



# بررسی کاربرد آلیاژ حافظه‌دار در اتصال صلب ورق انتهایی

المیرا فرجی زنوز<sup>۱</sup>، بهروز عسگریان<sup>۲</sup>، رضا کرمی محمدی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱)

## چکیده

شکست ترد اتصالات گیردار قاب‌های خمشی فولادی در زلزله‌های نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) موجب گردید تا اتصالات صلب جدیدی معرفی که مشکلات اتصالات سنتی را مرتفع ساخته و موجب عملکرد مناسب قاب‌های خمشی می‌شوند، اما علاوه بر افزایش هزینه ساخت به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها و ایجاد تغییرشکل‌های غیرالاستیک و ماندگار در زلزله-های شدید، هزینه‌های تعمیرات را بالا می‌برند. با استفاده از مواد بازگشت‌پذیر و هوشمندی چون آلیاژهای حافظه‌دار در این اتصالات می‌توان تغییرشکل‌های ماندگار و نیاز به تعمیرات را تا حدود چشمگیری کاهش داد. در این مقاله کاربرد آلیاژ حافظه‌دار بر پایه آهن و با بازیابی کرنش حدود ۵٪ در اتصال صلب ورق انتهایی و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از صحت‌سنجی رفتار چرخه‌ای یکی از اتصالات ورق انتهایی مورد آزمایش توسط سامنر که بر اساس تئوری ورق ضخیم طرح شده است، کاربرد آلیاژ حافظه‌دار به عنوان پیچ‌های متصل‌کننده ورق انتهایی به ستون و یا ورق در محل تشکیل مفصل پلاستیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد در اتصال ورق انتهایی طرح شده بر اساس تئوری ورق ضخیم، استفاده از ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار نقش موثرتری در کاهش چرخش پسماند اتصال نسبت به استفاده از پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار دارد. اتصال هیبریدی مجهز به ورق‌های نام‌برده، با حفظ مقاومت و شکل‌پذیری مناسب، جذب انرژی و کرنش پسماند کمتری نسبت به اتصال فولادی مشابه داشته و هزینه‌های تعمیرات را کاهش می‌دهد.

## کلمات کلیدی

آلیاژ حافظه‌دار، ورق انتهایی، مفصل پلاستیک، کرنش پسماند، اتصال هیبریدی

## Application of Shape Memory Alloyed Material in End Plate Rigid Connection

E. Faraji Zanoz, B. Asgarian, R. Karami Mohammadi

### ABSTRACT

As observed in Northridge (1994) and Kobe (1995) earthquakes, brittle failure of rigid connection caused premature collapse of steel moment frames and new rigid connections have been introduced in design guidelines of steel frames. Although the usage of new connections can lead to the appropriate function of steel moment frames, plastic hinges forms in beams which leaves the inelastic and permanent residual deformations after strong ground motions. Since this irremediable deformation increases repair cost, constructing rigid connections from reversible material such as Shape Memory Alloy (SMA) significantly reduce the residual strain and could be a solution to the problem. This paper focuses on the function of end plate connection using Iron-based SMA (possessing 5% of super elastic strain) by numerical study using ANSYS software. Following verification of cyclic behavior of an end plate connection tested by Sumner (designed on the basis of Thick Plate Theory), SMA is used as either connecting bolts for end plate-to-column connection or as plates located at plastic hinges. The result shows that using SMA plates is more efficient than SMA bolt in end plate connection which designed based on thick plate theory. Regarding appropriate weld ability and lower cost of iron-based SMA, hybrid connection equipped with mentioned plates is able to absorb lesser energy compared to steel connection. Moreover, it decrease repair cost whereas lower residual strain is seen.

### KEYWORDS

Shape memory alloy, End plate, Plastic hinges, Residual strain, Hybrid connection

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه خواجه نصیرالدین، [elmira.faraji@gmail.com](mailto:elmira.faraji@gmail.com) (نویسنده مسئول)

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین، [asgarian@kntu.ac.ir](mailto:asgarian@kntu.ac.ir)

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین، [rkarami@kntu.ac.ir](mailto:rkarami@kntu.ac.ir)



ضعف و آسیب‌پذیری اتصالات سستی قاب‌های خمشی فولادی موجب شد تا برای جبران شکست ترد و ضعف اتصالات جوشی، راهکارهای جدیدی مورد استفاده قرار گیرد که از جمله آن‌ها می‌توان به تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها (با فاصله از محل جوش‌ها)، اتصالات نیمه‌گیردار و پیچی و روش‌های کنترل غیرفعال همانند جداگرها و میراگرها اشاره نمود. استفاده از جداگرها و میراگرها اغلب با مشکلات افزایش طول عمر، دوام، نصب و تعویض، و هزینه‌های نگهداری همراه هستند و نمونه‌های دیگر اتصالات عنوان شده نیز پس از زلزله باعث ایجاد تغییرشکل‌های پسماند در سازه می‌شوند. به همین علت استفاده از مصالح نوین همانند آلیاژهای حافظه‌دار پیشنهاد گردید. آلیاژهای حافظه‌دار علاوه بر جبران مشکلات ذکر شده در سایر ابزارهای کنترل غیرفعال، قابلیت بازیابی کرنش‌هایی در حدود ۶ تا ۸ درصد را داشته و موجب کاهش تغییرشکل‌های پسماند می‌گردند. اتصال آلیاژ حافظه‌دار به عنوان اتصالی نیمه‌گیردار شناخته شده و با رفتار هیستریزس پایدار، میرایی هیسترتیک بالا، شکل‌پذیری مناسب و قابلیت بازگشت‌پذیری (خود مرکزی) چشمگیر، عملکرد لرزه‌ای مناسبی را فراهم می‌آورد.

برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ Ocel و همکارانش [۱] امکان استفاده از میله‌های آلیاژهای حافظه‌دار در فاز مارتزیت را به منظور کاربرد در اتصال بال تیر به بال ستون و در دو نمونه آزمایشگاهی و تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج دال بر رفتار هیسترتیک تکرارپذیر و پایدار بوده و هیچ‌گونه کاهشی در مقاومت و سختی و علائمی از خستگی مشاهده نشد. از آن جایی که این اتصال می‌تواند با تحمل چرخش زیاد، انرژی را بدون تسلیم تیرها تلف کند. پس از انجام این تحقیق، آلیاژ حافظه‌دار اغلب به صورت پیچ و یا میله در اتصالات نبشی، سپری، ورق انتهایی و... مورد استفاده قرار گرفت. کاربرد پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار در اتصال ورق انتهایی برای نخستین بار در سال ۲۰۰۷ [۲] بررسی شد. در این اتصال،

میله‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم در فاز آستنیت به عنوان پیچ در اتصال ورق انتهایی استفاده شده و به منظور بازگشت‌پذیری اتصال، ظرفیت ممان پیچ‌ها کمتر از ظرفیت الاستیک ممان تیر در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای این اتصال در نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS نشان از بازگشت‌پذیری قابل توجه و اتلاف انرژی متعادل اتصال آلیاژ حافظه‌دار دارد و پس از باربرداری، بدون ایجاد هیچ‌گونه کمناش موضعی در تیر، حدود ۹۰٪ از تغییرشکل‌های ایجاد شده به دلیل رفتار فوق ارتجاعی SMA از بین می‌روند. در پایان تحقیق به منظور تامین حدود مورد نیاز شکل‌پذیری، طول پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار در حدود ۲/۲ برابر طول پیچ معمولی در اتصال مشابه فولادی پیشنهاد گردید.

در سال ۲۰۱۲ اتصال معرفی شده در آزمایشگاه توسط Ma و Yam [۳] مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج مدل‌سازی تایید شد. در ادامه این تحقیقات، این اتصال در نرم‌افزار OpenSees توسط Rofooei و Farhidzade [۴] مدل‌سازی و سپس آنالیز دینامیکی غیرخطی افزایشی بر روی سازه‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ طبقه که به این اتصال مجهز شده بودند، انجام شد. نتایج نشان استفاده از SMA سبب می‌شود دامنه شتاب طیفی و در نتیجه برش پایه سازه SMA کاهش یابد. آلیاژ حافظه‌دار موجب کاهش دریافت نمی‌شود اما دریافت پسماند طبقات برخلاف عدم کاهش دریافت، کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۳، اتصال نیمه‌گیردار ورق انتهایی توسط Hu و Hwang [۵] پیشنهاد شد که شامل ترکیبی از میله‌های آلیاژ حافظه‌دار و فولاد کم کربن بوده و تیر فولادی را به ستون فولادی توخالی که از بتن پر شده است متصل می‌نمود. نتایج نمایانگر آن است که این اتصال می‌تواند پارامترهای مقاومت، سختی و ظرفیت مناسب تغییرشکل را فراهم نماید. مصالح فولاد قابلیت جذب انرژی پایین SMA را بهبود بخشیده در حالی که SMA خاصیت بازگشت‌پذیری سوپرالاستیک خود را به سیستم افزوده است. از طرفی رفتار اتصال نشان می‌دهد اتصال جوشی کاملاً گیردار تغییرشکل پسماند بیشتری در حین باربرداری دارد.



نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی و استاتیکی قاب های ۴ و ۶ طبقه مجهز به این اتصال در مقایسه با قاب مجهز به اتصالات کاملاً صلب جوشی نشان داد اتصال آلیاژ حافظه دار توانسته است رفتارهای مربوط به سختی، کاهش مقاومت، تغییرشکل های ماندگار و ظرفیت اتلاف انرژی قاب مجهز به این اتصالات را نسبت به قاب خمشی با اتصالات جوشی بهبود بخشد. اما برای دستیابی به تغییر مکان های یکسان با قاب خمشی جوشی و به دلیل سختی کمتر، مقاطع اعضای بزرگتری دارد. نتایج حاصل از مقایسه آنالیز تاریخچه زمانی نیز نشان می دهد که علاوه بر کاهش تغییر مکان ماکزیمم، تغییر مکان پسماند نیز در قاب اتصالات آلیاژ حافظه دار کاهش یافته است [۶].

در تحقیق فرمانی [۷]، در ابتدا یک اتصال ورق انتهایی با پیچ های فولادی به گونه ای طراحی شد که ممان مجموعه پیچ ها کمتر از ممان الاستیک تیر متصل باشد. عملکرد لرزه ای این اتصال به علت شکست زود هنگام پیچ های فولادی در سیکل های پایین بارگذاری غیر قابل قبول است. در گام بعد با تغییر قطر پیچ ها و جایگزینی مصالح آلیاژ حافظه دار سعی بر آن شده است که ممان پیچ ها ثابت بماند. این روند موجب می شود قبل از کمانش موضعی بال ها و جان، پیچ های آلیاژ وارد ناحیه غیرخطی خود شده و خاصیت منحصر به فرد آلیاژ و طول بلندتر آنها باعث شود پیچ ها در چرخش های کم، گسیخته نشده و بتوانند بدون ایجاد تغییرشکل ماندگار در تیر عملکرد و شکل پذیری اتصال را بهبود بخشند. تغییرشکل نهایی اتصال نمایانگر آن است که اتصال به حالت ابتدایی خود بازمی گردد، رفتار چرخه ای اتصال نیز نشان دهنده آن است که با افزایش طول پیچ های آلیاژی، شکل پذیری بهبود پیدا کرده است. قابل ذکر است تاکنون در هیچ یک از تحقیقات موجود کاربرد ورق های آلیاژ حافظه دار در اتصال ورق انتهایی بررسی نشده است.

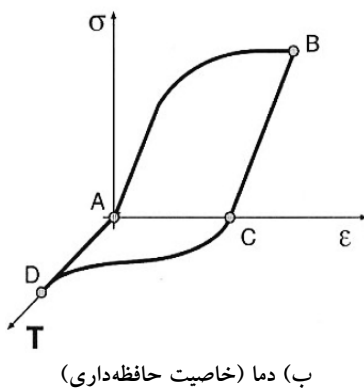
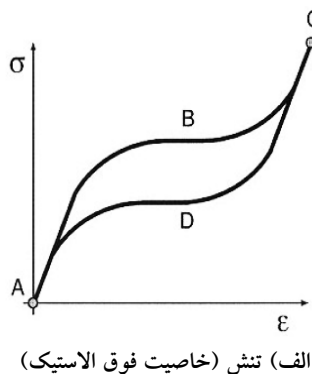
استفاده از ورق های آلیاژ حافظه دار در اتصالات فولادی تیر به ستون برای اولین بار در تحقیق Alam و Moradi [۸] و در اتصال گیردار ورق بالاسری-زیرسری در نرم افزار ANSYS بررسی گردید به صورتی که ورق های آلیاژ

حافظه دار بر پایه آهن با فرض کرنش بازگشت پذیری ۰/۸ جایگزین بخشی از بال و جان تیر در ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در اتصال شده تا کاهش تغییرشکل های پسماند در این ناحیه موجب افزایش بازگشت پذیری اتصال شود. افزایش طول ورق ها موجب افزایش بازگشت پذیری اتصال شده است.

استفاده از ورق های آلیاژ حافظه دار در بال ها و جان تیر باعث افزایش بازگشت پذیری و کاهش اتلاف انرژی نسبت به حالتی است که در آن فقط در بال ها از آلیاژ استفاده شده است. از طرفی اتصالی که مجهز به ورق های فولادی تقویتی بلافاصله پس از اتمام ورق های آلیاژی است، با متمرکز نمودن تغییرشکل ها در ناحیه مفصل پلاستیک، موجب کاهش بیشتر تغییرشکل های ماندگار شده است. اگرچه ساخت و عملیات جوشکاری ورق های آلیاژ در اتصال ترکیبی دشوارتر و پرهزینه تر است اما نتایج نشان از بهبود عملکرد اتصال ترکیبی نسبت به اتصال فولادی دارند. در این مقاله به منظور بهبود رفتار اتصال ورق انتهایی سخت نشده در عین حفظ مقاومت و رفتار مناسب و با هدف کاهش چرخش پسماند در پایان سیکل های بارگذاری چرخه ای، کاربرد مصالح آلیاژ حافظه دار بر پایه آهن به عنوان پیچ های اتصال ورق تیر به ستون و ورق در ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در نرم افزار ANSYS مورد بررسی قرار می گیرد. در مدل اول، اتصال فولادی بر اساس اتصال ورق انتهایی 4E-1.25-1.5-24 (براساس مطالعه [۹]) مدل سازی و در مدل دوم مصالح آلیاژ حافظه دار بر پایه آهن جایگزین مصالح فولادی پیچ در اتصال فولادی شده است. در مدل سوم نیز ورق های آلیاژ حافظه دار جایگزین بخشی از بال و جان اتصال در ناحیه مورد انتظار تشکیل مفصل پلاستیک می شود. در پایان رفتار چرخه ای اتصال و کرنش های پسماند هر دو اتصال ترکیبی (هیبریدی) با اتصال پایه فولادی تحت پروتوکل بارگذاری [۱۰] مقایسه می شود.

## ۲- مصالح آلیاژ حافظه دار

فوق ارتجاعی را به وجود می آورد. مقایسه رفتار فوق ارتجاعی و حافظه‌داری، تحت عنوان رفتار مکانیکی SMA در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۱].



شکل (۱): تبدیل فاز به علت تنش و دما [۱۱]

استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در زمینه کنترل سازه‌ها در سه گروه فعال، نیمه فعال و غیرفعال طبقه‌بندی شده است که عمدتاً از فاز ماتریز برای کنترل فعال و از فاز آستنیت برای کنترل فعال استفاده می‌شود [۱۲]. آلیاژهای حافظه‌دار تاکنون به عنوان میراگر، جداگر، مهاربند، اجزای میراگر پل‌ها، اتصالات و در مقاوم‌سازی زلزله نیز کاربرد داشته‌اند. علاوه بر آلیاژهای حافظه‌دار بر پایه نیکل-تیتانیوم که پرکاربردترین نوع آلیاژ حافظه‌دار هستند، آلیاژهای بر پایه مس و آهن نیز وجود دارند که به تازگی در کاربردهای صنعتی به کار رفته و خاصیت بازگشت‌پذیری تحت اثر دما و باربرداری دارند. به تازگی آلیاژهای حافظه‌دار بر پایه آهن با توجه به قیمت پایین‌تر در کنار مقاومت و سختی مورد توجه و ویژگی کارپذیری و جوش‌پذیری بهتر نسبت به سایر آلیاژهای حافظه‌دار توجه بیشتری در به خصوص

آلیاژهای حافظه‌دار (SMAs)، به دسته‌ای از آلیاژها گفته می‌شود که قادرند تغییر شکل و کرنش‌های دائمی که بر آنها اعمال می‌شود را بازیابی نموده و در نهایت به شکل اولیه خود، بازگردند. آلیاژهای حافظه‌دار می‌توانند تا کرنش‌های حدود ۱۰ درصد را بدون برجا گذاشتن کرنش پسماند و هم‌زمان با رفتار هیسترتیک تحمل کنند. قابلیت استهلاک مناسب انرژی، مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، عمر مفید بالا، سخت‌شدگی نهایی در مقادیر تغییر شکل‌های زیاد، نبود نیاز به نگهداری و امکان حذف کرنش‌های پسماند به کمک اعمال دما و یا اعمال تنش به همراه دما و امکان ساخت مواد با خصوصیات مورد تقاضا، همگی از خصوصیات منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار می‌باشند.

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار، از این مواد در زمینه‌های پزشکی، هوافضا، صنعت، خودروسازی، روباتیک و عمران استفاده‌های گوناگونی می‌شود. اولین مشاهدات در مورد این مواد به سال ۱۹۳۲ میلادی و به آلیاژ Au-Cd برمی‌گردد که تبدیل فازی برگشت‌پذیر در این آلیاژ به ثبت رسید. در سال ۱۹۶۲ خاصیت حافظه‌دار شکلی در آلیاژ Ni-Ti کشف شد که این آلیاژ را به نام Nitinol موسوم کرد و تا به امروز انواع مختلفی از این آلیاژها کشف شده است.

