

## نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### بررسی آزمایشگاهی اتصالات خارجی تیر به ستون بتن مسلح با میلگردهای فولادی و آلیاژهای محافظه دار شکلی تحت تاثیر بارهای چرخه ای

حسین رضایی آذریانی<sup>۱</sup>، محمدرضا اصفهانی<sup>۲\*</sup>، هاشم شریعتمدار<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

#### چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی، رفتار اتصال خارجی تیر به ستون بتنی تحت تاثیر بارگذاری چرخه ای با میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی (SMA) مورد بررسی قرار می گیرد. در این پژوهش ۸ نمونه بتنی ساخته و آزمایش شد. در ۴ نمونه از میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی و در ۴ نمونه دیگر از میلگردهای فولادی، برای اتصال تیر به ستون استفاده شده است. میزان محصور شدگی میلگردهای طولی تیر در محل اتصال نمونه ها، متفاوت در نظر گرفته شده است. همچنین از دو نوع بتن، با مقاومت های ۳۰ و ۴۵ مگا پاسکال استفاده شده است. نمونه ها تحت بارگذاری چرخه ای آزمایش شدند. نتایج پژوهش نشان می دهد که میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی، توانایی بالایی در بازگشت به شکل اولیه خود، بعد از تحمل تغییر مکان های بزرگ را دارند. در این مصالح مقدار جذب انرژی مناسب بوده و کاهش تغییر شکل پسماند در اتصال قابل ملاحظه می باشد. با توجه به رفتار فوق الاستیک میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی، در بتن معمولی و مقاومت بالا ترک ها در هسته اتصال قابل ملاحظه نبوده و بارگذاری چرخه ای، موجب بسته شدن ترک ها در هسته اتصال گردید. با افزایش بارگذاری چرخه ای، شکست خارج از هسته اتصال به صورت خمشی و در تیر ایجاد گردید. افزایش محصور شدگی تیر باعث دور شدن محل شکست در تیر از هسته اتصال گردید. در اتصال تیر به ستون با میلگردهای فولادی، شکست برشی در هسته اتصال ایجاد شد ولی با افزایش مقاومت بتن و محصور شدگی، شکست در خارج از هسته اتصال به صورت خمشی در تیر صورت گرفت. طول مفصل پلاستیک در تیر اتصال برای نمونه های با میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی و میلگردهای فولادی، توسط روابط تجربی و نتایج آزمایشگاهی محاسبه گردید و مشخص شد که استفاده از معادله پاول و پرستلی برای اتصالات بتنی با هر دو نوع میلگرد مناسب است.

کلمات کلیدی: آلیاژهای حافظه دار شکلی، بتن مسلح، اتصال تیر به ستون، اثر فوق الاستیک، بارگذاری چرخه ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.109758.1405	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.109758.1405	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۷/۰۱/۲۲	۱۳۹۷/۰۱/۲۲	۱۳۹۶/۱۲/۱۳	۱۳۹۶/۰۹/۱۸
محمدرضا اصفهانی esfahani@um.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

# Experimental Investigation on Exterior RC Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Loading using Steel and Shape Memory Alloy (SMA) Reinforcing Bars

Hossein Rezaee Azariani <sup>1</sup>, Mohammad Reza Esfahani <sup>2\*</sup>, Hashem Shariatmadar <sup>3</sup>

1- Ph.D. Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Associate professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

## ABSTRACT

*In the present Experimental research, the behavior of exterior RC beam-column connections subjected to cyclic loading is studied using steel and shape memory alloy (SMA) reinforcing bars. In this research, 8 specimens of exterior RC beam-column connections were tested in which four specimens included SMA reinforcing bars and the remaining four specimens included steel bars. The confinement of beam longitudinal bars was different in the connections. Also, two types of concretes were used with the strengths 30 and 45 MPa, respectively. The specimens were tested under cyclic loading. The results of the research show that the specimens with SMA reinforcing bars can return to their initial shape after tolerating large displacements. In these specimens, the energy dissipation is satisfactory and the decrease in the residual deformation is significant. According to the superelastic behavior of the SMA reinforcing bars, the width of cracks is not significant in the connection core and cyclic loading reduced the cracks in the connection core. As the cyclic loading increased, bending failure occurred in the beam outside of the connection core. As the concrete strength and confinement value increased, bending failure still occurred in the beam outside of the connection core. In the beam-column connection with steel bars, shear failure occurred in the connection core. However, as the concrete strength and confinement increased, bending failure occurred in the beam outside of the connection core. Plastic hinge length in the connecting beams were calculated in the specimens with SMA and steel bars by empirical equations and compared with the test results. It was shown that Paulay and Priestley equations were suitable to be used for concrete connections with different bars.*

## ARTICLE INFO

Received: 09/12/2017

Revised: 04/03/2018

Accepted: 11/04/2018

## Keywords:

*Shape Memory Alloy (SMA), Reinforced concrete, Beam-Column Connection, Superelastic Effect, Cyclic loading.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.109758.1405

\*Corresponding author: Mohammad Reza Esfahani  
Email address: esfahani@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی بتنی حساس‌ترین عضو سازه‌ای محسوب می‌شود که در بارهای لرزه‌ای بسیار آسیب پذیر است [۱]. اتصالات با جزئیات ضعیف، غالباً یا توسط ترک خوردگی کششی قطری به علت نیروی برشی [۲] و یا از طریق بیرون کشیده شدن میلگردهای خمشی به علت مهار ناکافی میلگردهای تیر در اتصال، تخریب می‌شوند. اتصالات خارجی به علت هندسه خاص و دریافت سهم بیشتری از بار جانبی از اهمیت ویژه‌ای نسبت به اتصالات داخلی برخوردارند. از سال ۱۹۷۰، آیین نامه‌های طراحی ضوابط خاص لرزه‌ای برای جزئیات میلگردها، در اتصالات را ارائه نموده‌اند. با این حال اتصالات در بارهای لرزه‌ای به شدت آسیب پذیر هستند [۳]. بررسی خسارت‌های وارده در اثر زلزله به قاب‌های بتن مسلح بیانگر آن است که بیشتر خسارت‌های وارده به این نوع قاب‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون رخ می‌دهند. اجرای میلگردهای عرضی در اتصال علاوه بر مشکلات اجرائی، موجب تراکم بالای فولاد در این ناحیه شده و بتن‌ریزی را دچار مشکل می‌کند. پژوهش‌هایی برای افزایش عملکرد اتصال با تغییر جزئیات میلگردگذاری و نوع بتن مصرفی انجام شده است. استفاده از بتن خودتراکم برای اتصالات با تراکم زیاد میلگرد پیشنهاد شده است. از مزایای این بتن، عدم نیاز به ویبره و امکان استفاده آسان از آن در نواحی با تراکم زیاد آرماتور می‌شود. Lin و همکاران [۴] نشان دادند که بتن خودتراکم در ستون‌های بتن مسلح دارای عملکرد بهتر نسبت به بتن معمولی در کنترل ترک‌ها است. تاثیر جزئیات میلگردهای طولی تیر بر رفتار اتصالات خارجی توسط Scott [۵] انجام شد. Abdel Fattah و Wight [۶] تاثیر میلگردهای کلاهدار<sup>۱</sup> را در اتصالات داخلی مورد بررسی قرار دادند که موجب افزایش عملکرد و شکل پذیری نمونه‌ها شد. Wallace و همکاران [۷] آزمایش‌هایی را با استفاده از این میلگردها بر روی اتصالات خارجی انجام دادند. این میلگردها مانع از لغزش میلگردهای تیر شدند. Kang و همکاران [۸] پژوهش‌هایی را بر روی اتصالات خارجی انجام دادند و اثر اندازه، شکل و نحوه اتصال میلگردها را بررسی نمودند. Barbhuiya و Choudhury [۹] به بررسی اثر اندازه اتصالات تیر به ستون بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط مدل‌های آزمایشگاهی، در سه نوع اتصال تیر به ستون پرداختند و اثر اندازه و ابعاد نمونه را بر اساس مکانیک شکست بررسی نمودند.

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی<sup>۲</sup> (SMA) نسل جدیدی از مواد هوشمند<sup>۳</sup> می‌باشند که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. Olander [۱۰]، برای نخستین بار رفتار فوق ارتجاعی را در آلیاژ طلا - کادمیوم<sup>۴</sup> کشف کرد. Read و Chang [۱۱] در این آلیاژ تبدیل فاز برگشت پذیر را کشف کردند که اولین تبدیل فاز ثبت شده می‌باشد. Buehler و همکاران [۱۲] در آزمایشگاه تسلیحات نیروی دریایی آمریکا اثر حافظه‌داری شکلی در آلیاژ نیکل و تیتانیوم<sup>۵</sup> را کشف کردند و این آلیاژ را نایتینول<sup>۶</sup> نامیدند. تاکنون انواع مختلف آلیاژهای حافظه‌دار شکلی شناخته شده‌اند که نایتینول نسبت به بقیه شناخته شده‌تر می‌باشد و در کاربردهای مهندسی بیشتر بکار رفته است. استفاده از این آلیاژها در سازه‌ها دارای مزایا و ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه<sup>۷</sup> و قابلیت جذب انرژی<sup>۸</sup> زیادی را دارا می‌باشند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که این مواد تغییر فاز منحصر به فردی را با تغییر در تنش خارجی یا دمای محیط از خود نشان می‌دهند [۱۳]. SMAها دارای دو فاز آستنیت<sup>۹</sup> و مارتنزیت<sup>۱۰</sup> می‌باشند. این دو فاز در شرایط دمایی مختلف به صورت متفاوت عمل می‌کنند. فاز آستنیت این مواد در دمای بالا و تنش پایین پایدار است در حالی که فاز مارتنزیت در دمای پایین و تنش بالا پایدار است. اگر ماده در حالت آستنیت باشد پس از باربرداری کرنش پسماند بجای نمی‌گذارد و این بیانگر رفتار فوق‌الاستیک این آلیاژ می‌باشد (شکل الف). اما اگر ماده در حالت مارتنزیت باشد، کرنش پسماند بجای گذارده که می‌توان با اعمال دما، کرنش پسماند را به صفر رساند. در این حالت آلیاژ حافظه‌دار، رفتار حافظه شکلی از خود نشان می‌دهد (شکل ب). در شکل ۱ رفتار تنش-کرنش و تبدیلات فازی<sup>۱۱</sup> آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نشان داده شده است [۱۴].

<sup>1</sup> Headed Bar

<sup>2</sup> Shape Memory Alloy(SMA)

<sup>3</sup> Smart Materials

<sup>4</sup>Au-Cd

<sup>5</sup>Ni-Ti

<sup>6</sup> Nitinol (Ni and Ti are the atomic symbols for Nickel and Titanium)

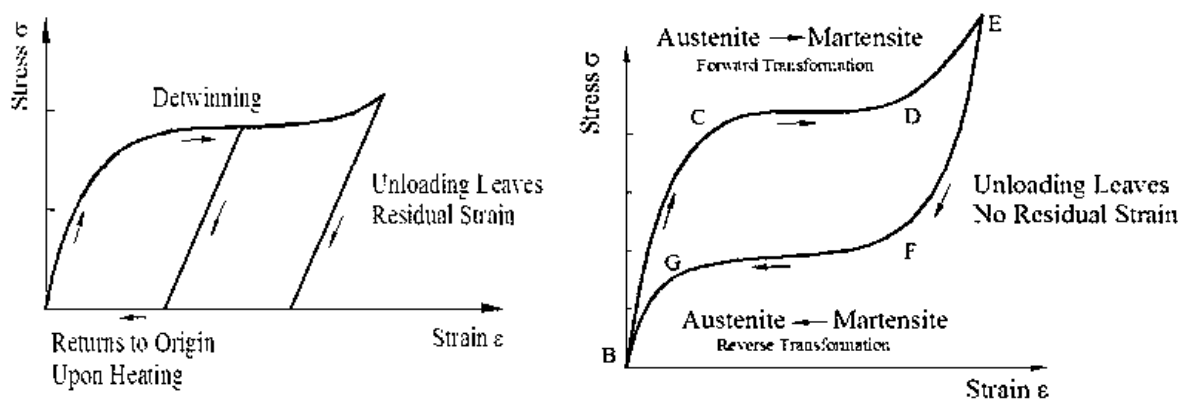
<sup>7</sup> Recentering

<sup>8</sup> Energy Dissipation

<sup>9</sup> Austenite

<sup>10</sup> Martensite

<sup>11</sup> Phase Transformations



ب: رفتار حافظه دار شکلی

الف: رفتار فوق الاستیک

شکل ۱: نمودار تنش کرنش آلیاژهای حافظه دار شکلی [۱۴]

