

بررسی آزمایشگاهی پیوستگی بین آرماتورهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه (GFRP) و بتن در نمونه‌های تیری وصله‌دار

مه‌الله رخشانی مهر (دانشجوی دکتری)

محمدرضا اصفهانی* (استاد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

سیدروح‌الله موسوی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص ۱۳-۲۳)
دربی ۲-۳، شماره ۱/۱، ص ۱۳-۲۳

نتایج آزمایشگاهی گذشته در مورد پیوستگی بین بتن و آرماتور در نمونه‌های تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای پلیمری الیافی (FRPR)^۱ کافی به نظر نمی‌رسد. علاوه بر این، تحقیقات کمی در رابطه با اثر آرماتور جانبی اطراف وصله در رفتار پیوستگی بین آرماتورهای FRP و بتن صورت گرفته است. در این نوشتار، ۱۵ نمونه‌ی تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه (GFRP)^۲ ساخته و آزمایش شدند. به کمک نتایج آزمایش اثر آرماتور جانبی وصله و مشخصات سطح ظاهری آرماتور در پیوستگی بین آرماتورهای GFRP و بتن بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که اثر آرماتور جانبی وصله در پیوستگی بین بتن و آرماتور بسته به مشخصات سطح ظاهری آرماتور متفاوت است. علاوه بر این، به کمک نتایج نمونه‌های آزمایشی این پژوهش و نتایج آزمایش‌های موجود در سایر پژوهش‌ها ضوابط آیین‌نامه‌های ۲-۶-۰۶-۸۴۰/۱۸R و CAN/CSA-S8۰۶-۰۲ برای تعیین مقاومت پیوستگی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

واژگان کلیدی: آرماتور پلیمری مسلح الیافی (FRP)، آرماتور جانبی، تیر بتن‌آرمه، مقاومت پیوستگی، وصله.

۱. مقدمه

آرماتورهای پلیمری مسلح الیافی (FRPR) به عنوان مسلح‌کننده در سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی کاربرد دارند. خصوصیات فوق‌العاده‌ی FRP مانند سبکی، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری در برابر خستگی سبب شده است تا در سال‌های اخیر استفاده از FRP رشد چشم‌گیری داشته باشد.^[۱] از طرف دیگر رفتار کشسان خطی (تا لحظه‌ی شکست)، مدول کشسانی پایین و خصوصیات ناهمگن آرماتورهای FRP سبب شده است تا رفتار پیوستگی این آرماتور با بتن، نسبت به آرماتورهای فولادی کاملاً متفاوت باشد.^[۲-۴]

کارایی یک عضو بتن مسلح به پیوستگی بین بتن و آرماتور بستگی دارد. عوامل متعددی در پیوستگی بین بتن و آرماتور FRP مؤثر هستند، که مؤثرترین آنها عبارت‌اند از: ضخامت پوشش بتن، قطر، مدول کشسانی و طول پیوستگی آرماتور.^[۱،۲،۵] وصله‌ی آرماتورهای یکی از جنبه‌های عملی پیوستگی بین بتن و آرماتور است. تأمین پیوستگی کافی بین بتن و آرماتور در طول وصله، نیازی ضروری برای طراحی سازه‌های بتن‌آرمه به‌شمار می‌آید.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱/۱۹، پذیرش ۱۳۹۱/۷/۸

rakhsh_77@yahoo.com
esfahani@um.ac.ir
s.r.mousavi@endg.usb.ac.ir

نتایج آزمایشگاهی موجود به منظور بررسی پیوستگی بین آرماتور و بتن در نمونه‌های تیری وصله‌دار کافی به نظر نمی‌رسد.^[۶،۷] علاوه بر این، در رابطه با اثر آرماتور جانبی وصله در پیوستگی بین آرماتورهای FRP و بتن در نمونه‌های تیری وصله‌دار تحقیقات کمی صورت گرفته است. از سوی دیگر در تحقیقات انجام‌شده در مورد اثر آرماتور جانبی وصله در پیوستگی آرماتورهای FRP اختلاف‌هایی وجود دارد. طبق مطالعات پژوهشگران نشان داده شد که آرماتور جانبی وصله در مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن تأثیری ندارد.^[۷] برخی پژوهشگران نیز در پژوهش خود نشان دادند که اثر آرماتور جانبی وصله در آرماتورهای فولادی با سطح نسبی آج زیاد، بیشتر از اثر آنها در آرماتورهای فولادی با سطح نسبی آج کم است.^[۸] بر این اساس، با توجه به اینکه سطح نسبی آج در آرماتورهای FRP کم است، در آیین‌نامه‌ی ۲-۶-۰۶-۸۴۰/۱۸R،^[۹] از اثر آرماتور جانبی وصله در محاسبات مقاومت پیوستگی صرف‌نظر شده است. در پژوهشی دیگر نیز نشان داده شد که با کاهش فاصله‌ی آرماتورهای جانبی وصله، مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور FRP در نمونه‌های تیری وصله‌دار افزایش می‌یابد؛^[۶] و همچنین آرماتور جانبی وصله، مقاومت پیوستگی آرماتورهای FRP و بتن را افزایش می‌دهد.^[۱۰]

شود؛ یا به عبارت دیگر، آرماتورهای کششی قبل از شکست پیوستگی گسیخته نشوند، طول وصله‌ی این نمونه‌ها به اندازه‌ی کافی کوتاه در نظر گرفته شد. نمونه‌ها به این صورت نام‌گذاری شدند: حرف اول نشان‌دهنده‌ی نوع آرماتور است (حرف R مربوط به آرماتورهای آج‌دار و حرف S نشان‌دهنده‌ی آرماتورهای ماسه‌پاشی شده است). عدد نخست قطر آرماتور طولی وصله شده بر حسب میلی‌متر، عدد دوم نمایانگر مقاومت بتن بر حسب مگاپاسکال، حرف آخر S نشان‌دهنده‌ی حضور آرماتور جانبی وصله و عدد آخر فاصله‌ی آرماتورهای جانبی وصله بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد. مثلاً نمونه‌ی S۱۵-۴۰-R۱۶ از آرماتور آج‌دار به قطر ۱۶ میلی‌متر، از بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال و آرماتور جانبی به فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متر ساخته شده است. نمونه‌های S۱۰-۴۰-NC و R۱۶-۴۰-NC به ترتیب نمونه‌های بدون آرماتور جانبی ساخته شده از آرماتورهای آج‌دار و ماسه‌پاشی شده و نمونه‌ی S۱۰-۴۰-NS، نمونه‌ی بدون وصله هستند.

۲.۲. مشخصات مصالح

دو نوع بتن با مقاومت معمولی (۴۰ مگاپاسکال) و مقاومت بالا (۷۰ مگاپاسکال) در ساخت نمونه‌ها به کار گرفته شد. برای ساخت بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال از سیمان تپ ۲ با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ استفاده شد و بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها در این بتن ۲۵ میلی‌متر بود. برای ساخت بتن با مقاومت ۷۰ مگاپاسکال

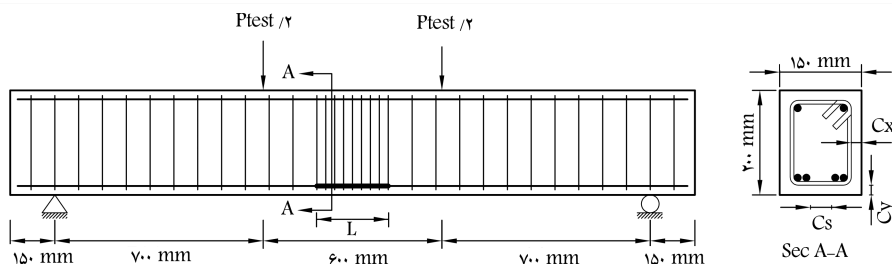
در این نوشتار، ۱۵ نمونه‌ی تیری وصله‌دار مسلح به آرماتورهای پلیمری مسلح به الیاف شیشه ساخته و آزمایش شدند. در این نمونه‌ها از دو نوع آرماتور آج‌دار^۳ و ماسه‌پاشی شده^۴ استفاده شد. در ۱۲ نمونه از مجموع ۱۵ نمونه‌ی فوق، از آرماتور جانبی وصله استفاده و ۲ نمونه‌ی بدون آرماتور جانبی وصله نیز ساخته شده است. برای بررسی شکل‌پذیری نمونه‌های وصله‌دار، یک نمونه‌ی بدون وصله نیز آزمایش شد. به کمک نتایج آزمایش، علاوه بر بررسی اثر پارامترهای مهم مؤثر در پیوستگی مانند: آرماتور جانبی وصله، مقاومت بتن، قطر آرماتور کششی و مشخصات سطح ظاهری آرماتور، رابطه‌های آیین‌نامه‌های CAN/CSA-S۸۰۶-۰۲^[۹] و ACI ۴۴۰/۱R-۰۶^[۴] برای محاسبه‌ی مقاومت پیوستگی تیرهای GFRP وصله‌دار مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. نمونه‌های آزمایشگاهی

جدول ۱، مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در هر یک از نمونه‌ها از ۲ آرماتور طولی کششی در قسمت پایین مقطع عرضی استفاده و در قسمت میانی تیر وصله شدند. ابعاد کلی مقطع عرضی تیرها ۱۵۰ × ۲۰۰ میلی‌متر بود. برای اینکه از شکست تیرها به صورت پیوستگی (شکافت^۵ یا بیرون کشیدگی^۶ اطمینان حاصل

جدول ۱. مشخصات تیرهای نمونه.



