

بررسی آزمایشگاهی وصله‌های مکانیکی میلگردهای کششی تیر بتن آرمه تحت خمش

علی خیرالدین* (استاد)

پیام طریقی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

قاسم پاچیده (پژوهشگر پسا دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

صادق هاشمی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۱۱۷-۱۰۷

به منظور بررسی عملکرد وصله‌های مکانیکی در پژوهش حاضر، ۶ نمونه تیر بتن آرمه با ابعاد و مصالح یکسان، که فقط در نوع وصله و محل آنها با یکدیگر تفاوت داشتند، ساخته شده است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر فاصله‌ی بین وصله‌ها با توجه به نوع آنها و همچنین مقایسه‌ی آن با تیر بدون وصله بوده است. همچنین بدین وسیله دید مناسبی از محل قرارگرفتن وصله‌ها و تأثیر آنها در عملکرد تیر بتن آرمه برای طراحان و مجریان سازه‌های بتن آرمه فراهم شده است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که با به کار بردن وصله‌ها، تغییر محسوسی در میزان باربری نمونه‌ها نسبت به حالت تیر مرجع مشاهده نشده است. همچنین پس از اعمال بارگذاری و شکستن نمونه‌ها، هیچ‌یک از میلگردهای با وصله‌ی مکانیکی در محل وصله گسیخته نشده و کوپرها سالم باقی مانده‌اند. تیر مرجع بیشترین و تیر وصله شده به روش کوپلر (آرماتور کششی میانی در مرکز تیر و ۲ آرماتور کششی دیگر به فاصله‌ی ۶ سانتی‌متر از مرکز تیر و به صورت متقارن وصله شده‌اند)، کمترین میزان ممان اینرسی مؤثر را داشته‌اند؛ بنابراین همین مقایسه در مورد پارامتر سختی خمشی هر یک از نمونه‌ها، که نسبت مستقیم با پارامتر ممان اینرسی مؤثر دارد، صادق بوده است. همچنین تیر مرجع، بیشترین و تیر 10° ، کمترین شکل‌پذیری جابه‌جایی را داشته است. نمونه‌ی $L33$ با ۶٪ افزایش و نمونه‌ی $6-33M$ با ۱٪ کاهش مقاومت نسبت به تیر مرجع، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان باربری را داشته‌اند.

واژگان کلیدی: وصله‌ی میلگرد، سازه‌های بتن آرمه، وصله‌ی مکانیکی، تیر بتن آرمه، کوپلر.

۱. مقدمه

آنهاسست، که بر روی رفتار اعضاء بتن آرمه تأثیر به سزایی خواهند داشت. طبق آیین‌نامه‌ی ACI 439R-3R، استفاده از وصله‌های پوششی در مناطق لرزه‌خیز به دلیل عملکرد ضعیف آنها در برابر بارهای چرخه‌بی پیشنهاد نشده است.^[۱] علاوه بر آن، درصد قابل توجهی از میزان میلگردهای مصرفی در هر پروژه بابت طول پوششی استفاده می‌شود، که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. همچنین بر طبق آیین‌نامه‌ی ACI 318-14، استفاده از وصله‌های پوششی برای میلگردهای با قطر بیشتر از ۳۶ میلی‌متر مجاز نیست.^[۱] از این رو در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های جایگزین به منظور وصله کردن میلگردها پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های مذکور، که امروزه مورد توجه بسیاری از مهندسان و سازندگان سازه‌های بتن آرمه قرار گرفته است، استفاده از وصله‌های مکانیکی است. با استفاده از وصله‌های مکانیکی به دلیل

استفاده از تکنولوژی‌های جدید برای ارتقاء کیفیت سازه و کاهش هزینه‌های تولید در صنعت ساختمان علاوه بر یک نیاز، یک ضرورت انکارناپذیر به شمار می‌آید. با توجه به طول محدود میلگردهای موجود در بازار، اغلب در هنگام اجرای سازه‌های بتن آرمه، باید با کنار هم قرار دادن میلگردها تحت ضوابط خاصی و با روش‌های مختلف، از قبیل وصله‌ی پوششی، میلگرد با طول مورد نیاز حاصل شود. بنابراین وصله‌ی میلگردها در سازه‌های بتن آرمه امری اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی، یکی از مهم‌ترین مسائلی که در اجرای سازه‌های بتن آرمه وجود دارد، نوع وصله‌ی میلگردها و محل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۶/۶/۱۳۹۸، اصلاحیه ۲۳/۸/۱۳۹۸، پذیرش ۲۱/۱۱/۱۳۹۸

DOI:10.24200/J30.2020.54320.2630

kheyroddin@semnan.ac.ir
Payam.tarighi@yahoo.com
pachideh@sharif.edu
sadegh.hashemi@gmail.com

حذف طول هم‌پوشانی، مصرف میلگرد کاهش می‌یابد. همچنین در سازه‌هایی که تراکم میلگرد در آنها بالاست، استفاده از وصله‌های مکانیکی بسیار اثربخش خواهد بود. محمدزاده و همکاران (۲۰۱۰)^[۲۱] بر روی تیرهای بتن‌آرمه همراه با وصله‌ی پوششی مطالعه‌ی انجام داده و دریافته‌اند که مقاومت فشاری بتن و مقدار و قطر خاموت، اثر قابل توجهی در شکل‌پذیری تیرهای وصله‌دار دارد. در سال‌های اخیر، پیشنهادهایی به منظور بهبود عملکرد وصله‌های مکانیکی و کاهش هزینه‌های آن مانند: استفاده از غلاف فولادی به جای غلاف چدنی^[۲۲]، استفاده از چسب اپوکسی به جای گروت داخل غلاف^[۲۳]، استفاده از غلاف و میخ گوه‌ی^[۲۴] استفاده از روش غلاف و گوه^[۲۵]، استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار در ساخت وصله‌های مکانیکی^[۲۶]، استفاده از غلاف‌های مخروطی پُر شده با گروت^[۲۷-۲۸] پیشنهاد استفاده از غلاف دور پیچ پُر شده از گروت^[۲۹] تاکنون ارائه شده است. لازم به ذکر است که ملات استفاده شده در وصله‌ی مکانیکی، طرح اختلاط ویژه داشته است؛ که تولیدکننده‌ی وصله‌های مکانیکی در هنگام فروش آن را در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهد. مطالعات فراوانی در مورد ارزیابی عملکرد وصله‌های مکانیکی در کشورهای مختلف انجام شده است.^[۳۰-۳۱] لی و همکاران (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ی آزمایشگاهی نشان دادند که محل استفاده از وصله‌های مکانیکی در اتصال ستون به فونداسیون در قاب‌های خمشی متوسط تأثیر ناچیزی در عملکرد لرزه‌ی آنها داشته است.^[۳۲] پژوهش بومیا و القازولی^۱ (۲۰۱۸)، کاهش ۱۳/۵ درصدی در کرنش نهایی وصله‌های مکانیکی در عضو بتن‌آرمه تحت بارگذاری چرخه‌ی نسبت به بارگذاری یکنواخت را نشان داده است.^[۳۳] همچنین نتایج مطالعات، نشان‌دهنده‌ی عملکرد خوب استفاده از وصله‌های مکانیکی در فراهم آوردن شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بوده است، هر چند که عملکرد آنها کاملاً به شکل و موقعیت وصله‌ی مکانیکی وابسته است.^[۳۴] لو^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، به معرفی دو نوع وصله‌ی مکانیکی همراه با گروت، که هزینه‌ی کمتری نسبت به وصله‌های مکانیکی معمول دارد، پرداختند و با انجام آزمایش کشش بر روی ۲۲ نمونه با طول‌های مختلف، عملکرد آن را مطابق با استانداردهای موجود ارزیابی کردند.^[۳۵] استفاده از CFRP به منظور ترمیم پایه‌ی پل‌هایی که در وصله‌ی میلگردهای آن از غلاف فولادی استفاده کرده و دچار آسیب‌دیدگی‌های شدید شده است^[۳۶] و همچنین استفاده از GFRP در غلاف فولادی وصله‌های مکانیکی به منظور بهبود عملکرد آنها ایده‌های جدیدی است که در سال‌های اخیر مطرح شده است.^[۳۷] یان^۳ و همکاران (۲۰۱۸)، نیز به بررسی آزمایشگاهی اتصال تیر به ستون با وصله‌ی مکانیکی همراه با ملات پرداختند و دریافته‌اند که وصله‌ی مکانیکی، یکی از پارامترهای مهم در عملکرد مفصل خمیری در تیر است و با افزایش سختی و مقاومت قسمتی از تیر در نزدیکی اتصال موجب افزایش تغییرمکان‌های تسلیم نهایی می‌شود.^[۳۸] سعیدی و تزارو^۴ (۲۰۱۶)، در بررسی نقش وصله‌های مکانیکی در محل مفصل خمیری در پایه‌ی پل‌ها دریافته‌اند که محل وصله‌های مکانیکی با طول بلند در عملکرد ستون‌های پل تأثیرگذار بوده و پیشنهاد شده است که طول وصله‌ها، به بیشینه‌ی ۱۵ برابر قطر میلگرد محدود شود.^[۳۹] عملکرد وصله‌های مکانیکی در پایه‌ی پل‌ها به دلیل آن‌که تحت بارگذاری‌های چرخه‌ی فراوانی قرار می‌گیرند، اهمیت ویژه‌ی دارد. همچنین عملکرد ضعیف وصله‌های فورجینگ^۵ در زلزله‌ی کوبه‌ی^۶ ژاپن، حساسیت استفاده از وصله‌های مکانیکی را در پایه‌ی پل‌ها دو چندان کرده است. به همین دلیل در مطالعه‌ی هابر^۷ و همکاران (۲۰۱۷)، روشی برای طراحی وصله‌های مکانیکی گروت‌دار در ناحیه‌ی مفصل خمیری در پایه‌ی پل‌ها ارائه و با انجام بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی، عملکرد آن بررسی شده است. روش طراحی پیشنهادی موجب شده است که مفصل خمیری به قسمت فوقانی غلاف فولادی انتقال یابد، که تأثیر به‌سزایی در افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت دورانی مفصل خمیری نسبت