Cozzarelli و Graesser [۱۵] به استفاده از این آلیاژها به عنوان میراگر زلزله پرداختند. Sakai و همکاران [۱۶] و Otero [۱۷] آزمایش‌هایی را بر روی تیرهای بتنی با استفاده از این مصالح انجام دادند. تیرهای مورد استفاده پس از ترک‌های بزرگ به کمک میلگردهای SMA شکل اولیه خود را بازیابی کردند. Czaderski و همکاران [۱۸] رفتار تیر بتنی مسلح شده با استفاده از میلگردهایی از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند و با تیر بتن مسلح با میلگردهای فولادی مقایسه کردند. در یک نمونه با میلگردهای فولادی و در نمونه دیگر از میلگردهای SMA، در ناحیه مفصل پلاستیک تیر و میلگردهای فولادی در سایر نواحی استفاده شد. نتیجه آزمایشگاهی حاکی از آن بود که قاب‌های مسلح شده با میلگردهای SMA، قابلیت بازیابی بیشتر تغییر مکان‌ها پس از جاری شدن، حتی پس از زمین لرزه‌های شدید را دارا بودند. Saidi و Wang [۱۹] به انعطاف پذیری بالای این مصالح در بارهای لرزه‌ای پرداختند. Soroushian و همکاران [۲۰] از میلگردهای SMA جهت تقویت تیرهای اصلی پل استفاده کردند. Wilson و Wesolowsky [۲۱] رفتار هیسترسیس<sup>۱۲</sup> مناسب و تحمل کرنش‌های حدود ۸ درصد و مقاومت بالا در برابر فرسودگی و خوردگی در میلگردهای SMA را ارائه نمودند. Dolce و همکاران [۲۲] بهبود و بازسازی رفتار قاب‌های موجود و استفاده از کابل‌های آلیاژهای حافظه دار شکلی را در سازه‌های بتنی پیش تنیده مورد بررسی قرار دادند. Maji و Negret [۲۳] استفاده از این میلگردها را از طریق کاربرد نیروهای اصلاحی پس کشیدگی برای تقویت سازه‌ها مطالعه کردند. Inaudi و همکاران [۲۴] به مطالعات آزمایشگاهی در مورد کنترل جابجایی سازه‌ها با استفاده از این مصالح پرداختند. DesRoches و همکاران [۲۵] به کاربرد این آلیاژها در کنترل سازه‌ها پرداختند. Wang [۲۶] از SMA در محل مفصل پلاستیک ستون‌های بتنی استفاده نمودند. Ocel و همکاران [۲۷] از این مصالح در محل اتصال تیر به ستون بتنی استفاده کردند. Wilde و همکاران [۲۸] به ارزیابی پل‌های بزرگ‌راهی دارای جداسازهای ساخته شده با SMA پرداختند. آنان مقایسه‌ای بین عملکرد دو نوع جداساز لرزه‌ای انجام دادند. نوع اول جداساز لرزه‌ای هوشمند به همراه میلگردهای SMA بود. نوع دوم جداساز با تکیه‌گاه لاستیکی و قیدهای کنترل کننده تغییر مکان بود. مدل‌های در نظر گرفته شده تحت رکوردهای زلزله کوبه با شدت زلزله‌های شدید، متوسط و ضعیف تحلیل گردید. نتایج حاکی از آن بود که در سطح تحریک ضعیف، عملکرد سیستم SMA بهتر بود و تغییر مکان نسبی بین عرشه و پایه پل ایجاد نمی‌شد. در سطح تحریک متوسط، SMA وارد قسمت اولیه فاز مارتنزیت می‌شد و تغییر مکان حداکثر سیستم با SMA کمتر بود. در سطح تحریک شدید، SMA بطور کامل وارد فاز مارتنزیت شد. در ابتدا تغییر مکان هر دو سیستم یکسان بود ولی در ادامه چون مارتنزیت دچار سخت شدگی شد، تغییر مکان سیستم SMA کاهش یافت.

تعدادی از محققان مانند Megget و Park [۲۹] تلاش‌های قابل توجهی را برای بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات بتنی اختصاص دادند. Alam و همکاران [۳۰] در پژوهشی به کاربرد SMA‌ها در انواع سازه‌ها پرداختند. این مصالح می‌توانند به صورت‌های مختلفی مانند میلگرد، سیم، ورق و حلقه به کار روند. Alam و همکاران [۳۱] در پژوهشی اشاره به هزینه بالای SMA‌ها به عنوان عاملی مهم برای

<sup>12</sup> Hysteretic Behavior

استفاده گسترده آن در صنعت ساخت و ساز اشاره کردند. با توجه به هزینه بالای این مصالح استفاده از آنها در سازه‌ها باید به مقدار قابل توجهی کاهش یابد و در نقاط بحرانی سازه‌ها استفاده شوند. Alam و همکاران [۳۲] در پژوهشی به ویژگی‌های اساسی SMA به کمک دستگاه‌های حسگر با تاکید بر خواص کنترلی آنها اشاره نمودند و به کاربرد این مصالح در پل‌های هوشمند پرداختند. Alam و همکاران [۳۳] همچنین به کاربردهای آلیاژهای حافظه دار شکلی در مهندسی زلزله پرداختند و ویژگی‌های اساسی این مصالح را با تاکید بر عوامل موثر بر خواص آنها بررسی نمودند. منحنی‌های جابجایی بارگذاری چرخه ای در نمونه با میلگردهای SMA از نظر حفظ جابجایی پسماند در اتصال پس از باربرداری، عملکرد بهتری را در مقایسه با نمونه با میلگردهای فولادی نشان داد. Alam و همکاران [۳۴] به تحلیل عددی دو نمونه اتصال تیر به ستون در یک قاب بتنی که بر اساس استانداردهای کانادا (CSA) <sup>۱۳</sup> طراحی شده بود پرداختند. در یک نمونه از میلگردهای فولادی در تیر و در نمونه دیگر با استفاده از میلگردهای SMA در محل مفصل پلاستیک تیر و میلگردهای فولادی در سایر قسمت‌های تیر اتصال استفاده شد. نتایج تحلیلی منحنی‌های جابجایی بارگذاری چرخه‌ای در نمونه با میلگردهای SMA از نظر حفظ جابجایی پسماند در اتصال پس از باربرداری، عملکرد بهتری را در مقایسه با میلگردهای فولادی نشان داد. Alam و همکاران [۳۵] در پژوهش دیگری به بررسی رفتار اتصال خارجی بتن مسلح تیر به ستون پرداختند و به مقایسه رفتار لرزه‌ای اتصال به کمک نتایج آزمایشگاهی و آنالیز تحلیلی پرداختند. Alam و همکاران [۳۶] رفتار لرزه‌ای قاب بتنی مسلح شده با SMA را در دو قاب هشت طبقه بتنی مورد بررسی قرار دادند. در یکی از قاب‌ها از میلگرد فولادی استفاده شده بود و در دیگری از SMA در ناحیه مفصل پلاستیک تیر و میلگرد فولادی در سایر نواحی استفاده گردید. هر دو قاب در نواحی زلزله خیز شدید و در غرب کانادا واقع شده بودند و تحت ۱۰ زمین لرزه متفاوت مورد تحلیل قرار گرفتند. رفتار قاب‌ها با توجه به تغییر مکان جانبی درون سازه‌ای، تغییر مکان جانبی بالاترین طبقه، تغییر مکان جانبی پسماند درون سازه‌ای و بالاترین طبقه تحت بررسی قرار گرفتند. نتیجه آزمایشگاهی حاکی از آن بود که قاب‌های مسلح شده با SMA قابلیت بازیابی بیشتری مکان‌ها پس از جاری شدن این میلگردها را در زمین لرزه‌های شدید دارند. Alam و همکاران [۳۷] به بررسی رفتار قاب‌های سه، شش و هشت طبقه با سه نوع میلگردگذاری طولی در تیرها پرداختند. در حالت اول در تمام تیرها از میلگردهای فولادی استفاده شد. در حالت دوم در تمام تیرها از میلگردهای SMA استفاده گردید و در حالت سوم در تمام تیرها در نقاط مفصل پلاستیک از میلگردهای SMA و در سایر نقاط از میلگردهای فولادی استفاده شد. برای تمامی حالت‌ها، برای میلگردهای ستون‌ها از میلگردهای فولادی استفاده شد. Youssef و همکاران [۳۸] در پژوهشی دو نمونه اتصال تیر به ستون را در یک قاب بتنی که بر اساس استانداردهای کانادا طراحی شده بود مورد آزمایش قرار دادند. در یک نمونه از میلگردهای فولادی در تیر و در نمونه دیگر با استفاده از میلگردهای SMA در محل مفصل پلاستیک تیر و میلگردهای فولادی در سایر قسمت‌های تیر اتصال استفاده شد. تغییر مکان‌های نسبی، دوران‌ها و انرژی جذب شده در نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که اتصال با میلگردهای SMA موجب بهبود رفتار تغییر شکل پس از مرحله جاری شدن میلگردها گردید به طوری که با کمترین مقدار هزینه امکان اصلاح سازه در اثر بارهای لرزه‌ای امکان پذیر بود. Nehdi و همکاران [۳۹] در پژوهشی به بهسازی رفتار لرزه‌ای در اتصال تیر به ستون توسط میلگردهای SMA پرداختند. ابتدا در یک اتصال تیر به ستون با میلگردهای SMA در محل مفصل پلاستیک کاهش در تنش‌های پسماند مشاهده شد. نمونه فوق پس از تشکیل ترک‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط بتن مناسب برای ترمیم ترک‌ها بهسازی شد و مجدداً آزمایش گردید. نمونه دیگری با مشخصات اتصال بهسازی شده ساخته و آزمایش شد. رفتار هر دو نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای نتایج مشابهی را نشان داد. بنابراین با استفاده از بتن مناسب برای ترمیم و بهسازی اتصال با هزینه اندک می‌توان رفتاری مشابه با نمونه واقعی بدست آورد.

Parra-Montesinos و همکاران [۴۰] گزارش کردند اگر اتصالات تیر به ستون بتنی از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ساخته شود می‌توان اتصالاتی را طراحی کرد که خسارت‌های کمتری را در حین زلزله داشته باشند و نیازی به ترمیم آنها پس از زلزله نباشد. Bariola [۴۱] نشان داد که اتصالات سازه‌های بتنی برای سازه‌هایی که از نظر ارتفاع در رده سازه‌های متوسط هستند، بیشتر در اثر بار لرزه‌ای خسارت می‌بینند. Engindeniz و همکاران [۴۲] به تاثیر قابل توجه رفتار کلی اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی بتن مسلح تحت بارگذاری‌های جانبی پرداختند.

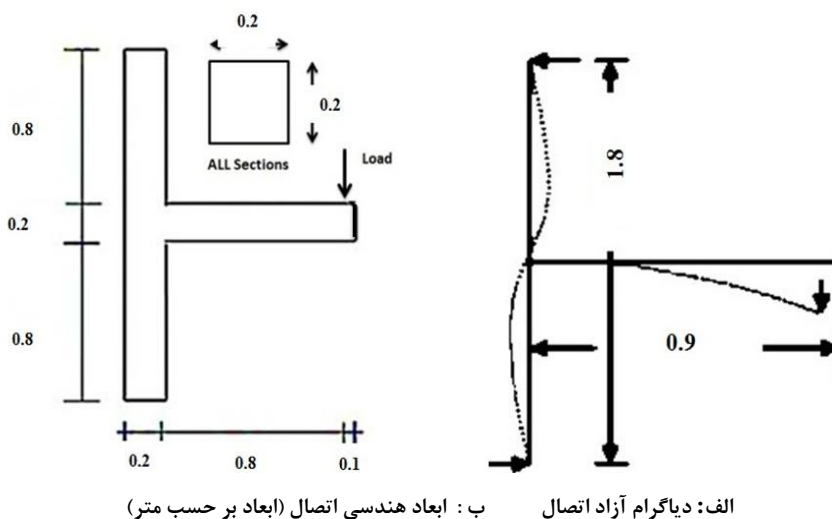
<sup>13</sup> Canadian Standard Association

در پژوهش حاضر تاثیر استفاده از میلگردهای آلیاژی حافظه‌ای شکلی در مقایسه با میلگردهای فولادی، با استفاده از دو نوع بتن با مقاومت‌های متفاوت، در اتصالات خارجی تیر به ستون بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به اثر محصور شدگی بتن توسط میلگردهای عرضی و تغییر در جزئیات میلگردگذاری، رفتار میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی با میلگردهای فولادی مقایسه شده‌اند.

## ۲- برنامه آزمایش

### ۲-۱- جزئیات نمونه‌ها

نمونه اتصال تیر به ستون شکل ۲ را می‌توان بخشی از قاب در نظر گرفت که با جدا کردن آن در نقاط عطف خمشی تیر و ستون از قاب بدست می‌آید. نقاط عطف خمشی تیرها و ستونها، لزوماً در وسط دهانه نیستند و با وجود بارهای دینامیکی در سازه‌ها موقعیت نقاط عطف تغییر می‌کند. اما این تغییر با توجه به جابجایی کم موقعیت نقاط عطف تیر و ستون تاثیر چندانی در رفتار هسته اتصال نخواهد داشت [۹]. در این پژوهش، نمونه‌های اتصال خارجی تیر به ستون بتنی از یک قاب دو بعدی با دهانه ۴ متر و ارتفاع ۳٫۶ متر انتخاب شده‌اند. نمونه‌ها با مقیاس ۱/۲ ساخته و آزمایش شدند. جزئیات اتصال به همراه دیاگرام آزاد اتصال و ابعاد هندسی آنها در شکل ۲ نشان داده شده است.



الف: دیاگرام آزاد اتصال      ب: ابعاد هندسی اتصال (ابعاد بر حسب متر)

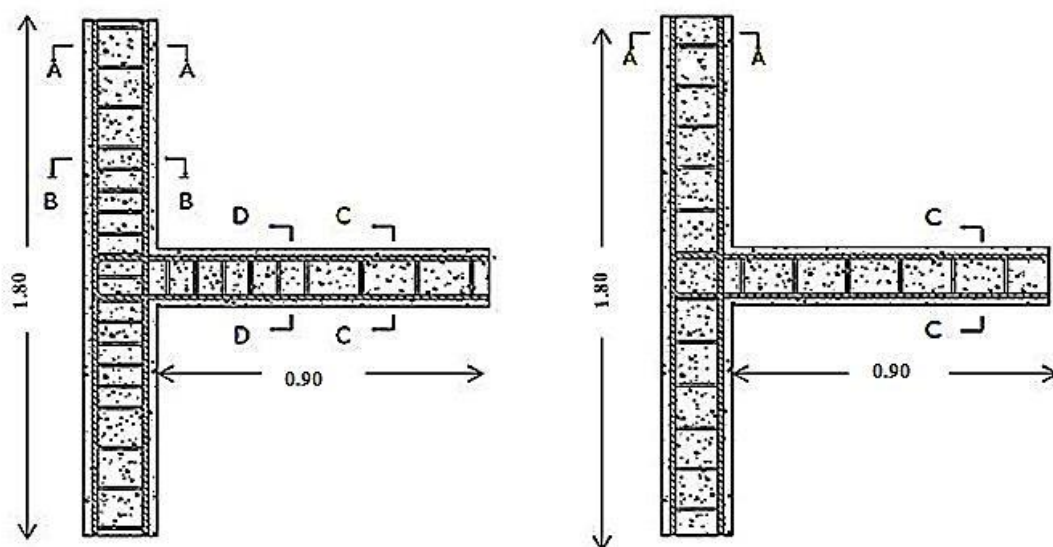
شکل ۲: جزئیات اتصال تیر به ستون خارجی

۸ نمونه اتصال خارجی تیر به ستون ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. در ۴ نمونه از میلگردهای فولادی و ۴ نمونه از میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی برای تیر استفاده شد. جهت ساخت نمونه‌ها، از دو نوع بتن با مقاومت پایین (از بتن معمولی) و بتن با مقاومت بالا (از بتن خودتراکم) استفاده شده است. از بتن خودتراکم جهت سهولت اجرا و افزایش مقاومت بتن استفاده شده است. جزئیات نمونه‌ها و علائم اختصاری برای میلگردهای فولادی و آلیاژی حافظه‌دار شکلی در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول ردیف‌های ۱ تا ۴، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای فولادی و ردیف‌های ۵ تا ۸، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی می‌باشد.

