



## بررسی عددی تأثیر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و سوراخ‌دار بودن صفحات کناری بر عملکرد چرخه‌ای اتصالات

وحید صابری<sup>۱\*</sup>، حمید صابری<sup>۱</sup>، امید میثاق مظاهری<sup>۱</sup>، عباسعلی صادقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوانکی، سمنان، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۳  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

### کلمات کلیدی:

اتصال گیردار  
صفحه ی کناری  
شکست ترد  
عملکرد چرخه ای  
آلیاژ حافظه‌دار شکلی

**خلاصه:** در اتصالات گیردار رایج، نقطه‌ضعف بزرگ، شکست ترد ناحیه‌ی جوشکاری هنگام وقوع زلزله می باشد. یک راهکار خلاقانه برای رفع چنین نقطه‌ضعف‌هایی استفاده از صفحات کناری در اتصال تیر به ستون می باشد. در مطالعات گذشته، تمرکز بیشتر بر عملکرد اتصالات با صفحه ی کناری و مقایسه ی این اتصالات با انواع دیگر اتصالات گیردار بوده است. در این تحقیق، به بررسی تأثیر جنس، ضخامت و سوراخ‌دار بودن صفحات کناری بر عملکرد چرخه ای اتصال خمشی پرداخته می شود. برای این منظور علاوه بر استفاده از صفحات کناری از جنس فولاد نرمه (ST۳۷) و فولاد پر مقاومت کم آلیاژ (ST۵۲)، از آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل - تیتانیوم (SMA-Ni-Ti) نیز استفاده شده است تا اثر فوق‌الاستیک این آلیاژ بر عملکرد اتصال نیز مورد بررسی قرار گیرد. مدل‌سازی و تحلیل در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS تحت بارگذاری چرخه ای صورت گرفته است و نتایج حاکی از افزایش ظرفیت و شکل پذیری اتصالات با صفحه ی کناری از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی بوده و همچنین مشخص گردید که می توان ضخامت های بهینه ای را برای صفحات کناری انتخاب نمود تا بدین صورت بیشترین شکل پذیری ممکن در اتصال ایجاد گردد و از تشکیل مفصل پلاستیک جلوگیری شود. بر اساس نتایج به دست آمده، با تغییر پیکربندی و ایجاد برش در اتصال بطور کلی ظرفیت اتصال در دوران ۰/۰۴ رادیان (حد پذیرش قاب‌های خمشی) کاهش یافته و تمرکز تنش در گوشه‌های برش خورده بیشترین تأثیر را در گسیختگی صفحات کناری دارند.

### ۱- مقدمه

به مقاومت اتصال. هدف از این دو تغییر جدا کردن مفصل پلاستیک از سطح ستون و انتقال آن به تیر بود. این کار احتمال شکست ترد جوش های شیاری اتصال را کاهش داده و به اتصال این قابلیت را می داد که دوران پلاستیک را تا ۰/۰۳ رادیان با افت لنگر پلاستیک کمتر از ۲۰٪ تحت بارهای چرخه ای کنترل نماید. از جمله اتصالاتی که در دهه های اخیر کاربرد آن رواج پیدا کرده است اتصال تیر به ستون با استفاده از صفحات کناری می باشد. در اتصالات با صفحه ی کناری یک جفت صفحه ی فولادی تیر را به ستون متصل می کند. این کار، اتصال جوشی انتهایی تیر به بال ستون را حذف می کند و

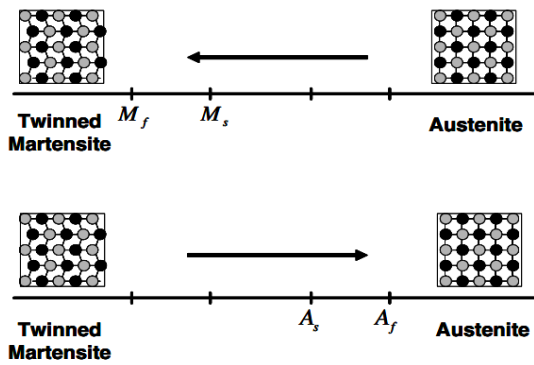
ساخت سازه های فولادی قاب خمشی<sup>۱</sup> در نیمه ی دوم قرن بیستم دچار تغییرات چشمگیری شد که خود حاصل به چالش کشیده شدن روندهای طراحی آئین نامه ای توسط زلزله هایی همچون نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) بود. عملکرد سازه های فولادی در این دو زلزله از نظر شکل پذیری پایین تر از سطح مورد انتظار بود و شکست ترد در اتصالات فولادی قاب خمشی مشاهده شد. بعد از زلزله ی نورتریج، دو تغییر اساسی در طراحی اتصالات فولادی ایجاد شد: (۱) افزایش مقاومت اتصالات (۲) ضعیف کردن مقاومت تیر نسبت

1 Steel Moment Frame

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saberi.vahid@gmail.com

2 SidePlate





شکل ۱. تغییر شکل مارتنزیتی با تغییر دما در غیاب بار خارجی [۸]  
 Fig. 1. The deformation of martensite with temperature changes without external load [8]

محوری شده است.

در مطالعه‌ی فعلی به منظور بررسی جامع رفتار صفحات کناری در اتصالات علاوه بر فولاد های نرمه و پر مقاومت کم‌آلیاژ، آلیاژ های حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم<sup>۱</sup> (SMA-Ni-Ti) نیز بکار گرفته شده است. آلیاژ های حافظه‌دار شکلی گروهی از آلیاژ های فلزی هستند که در تغییر شکل های زیاد با افزایش دما شکل اولیه ی خود را به دست می آورند. وقتی فنری از آلیاژ حافظه‌دار شکلی ساخته می‌شود، قابلیت کشش و انبساط دارد و شبکه‌ی کریستالی آن قابل تغییر است، بدون اینکه دچار خرابی گردد. زمانی که فنر تا دمای خاصی حرارت داده می‌شود، اتم‌های شبکه‌ی کریستالی نظم و ترتیب اولیه‌ی خود را به دست آورده و فنر مارپیچ می‌شود [۸]. آلیاژ های حافظه‌دار شکلی دارای دو فاز با شکل کریستالی متفاوت و در نتیجه خصوصیات متفاوت هستند. یکی از این فازها آستنیت<sup>۲</sup> است که فاز پایدار آن در دمای بالا است و دیگری مارتنزیت<sup>۳</sup> که فاز پایدار آن در دمای پایین است. تغییر حالت SMA بین این دو حالت که با اعوجاج برشی شبکه‌بندی اتفاق می‌افتد تغییر شکل مارتنزیتی نامیده می‌شود. تغییر شکل برگشت‌پذیر مارتنزیتی با سرد و گرم کردن در غیاب بار خارجی در شکل ۱ نمایش داده شده است [۸].

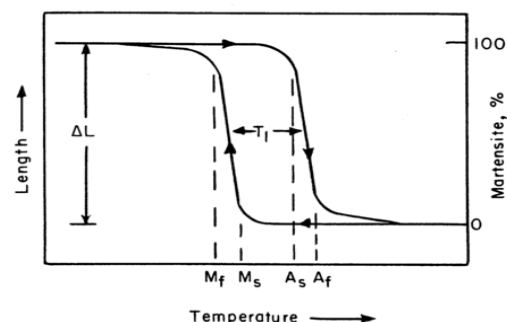
در حالت بدون تنش، یک آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای چهار دمای مشخصه می‌باشد.  $A_s$  دمای آغاز حالت آستنیت،  $A_f$  دمای پایان حالت آستنیت،  $M_s$  دمای آغاز حالت مارتنزیت و  $M_f$  دمای پایان حالت مارتنزیت می‌باشد. اگر دمای محیط بالاتر از  $A_f$  باشد ماده اصطلاحاً

تیر مستقیماً اتصالی به ستون ندارد. جدایی تیر از ستون مانع تمرکز تنش سه محوری موجود در اتصالات گیردار رایج می‌شود و افزایش سختی صفحات کناری تا حد زیادی قاب سازه‌ای را سخت تر کرده و با ایجاد سه چشمه‌ی اتصال موازی (دو صفحه کناری به همراه جان ستون) وابستگی سختی به تغییر شکل چشمه‌ی اتصال حذف می‌گردد. در این نوع اتصال صفحات فولادی در بالا و پایین تیر تنها به منظور پر کردن فاصله‌ی بین عرض بال تیر و عرض ستون استفاده می‌شوند [۱].

مطالعات انجام شده در زمینه‌ی اتصالات با صفحات کناری، غالباً بر تعیین عملکرد لرزه‌ای، مقایسه با اتصالات دیگر و بهسازی لرزه‌ای به کمک این اتصالات متمرکز بوده‌اند. واثقی امیری و همکاران [۲] پارامترهای لرزه‌ای سیستم‌های دوگانه با اتصالات دارای صفحات کناری را مورد بررسی قرار دادند و پارامترهای لرزه‌ای مانند ضرایب شکل‌پذیری، تنش مجاز، اضافه مقاومت و ضریب رفتار را در این نوع قاب‌ها محاسبه کردند. دیلمی و یخچالیان [۳] اتصالات گیردار با صفحات کناری را در نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS مدل‌سازی کرده و رفتار این اتصالات را با اتصالات گیردار معمولی مقایسه نمودند. در زمینه‌ی بهسازی سازه هم می‌توان به مطالعه‌ی انجام شده توسط چو و همکاران [۴] اشاره کرد. در این مطالعه شرایط اولیه‌ی اتصال بهسازی شده به صورت گیردار با بال جوش شده و جان پیچ شده به ستون بوده است که بعد از بهسازی، دو صفحه‌ی کناری در دو طرف بال قرار گرفته و به ستون متصل گردیده است. در زمینه‌ی مطالعات آزمایشگاهی نیز می‌توان به مطالعه‌ی دیلمی و شیراوند [۵] اشاره کرد. در این مطالعه دو نمونه‌ی اتصال گیردار با صفحه‌ی کناری تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند و عملکرد چرخه‌ای آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. فریدمهر و همکاران [۶] به بررسی عملکرد سازه‌ی فولادی قاب خمشی دارای اتصال گیردار با صفحه‌ی کناری تحت خرابی پیش رونده پرداخته‌اند. اتصال خمشی صفحه کناری قادر به دست‌یابی به ظرفیت چرخشی کافی و توسعه ظرفیت غیر ارتجاعی کامل تیر اتصال‌دهنده است. نتایج نشان داد که این اتصال دارای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری مناسبی در برابر خرابی پیش رونده می‌باشد. علیزاده و همکاران [۷] به ارزیابی عملکرد محوری اتصال صفحه کناری جان تیر پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که صفحه‌ی کناری اتصال باعث افزایش مقاومت