به حالت‌های رایج استفاده از وصله‌ها در سازه‌های پیش‌ساخته داشته است.^[۴۰] در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بررسی عملکرد وصله‌های مکانیکی، ۶ نمونه تیر بتن‌آرمه با ابعاد و مصالح یکسان، که فقط در نوع وصله و محل آن با یکدیگر تفاوت دارند، ساخته شده است. تعدادی از نمونه‌ها با وصله‌ی مکانیکی و تعدادی با وصله‌ی پوششی ساخته شده است، تا عملکرد هر یک از آنها بر اساس پارامترهای مختلف بررسی شود. همچنین یک نمونه به صورت مرجع و بدون هیچ‌گونه وصله‌ی آزمایشی شده است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر فاصله بین وصله‌ها با توجه به نوع آنها و مقایسه‌ی آن با تیر بدون وصله بوده است. همچنین بدین وسیله دید مناسبی از محل قرارگیری وصله‌ها و تأثیر آنها در عملکرد تیر بتن‌آرمه برای طراحان و مجریان سازه‌های بتن‌آرمه فراهم شده است. بارگذاری نمونه‌ها به صورت بار ثقلی بوده و در $\frac{1}{3}$ دهانه‌های تیر اعمال شده است. نتایج نشان داد که تیر مرجع، بیشترین و تیر 10° ، کمترین شکل‌پذیری جابه‌جایی را داشته‌اند. در وصله‌ی پوششی با افزایش فاصله، میزان شکل‌پذیری بیش از ۲ برابر شده است، اما در وصله‌ی مکانیکی با افزایش فاصله تا ۳۰ سانتی‌متر، شکل‌پذیری افزایش و از آن پس تا فاصله‌ی ۶۰ سانتی‌متر، شکل‌پذیری کاهش یافته است.

۲. مشخصات مصالح مصرفی

بتن و میلگردهای فولادی، دو مصالح اصلی هستند که در پروژه‌ی حاضر استفاده شده‌اند. انتخاب دقیق و با کیفیت هر یک از دو مصالح مذکور، نقش اساسی در صحت نتایج نهایی و پارامترهای مورد نظر را دارند. بسیار مشاهده شده است که به دلیل انتخاب مصالح نامرغوب، نتایج برداشت شده، غیرمنطقی و به دور از واقعیت بوده است؛ لذا مرحله‌ی کنونی حساسیت خاصی دارد، زیرا هر اتفاقی که در ادامه‌ی پروژه بیفتد، به نوع مصالح انتخابی بستگی دارد.

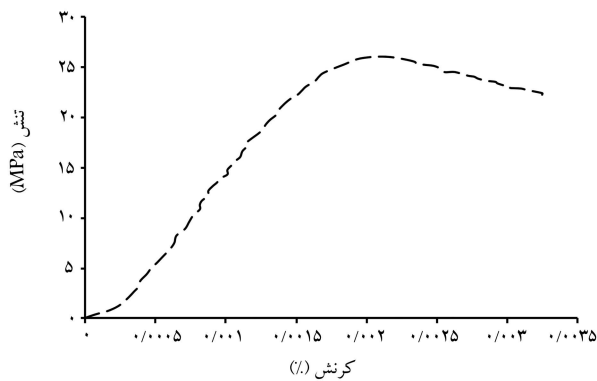
پس از بررسی کیفیت سیمان‌های موجود در بازار در زمان انجام پروژه‌ی حاضر، این نتیجه به دست آمده است که سیمان کارخانه‌ی فیروزکوه نسبت به سایر سیمان‌های موجود، کیفیت بهتری دارد و متناسب با مقاومت مورد نیاز پژوهش حاضر، نتیجه‌ی دقیق‌تری در مقاومت و گیرش بتن می‌دهند. در پژوهش حاضر از سیمان پرتلند تیپ II استفاده شده است.

به طور کلی می‌توان گفت آبی برای ساخت بتن مناسب است که قابل شرب باشد. به همین منظور در ساخت بتن مطالعه‌ی حاضر از آب شهری قابل شرب استفاده شده است.

۲.۱. بتن و آزمایش مقاومت فشاری

به هنگام بتن‌ریزی، سه نمونه‌ی مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر از بتن تهیه و پس از گذشت ۲۸ روز، مقاومت فشاری آنها آزمایش شده است. بر اساس استاندارد ASTM C۳۹، مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ی بی‌ملاک است. لذا با توجه به طرح اختلاط استفاده شده جدول ۱، با اعمال ضرایب معین، نتایج مقاومت فشاری مکعبی مطابق با جدول ۲ به استوانه‌ی تبدیل شده است. در شکل‌های ۱ الی ۳، تصاویری از نمونه‌ها و انجام آزمایش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود.

نمودار تنش - کرنش مربوط به سه نمونه‌ی ذکر شده، در شکل ۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن، مقاومت فشاری هر سه نمونه، بسیار به یکدیگر نزدیک هستند و خطای ناشی از عوامل مختلف محیطی، که باعث اختلاف در مقاومت



شکل ۴. منحنی تنش - کرنش نمونه‌ی مکعبی.

۳.۲. نتایج آزمایش کشش استاندارد میلگردها

در آزمایش کشش استاندارد، ابتدا ۲ میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر، که یکی از آنها با وصله‌ی مکانیکی و دیگری بدون وصله است، تحت آزمایش کشش یکنواخت قرار گرفته‌اند. بارگذاری برای وصله‌های مکانیکی بر اساس استاندارد ASTM A ۳۴۰M^[۱۷] تا حدی که نمونه‌ی مورد نظر دچار گسیختگی شود، ادامه پیدا کرده است. مطابق با استاندارد مذکور، نمونه با شدت ۷۰ الی ۷۰۰ مگاپاسکال بر دقیقه تا حد جاری شدن بارگذاری و توسط کرنش‌سنج نصب شده بر روی نمونه، تغییرشکل آن در زمان‌های مختلف آزمایش ثبت شده است. پس از این‌که میلگرد به حد جاری شدن خود رسید، برای جلوگیری از آسیب به دستگاه اندازه‌گیری، کرنش‌سنج از نمونه جدا شده و آزمایش تا حد گسیختگی میلگرد ادامه یافته است. مشخصات نمونه‌های آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین تصاویری از انجام آزمایش در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

