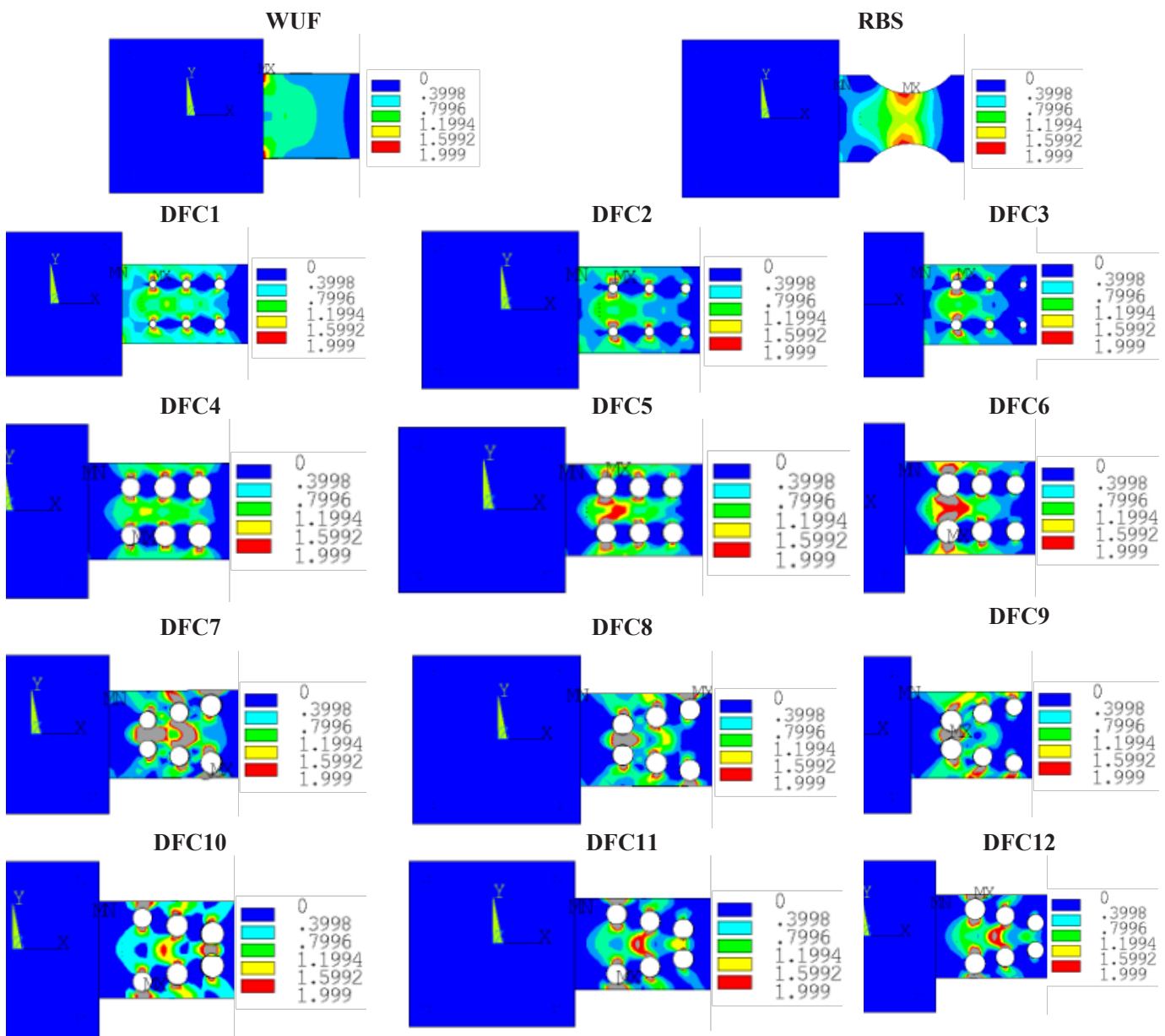


شکل ۱۱. توزیع شاخص کرنش پلاستیک معادل مدل‌های تحلیلی در نقاط بحرانی A و B خط جوش نفوذی CJP در تغییر شکل نسبی طبقه ۴/۰ رادیان

Fig. 11. Distribution of the EPEQI of numerical models in critical points of A and B of CJP groove welds in the story drift angle 0.04 radians

