

مطالعه آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای و اصلاح ناحیه شکست وصله مکانیکی میلگردها

محمد رضا شکرزاده^۱، فریبرز ناطقی الهی^{۲*}

۱- دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- mr.shokrzadeh@sbiau.ac.ir

۲- nateghi@iiees.ac.ir

چکیده:

در این مقاله با اصلاح روش ساخت وصله رزوه‌ای و ترکیب آن با جوش اصطکاکی دوار، دو نوع وصله معرفی شد. هدف اصلاح ناحیه شکست کوپلر با میلگرد رزوه‌ای و استفاده از آن در نواحی مفصل پلاستیک اعضای شکل‌پذیر در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد بود. ناحیه رزوه در روش پیشنهادی بزرگ‌تر شد. برای بزرگ‌تر کردن ناحیه رزوه، از دو تکنیک نورد سرد و جوشکاری اصطکاکی دوار استفاده شد. در مجموع ۹۶ نمونه (شامل سه نمونه تکرار از هر نوع) مورد آزمایش قرار گرفت. وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای استاندارد (TC)، وصله مکانیکی با ناحیه رزوه بزرگ‌تر شده (OTC)، وصله مکانیکی رزوه‌ای با جوش اصطکاکی دوار (RFWTC) و نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) تحت آزمایش کششی و چرخه‌ای تک‌محوری با و بدون غلاف بتنی قرار گرفتند. حساسیت به قطر میلگرد، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی و عملکرد حالت شکست، ارزیابی شد. وصله‌های RFWTC و OTC بهترین عملکرد را داشتند و برای استفاده در مناطق با خطر لرزه‌ای زیاد مناسب هستند. علاوه بر این، TC برای استفاده در مناطق لرزه‌خیز کم تا متوسط مناسب است.

واژگان کلیدی:

وصله مکانیکی رزوه‌ای، نورد سرد، جوش اصطکاکی دورانی، مفصل پلاستیک

* فریبرز ناطقی الهی، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

ایمیل: nateghi@iiees.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Experimental study of seismic behavior and modification of the failure region of mechanical bar splices

Mohamad Reza Shokrzadeh¹, F. Nateghi-Alahi²

¹Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Abstract:

The problem of overcrowding at the junction of the rebars is very significant, particularly for seismic details. Due to bar length limits, splicing of reinforcing bars is unavoidable in reinforced concrete (RC) structures and may alter the overall behavior of structures under static and dynamic stresses. Mechanical couplers can thus offer an appealing solution that eliminates the disadvantages of traditional reinforcement splicing. In the mechanical splice method, couplers are rigid components that are used to join reinforcement bars together. According to existing research, the failure mechanism of a thread splice under tensile and cyclic loads has not been sufficiently investigated. In addition, the use of the thread splice needs further investigation in the plastic hinge areas of ductile members in seismic areas. In this study, two types of patches are introduced by modifying the method of making a threaded splice and combining it with rotary friction welding. The goal is to modify the coupler's failure area with a threaded bar and use it in the plastic hinge areas of ductile members in seismic areas. The splice area in the suggested method is large. Two techniques are used to increase the splice area: cold rolling and rotating friction welding. In total, 97 samples were tested (three repeated samples of each type). Threaded couplers (TC), oversize-threaded couplers (OTC), rotary friction welding splices with threaded couplers (RFWTC), and non-spliced (NS) reference specimens were tested with and without concrete in uniaxial tensile and cyclic tests. Evaluations were conducted on the sensitivity to bar diameter, bar strength, ductility, energy absorption, and failure mode performance. The RFWTC and OTC exhibited superior performance in terms of strength, ductility, energy absorption, and failure mode, making them appropriate for use in high seismic zones. The TC is also suitable for use in zones with low to medium seismic activity. Furthermore, the anticipated model is enough for estimating the threaded couplers' ultimate tensile strength.

Keywords: mechanical threaded splice, cold rolling, rotating friction welding, plastic hinges

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

استفاده از تکنولوژی‌های جدید برای افزایش کیفیت سازه کاهش هزینه‌های تولید در صنعت ساختمان علاوه بر یک نیاز یک ضرورت است. وصله‌کردن میلگردها در سازه‌های بتن مسلح یکی از پرمخاطره‌ترین موارد موجود در اجرا است. زیرا رعایت یا عدم رعایت اصول آن تأثیر زیادی در عملکرد سازه خواهد داشت. عملکرد یکپارچه وصله‌های مکانیکی به شدت در رفتار سازه‌های بتن مسلح تأثیرگذار است. نداشتن رفتار یکپارچه در وصله، باعث ضعف عضو بتن مسلح تحت نیروهای اعمالی به آن می‌شود. (Nateghi-Alahi (۲۰۲۲, ۲۰۲۲, Shokrzadeh *et al.*, ۲۰۱۹; Shokrzadeh and از نظر آیین‌نامه‌ای دو نوع وصله تعریف می‌شود. وصله نوع یک که در نواحی بحرانی اعضای سازه‌های بتن مسلح مجاز نمی‌باشد. وصله نوع دو که این وصله با توجه به عملکرد یکپارچه‌ای که دارد در هر موقعیتی از سازه قابل اجرا است) 'ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary', ۲۰۱۹). روش‌های وصله که تاکنون معرفی و بررسی شده‌اند را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: وصله پوششی، جوشی و مکانیکی که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند (Hulshizer, Ucciferro and Gray, ۱۹۹۴; Bai and Ingham, ۲۰۰۹; Kheyroddin and Dabiri, ۲۰۲۰; Tazarv, Shrestha and Saiidi, ۲۰۲۱).

مهمترین مشکلات وصله پوششی گاه ایجاد تراکم زیاد میلگرد در یک ناحیه مشخص از عضو، عدم امکان استفاده از وصله پوششی برای میلگردهای بزرگ تر از قطر ۳۶ میلیمتر و نیز نیاز به میلگردهای انتظار بسیار بلند (گاه بلندتر از ۶ متر) در سازه بتنی برای اتصال به قطعه بعدی است. وصله‌های پوششی تحت نیروهای متناوب و چرخه‌ای در محدوده الاستیک قابل اعتماد نیستند، که این عدم اعتماد در وصله‌های پوششی با میلگردهای قطر بالا همچون میلگرد های قطر ۲۵، ۲۸، ۳۲، ۳۶ میلیمتر به مقدار زیادی افزایش می‌یابد (Nateghi-Alahi and Shokrzadeh, ۲۰۱۹). این در حالی است که این میلگردها المان‌های اصلی سازه بتنی هستند و هرگونه شک و تردید در مورد کارایی این اعضا نگرانی شدیدی را برای مهندسين و کاربران ایجاد می‌کند. در آیین‌نامه ACI 318-19 استفاده از این نوع وصله را برای میلگردهای با قطر ۳۶ به بالا ممنوع کرده است و همچنین استفاده از این نوع وصله در میلگردهایی که در کشش قرار دارند و در محل اتصال و محل ایجاد مفصل پلاستیک مجاز نمی‌باشد.

باشند (Einea, Yehia and Tadros, ۱۹۹۹; Hassan, Lucier and Rizkalla, ۲۰۱۲; Najafgholipour *et al.*, ۲۰۱۸; ACI Committee ۲۰۲۰, ۲۰۱۹, Harinkhede and Varghese, ۲۰۲۱)

قابلیت اعتماد در روش جوش سربه سر (فورجینگ) بسیار پایین است؛ زیرا در روش فورجینگ به علت دمای بالای قسمت فورج شده امکان اندازه‌گیری مؤلفه‌های فیزیکی و مکانیکی به طور دقیق نمی‌باشد. همچنین در این روش به علت دخالت عوامل متعدد در جوشکاری و همچنین بالابودن خطای انسانی، محیطی و مخصوصاً خطای ماشین‌آلات مورد استفاده، بهتر است از روش‌های جایگزین وصله میلگرد بهره گرفت. پس از وقوع زلزله کوبه در ژاپن، عملکرد نامطلوبی از میلگردهای وصله شده به روش فورجینگ مشاهده شد. علی‌رغم انجام جوش‌ها به دست جوشکارهای زنده ژاپنی و نظارت دقیق بر انجام این جوش‌ها و انجام آزمایش‌های کنترلی، نتایج حاصل از این روش در مناطق زلزله‌خیز فاجعه‌بار بوده و به هیچ‌وجه قابل اطمینان نمی‌باشد. (Saito, Yabe and Fujimori, ۱۹۸۵; Yamamoto *et al.*, ۲۰۰۲; Abé and Shimamura, ۲۰۱۴; Shokrzadeh, Aziminejhad and Sarvghadmoghaddam, ۲۰۱۶; Shokrzadeh, ۲۰۲۴)

در روش وصله مکانیکی، کوپلرها اجزای صلبی هستند که برای اتصال میلگردهای به یکدیگر استفاده می‌شوند. کوپلرها را می‌توان به طور کلی بر اساس نحوه اتصال ایجاد شده و میزان تنش بین میلگردها و کوپلرها به پنج نوع تقسیم کرد: کوپلرهای پیچی و پینی، کوپلرهای رزوه ای، کوپلرهای دوغابی و کوپلرهای سرد پرس شده (Shokrzadeh *et al.*, ۲۰۲۲). تنش کششی در یک میلگرد با وصله مکانیکی، از یک میلگرد به میلگرد دیگر از طریق کوپلر و قطعات آن منتقل می‌شود (Sharbatdar, Jafaria and Karimib, ۲۰۱۸; Bompa and Elghazouli, ۲۰۱۹; Dabiri, Kheyroddin and Faramarzi, ۲۰۲۲). نصب سریع، کاربرد سازگار با محیط زیست و عملکرد قابل قبول همگی از مزایای استفاده از روش‌های وصله مکانیکی هستند (Shokrzadeh, ۲۰۲۴; Shokrzadeh *et al.*, ۲۰۲۳).

رایج‌ترین نوع استفاده از وصله‌های مکانیکی، وصله رزوه ای می‌باشد. بزرگترین ضعف این وصله شکست در محل رزوه می‌باشد (Shokrzadeh *et al.*, ۲۰۲۲, ۲۰۲۳).

