

Experimental Comparison of the Behavior of Tensile Rebar Splices Using Coupler and Gas Pressure Welding

Hamed Karamlu¹, Mostafa Moghadasi^{2*}

1- MSc Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ABSTRACT

The use of alternative methods for the conventional method of lap splicing is inevitable. It can be referred to as coupler or gas pressure welding (GPW) with acceptable behavior in structural elements as an alternative method. Each standard coupler or GPW splice may be superior to each other in terms of different parameters. So, because of the lack of empirical studies in the field of comparing the behavior of the standard coupler and GPW splices, experimental research on this type of splice and the recognition of the advantages, and disadvantages of implementing each other is necessary. To this end, the experimental behavior of tensile rebar splices using couplers and GPW method was investigated. The rebars used in this study were of type S400. The total number of samples used in the experiments was 36. For each of rebars with 16, 18, 20, and 22 mm diameters, one sample was considered as non-spliced sample, four samples were considered coupler splices samples, and four other samples were considered GPW samples, with half of the spliced samples, without enclosure in concrete, and the other half of these samples were enclosed in concrete. A total of four samples without splices, 16 with mechanical splices, and 16 with GPW were considered for use in direct tensile testing and digital imaging correlation process. Various parameters were compared between coupler and GPW splices. For example, and on average, it can be said that the samples with coupler and GPW splices had a ductility reduction of about 19 and 29 percent, respectively, compared to the non-spliced samples, which indicates that the mechanical coupler is more ductile than GPW. Furthermore, on average, it can be said that samples with coupler and GPW splices had a 22 and 25 percent reduction in energy absorption, respectively, compared to non-spliced samples.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 February 2025

Revise Date: 09 June 2025

Accept Date: 09 July 2025

Keywords:

Mechanical coupler splice
Gas pressure welding splice (GPW)
Stiffness
Absorbed energy
Ductility
Digital Image Correlation (DIC)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.498372.3623

*Corresponding author: Mostafa Moghadasi
Email address: m.moghadasi@basu.ac.ir

مقایسه تجربی رفتار وصله میلگردهای کششی با استفاده از کوپلر و جوش سربه‌سر

حامد کرملو^۱، مصطفی مقدسی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

امروزه در اکثر سازه‌های بتن‌آرمه از وصله پوششی استفاده می‌شود که به دلیل محدودیت‌های کاربرد این نوع وصله، استفاده از روش‌های جایگزین وصله رایج پوششی امری اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا می‌توان به اتصالات مکانیکی مناسب و یا وصله جوشی سربه‌سر به‌عنوان روش جایگزین وصله پوششی، اشاره کرد. هرکدام از این وصله‌ها ممکن است از نظر پارامترهای مختلف، نسبت به یکدیگر برتری داشته باشند لذا با توجه به کمبود مطالعات تجربی در زمینه مقایسه رفتار کوپلر استاندارد و جوش سربه‌سر، مطالعه و تحقیق آزمایشگاهی در مورد این نوع از وصله‌ها و شناخت مزایا، معایب آن‌ها نسبت به یکدیگر ضرورت می‌یابد. بدین منظور در این تحقیق، رفتار تجربی وصله میلگردهای کششی با استفاده از کوپلر و جوش سربه‌سر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. میلگردهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع میلگرد آج ۴۰۰ (A3) است. تعداد کل نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، ۳۶ نمونه بود. از هرکدام از میلگردهای با قطر ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۲ میلی‌متر یک نمونه به‌عنوان نمونه‌های بدون وصله، چهار نمونه به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله کوپلری و چهار نمونه دیگر به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر در نظر گرفته شد. نصف نمونه‌های وصله‌شده، بدون محصورشدگی در بتن و نصف دیگر این نمونه‌ها، محصور در بتن بودند که جهت استفاده در آزمایش کشش مستقیم و فرایند تصویربرداری دیجیتال در نظر گرفته شد. پس از انجام آزمایش‌ها، مقایسه پارامترهای مختلف بین وصله‌های مکانیکی و جوش سربه‌سر انجام شد. به عنوان مثال و به طور میانگین می‌توان گفت نمونه‌های با وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده به ترتیب حدود ۱۹ و ۲۹ درصد کاهش شکل‌پذیری داشته‌اند که نشان‌دهنده شکل‌پذیری بیشتر وصله مکانیکی نسبت به جوش سربه‌سر است. علاوه‌براین، به طور میانگین می‌توان گفت نمونه‌های با وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده به ترتیب ۲۲ و ۲۵ درصد کاهش جذب انرژی داشته‌اند.

کلمات کلیدی: وصله مکانیکی کوپلری، جوش سربه‌سر، سختی، شکل‌پذیری، جذب انرژی، تصویربرداری دیجیتال DIC

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.498372.3623					
10.22065/jsce.2025.498372.3623	۱۴۰۴/۱۲/۲۹	۱۴۰۴/۰۴/۱۸	۱۴۰۴/۰۴/۱۸	۱۴۰۴/۰۳/۱۹	۱۴۰۳/۱۱/۱۳
مستند نویسنده مسئول: مصطفی مقدسی m.moghadasi@basu.ac.ir			پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

استفاده از سازه‌های بتن آرمه به علت مقاومت فشاری مطلوب، داشتن صرفه اقتصادی و دوام، در کشور ایران روزبه‌روز افزایش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین مسائل در اجرای سازه‌های بتن آرمه، نوع وصله میلگرد و محل آن است که به شدت بر روی رفتار اعضای بتن آرمه تأثیرگذار است. در سازه‌های بتن آرمه منظور از وصله میلگردها، اتصال طولی دو میلگرد به هم بوده به طوری که این اتصال قادر به تحمل ۱۲۵ درصد مقاومت تسلیم میلگردها باشد [۱].

وصله پوششی^۱ در حال حاضر متداول‌ترین نوع وصله است که با قرار دادن میلگردهای اتصال با طول کافی در کنار هم و معمولاً بستن آن‌ها با سیم‌های فولادی انجام می‌شود [۲]. مطابق بند ۹-۲۱-۴-۱-۲ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش سال ۱۳۹۹، میلگردهای کششی و فشاری با قطر بیش از ۳۴ میلی‌متر را نمی‌توان به صورت پوششی وصله کرد [۳]. همچنین استفاده از وصله پوششی در اتصالات تیر به ستون، در طولی معادل دو برابر ارتفاع مقطع از بر تکیه‌گاه و در محلهایی همانند پای ستون‌ها که در آن‌ها امکان تشکیل مفصل پلاستیک وجود دارد، ممنوع است [۴]. از آنجایی که در وصله پوششی تنش به واسطه بتن منتقل می‌شود و با توجه به اینکه که بتن می‌تواند در معرض آسیب دیدگی قرار گیرد و احتمال کاهش مقاومت آن وجود دارد؛ لذا این نوع وصله نسبت به وصله‌های مکانیکی^۲ و جوشی که در آن‌ها انتقال تنش به بتن بستگی ندارد، از نظر سازه‌ای مناسب نیست. از طرفی درصد قابل توجهی از میزان میلگردهای مصرفی در پروژه بابت طول پوششی مصرف می‌شود که این امر از نظر اقتصادی مطلوب نیست [۱]؛ بنابراین استفاده از روش‌های جایگزین وصله رایج پوششی، امری اجتناب‌ناپذیر است. از جمله این روش‌ها می‌توان به اتصالات مکانیکی مناسب و یا وصله جوشی سربه‌سر^۳ با رفتار قابل قبول به عنوان روش جایگزین وصله پوششی اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در سازه‌های بتن مسلح، استفاده از روش مناسب وصله میلگرد به دلیل تأثیر غیرقابل انکار آن بر عملکرد سازه‌ها، زمان ساخت و هزینه است [۵]. هر کدام از وصله‌های کوپلر استاندارد یا جوش سربه‌سر ممکن است از نظر پارامترهای مختلف از جمله مقاومت در برابر بارهای محوری و جانبی، سهولت اجرا، در دسترس بودن افراد متخصص و لوازم مورد نیاز اجرای وصله، نسبت به یکدیگر برتری داشته باشند و با توجه به شرایط سازه مورد نظر، استفاده از هر یک از این وصله‌ها می‌تواند مفید باشد. لذا با توجه به مطالب ذکر شده و کمبود مطالعات تجربی در زمینه مقایسه رفتار سازه‌های کوپلر استاندارد^۴ و جوش سربه‌سر، مطالعه و تحقیق آزمایشگاهی در مورد این نوع از وصله‌ها و شناخت مزایا، معایب و مقایسه رفتار آن‌ها نسبت به یکدیگر ضرورت می‌یابد. علاوه بر این، در این مطالعه از روش جدید تصویر پردازی دیجیتال به عنوان روشی در کنار روش‌های اندازه‌گیری مکانیکی موجود استفاده شده است که می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین قابل اطمینان برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها و کرنش‌های مرتبط، معرفی و به کار گرفته شود.

۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

روش‌های اتصال میلگردها به دلیل تأثیر بسیار مهم آن‌ها بر عملکرد عناصر و سازه‌های بتن آرمه، همواره توسط مهندسان سازه مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه بررسی روش‌های مختلف اتصال از جمله وصله‌های پوششی، مکانیکی و جوشی در عناصر سازه‌ای شامل ستون‌ها، تیرها، محل‌های اتصال، دیوارها و دال‌ها انجام شده است. در این بخش به برخی از آن‌ها اشاره شده، سپس خلاصه‌ای از نتایج این پژوهش‌ها ارائه شده است.

