

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد چرخه‌ای اتصال تیر به ستون با نیمرخ با جان شیاردار

حسین اکبری لر^۱، محسن ایزدی نیا^{۲*}، پرهام معمارزاده^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

* نجف آباد، صندوق پستی ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱، izadinia@iaun.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۰)

چکیده

این مقاله، رفتار لرزه‌ای نوع جدیدی از اتصال تیر به ستون با میراگر سوراخ دار را بررسی می‌کند. در این اتصال جدید، رفتار پلاستیک و آسیب‌های لرزه‌ای فقط در نیمرخ شیاردار ایجاد شده و تیر، ستون، جوش‌ها و چشمه اتصال از هرگونه آسیبی در امان می‌مانند. در این پژوهش میراگرهای سوراخ‌دار از پروفیل‌های I شکل ساخته شده‌اند و سوراخ‌هایی مستطیل شکل در جان آنها ایجاد شده است. در یک نمونه آزمایشگاهی (SDC1) از یک پروفیل I شکل بدون سوراخ در پایین و یک نیمرخ شیاردار در بالا برای اتصال خمشی تیر به ستون استفاده شده است. نمونه دوم (SDC2) شامل دو نیمرخ شیاردار یکسان در بالا و پایین تیر برای اتصال تیر به ستون می‌باشد. نمونه‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. بارگذاری چرخه‌ای تا دوران ۶ درصد ادامه پیدا کرد. نمونه SDC2 تا دوران ۴ درصد هیچگونه افت مقاومتی نشان نداد، در حالی‌که نمونه SDC1 پس از دوران ۳ درصد دچار کاهش مقاومت گردید. نمونه با دو میراگر، عملکرد بهتری نسبت به نمونه با یک میراگر نشان داد. رفتار این دو نمونه اتصال با تحلیل‌های تئوری و عددی مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج آزمایشگاهی و عددی، ظرفیت دورانی بالای این اتصال ناشی از تغییرشکل‌های پلاستیک میراگرهای سوراخ‌دار می‌باشد. نمونه SDC2 ظرفیت تحمل لنگر خمشی تا $1/73$ برابر لنگر پلاستیک مقطع تیر را از خود نشان داد. در نمونه SDC1 مقدار حداکثر لنگر خمشی مقاوم $1/4$ برابر لنگر پلاستیک مقطع تیر می‌باشد. همچنین نسبت جذب انرژی نمونه SDC2 به نمونه SDC1 برابر $1/51$ می‌باشد.

واژگان کلیدی

اتصال فولادی، میراگر سوراخ دار، اتلاف انرژی، شکل‌پذیری

Experimental Study of Cyclic Performance of Beam-to-Column Connection with Slit Damper

H. Akbari Lor, M. Izadinia, P. Memarzadeh

Abstract

This paper investigates seismic behavior of a new beam to column connection with slit dampers. The connection prevents damages of beam, column, panel zone and welds. Plastic deformations occur in dampers. The slit dampers were made with I-shape profiles that had some slits in the profiles webs. One of specimens had just one slit damper which connected beam to column (SDC1) and I-shape profile without any slit was located at the bottom flange of the beam. Other specimen had two identical slit dampers which connected beam to column (SDC2). Specimens were tested under cyclic loading. The cyclic loading continued until 0.06 radian rotation. The results show that moment of specimen with two slit dampers increases until 0.04 story drift. Moment of specimen with just one damper decreases after 0.03 drift. The specimen SDC2 has higher performance than specimen SDC1. Also, a theoretical and numerical study has been done. According to experimental and numerical results, high rotational capacity of the connection is related to plastic deformations of slit dampers. Maximum bending moment of specimens SDC2 and SDC1 were 1.73 and 1.4 times plastic moment of beam section respectively. Also, the absorbed energy ratio of specimen SDC2 to specimen SDC1 is 1.51.

Keywords

Steel connection, Slit damper, Energy dissipation, Ductility

یکی از اصلی‌ترین اهداف طرح لرزه‌ای اتصالات، افزایش میزان شکل‌پذیری آنها است. امروزه برای افزایش شکل‌پذیری در سازه‌ها از روش‌ها و تجهیزات مختلفی استفاده می‌شود. زلزله‌های نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) باعث خرابی بسیاری از اتصالات فولادی رایج تا آن زمان گردید. پیش از آن Popov و Tsai و همچنین Engelhardt و Husain در مطالعات خود نشان داده بودند که اتصالات فولادی رایج ظرفیت دورانی بسیار کمی دارند [۱-۲]. پس از زلزله نورتریج اتصالات با مقطع کاهش یافته^۱ بسیار توسعه یافتند. در این نوع اتصال کاهش مقاومت خمشی تیر و ضعیف کردن تیر در نزدیکی اتصال تیر به ستون انجام می‌شود. ایجاد مفصل پلاستیک در مقطع کاهش یافته آسیب‌پذیری جوش‌های اتصال تیر به ستون را کاهش داده و بنابراین ظرفیت تغییرشکل غیرالاستیک اتصال افزایش می‌یابد. همچنین آسیب‌های وارده به چشمه اتصال ستون کاهش می‌یابد. پژوهش‌های آیین‌نامه لرزه‌ای^۲ در سال ۱۹۹۷ نتایج آزمایش‌های اتصالات با مقطع کاهش یافته را منتشر کرد. در این آزمایش‌ها بال تیرها با شکل‌های مختلفی برش داده شدند. بهترین نتایج مربوط به برش شعاعی بال تیرها بوده است. بخشی از پژوهش‌های آیین‌نامه لرزه‌ای بر روی بهبود کارایی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و همچنین بررسی کماتش‌های موضعی در اتصال RBS متمرکز بوده است [۳].

علاوه بر مطالعات آیین‌نامه لرزه‌ای، تحقیقات دیگری نیز بر روی اتصالات با مقطع کاهش یافته انجام شده است. Chi و Uang رفتار اتصالات RBS را در اثر بارگذاری چرخه‌ای بررسی نمودند و یک روش طراحی لرزه‌ای را پیشنهاد دادند [۴].

یکی دیگر از روش‌های کاهش مقطع تیر، کاهش جان تیر می‌باشد. Wilkinson و همکارانش کاهش ارتفاع جان تیر را مورد مطالعه قرار دادند [۵]. این کاهش ارتفاع در ناحیه محدودی از تیر ایجاد می‌شود و مقاومت خمشی تیر را در آن ناحیه کاهش می‌دهد. Hedayat و Celikage کاهش جان تیر را با ایجاد سوراخ‌های دایروی مورد مطالعه قرار دادند [۶]. Mirghaderi و همکارانش در سال ۲۰۱۰ با برش دادن بخشی از جان تیر در نزدیکی اتصال و جوش دادن دو نبشی در طرفین جان تیر، نوع جدیدی از کاهش مقطع جان تیر را معرفی کردند [۷]. اتصال معرفی شده توسط آنها کاهش مقطع با جان آکاردوونی^۳ نام گرفت.

