Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.84-97

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Experimental Study of Seismic Behavior and Modification of the Failure Region of Mechanical Bar Splices

Mohamad Reza Shokrzadeh[1] and Fariborz Nateghi-Alahi*[2]

[1]Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2]International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
* corresponding author: (nateghi@iiees.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 17 January 2024

Revised: 2 March 2024

Accepted:20 April 2024

Keywords:

Mechanical threaded splice,
cold rolling,
rotating friction welding,
plastic hinges.

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, 96 samples were tested (three repeated samples of each type). Threaded couplers (TC), oversized-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.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:
Shokrzadeh, M.R. and Nateghi-Alahi, F. 2025. Experimental Study of Seismic Behavior and Modification of the Failure Region of Mechanical Bar Splices, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.84-97.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.63880.3292

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله‌ی مکانیکی میلگردها

محمدرضا شکرزاده [۱] و فریبرز ناطقی الهی [۲*]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۲] پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (nateghi@iiees.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

واژگان کلیدی:

وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای،

نورد سرد،

جوش اصطکاکی دورانی،

مفصل خمیری.

چکیده

در نوشتار حاضر، با اصلاح روش ساخت وصله‌ی رزوه‌ای و ترکیب آن با جوش اصطکاکی دوار، دو نوع وصله معرفی شده است. هدف، اصلاح ناحیه‌ی شکست کوپلر با میلگرد رزوه‌ای و استفاده از آن در نواحی مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد بوده است. ناحیه‌ی رزوه در روش پیشنهادی بزرگ‌تر شده و برای بزرگ‌ترکردن آن از دو روش نورد سرد و جوشکاری اصطکاکی دوار استفاده شده است. در مجموع ۹۶ نمونه (شامل سه نمونه‌ی تکرار از هر نوع) آزمایش شده‌اند. وصله‌های مکانیکی: رزوه‌ای استاندارد (TC)، با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، رزوه‌ای با جوش اصطکاکی دوار (RFWTC)، و نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) تحت آزمایش‌های کششی و چرخه‌ای تک‌محوری با و بدون غلاف بتنی قرار گرفته و حساسیت آن‌ها به قطر میلگرد، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی، و عملکرد حالت شکست ارزیابی شده است. وصله‌های RFWTC و OTC بهترین عملکرد را داشتند و برای استفاده در مناطق با خطر لرزه‌ای زیاد مناسب هستند. علاوه‌بر این، TC برای استفاده در مناطق لرزه‌خیز کم تا متوسط مناسب است.

۱. مقدمه

استفاده از شیوه‌های جدید برای افزایش کیفیت سازه، کاهش هزینه‌های تولید در صنعت ساختمان، علاوه‌بر یک نیاز، یک ضرورت است. وصله‌کردن میلگردها در سازه‌های بتن مسلح، یکی از پرمخاطره‌ترین موارد موجود در اجراست. زیرا رعایت یا عدم رعایت اصول آن، تأثیر زیادی در عملکرد سازه خواهد داشت. عملکرد یکپارچه‌ی وصله‌های مکانیکی به‌شدت در رفتار سازه‌های بتن مسلح تأثیرگذار است. نداشتن رفتار یکپارچه در وصله، باعث ضعف عضو بتن مسلح تحت نیروهای اعمالی به آن می‌شود.[۱-۳] از نظر آیین‌نامه‌ای دو نوع وصله تعریف شده است: وصله‌ی نوع یک، که در نواحی بحرانی اعضاء سازه‌های بتن مسلح مجاز نیست. وصله‌ی نوع دو، که با توجه به عملکرد یکپارچه‌ای که دارد، در هر موقعیتی از سازه قابل‌اجراست.[۴] روش‌های وصله، که تاکنون معرفی و بررسی شده‌اند، را می‌توان به ۳ دسته تقسیم کرد: پوششی، جوشی، و مکانیکی، که هر کدام مزایا و معایبی دارند.[۵-۸]

مهم‌ترین مشکلات وصله‌ی پوششی، گاه ایجاد تراکم زیاد میلگرد در یک ناحیه‌ی مشخص از عضو، عدم امکان استفاده از وصله‌ی پوششی برای میلگردهای بزرگ‌تر از قطر ۳۶ میلی‌متر، و نیز نیاز به میلگردهای انتظار بسیار بلند (گاه بلندتر از ۶ متر) در سازه‌ی بتنی برای اتصال به قطعه‌ی بعدی است. وصله‌های پوششی تحت نیروهای متناوب و چرخه‌ای در محدوده‌ی کشسان قابل اعتماد نیستند، که این بی‌اعتمادی در وصله‌های پوششی با میلگردهای با قطر بالا همچون میلگردهای با قطرهای ۲۵، ۲۸، ۳۲، و ۳۶ میلی‌متر به مقدار زیادی افزایش می‌یابد.[۱] این در حالی است که میلگردهای مذکور، المان‌های اصلی سازه‌ی بتنی هستند و هرگونه شک و تردید در مورد کارآیی آن‌ها، نگرانی شدیدی را برای مهندسان و کاربران ایجاد می‌کند. در آیین‌نامه‌ی ۱۹-۳۱۸ ACI، استفاده از وصله‌های پوششی برای میلگردهای با قطر ۳۶ به بالا ممنوع شده است و همچنین استفاده از آن‌ها در میلگردهایی که در کشش قرار دارند، در محل اتصال و محل ایجاد مفصل خمیری مجاز نیست.[۹-۱۵]

قابلیت اعتماد در روش جوش سر به سر (فورجینگ) بسیار پایین است؛ زیرا در روش فورجینگ به‌علت دمای بالای قسمت فورج‌شده، امکان اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌های فیزیکی و مکانیکی نیست. همچنین در روش فورجینگ به‌علت دخالت عوامل متعدد در جوشکاری و همچنین بالابودن خطای انسانی، محیطی، و مخصوصاً خطای ماشین‌آلات استفاده‌شده، بهتر است از روش‌های جایگزین وصله‌ی میلگرد استفاده کرد. پس از وقوع زلزله‌ی کوبه در ژاپن، عملکرد نامطلوبی از میلگردهای وصله‌شده به روش فورجینگ مشاهده شده است؛ که علی‌رغم انجام جوش‌ها به دست جوشکارهای زبده‌ی ژاپنی و نظارت دقیق بر انجام آن‌ها و انجام آزمایش‌های کنترلی، نتایج حاصل از روش فورجینگ در مناطق زلزله‌خیز فاجعه‌بار بوده و به‌هیچ‌وجه قابل‌اطمینان نیست.[۱۶-۲۰]

استناد به این مقاله:

شکرزاده، محمدرضا و ناطق الهی، فریبرز، ۱۴۰۴. مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله‌ی مکانیکی میلگردها. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص.۸۴-۹۷.

https://doi.org/10.24200/j30.2024.63880.3292

شاپا الکترونیکی: ۴۷۷۶-۲۶۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

در روش وصله‌ی مکانیکی، کوپلرها اجزاء صلبی هستند، که برای اتصال میلگردها به یکدیگر استفاده می‌شوند. کوپلرها را می‌توان به‌طورکلی براساس نحوه‌ی اتصال ایجادشده و میزان تنش بین میلگردها و کوپلرها به ۵ نوع تقسیم کرد: پیچی، پینی، رزوه‌ای، دوغابی، و سرد پرس‌شده.[۲] تنش کششی در یک میلگرد با وصله‌ی مکانیکی، از یک میلگرد به میلگرد دیگر از طریق کوپلر و قطعات آن منتقل می‌شود.[۲۱-۲۳] نصب سریع، کاربرد سازگار با محیط‌زیست و عملکرد قابل‌قبول، همگی از مزایای استفاده از روش‌های وصله‌های مکانیکی هستند.[۳ و ۲۰]

رایج‌ترین نوع استفاده از وصله‌های مکانیکی، وصله‌ی رزوه‌ای است؛ که بزرگ‌ترین ضعف آن، شکست در محل رزوه است.[۲ و ۳]

وصله‌های مکانیکی مطابق استاندارد ACI ۳۱۸ بر دو نوع هستند: ۱) وصله‌ی مکانیکی باید در کشش و فشار دارای کمینه‌ی مقاومت برابر ۱/۲۵ برابر مقاومت تسلیم میلگرد باشند؛ ۲) وصله‌ی مکانیکی باید در کشش و فشار دارای کمینه‌ی 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، محدودیت‌های بیشتری از نظر محل استفاده دارند و در منطقه با لرزه‌خیزی کم در هر کجای سازه می‌توانند استفاده شوند؛ ولی در مناطق لرزه‌خیز، استفاده از آن‌ها در نقاطی از سازه که انتظار رفتار غیرخطی از آن‌ها وجود دارد تا فاصله‌ی یک برابر عمق مقطع از محل تشکیل مفصل خمیری و یا در داخل گره‌ی اتصال مجاز نیست. وصله‌های نوع دوم، در هر جای سازه و در هر منطقه‌ی لرزه‌ای می‌توانند استفاده شوند.