پس از ساخته شدن نمونه‌ها، پیکربندی^۸ مورد نیاز آزمایش، آماده‌سازی شده است. با توجه به این‌که در پروژه‌ی حاضر، بارگذاری به صورت مونوتونیک (یک‌جهته) و اعمال بار در $\frac{1}{3}$ از دهانه‌ی تیر بوده است، نیاز به یک تیر فولادی جهت انتقال بار به نقاط $\frac{1}{3}$ دهانه‌ها بوده است. بنابراین تیر بارگذاری در زیر جک قرار گرفته و بار را از جک به نمونه منتقل کرده است. تکیه‌گاه‌های تیر نیز به صورت ساده بوده است، که نمونه‌ها بر روی آنها قرار گرفته‌اند. به همین منظور از یک تیر فولادی و دو تکیه‌گاه ساده جهت بارگذاری استفاده شده است. پس از تعیین قاب مورد نظر، تکیه‌گاه‌ها بر اساس طول تیرهای ساخته شده، تنظیم و بر روی کف قاب بسته شده‌اند. نمونه‌های ساخته شده بر روی تکیه‌گاه‌ها قرار گرفته و به ترتیب تیر بارگذاری، جک و نیروسنج بر روی همدیگر ثابت شده‌اند. پیکربندی آزمایش در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

۴.۲. مشخصات تیرهای آزمایش شده

در پژوهش حاضر، ۶ عدد تیر بتنی با ابعاد و مصالح مصرفی یکسان، که فقط در نوع و محل وصله با یکدیگر تفاوت دارند، ساخته شده‌اند، که یکی از آنها به صورت مرجع و بدون هیچ‌گونه وصله‌ی است؛ اما ۵ تیر دیگر همگی با وصله هستند. تیرها به طول ۲۱۰۰ میلی‌متر و بر روی دو تکیه‌گاه با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۲۰۵۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. عرض و ارتفاع مقطع آنها به ترتیب ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر بوده است. نوع میلگردها نیز در تمامی تیرها یکسان است؛ به این صورت که از میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر برای میلگردهای طولی کششی، به قطر ۱۰ میلی‌متر برای میلگردهای

جدول ۱. نسبت‌های طرح اختلاط بتن استفاده شده.

| آب | سیمان | ماسه | شن ریزدانه | شن درشت‌دانه |
|------|-------|------|------------|--------------|
| ۰/۲۱ | ۰/۴۷ | ۱ | ۰/۴۸ | ۰/۷۰ |



شکل ۱. چکش زدن نمونه‌ها جهت خروج هوا.



شکل ۲. نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری بتن.



شکل ۳. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری بتن.

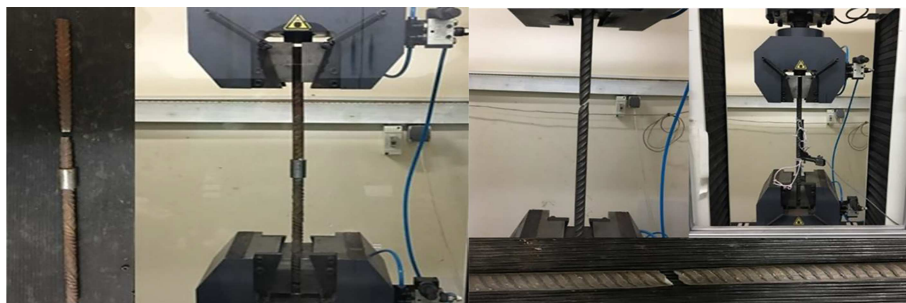
بتن می‌شود، بسیار ناچیز است. بنابراین بتن ساخته شده، یکنواخت و طرح اختلاط مطلوبی متناسب با نیاز پژوهش حاضر دارد.

۲.۲. میلگردهای فولادی

برای ساخت نمونه‌ها بر اساس نیاز پروژه، از میلگردهای AIII استفاده شده است. مشخصات مکانیکی و ترکیب‌های شیمیایی میلگردهای استفاده شده در پژوهش حاضر، که در آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه سمنان بررسی شده، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری.

| نمونه‌ها | وزن نمونه (Kg) | مقاومت فشاری مکعبی (مگاپاسکال) | مقاومت فشاری معادل استوانه‌یی (مگاپاسکال) |
|-------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------------------|
| نمونه‌ی ول | ۷,۲۷۴ | ۳۱,۴ | ۲۵,۱۲ |
| نمونه‌ی دوم | ۷,۱۳۸ | ۳۱,۳ | ۲۵,۰۵ |
| نمونه‌ی سوم | ۷,۱۷۸ | ۳۱,۸ | ۲۵,۴۴ |



شکل ۵. تصاویری از نحوه‌ی انجام آزمایش.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی و ترکیب‌های شیمیایی میلگرد.

| رد | RB۲۵A۳ |
|-----------------------|---------|
| مس (%) | ۰,۲۰۷ |
| کروم (%) | ۰,۰۱۶۷ |
| گوگرد (%) | ۰,۰۰۹۶ |
| فسفر (%) | ۰,۰۰۵۱۶ |
| منگنز (%) | ۰,۰۵۹۴ |
| سیلیسیم (%) | ۰,۱۵۳ |
| کربن (%) | ۰,۲۹۷ |
| ازدیاد طول (%) | ۲۲ |
| تنش نهایی (مگاپاسکال) | ۶۴۱ |
| تنش تسلیم (مگاپاسکال) | ۴۸۲ |

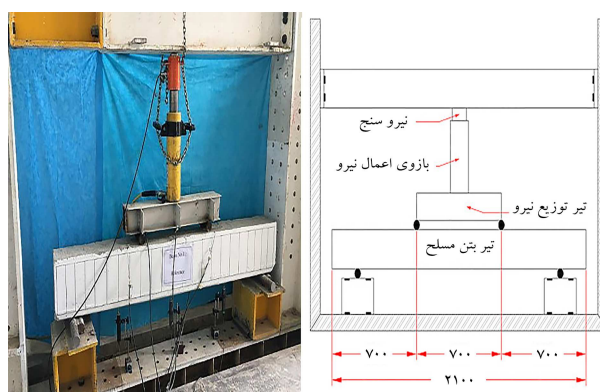
جدول ۴. مشخصات نمونه‌های آزمایش کشش بکناخت.

| نمونه | قطر میلگرد | نوع وصله | طول میلگرد |
|-------|------------|-------------------------|------------|
| اول | ۱۶ | بدون وصله | ۴۵ |
| دوم | ۱۶ | کوپلر استاندارد رزوه‌یی | ۴۵ |

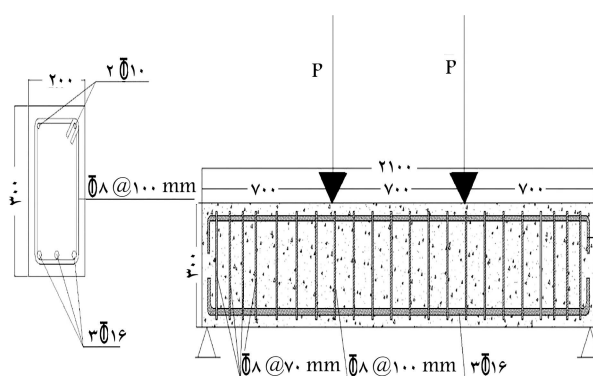
شده است. در تمامی نمونه‌ها فقط میلگردهای کششی، کرنش‌سنج داشته‌اند و بر روی میلگردهای فشاری، کرنش‌سنجی نصب نشده است.

۳. معرفی نمونه‌ها

در جدول ۵، مشخصات ۶ تیر بتن‌آرمه و همچنین تصاویری از نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۶. پیکربندی آزمایش.

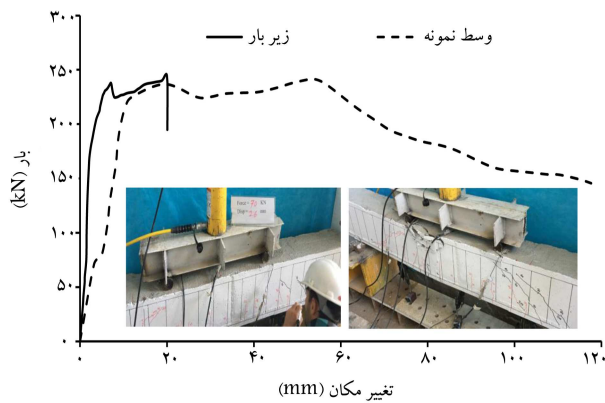


شکل ۷. جزئیات آرماتورگذاری و بارگذاری در طول تیر.