آلیاژهای حافظه‌دار دو خاصیت مهم حافظه‌داری و فوق ارتجاعی دارند. خاصیت حافظه‌داری باعث می‌شود آلیاژ تحت اثر گرما به شکل اولیه خود بازگردد و خاصیت فوق ارتجاعی موجب می‌شود آلیاژ مقدار زیادی تغییر شکل الاستیک را حین بارگذاری متحمل شده و پس از باربرداری، درصد زیادی از تغییر شکل اولیه را بازگرداند. این دو خاصیت منحصر به فرد نتیجه تبدیل فاز برگشت‌پذیر دو فاز کریستالی پایدار در آلیاژهای حافظه‌دار به نام‌های آستنیت و مارتنزیت می‌باشد که تحت اثر تنش و حرارت به یکدیگر تبدیل می‌شوند. تبدیل فاز بر اثر دما که در فاز مارتنزیت صورت می‌گیرد، خاصیت حافظه‌دار شکلی (SME) را حاصل می‌کند و دیگری تبدیل فاز بر اثر تنش که در فاز آستنیت رخ می‌دهد، خاصیت

در کاربردهای عمرانی به خود جلب کرده‌اند، اگرچه کرنش بازگشت‌پذیری این آلیاژها نسبت به آلیاژ نیکل-تیتانیوم کمتر است. در این تحقیق نیز با توجه به قیمت مناسب‌تر و جوش‌پذیری بهتر آلیاژهای بر پایه آهن، آلیاژ  $Fe_{43.5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7.5}$  با کرنش بازگشت‌پذیری ۵ درصد که در دمای اتاق در فاز آستنیت قرار داشته و خاصیت فوق ارتجاعی دارد یک‌بار به عنوان پیچ و بار دیگر به عنوان ورق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳- مدل‌سازی در نرم‌افزار و صحت‌سنجی

در این بخش مدل‌سازی اتصال معرفی شده شامل مدل‌سازی مصالح و هندسه، المان‌های انتخابی، تماس، مش بندی، بارگذاری و... در نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS بررسی می‌شود. به منظور انجام عملیات صحت‌سنجی و انتخاب یک اتصال فولادی پایه در مقایسه با اتصالات هیبریدی بخش‌های آتی این تحقیق، نمونه آزمایشگاهی اتصال چهارپیچه سخت‌نشده 4E-1.25-1.5-24 در تحقیق [۹] انتخاب و در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی می‌شود.

### ۳-۱- مدل‌سازی در نرم‌افزار

اتصال ورق انتهایی یکی از اتصالات پرکاربرد در قاب‌های خمشی فولادی است. این اتصال شامل یک ورق است که انتهای تیر به آن جوش داده شده و توسط تعدادی پیچ به بال ستون متصل می‌شود. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی رفتار لرزه‌ای این نوع اتصالات صورت گرفته و عملکرد مناسب آن موجب شده است تا به عنوان یکی از اتصالات پیش‌پذیرفته [۱۳] توسط انجمن سازه‌های فولادی آمریکا (AISC) و در سه گروه چهار پیچه سخت‌نشده، چهار پیچه سخت شده و هشت پیچه سخت شده معرفی گردیده و روش طراحی آن که بر اساس تئوری ورق ضخیم می‌باشد، به تفصیل ارائه شود. تئوری طراحی ورق ضخیم به منظور جلوگیری از شکست ترد اتصال است. در این روش ممان اتصال برای ۱۱۰٪

ممان پلاستیک اسمی تیر متصل طراحی شده و موجب می‌شود خرابی در هیچ یک از اعضای اتصال همانند ورق انتهایی و پیچ‌ها رخ ندهد. این تئوری طراحی موجب تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه ابتدایی تیر از بر ستون شده و جذب انرژی توسط کماتش موضعی بال‌ها و جان تیر انجام می‌شود. در واقع اتصال با مکانیزم خرابی نرم، ممان پلاستیک تیر را انتقال می‌دهد [۹].

اتصال مورد بررسی، اتصال چهارپیچه سخت‌نشده با نام 4E-1.25-1.5-24 است که بخش اول نام اتصال نشان‌دهنده نوع اتصال (چهارپیچه سخت‌نشده)، عدد ۱/۲۵ در بخش دوم نشان‌دهنده قطر پیچ استفاده شده، عدد ۱/۵ در بخش سوم نشان‌دهنده ضخامت ورق انتهایی و عدد ۲۴ در بخش چهارم نشان‌دهنده عمق تیر انتخابی است. اعداد ذکر شده همگی در واحد اینچ می‌باشند.

مدل‌سازی اتصال مطابق اطلاعات ارائه شده در پیوست A تحقیق Sumner [۹] شامل اندازه و مشخصات اعضای اتصال، صورت گرفته است. ابعاد تیر، ستون، ورق انتهایی، پیچ و مهره‌ها به ترتیب در جدول‌های (۱) تا (۳) نشان داده شده‌اند. قابل ذکر است که طول معرفی شده برای تیر در جدول (۱) از مرکز ستون اندازه‌گیری شده و طول تیر از بر ورق انتهایی برابر ۴/۰۸۹ متر می‌باشد. ابعاد ورق‌های پیوستگی نیز اسمی و ضخامت آن برابر ۰/۰۱۶ متر است.

پس از انجام آزمایشات اتصال در تحقیق [۹] به منظور مدل‌سازی رفتار مصالح اتصال در نرم‌افزار Ansys، از نمودارهای سه خطی شکل (۲) استفاده شده و در تحقیق حاضر نیز از این منحنی‌های رفتاری برای مدل‌سازی مصالح فولادی استفاده می‌گردد. و رابطه تنش و کرنش مصالح همانند جدول (۴) به نرم‌افزار معرفی می‌شود.

تیر به صورت طره به یک ستون دو سر مفصل متصل شده است. ورق انتهایی به ستون جوش شده و توسط پیچ‌ها به بال ستون اتصال می‌یابد. مدل‌سازی جوش مابین تیر و ورق انتهایی، جوش مابین ورق‌های پیوستگی و ستون و جوش مابین بال‌ها و جان تیر در قسمت Modeling نرم‌افزار و توسط بخش Partition انجام می‌شود.

عمق تیر از بر ستون از المان Solid186 و در سایر مقاطع و نواحی تیر از المان Solid185 استفاده شده است. مش بندی احجام اعضا با توجه به میزان اهمیت محاسبات نواحی مختلف انجام می‌شود. به صورتی که در ناحیه اصلی اتصال در تیر و ستون (در بخش میانی ستون و در طول ۱/۵ برابری عمق تیر از بر ستون در تیر) از اندازه مش کوچک‌تری نسبت به سایر نواحی استفاده شده است. در نواحی ذکر شده و در ورق انتهایی و مهره‌ها، مش چهار وجهی و در سایر نواحی مش شش وجهی انتخاب شده است (شکل (۳)).

برای مدل‌سازی تمامی اعضای اتصال از دو المان سه بعدی Solid185 و Solid186 بهره برده شده است. المان Solid185 المانی ۸ گرهی و المان Solid186 المانی ۲۰ گرهی است که هر دو المان با سه درجه آزادی انتقالی در جهت X، Y و Z، قابلیت در نظر گرفتن رفتارهای پلاستیسیته، هایپراالاستیسیته، سخت شوندگی تنش، خزش و تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بزرگ را دارند. از آن جایی که مشاهده اثر کماتش موضعی بال‌ها و جان تیر در محل تشکیل مفصل پلاستیک حائز اهمیت است و نیاز به محاسبات دقیق‌تری دارد، در تیر و در طول ۱/۵ برابری

جدول ۱- مشخصات مکانیکی اعضای قاب

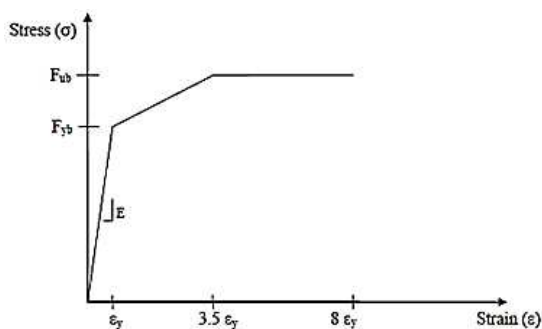
عضو	ارتفاع، d (m)	ضخامت جان، $t_w$ (m)	عرض، $b_f$ (m)	ضخامت بال، $t_f$ (m)	طول، $L_{bm}$ (m)
تیر	۰/۶۰۶	۰/۰۱۱	۰/۲۳۳	۰/۰۱۵	۴/۳۱۲
ستون	۰/۳۶۸	۰/۰۱۵	۰/۳۷۵	۰/۰۲۴	۵/۵۵۳

جدول ۲- ابعاد ورق انتهایی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ANSYS