روش دیگر برای افزایش شکل‌پذیری در اتصال و اتلاف

انرژی بیشتر، استفاده از میراگرهای هیسترتیک می‌باشد. این نوع از میراگرها اولین بار توسط Skinner و همکارانش معرفی گردید [۸]. Chan و Albermani بر روی میراگر شیاردار^۴ مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند و همچنین روابطی را برای این میراگرها توسعه دادند [۹]. در میراگرهای شیاردار، قسمت‌های نسبتاً ضعیف‌تر میراگر که از جنس فلز می‌باشند، در اثر بارگذاری چرخه‌ای رفتار پلاستیک از خود نشان می‌دهند. انرژی توسط میراگر مستهلک شده و از آسیب دیدن سایر قسمت‌های سازه جلوگیری می‌شود. Oh و همکارانش برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ از ورق‌های شیاردار برای اتصال تیر به ستون استفاده نمودند [۱۰]. در مطالعه آزمایشگاهی آنها، تمامی آسیب‌ها توسط میراگر جذب گردید، در نتیجه تیر، ستون و چشمه اتصال پس از بارگذاری چرخه‌ای تا دوران ۶ درصد هیچ آسیبی ندیدند.

Safari و همکارانش در سال ۲۰۱۳ مطالعاتی عددی و تئوری بر روی کاربرد میراگرهای شیاردار در اتصالات فولادی انجام دادند [۱۱]. اخیراً پژوهش بر روی میراگرهای سوراخ‌دار و کاربرد آنها در اجزای مختلف سازه بسیار توسعه یافته است. Jacobsen و همکارانش در سال ۲۰۱۰ از این نوع میراگرها در دیوارهای برشی فولادی استفاده نمودند. آنها اثرات آرایش‌های مختلف سوراخ‌ها را بر رفتار دیوار برشی بررسی نمودند [۱۲]. Hedayat در سال ۲۰۱۵ مطالعه عددی و تحلیلی بر روی میراگرهای شیاردار در دیوارهای برشی فولادی انجام داد و روابطی را برای پیش‌بینی رفتار این نوع قاب‌ها ارائه نمود [۱۳]. Benavent کاربرد میراگرهای شیاردار را در مهاربندی قاب‌های فولادی مورد مطالعه قرار داد [۱۴]. انواع دیگری از میراگرها نیز برای اتصال تیر به ستون مورد مطالعه قرار گرفته است. Maleki و Mahjoubi در سال ۲۰۱۳ میراگر لوله دابل را برای اتصال تیر به ستون معرفی نمودند و مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی آن انجام دادند [۱۵]. Tagawa و همکارانش در سال ۲۰۱۶ مطالعات آزمایشگاهی بر روی مهاربندی قاب‌های فولادی با مهاربندهایی که از میراگرهای شیاردار در آنها استفاده شده بود، انجام دادند [۱۶]. Banisheikholeslami و همکارانش در سال ۲۰۱۶ جزییات جدیدی برای اتصال تیر به ستون معرفی نمودند که در آن از میراگر ویسکوالاستیک برای کنترل آسیب‌های لرزه‌ای استفاده شده است [۱۷]. Kafi و Deihim در سال ۲۰۱۷ بر روی روش‌های طراحی اتصالات دارای میراگر و با جذب انرژی مطالعه نمودند [۱۸].

همانطور که بیان گردید در یک دهه اخیر پژوهش‌ها و



نوآوری‌های زیادی برای استفاده از میراگرها در اتصالات فولادی انجام شده است. در این مقاله یک نوع جدید از اتصال تیر به ستون با نیمرخ شیاردار معرفی می‌شود. در این اتصال جدید تیر به کمک میراگرهای فولادی I شکل به ستون متصل می‌شود. جزییات اجرایی این اتصال متفاوت از سایر میراگرهای اتصال پیشنهاد شده توسط سایر پژوهشگران می‌باشد.

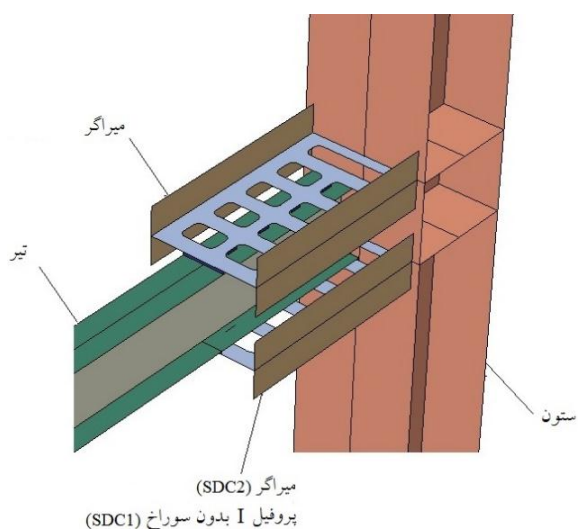
در این اتصال میراگرهای I شکل، نیمرخ‌های IPE استاندارد هستند که سوراخ‌هایی در جان آنها ایجاد شده است. لنگر خمشی در تیر، کوپل نیرویی را به این میراگرها وارد کرده و این نیروها باعث تسلیم شدن قسمت‌هایی از میراگر و اتلاف انرژی در آنها می‌شود.

در این نوع از اتصال سعی شده که با استفاده از میراگر آسیب‌های ناشی از بارگذاری چرخه‌ای، در میراگر ایجاد شده و سایر اجزای اتصال سالم باقی بمانند. دو نمونه از اتصال پیشنهادی ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای در آزمایشگاه قرار گرفته‌اند. همچنین مطالعه تئوری بر روی رفتار اتصال انجام شده است. مدل‌های اجزای محدود نمونه‌ها نیز به کمک نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. نتایج مطالعه عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

۲- اتصال پیشنهادی

نیمرخ شیاردار پیشنهادی در این مقاله یک پروفیل I شکل است که سوراخ‌هایی مستطیلی شکل با گوشه‌های گرد شده در جان آن ایجاد شده است. این سوراخ‌ها در دو ردیف در جان میراگر ایجاد شده و بال تیر به جان این میراگرها متصل می‌شود و انتهای نیمرخ شیاردار به ستون متصل می‌شود (شکل ۱). استفاده از میراگرها برای اتصال تیر به ستون ایده‌ای نسبتاً جدید است که اولین بار توسط Oh و همکارانش در سال ۲۰۰۹ پیشنهاد گردید و از ورق‌های شیاردار که به صورت قائم در زیر بال پایینی تیر نصب شده بود، برای اتصال تیر به ستون استفاده نمودند. بر پایه این ایده در این مقاله جزییات جدیدی برای اتصال تیر به ستون با نیمرخ‌های شیاردار پیشنهاد گردید. در این مطالعه، دو نمونه آزمایشگاهی ساخته شدند. تفاوت اصلی این دو نمونه در تعداد میراگرهای اتصال هر نمونه بود. در نمونه اول (SDC1) برای اتصال تیر به ستون فقط از یک نیمرخ شیاردار برای اتصال بال بالایی تیر به ستون استفاده گردید و برای اتصال بال پایینی تیر به ستون از یک نیمرخ I شکل بدون سوراخ استفاده گردید. برای نمونه آزمایشگاهی دوم (SDC2) از دو نیمرخ شیاردار I شکل که یکی به بال بالایی تیر و دیگری به بال

