

بررسی تحلیلی معیارهای پذیرش تیرهای بتن مسلح بهسازی شده با الیاف پلیمری مسلح (FRP) با مدل سازی عددی

سیدههدی زهرایی* (استاد)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه تهران

وحید چگنی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۶ (درداشت نشی)
دردی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۲۷-۱۳۶، (یادداشت نشی)

در پژوهش حاضر، بهسازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از الیاف پلیمری مسلح FRP بررسی شده است. در ابتدا جهت تأیید صحت مدل سازی ها، نتایج به دست آمده از تحلیل های حاصل از نرم افزار ABAQUS با نتایج مطالعات انجام شده آزمایشگاهی، مقایسه و در ادامه به بهسازی تیرهایی که نیاز به تقویت داشته اند، پرداخته و تأثیر FRP در انحناء و ظرفیت چرخشی تیر بررسی شده است. در نهایت، شکل پذیری متناسب با سطوح عملکردی و معیارهای پذیرش تیرهای بهسازی شده با توجه به کنترل پذیر بودن توسط نیرو یا تغییر شکل استخراج شده است. نتایج حاصل از تحلیل ها 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 می شود، تغییر یافته و معیار پذیرش برای این گونه تیرها، کنترل پذیر 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

ساختمان های متعارف با قاب خمشی تا ۵ طبقه تحت بارگذاری رفت و برگشتی و یک طرفه آزمایش شده و بر پایه‌ی نتایجی که به دست آمده است، معیارهایی همچون: دوران خمیری، شاخص خسارت و میزان شکل پذیری برای مراحل مختلف بارگذاری تعیین شده است. سپس با تراز بندی رفتار تیرها برای سطوح عملکردی مختلف نظیر: بهره برداری بدون وقفه، ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش سعی شده است که معیارهای متناظر با هر کدام به دست آید. نتایج حاصل با توصیه‌های موجود در مراجعی همچون FEMA ۳۵۶ مقایسه و تفاوت های موجود مشخص شده است. از آنجایی که سیستم سقف سازی اصلی، تیرچه و بلوک مورد نظر بوده است، از اثر بتن پوششی در بلوک ها در مجاورت تیر (T شکل) به دلیل فقدان آرمانور لازم و عدم کیفیت مناسب صرف نظر و تیرها با مقطع مستطیل در نظر گرفته شده اند. 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 مدل سازی آزمایشگاهی، طول مورد نظر از نقطه‌ی عطف آن در نظر گرفته شده (۲/۵ متر) و نتایج به دست آمده نشان داده است که مقدار دوران خمیری ارائه شده توسط FEMA ۳۵۶ در سازه های نو و طراحی های جدید بسیار محافظه کارانه است. مقادیر دوران خمیری ۰/۰۵، ۰/۰۳ و ۰/۰۱ به عنوان مقادیر متناظر با ترازهای عملکردی CP، LS و IO در طراحی های نو پیشنهاد شده است. همچنین شکل پذیری های ۴، ۳ و ۱/۵ به عنوان شکل پذیری

طراحی بر مبنای عملکرد را می توان به عنوان گامی مهم در عبور از آیین نامه های طراحی موجود پنداشت. بعد از وقوع زلزله های مخرب در دنیا در سه دهه ی اخیر و وقوع خسارت های سنگین مالی و جانی، لزوم بازنگری در تعیین سطح عملکردی ساختمان ها آشکار و ایده های طراحی بر مبنای عملکرد با رویکرد جدید مطرح شده است. روش عملکردی در مراجعی همچون FEMA، ATC و SEAOC تعریف شده و در FEMA ۳۵۶ و ATC ۴۰ به صورت نسبتاً جامع ارائه شده است. از جمله موارد درخور بررسی می توان معیارهای طراحی را نام برد که شامل شاخص هایی نظیر: دوران خمیری، تغییر شکل نسبی و خسارت است. شاخص های مذکور وابسته به پارامترهایی همچون: شکل پذیری، میزان استهلاک انرژی در رفتار غیرخطی، ظرفیت تغییر شکل و نیز انحناء هستند. به دلیل نوبا بودن روش عملکردی، روش ها و معیارهای مطرح شده در مراجع مذکور نیازمند بررسی و آزمون بیشتری است تا به نتایج کامل تری بیانجامد.

یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در آزمایشگاه سازه‌ی دانشکده‌ی عمران دانشگاه تهران (۱۳۸۶)، برای بررسی پارامترهای مذکور و انطباق دستورالعمل های ذکر شده با شرایط محلی در ایران به اجرا درآمده است و در آن ۶ نمونه‌ی تیر بتنی از

* نویسنده مسئول

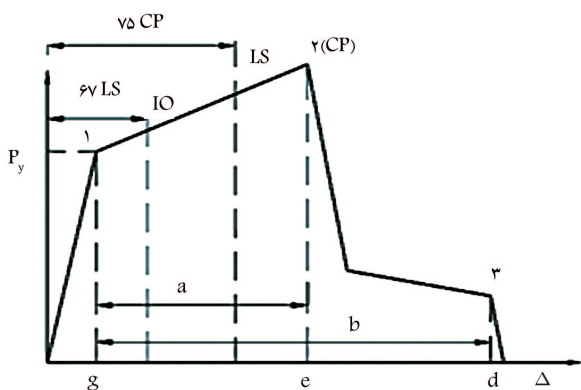
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۲/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۴/۱۲/۱۶.