دریگیس و همکاران در سال ۲۰۱۸، عملکرد ستون‌های بتن مسلح تعمیر شده به وسیله میلگردهای تقویتی جوش داده شده را ارزیابی کردند. وضعیت بارگذاری و روش تعمیر به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شد. بر اساس گزارش‌ها ستون‌های اصلی و تعمیر شده عملکرد مشابهی داشتند [۶]. لو و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک پژوهش تجربی با هدف بررسی عملکرد لرزه‌ای مفاصل تیر-ستون بتن مسلح پیش ساخته که دارای وصله غلاف دوغاب‌دار بودند، انجام دادند. در این تحقیق طول میلگرد، قطر میلگرد و انواع غلاف دوغاب‌دار پارامترهای متغیر بودند

¹ Lap splice

² Mechanical splices

³ Gas pressure welding (GPW)

⁴ Standard coupler

که به نتایج قابل توجهی دست یافتند. از جمله این نتایج می‌توان به این اشاره کرد که بار تسلیم نمونه‌های پیش‌ساخته با افزایش قطر میلگرد انتقال افزایش یافت. علاوه بر این، ظرفیت تحمل بار نمونه‌های پیش‌ساخته مشابه نمونه مرجع بود. همچنین، رزوها در غلاف‌های دوغاب‌دار تأثیر منفی بر شکل‌پذیری و ظرفیت تغییرشکل داشتند [۷]. خیرالدین و همکاران در سال ۲۰۲۰، تأثیر استفاده از وصله‌های مکانیکی بر عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه تحت بارهای محوری و لرزه‌ای را به‌طور تجربی بررسی کردند. با در نظر گرفتن نوع اتصال و محل وصله به‌عنوان پارامترهای متغیر، نتیجه گرفته شد که استفاده از کوپلرها در محل اتصال ستون-فونداسیون، جابه‌جایی و شکل‌پذیری نهایی را افزایش داده اما جذب انرژی را کاهش می‌دهد [۸]. خیرالدین و دبیری در سال ۲۰۲۰، عملکرد اتصالات تیر-ستون بتن مسلح با استفاده از کوپلرها را بررسی کرده و با تغییر تعداد کوپلرها نتیجه گرفتند وصله تمام میلگردهای تیر توسط کوپلرها باعث کاهش شکل‌پذیری و جذب انرژی می‌شود. استفاده از کوپلرها برای نیمی از میلگردهای تیر، شکل‌پذیری و جذب انرژی را اندکی افزایش داد [۹]. ژین و همکاران در سال ۲۰۲۱، با بررسی عملکرد لرزه‌ای پایه‌های بتنی دارای اتصال‌های غلاف دوغاب‌دار، روشی برای برآورد ظرفیت باربری آن‌ها پیشنهاد دادند و به این نتیجه رسیدند که با قراردادن غلاف دوغاب‌دار، ناحیه مفصل پلاستیک پایه‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۰]. خیرالدین و همکاران در سال ۲۰۲۱، استفاده از روش‌های وصله پوششی و وصله جوش سربه‌سر در ستون‌های بتن مسلح را به‌صورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. چهار ستون بتن مسلح، تحت بارهای لرزه‌ای و محوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از وصله جوش سربه‌سر در وسط یا پایین ستون‌ها می‌تواند شکل‌پذیری جابه‌جایی، شکل‌پذیری انحنا و طول مفصل پلاستیک را افزایش دهد، درحالی‌که وصله‌های پوششی می‌تواند پارامترهای لرزه‌ای ذکرشده را کاهش دهد. علاوه بر این، تعبیه وصله جوش سربه‌سر در پایین ستون‌ها ممکن است سختی و تنش‌نهایی را افزایش دهد. به‌طور کلی، ایشان به این نتیجه رسیدند که وصله جوش سربه‌سر میلگرد را می‌توان به‌عنوان یک روش قابل اطمینان برای اتصال میلگرد تحت بارهای لرزه‌ای و محوری در نظر گرفت [۵]. دبیری و خیرالدین در سال ۲۰۲۱، به مقایسه رفتار مفاصل تیر-ستون بتن مسلح با روش‌های مختلف وصله پرداختند که تعداد و نوع وصله‌ها، قطر میلگرد وصله‌شده به‌عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته‌شد و مشاهده گردید وصله همه میلگردها در مقایسه با مفاصلی که نیمی از میلگردها با روش جوش سربه‌سر به هم وصله شده‌بودند، منجر به شکل‌پذیری بالاتر و سختی کمتر شد [۱۱]. در پژوهشی که توسط دبیری و همکاران در سال ۲۰۲۲ انجام گرفت تلاش شد تا مقاومت کششی میلگردهای فولادی وصله شده و وصله نشده با استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و رگرسیون بررسی شود. در این تحقیق، از سه مدل یادگیری ماشین شامل رگرسیون غیرخطی، رگرسیون ریدج^۱ و شبکه عصبی مصنوعی همراه با ایجاد پایگاه داده‌ای با بیش از ۲۰۰ آزمایش استفاده شد. مطالعه پارامتری نشان داد طول و قطر کوپلر و دما تأثیر قابل توجهی بر مقاومت کششی میلگردهای متصل‌شده دارند [۱۲]. بن‌داهو و همکاران اثر کوپلرهای مکانیکی را بر رفتار ترک‌خوردگی تیرهای بتن‌آرمه بررسی کردند. در این مطالعه، رفتار غیرخطی تیرها تحت بارهای یکنواخت و چرخه‌ای با استفاده از منحنی‌های بار-جابجایی، توزیع ترک‌ها و همبستگی تصویر دیجیتال برای پایش کرنش و مقدار بازشدگی ترک‌ها تحلیل شد. نتایج نشان داد که کوپلرهای فشرده در مقایسه با میلگردهای پیوسته تأثیر قابل توجهی بر رفتار کلی یا موضعی تیرها ندارند. در ضمن، بار شکست، سختی کلی و توزیع ترک‌ها مشابه بودند و محاسبات آیین‌نامه‌ای برای بازشدگی و فاصله ترک‌ها با داده‌های تجربی در اکثر موارد همخوانی داشت [۱۳]. جعفر و همکاران در سال ۲۰۲۵ مطالعه تجربی بر روی عملکرد خمشی تیرهای بتنی مسلح با وصله پوششی و اتصال کوپلری رزوه‌دار انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تیرهای بتن‌آرمه با وصله پوششی از نظر ظرفیت بار بیشینه، عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. با این حال، در بررسی اندازه‌گیری‌های خیز، تیرهای بتن‌آرمه بدون وصله عملکرد بهتری نشان می‌دهند که نشان‌دهنده شکل‌پذیری بالاتر است. از سوی دیگر، تیرهای بتن‌آرمه با اتصالات کوپلری در هر دو جنبه عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهند [۱۴]. در سال ۲۰۲۵ شارما و همکاران عملکرد کوپلرهای مکانیکی میلگردهای پرمقاومت تحت اثر کرنش‌های غیرالاستیک را مورد بررسی قرار دادند. یازده کوپلر مکانیکی برای میلگردهای پرمقاومت با تنش تسلیم ۵۵۰ مگاپاسکال تحت آزمایش کرنش غیرالاستیک چرخه‌ای معکوس قرار گرفتند. نتایج نشان داد برخی کوپلرها عمر خستگی مشابه میلگردهای بدون وصله دارند، اما برخی دیگر عمر خستگی کمتری دارند [۱۵]. شکرزاده و همکاران در سال ۲۰۲۵ مطالعه‌ای بر روی رفتار چرخه‌ای غیرالاستیک ستون‌های بتن‌آرمه با

¹ Ridge Regression

وصله‌های کوپلری رزوه‌دار با انتهای پهن‌شده^۱ و وصله جوشکاری اصطکاکی دوار^۲ انجام دادند. آزمایش‌ها روی ستون‌های با مقیاس $\frac{1}{3}$ نشان داد نمونه‌های با جوشکاری دوار، شکل‌پذیری، انحنای و اتلاف انرژی را نسبت به کوپلرهای رزوه‌دار با انتهای پهن‌شده و نمونه‌های بدون وصله بهبود می‌بخشد. هر دو تکنیک وصله‌کردن فوق برای نواحی مستعد ایجاد مفصل پلاستیک تحت بار لرزه‌ای مناسب‌اند و چالش‌های کمانش و تمرکز تنش را کاهش می‌دهند [۱۶].

می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که هدف بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر روی عملکرد وصله‌های مکانیکی، ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسه کوپلرها (به‌عنوان مثال طول، ضخامت، صلبیت) بر عملکرد کلی آن‌ها و در نتیجه پیشنهاد مناسب‌ترین مقادیر است. بر اساس اطلاعات ارائه‌شده سه پارامتر اصلی وجود دارد که برای کاربرد وصله‌های مکانیکی باید در نظر گرفته شوند: (۱) شکل کوپلر: تمام تحقیقات به این نتیجه رسیده‌اند که کوپلرهای باریک، بلند و صلب می‌توانند با کاهش پارامترهای لرزه‌ای مانند شکل‌پذیری و ظرفیت بار، عملکرد نامناسبی داشته باشند [۱۷]، (۲) نوع وصله: ادعا می‌شود که کوپلرها و وصله‌های دوغاب‌دار بهتر از انواع دیگر عمل می‌کنند [۱۸] و (۳) تعداد و محل میلگردهای وصله‌شده: اتصال همه میلگردها در یک ناحیه می‌تواند منجر به رفتار ضعیف تحت بار چرخه‌ای شود [۸ و ۹]. در مورد وصله‌های دوغاب‌دار، بین نویسندگان پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه توافق وجود دارد که طول تعبیه‌شده میلگرد داخل غلاف و هندسه غلاف (قطر، طول و رزوه) مؤثرترین پارامترها هستند به طوری که طول تعبیه‌شده ۶ برابر قطر میلگرد و طول غلاف ۱۶ برابر قطر میلگرد، می‌تواند با افزایش ظرفیت پیوند منجر به عملکرد قابل قبولی شود. علاوه بر این، غلاف‌های مخروطی شکل در مقایسه با غلاف‌های لوله‌شکل به دلیل محصورشدگی بهتر، عملکرد مناسب‌تری دارند [۱۹]. به طور خلاصه می‌توان گفت، علی‌رغم تعداد زیادی از پژوهش‌های انجام‌شده بر روی وصله‌های پوششی و مکانیکی، مطالعه در مورد ارزیابی رفتار وصله‌های جوشی سرب‌ساز و مقایسه آن با وصله‌های مکانیکی کمیاب است.

۳- مصالح مصرفی و روش انجام تحقیق

در این بخش مشخصات مصالح مصرفی، انواع نمونه‌های مورد آزمایش و روش آماده‌سازی آن‌ها، دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده در تحقیق و روش انجام آزمایش‌ها ارائه‌شده است. آزمایش‌های موردنظر در آزمایشگاه تحقیقاتی مقاومت مصالح دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا انجام شد.

۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی و نمونه‌های آزمایشگاهی

میلگردهای استفاده‌شده در این تحقیق از نوع میلگرد آج ۴۰۰ (A3) تولید شرکت ذوب‌آهن اصفهان بوده که پس از تهیه میلگردها در شاخه‌های ۱۲ متری، جهت انجام جوش سرب‌ساز و اتصال مکانیکی کوپلری به قطعات کوچک‌تر ۵۰ سانتی‌متری تبدیل شد. سپس بخشی از آن‌ها جهت ایجاد رزوه و اتصال به وسیله کوپلر استاندارد، به شرکت اتصالات مکانیکی سپهند، و بخش دیگری جهت انجام وصله جوش سرب‌ساز، به شرکت سازه آزمون فولاد منتقل شده و پس از اتصال دو سر میلگردها با استفاده از وصله‌های موردنظر، نمونه‌های ساخته‌شده به دانشگاه بوعلی سینا منتقل شد.

