

بررسی آزمایشگاهی و عددی مقاومت‌سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از پاشش پلیمرهای مسلح به الیاف شیشه (SGFRP)

علی عباس‌زاده حسنلویی

کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

کیان آغنی

دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

حسن افشین *

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

چکیده

امروزه، مقاومت‌سازی اعضای بتنی یکی از نیازهای اصلی ساخت و ساز می‌باشد. این مهم باعث شده است تا ارائه روش‌های نوین مقاومت‌سازی به منظور کاهش هزینه‌ها از اهمیت ویژه برخوردار باشد. روش مقاومت‌سازی اعضای بتنی با استفاده از پاشش پلیمرهای مسلح به الیاف شیشه (SGFRP) با هدف افزایش سرعت عمل، توجیه اقتصادی و زمانی یکی از روش‌های نوین مقاومت‌سازی در زمینه بهسازی با FRPها می‌باشد. هدف این پژوهش ارزیابی تأثیر تأثیر روش مذکور در رفتار خمشی و برشی تیرهای بتنی می‌باشد. در این تحقیق ۹ نمونه تیر بتنی شامل نمونه‌های کنترلی، نمونه‌های با ضعف برشی و نمونه‌های با ضعف خمشی ساخته شده و با استفاده از روش SGFRP به صورت سه و پنج لایه مقاومت‌سازی شده‌اند. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری سه نقطه‌ای تا لحظه شکست قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که روش مقاومت‌سازی SGFRP باعث افزایش محسوس ظرفیت باربری و جذب انرژی تیرها شده و به خوبی می‌تواند در مقاومت‌سازی تیرهای بتنی مورد استفاده قرار گیرد. در حالت کلی، مقاومت‌سازی به روش SGFRP با پنج لایه نتایج مطلوب‌تری نسبت به حالت سه لایه داشته است. در مقاومت‌سازی پنج لایه، ظرفیت باربری در تیرهای دارای ضعف خمشی، ضعف برشی و بدون ضعف به ترتیب ۸۲، ۵۳، ۴۸ درصد افزایش داشته است. به علاوه، افزایش محسوس ظرفیت باربری و جذب انرژی برای تیرهای مقاومت‌سازی مشاهده شد. همچنین، یک روش عددی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS برای مدل‌سازی روش مقاومت‌سازی SGFRP مذکور با استفاده از کدنویسی UMAT ارائه شده و نتایج حاکی از دقت مناسب روش عددی مذکور می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت‌سازی، تیرهای بتنی، SGFRP، ABAQUS، روش نوین.

* نویسنده مسئول: hafshin@sut.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از SFRP انجام شده است. Boyd و Banthia [10] مقایسه‌ای مابین دورپیچ و دورپیچ اسپری FRP انجام داد و نتیجه گرفت که روش پاشش FRP نتایج مطلوب‌تری نسبت به روش معمول ارائه می‌دهد. Lee و Hausman [9] به بررسی رفتار تیرهای بتنی آسیب دیده مقاوم‌سازی شده با پاشش الیاف کربنی (SCFRP) پرداخت. آن‌ها نشان دادند که تیرهای بتنی مقاوم‌سازی شده دارای ظرفیت باربری و جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های معمولی می‌باشند. Boyd و همکاران [8] از روش SFRP برای بهسازی تیرپل‌های آسیب دیده در مقیاس واقعی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از روش مذکور می‌توان ۹۵٪ از ظرفیت تیرپل آسیب دیده را بازیابی کرد. Ross و همکاران [11] از روش پاشش الیاف شیشه (SGFRP) برای مقاوم‌سازی پل‌ها در مقیاس واقعی استفاده کرده و نشان دادند که پل‌های مقاوم‌سازی شده دارای ظرفیت باربری و جذب انرژی بیشتری می‌باشند. با بررسی رفتار اتصال تیر به ستون بتنی مقاوم‌سازی شده به روش SFRP، Yang و همکاران [12] نشان دادند که روش مقاوم‌سازی مذکور به خوبی می‌تواند ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اتصال را افزایش دهد. Getahun و همکاران [13] از روش SFRP جهت بهسازی ستون‌های بتنی آسیب دیده استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که ستون‌های بهسازی شده از مقاومت کافی برخوردار هستند. Hussain و Pimanmas [14] با استفاده از روش SFRP تیرهای بتنی عمیق دارای بازشو را مقاوم‌سازی کرده و نتیجه گرفتند که این روش مقاوم‌سازی باعث افزایش ظرفیت باربری تیرها شده است. Ha و همکاران [15] و نیز Yang و Li [16] نشان دادند که چسبندگی بین لایه چسبی و سطح بتن در روش SFRP همانند روش معمول دارای مقاومت کافی می‌باشد. همچنین، تحقیقاتی محدودی نشان دادند که روش SFRP از پتانسیل کافی جهت استفاده در مقاوم‌سازی خمشی و برشی اعضای بتنی برخوردار است [17-19]. با وجود اینکه چندین پژوهش به بررسی کاربرد روش SFRP در مقاوم‌سازی اعضای بتنی پرداخته‌اند، اطلاعات اندکی در زمینه تأثیر روش مذکور بر رفتار اعضای بتنی به‌ویژه هنگام استفاده از الیاف مختلف و نیز قابلیت بومی‌سازی روش مذکور موجود است. بدین منظور، هدف این پژوهش بررسی تأثیر مقاوم‌سازی با روش پاشش الیاف شیشه SGFRP در رفتار تیرهای بتن مسلح می‌باشد.