و موقعیت سوراخ‌ها در بال تیر باعث افزایش شاخص کرنش پلاستیک معادل در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون و توزیع نامناسب کرنش پلاستیک در محل مفصل پلاستیک می‌گردد. همچنین این امر سبب بدتر شدن شرایط این نواحی نسبت به اتصال مستقیم WUF و RBS متداول می‌گردد. در صورت اصلاح آرایش و قطر سوراخ‌ها، توزیع شاخص کرنش پلاستیک معادل در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون کاهش یافته و حتی مقادیر کمتری نسبت به اتصال RBS متداول در نواحی بحرانی داشته باشد. در نمونه DFC7 از الگوهای دو ردیف مایل

که شاخص کرنش پلاستیک معادل در مرکز و گوشه خط جوش مقادیر بیشتری نسبت سایر نقاط خط جوش دارند. همچنین مقدار شاخص کرنش پلاستیک معادل در گوشه خط جوش مقادیر بیشتری نسبت به مرکز خط جوش دارد. افزایش قطر سوراخ باعث کاهش شاخص کرنش پلاستیک معادل روی خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون می‌شود. همچنین با تغییر قطر سوراخ از کم به زیاد نسبت به بر ستون مقدار شاخص کرنش پلاستیک معادل روی خط جوش کاهش می‌یابد. توزیع این شاخص بر روی خط جوش نمایانگر حساسیت زیاد آن به آرایش سوراخ کاری است. انتخاب نامناسب قطر



شکل ۱۲. توزیع کرنش پلاستیک معادل الگوهای پیشنهادی سوراخ‌کاری بال تیر در محل مفصل پلاستیک در تغییر شکل نسبی طبقه 0.04 رادیان

Fig. 12. Distribution of the EPEQ in proposed flange drilling patterns in plastic hinge zones in the story drift angle 0.04 radians

قابل ملاحظه کرنش پلاستیک معادل بر روی خط جوش نسبت به اتصال WUF و RBS شده و همچنین توزیع یکنواخت‌تر کرنش پلاستیک معادل نسبت به سایر نمونه‌ها را به همراه داشته است. کاهش کرنش‌های پلاستیک بر روی خط جوش نشان دهنده کاهش پتانسیل شکست ترد و غیر شکل‌پذیر در این نوع آرایش سوراخ‌کاری است.

سوراخ‌کاری بال تیر مقادیر شاخص کرنش پلاستیک معادل کمتری نسبت به اتصال RBS بر روی خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون دارد. مطابق شکل ۱۲ در الگو سوراخ‌کاری نمونه DFCY تمرکز کرنش پلاستیک در اطراف سوراخ‌های محل مفصل پلاستیک رخ داده است و توزیع کرنش در ناحیه کاهش یافته به خوبی انجام شده است. در نمونه DFCY با توزیع مناسب کرنش معادل پلاستیک در اطراف سوراخ‌ها باعث کاهش

جدول ۶. حداکثر شاخص کرنش پلاستیک معادل اطراف سوراخ نمونه‌های تحلیلی در دوران ۰/۰۴ رادیان

Table6. Maximum EPEQI around the hole of numerical models zones in the story drift angle 0.04 radians

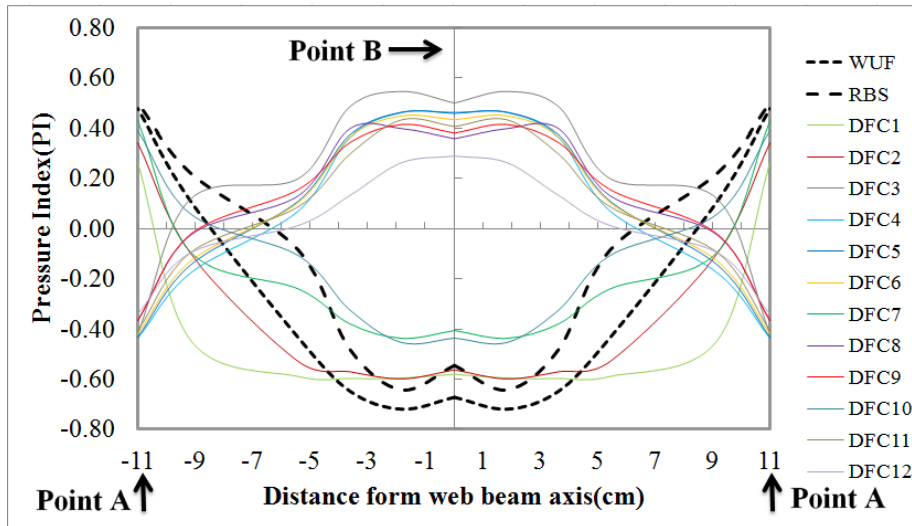
نمونه تحلیلی	حداکثر شاخص کرنش پلاستیک اطراف سوراخ
DFC1	۱۲/۹۳
DFC2	۱۵/۷۸
DFC3	۱۶/۵۰
DFC4	۱۱/۵۱
DFC5	۱۵/۶۲
DFC6	۱۸/۲۹
DFC7	۱۹/۲۱
DFC8	۲۰/۳۶
DFC9	۲۰/۷۹
DFC10	۱۳/۵۴
DFC11	۱۸/۷۱
DFC12	۲۹/۰۷