مطابق جدول ۱ تعداد کل نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش، ۳۶ نمونه بود. از هرکدام از میلگردهای با قطر ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۲۲ میلی‌متر یک نمونه به‌عنوان نمونه‌های بدون وصله، چهار نمونه به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله کوپلری و چهار نمونه دیگر به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله جوش سرب‌ساز در نظر گرفته شد. نصف نمونه‌های وصله‌شده، بدون محصورشدگی در بتن و نصف دیگر این نمونه‌ها، محصور در بتن بودند که جهت استفاده در آزمایش کشش مستقیم و فرایند تصویربرداری دیجیتال در نظر گرفته شد. در مورد نمونه‌های محصور در بتن، ابتدا قالب‌های استوانه‌ای به قطر داخلی ۱۰۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر و پایه‌های نگهدارنده فلزی جهت محصورکردن

¹ Oversize-threaded couplers (OTC)

² Rotary friction welding (RFW)

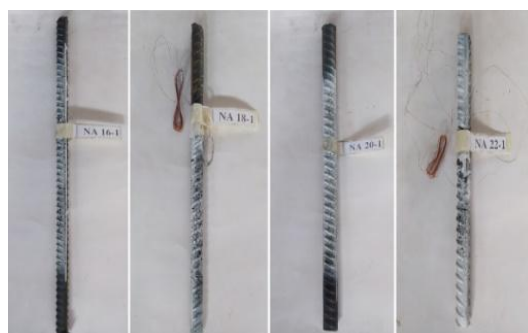
وصله‌ها و به تعداد کافی ساخته شد. تعداد ۸ نمونه از وصله‌های کوپلری و همچنین ۸ عدد از نمونه‌های وصله جوش سربه‌سر در کارخانه بتن اکباتان با بتنی به مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال بتن‌ریزی شد.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها برای اجرای فرایند تصویربرداری دیجیتال (DIC)

ابتدا نمونه‌ها با استفاده از اسپری رنگ سفید مات به صورت یک لایه یکنواخت رنگ‌آمیزی شدند. سپس با استفاده از اسپری رنگ مشکی مات دانه‌های ریز رنگ مشکی بر روی لایه یکنواخت رنگ سفید پاشیده شد و نمونه‌ها جهت تصویربرداری دیجیتال آماده شد. از هر کدام از میلگردهای با قطر ۱۶، ۲۰، ۲۲ میلی‌متر یک نمونه به‌عنوان نمونه‌های بدون وصله جهت استفاده در فرایند تصویربرداری دیجیتال همراه با آزمایش کشش در نظر گرفته شده و آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق شکل ۱ انجام شد.

جدول ۱: جزئیات نام‌گذاری نمونه‌های مورد آزمایش

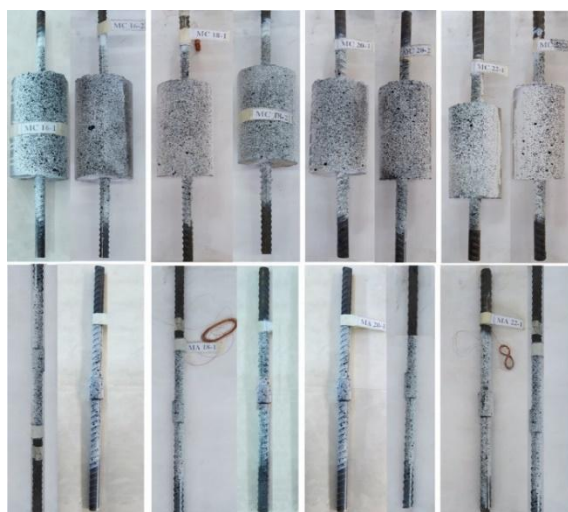
وضعیت وصله	آزمایش	قطر میلگرد (میلی‌متر)	نام نمونه‌ها	
Non-spliced (بدون وصله)	In-Air tests (آزمایش‌های در هوا)	16	NA 16-1	
		18	NA 18-1	
		20	NA 20-1	
		22	NA 22-1	
Mechanically-spliced (وصله مکانیکی)	In-Air tests (آزمایش‌های در هوا)	16	MA 16-1	MA 16-2
		18	MA 18-1	MA 18-2
		20	MA 20-1	MA 20-2
		22	MA 22-1	MA 22-2
	In-Concrete tests (آزمایش‌های در بتن)	16	MC 16-1	MC 16-2
		18	MC 18-1	MC 18-2
		20	MC 20-1	MC 20-2
		22	MC 22-1	MC 22-2
Forging-spliced (وصله با جوش سربه‌سر)	In-Air tests (آزمایش‌های در هوا)	16	FA 16-1	FA 16-2
		18	FA 18-1	FA 18-2
		20	FA 20-1	FA 20-2
		22	FA 22-1	FA 22-2
	In-Concrete tests (آزمایش‌های در بتن)	16	FC 16-1	FC 16-2
		18	FC 18-1	FC 18-2
		20	FC 20-1	FC 20-2
		22	FC 22-1	FC 22-2



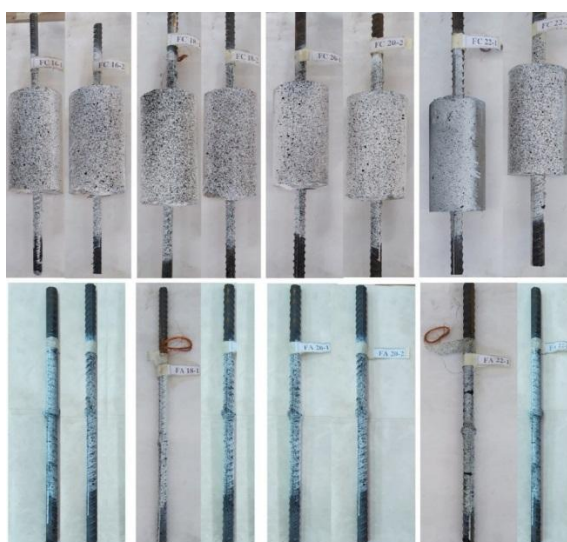
شکل ۱: نمونه‌های بدون وصله مورد استفاده در تصویربرداری دیجیتال

همچنین از هر کدام از میلگردهای با قطر ۱۸،۱۶، ۲۰ و ۲۲ میلی‌متر دو نمونه به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله کوپلری بدون محصورشدگی در بتن و دو نمونه دیگر به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله کوپلری محصور در بتن جهت استفاده در فرایند تصویربرداری دیجیتال در نظر گرفته شد. در مجموع ۱۶ نمونه دارای وصله مکانیکی رنگ‌آمیزی شده و مطابق شکل ۲ آماده تصویربرداری گردید.

علاوه بر این، از هر کدام از میلگردهای با قطر ۱۸،۱۶، ۲۰ و ۲۲ میلی‌متر دو نمونه به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر بدون محصورشدگی در بتن و دو نمونه دیگر به‌عنوان نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر محصور در بتن جهت استفاده در فرایند تصویربرداری دیجیتال در نظر گرفته شد. در مجموع ۱۶ نمونه دارای وصله جوش سربه‌سر رنگ‌آمیزی شده و مطابق شکل ۳ آماده تصویربرداری گردید.



شکل ۲: نمونه‌های دارای وصله مکانیکی مورد استفاده در تصویربرداری دیجیتال



شکل ۳: نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر مورد استفاده در تصویربرداری دیجیتال

۳-۳- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

۳-۳-۱- دستگاه انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌ها

برای انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌ها از دستگاه آزمایش یونیورسال ۶۰ تنی اینسترون^۱ (شکل ۴) ساخت کشور ایالات متحده آمریکا و در آزمایشگاه تحقیقاتی مقاومت مصالح دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا قرار دارد. این دستگاه قابلیت انجام آزمایش‌های کشش، فشار و خستگی را داراست. آزمایش کشش بر روی نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش با سرعت ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.



شکل ۴: دستگاه یونیورسال ۶۰ تنی اینسترون

۳-۳-۲- تجهیزات مربوط به تصویربرداری دیجیتالی (DIC)

روش کرنش‌سنج تصویری^۲ (DIC) یک روش نوین و بر اساس پردازش تصویرهایی است که دوربین در زمان‌های بسیار کوتاه از نمونه مورد آزمایش تهیه می‌کند و می‌تواند برای اندازه‌گیری دقیق کرنش بکار گرفته شود. به واسطه قابلیت این روش برای دریافت سریع داده‌ها، این فن برای تعیین ویژگی‌های مواد در هردو محدوده الاستیک و پلاستیک بسیار مناسب است. مهم‌ترین وسیله در این روش، دوربین تصویربرداری با برند فوترون^۳ و مدل FASTCAM Mini AX با قابلیت ثبت حداکثر ۴۰۰۰ عکس در ثانیه با رزولوشن ۱۲۸۰ در ۱۲۴۰ پیکسل می‌باشد. دیگر تجهیزات مورد استفاده در این روش شامل نورافکن و یک لپ‌تاپ (شکل ۵) جهت تحلیل تصاویر و ارائه نتایج حاصل از تحلیل است.

¹ Instron 60T

² Digital Image Correlation (DIC)

³ Photron



شکل ۵: تجهیزات مربوط به تصویربرداری دیجیتال (DIC) شامل دوربین، نورافن، لپ تاپ و دستگاه کشش اینسترون

۳-۴- روش انجام آزمایش

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها جهت تصویربرداری دیجیتال، نمونه‌ها به ترتیب داخل فک دستگاه کشش قرار گرفته و اندازه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته بین دو فک پس از بسته‌شدن فک‌ها به‌عنوان طول اولیه نمونه قبل از شروع آزمایش به‌دقت اندازه‌گیری شده و یادداشت گردید. سپس فاصله دوربین و نورافکن تا نمونه قرار گرفته داخل دستگاه کشش، طوری تنظیم می‌شود که تصویربرداری با کیفیت صورت گیرد. تنظیمات مربوط به دوربین و تصویربرداری انجام شده و شروع بارگذاری دستگاه کشش و تصویربرداری توسط دوربین در یک لحظه انجام شده و تا لحظه گسیختگی نمونه ادامه داشت.

با شروع بارگذاری، سیستم متصل به دستگاه کشش شروع به ثبت مقدار نیروی کششی وارد شده به نمونه در هر لحظه و تغییر طول متناظر ایجاد شده در نمونه نموده و این روند تا لحظه گسیختگی ادامه می‌یابد. نتایج حاصل از کشش مستقیم نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش اینسترون به‌صورت مقادیر عددی تغییرات طول نمونه و بار وارده بر حسب زمان در قالب فایل اکسل به دست آمد. با اندازه‌گیری طولی از نمونه که بین دو فک دستگاه کشش قرار گرفته به‌عنوان طول اولیه نمونه‌ها و با داشتن تغییر طول نمونه‌ها، کرنش هر نمونه از لحظه شروع بارگذاری تا لحظه گسیختگی محاسبه شد. همچنین با توجه به قطر واقعی نمونه‌های مختلف که توسط کولیس و بدون احتساب آج‌های آن اندازه‌گیری شده است، سطح مقطع نمونه‌ها محاسبه شده و با داشتن نیروی اعمال شده بر هر نمونه در حین آزمایش، تنش وارده بر هر نمونه به دست آمده و به این ترتیب نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مختلف ترسیم گردید.