وصله‌های مکانیکی مطابق ACI 318 بر دو نوع هستند. در نوع اول، وصله مکانیکی باید در کشش و فشار دارای مقاومت حداقل برابر

۱/۲۵ برابر مقاومت تسلیم میلگرد باشند و در نوع دوم، وصله مکانیکی باید در کشش و فشار دارای حداقل دو مقدار ۱/۶ برابر مقاومت تسلیم یا برابر با ۰/۹۵ مقاومت نهایی میلگرد لحاظ شود. وصله‌های مکانیکی نوع اول نسبت به وصله‌های نوع دوم دارای محدودیت‌های بیشتری از نظر محل استفاده هستند. این وصله در منطقه با لرزه‌خیزی کم در هر کجای سازه می‌تواند استفاده شود؛ ولی در مناطق لرزه‌خیز استفاده از این وصله در نقاطی از سازه که انتظار رفتار غیرخطی از آنها وجود دارد تا فاصله یک برابر عمق مقطع از محل تشکیل مفصل پلاستیک یا در داخل گره اتصال مجاز نمی‌باشد. وصله‌های نوع دوم در هر جای سازه و در هر منطقه لرزه‌ای بکار برده می‌تواند بکار برده شود.

۲- ضرورت انجام تحقیق

مطالعات انجام شده بر روی عملکرد وصله مکانیکی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (الف) شکلی (با و بدون غلاف بتن)، (ب) نحوه بار اعمال شده (چرخه‌ای یا یکنواخت)، و (ج) نرخ بارگذاری. به‌طور کلی، بر اساس نتایج آزمایش‌های وصله‌های قبلی، می‌توان گفت که رفتار تنش - کرنش میلگردهای متصل شده به‌صورت مکانیکی با میلگردهای یکپارچه شده متفاوت است، زیرا ظرفیت تغییر شکل میلگردهای متصل به‌صورت مکانیکی کمتر است. به‌عبارت‌دیگر، میلگردهایی یکپارچه، بیشتر از میلگردهایی که به‌صورت مکانیکی به یکدیگر متصل شده‌اند، کشیده می‌شوند. کشش ایجاد شده در میلگرد باعث ایجاد نیروی برشی در مقطع میلگرد می‌گردد و با توجه به این که در محل اتصال رزوه وجود دارد و خود ایجاد رزوه به روش سنتی (براده‌برداری یا رولینگ) باعث کم‌شدن مقطع میلگرد در محل رزوه می‌گردد. این امر سبب ایجاد ناحیه‌ای با سختی کمتر و مستعد شکست می‌شود. لازم به ذکر است مطالعات صورت‌گرفته در خصوص ضعف شکست در رزوه در وصله مکانیکی پیچی بسیار محدود است و عمده مشکل این اتصالات شکست در محل رزوه است. روش‌های رایج برای ایجاد رزوه در وصله‌های رزوه‌ای مکانیکی به‌صورت براده‌برداری یا رولینگ از روی میلگرد است. به علت کاهش قطر میلگرد در محل رزوه مقاومت آن کاهش یافته و میلگرد در هنگام آزمایش رفت و برگشتی در ناحیه رزوه دچار شکست می‌گردد. همچنین برای دستیابی به رفتار لرزه‌ای مناسب وصله مکانیکی نیاز به آزمایش‌های رفت و برگشتی در اعضای بتن مسلح است؛ بنابراین برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روش وصله میلگرد، ارزیابی و اصلاح

ناحیه شکست وصله در طول اعضای بتن مسلح و روش اجرای آن داشتن اطلاعات کافی و معتبر از عملکرد انواع روش‌های وصله میلگردها در اعضای بتن مسلح و روشن‌شدن نوع وصله انجام این مطالعه ضروری است. (Henin and Morcou, ۲۰۱۵; Tazarv and Saïdi, ۲۰۱۶; Bompa and Elghazouli, ۲۰۱۸, ۲۰۱۹; Nateghi-Alahi and Shokrzadeh, ۲۰۱۹; Dahal and Tazarv, ۲۰۲۰; Liu et al., ۲۰۲۰; Ghayeb et al., ۲۰۲۱; Al-Jelawy, ۲۰۲۲; Zhao et al., ۲۰۲۲; Shokrzadeh et al., ۲۰۲۲).

سازماندهی مقاله به شرح زیر است: با اصلاح روش ساخت وصله مکانیکی و ترکیب آن با جوشکاری اصطکاکی دوار، دو نوع وصله معرفی شده است. که می‌تواند در نواحی مفصل پلاستیک اعضای شکل‌پذیر در مناطق لرزه‌خیزی بالا استفاده شود. ناحیه وصله در روش پیشنهادی بزرگتر شده است. در مجموع ۹۶ نمونه (شامل سه نمونه تکرار از هر نوع) مورد آزمایش قرار گرفت. وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای استاندارد (TC)، وصله مکانیکی با ناحیه رزوه بزرگ‌تر شده (OTC)، وصله مکانیکی رزوه‌ای با جوش اصطکاکی دوار (RFWTC) و نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) با قطر میلگرد ۱۶ و ۲۰ تحت آزمایش کششی و چرخه‌ای تک‌محوری با و بدون غلاف بتنی قرار گرفتند. حساسیت به قطر میلگرد، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی و عملکرد حالت شکست، ارزیابی قرار گرفت. توضیح کاملی در مورد معیارهای لرزه‌ای وصله میلگرد بر اساس استانداردهای مختلف طراحی نیز برای استفاده عملی در این مقاله ارائه شده است.

۳- معرفی نمونه‌ها و متغیرهای آزمایش

در تمامی نمونه‌ها میلگرد، بتن مصرفی و ابعاد نمونه یکسان است. تنها متغیرهای مورد بررسی در این مقاله نوع و وصله‌های مکانیکی و قطر میلگرد در نمونه‌ها است. فولاد مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده از نوع AIII و به قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلیمتر است. این فولاد تولید کارخانه فولاد یزد است. کوپلرهای مورد استفاده تولید شده توسط شرکت سهند می‌باشد. لازم به توضیح است که فولاد مورد استفاده برای ساخت این کوپلرها مطابق با دستورالعمل DIN ۱۰۱۱۹۱ است. سختی وصله‌های مکانیکی بیشتر یا برابر با میلگردهای معمولی می‌باشد. پس استفاده از آنها برای وصله آرماتورها به یکدیگر بلامانع می‌باشد (Shokrzadeh, ۲۰۲۴).

۳-۱ نمونه‌های وصله مکانیکی با و بدون غلاف بتنی

سه نوع وصله مکانیکی فشاری - کششی، یعنی وصله مکانیکی رزوه‌ای (TC)، وصله مکانیکی با ناحیه رزوه بزرگ‌تر شده (OTC)، اتصال جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله مکانیکی رزوه‌ای (RFWTC)، و همچنین نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) ساخته شد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، در هر نمونه از میلگرد با قطرهای ۱۶ میلیمتر و ۲۰ میلیمتر استفاده شده است. جزئیات نمونه در شکل (۱) و جدول (۱) نشان داده شده است. شناسه نمونه به سه قسمت تقسیم می‌شود. بخش اول تعیین می‌کند که نمونه بدون غلاف بتن (A) است یا با غلاف بتن (C). بخش دوم به نوع وصله مکانیکی اشاره دارد که بدون وصله مکانیکی با (NS)، وصله مکانیکی رزوه‌ای با (TC)، وصله مکانیکی با ناحیه رزوه بزرگ‌تر شده با (OTC) و اتصالات جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله مکانیکی رزوه‌ای با (RFWTC) مشخص شده است. بخش آخر قطر میلگرد و همچنین پروتکل بارگذاری آزمایش را مشخص می‌کند که در آن بارگذاری کششی با (M) و بارگذاری رفت و برگشتی با (C) نشان دهنده شده است. لازم به ذکر است پروتکل بارگذاری چرخه‌ای برای نمونه‌های بدون غلاف بتنی با (C₁) و برای نمونه‌های دارای غلاف بتنی با (C₂) مشخص شده است (جدول ۲). در روش TC ایجاد رزوه به صورت نورد سرد انجام شد، این عمل توسط دستگاه رولینگ رزوه زنی بر روی میلگردها انجام می‌شود. یک روش نورد سرد ویژه برای ساخت نمونه‌های OTC استفاده شد. پس از برش توسط اره‌های دیسکی تحت فشار هیدرولیک قرار گرفته و ناحیه رزوه کاری با فشار افزایش داده شد و سپس رزوه شد (شکل ۲-الف) و (۲-ب)، شکل (۲-ج)). در روش جوشکاری اصطکاکی دوار، ۵ برابر قطر میلگرد (یک اندازه بزرگ‌تر) با جوش اصطکاکی دوار به میلگرد اصلی متصل می‌شود و سپس رزوه می‌شود شکل (۲-ج). طول نمونه‌های خارج غلاف بتنی ۷۰۰ میلیمتر بود. نمونه‌های دارای غلاف بتنی با استفاده از یک قاب پلاستیکی عمودی، همان‌طور که در شکل (۲-د) نشان داده شده است، ایجاد شدند. وضعیت عمودی قاب توسط پایه‌های چوبی حفظ شد. طول نمونه‌های با غلاف بتنی ۷۰۰ میلیمتر که ۶۰۰ میلیمتر از آن طول در داخل غلاف بتنی قرار گرفت. قطر خارجی غلاف بتنی برای نمونه‌های ساخته شده از میلگردهای $db = 16 \text{ mm}$ برابر با $Dc = 121 \text{ mm}$ است و قطر خارجی غلاف بتنی برای نمونه‌های ساخته

شده از میلگردهای $db = 20 \text{ mm}$ برابر با $Dc = 151 \text{ mm}$ است. (جدول ۱). در این مطالعه از روش پیشنهادی بزرگ کردن ناحیه رزوه کاری استفاده می‌گردد. برای بزرگ کردن ناحیه رزوه کاری از دو روش نورد سر و جوشکاری اصطکاکی دورانی استفاده می‌شود.

۳-۱-۱ روش نورد سرد:

روش اول: ایجاد رزوه به صورت براده برداری از روی میلگرد است. به علت کاهش قطر میلگرد در محل رزوه مقاومت آن کاهش یافته و میلگرد در هنگام آزمون کشش در ناحیه رزوه دچار شکست می‌گردد.

روش دوم: رزوه به صورت نورد سرد انجام می‌شود، این عمل طی فرایند خاص، توسط دستگاه رولینگ رزوه زنی بر روی میلگردها انجام می‌شود. در این روش قرقره‌هایی با گام کوپلر طراحی شده است، فشار این قرقره‌ها در حالت دوران سبب ایجاد رزوه روی میلگرد می‌شود شکل (۲-الف).

