

تأثیر مقاومت بتن و چسبندگی FRP در رفتار تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با FRP

محمود نادری* (دانشیار)

شهریار وجدانی طباطبایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۴)
دوره ۲- ۳۱، شماره ۲/۱، ص. ۸۷-۹۶، (پاداشد فنی)

روش‌های مختلفی در زمینه‌ی مقاوم‌سازی مطرح هستند، که استفاده از ورق‌های FRP با استقبال رو به رشدی مواجه شده است. با توجه به اینکه سازه‌های بتنی نیازمند مقاوم‌سازی، مقاومت بتنی مختلفی دارند، ممکن است ورق‌های به‌کار گرفته شده رفتار متفاوتی داشته باشند. بدین منظور در این نوشتار، رفتار تیرهای مسلح بتنی تقویت شده با ورق‌های FRP، که بتن بستر آن‌ها مقاومت و چسبندگی مختلفی دارند، مورد بررسی قرار گرفته است. مقاومت چسبندگی FRP‌های به‌کار گرفته شده، با استفاده از روش جدید «پیچش» اندازه‌گیری و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با نتایج حاصل از مدل‌سازی این تیرها در نرم‌افزار ABAQUS مقایسه شده‌اند. نتایج حاصله بیان‌گر آن است که با افزایش مقاومت فشاری بتن و مقاومت چسبندگی FRP به بتن، میزان بار نهایی تحمل شده توسط تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با FRP‌ها افزایش می‌یابد.

naderi-m@ikiu.ac.ir
shahriarvt@yahoo.com

واژگان کلیدی: FRP، مقاومت بتن، تیر مسلح بتنی، رفتار خمشی، چسبندگی.

۱. مقدمه

اما به منظور شناخت هر چه بهتر این روش و اشراف پیدا کردن به رفتار دقیق آن، همواره مسائلی از جمله نحوه‌ی تأثیر مقاومت بتن بستر و به‌طور دقیق‌تر مقاومت سطحی آن در رفتار المان مقاوم‌سازی شده و ورق‌های FRP مورد پرسش بوده‌اند. در این مطالعه نمونه‌های تیر بتن آرمه با مقاومت‌های بتن متفاوت ساخته شده و با استفاده از روش «پیچش»، مقاومت سطحی و مقاومت چسبندگی نوارهای FRP به بتن بستر اندازه‌گیری شده‌اند و میزان باربری و تغییرشکل‌های آن‌ها نیز به دست آمده است.

پژوهش‌های فراوانی با زمینه‌ی به‌کارگیری FRP در المان‌های مختلف انجام شده است، که با توجه به موضوع این پژوهش، بعضی از دست‌آوردهای آن‌ها در خصوص تیرهای بتنی مسلح به صورت اجمالی مرور شده است. از سال ۱۹۸۲، صفحات FRP چسبیده در وجه خارجی عضو به‌طور موفقیت‌آمیزی در تیرهای بتنی به‌کار رفته است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد شده است که لمینت‌های CFRP می‌توانند جایگزین صفحات فولادی شوند، که صرفه‌ی اقتصادی ناشی از سادگی اجرای این روش از مزیت‌های آن بوده است.^[۸] در پژوهش دیگری نیز از صفحات FRP برای مقاوم‌سازی تیر بتنی استفاده شده است. این برنامه‌ی آزمایشگاهی شامل آزمایش یک سری تیرهای مستطیلی با عرض ۳۰۰ میلی‌متر، عمق ۲۵۰ میلی‌متر و طول ۲ متر بود. تیرهای مقاوم‌سازی شده، ضخامت‌های مختلفی از نوار CFRP را شامل بودند. نتایج آزمایش، صحت فرضیه‌ی سازگاری کرنش در آنالیز مقطع عرضی را تأیید کرده است.^[۹] همچنین رفتار خستگی یک تیر مقاوم‌سازی شده با CFRP نیز مطالعه شده است. تیرها با همان ابعاد نمونه‌های

الیاف پلیمری مسلح چسبیده به صورت خارجی جهت مقاوم‌سازی و ترمیم سازه‌های بتنی موجود از حدود سال ۱۹۸۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و تعداد پروژه‌هایی که از الیاف پلیمری مسلح در سراسر جهان استفاده می‌کنند، به‌طور چشمگیری از ۱۰ سال پیش تاکنون افزایش یافته است.^[۱] اعضاء سازه‌ی، که توسط الیاف پلیمری مسلح چسبیده به صورت خارجی مقاوم‌سازی می‌شوند، عبارت‌اند از: تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارها، اتصالات، کوره‌ها و دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبد‌ها، تونل‌ها، سیلواها، لوله‌ها و خرپاها.^[۲] الیاف پلیمری مسلح همچنین برای تقویت سازه‌های بتنی، چوبی، فولادی و چدنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.^[۳] این روش با جایگزینی الیاف پلیمری مسلح به جای تقویت‌کننده‌های دیگر مانند صفحات فولادی و پوشش‌های بتنی شکل گرفته است.^[۴] دلیل اینکه کامپوزیت‌ها با استقبال خوبی روبرو شده‌اند را می‌توان به‌طور خلاصه بیان کرد: مصونیت در برابر خوردگی، وزن کم (حدود یک چهارم فولاد)، کاربرد آسان‌تر در فضای محدود، عدم نیاز به داربست، کاهش هزینه‌ی مربوط به کارگر، مقاومت کششی خیلی بالا، سختی مناسب برای ملزومات طراحی، ظرفیت تغییرشکل زیاد، تنوع در ابعاد و هندسه.^[۵] به‌طور کلی رفتار کامپوزیت‌ها کوشان خطی است، که تغییرشکل خمیری زیادی نخواهند داشت و در نتیجه با وجود افزایش شکل‌پذیری عضو مقاوم‌سازی شده با FRP، رفتار آن هنگام شکست ترد است و علائم آگاهی‌دهنده‌ی شکست، که خود به نوعی از فوائد سازه‌های بتنی محسوب می‌شود، ظاهر نخواهد شد.^[۶]

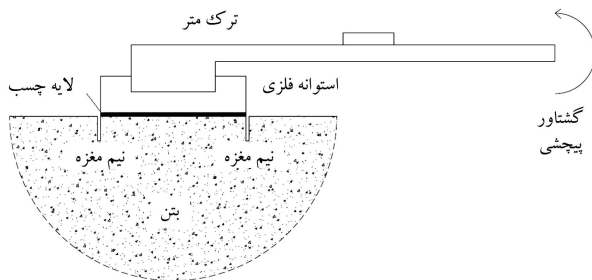
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۱، پذیرش ۱۳۹۲/۵/۱۲.