جدول ۱: جزئیات نمونه‌ها و علائم اختصاری برای میلگردهای معمولی و آلیاژی حافظه‌دار شکلی

Specimens	Abbreviations
1	<i>CONF - STEEL - C30</i>
2	<i>UNCONF - STEEL - C30</i>
3	<i>CONF - STEEL - C45</i>
4	<i>UNCONF - STEEL - C45</i>
5	<i>CONF - SMA - C30</i>
6	<i>UNCONF - SMA - C30</i>
7	<i>CONF - SMA - C45</i>
8	<i>UNCONF - SMA - C45</i>

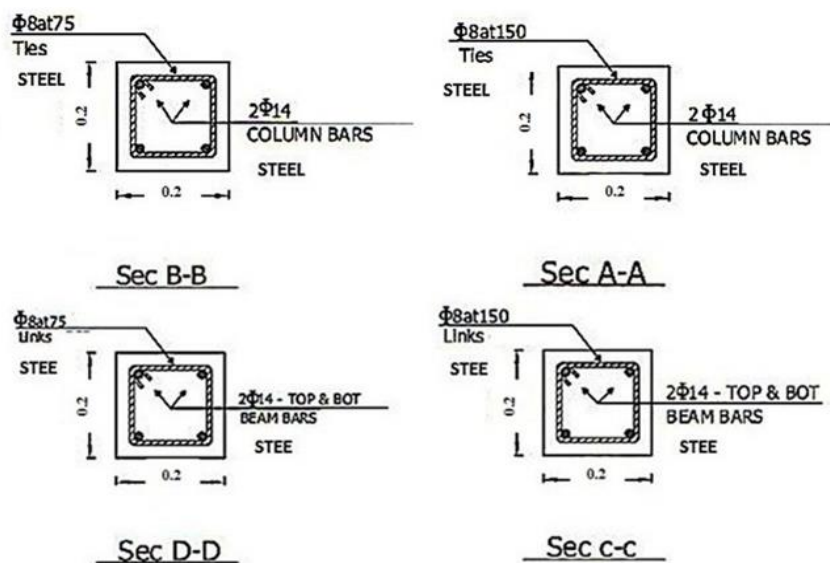
شکل های ۳ و ۴، مربوط به نمونه‌های ۱ تا ۴ با میلگردهای فولادی و شکل های ۵ و ۶، مربوط به نمونه‌های ۵ تا ۸ با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی می‌باشند. **CONF** معرف محصور شدگی اتصال است و نشان دهنده آن است که خاموت‌ها در تیرها و ستون‌ها از بر اتصال و به فاصله  $2d$  (دو برابر عمق مقطع)، دارای فاصله ۷۵ میلیمتر می‌باشند. **UNCONF** معرف عدم محصور شدگی و نشان دهنده آن است که فاصله خاموت‌ها در تیرها و ستون‌ها در تمام نقاط به فاصله ۱۵۰ میلیمتر می‌باشد. **Steel** معرف استفاده از میلگردهای فولادی و **SMA** معرف استفاده از میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی در تیر اتصال است. **C45** و **C30** به ترتیب معرف استفاده از بتن معمولی و بتن خودمتراکم با مقاومت‌های فشاری استوانه‌ای ۳۰ و ۴۵ مگاپاسگال در اتصال است. جزئیات نمونه‌ها شامل آرایش آرماتورگذاری، مقادیر و فواصل میلگردها و مقاطع آنها در شکل های ۳ و ۴، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای فولادی و در شکل های ۵ و ۶، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی نشان داده شده است.



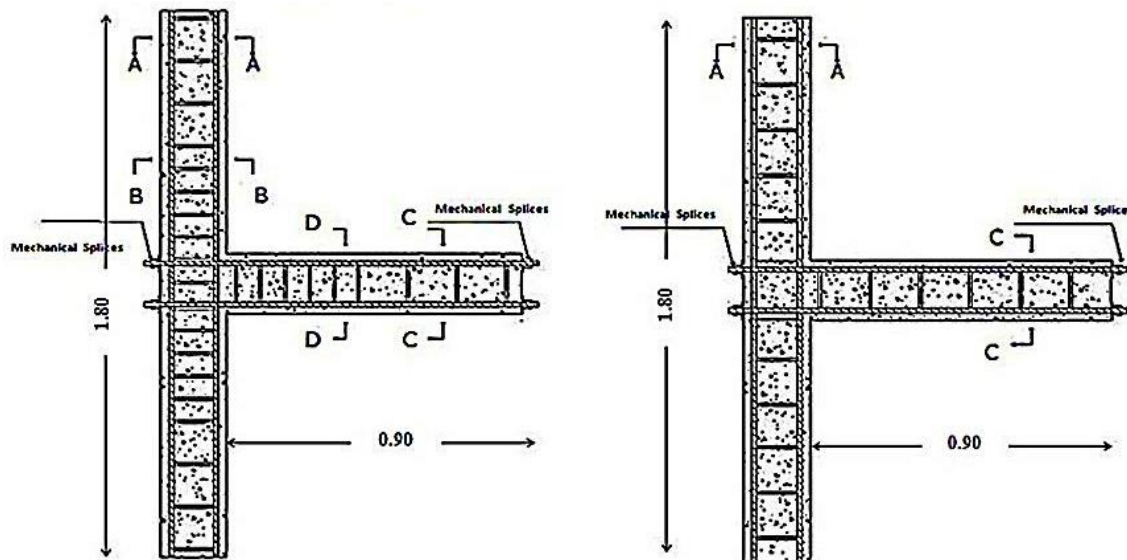
ب: برای نمونه های ۱ و ۳

الف: برای نمونه های ۲ و ۴

شکل ۳: نمونه‌های مسلح شده با میلگرد فولادی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)



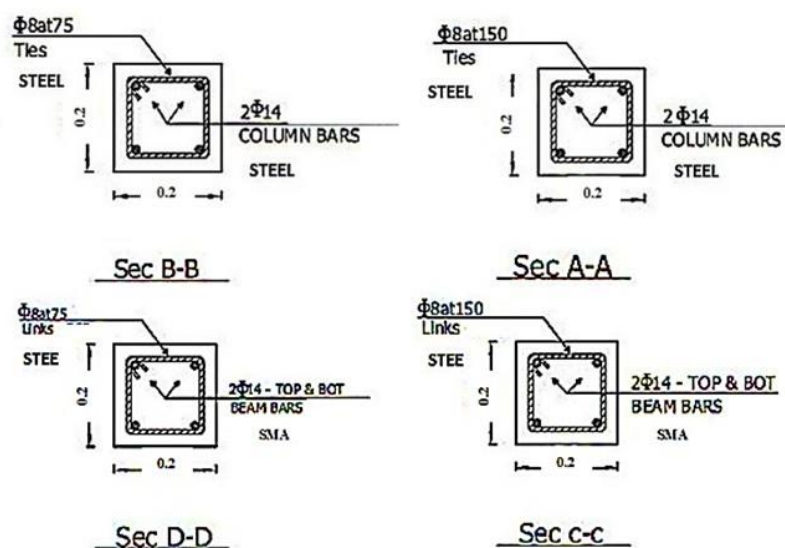
شکل ۴: مقاطع نمونه‌های مسلح شده با میلگرد فولادی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)



الف : برای نمونه های ۶ و ۸      ب: برای نمونه های ۵ و ۷

شکل ۵: نمونه‌های مسلح شده با میلگرد آلیاژی حافظه‌دار شکلی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)

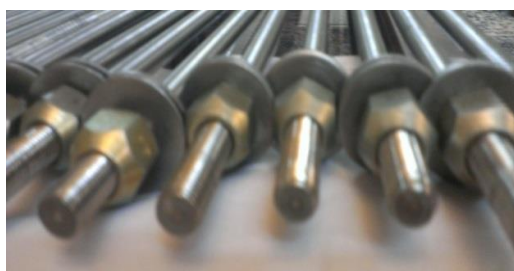




شکل ۶: مقاطع نمونه‌های مسلح شده با میلگرد آلیاژی حافظه‌دار شکلی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)

## ۲-۲- مشخصات مصالح

میلگردهای فولادی در نمونه‌ها از نوع A3 و آجدار بودند و دارای قطر ۸ (برای میلگردهای عرضی) و قطر ۱۴ میلی‌متر (برای میلگردهای طولی) بودند. میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی دارای قطر ۱۴ میلی‌متر (برای میلگردهای طولی تیر) و فاقد آج و از جنس نیتانیم بودند. بزرگترین مشکل این میلگردها هزینه بالای آنها و عدم دسترسی این مصالح در کشور می‌باشد. این میلگردها در فاز آستنیت ساخته شدند و دمای ساخت آنها بین ۱۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد بود. در هنگام آزمایش نمونه‌ها با این میلگردها با استقرار دماسنج دمای زمان ساخت آنها کنترل شد. جهت استقرار در نمونه‌ها و مهار آنها از اتصال دهنده‌های مکانیکی در انتهای این میلگردها استفاده شد. برای استقرار اتصال دهنده‌های مکانیکی در انتهای این میلگردها لازم بود که ۱۰ سانتیمتر از میلگردها توسط انجام عملیات تراشکاری رزوه شود تا امکان استقرار مناسب اتصال دهنده‌های مکانیکی میسر گردد. این اتصال دهنده‌ها موجب عدم لغزش میلگردهای SMA در نمونه‌ها - شدند. در شکل ۷ تراشکاری این میلگردها جهت رزوه نمودن و در شکل ۸ اتصال دهنده‌های مکانیکی در این میلگردها نشان داده شده است.

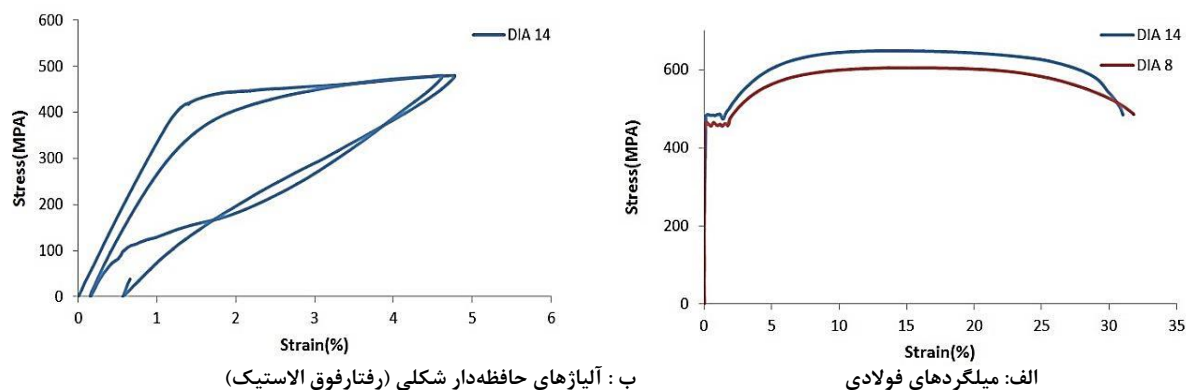


شکل ۸: اتصال دهنده‌های مکانیکی در SMA



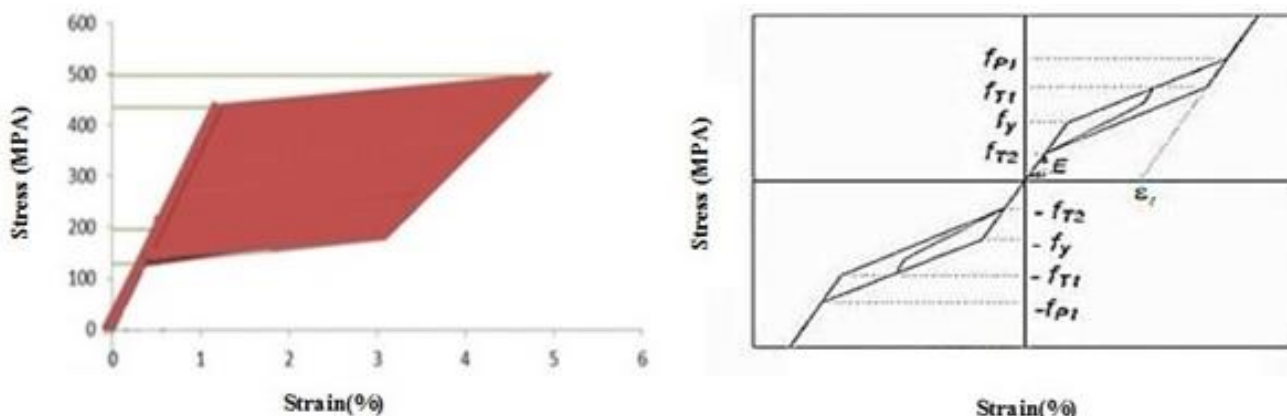
شکل ۷: تراشکاری جهت رزوه نمودن SMA

نمودار تنش- کرنش میلگردها برای میلگردهای فولادی و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، در شکل ۹ نشان شده است.