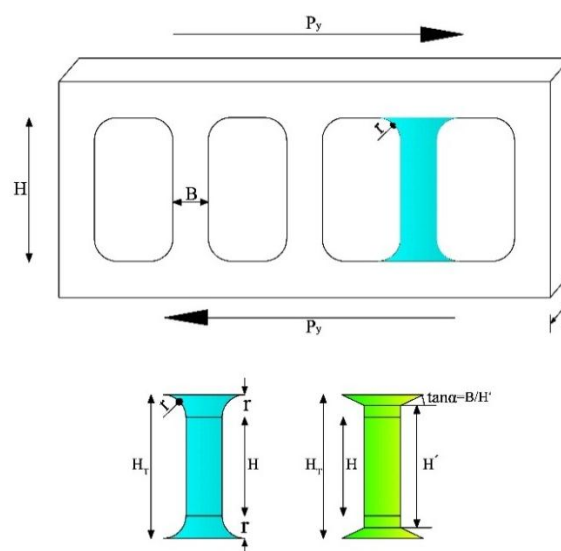
پایینی تیر متصل شده، استفاده گردیده است. در بارگذاری لرزه‌ای، این میراگرها نیروهای کششی و فشاری را به ستون انتقال داده، یک زوج نیرو ایجاد نموده و لنگر خمشی از تیر به ستون منتقل می‌گردد. وجود سوراخ‌ها در میراگرها و تمرکز تنش در اطراف این سوراخ‌ها باعث پلاستیک شدن مصالح فولادی جان میراگر شده و بخشی از انرژی زلزله را مستهلک می‌کند و باعث افزایش شکل‌پذیری اتصال می‌گردد. همچنین به علت جاری شدن میراگر میزان ظرفیت دورانی این نوع اتصال نیز افزایش می‌یابد. یکی از پارامترهایی که کارایی یک اتصال را تعیین می‌کند، دوران پلاستیک در اتصال می‌باشد. مطابق ضوابط AISC و FEMA اتصال خمشی در قاب‌های با شکل‌پذیری ویژه باید توانایی تحمل حداقل دوران 0.04 رادیان برای طبقه را داشته باشند [۱۹-۲۲]. همچنین حداقل لنگر خمشی مقاوم به ازای این دوران باید $0.8M_p$ باشد، که M_p ظرفیت خمشی پلاستیک تیر می‌باشد.



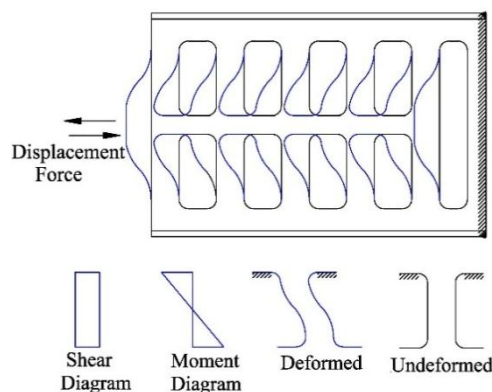
شکل ۱- نمای کلی اتصال پیشنهادی

در میراگرهای اتصال پیشنهادی، نحوه جوش دادن و اتصال میراگر به ستون و تیر به گونه‌ای می‌باشد که از حرکت و تغییر مکان قسمت‌های سوراخ شده جلوگیری نشود و قسمت‌های سوراخ‌دار میراگر دارای آزادی نسبی حرکتی در امتداد محور تیر می‌باشند. این آزادی حرکت نسبی باعث خواهد شد که میراگر در حرکات شدید زلزله تسلیم شده و مقداری از انرژی زلزله را مستهلک کند. برای این منظور مطابق شکل (۱) یک سوراخ در انتهای میراگر و نزدیک محل اتصال میراگر به ستون ایجاد شده است، که بیشتر عرض جان میراگر را شامل می‌شود. تغییرشکل یک میراگر در اثر بارگذاری و آزادی حرکت نسبی آن در امتداد

محور تیر در شکل (۲) نمایش داده شده است. همچنین نمودار تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی در طول یکی از پایه‌های میراگر در شکل (۲) نمایش داده شده است. همانطور مشاهده می‌گردد بیشینه لنگر خمشی در دو انتهای پایه‌های میراگر ایجاد می‌گردد و باعث تمرکز تنش بیشتر در این نقاط خاص می‌شود. مطابق نتایج آزمایشگاهی، ترک‌ها و شکست‌های میراگر نیز در همین نقاط مشاهده می‌گردد و تحلیل‌های عددی نیز تمرکز تنش را در نقاط انتهایی پایه‌های میراگر نشان می‌دهند.



الف) هندسه یک ردیف از سوراخ‌های میراگر



ب) تغییر شکل‌های ایجاد شده در جان نیمرخ شیاردار و نمودار تغییرات لنگر خمشی و نیروی برشی در طول یکی از پایه‌های میراگر

شکل ۲- معرفی میراگر پیشنهادی اتصال

۳- طراحی اتصال با نیمرخ شیاردار

در نمونه SDC1 یک نیمرخ شیاردار به بال بالایی تیر متصل شده است و در نمونه SDC2 دو نیمرخ شیاردار به بال‌های بالایی و پایینی تیر متصل شده‌اند. هر نیمرخ شیاردار متصل به بال تیر

دارای دو ردیف سوراخ می‌باشد. شکل (۲) یک ردیف از سوراخ‌های یک میراگر شیاردار را نمایش می‌دهد که تحت اثر نیروی P قرار گرفته است. مطابق روابط ارائه شده توسط Chan و Albermani بر حسب مشخصه‌های هندسی میراگر، دو مکانیزم تسلیم متفاوت ممکن است رخ دهد. تسلیم خمشی و تسلیم برشی دو نوع تسلیم محتمل برای میراگر شیاردار می‌باشند. با ساده‌سازی، مقاومت تسلیم (P_y) و مقاومت نهایی (P_u) از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است:

$$P_y = \min \left\{ n \frac{\sigma_y \cdot t \cdot B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_y \cdot t \cdot B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (1)$$

$$P_u = \min \left\{ n \frac{\sigma_u \cdot t \cdot B^2}{2H'}, n \frac{2\sigma_u \cdot t \cdot B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (2)$$

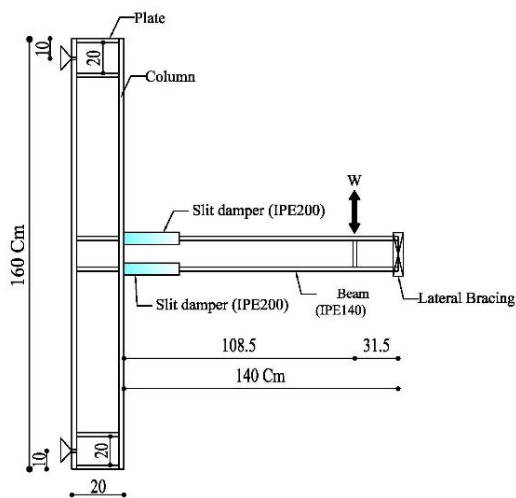
در روابط بالا، اگر عبارت اول محاسبه شود بدان معناست که تسلیم در میراگر شیاردار به دلیل لنگر خمشی است، در حالیکه اگر عبارت دوم محاسبه شود بدین معنی است که نیروی برشی باعث تسلیم میراگر شده است. در روابط بالا σ_y تنش تسلیم، σ_u تنش نهایی، B عرض پایه‌ها و H' ارتفاع معادل پایه‌ها، مطابق شکل (۲) می‌باشد. Oh و همکارانش مقدار H' را به صورت زیر پیشنهاد می‌کنند:

$$H' = H + \frac{2r^2}{H_T} \quad (3)$$

مقادیر H ، H_T و r در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند. فرض طراحی این است که در اتصال پیشنهادی تغییرشکل‌های پلاستیک فقط در میراگرها رخ می‌دهد. در این اتصال، لنگر انتهایی تیر به صورت یک زوج نیرو به دو پروفیل I شکل انتهایی که تیر را به ستون متصل می‌کنند، انتقال می‌یابد.