که در اتصال نمونه DFC۷ نسبت به سایر آرایش‌ها عملکرد لرزه‌ای اتصال را بهبود بخشیده، توزیع کرنش‌های پلاستیک در سطح گسترده‌تر بال تیر می‌باشد. در بین آرایش‌های مختلف دو ردیف سوراخ کاری موازی و مایل، آرایش نمونه DFC۷ کرنش‌های پلاستیک را به صورت متمرکز در اطراف سوراخ‌ها و حد فاصل آن‌ها ایجاد کرده و عملکرد مناسب‌تر داشته است.

در جدول ۶ حداکثر شاخص کرنش پلاستیک معادل اطراف سوراخ نمونه‌های تحلیلی در دوران ۰/۰۴ رادیان محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد بیشترین و کمترین مقدار حداکثر شاخص کرنش پلاستیک معادل اطراف سوراخ به ترتیب در نمونه‌های DFC۸ و DFC۱ رخ داده است.

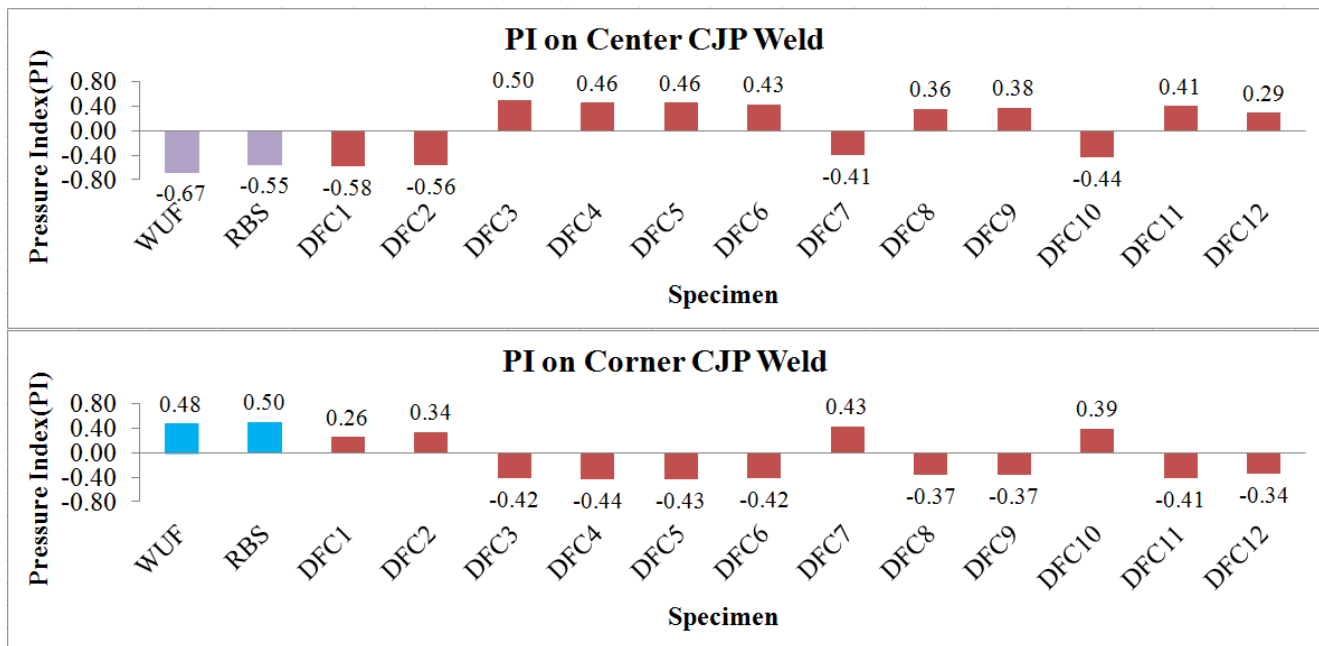
شاخص فشار برای مدل‌های تحلیلی در تغییر شکل نسبی طبقه ۰/۰۴ رادیان مطالعه گردید. تنش هیدرواستاتیک فشاری بزرگ می‌تواند پتانسیل بیشتری برای شکستگی ترد ایجاد کرده و احتمال آن را افزایش دهد. شکل ۱۳ نمودار پارامتر شاخص فشاری برای نمونه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، کمترین مقدار شاخص فشار در مرکز خط جوش برای نمونه WUF برابر ۰/۶۷- می‌باشد. کاهش مقادیر شاخص فشار برای الگوهای متنوع اتصالات سوراخ کاری شده بال تیر DFC بیانگر کاهش شکل‌پذیری در این