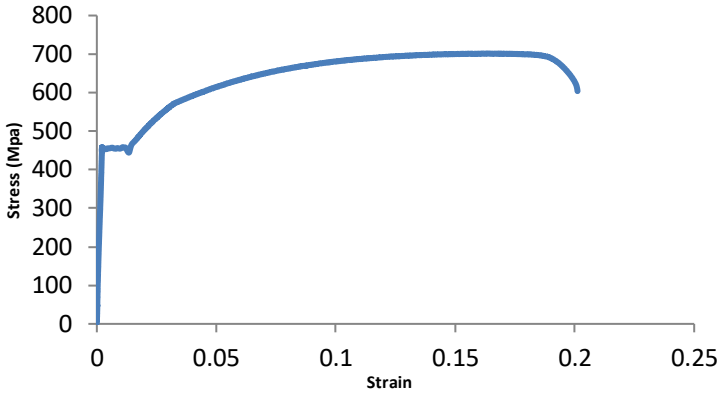

هم‌زمان با شروع بارگذاری، دوربین دیجیتال به‌صورت خودکار شروع به تصویربرداری از نمونه در حال کشش نموده به‌طوری که در هر ثانیه، ۵۰ عکس گرفته شده و این روند تا لحظه گسیختگی نمونه ادامه پیدا کرد. در حین انجام عکس‌برداری تصاویر در یک فایل ذخیره گردید. تحلیل تصاویر حاصل از تصویربرداری دیجیتال با استفاده از نرم‌افزار GOM انجام شد. با انتخاب مشخصات پاسخ در نرم‌افزار، خروجی‌های مدنظر مانند کرنش ایجاد شده در نمونه و توزیع آن با استفاده از تحلیل تصاویر هر نمونه به دست آمد. برای هماهنگ‌سازی مقادیر بار-جابجایی اندازه‌گیری شده به‌وسیله دستگاه کشش اینسترون با مقادیر کرنش اندازه‌گیری شده به‌روش تصویربرداری دیجیتال، از توابع INDEX، MATCH و FORECAST نرم‌افزار Excel استفاده شد.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

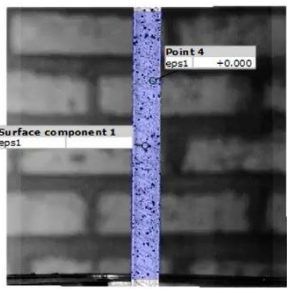
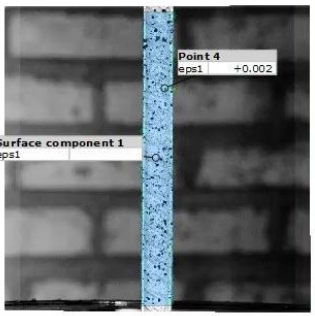
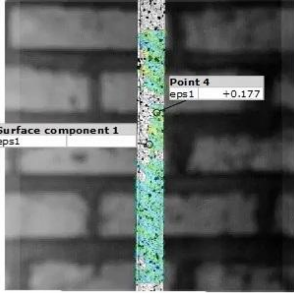
در این بخش پس از خلاصه کردن نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی هر گروه از نمونه‌های مورد آزمایش، به تجزیه و تحلیل آن‌ها پرداخته سپس نتایج به دست آمده در قالب نمودارها و جداول با یکدیگر مقایسه گردید.

۴-۱- نمودارهای تنش- کرنش و مشخصات مکانیکی نمونه‌ها


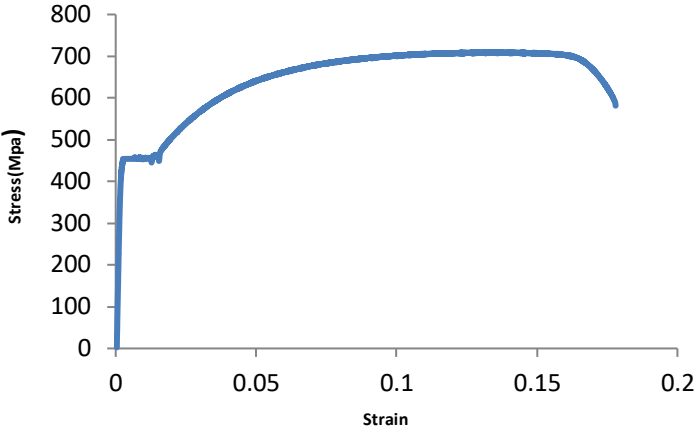

نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها با استفاده از اطلاعات حاصل از دستگاه کشش مستقیم اینسترون برای تمامی ۳۶ نمونه ترسیم گردید. میانگین نتایج حاصل از نمودارهای تنش-کرنش هر گروه از نمونه‌های مورد آزمایش شامل مقادیر تنش و کرنش تسلیم و گسیختگی، مدول الاستیسیته و همچنین مقادیر تغییر طول نمونه‌های مختلف محاسبه شد. به عنوان نمونه شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نمودار تنش-کرنش و مشخصات مکانیکی بدست آمده از دستگاه کشش مستقیم و تصاویر توزیع کرنش و کرنش تسلیم و گسیختگی حاصل از تصویربرداری دیجیتال NA 16-1 نشان می‌دهند. علاوه بر این، شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودار تنش-کرنش و مشخصات مکانیکی بدست آمده از دستگاه کشش مستقیم و تصاویر توزیع کرنش و کرنش تسلیم و گسیختگی حاصل از تصویربرداری دیجیتال را برای نمونه MA 16-1 نشان می‌دهند.

قبل از آزمایش	NA 16-1			بعد از آزمایش
				
$\sigma_0 = 0$	$\sigma_y = 438/29 \text{ MPa}$	$P_{max} = 128/84 \text{ kN}$		$\sigma_u = 70/42 \text{ MPa}$
$\epsilon_0 = 0$	$\epsilon_y = 0/002$	$\Delta L_{max} = 58/73 \text{ mm}$	$E_s = 210/88 \text{ GPa}$	$\epsilon_u = 0/2011$

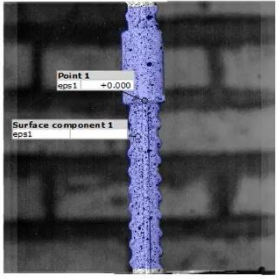
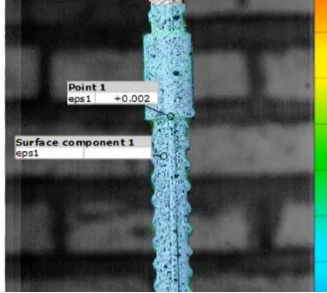
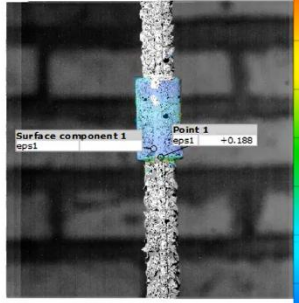
شکل ۶: نمودار تنش-کرنش و مشخصات مکانیکی نمونه NA 16-1

کد نمونه	قبل از بارگذاری	لحظه تسلیم	در آستانه گسیختگی
NA 16-1	 $\epsilon_0 = 0$	 $\epsilon_y = 0/002$	 $\epsilon_u = 0/177$

شکل ۷: تصاویر توزیع کرنش و مقادیر کرنش تسلیم و گسیختگی نمونه NA 16-1 حاصل از تصویربرداری دیجیتال

قبل از آزمایش	MA 16-1			بعد از آزمایش
				
$\sigma_0 = \cdot$	$\sigma_y = 435/45 \text{ MPa}$	$P_{max} = 130/36 \text{ kN}$		$\sigma_u = 709/71 \text{ MPa}$
$\epsilon_0 = \cdot$	$\epsilon_y = 0/0022$	$\Delta L = 55/053 \text{ mm}$	$E_s = 197/93 \text{ GPa}$	$\epsilon_u = 0/178$

شکل ۸: نمودار تنش-کرنش و مشخصات مکانیکی نمونه MA 16-1

کد نمونه	قبل از بارگذاری	لحظه تسلیم	در آستانه گسیختگی
MA 16-1			
	$\epsilon_0 = \cdot$	$\epsilon_y = 0/0020$	$\epsilon_u = 0/188$

شکل ۹: تصاویر توزیع کرنش و مقادیر کرنش تسلیم و گسیختگی نمونه MA 16-1 حاصل از تصویربرداری دیجیتال

میان نتایج کرنش تسلیم حاصل از تصویربرداری دیجیتال و دستگاه اینسترون، به ترتیب برای نمونه‌های NA و MA ، ۰ و ۹/۱ درصد تفاوت مشاهده می‌شود. برای کرنش نهایی، این تفاوت به ترتیب برای نمونه‌های NA و MA عبارتست از ۱۲- و ۵/۶ درصد. این مقایسه نشان‌دهنده نتایج قابل اطمینان روش تصویربرداری دیجیتال در اندازه‌گیری کرنش‌های میلگردها در آزمایش کشش است.

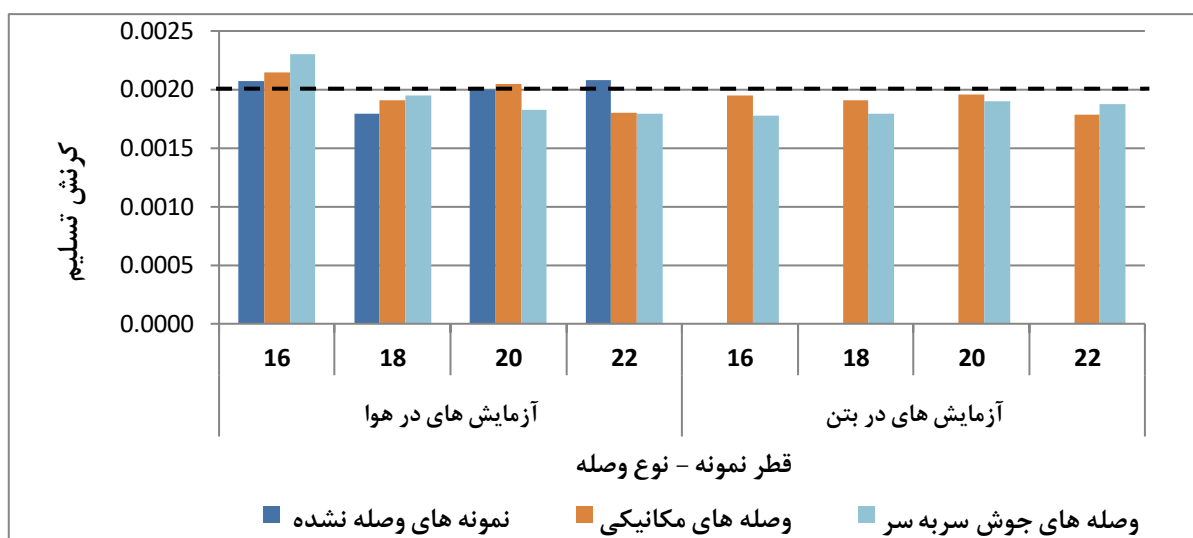
همان‌طور که انتظار می‌رفت تمامی منحنی‌های تنش-کرنش دارای ناحیه با رفتار خطی مشخص، نقطه تسلیم و شکل‌پذیری مشهود و قابل توجه هستند. در تمامی نمودارها سخت‌شدگی کرنشی بعد از پله تسلیم رخ داده است که در میلگردهای نیم‌سخت، قابل انتظار است. تقریباً در تمامی نمونه‌های بدون وصله، محل وقوع تسلیم شدگی و به تبع آن شکست نمونه در نقاط میانی طول نمونه و به صورت زاویه شکست نزدیک به ۴۵ درجه رخ داد که تأیید کننده شکست نرم نمونه‌هاست. همچنین در همه نمونه‌های با وصله، محل شکست در خارج از ناحیه وصله‌شده و در روی خود میلگرد قرار داشت که یکی از مشخصات وصله استاندارد و باکیفیت است.