نمونه	نوع آرماتور	f'_c (MPa)	d_b (mm)	L (mm)	قطر خاموت (mm)	S (mm)	C_w^{**} (mm)	C_y (mm)	C_s (mm)	f_u^* (MPa)	E_{frp}^* (GPa)
R۱۶-۴۰-NC						-	۳۰	۲۵	۲۵	۱۱۸۰	۶۰
R۱۶-۴۰-S۱۵						۱۵۰	۳۰	۲۵	۲۵	۱۱۸۰	۶۰
R۱۶-۴۰-S۱۰۰		۴۰	۱۶	۴۰۰	۸	۱۰۰	۳۰	۲۵	۲۵	۱۱۸۰	۶۰
R۱۶-۴۰-S۵۰						۵۰	۳۰	۲۵	۲۵	۱۱۸۰	۶۰
R۱۲-۴۰-S۱۵	آج‌دار					۱۵۰	۴۵	۲۵	۱۵	۱۲۵۰	۶۰
R۱۲-۴۰-S۱۰۰		۴۰	۱۲	۴۰۰	۸	۱۰۰	۴۵	۲۵	۱۵	۱۲۵۰	۶۰
R۱۲-۴۰-S۵۰						۵۰	۴۵	۲۵	۱۵	۱۲۵۰	۶۰
R۱۲-۷۰-S۱۵							۱۵۰	۴۵	۲۵	۱۵	۱۲۵۰
R۱۲-۷۰-S۱۰۰		۷۰	۱۲	۴۰۰	۸	۱۰۰	۴۵	۲۵	۱۵	۱۲۵۰	۶۰
R۱۲-۷۰-S۵۰						۵۰	۴۵	۲۵	۱۵	۱۲۵۰	۶۰
S۱۰-۴۰-NS				-	-	-	۳۰	۳۰	۵۰	۷۲۵	۳۷
S۱۰-۴۰-NC	ماسه‌پاشی شده					-	۳۰	۳۰	۵۰	۷۲۵	۳۷
S۱۰-۴۰-SA۰		۴۰	۱۰	۱۸۰	۸	۸۰	۳۰	۳۰	۵۰	۷۲۵	۳۷
S۱۰-۴۰-S۲۱						۲۱	۳۰	۳۰	۵۰	۷۲۵	۳۷
S۱۶-۴۰-S۵۰				۱۶	۲۸۰	۸	۵۰	۳۰	۳۰	۵۰	۷۰۰

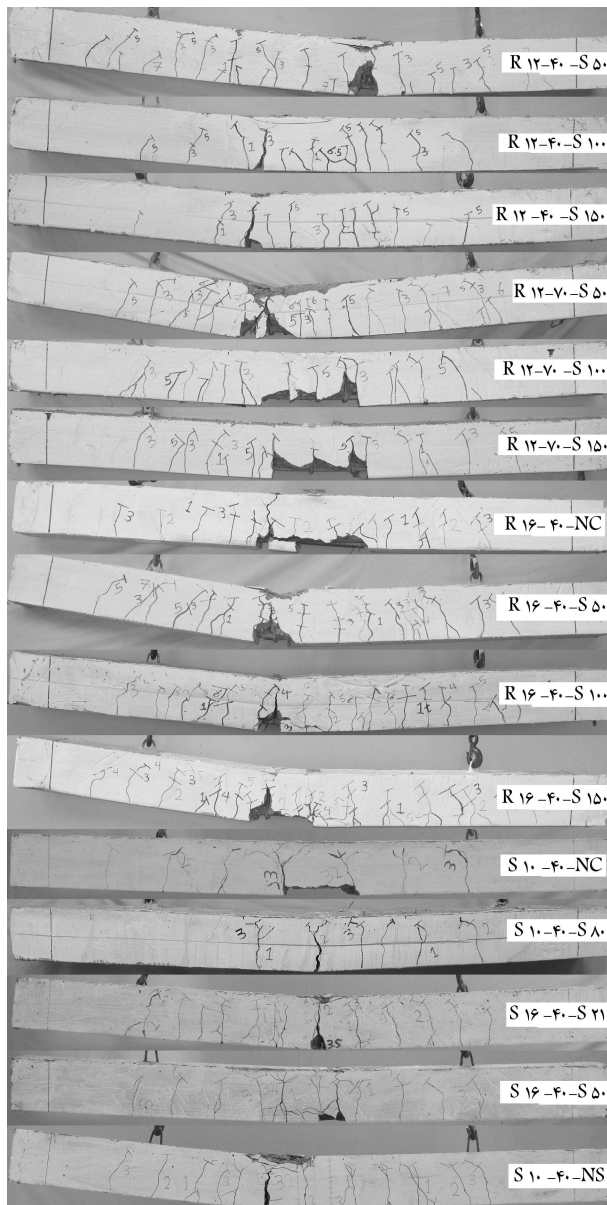
* مشخصات مکانیکی آرماتورها به کمک آزمایش کشش به دست آمده‌اند. ** اعداد با خطای $\pm 1/5$ میلی‌متر گرد شده‌اند.

وسط تیر با خط‌کش اندازه‌گیری تغییرمکان (LVDT)^۹ به دستگاه ثبت داده‌ها منتقل می‌شوند و خیز تجربی تیرهای مسلح‌شده با GFRP در وسط دهانه برداشت می‌شود. داده‌های خروجی از Load cell و LVDT با سیستم جمع‌آوری هم‌زمان اطلاعات در گام‌های زمانی یک ثانیه به وسیله‌ی دستگاه ثبت داده‌ها و رایانه ثبت شد. بار به صورت نموی به نمونه اعمال شد و پس از هر گام بارگذاری معادل ۲۰ کیلو نیوتن، ترک‌های مشاهده‌شده روی سطح تیر علامت زده شدند.

۳. نتایج آزمایش

۳.۱. شکل شکست و توزیع ترک‌ها

تصویر تمام نمونه‌ها پس از شکست در شکل ۳ به نمایش درآمده است. شکست تمام نمونه‌های ساخته‌شده از آرماتورهای آج‌دار و نمونه‌های S۱۰-۴۰-NC و



شکل ۳. تیرهای نمونه پس از آزمایش.

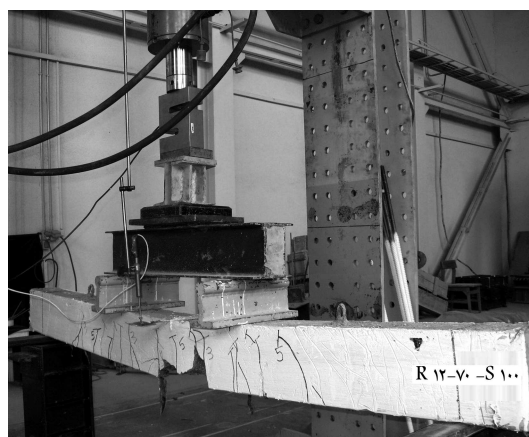
سیمان تپ ۲، میکروسیلیس و فوق‌روان‌کننده استفاده شد و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ بود. بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های مصالح سنگی در این نوع بتن به ۱۲ میلی‌متر محدود شد. برای تعیین مقاومت فشاری هر یک از تیرهای نمونه، برای هر تیر ۶ نمونه‌ی استوانه‌یی استاندارد به ابعاد ۱۵۰ × ۳۰۰ × ۱۵۰ میلی‌متر تهیه و در شرایط مشابه تیرهای نمونه عمل‌آوری شد. دو نوع آرماتور آج‌دار به قطرهای ۱۲ و ۱۶ و ماسه‌پاشی‌شده به قطرهای ۱۰ و ۱۶ میلی‌متر در ساخت نمونه‌ها به کار رفت. آرماتورهای طولی از الیاف شیشه (GFRP) با رزین وینیل‌استر ساخته شده‌اند. برای اطمینان از مشخصات مکانیکی ارائه‌شده توسط کارخانه‌ی سازنده‌ی آرماتورها، آزمایش کشش روی نمونه‌هایی از آرماتورهای GFRP انجام شد. مشخصات مکانیکی به دست آمده از آزمایش کشش شامل مقاومت کششی نهایی و مدول کشسانی آرماتورها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این نمونه‌ها از آرماتورهای فولادی به قطر ۸ میلی‌متر به عنوان آرماتور فشاری و آرماتور جانبی استفاده شده است. تصویر مشخصات سطح ظاهری آرماتورهای آج‌دار و ماسه‌پاشی‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳.۲. دستگاه و روند آزمایش

مطابق شکل ۲، نیرو به وسیله‌ی یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن و یک تیر توزیع‌کننده‌ی فولادی صلب به صورت بار دو نقطه‌یی به فاصله‌ی ۶۰۰ میلی‌متر به تیر نمونه‌ی آزمایشگاهی وارد شد. در بالای تیر توزیع‌کننده‌ی بار و در زیر جک هیدرولیکی یک عدد نیروسنج الکتریکی^۷ قرار داده شد تا به کمک آن و دستگاه دریافت و ثبت داده‌ها^۸، نیروها مستقیماً قرائت شوند. همچنین تغییرمکان



شکل ۱. مشخصات سطح ظاهری آرماتورها.



شکل ۲. دستگاه آزمایش نمونه‌ها.

