

بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات ورق انتهایی دارای مواد حافظه‌دار شکلی پایه آهن

سعید نظری^۱، مهدی قاسمیه^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳۱۲-۱۱۱۵۵، m.ghassemieh@ut.ac.ir

چکیده

در زلزله ۱۹۹۴ نورثریج و ۱۹۹۵ کوبه، تعداد زیادی از قاب‌های خمشی جوشی مرسوم، متحمل شکست ترد در محل اتصال تیر به ستون شدند. پژوهشگران دریافته‌اند که شکل‌پذیری اجزاء سیستم‌های سازه‌ای، در مهار انرژی ناشی از بارهای دینامیکی و به‌ویژه بارهای زلزله و انفجار، بسیار موثر می‌باشند. در سال‌های اخیر، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه آهن (Fe-based SMA ها)، که دارای دو ویژگی مهم خاصیت فوق‌ارتجاعی و رفتار حافظه‌شکلی می‌باشند، برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پژوهش به ارزیابی قابلیت اتلاف انرژی و دیگر خصوصیات اتصالات خمشی با ورق انتهایی گسترش‌یافته و دارای پیچ‌هایی از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی سوپرالاستیک پایه آهنی می‌پردازد. مدل‌های سه‌بعدی اتصال، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS ساخته شده‌اند. با اعمال بارهای چرخه‌ای به انتهای تیر اتصال، رفتار آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش دو نوع اتصال ورق انتهایی چهارپیچی، یکی با رفتار صفحه ضخیم و دیگری با رفتار صفحه نازک، مدل‌سازی شده است و در مورد هرکدام، رفتار اتصال با استفاده از مصالح حافظه‌دار شکلی و بدون آنها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. استفاده از این مصالح در مورد اتصال با رفتار صفحه ضخیم باعث افزایش شکل‌پذیری اتصال به میزان ۳۵ درصد شده است و اتصال ۹۳ درصد تغییرشکل ایجادشده را جبران کرده و به حالت اولیه بازگشته است. در اتصال با رفتار صفحه نازک افزایش شکل‌پذیری اتصال ۵۴ درصد بوده و ۸۵ درصد دوران تحمل‌شده نیز به حالت اولیه بازگشته است.

واژگان کلیدی

اتصال ورق انتهایی، مواد حافظه‌دار پایه آهن، سوپرالاستیک

Investigation of Seismic Behavior of End Plate Moment Connections with Iron-Based Shape Memory Alloys

S. Nazari, M. Ghassemieh

Abstract

In the 1994 Northridge and 1995 Kobe earthquakes, a large number of conventional bending frames suffered brittle fractures at the beam-to-column joint. Researchers have found that structural components of structural systems are very effective in controlling the energy caused by dynamic loads, especially earthquake and explosion loads. In recent years, Iron-based shape memory alloys, which have two important properties of superelasticity and shape memory behavior, have been used to improve the seismic performance of structural systems. This study investigates the energy dissipation capability and other properties of moment connection with expanded end-plate and bolts made of super-elastic ferrous based memory alloys. The 3D connectivity models are built using ABAQUS finite element software. By applying cyclic loads to the end of the beam, its behavior has been studied. In this research, two types of four-bolt connections, one with the behavior of a thick plate and the other with the behavior of a thin plate, have been modeled, and in each case, the connection behavior with and without the use of shape memory materials has been evaluated and compared. The use of these materials in connection with thick plate behavior has increased the ductility of the connection by 35%, and the connection has compensated 93% of the deformation and returned to its original state. In connection with thin plate behavior, the increase in ductility of the connection is 54% and 85% of the endured deformation has returned to the initial state.

Keywords

End plate connection, Fe-based shape memory alloys, Superelastic

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۵

به طور کلی، هنگامی که یک سازه در معرض زلزله یا امواج ناشی از انفجار قرار می‌گیرد، ضروری است که محتوای انرژی تحمیل شده به سازه، از طریق مسیرها و فرآیندهای مشخص و دارای ظرفیت جذب انرژی کافی، به شیوه ایمن و با کمترین خسارت ممکن مستهلک گردد. امروزه، سیستم‌های مستهلک کننده انرژی به صورت‌های مختلفی مانند سیستم‌های ویسکوز، ویسکوالاستیک، الاستوپلاستیک هیستریزیس و اصطکاکی، در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از سیستم مهاربندی مجهز به عضو لوزی شکل یا دایره‌ای شکل از جمله مواردی می‌باشد که توسط Pachide و همکاران [۱ و ۲] و نیز Kheiroddin و همکاران [۳] به منظور مستهلک کردن انرژی بارهای لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شمس و قبادی [۴] یک سیستم ترکیبی از میراگرهای مختلف به منظور مستهلک کردن انرژی و کاهش دریافت سازه ارائه دادند. Salehi و Ghobadi [۵] رفتار ارتجاعی ساختمان‌های دارای میراگر ترکیبی در پای ستون‌ها در دهانه‌های مهاربندی را مورد بررسی قرار دادند.

در زلزله‌های سال ۱۹۹۴ نورتریج و ۱۹۹۵ کوبه، مشاهدات میدانی حاکی از وقوع خرابی‌های متعدد در قاب‌های خمشی جوشی، در محل اتصال تیر به ستون بودند. خرابی‌های مشاهده شده، اغلب به علت وقوع شکست ترد در محل جوش بال تیر به ستون و یا در ناحیه‌های حرارت دیده شده در اثر جوشکاری بودند.

پس از آن مطالعات زیادی بر روی اتصالات خمشی به منظور یافتن راه‌کارهایی برای رفع مشکلات آن‌ها انجام گرفت. اساس کلیه راه‌حل‌های پیشنهادی حاصل از این پژوهش‌ها، بر دور کردن تخریب و شکنندگی از محل اتصال و ایجاد مفاصل پلاستیک در تیر و با فاصله‌ای از وجه ستون می‌باشد. وقوع این تغییرشکل‌های پلاستیک، با توجه به این که برگشت‌ناپذیر می‌باشند، مشکلات و هزینه‌های زیادی را در بازسازی پس از زلزله به وجود می‌آورد. بنابراین در صورتی که اجزای سازه قابلیت بازبازی شکل اولیه خود پس از تحمل تغییرشکل‌های زیاد را داشته باشند، پتانسیل استفاده در طراحی‌های مقاوم در برابر زلزله را خواهند داشت و می‌توانند از خسارات و هزینه‌های ایجاد شده در اثر زلزله بکاهند.

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که دارای دو ویژگی بارز حافظه‌دار بودن و رفتار فوق‌الاستیک هستند، از جمله مصالح هوشمندی می‌باشند که هم توانایی میرا کردن انرژی وارد بر سازه در حین زلزله را دارند و هم می‌توانند کرنش‌های بزرگی بپذیرند که در هنگام باربرداری قابل بازگشت می‌باشند. این مواد می‌توانند مشکلات و محدودیت‌های سیستم ذکر شده را تا حد بسیار زیادی برطرف کنند و علاوه بر مستهلک کردن انرژی زلزله، خسارت‌های ناشی از زلزله بر روی سازه را نیز کاهش دهند.

در سال‌های اخیر، مطالعاتی در رابطه با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سازه‌ها به عنوان میراگر، مهاربند و اجزای اتصالات به منظور کنترل غیرفعال سازه‌ها انجام شده است. Gholhaki و همکاران [۶] اثر آلیاژهای حافظه‌دار را در رفتار دیوارهای برشی فولادی بررسی کردند. Roshanfekr-rad و همکاران [۷] به بررسی احتمالاتی فروریزش ساختمان‌های دارای مواد حافظه‌دار پرداختند. این آلیاژها در حالت رفتار فوق‌ارتجاعی می‌توانند کرنش‌های تا حدود ۱۰٪ را بدون بر جای گذاشتن کرنش پسماند تحمل کنند. قابلیت استهلاک انرژی مناسب، باقی نگذاشتن کرنش پسماند (رفتار فوق‌ارتجاعی)، مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، عمر مفید بالا، سخت‌شدگی نهایی در تغییرشکل‌های زیاد، عدم نیاز به نگهداری، امکان حذف کرنش پسماند به کمک اعمال دما (رفتار حافظه‌شکلی) و امکان ساخت مواد با خصوصیات مورد تقاضا، همگی از قابلیت‌هایی بوده که این آلیاژها را به موادی مطلوب برای کاربرد در میراگرها و سیستم‌های جدا کننده تبدیل کرده‌اند. امروزه، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر پایه آهن به دلیل دارا بودن پتانسیل زیاد برای کاربرد در سازه‌ها، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. داشتن سختی بیشتر، هیستریزیس گرمایی بزرگ‌تر و هزینه کمتر تولید Fe-SMA نسبت به Ni-Ti، باعث برتری این آلیاژ در زمینه ساخت وساز گردیده است. این کاهش هزینه، هم به دلیل استفاده بیشتر از آهن در ترکیب آلیاژ و هم به دلیل امکان تولید این مواد در شرایط کارخانه‌ای معمول می‌باشد. Fe-SMA همچنین دارای مقاومت خوردگی مناسب، قابلیت کارپذیری کافی و جوش‌پذیری مناسب می‌باشد.

