مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۲۷-۱۳۶، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی تحلیلی معیارهای پذیرش تیرهای بتن مسلح بهسازی‌شده با الیاف پلیمری مسلح (FRP) با مدل‌سازی عددی

سیدمهدی زهرایی * **(استاد)**
دانشکده‌ی عمران، دانشگاه تهران
وحید چگنی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

در پژوهش حاضر، بهسازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از الیاف پلیمری مسلح FRP بررسی شده است. در ابتدا جهت تأیید صحت مدل‌سازی‌ها، نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های حاصل از نرم‌افزار ABAQUS با نتایج مطالعات انجام شده‌ی آزمایشگاهی، مقایسه و در ادامه به بهسازی تیرهایی که نیاز به تقویت داشته‌اند، پرداخته و تأثیر FRP در انحناء و ظرفیت چرخشی تیر بررسی شده است. درنهایت، شکل‌پذیری متناسب با سطوح عملکردی و معیارهای پذیرش تیرهای بهسازی‌شده با توجه به کنترل‌پذیر بودن توسط نیرو یا تغییر شکل استخراج شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان داده است که رفتار تیرها بعد از بهسازی با توجه به اینکه نسبت تغییر شکل حد کاهش مقاومت به تغییر شکل حد خطی آنها کمتر از ۲ می‌شود، تغییر یافته و معیار پذیرش برای این‌گونه تیرها، کنترل‌پذیر بودن توسط نیرو است.

واژگان کلیدی: بهسازی، سطوح عملکرد، معیارهای پذیرش، الیاف پلیمری مسلح FRP، روش المان محدود.

mzahrai@ut.ac.ir
vahidsaze@gmail.com

۱. مقدمه

طراحی بر مبنای عملکرد را می‌توان به‌عنوان گامی مهم در عبور از آیین‌نامه‌های طراحی موجود پنداشت. بعد از وقوع زلزله‌های مخرب در دنیا در سه دهه‌ی اخیر و وقوع خسارت‌های سنگین مالی و جانی، لزوم بازنگری در تعیین سطح عملکردی ساختمان‌ها آشکار و ایده‌های طراحی بر مبنای عملکرد با رویکرد جدید مطرح شده است. روش عملکردی در مراجعی همچون FEMA، ATC و SEAOC تعریف شده و در FEMA۳۵۶ و ATC۴۰ به‌صورت نسبتاً جامع ارائه شده است. از جمله موارد درخور بررسی می‌توان معیارهای طراحی را نام برد که شامل شاخص‌هایی نظیر: دوران خمیری، تغییر شکل نسبی و خسارت است. شاخص‌های مذکور وابسته به پارامترهایی همچون: شکل‌پذیری، میزان استهلاک انرژی در رفتار غیرخطی، ظرفیت تغییر شکل و نیز انحناء هستند. به دلیل نوپا بودن روش عملکردی، روش‌ها و معیارهای مطرح‌شده در مراجع مذکور نیازمند بررسی و آزمون بیشتری است تا به نتایج کامل‌تری بیانجامد.

یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در آزمایشگاه سازه‌ی دانشکده‌ی عمران دانشگاه تهران (۱۳۸۶)، برای بررسی پارامترهای مذکور و انطباق دستورالعمل‌های ذکرشده با شرایط محلی در ایران به اجرا درآمده است و در آن ۶ نمونه‌ی تیر بتنی از ساختمان‌های متعارف با قاب خمشی تا ۵ طبقه تحت بارگذاری رفت و برگشتی و یک طرفه آزمایش شده و بر پایه‌ی نتایجی که به‌دست آمده است، معیارهایی همچون: دوران خمیری، شاخص خسارت و میزان شکل‌پذیری برای مراحل مختلف بارگذاری تعیین شده است. سپس با ترازبندی رفتار تیرها برای سطوح عملکردی مختلف نظیر: بهره‌برداری بدون وقفه، ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش سعی شده است که معیارهای متناظر با هرکدام به‌دست آید. نتایج حاصل با توصیه‌های موجود در مراجعی همچون FEMA۳۵۶ مقایسه و تفاوت‌های موجود مشخص شده است.

از آنجایی که سیستم سقف سازه‌ی اصلی، تیرچه و بلوک موردنظر بوده است، از اثر بتن پوششی در بلوک‌ها در مجاورت تیر (T شکل) به‌دلیل فقدان آرماتور لازم و عدم کیفیت مناسب صرف‌نظر و تیرها با مقطع مستطیل در نظر گرفته شده‌اند. طول آزاد تیرها ۵/۵ متر فرض شده است، لیکن از آنجایی که در بارگذاری زلزله، نقاط عطف تیرها در وسط دهانه است؛ در ادبیات مدل‌سازی آزمایشگاهی، طول موردنظر از نقطه‌ی عطف آن در نظر گرفته شده (۲/۵ متر) و نتایج به‌دست آمده نشان داده است که مقدار دوران خمیری ارائه‌شده توسط FEMA۳۵۶ در سازه‌های نو و طراحی‌های جدید بسیار محافظه‌کارانه است. مقادیر دوران خمیری ۰/۰۵، ۰/۰۳ و ۰/۰۱ به‌عنوان مقادیر متناظر با ترازهای عملکردی CP، LS و IO در طراحی‌های نو پیشنهاد شده است. همچنین شکل‌پذیری‌های ۴، ۳ و ۱/۵ به‌عنوان شکل‌پذیری

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۲/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۴/۱۲/۱۶.

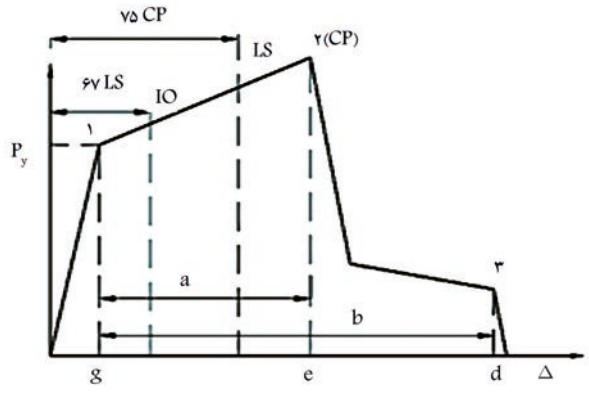
Archive of SID
www.SID.ir

مناسب جهت طراحی‌های نو در ترازهای عملکردی CP، LS، IO پیشنهاد شده است.[۱]

در پژوهشی در سال ۲۰۰۴، دو نوع تیر با تکیه‌گاه ساده با طول‌های بلند و کوتاه که تغییر مکان تیر اول، خمشی و تغییر مکان تیر دوم، برشی بوده است، تحلیل عددی المان محدود انجام شده و نیز برای مطالعه‌ی نسبت اثر آرماتورهای کششی، دو تیر کم‌فولاد (تحت مسلح) و پر فولاد (فوق مسلح) در نظر گرفته شده و دو آرماتور ۴Φ با $\rho = ۰٫۰۰۶۶$ برای مقطع کم‌فولاد و دو آرماتور ۸Φ با $\rho = ۰٫۲۶۴$ برای مقطع پر فولاد استفاده شده است که هر دو نسبت کم‌فولاد و پر فولاد براساس معیارهایی بوده است که در آن $\rho = ۰٫۱۰۸$ و $\frac{۱٫۴}{\sigma} < \rho < \rho_b$ است. انتخاب تیرهای بلند و کوتاه به این دلیل بوده است که تیرهای بلند، شکست خمشی و تیرهای کوتاه، شکست برشی دارند. همچنین جهت مطالعه‌ی اثر FRP در تقویت برشی تیرهای بتن مسلح، ورقه‌های FRP بر روی طرفین این تیرها استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از مطالعه‌ی مذکور نشان داده است که اولاً با تعداد لایه‌های FRP یکسان، مقاومت نهایی تیرهایی که از دو طرف مقاوم‌سازی شده بودند، کمتر از مقاومت نهایی تیرهایی بوده است که در زیر و بالا مقاوم‌سازی شده بودند و به این معنی است که افزایش مقاومت خمشی نهایی تیرهای بتن‌آرمه نسبت به مقاومت برشی تیرهای بتن‌آرمه، اهمیت بیشتری دارد. بعد از به‌کار بردن FRP در پایین تیرها، شکست تیرها به‌صورت برشی خمشی شده و ترک‌های زیادی در وسط تیرها و تکیه‌گاه‌ها رخ داده و مشاهده شده است که در تیرهای کم‌فولاد، ترک‌ها بیشتر در مرکز تیر به وجود می‌آیند، یعنی شکل‌پذیری تیر افزایش یافته است. همچنین مشاهده شده است که وقتی الیاف FRP موازی محور طولی تیر به‌کار برده شوند، مقاومت برشی تیر بیشتر افزایش می‌یابد.[۲]