1 Nitinol Shape Memory Alloys  
 2 Austenite Phase  
 3 Martensite Phase

مارتنزیت یا فوق‌الاستیک را مورد بررسی قرار دادند. شبیه سازی های عددی نشان داد که اتصالات SMA فوق‌الاستیک برای کنترل تغییرشکل باقیمانده در سازه مناسب تر هستند و همچنین اتصالات حاوی SMA مارتنزیت در کاهش تغییرشکل حداکثر تأثیر بیشتری دارد. اسپیشر و همکاران [۱۱] آزمایش بارگذاری چرخه ای را بر روی اتصالات ساده با تاندون های فولادی، SMA مارتنزیت، SMA فوق‌الاستیک و SMA فوق‌الاستیک به همراه میله های آلومینیومی موازی انجام دادند. برخلاف مدل های ساخته شده با فولاد، SMA مارتنزیت و همچنین SMA فوق‌الاستیک توانایی مرکزگرایی قابل‌ملاحظه‌ای از خود نشان دادند و تغییرشکل های باقیمانده در آن ها تحت بارگذاری تا جابه‌جایی نسبی ۵٪ ناچیز بود. فنگ و همکاران [۱۲] رفتار اتصالات گیردار با ورق انتهایی دارای پیچ های SMA را در مدل های بزرگ‌مقیاس تحت بار چرخه ای مورد آزمایش قرار دادند. همه ی مدل ها توانایی مرکزگرایی بالایی از خود نشان دادند و ظرفیت میرایی انرژی آن ها در حد متوسط بوده است. وانگ و همکاران [۱۳] اتصال مرکزگرا بین تیر H شکل و ستون های دایره ی توخالی را با استفاده از تاندون های فوق‌الاستیک SMA معرفی کردند. در مطالعه ی آن ها شش نمونه ی بزرگ‌مقیاس مورد آزمایش قرار گرفت و قابلیت مرکزگرایی آن ها بررسی شد. بعد از اعمال بار چرخه ای تا جابه‌جایی نسبی ۶٪، اتصالات دارای عملکرد مناسبی بوده اند و میرایی انرژی نسبتاً خوبی از خود نشان داده اند و در نهایت قابلیت مرکزگرایی آن ها مطلوب گزارش شده است. ماوریا و همکاران [۱۴]، مهاربندهای کمانش تاب کوچکی با هسته ی کوچک تر و طول کوتاه پیشنهاد کردند که می توانند در سازه به عنوان فیوز و میراگر بکار روند. اوزجلیک و همکاران [۱۵]، مهاربند کمانش تابی با شرایط اتصال متفاوت را به صورت تست های آزمایشگاهی پیشنهاد کردند. نوآوری این تحقیق ایجاد محدودیت های بیشتر در بخش های مختلف اتصال مصالح به هم می باشد. این قیود باعث کاهش نقص های موضعی و کمانش های آنی در بعضی بخش های مهاربند می گردد. شن و همکاران [۱۶]، عملکرد لرزه ای قاب های با مهاربندهای هم‌محور را با و بدون مهاربندهای کمانش تاب مطالعه کردند. نتایج تحقیق نشان داده است که قاب های با مهاربندهای کمانش تاب دریافت های پسماند را کنترل نموده و ظرفیت تسلیم و فروریزش سازه را افزایش داده اند. سانژینگ و همکاران [۱۷]، با بکار بردن آلیاژ حافظه دار



شکل ۲. نسبت مارتنزیت در برابر دما برای یک ماده حافظه دار شکلی [۸]  
 Fig. 2. The ratio of martensite to temperature for a shape memory material [8]

در حالت آستنیت قرار دارد و رفتار فوق‌الاستیک از خود بروز خواهد داد و اگر دمای محیط کمتر از  $M_f$  باشد، ماده اصطلاحاً در حالت مارتنزیت قرار دارد و رفتار حافظه شکلی از خود بروز خواهد داد. در شکل ۲ زمانی را نشان می‌دهد که ماده تحت حالت بدون تنش قرار گرفته است و تحت بار گرمایی است. تا زمانی که ماده به دمای  $A_s$  نرسیده است، به صورت کاملاً مارتنزیت است، زمانی که دما به  $A_s$  برسد، تبدیل از مارتنزیت به آستنیت آغاز شده تا به دمای بالاتر  $A_f$  برسد، و به سمت  $A_f$  برود. سرانجام زمانی که به دمای  $A_f$  برسد، تبدیل فاز پایان پذیرفته شده و ماده به حالت کاملاً آستنیت در خواهد آمد. در تبدیل معکوس، زمانی که ماده تحت کاهش دما قرار دارد، تا زمانی که ماده به دمای  $M_s$  نرسیده است، در حالت کامل آستنیت قرار دارد. زمانی که به دمای  $M_s$  می‌رسد، کریستال‌های آستنیت شروع به تبدیل شدن به مارتنزیت می‌کنند و زمانی که به دمای  $M_f$  می‌رسد، تبدیل آستنیت به مارتنزیت کامل شده است. در تبدیل معکوس، در دمای بین  $M_s$  و  $M_f$  ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت می‌باشد. حالت مارتنزیت می‌تواند هم توسط دما و هم توسط تنش ایجاد شود [۸].

در ادامه، پیشینه ی مطالعات در زمینه ی کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سازه های قاب خمشی ارائه می گردد. ابولمعالی و همکاران [۹] خصوصیات میراکننده ی انرژی اتصالات T شکل را با استفاده از فولاد و بست های SMA مورد آزمایش قرار دادند. باوجوداینکه در این آزمایش بست های SMA دچار ترک اولیه شدند، اما اتصالات T شکل با بست های SMA میرایی انرژی بیشتری نسبت به اتصال با بست های فولادی از خود نشان دادند. الینگود و همکاران [۱۰] عملکرد لرزه ای قاب های خمشی دارای آرماتورهای SMA

اجزاء محدود ABAQUS [۱۹] پرداخته می شود. همچنین در این مطالعه، با مدل سازی آلیاژهای حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم علاوه بر فولادهای نرمه و پر مقاومت کم آلیاژ از خصوصیت فوق الاستیک این آلیاژها در اتصالات با صفحه ی کناری نیز استفاده شده و عملکرد آن ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- صحت سنجی و مدل سازی نمونه ها

به منظور صحت سنجی مدل های مورد مطالعه، مدل اجزاء محدود نمونه ی آزمایشگاهی انجام شده توسط دیلمی و شیراوند [۵] در نرم افزار ABAQUS [۲۰] شبیه سازی شده است. شمای کلی اتصال در شکل ۳، بارگذاری چرخه ای مطابق شکل ۴، مدل ایجاد شده در نرم افزار ABAQUS در شکل ۵ ارائه شده اند. طبق مشخصات نمونه ی آزمایشگاهی در منبع [۵] از مقطع IPE300 برای تیر و از مقطع 2IPE270 برای ستون استفاده شده است. مشخصات هندسی صفحات کناری در جدول ۱، خصوصیات هندسی تیر و ستون در جدول ۲، ابعاد ورق های بکار رفته در جدول ۳ و مشخصات مصالح در جدول ۴ ذکر شده اند. بارگذاری در این آزمایش به انتهای ستون و به صورت افقی اعمال گردیده و گام های بارگذاری طبق جدول ۵ اعمال گردیده و دوران نهایی اتصال به ۰/۰۶ رادیان می رسد. مشخصات آلیاژهای حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم در جدول ۶ ارائه شده است. در مش بندی مدل از المان پیوسته ی C3D8R با شش وجه و هشت گره استفاده شده است. در شکل ۶ منحنی هیستریزس نمونه ی آزمایشگاهی دیلمی و شیراوند [۵] ذکر شده است. همان طور که از شکل ۷ مشخص است منحنی هیستریزس لنگر-دوران و خروجی نرم افزار ABAQUS تطابق خوبی با منحنی هیستریزس نمونه ی آزمایشگاهی [۵] دارد. پس می توان با اطمینان به مدل سازی و تحلیل های دینامیکی تحت بارگذاری چرخه ای پرداخت و با توجه به تغییر پارامترهای جنس، ضخامت و پیکربندی رفتار صفحات کناری بر عملکرد چرخه ای اتصالات را مورد مطالعه و مقایسه قرار داد. متغیرهای ارائه شده در جدول های ۱ و ۲ به صورت زیر تعریف می شوند [۹]:

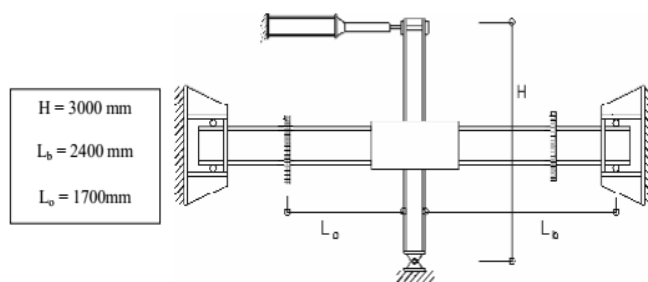
$a$ : فاصله مرکز تا مرکز IPE در ستون.

$b, t_f, t_w$ : به ترتیب ضخامت جان، ضخامت بال و عرض بال.

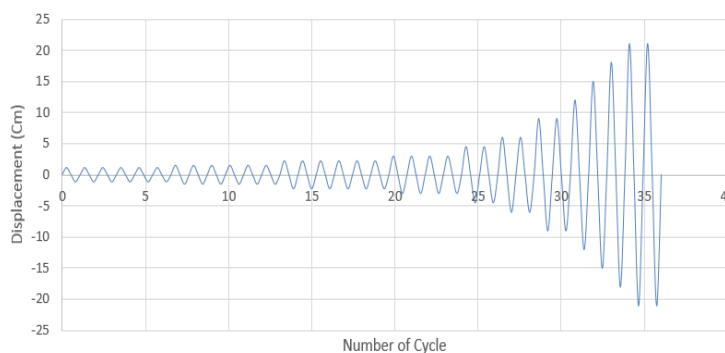
$t_{sp}, I_{sp}, h_{sp}$ : به ترتیب ارتفاع، طول و ضخامت صفحات کناری.