۲. ضرورت انجام پژوهش

مطالعات انجام‌شده بر روی عملکرد وصله‌ی مکانیکی را می‌توان به ۳ دسته تقسیم کرد: (الف) شکلی (با و بدون غلاف بتن)، (ب) نحوه‌ی بار اعمال‌شده (چرخه‌ای یا یکنواخت)، و (ج) نرخ بارگذاری. به‌طورکلی، براساس نتایج آزمایش‌های وصله‌های مذکور، می‌توان گفت که رفتار تنش- کرنش میلگردهای متصل‌شده به‌صورت مکانیکی با میلگردهای یکپارچه‌شده متفاوت است، زیرا ظرفیت تغییرشکل میلگردهای متصل به‌صورت مکانیکی کمتر است. به‌عبارت دیگر، میلگردهای یکپارچه، بیشتر از میلگردهایی که به‌صورت مکانیکی به یکدیگر متصل شده‌اند، کشیده می‌شوند. کشش ایجادشده در میلگرد باعث ایجاد نیروی برشی در مقطع میلگرد می‌شود و با توجه به اینکه در محل اتصال رزوه وجود دارد و خود ایجاد رزوه به روش سنتی (براده‌برداری یا رولینگ) باعث کم‌شدن مقطع میلگرد در محل رزوه می‌شود؛ که این امر سبب ایجاد ناحیه‌ای با سختی کمتر و مستعد شکست می‌شود. این تذکر لازم است که مطالعات صورت‌گرفته درخصوص ضعف شکست در رزوه در وصله‌ی مکانیکی پیچی بسیار محدود است و عمده‌ی مشکل اتصال‌های مذکور، شکست در محل رزوه است. روش‌های رایج برای ایجاد رزوه در وصله‌های رزوه‌ای مکانیکی به‌صورت براده‌برداری یا رولینگ از روی میلگرد است. به‌علت کاهش قطر میلگرد در محل رزوه، مقاومت آن کاهش می‌یابد و میلگرد در هنگام آزمایش رفت و برگشتی در ناحیه‌ی رزوه دچار شکست می‌شود. همچنین برای دست‌یابی به رفتار لرزه‌ای مناسب وصله‌ی مکانیکی نیاز به آزمایش‌های رفت و برگشتی در اعضاء بتن مسلح است؛ بنابراین، برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روش وصله‌ی میلگرد، ارزیابی و اصلاح ناحیه‌ی شکست وصله در طول اعضاء بتن مسلح و روش اجرای آن، داشتن اطلاعات کافی و معتبر از عملکرد انواع روش‌های وصله‌ی میلگردها در اعضاء بتن مسلح و روشن‌شدن نوع وصله، انجام مطالعه‌ی حاضر ضروری است.[۱، ۲، ۱۱، و ۲۳-۲۹]

سازمان‌دهی نوشتار حاضر به این شرح است:
با اصلاح روش ساخت وصله‌ی مکانیکی و ترکیب آن با جوشکاری اصطکاکی دوار، دو نوع وصله معرفی شده است، که می‌توانند در نواحی مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق لرزه‌خیزی بالا استفاده شوند. ناحیه‌ی وصله در روش پیشنهادی بزرگ‌تر شده است. در مجموع ۹۶ نمونه (شامل سه نمونه‌ی تکرار از هر نوع) آزمایش شده‌اند. وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای استاندارد (TC)، وصله‌ی مکانیکی با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای با جوش اصطکاکی دوار (RFWTC)، و نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) با قطر میلگرد ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر تحت آزمایش‌های کششی و چرخه‌ای تک‌محوری با و بدون غلاف بتنی قرار گرفته‌اند و حساسیت آن‌ها به قطر میلگرد، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی، و عملکرد حالت شکست ارزیابی شده است. توضیح کاملی در مورد معیارهای لرزه‌ای وصله‌ی میلگرد براساس استانداردهای مختلف طراحی نیز برای استفاده‌ی عملی در نوشتار حاضر ارائه شده است.

۳. معرفی نمونه‌ها و متغیرهای آزمایش

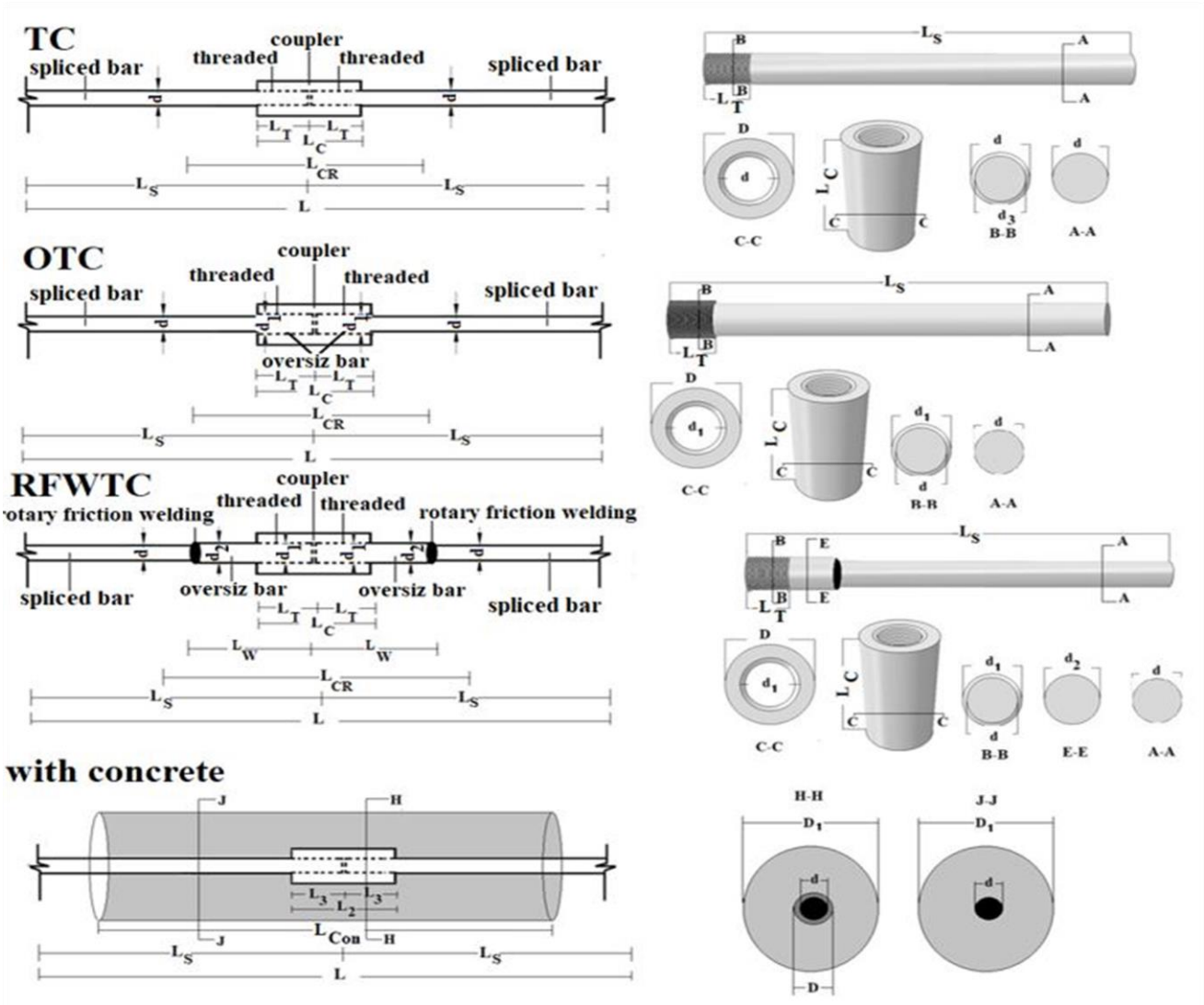
در تمامی نمونه‌ها، میلگرد، بتن مصرفی و ابعاد نمونه‌ها یکسان بوده است. متغیرهای بررسی‌شده در نوشتار حاضر، فقط نوع وصله‌های مکانیکی و قطر میلگرد در نمونه‌ها بوده است. فولاد استفاده‌شده در نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته‌شده از نوع AIII و به قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر و تولید کارخانه‌ی فولاد یزد بوده است. کوپلرهای استفاده‌شده، توسط شرکت سهند تولید شده‌اند. لازم به توضیح است که فولاد استفاده‌شده برای ساخت کوپلرهای مذکور مطابق با دستورالعمل DIN ۱.۱۱۹۱ بوده است. سختی وصله‌های مکانیکی بیشتر یا برابر با میلگردهای معمولی بوده است. پس استفاده از آن‌ها برای وصله‌ی آرماتورها به یکدیگر بلامانع است.[۲۰]

۱.۳. نمونه‌های وصله‌ی مکانیکی با و بدون غلاف بتنی

سه نوع وصله‌ی مکانیکی فشاری- کششی، یعنی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای (TC)، وصله‌ی مکانیکی با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، اتصال جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای (RFWTC)، و همچنین نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) ساخته شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در هر نمونه، از میلگردهای با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. جزئیات نمونه‌ها در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده‌اند.

شناسه‌ی نمونه‌ها 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 وصله‌ی مکانیکی اشاره دارد: بدون وصله‌ی مکانیکی (NS)، وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای (TC)، وصله‌ی مکانیکی با ناحیه‌ی رزوه‌ی بزرگ‌ترشده (OTC)، و اتصال‌های جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای با (RFWTC). در بخش آخر، قطر میلگرد و همچنین پروتکل بارگذاری آزمایش مشخص شده است؛ که در آن، بارگذاری کششی با (M) و بارگذاری رفت و برگشتی با (C) نشان داده شده است.

شایان ذکر است که پروتکل بارگذاری چرخه‌ای برای نمونه‌های بدون غلاف بتنی با (C_1) و برای نمونه‌های دارای غلاف بتنی با (C_2) مشخص شده است



شکل۱. جزئیات نمونه‌های TC، OTC، و RFWTC بدون غلاف بتن و با غلاف بتنی.