شکل ۱۲ توزیع شاخص کرنش پلاستیک معادل برای الگوهای پیشنهادی سوراخ کاری بال تیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی که کاهش مقطع بال تیر کمتر از ۲۷٪ و آرایش سوراخ کاری از قطر زیاد به قطر کم از بر ستون انجام شده است، تمرکز کرنش پلاستیک در اطراف سوراخ‌های نزدیک به بر ستون زیاد بوده که باعث پارگی زودرس و افزایش تمرکز کرنش پلاستیک بر روی خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون می‌شود. تغییر آرایش سوراخ کاری از قطر کم به قطر زیاد از بر ستون باعث توزیع کرنش پلاستیک در محل مفصل پلاستیک و ناحیه حفاظت شده اتصال تیر به ستون می‌گردد. استفاده از کاهش سطح مقطع بیشتر از ۲۷٪ تا ۵۰٪ بال تیر در سوراخ کاری بال تیر به طوری که مقاومت مقطع تیر کمتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک مقطع نشود، می‌تواند توزیع کرنش پلاستیک در محل مفصل پلاستیک بهبود بخشد و باعث کاهش چشمگیر کرنش پلاستیک بر روی خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون گردد. بر اساس نمودار شکل ۱۱ و با استفاده از آرایش سوراخ کاری نمونه DFC۷ می‌توان شاخص کرنش پلاستیک معادل را در مرکز خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون تا ۹۲/۳ درصد و در گوشه خط جوش نفوذی تا ۸۷/۷ درصد نسبت به اتصالات متداول RBS کاهش داد. عاملی



شکل ۱۳. شاخص فشار مدل‌های تحلیلی روی خط جوش نفوذی CJP در تغییر شکل نسبی طبقه 0.04 رادیان

Fig. 13. Pressure index of the groove welds in numerical models in the story drift angle is 0.04 radians

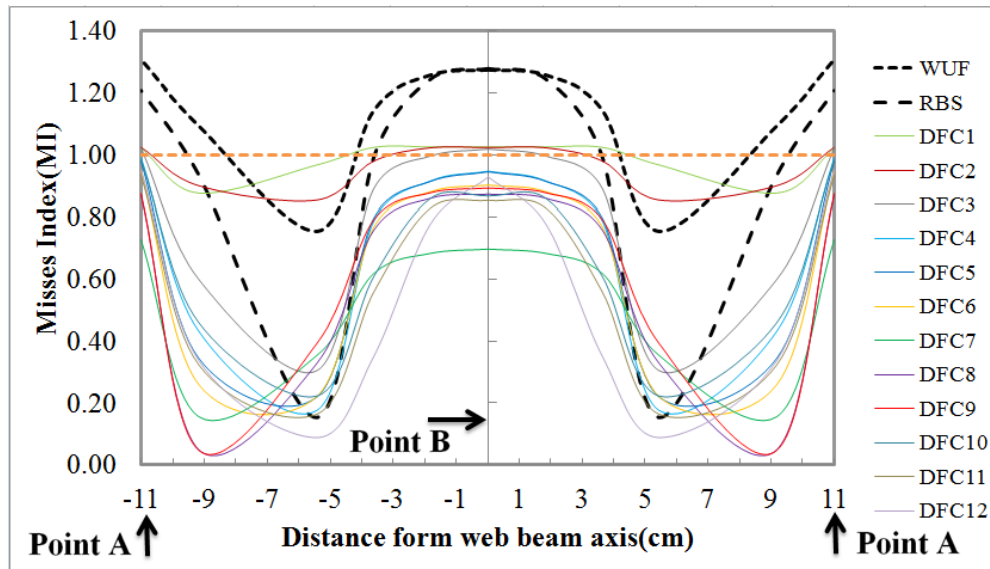


شکل ۱۴. شاخص فشار مدل‌های تحلیلی در نقاط بحرانی A و B خط جوش نفوذی CJP در تغییر شکل نسبی طبقه 0.04 رادیان

Fig. 14. Pressure index of the critical points of A and B of groove welds in numerical models in the storydrift angle 0.04 radians

اتصالات پیشنهادی سوراخ‌کاری شده بال تیر DFC، اتصال نمونه DFCV دارای بیشترین مقدار 0.43 شاخص فشار در گوشه خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون می‌باشد که بیانگر شکل‌پذیری مناسب این اتصال نسبت به سایر اتصالات پیشنهادی DFC است.