شکل ۹: نمودار تنش کرنش در میلگردها

جهت بررسی مشخصات رفتاری میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی از مدل ارائه شده توسط Sacco و Auricchio [۴۳] استفاده شده است. این مدل در شکل ۱۰ الف آمده است. در شکل ۱۰ ب این مدل بر اساس نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است. در این مدل  $f_T$  تنش آغاز رفتار آستنیت به مارتنزیت،  $f_{P1}$  تنش پایان رفتار آستنیت به مارتنزیت،  $f_{T1}$  تنش آغاز رفتار مارتنزیت به آستنیت،  $f_{T2}$  تنش پایان رفتار مارتنزیت به آستنیت،  $\epsilon_1$  کرنش استحاله<sup>۱۴</sup> مارتنزیتی (محدوده کرنش برای رفتار پایدار فوق الاستیک) می‌باشند.



شکل ۱۰: مدل رفتار فوق الاستیک میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی

با توجه به تنوع نوع و مقاومت بتن، ساخت نمونه‌ها و بتن ریزی آنها در دو مرحله انجام شد و از هر مرحله بتن ریزی، چهار نمونه استوانه‌ای گرفته شد. این نمونه‌ها همزمان با آزمایش اتصالات تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. در هر بار نمونه‌گیری، متوسط نتایج نمونه‌های استوانه‌ای به عنوان مقاومت مشخصه بتن اتصالات در نظر گرفته شده‌اند. هر یک از انواع بتن با هدف دستیابی به دو مقاومت  $f_c = 45\text{MPa}$  و  $f_c = 30\text{MPa}$  ساخته شده‌اند. در جدول ۲ و ۳ خواص مواد و جزئیات هندسی نمونه‌ها نشان داده شده است.

<sup>14</sup> Transformations Strain

جدول ۲: خواص مواد نمونه‌ها

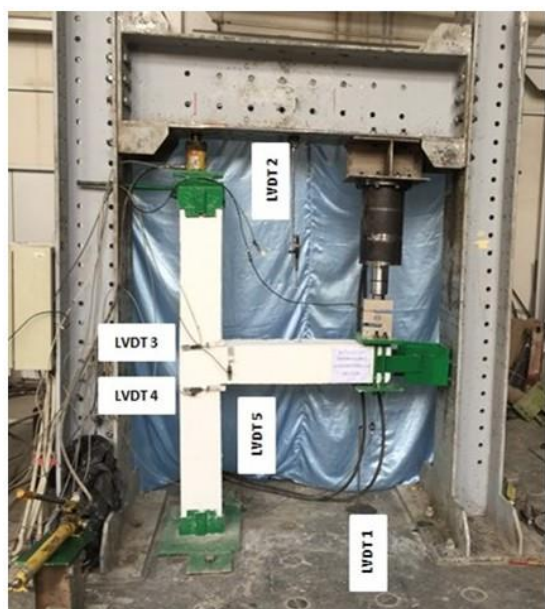
میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی		میلگردهای معمولی		جزئیات مصالح
7&8	5&6	3&4	1&2	نمونه‌ها
بتن:				
SCC	NC	SCC	NC	نوع بتن
45.4	30.1	45.4	30.1	مقاومت فشاری (MPa)
میلگردهای فولادی (طولی):				
550		484		مقاومت جاری شدن (MPa)
1100		649		مقاومت نهایی (MPa)
83		202.4		مدول الاستیسیته (GPa)
میلگرد های فولادی (عرضی):				
463		463		مقاومت جاری شدن (MPa)
605		605		مقاومت نهایی (MPa)
202.4		202.4		مدول الاستیسیته (GPa)
6.5E-5	6.5E-5	7.85E-5	7.85E-5	وزن مخصوص (N/mm <sup>3</sup> )
میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی:				
430		-	-	تنش آغاز رفتار آستنیت به مارتنزیت (MPa)
500		-	-	تنش پایان رفتار آستنیت به مارتنزیت (MPa)
200		-	-	تنش آغاز رفتار مارتنزیت به آستنیت (MPa)
120		-	-	تنش پایان رفتار مارتنزیت به آستنیت (MPa)
4		-	-	محدوده کرنش برای رفتار پایدار فوق الاستیک (%)

جدول ۳: جزئیات هندسی نمونه‌ها

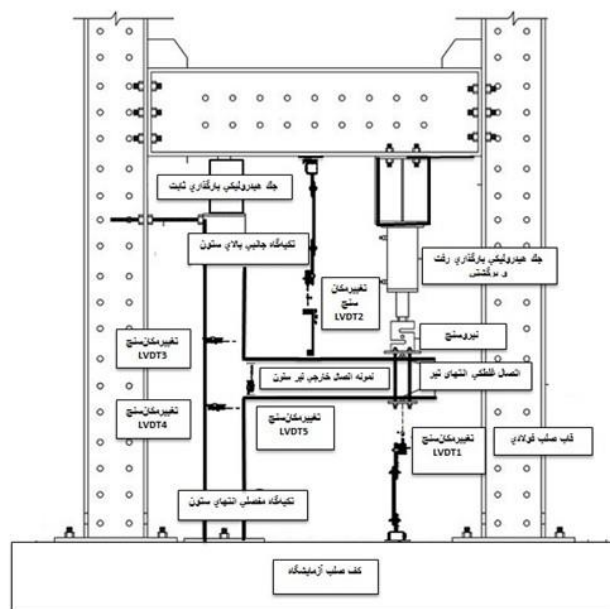
میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی		میلگردهای فولادی		جزئیات هندسی
6&8	5&7	2&4	1&3	نمونه‌ها
تیرها:				
200 × 200		200 × 200		ابعاد (mm)
4Φ14-SMA		4Φ14-Steel		میلگردهای طولی (بالا و پائین)
Φ8 @150 Steel	Φ8 @75-150 Steel	Φ8 @150 Steel	Φ8 @75-150 Steel	میلگردهای عرضی
ستون‌ها:				
200 × 200		200 × 200		ابعاد (mm)
4Φ14-Steel		4Φ14-Steel		میلگردهای طولی (در دو جهت)
Φ8 @150 Steel	Φ8 @75-150 Steel	Φ8 @150 Steel	Φ8 @75-150 Steel	میلگردهای عرضی

## ۲-۳- دستگاه آزمایش

جهت بارگذاری رفت و برگشتی در انتهای تیر از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. برای اندازه گیری اعمال بار وارد بر نمونه‌ها از یک نیروسنج<sup>۱۵</sup> با ظرفیت حداکثر ۲۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. جهت حفظ تعادل نمونه‌ها و عدم تغییر مکان-های جانبی، از صفحات فلزی مناسب در انتهای تیر و دو انتهای ستون مطابق شکل ۱۲ استفاده شد. ثبت تغییر مکان قائم انتهای تیر، توسط تغییر مکان سنج<sup>۱۶</sup> شماره ۱ که متصل به رایانه بود انجام شد. جهت بررسی رفتار اتصال در فاصله دو برابر عمق مقطع (2h) در جهت قائم از تغییر مکان سنج شماره ۲، بر روی تیر استفاده شد. در این پژوهش آزمایشگاهی، مقدار تغییر مکان قائم تیر اتصال  $\Delta_2$ ، در ناحیه بحرانی تیر (به فاصله 2h از برهسته اتصال) توسط LVDT2 در طول آزمایش توسط انتقال به رایانه برداشت شد. همچنین جهت محاسبه تغییر مکان در جهت قائم گره اتصال از تغییر مکان سنج شماره ۵ بر روی تیر و جهت تعیین دوران گره اتصال از تغییر مکان سنج‌های شماره ۳ و ۴، بر روی ستون استفاده شده است. برداشت تغییر مکان قائم  $\Delta_5$  توسط LVDT5 نصب شده در برهسته اتصال و تغییر مکان‌های افقی  $\Delta_3$  و  $\Delta_4$  توسط LVDT3 و LVDT4 نصب شده در بر ستون انجام گردید. شکل ۱۱ جزئیات دستگاه آزمایش و شکل ۱۲ دستگاه آزمایش را به همراه تغییر مکان سنج‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: دستگاه آزمایش به همراه تغییر مکان سنج‌ها



شکل ۱۱: جزئیات دستگاه آزمایش

بارگذاری رفت و برگشتی<sup>۱۷</sup> به صورت کنترل تغییر مکان<sup>۱۸</sup> به نمونه اعمال شده است. تغییر مکان نسبی<sup>۱۹</sup> اعمال شده روی تیر اتصال، براساس تغییر شکل جانبی اتصال تیر به ستون مطابق شکل ۱۳ محاسبه شده است. شکل‌های الف و ب و ۱۳ ب به ترتیب تغییر شکل یافته‌ی اتصال تیر- ستون خارجی در یک قاب خمشی چند طبقه تحت بار جانبی را در نمونه آزمایش و در سازه ایده‌آل نشان می‌دهند.  $\theta$  زاویه جابجایی نسبی بین طبقه‌ای، حاصل تقسیم  $\delta_{col}$  (جابجایی نسبی طبقه)، بر H (ارتفاع ستون)، تعریف شده است. در حالتی که دوران جسم آزاد تیر امکان پذیر باشد، زاویه جابجایی نسبی را می‌توان با استفاده از تغییر مکان قائم نوک تیر محاسبه کرد. با توجه به بازوی ۹۰۰ میلیمتری اعمال بار، تغییر مکان انتهای تیر برای رسیدن به تغییر مکان نسبی برای هر ۱ درصد تغییر مکان نسبی، برابر ۹ میلیمتر خواهد بود.

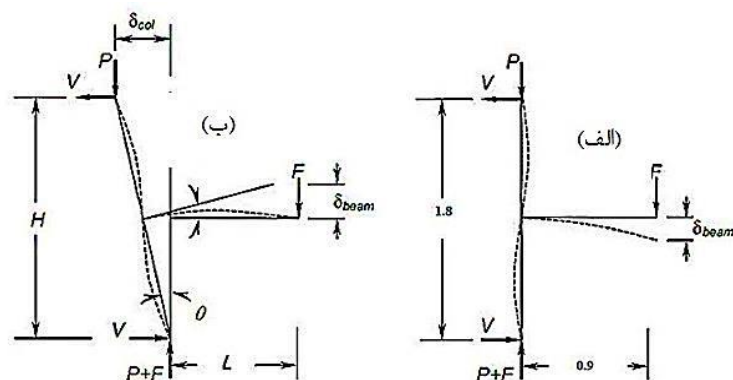
<sup>15</sup> Load cell

<sup>16</sup> LVDT (Linear Variable Differential Transforme)

<sup>17</sup> Cyclic Load

<sup>18</sup> Displacement Control

<sup>19</sup> Drift

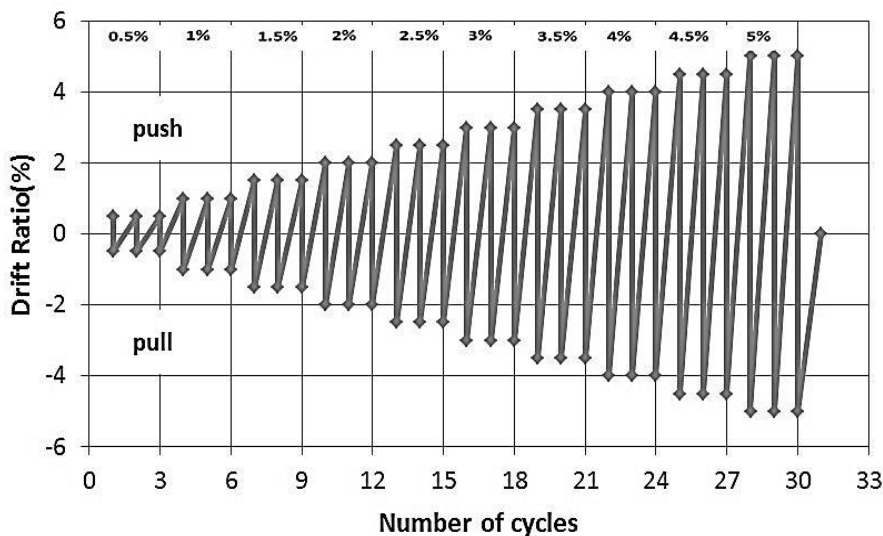


$$\text{Drift} = \theta = \frac{\delta_{col}}{H} = \frac{\delta_{beam}}{L}$$

(الف): در نمونه آزمایش (ب): در سازه ایده آل

شکل ۱۳: نحوه محاسبه تغییر مکان نسبی انتهای تیر (ابعاد بر حسب متر)

به منظور شبیه سازی نیروی زلزله در نمونه ها، از بارگذاری رفت و برگشتی مطابق شکل ۱۴ با چرخه های محدود استفاده شده است. بارگذاری در دو مرحله به سازه اعمال گردید. در مرحله نخست بار تا لحظه ترک خوردگی نمونه به صورت کنترل بار<sup>۲۰</sup> وارد گردید و رفتار نمونه در حالت الاستیک ثبت شد و پس از آن تا انتهای آزمایش، بار به صورت کنترل تغییر مکان تا تغییر مکان نسبی ۵ درصد به نمونه ها اعمال شد. مقدار نیروی محوری اعمال شده به ستون معادل  $0.10F_c A_g$  اعمال شد و در تمام چرخه های بارگذاری کنترل گردید تا در صورت کاهش به علت تغییر شکل نمونه، اصلاح لازم جهت تصحیح بار صورت گیرد.

