



بررسی اثر استفاده از پیچ های از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی روی عملکرد چرخه ای

اتصالات فلزی با صفحه انتهایی گسترش یافته

*مرتضی نظری منفرد^۱، نادر فنائی^۲

چکیده:

امروزه به کارگیری مواد هوشمند در علوم مهندسی اهمیت ویژه ای پیدا کرده است و البته مهندسی عمران نیز از این قاعده مستثنی نبوده است. آلیاژهای حافظه دار شکلی به دلیل دارا بودن خصوصیاتی از قبیل تحمل تغییر شکل های رفت و برگشتی و اتلاف انرژی حین آن و همچنین رفتار سوپر الاستیک در مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته اند. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود رفتار چرخه ای اتصالات فلزی با صفحه انتهایی گسترش یافته هشت پیچه مجهز به پیچ های از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی نایتینول سوپر الاستیک بررسی شده است. برای این منظور با بکارگیری نرم افزار اجزاء محدود ANSYS، یکبار اتصال سنتی و مرسوم با پیچ های فولادی پر مقاومت و بار دیگر همان اتصال با جزئیات هندسی یکسان ولی با پیچ های SMA طراحی و مدل سازی شده است و سپس با اعمال بار گذاری چرخه ای طبق پروتکل SAC، نمودارهای لنگر-دوران برای هر دو نوع اتصال استخراج شده است. اتصال سنتی با وجود شکل پذیری بالا و اتلاف انرژی بسیار خوب، دچار تغییر شکل های پسماند گشته و عملاً قابلیت تعمیر پس از زلزله را ندارد ولی بر خلاف آن، اتصال مجهز به پیچ های نایتینول در عین داشتن میرایی خوب و شکل پذیری بالا، قابلیت برگشت پذیری خیلی خوبی را دارا هستند. در این تحقیق ایده اصلی این بود که تغییر شکل های ناشی از بارهای رفت و برگشتی را در اتصال متمرکز کرده تا اینکه مفصل سوپر الاستیکی توسط تغییر شکل پیچ های از جنس حافظه دار شکلی، در اتصال به وجود آید.

واژگان کلیدی:

اتصال با صفحه انتهایی، آلیاژ حافظه دار شکلی، رفتار سوپر الاستیک، عملکرد چرخه ای، برگشت پذیری.

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، m_nazari_civil@yahoo.com

^۲ استادیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir



۱- مقدمه

تاریخچه مطالعه و بررسی روی رفتار و نحوه طراحی اتصالات در قابهای خمشی مقاوم در برابر زلزله به همین چند سال اخیر بر می‌گردد. تحقیقات بر روی این اتصالات از آنجا شروع شد که در زلزله نورث‌ریج کالیفرنیا و نیز در زلزله کوبه ژاپن، تعداد بسیاری از ساختمانهای فلزی بر اثر شکست از ناحیه جوش در اتصالات جوشی تیر به ستون، دچار فرو ریزش شدند. پس از آن مطالعات زیادی روی رفتار و نحوه طراحی صحیح اتصالات صورت گرفت که عمده این تحقیقات توسط FEMA طی یک پروژه موسوم به SAC صورت گرفت. نتیجه این فرایند معرفی اتصالات با صفحه انتهایی بود که جایگزینی مناسب برای اتصالات جوشی بودند و البته این نوع اتصالات جدید در طی مدتها از خود عملکرد لرزه ای مناسبی با داشتن مقاومت، شکل پذیری و صلبیت کافی از خود نشان داده‌اند (Adey et al, 1997). استراتژی طراحی این اتصالات با صفحه انتهایی که مبتنی بر اصل «اتصال قوی-تیر ضعیف» است، معمولاً منجر به ایجاد تغییر شکل‌های غیر قابل برگشت چه در تیر (اتصالات کاملاً مقاوم) و چه در اتصال (اتصالات نیمه مقاوم) پس از زلزله می‌گردد که هر دو این موارد هزینه بالا و مشکلات زیادی را برای تعمیر و باز سازی در پی دارند. تحقیقاتی جهت رفع مشکلات ناشی از تغییر شکل‌های پسماند در سازه انجام شده است که یک نمونه بارز آن استفاده از میله‌های پس کشیده از جنس فولاد پر مقاومت جهت تشکیل مکانیزم برگشت پذیری یا همان قابلیت خود ترمیمی در برابر تغییر شکل‌های تحمیلی بوده است (Ricles et al, 2002 and Christopoulos et al, 2002). در همین راستا، اخیراً توجه‌های زیادی به سمت استفاده از مصالح برگشت پذیر در اتصالات جلب شده که در میان این تحقیقات، کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی از جنس نیکل-تیتانیوم یا همان «نایتینول»، به عنوان یک راه حل مناسب برای مقابله با این مشکلات در مناطق لرزه خیز به چشم می‌خورد (Lagoudas, 2008 and Abolmaali et al, 2006). تحقیقاتی در زمینه استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی در اتصالات توسط چندین محقق صورت گرفته است. به عنوان نمونه، ابولمعالی و همکاران (Abolmaali et al, 2006) رفتار چرخه ای اتصالات سپری مجهز به پیچ‌های از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی مورد مطالعه قرار دادند که نتیجه کار، مشاهده اتلاف انرژی مناسب و برگشت پذیری بالا بود. دسرچرز و همچنین الینگوود و همکارانشان به روش اجزاء محدود و با تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی (DesRoches et al, 2010 and Ellingwood et al, 2010) قاب‌های خمشی فولادی مجهز به اتصالات از جنس آلیاژهای حافظه دار را مدل نموده و تأثیر این نوع اتصالات را در میزان تغییر شکل‌های نسبی پسماند طبقات، بررسی کردند که نتایج مطلوبی مانند کاهش چشم گیر تغییر شکل‌های پسماند بود.