آزمایش بارگذاری استاتیکی، با یک نوار 3×200 میلی‌متر از صفحه‌ی ترکیبی شیشه/کربن بدون مهار انتهایی بوده‌اند و نتایج نشان داده است که صفحه‌ی ترکیبی می‌تواند پس از گسیختگی ناشی از خستگی آرماتورها مقاومت کند.^[۱۳] همچنین در خصوص تأثیر دما در 10° سیکل ذوب و یخ از $25^\circ +$ تا $25^\circ -$ سانتی‌گراد روی تیر مقاوم‌سازی شده با لمینت CFRP مطالعاتی انجام شده است، که حاکی از آن است که هیچ تأثیر مضر در ظرفیت خمشی اتفاق نمی‌افتد.^[۱۴] در مطالعه‌ی دیگری نیز روندهای تحلیل مشابهی برای پیش‌بینی سختی خمشی و مقاومت لمینت FRP تیرهای بتنی انجام شده است، که صحت نتایج فقط در تیرهایی که تحت خمشی گسیخته شده‌اند، مورد تأیید قرار گرفته است.^[۱۵] همچنین پژوهشگران دیگری رفتار سازه‌ی تیرهای بتنی مسلح مقاوم‌سازی شده با لمینت GFRP را مطالعه کرده‌اند و نتایج آزمایش آنها نشان داده است که آماده‌سازی سطح بتن و انتخاب چسب اهمیت بالایی دارد. و نیز به این نتیجه رسیده‌اند که به‌طور مشخص مقاوم‌سازی با لمینت‌های FRP چسبیده در وجه خارجی برای تیرهای با نسبت آرماتور کم مؤثر خواهد بود.^[۱۶] پژوهشگر دیگری نیز آزمون خستگی روی تیر بتنی مسلح مقاوم‌سازی شده با لمینت FRP را انجام داده است، که در آن تیر در ۶ نقطه‌ی تحت بارگذاری آزمون شده است که از محدوده‌ی بار خستگی واقعی، $10/7$ میلیون سیکل بارگذاری انجام شده و عملکرد بسیار خوب لمینت‌های FRP را در مقاومت خستگی نشان داده است.^[۱۷] وی همچنین روشی برای پیش‌تنبه کردن لمینت‌ها جهت افزایش بار سرویس سازه ارائه کرده و به این نتیجه رسیده است که تغییر شکل برشی بین ترک‌ها در اعضاء بتن مسلح می‌تواند به جدایشگی پیش‌رس لمینت‌ها منجر شود.^[۱۸]

بهبودی مواد و مصالح جایگزین برای تعمیر و مرمت این‌گونه سازه‌ها به‌کار گرفته شود.^[۲۱] از جمله امتیازات این روش می‌توان به سادگی روش، ارزانی و سادگی ابزار به‌کار گرفته‌شده، کم‌هزینه بودن آن، آسیب بسیار ناچیز به‌جا مانده و عدم نیاز به متخصص و یا نیروی ماهر اشاره کرد.^[۲۲] در این آزمون، همان‌طور که در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است، یک استوانه‌ی فلزی با قطر ۴ و ارتفاع $2/5$ سانتی‌متر بر روی سطحی که قرار است مقاومت‌اش تعیین شود چسبانده و پس از سفت و سخت شدن، چسب اپوکسی به‌کار گرفته‌شده با یک گشتاورسنج معمولی درون حفره‌ی از پیش تعبیه‌شده‌ی استوانه‌ی فلزی قرار داده می‌شود، با وارد آوردن تدریجی گشتاور پیچشی، استوانه‌ی یادشده در محل چسبانده‌شده، ماده‌ی موردنظر را به حالت شکست در می‌آورد و مقاومت موردنظر به‌دست می‌آید.^[۲۳]

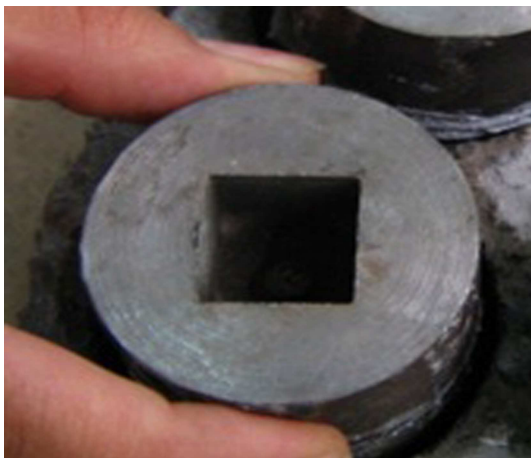
روش پیچش مبدئی بر رابطه‌ی اصلی پیچش است (رابطه‌ی ۱)، که در مباحث



شکل ۱. روش آزمون «پیچش».



شکل ۲. انجام روش آزمون «پیچش».



شکل ۳. استوانه‌ی فلزی مورد استفاده در روش «پیچش».

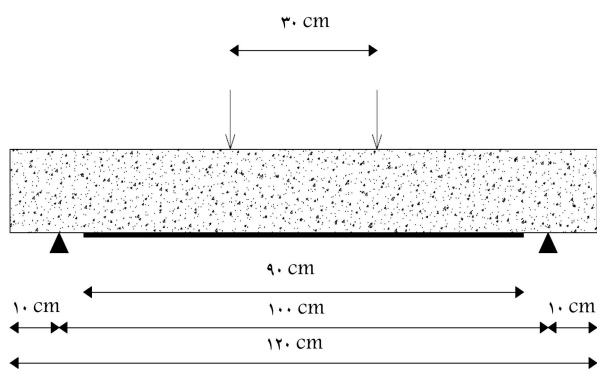
لذا با توجه به وجود خلأ و نبود اطلاعات لازم در زمینه‌ی موضوع این پژوهش بر آن شدیم تا با انجام مطالعه‌ی شامل نتایج آزمایشگاهی و نیز نتایج عددی جهت حاصل‌شدن اطمینان از صحت آن‌ها، قدمی در راستای روشن‌کردن ابهامات موجود و شناخت هر چه بیشتر آن‌ها برداشته شود.

۲. تعیین مقاومت چسبندگی

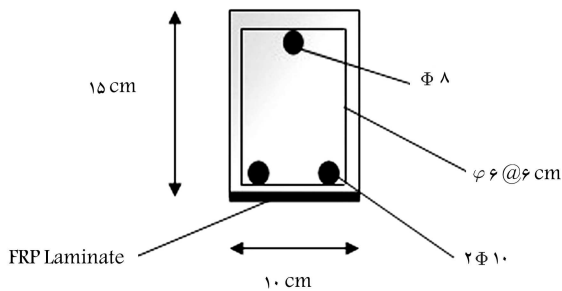
از آنجا که برای مطالعه‌ی رفتار و دوام و همچنین برای جایگزینی مناسب مواد و مصالح در تعمیر و مرمت، آگاهی از مقاومت مصالح به‌کار گرفته‌شده در سازه‌ها اهمیت ویژه‌ی دارد و با توجه به اینکه شرایط رایج در استفاده از روش‌های آزمایشگاهی با شرایط محیطی و بهره‌برداری این سازه‌ها کاملاً متفاوت هستند،^[۱۷] در سال‌های اخیر کوشش‌های زیادی برای ابداع روش‌های درجا به عمل آمده است، ولی در اغلب این روش‌ها، پارامترهایی به‌صورت غیرمستقیم اندازه‌گیری و با استفاده از روابطی، مقاومت مصالح موردنظر تخمین زده می‌شود.^[۱۸] روش «پیچش» که در این مطالعات مورد استفاده واقع شده است، روشی است که می‌توان با به‌کارگیری آن مقاومت واقعی و درجای مصالح به‌کار گرفته‌شده و چسبندگی آن‌ها را در ساختمان‌ها، از جمله: بتن، ملات، آجر و سنگ‌های مصرفی را به‌طور مستقیم به‌دست آورد.^[۱۹] به این دلیل عبارت «به‌طور مستقیم» به‌کار می‌رود که قسمت بسیار کوچکی از مصالح موردنظر شکسته می‌شود و مقاومت آن به‌دست می‌آید.^[۲۰] از بررسی‌های آزمایشگاهی و مطالعات درجای به‌عمل آمده، روش «پیچش» به‌عنوان روشی کم هزینه و مطمئن (دقت بالا) برای اندازه‌گیری مقاومت درجای مصالح در ساختمان‌ها پیشنهاد می‌شود.^[۲۱] همچنین، این روش می‌تواند با دقت قابل قبولی برای بررسی رفتار و دوام مصالح به‌کاررفته در بناها و نیز برای انتخاب