دسته اول آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، Fe-Mn-Si ها می‌باشند. این آلیاژ در دمای اتاق سوپرالاستیک نیست و از اثر حافظه‌شکلی آن برای پیش‌تندگی سازه‌ها استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از این آلیاژ، به منظور مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی و بتنی، گسترش یافته است. دسته دوم آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه آهن، آلیاژهایی هستند که در دمای اتاق سوپرالاستیک عمل کرده و می‌توان از این خاصیت آن‌ها در سازه بهره برد. امروزه، انواعی از Fe-SMA با خاصیت فوق الاستیک نظیر Fe-36Mn- و Fe-29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B و 8Al-8.6Ni [۸ و ۹] تولید شده‌اند. مشخصات مکانیکی 29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B توسط Tanaka و همکاران [۱۰] و مشخصات مکانیکی Fe-36Mn-8Al-8.6Ni توسط Omori و همکاران [۱۱] تعیین گردید. مشخصات مکانیکی این مصالح در جدول (۱) و نیز منحنی تنش کرنش مواد حافظه‌دار در شکل (۱) آمده است. همچنین طبق برآورد، بر اساس میزان عناصر موجود در این آلیاژها، قیمت این آلیاژها حدوداً بین ۸ تا ۱۲ برابر قیمت پیچ‌های فولادی می‌باشد.

تحقیقات زیادی بر روی اتصالات خمشی در حالت ورق انتهایی گسترش‌یافته و همچنین هم‌تراز، صورت گرفته است و رفتار این اتصالات، در نرم‌افزارهای اجزاء محدود بررسی شده است [۱۲-۱۴]. و همچنین در سال‌های اخیر، رفتار این اتصالات تحت ترکیب‌بارهای مختلف (خمشی، محوری و پیچشی)، مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۵-۱۷]. Motahari و همکاران [۱۸] به کمک روش‌های تحلیلی و استفاده از مدل رفتاری پیشنهادی، امکان استفاده از حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دار شکلی را در میراگر پیشنهادی با رفتار بهینه بررسی کردند. Ma و همکاران [۱۹] با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار ANSYS، رفتار یک اتصال تیر به ستون سخت‌شده دارای پیچ‌های SMA را بررسی کردند. آن‌ها رفتار اتصال را تحت بارهای چرخه‌ای اعمال‌شده به انتهای تیر مورد بررسی قرار دادند. Kari و همکاران [۲۰] به بررسی اثر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیتینول در بادبندهای سازه پرداختند و اثر استفاده همزمان بادبندهای SMA و بادبندهای معمولی با جایگزینی مناسب را در کاهش جابه‌جایی ماندگار و همچنین کاهش تغییر مکان جانبی طبقات بررسی کردند. Ghassemieh و همکاران [۲۱] با مدل‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS اثر استفاده از SMA را در دیواربرشی معمولی و

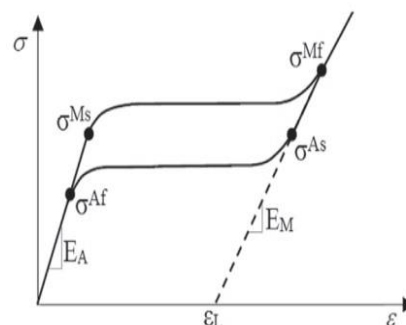
کویل بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نیتینول در میلگردهای دیوار به طور چشمگیری باعث کاهش جابه‌جایی می‌گردد. علاوه بر آن، خیز حداکثر دیوار برشی کوپل را کاهش می‌دهد. Ghassemieh و Kargar [۲۲] مواد حافظه‌دار را در قاب‌های خمشی با انواع مختلف سیستم‌های مهاربندی به کار بردند و به مقایسه پاسخ ضریب اصلاح ساختمان‌های فولادی پرداختند. Moradi و Alam [۲۳] یک اتصال تیر به ستون صلب گیردار را در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی کردند و سعی نمودند که با به کارگیری صفحاتی از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به بهبود رفتار این اتصال تحت بار چرخه‌ای بپردازند. نمودارهای هیستریزس اتصال را در حالت‌های مختلف ترسیم کردند و نتیجه گرفتند که این آلیاژ ظرفیت اتصال را افزایش داده، قابلیت بازگرداندگی خوبی دارد و همچنین شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی مناسبی را از خود نشان می‌دهد. در ضمن، آرایش مناسب آن مانع از ایجاد کماتش موضعی در بال تیر خواهد شد. Fang و همکاران [۲۴] با به‌کارگیری تاندون‌هایی از جنس آلیاژ نیتینول رفتار اتصال تیر I شکل به ستون دایروی را بررسی کردند. این تحقیق در دو مقاله یکی به صورت کار آزمایشگاهی و دیگری به صورت مدل‌سازی اجزاء محدود انجام گرفت. در این مقاله‌ها، شش اتصال با آرایش مختلف تاندون‌ها و طول‌های مختلف ساخته شد و قابلیت اتلاف انرژی، توانایی بازگرداندگی و همچنین آرایش بهینه تاندون‌ها به منظور دستیابی به حداکثر مقدار انرژی مستهلک‌شده مورد بررسی قرار گرفت. Farmani و Ghassemieh [۲۵] به ارزیابی رفتار سوپرالاستیک پیچ‌های SMA از جنس آلیاژ نیتینول و خاصیت بازگرداندگی پیچ‌ها در اتصالات ورق انتهایی گسترش‌یافته در نرم‌افزار ABAQUS پرداختند. Farmani و Ghassemieh [۲۶] اتصال تیر به ستون با تاندون‌های SMA به همراه ورق برشی و پین را مورد تحقیق قرار دادند. مدل‌های اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS ساخته شد و پارامترهای مختلف رفتار چرخه‌ای و میزان پیش‌تندگی لازم پیچ‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. Hedayati و Alam [۲۷] مصالح سوپرالاستیک Fe-29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B را بصورت کابل در الاستومرهای پل در مدل اجزاء محدود به کار بردند و اثر این آلیاژ را در کاهش کرنش برشی و افزایش انرژی مستهلک‌شده بررسی کردند. Izadi و همکاران [۲۸] با استفاده از آلیاژهای SMA پایه آهن سیستمی برای قوی‌تر



Chowdhury و همکاران [۲۹] اتصال تیر به ستون با کابل‌های پیش‌تنیده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این زمینه ۴ نوع آلیاژ مختلف SMA را بررسی کردند. همچنین کابل‌ها را در سه حالت کاملاً فولادی، قسمتی از کابل فولادی و کل کابل از جنس SMA مقایسه کردند.

در این پژوهش رفتار اتصالات ورق انتهایی دارای مواد حافظه‌دار شکلی پایه آهن بررسی می‌شود و سعی بر این است تا با طراحی اتصالات دارای این مواد، از تغییر شکل‌های پلاستیک سازه بعد از زلزله جلوگیری شود و میزان دوران باقی‌مانده در سازه کمترین مقدار باشد. پارامترهای مختلف مربوط به اتصال بررسی می‌گردد و در هر مورد با اتصال فولادی مقایسه می‌شود. برای این منظور، دو اتصال یکی با رفتار صفحه ضخیم و دیگری با رفتار صفحه نازک در نظر گرفته شده است.

کردن ورق‌های فولادی ارائه کردند. در این پژوهش با استفاده از خاصیت حافظه‌شکلی آلیاژهای SMA پایه آهن دمای نوار متصل به صفحه فولادی افزایش داده شد و سپس به منظور پیش‌تنیدگی، دما کاهش می‌یافت. این کار باعث ایجاد تنش فشاری در ورق فولادی می‌گشت.



شکل ۱- منحنی تنش- کرنش مواد حافظه‌دار شکلی [۸]

جدول ۱- مشخصات مکانیکی انواع مواد حافظه دار شکلی [۸]

واحد	FeMn AlNi	FeNiCo AlTaB	NiTi	تعریف	کمیت
GPa	۹۸	۵۰	۶۰	مدول الاستیسیته آستنیت	E_A
GPa	۶۰	۳۳	۳۰	مدول الاستیسیته مارتنزیت	E_M
MPa	۳۲۰	۷۵۱	۳۷۵	تنش آغاز تبدیل آستنیت به مارتنزیت	σ_s^{AS}
MPa	۴۰۰	۹۸۶	۴۳۰	تنش پایان تبدیل آستنیت به مارتنزیت	σ_f^{AS}
MPa	۲۱۰	۲۸۶	۲۰۸	تنش آغاز تبدیل معکوس مارتنزیت به آستنیت	σ_s^{SA}
MPa	۹۰	۱۹۸	۱۳۸	تنش پایان تبدیل معکوس مارتنزیت به آستنیت	σ_f^{SA}
-	۰٫۰۵	۰٫۱۳	۰٫۰۹	بیشترین کرنش برگشت پذیر	ϵ_L

(۲) ارائه شده است. مشخصات هندسی مدل اجزاء محدود ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS در شکل (۳) و جدول (۳) ارائه شده است. در شکل (۴) مدل تغییر شکل یافته نمونه آزمایشگاهی در کنار مدل تغییر شکل یافته اجزاء محدود نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل توزیع تنش فون میسز مشخص است، قبل از این که تیر تسلیم شود، پیچ‌ها تسلیم شده‌اند. در شکل (۴) منحنی لنگر-دوران اتصال ارائه شده است. مطابق جدول (۴) منحنی مدل اجزاء محدود تا حد قابل قبولی به منحنی آزمایشگاهی مدل نزدیک است.

۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی رفتار مواد حافظه‌دار شکلی و نیز نحوه عملکرد این مواد، مدل SMA-D10-290 Fang انتخاب شده است. Fang و همکاران [۳۰] هفت مدل مختلف اتصال تیر به ستون با ورق انتهایی گسترش یافته به همراه پیچ‌هایی از جنس آلیاژ نیتینول را مورد آزمایش قرار دادند. به منظور اعتبارسنجی، از یکی از مدل‌های ساخته شده استفاده گردیده است و نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است. اتصال به نحوی طراحی شده است که ورق انتهایی، رفتار کاملاً صفحه ضخیم از خود نشان دهد و نیروی اهرمی به وجود نیاید. مشخصات مصالح مورد استفاده، در جدول (۲) و شکل

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح استفاده شده در مدل اعتبارسنجی [۳۰]

مقطع	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی (%)
تیر	۲۸۷/۵	۴۸۷/۴	۲۱۰/۱	۲۸/۳
ستون	۳۰۶/۱	۴۸۷/۴	۱۹۳/۳	۲۶
ورق انتهایی	۳۷۷/۵	۵۳۱/۲	۲۰۵/۶	۲۴/۹
سخت کننده	۲۸۷/۵	۴۵۲/۹	۲۱۰/۱	۲۸/۳

در نقاطی که قطعات مختلف اتصال با یکدیگر تماس دارند، میبایست نوع این تماس و مشخصات مکانیکی دو سطحی که با یکدیگر تماس دارند، در نرم افزار تعریف شود. تماس ها به صورت اصطکاکی با تعریف ضریب اصطکاک در نرم افزار ایجاد شده است. ضریب اصطکاک بین ورق انتهایی و ستون، ۰,۴۴ و بین سایر سطوح ۰,۳ تعریف شده است.

برای هر پیچ فولادی در سه ناحیه سطوح اندرکنش (تماس) در نظر گرفته شده است:

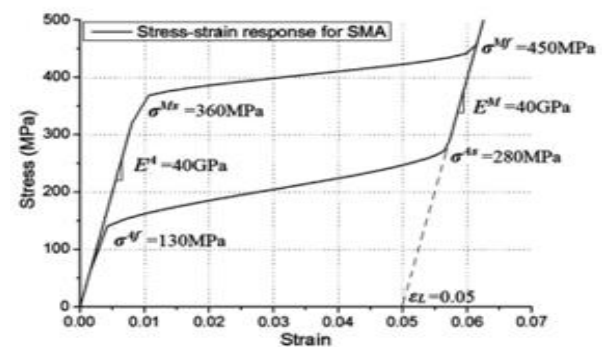
- بین سرپیچ و ورق انتهایی
- بین مهره و بال ستون
- بین بدنه پیچ و سوراخی که در ورق انتهایی و بال ستون ایجاد شده است.

در مورد پیچ های بلند SMA، با توجه به استفاده از واشر برای آنها، در پنج ناحیه سطوح اندرکنش (تماس) در نظر گرفته شده است:

- بین سرپیچ و سطح واشر
- بین مهره و سطح واشر
- بین ورق انتهایی و سطح واشر
- بین بال ستون و سطح واشر
- بین بدنه پیچ و سطوحی که در اثر ایجاد سوراخ در ورق انتهایی و بال ستون ایجاد شده اند.

علاوه بر موارد فوق، بین ورق انتهایی و بال ستون هم اندرکنش در نظر گرفته شده است.

به دلیل تقارن مدل ها نسبت به صفحه مرکزی گذرنده از جان تیر و جان ستون، تنها ساختن نیمی از مدل برای تحلیل اجزاء محدود در نرم افزار کافی است و روی صفحه تقارن، شرایط مرزی مربوط به تقارن اعمال می گردد که این کار موجب کاهش حجم محاسبات عددی و در نتیجه کاهش مدت زمان تحلیل می گردد. دو انتهای ستون نیز دارای شرایط تکیه گاهی مفصلی می باشند که این شرایط با بستن درجات آزادی روی خط مرکزی جان ستون حاصل شده است.

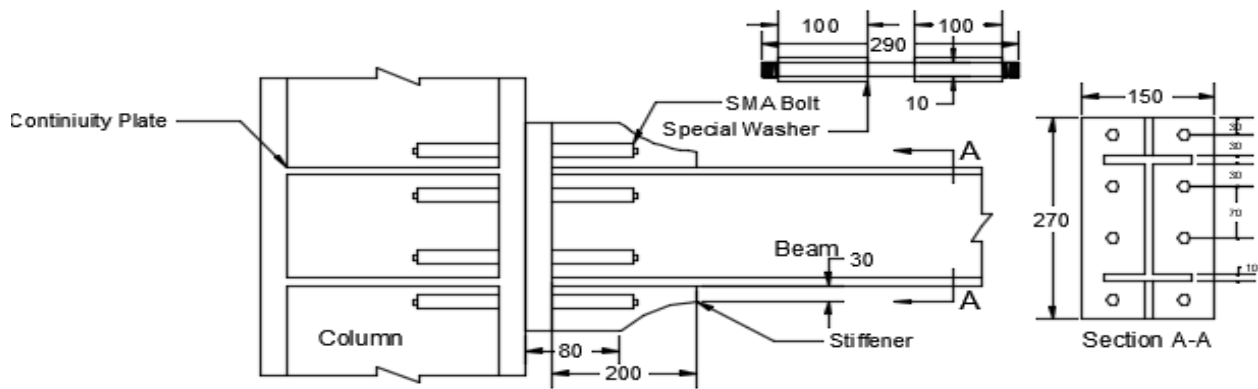


شکل ۲- نمودار تنش- کرنش مصالح استفاده شده در مدل اجزاء محدود Fang [۳۰]

۳- مدل سازی

در این بررسی، دو نوع اتصال ورق انتهایی بلند از نوع چهارپیچ سخت نشده با پیچ های پرمقاومت فولادی، یکی دارای رفتار صفحه ضخیم و دیگری دارای رفتار صفحه متوسط یا نازک طراحی و مدل سازی می شوند. سپس در مورد هر اتصال، حالت های مختلفی که امکان جایگزینی پیچ های فولادی اتصال با پیچ هایی از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی پایه آهن وجود دارد، مشخص می گردند و مورد مدل سازی قرار می گیرند. رفتار اتصال در هر یک از این حالت ها تحت بارگذاری چرخه ای اعمال شده به انتهای تیر اتصال، از نظر مقاومت، سختی، شکل پذیری، قابلیت اتلاف انرژی و تغییر شکل های پسماند در اتصال بررسی و مقایسه شده تا در هر حالت تاثیر پیچ های SMA پایه آهن در بهبود عملکرد لرزه ای اتصال مشخص گردد.

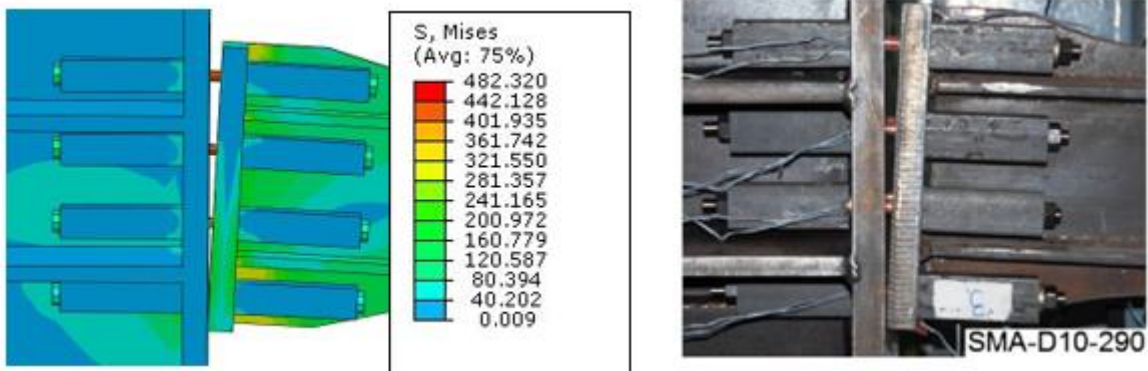




شکل ۳- نمونه آزمایشگاهی برای اعتبار سنجی [۲۱]

جدول ۳- جزئیات هندسی مدل اعتبارسنجی (ابعاد به میلی‌متر) [۲۱]

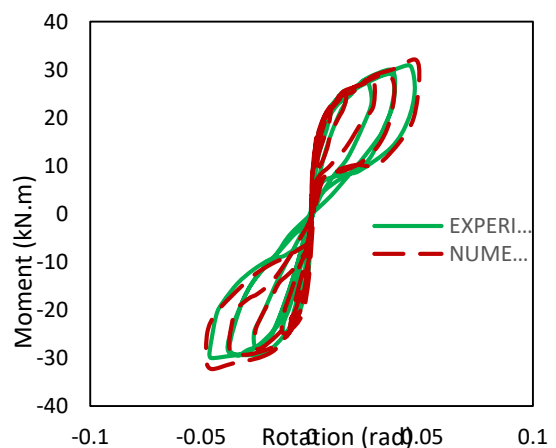
ضخامت سخت کننده	قطر پیچ‌ها	ضخامت ورق انتهایی	ستون		تیر	
			طول	مقطع	طول	مقطع
۱۰	۱۰	۲۴/۶	۱۷۰۰	۳۵۰×۳۵۰×۲۴×۱۶	۱۶۰۰	۱۵۰×۱۰۰×۱۰×۱۰