در قاب های با مهاربندهای شورون هشتی کمانش تاب، عملکرد قاب های با مهاربندهای کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار را مطالعه کردند. در این تحقیق عدم توانایی مهاربندهای کمانش تاب در مهار دریافت های پسماند بیان شده است، همچنین از توانایی این مهاربندها در کاهش دریافت طبقات تحت تحلیل های لرزه ای عنوان شده است. فرمانی و قاسمیه [۱۸] در مطالعه ای عددی دو دسته اتصالات تیر به ستون مجهز به تاندون های آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم را به عنوان المان مرکزگرا و پین های فولادی را به عنوان میراگرهای انرژی مکمل مورد بررسی قرار دادند و نقش آن ها را در بهسازی لرزه ای اتصالات قاب خمشی فولادی تعیین نمودند. هاشمی و همکاران [۱۹] دو قاب با تعداد طبقات ۶ و ۱۲ دارای مهاربندهای کمانش تاب در نرم افزار OpenSees به صورت دو بعدی در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی مدل سازی نموده اند و در نهایت نقش آلیاژهای حافظه دار شکلی در آن با استفاده از تحلیل های دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA) تحت ۷ زوج شتاب نگاشت دور از گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P695 بررسی شده اند. بر اساس منحنی های IDA، ظرفیت فروریزش قاب های مذکور ارائه شده و در نهایت منحنی های شکست برای سطح فروریزش توسعه داده شده اند. نتایج نشان داد که ظرفیت فروریزش قاب های دارای مهاربند مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به مهاربند کمانش تاب بیشتر می باشد. به عنوان نمونه، در سطح احتمال ۵۰ درصد، ظرفیت فروریزش قاب ۱۲ طبقه دارای مهاربند مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به قاب دارای مهاربند کمانش تاب، ۳۰ درصد بیش تر شده است. همچنین نتایج بیانگر این مسأله است که در قاب های ۶ طبقه به ازای شتاب های طیفی مختلف، سیستم مهاربندی کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به سیستم مهاربندی کمانش تاب می تواند ۲۸ درصد احتمال فروریزش را کاهش دهد. با بکارگیری آلیاژ حافظه دار شکلی در این قاب ها می توان هزینه بازیابی سیستم خسارت دیده ساختمانی را کاهش داده و سیستم برگشت پذیرتری داشت.

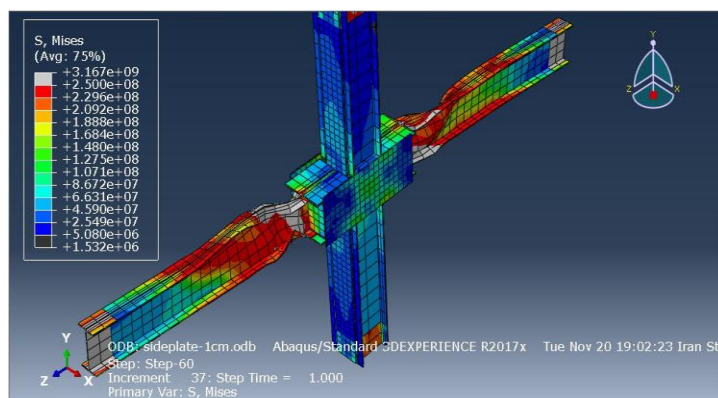
تاکنون تمرکز اکثر مطالعات انجام شده بر روی ظرفیت باربری و شکل پذیری اتصالات با صفحه ی کناری بوده است. در این تحقیق، به عنوان نوآوری به بررسی اثرات جنس، ضخامت و سوراخ دار بودن صفحه ی کناری بر عملکرد چرخه ای اتصالات با استفاده از نرم افزار



شکل ۳. پیکربندی نمونه ی آزمایشگاهی دیلمی و شیراوند [۵]  
**Fig. 3. The configuration of Deylami and Shiravand experimental sample [5]**



شکل ۴. بارگذاری چرخهای بر اساس پروتکل [1]  
**Fig. 4. The cyclic loading based on SAC [1]**



شکل ۵- نمونه ی آزمایشگاهی مدل سازی شده در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS  
**Fig. 5. Experimental sample modeled in finite element ABAQUS software**

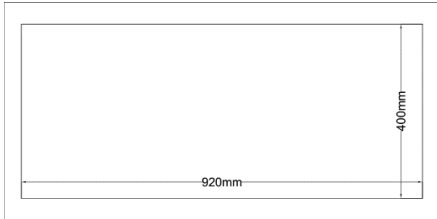

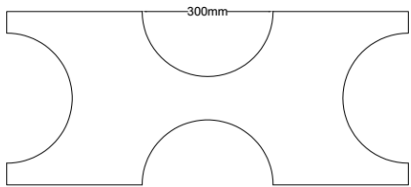
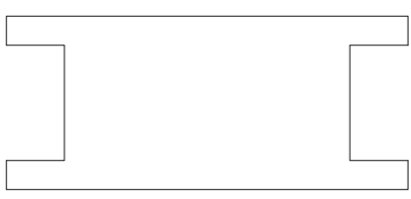
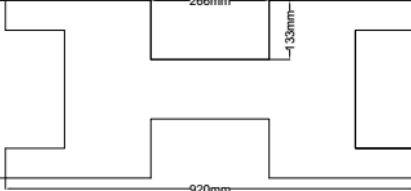
ABAQUS، مدل میله ای با مقطع دایره ای شکل به شعاع ۱۰۰ میلی متری و طول ۱/۵ متر ایجاد شد و مشخصات فوق الاستیک آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم بر اساس مقاله ی مرجع [۲۱] تعریف گردید. سپس این مدل تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفت و منحنی تنش کرنش آن استخراج گردید. شمای این مدل در شکل ۸ ارائه شده است.

مطابق شکل ۹ مشخصات حاصل از خروجی نرم افزار ABAQUS

$l_{cov}$ : طول صفحات رویی و نشیمن.  
 $t_{cov}, b_{cov}$ : به ترتیب ضخامت و عرض صفحات رویی.  
 $t_{bcov}, b_{bcov}$ : به ترتیب ضخامت و عرض صفحه نشیمن.  
 $t_{con}$ : ضخامت صفحات پیوستگی.  
 $t_{sh}$ : ضخامت صفحات برش.

همچنین به منظور صحت سنجی رفتار آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم و اعمال منحنی تنش-کرنش مربوطه در نرم افزار

جدول ۱. مشخصات صفحات کناری در نمونه‌های مدل‌سازی شده  
Table 1. The specifications of side plates in modeled samples

شکل	ابعاد (mm)	جنس	نمونه
	۹۲۰×۴۰۰×۱۵	ST37	M-1
	۹۲۰×۴۰۰×۱۵	ST52	M-2
	۹۲۰×۴۰۰×۱۵	Ni-Ti	M-3
	۹۲۰×۴۰۰×۱۰	ST37	T-1
	۹۲۰×۴۰۰×۵	ST37	T-2
	۹۲۰×۴۰۰×۱۰	Ni-Ti	T-3
	۹۲۰×۴۰۰×۵	Ni-Ti	T-4
	۹۲۰×۴۰۰×۱	Ni-Ti	T-5
	۹۲۰×۴۰۰×۱۵	ST37	S-1
	۹۲۰×۴۰۰×۱۵	ST37	S-2
	۹۲۰×۴۰۰×۱۵	ST37	S-2
	۹۲۰×۴۰۰×۱۵	ST37	S-4

جدول ۲. مشخصات تیر و ستون در نمونه‌ی آزمایشگاهی دیلمی و شیراوند [۵]  
Table 2. The specifications of beam and column in Deylami and Shiravand experimental sample [5]

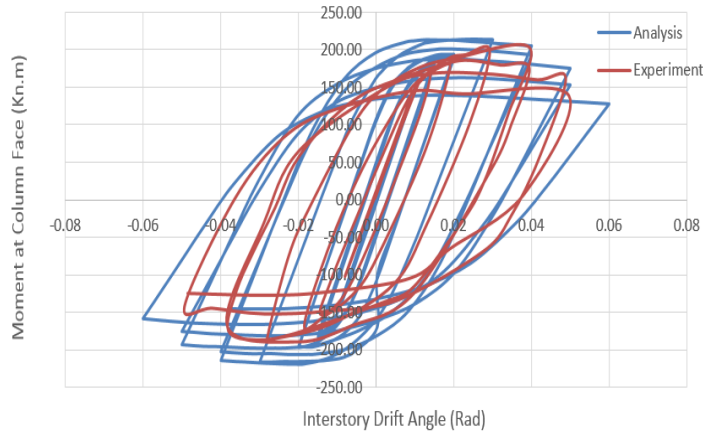
$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b$ (mm)	$a$ (mm)	ورق پوشش ستون	ستون	تیر
۸ / ۱	۸ / ۳	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰×۱۰	2IPE270	IPE300

جدول ۳. مشخصات ورق‌های بکاررفته در نمونه‌ی آزمایشگاهی در مطالعه‌ی دیلمی و شیراوند [۵]  
Table 3. The characteristics of sheets used in experimental sample in Deylami and Shiravand paper [5]

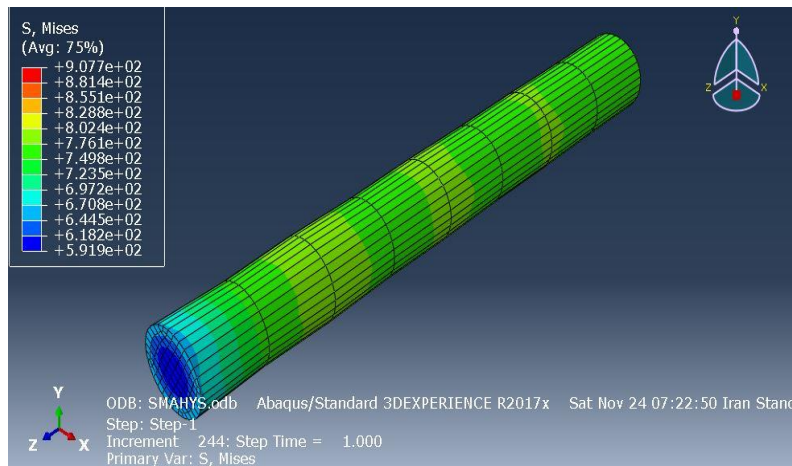
$t_{sh}$	$t_{con}$	$b_{b\ cov}$	$t_{b\ cov}$	$b_{t\ cov}$	$t_{t\ cov}$	$l_{cov}$	$h_{sp}$	$L_{sp}$	$t_{sp}$	نمونه
۸	۱۵	۳۳۵	۱۰	۱۵۰	۱۲	۳۵۰	۴۰۰	۹۳۰	۱۵	SP01
۸	۱۲	۳۳۵	۱۰	۱۵۰	۱۰	۳۰۰	۴۰۰	۹۳۰	۱۲	SP02







شکل ۷. مقایسه ی منحنی هیستریزیس لنگر-دوران نمونه ی آزمایشگاهی دیلمی و شیراوند [5] با نمونه ی تحلیلی در نرم افزار ABAQUS  
 Fig. 7. Comparison the moment-rotation hysteresis curve of Deylami and Shiravand's experimental sample [5] with analytical model in ABAQUS software