جدول ۱. جزئیات نمونه‌ها.*

Specimen	d_b	L	L_S	L_C	L_T	L_W	L_{Con}	d_1	d_2	d_3	D	D_1
Non-spliced (NS)	16	700	-	-	-	-	600	-	-	-	-	121
	20	700	-	-	-		600	-	-	-	-	151
Threaded couplers (TC)	16	700	350	42	21	-	600	16	-	2.5	23	121
	20	700	350	50	25	-	600	20	-	2.5	30	151
Oversize-threaded coupler (OTC)	16	700	350	46	23	-	600	18	18	2.5	28	121
	20	700	360	54	27	-	600	22	22	2.5	33	151
Welding splices with threaded couplers (RFWTC)	16	700	360	46	23	80	600	18	18	2.5	28	121
	20	700	360	54	27	100	600	22	22	2.5	33	151

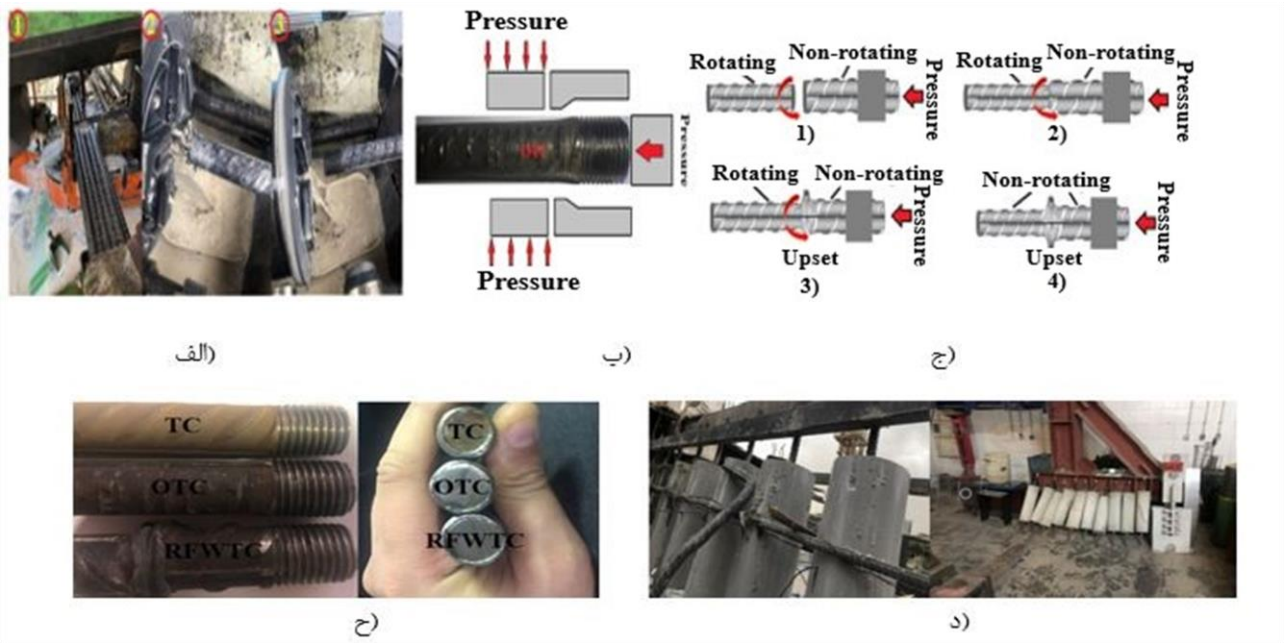
*ابعاد به میلیمتر است

(جدول ۲). در روش TC، ایجاد رزوه به‌صورت نورد سرد توسط دستگاه رولینگ رزوه‌زنی بر روی میلگردها انجام شده است. یک روش نورد سرد ویژه برای ساخت نمونه‌های OTC استفاده شده است. پس از برش توسط اره‌های دیسکی تحت فشار هیدرولیک قرار گرفته و ناحیه‌ی رزوه‌کاری با فشار افزایش یافته و سپس رزوه شده است (شکل ۲: الف، ب، و ج).

در روش جوشکاری اصطکاکی دوار، ۵ برابر قطر میلگرد (یک اندازه بزرگ‌تر) با جوش اصطکاکی دوار به میلگرد اصلی متصل و سپس رزوه شده است (شکل ۲- ج). طول نمونه‌های خارج غلاف بتنی ۷۰۰ میلی‌متر بوده است. نمونه‌های با غلاف بتنی با استفاده از یک قاب پلاستیکی عمودی (مطابق شکل ۲ - د) ایجاد شده‌اند. وضعیت عمودی قاب توسط پایه‌های چوبی حفظ شده است. طول

جدول ۲. شناسه‌ی نمونه‌ها.

	Without concrete tests		With concrete tests	
Sample	**Specimen ID**	**Test protocol**	**specimen**	**Test protocol**
Non-spliced (NS)	A-NS-16M	Monotonic	C-NS-16M	Monotonic
	A-NS-16C_1	Cyclic C_1	C-NS-16C_2	Cyclic C_2
	A-NS-20M	Monotonic	C-NS-20M	Monotonic
	A-NS-20C_1	Cyclic C_1	C-NS-20C_2	Cyclic C_2
Threaded couplers (TC)	A-TC-16M	Monotonic	C-TC-16M	Monotonic
	A-TC-16C_1	Cyclic C_1	C-TC-16C_2	Cyclic C_2
	A-TC-20M	Monotonic	C-TC-20M	Monotonic
	A-TC-20C_1	Cyclic C_1	C-TC-20C_2	Cyclic C_2
Oversize-threaded coupler (OTC)	A-OTC-16M	Monotonic	C-OTC-16M	Monotonic
	A-OTC-16C1	Cyclic C_1	C-OTC-16C_2	Cyclic C_2
	A-OTC-20M	Monotonic	C-OTC-20M	Monotonic
	A-OTC-20C_1	Cyclic C_1	C-OTC-20C_2	Cyclic C_2
Welding splices with threaded couplers (RFWTC)	A-RFWTC-16M	Monotonic	C-RFWTC-16M	Monotonic
	A-RFWTC-16C_1	Cyclic C_1	C-RFWTC-16C_2	Cyclic C_2
	A-RFWTC-20M	Monotonic	C-RFWTC-20M	Monotonic
	A-RFWTC-20C_1	Cyclic C_1	C-RFWTC-20C_2	Cyclic C_2



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

نمونه‌های با غلاف بتنی ۷۰۰ میلی‌متر بوده است، که ۶۰۰ میلی‌متر از آن در داخل غلاف بتنی قرار گرفته است. قطر خارجی غلاف بتنی برای نمونه‌های ساخته‌شده از میلگردهای db=۱۶ mm برابر با D_c=۱۲۱ mm و قطر خارجی غلاف بتنی برای نمونه‌های ساخته‌شده از میلگردهای db=۲۰ mm، برابر با D_c=۱۵۱ mm بوده است (جدول ۱).

در مطالعه‌ی حاضر، از روش پیشنهادی بزرگ‌کردن ناحیه‌ی رزوه‌کاری (از طریق دو روش نورد سرد و جوشکاری اصطکاکی دورانی) استفاده شده است.

۳.۱.۱. روش نورد سرد

روش اول: ایجاد رزوه به‌صورت براده‌برداری از روی میلگرد است. به‌علت کاهش قطر میلگرد در محل رزوه، مقاومت آن کاهش می‌یابد و میلگرد در هنگام آزمون کشش در ناحیه‌ی رزوه دچار شکست می‌شود.

روش دوم: رزوه به‌صورت نورد سرد انجام می‌شود. این عمل طی فرایند خاص، توسط دستگاه رولینگ رزوه‌زنی بر روی میلگردها انجام می‌شود. در روش حاضر، قرقره‌هایی با گام کوپلر طراحی شده‌اند، که فشار آن‌ها در حالت دوران، سبب ایجاد رزوه روی میلگرد می‌شود (شکل ۲ - الف).

روش سوم: در روش نورد سرد، پس از برش توسط اره‌های دیسکی، ناحیه‌ی رزوه‌کاری تحت فشار هیدرولیک قرار می‌گیرد و بزرگ‌تر می‌شود. اندازه‌ی جدید محل رزوه به نحوی افزایش می‌یابد که امکان اندازه‌ی رزوه‌کاری برای هر میلگرد را یک پله افزایش می‌دهد. به‌طور مثال، میلگرد ۲۰ پس از افزایش، رزوه‌ی ۲۲ خواهد داشت. لازم به توضیح است که فولاد استفاده‌شده برای ساخت کوپلرهای ذکرشده مطابق با دستورالعمل DIN ۱.۱۱۹۱ بوده است. طول رزوه در انتهای میلگرد برابر با ($d-P \leq L \leq d$) بوده است، که در آن، d قطر اسمی میلگرد و

p گام رزوه است. همچنین Dc قطر خارجی کوپلر و Lc طول کوپلر است؛ که در روش اخیر کاهش یافته است، که به دلیل افزایش قطر محل رزوه‌کاری بوده است (شکل ۲ - ب).

۲.۱.۳. روش جوشکاری اصطکاکی

جوشکاری اصطکاکی دورانی، نخستین فرایند از انواع جوش اصطکاکی است، که به‌صورت تجاری استفاده شده است. در فرایند اخیر، یکی از قطعات استوانه‌ای در همان راستای قطعه‌ی دیگر ثابت است، و دوران قطعه‌ی دیگر باعث می‌شود که مواد در فصل مشترک دو قطعه در اثر حرارت، نرم و سپس به یکدیگر جوش بخورند.[۳۰-۳۵] از ویژگی‌های فرایند جوشکاری اصطکاکی این است که علاوه‌بر فلزات همجنس، می‌تواند برای فلزات غیرهمجنس نیز استفاده شود. فرایند مذکور با به‌وجودآوردن گرما از دوران سریع و تحت‌فشار قراردادن دو قطعه نسبت به هم صورت می‌گیرد و ماده در حالت خمیری از محل فصل مشترک دو قطعه به بیرون خارج می‌شود. پس از توقف دوران و قبل از پایین‌آمدن دما، برای به‌دست‌آوردن یک اتصال جوش مستحکم، باید با نیروی زیادی دو قطعه به هم فشرده شوند. نتیجه‌ی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی، اتصالی است که در فاز جامد شکل می‌گیرد و مشکلات اتصال‌های ذوبی را ندارد.[۳۴-۳۷]