شکل ۴- مدل تغییر شکل یافته اتصال

جدول ۴- مقایسه مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی

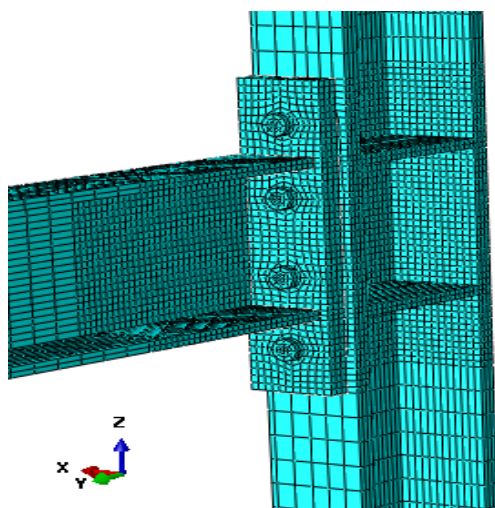
کمیت	EXP.	NUM.
دوران متناظر با نقطه تسلیم سازه θ_y (rad)	۰٫۰۰۵	۰٫۰۰۵
لنگر متناظر با نقطه تسلیم سازه M_y (kN-m)	۱۶٫۵	۱۵
دوران نهایی اتصال θ_u (rad)	۰٫۰۵۲	۰٫۰۵۴
حداکثر لنگر تحمل شده توسط اتصال M_u (kN-m)	۲۸٫۲	۲۹٫۴
انرژی مستهلک شده اتصال Dissipated Energy (kN.m)	۲٫۱۴	۲٫۰۳



شکل ۵- مقایسه منحنی هیستریزیس مدل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی

شبکه‌بندی نهایی اتصال مشخص شده است. انتخاب ابعاد شبکه بر اساس آنالیز حساسیت شبکه بوده است. در هر مدل ابعاد شبکه‌بندی تغییر داده شده است تا نتایج همگرا شوند. برای مثال، در رابطه با مدل EPI با ۱۹۷۲۹ جزء و ۳۱۹۸۰ نقطه، نتایج همگرا شده و کوچکتر شدن ابعاد شبکه تاثیری در نتایج نداشته است. در رابطه با EPI-SMA تعداد جزء‌ها، ۲۱۸۵۰ و تعداد نقاط، ۳۴۱۱۱ بوده است. در مدل EPI در ناحیه اتصال، ابعاد شبکه ۱۰ میلی‌متر و در نواحی دورتر ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

برای آن که امکان مقایسه وجود داشته باشد، در هر اتصال با تغییر قطر پیچ، سعی شده است که مقاومت خمشی ثابت نگه داشته شود. در تمامی مدل‌ها مقطع تیر W10*45 با طول ۲/۵ متر و مقطع ستون W10*88 با طول ۳/۲ متر می‌باشد.



شکل ۶- نمایش کلی مدل اتصال و نحوه مش‌بندی

طول پیچ‌های SMA در تمامی اتصالات ۱۴۰ میلی‌متر انتخاب شده است. این کار با سعی و خطا انجام گرفته است تا با کمترین طول بتوان بیشترین میزان بازگرداندگی را در اتصال ایجاد کرد. در اتصالات صفحه ضخیم، ضخامت ورق انتهایی ۳۲ میلی‌متر و در اتصالات صفحه نازک، ضخامت ورق انتهایی ۲۲ میلی‌متر می‌باشد. در جدول (۵) دیگر مشخصات اتصالات و نام‌گذاری آن‌ها آمده است. در این پژوهش از آلیاژ Fe-Mn-Al-Ni استفاده شده است که خصوصیات مکانیکی آن در جدول (۱) آمده است.

انتهای تیر به صورت آزاد می‌باشد و بارگذاری به شکل کنترل تغییر مکان به لبه انتهایی تیر اعمال می‌شود. بارگذاری اعمال شده مطابق پروتکل SAC می‌باشد. این بارگذاری از طریق اعمال تغییر مکان به انتهای آزاد تیر تا رسیدن به میزان دوران مورد نظر برای هر چرخه انجام می‌شود که در آن دوران اتصال از تقسیم تغییر مکان انتهای آزاد تیر بر فاصله افقی تیر تا مرکز ستون به دست می‌آید. لازم به ذکر است در این پژوهش، هر گام بارگذاری تنها یک بار بر مدل اجزاء محدود اثر داده شده است. قبل از این که پروتکل بارگذاری SAC به اتصال اعمال شود، لازم است نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها ایجاد شود. برای ایجاد نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها ضریب انبساط حرارتی اورتوتروپیک برای بدنه‌ی پیچ‌ها تعریف شده است، که در راستای محور پیچ دارای مقدار می‌باشد و در دو راستای دیگر مقدار ضریب انبساط حرارتی صفر می‌باشد.

این امر باعث می‌شود که هنگام کاهش دمای پیچ، طول آن کم شود، بدون این که قطر آن تغییر کند. در مرحله اول بارگذاری، دمای پیچ را افزایش می‌دهیم و سپس دمای بدنه پیچ کاهش داده می‌شود که این کار موجب ایجاد پیش‌تندگی در آن می‌شود. این روند به گونه‌ای از طریق سعی و خطا انجام گرفته است تا در پیچ‌های پر مقاومت فولادی میزان حداقل پیش‌تندگی ذکر شده در جدول J3.1 آیین نامه AISC 2010 ایجاد گردد [۳۲]. در مورد پیچ‌های SMA هم، تنش معادل با ۶۵ درصد تنش تسلیم (تنش آغاز تبدیل آستنیت به مارتنزیت) آن‌ها به عنوان نیروی پیش‌تندگی وارد شده است [۳۱].

برای شبکه‌بندی جزء‌ها و مدل‌های اتصال از جزء‌های سه‌بعدی C3D8 استفاده شده است. این جزء، شش وجهی است که دارای هشت گره می‌باشد و هر گره سه درجه آزادی انتقالی دارد. از انتگرال‌گیری گوسی کاهش نیافته در جزء‌ها استفاده شده است. به دلیل این که حجم محاسبات و زمان تحلیل مدل به میزان زیادی به تعداد جزء‌های مدل بستگی دارد، سعی کرده‌ایم تا حد ممکن و با توجه به دقت مسأله، از جزء‌های بزرگتری استفاده شود که این کار با سعی و خطا انجام شده است. به دلیل حساسیت ناحیه اتصال و احتمال وقوع پدیده‌های غیرخطی در این ناحیه، از جزء‌های ریزتری برای این ناحیه استفاده شده است و هر چه از آنجا دورتر شده‌ایم ابعاد جزء‌ها افزایش یافته است. لازم به ذکر است، آنالیز حساسیت شبکه برای همه مدل‌ها انجام گرفته است. در شکل (۶) نحوه

نام اتصال	نوع اتصال	جنس پیچ‌ها	جنس ورق انتهایی	رفتار اتصال	قطر پیچ (mm)
EP1	چهار پیچ سخت‌نشده	فولاد A325	فولاد A572Gr50	صفحه ضخیم	۲۲/۲
EP1-SMA	چهار پیچ سخت‌نشده	SMA	فولاد A572Gr50	صفحه ضخیم	۲۹
EP2	چهار پیچ سخت‌نشده	فولاد A325	فولاد A572Gr50	صفحه نازک	۲۵/۴
EP2-SMA	چهار پیچ سخت‌نشده	SMA	SMA	صفحه نازک	۳۱

در رابطه فوق، n ، تعداد پیچ‌ها در هر ردیف، N ، تعداد ردیف پیچ‌های کششی و h_i ، فاصله بین هر ردیف پیچ تا محور بال فشاری می‌باشد. P_t ، مقاومت کششی پیچ از رابطه (۴) به دست می‌آید که در آن F_t ، مقاومت کششی تعیین شده پیچ و A_{bott} مساحت اسمی پیچ می‌باشد.

$$P_t = F_t \cdot A_{bott} \quad (4)$$

تغییر شکل نهایی اتصالات و کانتور تنش فون-میسز اتصالات در شکل (۸) نمایش داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، اتصال EP1 رفتار تقریباً صفحه ضخیم داشته و نیروی اهرمی کمی در مرحله نهایی اتصال و در زمان گسیختگی به وجود آمده است. برای اینکه امکان مقایسه دو اتصال EP1-SMA و EP1 وجود داشته باشد، بایستی مقاومت خمشی اسمی یکسانی داشته باشند و به همین منظور، از پیچ‌های SMA با قطر ۲۹ mm استفاده شده است. همان طور که انتظار داشتیم و در شکل مشاهده می‌شود، اتصال EP1-SMA رفتار صفحه ضخیم از خود نشان داده و نیروی اهرمی به وجود نیامده است. نتیجه مدل‌سازی اجزاء محدود نشان دهنده آن است که تغییر شکل عمده اتصال در محل پیچ‌های SMA به وقوع پیوسته و هدف طراحی محقق شده است.

همان طور که ملاحظه می‌شود، در اتصالات EP1 و EP1-SMA پیچ‌های ردیف بیرونی وضعیت بحرانی‌تری داشته و زودتر به حداکثر کرنش می‌رسند که علت این امر رفتار صفحه ضخیم اتصال و جداسازی بیشتر ورق انتهایی در محل پیچ‌های بیرونی است.