مدل ساده شده اتصال پیشنهادی در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این مدل تیر به دو فنر در انتهای خود متصل می‌باشد. این دو فنر همان نیمرخ‌های I شکل می‌باشند. در مدل SDC1 فقط یک نیمرخ شیاردار به بال بالایی تیر متصل شده است و بال پایینی تیر بر روی یک نیمرخ I شکل بدون شیار قرار گرفته است، که به صورت نسبی می‌توان سختی آنرا بی‌نهایت در نظر گرفت و آن را به صورت یک میله صلب مدل کرد. در مدل SDC2 بال‌های بالایی و پایینی تیر به دو نیمرخ شیاردار یکسان متصل شده است و سختی فنر بالایی و پایینی یکسان است. در حالتی که پایه‌های نیمرخ شیاردار کاملاً پلاستیک شود به دلیل وجود دو ردیف پایه و شیار در هر میراگر نیروی حاکم در یک میراگر برابر با مقدار $2P_y$ خواهد بود و نیروی برشی در تیر فولادی (W_y) و لنگر خمشی در هر ستون (M_y) از روابط زیر بدست می‌آیند:

تکیه‌گاه جانبی از جا به جایی جانبی انتهای آزاد تیر جلوگیری شده است.



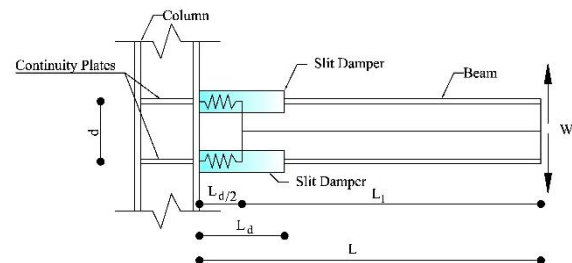
شکل ۴- نمای کلی نمونه های آزمایشگاهی

خواص مکانیکی فولاد تیر (IPE140)، نیمرخ شیاردار (IPE200) و ورق‌های ستون در جدول (۱) نمایش داده شده است. نمونه‌ها برای آزمایش کشش از مصالح فولادی طبق استاندارد ASTM تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمودار تنش-کرنش فولاد جان نیمرخ IPE200 که نیمرخ شیاردار از آن ساخته شده است در شکل (۷) نمایش داده شده است. سوراخ‌های میراگر به کمک واترجت ایجاد شده‌اند و بنابراین هیچ گونه تنش پسماندی در پروفیل میراگر توسعه پیدا نکرده است. جوشکاری هر دو نمونه در یک کارخانه تولید قطعات سازه‌های فولادی انجام شده و تمامی جوش‌ها توسط یک بازرس جوش به صورت چشمی کنترل شده‌اند و همچنین همه جوش‌های اتصال میراگر با آزمایش اولتراسونیک بررسی شده‌اند. جوش‌های اتصال نیمرخ‌های شیاردار به تیر از نوع جوش گوشه می‌باشد و جوشکاری در وضعیت افقی انجام شده

$$W_y = \frac{2P_y \cdot d}{L_1} \quad (۴)$$

$$M_y = W_y \cdot L = \frac{2P_y \cdot d \cdot L}{L_1} \quad (۵)$$

که d ارتفاع تیر، L طول تیر تا بر ستون و L_1 فاصله انتهای تیر تا وسط میراگرهای اتصال می‌باشد.



شکل ۳- مدل ساده شده تحلیلی اتصال پیشنهادی

در حالت نهایی، نیروی حاکم در هر نیمرخ شیاردار برابر با $2P_u$ خواهد بود و نیروی برشی حداکثر هر تیر فولادی (W_u) و لنگر خمشی حداکثر در بر ستون (M_u) از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$W_u = \frac{2P_u \cdot d}{L_1} \quad (۶)$$

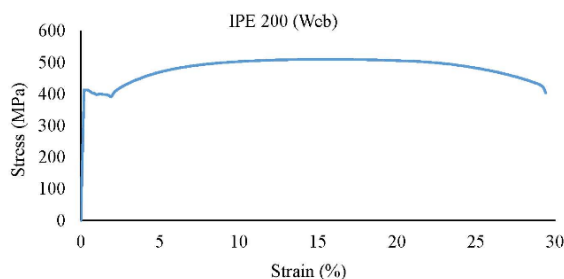
$$M_u = W_u \cdot L = \frac{2P_u \cdot d \cdot L}{L_1} \quad (۷)$$

۴- نمونه‌ها و تنظیمات آزمایش

در این پژوهش، دو نمونه SDC1 و SDC2 با میراگر اتصال با مقیاس یک به دو ساخته شده است (شکل (۴)). در هر دو نمونه تیرها از نیمرخ IPE140 ساخته شده‌اند. ستون‌های هر دو نمونه تیر-ورق I شکل بوده و یکسان می‌باشند. تفاوت اصلی دو نمونه در نحوه اتصال تیر به ستون و هندسه نیمرخ شیاردار می‌باشد. در نمونه SDC1 بال پایینی تیر به یک نیمرخ IPE200 بدون سوراخ متصل شده و این نیمرخ به بال ستون I شکل با جوش نفوذی متصل شده است. بال بالایی تیر این نمونه به یک نیمرخ شیاردار متصل شده است و این میراگر با جوش نفوذی به بال ستون متصل شده است. جزییات نمونه SDC1 در شکل (۵) نمایش داده شده است. در نمونه SDC2 هر دو بال بالایی و پایینی تیر به دو نیمرخ شیاردار یکسان متصل شده است. جزییات نمونه SDC2 در شکل (۶) نمایش داده شده است. بال و جان ستون و ورق‌های سخت کننده و ورق‌های پیوستگی همگی دارای ضخامت ۱۰ میلیمتر می‌باشند. برای جلوگیری از کماتش جانبی تیر در هر دو نمونه، به کمک یک

جدول ۱- خواص مکانیکی مصالح فولادی

نمونه	ضخامت (mm)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	کرنش گسیختگی (%)
تیر (IPE140)	جان = ۴/۷	۳۱۵	۴۸۳	۳۷/۸
	بال = ۶/۹	۳۰۱	۴۶۴	۳۸/۲
میراگر (IPE200)	جان = ۵/۶	۴۱۳	۵۱۰	۲۹/۴
	بال = ۸/۵	۴۰۴	۵۰۲	۳۱
ستون	۱۰	۲۷۰	۴۲۰	۳۰



شکل ۷- نمودار تنش کرنش فولاد جان نیمرخ شیاردار

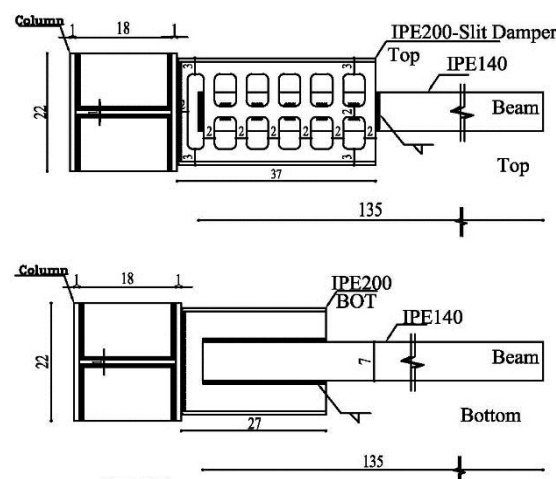
طراحی تیر و ستون به گونه‌ای بوده است که تئوری تیر ضعیف و ستون قوی برقرار باشد. مشخصات طراحی میراگرهای هر دو نمونه در جدول (۲) نمایش داده شده است. دو انتهای ستون به صورت مفصلی در آزمایشگاه به قاب صلب متصل شده است و تیر تحت اثر بارگذاری تغییر مکان چرخه‌ای قرار گرفته است. دامنه این تغییر مکان‌ها به تدریج افزایش می‌یابند. بارگذاری چرخه‌ای مشابه شکل (۸) به نمونه‌ها اعمال شده است. این بارگذاری مطابق پیشنهاد AISC341-05 بر روی تیر اعمال شده است [۲۰].