۲- مشخصه های آلیاژ های حافظه دار شکلی

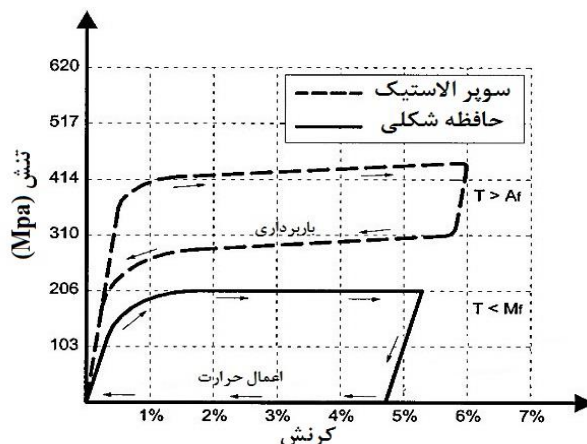
آلیاژ های حافظه دار شکلی دارای دو ویژگی منحصر به فرد رفتاری می باشند که شامل اثر حافظه شکلی (SME) و اثر سوپر الاستیک (SE) می باشند که هر دو این رفتار با تبدیلات فاز کریستالی با نام های مارتنزیت و آستنیت قابل شکل گیری می باشند (Tyber et al, 2007 and McCormick et al, 2007). انواع مختلفی از آلیاژ های حافظه دار موجود است که از میان آنها،



ششمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

۱۶ الی ۱۸ آذر ماه ۱۳۹۴

نایتینول که از ترکیب دو عنصر نیکل و تیتانیوم حاصل شده است با داشتن رفتار سوپر الاستیک خود، در حوزه های تحقیقاتی مهندسی عمران توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. با توجه به شکل (۱)، وقتی که نایتینول در دمایی بالاتر از دمای پایان فاز آستنیت (A_f) دچار تغییر شکل شود، تغییر شکل های ایجاد شده می تواند پس از بار برداری از بین رفته و تغییر چینی کریستالی در فاز مارتنزیت باعث اتلاف انرژی خواهد شد که این پدیده به عنوان اثر سوپر الاستیک شناخته می شود.



شکل ۱. منحنی تنش-کرنش برای SMA؛ رفتار سوپر الاستیک و اثر حافظه شکلی.

۳- مدل سازی به روش اجزاء محدود و صحت سنجی

ابتدا بر اساس بارگذاری های متداول و رعایت شرایط بارگذاری آیین نامه ASCE یک ساختمان سه طبقه مدل و اعضای معمول آن شامل تیر و ستون طراحی شدند و سپس با استفاده از آیین نامه AISC پیچ های لازم برای یک اتصال کناری که از جنس فولاد پر مقاومت هستند طراحی گشتند. سپس همین اتصال را این بار با پیچ های SMA ولی با این دیدگاه که ظرفیت انتقال لنگر تیر از ظرفیت کل مجموعه پیچ ها بیشتر باشد (طوری که تیر و ستون اتصال تا آخرین لحظه در ناحیه الاستیک خود باقی بمانند و به جای ایجاد مفصل پلاستیک در تیر، یک مفصل سوپر الاستیک در خود اتصال به وسیله تغییر شکل پیچ های SMA به وجود آید)، طراحی شده است. صفحه انتهایی نیز به شکل ضخیم طراحی شد تا از ایجاد اثر اهرمی در آن جلوگیری شود. برای بررسی رفتار این دو اتصال، یک مدل سه بعدی از آنها به روش اجزاء محدود در نرم افزار ANSYS تهیه گردید که در خود این برنامه اثر سوپر الاستیک و اثر حافظه شکلی گنجانده شده است. قابل ذکر است که از این پس اتصال سنتی را HS و اتصال مجهز به پیچ های نایتینول را SMA نامگذاری خواهیم کرد که هر دو اتصال طراحی شده از نوع با صفحه انتهایی هشت پیچه سخت شده (AES) هستند. جزئیات و ابعاد اجزاء این اتصالات را می توان در شکل (۲) مشاهده نمود. برای هر دو اتصال ابعاد تیر، ستون، صفحه انتهایی و سخت کننده ها یکسان بوده و تنها تفاوت مدل ها در قطر و جنس پیچ های آنها می باشد. برای تمام اجزاء فلزی به جز پیچ ها که از فولاد پر مقاومت رده ۸/۸ (ASTM ۳۲۵) می باشند، از فولاد ساختمانی ST ۳۷ استفاده شده



ششمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

۱۶ الی ۱۸ آذر ماه ۱۳۹۴

است. همچنین در جدول ۱ و ۲ می توان مشخصات مصالح پیچ های SMA را مشاهده نمود. قطر محاسبه شده پیچ های فولادی برای اتصال HS، طبق آیین نامه طراحی AISC برابر با ۲۱ میلیمتر بدست آمده است. برای اتصال SMA از آنجایی که لنگر طراحی به طور منطقی تقلیل داده شده بود، قطر پیچ های SMA، برابر ۱۵ میلیمتر محاسبه شد. برای تمام اجزاء فولادی، از مدل رفتاری دو خطه الاستو-پلاستیک با سخت شدگی کینماتیک^۱ و المان مکعبی Solid 185 استفاده شده است. همچنین این المان قادر به مدل سازی رفتار سوپر الاستیک و حافظه شکلی می باشد لذا برای پیچ های SMA نیز این المان مورد استفاده قرار گرفته شده است (شکل (۳)). در نرم افزار ANSYS، مدل سازی رفتار سوپر الاستیک بر اساس مدل ارائه شده توسط آوریکیو (Auricchio, 2001) می باشد.