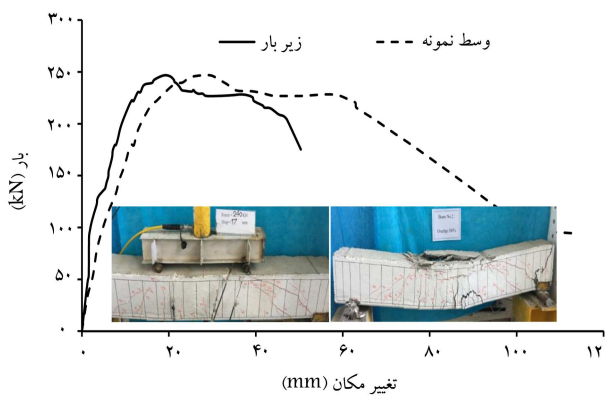
طولی فشاری و از قطر ۸ میلی‌متر به عنوان خاموت استفاده شده است. مقطع طولی و عرضی تیرهای آزمایشی به ترتیب در شکل ۷ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بارگذاری در $\frac{1}{3}$ دهانه و در ۲ نقطه اعمال شده است. بنابراین فاصله‌ی دو بار از یکدیگر، ۷۰۰ میلی‌متر است. در هر یک از نمونه‌ها تعداد ۵ عدد کرنش‌سنج استفاده شده است، که در ادامه، جزئیات و محل نصب آنها شرح داده

جدول ۵. معرفی نمونه‌ها.

| شماره‌ی نمونه | نام نمونه | نوع وصله | توضیحات |
|---------------|-----------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نمونه‌ی اول | R | تیر مرجع بدون وصله | آرما تورها به صورت سراسری و بدون وصله |
| نمونه‌ی دوم | L۱۰۰ | تیر وصله شده به روش همپوشانی | هر ۳ آرما تور کششی در مرکز تیر وصله شده‌اند. |
| نمونه سوم | L۳۳ | تیر وصله شده به روش همپوشانی | آرما تور کششی میانی در مرکز تیر و ۲ آرما تور کششی دیگر به فاصله‌ی از مرکز تیر و به صورت متقارن وصله شده‌اند. |
| نمونه‌ی چهارم | M۱۰۰ | تیر وصله شده به روش کوپلر | هر ۳ آرما تور کششی در مرکز تیر وصله شده‌اند. |
| نمونه‌ی پنجم | M۳۳-۳۰ | تیر وصله شده به روش کوپلر | آرما تور کششی میانی در مرکز تیر و ۲ آرما تور کششی دیگر به فاصله‌ی ۳۰ سانتی متر از مرکز تیر و به صورت متقارن وصله شده‌اند. |
| نمونه‌ی ششم | M۳۳-۶۰ | تیر وصله شده به روش کوپلر | آرما تور کششی میانی در مرکز تیر و ۲ آرما تور کششی دیگر به فاصله‌ی ۶۰ سانتی متر از مرکز تیر و به صورت متقارن وصله شده‌اند. |



شکل ۸. منحنی نیرو - تغییر مکان نمونه‌ی R.



شکل ۹. منحنی نیرو - تغییر مکان نمونه‌ی L۱۰۰.

جدول ۶. جزئیات اجرای نمونه‌ها.

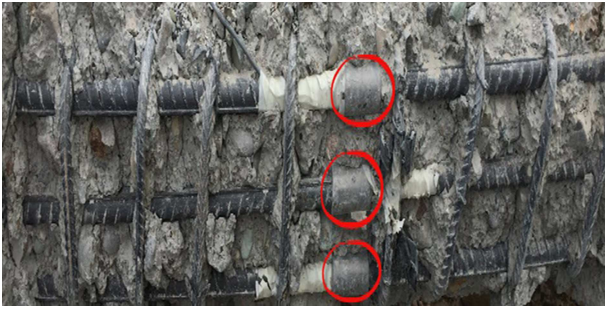
| نام نمونه | جزئیات |
|-----------|--------|
| L۱۰۰ | |
| L۳۳ | |
| M۱۰۰ | |
| M۳۳-۳۰ | |
| M۳۳-۶۰ | |

۴. نتایج اولیه‌ی تیرهای آزمایش شده

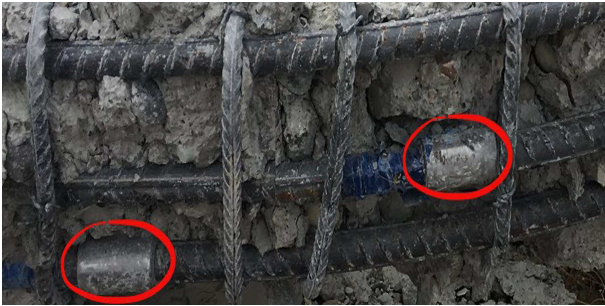
تصاویر شکست و منحنی بار تغییر مکان نمونه‌ها در زیر محل اثر بار و در مرکز تیر در شکل‌های ۸ الی ۱۳ مشاهده می‌شوند، که مطابق آنها رشد ترک‌ها و شکست در نمونه‌ها قابل مشاهده است، و نتایج حاصل از آنها در قسمت‌های بعدی نوشتار حاضر ارائه شده‌اند.

۵. بررسی نتایج

پس از انجام آزمایش خمش خالص بر روی نمونه‌های تیر بتن‌آرمه، سه نمونه‌ی M۱۰۰، M۳۳-۳۰ و M۳۳-۶۰، که وصله‌ی مکانیکی داشتند، در محل وصله‌ها شکسته شدند تا وضعیت کوپلرها پس از اعمال بارگذاری بررسی شود. در هر کدام از سه تیر مذکور مشاهده شد که وصله‌ها پس از اعمال بارگذاری و اتمام آزمایش، سالم بوده و هیچ‌گونه شکست یا گسیختگی در محل آنها به وجود نیامده است.



شکل ۱۴. وصله‌های مکانیکی تیر M۱۰۰ پس از آزمایش.



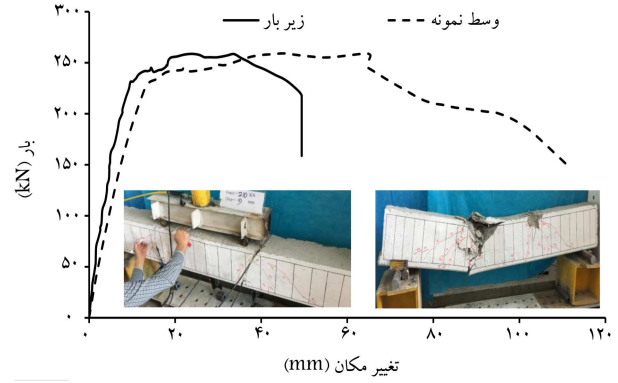
شکل ۱۵. وصله‌های تیر M۳۳-۳۰ پس از آزمایش.



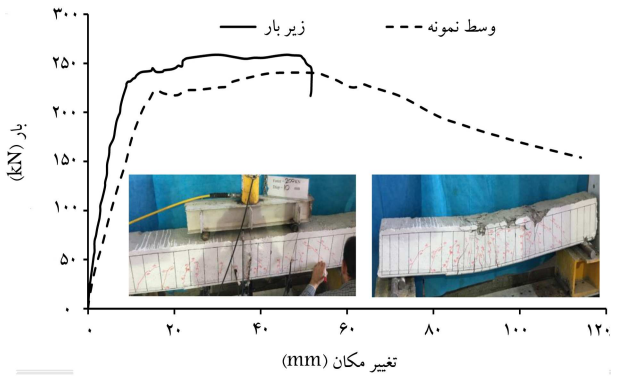
شکل ۱۶. وصله‌های تیر M۳۳-۶۰ پس از آزمایش.

به منظور تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش تیرها، پارامترهای مورد نیاز به این صورت تعریف می‌شوند:

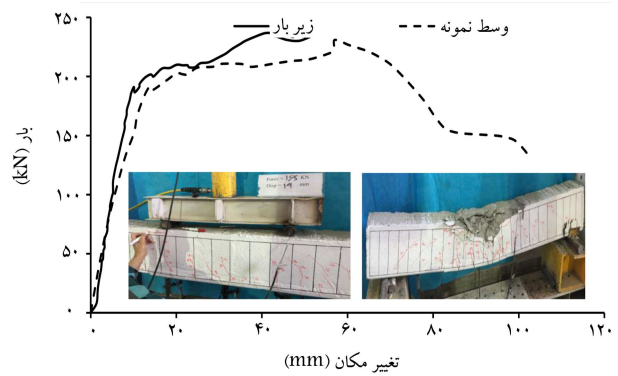
- نیروی بیشینه (P_{max})
نیروی برابر با ظرفیت بیشینه مقطع است و از منحنی بار - تغییر مکان در نقطه‌ای که بیشترین نیرو را دارد، محاسبه می‌شود.
- نیروی جاری شدگی (P_y)
نیروی است که به ازاء آن، اولین میلگرد کششی شروع به جاری شدن کرده است.
- نیروی نهایی (P_u)
نیروی نهایی برابر با بار بعد از آفت نمونه و معادل ۱۵٪ آفت است؛ به عبارت دیگر، برابر با $0.85P_{max}$ و در منحنی نزولی بعد از نقطه‌ی بیشینه است.
- نیروی ترک خوردگی (P_{cr})
نیروی ترک خوردگی برابر با نیروی است که به ازاء آن، اولین ترک در تیر بتن آرمه به وجود می‌آید.
- تغییر مکان‌ها (Δ_y و Δ_u و Δ_{cr})
 Δ_y تغییر طول نسبی در آستانه‌ی جاری شدن اولین میلگرد کششی است، که در واقع همان کرنش جاری شدن به ازاء P_y است.