که ملاحظه می‌شود، هیچ‌یک از تیرهای جدول ۲ به‌هنگام شکست به تنش نهایی (f_u) دسترسی پیدا نکرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که شکست تیرها به صورت پیوستگی اتفاق افتاده است.

۳.۳. اثر آرماتور جانبی وصله

نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های R16-40-NC، R16-40-S150، R16-40-S100 و R16-40-S50 در شکل ۴ نشان داده شده است. تمام این نمونه‌ها از آرماتورهای آج‌دار به قطر ۱۶ میلی‌متر و بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. متغیر این نمونه‌ها فقط فاصله‌ی آرماتور جانبی وصله است، به طوری که نمونه‌ی R16-40-NC بدون آرماتور جانبی وصله و فاصله‌ی آرماتور جانبی وصله در سایر نمونه‌ها از ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. بار نهایی و مقاومت پیوستگی هر یک از این نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به شکل ۴ و جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش فاصله‌ی آرماتور جانبی وصله، بار نهایی (ستون ۵ در جدول ۲) و مقاومت پیوستگی (ستون ۷ در جدول ۲) افزایش پیدا می‌کند، به طوری که مقاومت پیوستگی نمونه‌ی R16-40-S50 حدود ۲/۴ برابر مقاومت پیوستگی نمونه‌ی بدون آرماتور جانبی R16-40-NC است.

اثر آرماتورگذاری جانبی وصله با مقایسه‌ی نمونه‌های با مقاومت معمولی R16-40-S150، R16-40-S100 و R16-40-S50 در شکل ۵ و نمونه‌های با مقاومت بالای R16-40-S100، R16-40-S150 و R16-40-S50 در شکل ۶ قابل بررسی است. بار نهایی و مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با کاهش فاصله‌ی آرماتور جانبی وصله، بار نهایی و مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند.

اثر آرماتور جانبی وصله در آرماتورهای ماسه‌پاشی شده را می‌توان با مقایسه‌ی نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌های R16-40-NC، R16-40-S100 و R16-40-S150 در شکل ۷ بررسی کرد. بار نهایی و مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها به ترتیب در ستون‌های ۵ و ۷ در جدول ۲ ارائه شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود در نمونه‌های ساخته‌شده از آرماتورهای ماسه‌پاشی شده، آرماتور جانبی وصله اثر چندانی در بار نهایی و مقاومت پیوستگی نمونه‌ها ندارد.

بر اساس آنچه در رابطه با اثر آرماتور جانبی وصله در مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور (آج‌دار و ماسه‌پاشی شده) در نمونه‌های تیری وصله‌دار ارائه شد، می‌توان نتیجه گرفت که اثر آرماتور جانبی وصله در آرماتورهای GFRP تابعی از مشخصات

از نوع شکافت بود. در این نمونه‌ها دو نوع شکست شکافت مشاهده شد. در برخی نمونه‌ها مانند نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله‌ی R16-40-NC و R16-40-S100 یا نمونه‌های ساخته‌شده از بتن با مقاومت بالا و با آرماتورهای جانبی با فاصله‌ی زیاد (R16-40-S150، R16-40-S100) شکست نمونه‌ها با به‌وجود آمدن ترک‌های طولی در راستای آرماتورهای کششی در ناحیه‌ی وصله، در دو بخش جانبی و تحتانی تیر همراه بود. ایجاد ترک‌های طولی در این دو بخش باعث ریختن بتن اطراف آرماتورها می‌شود (شکل ۳). شکست این نمونه‌ها به طور ناگهانی و با صدای بلند همراه بود. در نمونه‌های R16-40-S150 و R16-40-S100 نیز چنین رفتاری مشاهده شد.

با کاهش فاصله‌ی آرماتورهای جانبی وصله در نمونه‌های R16-40-S50، R16-40-S100 و R16-40-S150 ترک‌های طولی فقط در قسمت تحتانی تیر مشاهده شد. در این نمونه‌ها حضور آرماتور جانبی وصله علاوه‌بر اینکه باعث کنشدن رشد ترک‌ها می‌شود، از بروز ترک‌های جانبی طولی در راستای آرماتورهای وصله‌شده جلوگیری می‌کند. در این نمونه‌ها شکست با ریزش بتن اطراف آرماتور همراه نیست. در نمونه‌های ساخته‌شده از آرماتورهای ماسه‌پاشی شده به دلیل پایین بودن مدول کشسانی این آرماتورها نسبت به آرماتورهای آج‌دار، ترک‌های مقطع عمیق‌تر بود. همان‌طور که اشاره شد، شکست نمونه‌ی R16-40-NC از آرماتورهای ماسه‌پاشی شده ساخته شده و بدون آرماتور جانبی وصله است، از نوع شکافت بود. در حالی‌که در نمونه‌های R16-40-S100 و R16-40-S150 شکست بیرون‌کشیدگی اتفاق افتاد. این دو نمونه، مشابه نمونه‌ی بدون آرماتور جانبی وصله‌ی R16-40-NC بود و فقط در آنها از آرماتور جانبی وصله استفاده شده است. در این دو نمونه، یک ترک عریض در قسمت انتهایی وصله ایجاد شد (شکل ۳). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های مسلح به آرماتورهای ماسه‌پاشی شده به قطر ۱۰ میلی‌متر، حضور آرماتور جانبی وصله باعث تغییر حالت شکست از شکافت بتن به بیرون‌کشیدگی آرماتور شده است.

۲.۳. مقاومت پیوستگی

مقاومت پیوستگی را می‌توان با استفاده از تنش ایجادشده در آرماتور تعیین کرد. تنش آرماتور را می‌توان براساس روابط کشسان-خمیری مقاطع خمشی بتن مسلح به دست آورد. پژوهشگران مختلف قبلاً این مسئله را استفاده و توصیه کرده‌اند.^[۱۷،۱۸]

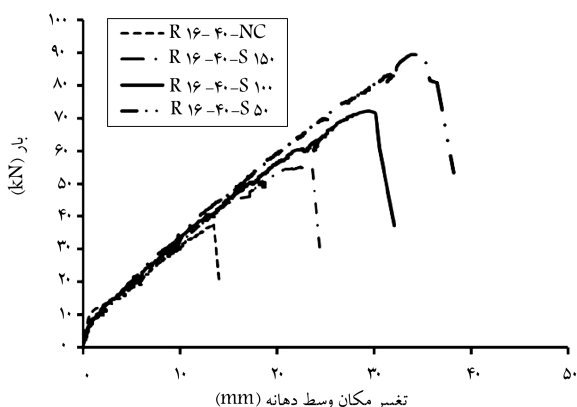
$$f_s = \frac{M}{A_b j d} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، M لنگر نهایی شکست و برابر با $VP_{test}/2$ ؛ A_b سطح مقطع کل آرماتورهای کششی وصله‌شده بر حسب میلی‌متر مربع؛ j ضریب بازوی لنگر مقاوم؛ d عمق مؤثر؛ P_{test} بار نهایی شکست است.

برای محاسبه‌ی میانگین تنش پیوستگی (u_{test}) نیروی کلی به‌وجودآمده در آرماتور FRP ($A_b \times f_s$) بر سطح تماس آرماتور با بتن در طول وصله ($\pi \times d_b \times L$) به صورت رابطه‌ی ۲ تقسیم می‌شود:

$$u_{test} = \frac{A_b f_s}{\pi d_b L} \quad (2)$$

در این رابطه، f_s تنش آرماتور بر حسب MPa است که از طریق رابطه‌ی ۱ تعیین می‌شود؛ d_b قطر آرماتور طولی بر حسب mm؛ L طول وصله بر حسب mm است. مقادیر تنش ایجادشده در آرماتور (f_s) و تنش پیوستگی محاسبه‌شده با کمک رابطه‌ی ۲ (u_{test}) به ترتیب در ستون‌های ۶ و ۷ در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همان‌طور

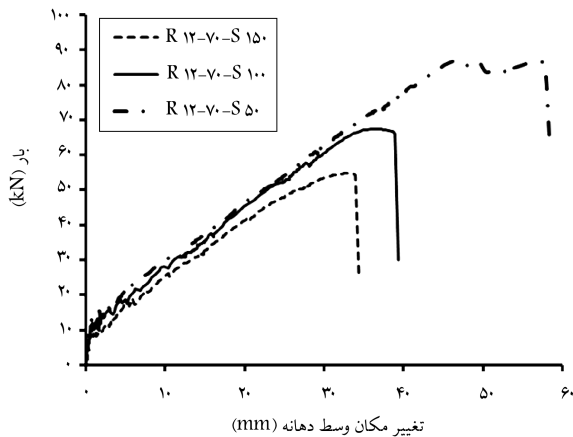


شکل ۴. نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌های: R16-40-NC، R16-40-S150، R16-40-S100 و R16-40-S50.