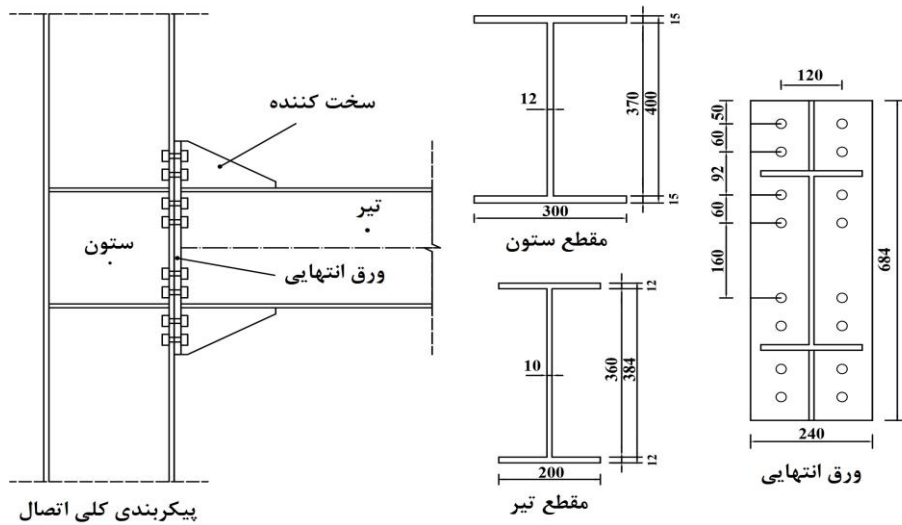
جدول ۱. مشخصات مصالح اجزاء اتصال.

مصالح	مدول الاستیسیته E (GPa)	نسبت پواسون (ν)	تنش تسلیم (F _y) (MPa)	تنش نهایی (F _u) (MPa)
ST37	۲۰۰	۰/۳	۲۴۰	۳۷۰
HS 8/8	۲۰۰	۰/۳	۶۴۰	۸۰۰
SMA	۴۲	۰/۳۳	۳۷۰	۵۰۰

جدول ۲. مشخصات مصالح برای پیچ های SMA.

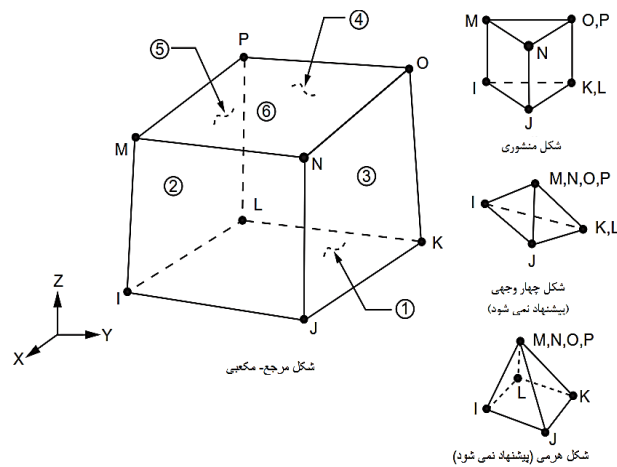
۳۶۰ MPa	تنش آغاز فاز مارتنزیت σ_{MS}
۴۵۰ MPa	تنش پایان فاز مارتنزیت σ_{Mf}
۲۸۰ MPa	تنش آغاز فاز آستنیت σ_{AS}
۱۳۰ MPa	تنش پایان فاز آستنیت σ_{Af}
۰/۰۵	حداکثر کرنش قابل برگشت ϵ_L
۰	زاویه انحراف رفتاری فشار و کشش α

^۱ - Bilinear Kinematic Hardening



شکل ۲. جزئیات و ابعاد هندسی اجزاء اتصال.

همچنین برای بارگذاری مدل ها از پروتکل بارگذاری SAC استفاده شده است که از نوع بارگذاری با کنترل جابجایی می باشد و در نرم افزار اجزاء محدود، این بارگذاری به انتهای تیر طره به شکل استاتیکی و تا گام بارگذاری ۵٪ اعمال شد (شکل (۴)). قابل ذکر است که یک تفاوت اصلی در بارگذاری اتصالات نسبت به پروتکل در نظر گرفته وجود دارد و این است که جهت کاهش تلاش محاسباتی، فقط چرخه اول بارگذاری در هر گام اعمال گردیده است.

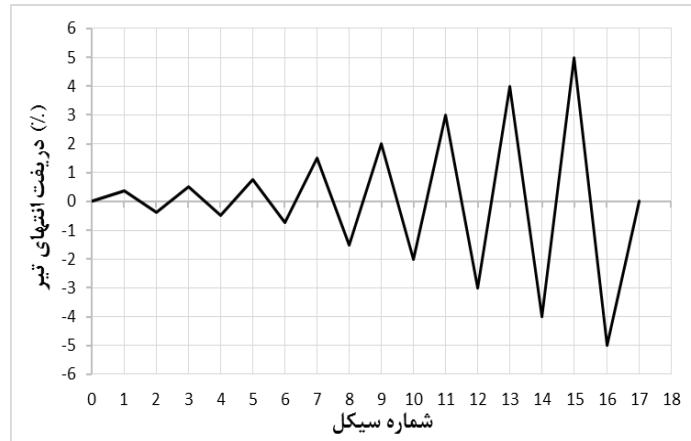


شکل ۳. شکل المان ۱۸۵ Solid.