در سال‌های ۲۰۱۲ هاویله و همکاران و در ۲۰۱۳ هاویله، به مدل‌سازی المان محدود تیرهای بتن مسلح بهسازی‌شده با CFRP پرداخته شده و در مطالعات مذکور، تیرهای بتن مسلح که با صفحات کوتاه برشی بهسازی شده بودند (۲۵٪ طول دهانه)، با تیرهای بتن مسلحی که با صفحات بلند (۸۵٪ طول دهانه) بهسازی‌شده بودند، مقایسه و از مدل‌سازی المان محدود جهت بررسی رفتار تیرها استفاده شده است که مجموعاً ۶ تیر مدل‌سازی و تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیرها و مدهای شکست مدل‌های آزمایشگاهی بررسی و مقایسه شده است. ۲ تیر از ۵ تیر بهسازی‌شده بدون هیچ‌گونه مهارکننده‌ی عرضی در دو انتها و ۳ تیر با مهارکننده‌های عرضی U شکل در دو انتها مدل‌سازی شده‌اند. در مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح و باند بین بتن و آرماتور و بتن و صفحات FRP و اندرکنش آنها مدل‌سازی و مشاهده شده است که نتایج المان محدود، انطباق مناسبی با مدل‌های آزمایشگاهی دارد و می‌توان با استفاده از مدل‌های المان محدود ظرفیت تیرهای بتن مسلح را به‌دست آورد.[۳]

در روش عملکردی، نحوه‌ی رفتار سازه و میزان آسیب‌پذیری آن در برابر بارگذاری زلزله دسته‌بندی می‌شود و در اغلب مراجع سه سطح عملکردی عمده تعریف شده است که شامل: بهره‌برداری بدون وقفه،[۱] ایمنی جانی (LS)[۲] و آستانه‌ی فروریزش (CP)[۳] است. همچنین بین دو سطح CP و LS، دامنه‌ی ایمنی محدود قابل تعریف است. از نظر کیفی در سطح بهره‌برداری بدون وقفه لازم است که بعد از زلزله، خسارت سازه به نحوی باشد که ایمنی سازه ادامه یابد و ضرورتاً سختی آن به اندازه‌ی مقادیر قبل از زلزله باقی بماند و از نظر کمّی، میزان تغییر شکل‌های نسبی ماندگار ناچیز باشد. در این تراز، خسارت ماندگار در سطح عضو وجود خواهد داشت، همان‌طور که در شکل ۱ این تراز تا ۶۷٪ تراز عملکردی LS می‌تواند قرار بگیرد. در تراز عملکردی ایمنی جانی (LS)، اجزاء سازه‌یی دچار خسارت جدی می‌شود. در این تراز حفظ جان ساکنان از موارد اجباری است و تغییر شکل‌های نسبی ماندگار



شکل ۱. نقاط عملکردی.[۴،۵]

در سازه وجود خواهد داشت و در اعضا به‌خصوص تیرها، خسارت زیادی به وجود خواهد آمد. قلوه شدن بتن روی آرماتورها از مشخصات سطح مذکور است.

همان‌طورکه قبلاً نیز گفته شده است، بین دو سطح مذکور، دامنه‌ی ایمنی محدود قابل تعریف است. دامنه‌ی پاسخ متناظر با این تراز عملکردی ۷۵٪ سطح عملکردی CP خواهد بود. در تراز عملکردی ایمنی جانی (LS)، اجزاء سازه‌یی دچار خسارت جدی می‌شوند. در تراز مذکور، حفظ جان ساکنان از موارد اجباری است و تغییر شکل‌های نسبی ماندگار در سازه وجود خواهد داشت و در اعضا، به‌خصوص تیرها، خسارت زیادی به وجود خواهد آمد. قلوه‌شدن بتن روی آرماتورها از مشخصات سطح LS است. همان‌طورکه قبلاً نیز گفته شده است، بین دو سطح CP و LS، دامنه‌ی ایمنی محدود قابل تعریف است. دامنه‌ی پاسخ متناظر با تراز عملکردی LS، ۷۵٪ سطح عملکردی CP خواهد بود. در تراز عملکردی آستانه‌ی فرو ریزش (CP)، سازه دچار خسارت وسیع می‌شود، به‌گونه‌یی که در این حالت فقط امکان تحمل بارهای ثقلی وجود دارد، ولی دچار فروریزش نخواهد شد و تغییر شکل‌های نسبی ماندگار در سازه وجود خواهد داشت و در نقاط بحرانی، مفصل خمیری ایجاد می‌شود و سازه در آستانه‌ی فروریزش قرار می‌گیرد.

همچنین بین دو سطح عملکرد ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش می‌توان سطح عملکرد ایمنی جانی محدود را تعریف کرد که سطح عملکردی است که پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع زلزله، خرابی در سازه ایجاد شود، اما میزان خرابی‌ها به اندازه‌یی نیست که منجر به خسارت حائز اهمیت شود. یکی از مشکلات محاسبات سازه‌یی این سیستم‌ها مشکل بودن مدل‌سازی رایانه‌یی آنها در قالب اجزاء محدود است. از طرف دیگر، به‌خاطر تنوع در پارامترهای مختلف تأثیرگذار در رفتار آنها و هزینه‌ی بالای مدل‌سازی‌ها، کاربرد روش آزمایشگاهی را با مشکل مواجه می‌کنند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی پارامترهای طراحی براساس عملکرد و انطباق دستورالعمل‌ها جهت استخراج معیارهای پذیرش تیرهای بتن‌آرمه قبل و بعد از مقاوم‌سازی با استفاده از روش‌های تحلیل المان محدود است. به این منظور، ابتدا جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی، نمونه‌هایی ازکارهای معتبر آزمایشگاهی تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس[۴]، مدل‌سازی و سپس با توجه به نیاز به مقاوم‌سازی تیرها پرداخته شده است. در ادامه، با استفاده از منحنی‌های بار ـ تغییر مکان، لنگر ـ انحناء و لنگر ـ چرخش تیرها، اثر ورقه‌های FRP در شکل‌پذیری، تغییر مکان و باربری تیرهای بتن مسلح بررسی شده است. درنهایت با توجه به ضوابط تدوین‌شده در آیین‌نامه‌ی FEMA۳۵۶ و بر پایه‌ی شاخص‌هایی نظیر: دوران خمیری و تغییر شکل نسبی، معیارهای پذیرش تیرهای کم‌فولاد، پر فولاد و مقاوم‌سازی‌شده براساس نوع رفتار منحنی ـ نیرو، تغییر شکل آنها استخراج شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

۲. مدل‌سازی و تحلیل

۱.۲. خصوصیات مصالح

برای مطالعه‌ی رفتار سازه‌های بتن‌آرمه با FRP، مرحله‌ی اساسی فهم و درک عمیق رفتار غیرخطی مصالح سازنده، یعنی بتن مسلح و کامپوزیت FRP، به‌طور مجزاست. منحنی تنش ـ کرنشی، که برای مدل کردن رفتار بتن در نظر گرفته شده است، مطابق رابطه‌ی ۱ است:[۶]

$$f_c = f''_c[(۲\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_۰}) - (\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_۰})^۲] \quad (۱)$$

که در آن، کرنش فشاری نهایی بتن $\varepsilon_{cu} = ۰/۰۰۳$ و نسبت پواسون بتن بین ۰٫۱۵ – ۰٫۲۲ است که در مطالعه‌ی حاضر نسبت پواسون بتن ۰٫۲ فرض شده است. مدول کشسانی بتن (E_c) رابطه‌ی مستقیم با مقاومت فشاری بتن دارد و می‌توان از رابطه‌ی ۲، برای محاسبه‌ی آن استفاده کرد. لازم به ذکر است که در رابطه‌ی ۲، f_c باید بر حسب MPa وارد شود:[۵]