روش سوم: در روش نورد سرد، پس از برش توسط اره‌های دیسکی تحت فشار هیدرولیک قرار گرفته و ناحیه رزوه کاری بزرگ‌تر می‌گردد. اندازه جدید محل رزوه به نحوی افزایش می‌یابد امکان اندازه رزوه کاری برای هر میلگرد را یک پله افزایش می‌دهد به طور مثال میلگرد ۲۰ پس از افزایش دارای رزوه ۲۲ خواهد بود. لازم به توضیح است که فولاد مورد استفاده برای ساخت این کوپلرها مطابق با دستورالعمل DIN ۱۰۱۱۹۱ است. طول رزوه در انتهای میلگرد برابر است با $(d-P \leq L \leq d)$ که d قطر اسمی میلگرد و p گام رزوه است Dc قطر خارجی کوپلر و Lc طول کوپلر است. این روش کاهش می‌یابد و این به دلیل افزایش قطر محل رزوه کاری است شکل (۲-ب).

۳-۱-۲ روش جوشکاری اصطکاکی

جوشکاری اصطکاکی دورانی نخستین فرایند از انواع جوش اصطکاکی است که به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفت. در این فرایند یکی از قطعات استوانه‌ای در همان راستای قطعه‌ی دیگر ثابت است، و دوران قطعه‌ی دیگر باعث می‌گردد مواد در فصل مشترک دو قطعه در اثر حرارت، نرم و سپس به یکدیگر جوش بخورند (Yilmaz et al., ۱۹۹۶; Maalekian, ۲۰۰۷; Li and Wang, ۲۰۱۵; Seshu Kumar et al., ۲۰۲۱). از ویژگی‌های این فرایند این است که

محل پروژه انجام می‌گیرد. حدود پرت میلگرد ها در ساختمان های متعارف بین ۵ تا ۱۰ درصد است که بیشتر بخاطر محدودیت استفاده از وصله در ناحیه مفصل پلاستیک و یا یک درمیان اجرا کردن وصله و میلگرد یکپارچه می باشد. در این روش فقط یک دستگاه جوش اصطکاکی دورانی اضافه می گردد. که ابعاد و اندازه آن و مشابه به دستگاه رزوه زنی می باشد. هزینه انجام هر جوش تقریبا با هزینه رزوه برابری می کند. روش پیشنهادی در کارگاه قابل انجام می باشد. برای میلگرد قطر بزرگتر می توان از میلگرد های پرت کارگاهی استفاده کرد. هزینه های یک سایز کوپلر بزرگتر و ۲ عدد جوش اصطکاکی دورانی در این روش به پروژه متحمل می شود. ولی در مقابل میلگرد های پرت کارگاهی به حداقل می رسد و همچنین افزایش حداقل ۲۰ درصدی سرعت اجرا و از همه مهمتر افزایش عملکرد سازه در برابر زلزله و کاهش هزینه های جانبی از مزایای این روش می باشد (Shokrzadeh, ۲۰۲۴).

علاوه بر فلزات هم جنس، می‌تواند برای فلزات غیر هم جنس نیز مورد استفاده قرار بگیرد. این فرایند با به وجود آوردن گرما از دوران سریع و تحت فشار قرار دادن دو قطعه نسبت به هم صورت می‌گیرد و ماده در حالت پلاستیک از محل فصل مشترک دو قطعه به بیرون خارج می‌گردد. پس از توقف دوران و قبل از پایین آمدن دما برای به دست آوردن یک اتصال جوش مستحکم، باید با نیروی زیادی، دو قطعه به هم فشرده گردند. نتیجه‌ی این فرایند، اتصالی است که در فاز جامد شکل گرفته و مشکلات اتصال‌های ذوبی را ندارد (Kuscu, Becenen and Sahin, ۲۰۰۸; Li and Wang, ۲۰۱۱; Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, ۲۰۱۴; Seshu Kumar et al., ۲۰۲۱).

در روش جوشکاری اصطکاکی دورانی میلگرد (قطر بزرگ‌تر) رزوه می‌شود و توسط جوشکاری اصطکاکی دورانی به میلگرد اصلی متصل می‌شود شکل (۲- ح). وصله رزوه ای یا در کارخانه یا در

جدول ۱: جزئیات نمونه‌ها*

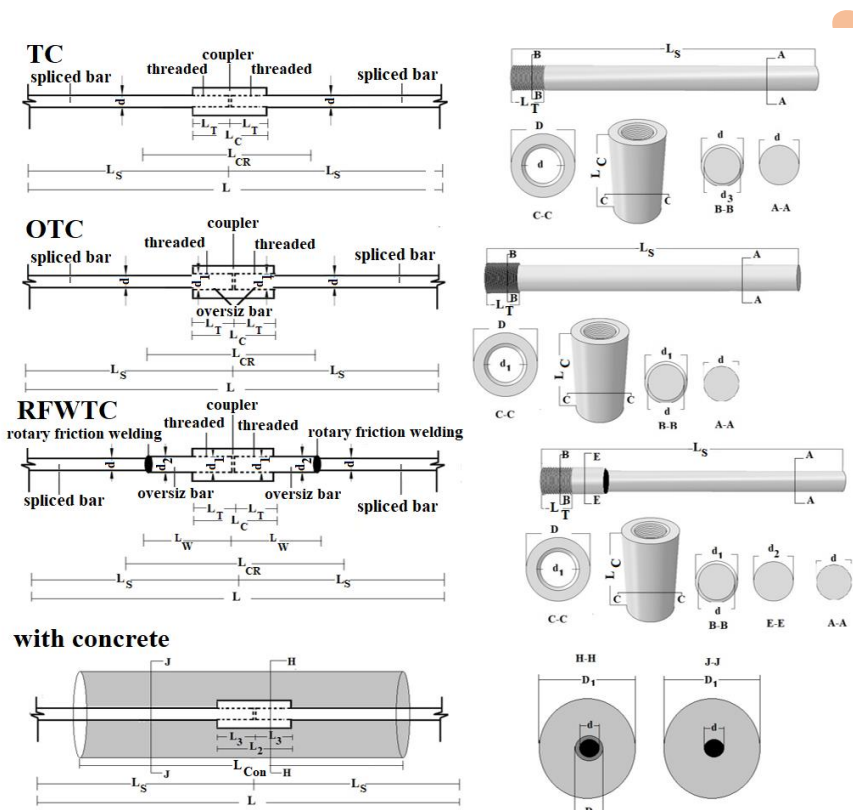
Specimen	d_b	L	L_s	L_c	L_t	L_w	L_{con}	d_v	d_r	d_r	D	D_1 (mm)
Non-spliced (NS)	۱۶	۷۰۰	-	-	-	-	۶۰۰	-	-	-	-	۱۲۱
	۲۰	۷۰۰	-	-	-	-	۶۰۰	-	-	-	-	۱۵۱
Threaded couplers (TC)	۱۶	۷۰۰	۳۵۰	۴۲	۲۱	-	۶۰۰	۱۶	-	۲۵	۲۳	۱۲۱
	۲۰	۷۰۰	۳۵۰	۵۰	۲۵	-	۶۰۰	۲۰	-	۲۵	۳۰	۱۵۱
Oversize-threaded coupler (OTC)	۱۶	۷۰۰	۳۵۰	۴۶	۲۳	-	۶۰۰	۱۸	۱۸	۲۵	۲۸	۱۲۱
	۲۰	۷۰۰	۳۶۰	۵۴	۲۷	-	۶۰۰	۲۲	۲۲	۲۵	۳۳	۱۵۱
Welding splices with threaded couplers (RFWTC)	۱۶	۷۰۰	۳۶۰	۴۶	۲۳	۸۰	۶۰۰	۱۸	۱۸	۲۵	۲۸	۱۲۱
	۲۰	۷۰۰	۳۶۰	۵۴	۲۷	۱۰۰	۶۰۰	۲۲	۲۲	۲۵	۳۳	۱۵۱

*ابعاد به میلی‌متر است

جدول ۲: شناسه نمونه‌ها

Sample	Without concrete tests		With concrete tests	
	Specimen ID	Test protocol	specimen	Test protocol
Non-spliced (NS)	A-NS-۱۶M	Monotonic	C-NS-۱۶M	Monotonic
	A-NS-۱۶C _۱	Cyclic C _۱	C-NS-۱۶C _۲	Cyclic C _۲
	A-NS-۲۰M	Monotonic	C-NS-۲۰M	Monotonic
	A-NS-۲۰C _۱	Cyclic C _۱	C-NS-۲۰C _۲	Cyclic C _۲
Threaded couplers (TC)	A-TC-۱۶M	Monotonic	C-TC-۱۶M	Monotonic
	A-TC-۱۶C _۱	Cyclic C _۱	C-TC-۱۶C _۲	Cyclic C _۲
	A-TC-۲۰M	Monotonic	C-TC-۲۰M	Monotonic
	A-TC-۲۰C _۱	Cyclic C _۱	C-TC-۲۰C _۲	Cyclic C _۲

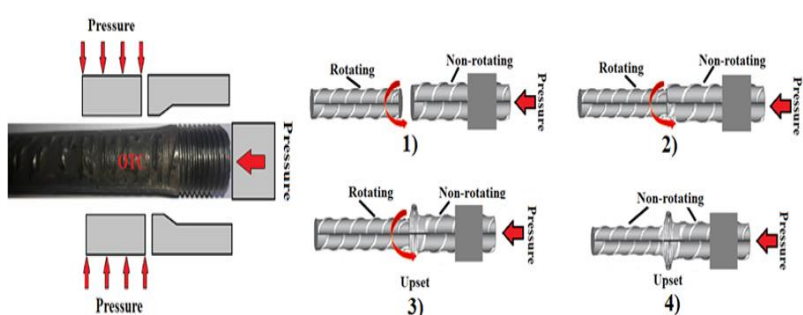
Oversize-threaded coupler (OTC)	A-OTC-1φM	Monotonic	C-OTC-1φM	Monotonic
	A-OTC-1φC ₁	Cyclic C ₁	C-OTC-1φC ₁	Cyclic C ₁
	A-OTC-2φM	Monotonic	C-OTC-2φM	Monotonic
	A-OTC-2φC ₁	Cyclic C ₁	C-OTC-2φC ₁	Cyclic C ₁
Welding splices with threaded couplers (RFWTC)	A-RFWTC-1φM	Monotonic	C-RFWTC-1φM	Monotonic
	A-RFWTC-1φC ₁	Cyclic C ₁	C-RFWTC-1φC ₁	Cyclic C ₁
	A-RFWTC-2φM	Monotonic	C-RFWTC-2φM	Monotonic
	A-RFWTC-2φC ₁	Cyclic C ₁	C-RFWTC-2φC ₁	Cyclic C ₁



شکل ۱: جزئیات نمونه‌های TC، OTC، و RFWTC بدون غلاف بتن و با غلاف بتنی.