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 $\Phi 4$ با $\rho = 0.066$ برای مقطع کم‌فولاد و دو آرماتور $\Phi 8$ با $\rho = 0.264$ برای مقطع پر فولاد استفاده شده است که هر دو نسبت کم‌فولاد و پر فولاد براساس معیارهایی بوده است که در آن $\rho = 0.108$ و $\rho_b < \rho < \frac{f_c}{f_y}$ 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) به‌سازی شده 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 کمی، 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 سازه‌ی دچار خسارت جدی می‌شود. در این تراز حفظ جان ساکنان از موارد اجباری است و تغییر شکل‌های نسبی ماندگار

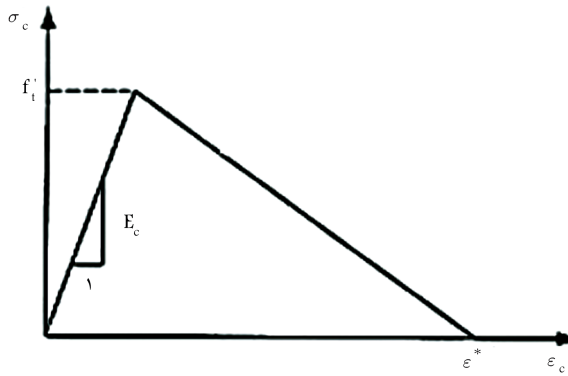


شکل ۱. نقاط عملکردی. [۴:۵]

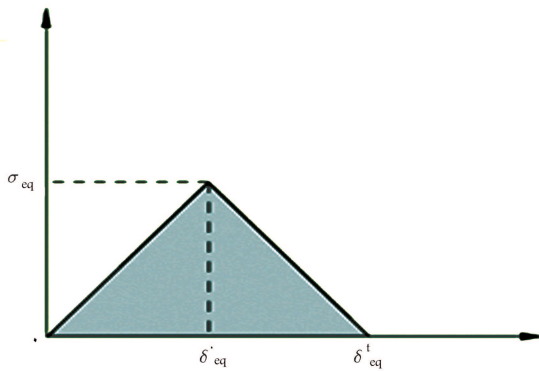
در سازه وجود خواهد داشت و در اعضا به‌خصوص تیرها، خسارت زیادی به وجود خواهد آمد. قله شدن بتن روی آرماتورها از مشخصات سطح مذکور است.

همان‌طور که 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 سازه‌ی 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. قله‌شدن بتن روی آرماتورها از مشخصات سطح LS است. همان‌طور که 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 فروریزش (CP)، سازه دچار خسارت وسیع می‌شود، به‌گونه‌ی 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 عملکردی ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش می‌توان سطح عملکردی 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 اندازه‌ی نیست که منجر به خسارت حائز اهمیت شود. یکی از مشکلات محاسبات سازه‌ی این سیستم‌ها مشکل بودن مدل‌سازی رایانه‌ی 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 از کارهای 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-تغییر مکان، لنگر-انحناء و لنگر-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 - نیرو، تغییر شکل آنها استخراج شده است.



شکل ۲. منحنی رفتاری بتن در کشش [۲]



شکل ۳. نمودار رفتاری FRP [۲]

حاضر برای دو تیر مذکور است:

$$L_p = 0.108Z + 0.22d_b f_{yp} \quad (3)$$

$$L_p = 0.25dh + 0.075Z \quad (4)$$

$$L_p = 0.18K_1 K_2 (Z/d) c \quad (5)$$

$$L_p = 0.15d + 0.32Z/d^{0.5} \quad (6)$$

$$L_p = 0.15d + 0.05Z \quad (7)$$

که در آنها $K_1 = 0.7$ برای فولاد نرم و $K_1 = 0.9$ برای فولاد سرد نورد شده، $K_2 = 0.6$ زمانی که $f'_c = 35.7 \text{ MPa}$ و $f'_c = 0.9$ زمانی که $f'_c = 11.7 \text{ MPa}$ (مقاومت بتن) $f'_c = 0.85$ ، Z فاصله‌ی بین بیشینه‌ی لنگر خمشی و نقطه‌ی عطف تیر یا مکان لنگر صفر، d_b برابر قطر آرماتورهای خمشی، f_{yp} 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 B۲۳ و B۷۹ به منظور بررسی صحت‌سنجی رفتار تیر بتن مسلح و تفاوت آنها به علت درصد آرماتورهای مسلح‌کننده است. تیر BFRP به منظور صحت‌سنجی رفتار تیر بتن مسلح به همراه FRP است. دو تیر اول مربوط به کیم^۵ و همکاران است که ابعاد 150×150 (mm) و طول 1600 (mm) دارد و مقاومت فشاری یکی از تیرها 66.6 و دیگری 82.1 (MPa) است [۷]. مقدار آرماتورهای کششی مورد استفاده در تیرهای اول و دوم به ترتیب $0.33\rho_b$