زوال سریع زیرساخت‌های عمرانی در حال تبدیل شدن به یک چالش اصلی پیش‌روی سازه‌های بتنی است و بازسازی زیرساخت‌ها یک مشکل بزرگ در سراسر جهان است. فرسودگی پل‌ها و سایر زیرساخت‌های عمرانی نیاز به مواد و فرایندهای مقرون به صرفه و با دوام را برای استفاده در تعمیر و مقاوم‌سازی ایجاد کرده است. پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP^۱) به اشکال مختلفی مانند میله، ورق یا صفحه به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن و مقاومت در برابر خوردگی مناسب، در زمینه مقاوم‌سازی و بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش، با استفاده از چسب اپوکسی به سطح مورد نظر متصل شده و باعث ایجاد لایه تقویتی می‌شود. در این راستا، مطالعات فراوانی در مورد مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با استفاده از FRP انجام شده است [1-6]. یکی از مشکلات این روش، جداشدگی ورق یا صفحه FRP از سطح بتن بوده که می‌تواند به دلیل نفوذ ناکافی چسب به سطح بتن باشد [7].

به منظور بهبود ناحیه اتصال مابین FRP و بتن، روش پاشش (اسپری یا SFRP) مورد توجه قرار گرفت. در این روش، ابتدا لایه چسب به روی بتن به قدرت بالا پاشیده شده و سپس الیاف به روی لایه چسبی اسپری می‌شوند. در این روش، الیاف‌های متنوعی مانند شیشه، کربن، آرامید و بازالت به عنوان الیاف تقویت‌کننده استفاده می‌گردد. برای لایه متصل‌کننده نیز رزین‌های مختلفی از جمله اپوکسی، پلی‌استر و وینیل استر با روانی بالا به منظور نفوذ بیشتر در داخل حفره‌های سطح بتن، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مزایای این روش می‌توان به سرعت عمل بالا، امکان بهسازی نواحی غیر قابل دسترس و مقاوم‌سازی چند لایه اشاره کرد. همانند هر روش دیگری، این روش نیز دارای معایبی می‌باشد که مهم‌ترین آن پخش تصادفی الیاف بر روی سطح می‌باشد. کارایی مصالح FRP رابطه مستقیمی با درصد حجمی الیاف و راستای آن‌ها دارد. در صورتی که تمامی الیاف در یک جهت مشخص و مطلوب قرار گیرد، بیشترین کارایی را از نظر مقاومت و ضریب ارتجاعی دارد. از آنجایی که در روش پاشش FRP، راستای الیاف به صورت تصادفی تعیین می‌شود، مقاوم‌سازی به صورت چند لایه انجام می‌شود [8,9].