۴. کارهای آزمایشگاهی

برای بررسی نحوه تأثیر مقاومت سطحی بتن در عملکرد ورق‌های FRP، تیرهای بتنی مسلح با ابعاد $۱۰۱۵ \times ۱۰۲ \times ۱۷$ متر با مقاومت‌های فشاری طراحی ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ مگاپاسگال در نظر گرفته شده‌اند، که از ورق‌های CFRP برای مقاوم‌سازی آنها استفاده شده است (شکل ۵). ابعاد تیرها به نحوی انتخاب شده است که رفتار خمشی لازم برای بررسی موضوع پژوهش در آن اتفاق بیافتد، یعنی عضو نیاز به تقویت خمشی داشته باشد و همچنین شرایط دستگاه موجود در آزمایشگاه جهت انجام آزمون خمش، به‌طور هم‌زمان لحاظ شده باشد. همچنین انتخاب قطر و نحوه چیدمان آرماتورها به‌گونه‌ای انجام شده است که عضو نیاز به تقویت خمشی داشته باشد. با توجه به اینکه در این مطالعه اثر مقاومت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد، لذا قطر، طول و چیدمان آرماتورها در تمامی رده‌های مقاومتی ثابت نگه داشته شده است. ورق‌های FRP نیز در نواحی که تیراز لحاظ خمش ضعیف بوده است، به‌گونه‌ای که از تکیه‌گاه‌ها ۵ سانتی‌متر فاصله داشته باشد، نصب شده است. برای هر رده‌ی مقاومتی، ۲ تیر مقاوم‌سازی شده، یک تیر شاهد و ۲ نمونه‌ی مکعبی ساخته شده است. ابعاد مقاطع و آرماتورگذاری تیرهای مورد آزمایش در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. طرح اختلاط بتن‌های موردنظر با استفاده از آئین‌نامه‌ی BS به‌دست آمده است، که خلاصه‌ی نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. سیمان مورد استفاده در ساخت بتن از نوع سیمان معمولی تپ ۲، که در ساخت و سازهای رایج مصرف می‌شود، انتخاب شده است. به دلیل کوچک بودن مقطع در نظر گرفته شده، بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگدانه و اسلامپ بتن تازه به نحوی در نظر گرفته شده است که بتن در قسمت‌های متراکم شبکه بتواند به‌راحتی قرار گیرد و از ایجاد خلل و فرج جلوگیری به‌عمل آید. برای این منظور بیشینه‌ی اندازه‌ی



شکل ۵. نمای کلی تیر موردنظر.



شکل ۶. مقطع تیر موردنظر.

$$\tau = \frac{TR}{J} \quad (۱)$$

که در آن، τ تنش برشی، T گشتاور پیچشی، R شعاع استوانه‌ی فلزی، $J = \frac{\pi R^4}{2}$ ممان اینرسی قطبی.

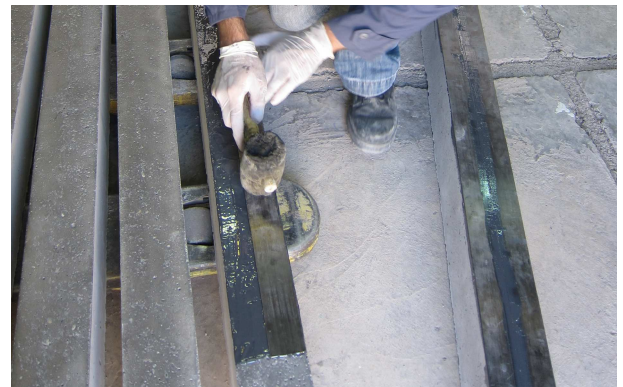
با انجام روش پیچش و قرانت گشتاور وارده، به کمک رابطه‌ی ۱، تنش برشی به‌دست می‌آید. از آنجایی که پیچش، همان برش خالص است، طبق مفاهیم مربوط به دایره‌ی موهر، تنش اصلی نیز همان تنش برشی خواهد بود. [۲۶] بدین ترتیب می‌توان تنش وارده را استحصال کرد.

۳. ورق‌های FRP به‌کار گرفته شده

به‌طور معمول، یک ماده‌ی کامپوزیت را به‌صورت مخلوطی فیزیکی در مقیاس میکروسکوپی از دو یا چند ماده‌ی مختلف تعریف می‌کنند که این مواد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده‌اند و مرز مشخصی را با یکدیگر تشکیل می‌دهند. این مخلوط در مجموع و با توجه به برخی معیارها، خواصی بهتر از هر یک از اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی خود را دارند. در کامپوزیت‌ها، این دو ناحیه‌ی متمایز وجود دارد:

- فاز پیوسته (ماتریس)؛
- فاز ناپیوسته (تقویت‌کننده).

در یک کامپوزیت، به‌طور کلی الیاف، عضو بارپذیر اصلی سازه هستند، در حالی که ماتریس آنها را در محل و آرایش مطلوب نگه می‌دارد و به‌عنوان یک محیط منتقل‌کننده‌ی بار بین الیاف عمل می‌کند، به‌علاوه آنها را از آسیب‌های محیطی در اثر افزایش دما یا رطوبت حفظ می‌کند. شکل‌گیری FRP به‌صورت قراردادن الیاف پیوسته در یک رزین است، که این رزین نقش نگهداری و به‌هم مرتبط‌کردن این الیاف جداگانه را ایفا می‌کند. الیاف متداول مورد استفاده عبارت از کربن، شیشه و آرامید هستند. [۲۷] بسته به نوع الیاف مصرفی، FRP به ۳ نوع GFRP (الیاف شیشه)، CFRP (الیاف کربن) و AFRP (الیاف آرامید) دسته‌بندی می‌شود. [۵] در شکل ۴، نحوه‌ی چسباندن یک نمونه‌ی CFRP نشان داده شده است.



شکل ۴. نمونه‌ی از تیرهای تقویت شده با FRP.

جدول ۱. خلاصه‌ی نتایج طرح‌های اختلاط برای مقاومت‌های موردنظر (kg/m²).

مقاومت طراحی	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵
سیمان	۳۶۲	۴۳۹	۵۱۰	۵۹۵	۷۱۴
آب	۲۱۵	۲۱۷	۲۱۸	۲۲۰	۲۲۲
ماسه	۹۸۷	۸۹۳	۸۲۱	۷۶۲	۶۸۸
شن	۷۷۶	۷۹۲	۷۵۸	۷۶۲	۷۱۶

جدول ۲. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سن ۱۱۰ روز (Mpa).

مقاومت مشخصه	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵
مقاومت حاصله	۳۶	۴۲	۵۳	۵۸	۶۳



شکل ۷. محل نصب استوانه‌ی فلزی جهت اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی به روش «پپچش».

سنگدانه ۱۰ میلی‌متر و اسلامپ بتن ۷۵ میلی‌متر لحاظ شده است. همچنین برای به‌دست‌آوردن بتنی با کیفیت مناسب از میز لرزاننده جهت ویبره‌کردن تیر استفاده شده است. ساخت نمونه‌های مکعبی به‌منظور کنترل مقاومت فشاری و همچنین اطمینان از طرح‌های اختلاط مدنظر بوده است، که مقاومت فشاری آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

پس از ساخت تیرهای بتن آرمه‌ی موردنظر، مرحله‌ی عمل‌آوری با قراردادن آن‌ها داخل حوضچه‌ی آب انجام شده است. برای چسباندن ورق‌های FRP روی سطح تیرها، ابتدا لایه‌های کم مقاومت سطح بتن توسط برس سیمی برداشته و گرد و خاک حاصل توسط پارچه‌ی مرطوب از بین برده شده است، تا سطح بتن جهت استفاده از چسب اپوکسی رزین که مشخصات آن در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است، آماده شود. در مرحله‌ی بعد، ورق‌های FRP با مشخصات آورده شده در جدول ۵ توسط چسب اپوکسی رزین به بتن چسبانده می‌شود.