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 - کرنشی، که برای مدل کردن رفتار بتن در نظر گرفته شده است، مطابق رابطه‌ی ۱ است: [۶]

$$f_c = f'_c \left[\left(2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c^*} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_c^*} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در آن، کرنش فشاری نهایی بتن $\epsilon_{cu} = 0.003$ و نسبت پواسون بین $0.15 - 0.22$ است که در مطالعه‌ی حاضر نسبت پواسون بتن 0.2 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]

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

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 - کرنش بتن تحت تنش کششی اندکی رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد، اگرچه تا حدود تنش معادل 50% 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 0.001 در کشش ناشی از خمش در محدوده‌ی 0.0014 تا 0.002 است که از مدل William Varnk در پژوهش حاضر استفاده شده است. [۱] f_t تنش کششی نظیر ترک خوردگی بتن و کرنش نظیر شکست بتن در حدود $12\epsilon_t$ 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 درون صفحه‌ی 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

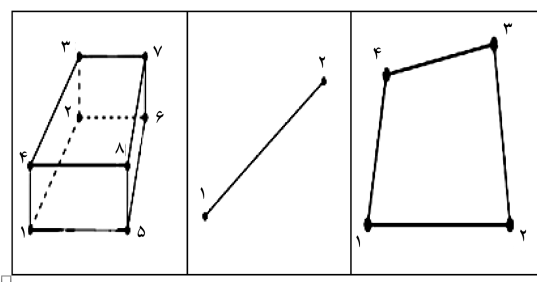
از آنجایی که جهت محاسبه‌ی انحناء و لولای خمیری از روش‌های عددی استفاده شده است، پس باید جهت محاسبه‌ی طول مفصل خمیری که اساس چرخش‌های خمیری است، از یک معادله‌ی مناسب استفاده شود. پژوهشگران مختلفی بر روی محاسبه‌ی تئوری طول مفصل خمیری که اساس آن روی انحنای خمیری است، مطالعه کرده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، از ۵ معادله (معادلات ۳ الی ۷)، [۷] جهت محاسبه‌ی طول مفصل خمیری استفاده و براساس آنها، معادله‌ی مقدار چرخش خمیری محاسبه شده است. بهترین معادله‌ی 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_{23cal} و B_{79cal} به ترتیب برابر 173.26 mm و 215 mm است که اساس محاسبات چرخش خمیری و ظرفیت چرخش خمیری در مطالعه‌ی

(mm) است. بتن مورد استفاده در تیر، مقاومت فشاری 41.37 MPa و فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها از یکدیگر 2439 mm بوده است که با ۳ لایه‌ی FRP به ضخامت 0.172 mm بهسازی شده است. مشخصات لایه‌های FRP نیز براساس جدول ۲ است. تیر B₂₂ با نسبت آرماتور طولی $0.33\rho_b$ ، تیر B₇₉ با نسبت آرماتور طولی $0.79\rho_b$ و B_{FRP} تیر آزمایشگاهی بهسازی شده با FRP است که دو آرماتور کششی به قطر 13 mm و دو آرماتور فشاری به قطر 3 mm دارد.

در تحلیل حاضر، جهت مدل‌سازی المان‌های بتنی از المان C₂D₈ (یک المان ۸ گره‌یی با ۳ درجه آزادی انتقالی در هر گره) و برای مدل‌سازی آرماتورهای فولادی از المان D₁D₂ (یک المان خرابایی با یک درجه آزادی انتقالی در هر گره که فقط در جهت طولی توانایی انتقال نیرو دارد) و جهت مدل‌سازی ورقه‌های FRP از المان S₊R, Shell (یک المان ۴ گره‌یی با ۶ درجه آزادی سه درجه‌ی انتقالی و ۳ درجه دورانی در هر گره) 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 Interaction استفاده شده است، که در آن آرماتور و FRP در 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 مقایسه‌ی بین نمودارهای بار- 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 بهسازی شده با FRP است. مقاومت فشاری بتن تیرهای B₂₂ و B₇₉ (اعداد ۳۳ و ۷۹ نشان‌دهنده‌ی درصد

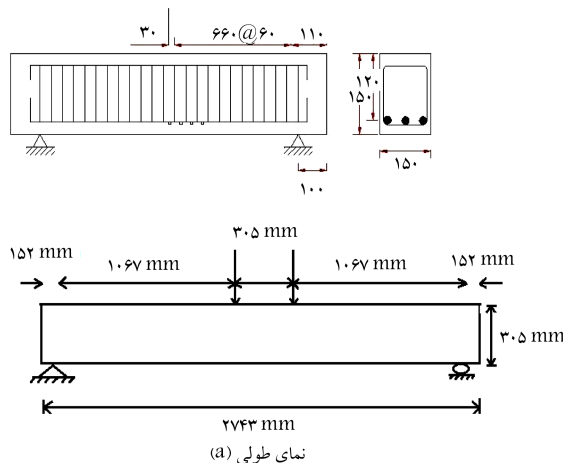


شکل ۵. المان‌های مدل‌سازی.^[۸]

و $0.79\rho_b$ بوده است. در جدول ۱، خصوصیات میلگردهای مسلح‌کننده (که در ناحیه‌ی کششی تیر در فاصله‌ی 30 mm از تراز زیرین تیر قرار گرفته‌اند) ارائه شده است. همچنین مشخصات هندسی این دو تیر مذکور و تیر بهسازی شده 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 $303 \times 205 \times 2743 \text{ mm}$ و طول 2743

جدول ۱. مشخصات میلگردها.