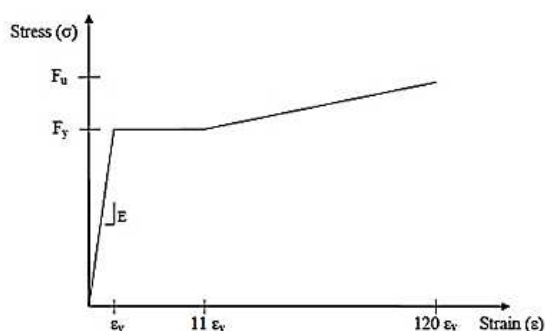
ضخامت، $t_p$ (m)	عرض، $b_p$ (m)	ارتفاع، $L_{pl}$ (m)	Top .g (m)	Top .P <sub>f</sub> (m)	Top .P <sub>t</sub> (m)	Bottom .g (m)	Bottom .P <sub>t</sub> (m)
۰/۰۴	۰/۲۵۴	۰/۸۵۷	۰/۱۵۲	۰/۰۴۳	۰/۰۷۱	۰/۱۵۱	۰/۰۶۳

جدول ۳- ابعاد پیچ‌ها و مهره‌های مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ANSYS

قطر پیچ، $d_b$ (m)	عرض، $l_b$ (m)	ضخامت بال، f (m)	طول، H (m)
۰/۰۳۲	۰/۰۶۴	۰/۰۵	۰/۰۲



ب) مصالح پیچ‌های پرمقاومت



الف) مصالح تیر، ستون و ورق انتهایی

شکل (۲): رابطه تنش-کرنش [۹]



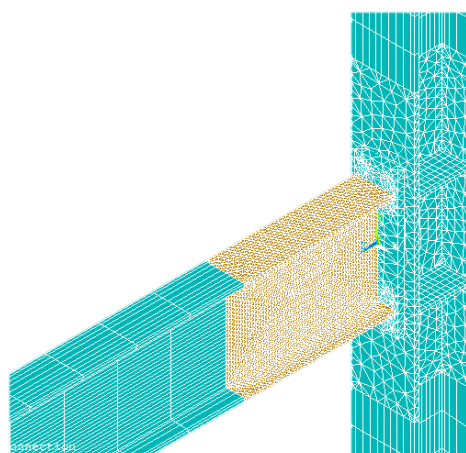
جدول ۴- خصوصیات مصالح فولادی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار

فولاد ۱ (ورق انتهایی، ورق‌های پیوستگی)		فولاد ۲ (تیر، ستون)		فولاد ۳ (پیچ‌ها)	
کرنش	تنش (MPa)	کرنش	تنش (MPa)	کرنش	تنش (MPa)
۰/۰۰۱۲۷۵	۲۶۲/۰۱۰	۰/۰۰۱۷۷۹	۳۶۵/۴۳۵	۰/۰۰۳۸۵۹	۷۹۲/۹۲۵
۰/۰۱۴۰۳	۲۶۸/۹۰۵	۰/۰۱۹۵۶۴	۳۷۲/۳۳۰	۰/۰۱۳۵۰۷	۱۰۳۴/۲۵۰
۰/۱۵۳۰۲	۴۷۵/۷۵۵	۰/۲۱۳۴۲۳	۴۸۷/۴۷۷	۰/۰۳۰۸۷۲	۱۰۴۱/۱۴۵

انتهایی و بال ستون از تماس حجم به حجم استفاده شده است.

بارگذاری در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول پیش‌تندگی پیچ‌ها اعمال شده و در مرحله دوم بارگذاری چرخه‌ای به صورت اعمال تغییرمکان در انتهای تیر مدل‌سازی می‌گردد. به منظور ایجاد پیش‌تندگی از دستور psmesh در نرم‌افزار استفاده شده است. این دستور در پیچ‌ها مقطع ایجاد کرده و المان‌های پیش‌تندگی را در این ناحیه به وجود می‌آورد. در آزمایش سامنر به پیچ‌ها نیروی پیش‌تندگی اعمال شده است که با توجه به مرجع [۱۴] حداقل نیروی پیش‌تندگی اتصالات اصطکاکی برای پیچ‌های A490 با قطر ۱/۲۵ اینچ برابر ۴۵۳۷۱۸/۶ می‌باشد. با استفاده از المان پیش‌تندگی می‌توان این نیروی لازم را به عنوان نیروی پیش‌تندگی در هر پیچ اعمال نمود.

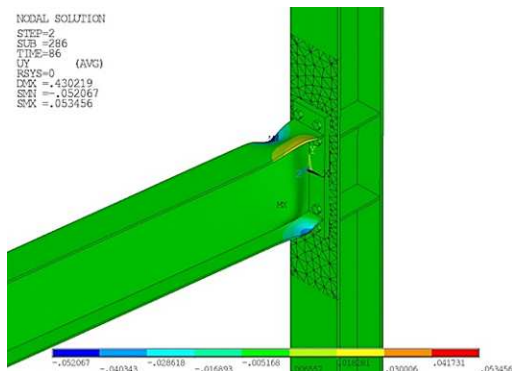
در مرحله دوم بارگذاری و پس از اعمال نیروی پیش‌تندگی، بارگذاری چرخه‌ای (رفت و برگشتی) [۱۰] به صورت تغییرمکان و در انتهای تیر طره وارد می‌گردد. چرخش لازم نشان داده شده در پروتوکل بارگذاری شکل (۴) در طول تیر از مرکز ستون ضرب شده و به صورت تغییرمکان در راستای قائم و در انتهای تیر وارد می‌گردد.



شکل (۳): نمایش مش‌بندی مدل اجزا محدود اتصال

میان ورق انتهایی و بال ستون، میان جدار سوراخ‌های پیچ در ورق انتهایی و بال ستون با بدنه پیچ‌ها و میان بال ستون و ورق انتهایی و مهره‌ها، تماس و برخورد در حین بارگذاری وجود دارد که به وسیله المان‌های تماسی مدل شده‌اند. اصطکاک سطوح فولادی همانند تحقیق Ma و همکارانش [۲] برابر میزان ۰/۴۵ در نظر گرفته شده که در حدود ضریب اصطکاک معرفی شده برای سطوح فولادی (مابین ۰/۳ تا ۰/۵) در آیین‌نامه سازه‌های فولاد آمریکا [۱۴] است.

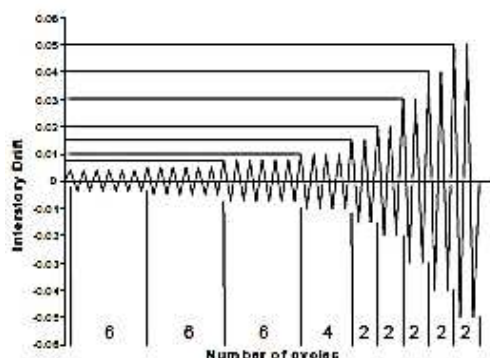
المان‌های مورد استفاده نیز با توجه به آن که مدل‌سازی به صورت سه بعدی انجام می‌شود المان‌های تماسی Conta174 و Targe170 هستند. برای شبیه‌سازی تماس میان ورق انتهایی و بال ستون، از بخش تماس سطح به سطح و برای شبیه‌سازی تماس میان پیچ و مهره‌ها و ورق



الف) مدل اجزا محدود



ب) مدل آزمایشگاهی



تعداد چرخه‌های بارگذاری	زاویه تغییر مکان نسبی میان طبقه (θ)	گام بارگذاری
۶	۰/۰۰۳۷۵	۱
۶	۰/۰۰۰۵	۲
۶	۰/۰۰۷۵	۳
۴	۰/۰۱	۴
۲	۰/۰۱۵	۵
۲	۰/۰۲	۶
۲	۰/۰۳	۷

شکل (۴): پروتکل بارگذاری [۱۰]

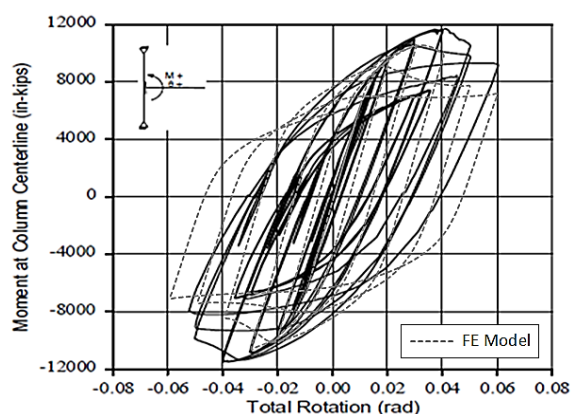
شکل (۶): تغییر شکل اتصال پس از بارگذاری

مدل اجزا محدود و مدل آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردار بوده و رفتار اتصال به صورت مناسبی شبیه سازی شده است. مفصل پلاستیک در فاصله تقریبی نصف عمق تیر از بر ستون تشکیل شده است که در فاصله مورد انتظار ایجاد مفصل پلاستیک طبق نتایج آزمایشگاهی است با توجه به شکل (۵) ماکزیمم ممان اتصال در مدل سازی در مقایسه با مقدار برداشت شده در آزمایشگاه حدود ۱۰/۱۷٪ خطا دارد. نوع المان انتخابی، اندازه مش بندی مربوط به المان‌ها و نوع مصالح اختصاص یافته در کنار نوع و تعداد گام‌های بارگذاری همگی از جمله عواملی است که می‌تواند در مشاهده اثر کماتش در مدل اجزا محدود اثرگذار باشد. در مجموع با توجه به تفاوت‌های موجود، میزان تقریبی ۱۰ درصد خطا در مقدار ممان ماکزیمم قابل قبول بوده و می‌توان از مدل اتصال در مراحل بعدی این تحقیق استفاده نمود.