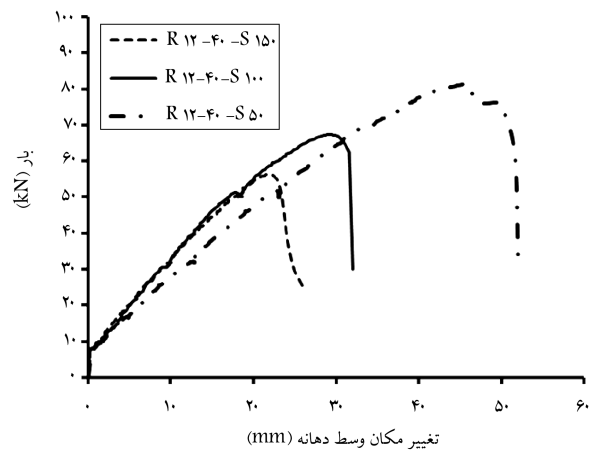
جدول ۲. نتایج آزمایش.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
نمونه	نوع آرماتور	f'_c (MPa)	شکل شکست	P_{test} (kN)	f_s (MPa)	u_{test} (MPa)	Δ_y (mm)	$\Delta_{0.85}$ (mm)	μ
R۱۶-۴۰-NC				۳۷,۵۹	۴۳۷,۶۷	۲,۱۸	۱۳,۰	۱۳,۶	۱,۰۵
R۱۶-۴۰-S۱۵۰				۵۵,۲۶	۶۴۳,۴۱	۳,۲۰	۲۰,۳	۲۳,۸	۱,۱۷
R۱۶-۴۰-S۱۰۰		*۴۱,۲	Splitting	۷۲,۱۸	۸۴۰,۴۲	۴,۱۸	۲۷,۳	۳۰,۵	۱,۱۲
R۱۶-۴۰-S۵۰				۸۹,۴۷	۱۰۴۱,۷۰	۵,۱۸	۳۲,۹	۳۶,۸	۱,۱۲
R۱۲-۴۰-S۱۵۰	آج دار			۵۶,۵۱	۶۵۰,۱۸	۴,۳۱	۱۹,۶	۲۳,۵	۱,۲۰
R۱۲-۴۰-S۱۰۰		۴۱,۲	Splitting	۶۷,۴۲	۷۷۵,۷۱	۵,۱۴	۲۶,۱	۳۱,۷	۱,۲۱
R۱۲-۴۰-S۵۰				۸۱,۵۸	۹۳۸,۶۳	۶,۲۲	۴۱,۶	۵۱,۲	۱,۲۳
R۱۲-۷۰-S۱۵۰				۵۴,۸۸	۶۳۱,۴۳	۴,۱۹	۲۹,۸	۳۴,۲	۱,۱۵
R۱۲-۷۰-S۱۰۰		۷۲,۰	Splitting	۶۷,۴۱	۷۷۵,۵۹	۵,۱۴	۳۵,۰	۳۹,۲	۱,۱۲
R۱۲-۷۰-S۵۰				۸۶,۹۷	۱۰۰۰,۶۰	۶,۶۴	۴۵,۳	۵۸,۱	۱,۲۸
S۱۰-۴۰-NS		**۳۷,۶	Crushing	۳۲,۶	-	-	۵۲,۸	۶۰,۵	۱,۱۴
S۱۰-۴-NC	ماسه پاشی شده	۴۰	Splitting	۳۲,۳۱	۳۸۰,۷۶	۶,۷۳	۲۷,۰	۳۱,۶	۱,۱۷
S۱۰-۴-SA۰		۴۰	Pullout	۳۲,۴۸	۳۸۲,۷۶	۶,۷۷	۳۱,۱	۳۸,۰	۱,۲۲
S۱۰-۴-S۲۱		۳۸	Pullout	۳۴,۹۶	۴۱۱,۹۹	۷,۲۹	۵۱,۱	۶۳,۰	۱,۲۴
S۱۶-۴-S۵۰		۳۸	Splitting	۳۴,۱۱	۴۰۹,۴۱	۳,۰۲	۲۰,۸	۳۰,۰	۱,۴۴

* مقاومت پیوستگی بتن به طور متوسط ۴۱ مگاپاسکال در نظر گرفته می شود.
 ** مقاومت پیوستگی بتن به طور متوسط ۳۸ مگاپاسکال در نظر گرفته می شود.



شکل ۵. نمودار بار - تغییر مکان نمونه های: R۱۲-۴۰-S۵۰، R۱۲-۷۰-S۱۰۰ و R۱۲-۷۰-S۱۵۰.

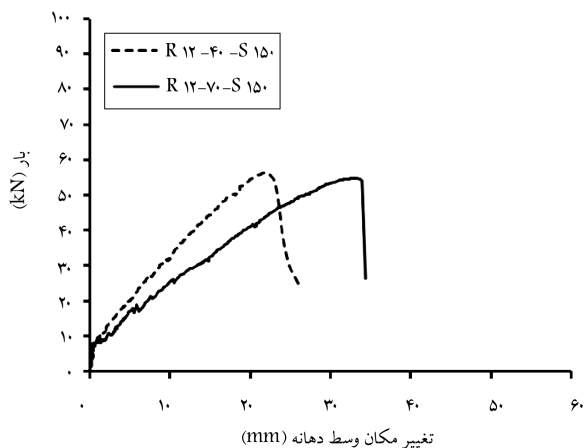


شکل ۶. نمودار بار - تغییر مکان نمونه های: R۱۲-۴۰-S۱۰۰، R۱۲-۴۰-S۵۰ و R۱۲-۴۰-S۱۵۰.

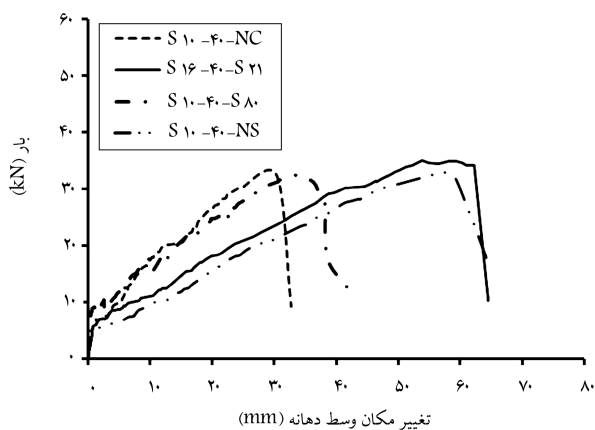
۴.۳. اثر مقاومت بتن

پژوهشگران با انجام آزمایش های بیرون کشیدگی مستقیم بر روی نمونه های با طول پیوستگی کوتاه نشان دادند که در بتن با مقاومت فشاری بیش از ۳۰ مگاپاسکال، مقاومت بتن تأثیری در مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور FRP ندارد.^[۵] اثر مقاومت بتن در مقاومت پیوستگی نمونه های تیری وصله دار را می توان با مقایسه ی نمودار بار - تغییر مکان و مقاومت پیوستگی نمونه های R۱۲-۴۰-S۱۵۰، R۱۲-۷۰-S۱۵۰ و R۱۲-۴۰-S۱۰۰، R۱۲-۷۰-S۱۰۰ و R۱۲-۴۰-S۵۰، R۱۲-۷۰-S۵۰ بررسی

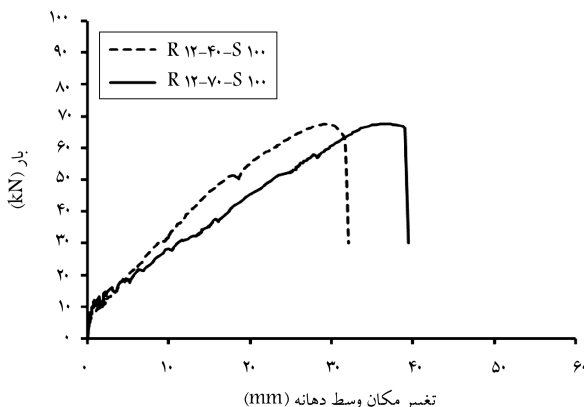
سطح ظاهری آرماتور است. به طوری که کاهش فاصله ی آرماتورهای جانبی وصله در آرماتورهای آج دار باعث افزایش مقاومت پیوستگی و در آرماتورهای ماسه پاشی شده تغییری در مقاومت پیوستگی وصله ایجاد نمی کند. براساس پژوهش های انجام شده اثر آرماتور جانبی وصله در مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور فولادی به سطح نسبی آج آرماتورها بستگی دارد به طوری که اثر آرماتور جانبی وصله در آرماتورهای فولادی با سطح نسبی آج زیاد، بیشتر از اثر آنها در آرماتورهای فولادی با سطح نسبی آج کم است.^[۱۱]



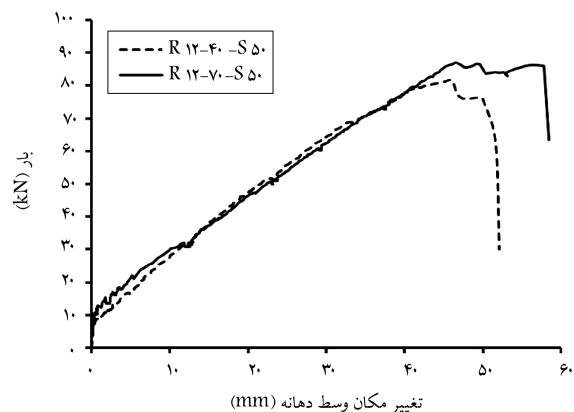
شکل ۸. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های: R۱۲-۷۰-S۱۵۰, R۱۲-۴۰-S۱۵۰.



شکل ۷. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های: S۱۰-۴۰-NC, S۱۶-۴۰-S۲۱, S۱۰-۴۰-S۸۰, S۱۰-۴۰-NS و S۱۰-۴۰-NC و S۱۰-۴۰-S



شکل ۹. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های: R۱۲-۷۰-S۱۰۰, R۱۲-۴۰-S۱۰۰.



شکل ۱۰. نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های: R۱۲-۷۰-S۵۰, R۱۲-۴۰-S۵۰.