برای بارگذاری نمونه‌ها از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ ± کیلونیوتن و تغییر مکان ۱۵۰ ± میلی‌متر استفاده شده است. برای تعیین مقدار دوران اتصال مطابق ضوابط FEMA350 و AISC341 از شکل (۹) استفاده شده است. تغییر مکان‌های تیر در زیر نقطه اعمال بار توسط یک حسگر لیزری ثبت شده است.

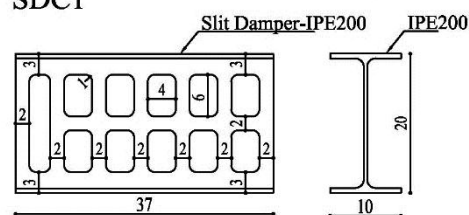
جدول ۲- مشخصات طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه	W_y (kN)	M_y (kN.m)	W_u (kN)	M_u (kN.m)
SDC1	۲۰/۵۱	۲۲/۲۵	۲۵/۳۳	۲۷/۴۸
SDC2	۳۸/۲۳	۴۱/۴۸	۴۷/۲۰	۵۱/۲۲

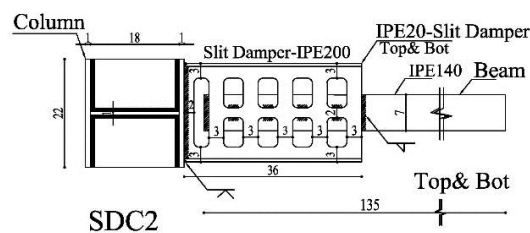
است. در نمونه SDC2 نیمرخ بالایی و پایینی با شرایط یکسان به تیر جوش شده‌اند. جزئیات این اتصال در شکل (۵) نمایش داده شده است. در حالت کاربردی زمانی می‌توان نیمرخ بالایی و پایینی نمونه SDC2 را به صورت یکسان و در وضعیت افقی به تیر جوش داد که الزاما ساخت اتصال در کارخانه انجام شود و اتصال از نوع درختی باشد که در آن اتصال تیر به ستون و جزئیات آن در کارخانه انجام می‌شود.



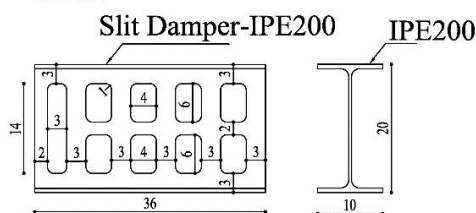
SDC1



شکل ۵- جزئیات نمونه آزمایشگاهی SDC1



SDC2



شکل ۶- جزئیات نمونه آزمایشگاهی SDC2

آمد و با ادامه بارگذاری و افزایش دامنه تغییر مکان‌ها، طول ترک‌ها نیز افزایش یافت. بارگذاری نمونه تا تغییر مکان ۶٪ ادامه پیدا کرد و در این جابجایی تقریباً تمامی پایه‌ها در کل عرض خود دچار ترک شدند و بارگذاری متوقف گردید (شکل ۱۰).



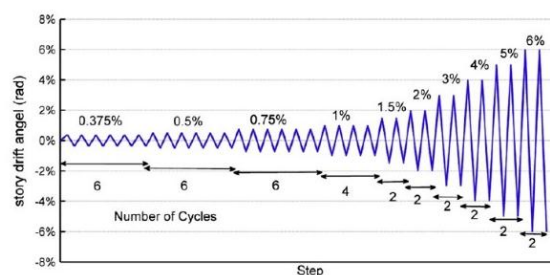
شکل ۱۰- نمونه SDC1 در انتهای بارگذاری

در حین بارگذاری و پس از اتمام بارگذاری هیچگونه نشانه‌ای از ترک یا شکست در جوش‌های اتصال میراگر به تیر و یا جوش‌های اتصال میراگر به ستون مشاهده نگردید. بنابراین وجود میراگر و جذب انرژی توسط آن مانع از آسیب دیدن جوش‌های اتصال گردید که این موضوع یعنی جلوگیری از آسیب دیدن جوش و شکست آن یکی از اهداف استفاده از میراگر سوراخ دار می‌باشد.

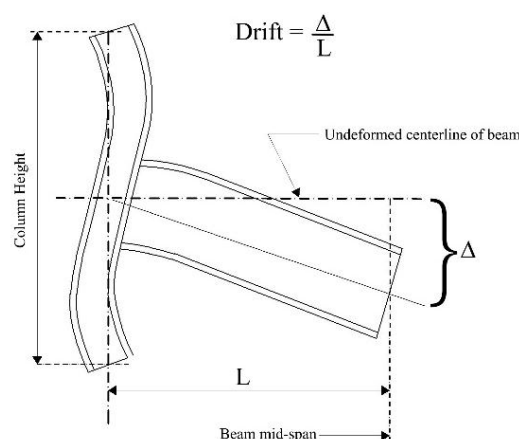
نکته دیگر آنست که در حین بارگذاری هیچ کماتش موضعی در بال و یا جان تیر مشاهده نگردید و همچنین در پایان آزمایش هیچ تغییرشکل ماندگار پلاستیکی در تیر مشاهده نشد که این موضوع نیز یکی دیگر از اهداف استفاده از نیمرخ شیاردار در اتصال تیر به ستون بوده است. بنابراین جذب انرژی توسط میراگر مانع از ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار و پلاستیک در تیر گردیده است. در پایان آزمایش تیر فقط بر روی پروفیل I شکل پایینی اتکا داشته و جوش‌های اتصال تیر به این پروفیل I شکل نیز هیچ آسیبی ندیده‌اند و اتصال ایستایی قائم خود را همانند یک اتصال مفصلی حفظ نموده است.

۶- مشاهدات آزمایش نمونه SDC2

در این نمونه از دو نیمرخ شیاردار مشابه برای اتصال بال بالایی و پایینی تیر به ستون استفاده شده است. بر روی این نمونه نیز بارگذاری به صورت تغییر مکان چرخه‌ای اعمال می‌گردد. در این نمونه اولین ترک‌ها بر روی پایه‌های میراگرها به ازای



شکل ۸- نمودار بارگذاری اعمال شده [۲۰]



شکل ۹- اندازه گیری میزان دوران اتصال [۲۱]