نوع اتصالات می‌باشد. مقادیر مثبت شاخص فشار بیانگر افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های تحلیلی مربوطه است. همچنین با توجه به نمودار شکل ۱۴ می‌توان شاخص فشار در اتصالات RBS را توسط اتصال پیشنهادی نمونه DFCV تا $25/8$ درصد در مرکز خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون افزایش داد. در بین



شکل ۱۵. شاخص میسز مدل‌های تحلیلی روی خط جوش نفوذی CJP در تغییر شکل نسبی طبقه ± 0.4 رادین

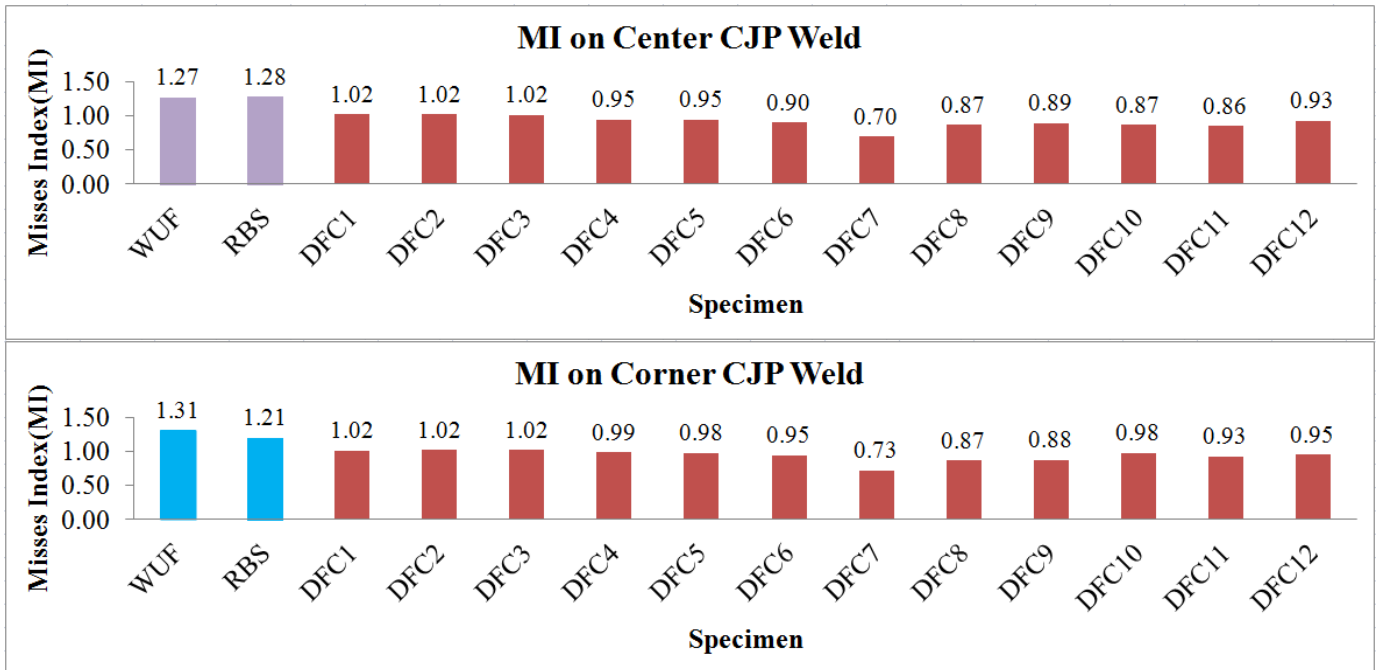
Fig.15. Mises index of the groove welds in numerical models in the storydrift angle is 0.04 radians

محاسبه و بررسی می‌باشد. بنابراین هر نقطه از خط جوش دارای مقادیر مشخصی از شاخص‌های خسارت در چرخش پلاستیک معینی از اتصال خواهند بود. بنابراین کاهش شاخص کرنش پلاستیک معادل و شاخص میسز و افزایش شاخص فشار در تمام نقاط از خط جوش، نشان از بهبود عملکرد اتصال می‌باشد و همچنین کاهش و افزایش این شاخص‌های خسارت ملاک اصلی شکل‌پذیری موضعی و وضعیت تسلیم در هر نقطه از خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون و نواحی حد فاصل سوراخ‌ها در اتصالات پیشنهادی DFC می‌باشد.