الف)



ب)

ج)



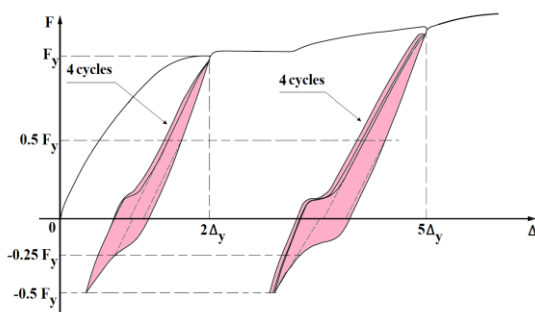
ح)



د)

شکل ۲: فرایند ساخت نمونه‌های TC، OTC و RFWTC (الف) TC، (ب) OTC، (ج) RFWTC، (د) قطر نمونه‌ها، (ه) با غلاف بتنی.

سرعت آزمایش را افزایش دهد، بدین ترتیب که، تنها سرعت کرنش قبل از تسلیم در مطالعه حاضر برای همه نمونه‌ها در طول کل آزمایش مورد استفاده قرار گرفت تا خطاهای ایجاد شده در نتیجه آزمایش به حداقل برسد. از آنجایی که طول و عملکرد مهاری یک وصله آزمایشی (شامل یک وصله مکانیکی و دو میلگرد متصل)، ممکن است کرنش تسلیم وصله را تغییر دهد، کرنش هدف برای تغییر سرعت را نمی‌توان قبل از آزمایش به طور دقیق تعیین کرد و همچنین ممکن است برای انواع مختلف وصله‌های مکانیکی یکسان نباشد. درک رفتار چرخه‌ای وصله مکانیکی تحت بارگذاری زلزله برای اظهار نظر در مورد اینکه آیا یک کوپلر برای استفاده در نواحی مفصل پلاستیک اعضای انعطاف پذیر مناسب است ضروری است. برای بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌های درون غلاف بتنی و خارج غلاف بتنی از پروتکل بارگذاری پیشنهاد شده در ISO/DIS ۱۵۸۳۵ استفاده شد (شکل ۳) (*ISO/DIS 15835. Steel for the Reinforcement of Concrete - Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars (Parts 1 to 3). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; 2018., no date*)

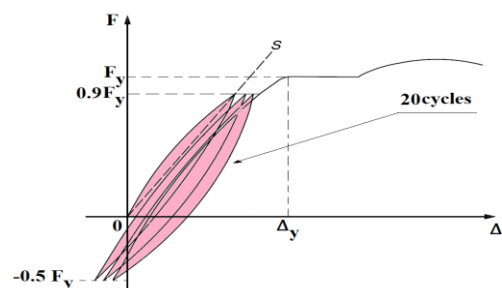


نمونه بدون غلاف بتنی (C۱)

۲-۳ دستورالعمل بارگذاری برای وصله میلگرد مکانیکی پیشنهادی

دستگاه استفاده شده در این مقاله ساخت کارخانه Roell Amsler از کشور آلمان است و برای اعمال نیروهای کششی و فشاری به نمونه‌های گرد و تخت چه به صورت استاتیکی و چه به صورت دینامیکی به کار می‌رود. در حالت استاتیکی حداکثر ۶۰۰ کیلو نیوتن و در حالت دینامیکی حداکثر ۵۰۰ کیلو نیوتن نیرو قابل اعمال است. دستگاه شامل دو فک است، فک بالایی نقش تکیه‌گاه را داشته و فک پایینی به عنوان محرک عمل می‌کند. با بالا و پایین بردن فک بالایی می‌توان فاصله بین دو فک را تغییر داد. علاوه بر این فک پایینی را می‌توان حداکثر تا ۳۰ سانتی متر جابه‌جا کرد. کنترل کننده دیجیتالی ۹۶۰۰، واسطه میان دستگاه و کامپیوتر است. این کنترل کننده علاوه بر کنترل دقیق عملکرد فک پایینی به دو صورت کنترل جابه‌جایی و کنترل نیرو، قادر است دو سیگنال جابه‌جایی (Stroke) و نیرو (Load) را از خروجی مبدل‌های نصب شده بر Actuator، نمونه برداری کرده و به کامپیوتر انتقال دهد. (*Structural Engineering Lab. - International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, no date*). وصله مکانیکی میلگرد تحت هر دو بارگذاری کششی تک‌محوری یکنواخت و چرخه‌ای تا شکست، سه نمونه در هر نوع بارگذاری آزمایش شدند. آزمایش کشش یکنواخت میلگرد یک‌پارچه و وصله میلگرد مکانیکی شده طبق ASTM E^۸ (*ASTM E8 / E8M - 16ae1 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, no date*) با کشیدن نمونه به سمت شکست با سرعت کرنش ثابت ۰.۰۱۹ in./in./min، که در محدوده ۰.۰۱۵ ± ۰.۰۰۶ ASTM اینچ می باشد، انجام شد. استاندارد ASTM به دو سرعت قبل و بعد از تسلیم میلگرد اجازه می دهد تا

کرنش (ϵ_{ii}) که با تقسیم جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بر طول نمونه محاسبه می‌شود، برای میلگردهای ۱۶ میلیمتری $\epsilon_{ii} = 0,090$ و برای میلگردهای ۲۰ میلیمتر $\epsilon_{ii} = 0,090$ بود. جدول (۴) نتایج آزمایش‌ها را بر حسب نیروی تسلیم T_y و استحکام تسلیم f_y ، نیروی نهایی T_{ii} و استحکام نهایی f_{ii} ، کرنش میانگین متناظر با استحکام تسلیم ϵ_y و کرنش‌های میانگین متناظر با استحکام نهایی ϵ_{ii} ، و ضریب شکل‌پذیری محاسبه شده به‌عنوان نسبت کرنش‌های نهایی به میانگین تسلیم (ϵ_{ii}/ϵ_y) را نشان می‌دهد. نمودارهای تنش - کرنش آزمایش‌ها تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای بر روی میلگردهای یکپارچه و دارای وصله مکانیکی در شکل (۴) نشان داده شده است. تقریباً برای هر سه تکرار آزمایش (۱۶ میلیمتر و ۲۰ میلیمتر)، همه پاسخ‌ها، در محدوده‌های $0,09$ و $0,130$ برای ϵ_y و ϵ_{ii} هستند. اختلافات جزئی در پایان ممکن است مربوط به نوسانات منظم مواد باشد که ذاتی هستند. قابل ذکر است که سیستم وصله مکانیکی OTC و RFWTC تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای عملکردی مشابه به نمونه یکپارچه داشته است. لازم به ذکر است که بین پیکربندی‌های بررسی شده، ϵ_{ii} به طور مداوم کاهش می‌یابد، همان‌طور که توسط آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای (C₁) در شکل (۴) مشاهده می‌شود. بالاترین مقادیر ϵ_{ii} در NS و RFWTC در محدوده $0,13$ مشاهده شد. TC با $0,09$ بیشترین کاهش ϵ_{ii} را دارد. روش تولید OTC و RFWTC باعث افزایش سطح مقطع میلگرد در رزوه‌ها شده است که با کمترین تنش در ناحیه کوپلر بر توزیع کرنش در طول اتصال اثر مثبت دارد. تمرکز تنش در رزوه‌ها به علت کم شدن سطح مقطع رزوه، باعث ایجاد شکست در منطقه وصله مکانیکی برای نمونه TC شد. کاهش ϵ_{ii} نشان داده شده در نمونه TC در سطح اتصال رخ می‌دهد و ممکن است پاسخ وصله مکانیکی را مشخص نکند. از آنجایی که کوپلر سطح مقطع بزرگ‌تری نسبت به میلگرد دارد، قطعه ضعیف‌تر به خارج از کوپلر منتقل می‌شود. در نتیجه، افزایش کرنش در میلگرد ایجاد می‌شود، به‌ویژه هنگام استفاده از وصله مکانیکی TC که منجر به شکست زودرس در نزدیکی اتصال‌دهنده به میلگرد می‌شود (شکل ۵). کاهش ϵ_{ii} بین اتصالات ممکن است به نسبت با افزایش طول کل نمونه، اهمیت کمتری پیدا کند. همچنین باید برای اعضای خمشی با وصله مکانیکی‌های به‌دقت بررسی شود، زیرا گردایان لنگر (تغییرات فیزیکی یک متغیر در فضای چند بعدی) و تمرکز احتمالی



نمونه با غلاف بتنی (C₁)

شکل ۳: تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای (ISO/DIS 15835. Steel for the Reinforcement of Concrete - Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars (Parts 1 to 3). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; ۲۰۱۸، ۰۰ ۰۰۰۰).

۴- مشاهدات، تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت پس از ساخت ۹۶ نمونه با غلاف و بدون غلاف بتنی و فراهم ساختن شرایط و مدت زمان لازم جهت عمل‌آوری آنها، نمونه‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند و نتایج توسط دستگاه ثبت اطلاعات ثبت می‌شود. بعد از به‌دست آوردن اطلاعات آزمایش، تجزیه و تحلیل داده‌ها آغاز می‌شود. این بخش از مهم‌ترین مراحل کسب اطلاعات آزمایش است. در این بخش ابتدا اطلاعات مربوط به هر نمونه ارائه می‌شود و سپس با نتایج نمونه مرجع مقایسه می‌شود.

۴-۱ نمونه بدون غلاف بتنی

در این بخش از بارگذاری یکنواخت و بارگذاری چرخه‌ای C₁ (شکل ۵) برای ارزیابی ۳۶ وصله مکانیکی میلگرد و ۱۲ میلگرد یکپارچه با قطر ۱۶ و ۲۰ میلیمتر استفاده شد. این اندازه میلگرد به طور خاص انتخاب شده‌اند، زیرا در بازارها موجود هستند. سه نوع مختلف کوپلر (OTC، RFWTC و TC) به همراه نمونه مرجع (NS) متشکل از چهار گروه مختلف (با اندازه و نوع بارگذاری مختلف)، در این برنامه آزمایشی گنجانده شد. حداقل استحکام تسلیم کششی (f_y) نمونه‌های یکپارچه (مرجع) به ترتیب ۵۱۱ مگاپاسکال برای میلگرد به قطر ۱۶ میلیمتر و ۵۱۰ مگاپاسکال برای میلگرد به قطر ۲۰ میلیمتر بود، درحالی‌که استحکام کششی (f_{ii}) آنها به ترتیب ۶۱۸ مگاپاسکال و ۶۵۴ مگاپاسکال بود. هر دو f_y و f_{ii} با تقسیم نیرو متناظر بر مساحت میلگرد اسمی محاسبه شدند (جدول (۳)). حداقل میانگین نهایی

شوند. این تمرکز شکل پذیری معمولاً در نقاطی با تنش‌ها و شرایط بارگذاری خاص ظاهر می‌شود و می‌تواند در تحلیل و طراحی سازه‌ها مورد بررسی قرار گیرد تا بهبود دوام و عملکرد سازه ارائه شود.