تحقیقات محدودی در زمینه بهسازی و مقاوم‌سازی اعضای بتنی با

جدول ۲- مشخصات مکانیکی چسب

مدول اولیه	مقاومت خمشی	مقاومت کششی
۳/۵ MPa	۴۵ MPa	۶۰ MPa

در پژوهش‌های پیشین [9,10-19]، درصد‌های ارائه شده برای نسبت حجمی الیاف به چسب در بازه ۱۵٪ الی ۳۰٪ قرار داشته و وابسته به نوع مواد به کار رفته و روش استفاده شده، می‌باشند. در این تحقیق، جهت دستیابی به درصد حجمی مناسب ترکیب چسب و الیاف، از ۱۲ نمونه شاهد بتنی بدون آرماتور طولی و عرضی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۴۵۰ mm استفاده شده است. بدین منظور، نمونه‌های بتنی مذکور با درصد‌های مختلف نسبت حجم الیاف به حجم چسب (F/E) برابر ۰/۱۷، ۰/۲۵ و ۰/۲۹ مقاوم سازی شده و تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای، مطابق شکل ۲، قرار گرفته‌اند.



شکل ۲- نمونه‌های شاهد و آزمایش آنها

شکل ۳ نازل ساخته شده جهت پاشش الیاف را نشان می‌دهد. ضخامت لایه مقاوم ساز برای تمامی نمونه‌ها ۳ میلی‌متر می‌باشد. لازم بذکر است که برخلاف روش معمول مقاوم سازی با FRP، کلیه عملیات مذکور با سرعت بالایی انجام گرفته است. در نهایت، ۳۰ دقیقه پس از پاشش، از یک میله فولادی صاف به عنوان غلطک برای خارج کردن حباب‌های هوا محبوس شده در لایه‌ها استفاده می‌شود. شکل ۴ نمودارهای نیرو- تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌های شاهد کنترلی و مقاوم سازی شده (به صورت میانگین) را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده درصد مناسب نسبت حجم الیاف به حجم چسب (F/E) برابر ۰/۲۵ (۲۰٪ الیاف و ۸۰٪ چسب) برای مقاوم سازی در نظر گرفته شده است.

در این راستا، تیرهای بتن مسلح دارای ضعف برشی و ضعف خمشی ساخته شده و مورد مقاوم سازی با استفاده از پاشش الیاف شیشه به صورت چند لایه قرار گرفته‌اند. سپس تیرهای مذکور تحت بارگذاری سه نقطه‌ای قرار گرفته و رفتار آنها ارزیابی شده است. به علاوه، یک روش عددی در نرم افزار المان محدود ABAQUS با استفاده از کدنویسی UMAT و معیار خرابی Tsai-Wu ارائه شده و دقت روش عددی مذکور در زمینه تخمین رفتار تیرهای بتنی مقاوم سازی شده به روش پاشش الیاف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق، از الیاف شیشه جهت مقاوم سازی در تیرهای بتن مسلح دارای ضعف به منظور تأمین مقاومت خمشی و برشی استفاده شده است. مشخصات مکانیکی مصالح مصرفی، مشخصات تیرهای بتنی، نحوه مقاوم سازی و آزمایش نمونه‌ها در قسمت‌های بعد آورده شده است.

۱-۲- مشخصات الیاف و چسب

در این پژوهش از الیاف شیشه خرد شده (Chopped) به طول ۱۸ میلی‌متر، شکل ۱، و چسب اپوکسی شفاف و روان با نام صنعتی Ker828 استفاده شده است که مشخصات آنها مطابق جداول ۱ و ۲ می‌باشد.

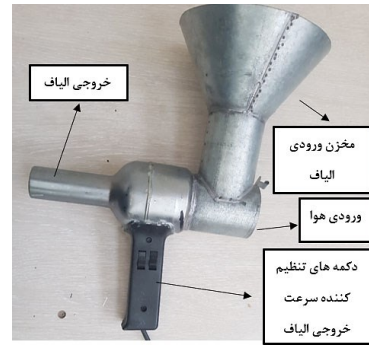


شکل ۱- الیاف شیشه مصرفی

جدول ۱- مشخصات مکانیکی الیاف شیشه

کرنش نهایی	مدول الاستیسیته	مقاومت کششی	ضخامت	چگالی
٪	GPa	MPa	(mm)	(kg/m ³)
۴/۵۰	۶۹	۲۲۵۰	۰/۱۰	۲۵۲۰