۴-۲- مقایسه کرنش تسلیم و کرنش گسیختگی بین نمونه‌ها

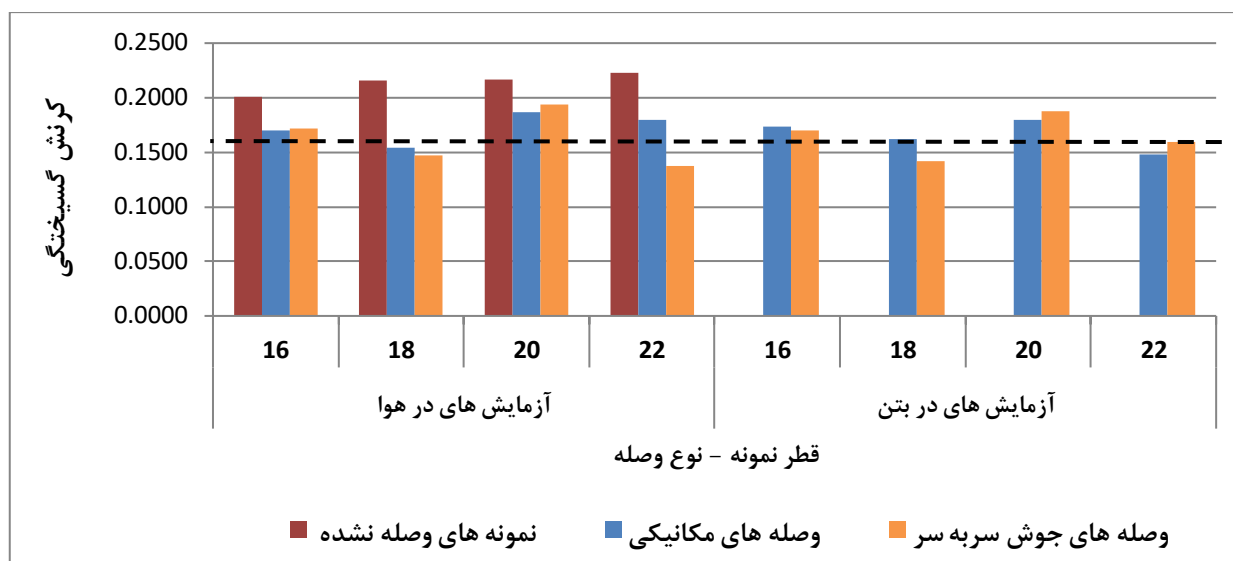
با استفاده از نتایج به دست آمده در بخش ۴-۱ میانگین کرنش تسلیم و کرنش گسیختگی نمونه‌های بدون وصله، دارای وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر برای مقایسه با یکدیگر در قالب جدول ۲ ارائه شده است. با استفاده از اطلاعات جدول ۲، نمودار میله‌ای تغییرات کرنش تسلیم نمونه‌های مذکور برای مقایسه با یکدیگر در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار کرنش تسلیم در اکثر نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده افزایش مختصری یافته، در حالی که این مقدار در برخی از نمونه‌ها روند کاهشی داشته است. کرنش تسلیم در بیشتر نمونه‌های دارای وصله مکانیکی نسبت به نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر به مقدار بسیار کم افزایش دارد. به طور کلی می‌توان گفت که افزودن وصله چه از نوع مکانیکی چه از نوع جوش سربه‌سر، تغییر محسوس و اثرگذاری قابل توجهی بر کرنش تسلیم نمونه‌ها ندارد که کاملاً منطبق بر عملکرد مورد انتظار یک وصله استاندارد است. از نظر مقایسه میان کرنش تسلیم اندازه‌گیری شده به روش تجربی در این تحقیق و مقدار کرنش تسلیم اسمی مورد قبول مبحث ۹ (۱۳۹۹) که برابر ۰/۰۰۲۰ است [۳]، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که این دو مقدار با درصد بسیار کمی از هم اختلاف دارند. همچنین، همان‌طور که در جدول ۲ و نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود مقدار کرنش گسیختگی در تمام نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده کاهش یافته است. کرنش گسیختگی در نیمی از نمونه‌های دارای وصله مکانیکی، بیشتر است و در نصف دیگر این نمونه‌ها مقدار کمتری نسبت به نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر دارد.

جدول ۲: مقایسه کرنش تسلیم و کرنش گسیختگی در نمونه‌های مختلف

آزمایش	نمونه‌های بدون وصله			وصله‌های مکانیکی			وصله‌های جوش سربه‌سر		
	نمونه	ϵ_y	ϵ_u	نمونه	ϵ_y	ϵ_u	نمونه	ϵ_y	ϵ_u
آزمایش‌های در هوا	NA 16	۰/۰۰۲۱	۰/۲۰۱۲	MA 16	۰/۰۰۲۲	۰/۱۶۹۹	FA 16	۰/۰۰۲۳	۰/۱۷۲۰
	NA 18	۰/۰۰۱۸	۰/۲۱۵۶	MA 18	۰/۰۰۱۹	۰/۱۵۴۳	FA 18	۰/۰۰۲۰	۰/۱۴۷۲
	NA 20	۰/۰۰۲۰	۰/۲۱۶۳	MA 20	۰/۰۰۲۱	۰/۱۸۷۰	FA 20	۰/۰۰۱۸	۰/۱۹۴۱
	NA 22	۰/۰۰۲۱	۰/۲۲۳۰	MA 22	۰/۰۰۱۸	۰/۱۷۹۸	FA 22	۰/۰۰۱۸	۰/۱۳۷۳
آزمایش‌های در بتن	NC 16			MC 16	۰/۰۰۲۰	۰/۱۷۳۱	FC 16	۰/۰۰۱۸	۰/۱۷۰۲
	NC 18			MC 18	۰/۰۰۱۹	۰/۱۶۲۲	FC 18	۰/۰۰۱۸	۰/۱۴۱۷
	NC 20			MC 20	۰/۰۰۲۰	۰/۱۷۹۳	FC 20	۰/۰۰۱۹	۰/۱۸۷۶
	NC 22			MC 22	۰/۰۰۱۸	۰/۱۴۸۳	FC 22	۰/۰۰۱۹	۰/۱۵۹۶



شکل ۱۰: مقایسه کرنش تسلیم تجربی در نمونه‌های مختلف (کرنش تسلیم اسمی میلگرد آج ۴۰۰ مطابق مبحث ۹ (۱۳۹۹) برابر ۰/۰۰۲۰ است که با خط چین افقی نمایش داده شده است [۳]).



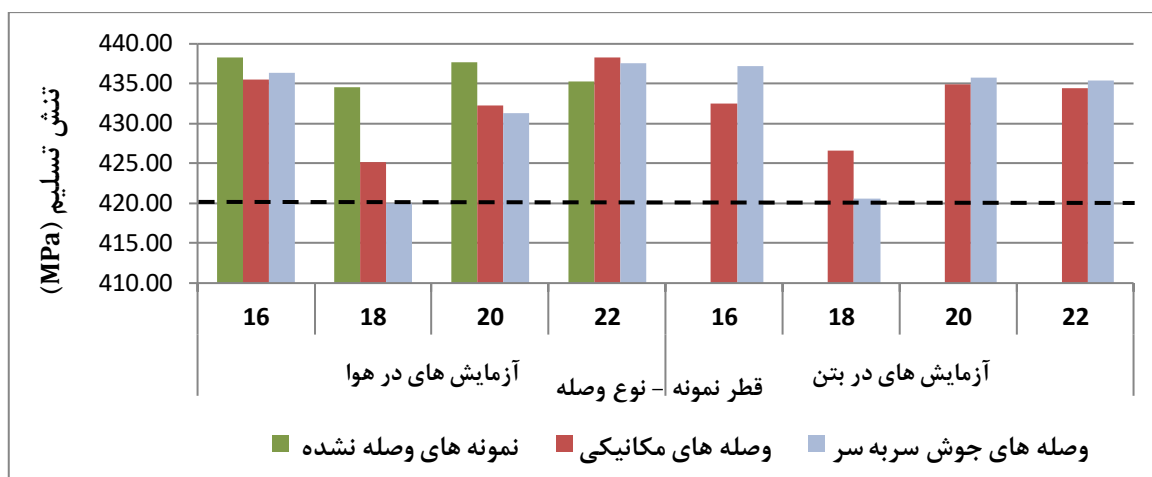
شکل ۱۱: مقایسه کرنش گسیختگی تجربی در نمونه‌های مختلف (حداقل کرنش گسیختگی اسمی میلگرد آج ۴۰۰ مطابق مبحث ۹ (۱۳۹۹) برابر ۰/۱۶ است که با خط‌چین افقی نمایش داده شده است [۳].)

۳-۴- مقایسه تنش تسلیم و تنش گسیختگی بین نمونه‌ها

محاسبه حد تسلیم با توجه به بند ۹-۴-۸-۲-ب مبحث ۹ مقررات ملی (۱۳۹۹) و با استفاده از روش توقف نیرو انجام گرفته است. این روش، تنش حد تسلیم به صورت مقدار تنش نظیر نقطه‌ای که افزایش نیرو بعد از آن مشاهده نمی‌شود، تعریف می‌شود [۳]. با استفاده از نتایج به دست آمده در بخش ۴-۱ میانگین تنش تسلیم و گسیختگی نمونه‌های بدون وصله، دارای وصله مکانیکی و جوش سربه سر برای مقایسه با یکدیگر در قالب جدول ۳ ارائه شده است و برای مقایسه با یکدیگر در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. حد تسلیم تجربی تمامی نمونه‌های بدون وصله از حد تسلیم مبحث ۹ (۱۳۹۹) برای میلگرد آج ۴۰۰ کمتر نشده است که نشان دهنده کیفیت تولید و مقاومت کافی میلگردهای مورد استفاده در این پژوهش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تنش تسلیم تجربی در بیشتر نمونه‌های وصله شده نسبت به نمونه‌های وصله نشده کاهش یافته است ولی از حد تسلیم مبحث ۹ (۱۳۹۹) برای میلگرد آج ۴۰۰ بیشتر است. در برخی از نمونه‌ها افزایش مقدار تنش تسلیم نمونه وصله شده نسبت به نمونه مشابه بدون وصله مشاهده می‌شود.