برای به‌دست‌آوردن مقاومت چسبندگی ورق FRP به بتن بستر تیرهای مقاوم‌سازی شده، در دو انتهای قسمتی که ورق وجود دارد (شکل ۷). از روش «پپچش» استفاده شده است، که برای این منظور باید ابتدا پیش از چسباندن استوانه‌های فلزی در محل‌های موردنظر، نیم مغزه‌هایی با عمق ۵ میلی‌متر ایجاد شوند.

جدول ۳. مشخصات رزین مصرفی.

روش آزمایش	مقدار	واحد	خصوصیات
ASTM D۱۶۵۲	۱۸۵ - ۱۹۲	g/eq	وزن معادل اپوکسید ^۱
ASTM D۴۴۵	۱۱۰ - ۱۵۰	P	گران روی ^۲ (۲۵°C)
ASTM D۱۵۴۴	۱ max.	Gardner	رنگ
—	۱/۱۶	g/ml	تراکم (۲۵°C)
—	مایع شفاف		شکل ظاهری
—	۰/۰۳	mm Hg	فشار بخار (۷۷°C)
—	۱/۵۷۳		ضریب شکست (۲۵°C)
—	۰/۵	BTU/lb/°F	گرمای ویژه
SMS ۲۰۲۶	mmol/kg	mmol/kg	اجزاء اپوکسی
—	۱۸۴ - ۱۹۰	g	جرم مولار اپوکسی*
ASTM D۴۴۵	۱۲ - ۱۴	Pa.s**	گران روی (۲۵°C)
ASTM D۱۲۰۹	۱۰۰ max	Pt-Co	رنگ
SMS ۱۳۴۷	۱/۱۶	kg/L	تراکم (۲۵°C)
ASTM D۹۳	> ۱۵۰	°C	درجه‌ی اشتعال

ASTM D۱۶۵۲ (اجزاء اپوکسی در اپوکسی رزین - روش پیکاریک).

ASTM D۴۴۵ (گران روی جنبشی - تعیین گران روی مایعات توسط لزجت سنج Ubbelohde).

* تعداد گرم‌های رزین شامل یک گرم معادل اپوکسید.

** ۱ Pa.s = ۱۰ poise

جدول ۴. مشخصات عمل‌آورنده‌ی رزین مصرفی.

روش آزمایش	مقدار	واحد	خصوصیات
ASTM D۲۸۹۶	۸ - ۶	% m/m	اجزاء نیتروژن پایه
ASTM D۴۴۵	۰/۷ - ۰/۵	Pa.s	گران روی (۲۵°C)
ASTM D۱۵۴۴	۲ max	—	رنگ گاردنر
calculated	۱۰۲ - ۱۰۶	g/eq	وزن معادل هیدروژن
calculated	۵۸	phr	نسبت پیشنهادی
ASTM D۷۹۲	۱/۰۴	kg/l	تراکم (۲۵°C)

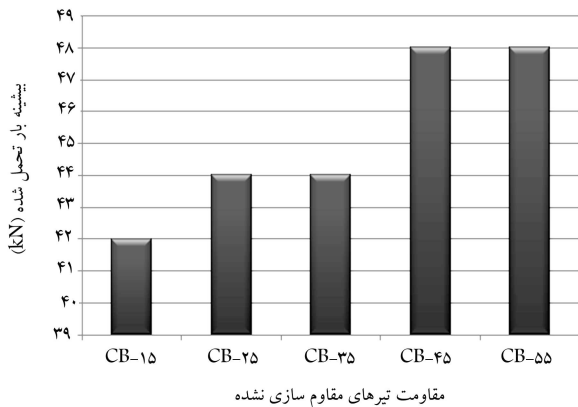
نمونه‌های تیر توسط دستگاه آزمون خمش، با سرعت بارگذاری ثابت و تا مرحله‌ی شکست و افت شدید در توانایی تحمل بار تحت بارگذاری، که مستقیماً روی بتن اعمال می‌شد، قرار گرفتند و هم‌زمان با بارگذاری نتایج مربوط به تغییر مکان وسط دهانه ثبت شده است.

۵. نتایج به‌دست‌آمده و تحلیل آن‌ها

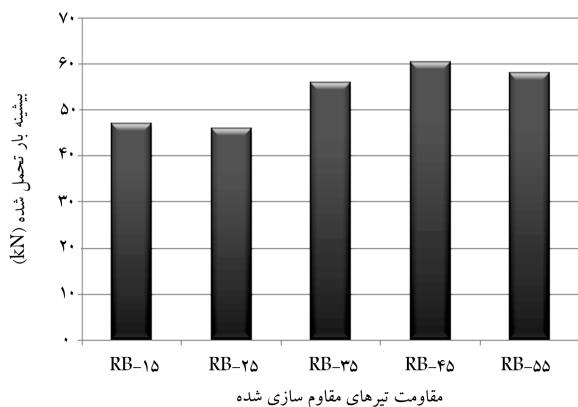
در این قسمت تیرهای مقاوم‌سازی‌نشده را CB و تیرهای مقاوم‌سازی‌شده را RB نام‌گذاری کرده‌ایم. برای مثال تیر کنترل مربوط به مقاومت ۱۵ MPa را CB-۱۵ نشان دادیم.

جدول ۵. مشخصات ورق CFRP مصرفی.

خصوصیات	عرض (mm)	ضخامت (mm)	مدول کشسانی کششی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	درصد کرنش نهایی الیاف ناشی از کشش
سخت CFRP	۵۰	۱٫۲	۱۶۵۰۰۰	۳۰۵۰	۱٫۷



شکل ۸. بررسی میزان تحمل بار در تیرهای مقاوم‌سازی نشده با مقاومت‌های مختلف.



شکل ۹. میزان تحمل بار در تیرهای مقاوم‌سازی شده با مقاومت‌های مختلف.

در دو مرحله قبل، که بارهای تحمل شده توسط تیرهای با الیاف مسلح‌کننده و بدون آن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌ایم، خیز تیرها نیز ثبت شده است که رفتار مشاهده شده را در این بخش بحث کرده‌ایم. در تیر بدون تقویت‌کننده، گسیج مربوط به ثبت خیز برای تیر با مقاومت فشاری ۱۵ MPa عدد ۲۲٫۳۳ میلی‌متر را نشان می‌داد. در تیر با مقاومت فشاری ۲۵ MPa خیز به ۲۰٫۰۸ میلی‌متر رسیده بود، که ۲٫۲۵ میلی‌متر کمتر است. تیر با مقاومت فشاری ۳۵ MPa خیزی معادل ۱۸٫۷۸ میلی‌متر داشت، که نسبت به تیر با مقاومت فشاری ۲۵ MPa ۶٫۵٪ کاهش داشته است. در نمونه با مقاومت فشاری ۴۵ MPa، ۱۷٫۲۴ میلی‌متر خیز داشته‌ایم که نسبت به رده‌ی مقاومتی قبلی ۵/۵٪ کمتر بوده است. در نمونه‌ی آخر، که مربوط به مقاومت فشاری ۵۵ MPa است، خیز حاصل از اعمال بار ۱۸٫۳۳ میلی‌متر بود، که نسبت به رده‌ی مقاومت قبلی شاهد افزایش تغییرشکل بودیم.