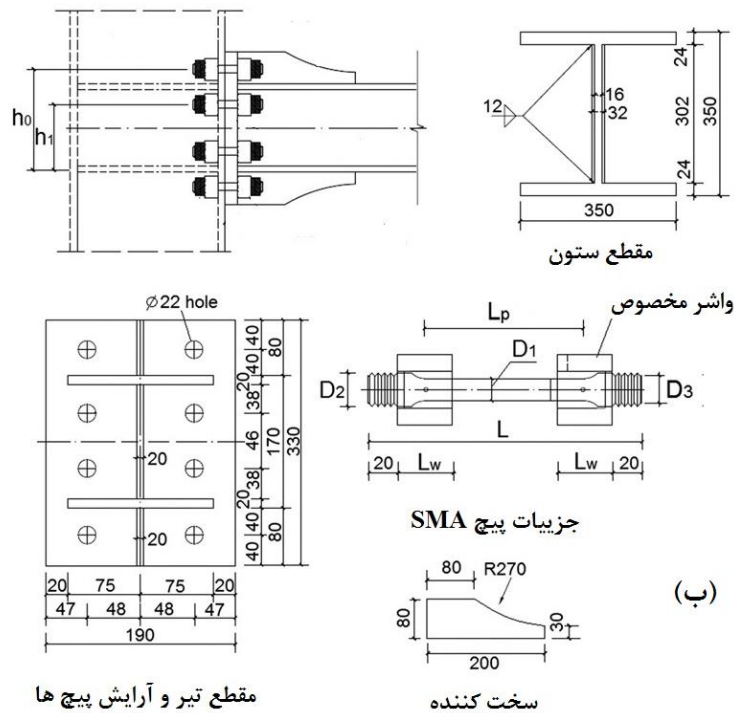
ششمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

۱۶ الی ۱۸ آذر ماه ۱۳۹۴

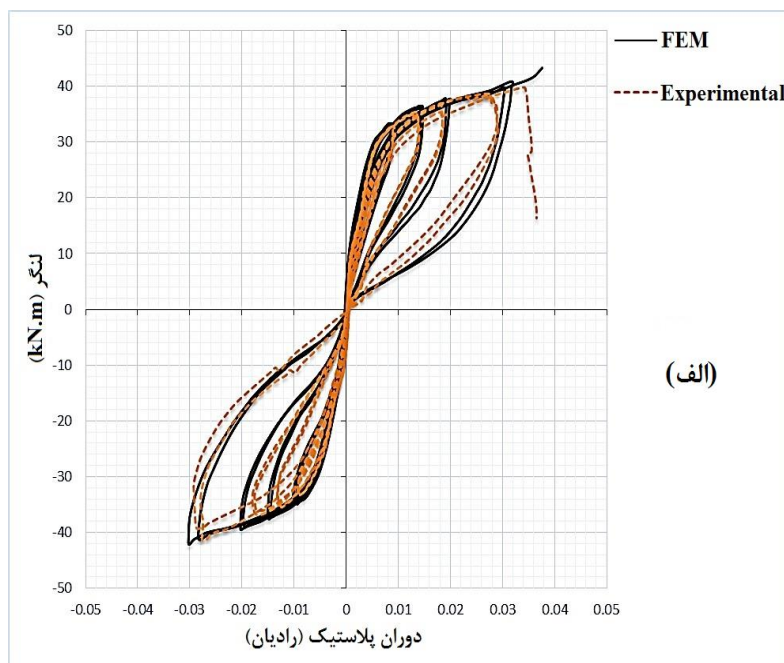


شکل ۴. نمودار دریفت انتهای تیر - شماره چرخه بارگذاری.

برای صحت سنجی مدل سازی ها از نتایج کار آزمایشگاهی فنگ و همکارانش (Fang et al, 2014) یک نمونه انتخاب شده است که جزئیات آن را در شکل (۵) می توان مشاهده نمود. همانطور که از شکل (۶) مشخص است، نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی با دقت قابل قبولی مطابق می باشند.



شکل ۵. پیکر بندی و جزئیات اتصال آزمایش فنگ و همکاران جهت صحت سنجی مدل سازی عددی.



شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی (اتصال آزمایش فنگ و همکاران)

۴- رفتار مکانیکی اتصالات

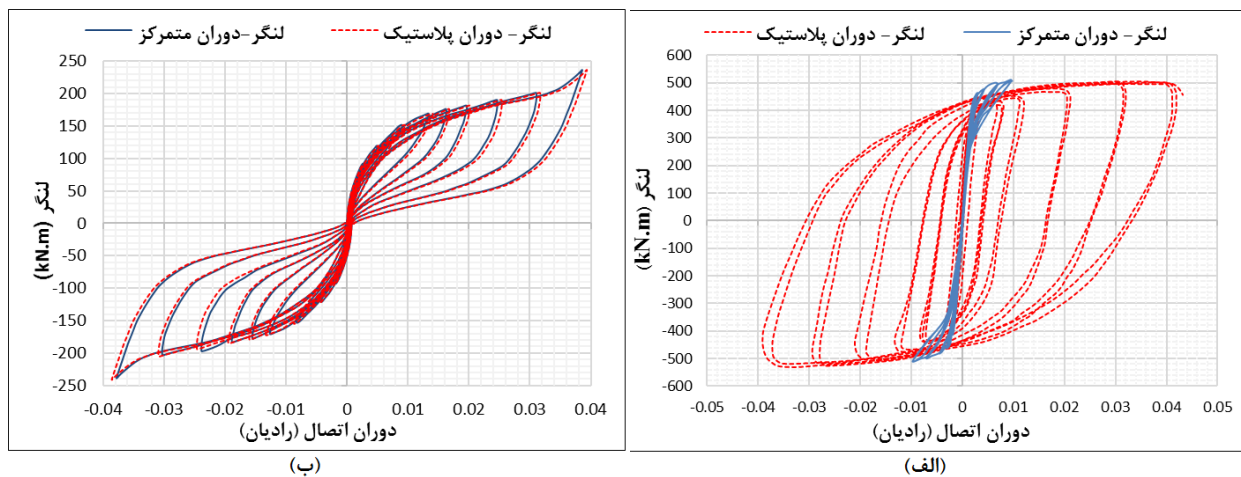
برای هر اتصال مشخصات چرخه ای مهم شامل نمودار لنگر- دوران، شکل پذیری، اتلاف انرژی و برگشت پذیری تغییر شکل ها استخراج شده است.