۴- کاربرد پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار در اتصال ورق انتهایی

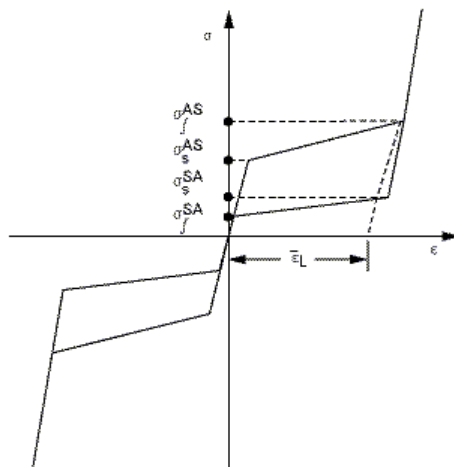
### ۲-۳- نتایج صحت سنجی اتصال

پس از مدل‌سازی اعضای اتصال و اعمال بارگذاری، تحلیل توسط نرم افزار انجام می‌شود. منحنی ممان-چرخش اتصال مدل‌سازی شده در مقایسه با منحنی ممان-چرخش آزمایشگاه در شکل (۵) نشان داده شده است. مقایسه تغییر شکل اتصال در مدل و آزمایشگاه و پس از پایان بارگذاری نیز در شکل (۶) به نمایش درآمده است.



شکل (۵): مقایسه منحنی ممان-چرخش مدل اتصال با نتیجه آزمایشگاهی

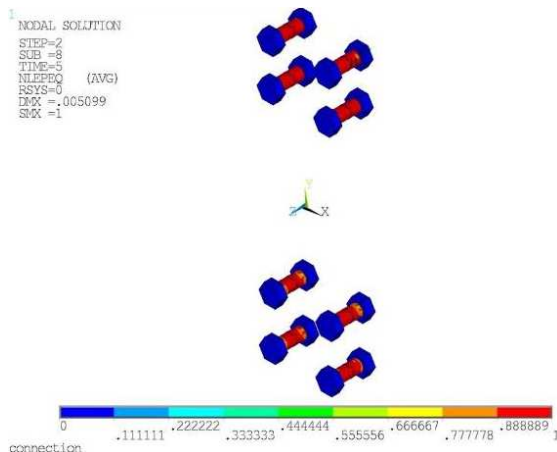




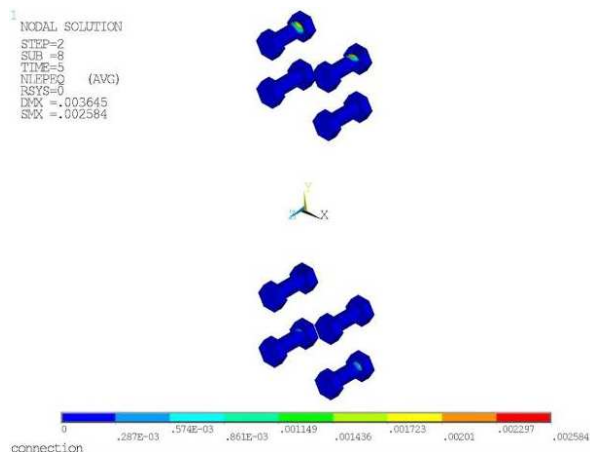
شکل (۷): مدل آریچیو به منظور مدل‌سازی ماده آلیاژ حافظه‌دار در نرم افزار Ansys

کرنش پلاستیک معادل و کرنش فون میسر پیچ‌های FeMnAlN در مقایسه با پیچ‌های فولادی در چرخش ۰/۰۲ در شکل (۸) نمایش داده شده است، همان طور که مشاهده می‌گردد، پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار وارد ناحیه غیرخطی شده و از حدود کرنش بازگشت‌پذیری خود نیز فراتر رفته‌اند که در نهایت منجر به گسیختگی پیچ در سیکل بعد خواهد شد. این در حالی است که تیر در هر دو حالت فولادی و آلیاژی در حالت الاستیک خود قرار دارد. تنش فون میسر موجود در چرخش ۰/۰۲ رادیان در پیچ‌های FeMnAlN از حدود ۴۰۰ مگاپاسکال (مقاومت نهایی آلیاژ) فراتر رفته و پیچ‌ها مقاومت خود را از دست داده‌اند. در صورتی که پیچ‌های فولادی تنشی در حدود ۸۰۰ مگاپاسکال را در این چرخش تجربه می‌کنند که فاصله زیادی تا تنش نهایی خود (حدود ۱۰۰۰ مگاپاسکال) دارند. این امر به دلیل نوع خرابی ترد اتصال مطلوب نبوده و در از لحاظ رفتار لرزه‌ای مورد تایید نیست.

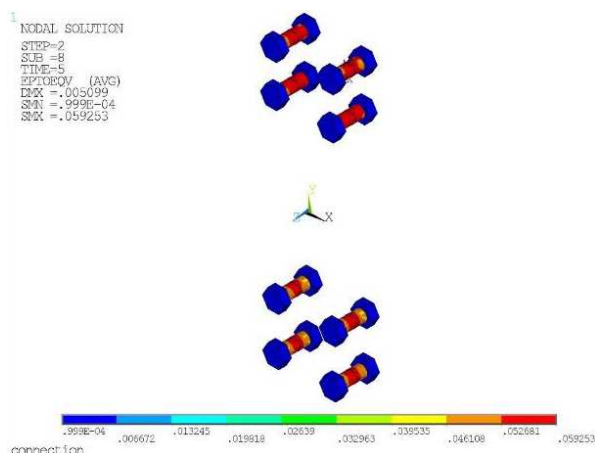
نرم افزار Ansys بر خلاف برخی از نرم افزارهای مشابه، مدل غیرخطی مستقلی برای تعریف مصالح آلیاژ حافظه‌دار دارد. نرم‌افزار Ansys قابلیت مدل‌سازی ماده آلیاژ حافظه‌دار را داشته و از مدل رفتاری آریچیو برای انتقال فاز آلیاژ حافظه‌دار استفاده می‌کند (شکل (۷)). اتصال ورق انتهایی حافظه‌دار 4E-1.25-1.5-24 مربوط به مطالعه Sumner [۹] که در بخش قبل صحت‌سنجی شد، در این قسمت مورد استفاده قرار می‌گیرد. به نحوی که پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار جایگزین پیچ‌های فولادی A490 می‌شوند. مابقی اعضای اتصال تغییری نکرده و به شکل قبل باقی خواهند ماند. بدین منظور در مدل اتصال پیشین، ماده جدیدی توسط مدل پیش‌فرض آلیاژ حافظه‌دار موجود در نرم‌افزار Ansys معرفی خواهد شد و پارامترهای مربوط به معرفی آلیاژ حافظه‌دار بر پایه آهن FeMnAlN بر اساس شکل (۷) با رفتار کششی و فشاری یکسان به نرم‌افزار معرفی می‌شود. به منظور ایجاد پیش‌تنیدگی در پیچ‌های آلیاژی نیز از همان المان معرفی شده psmesh استفاده شده است. اما با توجه به تفاوت تنش نهایی آلیاژ حافظه‌دار و فولاد مقدار نیروی پیش‌تنیدگی نیز متفاوت خواهد بود. پس از اعمال نیروی پیش‌تنیدگی، بارگذاری چرخه‌ای طبق پروتوکل مرجع [۱۰] به انتهای تیر وارد می‌شود.



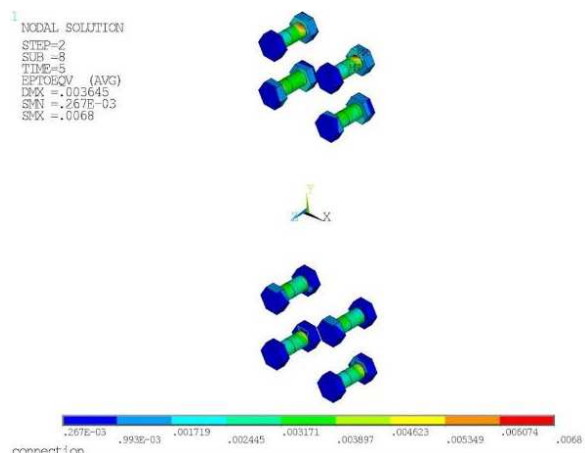
ب) کرنش پلاستیک پیچ‌های فولادی FeMnAlN



الف) کرنش پلاستیک پیچ‌های فولادی



د) کرنش فون میسر پیچ‌های فولادی FeMnAlN



ج) کرنش فون میسر پیچ‌های فولادی

شکل (۸): نمایش کرنش پلاستیک و فون میسر پیچ‌ها در چرخش ۰/۰۲

$$M_{uc} = 1.1 R_y F_y Z_x \quad (1)$$

$$M_{np} = 2\Phi F_t (\pi d_b^2 / 4) (h_0 + h_1) \quad (2)$$

با توجه به خصوصیات ذکر شده برای اتصال مورد انتظار تیر) و  $M_{uc}$  (ظرفیت ممان پلاستیک)  $4E-1.25-1.5-24$  (ممان مجموعه پیچ‌ها) همانند روابط (۱) و (۲) به ترتیب برابر  $11479/5$  Kips.in و  $12635/78$  Kips.in خواهد بود. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار ممان مجموعه پیچ‌ها بزرگ‌تر از ممان پلاستیک مورد انتظار تیر است، با توجه به آن‌که سایر ملزومات طراحی نیز رعایت شده‌اند، رفتار اتصال از نوع ورق ضخیم بوده و مود خرابی اتصال، کماتش موضعی بال‌ها و جان تیر است و گسیختگی پیچ‌ها در آن رخ