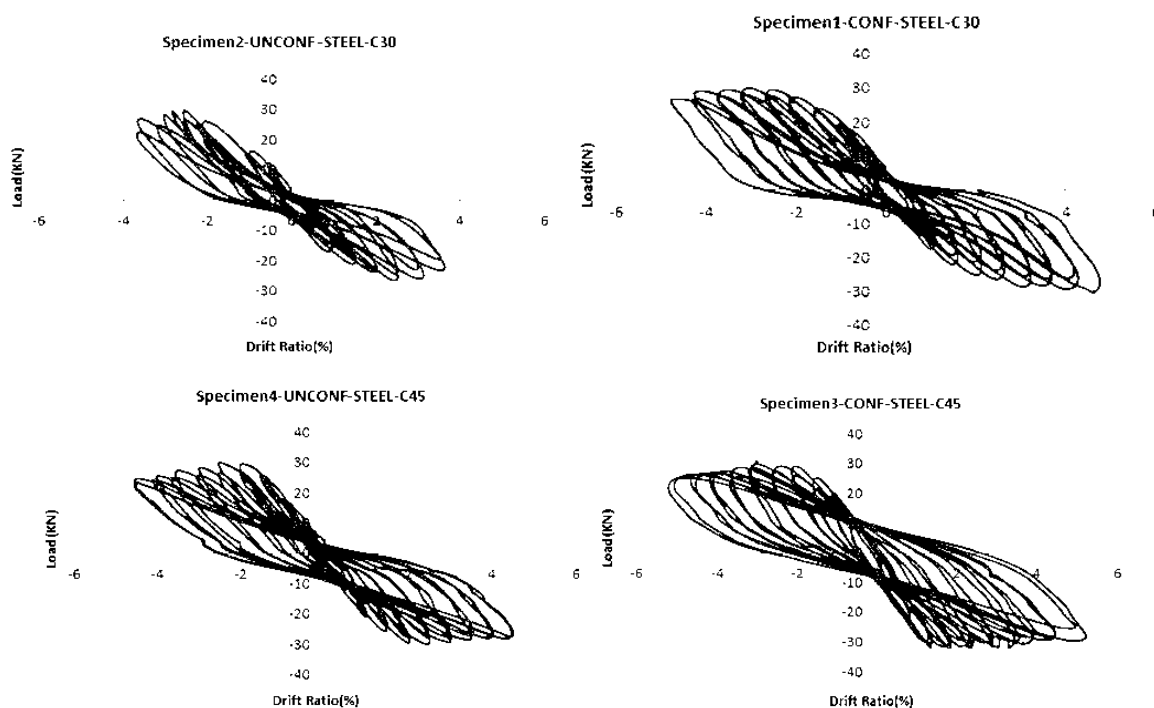


شکل ۱۴: الگوی بارگذاری رفت و برگشتی

## ۳- نتایج آزمایش

## ۳-۱- نمودارهای بار- تغییر مکان نسبی در نمونه‌ها

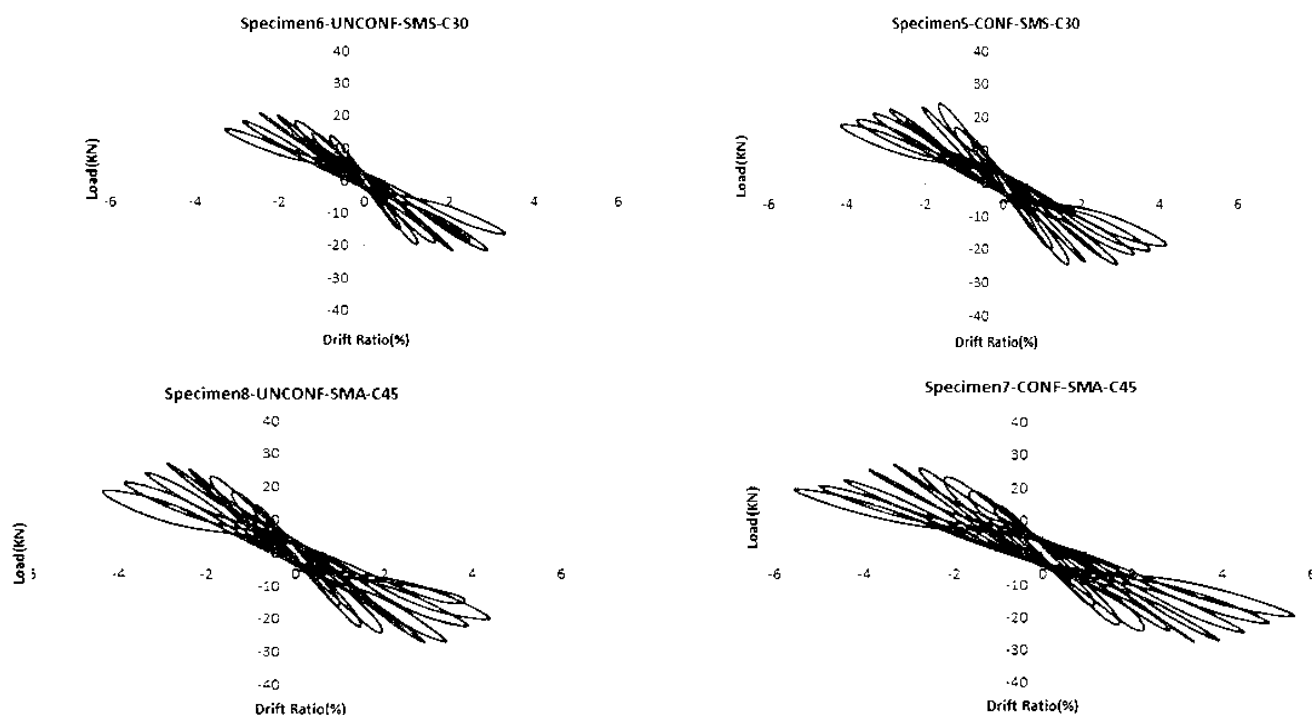
نمودارهای بار- تغییر مکان نسبی انتهای تیر در نمونه‌های با میلگردهای فولادی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مقدار تغییر مکان نسبی در این نمودارها بر حسب درصد بیان شده است. در نمونه‌های ۱ الی ۴ (شکل ۱۵) سختی و مقاومت در حلقه‌های پسماند در هر چرخه بارگذاری تغییر کرده است و در یک تغییر مکان نسبی مشخص، بار انتهای تیر در نمونه‌ها به بیشترین مقدار خود رسیده و این مقدار در چرخه‌های بعدی کاهش می‌یابد. ظرفیت باربری نهایی نمونه‌ها در محدوده ۳۰ کیلو نیوتن بوده و در تغییر مکان نسبی ۲ تا ۳ درصد رخ داده اند. مقایسه حلقه‌های پسماند نشان می‌دهد که مقدار جمع شدگی مرکزی<sup>۲۱</sup> در نمونه با مقاومت بالا و محصور شده قابل ملاحظه نیست (نمونه ۳). مقدار جمع شدگی مرکزی در نمونه با مقاومت معمولی و محصور نشده بیشترین مقدار را دارا می‌باشد (نمونه ۲). نمودارهای بار- تغییر مکان نسبی انتهای تیر در تمام نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در نمونه‌های ۵ الی ۸ سختی و مقاومت در هر چرخه بارگذاری تغییر کرده است اما تغییرات آن قابل ملاحظه نیست. گرچه در یک تغییر مکان نسبی مشخص، بار انتهای تیر در نمونه‌ها به بیشترین مقدار خود رسیده است و سپس این مقدار در چرخه‌های بعدی به مرور تقلیل یافته است. ظرفیت باربری نهایی در تمام نمونه‌ها در محدوده ۲۴ تا ۲۸ کیلو نیوتن بوده و در تغییر مکان نسبی ۲ تا ۳٫۵ درصد رخ داده اند. از مقایسه حلقه‌های پسماند می‌توان نتیجه گرفت که مقدار جمع شدگی مرکزی<sup>۲۲</sup> در نمونه با مقاومت بالا و محصور شده کمتر (نمونه ۷) و در نمونه با مقاومت معمولی و محصور نشده بیشترین مقدار را دارا می‌باشد (نمونه ۶).



شکل ۱۵: نمودار بار- تغییر مکان نسبی انتهای تیر در نمونه‌های با میلگردهای فولادی

<sup>21</sup> Pinching

<sup>22</sup> Pinching



شکل ۱۶: نمودار بار- تغییر مکان نسبی انتهای تیر در نمونه های با میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی

نمونه های ۵ تا ۸ (شکل ۱۶) با میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی نشان می دهند که در تمام نمونه ها با توجه به رفتار فوق الاستیک این مصالح مقدار جابجایی پسماند نمونه ها، بسیار کمتر از مقدار جابجایی پسماند در نمونه های با میلگردهای فولادی است و در این اتصالات، نمونه ها پس از تحمل تغییر شکل های پلاستیک قابل توجه، قابلیت بازگشت به شکل اولیه خود را دارند. در جدول ۴ خلاصه نتایج آزمایش نمونه ها نشان داده شده اند. در این جدول  $f_c'$  مقاومت بتن مصرفی،  $P_u$  بار نهایی،  $P_y$  بار نظیر تسلیم میلگردهای طولی تیر و  $\delta_y$  و  $\delta_u$  تغییر مکان نسبی متناظر با آنها می باشند. جهت تعیین مقادیر بارهای نهایی و تسلیم و تغییر مکان های نسبی متناظر آنها بارگذاری چرخه ای در تمام نمونه ها در انتهای تیر اعمال گردید. سپس انتقال داده ها به رایانه انجام شد و با استفاده از برنامه اکسل مقادیر فوق محاسبه شده اند.

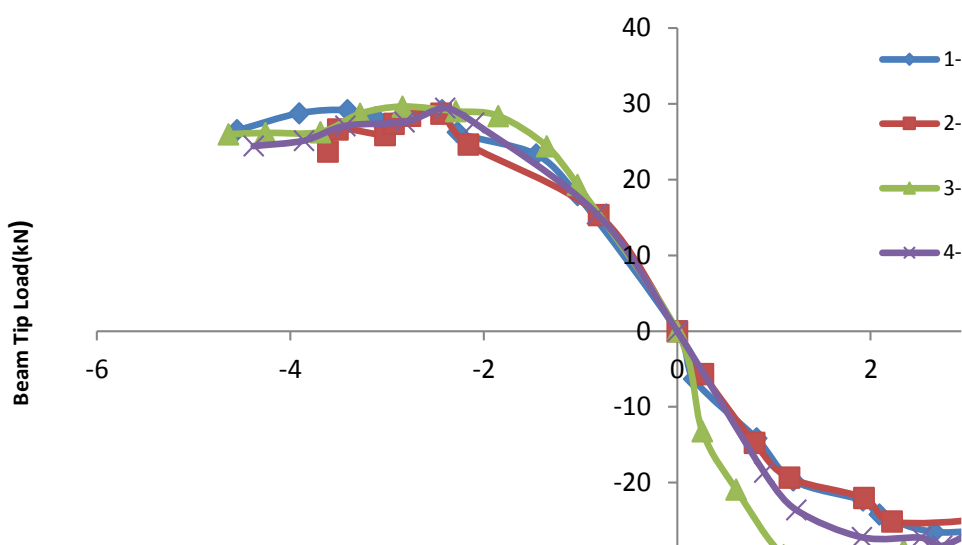
جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایش نمونه ها با میلگردهای فولادی و میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی

specimens	$f_c'$ (MPa)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (%)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (%)
1 - CONF - STEEL - C30	30	18.51	0.88	29.74	2.99
2 - UNCONF - STEEL - C30	30	16.50	0.83	26.52	2.46
3 - CONF - STEEL - C45	45	19.62	1.04	30.73	3.01
4 - UNCONF - STEEL - C45	45	19.22	0.90	29.88	2.50
5 - CONF - SMA - C30	30	13.23	1.47	24.59	2.73
6 - UNCONF - SMA - C30	30	12.43	1.38	20.72	2.30
7 - CONF - SMA - C45	45	13.65	1.52	27.45	3.05
8 - UNCONF - SMA - C45	45	13.57	1.51	27.26	3.03

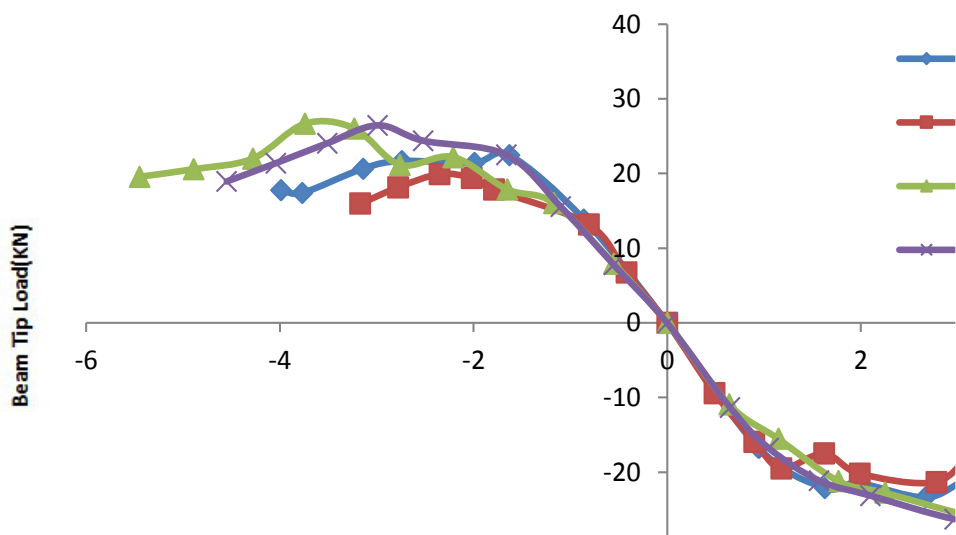


## ۳-۲- پوش منحنی‌های بار- تغییر مکان نسبی

نمودار پوش منحنی‌های بار- تغییر مکان نسبی<sup>۲۳</sup> با متصل کردن نقاط جابجایی نسبی حداکثر هر سطح جابجایی نسبی رسم شده است. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نمودار پوش منحنی‌های بار- تغییر مکان نسبی را در نمونه‌های با میلگرد فولادی و میلگرد آلیاژی حافظه‌دار شکلی نشان می‌دهند. آیین‌نامه ACI 374.1-05 [۴۴] برای پذیرش اتصال به عنوان عضوی از یک قاب خمشی در شرایط لرزه‌ای و بدست آوردن عملکرد رضایت‌بخش الزاماتی را مطرح می‌کند. طبق این آئین‌نامه، جهت تامین معیار شکست در سومین چرخه تکرار جابجایی نسبی ۳٫۵ درصد، حداکثر نیروی اعمالی در هر جهت بارگذاری نباید کمتر از ۷۵ درصد حداکثر مقاومت جانبی در همان جهت باشد. نسبت انرژی جذب شده نسبی نباید کمتر از ۱٫۲۵ باشد و سختی سکانتی<sup>۲۴</sup> حدود صفر (سختی سکانتی بین جابجایی نسبی  $-۰/۳۵$  تا  $+۰/۳۵$  بر حسب درصد) نباید کمتر از ۰/۰۵ سختی اولیه در اولین چرخه در همان جهت باشد. با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ و کنترل معیارهای پذیرش آیین‌نامه ACI 374.1-05، رفتار لرزه‌ای نمونه‌ها ارزیابی گردید و مشخص شد عملکرد نمونه‌ها در حد قابل قبول می‌باشد.