با مشاهده‌ی تغییرمکان به‌وجودآمده در تیرهای مقاوم‌سازی نشده (شکل ۱۰)، روند کلی آنکه نزولی است، قابل مشاهده است؛ یعنی با افزایش مقاومت فشاری

۱.۵. توانایی تحمل بار و تغییرشکل حاصله

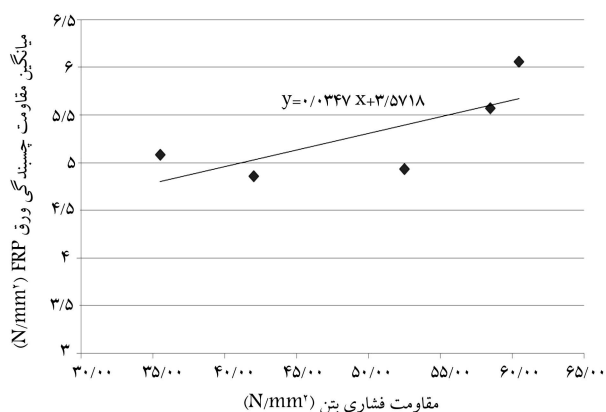
در این بخش تیرهای بتنی مسلح بدون الیاف تقویت‌کننده و با الیاف تقویت‌کننده را از لحاظ میزان تحمل بار وارده و خیز به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار داده‌ایم، که برای این منظور آن‌ها را داخل دستگاه مربوط به آزمون خمش قرار دادیم و با نصب گیج‌های مربوط به ثبت خیز نمونه، بارگذاری را شروع کردیم. به‌طور کلی هدف ما از انجام مقایسه میان میزان بار قابل تحمل و در مرحله‌ی بعد خیزهای به‌وجودآمده، به‌دست آوردن روند تغییرات آن‌ها متناسب با افزایش مقاومت فشاری بوده است. این تذکر لازم است که نتایج مربوط به تیرهای مقاوم‌شده، میانگین نتایج حاصل از دو تیر نمونه در هر رده‌ی مقاومتی است.

در ابتدا تیرهای بتنی مسلح بدون الیاف تقویت‌کننده را بررسی کردیم. با توجه به شکل ۸، نیروی قابل تحمل توسط تیرهای مقاوم‌سازی نشده با مقاومت فشاری بتن ۱۵ MPa، ۴۲ KN است. در تیر با مقاومت فشاری بتن ۲۵ MPa، این عدد به ۴۴ KN رسید، یعنی افزایشی معادل ۵٪. با افزایش مقاومت فشاری بتن به ۳۵ MPa، بار قابل تحمل تغییری از خود نشان نداد. مجدداً مقاومت فشاری را افزایش دادیم و آن را به ۴۵ MPa رساندیم؛ بار تحمل شده توسط تیر نسبت به آخرین رده‌ی مقاومت ۴ KN افزایش یافت و به ۴۸ KN رسید. در آخرین رده‌ی مقاومت بتن، که مقاومت فشاری ۵۵ MPa است، با انجام آزمون خمش، بار قابل تحمل توسط تیر مشابه مقدار مقاومت فشاری ۴۵ MPa قرانت شد و تغییر محسوسی نداشت. با نگاهی به روند افزایش مقاومت فشاری بتن تیرهای مسلح می‌توان گفت به‌طور کلی شاهد روندی صعودی بوده‌ایم، اما در فواصلی این روند ثابت و مجدداً رو به افزایش گذاشته است.

در مرحله‌ی بعد، نوبت به تیرهای بتنی با الیاف تقویت‌کننده می‌رسد. پس از قراردادن آن‌ها و اعمال بار، نتایج مربوط قرانت و ثبت شد. تیر با مقاومت فشاری بتن ۱۵ MPa باری معادل ۴۷ KN تحمل کرد، که نسبت به تیر مقاوم‌نشده چیزی حدود ۱۲٪ بیشتر است. در تیر با مقاومت فشاری ۲۵ MPa، بار قابل تحمل به ۴۶ KN رسید که نسبت به رده‌ی مقاومت قبلی ۱ KN کمتر و نسبت به تیر مقاوم‌نشده با همان مقاومت فشاری، ۵٪ بار بیشتر تحمل کرده است. تیر بعدی مربوط به رده‌ی مقاومت ۳۵ MPa است، بیشینه‌ی بار تحمل شده توسط آن ۵۶ KN بوده است، که نسبت به مقاومت قبلی حدود ۲۲٪ بیشتر و نسبت به تیر مقاوم‌نشده با همان مقاومت فشاری، ۲۷٪ بیشتر بوده است. بار مربوط به تیر با مقاومت فشاری بتن ۴۵ MPa، ۶۰٫۵ KN ثبت شد که نسبت به رده‌ی پائین‌تر ۴٫۵ KN و نسبت به تیر مقاوم‌نشده نیز ۱۲٫۵ KN بیشتر قرانت شده است. در تیر پایانی که مربوط به مقاومت ۵۵ MPa است، بار نشان داده شده توسط دستگاه ۵۸ KN است، که نشان‌دهنده‌ی کاهش در بار قابل تحمل است. با نگاهی کلی شاهد آن بودیم که در تیرهای مقاوم‌سازی شده (شکل ۹)، رفتار به‌گونه‌ی است که با افزایش مقاومت فشاری، روند بار قابل تحمل، به‌صورت کلی صعودی بوده است. با مقایسه‌ی بین دو تیر مقاوم‌سازی شده و مقاوم‌سازی نشده نیز می‌توان گفت در هر دوی آن‌ها نیروی قابل تحمل به‌صورت کلی با افزایش مقاومت فشاری بتن روند رو به افزایش داشته است.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی خیز تیرهای مقاوم‌سازی شده.

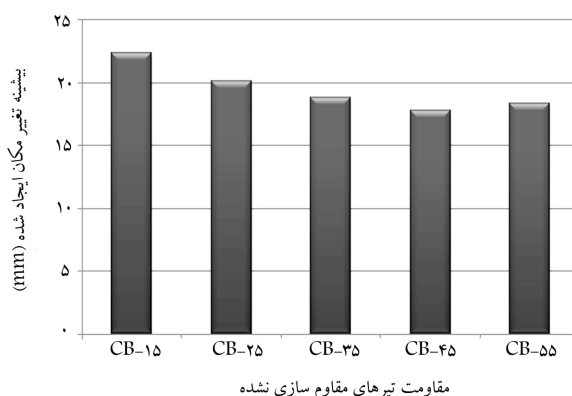


شکل ۱۳. حساسیت مقاومت چسبندگی ورق FRP نسبت به تغییر مقاومت فشاری بتن.

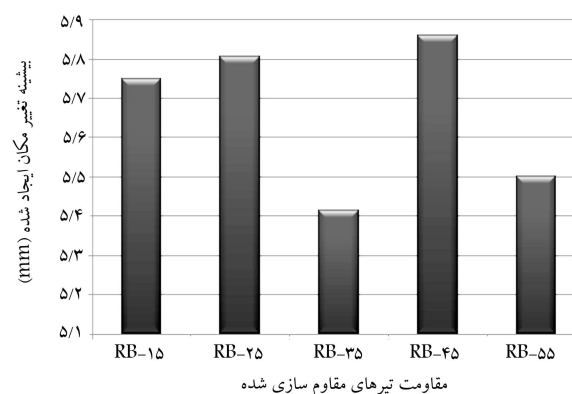
۲.۵. مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP به‌کار گرفته شده

در بخش قبل اثر مقاومت فشاری بتن تیرهای مسلح در میزان باربری و خیز به‌وجود آمده را بررسی کرده‌ایم و در این بخش می‌خواهیم اثر مقاومت فشاری در مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP را مورد بحث قرار دهیم. همان‌طور که در بخش‌های ابتدایی این نوشتار اشاره شده است، برای به‌دست‌آوردن مقاومت چسبندگی از روش پیش‌گرفته‌ایم استفاده کرده‌ایم. ابتدا در محل انجام آزمون پیش‌گرفته‌ایم که نواحی انتهایی تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با FRP بود، توسط دستگاه کرگیری نیم مغزه‌هایی ایجاد کردیم. با چسباندن استوانه‌های فلزی و سپری شدن زمان لازم جهت گرفتن چسب، توسط ترک‌گشاها پیچشی اعمال شده است، که منجر به جدا شدن استوانه شده است. گشتاور مربوط را قرائت و با استفاده از روابط تنش‌تنش وارده به‌دست آمده است.