شماره‌ی میلگرد	سطح مقطع (cm ²)	تنش تسلیم (MPa)	مدول کشسانی (GPa)
D ₃	0.7065	344.7	119
D ₁₀	0.71	406	175
D ₁₃	1.27	413	200
D ₁₆	1.99	443	172
D ₁₉	2.87	419	174



شکل ۴. مشخصات هندسی تیرهای کالیبره‌شده.^[۸]

جدول ۲. مشخصات لایه‌های FRP.^[۲]

μ_{12}	$G_{12} \text{ MPa}$	$G_{13} = G_{12} \text{ MPa}$	$Y' \text{ MPa}$	$Y \text{ MPa}$	$X' \text{ MPa}$	$X \text{ MPa}$	$E_{22} \text{ GPa}$	$E_{11} \text{ GPa}$
0.17	52.3	86.5	206	52	-2758	2758	5.14	3.141

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، E₁₁ مدول کشسانی در جهت طولی، E₂₂ مدول کشسانی در جهت عرضی است.

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج صحت‌سنجی.

نمونه	P_y	P_u	Δ_y	Δ_u
B _{۳۳} AZ	۴۹,۴۵	۵۲,۵۵	۵,۹	۱۴,۸
B _{۳۳} KAL	۱۱,۵۰	۰۹,۵۵	۸۴,۶	۳۸,۱۲
B _{۷۹} AZ	۸۲,۱۰۳	۰۴,۱۰۸	۸,۵	۵,۱۱
B _{۷۹} KAL	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_{۳۳}AZ نمونه‌ی آزمایشگاهی با ρ_b ۰/۳۳،

B_{۳۳}KAL نمونه‌ی کالیبره‌شده با ρ_b ۰/۳۳،

B_{۷۹}AZ نمونه‌ی آزمایشگاهی با ρ_b ۰/۷۹،

B_{۷۹}KAL نمونه‌ی کالیبره‌شده با ρ_b ۰/۷۹،

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

B_{FRPKAL} نمونه‌ی کالیبره‌شده با FRP.

آرما تورکشی استفاده‌شده در تیرها یعنی $\rho_{balance}$ ۰/۳۳ و $\rho_{balance}$ ۰/۷۹ (است) برابر ۶۶/۶MPa و مقاومت فشاری تیر سوم که B_{FRP} نامیده شده است (زیرنویس FRP به معنای تیر بهسازی شده با FRP است)، برابر ۴۱/۳۷ MPa مدل‌سازی است. نحوه‌ی مش‌بندی به‌گونه‌ی انتخاب شده است که به هم‌گرایی جواب‌ها کمک کند. برای جلوگیری از تمرکز تنش ناشی از اعمال بار متمرکز از صفحه‌ی فولادی با مدول کشسانی بالا (صلب) که در زیر بار تغییر شکل نداشته باشد، استفاده شده است. جهت تحلیل استاتیکی غیرخطی تیرها از بارهای متمرکز که طی ۱۰۰ مرحله به تیرها اعمال شده‌اند، مطابق شکل ۴ استفاده شده است. در مرحله‌ی بعد، جهت بررسی نحوه‌ی صحت‌سنجی، نمودارهای نیرو - تغییر مکان تیرهای مدل‌سازی شده 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 استخراج شده در شکل‌های ۶ الی ۸ و نتایج ارائه‌شده در جدول ۳، روش المان محدود، تطابق قابل‌قبولی 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.

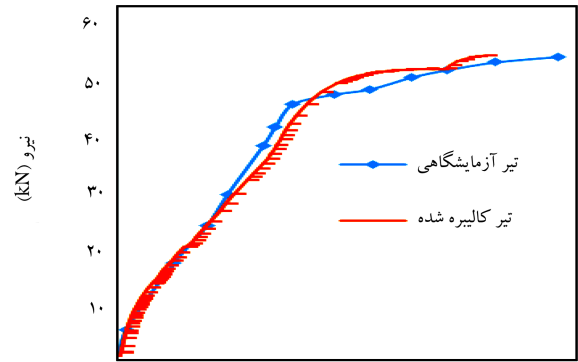
۳. بهسازی تیر با استفاده از ورقه‌های FRP

جهت بهسازی تیر B_{۳۳}، ورقه‌های FPR به قسمت کششی تیر چسبانده شده است. بدین منظور در نرم‌افزار آباکوس از منوی Interaction گزینه‌ی embed استفاده شده است. لازمی استفاده از فرض مذکور بر این اساس است که شکست تیر

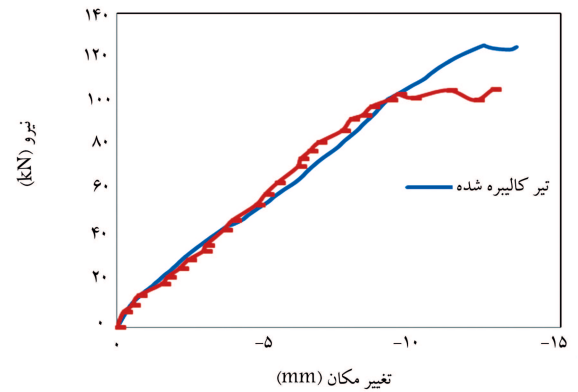
جدول ۴. درصد خطای صحت‌سنجی‌ها.