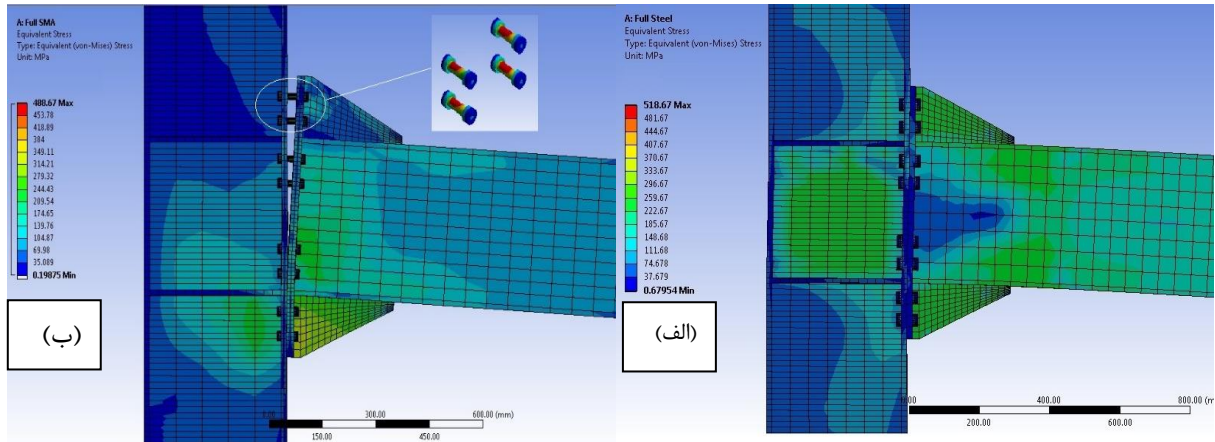
۴-۱- نمودار لنگر دوران

نمودار لنگر- دوران پلاستیک برای اتصال HS (شکل (۷-الف))، همانطور که انتظار می رفت دارای حلقه های هیستریزس پایدار و پهنی بوده که بیانگر شکل پذیری خوب و شاخصه های اتلاف انرژی عالی می باشد که در قسمت های بعدی توضیح داده خواهد شد. در چرخه های اولیه بارگذاری شاهد تغییر شکل های پلاستیک ناچیزی هستیم که این مقادیر با افزایش مقدار جابجایی انتهایی تیر بیشتر و بیشتر می شود. این اتصال تا گام بارگذاری ۵٪، از خود نمودار هیستریزس پایدار را به نمایش گذاشت. حداکثر لنگر تحمل شده توسط این اتصال برابر $506/1 \text{ kN.m}$ بود. با توجه به این نمودار می توان زوال مقاومت اتصال را در چرخه های با بارگذاری بزرگ تر (بعد گام بارگذاری ۲٪) مشاهده نمود که علت آن تسلیم تیر در ناحیه مفصل پلاستیک در لبه سخت کننده تیر بود. همچنین حداکثر دوران پلاستیک ایجاد شده در اتصال برابر با $0/042$ رادیان بود. در