گسیختگی پیچ‌ها موجب می‌شود اتصال نتواند به ممان مورد انتظار اتصال که طبق رابطه (۱) که بر اساس مرجع [۱۵] به دست می‌آید دست پیدا کرده و حدود لازم مقاومت خمشی و همچنین حدود چرخش و شکل‌پذیری لازم را برای قاب‌های خمشی طبق مرجع [۱۶] را تامین کند. ممان مجموعه پیچ‌ها نیز بر اساس همین مرجع از رابطه (۲) به دست می‌آید. در رابطه (۱) پارامتر  $Z_x$  برابر مدول مقطع پلاستیک تیر،  $F_y$  برابر تنش تسلیم، ضریب  $R_y$  برابر نسبت مقاومت تسلیم مورد انتظار به حداقل مقاومت تسلیم تعیین شده است. این مقدار برای  $F_y = 50$  ksi برابر  $1/1$  است. در رابطه (۲) پارامتر  $F_t$  برابر تنش کششی پیچ، پارامترهای  $h_0$  و  $h_1$  فاصله مرکز بال فشاری تیر تا مرکز ردیف‌های پیچ و  $d_b$  نشان‌دهنده قطر پیچ موجود است.

تامین دررفت لازم اطمینان حاصل پیدا کرد. اگرچه تامین چنین طولی برای پیچ حدود شکل پذیری لازم را می‌تواند ارضا نماید اما هم‌چنان ممان مقاوم اتصال باید کوچکتر از ممان الاستیک تیر باشد تا تغییرشکل پلاستیک در تیر رخ ندهد.

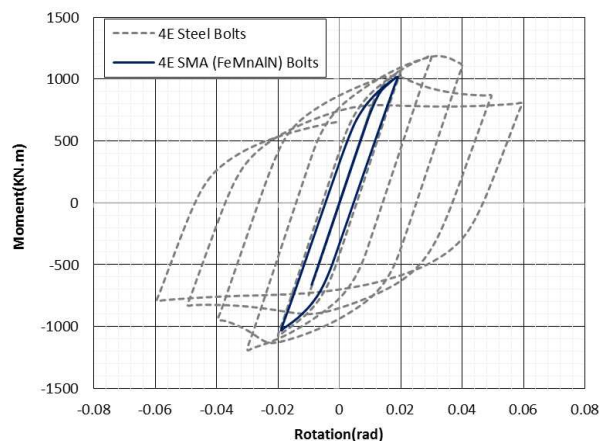
بنابراین در صورتی که از پیچ آلیاژ حافظه دار به منظور کاهش کرنش پسماند استفاده گردد، ممان مقاوم اتصال کاهش می‌یابد. تمامی تحقیقات که در بخش قبل عنوان شد، این کاهش ممان مقاوم را نسبت به اتصال فولادی مورد پذیرش آیین نامه ANSI/AISC 341-10 [۱۶] پذیرفته‌اند تا بازگشت پذیری اتصال فراهم شود. اما هدف از تحقیق حاضر آن است که با استفاده از آلیاژ حافظه دار بتوان بدون کاهش حدود شکل پذیری و ممان مقاوم و در کنار حفظ سختی اتصال، تغییرشکل‌های ماندگار را کاهش داد. از طرفی مکانیزم نهایی خرابی چنین اتصالی، گسیختگی پیچ‌ها خواهد بود که نوعی خرابی ترد است. بنابراین استفاده از پیچ‌های آلیاژ حافظه دار با حفظ هندسه موجود اتصال، بدین منظور مناسب نیست و ادامه مطالعات در راستای کاربرد دیگر آلیاژ حافظه دار در اتصال ورق انتهایی بررسی می‌گردد.

#### ۵- کاربرد ورق‌های آلیاژ حافظه دار در اتصال ورق انتهایی

هدف از مقاله حاضر آن است که با استفاده از آلیاژ حافظه دار بتوان بدون کاهش حدود شکل‌پذیری و ممان مقاوم، تغییرشکل‌های پسماند را کاهش داد. با توجه به نتایج بخش قبل، می‌بایست در موضعی از مصالح آلیاژ حافظه دار استفاده نمود که خاصیت منحصر به فرد آن نمایان شود. در این بخش با توجه به آن که عمده تغییرشکل‌های پسماند اتصال ورق انتهایی به علت رخداد مفصل پلاستیک در تیر به وجود می‌آید، کاربرد ورق‌های آلیاژ حافظه دار در ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در تیر بررسی می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل دیده شد، در صورتی که طراحی اتصال ورق انتهایی مطابق روند موجود در مرجع [۱۵] انجام شود، انتظار می‌رود مفصل پلاستیک در مینیمم دو مقدار

نمی‌دهد. تنش کششی کمتر پیچ FeMnAlN (۴۲/۶۷ ksi) موجب می‌شود مقاومت ممان مجموعه پیچ‌ها کمتر باشد. ممان مجموعه پیچ‌های FeMnAlN نه تنها از میزان ممان پلاستیک مورد انتظار تیر، بلکه از ممان الاستیک تیر متصل نیز کمتر است. در نتیجه این پیچ‌ها هستند که وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند.

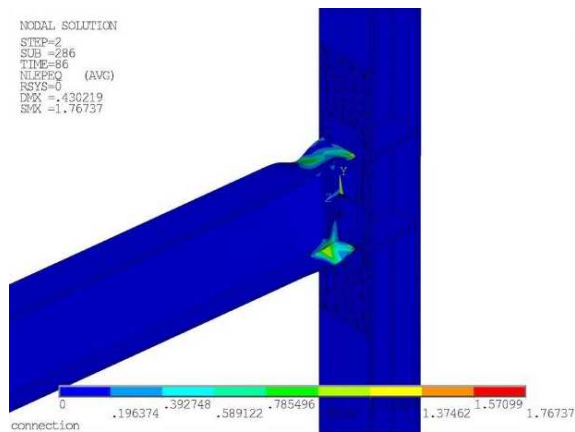
شکل (۹) نتایج بارگذاری چرخه‌ای اتصال با پیچ‌های FeMnAlN را با اتصال با پیچ‌های فولادی مقایسه می‌کند. خطوط خط چین نمایانگر اتصال با پیچ‌های فولادی و خطوط صاف نمایانگر اتصال با پیچ‌های FeMnAlN می‌باشد. در چرخش ۰/۰۲ رادیان، کرنش به وجود آمده در پیچ‌ها از حد کرنش بازگشت‌پذیری آلیاژ عبور می‌کند، بنابراین کارایی اتصال به همین میزان دررفت محدود شده است و اتصال شکل‌پذیری لازم را تامین نمی‌کند. با توجه به عدم عملکرد مناسب پیچ‌ها، اتصال نمی‌تواند حدود لازم معرفی شده در آیین‌نامه [۱۶] برای قاب‌های خمشی متوسط و ویژه، را رعایت نماید.



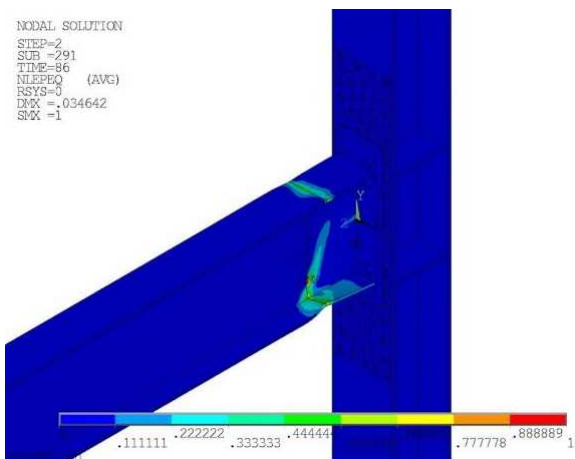
شکل (۹): منحنی ممان-چرخش اتصال با پیچ‌های فولادی در مقایسه با پیچ‌های FeMnAlN

نتایج نشان می‌دهند به علت تقاضای بالای کرنش، طول پیچ‌ها برای شرایط موجود پاسخگو نیست و برای آن که اتصال بتواند حدود لازم را با توجه به مرجع [۱۶] رعایت نماید، طول پیچ‌های آلیاژی FeMnAlN می‌بایست چندین برابر حالت فعلی باشد. با فراهم کردن این طول برای پیچ‌ها با استفاده از واشرهای بلند و یا غلاف می‌توان از حدود

کاهش بارز تغییرشکل‌های ماندگار اتصال به خصوص در نواحی تشکیل مفصل پلاستیک دارد. بخشی از تیر در ناحیه تغییر مصالح دچار کرنش بیشتری نسبت به سایر نواحی شده است که به نظر می‌رسد به علت تغییر مصالح و تمرکز تنش در این نواحی باشد.