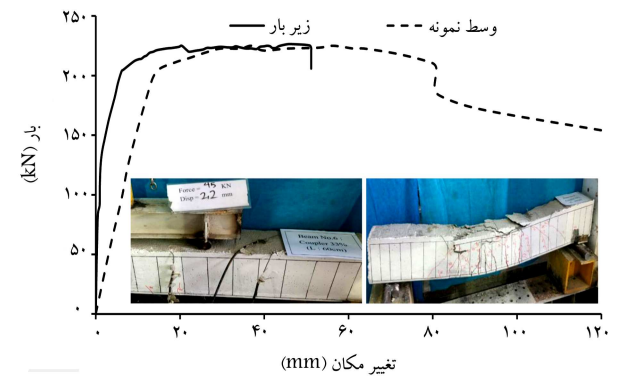
شکل ۱۰. منحنی نیرو - تغییر مکان نمونه‌ی L۳۳.



شکل ۱۱. منحنی نیرو - تغییر مکان نمونه‌ی M۱۰۰.



شکل ۱۲. منحنی نیرو - تغییر مکان نمونه‌ی M۳۳-۳۰.



شکل ۱۳. منحنی نیرو - تغییر مکان نمونه‌ی M۳۳-۶۰.

جدول ۷. نیرو و تغییر طول نسبی نمونه‌ها.

| نام نمونه | P_u (kN) | P_y (kN) | P_{cr} (kN) | Δ_u (mm) | Δ_y (mm) | Δ_{cr} (mm) |
|-----------|------------|------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| ۱ | ۲۴۴ | ۲۲۰ | ۷۰ | ۴۸,۰۷ | ۸,۸۶ | ۲,۹۰ |
| ۲ | ۲۴۶,۳ | ۱۹۹ | ۵۵ | ۲۲,۷۰ | ۱۰,۵۵ | ۲,۲۴ |
| ۳ | ۲۳۸ | ۲۱۴ | ۷۰ | ۴۹ | ۹,۴۳ | ۲,۲۸ |
| ۴ | ۲۱۷,۷ | ۱۹۸ | ۳۰ | ۳۹,۵۰ | ۹,۷۰ | ۱,۴۲ |
| ۵ | ۲۳۳ | ۱۷۶ | ۳۰ | ۴۵,۲۰ | ۹,۳۹ | ۱,۴۰ |
| ۶ | ۲۲۰ | ۱۸۵ | ۴۵ | ۳۱,۹۰ | ۹,۹۰ | ۲,۴۷ |

جدول ۸. مقایسه‌ی پارامترهای مختلف نمونه‌ها.

| ردیف | نام نمونه | $\frac{P_{cr i}}{P_{cr R}}$ | $\frac{P_{y i}}{P_{y R}}$ | $\frac{P_{u i}}{P_{u R}}$ | $\frac{\Delta_{y i}}{\Delta_{y R}}$ | $\frac{\Delta_{u i}}{\Delta_{u R}}$ |
|------|-----------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ۱ | R | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۲ | L۱۰۰ | ۰,۷۹ | ۰,۷۷ | ۰,۹۰ | ۱,۱۹ | ۰,۴۷ |
| ۳ | L۳۳ | ۱ | ۰,۷۹ | ۰,۹۷ | ۱,۰۶ | ۱,۰۲ |
| ۴ | M۱۰۰ | ۰,۴۳ | ۰,۴۹ | ۰,۹۰ | ۱,۰۹ | ۰,۸۲ |
| ۵ | M۳۳-۳۰ | ۰,۴۳ | ۰,۴۸ | ۰,۸۰ | ۱,۰۶ | ۰,۹۴ |
| ۶ | M۳۳-۶۰ | ۰,۶۴ | ۰,۸۵ | ۰,۸۴ | ۱,۱۲ | ۰,۶۶ |

جدول ۹. شکل پذیری جابه‌جایی نمونه‌ها.

| ردیف | نام نمونه | Δ_u (mm) | Δ_y (mm) | μ |
|------|-----------|-----------------|-----------------|-------|
| ۱ | R | ۵۶,۳۵ | ۱۶,۲ | ۳,۴۸ |
| ۲ | L۱۰۰ | ۳۶,۷۶۸ | ۱۲,۱۵۵ | ۳,۰۲ |
| ۳ | L۳۳ | ۶۵,۸۳ | ۱۶,۷۲۰ | ۳,۹۳ |
| ۴ | M۱۰۰ | ۵۴,۱۷۷ | ۱۷,۰۱۰ | ۳,۱۹ |
| ۵ | M۳۳-۳۰ | ۵۸,۴۹ | ۱۶,۳۳۷ | ۳,۵۸ |
| ۶ | M۳۳-۶۰ | ۵۹,۷۸ | ۱۶,۰۴۲ | ۳,۷۳ |

Δ_u تغییر مکان بیشینه در آستانه‌ی شکست است، که بیش از تغییر مکان به ازا P_u نیروی نمی‌تواند باشد. Δ_{cr} تغییر مکانی است که در اثر نیروی P_{cr} اولین ترک را در تیر بتنی به وجود می‌آورد.

پارامترهای اخیر برای هر یک از ۶ نمونه‌ی تیر در وسط تیر محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است.

۱.۵. مقایسه‌ی نیروها، تغییر طول‌های نسبی و ظرفیت باربری نمونه‌ها

در جدول ۶، مقادیر نیروها و تغییر مکان‌های مندرج در جدول ۸ نسبت به مقادیر تیر مرجع مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وصله‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ی در میزان باربری نمونه‌ها نسبت به حالت مرجع ندارند. دلیل این امر آن است که هیچ‌یک از وصله‌ها در هنگام بارگذاری دچار آسیب نشده و توانسته‌اند میلگردها را به حد نهایی آنها برسانند. به‌طور کلی نمونه‌های با وصله‌ی پوششی نسبت به نمونه‌های با وصله‌ی مکانیکی، ظرفیت باربری بیشتری داشتند. نمونه‌ی L۳۳ با ۶٪ افزایش و نمونه‌ی M۳۳-۶۰ با ۱۰٪ کاهش مقاومت نسبت به تیر مرجع، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان باربری را داشتند.

۳.۵. ممان اینرسی مؤثر و مقایسه‌ی سختی خمشی تیرها

بر اساس رابطه‌ی ۱، که به رابطه‌ی برانسون معروف است، ممان اینرسی مؤثر مقطع ترک‌خورده در هر یک از تیرها برای بار سرویس $P_{max}/4$ محاسبه و در جدول ۱۰ ارائه شده است.

$$I_e = I_{cr} + (I_g - I_{cr}) \frac{M_{cr}^2}{M_a^2} \quad (1)$$

نتایج مندرج در جدول ۱۰ حاکی از این موضوع است که تیر مرجع بیشترین ممان اینرسی مؤثر و تیر M۳۳-۶۰، کمترین میزان ممان اینرسی مؤثر را دارد. سختی

۲.۵. شکل پذیری جابه‌جایی

شکل پذیری جابه‌جایی که برای هر نمونه به صورت نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان لحظه‌ی جاری شدن میلگردها تعریف می‌شود، در جدول ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۹، نوع وصله‌ها تأثیر محسوس در میزان شکل پذیری نمونه‌ها نداشته و با تغییر حالت‌های مختلف وصله و همچنین نوع چپش آنها، شکل پذیری تقریباً ثابت بوده است. با وجود این، بیشترین میزان شکل پذیری در وصله‌های مکانیکی زمانی به دست می‌آید که وصله‌ی میلگردها بیشترین فاصله