بر اساس طراحی انجام شده، انتظار می‌رود که اتصالات به دلیل وقوع شکستگی در پیچ‌ها دچار خرابی گردند. البته آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای اجازه استفاده از چنین اتصالاتی را نمی‌دهند و در مورد اتصالات ورق ضخیم، روند طراحی را به گونه‌ای هدایت می‌کنند که مفصل پلاستیک در تیر شکل گرفته و شکل‌پذیری اتصال از طریق پلاستیک‌شدگی تیر تامین گردد. ولی با توجه به این که هدف پژوهش حاضر، استفاده از شکل‌پذیری پیچ‌های حافظه‌شکلی پایه آهن و کاهش تغییر شکل‌های پسماند در اتصال از طریق استفاده از قابلیت منحصربه‌فرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی یعنی خاصیت فوق‌ارتجاعی آن‌هاست، روند طراحی را به گونه‌ای پیش برده‌ایم تا پیچ‌های اتصال، متحمل تغییر شکل عمده شده و از شکل‌پذیری بالای پیچ‌های SMA به نحو مناسبی استفاده گردد. محل قرارگیری پیچ‌ها بر روی ورق انتهایی در شکل (۷) نشان داده شده است.

مقاومت صفحه انتهایی، M_{pl} ، طبق رابطه (۱) به دست می‌آید [۲۵].

$$M_{pl} = F_{yp} \cdot t_p^2 \left[\frac{b_p}{2} \cdot \left[h_2 \cdot \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_1 \left(\frac{1}{p_{fo}} \right) - \frac{1}{2} \right] + \frac{2}{g} [h_2 \cdot (P_{fi} + s)] \right] \quad (1)$$

در رابطه فوق، F_{yp} ، تنش تسلیم صفحه، t_p ، ضخامت صفحه می‌باشد و پارامترهای دیگر در شکل (۶) نمایش داده شده است. بعد نامعلوم s از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۵].

$$s = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{b_p \cdot g} \quad (2)$$

مقاومت اتصال، بر اساس معیار گسیختگی کششی پیچ‌ها، طبق رابطه (۳) برابر لنگر استاتیک نیروی نهایی پیچ حول خط مرکزی بال فشاری خواهد شد.

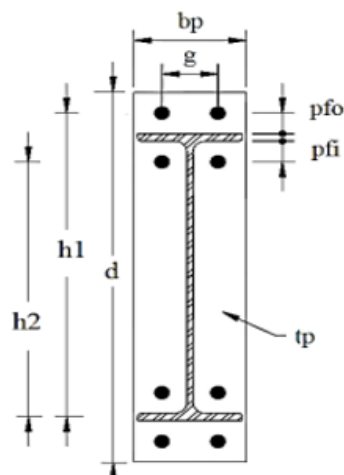
$$M_{np} = n \cdot P_t \cdot \sum_{i=1}^N h_i \quad (3)$$



و تغییرشکل نهایی آن به همراه کانتور تنش فون-میسز روی آن در شکل (۸) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، ورق انتهایی در محل بال کششی تسلیم شده و نیروی اهرمی نیز به وجود آمده است.

نمودار نیروی پیچ بر حسب لنگر خمشی اعمال شده به اتصالات برای بحرانی‌ترین پیچ در شکل (۹) نشان داده شده است. در اتصال EP1، مقدار نیروی پیش‌تندگی موجود در پیچ که در ابتدا ۱۷۳ kN می‌باشد، پس از چند گام اولیه بارگذاری، کاهش یافته و سپس به سرعت از بین رفته و مساوی صفر می‌شود. این امر به دلیل رفتار تقریباً صفحه ضخیم اتصال می‌باشد که باعث می‌شود اتصال دچار گسیختگی ترد از ناحیه پیچ‌ها شود. در پیچ‌های فولادی پرمقاومت، نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها به دلیل پلاستیک‌شدگی که در خود پیچ‌های فولادی رخ می‌دهد به سرعت از بین رفته و برابر صفر می‌شود. اما در مورد اتصال EPI-SMA مقدار نیروی پیش‌تندگی موجود در پیچ در ابتدا ۱۴۷ kN می‌باشد، که این نیرو پس از چند گام بارگذاری، کاهش یافته و نهایتاً به حدود ۸۰ kN می‌رسد. این پدیده به دلیل تغییرشکل‌های پلاستیک ایجاد شده در اجزای غیر SMA شامل واشرها، ورق انتهایی و بال ستون رخ می‌دهد که پیچ SMA در اتصال آن‌ها نقش دارد و تغییرشکل آن‌ها باعث شده تا نیروی پیش‌تندگی در پیچ به کمتر از نصف مقدار اولیه‌اش برسد. بر خلاف اتصال EP1 که در آن نیروی پیش‌تندگی به سرعت از بین رفته، در اتصال EP2 نیروی پیش‌تندگی پس از تحمل تعداد چرخه‌های بیشتری کاهش پیدا کرده و نهایتاً به صفر رسیده است که این نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری اتصال است. اما در هردو اتصال با پیچ‌های فولادی نیروی پیش‌تندگی اولیه از بین رفته است. در مورد اتصال EP2-SMA نیروی پیچ پس از تحمل تعداد زیادی چرخه به صفر نمی‌رسد و در نهایت بیش از نیمی از نیروی پیش‌تندگی اولیه در پیچ باقی مانده است.

نمودارهای هیستریزس اتصالات در شکل (۱۰) نشان داده شده است و اطلاعات مورد نیاز از نمودارها استخراج گردیده است و در جدول (۶) ثبت شده است. در مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود دو اتصال EP1 و EP1-SMA که در جدول (۶) ارائه شده، نشان می‌دهد که مقاومت نهایی دو اتصال، نزدیک به هم می‌باشد. همچنین سختی اولیه آن‌ها به یک‌دیگر نزدیک است. در عوض در اتصال EP1-SMA، استفاده از پیچ‌های



d (mm)	bp (mm)	g (mm)	Pfo (mm)	Pfi (mm)
۴۹۷	۲۳۰	۱۲۰	۵۰	۵۰

شکل ۷- محل قرارگیری پیچ‌ها بر روی ورق انتهایی [۲۳]

کلیه مشخصات EP2 مشابه اتصال EP1 است، تنها تفاوت ایجاد شده مربوط به ضخامت ورق انتهایی و محل قرارگیری پیچ‌ها است که به گونه‌ای تغییر داده شده‌اند تا اتصال، رفتار ورق نازک داشته باشد. در رفتار صفحه نازک، علاوه بر ورق انتهایی در محل بال کششی تیر، پیچ‌های کششی نیز تسلیم می‌شوند. با توجه به تسلیم شدن ورق انتهایی علاوه بر تسلیم شدن پیچ‌های کششی، شکل‌پذیری این نوع اتصال بیشتر از شکل‌پذیری اتصال ورق ضخیم بوده است. اتصال EP2-SMA در حقیقت همان اتصال EP2 می‌باشد که در آن به جای کلیه پیچ‌های پرمقاومت فولادی از پیچ‌های بلند SMA با طول ۱۴۰ mm استفاده شده است و همچنین جنس ورق انتهایی، SMA می‌باشد. به منظور نصب پیچ‌های بلند SMA از واشرهای فولادی از جنس فولاد پرمقاومت A325 بهره برده‌ایم. دلیل استفاده از پیچ‌های بلندتر نسبت به پیچ‌های فولادی، جلوگیری از تجاوز کرنش پیچ از حد کرنش بازگشت‌پذیر می‌باشد.

برای این که امکان مقایسه دو اتصال EP2 و EP2-SMA وجود داشته باشد، می‌بایست مقاومت خمشی یکسانی داشته باشند و به همین منظور از پیچ‌های SMA با قطر ۳۱ mm استفاده شده است. دلیل استفاده از ورق انتهایی SMA در اتصال EP2-SMA رفتار صفحه نازک اتصال و تغییرشکل‌های زیاد اتصال در محل ورق انتهایی بوده است. مدل اتصال EP2-SMA

بزرگی 0.06 رادیان، توانسته تا مقدار زیادی تغییر شکل‌هایی که تحمل کرده است را جبران کند و به وضعیت قبل از بارگذاری‌اش برگردد. در شکل (۱۱) نمودارهای لنگر خمشی بر حسب میزان جداسازی صفحه انتهایی در محل بال کششی برای اتصالات رسم شده است.

در شکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود که جداسازی صفحه انتهایی در محل بال کششی تیر در همان گام‌های اولیه بارگذاری با سرعت افزایش یافته است. علت این امر تسلیم شدن سریع پیچ‌ها و لق شدن آن‌ها و به تبع آن جدا شدن ورق انتهایی در همان چرخه‌های ابتدایی بارگذاری می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در آخرین چرخه کامل که مربوط به دوران 0.03 رادیان اتصال است، به هنگام باربرداری جداسازی ورق انتهایی به میزان $1/8$ میلی‌متر در محل بال تیر باقی مانده است.

در شکل (۱۱-ب) مشاهده می‌شود که جداسازی صفحه انتهایی در محل بال کششی در آخرین چرخه به $5/8$ میلی‌متر رسیده است که این مقدار در اتصال EP1، $2/4$ میلی‌متر بود و این نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری اتصال است. همچنین در آخرین چرخه کامل که مربوط به دوران 0.042 رادیان است، در هنگام باربرداری، جداسازی ورق انتهایی، تنها به میزان 0.2 میلی‌متر در محل بال تیر باقی مانده است. علت این پدیده رفتار فوق‌ارتجاعی پیچ‌ها است که توانسته‌اند اتصال را تا حدود بسیار زیادی به وضعیت اولیه‌اش برگردانند.