الف) فولادی (4E-1.25-1.5-24)

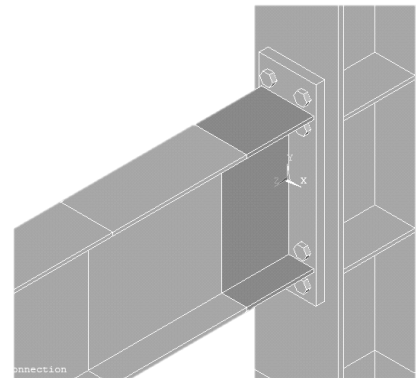


ب) هیبریدی (4E-30cm-SMA)

شکل (۱۱): کرنش پلاستیک معادل اتصال فولادی و هیبریدی

مقادیر کرنش در اغلب نواحی از حدود مجاز خود (کرنش بازگشت‌پذیری) فراتر رفته و قابل قبول است. ناحیه بسیار کوچکی از آلیاژ نیز از حد کرنش بازگردانی ۵٪ فراتر رفته که با توجه به این‌که در محدوده جوش ورق‌ها قرار گرفته، مطلوب نیست. لازم به ذکر است که این ناحیه بسیار کوچک بوده و موجب خرابی نخواهد شد، اما می‌توان با استفاده از آلیاژی که کرنش بازگردانی بزرگتری دارد، این مساله را حل نمود. رخداد پدیده پلاستیک در تیر بر خلاف

$d/2$  و  $3b_f$  (سه برابر عرض بال و نصف عمق تیر) در اتصالات سخت‌نشده از بر ستون تشکیل شود. با توجه به نتایج بخش ۳ طول تشکیل مفصل پلاستیک حدوداً ۳۰ سانتی متر بوده و در این طول از بر ستون، ورق آلیاژ جایگزین بال‌ها و جان تیر می‌گردد (شکل (۱۰)).



شکل (۱۰): کاربرد ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار FeMnAlN

در ناحیه نشان داده شده در تیر

در این اتصال بخشی از تیر با ورق آلیاژ حافظه‌دار جایگزین شده و سپس این ورق‌ها به مابقی تیر جوش می‌شوند. گرچه جوشکاری ورق‌های آلیاژی کمی مشکل است اما امروزه و با توجه به پیشرفت علوم مواد در این زمینه، مشکلات جوش این مصالح تا حدودی مرتفع شده است. ضخامت ورق‌ها دقیقاً برابر ضخامت بال و جان تیر متصل بوده و مابقی اعضای اتصال و همچنین مدل‌سازی آن‌ها (المان‌ها، تماس و...) کاملاً همانند اتصال مشابه فولادی در نظر گرفته می‌شود. برای مقایسه رفتار چرخه‌ای دو اتصال نیز از پروتکل بارگذاری SAC [۱۰] بر اساس شکل (۴) استفاده شده است. با توجه به تشابه اجزای اتصال و بارگذاری اعمالی، امکان مقایسه میان دو اتصال فراهم می‌شود. اتصال هیبریدی چهارپیچه سخت نشده که مجهز به ۳۰ سانتی متر ورق FeMnAlN در بال‌ها و جان تیر است، در این تحقیق با نام 4E-30cm-SMA شناخته می‌شود.

شکل (۱۱) نشان‌دهنده کرنش پلاستیک معادل در پایان تمامی چرخه‌های بارگذاری و پس از ۰/۰۶ رادیان در اتصال است که به خوبی نشان از بازگشت‌پذیری اتصال و

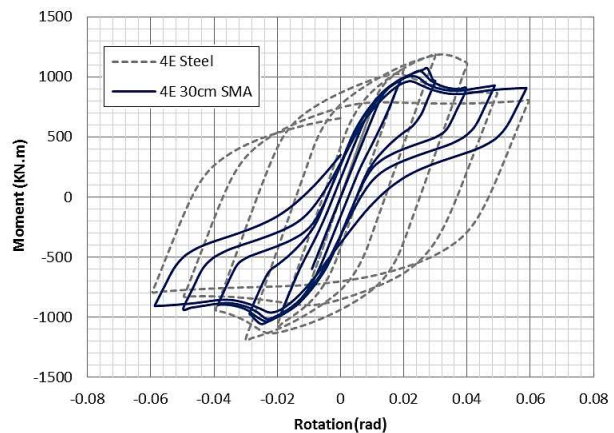
گسیختگی پیچ پدیده نامطلوبی نبوده و به دلیل مکانیزم خرابی نرم قابل قبول است و فقط بازگشت پذیری اتصال را کاهش می‌دهد. اتصال به خوبی توانسته است تا انتهای تمامی سیکل‌های بارگذاری رفتار مناسبی را نشان داده و تغییرشکل‌های پسماند را تا حدود چشمگیری کاهش دهد. در شکل (۱۲) رفتار چرخه‌ای اتصال در قالب منحنی ممان-چرخش اتصال با اتصال فولادی مشابه مقایسه شده است. رفتار چرخه‌ای اتصال 4E-30cm-SMA همانند اتصال فولادی 4E-1.25-1.5-24 کاملاً شکل‌پذیر بوده و سیکل‌های پایداری تا چرخش ۰/۰۶ رادیان دارد و بر اساس ضوابط آیین نامه ANSI/AISC 341-10 [۱۶] می‌تواند حدود چرخش مورد نیاز برای قاب‌های خمشی را فراهم آورد. ممان ماکزیمم در اتصال هیبریدی در مقایسه با اتصال فولادی، کاهش برابر ۹/۸۵٪ را نشان می‌دهد. کاهش ممان مقاوم ماکزیمم می‌تواند به علت مقادیر کمتر تنش تسلیم مصالح آلیاژ حافظه‌دار (۳۲۰ مگاپاسکال) در مقایسه با تنش تسلیم فولاد (۳۶۵ مگاپاسکال) باشد. شیب منحنی ممان-چرخش اتصال هیبریدی تقریباً برابر شیب منحنی در اتصال فولادی است، بدین معنا که سختی اتصال دچار تغییر و یا کاهش نشده است. بازگشت‌پذیری اتصال در منحنی ممان-چرخش کاملاً مشهود است. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، چرخش پسماند اتصال هیبریدی برابر ۰/۰۱۲ رادیان می‌باشد که بازگشت‌پذیری در حدود ۸۰٪ را نشان می‌دهد. بدین معنا که اتصال هیبریدی در صورت باربرداری در آخرین سیکل، ۸۰٪ چرخش به وجود آمده (۰/۰۶ رادیان) را بازیابی کرده و چرخش ماندگاری تنها در حدود ۰/۰۱۲ رادیان باقی می‌گذارد. این در حالی است که نمودار نشان می‌دهد مصالح فولاد در اتصال تنها ۲۳/۳۳٪ قابلیت بازیابی کرنش را دارد. بنابراین با توجه به محاسبات می‌توان گفت کاربرد ۳۰ سانتی‌متر از ورق مصالح آلیاژ حافظه‌دار FeMnAlN در ابتدای تیر در اتصال 4E-1.25-1.5-24 می‌تواند چرخش پسماند را نسبت به اتصال فولادی در حدود ۷۴٪ کاهش دهد.

استفاده از ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار بدین معنا نیست که در اتصال تغییرشکلی به وجود نمی‌آید بلکه تغییرشکل‌های ناشی از بارگذاری اعمالی همانند تغییرشکل‌ها در اتصال فولادی رخ می‌دهند اما به علت ویژگی مصالح آلیاژ حافظه‌دار اغلب تغییرشکل‌های به وجود آمده بازیابی می‌شوند. ایجاد این تغییرشکل‌های بزرگ در اتصال موجب کاهش ممان مقاوم اتصال پس از دستیابی به ممان پلاستیک مورد انتظار تیر و در هر چرخه بزرگ بارگذاری است. بنابراین بعد از دستیابی به ممان پلاستیک مورد انتظار در تیر به علت رخداد تغییرشکل‌های بزرگ در چرخش‌های بالا، کماتش موضعی بال و جان رخ داده و سپس ممان مقاوم شروع به کاهش می‌کند. بنابراین کاهش ممان مقاوم اتصال پس از دستیابی به ممان پلاستیک مورد انتظار ناشی از کماتش موضعی بال و جان بوده و به همین علت در هر دو اتصال مشاهده می‌گردد.

تغییرشکل‌های پسماند به وجود آمده پس از تشکیل مفصل پلاستیک و پس از چرخه بارگذاری ۰/۰۳ رادیان در اتصال 4E-1.25-1.5-24 باعث می‌شود اتصال نتواند در چرخه‌های بعدی ممان مقاومی در حدود ممان ماکزیمم خود ( $M_{uc}$ ) را نشان دهد و در چرخه‌های بعد ممان مقاوم ماکزیمم آن سیکل به مراتب کمتر از چرخه‌های قبلی می‌باشد. این در حالی است که مقادیر زیادی از تغییرشکل‌های به وجود آمده ناشی از بارگذاری در حین باربرداری در اتصال 4E-30cm-SMA از بین می‌رود و به همین دلیل با توجه به شکل (۱۲)، اتصال موجود حتی در چرخه‌های بالا نیز می‌تواند ممان ماکزیمم مقاومی در حدود ممان ماکزیمم اتصال را تجربه کند.