در این نوع اتصالات سوراخ‌کاری شده بال تیر با دو ردیف مایل می‌توان با رعایت حداقل فاصله سوراخ‌ها، چیدمان مایل و خروج از مرکزیت راستای سوراخ‌ها، رفتار خمیری متفاوتی از عملکرد لرزه‌ای این نوع اتصالات را مشاهده کرد. وجود مسیرهای مایل بین سوراخ‌ها باعث می‌شوند که کمانش موضعی قطعات بین این سوراخ‌ها به تعویق افتاده و از حداکثر ظرفیت محوری بال تیر تحت خمش و همچنین حداکثر پتانسیل شکل‌پذیری مفصل پلاستیک استفاده گردد. همچنین استفاده از آرایش سوراخ‌کاری قطر کم به زیاد از بر ستون این امکان را فراهم می‌کند که توزیع کرنش پلاستیک در محل مفصل پلاستیک، متناسب با مقدار لنگر مقاوم موجود در هر مسیر بحرانی بین سوراخ‌ها، یکنواخت‌تر شده و شکل‌پذیری این نوع از اتصالات را افزایش دهند.

روند تغییرات شاخص میسز مطابق شکل ۱۵ با بیشترین مقدار برابر $1/28$ برای مدل RBS در مرکز خط جوش نفوذی و $1/31$ برای مدل WUF در گوشه خط جوش نفوذی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد شاخص میسز در مرکز جوش و گوشه جوش نفوذی اتصال بال تیر به ستون مقادیر بزرگ‌تری نسبت به دیگر نقاط جوش نفوذی دارد که بیانگر پتانسیل وقوع سریع‌تر تسلیم مصالح جوش در این نقاط نسبت به سایر نقاط دیگر جوش نفوذی اتصال تیر به ستون می‌باشد. همچنین استفاده از سوراخ‌های با قطر کوچک و ترتیب قرارگیری سوراخ‌ها از بزرگ به کوچک نسبت به بر ستون باعث افزایش شاخص میسز در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون خواهد شد. استفاده از کاهش مقطع بال تیر بیشتر از 27% و همچنین ترتیب آرایش قطر کوچک به بزرگ نسبت به بر ستون می‌تواند شاخص میسز را کاهش می‌دهد. با توجه به نمودار شکل ۱۶ در اتصال پیشنهادی نمونه DFC۷ بیشترین کاهش شاخص میسز در مرکز خط و گوشه خط جوش نفوذی نسبت به سایر اتصالات رخ داده است و همچنین شاخص میسز در مرکز خط جوش نفوذی $45/5\%$ درصد و در گوشه خط جوش نفوذی $39/9\%$ درصد نسبت به اتصالات RBS متداول کاهش یافته است.

با توجه به تحقیقات انجام شده در تعیین شاخص‌های خسارت در اتصالات قاب‌های خمشی توسط El-Tawil، این شاخص‌ها در هر مقدار از چرخش پلاستیک اتصال بر روی خط جوش نفوذی بال تیر به ستون قابل



شکل ۱۶. شاخص میسز مدل‌های تحلیلی در نقاط بحرانی A و B خط جوش نفوذی CJP در تغییر شکل نسبی طبقه ۰/۰۴ رادیان

Fig. 16. Mises index of the critical points of A and B of groove welds in numerical models zones in the story drift angle 0.04 radians

۶-۶- نتیجه‌گیری

جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصالات سوراخ‌کاری شده با دو ردیف موازی و مایل، مدل‌های اجزاء محدود این اتصالات مورد بررسی قرار گرفتند. جهت راستی آزمایشی این مدل‌ها رفتار لرزه‌ای، یک نمونه‌ای آزمایشگاهی WUF مورد بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار گرفت. پس از راستی آزمایشی نتایج تحلیلی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی با استفاده از مقایسه منحنی لنگر- دوران اتصال WUF، رفتار لرزه‌ای ۱۲ نمونه تحلیلی با الگوهای متفاوت سوراخ‌کاری موازی و مایل بال تیر بررسی شد. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته با توجه به محدودیت‌های آن نتایج زیر قابل ارائه است:

۱- بر اساس مقایسه منحنی رفتار چرخه‌ای حاصل از نتایج تحلیلی در اتصالاتی که کاهش ۴۱٪، ۴۵٪ و ۵۰٪ در هر ردیف از سطح مقطع بال تیر ایجاد شده است، بیشترین مقدار افزایش مقاومت برابر ۲۲/۲ درصد در اتصال نمونه DFC۷ نسبت به اتصال RBS معادل آن اتفاق افتاده است.