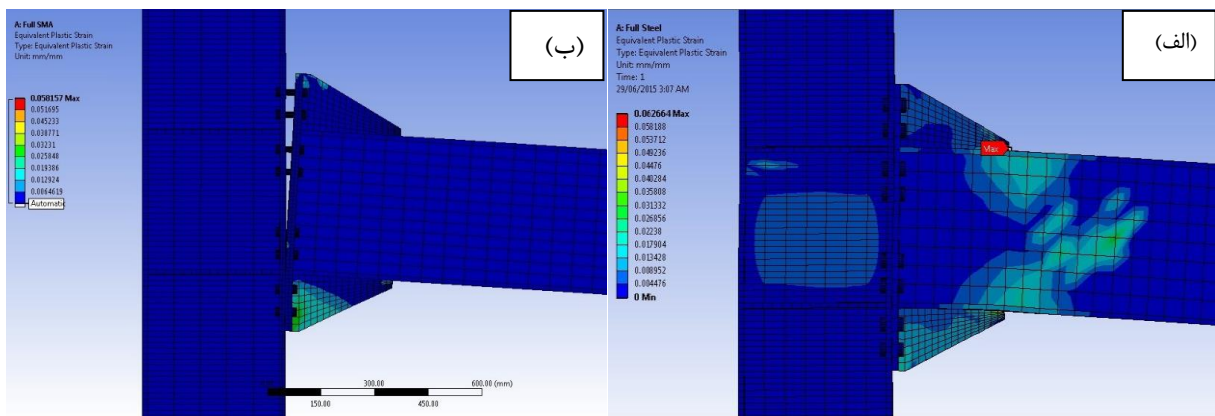
شکل ۷ نمودار لنگر- دوران متمرکز اتصال به صورت خط ممند به نمایش گذاشته شده است. برای محاسبه این دوران، جابجایی‌های بالا و پایین صفحه انتهایی را بر فاصله آن‌ها (ارتفاع صفحه انتهایی) تقسیم نموده که بیان گر دوران خود اتصال و ناشی از تغییر طول پیچ‌ها فولادی می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است، دوران متمرکز اتصال در مقابل دوران کل اتصال و یا دوران پلاستیک اتصال نسبتاً ناچیز می‌باشد که حداکثر مقدار آن حدود $0/01$ رادیان است. علت این تفاوت این است که پیچ‌های فولادی هنوز در ناحیه الاستیک خود باقی مانده و وارد ناحیه پلاستیک نشده‌اند و این بیانگر وجود فلسفه رایج و سنتی موجود در طراحی این نوع اتصالات در آیین نامه AISC است. در شکل (۷-ب) نیز می‌توان نمودار لنگر- دوران پلاستیک و لنگر- دوران متمرکز اتصال SMA را مشاهده نمود. بر خلاف اتصال HS، در این اتصال تفاوت بین نمودار لنگر- دوران پلاستیک و نمودار لنگر- دوران متمرکز، ناچیز می‌باشد. این پدیده را می‌توان چنین توجیه کرد که تقریباً بیشتر دوران اتصال را پیچ‌های SMA بوسیله افزایش طول خود متحمل شده‌اند و از آنجایی که این تغییر شکل‌ها با بار برداری بر خواهند گشت، لذا تغییر شکل‌های پلاستیک ناچیزی را بدست می‌دهند. برای اتصال SMA، تا گام بارگذاری $0/75$ در ناحیه الاستیک خود بوده و شاهد ایجاد حلقه‌های هیستریزیس قابل ملاحظه ای نیستیم. ولی برای گام‌های بارگذاری بزرگ‌تر از آن، نمودار لنگر- دوران به تدریج به حالت پرچمی شکل خود نزدیک می‌شود که نتیجه ورود پیچ‌های SMA به آغاز فاز مارتزیت است. حداکثر لنگر متحمل شده توسط این اتصال برابر 236 kN.m و حداکثر دوران متمرکز $0/393$ رادیان بود. ملاحظه می‌شود که لنگر تحمل شده برای این اتصال در گام‌های پایانی بر خلاف اتصال سنتی رو به افزایش است که دلیل آن را با شکل نمودار این چنین می‌توان بیان کرد که در چرخه‌های پایانی به خصوص دو چرخه آخر بار گذاری، پیچ‌هایی SMA وارد ناحیه پست الاستیک خود شده (ناحیه سخت شدگی مجدد) که تبعاً منجر به افزایش مقاومت کل اتصال شده است.





شکل ۸. کانتور توزیع تنش فون میسنز معادل؛ الف) اتصال HS ب) اتصال SMA

همانگونه که از شکل (۸) قابل مشاهده می باشد، در اتصال SMA بر خلاف اتصال HS، تیر و ستون در ناحیه الاستیک خود باقی مانده و تغییر شکل ها را عمدتاً پیچ های SMA با کرنش های سوپر الاستیک و قابل برگشت کنترل نموده اند. با توجه به اشکال (۹-الف) و (۹-ب) میتوان تشکیل مفصل پلاستیک را در ناحیه انتهایی تیر متصل و نزدیک به ابتدای سخت کننده های صفحه انتهایی را برای اتصال HS مشاهده نمود در حالیکه پیچ ها هنوز در ناحیه الاستیک خود باقی مانده و دچار تغییر شکل پلاستیک و تسلیم شدگی نشده اند. در اتصال SMA شاهد تسلیم شدگی موضعی در سخت کننده های صفحه انتهایی هستیم که با افزایش لنگر مقاوم ناشی از مجموعه پیچ ها بیشتر و مشهود تر می شود.



شکل ۹. توزیع کرنش پلاستیک معادل الف) اتصال HS ب) اتصال SMA



۲-۴- شکل پذیری

از اتصالات به طور کلی این انتظار می‌رود که شکل پذیری کافی را جهت تحمل بارهای لرزه ای داشته باشند. مطابق Eurocode 8، اتصالات تحت بارگذاری لرزه ای باید به گونه ای طراحی شوند که ظرفیت دورانی ناحیه مفصل پلاستیک آن‌ها از ۰/۰۳۵ رادیان برای کلاس با تغییر شکل زیاد و ۰/۰۲۵ رادیان برای کلاس با شکل پذیری متوسط، کمتر نباشد. در مبحث لرزه ای آیین نامه AISC الزام شده است که اتصال باید به گونه ای طراحی شود که قاب‌های خمشی ویژه و متوسط مجهز به این اتصالات، حداقل دررفت بین طبقه‌ای به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۲ رادیان را تحمل نمایند. اگر چه دو اصطلاح متفاوت برای اندازه گیری تقاضای شکل پذیری (به طور مثال در Eurocode 8 ظرفیت دوران ناحیه مفصل پلاستیک و در AISC دررفت بین طبقه ای) در این دو آیین نامه ذکر شده است ولی این دو اصطلاح فنی را می‌توان یکسان در نظر گرفت که در این تحقیق از واژه دررفت اسفاده می‌شود. خلاصه گروه بندی اتصالات را از نظر شکل پذیری بر اساس دو آیین نامه AISC و Eurocode 8، در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. گروه بندی اتصالات مدل شده از لحاظ شکل پذیری