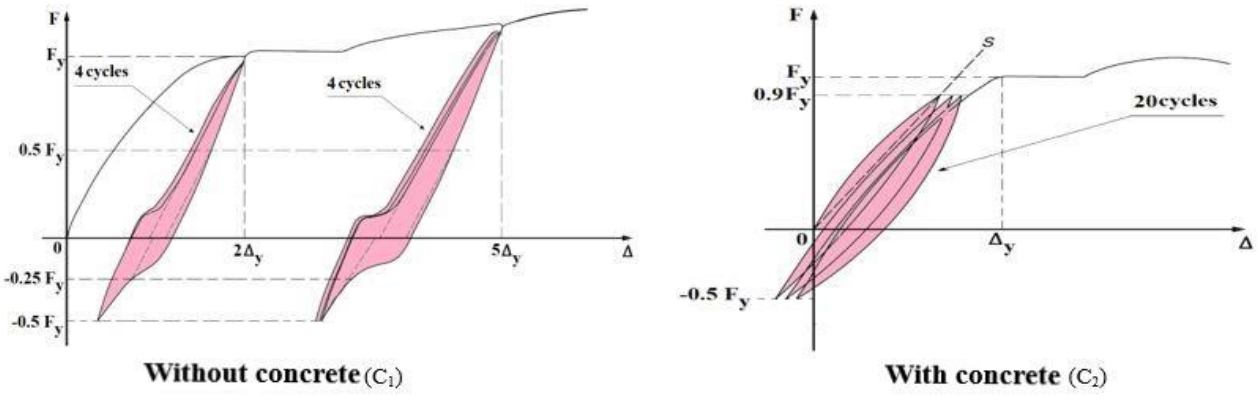
در روش جوشکاری اصطکاکی دورانی، میلگرد (قطر بزرگ‌تر) رزوه می‌شود و توسط جوشکاری اصطکاکی دورانی به میلگرد اصلی متصل می‌شود (شکل ۲ - ح). وصله‌ی رزوه‌ای یا در کارخانه یا در محل پروژه انجام می‌گیرد. حدود پرت میلگردها در ساختمان‌های متعارف بین ۵ تا ۱۰ درصد است، که بیشتر بخاطر محدودیت استفاده از وصله در ناحیه‌ی مفصل خمیری و یا یک درمیان اجراکردن وصله و میلگرد یکپارچه است. در روش اخیر، فقط یک دستگاه جوش اصطکاکی دورانی اضافه می‌شود، که ابعاد و اندازه‌ی آن، مشابه به دستگاه رزوه‌زنی است. هزینه‌ی انجام هر جوش تقریباً با هزینه‌ی رزوه برابری می‌کند. روش پیشنهادی در کارگاه انجام‌پذیر است. برای میلگرد قطر بزرگ‌تر می‌توان از میلگردهای پرت کارگاهی استفاده کرد. هزینه‌های یک سایز کوپلر بزرگ‌تر و ۲ عدد جوش اصطکاکی دورانی در این روش به پروژه تحمیل می‌شود. ولی در مقابل، میلگردهای پرت کارگاهی به میزان کمینه می‌رسند و همچنین افزایش کمینه‌ی ۲۰ درصدی سرعت اجرا و از همه مهم‌تر افزایش عملکرد سازه در برابر زلزله و کاهش هزینه‌های جانبی از مزایای روش مذکور است.[۲۰]

۲.۳. دستورالعمل بارگذاری برای وصله‌ی میلگرد مکانیکی پیشنهادی

دستگاه استفاده‌شده در نوشتار حاضر ساخت کارخانه‌ی Roell Amsler از کشور آلمان بوده است و برای اعمال نیروهای کششی و فشاری به نمونه‌های گرد و تخت چه به‌صورت استاتیکی و چه به‌صورت دینامیکی به‌کار می‌رود. در حالت استاتیکی، بیشینه‌ی ۶۰۰ کیلونیوتن و در حالت دینامیکی، بیشینه‌ی ۵۰۰ کیلونیوتن نیرو اعمال می‌شود. دستگاه شامل دو فک است: فک بالایی نقش تکیه‌گاه را دارد و فک پایینی به‌عنوان محرک عمل می‌کند. با بالا و پایین بردن فک بالایی می‌توان فاصله‌ی بین دو فک را تغییر داد. علاوه‌بر این، فک پایین را می‌توان تا بیشینه‌ی ۳۰ سانتی‌متر جابجا کرد. کنترل‌کننده‌ی دیجیتالی ۹۶۰۰، واسطه‌ی میان دستگاه و کامپیوتر است؛ که علاوه‌بر کنترل دقیق عملکرد فک پایین، به دو صورت کنترل جابجایی و کنترل نیرو قادر است دو سیگنال جابجایی (Stroke) و نیرو (Load) را از خروجی مبدل‌های نصب‌شده بر Actuator نمونه‌برداری کند و به کامپیوتر انتقال دهد.[۳۸] وصله‌ی 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 وصله‌ی میلگرد مکانیکی‌شده طبق استاندارد ASTM ۸ E،[۳۹] با کشیدن نمونه به سمت شکست با سرعت کرنش ثابت ۰/۰۱۹ (in./in./min)، که در محدوده‌ی ASTM۰/۰۰۶±۰/۰۱۵ اینچ بوده است، انجام شده است. استاندارد ASTM به دو سرعت قبل و بعد از تسلیم میلگرد اجازه می‌دهد تا سرعت آزمایش را افزایش دهند؛ بدین ترتیب که فقط سرعت کرنش قبل از تسلیم در مطالعه‌ی حاضر برای همه‌ی نمونه‌ها در طول کل آزمایش استفاده شده است، تا خطاهای ایجادشده در نتیجه‌ی آزمایش به میزان کمینه برسد. از آنجایی که طول و عملکرد مهاری یک وصله‌ی آزمایشی (شامل یک وصله‌ی مکانیکی و دو میلگرد متصل)، ممکن است کرنش تسلیم وصله را تغییر دهد، کرنش هدف برای تغییر سرعت را نمی‌توان قبل از آزمایش دقیقاً تعیین کرد و همچنین ممکن است برای انواع مختلف وصله‌های مکانیکی یکسان نباشد. درک رفتار چرخه‌ای وصله‌ی مکانیکی تحت بارگذاری زلزله برای اظهارنظر در مورد اینکه آیا یک کوپلر برای استفاده در نواحی مفصل خمیری اعضاء انعطاف‌پذیر مناسب است، ضروری است. برای بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌های درون غلاف بتنی و خارج غلاف بتنی از پروتکل بارگذاری پیشنهادی در دستورالعمل ISO/DIS ۱۵۸۳۵ استفاده شده است (شکل ۳).[۴۰]

۴. مشاهده‌ها، و تجزیه‌وتحلیل نتایج آزمایش‌ها

در بخش حاضر، پس از ساخت ۹۶ نمونه با غلاف و بدون غلاف بتنی و فراهم‌ساختن شرایط و مدت‌زمان لازم جهت عمل‌آوری آن‌ها، نمونه‌ها آزمایش و نتایج توسط دستگاه ثبت اطلاعات ثبت شده‌اند. بعد از به‌دست‌آوردن اطلاعات آزمایش، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها آغاز شد. بخش حاضر از مهم‌ترین مراحل کسب



شکل ۳. تاریخچه‌ی بارگذاری چرخه‌ای.[۴۰]

جدول ۳. نتایج آزمایش نمونه بدون غلاف بتنی*.

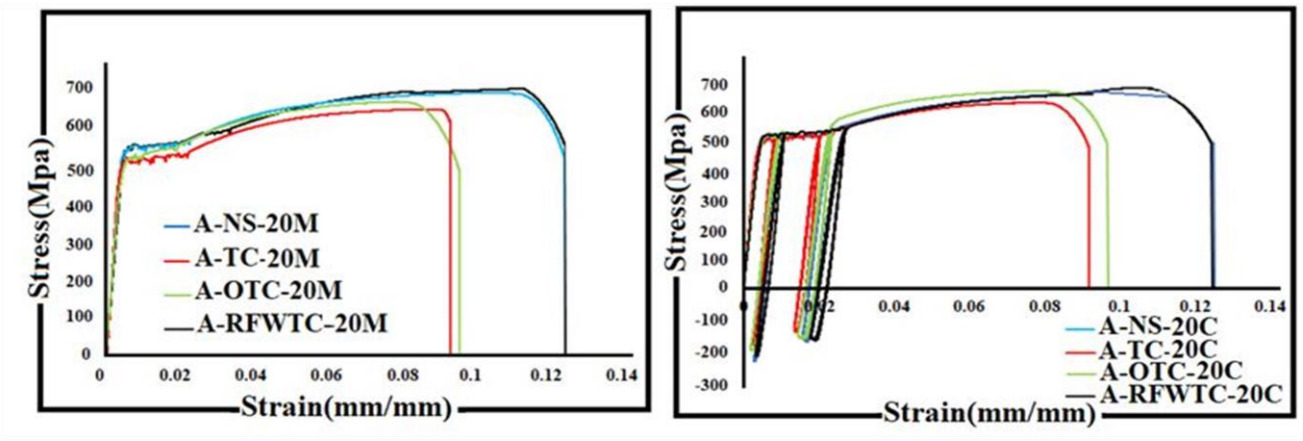
Specimen Average	F_y (kN)	F_u (kN)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_y (mm/mm)	ε_u (mm/mm)	μ_ε ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)	μ ($\varepsilon_u/\varepsilon_y$)	R_u (%)	Ry (%)
A-NS-16M	104±1.7^{ab}	126±2.1^{a}	520± 8.5^{a}	636± 9.9^{a}	0.0040± 0.00017^{a}	0.122± 0.004^{a}	1	30.40	-	-
A-TC-16M	103±2.5^{a}	122±4.9^{a}	530± 4.1^{a}	622± 25^{a}	0.0040± 0.00017^{a}	0.098± 0.003^{a}	0.80	24.50	119.60	101.53
A-OTC-16M	107±1.7^{ab}	127±1.2^{a}	519± 8.6^{a}	644± 6.6^{a}	0.0039± 0.00017^{a}	0.111± 0.003^{a}	0.91	28.46	125.57	99.81
A-RFWTC-16M	110±3.3^{b}	128±3.68^{a}	523± 10^{a}	653± 18^{a}	0.0044± 0.00018^{a}	0.124± 0.005^{a}	1.01	28.20	125.57	100.58
A-NS-16C$_1$	104±0.5^{df}	123±0.5^{de}	524± 8.5^{d}	628± 1.3^{de}	0.0044± 0.00005^{de}	0.132± 0.002^{de}	1	30.00	-	-
A-TC-16C$_1$	102±3.1^{d}	121±0.80^{e}	516± 6.4^{d}	618± 3.8^{e}	0.0038± 0.00020^{e}	0.090± 0.003^{e}	0.68	23.68	117.94	98.47
A-OTC-16C$_1$	109±2.5^{fg}	129±3.6^{d}	511± 6.7^{d}	658± 18.3^{d}	0.0039± 0.0001^{d}	0.097± 0.004^{d}	0.74	25.00	123.45	97.52
A-RFWTC-16C$_1$	112±3.7^{g}	129±3.6^{d}	524± 11^{d}	656± 17.8^{d}	0.0044± 0.00018^{d}	0.130± 0.006^{d}	0.99	29.60	125.20	100.00
A-NS-20M	162±4.5^{h}	195±2.1^{hi}	533± 16^{h}	691± 1.2^{h}	0.0044± 0.00045^{h}	0.124± 0.002^{h}	1	28.20	-	-
A-TC-20M	163±2.1^{h}	189±2.4^{h}	522± 4.5^{h}	660± 8.3^{i}	0.0040± 0.00005^{hi}	0.091± 0.002^{i}	0.73	22.70	123.80	97.94
A-OTC-20M	166±2.9^{h}	195±3.1^{hi}	530± 9.3^{h}	683± 11^{h}	0.0038± 0.00008^{i}	0.097± 0.002^{i}	1.01	25.52	128.14	99.50
A-RFWTC-20M	169±2.1^{h}	199±2.9^{i}	534± 12^{h}	697± 4.4^{h}	0.0044± 0.00008^{h}	0.124± 0.005^{h}	1	28.20	130.76	100.20
A-NS-20C$_1$	161±1.2^{j}	196±0.8^{j}	514± 5.4^{j}	686± 2.9^{jl}	0.0046± 0.00016^{j}	0.128± 0.003^{j}	1	27.80	-	-
A-TC-20C$_1$	160±2.1^{j}	187±2.1^{k}	510± 7.1^{j}	641± 3.6^{k}	0.0040± 0.0002^{k}	0.090± 0.003^{k}	0.70	22.5	124.50	99.22
A-OTC-20C$_1$	169±2.5^{k}	196±1.3^{j}	534± 7.2^{k}	686± 4.5^{j}	0.0039± 0.0001^{k}	0.097± 0.004^{k}	1.00	25.01	133.46	103.90
A-RFWTC-20C1	168±2.6^{k}	198±1.7^{j}	540± 7.0^{k}	693± 6.0^{l}	0.0045± 0.00026^{jk}	0.126± 0.002^{j}	0.99	28.00	134.82	105.05