مسلح به الیاف شیشه (SGFRP) می‌باشند. مشخصات نامگذاری، آرماتورگذاری و مقاوم‌سازی تیرها به صورت جداول ۴ و ۵ می‌باشد. میلگردهای عرضی و طولی به ترتیب دارای مقاومت تسلیم آزمایش شده 412 MPa و 380 MPa می‌باشند. تمامی تیرها به مدت ۲۸ روز در دمای 25 ± 5 درجه سانتی‌گراد در شرایط استاندارد عمل‌آوری شده‌اند.



شکل ۳- نازل پاشش الیاف

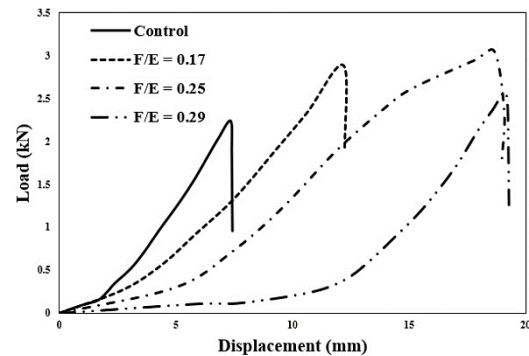
جدول ۴- مشخصات نام‌گذاری و آرماتورگذاری نمونه‌ها

مشخصه تیر	نام	آرماتور فشاری کششی	آرماتور برشی
بدون ضعف	N10-L8.5	2Ø8	2Ø10
ضعف خمشی	N8-L8.5	2Ø8	2Ø8
ضعف برشی	N10-L20	2Ø8	2Ø10

جدول ۵- نام‌گذاری و مشخصات آرماتورگذاری نمونه‌ها

نام	نحوه مقاوم‌سازی
L33-N10-L8.5	نمونه بدون ضعف، ۳ لایه، ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر
L35-N10-L8.5	نمونه بدون ضعف، ۵ لایه، ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر
L33-N8-L8.5	نمونه دارای ضعف خمشی، ۳ لایه، ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر
L35-N8-L8.5	نمونه دارای ضعف خمشی، ۵ لایه، ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر
L33-N10-L20	نمونه دارای ضعف برشی، ۳ لایه، ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر
L35-N10-L20	نمونه دارای ضعف برشی، ۵ لایه، ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر

تیرهای مذکور در سه سری بدون ضعف، دارای ضعف برشی و دارای ضعف خمشی دسته‌بندی شده‌اند. در نمونه‌های دارای ضعف برشی، از آرماتورهای برشی با فاصله بسیار زیاد استفاده شده که سبب کاهش مقاومت برشی تیر شده است. در طرف مقابل، در تیرهای دارای ضعف خمشی، از آرماتور طولی حداقل جهت ایجاد ضعف در ناحیه کششی نمونه استفاده شده است، شکل ۵. تیرهای بتنی مذکور به دو صورت خمشی و برشی مطابق شکل ۶ مورد مقاوم‌سازی قرار گرفته‌اند. برای مقاوم‌سازی به روش SGFRP، ابتدا سطح مورد نظر عاری از غبار و رطوبت گردیده و قالب‌گیری شده تا از روان شدن چسب روی سطوح دیگر جلوگیری شود، شکل ۷. برای شروع، یک لایه چسب و سپس الیاف بر روی سطح



شکل ۴- نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای نمونه‌های شاهد کنترلی و مقاوم‌سازی شده به صورت میانگین

۲-۲- بتن

بتن مورد استفاده جهت ساخت نمونه از نوع بتن معمولی با سیمان تیپ دو کارخانه سیمان صوفیان (بدون فوق‌روان کننده یا مواد افزودنی) بوده و مشخصات آن به صورت جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- طرح اختلاط و مشخصات بتن مصرفی