گرفت که در صورت کاهش فاصله‌ی آرماتورهای جانبی (به مقدار ۵۰ میلی‌متر) نمونه‌های با قطر بیشتر از خود رفتار سخت‌تری نشان می‌دهند.

۶.۳. شکل‌پذیری نمونه‌ها

برای بررسی شکل‌پذیری نمونه‌های آزمایش شده در این برنامه‌ی آزمایشگاهی از شاخص شکل‌پذیری کوهن و بارلت^[۱۲] استفاده شد. آنها برای بررسی شکل‌پذیری در

کرد. نمودار بار- تغییر مکان این نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۸ الی ۱۰ و بار نهایی و مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول مقدار بار نهایی هر یک از نمونه‌های R۱۲-۷۰-S۱۵۰ و R۱۲-۴۰-S۱۵۰ به ترتیب ۵۴/۸۸ و ۵۶/۵۱ کیلو نیوتن در نمونه‌های R۱۲-۷۰-S۱۰۰ و R۱۲-۴۰-S۱۰۰ به ترتیب ۶۷/۴۱ و ۶۷/۴۲ کیلو نیوتن در نمونه‌های R۱۲-۷۰-S۵۰ و R۱۲-۴۰-S۵۰ به ترتیب ۸۱/۵۸ و ۸۶/۹۷ کیلو نیوتن به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مشابه یافته‌های محققان،^[۵] مقاومت بتن تأثیر قابل ملاحظه‌ی در مقاومت پیوستگی و بار نهایی تیرهای بتن‌آرمه‌ی وصله‌دار مسلح به آرماتورهای آج‌دار ندارد.

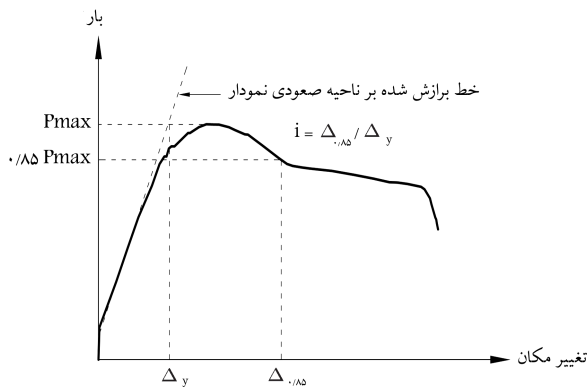
۵.۳. اثر قطر آرماتور

اثر قطر آرماتور در مقاومت پیوستگی را می‌توان با مقایسه‌ی نمودار بار- تغییر مکان و مقاومت پیوستگی نمونه‌های R۱۶-۴۰-S۱۵۰, R۱۲-۴۰-S۱۵۰ و R۱۶-۴۰-S۱۰۰, R۱۲-۴۰-S۱۰۰, R۱۶-۴۰-S۵۰, R۱۲-۴۰-S۵۰ و R۱۶-۴۰-S۱۰۰, R۱۲-۴۰-S۱۰۰ بررسی کرد. نمودار بار- تغییر مکان این نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ و بار نهایی و مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این نمودارها و مقایسه‌ی بار نهایی ارائه شده در ستون ۵ جدول ۲، می‌توان نتیجه گرفت که قطر آرماتور تأثیری در بار نهایی نمونه‌های تیری وصله‌دار ندارد.

در جدول ۲، مقاومت پیوستگی این نمونه‌ها به ترتیب مقادیر (۳/۲۰, ۴/۳۱) و (۴/۱۸, ۵/۱۴) و (۵/۱۸, ۶/۲۲) به دست آمده است. ملاحظه می‌شود با افزایش قطر آرماتور، مقاومت پیوستگی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. این رفتار در نمونه‌های بیرون‌کشیدگی برخی پژوهشگران^[۵] نیز مشاهده شد.

در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که رفتار بار- تغییر مکان نمونه‌های R۱۵-S۴۰- و R۱۲ و R۱۶-۴۰-S۱۵۰ که به ترتیب از آرماتورهایی به قطرهای ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر ساخته شده‌اند، مشابه یکدیگر هستند. این مطلب در شکل ۱۲ برای نمونه‌های R۱۶-۴۰-S۱۰۰ و R۱۲-۴۰-S۱۰۰ نیز صادق است.

در شکل ۱۳ نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های R۱۲-۴۰-S۵۰ و R۱۶-۴۰-S۵۰ با یکدیگر مقایسه و ملاحظه شد نمونه‌ی R۱۶-۴۰-S۵۰ از خود رفتار سخت‌تری نسبت به نمونه‌ی R۱۲-۴۰-S۵۰ نشان می‌دهد. با توجه به این مطلب می‌توان نتیجه



شکل ۱۴. پارامترهای مورد استفاده در شاخص شکل پذیری کوهن و بارلت. [۱۲]

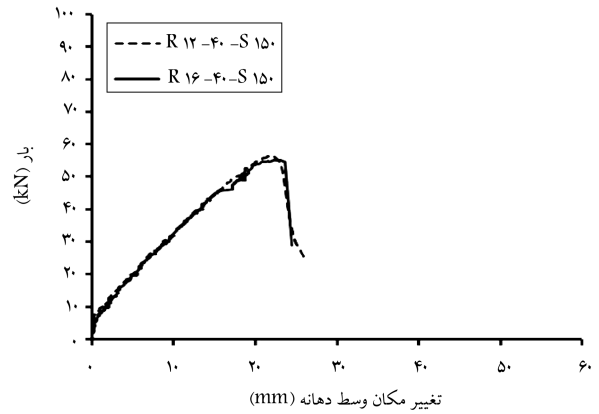
بر ناحیه‌ی صعودی صعودی منحنی بار- تغییرمکان برازش داده می‌شود. این خط تقریباً نشان‌دهنده‌ی رفتار کشسانی است. تغییرمکان متناظر با بیشینه‌ی نیروی آزمایش روی خط مذکور، مقدار Δ_y را مشخص می‌کند. در جدول ۲، مقادیر Δ_y ، $\Delta_{0.85}$ و شاخص شکل‌پذیری هر یک از نمونه‌ها ارائه شده است.

رفتار سازه‌های مسلح‌شده با آرماتورهای پلیمری الیافی (FRP) با سازه‌های مسلح‌شده با آرماتورهای فولادی متفاوت است. منحنی تنش - کرنش آرماتورهای FRP برخلاف آرماتورهای فولادی تا لحظه‌ی گسیختگی به صورت خطی است که باعث کاهش شکل‌پذیری تیرهای مسلح‌شده با آرماتورهای FRP می‌شود. این مطلب در مورد نمونه‌ی بدون وصله S10-40-NS صادق است. نمودار بار - تغییرمکان نمونه‌ی بدون وصله S10-40-NS در شکل ۷ نشان داده شده است. در ستون ۱۰ در جدول ۲، شاخص شکل‌پذیری این نمونه ۱/۱۴ به دست آمده است. ملاحظه می‌شود که شکست این نمونه به صورت ترد و آبی است.

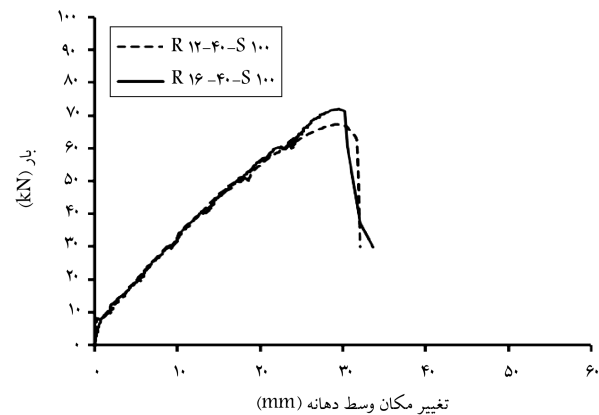
همان‌طورکه قبلاً بیان شد، نمونه‌های R16-40-NC و S10-40-NC فاقد آرماتور جانبی وصله است و از آنها برای مقایسه‌ی شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های فاقد آرماتور جانبی وصله و نمونه‌های دارای آرماتور جانبی وصله استفاده خواهد شد. با توجه به ستون‌های ۸ و ۹ در جدول ۲ مشاهده می‌شود که در این دو نمونه مقادیر Δ_y و $\Delta_{0.85}$ نزدیک به یکدیگرند و شاخص شکل‌پذیری این تیرها به ترتیب برابر ۱/۱۷ و ۱/۱۵ شده است. این بدان معنی است که این نمونه‌ها شکل‌پذیر نیستند و شکست آنها به صورت ترد و آبی است. در شکل‌های ۴ و ۷ منحنی بار- تغییرمکان این نمونه‌ها ارائه شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، بعد از نقطه‌ی بیشینه، منحنی‌ها با شیب تندی افت کرده‌اند.

شاخص شکل‌پذیری کلیه‌ی نمونه‌های آج‌دار در ستون ۱۰ جدول ۲ ارائه شده است. به کمک جدول ۲ و شکل‌های ۴ الی ۶ می‌توان نتیجه گرفت که حضور آرماتور جانبی وصله در آرماتورهای آج‌دار تغییر چندانی در شکل‌پذیری ایجاد نمی‌کند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، پس از نقطه‌ی اوج منحنی بار - تغییرمکان، در همه‌ی نمونه‌ها (حتی در نمونه‌های با فاصله‌ی آرماتور جانبی ۵۰ میلی‌متر) منحنی با شیب تندی افت کرده است.