شکل ۱۷: پوش نمودارهای بار- تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگردهای فولادی



شکل ۱۸: پوش نمودارهای بار- تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی

<sup>23</sup> Load-Story Drift Envelope

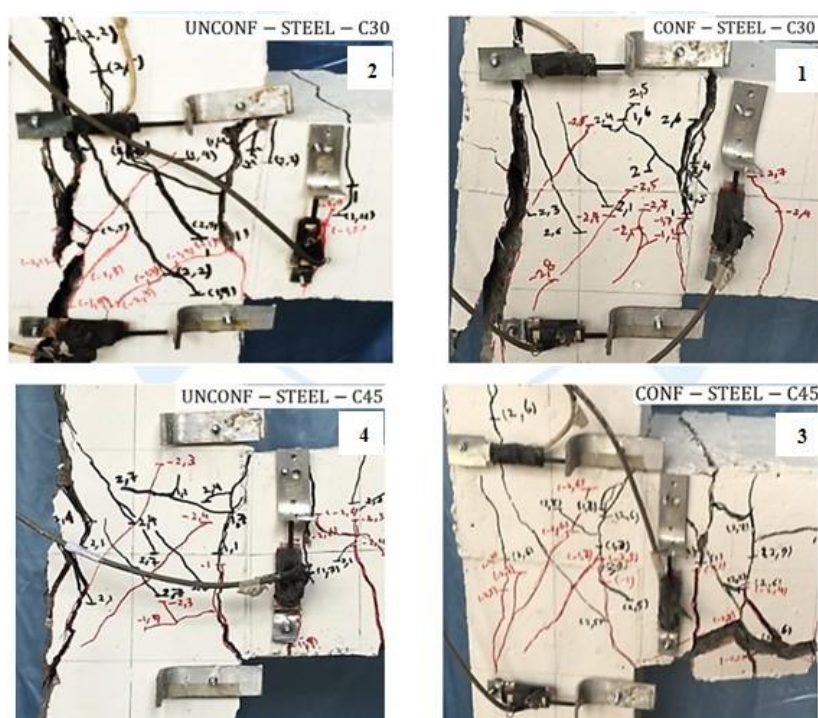
<sup>24</sup> Secant Stiffness



## ۴ - تحلیل نتایج آزمایش

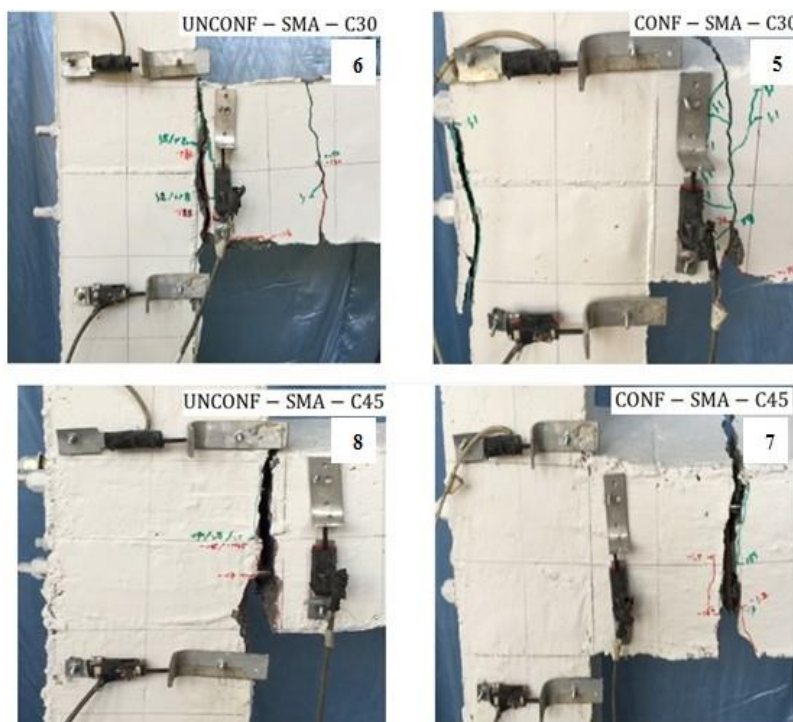
## ۴-۱- الگوهای ترک خوردگی

الگوهای ترک خوردگی<sup>۲۵</sup> در تغییر مکان نسبی ۵ درصد جهت نمونه‌های با میلگردهای فولادی در شکل ۱۹ و برای نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود در اتصال تیر به ستون با میلگردهای فولادی، در نمونه با بتن معمولی محصور شده (نمونه ۱) و محصور نشده (نمونه ۲) شکست برشی در هسته اتصال ایجاد شده است. با افزایش مقاومت بتن در نمونه‌های محصور شده (نمونه ۳) و محصور نشده (نمونه ۴) شکست در خارج از هسته اتصال به صورت خمشی در تیر صورت گرفته است. عرض ترک‌ها در نمونه‌های محصور شده با بتن‌های معمولی و مقاومت بالا (نمونه‌های ۱ و ۳) نسبت به نمونه‌های محصور نشده (نمونه‌های ۲ و ۴) کمتر است.



شکل ۱۹: الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های با میلگردهای فولادی

<sup>25</sup> Cracking Patterns



شکل ۲۰: الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی

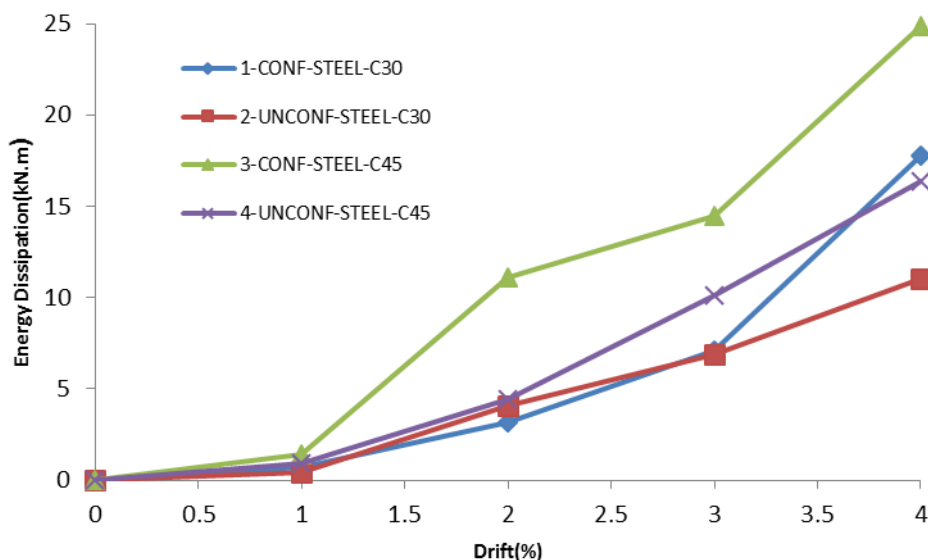
همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود نمونه‌های ۶ و ۸ با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی، با بتن‌های معمولی و مقاومت بالا، ترک‌ها در هسته اتصال قابل ملاحظه نبودند و با افزایش بار چرخه‌ای، شکست خارج از هسته اتصال به صورت خمشی در تیر ایجاد گردید. همچنین در نمونه‌های ۵ و ۷ در بتن‌های معمولی و مقاومت بالا افزایش محصور شدگی تیر باعث دور شدن محل شکست در تیر از هسته اتصال شد. کاهش عرض ترک برای نمونه‌های محصور شده قابل ملاحظه بود.

#### ۴-۲- قابلیت جذب انرژی

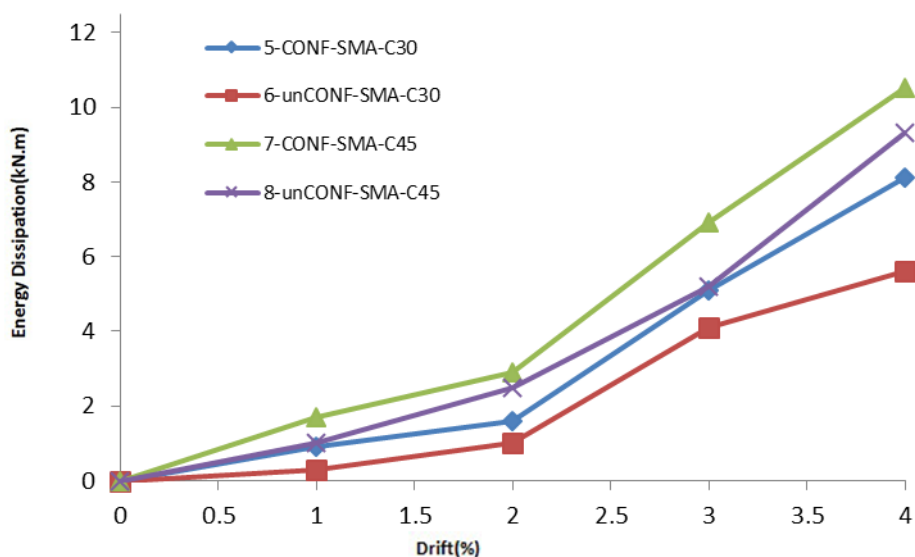
قابلیت جذب انرژی از مهم‌ترین عامل‌ها در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. هرچه سازه بیشتر بتواند انرژی زلزله را بدون فروریزش جذب کند، شانس بیشتری برای دوام آوردن در زلزله خواهد داشت. ظرفیت انرژی سازه باید بیشتر از تقاضای انرژی باشد. در نمودارهای ۲۱ و ۲۲ انرژی تجمعی جذب شده در برابر تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگرد فولادی و آلیاژی حافظه‌دار شکلی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های با میلگرد فولادی، حدود دو برابر نمونه‌های با میلگرد آلیاژی حافظه‌دار می‌باشد. علت آن بیشتر بودن سطوح محصور شده در چرخه‌های هیسترسیس در این نمونه‌ها است. بالا بودن مقاومت فشاری بتن و محصور شدگی نمونه را می‌توان دلیلی بر توانمندی نمونه در جذب بیشتر انرژی و جمع شدگی کمتر آن دانست [۴۵]. کمترین مقدار قابلیت جذب انرژی در این نمونه‌ها، در نمونه ۲ رخ داده است که دارای بیشترین جمع شدگی در چرخه‌ها بوده و دارای کمترین سطح در حلقه‌های پسماند می‌باشد. افزایش مقاومت بتن موجب بهبود در حلقه‌های پسماند شده و بیشترین جذب انرژی در نمونه ۳ اتفاق افتاده است.

قابلیت جذب انرژی در نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی، رفتاری مشابه نمونه‌های با میلگردهای فولادی داشته است ولی نسبت به نمونه‌های با میلگرد فولادی کمتر است. در نمونه ۷ تا دریافت ۲ درصد قابلیت جذب انرژی مشابه سایر نمونه‌ها بوده است ولی در تغییر مکان نسبی بین ۲ تا ۳ درصد، کاهش در جذب انرژی نمونه اتفاق افتاده است که علت آن می‌تواند لغزش میلگردها در نمونه فوق باشد.

گرچه مقدار جذب انرژی در میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی حدود نصف میلگردهای فولادی است ولی همانطور که در شکل ۱۶ بخش ۱-۳ نشان داده شده است در میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار در نزدیکی بار صفر مقدار جابجایی پسماند بسیار کمتر از مقدار جابجایی در نمونه‌های با میلگردهای فولادی است و این میلگردها پس از تحمل تغییر شکل‌های پلاستیک قابل توجه، امکان بازگشت به حالت و شکل اولیه خود را دارا می‌باشند.