جدول ۱۰. ممان اینرسی مؤثر نمونه‌ها.

| نام تیر | $(E_c \times I_{eff}) \times 10^{12}$ | E_c | $I_{eff} \times 10^8$ | $I_g \times e^y$ | $\frac{I_{eff}}{I_g}$ | $(I_{eff} - theo) \times 10^8$ |
|---------|---------------------------------------|-------|-----------------------|------------------|-----------------------|--------------------------------|
| R | ۴,۷۶ | ۲۳۵۰۰ | ۲,۰۲۳ | ۴۵ | ۰,۴۵ | ۲,۰۵ |
| L۱۰۰ | ۴,۰۵ | ۲۳۵۰۰ | ۱,۷۲۳ | ۴۵ | ۰,۳۸۳ | ۲,۰۵ |
| L۳۳ | ۴,۶۱ | ۲۳۵۰۰ | ۱,۹۶۲ | ۴۵ | ۰,۴۳۶ | ۲,۰۴ |
| M۱۰۰ | ۳,۹۸ | ۲۳۵۰۰ | ۱,۶۹۴ | ۴۵ | ۰,۳۷۶ | ۲,۰۵ |
| M۳۳-۳۰ | ۳,۵۸ | ۲۳۵۰۰ | ۱,۵۲۳ | ۴۵ | ۰,۳۳۹ | ۲,۰۵ |
| M۳۳-۶۰ | ۳,۲۵ | ۲۳۵۰۰ | ۱,۳۸۳ | ۴۵ | ۰,۳۰۷ | ۲,۰۶ |

جدول ۱۱. سختی خمشی و ضرایب ترک خوردگی نمونه‌ها.

| ردیف | نام نمونه | صلبیت خمشی | ضریب ترک خوردگی |
|------|-----------|------------|-----------------|
| ۱ | R | ۴,۷۶ | ۰,۴۵ |
| ۲ | L۱۰۰ | ۴,۰۵ | ۰,۳۸ |
| ۳ | L۳۳ | ۴,۶۱ | ۰,۴۳ |
| ۴ | M۱۰۰ | ۳,۹۸ | ۰,۳۷ |
| ۵ | M۳۳-۳۰ | ۳,۵۸ | ۰,۳۳ |
| ۶ | M۳۳-۶۰ | ۳,۲۵ | ۰,۳۰ |

جدول ۱۲. صلبیت خمشی نمونه‌ها.

| نام نمونه | P | $EL \times 10^6$ |
|-----------|--------------|------------------|
| R | $0/2P_{max}$ | ۴,۴۹ |
| | $0/6P_{max}$ | ۴,۱۵ |
| | P_y | ۳,۲۱ |
| | P_{max} | ۰,۶۶ |
| L۱۰۰ | $0/2P_{max}$ | ۳,۵۹ |
| | $0/6P_{max}$ | ۲,۶۹ |
| | P_y | ۲,۴۲ |
| | P_{max} | ۱,۳۹ |
| L۳۳ | $0/2P_{max}$ | ۳,۸۰ |
| | $0/6P_{max}$ | ۳,۳۹ |
| | P_y | ۲,۹۱ |
| | P_{max} | ۰,۶۸ |
| M۱۰۰ | $0/2P_{max}$ | ۳,۴۷ |
| | $0/6P_{max}$ | ۲,۸۵ |
| | P_y | ۲,۶۳ |
| | P_{max} | ۰,۸۷ |
| M۳۳-۳۰ | $0/2P_{max}$ | ۳,۰۴ |
| | $0/6P_{max}$ | ۲,۶۸ |
| | P_y | ۲,۴۵ |
| | P_{max} | ۰,۶۶ |
| M۳۳-۶۰ | $0/2P_{max}$ | ۲,۶۳ |
| | $0/6P_{max}$ | ۲,۶۰ |
| | P_y | ۲,۴۵ |
| | P_{max} | ۰,۷۳ |

خمشی هر یک از نمونه‌ها که نسبت مستقیم با پارامتر ممان اینرسی مؤثر دارد، در جدول ۱۱ ارائه شده است، که مطابق آن، تیر مرجع بیشترین و تیر M۳۳-۶۰، کمترین سختی خمشی را دارند، به این معنا که در بار سرویس $0/4P_{max}$ ، تیر مرجع کمترین و تیر M۳۳-۶۰، بیشترین ترک خوردگی را داشته‌اند. در وصله‌های پوششی، ایجاد فاصله بین وصله‌ها، منجر به افزایش سختی نمونه‌ها شده است. این در حالی است که در وصله‌های مکانیکی، افزایش فاصله بین وصله‌ها منجر به کاهش سختی خمشی تیر بتن آرمه شده است. همچنین استفاده از وصله‌ی پوششی در مقایسه با وصله‌های مکانیکی، سختی خمشی بیشتری را برای عضو به وجود آورده است. از مقایسه‌ی رابطه‌ی ممان اینرسی مؤثر در دو حالت تئوری (برانسون) و آزمایشگاهی برای تمامی نمونه‌ها، این مفهوم دریافت می‌شود که مقادیر ممان اینرسی مؤثر تئوری برانسون نزدیک و بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی است. این بدان معناست که مقادیر ممان اینرسی حاصل از تئوری برانسون نسبت به مقادیر ممان اینرسی مؤثر آزمایشگاهی، کمی محافظه‌کارانه است. همچنین ضریب α ، که در نرم‌افزار ایتبس^۹ به عنوان ضریب ترک خوردگی مقطع برابر با $0/35$ در نظر گرفته می‌شود، در پژوهش حاضر محاسبه و در جدول ۱۱ ارائه شده است.

۴.۵. مقایسه‌ی صلبیت خمشی مؤثر تیرها

با استفاده از فرمول خیز تحلیل سازه روابط ۲ و ۳، صلبیت خمشی مؤثر آزمایشگاهی هر یک از نمونه‌ها در بارهای مختلف محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است (جدول ۱۲):

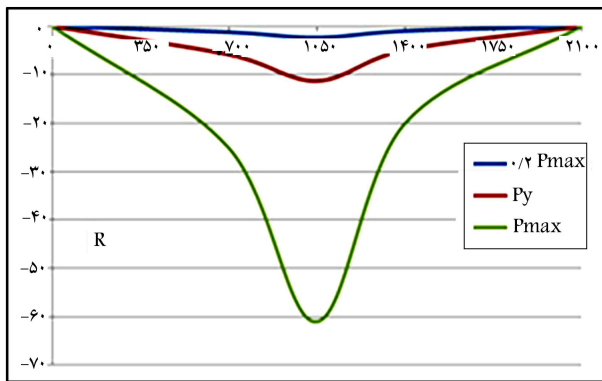
$$\Delta = \frac{Pa(3l^2 - 4a^2)}{48EI_e} \quad (2)$$

$$(EI_e) = \frac{Pa(3l^2 - 4a^2)}{48\Delta} \quad (3)$$

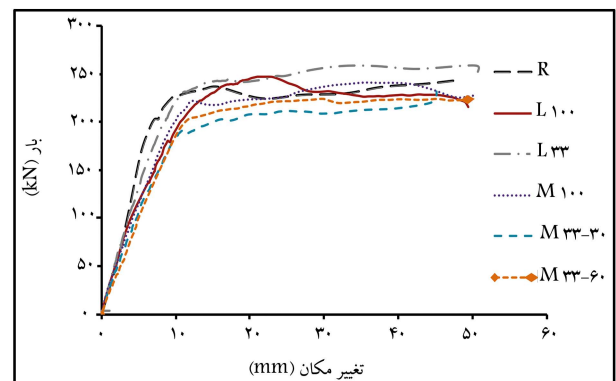
صلبیت خمشی مؤثر، معیاری برای تعیین میزان ترک خوردگی تیر در بارهای

مختلف است. بنابراین تحت یک بارگذاری مشخص، هر چه میزان صلبیت خمشی مؤثر بیشتر باشد، مقطع کمتر ترک می‌خورد و بالعکس.