جدول ۳: مقایسه تنش تسلیم و تنش گسیختگی در نمونه‌های مختلف

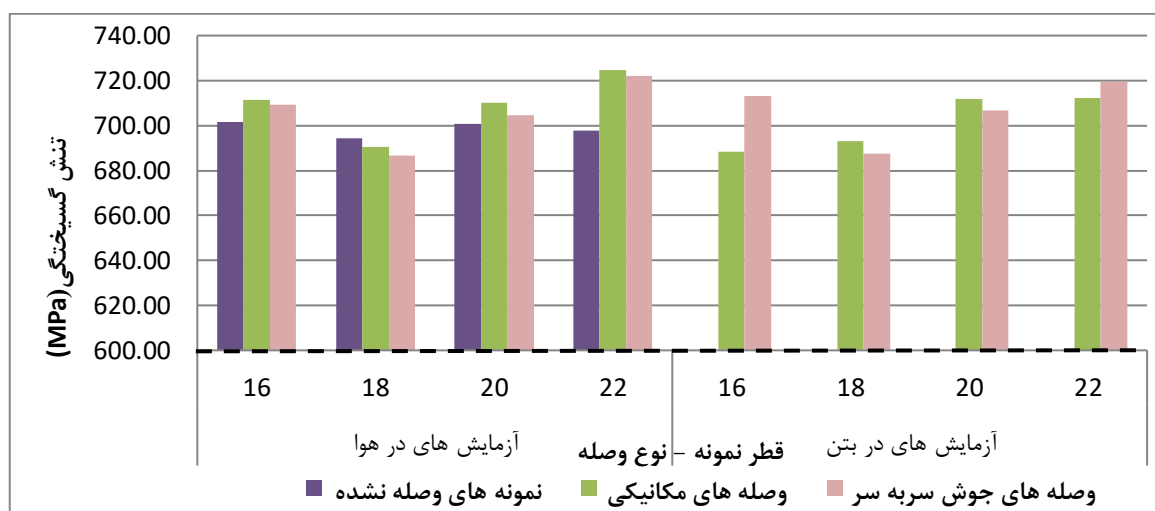
آزمایش	نمونه‌های بدون وصله			وصله‌های مکانیکی			وصله‌های جوش سربه سر		
	نمونه	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	نمونه	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	نمونه	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)
آزمایش‌های در هوا	NA 16	۴۳۸/۲۹	۷۰۱/۴۱	MA 16	۴۳۵/۵۲	۷۱۱/۲۷	FA 16	۴۳۶/۴۰	۷۰۹/۳۹
	NA 18	۴۳۴/۶۲	۶۹۴/۱۷	MA 18	۴۲۵/۱۳	۶۹۰/۵۵	FA 18	۴۲۰/۰۱	۶۸۶/۶۴
	NA 20	۴۳۷/۶۹	۷۰۰/۵۴	MA 20	۴۳۲/۲۴	۷۰۹/۹۴	FA 20	۴۳۱/۲۸	۷۰۴/۶۲
	NA 22	۴۳۵/۲۹	۶۹۷/۹۰	MA 22	۴۳۸/۳۰	۷۲۴/۷۳	FA 22	۴۳۷/۶۱	۷۲۲/۰۵
آزمایش‌های در بتن	NC 16	-	-	MC 16	۴۳۲/۵۷	۶۸۸/۳۷	FC 16	۴۳۷/۲۲	۷۱۲/۹۰
	NC 18	-	-	MC 18	۴۲۶/۶۲	۶۹۳/۱۵	FC 18	۴۲۰/۵۸	۶۸۷/۳۴
	NC 20	-	-	MC 20	۴۳۴/۹۵	۷۱۱/۶۸	FC 20	۴۳۵/۷۳	۷۰۶/۷۵
	NC 22	-	-	MC 22	۴۳۴/۴۴	۷۱۲/۲۱	FC 22	۴۳۵/۳۸	۷۱۹/۶۴



شکل ۱۲: مقایسه تنش تسلیم در نمونه‌های مختلف (حداقل تنش تسلیم اسمی مطابق مبحث ۹ (۱۳۹۹) برابر ۴۰۰ مگاپاسکال است که با خط چین افقی نمایش داده شده است [۳].)

تنش تسلیم در نیمی از نمونه‌های دارای وصله مکانیکی مقداری بیشتر و در نصف دیگر این نمونه‌ها مقدار کمتری نسبت به نمونه‌های دارای وصله جوش سربه سر دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت تنش تسلیم نمونه‌های مشابه با دو نوع وصله متفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. پرداختن به این مقایسه از آنجا اهمیت می‌یابد که مهندس طراح در تمامی روابط محاسبات سازه بتن‌آرمه از تنش تسلیم اسمی ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده می‌کند که با وجود وصله نیز، قابلیت اعتماد محاسبات سازه پابرجا خواهد بود.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نسبت تنش گسیختگی به تنش تسلیم در تمامی نمونه‌های میلگرد بدون وصله حدود ۱/۶ است که از مقدار تعیین شده توسط مبحث ۹ (۱۳۹۹) مقررات ملی ساختمان یعنی ۱/۲۵ بیشتر است. این نسبت تنش، تأیید کننده مشخصات لازم برای یک میلگرد ساختمانی است. علاوه بر این، مقدار تنش گسیختگی در بیشتر نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده افزایش یافته است. در برخی از نمونه‌ها کاهش مقدار تنش گسیختگی نمونه وصله‌شده نسبت به نمونه مشابه مشاهده شد. در تعداد زیادی از نمونه‌های دارای وصله مکانیکی تنش گسیختگی بیشتر از نمونه‌های مشابه دارای وصله جوش سربه سر بود. به‌طور کلی می‌توان گفت تنش گسیختگی نمونه‌های مشابه با دو نوع وصله متفاوت در نمونه‌های دارای وصله مکانیکی بیشتر از نمونه‌های مشابه با وصله جوش سربه سر است.



شکل ۱۳: مقایسه تنش گسیختگی در نمونه‌های مختلف (حداقل تنش گسیختگی اسمی مطابق مبحث ۹ (۱۳۹۹) برابر ۶۰۰ مگاپاسکال است که با خط چین افقی نمایش داده شده است [۳].)

۴-۴- مقایسه میزان سختی بین نمونه‌ها

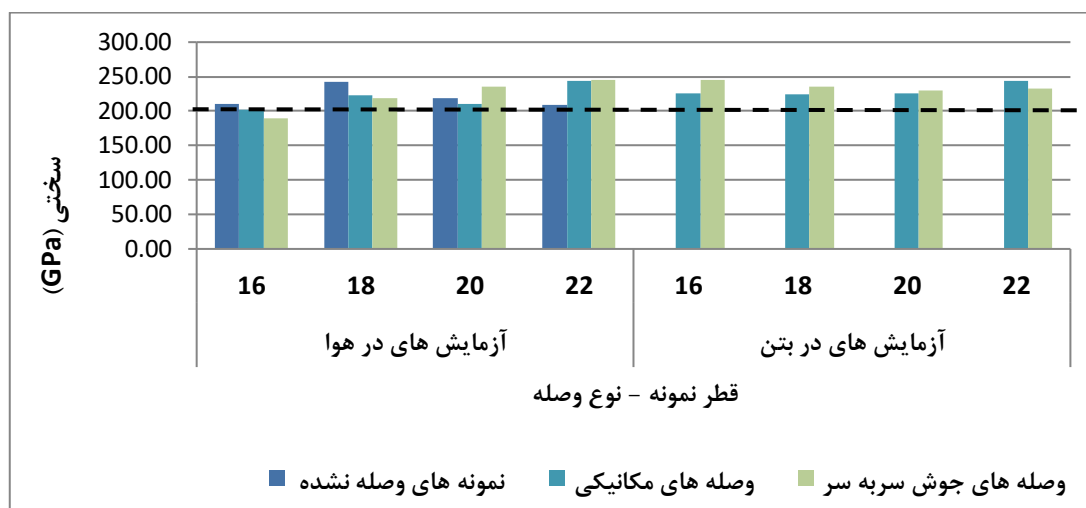
سختی هر جسم به صورت میزان مقاومت آن جسم در برابر شکل‌پذیری تعریف می‌شود. شیب نمودار تنش- کرنش هر ماده در ناحیه خطی برابر است با سختی الاستیک یا مدول الاستیسیته آن ماده، بنابراین با استفاده از رابطه زیر، سختی نمونه‌های مختلف میلگردهای وصله شده و وصله نشده محاسبه شد.

$$E = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} \quad (1)$$

که در رابطه فوق σ_y تنش تسلیم، ε_y کرنش تسلیم و E مدول مدول الاستیسیته یا سختی الاستیک است. با استفاده از نتایج به دست آمده در بخش ۴-۱ میانگین میزان پارامتر سختی الاستیک (مدول الاستیسیته) نمونه‌های بدون وصله، دارای وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر در قالب جدول ۴ ارائه شده، سپس نمودار میله‌ای تغییرات سختی برای مقایسه با یکدیگر در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴: مقایسه مقدار سختی در نمونه‌های مختلف

آزمایش	نمونه‌های بدون وصله		وصله‌های مکانیکی		وصله‌های جوش سربه‌سر	
	نمونه	سختی (GPa)	نمونه	سختی (GPa)	نمونه	سختی (GPa)
آزمایش‌های در هوا	NA 16	۲۱۰/۸۸	MA 16	۲۰۲/۶۸	FA 16	۱۹۰/۰۵
	NA 18	۲۴۲/۲۵	MA 18	۲۲۲/۹۳	FA 18	۲۱۸/۶۷
	NA 20	۲۱۸/۸۴	MA 20	۲۱۰/۹۵	FA 20	۲۳۵/۷۷
	NA 22	۲۰۹/۴۳	MA 22	۲۴۲/۵۰	FA 22	۲۴۴/۶۸
آزمایش‌های در بتن	NC 16		MC 16	۲۲۵/۴۰	FC 16	۲۴۵/۶۷
	NC 18		MC 18	۲۲۴/۱۳	FC 18	۲۳۶/۰۸
	NC 20		MC 20	۲۲۶/۰۳	FC 20	۲۳۰/۰۴
	NC 22		MC 22	۲۴۲/۳۶	FC 22	۲۳۲/۲۲



شکل ۱۴: مقایسه مقدار سختی در نمونه‌های مختلف (مدول الاستیسیته میلگرد مطابق مبحث ۹ (۱۳۹۹) برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال است که با خط‌چین افقی نمایش داده شده است [۳].)

از نتایج مندرج در جدول ۴ و شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که هر چند سختی الاستیک تمامی نمونه‌ها اعم از وصله‌شده و وصله‌نشده حداقل سختی مدنظر مبحث ۹ (۱۳۹۹) را ارضا کرده است اما در مقام مقایسه میان دو روش وصله و همچنین مقایسه بین وصله‌شده‌ها و وصله‌نشده‌ها می‌توان گفت مقدار سختی در نمونه‌های وصله‌شده با قطرهای ۱۶ و ۱۸ میلی‌متر نسبت به نمونه‌های وصله نشده مشابه خود کاهش یافته است. از سوی دیگر، در برخی از نمونه‌ها همانند نمونه با قطر ۲۲ میلی‌متر شاهد افزایش مقدار سختی نمونه وصله‌شده نسبت به نمونه مشابه وصله نشده هستیم. اکثر نمونه‌های با وصله مکانیکی سختی کمتری نسبت به وصله‌های جوش سربه‌سر مشابه خود داشتند. درحالی‌که سختی وصله‌های مکانیکی با قطرهای ۱۶ و ۲۲ میلی‌متر نسبت به سختی نمونه‌های مشابه دارای جوش سربه‌سر بیشتر بود.