یکی دیگر از موارد قابل توجه در منحنی ممان-چرخش اتصال کاهش انرژی تلف شده در اتصال 4E-30cm-SMA نسبت به اتصال 4E-1.25-1.5-24 است. میزان انرژی تلف شده توسط مساحت محصور در چرخه‌های هیستریزس منحنی ممان-چرخش به دست می‌آید. بازگشت‌پذیری اتصال 4E-30cm-SMA موجب شده تا سطح محصور در حلقه‌های هیستریزس اتصال به میزان ۵۳/۸۲٪ کاهش یابد.

به طور کلی سیستم‌های بازگشت پذیر نسبت به سیستم‌های تسلیم شونده اتلاف انرژی کمتری دارند.



شکل (۱۲): مقایسه منحنی ممان چرخش اتصال فولادی 4E-1.25-1.5-24 و اتصال هیبریدی 4E-30cm-SMA

زود هنگام پیچ‌ها، شکل پذیری و ممان مقاوم بسیار کمتری نسبت به اتصال هیبریدی مجهز به ورق‌های آلیاژی دارد. این در حالی است که نتایج تحقیق نشان می‌دهد در صورتی که از ورق‌های آلیاژی در محل تشکیل مفصل پلاستیک در تیر استفاده گردد نیازی به پذیرش کاهش چشمگیر ممان مقاوم اتصال نسبت به اتصال فولادی مشابه نیست و می‌توان به ممان مقاوم ماکزیمی در حدود ممان پلاستیک مورد انتظار تیر دست یافت و از ظرفیت تیر متصل نیز بهره برد. بنابراین در عین حفظ رفتار مناسب اتصال ورق انتهایی، تغییر شکل‌های پسماند اتصال را نیز می‌توان کاهش داد.

از طرفی مکانیزم خرابی اتصال هیبریدی مجهز به ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار همانند اتصال ورق انتهایی فولادی بوده و بر خلاف مکانیزم خرابی ترد اتصال هیبریدی مجهز به پیچ‌های آلیاژی، نوع مکانیزم خرابی، مکانیزم خرابی نرم کماتش موضعی بال و جان است که از لحاظ عملکرد لرزه‌ای مطلوب شناخته می‌شود. با استفاده از ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار در اتصال ورق انتهایی و در ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک می‌توان به اهداف تحقیق حاضر که همانا کاهش تغییر شکل‌های ماندگار در کنار حفظ شکل پذیری، مقاومت خمشی و سختی اتصال است، دست یافت. بنابراین اتصال هیبریدی مجهز به ورق‌های آلیاژ حافظه‌دار نه تنها عملکرد مناسب‌تری نسبت به اتصال هیبریدی مجهز به پیچ‌های آلیاژی دارد، بلکه با توجه به حفظ حدود و ضوابط آیین نامه ANSI/AISC341-10 [۱۶] می‌توان این اتصال را به عنوان اتصالی مناسب برای قاب‌های خمشی متوسط و ویژه نیز معرفی نمود.

#### ۷- واژه‌نامه

Passive control	کنترل غیرفعال
Shape memory alloy (SMA)	آلیاژهای حافظه‌دار
Partially restrained	اتصالی نیمه‌گیردار
Hysteresis	هیسترزیس
End Plate	ورق انتهایی

حداقل ممان مقاوم اتصال در سیکل‌های ۰/۰۲ و ۰/۰۴ رادیان به ترتیب برابر ۹۲/۸۶٪ و ۸۴/۳۱٪ حداکثر ممان مقاوم اتصال می‌باشد. بنابراین از آن جایی که حداکثر ممان مقاوم اتصال از ممان پلاستیک اسمی تیر نیز بزرگ‌تر است، می‌توان گفت اتصال 4E-30cm-SMA می‌تواند حدود ممان مقاوم ANSI/AISC341-10 [۱۶] برای اتصالات تیر به ستون را که برابر  $0.8M_p$  است را نیز داشته و با توجه به رفتار شکل پذیر خود برای قاب‌های خمشی متوسط و ویژه مناسب تلقی شود. با توجه به **Error! Reference source not found.** پر واضح است که اتصال 4E-1.25-1.5-24 نیز محدوده ممان مقاوم ذکر شده را رعایت می‌کند، به طور مثال حداقل ممان مقاوم در چرخه ۰/۰۶ رادیان برابر  $1100 \text{ kN.m}$  است که برابر ۹۲/۶۲٪ حداکثر ممان مقاوم بوده و بنابراین بزرگتر از مقدار  $0.8M_p$  ذکر شده در مرجع [۱۶] نیز هست. نتایج نشان می‌دهند که هر دو اتصال به خوبی توانسته‌اند حدود لرزه‌ای لازم برای اتصالات تیر به ستون قاب‌های خمشی را برآورده سازند.

#### ۶- نتیجه‌گیری

اتصال هیبریدی مجهز به پیچ‌های آلیاژی با طول مشابه پیچ‌های فولادی به علت گسیختگی و پلاستیک شدن



Connections”, Nonlinear Dynamics, Vol. 65, No. 4, pp. 433-455.

[۷] فرمائی، م. و قاسمیه، م. (۱۳۹۲)، “اتصالات ورق انتهایی دارای مواد هوشمند”، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

[8] Moradi, S. and Alam, S. (2014), “Feasibility Study of Utilizing Superelastic Shape Memory Alloy Plates in Steel Beam-Column Connections for Improved Seismic Performance”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, pp. 1-13.

[9] Sumner, E. (2003), “Unified Design of Extended End-Plate Moment Connections subject to Cyclic Loading”, Dissertation submitted to the faculty of the virginia polytechnic institute and state university in partial fulfillment of requirements for the degree of Doctor of philosophy.

[10] SAC. (1997), “Protocol for Fabrication, Inspection, Testing and Documentation of Beam-Column Connection Tests and other Experimental Specimens”, SAC/BD-97/02, SAC Joint Venture.

[11] Fugazza, D. (2003), “Shape-Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Behavior and Numerical Simulations”, Master's Thesis, University of Pavia, Italy.

[12] Song, G., Ma, N. and Li, H. (2006), “Applications of Shape Memory Alloys in Civil Structures”, Engineering structures, Vol. 28, No. 9, pp. 1266-1274.

[13] ANSI/AISC 358-10. (2010), “Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications”, American Institute of Steel Construction.

[14] ANSI/AISC 360-10. (2010), “Specification for Structural Steel Buildings”, American Institute of Steel Construction.

[15] Steel Design Guide 4. (2004), “Extended End-Plate Moment Connections Seismic and Wind Applications”, Second Edition. American Institute of Steel Construction (AISC).

[16] ANSI/AISC 341-10. (2010), “Seismic Provision for Structural Steel Buildings”, American Institute of Steel Construction.

Extensive nonlinear dynamic analysis	آنالیز دینامیکی غیرخطی افزایشی
Superelasticity (SE)	فوق ارتجاعی
Austenite	آستنیت
Martensite	مارتنزیت
Active	فعال
Semi active	نیمه فعال
Passive	غیرفعال
Contact	تماس
Meshing	مش بندی
American Institute of Steel Construction (AISC)	انجمن سازه‌های فولادی آمریکا
Four bolt unstiffened (4E)	چهار پیچ‌ه سخت نشده
Four bolt stiffened (4ES)	چهار پیچ‌ه سخت شده
Eight bolt stiffened (8ES)	هشت پیچ‌ه سخت شده
Thick plate	ورق ضخیم
Plastic hinge	مفصل پلاستیک
Pretension	پیش‌تندگی
Auricchio	آریچیو

#### ۸- مراجع

[1] Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R.T., Hes, W., Krumme, R., Hayes, J.R. and Sweeney, S. (2004), “Steel Beam-Column Connection using Shape Memory Alloys”, structural Engineering, Vol. 130, No. 5, pp. 732-740.

[2] Ma, H., Wilkinson, T. and Cho, C. (2007), “Feasibility Study on a Self-Centering Beam-to-Column Connection by using the Superelastic Behavior of SMAs”, Smart Material and Structures, Vol. 16, No. 5, pp. 1555-1563.

[3] Ma, H. and Yam, M. (2012), “Experimental Study on a Beam-to-Column Connection using Shape Memory Alloy”, Advanced Material Research, Vol. 374, pp. 2176-2179.

[4] Rofooei, F. and Farhidzade, A. (2011), “Investigation on the Seismic Behavior of Steel MRF with Shape Memory Alloy Equipped Connections”, Procedia Engineering, Vol. 14, pp. 3325-3330.

[5] Hu, J., and Hwang, W. (2013), “Design and Behavior of Recentering Beam-to-CFT Column Connections with Super-Elastic Shape Memory Alloy Fasteners”, International Journal of Steel Structures, Vol. 13, No. 1, pp. 55-69.

[6] Hu, J. and Leon, R. (2011), “Analyses and Evaluations for Composite-Moment Frames with SMA PR-CFT