*حروف مختلف در یک ستون، نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار است ($p<۰/۰۵$)

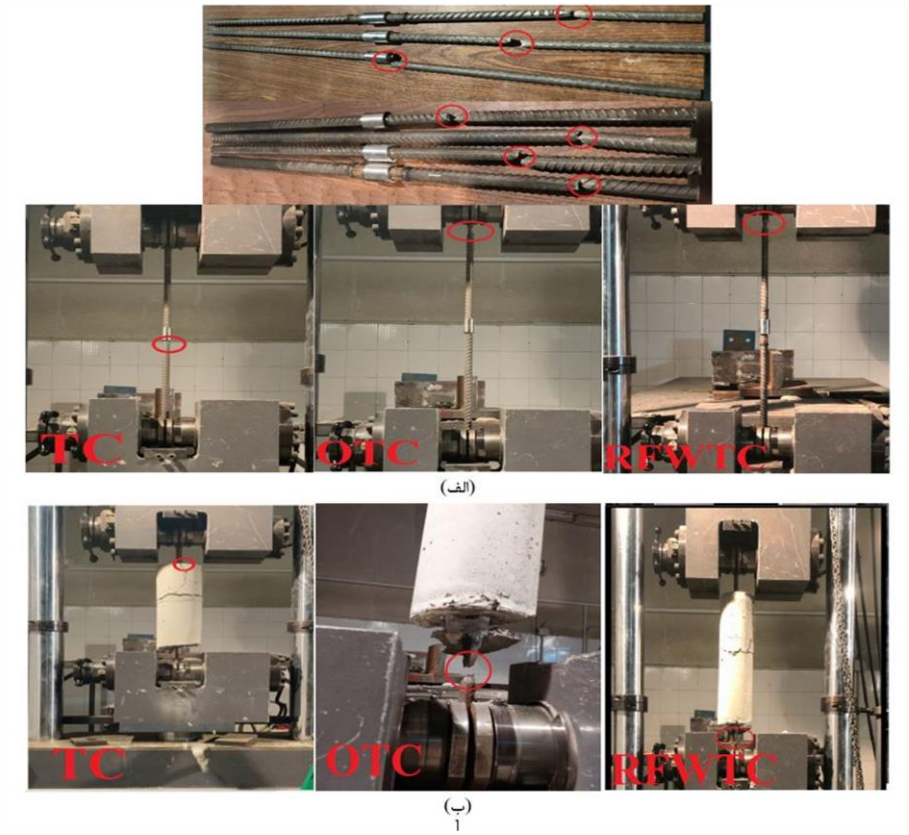
اطلاعات آزمایش است؛ که در آن، ابتدا اطلاعات مربوط به هر نمونه ارائه و سپس با نتایج نمونه‌ی مرجع مقایسه شده است.

۱.۴. نمونه‌ی بدون غلاف بتنی

در بخش حاضر از بارگذاری یکنواخت و بارگذاری چرخه‌ای C_1 برای ارزیابی ۳۶ وصله‌ی مکانیکی میلگرد و ۱۲ میلگرد یکپارچه با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. اندازه‌ی میلگردهای اخیر به‌طورخاص انتخاب شده‌اند، زیرا در بازارها موجود هستند. سه نوع مختلف کوپلر (TC، OTC، و RFWTC) به همراه نمونه‌ی مرجع (NS) متشکل از ۴ گروه مختلف (با اندازه و نوع بارگذاری‌های مختلف)، در برنامه‌ی آزمایشی حاضر گنجانده شده‌اند. کمینه‌ی 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 بوده است؛ در حالی که استحکام کششی (f_u) آن‌ها به ترتیب ۶۱۸ مگاپاسکال و ۶۵۴ مگاپاسکال بوده است. هر دو f_y و f_u با تقسیم نیروی متناظر بر مساحت میلگرد اسمی محاسبه شده‌اند (جدول ۳). کمینه‌ی میانگین نهایی کرنش (ε_u) که با تقسیم جابجایی اندازه‌گیری‌شده بر طول نمونه محاسبه می‌شود، برای میلگردهای ۱۶ میلی‌متری ε_u = ۰/۰۹۰ و برای میلگردهای ۲۰ میلی‌متر، ε_u = ۰/۰۹۰ بوده است. در جدول ۳، نتایج آزمایش‌ها بر حسب نیروی تسلیم T_y و استحکام تسلیم f_y، نیروی نهایی T_u، و استحکام نهایی f_u، کرنش میانگین متناظر با استحکام تسلیم ε_y و کرنش‌های میانگین متناظر با استحکام نهایی ε_u، و ضریب شکل‌پذیری محاسبه‌شده به‌عنوان نسبت کرنش‌های نهایی به میانگین تسلیم ($\varepsilon_u/\varepsilon_y$) ارائه شده است. نمودارهای تنش-کرنش آزمایش‌ها تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای بر روی میلگردهای یکپارچه و دارای وصله‌ی مکانیکی در شکل ۴ مشاهده می‌شوند. تقریباً برای هر سه تکرار آزمایش (۱۶ و ۲۰ میلی‌متر)، همه‌ی پاسخ‌ها، در محدوده‌های ۰/۰۹ و ۰/۱۳۰ برای ε_y و ε_u بوده‌اند. اختلافات جزئی در پایان ممکن است مربوط به نوسان‌های منظم مواد باشد، که ذاتی هستند. این تذکر لازم است که سیستم وصله‌های مکانیکی OTC و RFWTC تحت بارگذاری یکنواخت و



شکل ۴. نمودار σ-ε نمونه‌های بدون غلاف بتنی



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

چرخه‌ای، عملکردی مشابه به نمونه‌ی یکپارچه داشته است. شایان ذکر است که بین پیکربندی‌های بررسی‌شده، ε_u به‌طورمداوم کاهش یافته است، همان‌طور که توسط آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای (C_1) در شکل ۴ مشاهده می‌شود. بالاترین مقادیر ε_u در NS و RFWTC در محدوده‌ی ۰/۱۳ مشاهده شده است. TC با ۰/۰۹ بیشترین کاهش ε_u را داشته است. روش تولید OTC و RFWTC باعث افزایش سطح مقطع میلگرد در رزوه‌ها شده است، که با کمترین تنش در ناحیه‌ی کوپلر در توزیع کرنش در طول اتصال اثر مثبت داشته است. تمرکز تنش در رزوه‌ها به‌علت کم‌شدن سطح مقطع رزوه، باعث ایجاد شکست در منطقه‌ی وصله‌ی مکانیکی برای نمونه‌ی TC شده است. کاهش ε_u نشان داده‌شده در نمونه‌ی TC در سطح اتصال رخ می‌دهد و ممکن است پاسخ وصله‌ی مکانیکی را مشخص نکند. از آنجایی که کوپلر سطح مقطع بزرگ‌تری نسبت به میلگرد دارد، قطعه‌ی ضعیف‌تر به خارج از کوپلر منتقل می‌شود. در نتیجه، افزایش کرنش در میلگرد ایجاد می‌شود، به‌ویژه هنگام استفاده از وصله‌ی مکانیکی TC، که منجر به شکست زودرس در نزدیکی اتصال‌دهنده به میلگرد می‌شود (شکل ۵). کاهش ε_u بین اتصال‌ها ممکن است به نسبت با افزایش طول کل نمونه، اهمیت کمتری پیدا کند. همچنین باید برای اعضاء خمشی با وصله‌های مکانیکی به‌دقت بررسی شود، زیرا گرادیان لنگر (تغییرات فیزیکی یک متغیر در فضای چندبُعدی) و تمرکز احتمالی حالت خمیری به کاهش شکل‌پذیری کمک می‌کند. مناطق یا نقاط خاص در یک سازه یا عضو سازه وجود دارد، که در آن‌ها تمرکز بیشتری از تغییرشکل خمیری 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

جدول ۴. نتایج آزمایش نمونه با غلاف میلگرد*.