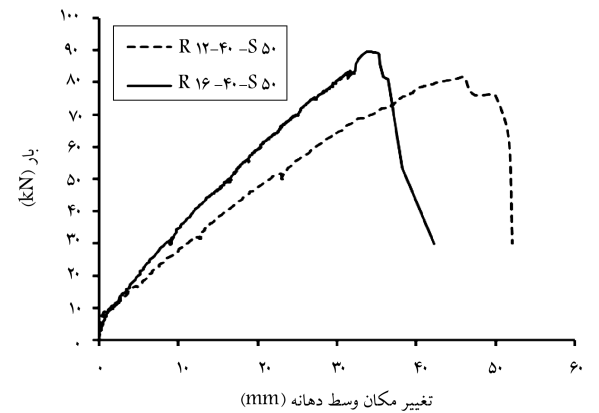
در شکل ۷، نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌های مسلح‌شده با آرماتورهای ماسه‌پاشی شده در مقایسه با نمونه‌ی بدون وصله نشان داده شده است. علاوه بر این، شاخص شکل‌پذیری این نمونه‌ها در ستون ۱۰ جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به شکل ۷ ملاحظه می‌شود که رفتار نمونه‌ی بدون آرماتور جانبی وصله S10-40-NC و نمونه‌ی دارای آرماتور جانبی وصله با فاصله‌ی آرماتورهای جانبی ۸۰ میلی‌متر S10-40-SA تقریباً مشابه یکدیگر هستند. در ستون ۱۰ جدول ۲، شاخص



شکل ۱۱. نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های: R12-40-S150, R16-40-S150.



شکل ۱۲. نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های: R12-40-S100, R16-40-S100.



شکل ۱۳. نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های: R12-40-S50, R16-40-S50.

تیرها، یک شاخص شکل‌پذیری تغییرمکانی پیشنهاد کردند. در این روش، شاخص شکل‌پذیری تیر از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود. در این تعریف، نسبت تغییرمکان متناظر با ۸۵٪ نیروی بیشینه (روی شاخه نزولی منحنی بار- تغییرمکان) به تغییرمکان متناظر با نیروی بیشینه (حد رفتار کشسانی) به عنوان شاخص شکل‌پذیری معرفی شده است.

$$\mu = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \quad (3)$$

شکل ۱۴، نحوه‌ی تعیین پارامترهای رابطه‌ی ۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، برای محاسبه‌ی Δ_y در رابطه‌ی ۳، ابتدا خطی

است. با این حال، هیچ یک از نمونه‌ها شکل‌پذیری قابل قبولی از خود نشان نمی‌دهند.

۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایش با روابط موجود

از آنجا که خصوصیات آرماتورهای FRP با آرماتورهای فولادی کاملاً متفاوت است، از روابط مربوط به پیوستگی آرماتورهای فولادی نمی‌توان برای طراحی وصله‌ی آرماتورهای FRP استفاده کرد. محققان از روشی مشابه آنچه قبلاً برای آرماتورهای فولادی استفاده شده بود،^[۱۳] رابطه‌ی برای محاسبه‌ی تنش پیوستگی میانگین در آرماتورهای GFRP ارائه کردند.^[۱۷] در این رابطه از اثر آرماتور جانبی وصله صرف‌نظر شده و فقط اثر دورگیری ناشی از پوشش بتن وارد محاسبات شده است. این رابطه^[۱۷] اساس رابطه‌ی پیشنهادی ACI ۴۴۰/۱R-۰۶^[۱۴] است:

$$\frac{u}{\sqrt{f'_c}} = 0.33 + 0.025 \frac{C}{d_b} + 0.83 \frac{d_b}{L} \quad (۴)$$

در این رابطه، f'_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال؛ C کمترین فاصله‌ی بین پوشش جانبی تا مرکز آرماتور، پوشش تحتانی تا مرکز آرماتور و نصف فاصله‌ی بین آرماتورهای وصله‌شده بر حسب میلی‌متر و L طول پیوستگی بین بتن و آرماتور بر حسب میلی‌متر است.

آیین‌نامه‌ی CAN/CSA-S8۰۶-۰۲^[۱۸] برای تعیین مقاومت پیوستگی بین آرماتورهای FRP و بتن، رابطه‌ی ۵ را پیشنهاد کرده است. در این رابطه، اثر نوع بتن، اندازه‌ی آرماتور، نوع الیاف و مشخصات سطح ظاهری آرماتور وارد محاسبات شده است:

$$u = \frac{d_{cs} \sqrt{f'_c}}{1.15 (k_1 k_2 k_3 k_4 k_5) \pi d_b} \quad (۵)$$

در این رابطه، k_1 ضریب اثر موقعیت قرارگیری آرماتور در مقطع عرضی؛ k_2 ضریب اثر چگالی بتن؛ k_3 ضریب اثر اندازه‌ی آرماتور؛ k_4 ضریب اثر نوع الیاف؛ k_5 ضریب اثر سطح ظاهری آرماتور؛ d_{cs} کمترین فاصله‌ی بین سطح خارجی بتن تا مرکز آرماتور و دو سوم فاصله‌ی مرکز تا مرکز آرماتورهای وصله‌شده است، و نباید از ۲/۵ برابر d_b بیشتر شود.

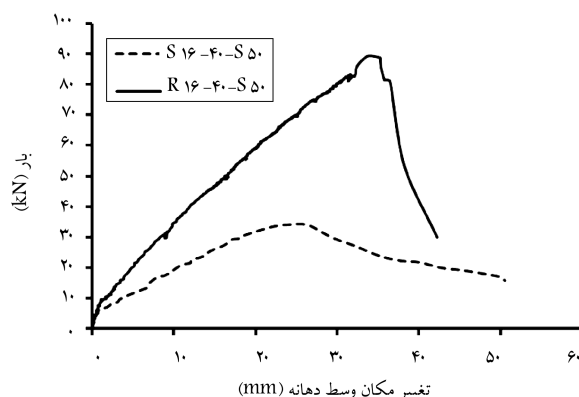
۱.۴. نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله

در ستون ۴ جدول ۳، میانگین و انحراف معیار نسبت مقاومت پیوستگی آزمایشگاهی به مقاومت پیوستگی محاسبه‌شده با کمک رابطه‌ی ۴ ($u_{test}/u_{(r)}$) برای نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله‌ی موزلی و همکاران،^[۱] هراجلی و ابونیاچ،^[۹] آلی^[۱۴] و نویسندگان به ترتیب مقادیر (۰/۱۱،۰/۷۶)، (۰/۱۱،۰/۰۵)، (۰/۳۰،۰/۶۰) و (۰/۵۲،۰/۸۶) به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در همه‌ی موارد، رابطه‌ی ACI ۴۴۰/۱R-۰۶^[۱۴] مقدار مقاومت پیوستگی نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله را دست بالا تخمین می‌زند. به طوری که در برخی نمونه‌های آزمایشگاهی (هراجلی و ابونیاچ^[۱]) مقدار میانگین مقاومت پیوستگی محاسبه‌شده حدود دو برابر مقدار میانگین آزمایشگاهی است.

نتایج مقایسه‌ی رابطه‌ی CAN/CSA-S8۰۶-۰۲^[۱۸] و نتایج آزمایش موجود برای نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله در ستون ۵ جدول ۳ ارائه شده است. مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت $u_{test}/u_{(5)}$ برای نمونه‌های بدون آرماتور جانبی وصله‌ی موزلی و همکاران،^[۱] هراجلی و ابونیاچ،^[۹] آلی^[۱۴] و نویسندگان به ترتیب

شکل‌پذیری این دو نمونه به ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۲۲ به دست آمده است. این مطلب نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها حضور آرماتور جانبی وصله به فاصله‌ی زیاد، تأثیر چندانی در رفتار بار - تغییرمکان ندارد و فقط به مقدار ناچیزی سبب افزایش شکل‌پذیری می‌شود. این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی بدون وصله‌ی NS-۴۰-S۱۰ (با شاخص شکل‌پذیری ۱/۱۴) شکل‌پذیرتر هستند. لیکن رفتار این نمونه‌ها ترد است و ضوابط کلی شکل‌پذیری برآورده نمی‌شود. از طرف دیگر در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که نمونه‌ی S۱۰-۴۰-S۲۱ دارای رفتاری مشابه نمونه‌ی بدون وصله‌ی NS-۴۰-S۱۰ است. نمونه‌ی S۱۰-۴۰-S۲۱ دارای آرماتور جانبی وصله به فاصله‌ی ۲۱ میلی‌متر است. شاخص شکل‌پذیری این نمونه ۱/۲۴ به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش فاصله‌ی آرماتورهای جانبی به میزان ۲۱ میلی‌متر، رفتار بار - تغییرمکان نمونه‌های ساخته‌شده از آرماتورهای ماسه‌پاشی‌شده مشابه رفتار نمونه‌ی بدون وصله می‌شود. با این حال مقایسه‌ی شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های مسلح به آرماتورهای ماسه‌پاشی‌شده نشان می‌دهد که حضور آرماتور جانبی تأثیر قابل ملاحظه‌ی در شکل‌پذیری نمونه‌ها ندارد. نکته‌ی قابل توجه در خصوص نمونه‌های ساخته‌شده از آرماتورهای ماسه‌پاشی‌شده این است که شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های وصله‌دار نسبت به شاخص شکل‌پذیری نمونه‌های بدون وصله بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۳ و جدول ۲ نشان داده شده است، شکل شکست در نمونه‌ی بدون آرماتور جانبی وصله‌ی NS-۴۰-S۱۰ از نوع شکافت و در نمونه‌های S۱۰-۴۰-S۸۰ و S۱۰-۴۰-S۲۱ از نوع بیرون‌کشیدگی است. در نمونه‌های دارای شکل شکست بیرون‌کشیدگی لغزش آرماتور از درون بتن باعث به‌وجود آمدن اصطکاک بین آرماتور و بتن می‌شود و این امر سبب جذب انرژی همراه با افزایش تغییرمکان در تیر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی افزایش شکل‌پذیری نمونه‌هاست. لیکن همان‌طور که اشاره شد، هیچ‌یک از این نمونه‌ها از خود رفتار شکل‌پذیر مناسبی نشان نمی‌دهند.