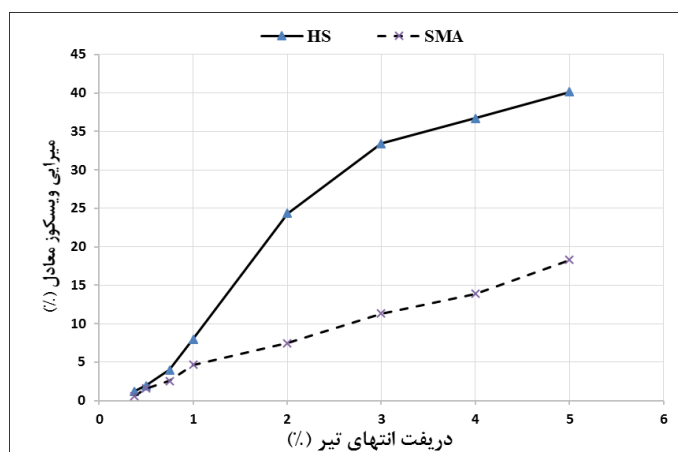
مدل اتصال	گروه شکل پذیری بر اساس AISC	گروه شکل پذیری بر اساس Eurocode 8
HS	با شکل پذیری بالا	با شکل پذیری بالا
SMA	با شکل پذیری بالا	با شکل پذیری بالا

۳-۴- اتلاف انرژی

برای شناخت بیشتر عملکرد اتصالات، میزان اتلاف انرژی آن‌ها را که با پارامتر میرایی ویسکوز معادل سنجیده می‌شود را در این بخش مورد بررسی قرار خواهیم داد. رابطه $\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_{so}} = \frac{E_D}{2\pi K_s \delta_{max}^2}$ میزان میرایی ویسکوز معادل را نشان می‌دهد (Speicher et al, 20110) که در رابطه فوق؛ E_D انرژی اتلاف شده در یک چرخه کامل بارگذاری (مساحت نمودار لنگر دوران یک چرخه) E_{so} انرژی جذب شده توسط یک سیستم الاستیک است که همزمان دارای حداکثر تغییر شکل (در اینجا دوران) و نیروی متناظر است، می‌باشد. مقدار میرایی ویسکوز معادل، برای چرخه اول هر گام بارگذاری محاسبه شده و در شکل (۱۰) به نمایش گذاشته شده است که در آن به طور کلی میرایی اتصالات با افزایش میزان دوران انتهایی تیر افزایش می‌یابد. اتصال HS با اختلاف، دارای درصد میرایی ویسکوز معادل بیشتری معادل ۴۱٪ می‌باشد که این میزان برای اتصال



SMA برابر با ۱۷٪ بود. علت این امر هم تسلیم شدگی تیر می‌باشد که منجر به ایجاد حلقه‌های هیستریزس پهن و ثابتی شده است.



شکل ۱۰. نمودار میرایی ویسکوز معادل به ازای هر گام بارگذاری برای چرخه‌های اول

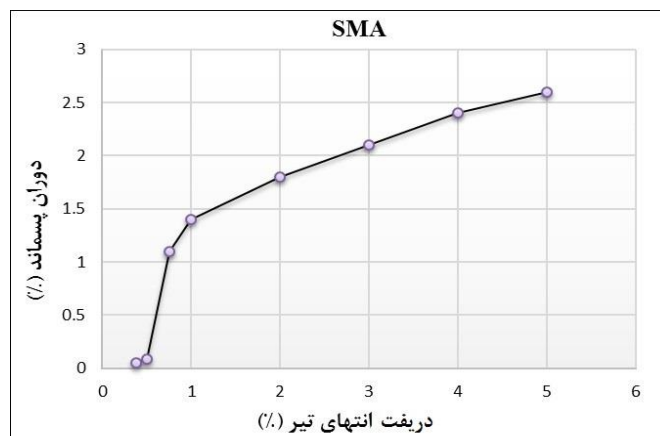
۴-۴- قابلیت برگشت پذیری

قابلیت برگشت پذیری اتصالات را می‌توان با میزان پسماند آن‌ها پس از بار برداری تعیین کرد. شکل (۱۱)، دوران انباشته شده را برای چرخه اول هر گام بارگذاری و بار برداری را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، به راحتی می‌توان دریافت که قابلیت برگشت پذیری برای اتصال HS بسیار ناچیز بوده و تقریباً تمام تغییر شکل‌های ایجاد شده از نوع پلاستیک و دائمی بوده‌اند که دلیل اصلی آن هم تسلیم فولاد تیر و تسلیم جزئی سایر اجزاء اتصال (به جزء پیچ‌ها که در ناحیه الاستیک باقی مانده بودند) است. ما بر خلاف اتصال سنتی، تقریباً همه تغییر شکل‌های ایجاد شده در اتصال SMA پس از بار برداری در هر گام، به صفر میل کرده و اتصال به حالت اولیه خود بازگشته است. روشن است که علت این مکانیزم برگشت پذیری، رفتار سوپر الاستیک پیچ‌های SMA بوده است.



ششمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

۱۶ الی ۱۸ آذر ماه ۱۳۹۴



شکل ۱۱. دوران پلاستیک پسماند به ازای هر گام بارگذاری برای اتصال SMA

۵- نتیجه گیری

اهم نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱) اتصال سنتی با پیچ‌های پر مقاومت فولادی که بر اساس آیین نامه AISC، طراحی گشته است، حین بارگذاری‌های چرخه ای، با توجه به نمودار لنگر- دوران آن، شکل پذیری بالا، میرایی انرژی بسیار خوب و البته تغییر شکل‌های پسماند زیادی را از خود نشان داد. علت آن، رعایت فلسفه حاکم بر طراحی این گونه اتصالات، مبتنی بر قوی تر طراحی نمودن اتصال نسبت به تیر متصل است. یعنی قبل از آنکه پیچ‌های فولادی دچار هر گونه تسلیم و یا گسیختگی شوند، تیر در ناحیه مفصل پلاستیک از پیش تعیین شده ای دچار تسلیم شده و به عنوان یک عضو کنترل کننده نیرو، رفتار اتصال را کنترل کرده و مانع از شکست اتصال از ناحیه پیچ‌ها می‌شود. ولی در عوض تغییر شکل‌های پسماند زیاد ایجاد شده در اتصال، قابلیت تعمیر را سلب کرده و عملاً تیر، بعد از چنین بارگذاری قابل استفاده نخواهد بود.

۲) اکثر مولفه‌های اتصال با صفحه انتهایی که در آن‌ها از پیچ‌های SMA استفاده شد، برخلاف اتصال HS تا آخرین گام‌های بارگذاری تقریباً در ناحیه الاستیک خود باقی مانده و میزان تغییر شکل پلاستیک کمتری داشتند و این پیچ‌های سوپر الاستیک بودند که با افزایش طول خود باعث دوران اتصال می‌شدند و منجر به مقداری کاهش در شکل پذیری اتصال SMA ناشی از تسلیم اعضایی مانند تیر گردید. هرچند که این اتصال SMA دارای مشخصه‌های شکل پذیری خوب و میرایی انرژی متوسط بود ولی در عوض مشخصه بارز آن‌ها یعنی برگشت پذیری کرنشی، مانع ایجاد تغییر شکل (دوران)‌های پسماند در اتصال شده که این امر سبب بهبود عملکرد و نیز کاهش هزینه‌های تعمیر پس از زلزله و یا بارگذاری خواهد شد.

۳) می‌توان گفت که اتصال SMA پیشنهاد شده را می‌توان به دلیل دارا بودن مشخصه‌های لرزه ای مناسب شامل شکل پذیری بالا (تقریباً در حد اتصال HS)، میرایی انرژی متوسط (۱.۴٪ اتصال HS) و برگشت پذیری بسیار خوب، به عنوان یک جایگزین مناسب برای اتصالات سنتی جهت کاربرد در مناطق با لرزه خیزی بالا دانست.



منابع:

- 1- Abolmaali A, Treadway J, Aswath P, Lu FK, McCarthy E. "Hysteresis behavior of t-stub connections with superplastic shape memory fasteners". Journal of Structural Engineering 2006; 62:831-8.
- ۲- Adey B.T, Grondin G.Y, Cheng J.J.R. "Extended end plate moment connections under cyclic loading". Department of Civil and Environment Engineering. University of Alberta, Alberta, Canada. Structural Engineering Report 1997; No.216.
- 3- AISC, "Seismic provisions for structural steel buildings". Chicago, IL, USA: American Institute of Steel Construction; 2005.
- 4- AISC, *Steel Design Guide 4*, "Extended end-plate moment connections, seismic and wind applications; Second edition", 2004.
- 5- ASCE/SEI 7-05, "Minimum design load for building and other structures". ۲۰۰۶.
- 6- Auricchio F. "A robust integration-algorithm for a finite strain shape memory alloy- super elastic model". International Journal of Plasticity 2001; 17:971-90.
- 7- Cheng Fang, Michael C.H. Yam, Angus C.C. Lam, Langkun Xie. "Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts". Journal of Constructional Steel Research 2014; 94:122-۱۳۶.
- 8- Christopoulos C, Filiatrault A, Uang CM, Folz B. "Posttensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames". Journal of Structural Engineering 2002; 128(9):1111-20.
- 9- DesRoches R, Taftali B, Ellingwood BR. "Seismic performance of steel frames with shape memory alloy connections, part I-analysis and seismic demands". Journal of earthquake engineering 2010; 14(4):471-86.
- 10- Ellingwood BR, Taftali B, DesRoches R. "Seismic performance of steel frames with shape memory alloy connections, part II-probabilistic seismic demand assessment". Journal of earthquake engineering 2010; 14(5):631-45.
- ۱۱- EN 1998-1:2004, Eurocode 8: "design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings". European Committee for Standardization; 2005.
- ۱۲- Lagoudas DC. "Shape memory alloys: modeling and engineering applications". USA: Springer; 2008.
- 13- McCormick J, Tyber J, DesRoches R, Gall K, Maier HJ." *Structural engineering with NiTi. II: mechanical behavior and scaling*". J Eng Mech 2007; 133:1019-29.
- 14- Ricles JM, Sause R, Peng SW, Lu LW. "Experimental evaluation of earthquake resistant Post-tensioned steel connections". Journal of Structural Engineering 2002; 128(7): 850-9.
- ۱۵- SAC Joint Venture. "Protocol for fabrication, inspection, testing and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens". Report no. SAC/BD- 97/02.
- 16- Speicher MS, DesRoches R, Leon RT. "Experimental results of a Ni-Ti shape memory alloys (SMA)-based Recentering beam-column connection". Structural engineering 2011; 33(9):2448.
- 17- Tyber J, McCormick J, Gall K, DesRoches R, Maier JH, Abdel Maksoud AE. "Structural engineering with NiTi". Basic materials characterization. J Eng Mech 2007; 133:1009-18.