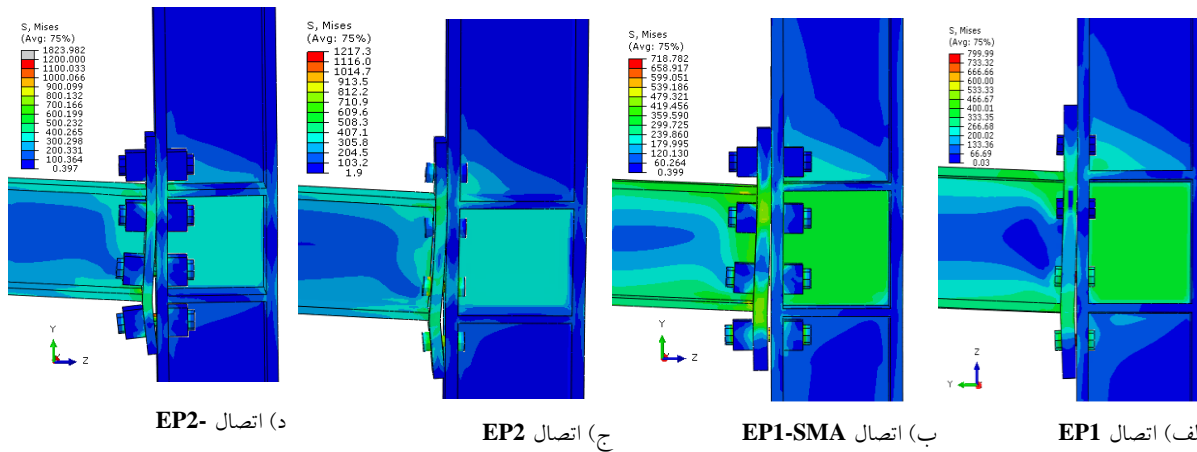
در شکل (۱۱-ج) مشاهده می‌شود که جداسازی صفحه انتهایی در محل بال کششی تیر نسبت به اتصال EP1 افزایش یافته، به طوری که مقدار نهایی آن از $5/3$ میلی‌متر به $7/1$ میلی‌متر رسیده است و میزان جداسازی باقی‌مانده در محل بال از $1/8$ میلی‌متر به $3/3$ میلی‌متر رسیده است. در شکل (۱۱-د) مشاهده می‌شود که جداسازی صفحه انتهایی در محل بال کششی در آخرین چرخه به $8/2$ میلی‌متر رسیده است که این مقدار در اتصال EP2، $7/1$ میلی‌متر بود و این نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری اتصال است. همچنین در آخرین چرخه کامل که مربوط به دوران 0.064 رادیان است، در هنگام بار برداری جداسازی ورق انتهایی تنها به میزان 0.8 میلی‌متر در محل بال تیر باقی مانده است. علت این پدیده رفتار فوق‌ارتجاعی پیچ‌ها است که توانسته‌اند اتصال را تا حدود بسیار زیادی به وضعیت اولیه‌اش برگردانند.

SMA پایه‌آهنی سبب شده شکل‌پذیری دورانی اتصال، 33 درصد افزایش پیدا کند و اتلاف انرژی آن نیز 35 درصد افزایش یابد. میزان دوران غیرالاستیک اتصال 67 درصد افزایش یافته است. ظرفیت دورانی اتصال هم 33 درصد افزایش یافته است. از مجموع محاسبات فوق، می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده مناسب از پیچ‌های SMA پایه‌آهنی در اتصال طراحی‌شده براساس رفتار صفحه ضخیم، توانسته تغییر شکل باقی‌مانده در سازه را به نحو چشم‌گیری کاهش داده و پس از تحمل تغییر شکل‌هایی به بزرگی 0.042 رادیان به وضع قبل از بارگذاری بازگردد و همچنین شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی مناسبی ایجاد کند، ضمن این که مقاومت و سختی لازم برای اتصال را هم فراهم کرده‌ایم.

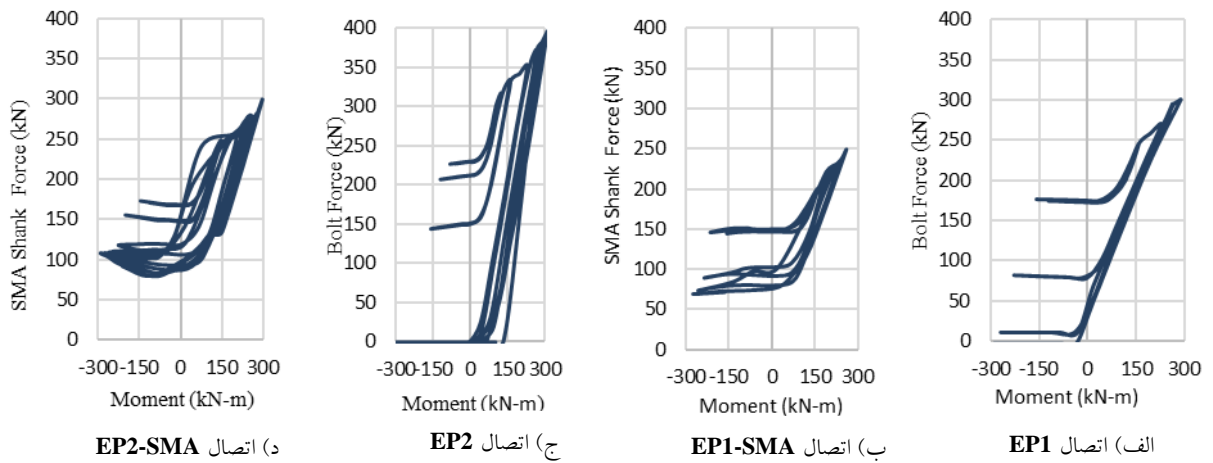
نتایج تحلیل اجزاء محدود دو اتصال EP1 و EP2 که در جدول (۶) آمده، نشان می‌دهد سختی اولیه دو اتصال بسیار به هم نزدیک می‌باشد. در عوض رفتار صفحه نازک اتصال EP2 و تشکیل مفاصل پلاستیک در آن، سبب شده شکل‌پذیری دورانی اتصال 33 درصد افزایش یابد.

در مورد مقایسه اتصالات EP2 و EP2-SMA می‌توان گفت با وجود مقاومت خمشی تقریباً یکسان دو اتصال، شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی اتصال EP2-SMA به میزان قابل توجهی بیشتر است. ویژگی دیگر اتصال EP2-SMA توانایی نسبتاً خوب آن برای بازگشت به حالت اول است به طوری که با تحمل 10 چرخه، مقدار دوران باقی‌مانده در آن نصف اتصال EP2 می‌باشد. اگر چرخه آخر که کرنش موجود در پیچ‌ها از حداکثر کرنش برگشت‌پذیر عبور کرده است را در نظر نگیریم، با تحمل 9 چرخه (یک چرخه بیشتر از EP2) مقدار دوران باقی‌مانده 0.05 رادیان است. به عبارتی با تحمل 9 چرخه بیش از 92 درصد دوران سازه جبران شده و به وضع اول بازگشته است که این مقدار با تحمل 10 چرخه بیش از 84 درصد است. همچنین این اتصال تعداد چرخه‌های بیشتری تحمل کرده و میزان اتلاف انرژی آن بیش از $1/5$ برابر اتصال EP2 است.

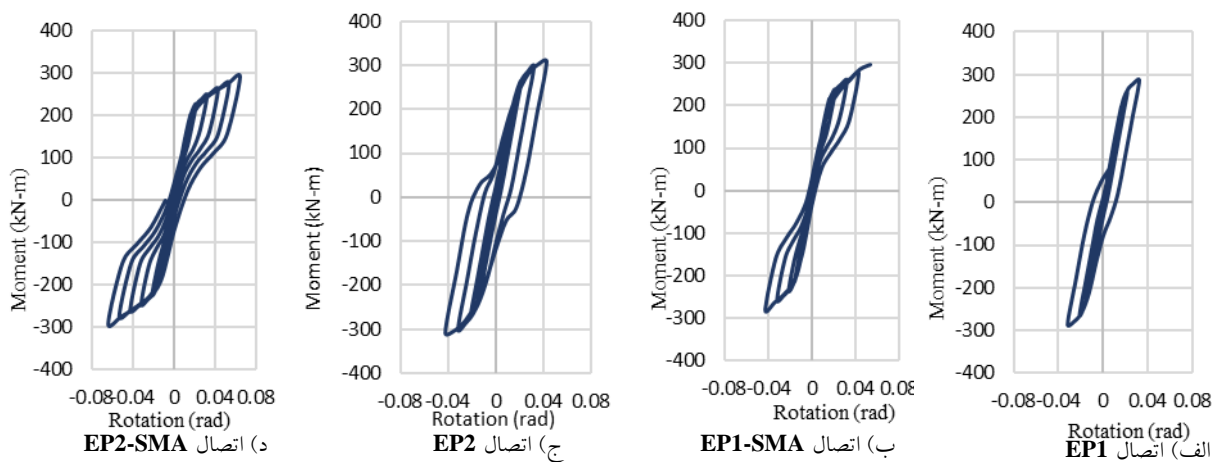
در مجموع می‌توان به این نتیجه رسید که در اتصال طراحی‌شده براساس رفتار ورق نازک، استفاده از پیچ‌های SMA به همراه ورق انتهایی از جنس SMA پایه‌آهن، شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش داده و مهم‌تر از آن اتصالاتی ساخته‌ایم که پس از تحمل دوران‌هایی به



شکل ۸- تغییر شکل نهایی اتصالات و توزیع تنش فون- میسز (MPa)