(Bompa and Elghazouli, ۲۰۱۹; Nateghi-Alahi and)
(Shokrzadeh, ۲۰۱۹; Shokrzadeh *et al.*, ۲۰۲۲).

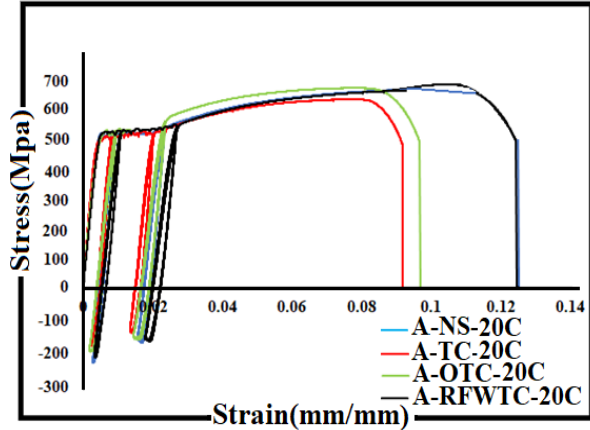
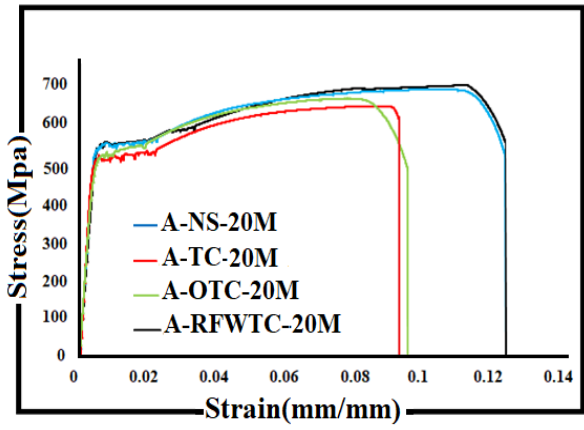
پلاستیسیته به کاهش شکل‌پذیری کمک می‌کند. مناطق یا نقاط خاص در یک سازه یا عضو سازه وجود دارد که در آنها تمرکز بیشتری از تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد. در غالب، این مناطق می‌توانند ناحیه‌هایی با استحکام کمتر، عملکرد محدودتر یا خواص مکانیکی ضعیف‌تر باشند که ممکن است به شکست و نقص در سازه منجر

جدول ۳: نتایج آزمایش نمونه بدون غلاف میلگرد*

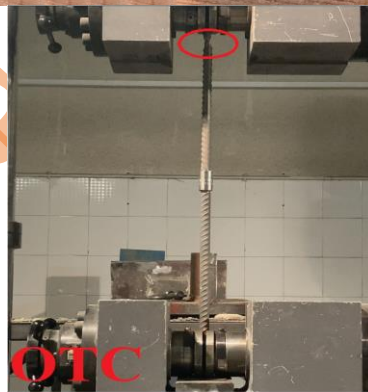
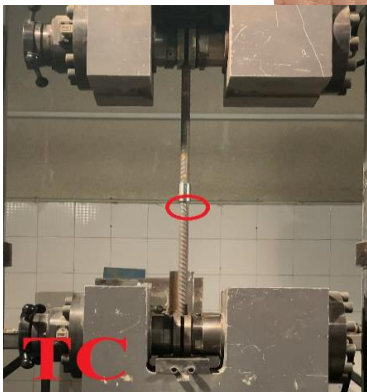
Specimen Average	T_y (kN)	T_u (kN)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	ϵ_u (mm/mm)	μ_{ϵ} ($\epsilon_{usp}/\epsilon_{ub}$)	μ (ϵ_u/ϵ_y)	R_u (%)	R_y (%)
A-NS-۱۶M	۱۰۴±۱, ۷ ^{ab}	۱۲۶± ۲.۱ ^a	۵۲۰± ۸.۵ ^a	۶۳۶± ۹.۹ ^a	۰.۰۰۴۰± ۰.۰۰۰۱۷ ^a	۰.۱۲۲± ۰.۰۰۴ ^a	۱	۳۰.۴۰	-	-
A-TC-۱۶M	۱۰۳±۲, ۵ ^a	۱۲۲± ۴.۹ ^a	۵۳۰± ۴, ۱ ^a	۶۲۲± ۲۵ ^a	۰.۰۰۴۰± ۰.۰۰۰۱۷ ^a	۰.۰۹۸± ۰.۰۰۳ ^a	۰.۸۰	۲۴.۵۰	۱۱۹.۶۰	۱۰۱.۵۳
A-OTC-۱۶M	۱۰۷±۱, ۷ ^{ab}	۱۲۷± ۱.۳ ^a	۵۱۹± ۸, ۶ ^a	۶۴۴± ۶.۶ ^a	۰.۰۰۳۹± ۰.۰۰۰۱۷ ^a	۰.۱۱۱± ۰.۰۰۳ ^a	۰.۹۱	۲۸.۴۶	۱۲۵.۵۷	۹۹.۸۱
A-RFWTC-۱۶M	۱۱۰±۳, ۳ ^b	۱۲۸± ۳.۶۸ ^a	۵۲۳± ۱.۰ ^a	۶۵۳± ۱۸ ^a	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۱۸ ^a	۰.۱۲۴± ۰.۰۰۵ ^a	۱.۰۱	۲۸.۲۰	۱۲۵.۵۷	۱۰۰.۵۸
A-NS-۱۶C _۱	۱۰۴±۰, ۵ ^{df}	۱۲۳± ۰.۵ ^{de}	۵۲۴± ۸.۵ ^d	۶۲۸± ۱.۳ ^{de}	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۰۵ ^{de}	۰.۱۳۲± ۰.۰۰۲ ^{de}	۱	۳۰.۰۰	-	-
A-TC-۱۶C _۱	۱۰۲±۳, ۱ ^d	۱۲۱± ۰.۸۰ ^e	۵۱۶± ۶.۴ ^d	۶۱۸± ۳.۸ ^e	۰.۰۰۳۸± ۰.۰۰۰۲۰ ^e	۰.۰۹۰± ۰.۰۰۳ ^e	۰.۶۸	۲۳.۶۸	۱۱۷.۹۴	۹۸.۴۷
A-OTC-۱۶C _۱	۱۰۹±۲, ۵ ^{fg}	۱۲۹± ۳.۶ ^d	۵۱۱± ۶.۷ ^d	۶۵۸± ۱۸.۳ ^d	۰.۰۰۳۹± ۰.۰۰۰۱ ^d	۰.۰۹۷± ۰.۰۰۴ ^d	۰.۷۴	۲۵.۰۰	۱۲۳.۴۵	۹۷.۵۲
A-RFWTC-۱۶C _۱	۱۱۲±۳, ۷ ^g	۱۲۹± ۳.۶ ^d	۵۲۴± ۱۱ ^d	۶۵۶± ۱۷.۸ ^d	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۱۸ ^d	۰.۱۳۰± ۰.۰۰۶ ^d	۰.۹۹	۲۹.۶۰	۱۲۵.۲۰	۱۰۰.۰۰
A-NS-۲۰M	۱۶۲±۴, ۵ ^h	۱۹۵± ۲.۱ ^{hi}	۵۳۳± ۱۶ ^h	۶۹۱± ۱.۳ ^h	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۰۴۵ ^h	۰.۱۲۴± ۰.۰۰۲ ^h	۱	۲۸.۲۰	-	-
A-TC-۲۰M	۱۶۳±۲, ۱ ^h	۱۸۹± ۲.۴ ^h	۵۲۲± ۴.۵ ^h	۶۶۰± ۸.۳ ⁱ	۰.۰۰۴۰± ۰.۰۰۰۰۵ ^{hi}	۰.۰۹۱± ۰.۰۰۲ ⁱ	۰.۷۳	۲۲.۷۰	۱۲۳.۸۰	۹۷.۹۴
A-OTC-۲۰M	۱۶۶±۲, ۹ ^h	۱۹۵± ۳.۱ ^{hi}	۵۳۰± ۹.۳ ^h	۶۸۳± ۱۱ ^h	۰.۰۰۳۸± ۰.۰۰۰۰۸ ⁱ	۰.۰۹۷± ۰.۰۰۲ ⁱ	۱.۰۱	۲۵.۵۲	۱۲۸.۱۴	۹۹.۵۰
A-RFWTC-۲۰M	۱۶۹±۲, ۱ ^h	۱۹۹± ۲.۹ ⁱ	۵۳۴± ۱۳ ^h	۶۹۷± ۴.۴ ^h	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۰۸ ^h	۰.۱۲۴± ۰.۰۰۵ ^h	۱	۲۸.۲۰	۱۳۰.۷۶	۱۰۰.۲۰
A-NS-۲۰C _۱	۱۶۱±۱, ۲ ^j	۱۹۶± ۰.۸ ^j	۵۱۴± ۵.۴ ^j	۶۸۶± ۲.۹ ^{jl}	۰.۰۰۴۶± ۰.۰۰۰۰۱۶ ^j	۰.۱۲۸± ۰.۰۰۳ ^j	۱	۲۷.۸۰	-	-
A-TC-۲۰C _۱	۱۶۰±۲, ۱ ^j	۱۸۷± ۲.۱ ^k	۵۱۰± ۷.۱ ^j	۶۴۱± ۳.۶ ^k	۰.۰۰۴۰± ۰.۰۰۰۰۲ ^k	۰.۰۹۰± ۰.۰۰۳ ^k	۰.۷۰	۲۲.۵	۱۲۴.۵۰	۹۹.۲۲
A-OTC-۲۰C _۱	۱۶۹±۲, ۵ ^k	۱۹۶± ۱.۳ ^j	۵۳۴± ۷.۲ ^k	۶۸۶± ۴.۵ ^j	۰.۰۰۳۹± ۰.۰۰۰۰۱ ^k	۰.۰۹۷± ۰.۰۰۴ ^k	۱.۰۰	۲۵.۰۱	۱۳۳.۴۶	۱۰۳.۹۰