۴-۵- مقایسه میزان شکل‌پذیری بین نمونه‌ها

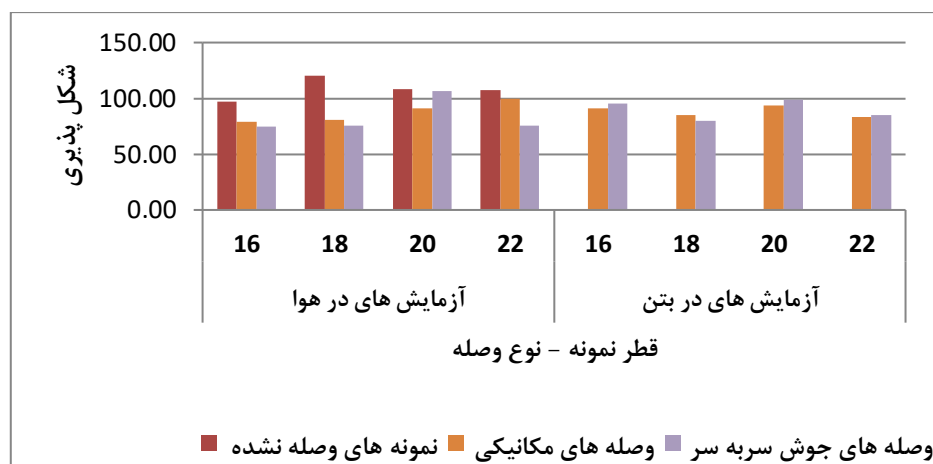
طبق تعریف، شکل‌پذیری برابر است با نسبت کرنش نهایی بر کرنش تسلیم و این مقدار با شاخص بدون بعد شکل‌پذیری (μ) نشان داده می‌شود.

$$\mu = \frac{\epsilon_{u}}{\epsilon_y} \quad (2)$$

که در رابطه فوق ϵ_u کرنش نهایی میلگرد است. با استفاده از نتایج به‌دست آمده در بخش ۴-۱، میزان شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های بدون وصله، دارای وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر در قالب جدول ۵ ارائه شده، سپس نمودار میله‌ای تغییرات شکل‌پذیری برای مقایسه با یکدیگر در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار شکل‌پذیری در همه نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله نشده مشابه خود کاهش یافته است. به طور میانگین می‌توان گفت نمونه‌های با وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده به ترتیب ۱۸/۷۸ و ۲۸/۸۶ درصد کاهش شکل‌پذیری داشته‌اند. این افت شکل‌پذیری در نمونه‌های با وصله نسبت به نمونه‌های بدون وصله را می‌توان ناشی از اثرات ناشی از کرنش‌های پسماند پلاستیک ناشی از جوشکاری سربه‌سر در نمونه‌های با وصله فورجینگ و در نتیجه کاهش شکل‌پذیری در این وصله‌ها دانست. این امر در نمونه‌های با کوپلر مکانیکی می‌تواند با ضعف و عدم پیوستگی موجود در رزوه‌های ایجاد شده در کوپلرهای مکانیکی در ارتباط باشد. در مقایسه شکل‌پذیری بین دو روش وصله به‌کاررفته در این پژوهش می‌توان گفت نیمی از نمونه‌های وصله مکانیکی شکل‌پذیری کمتری نسبت به وصله‌های جوش سربه‌سر مشابه خود داشتند. درحالی‌که نصف دیگر وصله‌های مکانیکی نسبت به نمونه‌های مشابه شکل‌پذیری بیشتری داشتند.

جدول ۵: مقایسه مقدار شکل‌پذیری در نمونه‌های مختلف

آزمایش	نمونه‌های بدون وصله		وصله‌های مکانیکی		وصله‌های جوش سربه‌سر	
	نمونه	شکل‌پذیری	نمونه	شکل‌پذیری	نمونه	شکل‌پذیری
آزمایش‌های دراز	NA 16	۹۷/۱۸	MA 16	۷۸/۹۹	FA 16	۷۵/۰۸
	NA 18	۱۲۰/۱۵	MA 18	۸۰/۷۰	FA 18	۷۵/۹۰
	NA 20	۱۰۸/۱۳	MA 20	۹۱/۲۴	FA 20	۱۰۶/۱۴
	NA 22	۱۰۷/۳۰	MA 22	۹۹/۸۸	FA 22	۷۵/۵۲
آزمایش‌های دراز	NC 16		MC 16	۹۰/۸۲	FC 16	۹۵/۷۱
	NC 18		MC 18	۸۵/۱۷	FC 18	۸۰/۲۰
	NC 20		MC 20	۹۳/۲۱	FC 20	۹۸/۶۲
	NC 22		MC 22	۸۲/۹۶	FC 22	۸۴/۹۹



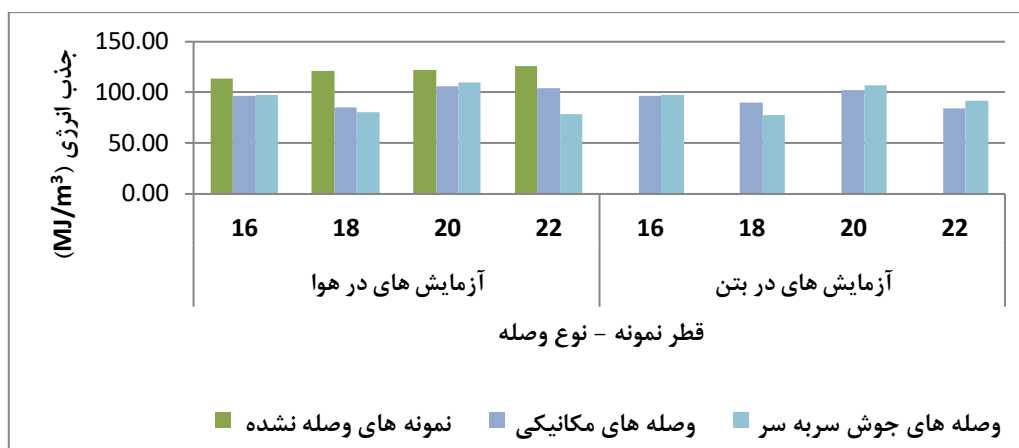
شکل ۱۵: مقایسه مقدار شکل پذیری در نمونه‌های مختلف

۴-۶- مقایسه میزان جذب انرژی بین نمونه‌ها

مساحت سطح زیر نمودار تنش- کرنش یک ماده بیانگر میزان ظرفیت جذب انرژی آن ماده در واحد حجم آن (چگالی انرژی) قبل از گسیختگی است. با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش نمونه‌های مورد آزمایش، میزان قابلیت جذب انرژی هر نمونه در واحد حجم آن محاسبه شد. با استفاده از نتایج به دست آمده از بخش ۴-۱، پارامتر جذب انرژی نمونه‌های بدون وصله، دارای وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر در قالب جدول ۶ و شکل ۱۲ ارائه شد. مقدار جذب انرژی در همه نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده مشابه خود کاهش یافته است. بیشتر نمونه‌های وصله مکانیکی جذب انرژی کمتری نسبت به وصله‌های جوش سربه‌سر مشابه خود داشتند. به طور میانگین می‌توان گفت نمونه‌های با وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده به ترتیب ۲۲ و ۲۵ درصد کاهش جذب انرژی داشته‌اند. این در حالی است که این نتایج در همبستگی با پارامتر شکل پذیری است به طوری که در قسمت قبل مشاهده شد مقدار شکل پذیری در همه نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده مشابه خود کاهش یافته است. به عبارت دیگر شکل پذیری کمتر با جذب انرژی کمتر همراه بوده است..

جدول ۶: مقایسه مقدار جذب انرژی در نمونه‌های مختلف

آزمایش	نمونه‌های بدون وصله		وصله‌های مکانیکی		وصله‌های جوش سربه‌سر	
	نمونه	جذب انرژی ($\frac{MJ}{m^3}$)	نمونه	جذب انرژی ($\frac{MJ}{m^3}$)	نمونه	جذب انرژی ($\frac{MJ}{m^3}$)
آزمایش‌های در هوا	NA 16	۱۱۴/۰۴	MA 16	۹۶/۸۱	FA 16	۹۷/۸۵
	NA 18	۱۲۱/۱۵	MA 18	۸۵/۶۰	FA 18	۸۰/۹۵
	NA 20	۱۲۲/۵۰	MA 20	۱۰۶/۲۰	FA 20	۱۰۹/۷۵
	NA 22	۱۲۵/۷۵	MA 22	۱۰۴/۱۱	FA 22	۷۹/۱۰
آزمایش‌های در بتن	NC 16		MC 16	۹۶/۳۶	FC 16	۹۷/۳۹
	NC 18		MC 18	۹۰/۳۱	FC 18	۷۸/۱۳
	NC 20		MC 20	۱۰۲/۲۵	FC 20	۱۰۶/۵۸
	NC 22		MC 22	۸۴/۷۹	FC 22	۹۱/۶۹



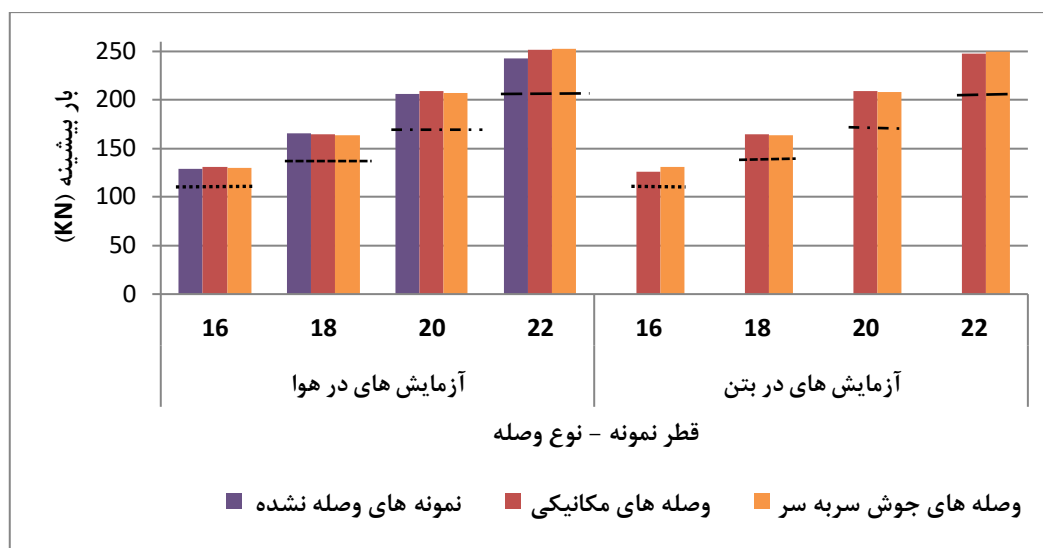
شکل ۱۶: مقایسه مقدار جذب انرژی در نمونه‌های مختلف

۴-۷- مقایسه میزان بار بیشینه بین نمونه‌ها

با استفاده از نتایج به دست آمده در بخش‌های ۴-۱، بار بیشینه نمونه‌های بدون وصله، دارای وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر در قالب جدول ۷ و شکل ۱۳ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود تمامی وصله‌ها اعم از مکانیکی و جوش سربه‌سر و همچنین نمونه‌های در هوا یا در بتن، حداقل مقاومت گسیختگی مقرر توسط میحث ۹ (۱۳۹۹) یعنی ۱۲۵ درصد مقاومت تسلیم میلگرد را دارا بوده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود مقدار بار بیشینه در اکثر نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله نشده مشابه خود افزایش یافته است.