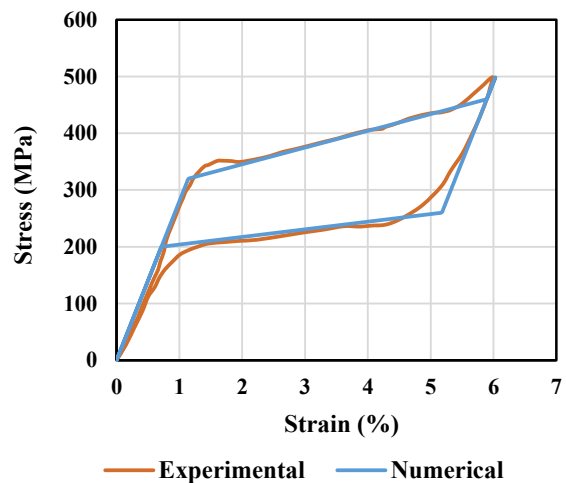


شکل ۸. نمونه میله ی ساخته شده در نرم افزار ABAQUS دارای خصوصیات فوق الاستیک آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم  
 Fig. 8. The rod constructed in ABAQUS software with supraelastic properties of Nickel-Titanium shape memory alloy

### ۳- نتایج

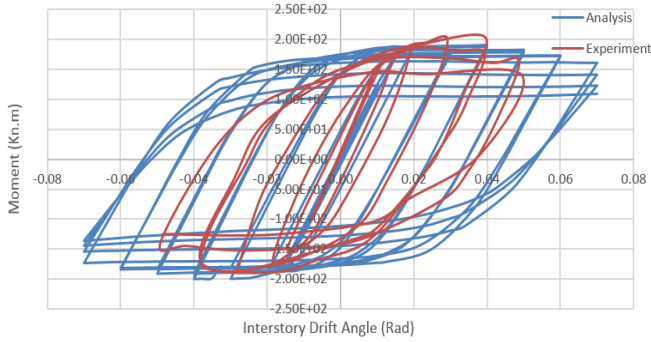
در این بخش نتایج مدل سازی و تحلیل های چرخه ای مدل های مورد مطالعه در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS ارائه گردیده و نتایج در سه بخش به شرح ذیل ارائه و مقایسه شده اند.

۳-۱- بررسی اثر جنس صفحه ی کناری بر عملکرد چرخه ای اتصال پارامتر نخست بررسی اثر جنس صفحات کناری بر عملکرد چرخه ای اتصال در نمونه های M-1، M-2، M-3 می باشد. این نمونه ها به ترتیب از جنس فولاد نرمه ST37، فولاد پر مقاومت کم آلیاژ ST52 و آلیاژهای حافظه دار شکلی Ni-Ti در نظر گرفته شده اند. منحنی هیستریزیس لنگر-انحنا حاصل از اعمال بارگذاری

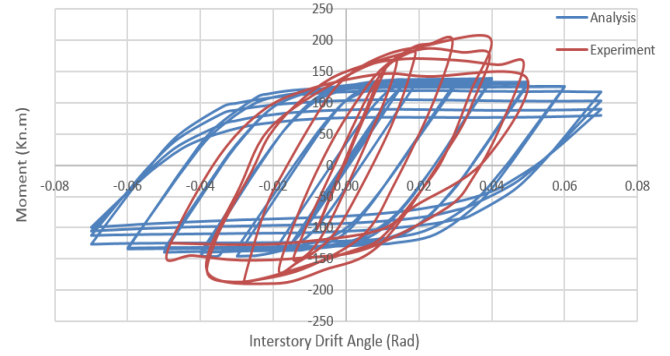


شکل ۹. مقایسه ی عددی و آزمایشگاهی آلیاژ حافظه دار شکلی  
 Fig. 9. The numerical and experimental results of shape memory alloy

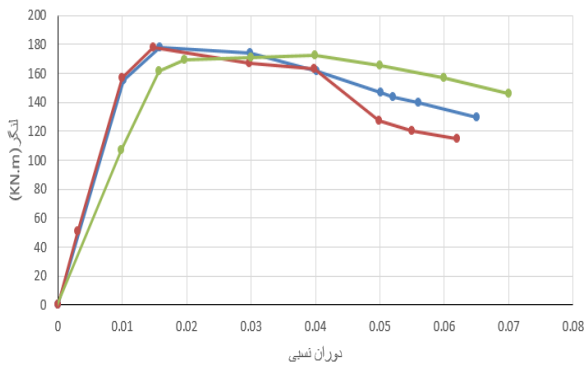




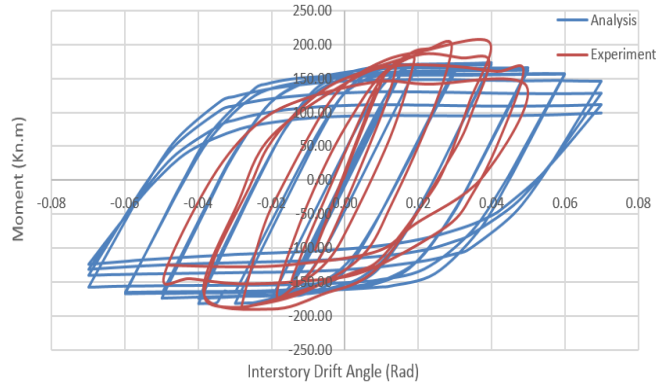
شکل ۱۲. منحنی هیستریزس مدل M-3 با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA-Ni-Ti)  
 Fig. 12. The hysteresis curve of model M-3 with using SMA-Ni-Ti



شکل ۱۰. منحنی هیستریزس مدل M-1 با استفاده از فولاد نرم (ST37)  
 Fig. 10. The hysteresis curve of model M-1 with using ST37



شکل ۱۳. مقایسه ی حداکثر لنگر در چرخه های مختلف منحنی هیستریزس در مدل‌های M-1 تا M-3  
 Fig. 13. Comparison of maximum moment in different cycles of hysteresis curve in models M-1 to M-3



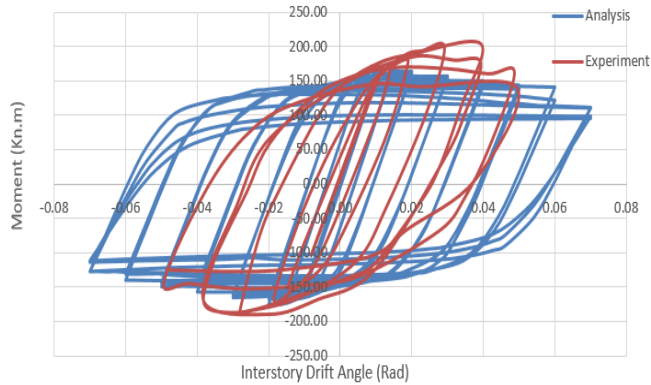
شکل ۱۱. منحنی هیستریزس مدل M-2 با استفاده از فولاد پر مقاومت کم آلیاژ (ST52)  
 Fig. 11. The hysteresis curve of model M-2 with using ST52

از خود نشان داده؛ اما شکل پذیری آن را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می دهد. در ادامه مدل های M-1 تا M-3 مطابق شکل های ۱۴ تا ۱۶ ارائه شده است.

۳-۲- بررسی اثر ضخامت صفحه‌ی کناری بر عملکرد چرخه ای اتصال مطابق شکل های ۱۷ تا ۲۱ در مدل های T-1 تا T-5 اثر ضخامت صفحه کناری بر عملکرد آن بررسی شده است. نمونه های T-1 و T-2 از فولاد ST37 و نمونه های T-3، T-4 و T-5 از آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA-Ni-Ti) هستند. در مدل T-1 لنگر حداکثر برابر است با ۱۶۸/۹ kN.m که در دوران ۰/۰۱ رادیان رخ می دهد. برای مدل T-2 لنگر حداکثر و دوران مربوطه برابر است با ۱۲۷/۵ و ۰/۰۷ رادیان. مقدار لنگر حداکثر و دوران در مدل T-3 برابر است با ۱۷۳/۷ kN.m که در دوران ۰/۰۳ رادیان رخ می دهد.

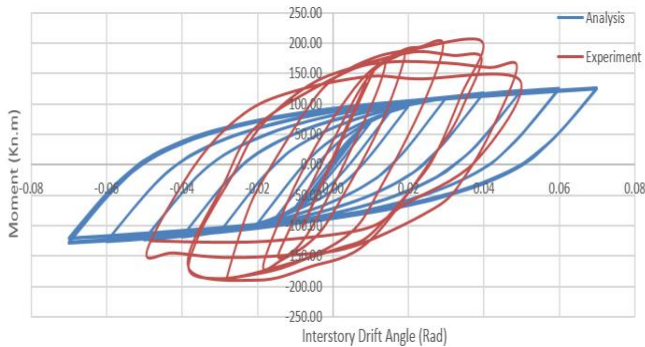
چرخه ای به ترتیب در شکل های ۱۰ الی ۱۲ نشان داده شده اند. همه ی این مدل ها ضخامت صفحه ی کناری برابر با ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در مدل M-1 حداکثر لنگر در ۰/۰۳ رادیان ایجاد شده و برابر است با ۱۶۸ kN.m. در مدل M-2 حداکثر لنگر در دوران ۰/۰۲ رادیان رخ داده و مقدار آن برابر است با ۱۷۷ kN.m. همچنین مقادیر حداکثر لنگر و دوران مربوطه برای نمونه M-3 به ترتیب برابر است با ۱۷۲/۶ و ۰/۰۲ رادیان. مقدار حداکثر لنگر در هر چرخه هیستریزس در شکل ۱۳ برای هر کدام از نمونه ها مشخص شده است.