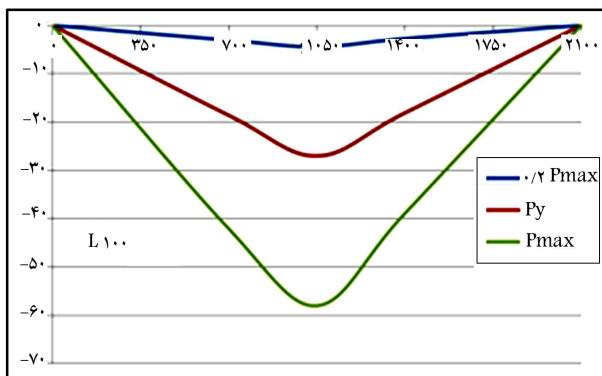
همان طور که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود، تحت بارهای $0/2P_{max}$ ، $0/6P_{max}$ و P_y ، تیر مرجع و در بار P_{max} ، تیر L۱۰۰ بیشترین صلبیت خمشی را داشته‌اند. همچنین در بارهای $0/2P_{max}$ و $0/6P_{max}$ ، تیر M۳۳-۶۰ در بار



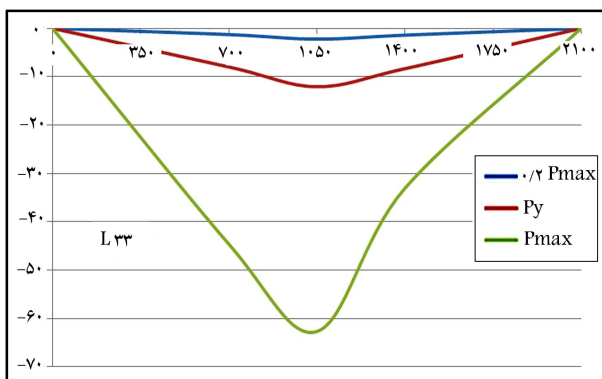
شکل ۱۸. خیز تیر R.



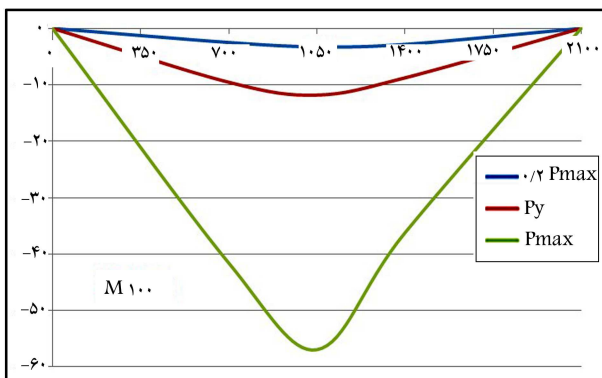
شکل ۱۷. مقایسه‌ی منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌ها در وسط آنها.



شکل ۱۹. خیز تیر L100.



شکل ۲۰. خیز تیر L33.



شکل ۲۱. خیز تیر M100.

P_y ، تیر $L100$ و در بار P_{max} ، تیر مرجع $M33-30$ ، کمترین صلبیت خمشی را داشته‌اند.

۵.۵. میزان جذب انرژی نمونه‌ها

از آنجایی که مساحت زیر نمودار بار - تغییر مکان، نشان‌دهنده‌ی میزان جذب انرژی هر یک از نمونه‌هاست، در شکل ۱۷، نمودار مذکور برای هر ۶ نمونه نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۱۷، نمونه‌ی $L33$ با وصله‌ی پوششی، بیشترین مقدار جذب انرژی و نمونه‌ی $M33-30$ ، کمترین میزان جذب انرژی را داشته است. استفاده از وصله‌های مکانیکی در تمامی نمونه‌ها منجر به کاهش جذب انرژی آنها نسبت به تیر مرجع شده است. نتایج تیر با وصله‌های مکانیکی نشان می‌دهد که افزایش فاصله بین وصله‌های مکانیکی نسبت به حالتی که تمامی وصله‌ها در یک مقطع قرار گرفته باشند، منجر به کاهش جذب انرژی تیر بتن‌آرمه و از طرفی ترک‌خوردگی مقطع تیر در بار کمتر شود. همچنین نمونه‌ی $M33-60$ نسبت به نمونه‌ی $M33-30$ ، جذب انرژی بالاتری داشته و ایجاد فاصله بین وصله‌های پوششی، موجب افزایش جذب انرژی تیر بتن‌آرمه شده است. زمان استفاده از وصله‌های پوششی، ایجاد فاصله بین آنها موجب شده است که جذب انرژی آن از تیر مرجع نیز فراتر رود، که این امر نشان می‌دهد وصله‌های پوششی به درستی عمل کرده و باعث تقویت مقطع شده‌اند. همچنین ایجاد فاصله بین وصله‌های پوششی منجر به تقویت مقاطع مختلف شده است. در مقایسه‌ی انجام شده بین وصله‌های پوششی و مکانیکی از لحاظ جذب انرژی، وصله‌های پوششی عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند.

۶.۵. مقایسه‌ی خیز تیرها تحت بارهای مختلف

خیز تیرها در سه بار $0.5 P_{max}$ ، P_y و P_{max} در شکل‌های ۱۸ الی ۲۳ بررسی شده است. در بار P_{max} ، تیر $L33$ و $L100$ به ترتیب بیشترین و کمترین خیز را داشتند. استفاده از وصله‌ی پوششی در یک مقطع موجب شده است که خیز تیر در بار P_{max} به شدت کاهش یابد. از طرف دیگر، ایجاد فاصله بین وصله‌های پوششی منجر به افزایش چشمگیر خیز تیر نسبت به حالتی که وصله‌های پوششی در یک مقطع قرار گیرند، شده است. همچنین موجب فراتر رفتن خیز آن از تیر مرجع شده است. نتایج حاصل از استفاده‌ی وصله‌های مکانیکی نیز نشان داد که خیز تیر در بارگذاری بیشینه نسبت به تیر مرجع کاهش یافته و نیز ایجاد فاصله بین وصله‌های مکانیکی در نمونه منجر به میزان کاهش خیز بیشینه شده است. با این حال خیز

وصله‌ی مکانیکی و مقایسه‌ی رفتار آن با وصله‌ی پوششی، ۶ نمونه تیر بتن مسلح با ابعاد و مصالح کاملاً یکسان، که فقط در نوع وصله و مکان با یکدیگر تفاوت داشتند، ساخته و آزمایش شده‌اند. تمام وصله‌های مکانیکی استفاده شده در نمونه‌ها از نوع کوپلر استاندارد رزوه شده بوده‌اند. از بین نمونه‌ها، یکی از آنها به صورت تیر مرجع در نظر گرفته شده است، که هیچ‌گونه وصله‌ی ندارد و میلگردها به صورت سراسری قرار گرفته‌اند. بارگذاری نمونه‌ها به صورت مونوتونیک (یک‌جهته) بوده است. همچنین آزمایش کشش بر روی میلگردها به صورت مجزا بدون حضور بتن انجام شده است. یکی از آزمایش‌های انجام شده بر روی میلگرد بدون وصله و دیگری بر روی میلگرد با کوپلر بوده است، که تحت آزمایش کشش یکنواخت قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر به این شرح است:

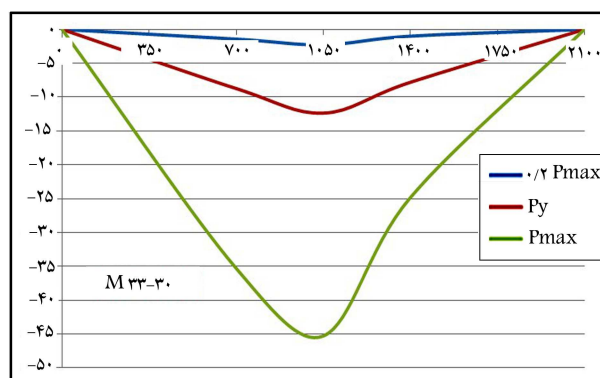
- با به کارگیری وصله‌ها، تغییر محسوسی در میزان باربری نمونه‌ها نسبت به حالت تیر مرجع مشاهده نشده است. به طور کلی نمونه‌های با وصله‌ی پوششی نسبت به نمونه‌های با وصله‌ی مکانیکی در میزان باربری موفق‌تر بوده و بار بیشتری را تحمل کرده‌اند. هر چه فاصله‌ی وصله‌های پوششی از یکدیگر بیشتر شود، میزان باربری نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش فاصله‌ی وصله‌های مکانیکی از یکدیگر، میزان باربری نمونه‌ها کاهش یافته است.