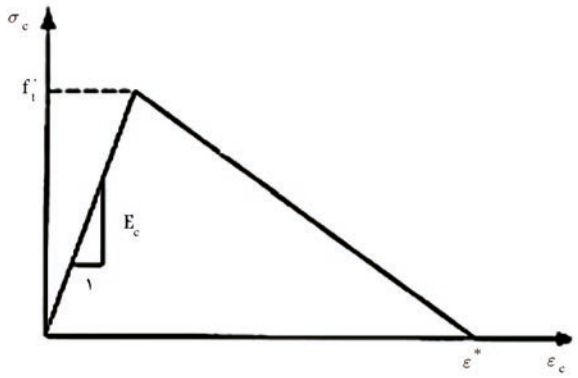
$$E_C = ۴۷۰۰\sqrt{f_c} \quad (۲)$$

زمانی که ترک در بتن مسلح به‌وقوع می‌پیوندد، باز هم بتن قادر به تحمل مقداری کشش در جهت عمود به ترک است که به این پدیده سختی کششی باقی‌مانده می‌گویند. در مطالعه‌ی حاضر، مطابق شکل ۲ از مدل ساده‌ی خطی جهت مدل کردن رفتار کششی بتن استفاده شده است. منحنی تنش ـ کرنش بتن تحت تنش کششی اندکی رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد، اگرچه تا حدود تنشی معادل ۵۰٪ مقاومت کششی بتن (f_t) رفتار خطی است. کرنش کششی نظیر تنش کششی بیشینه‌ی بتن که با ε_t نشان داده می‌شود، در کشش خالص ۰٫۰۰۰۱ در کشش ناشی از خمش در محدوده‌ی ۰٫۰۰۰۱۴ تا ۰٫۰۰۰۲ است که از مدل William Varnk در پژوهش حاضر استفاده شده است.[۲] f_t تنش کششی نظیر ترک‌خوردگی بتن و کرنش نظیر شکست بتن در حدود $۱۲\varepsilon_t$ در نظر گرفته شده است.

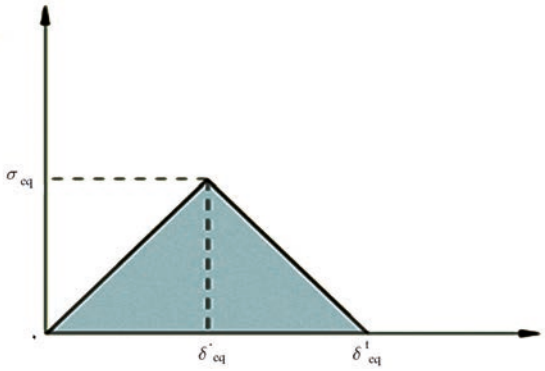
الیاف پلیمری مسلح‌کننده در جهت طولی به سختی رفتار غیرخطی دارند و رفتار آن‌ها به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. همچنین بارگذاری‌های عرضی درون صفحه‌ی انحراف از رفتار غیرخطی مشاهده شده است، اما میزان غیرخطی شدن قابل مقایسه با برش درون‌صفحه‌یی نیست. معمولاً این رفتار غیرخطی را که توأم با بارگذاری‌های عرضی است، می‌توان نادیده گرفت. در شکل ۳، مدل رفتاری الیاف پلیمری مسلح‌کننده نشان داده شده است.

۲.۲. طول ناحیه‌ی مفصل خمیری

از آنجایی که جهت محاسبه‌ی انحناء و لولای خمیری از روش‌های عددی استفاده شده است، پس باید جهت محاسبه‌ی طول مفصل خمیری که اساس چرخش‌های خمیری است، از یک معادله‌ی مناسب استفاده شود. پژوهشگران مختلفی بر روی محاسبه‌ی تئوری طول مفصل خمیری که اساس آن روی انحنای خمیری است، مطالعه کرده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، از ۵ معادله (معادلات ۳ الی ۷)،[۷] جهت محاسبه‌ی طول مفصل خمیری استفاده و براساس آنها، معادله‌ی مقدار چرخش خمیری محاسبه شده است. بهترین معادله‌یی که مقدار واقعی طول مفصل را تقریب می‌زند، معادله‌ی ۳ است که براساس آن مقدار طول مفصل خمیری، مقطع بتنی برای دو تیر کالیبره‌شده‌ی $B_{۳۳cal}$ و $B_{۷۹cal}$ به ترتیب برابر $۱۷۳/۲۶mm$ و $۲۱۵mm$ است که اساس محاسبات چرخش خمیری و ظرفیت چرخش خمیری در مطالعه‌ی



شکل ۲. منحنی رفتاری بتن در کشش.[۲]



شکل ۳. نمودار رفتاری FRP.[۲]

حاضر برای دو تیر مذکور است:

$$L_P = ۰/۰۸Z + ۰/۰۲۲d_b f_{yp} \quad (۳)$$

$$L_p = ۰/۲۵h + ۰/۰۷۵Z \quad (۴)$$

$$L_p = ۰/۸K_۱K_۲(Z/d)c \quad (۵)$$

$$L_p = ۰/۵d + ۰/۳۲Z/d^{۰/۵} \quad (۶)$$

$$Lp = ۰/۵d + ۰/۰۵Z \quad (۷)$$

که در آنها $K_۱ = ۰/۷$ برای فولاد نرم و $K_۱ = ۰/۹$ برای فولاد سرد نوردشده، $K_۳ = ۰/۶$ زمانی که $f'_c = ۳۵/۰۲$MPa و ۰٫۹ زمانی که $f'_c = ۱۱/۷$MPa، (مقاومت بتن) $f'_c = ۰/۸۵$، Z فاصله‌ی بین بیشینه‌ی لنگر خمشی و نقطه‌ی عطف تیر یا مکان لنگر صفر، d_b برابر قطر آرماتورهای خمش، f_y تنش تسلیم فولادهای طولی، d برابر ارتفاع مؤثر تیر بتنی و h ارتفاع است.

۳.۲. تیرهای مورد تحلیل

در پژوهش حاضر به علت بالا بردن دقت صحت‌سنجی، ۳ تیر از دو نوشتار مختلف انتخاب شده است. ۲ تیر $B_{۷۹}$ و $B_{۳۳}$ به منظور بررسی صحت‌سنجی رفتار تیر بتن مسلح و تفاوت آنها به علت درصد آرماتورهای مسلح‌کننده است. تیر B_{FRP} به منظور صحت‌سنجی رفتار تیر بتن مسلح به همراه FRP است. دو تیر اول مربوط به کیم[۵] و همکاران است که ابعاد ۱۵۰ × ۱۵۰ (mm) و طول ۱۶۰۰ (mm) دارد و مقاومت فشاری یکی از تیرها ۶۶٫۶ و دیگری ۸۲٫۱ (MPa) است.[۷] مقدار آرماتورهای کششی مورد استفاده در تیرهای اول و دوم به ترتیب $۰/۳۳\rho_b$

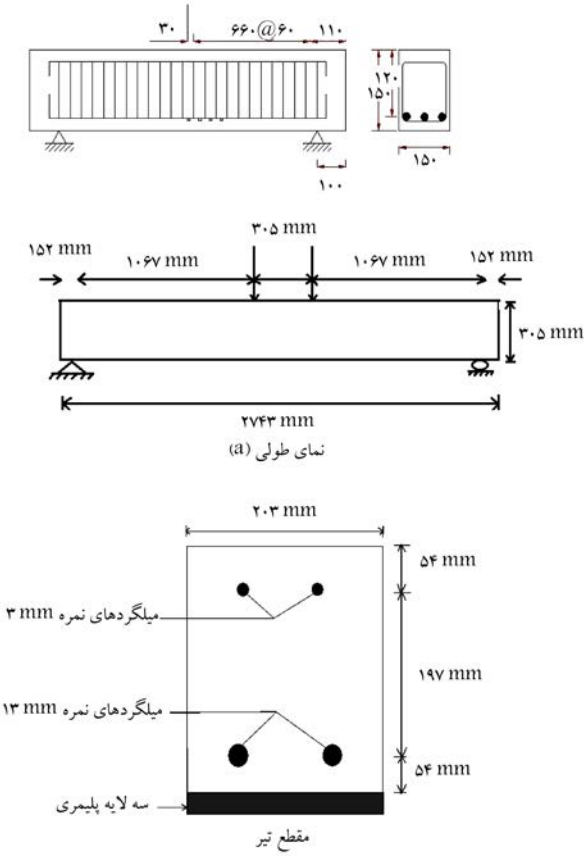
Archive of SID
www.SID.ir

و $0/79\rho_b$ بوده است. در جدول ۱، خصوصیات میلگردهای مسلح‌کننده (که در ناحیه‌ی کششی تیر در فاصله‌ی ۳۰ mm از تراز زیرین تیر قرار گرفته‌اند) ارائه شده است. همچنین مشخصات هندسی این دو تیر مذکور و تیر بهسازی‌شده با FRP در شکل ۴ نشان داده شده است.