تفاوت شکل‌پذیری نمونه‌های ساخته‌شده از آرماتورهای آج‌دار و ماسه‌پاشی‌شده با آرماتور جانبی وصله را می‌توان در شکل ۱۵ با مقایسه‌ی دو نمونه‌ی S۱۶-۴۰-S و R۱۶-۴۰-S۵۰ بررسی کرد. این دو نمونه به ترتیب از آرماتورهای ماسه‌پاشی‌شده و آج‌دار ساخته شده‌اند. طول وصله در نمونه‌ی S۱۶-۴۰-S برابر ۱۸۰ میلی‌متر و در نمونه‌ی R۱۶-۴۰-S۵۰ مساوی ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که نمونه‌ی ماسه‌پاشی‌شده علی‌رغم داشتن طول وصله‌ی کمتر نسبت به نمونه‌ی آج‌دار شکل‌پذیرتر است. شاخص شکل‌پذیری این دو نمونه در جدول ۲ به ترتیب ۱/۱۲ و ۱/۴۴ به دست آمده



شکل ۱۵. نمودار بار - تغییرمکان نمونه‌های: R۱۶-۴۰-S۵۰، S۱۶-۴۰-S۵۰.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایش نمونه‌های با آرما تور جانبی وصله و ضوابط آیین‌نامه‌ی بی.

(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)
مرجع	Beam No.	سطح* ظاهری	$u_{test}/u_{(۲)}$	$u_{test}/u_{(۵)}$
	۶G۵۰N-AA	SC	۰٫۷۹	۰٫۶۵
	G۷۰N-A۹۶	SC	۰٫۸۰	۰٫۵۸
	G۸۰N-A۱۰۶	SC	۰٫۸۷	۰٫۶۰
	G۱۱۵N-A۱۱۶	SC	۰٫۷۴	۰٫۴۶
	G۷۰L-A۲۵۶	SC	۰٫۷۲	۰٫۵۲
	G۷۰N-A۲۶۶	SC	۰٫۸۰	۰٫۵۸
	G۷۰M-A۲۷۶	SC	۰٫۹۱	۰٫۶۵
[۱۲]	G۷۰N-KW۲۸۶	SC	۰٫۷۰	۰٫۶۷
	G۷۰N-FX۲۹۶	SC	۰٫۸۱	۰٫۷۷
	G۷۰N-KX۳۰۶	SC	۰٫۸۰	۰٫۵۸
	G۷۰N-PX۳۱۶	SC	۰٫۷۰	۰٫۵۰
	G۷۰N-KY۳۲۶	SC	۰٫۸۹	۰٫۶۴
	G۷۰N-KY۳۳۶	SC	۰٫۷۷	۰٫۵۵
	میانگین		۰٫۷۹	۰٫۶۰
	انحراف معیار		۰٫۰۷	۰٫۰۸
	A۴۶۰-۱	Wrapped	۰٫۹۱	۰٫۶۷
	A۴۶۰-۲	Wrapped	۰٫۹۴	۰٫۶۸
	A۵۴۰-۱	Wrapped	۰٫۶۵	۰٫۴۵
	A۵۴۰-۲	Wrapped	۰٫۸۷	۰٫۶۰
[۱۰]	B-۶۷۵-۱	Wrapped	۰٫۸۲	۰٫۵۸
	B-۶۷۵-۲	Wrapped	۰٫۸۲	۰٫۵۸
	B-۸۷۰-۱	Wrapped	۰٫۶۹	۰٫۴۵
	B-۸۷۰-۲	Wrapped	۰٫۷۵	۰٫۴۹
	میانگین		۰٫۸۱	۰٫۵۶
	انحراف معیار		۰٫۱۰	۰٫۰۹
	R۱٫۲۵L۲۰-C	Grooved	۰٫۷۵	۱٫۰۰
	T۱٫۲۵L۲۰-C	Th-W	۰٫۳۵	۰٫۴۵
[۲]	T۲L۲۰-C	Th-W	۰٫۴۲	۰٫۳۶
	میانگین		۰٫۵۱	۰٫۶۰
	انحراف معیار		۰٫۲۱	۰٫۳۵
	R۱۶-۴۰-S۱۵۰	Ribbed	۰٫۷۲	۱٫۱۵
	R۱۶-۴۰-S۱۰۰	Ribbed	۰٫۹۴	۱٫۵۰
	R۱۶-۴۰-S۵۰	Ribbed	۱٫۱۶	۱٫۸۶
	R۱۲-۴۰-S۱۵۰	Ribbed	۱٫۱۱	۱٫۷۷
	R۱۲-۴۰-S۱۰۰	Ribbed	۱٫۳۲	۲٫۱۱
	R۱۲-۴۰-S۵۰	Ribbed	۱٫۶۰	۲٫۵۵
[۱۰]	R۱۲-۷۰-S۱۵۰	Ribbed	۰٫۸۱	۱٫۳۰
	R۱۲-۷۰-S۱۰۰	Ribbed	۱٫۰۰	۱٫۵۹
	R۱۲-۷۰-S۵۰	Ribbed	۱٫۲۹	۲٫۰۶
	S۱۰-۴۰-S۸۰	SC	۱٫۲۴	۱٫۲۱
	S۱۰-۴۰-S۲۲	SC	۱٫۳۷	۱٫۳۳
	S۱۶-۴۰-S۵۵	SC	۰٫۵۷	۰٫۸۱
	میانگین		۱٫۰۹	۱٫۵۴
	انحراف معیار		۰٫۲۷	۰٫۴۶

* SC=Sand Coated, Th-W=Thread Wrapped

جدول ۳. مقایسه نتایج آزمایش نمونه‌های بدون آرما تور جانبی وصله با ضوابط آیین‌نامه‌ی بی.

(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)
مرجع	Beam No.	سطح* ظاهری	$u_{test}/u_{(۲)}$	$u_{test}/u_{(۵)}$
	B-G۱-۳	W-SC	۰٫۸۲	۰٫۷۲
	B-G۲-۳	Ribbed	۰٫۷۸	۰٫۶۹
	B-A-۳	Ribbed	۰٫۸۸	۰٫۷۸
	B-A-۱	Ribbed	۰٫۸۹	۰٫۸۹
	B-A-۲	Ribbed	۰٫۶۵	۰٫۸۰
[۲]	B-G۱-۱	W-SC	۰٫۸۵	۰٫۸۱
	B-G۲-۱	Ribbed	۰٫۷۳	۰٫۶۹
	B-G۱-۲	W-SC	۰٫۶۰	۰٫۷۱
	B-G۲-۲	Ribbed	۰٫۶۴	۰٫۷۹
	میانگین		۰٫۷۶	۰٫۷۶
	انحراف معیار		۰٫۱۱	۰٫۰۷
	R۱٫۲۵L۱۵	Ribbed	۰٫۵۵	۰٫۸۸
	R۱٫۲۵L۲۰	Ribbed	۰٫۵۸	۰٫۸۰
	R۲L۱۵	Ribbed	۰٫۵۵	۰٫۶۳
	R۲L۲۰	Ribbed	۰٫۶۵	۰٫۶۴
	R۱٫۲۵L۳۰	Ribbed	۰٫۴۸	۰٫۵۴
[۲]	T۱٫۲۵L۱۵	Th-W	۰٫۵۳	۰٫۶۶
	T۱٫۲۵L۲۰	Th-W	۰٫۳۱	۰٫۳۸
	T۲L۱۵	Th-W	۰٫۵۰	۰٫۴۴
	T۲L۲۰	Th-W	۰٫۳۲	۰٫۲۸
	میانگین		۰٫۵۰	۰٫۵۸
	انحراف معیار		۰٫۱۱	۰٫۱۹
	۶G۷۰z-A۲۳	SC	۰٫۶۲	۰٫۴۵
[۱۲]	۶G۷۰z-A۲۲	SC	۰٫۵۸	۰٫۴۱
	میانگین		۰٫۶۰	۰٫۴۳
	انحراف معیار		۰٫۱۱	۰٫۱۹
	R۱۶-۴۰-NC	Ribbed	۰٫۴۹	۰٫۷۸
نویسندگان	S۱۰-۴۰-NC	SC	۱٫۲۳	۱٫۲
	میانگین		۰٫۸۶	۰٫۹۹
	انحراف معیار		۰٫۵۲	۰٫۲۹

* W-SC=Wrapped — Sand Coated, SC=Sand Coated, Th-W=Thread Wrapped

مقادیر (۰٫۷۰، ۰٫۷۶)، (۰٫۱۹، ۰٫۵۸)، (۰٫۳۰، ۰٫۴۳) و (۰٫۲۹، ۰٫۹۹) به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رابطه‌ی CAN/CSA-S۸۰۶-۰۲ [۹] مقدار مقاومت پیوستگی نمونه‌های بدون آرما تور جانبی وصله را دست بالا و در برخی موارد (نتایج این نوشتار) با پراکندگی زیاد تخمین می‌زند.