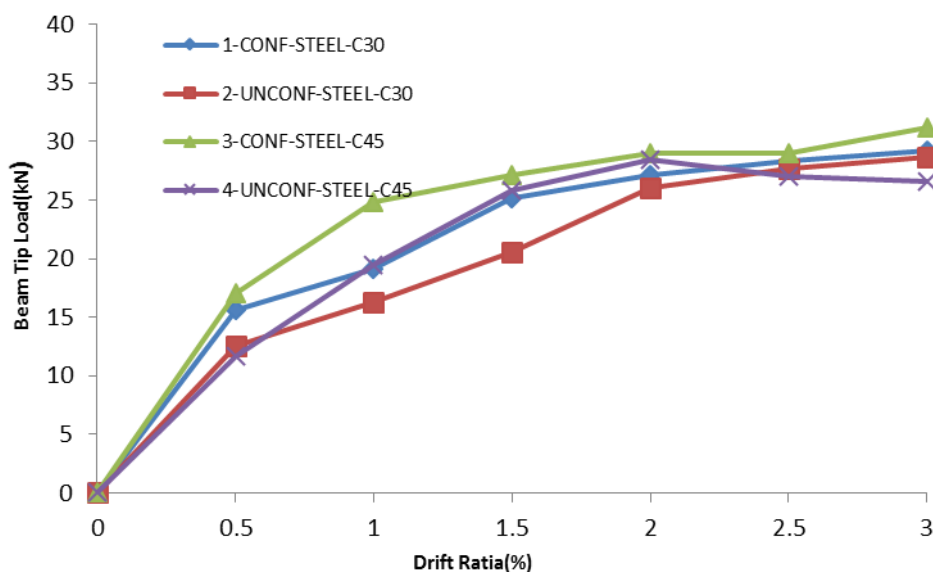
شکل ۲۱: نمودار انرژی تجمعی جذب شده - تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگردهای فولادی



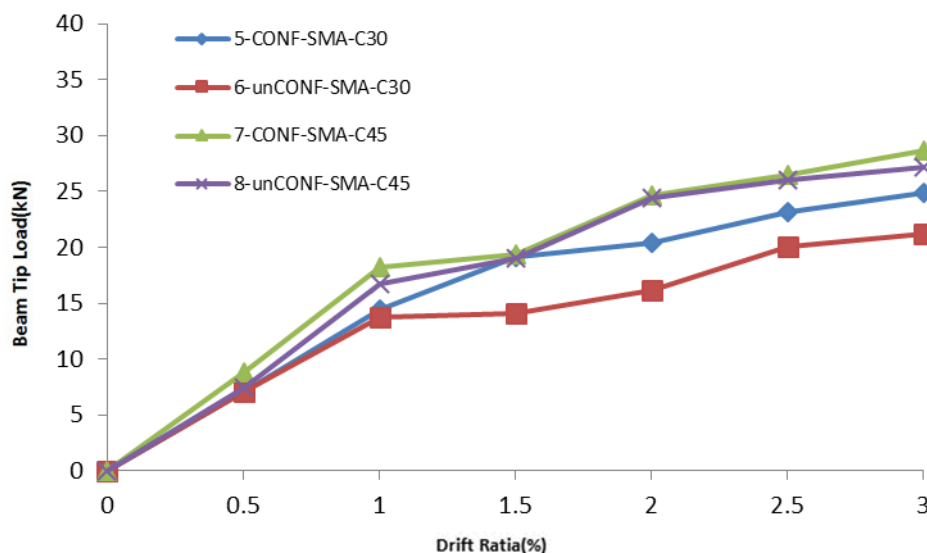
شکل ۲۲: نمودار انرژی تجمعی جذب شده - تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی

## ۳-۴- پوش بار انتهایی تیر- تغییر مکان نسبی

پوش بار انتهایی تیر- تغییر مکان نسبی<sup>۲۶</sup> در تمامی نمونه‌ها در شکل های ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. در نمونه‌های با میلگردهای فولادی، شروع نمودار با سختی بیشتری آغاز شده است. افزایش بار تا تغییر مکان نسبی ۲ درصد، در نمونه‌های با میلگردهای فولادی مشهود بوده و پس از آن چندان قابل ملاحظه نیست. در نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی، شروع نمودار با سختی کمتری آغاز شده است. علیرغم یکسان بودن تمام جزئیات نمونه‌ها از جمله سطح مقطع میلگردهای فولادی و آلیاژی حافظه‌دار شکلی، بار انتهایی تیر در نمونه‌های با میلگردهای فولادی نسبت به نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی حدود ۱۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲۳: نمودار پوش بار انتهایی تیر- تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگردهای فولادی



شکل ۲۴: نمودار پوش بار انتهایی تیر- تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی

<sup>26</sup> Beam Tip Load Versus Story Drift Envelope

## ۴-۴- لنگر- انحنا

یکی از روش‌های بیان ویژگی‌های خمشی غیر خطی یک مقطع بتن مسلح استفاده از منحنی لنگر - انحنا<sup>۲۷</sup> می‌باشد. انحنا در طول عضو، به علت جابجایی ارتفاع تار خنثی و تغییر در ظرفیت باربری بتن متغیر است [۱]. همانطور که در بخش ۲-۳- دستگاه آزمایش و در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، آمده است مقدار تغییر مکان قائم تیر اتصال  $\Delta_2$ ، در ناحیه بحرانی تیر توسط LVDT2 و تغییر مکان قائم  $\Delta_5$  توسط LVDT5 و تغییر مکان‌های افقی  $\Delta_3$  و  $\Delta_4$  توسط LVDT3 و LVDT4 برداشت گردید.  $\theta_c$  دوران گره اتصال توسط LVDT3 و LVDT4 و  $\Delta$  تغییر مکان توسط LVDT2 و LVDT5 با توجه به روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه است. مقدار L، فاصله دو تغییر مکان سنج افقی مستقر شده بر روی ستون می‌باشد که این مقدار برای تمام نمونه‌ها حدود ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. مقدار تغییر مکان کل تیر به فاصله 2h از بر هسته اتصال و با  $\Delta_{Total}$  نشان داده می‌شود و از رابطه (۳) قابل محاسبه است. در این رابطه مقدار  $h$  ۲۰۰ میلی‌متر (ارتفاع تیر) لحاظ می‌گردد.

$$\theta_c = \frac{\Delta_4 - \Delta_3}{L} \quad (1)$$

$$\Delta = \Delta_3 - \Delta_2 \quad (2)$$

$$\Delta_{Total} = \Delta - \theta_c * 2h \quad (3)$$

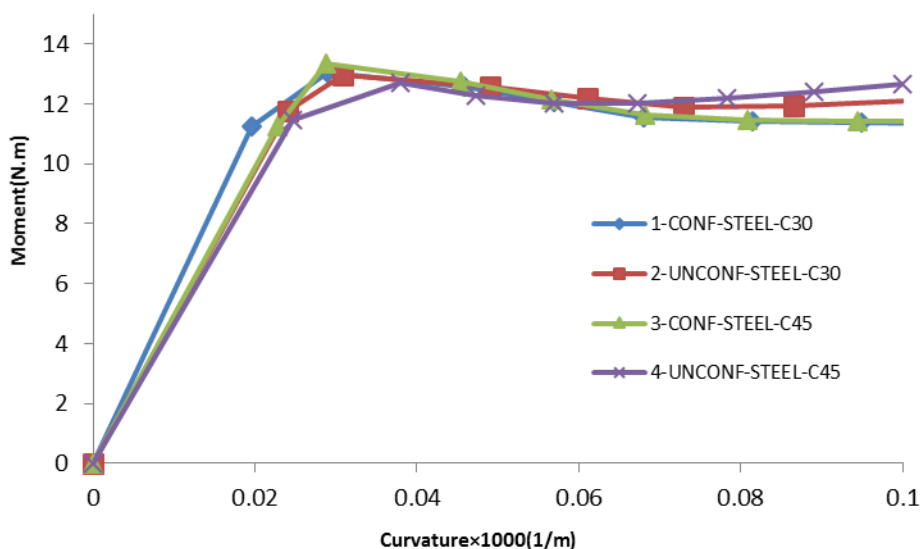
با فرض تغییر شکل تیر در ناحیه بحرانی به شکل قوسی از یک دایره و محاسبه شعاع دایره (R) می‌توان انحنا ( $\frac{1}{R}$ ) را با توجه به هندسه شکل فرضی تغییر شکل تیر و روابط حاکم بر مقاومت مصالح محاسبه نمود [۴۶]. شعاع دایره و انحنا در مقطع بحرانی تیر با توجه به رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$(\Delta_{Total} - R)^2 + y_0^2 = R^2 \quad R = \frac{\Delta_{Total}^2 + y_0^2}{2\Delta_{Total}} \quad \phi = \frac{1}{R} \quad (4)$$

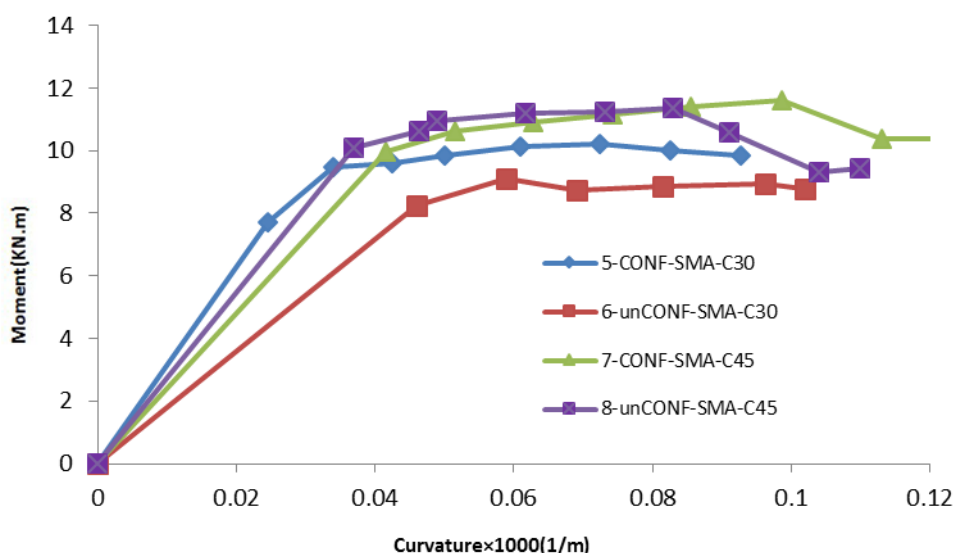
$y_0$  فاصله اندازه گیری شده تغییر مکان جانبی تیر و  $\phi$  انحنا می‌باشد. مقدار  $y_0$  نیز برابر ۴۰۰ میلی‌متر (محل نصب LVDT2) در شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌باشد. با توجه به روابط (۱) تا (۴) نمودار لنگر- انحنا در نمونه‌های با میلگردهای فولادی و با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ ترسیم شده‌اند.

شکل ۲۵ نشان می‌دهد که در نمونه‌های ۱ الی ۴ با میلگردهای فولادی نمودار لنگر- انحنا به صورت خطی ادامه یافته تا به نقطه تسلیم فولاد برسد. زمانی که فولاد جاری شده است مقدار انحنا افزایش یافته است. در صورتی که مقدار لنگر چندان تغییر نمی‌کند. در این نمونه‌ها انحنا تاثیر چندانی بر تیرها نداشته است و تمام منحنی‌ها تا ممان حدود ۱۴ کیلو نیوتن متر رفتاری مشابه از خود نشان داده‌اند. محصور شدگی در نمونه ۱ موجب افزایش انحنا نسبت به نمونه ۲ شده است. همچنین افزایش مقاومت و محصور شدگی در نمونه ۳، منجر به افزایش بیشتر انحنا نسبت به سایر نمونه‌ها شده است. شکل ۲۶ نشان می‌دهد که در نمونه‌های ۵ الی ۸ با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی نمودار لنگر- انحنا به صورت خطی ادامه یافته تا به نقطه تسلیم فولاد برسد. با جاری شدن فولاد مقدار انحنا افزایش یافته است. مقدار لنگر در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فولادی مقادیر کمتری را نشان می‌دهد. منحنی‌ها تا لنگر حدود ۱۰ کیلو نیوتن متر رفتاری مشابه از خود نشان داده‌اند. محصور شدگی در نمونه ۵ موجب افزایش انحنا نسبت به نمونه ۶ شده است. همچنین افزایش مقاومت و محصور شدگی در نمونه ۷، منجر به افزایش بیشتر انحنا نسبت به سایر نمونه‌ها شده است.

<sup>27</sup> Moment - Curvature Curve



شکل ۲۵: نمودار لنگر- انحنای در نمونه‌های با میلگردهای فولادی



شکل ۲۶: نمودار لنگر- انحنای در نمونه‌های با میلگردهای آلیاژی حافظه‌دار شکلی

#### ۴-۵- محاسبات طول مفصل پلاستیک

طول مفصل پلاستیک<sup>۲۸</sup> یک عضو سازه ای یک پارامتر اساسی در ارزیابی پاسخ سازه و آسیب آن به دلیل بارهای لرزه ای است. روابط تجربی متعددی برای تخمین طول مفصل پلاستیک اعضای بتن مسلح ارائه شده است. در بسیاری از این روابط، طول مفصل پلاستیک متناسب با عمق موثر مقطع عضو، طول عضو، قطر و تنش جاری شدن میلگردها در نظر گرفته می‌شوند [۳۵]. تعدادی از روابط تجربی پیشنهاد شده توسط Sawye [۴۷]، Corley [۴۸]، Mattock [۴۹]، Paulay و Priestley [۵۰] به ترتیب در روابط (۵) تا (۸) ارائه شده اند. با توجه به روابط ارائه شده طول مفصل پلاستیک در تیر اتصال محاسبه می‌گردد. در روابط فوق  $d$  و  $L$  به ترتیب عمق موثر تیر و طول تیر بر حسب میلیمتر،  $d_p$  قطر میلگردهای طولی تیر بر حسب میلیمتر و  $f_y$  تنش جاری شدن میلگردهای

<sup>28</sup> Plastic Hinge Length

طولی تیر بر حسب مگاپاسکال می‌باشند. محاسبات طول مفصل پلاستیک بر اساس روابط (۵) تا (۸)، بر اساس روابط تجربی در جدول ۵ آمده است. روابط تجربی (۷) و (۸) به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار را برای طول مفصل پلاستیک در تیر برآورد می‌کنند.

$$L_p = 0.075L + 0.25d \quad (۵)$$

$$L_p = 0.5d + \frac{L}{\sqrt{d}} \quad (۶)$$

$$L_p = 0.05L + 0.5d_s \quad (۷)$$

$$L_p = 0.08L + 0.022d_s f_y \quad (۸)$$

جدول ۵: محاسبه طول مفصل پلاستیک در تیر بر اساس روابط تجربی

specimens	$d_s$	$d$	$L$	$f_y$	Empirical			
					$L_p(Eq5)$	$L_p(Eq6)$	$L_p(Eq7)$	$L_p(Eq8)$
	mm	mm	mm	MPa	mm	mm	mm	mm
4 تا 1	13.90	200	900	484	118	164	52	220
8 تا 5	14.05	200	900	550	118	164	52	242

در بخش آزمایشگاهی، بر اساس نتایج می‌توان طول مفصل پلاستیک را با توجه به روابط (۹) و (۱۰) محاسبه نمود [۳۵]. در این روابط  $\Delta_u$  و  $\Delta_y$  تغییر مکان نهایی و تسلیم تیر و  $\phi_u$  و  $\phi_y$  انحنای نهایی و تسلیم تیر است. محاسبات طول مفصل پلاستیک بر اساس روابط (۹) و (۱۰) و بر اساس نتایج آزمایشگاهی در جدول ۶ آمده است.

$$\Delta_p = \Delta_u - \Delta_y \quad (۹)$$

$$\Delta_p = (\phi_u - \phi_y) L_p \left( L - \frac{L_p}{2} \right) \quad (۱۰)$$

جدول ۶: محاسبه طول مفصل پلاستیک در تیر بر اساس نتایج آزمایشگاهی

specimens	Experimental				
	$\Delta_y$	$\Delta_u$	$\phi_y$	$\phi_u$	$L_p(Eq10)$
	mm	mm	Rad/km	Rad/km	mm
1	7.9	26.9	19.6	123.0	235
2	7.5	22.1	24.0	100.8	244
3	9.4	27.1	22.8	121.6	227
4	8.1	22.5	24.7	100.0	246
5	7.3	26.3	24.6	95.0	380
6	8.2	22.1	46.0	102.0	340
7	9.7	30.4	42.0	129.0	322
8	8.5	26.4	37.0	110.0	335

از مقایسه فرمول تجربی پاول و پرستلی استفاده شده در رابطه (۸) و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در جدول‌های ۵ و ۶ جهت محاسبه طول مفصل پلاستیک در تیر اتصال، مشخص شد که استفاده از این فرمول تجربی برای اتصالات بتنی با میلگردهای متفاوت مناسب است.



## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، امکان استفاده از میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی به عنوان یک میلگرد با رفتار ویژه و مطلوب برای کنترل رفتار اتصال در برابر بارهای چرخه‌ای بررسی شده است. این آلیاژها با توجه به رفتار فوق الاستیک دارای تحمل کرنش های بالا، بدون بر جا گذاشتن کرنش های پسماند می باشند و می توان از آنها در اتصالات بتنی تیر به ستون به منظور افزایش مقاومت اتصال در برابر زلزله استفاده کرد. در این پژوهش آزمایشگاهی، با ساخت و آزمایش ۸ نمونه اتصال تیر به ستون با استفاده از میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی و میلگردهای فولادی و بتن های با مقاومت متفاوت، رفتار اتصال تیر به ستون بررسی شد. نتایج بدست آمده از بررسی آزمایشگاهی نمونه ها در این پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- نتایج آزمایشگاهی نشان داد که میلگردهای آلیاژی حافظه دار، دارای جذب انرژی مناسب بوده اند اما این مقدار جذب انرژی در مقایسه با میلگردهای فولادی کاهش بیش از ۵۰ درصد را نشان می دهد. گرچه مقدار جذب انرژی در میلگردهای آلیاژی حافظه دار کمتر از میلگردهای فولادی است اما رفتار فوق الاستیک آنها موجب تحمل کرنش های بالا بدون بجا گذاشتن کرنش های پسماند شده است.

۲- نمودار بار- تغییر مکان نسبی انتهای تیر، در تمام نمونه های آزمایشگاهی با میلگرد آلیاژی حافظه دار شکلی مورد استفاده در پژوهش، نشان دهنده توانایی بالای این مصالح در بازگشت اتصال به شکل اولیه خود بعد از تحمل تغییر مکان های بزرگ می باشد. مقدار جابجایی پسماند نمونه های با میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی، بسیار کمتر از مقدار جابجایی پسماند در نمونه های با میلگردهای فولادی است و در اتصال، نمونه ها پس از تحمل تغییر شکل های پلاستیک قابل توجه، قابلیت بازگشت به شکل اولیه خود را دارند.

۳- در نمونه با میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی، در بتن های معمولی و مقاومت بالا، ترک ها در هسته اتصال قابل ملاحظه نبودند و بارگذاری چرخه ای موجب بسته شدن ترک ها در هسته اتصال گردید. با افزایش بار چرخه ای، شکست خارج از هسته اتصال به صورت خمشی در تیر ایجاد گردید. افزایش محصور شدگی تیر باعث دور شدن محل شکست در تیر از هسته اتصال شد. در اتصال تیر به ستون با میلگرد های فولادی، شکست برشی در هسته اتصال ایجاد شد ولی با افزایش مقاومت بتن و محصور شدگی، شکست در خارج از هسته اتصال به صورت خمشی در تیر صورت گرفت.

۴- طول مفصل پلاستیک در تیر اتصال برای نمونه های با میلگردهای آلیاژی حافظه دار شکلی و میلگردهای فولادی، توسط روابط تجربی و نتایج آزمایشگاهی محاسبه گردید و مشخص شد که استفاده از معادله پاول و پریستلی برای اتصالات بتنی با میلگردهای متفاوت مناسب است.

## مراجع

- [1] Park, R. and Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures. John Wiley & Sons Inc., New York.
- [2] Ghobarah, A. and Said, A. (2001). Seismic rehabilitation of beam-column joints using FRP laminates. *Journal of Earthquake*, 5(1), 113-129.
- [3] Saatcioglu, M., Mitchell, D., Tinawi, R., Gardner, N. J., Gillies, A. G., Ghobarah, A. and Lau, D. (2001). The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake damage to structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(4), 715-737.
- [4] Lin, C. H., Hwang, C. L., Lin, S. P. and Liu, C. H. (2008). Self-consolidating concrete columns under concentric compression. *ACI Structural Journal*, 105(4), 425-432.
- [5] Scott, R. H. (1992). The effects of detailing on RC beam-column connection behaviour, *The Structural Engineer*, 70, 318-324.
- [6] Abdel Fattah, B., and Wight, J.K. (1987). Study of moving beam plastic hinging zones for earthquake-resistant design of RC Buildings, *ACI Structural Journal*, 84, 31-39.
- [7] Wallace, J.W., McConnell, S. W., Gupta, P. and Cote, P. A. (1998). Use of headed reinforcement in beam-column joints subjected to earthquake loads. *ACI Structural Journal*, 95, 590-606.
- [8] Kang, T.H.K., Sang, S.H. and Choi, D.U. (2010). Bar pullout tests and seismic tests of small-headed bars in beam-column joints. *ACI Structural Journal*, 107, 32-42.



- [9] Barbhuiya, Salim., Choudhury, Abdul- Munim. (2015). A study on the size effect of RC beam-column connections under cyclic loading. *Engineering Structures*, 95, 1-7.
- [10] Olander, A. (1932). The crystal structure of AuCd. *Zeitschrift Fur Kristallographie*, 83(1-6), 145-148.
- [11] Chang, L. C. and Read, T. A. (1951). Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals—the gold-cadmium beta phase. *JOM*, 3(1), 47-52.
- [12] Buehler, W. J., Gilfrich, J. V. and Wiley, R. C. (1963). Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *Journal of applied physics*, 34(5), 1475-1477.
- [13] Song, G., Ma, N. and Li, H. N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering structures*, 28(9), 1266-1274.
- [14] DesRoches, R., Taftali, B. and Ellingwood, B. R. (2010). Seismic performance assessment of steel frames with shape memory alloy connections. Part I—analysis and seismic demands. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(4), 471-486.
- [15] Graesser, E. J. and Cozzarelli, F. A. (1991). Shape-memory alloys as new materials for aseismic isolation. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(11), 2590-2608.
- [16] Sakai, Y., Kitagawa, Y., Fukuta, T. and Iiba, M. (2003). Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire. In *Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures*, 5057, 178-187. International Society for Optics and Photonics.
- [17] Otero, K. (2004). *Intelligent Reinforced Concrete Structures Using Shape Memory Alloys*. Texas, USA: University of Houston.
- [18] Czaderski, C., Hahnebach, B. and Motavalli, M. (2006). RC beam with variable stiffness and strength. *Construction and Building Materials*, 20(9), 824-833.
- [19] Saïidi, M. S. and Wang, H. (2006). Exploratory study of seismic response of concrete columns with shape memory alloys reinforcement. *ACI Structural Journal*, 103(3), 436-443.
- [20] Soroushian, P., Ostowari, K., Nossoni, A. and Chowdhury, H. (2001). Repair and strengthening of concrete structures through application of corrective posttensioning forces with shape memory alloys. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1770, 20-26.
- [21] Wilson, J. C. and Wesolowsky, M. J. (2005). Shape memory alloys for seismic response modification: a state-of-the-art review. *Earthquake Spectra*, 21(2), 569-601.
- [22] Dolce, M., Cardone, D., Marnetto, R., Mucciarelli, M., Nigro, D., Ponzio, F. C. and Santarsiero, G. (2004). Experimental static and dynamic response of a real RC frame upgraded with SMA re-centering and dissipating braces. In *Proceeding of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada.
- [23] Maji, A. K. and Negret, I. (1998). Smart prestressing with shape-memory alloy. *Journal of engineering mechanics*, 124(10), 1121-1128.
- [24] Inaudi, J. and Kelly, J. (1994). Experiments on tuned mass dampers using viscoelastic, frictional and shape-memory alloy materials. In *First World Conference on Structural Control*, 127-136.
- [25] DesRoches, R. and Smith, B. (2004). Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of their potential and limitations. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(03), 415-429.
- [26] Wang, H. (2005). A study of RC columns with shape memory alloy and engineered cementitious composites. M. Sc. Thesis, *Department of Civil Engineering*, University of Nevada, Reno.
- [27] Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R. T., Hess, W. G., Krumme, R., Hayes, J. R. and Sweeney, S. (2004). Steel beam-column connections using shape memory alloys. *Journal of Structural Engineering*, 130(5), 732-740.
- [28] Wilde, K., Gardoni, P. and Fujino, Y. (2000). Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges. *Engineering structures*, 22(3), 222-229.
- [29] Megget, L. M. and Park, R. (1971). Reinforced concrete exterior beam-column joints under seismic loading. *New Zealand Engineering (Wellington)*, 26(11), 341-353.
- [30] Alam, M.S., Youssef, M.A. and Nehdi, M. (2005). Shape memory alloys as a new construction material, *Proceedings of the Cansmart- the 8th International Workshop on Smart Materials and Structures*, Toronto, Canada.
- [31] Alam, M. S., Youssef, M. A. and Nehdi, M. (2007a). Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(9), 1075-1086.
- [32] Alam, M. S., Nehdi, M. and Youssef, M. A. (2007b). Shape memory alloy based smart RC bridge: overview of state of the art. *Smart Struct. Syst*, 4(3), 367-389.
- [33] Alam, M. S., Youssef, M. A. and Nehdi, M. (2007c). Seismic behaviour of concrete beam-column joints reinforced with superelastic shape memory alloys. In *9th Canadian Conf. on Earthquake Engineering*, Ontario, Canada.
- [34] Alam, M. S., Nehdi, M. and Youssef, M. A. (2007d). Applications of shape memory alloys in earthquake engineering. In *Proceedings of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ontario, Canada.
- [35] Alam, M. S., Youssef, M. A. and Nehdi, M. (2008). Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements. *Engineering Structures*, 30(12), 3399-3411.

- [36] Alam, M.S., Youssef, M. and Nehdi, M. (2009). Seismic performance of concrete frame structures reinforced with superelastic shape memory alloys. *Smart Struct Syst*, 5, 565-585.
- [37] Alam, M. S., Moni, M. and Tesfamariam, S. (2012). Seismic overstrength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy rebar. *Engineering Structures*, 34, 8-20.
- [38] Youssef, M. A., Alam, M. S. and Nehdi, M. (2008). Experimental investigation on the seismic behavior of beam-column joints reinforced with superelastic shape memory alloys. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(7), 1205-1222.
- [39] Nehdi, M., Alam, M. S. and Youssef, M. A. (2012). Seismic behaviour of repaired superelastic shape memory alloy reinforced concrete beam-column joint. *Smart Structures & Systems*, 7(5), 329-348.
- [40] Parra-Montesinos, G. J., Peterfreund, S. W. and Chao, S. H. (2005). Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites. *Structural Journal*, 102(3), 487-495.
- [41] Bariola, J. (1992). Drift response of medium-rise reinforced concrete buildings during earthquakes. *ACI Struct.* 89(4), 384-390.
- [42] Engindeniz, M., Kahn, L. F. and Abdul-Hamid, Z. (2005). Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: State of the art. *ACI structural journal*, 102(2), 187-197.
- [43] Auricchio, F. and Sacco, E. (1997). A superelastic shape-memory-alloy beam model. *Journal of intelligent material systems and structures*, 8(6), 489-501.
- [44] ACI Committee. (2006). Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (ACI 374.1-05). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- [45] Ehsani, M. R. and Alameddine, F. (1991). Design recommendations for type 2 high-strength reinforced concrete connections. *ACI Structural Journal*, 88(3), 277-291.
- [46] Beydokhty, E. Z. and Shariatmadar, H. (2016). Behavior of damaged exterior RC beam-column joints strengthened by CFRP composites. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(5), 880-896.
- [47] Sawyer, H. A. (1965). Design of concrete frames for two failure stages. Special Publication, 12, 405-437.
- [48] Corley, W. (1966). Rotational capacity of reinforced concrete beams. *Journal of the Structural Division*, 92(5), 121-146.
- [49] Mattock, A. H. (1967). Discussion of "rotation capacity of reinforced concrete beams" by WG Corley. *Journal of Structural Division*, 93(2), 519-522.
- [50] Paulay, T. and Priestley, M. J. N. (1992). Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. John Wiley & Sons, Inc., New York.