تیر B_{FRP} مربوط به هوسان و همکارانش است که به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی FRP تحلیل شده و دارای ابعاد (mm)۲۰۳ × ۳۰۵ و طول ۲۷۴۳ (mm) است. بتن مورد استفاده در تیر، مقاومت فشاری ۴۱/۳۷MPa و فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها از یکدیگر ۲۴۳۹mm بوده است که با ۳ لایه‌ی FRP به ضخامت ۰/۱۷۲ (mm) بهسازی شده است. مشخصات لایه‌های FRP نیز براساس جدول ۲ است. تیر B_{33} با نسبت آرماتور طولی $0/33\rho_b$، B_{79} تیر با نسبت آرماتور طولی $0/79\rho_b$ و B_{FRP} تیر آزمایشگاهی بهسازی‌شده با FRP است که دو آرماتور کششی به قطر ۱۳mm و دو آرماتور فشاری به قطر ۳mm دارد.

جدول ۱. مشخصات میلگردها.

شماره‌ی میلگرد	سطح مقطع (cm^2)	تنش تسلیم (MPa)	مدول کشسانی (GPa)
D_3	۰/۰۷۰۶۵	۳۴۴/۷	۱۱۹
D_{10}	۰/۷۱	۴۰۶	۱۷۵
D_{13}	۱/۲۷	۴۱۳	۲۰۰
D_{16}	۱/۹۹	۴۴۳	۱۷۲
D_{19}	۲/۸۷	۴۱۹	۱۷۴

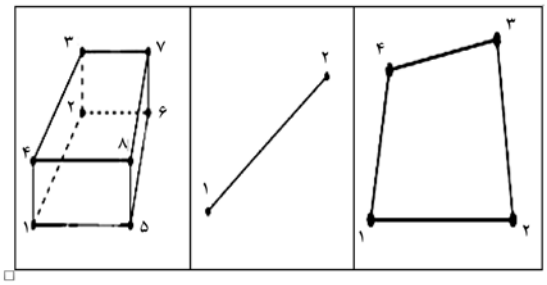


شکل ۴. مشخصات هندسی تیرهای کالیبره‌شده.[۲و۸]

المان C_2D_8 (یک المان ۸ گره‌یی با ۳ درجه آزادی انتقالی در هرگره) و برای مدل‌سازی آرماتورهای فولادی از المان D_1D_2 (یک المان خرپایی با یک درجه آزادی انتقالی در هرگره که فقط در جهت طولی توانایی انتقال نیرو دارد) و جهت مدل‌سازی ورقه‌های FRP از المان Shell، S_4R (یک المان ۴گره‌یی با ۶ درجه آزادی سه درجه‌ی انتقالی و ۳ درجه دورانی در هرگره) استفاده شده است (شکل ۵).[۸] برای مدل‌سازی اندرکنش بین آرماتورهای مسلح‌کننده و بتن و همچنین بین FRP و سطح بتن از گزینه‌ی Embed در منوی Intraction استفاده شده است، که در آن آرماتور و FRPدر بتن مدفون می‌شوند. این فرض به معنای این است که هیچ‌گونه شکست پیوستگی بین آرماتور و بتن یا FRP و بتن رخ نمی‌دهد. جهت استفاده از فرض مذکور باید کرنش در ورقه‌های FRP کنترل شود و کرنش‌های مذکور نباید از کرنش مجاز مؤثر ورقه‌های FRP بیشتر باشد.[۸-۱۰]

۴.۲. صحت‌سنجی

در این مرحله ۳ تیری که مشخصات آن‌ها در بخش پیش ذکر شده است، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، مدل‌سازی و تحلیل استاتیکی غیرخطی شده‌اند. سپس مقایسه‌یی بین نمودارهای بار ـ تغییرمکان ۳ تیر کالیبره‌شده و نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شده است که نتایج آن در شکل‌های ۶ الی ۸ و جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. برای بررسی دقیق اثر FRP در رفتار تیرهای بتن مسلح، ۳ عدد تیر بتن مسلح کالیبره شده‌اند که ۲ عدد از آن‌ها بدون FRP جهت صحت‌سنجی تیرهای بتن مسلح و دیگری با FRP جهت صحت‌سنجی تیر بتن مسلح بهسازی‌شده با FRP است. مقاومت فشاری بتن تیرهای B_{33} و B_{79} (اعداد ۳۳ و ۷۹ نشان‌دهنده‌ی درصد



شکل ۵. المان‌های مدل‌سازی.[۸]

جدول ۲. مشخصات لایه‌های FRP.[۲]

E_{11}GPa	E_{22}GPa	XMPa	X' MPa	Y MPa	Y' MPa	$G_{12}=G_{13}$MPa	G_{23}MPa	μ_{12}
۳/۱۴۱	۵/۱۴	۲۷۵۸	-۲۷۵۸	۵۲	۲۰۶	۸۶/۵	۵۲/۳	۲۱/۰

که در آن: X مقاومت کششی در جهت طولی، X' مقاومت فشاری در جهت طولی، Y مقاومت کششی در جهت عرضی، Y' مقاومت فشاری در جهت عرضی، E_{11} مدول کشسانی در جهت طولی، E_{22} مدول کشسانی در جهت عرضی است.

www.SID.ir

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج صحت‌سنجی.

نمونه	P_y	P_u	Δ_y	Δ_u
B_{33AZ}	۴۹٫۴۵	۵۲٫۵۵	۵٫۹	۱۴٫۸
B_{33KAL}	۱۱٫۵۰	۰۹٫۵۵	۸۴٫۶	۳۸٫۱۲
B_{79AZ}	۸۲٫۱۰۳	۰۴٫۱۰۸	۸٫۵	۵٫۱۱
B_{79KAL}	۷۷۳٫۱۱۰	۱٫۱۲۵	۳۸٫۱۰	۵٫۱۳
B_{FRPAZ}	۸۷	۱۱۷٫۹۲	۸٫۹	۱۹٫۹
B_{FRPKAL}	۹۵٫۹۳	۸۹٫۱۲۴	۵٫۹	۴۶٫۱۷

B_{33AZ} نمونه‌ی آزمایشگاهی با ρ_{pb} ۰٫۳۳،

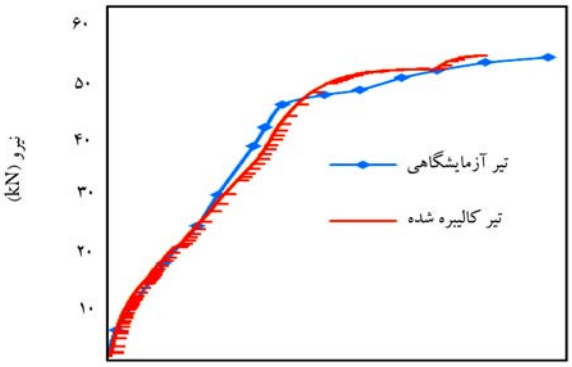
B_{33KAL} نمونه‌ی کالیبره‌شده با ρ_b ۰٫۳۳،

B_{79AZ} نمونه‌ی آزمایشگاهی ρ_{pb} ۰٫۷۹،

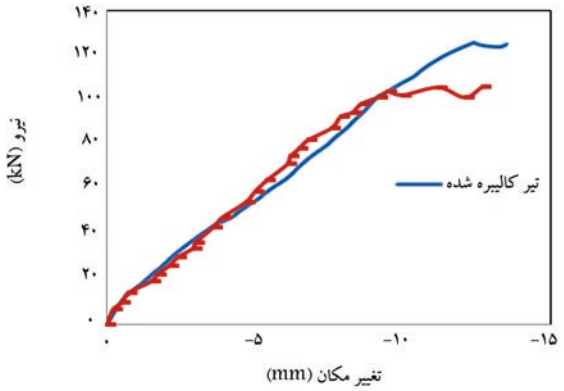
B_{79KAL} نمونه‌ی کالیبره‌شده با ρ_{pb} ۰٫۷۹،

B_{FRPAZ} نمونه‌ی آزمایشگاهی تیر بهسازی شده با FRP،

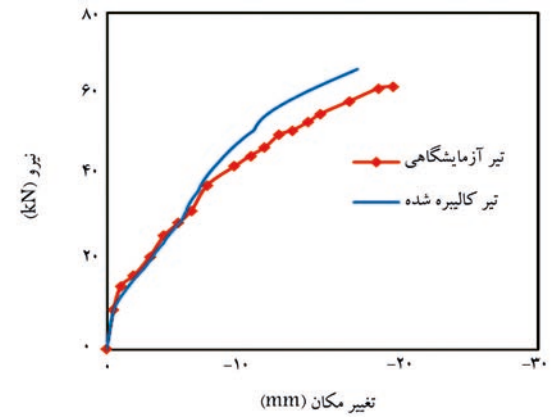
B_{FRPKAL} نمونه‌ی کالیبره‌شده با FRP.



شکل ۶. نمودار بار ـ تغییر مکان تیر B_{33}.