برای تیر با مقاومت فشاری 15 MPa ، مقاومت چسبندگی $5,08 \text{ MPa}$ ثبت شده است. در تیر با مقاومت فشاری 25 MPa ، مقاومت چسبندگی $4,86 \text{ MPa}$ به‌دست آمده است که نشان‌دهنده‌ی کاهش آن به میزان $5,22 \text{ MPa}$ است. با ادامه‌ی این روند نوبت به تیر با مقاومت فشاری 35 MPa رسید که مقاومت چسبندگی آن $4,93 \text{ MPa}$ شد و نسبت به رده‌ی مقاومت قبلی افزایش خیلی کمی داشت. در تیر با مقاومت 45 MPa ، مقاومت چسبندگی بین ورق FRP و بتن به $5,57 \text{ MPa}$ رسید که نسبت به عدد مربوط به مقاومت فشاری 35 MPa ، 13% رشد داشته است. در انتها مقاومت چسبندگی تیر با مقاومت 55 MPa ، $6,06 \text{ MPa}$ ثبت شد که نسبت به رده‌ی قبلی $5,49 \text{ MPa}$ بیشتر بود. با توجه به روند قابل مشاهده در شکل ۱۳ می‌توان گفت مقاومت



شکل ۱۰. میزان تغییر مکان ایجادشده در تیرهای مقاوم‌سازی نشده با مقاومت‌های مختلف.

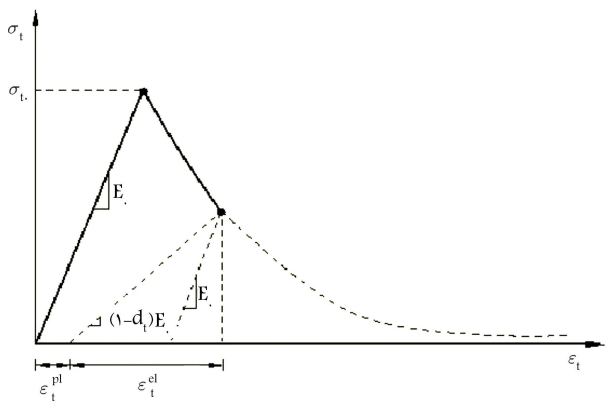


شکل ۱۱. میزان تغییر مکان ایجادشده در تیرهای مقاوم‌سازی شده با مقاومت‌های مختلف.

بتن، تغییر مکان حاصله به‌طور کلی در حال کاهش است.

در این بخش تغییر مکان‌های ثبت شده برای تیرهای مقاوم‌شده با پوشش FRP را مورد بررسی قرار داده‌ایم. در تیر با مقاومت فشاری 15 MPa خیزی معادل $5,75$ میلی‌متر داشتیم، که حدود یک چهارم خیز تیر مقاوم‌نشده است. تیر با مقاومت فشاری 25 MPa نیز خیز $5,81$ میلی‌متر داشت، که اختلاف آن با خیز تیر با مقاومت فشاری 15 MPa تقریباً کم است. خیز مربوط به تیر با مقاومت فشاری 35 MPa ، $5,42$ میلی‌متر است که نسبت به رده‌ی مقاومت قبلی 7% کمتر است. عدد ثبت شده برای مقاومت فشاری 45 MPa ، $5,86$ میلی‌متر است، که نشان‌دهنده‌ی صعود مجدد خیز حاصل از اعمال بار است. در تیر پایانی با مقاومت فشاری 55 MPa ، خیز مجدداً کاهش و به $5,5$ میلی‌متر رسیده است. تغییر مکان‌های به‌دست‌آمده در تیرهای مقاوم‌سازی شده (شکل ۱۱)، روندی متفاوت دارند و به‌طور کلی روند آن‌ها نوسانی خواهد بود، چون از الگوی خاص افزایش یا کاهش تبعیت نمی‌کنند (شکل ۱۲). با مقایسه‌ی بین دو تیر مقاوم‌سازی شده و نشده می‌توان گفت خیز حاصله در تیرهای مقاوم‌شده همواره کمتر از خیز تیرهای مقاوم‌نشده است.

به‌طور کلی پس از اعمال بارگذاری نمونه‌ها، با بررسی مود گسیختگی آن‌ها می‌توان این طور بیان کرد که گسیختگی تیرهای تقویت‌نشده در مود خمشی و گسیختگی تیرهای تقویت‌شده با کندن شدن ورق FRP از قسمت انتهایی تیر بتنی و در نتیجه کاهش شدید در توانایی تحمل بار بوده است.



شکل ۱۵. نمودار تنش - کرنش بتن تحت کشش.

۱.۶. رابطه‌ی سخت‌شدگی کششی

برای شبیه‌سازی کامل رفتار کششی بتن مسلح در ABAQUS، یک ارتباط تنش - کرنش بعد از گسیختگی برای بتن تحت کشش استفاده می‌شود، که سخت‌شدگی کششی، نرم‌شدگی کرنش و اندرکنش آرماتور با بتن را به حساب می‌آورد (شکل ۱۵). کرنش ترک خوردگی از رابطه‌ی ۲ بدست می‌آید:

$$\varepsilon_{ot}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_s} \quad (2)$$

که در آن، ε_t کرنش کششی کل، ε_{ot}^{el} کرنش کشسان متناظر برای ماده‌ی آسیب‌ندیده، E_s مدول یانگ، σ_t تنش.

ABAQUS، صحت منحنی آسیب را با استفاده از مقادیر کرنش خمیری ($\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$) مطابق رابطه‌ی ۳ بررسی می‌کند:

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_s} \quad (3)$$

که در آن، d_t پارامتر آسیب است.

مقادیر کرنش خمیری کششی منفی یا در حال کاهش، نشان‌دهنده‌ی منحنی‌های آسیب نادرست است، که ممکن است منجر به بروز پیغام خطا قبل از اینکه آنالیز صورت بگیرد، شود.

۲.۶. رابطه‌ی تنش - کرنش فشاری

کرنش غیرکشسان از رابطه‌های ۴ و ۵ به‌دست می‌آید (مطابق شکل ۱۶):

$$\varepsilon_{oc}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_s} \quad (4)$$

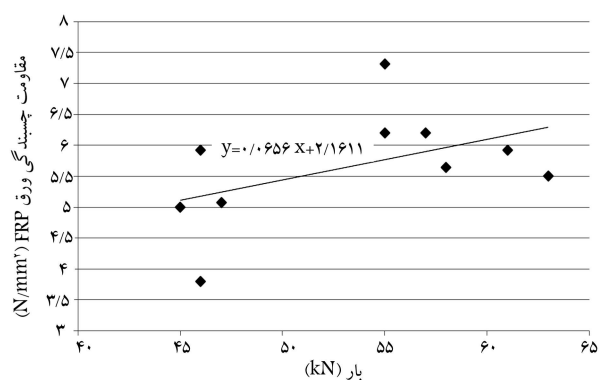
$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \quad (5)$$

که در آن، ε_c کرنش فشاری کل، و ε_{oc}^{el} کرنش کشسان متناظر با ماده‌ی آسیب‌ندیده هستند.

همچنین اندازه‌گیری‌های اصلاحی باید برای اطمینان از اینکه مقدار کرنش خمیری ($\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$) که از رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آید، نه منفی است و نه با افزایش تنش کاهش پیدا می‌کند.

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_s} \quad (6)$$

که در آن، d_c خصوصیات آسیب است.



شکل ۱۴. رابطه‌ی میان بیشینه‌ی بار تحمل‌شده و مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP.

چسبندگی بتن و ورق‌های FRP، با افزایش مقاومت فشاری بتن صعودی خواهد بود.