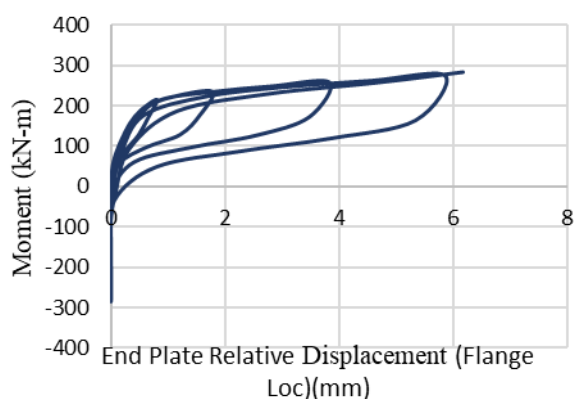
شکل ۹- نمودار نیروی پیچ بر حسب لنگر خمشی در اتصالات



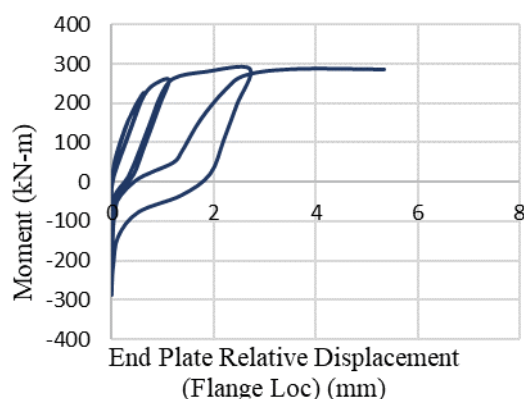
شکل ۸- نمودار لنگر بر حسب دوران اتصالات

جدول ۶- نتایج بررسی نمودارهای هیسترسیس اتصالات

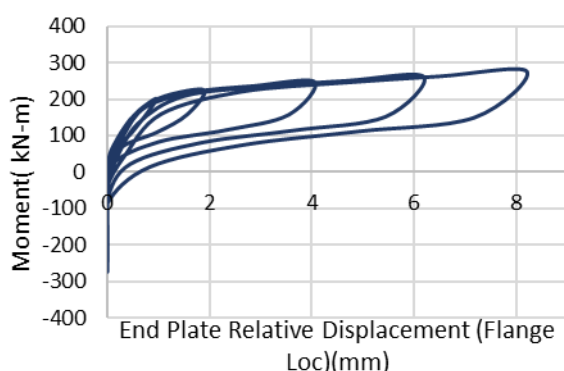
کمیت	فرمول (واحد)	EP1	EP1-SMA	EP2	EP2-SMA
دوران متناظر با نقطه تسلیم سازه	θ_y (rad)	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۵	۰٫۰۱۶	۰٫۰۱۵
لنگر متناظر با نقطه تسلیم سازه	M_y (kN-m)	۲۲۶٫۱	۲۱۳٫۵	۲۲۶٫۴	۲۲۸٫۸
سختی دورانی الاستیک اتصال	$K = \frac{M_y}{\theta_y}$ (kN.m/rad)	۱۴٫۱	۱۴٫۲	۱۴٫۱	۱۵٫۲
دوران نهایی اتصال	θ_u (rad)	۰٫۰۳۲	۰٫۰۴۲	۰٫۰۴۲	۰٫۰۶۴
حداکثر لنگر تحمل شده توسط اتصال	M_u (kN-m)	۲۸۶٫۴	۲۷۵٫۱	۳۰۹٫۴	۲۸۹٫۲
شکل پذیری اتصال	$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y}$	۲	۲٫۶۶	۲٫۶۶	۴
دوران غیر الاستیک اتصال	$\theta_{inelastic} (rad) = \theta_u - \theta_y$	۰٫۰۱۶	۰٫۰۲۶	۰٫۰۲۶	۰٫۰۴۸
انرژی مستهلک شده اتصال	Dissipated Energy (kN.m)	۹٫۷	۱۳٫۲	۲۶٫۳	۳۹٫۵



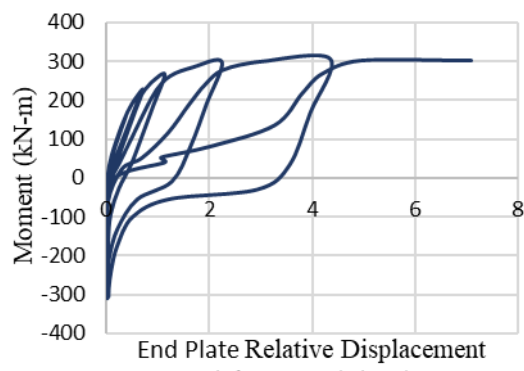
ب) اتصال EP1-SMA



الف) اتصال EP1

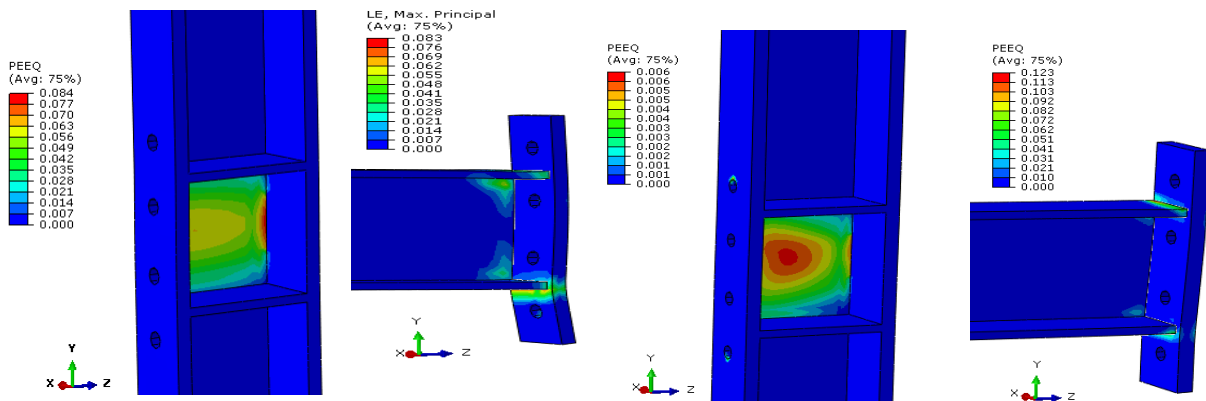


د) اتصال EP2-SMA



ج) اتصال EP2

شکل ۹- نمودار لنگر خمشی-جداشدگی صفحه انتهایی، در محل بال تیر اتصالات



ب) کرنش در تیر و ورق انتهایی و ستون EP2-SMA

الف) کرنش پلاستیک در تیر و ورق انتهایی و ستون EP1-SMA

شکل ۱۰- توزیع کرنش در اجزای اتصالات در انتهای بارگذاری

و هم قیمت تمام شده کمتری نسبت به اتصالات دارای نیتینول خواهند داشت. این کار از طریق مدل سازی اجزاء محدود اتصال در نرم افزار ABAQUS، اعمال بارگذاری چرخه ای به انتهای تیر اتصال و یافتن نمودار لنگر-دوران اتصال ها و بررسی اجزاء مختلف آن ها انجام شده است.

برای بررسی رفتار این دسته اتصالات، دو اتصال به نام های EP1 و EP2 دارای پیچ و ورق انتهایی فولادی طراحی گردیده اند که از اولی رفتار صفحه ضخیم و از دومی رفتار صفحه متوسط یا نازک انتظار می رود، ولی هر دو دارای مقاومت خمشی یکسان بوده و روند طراحی به گونه ای انجام گرفته است که اتصالات از ناحیه پیچ ها دچار شکست شوند. در اتصال EP2 تغییر شکل ورق انتهایی موجب افزایش شکل پذیری و انرژی مستهلک شده اتصال گشته است. در مورد اتصال EP1، یک بار تمامی پیچ های فولادی اتصال با پیچ های بلند SMA پایه آهنی با طول ۲/۵ برابر و قطر ۱/۳ برابر پیچ های فولادی جایگزین شده اند. در اثر این جایگزینی، شکل پذیری اتصال به میزان ۳۳ درصد و اتلاف انرژی ۳۵ درصد افزایش یافته است، ضمن این که مقاومت و سختی اولیه اتصال تقریباً بدون تغییر باقی مانده است. علاوه بر این، اتصال توانسته است که پس از تحمل دوران هایی به بزرگی ۰/۰۴۲ رادیان، بیش از ۹۳ درصد این دوران را جبران کرده و به وضعیت قبل از بارگذاری اش بازگردد و در

توزیع کرنش پلاستیک در اجزای اتصالات EP1-SMA و EP2-SMA در انتهای بارگذاری در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در اتصال EP1-SMA اجزاء بصورت جزئی و موضعی دچار تغییر شکل های پلاستیک شده اند که در انتهای بال تیر، ورق انتهایی در مجاورت بال های تیر و ناحیه چشمه اتصال ستون اتفاق افتاده است. با توجه به ناچیز بودن این پلاستیک شدگی ها، بخش اصلی شکل پذیری اتصال، ناشی از تغییر شکل پیچ های SMA می باشد که هدف ما هم از طراحی اتصال همین بوده است. در اتصال EP2-SMA که اتصال رفتار صفحه نازک دارد، تغییر شکل ورق انتهایی بیشتر بوده است و ورق انتهایی در محل بال کششی در اغلب نقاط در محدوده کرنش بازگشت پذیر قرار دارد. ستون هم در اکثر نقاط به جز ناحیه اتصال، الاستیک باقی مانده است.