Specimen Average	F_y (kN)	F_u (kN)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_y (mm/mm)	ε_u (mm/mm)	μ_ε ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)	μ ($\varepsilon_u/\varepsilon_y$)	R_u (%)	Ry (%)
C-NS-16M	104±1.7^{ab}	125±2.1^{a}	520±8.8^{a}	637±10^{a}	0.0040±0.00017^{a}	0.110±0.003^{ad}	1	27.50	-	-
C-TC-16M	103±2.5^{b}	122±3.3^{a}	520±4.1^{a}	619±25^{a}	0.0041±0.00012^{a}	0.083±0.003^{b}	0.75	2025	119.03	100.00
C-OTC-16M	106±0.8^{a}	124±1.6^{a}	518±1.3^{a}	645±1.3^{a}	0.0044±0.00001^{b}	0.097±0.004^{c}	0.88	22.00	124.03	100
C-RFWTC-16M	107±0.8^{a}	126±1.0^{a}	523±4.6^{a}	650±1.3^{a}	0.0045±0.00012^{b}	0.112±0.002^{d}	1.02	24.90	125.00	100.58
C-NS-16C$_2$	105±0.5^{e}	125±0.8^{e}	538±3.3^{e}	630±4.1^{e}	0.0045±0.00008^{e}	0.098±0.002^{e}	1	21.80	-	-
C-TC-16C2	104±1.4^{e}	120±0.8^{f}	517±6.4^{f}	619±0.5^{e}	0.0039±0.00021^{f}	0.091±0.003^{f}	0.92	23.30	115.06	96.09
C-OTC-16C$_2$	108±0.5^{f}	129±2.1^{g}	514±6.7^{f}	659±17.0^{f}	0.0040±0.00005^{f}	0.090±0.002^{f}	0.92	22.50	122.50	95.54
C-RFWTC-16C$_2$	112±0.5^{g}	129±1.4^{g}	522±1.4^{f}	673±1.0^{f}	0.0042±0.00012^{f}	0.102±0.002^{e}	1.04	24.30	125.09	97.02
C-NS-20M	162±4.5^{h}	198±0.8^{h}	539±17^{h}	693±3.7^{h}	0.0043±0.00029^{h}	0.109±0.004^{h}	1	25.35	-	-
C-TC-20M	163±2.1^{h}	187±2.1^{i}	523±5.0^{h}	662±7.8^{i}	0.0044±0.00012^{h}	0.083±0.003^{i}	0.76	18.90	122.82	97.03
C-OTC-20M	165±1.2^{hi}	195±1.4^{h}	528±2.9^{h}	693±2.9^{h}	0.0040±0.00024^{h}	0.086±0.004^{i}	1.01	21.50	128.57	98.00
C-RFWTC-20M	169±0.8^{i}	199±2.6^{h}	539±8.2^{h}	693±3.7^{h}	0.0044±0.00021^{h}	0.111±0.003^{h}	1.02	25.80	128.60	100
C-NS-20C$_2$	164±1.4^{ik}	198±0.8^{j}	521±3.3^{j}	688±1.9^{jl}	0.0048±0.00013^{jk}	0.110±0.002^{j}	1	2.300	-	-
C-TC-20C$_2$	161±1.9^{j}	184±1.4^{k}	516±0.9^{j}	649±1.0^{k}	0.0039±0.00013^{l}	0.081±0.002^{k}	0.73	20.75	124.00	99.04
C-OTC-20C$_2$	168±0.5^{kl}	197±0.5^{j}	530±0.5^{k}	685±1.6^{j}	0.0039±0.00033^{l}	0.088±0.002^{l}	1.00	22.60	131.48	101.73
A-RFWTC-20C1	168±2.7^{l}	199±1.7^{j}	539±6.9^{l}	693±6.1^{l}	0.0044±0.00027^{jl}	0.111±0.001^{m}	1.01	25.20	133.01	103.46

*حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری است ($P < 0/05$)

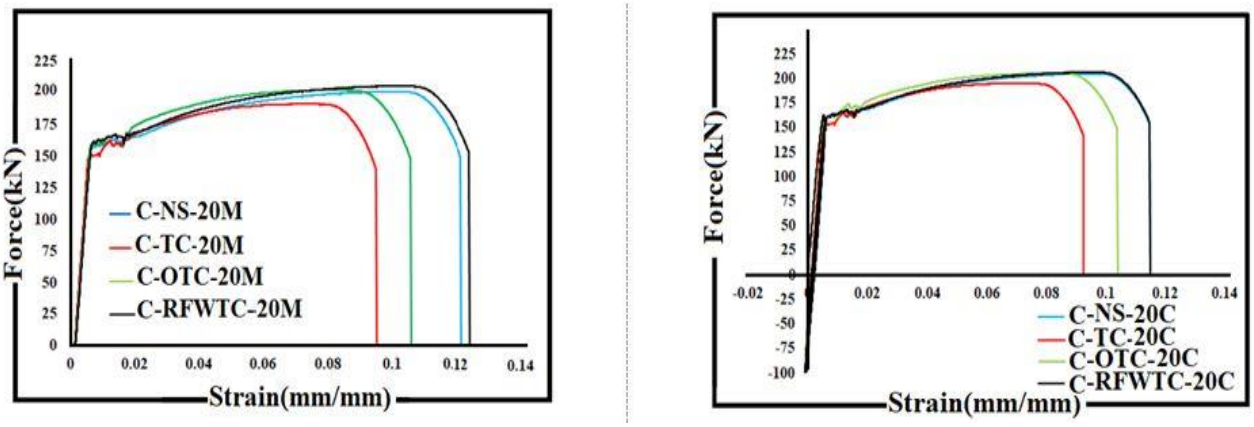
منجر شوند. این تمرکز شکل‌پذیری معمولاً در نقاطی با تنش‌ها و شرایط بارگذاری خاص ظاهر می‌شود و می‌تواند در تحلیل و طراحی سازه‌ها بررسی شود تا بهبود دوام و عملکرد سازه ارائه شود.[۱، ۲، و ۲۳]

۲.۴. نمونه با غلاف بتنی

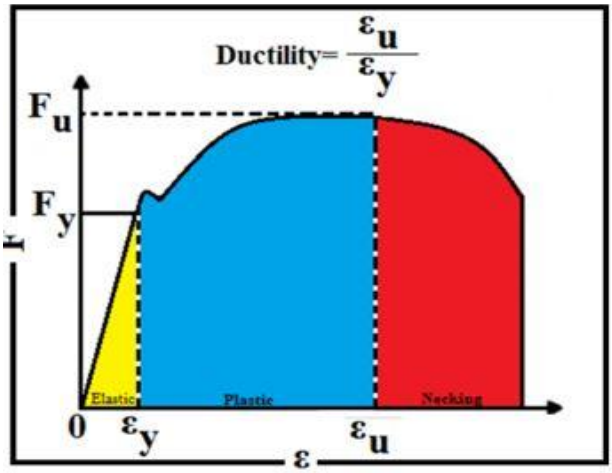
در بخش حاضر، از ۳۶ وصله‌ی مکانیکی میلگرد و ۱۲ میلگرد یکپارچه با سه نوع مختلف کوپلر (TC، OTC، و RFWTC) به همراه نمونه‌ی مرجع (NS) استفاده شده است. نمونه‌های مذکور در ۴ گروه مختلف تحت بارگذاری یکنواخت و بارگذاری چرخه‌ای C_2 (شکل ۶) با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر درون غلاف بتنی ارزیابی شده‌اند. در جدول ۴، یافته‌های کلیدی از آزمایش یکنواخت و چرخه‌ای روی وصله‌ی مکانیکی تعبیه‌شده از نظر نیروی تسلیم T_y و نیروی نهایی Tu ارائه شده است. همچنین، در جدول ۴، تطبیق کلی کرنش متناظر با استحکام تسلیم ε_y و کرنش‌های متناظر با نیروی نهایی ε_u ارائه شده است، که برای مقایسه‌های کیفی با تقسیم جابجایی ثبت‌شده بر طول عضو، که شامل منطقه‌ی بتن و سطح میلگرد آزاد است، محاسبه می‌شوند. نسبت شکل‌پذیری μ نیز ارائه شده است، که از نسبت $\varepsilon_u/\varepsilon_y$ محاسبه می‌شود. در نمونه با غلاف بتنی با قطر میلگردهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متری با وصله‌ی مکانیکی و بدون وصله‌ی مکانیکی، کاهش ε_u با نوع وصله و نوع بارگذاری وجود دارد. همچنین شایان ذکر است که آزمایش‌های تک‌محوری ε_u کمتری را برای اعضاء با غلاف بتنی نسبت به نمونه‌های بدون غلاف بتنی نشان داده‌اند، به این معنی که پاسخ بتن ممکن است یک حد پایین محافظتی برای عملکرد وصله‌ی مکانیکی در نظر گرفته شود.[۲۴] عبارت "حد پایین محافظتی" به معنای استفاده از یک مقدار یا شرایط کمترینی است که به‌طوراحتیاطی برای محافظت از یک سیستم یا عنصر موردنظر در نظر گرفته می‌شود. در مورد وصله‌ها، حد پایین محافظتی به مقداری اشاره دارد که در صورت رعایت آن، وصله به‌طورقطعی عملکرد خواسته‌شده را ارائه می‌دهد و از شکست و خرابی جلوگیری می‌کند. به‌عبارت دیگر، استفاده از یک حد پایین محافظتی به معنای انتخاب مقادیر کمترینی است که تضمین‌کننده‌ی عملکرد ایمن و قابل اعتماد وصله است. در برخی مطالعات پیشین،[۲۴] عملکرد وصله در حالت بدون غلاف بتنی به‌عنوان یک حد پایین محافظتی محسوب شده است، اما نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که عملکرد اتصال‌ها در غلاف بتنی کمتر از حالت بدون غلاف بتنی بوده است، بدین معنا که با استفاده از حد پایین محافظتی مبتنی بر عملکرد در حالت بدون غلاف بتنی، ممکن است وصله در حالت با غلاف بتنی به‌درستی عمل نکنند و خطر شکست و خرابی وجود داشته باشد.