نمونه	Δ_{ykal}/Δ_y	Δ_{ukal}/Δ_u	P_{ykal}/P_y	P_{ukal}/P_u
B _{۳۳} KAL	۱۶/۱	۸۴/۰	۱/۱	۰۵/۱
B _{۷۹} KAL	۲/۱	۱۷/۱	۰۶/۱	۱۶/۱
B _{FRPKAL}	۰۶/۱	۸۷/۰	۰۸/۱	۰۶/۱

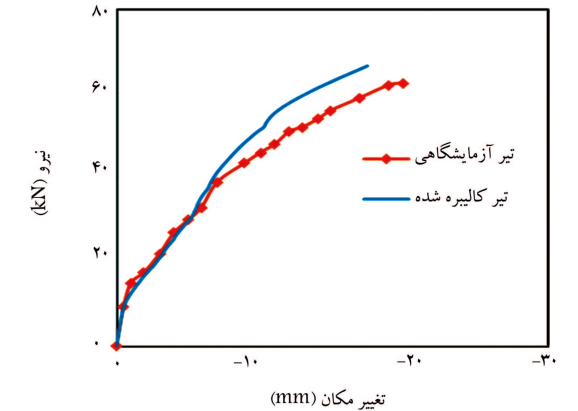
Δ_y تغییر مکان تسلیم، Δ_u تغییر مکان نهایی تیر، Δ_{yaz} تغییر مکان تسلیم نمونه‌ی آزمایشگاهی، Δ_{ykal} تغییر مکان تسلیم نمونه‌ی کالیبره‌شده، Δ_{uaz} تغییر مکان نهایی نمونه‌ی آزمایشگاهی.



شکل ۶. نمودار بار - تغییر مکان تیر B_{۳۳}.



شکل ۷. نمودار بار - تغییر مکان تیر B_{۷۹}.

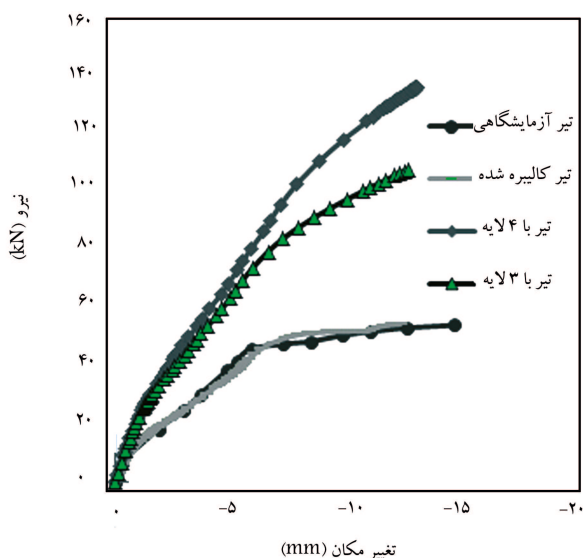


شکل ۸. نمودار بار - تغییر مکان تیر B_{FRP}.

با توجه به نتایج به دست آمده، بار تسلیم تیر B_{۳۳} بعد از بهسازی با ۳ و ۴ لایه 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 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 مقایسه‌ی که بین بار نهایی تیر قبل و بعد از بهسازی به عمل آمده، مشاهده شده است که بار نهایی تیر به میزان ۱/۹۸ و ۲/۵ برای نمونه‌های B_{۳۳} و B_{۳۳} افزایش یافته است. بر این اساس، اگر مقایسه‌ی بین تغییر مکان نهایی تیرهای بهسازی شده‌ی B_{۳۳} و B_{۳۳} و تغییر مکان نهایی تیر آزمایشگاهی، که نشان‌دهنده‌ی خیز نهایی واقعی تیر است، انجام

در اثر از بین رفتن اتصال بین FRP و تیر بتنی یا ورقه‌ورقه شدن لایه‌های FRP نیست. در این صورت 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. [۱۰۹]

به منظور بهسازی تیر B_{۳۳} با استفاده از ورقه‌های FRP، در اولین سعی ۳ ورقه‌ی FRP با مشخصات ارائه شده در جدول ۵ به قسمت زیرین تیر چسبانده شده است. بعد از تحلیل تیر بهسازی شده و کنترل کرنش‌ها و تنش‌های حاصل از خروجی نرم‌افزار، در حالی که کرنش در ورقه‌های FRP تقریباً برابر ۰/۰۷۵ بوده است، کرنش فشاری بتن در مقطع بحرانی وسط تیر حدود ۰/۰۲۶ به دست 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 ۰/۰۶۴ به دست 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 بهسازی شده 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.