مؤلفه	مقدار
سیمان (kg/m^3)	۴۰۷
آب (kg/m^3)	۲۰۰
ماسه (kg/m^3)	۱۱۲۴
درشت‌دانه (kg/m^3)	۶۴۲
نسبت آب به سیمان	۰/۴۹
اسلامپ (mm)	۸۰/۱۲
مقاومت مشخصه (MPa)	۳۳/۴۲

۳-۲- مشخصات تیرها و نحوه مقاوم‌سازی آنها

تعداد ۹ نمونه تیر بتنی به ابعاد ($100 \times 200 \times 1500 \text{ mm}$) در سه سری ساخته شده است. ۳ عدد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه کنترلی و ۶ عدد به عنوان نمونه مقاوم‌سازی شده به صورت پاشش پلیمرهای

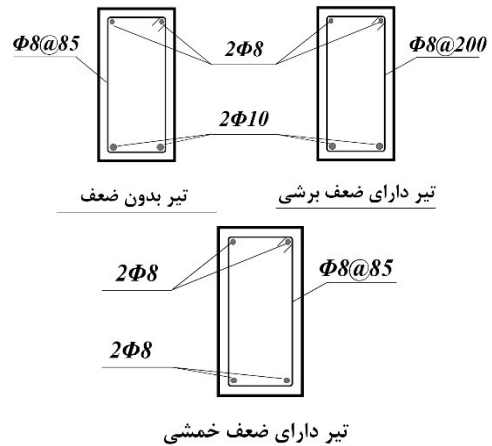


شکل ۹- پاشش لایه چسب نهایی

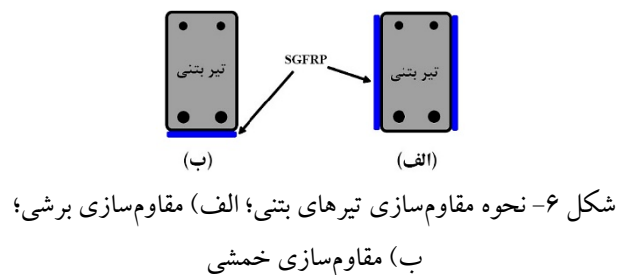


شکل ۱۰- تیرهای بتنی مقاوم سازی شده با روش SGFRP

با استفاده از پمپ هوا پاشیده می شوند. این عملیات برای نمونه‌ها سه و پنج بار انجام می گیرد، شکل ۸ سپس، قالب‌های دور تا دور تیرهای بتنی حذف شده و مطابق شکل ۹ لایه نهایی چسب بر روی سطح آن اسپری شده تا لایه نهایی چسب باشد. شکل ۱۰ تیرهای بتنی را پس از اتمام عملیات مقاوم سازی نشان می دهد.



شکل ۵- جزئیات آرماتور گذاری تیرها (اندازه‌ها به mm)



شکل ۶- نحوه مقاوم سازی تیرهای بتنی؛ الف) مقاوم سازی برشی؛ ب) مقاوم سازی خمشی



شکل ۷- قالب گیری ناحیه مقاوم سازی در تیرهای بتنی



شکل ۸- مقاوم سازی تیرهای بتنی با روش SGFRP

۲-۴- آزمایش تیرهای بتنی

برای یافتن ظرفیت باربری تیرهای کنترلی و مقاوم سازی شده، از بارگذاری سه نقطه‌ای فزاینده با دهانه خالص بارگذاری ۱۳۵ سانتی متر، مطابق شکل ۱۱، با سرعت بارگذاری ۲ MPa/min استفاده شده است. در این آزمایش از جک هیدرولیکی ۲۵ تنی با بازشدگی ۲۰۰ میلی متر و LVDT با ظرفیت بازشدگی ۱۰۰ میلی متر و حساسیت ۰/۰۱ میلی متر برای اندازه گیری تغییر مکان وسط دهانه استفاده شده است.