۳.۴. شکل‌پذیری نمونه‌های با و بدون غلاف بتنی

$\mu\varepsilon$ و μ هر نمونه در جدول‌های ۳ و ۴ با استفاده از شکل ۷ و معادله‌ی ۳ تعیین شده است. این تذکر لازم است که می‌توان از نسبت کرنش نهایی به کرنش



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



شکل ۷. تعریف کرنش تسلیم و کرنش نهایی.[۴۱ و ۴۵]

تسلیم برای محاسبه‌ی نسبت شکل‌پذیری استفاده کرد.[۲۴] همچنین، نسبت کرنش نهایی میلگرد وصله‌شده (ε_{usp}) به کرنش نهایی (ε_{ub}) میلگرد یکپارچه می‌تواند برای ارزیابی شکل‌پذیری استفاده شود. در پژوهش حاضر، ε_{usp} مخفف استحکام نهایی میلگرد وصله‌شده است.[۴۱]

$$\text{شکل پذیری } (\mu_\varepsilon) = \frac{\text{کرنش نهایی میلگرد وصله شده } (\varepsilon_{usp})}{\text{کرنش نهایی میلگرد یکپارچه } (\varepsilon_{ub})} \quad (۳)$$

نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)، که بیش از ۰/۶۵ است، می‌تواند الزام‌های آیین‌نامه‌های EC۲،[۴۲] و EC۸،[۴۳] را برآورده سازد. هنگامی که از کلاس میلگرد C استفاده می‌شود،[۴۰] نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$)، که بالای ۰/۶۵ است، می‌تواند الزام‌ها را براساس آیین‌نامه‌های اخیر برای شکل‌پذیری متوسط برآورده سازد. با این حال، میلگرد وصله‌شده، که نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$) کمتر از ۰/۶۵ دارد، برای اعضایی که در معرض تغییرشکل‌های غیرکشسان قابل‌توجهی هستند، نامطلوب به‌نظر می‌رسد.[۴۱] برای بررسی حاضر، ضروری است که شرایط ذکرشده، برای میلگردهای وصله‌شده با نسبت شکل‌پذیری زیاد تأیید شوند. همچنین شکل‌پذیری میلگرد وصله‌شده (μ_{sp}) نیز باید دست‌کم به اندازه‌ی میلگرد یکپارچه (μ_b) باشد. برای استفاده از میلگردهای اتصال در اجزاء سازه‌ای که می‌توانند تنش‌های لرزه‌ای قابل‌توجهی را تحمل کنند، نسبت (μ_{sp}/μ_b) باید بزرگ‌تر یا مساوی ۱/۰ باشد. شکل‌پذیری نمونه‌ها نیز با استفاده از نسبت شکل‌پذیری ($\varepsilon_{usp}/\varepsilon_{ub}$) پیشنهادشده در نوشتار تازارو[1] و همکاران (۲۰۲۱)،[۴۴] ارزیابی شده است. جدول‌های ۳ و ۴ با توجه به معادله‌ی ۳، مقادیر متوسط شکل‌پذیری همه‌ی نمونه‌ها را با هم نشان می‌دهند. توصیه می‌شود که نمونه‌های RFWTC و OTC برای استفاده در اعضاء سازه‌ای با تغییرشکل غیرکشسان (اجزاء با تنش‌های غیرکشسان به اجزایی اشاره دارند که در مواجهه با شرایط غیرکشسان، توانایی تغییرشکل دائمی (شکل‌دهی غیرکشسان) را از خود نشان می‌دهند) مناسب هستند؛ زیرا مقدار شکل‌پذیری آن‌ها تقریباً برابر با میلگردهای یکپارچه است. همچنین به آن‌ها اجازه می‌دهد تا در اعضاء بتنی در مناطق بحرانی لرزه‌ای استفاده شوند. برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای کم تا متوسط، می‌توان از وصله‌ی میلگرد TC در اعضاء سازه‌ای استفاده کرد.

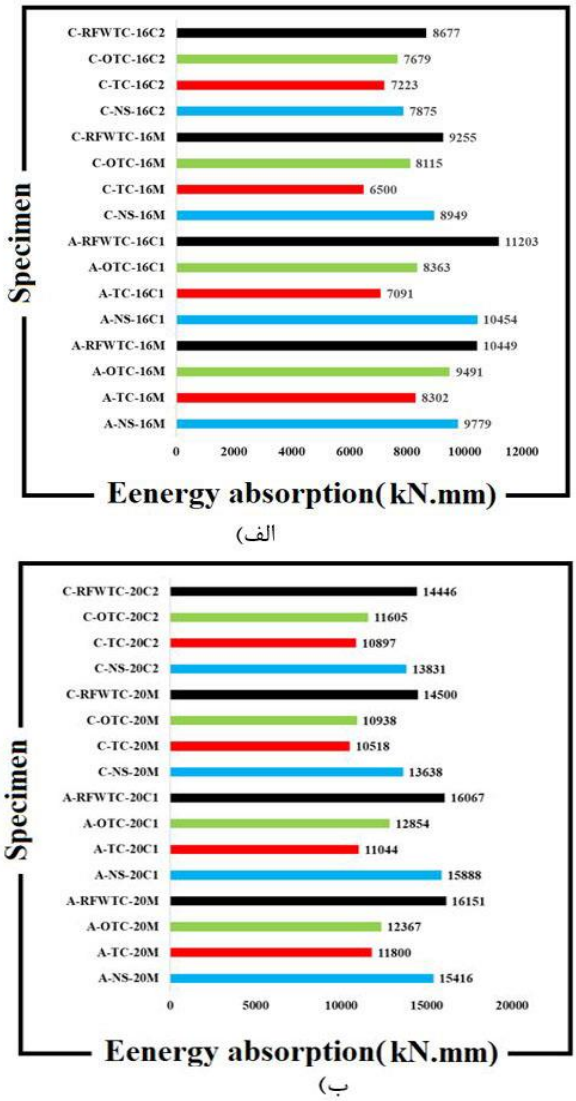
۴.۴. جذب انرژی نمونه‌های با و بدون غلاف بتنی

سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی به‌عنوان منطقه‌ی جذب انرژی شناخته می‌شود و می‌توان آن را به‌عنوان یک جزء مهم برای ارزیابی نحوه‌ی رفتار وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای، به‌ویژه در مناطق لرزه‌ای در نظر گرفت. جذب انرژی هر نمونه در شکل ۸ مشاهده می‌شود. جذب انرژی به‌عنوان نتیجه‌ی میانگین سه نمونه برای هر نمونه محاسبه شده است. عملکرد نمونه‌ی RFWTC از نظر جذب انرژی بالاتر از نمونه‌ی NS بوده است؛ لذا، دست‌یابی به تداوم میلگرد فولادی کافی است. علاوه‌بر این، نمونه‌ی OTC جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌ی TC دارد.

۵.۴. ارزیابی رفتار مکانیکی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای

در وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای مشخص شده است که مکانیسم میلگرد رزوه‌شده و کوپلر روی میلگرد، استحکام قفل‌شوندگی کافی برای جلوگیری از جابجایی لغزش دارد. از سوی دیگر، قطر رزوه‌ی تعبیه‌شده برای اطمینان از عملکرد بالای وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای حیاتی است. با توجه به استحکام درگیری بالا و اتصال قوی در قسمت رزوه‌ای، هیچ جابجایی لغزشی در کناره‌ی میلگرد رزوه‌ای تشخیص داده نشده است. برای مشاهده‌ی اتصال قوی‌تر بین رزوه و کوپلر، سطح مقطع موقعیت رزوه باید بزرگ‌تر باشد. در صورت وجود سطح مقطع بزرگ‌تر از میلگرد، تنش‌های اتصال در سطح میلگرد یکنواخت خواهد بود. استانداردهای ACI۳۱۸-۱۹،[۴] ACI۴۳۹،[۴۶] و ACI۱۳۳،[۴۷] -ACI 318 و همچنین استانداردهای ISO۱۵۸۳۵-Part۱: ۲۰۱۸ و ISO۱۵۸۳۵-Part۲: ۲۰۱۸،[۴۰] همگی نشان‌دهنده‌ی موارد توصیه‌شده هستند.

[1] Tazarv



شکل ۸. میانگین جذب انرژی نمونه‌ها: (الف) میلگرد ۱۶ میلی‌متر، (ب) میلگرد ۲۰ میلی‌متر.

مطابق با مشخصات ارائه‌شده در BS-۸۱۱۰ و ACI۳۱۸-۱۹، مقاومت کششی نهایی اتصال مکانیکی باید بیشتر از ۱/۲۵ برابر استحکام تسلیم میلگرد باشد؛ بنابراین، ارزیابی نسبت مقاومت نهایی هر نمونه (R_u) بسیار مهم است. در مطالعه‌ی حاضر، R_u مخفف نسبت استحکام کششی نهایی نمونه‌ی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای به میانگین مقاومت کششی تسلیم نمونه‌ی میلگرد یکپارچه است. نسبت R_u در نمونه‌های RFWTC بالاتر از ۱۲۵٪ نسبت R_u هر نمونه است. در نتیجه، این گروه‌ها طبق کد ACI ۳۱۸-۱۹ به استحکام لازم دست یافته‌اند.[۴] در مورد نمونه‌های OTC، آن‌ها مشخصات ACI ۳۱۸ را برآورده می‌سازند (جدول‌های ۳ و ۴). شایان ذکر است که متأسفانه برخی از میلگردها پتانسیل بزرگ‌شدن بیش از حد را ندارند یا به‌عبارتی، بعد از بزرگ‌شدن میلگرد، سختی ناحیه‌ی رزوه که قرار است رزوه شود، به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و رزوه‌کاری را با مشکل مواجه می‌سازد. هیچ فرآیند شکل‌گیری وجود ندارد. که این به نوع تولید میلگرد می‌تواند مرتبط باشد. علاوه‌بر این، نسبت قدرت تسلیم (R_y) محاسبه شده است. R_y نشان‌دهنده‌ی نسبت استحکام کششی تسلیم نمونه‌ی وصله‌ی مکانیکی رزوه‌ای به استحکام کششی تسلیم میلگرد یکپارچه است (جدول‌های ۳ و ۴). در حالی که میانگین نسبت‌های R_y در OTC و TC کمتر از ۱ است، متوسط نسبت‌های R_y برای نمونه‌های RFWTC بیشتر از ۱ است. در مقایسه با سایر نمونه‌ها، نمونه‌های RFWTC و OTC از نظر استحکام (R_u و R_y)، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی، و حالت خرابی بهترین عملکرد را دارند. به‌دلیل عملکرد بهبودیافته، اتصال برابر نمونه‌های RFWTC و OTC برای استفاده در مناطق لرزه‌ای بالا ایده‌آل است. علاوه‌بر این، عملکرد TC از نظر استحکام، اتلاف انرژی و حالت خرابی استانداردها را برآورده کرده است، که بنابراین می‌تواند نیروهای زلزله‌ی کم تا متوسط را تحمل کند.

۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی نوشتار حاضر، اصلاح ناحیه‌ی شکست کوپلر با میله‌ی رزوه‌ای و استفاده از آن در نواحی مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد بوده است. وصله‌های مکانیکی مذکور با تغییر روش ساخت وصله‌ی رزوه‌ای و ترکیب آن با جوشکاری اصطکاکی دوار و نورد سرد ساخته شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که این دو نوع وصله‌ی مکانیکی را می‌توان در بخش‌های مفصل خمیری اعضاء شکل‌پذیر در مناطق لرزه‌ای استفاده کرد. برای ارزیابی دقیق رفتار وصله‌های مکانیکی مذکور پس از ساخت ۹۶ نمونه با غلاف و بدون غلاف بتنی به همراه ۳ نمونه‌ی ستون بتن مسلح نتایج حاصل از آزمایش‌ها، رفتار تک‌محوری یکنواخت و چرخه‌ای با غلاف بتنی و بدون غلاف بررسی شده است. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها ارائه شده‌اند:

۱-رزوه‌های بزرگ‌شده، پتانسیل بهبود عملکرد وصله‌ی مکانیکی در اعضاء بتنی را دارند. شکست شکل‌پذیر را می‌توان در نمونه‌های OTC و RFWTC مشاهده کرد.

۲- نمونه‌های OTC و RFWTC، الزام‌های عملکرد خوبی را برای عضو سازه‌ای که تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد، نشان می‌دهند. همچنین استانداردهای مربوط به نواحی لرزه‌ای را برآورده می‌سازند.

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

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

۵- می‌توان گفت که وصله‌های 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 وصله‌های مکانیکی RFWTC و OTC در پژوهش‌های عددی یا آزمایشگاهی عمیق‌تر بررسی شوند، تا توصیه‌ها و نگرانی‌های مربوط به روش ذکرشده‌ی وصله، دقیق‌تر ارائه شود. مطالعات آتی می‌توانند پیامدهای اعمال روش مذکور را برای اعضاء بتن مسلح از جمله: ستون‌ها، تیرها، دال‌ها، و اتصال‌های تیر- ستون مطالعه و بررسی کنند.

References- منابع

1. Abé, M. and Shimamura, M., 2014. Performance of railway bridges during the 2011 Tōhoku earthquake. *J. of Performance of Constructed Facilities*, *28*(1), pp.13–23. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000379.
2. ICC Evaluation Service, LLC (ICC-ES), (n.d.). AC133 - *Acceptance Criteria. Available at*: https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac133/ (Accessed: 13 December 2022).
3. ACI Committee 318, 2019. *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.* American Concrete Institute. DOI:10.14359/51716937.
4. ACI Committee 318, 2019. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19).* American Concrete Institute.
5. ACI Committee 439, 2007. *Types of Mechanical Splices for Reinforcing Bars.* American Concrete Institute.
6. Al-Jelawy, H. M., 2022. Experimental and numerical investigations on monotonic tensile behavior of grouted sleeve couplers with different splicing configurations. *Engineering Structures*, *265*, 114434. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2022.114434.
7. ASTM International, (n.d.). *ASTM E8 / E8M - 16ae1 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.* Available at: https://www.astm.org/Standards/E8 (Accessed: 19 October 2020).
8. Bai, A. S. H. and Ingham, J. M., 2009. Seismic performance of mechanically coupled reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research, 61*(7), pp.529–537. DOI:10.1680/macr.2008.00098.
9. Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y., 2017. Ductility considerations for mechanical reinforcement couplers. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2017.08.007.
10. Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y., 2018. Monotonic and cyclic performance of threaded reinforcement splices. *Structures, 16*, pp. 358–372. https://DOI:10.1016/j.istruc.2018.11.009.
11. Bompa, D. V. and Elghazouli, A. Y., 2019. Inelastic cyclic behaviour of RC members incorporating threaded reinforcement couplers. *Engineering Structures, 180*, pp. 468–483. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2018.11.053.
12. British Standards Institution, 2004. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. British Standards Institution.
13. 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.
14. 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*. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126835.
15. 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. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120308
16. Einea, A., Yehia, S. and Tadros, M. K., 1999. Lap splices in confined concrete. *ACI Structural Journal, 96*(6), pp. 947–955. DOI:10.14359/769.
17. 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.
18. 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.
19. Ghayeb, H. H., Abdul Razak, H., Ramli Sulong, N. H., Mo, K. H., Abutaha, F. and Gordan, M., 2021., 2021. Performance of mechanical steel bar splices using grouted couplers under uniaxial tension. *J. of Building Engineering*. https://DOI:10.1016/j.jobe.2020.101892.
20. 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:10.1007/978-981-15-8025-3_7.
21. 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*. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.013.
22. Henin, E. and Morcous, G., 2015. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction. *Engineering Structures*, *83*, pp. 154–162. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2014.10.045.
23. Hulshizer, A. J., Ucciferro, J. J. and Gray, G. E., 1994. Mechanical reinforcement couplings meet demands of strength and constructibility. *Concrete International, 16*(12), pp. 47–52.

24. ISO/DIS 15835, 2018. *Steel for the Reinforcement of Concrete - Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars (Parts 1 to 3).* International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

25. Kheyroddin, A. and Dabiri, H., 2020. Cyclic performance of RC beam-column joints with mechanical or forging (GPW) splices; an experimental study. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2020.10.071.

26. Kuscu, H., Becenen, I. and Sahin, M., 2008. Evaluation of temperature and properties at the interface of AISI 1040 steels joined by friction welding. *Assembly Automation*. DOI:10.1108/01445150810904468.

27. 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*. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2019.03.108.

28. Li, W. and Wang, F., 2011. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Materials Science and Engineering A*. https://DOI:10.1016/j.msea.2011.04.001.

29. Liu, C., Pan, L., Liu, H., Tong, H., Yang, Y. and Chen, W., 2020. Experimental and numerical investigation on mechanical properties of grouted-sleeve splices. *Construction and Building Materials*. https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120441.

30. Maalekian, M., 2007. Friction welding - Critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*. DOI:10.1179/174329307X249333.

31. Najafgholipour, M. A., Dehghan, S. M., Khani, M. and Heidari, A., 2018. The performance of lap splices in RC beams under inelastic reversed cyclic loading. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2018.07.011

32. 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. 30–41. Available at: https://isn.ac/XBHB-EZGFF.

33. Saito, T., Yabe, Y. and Fujimori, T., 1985. An ultrasonic testing method for gas pressure welded joints of reinforcing steel bars. *Ultrasonics. https://DOI:10.1016/0041-624X(85)90060-5.*

34. Seshu Kumar, A., Khadeer, S. A., Rajinikanth, V., Pahari, S. and Ravi Kumar, B., 2021. Evaluation of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints. *Materials Science and Engineering A*. https://DOI:10.1016/j.msea.2021.141844.

35. 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.

36. Shokrzadeh, M. R., Aziminejhad, A. and Sarvghadmoghaddam, A., 2016. Hysteretic behavior of concrete connections strengthened by X-shape FRP strips. *Analysis of Structure and Earthquake, 12*(4), pp. 29–40. Available at: https://civil-strj.maragheh.iau.ir/article_525485.html (Accessed: 8 November 2016). [In Persian].

37. Shokrzadeh, M. R., Nateghi-E, Mansoori, M. R. and Javadi, P., 2022. Failure area evaluation of the coupler with threaded bar: Experimental and numerical study. *Int. J. of Advanced Structural Engineering, 12*(1), pp. 531–543. DOI:10.1007/ijase.2022.692294.

38. Shokrzadeh, M. R., Nateghi-E, Mansoori, M. R. and Javadi, P., 2023. The improvement of the threaded-based mechanical splice by modifying the threaded system: Study of techniques cold rolling and rotating friction welding. *J. of Building Engineering, 80*, 107964. https://DOI:10.1016/j.jobe.2023.107964.

39. 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*, pp. 175–488. DOI:10.32432/brs-290180.

40. 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-290180.

41. Structural Engineering Lab - International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, (n.d.). Available at: http://www.iiees.ac.ir/en/structural-laboratory/ (Accessed: 28 November 2021).

42. Tazarv, M., LaVoy, M., Sjurseth, T., Greeneway, E. and Wehbe, N., 2023. Analysis and design of mechanically spliced precast bridge columns. *Engineering Structures, 280*, 115726. https://DOI:10.1016/j.engstruct.2023.115726.

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

44. 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. https://DOI:10.1016/j.istruc.2020.12.091.

45. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 2014. *In Control of Welding*

Distortion in Thin-Plate Fabrication. DOI:10.1016/b978-0-85709-047-8.50016-9.

46. Yamamoto, R. I., Fukada, Y., Tatsumi, M. and Ueyama, K., 2002. New quality inspection method for gas pressure welds. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)*. DOI:10.2219/rtriqr.43.7.

47. Yilmaz, M., Kaluc, E., Tülbentci, K. and Karagöz, S., 1996. Investigation into the weld zone of friction welded C45/HS6-5-2 dissimilar steel joints. *J. of Materials Science Letters*. DOI:10.1007/BF00591663.

48. Zhao, E., Song, C., Zhang, X., Zhou, Q. and Yan, K., 2022. Experimental study on monotonic, cyclic mechanics and fatigue performance of pressed cone sleeve splices. *Structures*. https://DOI:10.1016/j.istruc.2022.03.050.