شکل ۷. نمودار بار ـ تغییر مکان تیر B_{79}.



شکل ۸. نمودار بار ـ تغییر مکان تیر B_{FRP}.

آرماتورکششی استفاده‌شده در تیرها یعنی $\rho_{pbalance}$ ۰٫۳۳ و $\rho_{pbalance}$ ۰٫۷۹ است) برابر ۶۶٫۶MPa و مقاومت فشاری تیر سوم که B_{FRP} نامیده شده است (زیرنویس FRP به معنای تیر بهسازی‌شده با FRP است)، برابر ۴۱٫۳۷ MPa مدل‌سازی است. نحوه‌ی مش‌بندی به‌گونه‌یی انتخاب شده است که به هم‌گرایی جواب‌ها کمک کند. برای جلوگیری از تمرکز تنش ناشی از اعمال بار متمرکز از صفحه‌یی فولادی با مدول کشسانی بالا (صلب) که در زیر بار تغییر شکل نداشته باشد، استفاده شده است. جهت تحلیل استاتیکی غیرخطی تیرها از بارهای متمرکزکه طی ۱۰۰ مرحله به تیرها اعمال شده‌اند، مطابق شکل ۴ استفاده شده است. در مرحله‌ی بعد، جهت بررسی نحوه‌ی صحت‌سنجی، نمودارهای نیرو ـ تغییر مکان تیرهای مدل‌سازی‌شده از نرم‌افزار آباکوس استخراج (نقطه‌ی کنترل وسط تیر بوده است) و سپس نتایج مذکور با نتایج آزمایشگاهی مزبور مقایسه شده است. با توجه به نمودارهای استخراج‌شده در شکل‌های ۶ الی ۸ و نتایج ارائه‌شده در جدول ۳، روش المان محدود، تطابق قابل قبولی با کارهای آزمایشگاهی داشته است. براساس جدول ۴، بیشینه‌ی خطای مربوط به تغییر مکان‌ها حدود و بیشینه‌ی خطای مربوط به نیروها در حدود ۱۶٪ بوده است.

۳. بهسازی تیر با استفاده از ورقه‌های FRP

جهت بهسازی تیر B_{33}، ورقه‌های FPR به قسمت کششی تیر چسبانده شده است. بدین منظور در نرم‌افزار آباکوس از منوی Interaction گزینه‌ی embed استفاده شده است. لازمه‌ی استفاده از فرض مذکور بر این اساس است که شکست تیر

جدول ۴. درصد خطای صحت‌سنجی‌ها.

نمونه	Δ_{ykal}/Δ	Δ_{ukal}/Δ_u	P_{ykal}/P_y	P_{ukal}/P_u
B_{33KAL}	۱۶٫۱	۸۴٫۰	۱٫۱	۰۵٫۱
B_{79KAL}	۲٫۱	۱۷٫۱	۰۶٫۱	۱۶٫۱
B_{FRPKAL}	۰۶٫۱	۸۷٫۰	۰۸٫۱	۰۶٫۱

Δ_Y تغییر مکان تسلیم، Δ_u تغییرمکان نهایی تیر، Δ_{yaz} تغییر مکان تسلیم نمونه‌ی آزمایشگاهی، Δ_{ykal} تغییرمکان تسلیم نمونه‌ی کالیبره‌شده، Δ_{uaz} تغییر مکان نهایی نمونه‌ی آزمایشگاهی.

Archive of SID
www.SID.ir

در اثر از بین رفتن اتصال بین FRP و تیر بتنی یا ورقه‌ورقه شدن لایه‌های FRP نیست. در این‌صورت باید کرنش مؤثر در ورقه‌های FRP از کرنش مجاز کمتر باشد. اما اگر کرنش مؤثر ورقه‌های FRP بیش از کرنش مجاز باشد، فرض می‌شود که ورقه‌های FRP گسیخته می‌شوند که در این صورت باید تعداد لایه‌ها را افزایش داد.[۹و۱۰]

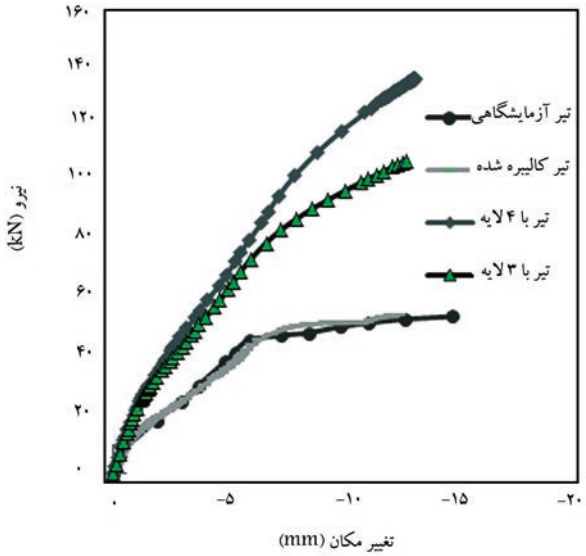
به منظور بهسازی تیر $B_{۳۳}$ با استفاده از ورقه‌های FRP، در اولین سعی ۳ ورقه‌ی FRP با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۵ به قسمت زیرین تیر چسبانده شده است. بعد از تحلیل تیر بهسازی‌شده و کنترل کرنش‌ها و تنش‌های حاصل از خروجی نرم‌افزار، در حالی که کرنش در ورقه‌های FRP تقریباً برابر ۰٫۰۰۷۵ بوده است، کرنش فشاری بتن در مقطع بحرانی وسط تیر حدود ۰٫۰۰۲۶ به‌دست آمده است، که با توجه به افزایش شدید در نرخ کرنش‌های FRP، تحلیل در مرحله‌ی ۵۳ متوقف شده است و پژوهشگران با آنالیز حساسیت نتوانستند مشکل را حل کنند و با توجه به مقدار کرنش مؤثر مجاز ۰٫۱ به این نتیجه رسیده‌اند که قبل از اینکه تیر بتنی به ظرفیت نهایی خود برسد، گسیختگی لایه‌های FRP رخ خواهد داد. در دومین سعی، از ۴ لایه‌ی FRP جهت بهسازی تیر بتنی استفاده شده است که بعد از آنالیز حساسیت تیر و کنترل تنش‌ها و کرنش‌های بتن و FRP، در حالی که کرنش در ورقه‌های FRP حدود ۰٫۰۰۶۴ به‌دست آمده است، کرنش در دورترین تار فشاری تیر حدود ۰٫۰۰۳ بوده است که می‌توان این حالت را به طور تقریبی بیان‌گر شکست بالانس تیر بهسازی‌شده فرض کرد، یعنی حالتی که هم‌زمان با خردشدگی بتن، ورقه‌های FRP نیز در آستانه‌ی گسیختگی قرار می‌گیرند. خلاصه‌ی نتایج مربوط به بهسازی تیر $B_{۳۳}$ در جدول‌های ۶ و ۷ و شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۵. مشخصات ورقه‌های FRP.

ضخامت (mm)	کرنش نهایی (٪)	X (MPa)	E (GPa)
۱۶	۱۴٫۸	۳۴۰۰	۲۴۰

E مدول کشسانی لایه‌ها و X مقاومت کشسانی لایه‌هاست.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، بار تسلیم تیر $B_{۳۳}$ بعد از بهسازی با ۳ و ۴ لایه‌ی FRP به ترتیب به میزان ۱٫۷ و ۲٫۳۸ افزایش یافته است. همچنین خیز متناظر با تسلیم فولادهای کششی نیز به میزان ۱٫۰۵ و ۱٫۰۷ برای نمونه‌های $B_{۳۳F۳}$ و و $B_{۳۳F۴}$ کاهش یافته است که به این دلیل است که با به‌کار بردن ورقه‌های FRP در قسمت کششی تیر، قسمتی از نیروهای کششی به FRP منتقل می‌شود. لذا تنش و کرنش در آرماتورهای کششی کاهش می‌یابد و آرماتورها در خیز و بار بیشتری تسلیم خواهند شد. با مقایسه‌یی که بین بار نهایی تیر قبل و بعد از بهسازی به‌عمل آمده، مشاهده شده است که بار نهایی تیر به میزان ۱٫۹۸ و ۲٫۵ برای نمونه‌های $B_{۳۳F۳}$ و $B_{۳۳F۴}$ افزایش یافته است. بر این اساس، اگر مقایسه‌یی بین تغییر مکان نهایی تیرهای بهسازی‌شده‌ی $B_{۳۳F۳}$ و $B_{۳۳F۴}$ و تغییر مکان نهایی تیر آزمایشگاهی، که نشان‌دهنده‌ی خیز نهایی واقعی تیر است، انجام



شکل ۹. نمودار بار- تغییر مکان تیر $B_{۳۳}$ و بعد از بهسازی.