۲-۵- نحوه تفسیر نتایج

برای تمامی نمونه‌ها، نمودارهای بار- تغییر مکان وسط دهانه و نحوه خرابی آنها ارائه شده است. علاوه بر این، نیرو در لحظه شروع ترک خوردگی (P_{cr})، نیروی باربری حداکثر (P_{II})، مقدار خیز در

جدول ۶- نتایج بدست آمده از آزمایش

مشخصه	Control	L33	L35
P_{cr} (kN)	۲۶	۳۸	۴۰
P_u (kN)	۳۷	۴۰	۴۵
Δ_{cr} (mm)	۴/۶	۸/۱	۷/۶
Δ_u (mm)	۸۷	۹۶	۹۲
Δ_u / Δ_{cr}	۱۸/۹	۱۱/۸	۱۲/۱
E_{cr} (J)	۷۰	۱۳۱	۱۷۸
E_u (J)	۲۸۸۲	۳۵۴۷	۳۷۰۵

همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت‌سازی نمونه با سه لایه پاشش و پنج لایه پاشش به ترتیب باعث افزایش ۴۶ و ۵۳ درصدی نیروی در لحظه شروع ناحیه پلاستیک نسبت به حالت بدون مقاومت‌سازی شده است. به علاوه، میزان جذب انرژی اولیه (تا لحظه شروع ناحیه پلاستیک) به ترتیب افزایش ۸۷ و ۱۵۴ درصدی را تجربه کرده است. همچنین مقدار جذب انرژی نهایی نیز به ترتیب به میزان ۲۳ و ۲۸ درصد افزایش یافته ولیکن شکل پذیری به ترتیب به میزان ۳۷ و ۳۵ درصد به ترتیب کاهش یافته است. نمای شکست تیرها نیز به صورت شکل ۱۴ می‌باشد. در حالت کلی، تیر کنترلی با کاهش ناگهانی مقاومت بدلیل ایجاد ترک قطری شدید ناشی از ضعف برشی، روبرو شده است. لایه مقاومت‌ساز SGFRP با جبران این ضعف توانسته است خرابی تیر بتنی را از حالت برشی به حالت خمشی تغییر دهد. همچنین، هیچ‌گونه جدایشی مابین لایه‌های مقاومت‌ساز و تیر بتنی مشاهده نشده است.



(الف) تیر کنترلی



(ب) تیر مقاومت‌سازی شده L35

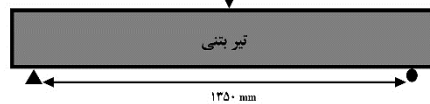
شکل ۱۴- نمای شکست تیرهای دارای ضعف برشی

لحظه شروع خرابی‌های ترک خوردگی (Δ_{cr})، مقدار خیز نهایی مشاهده شده در آزمایش پیش از خرابی کامل (Δ_u)، جذب انرژی تا لحظه شروع ناحیه پلاستیک (E_{cr}) و جذب انرژی نهایی (E_u) مطابق شکل ۱۲ برای تمامی نمونه‌ها ارائه شده است.



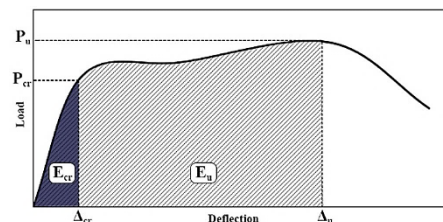
(الف)

محل بارگذاری



(ب)

شکل ۱۱- بارگذاری سه نقطه‌ای تیرهای بتنی؛ (الف) بارگذاری نمونه؛ (ب) شکل شماتیک بارگذاری تیرها