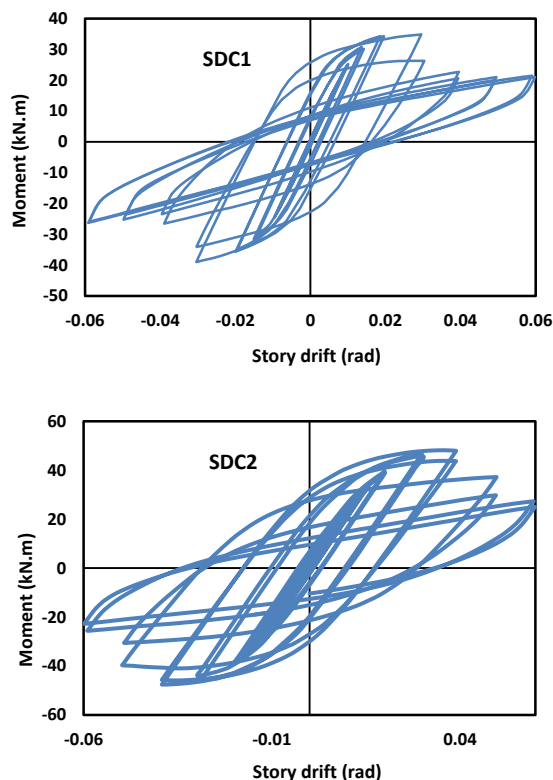
۵- مشاهدات آزمایش نمونه SDC1

در این نمونه فقط از یک نیمرخ شیاردار برای اتصال تیر به ستون استفاده شده است. نیمرخ شیاردار، بال بالایی تیر را به ستون متصل می‌کند و بال پایینی تیر توسط یک پروفیل I شکل بدون سوراخ به ستون متصل گردیده است. بارگذاری چرخه‌ای که حالتی مشابه بارگذاری زلزله را بر روی اتصال شبیه‌سازی می‌کند به نمونه اعمال شده است.

در اولین چرخه تغییر مکان ۳ درصد اولین ترک‌ها بر روی پایه‌های میراگر ایجاد گردید و در چرخه بعدی این ترک‌ها توسعه یافتند. در اولین چرخه تغییر مکان ۳ درصد، حداقل مقدار لنگر خمشی در بر اتصال به ستون برابر $1/4 M_p$ می‌باشد. تا تغییر مکان ۳ درصد مقدار لنگر خمشی مقاوم اتصال و به عبارت دیگر بار وارد بر تیر افزایش می‌یابد، اما با افزایش تغییر مکان از ۳ درصد به ۴ درصد به دلیل توسعه ترک در پایه‌های میراگر مقدار لنگر خمشی مقاوم اتصال کاهش می‌یابد. مقدار لنگر خمشی مقاوم اتصال در اولین چرخه جا به جایی ۴ درصد برابر با $0.95 M_p$ می‌باشد. این مقدار بیشتر از $M_p/8$ است که توسط AISC توصیه شده است. از اینجا به بعد ترک‌هایی در دو انتهای هر یک از پایه‌های میراگر اتصال بوجود



شده و این امر سبب می‌شود که این اتصال انعطاف‌پذیرتر بوده و تمرکز تنش کمتری نسبت به نمونه SDC1 در میراگرها ایجاد گردد. در نمونه SDC1، افت مقاومت خمشی در چرخه اول دوران ۰/۰۴ رادیان نسبت به چرخه اول دوران ۰/۰۳ رادیان برابر با ۳۲ درصد می‌باشد. برای نمونه SDC2، افت مقاومت خمشی در چرخه اول دوران ۰/۰۵ رادیان نسبت به چرخه اول دوران ۰/۰۴ رادیان برابر با ۱۹ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودار لنگر-دوران نمونه‌های آزمایشگاهی

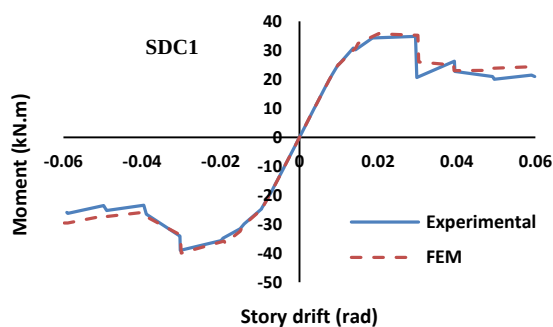
۷- مدل‌های اجزای محدود

در این مطالعه، علاوه بر نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال تیر به ستون با میراگر، مدل‌های اجزای محدود این اتصال نیز ساخته شد و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. این مدل‌های عددی نیز تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند تا اثر زلزله را بر روی اتصال پیشنهادی با میراگر نمایش دهند. برای مدل سازی عددی از نرم افزار ABAQUS استفاده شد. در این نرم افزار از المان‌های Shell چهار گرهی برای مدل کردن تیرها و ستون‌ها و میراگرها استفاده شده است. المان‌های پوسته از نوع S4R می‌باشند. این المان دارای چهار گره بوده و در هر گره ۶ درجه آزادی دارد. خواص مصالح فولادی در هر قسمت تیر، ستون و میراگر اتصال بر حسب نمودار به دست آمده از آزمایش

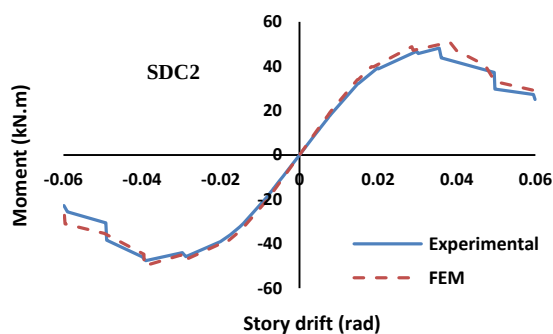
تغییر مکان نسبی طبقه برابر با ۴ درصد رخ می‌دهد. در این نمونه با افزایش تغییر مکان تا ۴ درصد مقدار لنگر خمشی مقاوم اتصال نیز افزایش می‌یابد. مقدار لنگر خمشی مقاوم به ازای تغییر مکان ۴ درصد $1/3M_p$ می‌باشد. این مقدار بزرگ‌تر از $0/8M_p$ است، که توسط AISC توصیه شده است. با افزایش تغییر مکان از ۴ درصد به ۵ درصد و با توسعه ترک‌ها بر روی پایه‌های میراگرها، مقدار لنگر خمشی مقاوم افت می‌کند. مقدار لنگر خمشی مقاوم در اولین چرخه تغییر مکان نسبی ۵ درصد برابر با $1/4M_p$ می‌باشد. این کاهش لنگر خمشی مقاوم در چرخه‌های بعدی نیز اتفاق می‌افتد. نکته قابل توجه در مورد توسعه ترک‌ها این است که با وجود اینکه ترک‌های اولیه بر روی هر دو میراگر بالایی و پایینی رخ دادند، اما ترک‌ها بر روی میراگر بالایی بسیار سریعتر گسترش یافتند و بنابراین در هر چرخه تمرکز تنش بر روی میراگر بالایی بیشتر و بیشتر گردید و انرژی بیشتری توسط میراگر بالایی جذب شد، اما در پایه‌های میراگر پایینی فقط ترک‌های ابتدایی وجود داشتند و در انتهای آزمایش، اتصال هنوز ایستایی خود را حفظ نموده بود. در آزمایش این نمونه نیز هیچگونه ترک و شکستی در هیچ کدام جوش‌های اتصال مشاهده نگردید. بنابراین جذب انرژی توسط میراگرها مانع از آسیب دیدگی جوش‌های اتصال گردید. در حین آزمایش در نمونه SDC2، هیچگونه کماتش موضعی در بال یا جان تیر رخ نداد و پس از اتمام آزمایش نیز هیچگونه تغییر شکل ماندگار پلاستیک در تیر مشاهده نگردید. نمودارهای لنگر-دوران اتصال برای دو نمونه آزمایشگاهی در شکل (۱۱) ترسیم شده است. مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی نشان دهنده میزان انرژی جذب شده توسط اتصال می‌باشد. این مقدار برای نمونه SDC1 برابر با $14/13$ کیلوژول و برای نمونه SDC2 برابر با $21/39$ کیلوژول می‌باشد که نشان دهنده جذب انرژی بیشتر توسط نمونه SDC2 می‌باشد و عملکرد بهتر این نمونه را نشان می‌دهد. این جذب انرژی بیشتر ناشی از وجود دو میراگر در این نمونه است. در حالیکه در نمونه SDC1 فقط از یک میراگر استفاده شده است.

همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، نمونه SDC1 پس از دوران ۳ درصد افت مقاومت خمشی را تجربه می‌کند، دلیل این افت مقاومت، ایجاد و گسترش ترک‌ها در میراگر اتصال می‌باشد. در نمونه SDC2 این افت مقاومت خمشی دیرتر و به ازای دوران ۴ درصد رخ می‌دهد. دلیل آنکه ترک‌ها در نمونه SDC2 دیرتر ایجاد شده و دیرتر گسترش می‌یابند آنست که در این اتصال از دو میراگر برای اتصال تیر به ستون استفاده

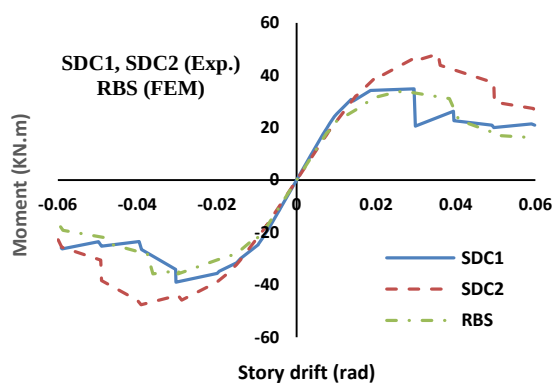




الف) نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی SDC1



ب) نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی SDC2

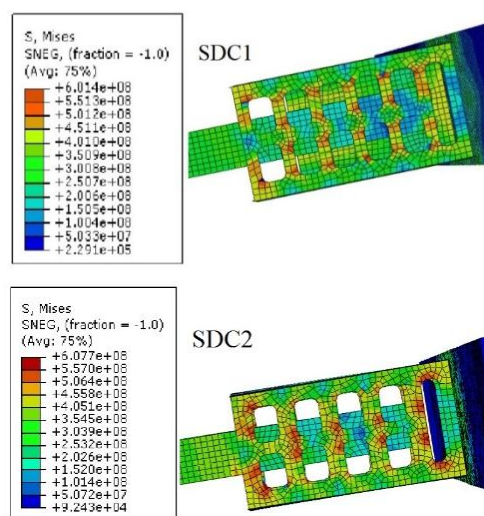


ج) نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل عددی RBS

شکل ۱۳- مقایسه منحنی‌های اسکلتون لنگر-دوران نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی

برای مقایسه بیشتر نمونه‌های آزمایشگاهی با اتصال با مقطع کاهش یافته منحنی اسکلتون این دو نمونه و مدل اتصال کاهش یافته در شکل (۱۳) ترسیم شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود بیشترین سختی اولیه را نمونه SDC1 دارد و پس از آن سختی اولیه مدل RBS و نمونه SDC2 تقریباً برابر بوده و منحنی آنها به ازای دوران‌های کوچک تقریباً مماس برهم می‌باشد. در ادامه با افزایش لنگر به ازای دوران ۰/۰۲ رادیان منحنی سه نوع اتصال کاملاً از هم متمایز می‌شوند. نمونه‌های SDC1 و RBS بعد از این نقطه افزایش لنگر چندان را تجربه نمی‌کنند. در حالیکه در نمونه SDC2 تا دوران ۰/۰۴ رادیان

کشش مصالح فولادی، به نرم افزار معرفی شده است. مهار جانبی در انتهای مدل‌ها همانند نمونه‌های آزمایشگاهی اعمال شده است. بارگذاری چرخه‌ای همانند نمونه آزمایشگاهی بر روی تیر در نمونه‌های عددی نیز اعمال شده است. بیشترین تنش‌ها برای نمونه SDC1 در تغییر مکان ۳ درصد و برای نمونه SDC2 در تغییر مکان ۴ درصد ایجاد گردید. در شکل (۱۲)، کانتورهای بیشینه تنش ون میز برای مدل‌های SDC1 و SDC2 به ترتیب برای تغییر مکان‌های ۳ درصد و ۴ درصد نمایش داده شده است. از تنش‌های ون میز به عنوان معیاری برای تعیین جاری شدن مصالح ایزوتروپیک و شکل‌پذیر در ترکیبات تنش پیچیده استفاده می‌شود.



شکل ۱۲- کانتورهای بیشینه تنش ون میز نمونه‌ها (Pa)

منحنی اسکلتون لنگر-دوران برای مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۱۳) ترسیم شده‌اند. در نمودار اسکلتون مقدار حداکثر لنگر خمشی مقاوم در هر یک از چرخه‌های بارگذاری بر حسب مقدار دوران آن چرخه ترسیم می‌گردد. در نمودار اسکلتون مقدار حداکثر لنگر خمشی مقاوم در هر یک از چرخه‌های بارگذاری بر حسب مقدار دوران آن چرخه ترسیم می‌گردد. منحنی‌های تحلیل عددی مطابقت مناسبی با منحنی‌های اسکلتون نمونه‌های آزمایشگاهی دارند. در ادامه برای مقایسه رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی با اتصالات فولادی متداول یک مدل عددی از اتصال تیر به ستون با مقطع کاهش یافته (RBS) نیز توسط نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده است. در این مدل RBS نیز مشخصات تیر و ستون مشابه مشخصات تیر و ستون در نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد و کاهش مقطع بال‌های تیر با برش قطاع دایروی در نظر گرفته شده است.

افزایش لنگر به ازای افزایش دوران اتصال مشاهده می‌گردد. نمونه SDC1 پس از دوران 0.3° رادیان دچار افت لنگر می‌گردد که این موضوع بدلیل ایجاد ترک‌هایی در میراگر اتصال می‌باشد. نمونه‌های SDC2 و RBS نیز پس از دوران 0.4° کاهش لنگر را تجربه می‌کند. در بین سه نوع اتصال بیشترین ظرفیت لنگر خمشی را نمونه SDC2 با $1.73M_p$ دارا می‌باشد. حداکثر ظرفیت لنگر در نمونه SDC1 برابر با $1.4M_p$ و برای مدل RBS برابر با $1.28M_p$ می‌باشد. در اینجا نیز به دلیل استفاده از دو میراگر در نمونه SDC2 ترک‌ها در میراگرهای این اتصال دیرتر ایجاد شده و دیرتر گسترش می‌یابند و باعث می‌شود نمونه تا دوران‌های بالاتر افزایش لنگر مقاوم را تجربه کند.

در جدول (۳) نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تئوری، داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی نمایش داده شده است.