جدول ۷: مقایسه مقدار بار بیشینه در نمونه‌های مختلف

آزمایش	نمونه‌های بدون وصله		وصله‌های مکانیکی		وصله‌های جوش سربه‌سر		حداقل بار گسیختگی لازم برای وصله استاندارد 1.25σ _y A (kN)
	نمونه	بار بیشینه (kN)	نمونه	بار بیشینه (kN)	نمونه	بار بیشینه (kN)	
آزمایش‌های در هوا	NA 16	۱۲۸/۸۴	MA 16	۱۳۰/۶۵	FA 16	۱۳۰/۳۱	۱۱۰/۱
	NA 18	۱۶۵/۳۲	MA 18	۱۶۴/۴۶	FA 18	۱۶۳/۵۳	۱۳۸/۲
	NA 20	۲۰۶/۰۸	MA 20	۲۰۸/۸۵	FA 20	۲۰۷/۲۸	۱۷۱/۸
	NA 22	۲۴۲/۶۵	MA 22	۲۵۱/۹۸	FA 22	۲۵۲/۲۰	۲۰۶/۷
آزمایش‌های در بتن	NC 16		MC 16	۱۲۶/۴۵	FC 16	۱۳۰/۹۵	۱۱۰/۱
	NC 18		MC 18	۱۶۵/۰۸	FC 18	۱۶۳/۶۹	۱۳۸/۲
	NC 20		MC 20	۲۰۹/۳۵	FC 20	۲۰۷/۹۰	۱۷۱/۸
	NC 22		MC 22	۲۴۷/۶۲	FC 22	۲۵۰/۲۱	۲۰۶/۷



شکل ۱۷: مقایسه مقدار بار بیشینه در نمونه‌های مختلف (حداقل مقاومت گسیختگی مقرر برای وصله استاندارد توسط مبحث ۹ (۱۳۹۹) یعنی ۱۲۵ درصد مقاومت تسلیم هر قطر از میلگردها با خط چین افقی نمایش داده شده است [۳].

۵- نتیجه گیری

قابل توجه‌ترین نتیجه‌گیری‌ها از تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق عبارتند از:

- ۱- بر اساس مشاهدات این پژوهش تجربی می‌توان گفت که افزودن وصله چه از نوع مکانیکی چه از نوع جوش سربه‌سر، تغییر محسوس و اثرگذاری قابل توجهی بر کرنش تسلیم نمونه‌ها ندارد که کاملاً منطبق بر عملکرد مورد انتظار یک وصله استاندارد است.
- ۲- مقدار کرنش گسیختگی در تمام نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده کاهش یافته است. کرنش گسیختگی در نیمی از نمونه‌های دارای وصله مکانیکی، بیشتر است و در نصف دیگر این نمونه‌ها مقدار کمتری نسبت به نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر دارد.
- ۳- تنش تسلیم در نیمی از نمونه‌های دارای وصله مکانیکی مقداری بیشتر و در نصف دیگر این نمونه‌ها مقدار کمتری نسبت به نمونه‌های دارای وصله جوش سربه‌سر دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت تنش تسلیم نمونه‌های مشابه با دو نوع وصله متفاوت چندان با یکدیگر ندارند.
- ۴- مقدار تنش گسیختگی در بیشتر نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده افزایش یافته است. در برخی از نمونه‌ها کاهش مقدار تنش گسیختگی نمونه وصله‌شده نسبت به نمونه مشابه مشاهده شد. در تعداد زیادی از نمونه‌های دارای وصله مکانیکی تنش گسیختگی بیشتر از نمونه‌های مشابه دارای وصله جوش سربه‌سر بود. به‌طور کلی می‌توان گفت تنش گسیختگی نمونه‌های مشابه با دو نوع وصله متفاوت در نمونه‌های دارای وصله مکانیکی بیشتر از نمونه‌های مشابه با وصله جوش سربه‌سر است.
- ۵- مقدار سختی در نمونه‌های وصله‌شده در هوا با قطرهای ۱۶ و ۱۸ میلی‌متر نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده مشابه خود کاهش یافته است. در برخی از نمونه‌ها همانند نمونه با قطر ۲۲ میلی‌متر مقدار سختی نمونه وصله‌شده نسبت به نمونه مشابه وصله‌نشده روند افزایشی داشته است.

۶- مقدار شکل پذیری در همه نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده مشابه خود کاهش یافته است. به طور میانگین می‌توان گفت نمونه‌های با وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده به ترتیب ۱۸/۷۸ و ۲۸/۸۶ درصد کاهش شکل پذیری داشته‌اند.

۷- مقدار جذب انرژی در همه نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده مشابه خود کاهش یافته است. به طور میانگین می‌توان گفت نمونه‌های با وصله مکانیکی و جوش سربه‌سر نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده به ترتیب ۲۲ و ۲۵ درصد کاهش جذب انرژی داشته‌اند.

۸- تمامی وصله‌ها اعم از مکانیکی و جوش سربه‌سر و همچنین نمونه‌های در هوا یا در بتن، حداقل مقاومت گسیختگی مقرر توسط مبحث ۹ (۱۳۹۹) یعنی ۱۲۵ درصد مقاومت تسلیم میلگرد را دارا بوده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود مقدار بار بیشینه در اکثر نمونه‌های وصله‌شده نسبت به نمونه‌های وصله‌نشده مشابه خود افزایش یافته است.

سپاسگزاری

مولفان بر خود لازم می‌دانند کمال تشکر و قدردانی را از زحمات کارکنان و مسئولان آزمایشگاه مقاومت مصالح دپارتمان مکانیک دانشگاه بوعلی سینا ابراز نمایند.

مراجع

- [1] Kheyroddin, A. and Famili, H. and Shirinsokhan, H. and Delnavaz, M. (2017). *Introduction of new methods of reinforcing splices in reinforced concrete structures*. Tehran: Journal of Iranian Concrete Association.
- [2] Dahal, P.K. and Tazarv, M. (2020). Mechanical bar splices for incorporation in plastic hinge regions of RC members. *Construction and Building Materials*.
- [3] National Building Regulations No. 9. (2020). *Design and Implementation of Reinforced Concrete Buildings*. Tehran: National Building Regulations Office, Fourth Edition, Iran Development Publication.
- [4] American Concrete Institute (ACI). (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*.
- [5] Kheyroddin, A. and Rouhi, S. and Dabiri, H. (2021). An experimental study on the influence of incorporating lap or forging (GPW) splices on the cyclic performance of RC columns. *Engineering Structures*, Volume 241: 112434.
- [6] Rodrigues, H. and Furtado, A. and Arêde, A. and Vila-Pouca, N. and Varum, H. (2018). Experimental study of repaired RC columns subjected to uniaxial and biaxial horizontal loading and variable axial load with longitudinal reinforcement welded steel bars solutions. *Eng. Struct.*, Volume 155: 371–386.
- [7] Lu, Z. and Huang, J. and Dai, Sh. and Liu, J. and Zhang, M. (2019). Experimental study on a precast beam-column joint with double grouted splice sleeves. *Eng. Struct.*, Volume 199: 109589.
- [8] Kheyroddin, A. and Mohammadkhah, A. and Dabiri, H. and Kaviani, A. (2020). Experimental investigation of using mechanical splices on the cyclic performance of RC columns. *Structures*, Volume 24: 717–727.
- [9] Kheyroddin, A. and Dabiri, H. (2020). Cyclic performance of RC beam-column joints with mechanical or forging (GPW) splices; an experimental study. *Structures*, Volume 28: 2562–2571.

- [10] Xin, G. and Xu, W. and Wang, Jin. and Yan, X. and Chen, Y. and Yan, W. and Li, J. (2021). Seismic performance of fabricated concrete piers with grouted sleeve joints and bearing-capacity estimation method. *in Structures*. Elsevier.
- [11] Dabiri, H., & Kheyroddin, A. (2021). An experimental comparison of RC beam-column joints incorporating different splice methods in the beam. In *Structures* (Vol. 34, pp. 1603-1613). Elsevier.
- [12] Dabiri, H., Kheyroddin, A., & Faramarzi, A. (2022). Predicting tensile strength of spliced and non-spliced steel bars using machine learning-and regression-based methods. *Construction and Building Materials*, 325, 126835.
- [13] Ben-dahou, A., Ferrier, E., Gabor, A., Michel, L., Gardes, R., Boisson, R., ... & Dolo, J. M. (2024). Influence of rebar couplers on the cracking behavior of reinforced concrete beams. *Nuclear Engineering and Design*, 416, 112801.
- [14] Jafar, j. and Yulianto, H. and Ambarwati, Z. and Musyaffa, M. F. (2025). Experimental Study on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams with Lap Splices and Threaded Coupler-type Mechanical Splice. *International Journal of Integrated Engineering*, 17(1), 247-259.
- [15] Sharma, L. K. and Abdullah, W. and Niroula, S. and Budhathoki, N. and Ghannoum, W. M. (2025). Performance of Mechanical Couplers of High-Strength Reinforcing Bars under Inelastic Strain Demands. *ACI Structural Journal*, 122(1), 225-238.
- [16] Shokrzadeh, M. R. and Nateghi-Alahi, F. and Mansoori, M. R. and Javadi, P. (2025). Cold rolling versus rotating friction welding techniques in mechanical splices: Study of the inelastic cyclic behavior of reinforced concrete columns. *Structural Concrete*.
- [17] Dahal, P. K., and Tazarv, M. (2020). Mechanical bar splices for incorporation in plastic hinge regions of RC members. *Construction and Building Materials*, 258, 120308.
- [18] Zheng, Y. and Guo, Z. and Guan, D. and Zhang, X. (2018). Parametric study on a novel grouted rolling pipe splice for precast concrete construction. *Construction and Building Materials*, 166, 452-463.
- [19] Dabiri, H. and Kheyroddin, Ali. and Dall'Asta, A. (2022). Splice methods used for reinforcement steel bars: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mater*, Volume 320: 126198.