همچنین مقدار دوران پلاستیک مقطع در اتصال نمونه DFC۷ برابر ۰/۰۵۹ رادیان بوده که ۷/۳ درصد بیشتر از دوران پلاستیک اتصال RBS می‌باشد. ۲- شاخص کرنش پلاستیک معادل در الگوهای متفاوت سوراخ‌کاری بال تیر و مقایسه آن با نتایج به دست آمده برای اتصال WUF و RBS نشان می‌دهد که این پارامتر بر روی خط جوش نفوذی تیر به ستون در مرکز و گوشه خط جوش بیشترین مقادیر را نسبت به سایر نقاط دارد. در اتصال نمونه DFC۷ با کاهش قابل ملاحظه شاخص کرنش پلاستیک معادل بر روی خط جوش اتصال تیر به ستون و توزیع مناسب و گسترده کرنش‌های پلاستیک در بین سوراخ‌های بال ناشی از ایجاد مسیرهای مورب بین سوراخ‌ها در محل مفصل پلاستیک، مناسب‌ترین توزیع کرنش پلاستیک را نسبت به سایر اتصالات دارد.

۳- استفاده از اتصال نمونه DFC۷ با آرایش سوراخ‌کاری مایل از قطر کم به قطر زیاد از بر ستون باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در کرنش پلاستیک معادل روی خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون شده است.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
فاصله بر ستون تا لبه اولین سوراخ، cm	a
طول مفصل پلاستیک، cm	b
عرض بال تیر، cm	b _{bf}
عمق تیر، cm	d _b
کرنش پلاستیک معادل	EPEQ
شاخص کرنش پلاستیک معادل	EPEQI
تنش تسلیم فولاد، N/mm ²	F _y
تنش نهایی فولاد، N/mm ²	F _u
سختی اولیه، KN/m	K _{initial}
شاخص فشار	PI
درصد کاهش سطح مقطع بال تیر	P.R
شاخص میسر	MI
مقاومت برشی چشمه اتصال	V _{pz}
مقاومت تسلیم برشی چشمه اتصال	V _y
فاصله مرکز سوراخ تا بر ستون، cm	x

علائم یونانی

کرنش پلاستیک راستای ij	ϵ_{ij}^p
کرنش پلاستیک راستای zi	ϵ_{zi}^p
کرنش پلاستیک راستای x	ϵ_x^p
کرنش پلاستیک راستای y	ϵ_y^p
کرنش پلاستیک راستای z	ϵ_z^p
کرنش تسلیم، N/mm ²	ϵ_y
کرنش برشی پلاستیک صفحه yz	γ_{yz}^p
کرنش برشی پلاستیک صفحه xy	γ_{xy}^p
کرنش برشی پلاستیک صفحه zx	γ_{zx}^p
ضریب شکل پذیری	μ
ضریب پواسون	ν
تنش فون میسر، N/mm ²	σ_e
تنش هیدرواستاتیک، N/mm ²	σ_m
تنش تسلیم، N/mm ²	σ_y

همچنین با اتصال نمونه DFCV می‌توان شاخص کرنش پلاستیک معادل را در مرکز خط جوش نفوذی تا ۹۲/۳ درصد و در گوشه خط جوش نفوذی تا ۸۷/۷ درصد نسبت به اتصالات RBS کاهش داد.

۴- در صورتی که سوراخ کاری به گونه‌ای انجام شود که کاهش سطح مقطع بال تیر بین ۲۷٪ تا ۵۰٪ باشد و به طوری که مقاومت مقطع تیر کمتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک مقطع نشود، کاهش قابل ملاحظه کرنش پلاستیک معادل در مرکز و گوشه خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون در اتصالات DFCV نسبت به اتصال RBS رخ خواهد داد.

۵- در محل‌هایی از خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون که مقدار شاخص فشار دارای مقادیر مثبت می‌باشد، شکل‌پذیری خط جوش افزایش خواهد یافت و همچنین برای مقادیر منفی پتانسیل شکست ترد در خط جوش بالا خواهد رفت. مقایسه نتایج تحلیلی شاخص فشار نشان می‌دهد که در مرکز خط جوش نفوذی اتصال نمونه DFCV مقداری برابر ۰/۴۱- دارد که این مقدار بیشتر از نظیر آن‌ها در اتصال RBS می‌باشد. افزایش مقادیر شاخص فشار در خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون بیانگر افزایش شکل‌پذیری موضعی خط جوش نفوذی اتصال تیر به ستون اتصال نمونه DFCV نسبت به RBS می‌باشد.