با توجه به منحنی ارائه شده در شکل ۱۳ مشخص می شود که منحنی M-3 مربوط به آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA-Ni-Ti) دوران بیشتری را تا نقطه ی گسیختگی تحمل کرده است؛ اما با این وجود لنگر حداکثر در منحنی M-1 بیشتر است. بنابراین با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA-Ni-Ti) ظرفیت اتصال کاهش ۲/۵٪



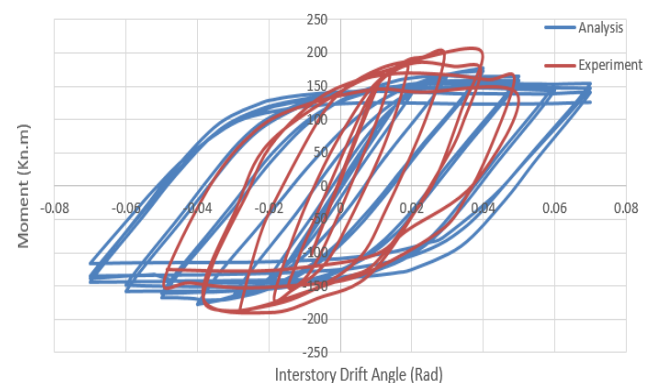
شکل ۱۷. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران برای مدل T-1 با ضخامت ۱ cm و فولاد نرمه ST37

Fig. 17. Moment-rotation hysteresis curve for model T-1 with a thickness of 1 cm and material ST37



شکل ۱۸. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران برای مدل T-2 با ضخامت ۰/۵ و فولاد نرمه ST37

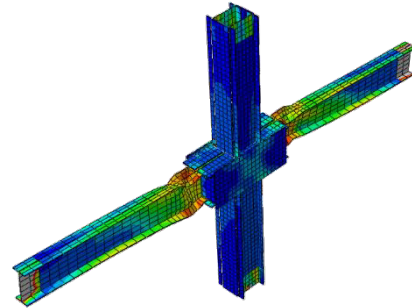
Fig. 18. Moment-rotation hysteresis curve for model T-2 with a thickness of 0.5 cm and material ST37



شکل ۱۹. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران برای مدل T-3 با ضخامت ۱ cm و آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti

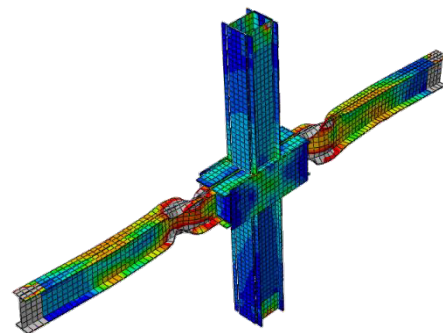
Fig. 19. Moment-rotation hysteresis curve for model T-3 with a thickness of 1 cm and material shape memory alloy

حداکثر لنگر در چرخه های مختلف منحنی هیستریزیس در مدل های



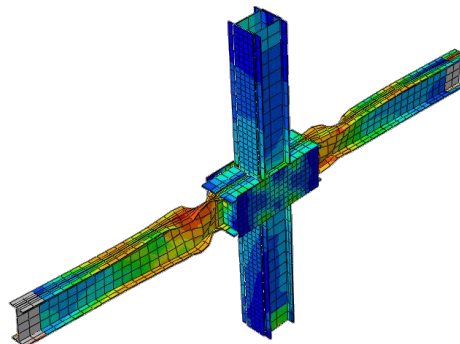
شکل ۱۴. تغییرشکل‌های مدل M-1 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.05rad

Fig. 14. The deformations of model M-1 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.05 rad



شکل ۱۵. تغییرشکل‌های مدل M-2 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.05rad

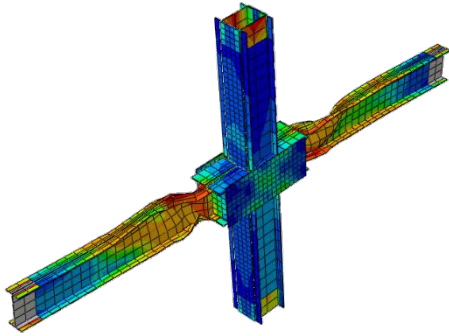
Fig. 15. The deformations of model M-2 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.05 rad



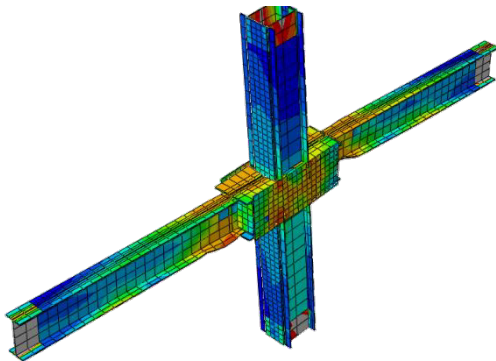
شکل ۱۶. تغییرشکل‌های مدل M-3 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad

Fig. 16. The deformations of model M-3 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad

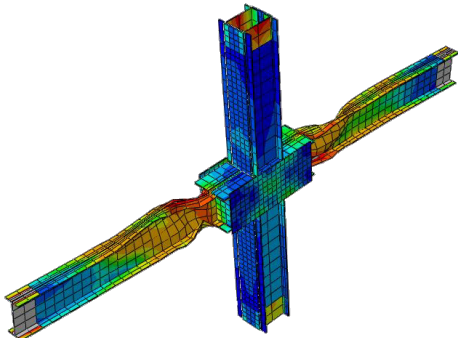
برای مدل 4-T هم مقادیر لنگر حداکثر و دوران به ترتیب برابر هستند با ۱۷۶/۱ kN.m و ۰/۰۴ رادیان. مقادیر لنگر و جابه‌جایی حداکثر هم برابر هستند با ۱۲۲/۹ kN.m و ۰/۰۷ رادیان. مقایسه ی



شکل ۲۳. تغییرشکلهای ایجاد شده در مدل T-1 در آخرین چرخه بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad  
 Fig. 23. The deformations of model T-1 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad



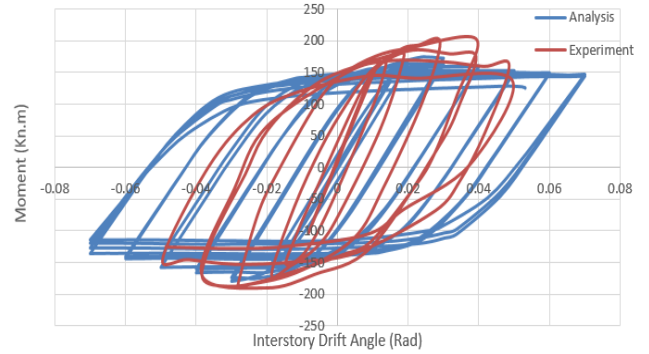
شکل ۲۴. تغییرشکلهای ایجاد شده در مدل T-2 در آخرین چرخه بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad  
 Fig. 24. The deformations of model T-2 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad



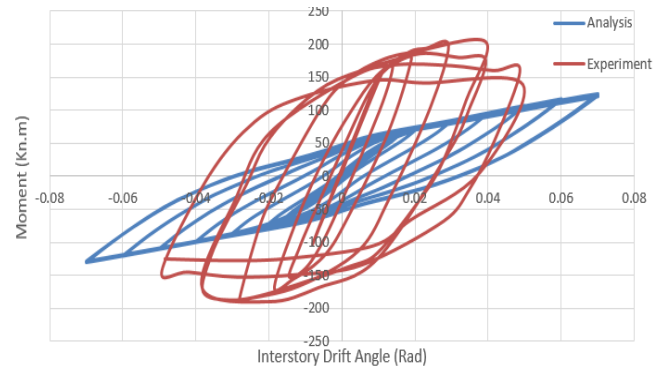
شکل ۲۵. تغییرشکلهای ایجاد شده در مدل T-3 در آخرین چرخه بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad  
 Fig. 25. The deformations of model T-3 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad

۳-۳- بررسی اثر سوراخ‌دار بودن در صفحات کناری

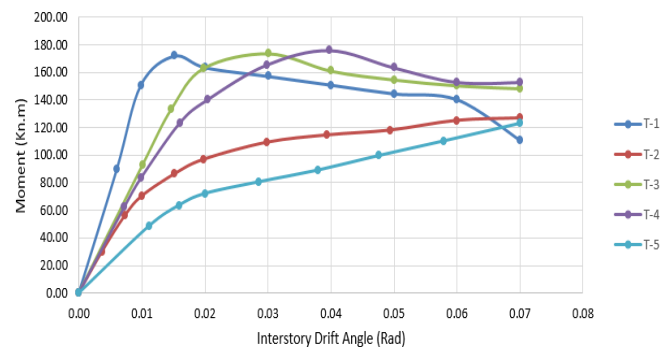
به منظور بررسی اثر سوراخ‌دار بودن در صفحه ی کناری بر عملکرد اتصال، نمونه های S-1 تا S-4 در نرم افزار ABAQUS مدل سازی



شکل ۲۰. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران برای مدل T-4 با ضخامت ۰/۵ و آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti  
 Fig. 20. Moment -rotation hysteresis curve for model T-4 with a thickness of 0.5 cm and material shape memory alloy

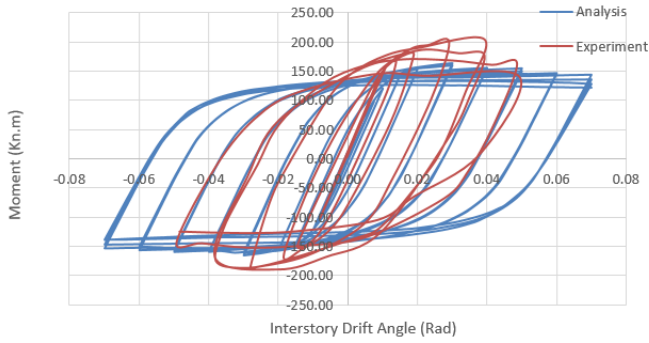


شکل ۲۱. منحنی هیستریزیس لنگر-دوران برای مدل T-5 با ضخامت ۱/۰ و آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti  
 Fig. 21. Moment -rotation hysteresis curve for model T-5 with a thickness of 0.1 cm and material shape memory alloy

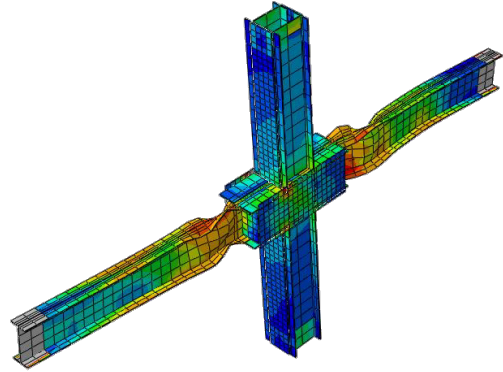


شکل ۲۲. مقایسه ی حداکثر لنگر در چرخه های مختلف منحنی هیستریزیس در مدل‌های T-1 تا T-5  
 Fig. 22. Comparison of maximum moment in different cycles of hysteresis curve in models T-1 to T-5

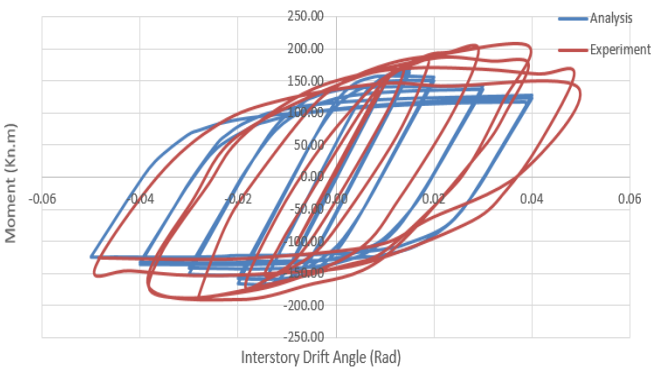
T-1 تا T-5 مطابق شکل ۲۲ ارائه شده است. در ادامه مدل های T-1 تا T-5 مطابق شکل های ۲۳ تا ۲۷ نشان داده شده است.