جدول ۶. تغییر مکان تیر $B_{۳۳}$ قبل و بعد از بهسازی.

نمونه	Δ_{yaz}/Δ_y	Δ_{ykal}/Δ_y	Δ_{uaz}/Δ_u	Δ_{ukal}/Δ_u	Δ_y/Δ_u
$B_{۳۳AZ}$	-	۰٫۸۶	-	۰٫۸۸۵	۲٫۵
$B_{۳۳Cal}$	۱٫۲۴۷	-	۰٫۸۳۶	-	۱٫۸۳
$B_{۳۳F۳}$	۱٫۲۴۴	۱٫۰۷	۰٫۸۶	۱٫۰۲	۱٫۷۳
$B_{۳۳F۴}$	۱٫۲۲	۱٫۰۵	۰٫۸۸۵	۱٫۱۹۵	۱٫۸

Δ_u تغییر مکان نهایی مقطع بتنی، Δ_y تغییر مکان تسلیم مقطع بتنی، Δ_{yaz} تغییر مکان تسلیم نمونه‌ی آزمایشگاهی و Δ_{uaz} تغییر مکان نهایی نمونه‌ی آزمایشگاهی.

جدول ۷. نتایج تیر $B_{۳۳}$ قبل و بعد از بهسازی.

نمونه	P_Y/P_{yaz}	P_Y/P_{ykal}	P_u/P_{uAZ}	P_u/P_{uaz}
$B_{۳۳AZ}$	-	۰٫۹۰۷	-	۰٫۹۵
$B_{۳۳Cal}$	۱٫۱	-	۱٫۰۴	-
$B_{۳۳F۳}$	۱٫۸۷	۱٫۷	۲٫۶۲	۲٫۵
$B_{۳۳F۴}$	۲٫۶۲	۲٫۳۸	۲٫۰۷	۱٫۹۸

که در آن P_{yaz}: بار تسلیم نمونه‌ی آزمایشگاهی، P_{uaz} بار نهایی نمونه‌ی آزمایشگاهی، P_y بار تسلیم تیر، P_u بار نهایی تیر، P_{ykal} بار تسلیم نمونه‌ی کالیبره است.

Archive of SID
www.SID.ir

شود؛ تغییر مکان تیر برای نمونه‌های B_{33F3} و B_{33F4} به میزان ۱۹ و ۱۴٫۷ درصد کاهش یافته است. همچنین با مقایسه‌یی که بین تیر B_{33} و تیرهای B_{33F3} و B_{33F4} صورت پذیرفته است، معلوم شده که در تغییر مکان یکسان، بار نهایی به میزان تقریبی ۳ برابر افزایش یافته است. به هر حال با توجه به مطالب گفته‌شده می‌توان بیان کرد که بعد از بهسازی تیرهای بتن‌آرمه با استفاده از الیاف پلیمری مسلح‌کننده، خیز نهایی و خیز متناظر با تسلیم آرماتورهای کششی این تیرها کاهش پیدا می‌کند.

۱.۳. تأثیر ورقه‌های FRP در انحناء و ظرفیت چرخشی تیر بهسازی‌شده

براساس روابط ۱۰ الی ۱۳،[۷] و مقادیر کرنش‌های کششان و خمیری مربوط به بتن و آرماتورهای طولی و FRP، نمودارهای لنگر ـ انحناء و لنگر ـ چرخشی تیر کالیبره‌شده‌ی B_{33} و تیرهای بهسازی‌شده‌ی B_{FRP3} و B_{FRP4} رسم شده است. با توجه به شکل ۱۰ و نتایج به‌دست آمده در جدول ۸ مشاهده می‌شود که انحناء نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی و انحناء نهایی تیر بعد از بهسازی به‌ترتیب به مقدار ۸۴٫۶، ۸۵٫۶، ۷۶٫۸ و ۸۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین براساس شکل ۱۱ و جدول ۹، اگر مقایسه‌یی بین چرخش نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی و چرخش نهایی تیرها قبل و بعد از بهسازی صورت پذیرد، بعد از بهسازی تیرها با استفاده از ورقه‌های FRP چرخش نظیر تسلیم شدن آرماتور های طولی بعد از بهسازی برای تیرهای B_{FRP3} و B_{FRP3} به ترتیب به میزان ۸۵٫۴ و ۸۰ و چرخش نهایی به میزان ۸۰ و ۸۰٫۹ درصد و ظرفیت چرخش خمیری به میزان ۶۳٫۵ و ۶۱ درصد کاهش می‌یابد.

$$\varphi = \frac{\frac{f_y}{E_S}}{d(1-k)} \qquad (۸)$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} \qquad (۹)$$

$$\theta_{AB} = \int_B^A \varphi dx \qquad (۱۰)$$

جدول ۸. نتایج انحناء B_{33} قبل و بعد از بهسازی.

نمونه	Φ_y	Φ_u	Φ_y/Φ_{yCAL}	Φ_u/Φ_{uCAL}
	$\Phi^{*}10-5 Rad/cm$			
B_{33Cal}	۳۷٫۳	۱۸٫۸	-	-
B_{33f4}	۴۶٫۳	۳۹٫۶	۰٫۸۵۴	۰٫۷۸۰
B_{33f5}	۳٫۴۳	۲۹٫۶	۰٫۷۶۸	۰٫۷۶۸

که در آن Φu انحنای نهایی تیر B_{33} و Φ_y انحنای تسلیم B_{33} است.

جدول ۹. نتایج چرخش تیر B_{33} قبل و بعد از بهسازی.

نمونه	θy	θu	θp	θ_{yKaL}/θ_y	θ_{uKaL}/θ_u	θ_{pKAL}/θ_p
B_{33Cal}	۰٫۰۱۲۵	۰٫۰۲۱۲	۰٫۰۰۸۷	-	-	-
B_{33F4}	۰٫۰۱۲۷	۰٫۰۱۷۸	۰٫۰۰۴۵	۱٫۰۱	۰٫۸۱	۰٫۵۱۶
B_{33F5}	۰٫۰۱۲۶	۰٫۰۱۷	۰٫۰۰۴۴	۱٫۰۱	۰٫۸	۰٫۴۹۷

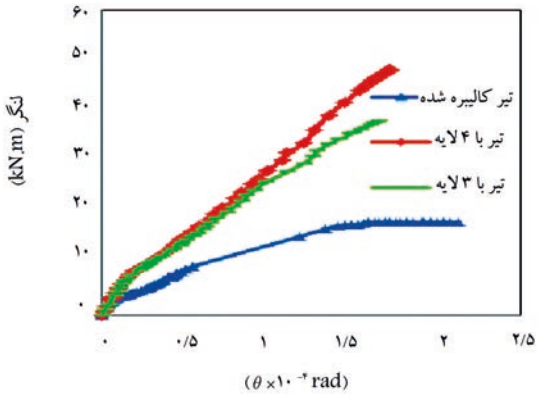
θ_u چرخش نهایی تیر B_{33} ، θ_y چرخش تسلیم تیر B_{33}، θ_p ظرفیت چرخش خمیری تیر B_{33} و θ_{yKAl} چرخش تسلیم تیر B_{33} کالیبره.

$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y)L_P \qquad (۱۱)$$

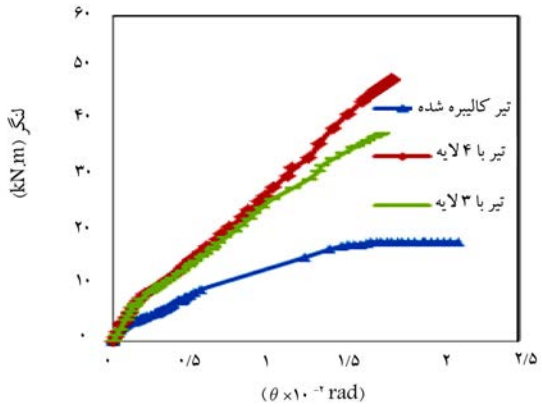
که در آن‌ها، f_y تنش تسلیم آرماتورهای طولی، E_S مدول کشسانی فولاد، kd موقعیت تار خنثی، φ و φ_u به ترتیب انحناء و انحنای نهایی تیر، c ارتفاع تار خنثی در لحظه‌ی شکست تیر و θ_p چرخش خمیری تیر بتن‌آرمه هستند.