همچنین با انجام یک مقایسه بین بیشینه‌ی نیروهای تحمل‌شده و مقاومت چسبندگی (شکل ۱۴)، می‌توان گفت هر چقدر چسبندگی بیشتر شود، توان تیر در تحمل بار نیز بیشتر خواهد شد؛ که می‌توان این طور برداشت کرد که با افزایش چسبندگی، ظرفیت بیشتری از ورق‌های FRP به‌کار گرفته‌شده در اختیار ما قرار می‌گیرد که از لحاظ اقتصادی نیز صرفه‌ی بیشتری خواهد داشت.

۶. مدل‌سازی نتایج حاصله

نرم‌افزار ABAQUS مجموعه‌ی برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند است که مبتنی بر روش اجزاء محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارد. این نرم‌افزار مجموعه‌ی المان‌های بسیار گسترده‌ی دارد که هر نوع هندسه‌ی را می‌توان توسط آن‌ها به‌صورت مجازی مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت‌شده، فوم‌های فزنی و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد. [۲۸، ۲۷]

نرم‌افزار ABAQUS قابلیت شبیه‌سازی آسیب با استفاده از هر کدام از سه مدل ترک برای المان بتن مسلح را فراهم می‌سازد:

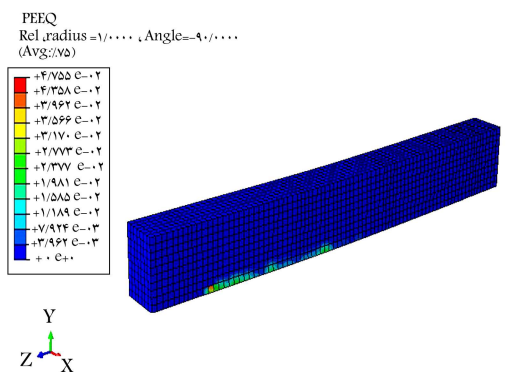
۱. مدل پخش ترک بتن؛

۲. مدل ترک ترد بتن؛

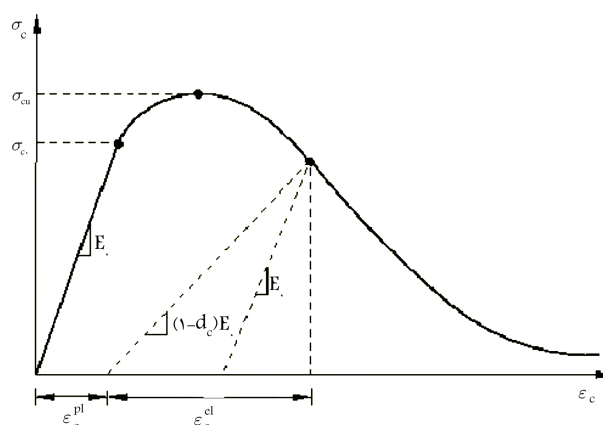
۳. مدل خمیری بتن آسیب‌دیده.

در روش سوم توانایی به نمایش گذاشتن رفتار غیرکشسان کامل بتن هم در کشش و هم در فشار شامل خصوصیات آسیب بتن وجود دارد. همچنین، این یگانه مدلی است که می‌تواند هم در ABAQUS/Standard و هم در ABAQUS/Explicit استفاده شود و بنابراین ما را قادر می‌سازد تا بتوانیم نتایج را میان این دو منتقل کنیم. بنابراین، توسعه‌ی یک مدل شبیه‌سازی آسیب مناسب با استفاده از این مدل می‌تواند برای آنالیز سازه‌های بتن مسلح تحت هر ترکیب بارگذاری شامل استاتیکی و دینامیکی مفید باشد.

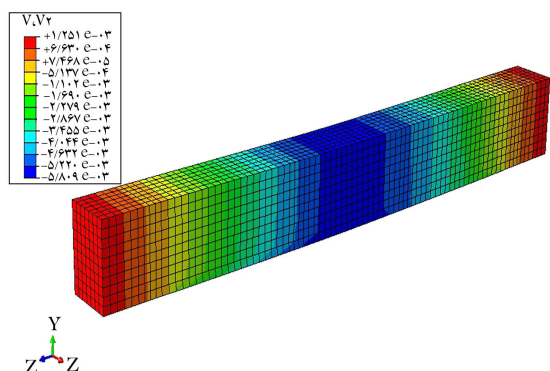
مدل خمیری آسیب‌دیده بتن فرض می‌کند که دو مکانیزم عمده‌ی گسیختگی شامل: ترک کششی و خوردشدگی فشاری وجود دارد.



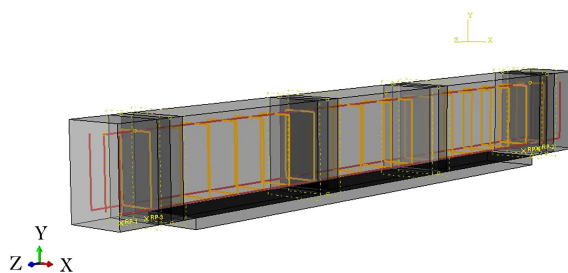
شکل ۱۸. کانتور کرنش خمیری معادل (PEEQ).



شکل ۱۶. نمودار تنش - کرنش بتن تحت فشار.



شکل ۱۹. کانتور جابجایی قائم (U2).



شکل ۱۷. نمای کلی مدل ساخته شده.

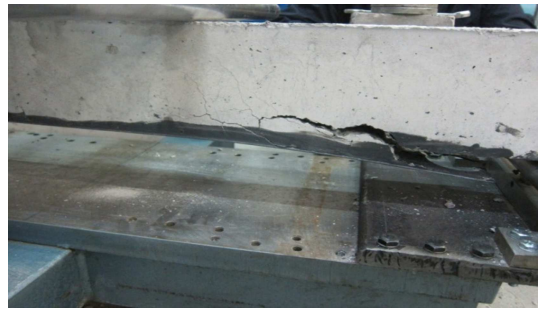
جهت صحت سنجی نتایج، تیر مقاوم‌سازی شده با مقاومت ۱۵ مگاپاسگال در نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی شده است. همان طور که در شکل ۱۷ مشاهده می شود، مدل از بتن، آرماتور طولی و عرضی و FRP تشکیل شده است. نوع المان هر کدام از آنها به ترتیب عبارت اند از: C3D4R از خانواده المان Solid، B31 از خانواده المان Beam و S4R از خانواده المان Shell. همچنین مش بندی انجام شده از نوع Structure است، که ابعاد المان ها به گونه یی تعیین شده است که هم نتایج دقت خوبی داشته باشند و هم زمان مربوط به تحلیل در نرم افزار منطقی باشد که به این شرح هستند: بتن ۰/۰۱۵، FRP ۰/۰۲، آرماتور طولی ۰/۰۱۱، آرماتور عرضی ۰/۰۱۱.

تحلیل مدل، دینامیکی و از نوع EXPLICIT است که گام‌های زمانی برای بارگذاری ۰/۰۵ ثانیه بوده است. در این مدل سازی آرماتور و صفحه‌ی FRP به بتن متصل شده‌اند و از اثر لغزش آرماتور صرف نظر شده است، چون مسئله بسیار پیچیده و باعث دورماندن از موضوع مورد مطالعه می شد.

۳.۶. نتایج حاصله

پس از تکمیل ساخت مدل و اعمال بار به آن، تحلیل را اجرا کرده ایم. همان طور که در شکل‌های ۱۸ الی ۲۱ ملاحظه می شود، رفتار تیر مدل شده در نرم افزار و همچنین نحوه ی ایجاد ترک و گسیختگی شباهت خوبی با نمونه ی آزمایشگاهی دارد. در شکل ۲۲ می توان تیر ساخته شده با مقاومت فشاری طراحی ۱۵ مگاپاسکال را مشاهده کرد. همچنین اگر بخواهیم نتایج به دست آمده از نرم افزار و آزمایشگاه را مقایسه کنیم، با نگاهی به جدول ۶ که مقادیر را به طور خلاصه در بر دارد، می توان گفت اختلاف موجود در حد خیلی کم و قابل قبول است.