۲.۴. نمونه‌های دارای آرما تور جانبی وصله

در ستون ۴ جدول ۴، مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت $u_{test}/u_{(۲)}$ برای نمونه‌های دارای آرما تور جانبی وصله‌ی آلی، [۱۲] تیقارت و همکاران، [۱۰] هراجل و ابونیاچ [۲]

و نویسندگان به ترتیب مقادیر (۰/۰۷۰/۷۹)، (۰/۱۰/۸۱)، (۰/۲۱/۵۱) و (۰/۲۷/۰۹) به دست آمده است. همان طور که ملاحظه می شود، رابطه $R=0.6$ با پراکندگی زیاد و سایر نمونه ها را (آلی،^[۱۴] تیقارت و همکاران،^[۱۱] و هراجلی و ابونیاچ^[۱۲])، دست بالا تخمین می زند.

در ستون ۵ جدول ۴، مقدار میانگین و انحراف معیار نسبت $u_{test}/u(5)$ برای نمونه های دارای آرماتور جانبی وصله ی آلی^[۱۴]، تیقارت و همکاران،^[۱۱] هراجلی و ابونیاچ^[۱۲] و نویسندگان به ترتیب مقادیر (۰/۰۸۰/۶۰)، (۰/۰۹۰/۵۶)، (۰/۰۳۵/۶۰) و (۰/۰۴۶/۵۴) به دست آمده است. همان طور که ملاحظه می شود، رابطه ی $CAN/CSA-S806-02$ ^[۹] بسته به مشخصات سطح ظاهری آرماتور (مشخصات سطح ظاهری هر یک از نمونه ها در ستون ۳ جدول ۴ ارائه شده است)، مقدار مقاومت پیوستگی نمونه های دارای آرماتور جانبی وصله را دست بالا (آلی،^[۱۴] تیقارت و همکاران،^[۱۱] هراجلی و ابونیاچ^[۱۲]) یا دست پایین با پراکندگی زیاد (نمونه های این نوشتار) تخمین می زند.

با توجه به آنچه بیان شد می توان نتیجه گرفت که روابط $ACI 440.1R-06$ ^[۴] و $CAN/CSA-S806-02$ ^[۹] در هر دو حالت نمونه های بدون آرماتور جانبی وصله و دارای آرماتور جانبی وصله، مقاومت پیوستگی بین بتن و آرماتور را در نمونه های تیری وصله دار به خوبی پیش بینی نمی کند. بنابراین برای استفاده از آرماتورهای FRP در تیرهای بتن آرمه ی وصله دار باید روابط طراحی جدیدی برای آنها ارائه شود. یکی از ساده ترین روش ها، اصلاح روابط آیین نامه یی سازه های مسلح فولادی برای FRP است.^[۱۵]

باعث افزایش مقاومت پیوستگی می شود و در تیرهای مسلح به آرماتورهای ماسه پاشی شده تغییر قابل توجهی در مقاومت پیوستگی ایجاد نمی کند.

۲. آرماتور جانبی وصله در نمونه های ساخته شده از آرماتورهای ماسه پاشی شده باعث تغییر شکل شکست از حالت شکافت به بیرون کشیدگی می شود. در نمونه های دارای شکل شکست بیرون کشیدگی، لغزش آرماتورها از درون بتن باعث افزایش شکل پذیری نسبت به نمونه ی بدون وصله می شود. در نمونه های آج دار حضور آرماتور جانبی وصله باعث محدود شدن ترک های شکافت به قسمت تحتانی تیر می شود.

۳. ضوابط آیین نامه یی $CAN/CSA-S806-02$ و $ACI 440.1R-06$ یک برآورد منطقی از مقاومت پیوستگی نمونه های تیری وصله دار ارائه نمی کنند. به طوری که نتایج محاسباتی حاصل از ضوابط آیین نامه یی در نمونه های بدون آرماتور جانبی وصله، دست بالا و در نمونه های دارای آرماتور جانبی وصله بسته به مشخصات سطح ظاهری آرماتور، دست بالا یا دست پایین برآورد می شوند.

تقدیر و تشکر

بخشی از هزینه های این طرح توسط شرکت فرآورده های سیمان شرق مشهد تأمین شده است. نویسندگان از همکاری صمیمانه ی مدیریت این شرکت، مسئول کنترل کیفیت بتن، قدردانی می کنند.

فهرست علائم

- A_f : سطح مقطع یک آرماتور کششی وصله شده؛
 C_x : پوشش جانبی آرماتور؛
 C_y : پوشش تحتانی آرماتور؛
 C_s : فاصله ی دو آرماتور طولی وصله شده؛
 E_{FRP} : مدول کشسانی آرماتور FRP؛
 E_s : مدول کشسانی فولاد؛
 f_u : مقاومت نهایی آرماتور کششی؛
 S : فاصله ی آرماتورهای جانبی وصله؛
 u_{test} : مقاومت پیوستگی آزمایشگاهی؛
 $\Delta_{0.5}$: تغییر مکان متناظر با ۰.۵٪ نیروی بیشینه روی شاخه ی نزولی منحنی بار - تغییر مکان؛
 Δ_y : تغییر مکان متناظر با نیروی بیشینه روی خط برآزش شده بر ناحیه ی صعودی منحنی بار - تغییر مکان.

۵. نتیجه گیری

این برنامه ی آزمایشگاهی با هدف بررسی اثر پارامترهای مهم مؤثر در رفتار پیوستگی آرماتورهای GFRP مانند: آرماتور جانبی وصله، قطر آرماتور، مقاومت فشاری بتن و مشخصات سطح ظاهری آرماتور انجام شده است. در بخش آزمایشگاهی این پژوهش، ۱۵ نمونه ی تیری وصله دار مسلح به آرماتورهای GFRP ساخته و آزمایش شد. به کمک این نتایج و نتایج آزمایش های سایر پژوهشگران، رابطه های موجود در آیین نامه های $CAN/CSA-S806-02$ و $ACI 440.1R-06$ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این مطالعه، این نتایج حاصل شد:

۱. تأثیر آرماتور جانبی در مقاومت پیوستگی نمونه های تیری وصله دار مسلح به آرماتورهای GFRP به مشخصات سطح ظاهری آرماتور وابسته است. به طوری که آرماتور جانبی وصله در تیرهای وصله دار مسلح به آرماتورهای آج دار

پانویس ها

1. fiber reinforced polymer rebar
2. glass fiber reinforced polymer

3. ribbed
4. sand coat
5. splitting
6. pull-out
7. load cell

8. data logger
9. linear variable displacement transducer

منابع (References)

1. Okelo, R. and Yuan, R. "Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete", *Journal of Composites for Construction*, **9**(3), pp. 203-213 (2005).
2. Mosley, C.P., Tureyen, A.K. and Frosch, R.J. "Bond strength of nonmetallic reinforcing bars", *ACI Structural Journal*, **105**(5), pp. 634-642 (2008).
3. Harajli, M. and Abouniaj, M. "Bond performance of GFRP bars in tension: Experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines", *Journal of Composites for Construction*, **14**(6), pp. 659-668 (2010).
4. American Concrete Institute (ACI)., *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI 440.1R-06, Farmington Hills, Mich (2006).
5. Achillides, Z. and Pilakoutas, k. "Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions", *Journal of Composites for Construction*, **8**(2), pp. 173-81 (2004).
6. Aly, R. "Stress along tensile lap-spliced fiber reinforced polymer reinforcing bars in concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **34**(9), pp. 1149-1158 (2007).
7. Wambeke, B. and Shield, C. "Development length of glass fiber reinforced polymer bars in concrete", *ACI Structural Journal*, **103**(1), pp. 11-17 (2006).
8. Darwin, D., Tholen, M.L., Idun, E.K. and Zou, J. "Splice strength of high relative rib area reinforcing bars", *ACI Structural Journal*, **93**(1), pp. 95-107 (1996).
9. CAN/CSA S806-02 "Design and construction of building components with fiber reinforced polymers", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, 177 p. (2002).
10. Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Mukhopadhyaya, P. "Bond strength of glass FRP rebar splices in beams under static loading", *Construction and Building Materials*, **13**(7), pp. 383-392 (1999).
11. Esfahani, M.R. and Kianoush, M.R. "Development/splice length of reinforcing bars", *ACI Structural Journal*, **102**(1), pp. 22-30 (2005).
12. Cohn, M.Z. and Barlett, M. "Computer-simulated flexural tests of partially prestressed concrete sections", *ASCE Journal of Structural Division*, **108**(ST12), pp. 2747-2765 (1982).
13. Orangun, C.O., Jirsa, J.O. and Breen, J.E. "Reevaluation of test data on development length and splices", *ACI JOURNAL, Proceedings*, **74**(3), pp. 114-122 (1977).
14. Aly, R. "Experimental and analytical studies on bond behavior of tensile lap spliced FRP reinforcing bars in concrete", Ph.D Thesis, University of Sherbrook, Canada (2005).
15. Tepfers, R. and De Lorenzis, L. "Bond of FRP reinforcement in concrete", *Journal of Mechanics of Composite Materials*, **39**(4), pp. 447-496 (2003).