A-RFWTC-20C ¹	۱۶۸±۲,۶ ^k	۱۹۸±	۵۴۰±	۶۹۳±	۰.۰۰۴۵±	۰.۱۲۶±	۰.۹۹	۲۸.۰۰	۱۳۴.۸۲	۱۰.۵.۰۵
		۱.۷ ^j	۷.۰ ^k	۶.۰ ^l	۰.۰۰۰۲۶ ^k	۰.۰۰۰۲ ^j				

*حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری است (P > ۰.۰۵)



شکل ۴: نمودار σ - ϵ نمونه‌های بدون غلاف بتنی (NS, TC, OTC, RFWTC) تحت بارگذاری یکپارچه و چرخه‌ای



(الف)



(ب)

شکل ۵: ناحیه شکست نمونه‌های (NS, TC, OTC, RFWTC) تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای (میلگرد ۱۶ و ۲۰ میلیمتر) الف) بدون غلاف بتنی ب) با غلاف بتنی

۴-۲ نمونه با غلاف بتنی

داندند، به این معنی که پاسخ بتن ممکن است یک حد پایین محافظتی برای عملکرد وصله مکانیکی در نظر گرفته شود (Bompa and Elghazouli, ۲۰۱۸). عبارت "حد پایین محافظتی" به معنای استفاده از یک مقدار یا شرایط کمترینی است که به طور احتیاطی برای محافظت از یک سیستم یا عنصر مورد نظر در نظر گرفته می‌شود. در مورد وصله‌ها، حد پایین محافظتی به مقداری اشاره دارد که در صورت رعایت آن، وصله به طور قطعی عملکرد خواسته شده را ارائه می‌دهد و از شکست و خرابی جلوگیری می‌کند. به عبارت دیگر، استفاده از یک حد پایین محافظتی به معنای انتخاب مقادیر کمترینی است که تضمین کننده عملکرد ایمن و قابل اعتماد وصله است. در برخی مطالعات قبلی (Bompa and Elghazouli, ۲۰۱۸)، عملکرد وصله در حالت بدون غلاف بتنی به عنوان یک حد پایین محافظتی محسوب می‌شود، اما نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که عملکرد اتصالات در غلاف بتنی کمتر از حالت بدون غلاف بتنی است، به این معنی که با استفاده از حد پایین محافظتی مبتنی بر عملکرد در حالت بدون غلاف بتنی، ممکن است وصله در با غلاف بتنی به درستی عمل نکنند و خطر شکست و خرابی وجود داشته باشد.

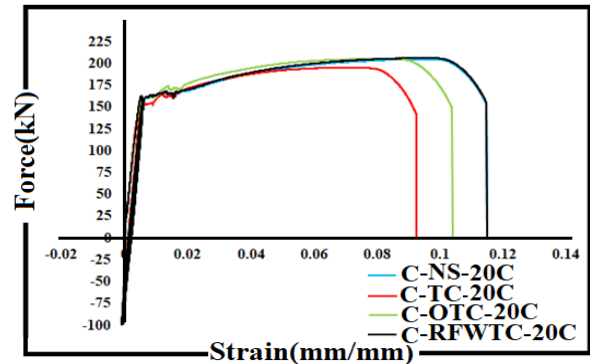
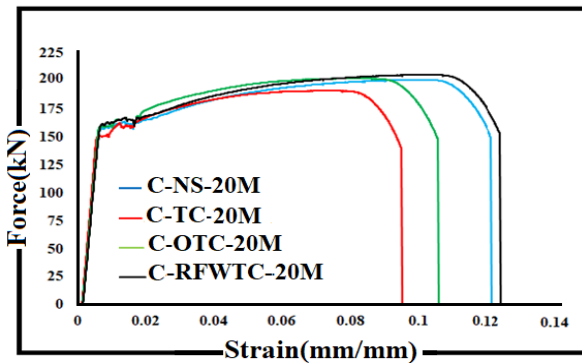
در این بخش از ۳۶ وصله مکانیکی میلگرد ۱۲ میلگرد یکپارچه با سه نوع مختلف کوپلر (TC, OTC, RFWTC) به همراه نمونه مرجع (NS) استفاده شد. این نمونه‌ها در چهار گروه مختلف تحت بارگذاری یکنواخت و بارگذاری چرخه‌ای (شکل ۶) با قطر ۱۶ و ۲۰ میلیمتر درون غلاف بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۴) یافته‌های کلیدی از آزمایش یکنواخت و چرخه‌ای روی وصله مکانیکی تعبیه شده را از نظر نیروی تسلیم T_y و نیروی نهایی T_u خلاصه می‌کند. جدول همچنین تطبیق کلی کرنش متناظر با استحکام تسلیم ϵ_y و کرنش‌های متناظر با نیروی نهایی ϵ_u را ارائه می‌کند که برای مقایسه‌های کیفی با تقسیم جابه‌جایی ثبت شده بر طول عضو که شامل منطقه بتن و سطح میلگرد آزاد است، محاسبه می‌شوند. نسبت شکل‌پذیری μ نیز ارائه می‌شود که از نسبت ϵ_u/ϵ_y محاسبه می‌شود. در نمونه با غلاف بتنی با قطر میلگردهای ۱۶ میلیمتری و ۲۰ میلیمتری با وصله مکانیکی و بدون وصله مکانیکی، کاهش ϵ_u با نوع وصله و نوع بارگذاری وجود دارد. همچنین شایان ذکر است که آزمایش‌های تک‌محوری ϵ_u کمتری را برای اعضای با غلاف بتنی نسبت به نمونه‌های بدون غلاف بتنی نشان

جدول ۴: نتایج آزمایش نمونه با غلاف میلگرد*

Specimen Average	T_y (kN)	T_u (kN)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	ϵ_u (mm/mm)	μ ($\epsilon_{usp}/\epsilon_{ub}$)	μ (ϵ_u/ϵ_y)	R_u (%)	R_y (%)
C-NS-۱۶M	۱۰۴±	۱۲۵±۲	۵۲۰±۸	۶۳۷±	۰.۰۰۴±	۰.۱۱۰±	۱	۲۷.۵۰	-	-
	۱,۷ ^{ab}	.۱ ^a	.۸ ^a	۱.۰ ^a	۰.۰۰۰۱۷ ^a	۰.۰۰۳ ^{ad}				

C-TC-۱۶M	۱۰۳± ۲,۵ ^b	۱۲۲±۳ .۳ ^a	۵۲± ۴.۱ ^a	۶۱۹± ۲۵ ^a	۰.۰۰۴۱± ۰.۰۰۰۱۲ ^a	۰.۰۸۳± ۰.۰۰۳ ^b	۰.۷۵	۲۰۲۵	۱۱۹.۰۳	۱۰۰.۰۰
C-OTC-۱۶M	۱۰۶± ۰,۸ ^a	۱۲۴±۱ .۶ ^a	۵۱۸± ۱.۳ ^a	۶۴۵± ۱.۳ ^a	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۰۱ ^b	۰.۰۹۷± ۰.۰۰۴ ^c	۰.۸۸	۲۲.۰۰	۱۲۴.۰۳	۱۰۰
C-RFWTC-۱۶M	۱۰۷± ۰,۸ ^a	۱۲۶±۱ .۰ ^a	۵۲۳± ۴.۶ ^a	۶۵۰± ۱.۳ ^a	۰.۰۰۴۵± ۰.۰۰۰۰۱۲ ^b	۰.۱۱۲± ۰.۰۰۲ ^d	۱.۰۲	۲۴.۹۰	۱۲۵.۰۰	۱۰۰.۵۸
C-NS-۱۶C_r	۱۰۵± ۰,۵ ^e	۱۲۵±۰ .۸ ^e	۵۳۸± ۳.۳ ^e	۶۳۰± ۴.۱ ^e	۰.۰۰۴۵± ۰.۰۰۰۰۰۸ ^e	۰.۰۹۸± ۰.۰۰۲ ^e	۱	۲۱۸۰	-	-
C-TC-۱۶C_r	۱۰۴± ۱,۴ ^e	۱۲۰±۰ .۸ ^f	۵۱۷± ۶.۴ ^f	۶۱۹± ۰.۵ ^e	۰.۰۰۳۹± ۰.۰۰۰۰۲۱ ^f	۰.۰۹۱± ۰.۰۰۳ ^f	۰.۹۲	۲۳.۳۰	۱۱۵.۰۶	۹۶.۰۹
C-OTC-۱۶C_r	۱۰۸± ۰.۵ ^g	۱۲۹±۲ .۱ ^g	۵۱۴± ۶.۷ ^f	۶۵۹± ۱۷.۰ ^f	۰.۰۰۴۰± ۰.۰۰۰۰۰۵ ^f	۰.۰۹۰± ۰.۰۰۲ ^f	۰.۹۲	۲۲.۵۰	۱۲۲.۵۰	۹۵.۵۴
C-RFWTC-۱۶C_r	۱۱۲± ۰,۵ ^g	۱۲۹±۱ .۴ ^g	۵۲۲± ۱.۴ ^f	۶۷۳± ۱.۰ ^f	۰.۰۰۴۲± ۰.۰۰۰۰۱۲ ^f	۰.۱۰۲± ۰.۰۰۲ ^e	۱.۰۴	۲۴.۳۰	۱۲۵.۰۹	۹۷.۰۲
C-NS-۲۰M	۱۶۲± ۴,۵ ^h	۱۹۸±۰ .۸ ^h	۵۳۹± ۱۷ ^h	۶۹۳± ۳.۷ ^h	۰.۰۰۴۳± ۰.۰۰۰۰۲۹ ^h	۰.۱۰۹± ۰.۰۰۴ ^h	۱	۲۵.۳۵	-	-
C-TC-۲۰M	۱۶۳± ۲,۱ ^h	۱۸۷±۲ .۱ ⁱ	۵۲۳± ۵.۰ ^h	۶۶۲± ۷.۸ ⁱ	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۰۱۲ ^h	۰.۰۸۳± ۰.۰۰۳ ⁱ	۰.۷۶	۱۸.۹۰	۱۲۲.۸۲	۹۷.۰۳
C-OTC-۲۰M	۱۶۵± ۱,۲ ^{hi}	۱۹۵±۱ .۴ ^h	۵۲۸± ۲.۹ ^h	۶۹۳± ۲.۹ ^h	۰.۰۰۴۰± ۰.۰۰۰۰۲۴ ^h	۰.۰۸۶± ۰.۰۰۴ ⁱ	۱.۰۱	۲۱.۵۰	۱۲۸.۵۷	۹۸.۰۰
C-RFWTC-۲۰M	۱۶۹± ۰,۸ ⁱ	۱۹۹±۲ .۶ ^h	۵۳۹± ۸.۲ ^h	۶۹۳± ۳.۷ ^h	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۰۲۱ ^h	۰.۱۱۱± ۰.۰۰۳ ^h	۱.۰۲	۲۵.۸۰	۱۲۸.۶۰	۱۰۰
C-NS-۲۰C_r	۱۶۴± ۱,۴ ^{jk}	۱۹۸±۰ .۸ ^j	۵۲۱± ۳.۳ ^j	۶۸۸± ۱.۹ ^{jl}	۰.۰۰۴۸± ۰.۰۰۰۰۱۳ ^{jk}	۰.۱۱۰± ۰.۰۰۲ ^j	۱	۲۳.۰۰	-	-
C-TC-۲۰C_r	۱۶۱± ۱,۹ ^j	۱۸۴±۱ .۴ ^k	۵۱۶± ۰.۹ ^j	۶۴۹± ۱.۰ ^k	۰.۰۰۳۹± ۰.۰۰۰۰۱۳ ⁱ	۰.۰۸۱± ۰.۰۰۲ ^k	۰.۷۳	۲۰.۷۵	۱۲۴.۰۰	۹۹.۰۴
C-OTC-۲۰C_r	۱۶۸± ۰,۵ ^{kl}	۱۹۷±۰ .۵ ^j	۵۳۰± ۰.۵ ^k	۶۸۵± ۱.۶ ^j	۰.۰۰۳۹± ۰.۰۰۰۰۳۳ ⁱ	۰.۰۸۸± ۰.۰۰۲ ^l	۱.۰۰	۲۲.۶۰	۱۳۱.۴۸	۱۰۱.۷۳
A-RFWTC-۲۰C_r	۱۶۸± ۲,۷ ^l	۱۹۹±۱ .۷ ^j	۵۳۹± ۶.۹ ^l	۶۹۳± ۶.۱ ^l	۰.۰۰۴۴± ۰.۰۰۰۰۲۷ ^{jl}	۰.۱۱۱± ۰.۰۰۱ ^m	۱.۰۱	۲۵.۲۰	۱۳۳.۰۱	۱۰۳.۴۶

*حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری است (P > ۰.۰۵)



شکل ۶: نمودار F-ε نمونه‌های با غلاف بتنی (NS, TC, OTC, RFWTC) تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای

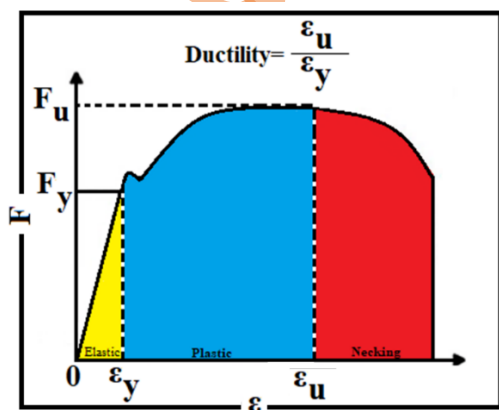
شده (μ_{sp}) نیز باید حداقل به اندازه میلگرد یکپارچه (μ_b) باشد. برای استفاده از میلگردهای اتصال در اجزای سازه‌ای که می‌توانند تنش‌های لرزه‌ای قابل توجهی را تحمل کنند، نسبت (μ_{sp}/μ_b) باید بزرگ‌تر یا مساوی ۱.۰ باشد. شکل‌پذیری نمونه‌ها نیز با استفاده از نسبت شکل‌پذیری ($\epsilon_{usp}/\epsilon_{ub}$) پیشنهاد شده توسط مطالعه قبلی (Tazarv *et al.*, ۲۰۲۳) ارزیابی شد. جداول (۳) و (۴) با توجه به معادله (۳)، مقادیر متوسط شکل‌پذیری همه نمونه‌ها را با هم نشان می‌دهد. توصیه می‌شود که نمونه‌های OTC و RFWTC برای استفاده در اعضای سازه‌ای با تغییر شکل غیرالاستیک (اجزا با تنش‌های غیرالاستیک" به اجزایی اشاره دارد که در مواجهه با شرایط غیرالاستیک، توانایی تغییر شکل دائمی (شکل‌دهی غیرالاستیک) را از خود نشان می‌دهند) مناسب هستند، زیرا مقدار شکل‌پذیری آن‌ها تقریباً برابر با میلگرد های یکپارچه می‌باشد. همچنین به آن‌ها اجازه می‌دهد تا در اعضای بتنی در مناطق بحرانی لرزه‌ای استفاده شوند. برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای کم تا متوسط، می‌توان از وصله میلگرد TC در اعضای سازه‌ای استفاده کرد.

۳-۴ شکل‌پذیری نمونه‌های با و بدون غلاف بتنی

μ و μ_{ϵ} هر نمونه در جدول (۳) با استفاده از شکل (۷) و معادله (۳) تعیین شد. لازم به ذکر است که می‌توان از نسبت کرنش نهایی به کرنش تسلیم برای محاسبه نسبت شکل‌پذیری استفاده کرد (Bompa and Elghazouli, ۲۰۱۸). همچنین، نسبت کرنش نهایی میلگرد وصله شده (ϵ_{usp}) به کرنش نهایی میلگرد یکپارچه می‌تواند برای ارزیابی شکل‌پذیری استفاده شود. در اینجا، ϵ_{usp} مخفف استحکام نهایی میلگرد وصله شده است [۵۴].

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_{usp}}{\epsilon_{ub}} = \frac{\text{کرنش نهایی میلگرد وصله شده}}{\text{کرنش نهایی میلگرد یکپارچه}}$$

نسبت شکل‌پذیری ($\epsilon_{usp}/\epsilon_{ub}$)، که بیش از ۰/۶۵ است، می‌تواند الزامات EC^۲ [۵۵] و EC^۸ [۵۶] را برآورده کند. هنگامی که از کلاس میلگرد C استفاده می‌شود (ISO/DIS 15835. Steel for the Reinforcement of Concrete - Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars (Parts 1 to 3). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; ۲۰۱۸)، نسبت شکل‌پذیری ($\epsilon_{usp}/\epsilon_{ub}$)، که بالای ۰/۶۵ است، می‌تواند الزامات بر اساس آیین نامه‌های EC^۲ (British Standards, ۲۰۰۴) و EC^۸ (European Committee for Standardization, ۲۰۰۴) را برآورده کند. با این حال، میلگرد وصله شده، که دارای نسبت شکل‌پذیری ($\epsilon_{usp}/\epsilon_{ub}$) کمتر از ۰/۶۵ است، برای اعضای که در معرض تغییر شکل‌های غیرالاستیک قابل توجهی هستند نامطلوب به نظر می‌رسد (Bompa and Elghazouli, ۲۰۱۷). برای این بررسی ضروری است که شرایط فوق، برای میلگرد های وصله شده با نسبت شکل‌پذیری زیاد تأیید شود. همچنین شکل‌پذیری میلگرد وصله



۴- عملکرد TC از نظر استحکام، اتلاف انرژی و حالت خرابی استانداردها را برآورده کرده است؛ بنابراین می‌تواند نیروهای زلزله کم تا متوسط را تحمل کند.

۵- می‌توان گفت که وصله مکانیکی RFWTC و OTC برای میلگردهای طولی قابل‌اعتماد هستند و حتی می‌توانند عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن مسلح را بهبود بخشند.

با این حال، پیشنهاد می‌شود وصله مکانیکی RFWTC و OTC در تحقیقات عددی یا آزمایشگاهی عمیق‌تر بررسی شوند تا توصیه‌ها و نگرانی‌های مربوط به این روش وصله دقیق‌تر ارائه شود. تحقیقات آینده می‌تواند پیامدهای اعمال این روش را برای اعضای بتن مسلح از جمله ستون‌ها، تیرها، دال‌ها، و اتصالات تیر-ستون مورد مطالعه و بررسی قرار دهد.

منابع

- Abé, M. and Shimamura, M. (۲۰۱۴) 'Performance of railway bridges during the ۲۰۱۱ Tōhoku earthquake', *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ۲۸(۱), pp. ۱۳-۲۳. doi: ۱۰.۱۰۶۱/(ASCE)CF.۱۹۴۳-۵۵۰۹.۰۰۰۰۳۷۹. ACI33 - ICC Evaluation Service, LLC (ICC-ES) (no date). Available at: <https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac۱۳۳/> (Accessed: ۱۳ December ۲۰۲۲).
- 'ACI ۳۱۸-۱۹ Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary' (۲۰۱۹) *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. doi: ۱۰.۱۴۳۵۹/۵۱۷۱۶۹۳۷.
- ACI Committee ۳۱۸ (۲۰۱۹) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*, American Concrete Institute.
- ACI Committee ۴۳۹. (۲۰۰۷) *Types of mechanical splices for reinforcing bars*.
- Al-Jelawy, H. M. (۲۰۲۲) 'Experimental and numerical investigations on monotonic tensile behavior of grouted sleeve couplers with different splicing configurations', *Engineering Structures*, ۲۶۵, p. ۱۱۴۴۳۴. doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.ENGSTRUCT.۲۰۲۲.۱۱۴۴۳۴.
- ASTM E8 / E8M - 16a1 *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials* (no date). Available at: <https://www.astm.org/Standards/E8> (Accessed: ۱۹ October ۲۰۲۰).
- Bai, A. S. H. and Ingham, J. M. (۲۰۰۹) 'Seismic performance of mechanically coupled reinforcing bars', *Magazine of Concrete Research*, ۶۱(۷), pp. ۵۲۹-۵۳۷. doi: ۱۰.۱۶۸۰/macrc.۲۰۰۸.۰۰۰۹۸.
- Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y. (۲۰۱۷) 'Ductility considerations for mechanical reinforcement couplers', *Structures*. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.istruc.۲۰۱۷.۰۸.۰۰۷.
- Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y. (۲۰۱۸) 'Monotonic

می‌تواند مرتبط باشد. علاوه بر این، نسبت قدرت تسلیم (R_y) محاسبه شد. R_y نشان دهنده نسبت استحکام کششی تسلیم نمونه وصله مکانیکی رزوه‌ای به استحکام کششی تسلیم میلگرد یک پارچه است (جداول (۳) و (۴)). در حالی که میانگین نسبت های R_y در OTC و TC کمتر از ۱ است، متوسط نسبت های R_y برای نمونه های RFWTC بیشتر از ۱ است. در مقایسه با سایر نمونه ها، نمونه های RFWTC و OTC از نظر استحکام (R_y و R_u)، شکل پذیری، اتلاف انرژی و حالت خرابی بهترین عملکرد را دارند. به دلیل عملکرد بهبود یافته، اتصال برابر نمونه های RFWTC و OTC برای استفاده در مناطق لرزه‌ای جلا ایده آل است. علاوه بر این، عملکرد TC از نظر استحکام، اتلاف انرژی و حالت خرابی استانداردها را برآورده کرده است که بنابراین می‌تواند نیروهای زلزله کم تا متوسط را تحمل کند.