- مقاومت فشاری به‌طور کلی کاهش می‌یابد، ولی در تیرهای مقاوم‌سازی شده با افزایش مقاومت، روند آن از الگوی خاصی مطابقت نمی‌کند.
۳. با توجه به میزان تحمل بار و خیز به‌دست آمده در نمونه‌های با مقاومت مختلف، می‌توان گفت مقاومت فشاری بتن در عملکرد تیرهای بتنی مسلح نقش مهمی ایفا می‌کند.
۴. تیرهای با مقاومت فشاری بالاتر، شکل‌پذیری بیشتری دارند.
۵. با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت چسبندگی ورق FRP و بتن بستر بهبود می‌یابد.
۶. اگر مقاومت چسبندگی افزایش یابد، میزان تحمل بار افزایش می‌یابد.
۷. در صورتی که مقاومت فشاری بتن بستر افزایش یابد، می‌توان از ظرفیت بالقوه‌ی بیشتری که در ورق‌های FRP وجود دارد، بهره برد که نقش به‌سزایی در کاهش مصالح به‌کاررفته و در نتیجه هزینه‌های انجام مقاوم‌سازی دارد.
۸. در اجرای مقاوم‌سازی با استفاده از ورق‌های FRP، باید از اجرای صحیح این روش جهت حصول چسبندگی کافی که رابطه‌ی مستقیم با افزایش تحمل بار و به‌طور کلی بهبود عملکرد عضو مقاوم‌سازی شده دارد، اطمینان پیدا کرد.
۹. مقایسه‌ی صورت‌گرفته میان نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی با نرم‌افزار، حاکی از آن است که اختلاف میان این دو حدود ۱/۱٪ است، که نتیجه‌ی قابل قبولی محسوب می‌شود و صحت نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی را به‌خوبی تأیید می‌کند.



شکل ۲۲. نحوه‌ی شکست تیر RB-۱۵.

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی.

نوع نمونه	بیشینه‌ی بار تحمل شده (KN)	تغییر مکان (mm)
آزمایشگاهی	۴۷	۵٫۷۵
مدل‌سازی	۴۷٫۶	۵٫۸۱

۷. نتیجه‌گیری

۱. روند کلی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری بتن، میزان تحمل بار نهایی در تیرهای مقاوم‌سازی شده و مقاوم‌سازی نشده افزایش می‌یابد.
۲. در تیرهای مقاوم‌سازی نشده خیز اندازه‌گیری شده در وسط دهانه، با افزایش

منابع (References)

- ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, (ACI 440. 2R-08), American Concrete Institute, Framington Hills, Michigan, USA (2008).
- Alagusundaramoorthy, P., Harik, I. and Choo, C. "Flexural behavior of R/C beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets or fabric", *Journal of Composites for Construction*, **7**(4), pp. 292-301 (2003).
- Amer, M.I. and Mohammed, Sh.M. "Finite element modeling of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates", *European Journal of Scientific Research*, **30**(4), pp. 526-541 (2009).
- Adhikary, B.B., Mutsuyashi, H. and Ashraf, M. "Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer sheets with bonded anchorage", *ACI Structural Journal*, **101**(5), pp. 660-668 (2004).
- Jumatt, M.Z. and Alam, A. "Experimental and analytical investigation on the structural behaviour of steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened concrete beams", *Journal of Applied Sciences*, **8**(23), pp. 4383-4389 (2008).
- Kachlakeva, D. and McCurry, D.D. "Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates", *Composites, Part B.*, **31**(6-7), pp. 445-452 (2000).
- Manuel, A.G.S. and Hugo, B. "Degradation of bond between FRP and RC beams", *Composite Structures*, **85**(2), pp. 164-174 (2008).
- Chajes, M.J., Thomson, T.A., Finch, W.W. and Januszka, T.F. "Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials", *Construction and Building Materials*, **8**(3), pp. 191-201 (1994).
- Esfahani, M., Kianoush, M. and Tajari, A. "Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets", *Engineering Structures*, **29**(10), pp. 2428-2444 (2007).
- Pham, H. and Al- Mahaidi, R. "Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites", *Composite Structures*, **66**(1-4), pp. 617-625 (2004).
- Camata, G., Spacone, E. and Zarnic, R. "Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates", *Composites, Part B.*, **38**(2), pp. 277-288 (2007).

12. Coronado, C.A. and Lopez, M.M. "Sensitivity analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates", *Cement and Concrete Composites*, **28**(1), pp. 102-114 (2006).
13. Ebead, U. and Marzouk, H. "Tension - stiffening model for FRP strengthened RC concrete two-way slab", *Materials and Structures*, **38**(2), pp. 193-200 (2004).
14. Lundquist, J., Nordin, H., Täljsten, B. and Olafsson, T. "Numerical analysis of concrete beams strengthened with CFRP: a study of anchorage lengths", The International Symposium of Bond Behaviour of FRP in Structures, pp. 247-254 (2005).
15. Pannirselvam, N., Raghunath, P. and Suguna, K. "Strength modeling of reinforced concrete beam with externally bonded fiber reinforcement polymer reinforcement", *American Journal of Engineering and Applied Science*, **1**(3), pp. 192-199 (2008).
16. Obaidat, Y., Heyden, S. and Dahlblom, O. "The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modeling retrofitted RC beams with FEM", *Composite Structures*, **92**(6), pp. 1391-1398 (2010).
17. Martin, E., *Conserving Buildings*, A Manual of Techniques and Materials, New York, John Wiley & Sons, pp. 33-69 (1997).
18. Busse, G. "Technology and concepts for the repair of concrete", *Epoxy Adhesives and Mortars*, Zurich, Switzerland, pp. 1-43 (2001).
19. Naderi, M. "Using twist-off method for measuring surface strength of concretes cured under different environments", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(4), pp. 385-392 (2011).
20. Naderi, M. "New twist-off method for the evaluation of In-situ strength of concrete", *Journal of Testing and Evaluation*, **35**(6), (2007).
21. Naderi, M. "Assessing the in situ strength of concrete, using new twist-off method", *International Journal of Civil Engineering*, **4**(2), pp.146-155 (2006).
22. Naderi, M. and Ghoddoosian, O. "Assessing the adhesion of self-compacting concrete and mortar applied to different concrete surfaces, using twist-off and friction-transfer methods, and It's estimation by fuzzy logic", *Journal of Civil Engineering*, **23**(1), pp. 97-110 (2012).
23. Wigggenhauser, H. "Research in non-destructive testing in civil engineering", in: Uomoto, T. (Ed.); *Proceedings of Seiken Symposium No. 26 Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000 in Tokyo*, Japan, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Singapore-Tokyo: Elsevier, pp. 23-39 (25-27 April 2000).
24. Sansalone, M.J. and Streett, W.B., *Impact-Echo: Non-Destructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp. 1-340 (1997).
25. Malhotra, V.M., *Testing Hardened Concrete: Non-Destructive Methods*, Iowa State University Press, 188 pages (2003).
26. *Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures*, Training Course Series, No.17, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 1-78 and pp. 100-129 (2002).
27. Wahalathantri, B.L., Thambiratnam, D.P., Chan, T.H.T. and Fawzia, S. "A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS", *Infrastructure, Transport and Urban Development*, pp. 260-264 (2011).
28. Nayal, R. and Rasheed, H.A. "Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **18**(6), pp. 831-841 (2006).