جدول ۳- مقایسه نتایج تئوری، عددی و آزمایشگاهی

نمونه	پیشینه لنگر تئوری (kN.m)	پیشینه لنگر عددی (kN.m)	پیشینه لنگر آزمایشگاهی (kN.m)
SDC1	۲۷/۴۸	۳۹/۹۳	۳۸/۹۹
SDC2	۵۱/۲۲	۵۰/۸۴	۴۸/۱۶

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش، نوع جدیدی از اتصال خمشی تیر به ستون فولادی همراه با نیمرخ شیاردار فولادی معرفی شده است. این نمونه‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شدند. در یکی از نمونه‌ها (SDC1) از یک نیمرخ شیاردار و در دیگری (SDC2) از دو نیمرخ شیاردار استفاده شده است. در نمونه SDC1، حداکثر لنگر خمشی به ازای تغییر مکان ۳ درصد به میزان $1.4M_p$ در اتصال ایجاد گردید. همچنین در این نمونه، لنگر خمشی مقاوم به ازای تغییر مکان ۴ درصد برابر با $0.95M_p$ می‌باشد. در نمونه SDC2، لنگر خمشی به ازای تغییر مکان ۴ درصد برابر با $1.73M_p$ است. در هر دو نمونه مقدار لنگر خمشی نمونه‌ها به ازای تغییر مکان ۴ درصد بیشتر از حداقل مقدار تعیین شده توسط آیین نامه AISC یعنی $0.8M_p$ می‌باشد. در نمونه SDC2 با استفاده از دو نیمرخ شیاردار برای اتصال تیر به ستون، شکل‌پذیری و جذب انرژی اتصال افزایش یافته است. همچنین ظرفیت لنگر خمشی این اتصال نیز افزایش یافته است. در این نمونه تا قبل از تغییر مکان ۴ درصد ترک در پایه‌های میراگرها بوجود نیامد.

این نوع اتصال‌ها ظرفیت تحمل دوران پلاستیک مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ها [۱۹-۲۲] را دارند و در عین حال می‌توانند لنگر خمشی بیش از مقادیر توصیه شده توسط آیین‌نامه‌ها را تحمل کنند. موارد زیر بر اساس نتایج آزمایش‌ها بدست آمده‌اند.

- این نوع اتصال از تمرکز تنش و آسیب دیدن جوش‌های اتصال جلوگیری می‌کند. لازم به ذکر است که این نوع آسیب در سایر اتصال‌های خمشی متداول، امری بسیار رایج می‌باشد. در دو نمونه مورد آزمایش، هیچگونه شکست و آسیبی در جوش‌های اتصال مشاهده نگردید.

- در طول مدت بارگذاری، تغییر شکل‌های پلاستیک فقط در میراگرها ایجاد شد و بنابراین هیچ آسیبی در تیر و ستون ایجاد نشد.

- در طول مدت بارگذاری، هیچ کمناش جانبی در بال‌ها و جان تیرها ایجاد نشد و پس از آزمایش نیز هیچ تغییر شکل پلاستیک ماندگاری در تیر ایجاد نگردید و جذب انرژی بارگذاری فقط توسط میراگر انجام شد.

- نمونه SDC2 با دو میراگر، ظرفیت جذب انرژی بیشتری را نسبت به نمونه SDC1 با یک میراگر از خود نشان می‌دهد. نسبت جذب انرژی نمونه SDC2 به نمونه SDC1 برابر 1.51 می‌باشد. همچنین نسبت ظرفیت لنگر خمشی مقاوم نمونه SDC2 به نمونه SDC1 برابر 1.23 می‌باشد.

موارد بالا، کارایی مناسب این اتصال جدید را نشان می‌دهند، زیرا هدف اصلی از کاربرد میراگر، افزایش شکل‌پذیری اتصال خمشی تیر به ستون فولادی و جلوگیری از آسیب دیدن جوش‌های اتصال، چشمه اتصال و تیر می‌باشد. که همگی این اهداف در نمونه‌های آزمایشگاهی تأمین شدند. با این وجود، انجام مطالعه و پژوهش بیشتر برای شناسایی رفتار این نوع اتصال جدید ضروری می‌باشد.

۹- مراجع

- [1] Popov, E.P. and Tsai, K.C. (1989), "Performance of Large Seismic Steel Moment Connections under Cyclic Loads", Engineering Journal of AISC, Vol. 26, No. 2, pp. 51-60.
- [2] Engelhardt, M.D., and Husain, A. S. (1993), "Cyclic-Loading Performance of Welded Flange-Bolted Web Connections", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 12, pp. 3537-3550.
- [3] SAC, (1997), Interim Guidelines Advisory No.1, FEMA-267A, SAC Joint Venture.
- [4] Chi, B. and Uang, C.M. (2002), "Cyclic Response and Design Recommendations of Reduced Beam Section Moment Connections with Deep Columns", Journal of Structural Engineering, Vol.128, No. 4, pp. 464-473.
- [5] Wilkinson, S., Hurdman, G. and Crowther, A. (2006), "A Moment Resisting Connection for Earthquake Resistant



- [14] Benavent-Climent, A. (2010), "A Brace-Type Seismic Damper Based on Yielding the Walls of Hollow Structural Sections", *Engineering Structures*, Vol.32, No. 4, pp. 1113-1122.
- [15] Maleki, S. and Mahjoubi, S. (2013), "Dual-Pipe Damper", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 85, pp. 81-91.
- [16] Tagawa, H., Yamanishi, T., Takaki, A. and Chan, R.W. (2016), "Cyclic Behavior of Seesaw Energy Dissipation System with Steel Slit Dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 117, pp. 24-34.
- [17] Banisheikholeslami, A., Behnamfar, F. and Ghandil, M. (2016), "A Beam-to-Column Connection with Visco-Elastic and Hysteretic Dampers for Seismic Damage Control", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 117, pp. 185-195.
- [18] Deihim, M. and Kafi, M.A. (2017), "A Parametric Study into the New Design of a Steel Energy-Absorbing Connection", *Engineering Structures*, Vol. 145, pp. 22-33.
- [19] AISC 358-10, (2010), *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, American Institute of Steel Construction.
- [20] AISC 341-05, (2005), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction.
- [21] FEMA-355D, (2000), *State of the Art Report on Connection Performance*, Federal Emergency Management Agency.
- [22] FEMA 350, (2000), *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, Federal Emergency Management Agency.
- [6] Hedayat, A.A. and Celikag, M. (2010), *Reduced Beam Web (RBW) Connections with Circular Openings, Structural Steel, Shapes and Standards, Properties and Applications*.
- [7] Mirghaderi, S.R., Torabian, S. and Imanpour, A. (2010), "Seismic Performance of the Accordion-Web RBS Connection", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, No. 2, pp. 277-288.
- [8] Skinner, R., Kelly, J. and Heine, A. (1974), "Hysteretic Dampers for Earthquake Resistant Structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 3, No. 3, pp. 287-296.
- [9] Chan, R.W. and Albermani, F. (2008), "Experimental Study of Steel Slit Damper for Passive Energy Dissipation", *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 4, pp. 1058-1066.
- [10] Oh, S.-H., Kim, Y.-J. and Ryu, H.-S. (2009), "Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers", *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 9, pp. 1997-2008.
- [11] Saffari, H., Hedayat, A. and Nejad, M.P. (2013), "Post-Northridge Connections with Slit Dampers to Enhance Strength and Ductility", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 80, pp. 138-152.
- [12] Jacobsen, A., Hitaka, T. and Nakashima, M. (2010), "Online Test of Building Frame with Slit-Wall Dampers Capable of Condition Assessment", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, No. 11, pp. 1320-1329.
- [13] Hedayat, A.A. (2015), "Prediction of the Force Displacement Capacity Boundary of an Unbuckled Steel Slit Damper", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 114, pp. 30-50.

پی نوشت

¹ Reduced Beam Section (RBS)

² Seismic Analysis Code (SAC)

³ Accordion-web RBS

⁴ Slit damper