۲.۳. استخراج معیارهای پذیرش متناسب با ترازهای عملکردی تیر B_{33}

موضوع مهم دیگر در روش عملکردی، ارائه‌ی معیارهای پذیرش متناظر با هر تراز است. معیارهای مختلفی برای ترازهای عملکردی قابل بررسی است، از جمله می‌توان به تغییر شکل نسبی جانبی یا Drift، میزان دوران خمیری و شکل‌پذیری اشاره کرد. از پارامترهای اساسی در تعیین رفتار غیرخطی اعضاء سازه‌یی، پارامتر شکل‌پذیری

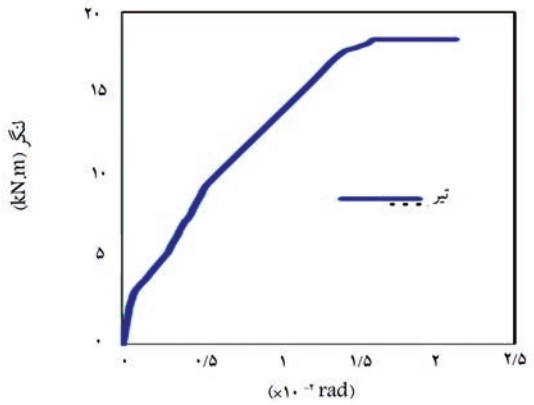


شکل ۱۰. نمودار لنگر ـ انحناء تیر B_{33} قبل و بعد از بهسازی.



شکل ۱۱. نمودار لنگر ـ چرخش B_{33} قبل و بعد از مقاوم‌سازی.

www.SID.ir



شکل ۱۲. نمودار لنگر ـ چرخش تیر $B_{۳۳}$.

جدول ۱۰. شکل‌پذیری تیر $B_{۳۳}$ در ترازهای عملکردی.

نمونه	تغییر شکل سطح عملکرد		
	IO	LS	CP
$B_{۳۳Cal}$	۱/۲۶	۱/۸۸	۲/۵
$B_{۳۳az}$	۱	۱/۳۶	۱/۸۱

جدول ۱۱. مقدار دوران متناظر با سطوح عملکردی.

نمونه	دوران متناظر با سطح عملکرد		
	IO	LS	CP
$B_{۳۳Cal}$	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۵۹	۰/۰۲۱۲

است. بر این اساس شکل‌پذیری عبارت است از نسبت تغییر شکل نهایی به تغییر شکل حد تسلیم پارامتر مذکور، که نقش مهمی در کاهش نیروی معادل استاتیکی و حفظ پایداری سازه در برابر زلزله دارد. بر پایه‌ی نتایج تحلیل عددی، میزان شکل‌پذیری متناظر با حدهای CP، LS و IO برای تیر $B_{۳۳}$ آزمایشگاهی و کالیبره‌شده در جدول ۱۰ ارائه شده است.

دوران‌های خمیری، عامل اصلی ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار هستند. شکل ۱۲، نمودار لنگر ـ چرخش تیر $B_{۳۳}$ را قبل و بعد از بهسازی نشان می‌دهد. با توجه به مطالب ذکرشده، دوران خمیری متناظر با حدهای CP، LS و IO تیر $B_{۳۳}$ قبل و بعد از بهسازی قابل تعیین است. با توجه به تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌توان فرض کرد که سطح عملکردی CP متناظر با ظرفیت نهایی چرخشی خمیری تیر است. در جدول ۱۱، مقدار دوران متناظر با هر یک از سطوح عملکردها ارائه شده است.

۴. استخراج معیار پذیرش تیرهای بهسازی‌شده

شکل ۹، نمودار تیر بهسازی‌شده‌ی $B_{۳۳}$ به‌صورت چندخطی است. قسمت اول، به‌صورت کشسان خطی و نشان‌دهنده‌ی رفتار تیر قبل از ترک خوردن بتن در ناحیه‌ی کششی است و شیب قسمت ذکرشده نسبت به حالت بهسازی‌نشده، بیشتر است. قسمت دوم، به‌صورت خطی و کشسان تا تسلیم شدن آرماتورهای طولی و شیب آن نسبت به حالت بهسازی‌نشده بیشتر است. قسمت سوم باز هم به‌صورت خطی و با کاهش بیشتر شیب و نمودار به‌صورت ناگهانی قطع می‌شود، که بیانگر این مطلب است که شکست تیر به‌صورت ترد و ناگهانی است.[۱۰] علت آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد: تیر $B_{FRP۳}$ (که در آن تعداد لایه‌های FRP، ۳ عدد است) که به علت افزایش بیش از حد نرخ کرنش در جهت طولی الیاف FRP در مرحله‌ی ۵۳ متوقف شده است، با کنترل مقادیر بیشینه‌ی کرنش کششی الیاف FRP که ۰/۰۰۷۵ و کرنش فشاری بتن که حدود ۰/۰۰۲۶ است، مشکل مذکور ضمن آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف مدل‌سازی برطرف نشده است و بیانگر این مطلب است که اگر ۳ لایه‌ی FRP جهت مقاوم‌سازی تیر $B_{۳۳}$ استفاده شود، قبل از اینکه بتن به ظرفیت نهایی خود برسد، الیاف FRP به طور ناگهانی گسیخته می‌شود و تیر به ظرفیت نهایی خمشی خود نخواهد رسید.

با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۸، انحناء نهایی در تیرهای مقاوم‌سازی شده‌ی $B_{FRP۳}$ و $B_{FRP۴}$ به ترتیب به میزان ۷۶/۸ و ۷۸/۱ درصد و انحناء تسلیم به ترتیب به میزان ۸۴/۹ و ۸۵/۶ درصد کاهش یافته است. همچنین با توجه به مقادیر به‌دست آمده در جدول ۹، ظرفیت چرخش خمیری، چرخش تسلیم و چرخش نهایی در تیرهای تیر $B_{FRP۳}$ و $B_{FRP۴}$ به ترتیب به میزان ۶۱ و ۶۳/۵؛ ۸۵/۱ و ۸۵/۴؛ و ۸۰/۹ و ۸۰ درصد کاهش یافته است. براساس مقادیر عددی به‌دست آمده در تیر $B_{FRP۴}$، امکان پاره‌شدگی ورقه‌ها وجود دارد. بنابراین اگر تعداد صفحات FRP جهت بهسازی تیر کم باشد، قبل از اینکه تیر به ظرفیت خمشی نهایی خود برسد، به طور ناگهانی شکسته می‌شود. اگر مقایسه‌یی بین تغییر مکان‌های نهایی دو تیر $B_{۳۳Cal}$ (کم‌فولاد) و $B_{۷۹Cal}$ (پر فولاد) صورت پذیرد، بر مبنای نتایج آزمایشگاهی تغییر مکان تیر $B_{۳۳}$ به میزان ۱/۲۸ برابر بیشتر از تیر پر فولاد است؛ همچنین ظرفیت باربری آن تقریباً به میزان ۵۰٪ کمتر از تیر پر فولاد است. درخصوص رفتار تیرها بعد از نقطه‌ی تسلیم در تیر $B_{۳۳Cal}$، نرم‌افزار تا حدود ۲ برابر تغییر مکان نقطه‌ی تسلیم، رفتار غیرخطی تیر را نشان می‌دهد؛ در صورتی که در تیر $B_{۷۹Cal}$، ۱/۳ برابر تغییر مکان نقطه‌ی تسلیم، رفتار غیرخطی تیر را نشان می‌دهد. براساس منحنی‌های به‌دست آمده‌ی نیرو ـ تغییر شکل، رفتار تیر $B_{۳۳}$ به‌صورت نیمه شکل‌پذیر است.

طبق مرجع ۵ برای اینکه رفتار یک عضو، کنترل‌شونده توسط تغییر شکل باشد، باید تغییر شکل آستانه‌ی کاهش مقاومت به تغییر شکل حد خطی بیشتر از ۲ باشد.[۵] مطابق نمودارهای نیرو ـ تغییر مکان استخراج‌شده حاصل از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی تیر $B_{۳۳}$، نسبت تغییر شکل در آستانه‌ی کاهش مقاومت به تغییر شکل حد خطی در نمونه‌ی کالیبره‌شده و نمونه‌ی آزمایشگاهی به ترتیب ۱/۸۳ و ۲/۵ است و با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی، اعتبار بیشتری دارند و نتایج عددی به‌صورت تقریب هستند، می‌توان پذیرفت که رفتار تیر $B_{۳۳}$، کنترل‌شونده توسط تغییر شکل است. در مورد تیرهای بهسازی‌شده‌ی $B_{FRP۳}$ و $B_{FRP۴}$، نسبت تغییر شکل آستانه‌ی کاهش مقاومت به تغییر شکل آستانه‌ی حد خطی به ترتیب حدود ۱/۷۳ و ۱/۸ است که این دو نسبت کمتر از ۲ هستند؛ لذا معیار پذیرش تیر بهسازی‌شده، کنترل‌شونده توسط نیرو است و باید نیروهای طراحی از کرانه‌ی پایین مقاومت عضو با درنظر گرفتن کلیه‌ی تلاش‌هایی که هم‌زمان بر عضو وارد می‌شوند، کوچک‌تر باشد و باید در روابط کنترلی اعضا مذکور، ضریب آگاهی بر کرانه‌ی پایین مقاوم اعمال شود. لازم به ذکر است نتایج مذکور انطباق کاملی با مباحث تئوری که قبلاً بیان شده است، دارند. بر این اساس بعد از مقاوم‌سازی تیر بتنی، به علت اینکه رفتار تیر تغییر می‌کند و شکست چه با گسیختگی ورقه‌های FRP رخ دهد و چه با رسیدن بتن به ظرفیت نهایی خود باشد، شکست به‌صورت ترد است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱۲. کرانه‌ی پایین مقاومت هر یک از اعضاء.