۴- نتیجه گیری

به طور کلی هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر استفاده از پیچ های SMA پایه آهنی که در دمای معمولی اتاق دارای رفتار سوپر الاستیک می باشند، بر رفتار اتصالات خمشی تیر به ستون از نوع ورق انتهایی بلند می باشد. به طور کلی، قیمت آلیاژ های حافظه دار پایه آهنی کمتر از نیتینول می باشد زیرا بخش عمده آن آهن است. با استفاده از این آلیاژ به بررسی خصوصیات اتصالات ورق انتهایی گسترش یافته پرداخته و اتصالاتی بررسی گردید که هم قابلیت بازگرداندگی و اتلاف انرژی مناسبی دارند

[5] Salehi, S., Ghobadi, M. (2020). "Seismic resilient bracing structure equipped with hybrid device at base", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 138, pp. 106256.

[۶] قلهکی، م.، خسروی خور، ع. و رضایی فر، ا. (۱۳۹۸)، "مطالعه اثر آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti در شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ۴، صفحات ۲۰۵ تا ۲۲۰.

[7] Rad, S., Ghobadi, M. and Yakhchalian, M. (2019). "Probabilistic seismic collapse and residual drift assessment of smart building equipped with shape memory alloy connections", *Engineering Structures*, Vol. 197, pp. 109375.

[8] Zhang, X., Zhang, J., Wu, H. and Kumar, D.D. (2022). "Iron-Based Shape Memory Alloy in Construction: Research, Applications and Opportunities", *Material*, Vol. 15(5), pp. 1723.

[9] Cladera, A., Weber, B., Leinenbach, C., Czaderski, C., Shahverdi, M. and Motavalli, M. (2014). "Iron-Based Shape Memory Alloys for Civil Engineering Structures: An Overview", *Construction and Building Materials*, vol. 63, pp. 281-293.

[10] Tanaka, Y., Kainuma, R., Omori, T. and Ishida, K. (2015). "Alloy Design for Fe-Ni-Co-Al-Based Super elastic Alloys", *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, pp. S485-S492.

[11] Omori, T., Ando, K., Okano, M., Xu, X., Tanaka, Y., Ohnuma, I., Kainuma, R. and Ishida, K. (2011). "Superelastic Effect in Polycrystalline Ferrous Alloys." *Science*, vol. 333, pp. 68-71.

[12] Ghassemieh, M., Jalalpour, M. and Gholampour, A.A. (2014). "Numerical Evaluation of the Extended Endplate Moment Connection Subjected to Cyclic Loading", *Current Advances in Civil Engineering*, vol. 2, pp. 35-43.

[13] Zeinoddini-Meimand, V., Ghassemieh, M. and Kiani, J. (2014). "Finite Element Analysis of Flush End Plate Moment Connections under Cyclic Loading", *International Journal of Civil, Architectural Science and Engineering*, vol. 8.

[14] Goudarzi, A., Ghassemieh, M., Fanaei, N., Laefer, D.F. and Baei, M. (2015). "Axial Load Effects on Flush End-Plate Moment Connections", *Structures and Buildings*, vol. 18, pp. 1215-1237.

[۱۵] قاسمیه، م.، گودرزی، ا.، ارزیتون، ا. (۱۳۹۳)، "بررسی رفتار ورق انتهایی گسترش‌یافته تحت خمش و برش"، نشریه علمی پژوهشی سازه و فولاد، شماره پانزدهم، ص. ۱۳-۲۶.

[16] Ghassemieh, M., Goodarzi, A.R. and Arzeyton, A. (2014). "Behavior of Flush End-Plate Moment Connections Subjected to Bending and Axial Forces", *Journal of Steel and Structures*, Iranian Society of Steel structures, vol. 170, pp. 199-210.

حقیقت یک مفصل سوپرالاستیک در محل پیچ‌های اتصال ایجاد شده است.

در مورد اتصال EP2، به دلیل تسلیم شدن ورق انتهایی، این اتصال از شکل‌پذیری بیشتری برخوردار است و تغییرشکل زیادی تجربه می‌کند. در این اتصال یک بار به جای پیچ‌های فولادی، پیچ‌های SMA پایه‌آهنی قرار داده شد و مشاهده شد به دلیل تغییرشکل زیاد ورق میزان تغییرشکل پسماند سازه هم زیاد است. سپس برای کم کردن تغییرشکل پسماند، ورق انتهایی سازه هم از جنس آلیاژ سوپرالاستیک پایه‌آهن قرار داده شده و مشاهده شد که اتلاف انرژی اتصال ۵۰ درصد و شکل‌پذیری اتصال نیز ۵۴ درصد افزایش یافته است. همچنین اتصال پس از تحمل تغییرشکل‌هایی به بزرگی ۰/۰۶۴ رادیان بیش از ۸۵ درصد این دوران را جبران کرده و به حالت قبل بازگشته است. به طور کلی، در این پژوهش نشان داده شد که با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پایه‌آهنی در اتصالات خمشی می‌توان به میزان قابل‌توجهی استهلاک انرژی ایجاد کرد و علاوه بر آن خاصیت سوپرالاستیک این آلیاژها باعث بازگشت تغییرشکل‌های تحمل‌شده به حالت اول می‌گردد، که این در بهره‌برداری از سازه پس از زلزله نکته بسیار کارآمدی خواهد بود. نکته دیگر، قیمت بسیار پایین‌تر آلیاژهای پایه‌آهنی نسبت به آلیاژ نیتینول می‌باشد که طی برآوردی که انجام گرفته است، در مورد پیچ‌ها حدود یک پنجم می‌باشد.

۵- مراجع

[1] Pachide, G., Kafi, M. and Gholhaki, M. (2020). "Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipator", *Structures*, vol. 28, pp. 467-481.

[۲] پاچیده، ق.، کافی، م. و قلهکی، م. (۱۴۰۰)، "ارزیابی آزمایشگاهی و عددی سیستم نوین مهاربندی با عضو لوزی‌شکل مجهز به میراگر تسلیم شوونده"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۱۱، ص ۴۵۵۷-۴۵۷۶.

[3] Kheiroddin, A., Gholhaki, M. and Pachideh, G. (2019). "Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Moment Frame Retrofitted with Steel Braces Using IDA and Pushover Method in the Near- Fault Field", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7-1, pp. 159-173.

[4] Shams, A., Ghobadi, M. (2021). "Development of a high-performance hybrid self-centering building for seismic resilience." *Engineering Structures*, vol. 226, pp. 111382.



- [28] Izadi, M.R., Ghafoori, E., Shahverdi, M., Motavalli, M. and Maalek, S. (2018). "Development of an Iron-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) Strengthening System for Steel Plates", *Engineering Structures*, vol. 174, pp. 433-446.
- [29] Chowdhury, M.A., Rahmzadeh, A., Moradi, S. and Alam, M.S. (2019). "Feasibility of Using Reduced Length Superelastic Shape Memory Alloy Strands in Post-Tensioned Steel Beam-Column Connections", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 30, pp. 283-307.
- [30] Fang, C., Yam, M.C.H., Lam, A.C.C. and Xie, L. (2014). "Cyclic Performance of Extended End-Plate Connections Equipped with Shape Memory Alloy Bolts", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 94, pp. 122-136.
- [31] ASCE/SEI-41, (2007), *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers.
- [32] ANSI/AISC-358-16, (2016), *Steel Moment Frames for Prequalified Connections*.
- [17] طاهریپور، م.، قاسمی، م. (۱۳۹۷)، "بررسی رفتار اتصالات ورق انتهایی تحت بارگذاری ترکیبی"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس، شماره ۶، ص. ۱۶۹-۱۸۰.
- [18] Motahari, S.A., Ghassemieh, M. and Abolmaali, S.A. (2007). "Implementation of Shape Memory Alloy Dampers for Passive Control of Structures Subjected to Seismic Excitations", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, pp. 1570-1579.
- [19] Ma, H., Cho, C. and Wilkinson, T. (2008). "A Numerical Study on Bolted End-Plate Connection Using Shape Memory Alloys", *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 1419-1426.
- [20] Kari, A., Ghassemieh, M. and Abolmaali, S.A. (2011). "A New Dual Bracing System for Improving the Seismic Behavior of Steel Structures", *Smart Materials and Structures*, vol. 41.
- [21] Ghassemieh, M., Mohyeddin Ghodrati, S., Reza Bahaari, M. and Ali Nojumi, S. (2013). "Seismic Enhancement of Coupled Shear Walls Using Shape Memory Alloys", *Journal of Civil Engineering and Science*, vol. 2, pp. 93-101.
- [22] Ghassemieh, M. and Kargarmoakhar, R. (2013). "Response modification factor of steel frames utilizing shape memory alloys", *J. Intelligent. Material Systems and Structures*, vol. 24, pp. 1213-1225.
- [23] Moradi, S. and Alam, M.S. (2015). "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*, vol. 26, pp. 463-475.
- [24] Wang, W., Chan, T.M. and Shao, H. (2015). "Numerical Investigation on I-Beam to CHS Column Connections Equipped with NiTi Shape Memory Alloy and Steel Tendons under Cyclic Loads", *Structures*, vol. 4, pp. 114-124.
- [25] Farmani, M.A. and Ghassemieh, M. (2016). "Shape Memory Alloy-Based Moment Connections with Superior Self-Centering Properties", *Smart Materials and Structures*, vol. 25, pp. 1-17.
- [26] Farmani, M.A. and Ghassemieh, M. (2017). "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*, vol. 135, pp. 30-48.
- [27] Hedayati Dezfouli, F. and Alam, M.S. (2018). "Smart Lead Rubber Bearings Equipped with Ferrous Shape Memory Alloy Wires for Seismically Isolating Highway Bridges", *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 22, pp. 1042-1067.