۵ - نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله اصلاح ناحیه شکست کوپلر با میله رزوه‌ای و استفاده از آن در نواحی مفصل پلاستیک اعضای شکل‌پذیر در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد بود. این وصله‌های مکانیکی با تغییر روش ساخت وصله رزوه‌ای و ترکیب آن با جوشکاری اصطکاکی دوار و نورد سرد ساخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این دو نوع وصله مکانیکی را می‌توان در بخش‌های مفصل پلاستیک اعضا شکل‌پذیر در مناطق لرزه‌ای استفاده کرد. برای ارزیابی دقیق رفتار این وصله‌های مکانیکی پس از ساخت ۹۶ نمونه با غلاف و بدون غلاف بتنی به همراه ۳ نمونه ستون بتن مسلح نتایج حاصل از آزمایش‌ها، رفتار تک‌محوری یکنواخت و چرخه‌ای با غلاف بتنی و بدون غلاف بررسی شد. در ادامه نتایج حاصل از آزمایش‌ها ارائه می‌گردد.

۱- رزوه‌های بزرگ شده پتانسیل بهبود عملکرد وصله مکانیکی در اعضای بتنی را دارند. شکست شکل‌پذیر را می‌توان در OTC و RFWTC مشاهده کرد.

۲- نمونه‌های OTC و RFWTC الزامات عملکرد خوبی را برای عضو سازه‌ای که تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرند، را نشان می‌دهد همچنین استانداردهای مربوط به نواحی لرزه‌ای را برآورده می‌کنند.

۳- به دلیل عملکرد بهبودیافته، نمونه‌های RFWTC و OTC برای استفاده در مناطق لرزه‌ای با خطر زیاد، ایده‌آل هستند.

- Strength and Constructibility', *Concrete International*, 16(12), pp. 47-52.
- ISO/DIS 15835. *Steel for the Reinforcement of Concrete - Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars (Parts 1 to 3)*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland; 2018. (no date).
- Kheyroddin, A. and Dabiri, H. (2020) 'Cyclic performance of RC beam-column joints with mechanical or forging (GPW) splices; an experimental study', *Structures*. doi: 10.1016/j.istruc.2020.10.071.
- Kuscu, H., Becenen, I. and Sahin, M. (2008) 'Evaluation of temperature and properties at interface of AISI 1040 steels joined by friction welding', *Assembly Automation*. doi: 10.1108/1445150810904468.
- Lee, C. S. and Han, S. W. (2019) 'Cyclic behaviour of lightly-reinforced concrete columns with short lap splices subjected to unidirectional and bidirectional loadings', *Engineering Structures*. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.03.108.
- Li, W. and Wang, F. (2011) 'Modeling of continuous drive friction welding of mild steel', *Materials Science and Engineering A*. doi: 10.1016/j.msea.2011.04.001.
- Liu, C. et al. (2020) 'Experimental and numerical investigation on mechanical properties of grouted-sleeve splices', *Construction and Building Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120441.
- Maalekian, M. (2007) 'Friction welding - Critical assessment of literature', *Science and Technology of Welding and Joining*. doi: 10.1179/174329307XX249333.
- Najafgholipour, M. A. et al. (2018) 'The performance of lap splices in RC beams under inelastic reversed cyclic loading', *Structures*. doi: 10.1016/j.istruc.2018.07.011.
- Nateghi-Alahi, F. and Shokrzadeh, M. R. (2019) 'Behavior considerations for mechanical rebar couplers', in *Behavior considerations for mechanical rebar couplers*. University of Tokyo, pp. 3-11. Available at: <https://isn.ac/XBHB-EZGFF>.
- Saito, T., Yabe, Y. and Fujimori, T. (1985) 'An ultrasonic testing method for gas pressure welded joints of reinforcing steel bars', *Ultrasonics*. doi: 10.1016/0041-624X(85)90060-5.
- Seshu Kumar, A. et al. (2021) 'Evaluation of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints', *Materials Science and Engineering A*. doi: 10.1016/j.msea.2021.141844.
- Sharbatdar, M. K., Jafaria, O. M. and Karimib, M. S. (2018) 'Experimental evaluation of splicing of longitudinal bars with forging welding in flexural reinforced concrete beams', *Advances in Concrete Construction*. doi: 10.12989/acc.2018.6.5.509.
- Shokrzadeh, M., Aziminejad, A. and Sarvghadmoghaddam, A. (2016) 'Hysteretic Behavior of Concrete Connections Strengthened by X-Shape FRP and cyclic performance of threaded reinforcement splices', *Structures*, 16(April), pp. 358-372. doi: 10.1016/j.istruc.2018.11.009.
- Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y. (2019) 'Inelastic cyclic behaviour of RC members incorporating threaded reinforcement couplers', *Engineering Structures*, 180, pp. 468-483. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.11.053.
- British Standards, I. (2004) 'Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings', *British Standards Institution*.
- Çelik, S. and Ersozlu, I. (2014) 'Investigation of microstructure and mechanical properties of friction welded AISI 316 and Ck 45 steels', *High Temperature Materials and Processes*. doi: 10.1515/htmp-2013-0042.
- Dabiri, H., Kheyroddin, A. and Faramarzi, A. (2022) 'Predicting tensile strength of spliced and non-spliced steel bars using machine learning- and regression-based methods', *Construction and Building Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126835.
- Dahal, P. K. and Tazarv, M. (2020) 'Mechanical bar splices for incorporation in plastic hinge regions of RC members', *Construction and Building Materials*, 258, p. 120308. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120308.
- Einea, A., Yehia, S. and Tadros, M. K. (1999) 'Lap splices in confined concrete', *ACI Structural Journal*, 96(6), pp. 947-955. doi: 10.14359/1769.
- Emre, H. E. and Kaçar, R. (2015) 'Effect of post weld heat treatment process on microstructure and mechanical properties of friction welded dissimilar drill pipe', *Materials Research*. doi: 10.1590/1516-1439.308114.
- European Committee for Standardization (2004) 'Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings', *European Committee for Standardization*.
- Ghayeb, H. H. et al. (2021) 'Performance of mechanical steel bar splices using grouted couplers under uniaxial tension', *Journal of Building Engineering*. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101892.
- Harinkhede, S. and Varghese, V. (2021) 'Investigation on Design of New Techniques in Mechanical Rebar Coupler as an Alternative to Lap Splices', in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, pp. 57-61. doi: 10.1007/978-981-15-8025-2_7.
- Hassan, T. K., Lucier, G. W. and Rizkalla, S. H. (2012) 'Splice strength of large diameter, high strength steel reinforcing bars', *Construction and Building Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.013.
- Henin, E. and Morcou, G. (2015) 'Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction', *Engineering Structures*, 83, pp. 154-162. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.10.045.
- Hulshizer, A. J., Ucciferro, J. J. and Gray, G. E. (1994) 'Mechanical Reinforcement Couplings Meet Demands of

of friction welded C[∅]/HS[∅]- δ - γ dissimilar steel joints', *Journal of Materials Science Letters*. doi: 10.1007/BF00591663.

Zhao, E. *et al.* (2022) 'Experimental study on monotonic, cyclic mechanics and fatigue performance of pressed cone sleeve splices', *Structures*. doi: 10.1016/j.istruc.2022.03.050.

Strips', *Analysis of Structure and Earthquake*, 12(4), pp. 29-40. Available at: https://civil-strj.maragheh.iau.ir/article_525485.html (Accessed: 18 November 2022).

Shokrzadeh, M. R. *et al.* (2022) 'Failure area evaluation of the coupler with threaded bar: Experimental and Numerical study', *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 12(1), pp. 531-543. doi: 10.1007/IJASE.2022.692294.

Shokrzadeh, M. R. *et al.* (2023) 'The improvement of the threaded-based mechanical splice by modifying the threaded system: Study of techniques cold rolling and rotating friction welding', *Journal of Building Engineering*, 80, p. 107964. doi: 10.1016/J.JOBE.2023.107964.

Shokrzadeh, M. R. (2024) *Experimental study of seismic behavior and modification of the failure region of mechanical bar splices in reinforced concrete vertical elements*. Islamic Azad University Science and Research Branch. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/377926482_Experimental_study_of_seismic_behavior_and_modification_of_the_failure_region_of_mechanical_bar_splices_in_reinforced_concrete_vertical_elements (Accessed: 6 February 2024).

Shokrzadeh, M. R. and Nateghi-Alahi, F. (2022) 'Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier', *Bridge Structures*, 18(3-4), pp. 75-88. doi: 10.3233/BRS-220180.

Structural Engineering Lab. - International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (no date).

Available at: <http://www.iiess.ac.ir/en/structural-laboratory/> (Accessed: 18 November 2021).

Tazarv, M. *et al.* (2023) 'Analysis and design of mechanically spliced precast bridge columns', *Engineering Structures*, 280, p. 115726. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.115726.

Tazarv, M. and Saiidi, M. S. (2016) 'Seismic design of bridge columns incorporating mechanical bar splices in plastic hinge regions', *Engineering Structures*. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.06.041.

Tazarv, M., Shrestha, G. and Saiidi, M. S. (2021) 'State-of-the-art review and design of grouted duct connections for precast bridge columns', *Structures*. doi: 10.1016/j.istruc.2020.12.091.

'Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies' (2014) in *Control of Welding Distortion in Thin-Plate Fabrication*. doi: 10.1016/b978-0-08-10457-0.47-8.50.16-9.

Yamamoto, R. I. *et al.* (2002) 'New quality inspection method for gas pressure welds', *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)*. doi: 10.2219/rtriqr.43.7.

Yilmaz, M. *et al.* (1996) 'Investigation into the weld zone