۶- نتایج تحلیلی این تحقیق نشان می‌دهد اتصالات با بال سوراخ کاری شده مایل تیر می‌تواند شاخص میسر را بر روی خط جوش نفوذی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. کمترین مقدار شاخص میسر در اتصال نمونه DFCV بر روی مرکز و گوشه خط جوش نفوذی بال تیر به ستون به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۷۳ نسبت به سایر اتصالات RBS رخ داده است. با کاهش شاخص میسر بر روی جوش بال تیر به ستون می‌توان از تسلیم زودرس فلز جوش جلوگیری کرد و افزایش آن موجب تمرکز تغییر شکل پلاستیک در محدوده مفصل پلاستیک و ناحیه سوراخ کاری شده و شکست زودرس و کاهش جذب انرژی ناشی از تغییر شکل پلاستیک گردد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از اساتید و کارکنان دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران و پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله که در انجام این تحقیق یاری کردند، اعلام می‌گردد.

- [10] R. Rahnavard, A. Hassanipour, N. Siahpolo, Analytical study on new types of reduced beam section moment connections affecting cyclic behavior, *Case Studies in Structural Engineering*, 3 (2015) 33-51.
- [11] R.A. Jazany, Improved design of drilled flange (DF) moment resisting connection for seismic regions, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(5) (2018) 1987-2020.
- [12] P.S. Heidari, A. Aziminejad, A. Moghadam, M.A. Jafari, Evaluation of drilled flange connections with combined arrangements of holes and notches, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(14) (2020) 6487-6532.
- [13] J. Hancock, A. Mackenzie, On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 24(2-3) (1976) 147-160.
- [14] A. Kanvinde, G. Deierlein, Continuum based micro-models for ultra low cycle fatigue crack initiation in steel structures, in: *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond*, 2005, pp. 1-11.
- [15] A. Kanvinde, G. Deierlein, Cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue, *Journal of engineering mechanics*, 133(6) (2007) 701-712.
- [16] AISC360-16, Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, (2016).
- [17] N.B. Regulations, Design and implementation of steel buildings, (2013), (in Persian).
- [18] AISC341-16, Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, (2016).
- [19] C. Roeder, State of the art report on connection performance, Federal Emergency Management Agency (FEMA) Bulletin, (355D) (2000).
- [20] AISC358-16, Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications, in, American National Standard and American Institute of Steel Construction, 2016.
- [1] N.F. Youssef, D. Bonowitz, J.L. Gross, A survey of steel moment-resisting frame buildings affected by the 1994 Northridge earthquake, US National Institute of Standards and Technology, 1995.
- [2] E.P. Popov, T.-S. Yang, S.-P. Chang, Design of steel MRF connections before and after 1994 Northridge earthquake, *Engineering Structures*, 20(12) (1998) 1030-1038.
- [3] S.W. Han, G.U. Kwon, K.H. Moon, Cyclic behaviour of post-Northridge WUF-B connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 63(3) (2007) 365-374.
- [4] Tzong-Shuoh Yang, E.P. Popov, experimental and analytical studies steel connections and energy dissipators, Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California at Berkeley, Report No. UCB/EERC-95/13 (1995).
- [5] H. Farrokhi, F. Danesh, S. Eshghi, A modified moment resisting connection for ductile steel frames (Numerical and experimental investigation), *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11) (2009) 2040-2049.
- [6] M. Vetr, A. Haddad, Study of drilled flange connection in moment resisting frames, in: Report No. 3732, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Tehran; Iran, 2010.
- [7] M. Vetr, M. Miri, A. Haddad, Seismic behavior of a new reduced beam section connection by drilled holes arrangement (RBS_DHA) on the beam flanges through experimental studies, in: 15th world conference of earthquake engineering, Lisbon, Portugal, 2012.
- [8] S.J. Lee, S.E. Han, S.Y. Noh, S.-W. Shin, Deformation capacity of reduced beam section moment connection by staggered holes, in: International conference on sustainable building, Seoul, Korea, 2007.
- [9] A. Atashzaban, I. Hajirasouliha, R.A. Jazany, M. Izadinia, Optimum drilled flange moment resisting connections for seismic regions, *Journal of Constructional Steel Research*, 112 (2015) 325-338.

- Maig, 28 (2016).
- [23] S. El-Tawil, T. Mikesell, E. Vidarsson, S.K. Kunnath, Strength and ductility of FR welded-bolted connections, SAC Report, (1998) 98-01.
- [21] A.S.f. Testing, Materials, ASTM A370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, in, ASTM West Conshohocken, 2014.
- [22] A. Guide, Ansys Meshing User's Guide, Últim accès

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Shadman Heidari, A. Aziminejad, A.S. Moghadam, M. A. Jafari, Investigation of seismic behavior of drilled flange connection with inclined arrangement of holes, Amirkabir J. Civil Eng., 54(1) (2022) 299-322.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18755.6955