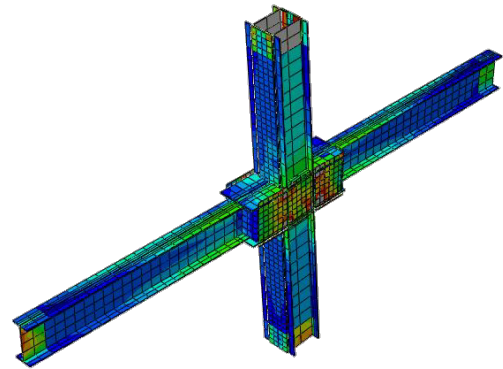
شکل ۲۸. منحنی هیستریزس لنگر-دوران مدل S-1  
**Fig. 28. The Hysteresis curve of moment-rotation of model S-1**



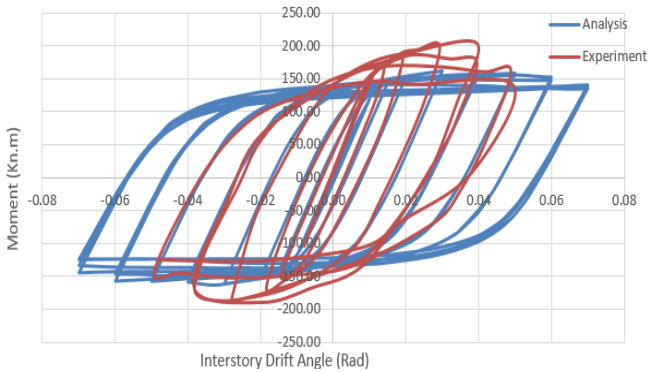
شکل ۲۶. تغییرشکلهای ایجاد شده در مدل T-4 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad  
**Fig. 26. The deformations of model T-4 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad**



شکل ۲۹. منحنی هیستریزس لنگر-دوران مدل S-2  
**Fig. 29. The Hysteresis curve of moment-rotation of model S-2**



شکل ۲۷. تغییرشکلهای ایجاد شده در مدل T-5 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad  
**Fig. 27. The deformations of model T-5 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad**



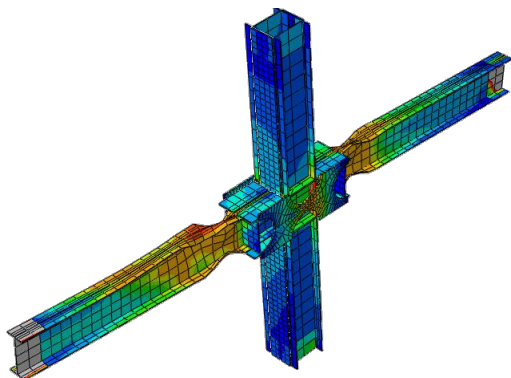
شکل ۳۰. منحنی هیستریزس لنگر-دوران مدل S-3  
**Fig. 30. The Hysteresis curve of moment-rotation of model S-3**

#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج ارائه شده در بخش های با یکدیگر مقایسه خواهند شد. طبق آیین‌نامه‌ی FEMA350 و آیین‌نامه‌ی فولاد آمریکا (AISC, 2010) در قاب های خمشی ویژه ظرفیت اتصال باید

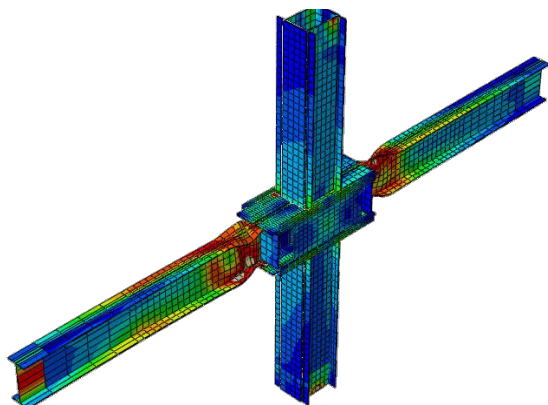
شده و منحنی هیستریزس آن ها استخراج گردید. این منحنی ها در شکل های ۲۸ تا ۳۱ نشان داده شده اند. در مدل I-S مقدار لنگر حداکثر برابر است با  $163/67 \text{ kN.m}$  که در میزان دوران  $0/03$  رادیان رخ داده است. در مدل 2-S مقدار لنگر حداکثر برابر است با  $160/85 \text{ kN.m}$  در دوران برابر با  $0/01$  رادیان. همچنین میزان لنگر و دوران مدل 3-S به ترتیب برابر است با  $157/17 \text{ kN.m}$  که در دوران برابر با  $0/03$  رادیان رخ داده است. شکل ۳۲ مقادیر حداکثر لنگر در چرخه های دیگر را در این مدل ها نشان داده است. همان‌طور که از منحنی مشخص است، دوران گسیختگی در نمونه های S-2 و S-4 کمتر از همین مقادیر برای نمونه های S-1 و S-3 می باشد. در ادامه مدل های S-1 تا S-4 مطابق شکل های ۳۳ تا ۳۶ نشان داده شده است.





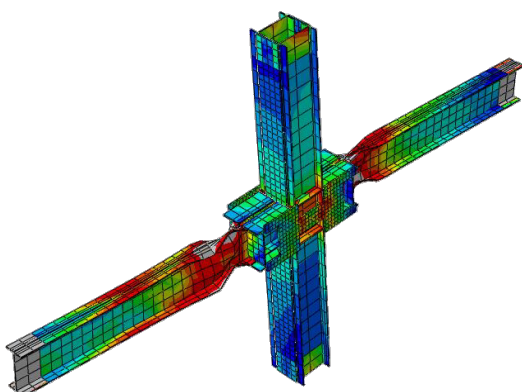
شکل ۳۴. تغییرشکل های مدل S-2 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.05rad

Fig. 34. The deformations of model S-2 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.05 rad



شکل ۳۵. تغییرشکل های ایجاد در مدل S-3 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad

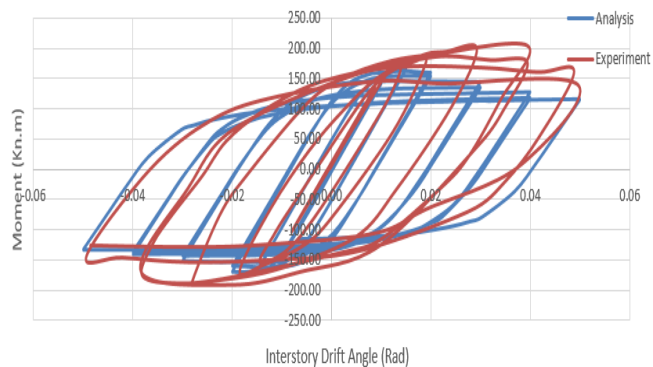
Fig. 35. The deformations of model S-3 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad



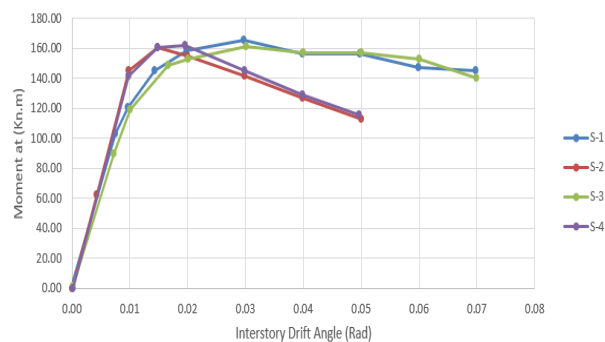
شکل ۳۶. تغییرشکل های ایجاد شده در مدل S-4 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.05rad

Fig. 36. The deformations of model S-4 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.05 rad

در جدول ۷ ارائه شده اند. در همه ی مدل های ارائه شده نسبت لنگر

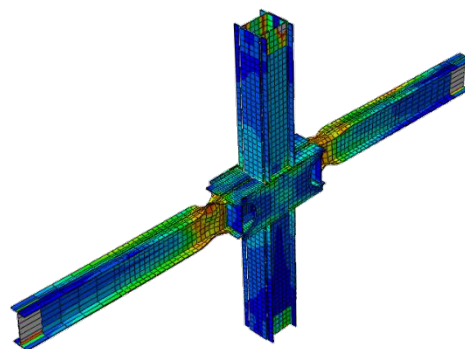


شکل ۳۱. منحنی هیستریزس لنگر-دوران مدل S-4  
Fig. 31. The Hysteresis curve of moment-rotation of model S-4



شکل ۳۲. مقایسه ی حداکثر لنگر در چرخه های مختلف منحنی هیستریزس در مدل های S-1 تا S-4