نمونه‌ها	B_{79}	B_{FRP3}	B_{FRP4}
لنگر مقاوم طراحی (N.m)	۴۳۷۸۴	۳۸۳۶۲	۴۸۲۵۰

۵. نتیجه‌گیری

۱. روش‌های تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود و با آنالیز حساسیت و تغییر جزئی در پارامترهای مدل‌سازی می‌توانند به تقریب‌های بهتری از تغییر مکان نهایی، تغییر مکان نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی، ظرفیت باربری نهایی و باربری نقطه‌ی تسلیم دست یابند که در مطالعه‌ی حاضر در بعضی موارد مقاومت کششی بتن تا ۱/۵ برابر مقدار تئوری آن فرض شده است.

۲. بعد از بهسازی تیر بتنی B_{33} (تیری که مقدار آرماتور کششی آن است) با استفاده از مصالح FRP، تغییر مکان نهایی تیر مذکور کاهش پیدا کرده و تغییر مکان نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی به مقدار جزئی افزایش یافته است، اما ظرفیت باربری نهایی آن تا حدود ۲/۵ برابر افزایش پیدا کرده است. همچنین باربری نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی نیز افزایش یافته است. بعد از بهسازی تیر B_{33}، انحناء نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی به مقدار جزئی افزایش، انحناء نهایی تیر مذکور کاهش، چرخش نظیر جاری‌شدن آرماتورهای طولی نیز به مقدارجزئی افزایش و چرخش نهایی و ظرفیت چرخش خمیری تیر ذکرشده کاهش یافته است. همچنین اگر مقدار FRP که جهت بهسازی تیرهای بتنی استفاده می‌شود، کم باشد، تیر قبل از اینکه به ظرفیت نهایی خود برسد، به صورت ترد و ناگهانی شکسته می‌شود.

۳. انحناء نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی تیر B_{79} بیشتر از تیر B_{33} و انحناء نهایی تیر B_{33} بیشتر از تیر B_{79} بوده است. همچنین چرخش نظیر جاری شدن آرماتورهای طولی برای تیر B_{79} بیشتر از B_{33}، اما چرخش نهایی و ظرفیت چرخش خمیری تیر B_{33} بیشتر از تیر B_{79} بوده است.

۴. با توجه به اینکه تغییر مکان حد کاهش مقاومت تیر B_{79} به تغییر مکان حد خطی آن کمتر از ۲ است، استخراج معیارهای پذیرش برای تیر مذکور، کنترل‌شونده توسط نیرو است و با توجه به اینکه نسبت تغییر مکان حد کاهش مقاومت تیر B_{33} به تغییر مکان حد خطی آن بیشتر از ۲ است، معیار پذیرش آن، کنترل‌شونده توسط تغییر شکل است. تیرهای پر فولاد همانند تیر B_{79} با توجه به اینکه تغییر مکان حد کاهش مقاومت‌شان به تغییر مکان حد خطی آنها کمتر از ۲ است، استخراج معیارهای پذیرش برای آن‌ها، کنترل‌شونده توسط نیرو است و تیرهای کم‌فولاد با توجه به اینکه تغییر مکان حد کاهش مقاومت‌شان به تغییر مکان حد خطی آنها بیشتر از ۲ است، کنترل‌شونده توسط تغییر شکل هستند.

۵. با توجه به اینکه در منحنی نیرو ـ تغییر مکان تیرهای بتن‌آرمه‌ی مقاوم‌سازی‌شده با FRP در قسمت تحتانی، نسبت تغییر شکل حد کاهش مقاومت به تغییر شکل حد خطی کمتر از ۲ است، معیار پذیرش برای این‌گونه تیرها، کنترل‌شونده توسط نیرو است.

۶. اگر نمودارهای تیر B_{33} قبل و بعد از مقاوم‌سازی بررسی شود، مشاهده خواهد شد که بعد از مقاوم‌سازی تیر، شکل نمودار تقریباً به‌صورت ۳ خطی می‌شود که قسمت اول به‌صورت کشسان خطی و نشان‌دهنده‌ی رفتار تیر قبل از ترک خوردن بتن در ناحیه‌ی کششی است. شیب این قسمت نسبت به حالت مقاوم‌سازی نشده بیشتر است. قسمت دوم به‌صورت خطی و باز هم کشسان تا تسلیم شدن آرماتورهای طولی، ولی باز هم شیب نسبت به حالت مقاوم‌سازی نشده بیشتر است؛ و قسمت سوم باز هم به‌صورت خطی و با کاهش بیشتر شیب و نمودار به‌صورت ناگهانی قطع می‌شود، که بیانگر این مطلب است که بعد از بهسازی تیرها با FRP، شکست تیرها به‌صورت ترد و ناگهانی می‌شود.

۷. معیار پذیرش تیرها بعد از مقاوم‌سازی، کنترل‌شونده توسط نیرو است. برای تلاش‌های کنترل‌شونده توسط نیرو، نیروهای طراحی باید کوچک‌تر از کرانه‌ی پایین مقاومت اعضا باشند و در روابط کنترلی این اعضا، باید ضریب آگاهی بر کرانه‌ی پایین مقاومت اعضا اعمال شود. کرانه‌ی پایین مقاومت اعضا را می‌توان از آزمایش یا از روابط مقاومت مصالح به‌دست آورد که با استفاده از نمودارهای حاصل از تحلیل عددی براساس جدول ۱۲، کرانه‌ی پایین مقاومت اعضا با استفاده از نمودارهای لنگر ـ چرخش اعضا که از نرم‌افزار استخراج شده‌اند، به‌دست می‌آید.

پانوشت‌ها

1. occupancy immediate (OI)
2. life safety
3. collapse prevention
4. Abaqus
5. Kim

منابع (References)

1. Khanmohammadi, M. and Marefat, M.S. "Study of design criteria in performance method for reinforced concrete beams based on experimental research", *Proceedings of 8th International Congress in Civil Engineering*, Shiraz, (in Persion) (1385).
2. Hsuan, H.T., Lin, F.M. and Jan, Y.Y. "Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams reinforced plastics", *Journal of Composite Structures*, **63**(3-4), pp. 271-281 (2004).
3. Hawileh, R., Abdalla, J. and Tanarslan, M. "Modeling of nonlinear response of R/C shear deficient T-beam subjected to cyclic loading", *Computer Concr Int.*, **10**(4), pp. 413-428 (2012).
4. Hawileh, R.A. "Finite element simulation of reinforced concrete beams externally strengthened with short-length CFRP plates", *Constructional Building Materials*, **27**, pp. 461-471 (2013).

Archive of SID
www.SID.ir

5. FEMA356. "NEHRP Guideline for the seismic rehabilitation of buildings", Federal Emergency Management Agency.

6. Mostofinejad, D. "Design of reinforced concrete structures", Arkan press, Esfehan, (in Persion) (1386

7. Kim, S.W., Ko, M.Y. and Kim. J.K. "Experimental study on the plastic rotation capacity on the plastic rotation of reinforced high sterenth concrete beams", *Materials and Structures*, **34**(5), pp. 302-311 (2001).

8. *Abaqus Theory and Users' Manual*, Version 6.6 (2006).

9. Bilotta A., Ludovico, M. and Nigro, E. "FRP-to-concrete interface debonding: Experimental calibration of a capacity model", *Composites Part B.: Eng.*, **42**(6), pp. 1539-1553 (2011).

10. Shin Y.S. and Lee, C. "Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load", *ACI Struct. J.*, **100**(2), pp. 231-239 (2003)

Archive of SID

www.SID.ir