شکل ۹. نمودار بار - تغییر مکان تیر B و بعد از بهسازی.

جدول ۵. مشخصات ورقه‌های FRP.

ضخامت (mm)	کرنش نهایی (۰/۰)	X (MPa)	E (GPa)
۱۶	۱۴/۸	۳۴۰۰	۲۴۰

E مدول کشسانی لایه‌ها و X مقاومت کششی لایه‌هاست.

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

نمونه	$\Delta y_{az} / \Delta y$	$\Delta y_{kal} / \Delta y$	$\Delta u_{az} / \Delta u$	$\Delta u_{kal} / \Delta u$	$\Delta y / \Delta u$
B _{۳۳} AZ	-	۰/۸۶	-	۰/۸۸۵	۲/۵
B _{۳۳} Cal	۱/۲۴۷	-	۰/۸۳۶	-	۱/۸۳
B _{۳۳} F۲	۱/۲۴۴	۱/۰۷	۰/۸۶	۱/۰۲	۱/۷۳
B _{۳۳} F۴	۱/۲۲	۱/۰۵	۰/۸۸۵	۱/۱۹۵	۱/۸

Δu تغییر مکان نهایی مقطع بتنی، Δy تغییر مکان تسلیم مقطع بتنی، Δy_{az} تغییر مکان تسلیم نمونه‌ی آزمایشگاهی و Δu_{az} تغییر مکان نهایی نمونه‌ی آزمایشگاهی.

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

نمونه	$P_Y / P_{y_{az}}$	$P_Y / P_{y_{kal}}$	$P_u / P_{u_{AZ}}$	$P_u / P_{u_{az}}$
B _{۳۳} AZ	-	۰/۹۰۷	-	۰/۹۵
B _{۳۳} Cal	۱/۱	-	۱/۰۴	-
B _{۳۳} F۲	۱/۸۷	۱/۷	۲/۶۲	۲/۵
B _{۳۳} F۴	۲/۶۲	۲/۳۸	۲/۰۷	۱/۹۸

که در آن $P_{y_{az}}$: بار تسلیم نمونه‌ی آزمایشگاهی، $P_{u_{az}}$ بار نهایی نمونه‌ی آزمایشگاهی، P_y بار تسلیم تیر، P_u بار نهایی تیر، $P_{y_{kal}}$ بار تسلیم نمونه‌ی کالیبره است.

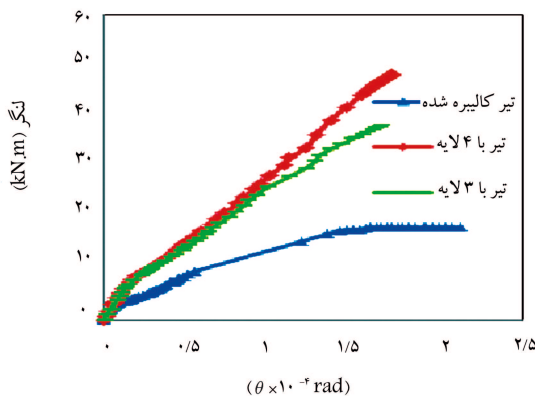
$$\theta_p = (\varphi_u - \varphi_y)LP \quad (11)$$

که در آن ها، 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 لحظه شکست تیر و θ_p چرخش خمیری تیر بتن آرمه هستند.

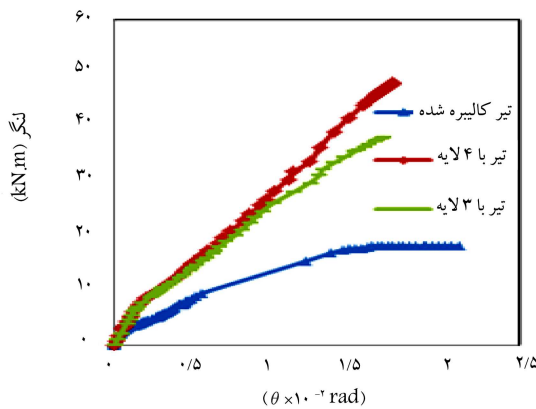
۲.۳. استخراج معیارهای پذیرش متناسب با ترازهای عملکردی تیر

B_{۲۳}

موضوع مهم دیگر در روش عملکردی، ارائه ی معیارهای پذیرش متناظر با هر تراز است. معیارهای مختلفی برای ترازهای عملکردی قابل بررسی است، از جمله می توان به تغییر شکل نسبی جانبی یا Drift، میزان دوران خمیری و شکل پذیری اشاره کرد. از پارامترهای اساسی در تعیین رفتار غیرخطی اعضاء سازه یی، پارامتر شکل پذیری



شکل ۱۰. نمودار لنگر - انحناء تیر B_{۲۳} قبل و بعد از بهسازی.



شکل ۱۱. نمودار لنگر - چرخش B_{۲۳} قبل و بعد از مقاوم سازی.

شود؛ تغییر مکان تیر برای نمونه های B_{۲۳FR۲} و B_{۲۳FR۴} به میزان ۱۹ و ۱۴/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین با مقایسه یی که بین تیر B_{۲۳} و تیرهای B_{۲۳FR۲} و B_{۲۳FR۴} 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 گفته شده می توان بیان کرد که بعد از بهسازی تیرهای بتن آرمه با استفاده از الیاف پلیمری مسلح کننده، خیز نهایی و خیز متناظر با تسلیم آرماتورهای کششی این تیرها کاهش پیدا می کند.