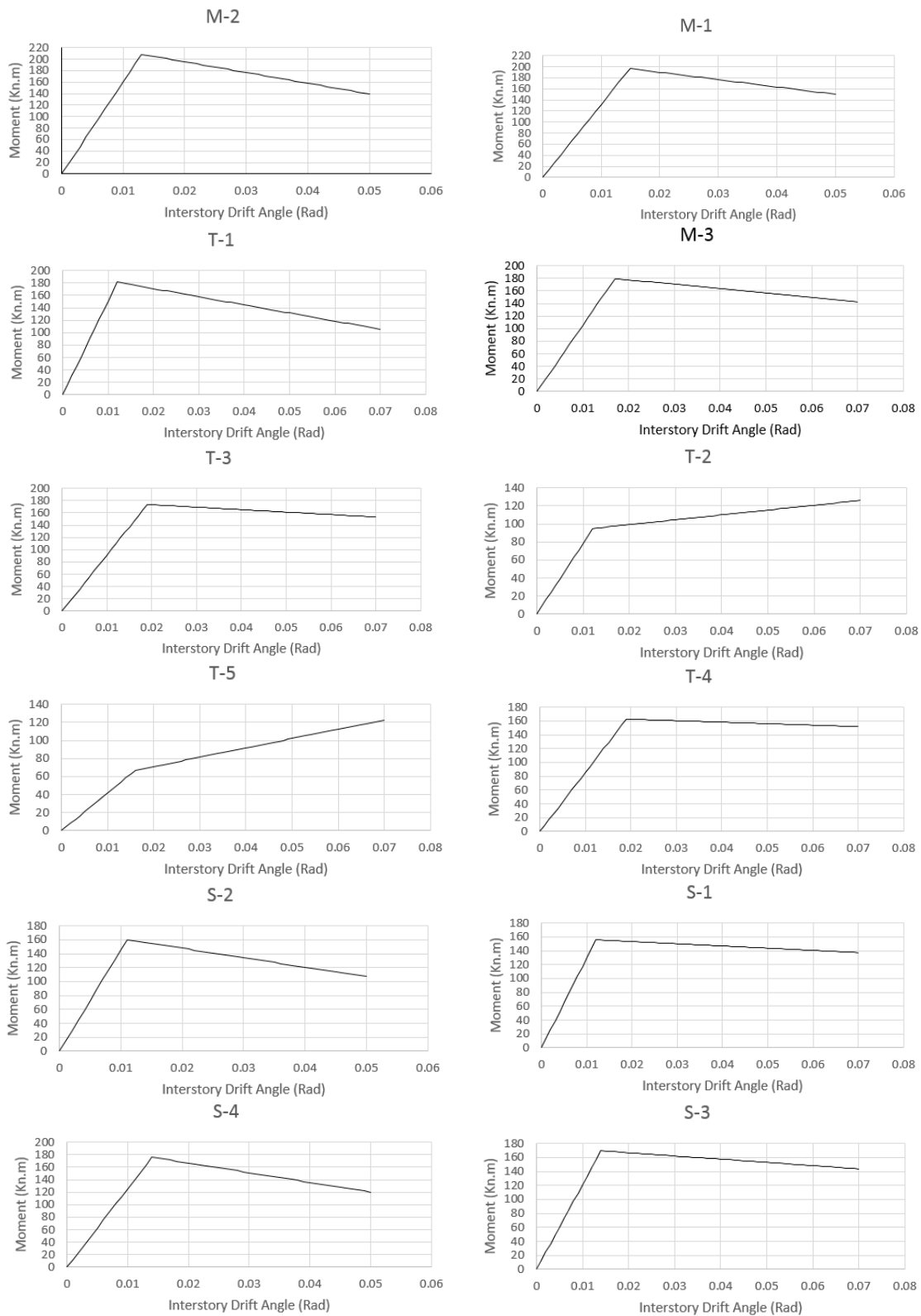
Fig. 32. Comparison of maximum moment in different cycles of hysteresis curve in models S-1 to S-4



شکل ۳۳. تغییرشکل های مدل S-1 در آخرین چرخه ی بارگذاری در جابه‌جایی نسبی 0.07rad

Fig. 33. The deformations of model S-1 in the last loading cycle at a relative displacement of 0.07 rad

در دوران برابر با ۰/۰۴ رادیان حداقل برابر با ۸۰٪ ظرفیت تیرهای متصل به اتصال باشد. به همین منظور مقادیر حداکثر لنگر تحمل شده توسط اتصال ها در مدل های ساخته شده در دوران ۰/۰۴ رادیان



شکل ۳۷- منحنی دوخطی لنگر-دوران نمونه‌های مورد مطالعه  
**Fig. 37. The bilinear moment-rotation curve of the studied samples**

می‌توان به عنوان اتصال در قاب خمشی ویژه در نظر گرفت. به منظور بررسی شکل پذیری نمونه‌ها منحنی دوخطی لنگر-

در دوران ۰/۰۴ رادیان به ۸۰٪ لنگر پلاستیک تیرها بالاتر از یک بوده که نشان دهنده‌ی آن است که همه‌ی مدل‌های اتصال ارائه شده را



جدول ۷. خلاصه ی نتایج ظرفیت خمشی، دوران تسلیم، دوران نهایی و انرژی جذب شده ی نمونه های مورد مطالعه

Table 7. Summary of flexural capacity, yield rotation, final rotation, and Absorbed Energy Results of the studied Samples

$E / E_R$	$E_{Total}$ (kj)	$\frac{\theta_u}{\theta_y}$	$\theta_y$	My	M <sub>0.04rad/0.8</sub> MP	M <sub>0.04rad/M</sub> R	M <sub>0.04rad</sub>	نمونه
1	۵۲۶/۲۷	۲/۹۴	۰/۰۱۷	۲۲۳/۳۸	۲/۳۲	1	۲۰۰/۰۰	آزمایش
۰/۷۳	۳۸۴/۲۶	۳/۵۷	۰/۰۱۴	۱۹۳/۶۹	۲/۰۵	۰/۸۱	۱۶۱/۳۹	M-1
۰/۷۸	۴۱۳/۳۳	۴/۱۷	۰/۰۱۲	۱۹۷/۵۴	۲/۰۷	۰/۸۲	۱۶۳/۱۴	M-2
۱/۱۹	۶۲۵/۹۹	۴/۱۲	۰/۰۱۷	۱۸۲/۶۸	۲/۱۹	۰/۸۷	۱۷۲/۵	M-3
۰/۶۹	۳۶۵/۴۳	۵/۸۳	۰/۰۱۲	۱۸۶/۳	۱/۹۱	۰/۷۵	۱۵۰/۸۴	T-1
۰/۵۴	۲۸۷/۴۵	۵/۸۳	۰/۰۱۲	۹۵/۸۲	۱/۴۵	۰/۵۷	۱۱۴/۴۴	T-2
۰/۸۷	۴۵۵/۱۱	۳/۸۹	۰/۰۱۸	۱۶۹/۱۳	۲/۰۴	۰/۸۱	۱۶۱/۰۲	T-3
۰/۶۶	۳۴۵/۶۷	۳/۶۸	۰/۰۱۹	۱۶۳/۶۸	۲/۲۴	۰/۸۸	۱۷۶/۱۶	T-4
۰/۴۶	۲۴۲/۱۷	۴/۴	۰/۰۱۶	۶۷/۰۲	۱/۱۳	۰/۴۴	۸۸/۹۸	T-5
۰/۶۷	۳۵۱/۰۵	۵/۳۸	۰/۰۱۳	۱۶۳/۴۴	۱/۹۸	۰/۷۸	۱۵۶/۲۵	S-1
۰/۶۱	۳۲۴/۱۱	۴/۵۴	۰/۰۱۱	۱۶۵/۱۹	۱/۶۱	۰/۶۳	۱۲۶/۸۳	S-2
۰/۶۴	۳۳۵/۱۲	۵/۰۰	۰/۰۱۴	۱۶۶/۲۱	۱/۹۹	۰/۷۹	۱۵۷/۱۷	S-3
۰/۵۹	۳۱۱/۷۸	۳/۵۷	۰/۰۱۴	۱۷۱/۵۴	۱/۶۳	۰/۶۴	۱۲۸/۶۸	S-4

نیتینول لنگرهای ایجاد شده از لنگر پلاستیک تیر فراتر رفته و کماتش های موضعی مانند نمونه های M-1 و M-2 در بال و جان تیر ایجاد می شوند. با ورود آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم به فاز مارتنزیت و ظهور خواص فوق الاستیک بخشی از جابه جایی های ایجاد شده با ایجاد تغییر شکل های بزرگ در صفحه ی کناری جبران شده و با این وجود تنش های بزرگ تری هم توسط صفحه کناری تحمل می شود. این مسأله باعث می شود که ظرفیت اتصال در این حالت بیشتر از نمونه های M-1 و M-2 باشد و با این وجود افت شدید ایجاد شده در ظرفیت در جابه جایی های بالای ۰/۰۴ رادیان در نمونه های M-1 و M-2 در نمونه ی M-3 مشاهده نشود. نکته دیگر اینکه در نمونه های M-1 و M-2 تغییر شکل المان های بال و جان تیر در جابه جایی های نسبی بالای ۰/۰۴ رادیان آن قدر زیاد بود که عملاً امکان همگرایی در این جابه جایی های برای نرم افزار وجود نداشت. در نمونه ی M-3 اما این تغییر شکل ها در المان های تیر به شدت مدل های M-1 و M-2 نبوده و اتصال تا جابه جایی های نسبی ۰/۰۷ رادیان را تحمل کرده و افت لنگر چندان در آن ایجاد نمی شود. در مدل T-1 ضخامت فولاد ST37 به ۱ سانتی متر کاهش داده شده است. این کار ظرفیت اتصال در دوران ۰/۰۴ رادیان را کاهش داده؛ اما با این وجود در این نمونه افت لنگر بعد از جابه جایی ۰/۰۴ رادیان به شدت نمونه های M-1 و M-2 نیست. به عبارت دیگر

دوران نسبی برای اتصال ها تهیه گردید. برای تهیه ی این منحنی ها از نرم افزار Matlab [۲۲] استفاده گردید؛ به شکلی که مساحت زیر منحنی پوش لنگر-دوران نسبی با مساحت زیر منحنی دوخطی ایجاد شده یکسان در نظر گرفته شد. منحنی دوخطی نمونه ها در شکل ۳۷ نشان داده شده است.

در مدل های M-1 و M-2 که در آن ها صفحه ی کناری به ترتیب از فولاد ST37 و ST52 ساخته شده اند، مشاهده می شود که ظرفیت اتصال در دوران ۰/۰۴ رادیان وابستگی چندانی به جنس این فولادها نداشته و اساساً با افزایش لنگر به حدی بالاتر از لنگر پلاستیک تیرها وقوع کماتش موضعی در بال و جان تیر، منحنی هیستریزس این نمونه ها دچار افت شده است. در مدل M-3 با توجه به استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم و خواص فوق الاستیک این ماده که در نرم افزار آباکوس تعریف شده است، می توان مشاهده کرد که اولاً با توجه به آنکه مدول الاستیسیته آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم در فاز آستنیت نسبت به مدول الاستیسیته فولاد بسیار پایین تر است، شیب قسمت الاستیک منحنی مربوط به مدل M-3 کمتر از شیب منحنی های M-2 و M-1 است، در عین حال، افت ایجاد شده در منحنی هیستریزس M-1 و M-2 در منحنی M-3 هم مشاهده می گردد. دلیل این امر آن است که قبل از تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در آلیاژ

نهایی نمونه‌ها از ۰/۰۷ به ۰/۰۵ کاهش می‌یابد. در مدل‌های S-2 و S-4 پارامتر شکل‌پذیری برابر است با  $\frac{\theta_u}{\theta_y} = \frac{4}{5}$  و  $\frac{\theta_u}{\theta_y} = \frac{3}{5}$ . در نهایت با مقایسه‌ی نمونه‌های S-1 تا S-4 می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد اتصال با صفحه‌ی کناری به همراه برش‌های دایره‌ای شکل از نظر ظرفیت و شکل‌پذیری بهتر از صفحات کناری با برش‌های مستطیل‌شکل بوده و با افزایش تعداد این برش‌ها، ظرفیت و شکل‌پذیری کاهش چشمگیری داشته‌اند.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر تغییر در جنس، ضخامت و شکل صفحات کناری در اتصالات خمشی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مجموع برای بررسی اثر جنس، ۱۲ نمونه‌ی عددی شامل ۳ مدل، اثر ضخامت، ۵ مدل و اثر تغییر پیکربندی نمونه‌ها، ۴ مدل در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مدل‌سازی شده‌اند. در بررسی اثر جنس صفحه‌ی کناری، علاوه بر فولاد‌های نرم و پر مقاومت از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم (Ni-Ti) در صفحه‌ی کناری اتصال استفاده شده است. در نهایت بعد از مدل‌سازی و تحلیل اجزاء محدود مدل‌ها، به استخراج منحنی هیستریزس تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته و نتایج زیر به اختصار ارائه شده است:

۱- مشخص شد که صفحات کناری با آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم در ضخامت یکسان اساساً ظرفیت نیرویی بالاتری را تحمل کرده و انرژی بیشتری را جذب می‌کنند.