- تیر مرجع بیشترین و تیر 10° ، کمترین شکل‌پذیری جابه‌جایی را داشته‌اند. در وصله‌ی پوششی با افزایش فاصله، میزان شکل‌پذیری بیش از ۲ برابر شده است، اما در وصله‌ی مکانیکی با افزایش فاصله تا 30° سانتی‌متر، شکل‌پذیری افزایش یافته و از آن پس تا فاصله‌ی 60° سانتی‌متر، پارامتر شکل‌پذیری کاهش یافته است. سرعت افزایش و کاهش میزان شکل‌پذیری در حالت وصله‌ی مکانیکی نسبت به سرعت افزایش آن در حالت وصله‌ی پوششی بسیار کمتر بوده است.

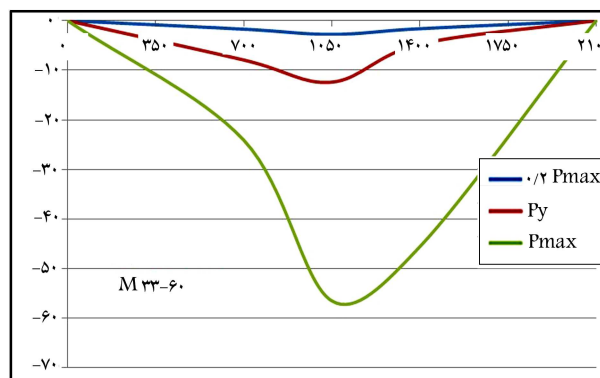
- تیر مرجع، بیشترین ممان اینرسی مؤثر و تیر 60° کمترین ممان اینرسی مؤثر را داشته‌اند. بنابراین مقایسه‌ی حاضر در باره‌ی سختی خمشی هر یک از نمونه‌ها، که نسبت مستقیم با پارامتر ممان اینرسی مؤثر دارد، نیز صادق است. لذا تیر مرجع، بیشترین و تیر 60° ، کمترین میزان سختی خمشی را داشته‌اند. سایر نمونه‌ها نیز مقادیر نزدیک به هم داشته‌اند.

- تیر 33° ، بیشترین قابلیت جذب انرژی را داشته است. در طرف مقابل، تیر 33° کمترین میزان جذب انرژی را داشته است. به طور کلی، وصله‌های پوششی در جذب انرژی از وصله‌های مکانیکی عملکرد قابل قبول‌تری را از خود نشان داده‌اند.

- پس از اعمال بارگذاری و شکستن نمونه‌ها، هیچ‌یک از میلگردهای با وصله‌ی مکانیکی در محل وصله، گسیخته نشده و کوپلرها سالم باقی مانده‌اند.



شکل ۲۲. خیز تیر M_{33-30} .



شکل ۲۳. خیز تیر M_{33-60} .

بیشینه‌ی نمونه‌ی M_{33-60} نسبت به نمونه‌ی M_{33-30} عملکرد بهتری داشته است.

۶. نتیجه‌گیری

از آنجایی که یکی از مصالح اصلی و پرکاربرد در سازه‌های بتن‌آرمه، میلگردها هستند و با توجه به محدودیت‌هایی که در اندازه‌ی میلگردها وجود دارد؛ وصله کردن آنها یک امر اجتناب‌ناپذیر در مسیر اجرای سازه‌های بتن‌آرمه است. برای وصله‌ی میلگردها، سال‌های بسیاری از روش سنتی وصله‌ی پوششی استفاده شده است، که به مرور با ظهور روش‌های جدید و به روز، استفاده از وصله‌ی پوششی محدودتر شده است. از جمله روش‌های نوین می‌توان به وصله‌های: جوشی (فورجینگ)، اتکایی، مکانیکی و یا ترکیبی از آنها اشاره کرد. در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بررسی عملکرد

پانویس‌ها

1. Bompa & Elghazouli
2. Lua
3. Yan
4. Tazarv & Saiidi

5. Forging
6. Kobe
7. Haber
8. set up
9. ETABS

منابع (References)

1. ACI 439.3R, "Types of mechanical splices for reinforcing bars", *American Concrete Institute, Michigan, United States*, pp.24 (2007).
2. ACI 318-14, "Building code requirements for structural concrete", *American Concrete Institute, Michigan, United States*, pp.345 (2014).
3. Mohammadzadeh, B., Esfahani, M.R. and Shoostari, A. "Ductility analysis of lap-spliced reinforced concrete beams", *Journal of Civil Engineering*, **22**(1), pp. 63-82 (2010).
4. Reetz, J., Von Ramin, M. and Matamoros, A.B. "Performance of mechanical splices within the plastic hinge region of beams subject to cyclic loading", *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C. Canada* (2000).
5. Navaratnarajah, V. "Splicing of reinforcement bars with epoxy Joints", *N.T.J. Adhesion and Adhesives*, **3**(2), pp. 93-99 (1983).
6. Dac Phuong, N., Hiroshi, M. and Takuya, O. "Experimental study on RC beams using mechanical splices with different quality and staggering length", *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction EASEC-13, Hokkaido University* (2007).
7. Coogler, K.L. "Investigation of the behavior of offset mechanical splices", *Civil and Environmental Engineering, University Of South Carolina* (2006).
8. Kheyroddin, A. and Shirinsokhan, A. "Present an innovative experimental method for bar splices tensile members in reinforced concrete structures", *Concrete Research*, **10**(4), pp. 5-17 (2016) (in Persian).
9. Shahria Alam, M., Maged, A.Y. and Moncef, N. "Cyclic behavior of mechanically spliced shape memory alloy and steel bars", *9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering* (2010).
10. Ling, J.-H., Baharuddin Abd. Rahman, A., Ibrahim, I.S. and et al. "Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load", *Construction And Building Materials*, **33**, pp. 90-98 (2012).
11. Henin, E. and Morcou, G. "Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction", *Engineering Structures*, **83**, pp. 154-162 (2014).
12. Ling, J.H., Baharuddin Abd. Rahman, A. and Ibrahim, I.S. "Feasibility study of grouted splice connector under tensile load", *Construction and Building Materials*, **50**, pp. 530-539 (2014).
13. Ling, L.H., Baharuddin Abd. Rahman, A., Ibrahim, I.Z. and et al. "Tensile capacity of grouted splice sleeves", *Engineering Structures*, **111**, pp. 285-296 (2016).
14. Hosseini, S.J.A., Baharuddin Abd. Rahman, A., Osman, M.O. and et al. "Bond behavior of spirally confined splice of deformed bars in grout", *Construction and Building Materials*, **80**, pp. 180-194 (2015).
15. McCabe, S.L. "The performance of mechanical splices", *12WCEE2000, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Kansas, USA*, pp. 8 (2000).
16. Bai, A., Ingham, J. and Hunt, R. "Assessing the seismic performance of reinforcement coupler systems", *Pacific Conference Earthquake Engineering, paper No.035*, pp. 11 (2003).
17. Lee, D., Yang, I.-S., Kim, J. and et al. "Reinforced concrete column-foundation connections with mechanical splices", *The 2018 Structures Congress, Songdo Convention, Incheon, Korea* (Aug., 2018).
18. Bompa, D.V. and Elghazouli, A.Y. "Ductility of reinforced concrete members incorporating mechanical splices", *16th European Conference on Earthquake Thesaloniki* (June, 2018).
19. Bompa, D.V. and Elghazouli, A.Y. "Inelastic cyclic behavior of RC members incorporating threaded reinforcement couplers", *Engineering Structures*, **180**, pp. 468-483 (2019).
20. Lua, Zh., Huanga, J., Lia, Y. and et al. "Mechanical behavior of grouted sleeve splice under uniaxial tensile loading", *Engineering Structures*, **186**, pp. 421-435 (2019).
21. Parks, J.E., Brown, D.N., Ameli, M.J. and et al. "Seismic repair of severely damaged precast reinforced concrete bridge columns connected with grouted splice sleeves", *ACI Structural Journal*, **113**(3), pp. 615-626 (2016).
22. Zhao, Ch., Zhang, Z., Wang, J. and et al. "Numerical and theoretical analysis on the mechanical properties of improved CP-GFRP splice sleeve", *Thin-Walled Structures*, **137**, pp. 487-501 (2019).
23. Yan, Q., Chen, T. and Xie, Zh. "Seismic experimental study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves", *Engineering Structures*, **155**, pp. 330-344 (2018).
24. Tazarv, M. and Saiidi, M.S. "Seismic design of bridge columns incorporating mechanical bar splices in plastic hinge regions", *Engineering Structures*, **124**, pp. 507-520 (2016).
25. Haber, Z.B., Mackie, K.R. and Al-Jelawy, H.M. "Testing and analysis of precast columns with grouted sleeve connections and shifted plastic hinging", *22*(10) (2017).