۱.۳. تأثیر ورقه های FRP در انحناء و ظرفیت چرخشی تیر

بهسازی شده

براساس روابط ۱۰ الی ۱۳^[۷] و مقادیر کرنش های کشسان و خمیری مربوط به بتن و آرماتورهای طولی و FRP، نمودارهای لنگر - انحناء و لنگر - چرخشی تیر کالیبره شده ی B_{۲۳} و تیرهای بهسازی شده ی B_{FRP۲} و B_{FRP۴} رسم شده است. با توجه به شکل ۱۰ و نتایج به دست آمده در جدول ۸ مشاهده می شود که انحناء نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی و انحناء نهایی تیر بعد از بهسازی به ترتیب به مقدار ۸۴/۶، ۸۵/۶، ۷۶/۸ و ۸۷ درصد کاهش می یابد. همچنین براساس شکل ۱۱ و جدول ۹، اگر مقایسه یی 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 ورقه های FRP چرخش نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی بعد از بهسازی برای تیرهای B_{FRP۲} و B_{FRP۴} 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 می یابد.

$$\varphi = \frac{f_y}{d(1-k)} \quad (8)$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} \quad (9)$$

$$\theta_{AB} = \int_B^A \varphi dx \quad (10)$$

جدول ۸. نتایج انحناء B_{۲۳} قبل و بعد از بهسازی.

نمونه	Φ_u	Φ_y	Φ_u / Φ_{uCAL}	Φ_y / Φ_{yCAL}
B _{۲۳CAL}	۱۸/۸	۳۷/۳	-	-
B _{۲۳FR۲}	۳۹/۶	۴۶/۳	۰/۷۸۰	۰/۸۵۴
B _{۲۳FR۵}	۲۹/۶	۳/۴۳	۰/۷۶۸	۰/۷۶۸

که در آن Φ_u انحنای نهایی تیر B_{۲۳} و Φ_y انحنای تسلیم B_{۲۳} است.

جدول ۹. نتایج چرخش تیر B_{۲۳} قبل و بعد از بهسازی.

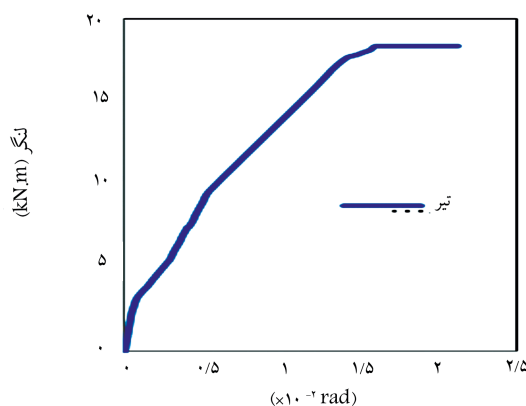
نمونه	θ_y	θ_u	θ_p	$\theta_y K_{aL} / \theta_u$	$\theta_u K_{aL} / \theta_p$	$\theta_p K_{aL} / \theta_p$
B _{۲۳CAL}	۰/۱۲۵	۰/۲۱۲	۰/۰۸۷	-	-	-
B _{۲۳FR۲}	۰/۱۲۷	۰/۱۷۸	۰/۰۴۵	۱/۰۱	۰/۸۱	۰/۵۱۶
B _{۲۳FR۵}	۰/۱۲۶	۰/۱۷	۰/۰۴۴	۱/۰۱	۰/۸	۰/۴۹۷

θ_u چرخش نهایی تیر B_{۲۳}، θ_y چرخش تسلیم تیر B_{۲۳}، θ_p ظرفیت چرخش خمیری تیر B_{۲۳} و $\theta_y K_{aL}$ و $\theta_u K_{aL}$ چرخش تسلیم تیر B_{۲۳} کالیبره.

که بیانگر این مطلب است که شکست تیر به صورت ترد و ناگهانی است.^[۱۰] علت آن را می‌توان این‌گونه بیان کرد: تیر BFRP₂ (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 B₂₃ 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، انحنا نهایی در تیرهای مقاوم‌سازی شده‌ی BFRP₂ و BFRP₄ به ترتیب به میزان ۷۶/۸ و ۷۸/۱ درصد و انحنا 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 BFRP₂ و BFRP₄ 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 BFRP₂، 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 مقایسه‌ی بین تغییر مکان‌های نهایی دو تیر B₂₃Cal (کم‌فولاد) و B₂₃Cal (پر فولاد) صورت پذیرد، بر مبنای نتایج آزمایشگاهی تغییر مکان تیر B₂₃ 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 B₂₃Cal، نرم‌فزار تا حدود ۲ برابر تغییر مکان نقطه‌ی تسلیم، رفتار غیرخطی تیر را نشان می‌دهد؛ در صورتی که در تیر B₂₃Cal، ۱/۳ برابر تغییر مکان نقطه‌ی تسلیم، رفتار غیرخطی تیر را نشان می‌دهد. براساس منحنی‌های به‌دست آمده‌ی نیرو - تغییر شکل، رفتار تیر B₂₃ به صورت نیمه شکل پذیر است.