۲- در مدل‌هایی که شامل تغییر ضخامت صفحه‌ی کناری می‌باشند، مشخص شد که در صفحات فولادی با وجود آنکه ظرفیت لنگر اتصال کاهش می‌یابد؛ اما با این وجود تا ضخامت ۱ سانتی‌متر، میزان شکل‌پذیری افزایش یافته و افت لنگر در جابه‌جایی‌های بالاتر کمتر رخ می‌دهد.

۳- با کاهش بیشتر ضخامت در صفحات فولادی در جابه‌جایی‌های بالا، صفحه‌ی کناری از خود رفتار پلاستیک نشان داده و تغییر شکل چندانی در فولاد ایجاد نمی‌شود؛ اما با توجه به این که مقدار لنگر تحمل شده در اتصال از ۰/۸ لنگر پلاستیک بیشتر است، اتصال می‌تواند در قاب خمشی با شکل‌پذیری ویژه نیز استفاده شود.

۴- ایجاد تغییر پیکربندی در صفحات کناری مانند سوراخ‌دار بودن تا زمانی که این تغییر پیکربندی‌ها در نقاط پر تنش نباشد

با کاهش ضخامت صفحه‌ی اتصال سختی اتصال نسبت به سختی تیر کاهش یافته و نیروهای کمتری به تیر وارد می‌شوند؛ اما تنش‌های ایجاد شده در صفحه‌ی اتصال هم بزرگ‌تر خواهند شد. در مدل T-2 ضخامت صفحه کناری باز هم کاهش یافته و به ۰/۵ سانتی‌متر رسیده است. با این کار عملاً افت لنگر در جابه‌جایی‌های نسبی بالای ۰/۰۴ رادین وجود نداشته است؛ چرا که کمانش موضعی و تغییر شکل‌های بزرگ مانند حالات قبلی در جان و بال تیر رخ نمی‌دهد. در این حالت تنها می‌توان کمانش موضعی جان پایین تیر را در آخرین چرخه‌ی بارگذاری مشاهده کرد (دلیل عدم رخداد کمانش موضعی در بال بالایی این است که صفحه اتصال پایینی یک تکه بوده و به همین دلیل سختی بیشتری نسبت به صفحات بالایی دارد و نیروهای بیشتری به بال پایینی تیر نسبت به بال بالایی وارد می‌گردد). در مدل T-2 تنش‌های ایجاد شده در فولاد صفحه‌ی کناری بسیار بالا رفته و برخلاف صفحات کناری در مدل‌های قبلی که رفتاری الاستیک داشتند، در این حالت صفحه‌ی کناری رفتار پلاستیک از خود نشان می‌دهد. مدل‌های T-1 و T-2 تا دوران ۰/۰۷ رادین را تحمل نمودند. در مدل‌های S-1 تا S-4 با ایجاد برش‌های نیم دایره و مستطیل شکل عملکرد صفحه‌ی کناری با ایجاد تغییر پیکربندی در آن مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل‌های S-1 و S-3 با ایجاد دو برش نیم دایره و مستطیل شکل، ظرفیت اتصال در دوران ۰/۰۴ رادین سه درصد نسبت به حالت صفحه‌ی بدون برش کاهش نشان داده و به ترتیب به مقادیر ۱۵۶/۲۵ kN.m و ۱۵۷/۱۷ kN.m می‌رسد. در مدل‌های S-2 و S-4 تعداد چهار برش نیم دایره و مستطیل شکل در صفحه‌ی کناری ایجاد شده و در این حالت افت لنگر در دوران ۰/۰۴ رادین قابل توجه بوده و همچنین اتصال تنها قادر به تحمل دوران تا ۰/۰۵ رادین می‌باشد. برای مقایسه‌ی شکل‌پذیری پارامتر  $\frac{\theta_u}{\theta_y}$  حاصل از منحنی دوخطی لنگر-دوران نسبی این نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه می‌گردد. برای نمونه‌های S-1 و S-3 با دو برش دایره و مستطیل شکل مقدار پارامتر شکل‌پذیری برابر است با  $\frac{\theta_u}{\theta_y} = 0/38$  و  $\frac{\theta_u}{\theta_y} = 0/5$ . بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علیرغم نزدیکی ظرفیت خمشی در دوران نسبی ۰/۰۴ رادین، تغییر شکل برش‌ها از دایره به مستطیل باعث کاهش قابل ملاحظه‌ی شکل‌پذیری می‌شود. با افزایش تعداد برش‌های دایره‌ای و مستطیل شکل شکل‌پذیری باز هم کاهش یافته است؛ به صورتی که دوران

- Constructional Steel Research 62 (2006) 831-838.
- [10] B.R. Ellingwood, B. Taftali, and R. DesRoches. Seismic performance assessment of steel frames with shape memory alloy connections, Part II-Probabilistic seismic demand assessment, *Journal of Earthquake Engineering*, 14 (2010) 631-645.
- [11] M. S. Speicher, R. DesRoches, and R. T. Leon. Experimental results of a NiTi shape memory alloy (SMA)-based recentering beam-column connection, *Engineering Structures*, 33 (2011) 2448-2457.
- [12] C. Fang, M. C. Yam, A. C. Lam, and L. Xie. Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts, *Journal of Constructional Steel Research*, 94 (2014) 122-136.
- [13] W. Wang, T.-M. Chan, H. Shao, and Y. Chen, Cyclic behavior of connections equipped with NiTi shape memory alloy and steel tendons between H-shaped beam to CHS column, *Engineering Structures*, 88 (2015) 37-50.
- [14] A. Maurya, M.R. R. Ryota Matsui, and S.H. Florig, Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as structural fuses, *Journal of Constructional Steel Research*, 127(2016) 54-65.
- [15] R. Ozcelik, E. Dikiciasik, and F. Erdil, The development of the buckling restrained braces with new end restrains, *Journal of Constructional Steel Research*, 138(2017) 208-220.
- [16] Shen, O. Seker, B. Akbas, P. Seker, S.B. Momenzadeh, and M. Faytarouni, Seismic performance of concentrically braced frames with and without brace buckling, *Engineering Structures*, 141(2017) 461-481.
- [17] Q. Canxing, Z. Yichen, L. Han Q. Bing, H. Hetao, and T. Li, Seismic performance of Concentrically Braced Frames with non-buckling braces, *Engineering Structures*, 154(2018) 93-102.
- [18] M. A. Farmani and M. Ghassemieh. Steel beam-to-column connections equipped with SMA tendons and energy dissipating devices including shear tabs or web hourglass pins, *Journal of Constructional Steel Research*, 135 (2017) 30-48.
- [19] M. Pouraminian, S. Hashemi, A. Sadeghi, and S. (قسمت مرکزی صفحه‌ی اتصال و ناحیه‌ی متصل به بال ستون) تأثیر زیادی بر ظرفیت اتصال ندارد؛ اما ایجاد تغییر پیکربندی در نواحی پر تنش، به سرعت ظرفیت اتصال را کاهش می‌دهد.
- مراجع**
- [1] FEMA-350. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-frame Buildings, (2013).
- [2] Z. Rahmani, M. Naghipour, J. Vaseghi Amiri, and R. Karimnezhad, Comparing Seismic Parameters in Dual Systems Equipped with Concentric and Eccentric Braces and Side Plate Connection, *Middle East Journal of Scientific Research*, 14(3) (2013) 300-308.
- [3] A. Deylami, and M. Yakhchalian. Comparison between” Common Moment Connection” and Moment Connection with Side Plates for Double-I Built-up Columns. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, (2008).
- [4] C.C. Chou, K.C.Tsai, Y.Y. Wang, and C.K. Jao, Seismic rehabilitation performance of steel side plate moment connections. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 39(1) (2010) 23-44.
- [5] A. Deylami, and M. Shiravand, The Experimental Study on Moment Connection of Beam to Double I Column Using Full Depth Side Plates. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, (2008).
- [6] Faridmehr, M.H. Osman, M. Bin Md Tahir, A. Farokhi Nejad, and R. Hodjati, Seismic and progressive collapse assessment of SidePlate moment connection system, *Structural Engineering and Mechanics*, 54(2015) 35-54.
- [7] S. Alizadeh, G.A. MacRae, D. Bull, and G.C. Clifton, (2018). Beam Web-Side-Plate Connection Axial Performance. *Key Engineering Materials*, 763, 174-181.
- [8] C. Cismasiu, and F.P.A. Dos Santos. Numerical simulation of a semi-active vibration control device based on superelastic shape memory alloy wires: INTECH Open Access Publisher, (2010).
- [9] A. Abolmaali, J. Treadway, P. Aswath, F. K. Lu, and E. McCarthy. Hysteresis behavior of t-stub connections with superelastic shape memory fasteners, *Journal of*

- dependent viscous constitutive model for superelastic shape-memory alloys: formulation and comparison with experimental data. *Smart Mater Struct.* 16(1) (2007).
- [22] MATLAB (matrix laboratory), Multi paradigm numerical computing environment and proprietary programming language developed by Math Works, (2013). <https://www.mathworks.com/help/matlab>
- Pourbakhshian, Probabilistic Assessment the Seismic Collapse Capacity of Buckling-Restrained Braced Frames Equipped with Shape Memory Alloys. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2020). Doi: 10.22065/jsce.2020.236804.2174.
- [20] Abaqus, Abaqus/standard. Version 6.11, ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I, (2012).
- [21] F. Auricchio, D. Fugazza, and R. DesRoches, A 1D rate-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

V. Saberi, H. Saberi, O. Misagh Mazaheri, A. Sadeghi, *Numerical Investigation of Shape Memory Alloys and Side Plates Perforation Effect on Hysteresis Performance of Connections*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(8) (2021) 3481-3498.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17981.6727](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17981.6727)