طبق مرجع ۵ برای اینکه رفتار یک عضو، کنترل‌شده توسط تغییر شکل باشد، باید تغییر شکل آستانه‌ی کاهش مقاومت به تغییر شکل حد خطی بیشتر از ۲ باشد.^[۵] مطابق نمودارهای نیرو - تغییر مکان استخراج شده حاصل از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی تیر B₂₃، 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 B₂₃، کنترل‌شده توسط تغییر شکل است. در مورد تیرهای بهسازی‌شده‌ی BFRP₂ و BFRP₄، 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، کنترل‌شده توسط نیرو است و باید نیروهای طراحی از کرانه‌ی پایین مقاومت عضو با در نظر 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 به صورت ترد است.



شکل ۱۲. نمودار لنگر - چرخش تیر B₂₃.

جدول ۱۰. شکل‌پذیری تیر B₂₃ در ترازهای عملکردی.

نمونه	تغییر شکل سطح عملکرد		
	CP	LS	IO
B ₂₃ Cal	۲/۵	۱/۸۸	۱/۲۶
B ₂₃ az	۱/۸۱	۱/۳۶	۱

جدول ۱۱. مقدار دوران متناظر با سطوح عملکردی.

نمونه	دوران متناظر با سطح عملکرد		
	CP	LS	IO
B ₂₃ Cal	۰/۰۲۱۲	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۰۷

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 B₂₃ آزمایشگاهی و کالیبره‌شده در جدول ۱۰ ارائه شده است.

دوران‌های خمیری، عامل اصلی ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار هستند. شکل ۱۲، نمودار لنگر - چرخش تیر B₂₃ را قبل و بعد از بهسازی نشان می‌دهد. با توجه به مطالب ذکرشده، دوران خمیری متناظر با حدهای CP، LS و IO تیر B₂₃ 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 B₂₃ به صورت چندخطی است. قسمت اول، به صورت کشسان خطی و نشان‌دهنده رفتار تیر قبل از ترک خوردن بتن در ناحیه‌ی کششی است و شیب قسمت ذکرشده نسبت به حالت بهسازی‌نشده، بیشتر است. قسمت دوم، به صورت خطی و کشسان تا تسلیم شدن آرماتورهای طولی و شیب آن نسبت به حالت بهسازی‌نشده بیشتر است. قسمت سوم باز هم به صورت خطی و با کاهش بیشتر شیب و نمودار به صورت ناگهانی قطع می‌شود،

نمونه‌ها	B _{FRP۲}	B _{FRP۳}	B _{V۹}
لنگر مقاوم طراحی (N.m)	۴۸۲۵۰	۳۸۳۶۲	۴۳۷۸۴

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_{۲۳} (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_{۲۳}، انحناء نظیر تسلیم شدن آرماتورهای طولی به مقدار جزئی افزایش، انحناء نهایی تیر مذکور کاهش، چرخش نظیر جاری شدن آرماتورهای طولی نیز به مقدار جزئی افزایش و چرخش نهایی و ظرفیت چرخش خمیری تیر ذکر شده 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_{V۹} بیشتر از تیر B_{۲۳} و انحناء نهایی تیر B_{۲۳} بیشتر از تیر B_{V۹} بوده است. همچنین چرخش نظیر جاری شدن آرماتورهای طولی برای تیر B_{V۹} بیشتر از B_{۲۳}، اما چرخش نهایی و ظرفیت چرخش خمیری تیر B_{۲۳} بیشتر از تیر B_{V۹} بوده است.
۴. با توجه به اینکه تغییر مکان حد کاهش مقاومت تیر B_{V۹} 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_{۲۳} به تغییر مکان حد خطی آن بیشتر از ۲ است، معیار پذیرش آن، کنترل‌شونده توسط تغییر شکل است. تیرهای پر فولاد همانند تیر B_{V۹} 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 کم فولاد 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 - تغییر مکان تیرهای بتن‌آرمه‌ی مقاوم‌سازی شده 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_{۲۳} قبل و بعد از مقاوم‌سازی بررسی شود، مشاهده خواهد شد که بعد از مقاوم‌سازی تیر، شکل نمودار تقریباً به صورت ۳ خطی می‌شود که قسمت اول به صورت 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 به صورت 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 به صورت خطی و با کاهش بیشتر شیب و نمودار به صورت ناگهانی قطع می‌شود، که بیانگر این مطلب است که بعد از بهسازی تیرها با FRP، شکست تیرها به صورت 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 به دست آورد که با استفاده از نمودارهای حاصل از تحلیل عددی براساس جدول ۱۲، کرانه‌ی پایین مقاومت اعضا با استفاده از نمودارهای لنگر - چرخش اعضا که از نرم‌افزار استخراج شده‌اند، به دست می‌آید.

پانویس‌ها

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", *Proceed-*

ings of 8th International Congress in Civil Engineering, Shiraz, (in Persian) (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 Tanarlan, 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).

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 Persian) (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 strength 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)