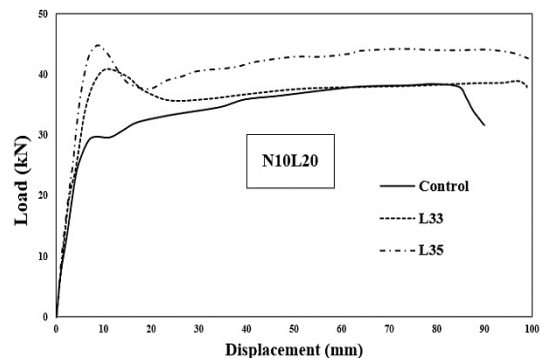


شکل ۱۲- شکل شماتیک نقاط P_u ، P_{cr} ، Δ_u ، Δ_{cr} ، E_{cr} و E_u

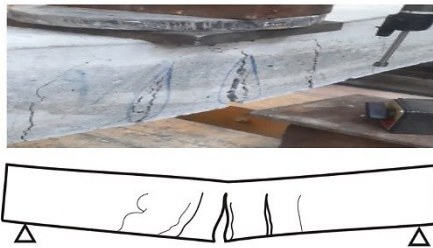
۳- نتایج آزمایش

۳-۱- نمونه‌های دارای ضعف برشی

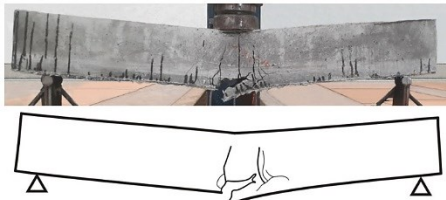
در شکل ۱۳ و جدول ۶ نتایج آزمایش خمشی نمونه‌های دارای ضعف برشی ارائه شده است.



شکل ۱۳- نتایج بارگذاری برای نمونه‌های دارای ضعف برشی

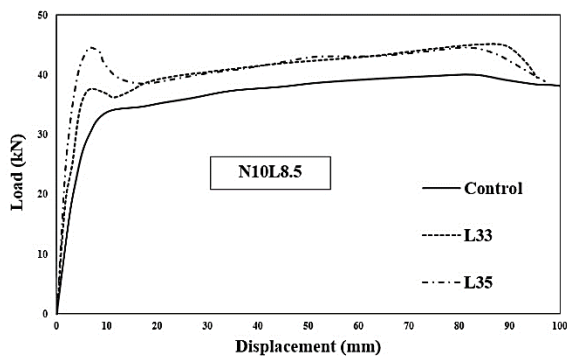


(الف) تیر کنترلی



(ب) تیر مقاوم سازی شده L35

شکل ۱۶- نمای شکست تیرهای دارای ضعف خمشی



شکل ۱۷- نتایج بارگذاری برای نمونه های بدون ضعف

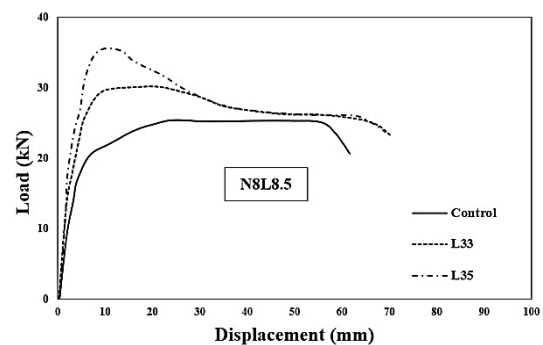
جدول ۸- نتایج بدست آمده از آزمایش

L35	L33	Control	مشخصه
۴۰	۳۴	۲۷	P_{cr} (kN)
۴۴	۴۲	۳۶	P_u (kN)
۳/۲	۴/۲	۵/۱	Δ_{cr} (mm)
۸۱	۸۹	۸۳	Δ_u (mm)
۲۶/۱	۲۱/۸	۱۶/۲	Δ_u / Δ_{cr}
۶۷	۷۹	۸۰	E_{cr} (J)
۳۳۶۱	۳۶۱۸	۲۹۸۹	E_u (J)

همانطور که مشاهده می شود، مقاوم سازی نمونه های سه لایه و پنج لایه به ترتیب باعث افزایش ۲۵ و ۴۸ درصدی نیروی اولیه نسبت به حالت بدون مقاوم سازی شده است. میزان جذب انرژی اولیه به ترتیب کاهش ۱/۲ و ۱۶ داشته و نیز مقدار جذب انرژی نهایی نیز برای سه لایه و پنج لایه به ترتیب به میزان ۲۱ و ۱۳ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، شکل پذیری سه لایه و پنج لایه نیز نسبت به تیر کنترلی به ترتیب به میزان ۳۴ و ۶۱ درصد افزایش یافته است.

۲-۳- نمونه های دارای ضعف خمشی

شکل ۱۵ و جدول ۷ نتایج آزمایش خمش نمونه های دارای ضعف خمشی را ارائه می دهند. همانطور که مشاهده می شود، مقاوم سازی نمونه سه لایه و پنج لایه به ترتیب باعث افزایش ۵۸ و ۸۲ درصدی نیروی خرابی اولیه نسبت به حالت بدون مقاوم سازی شده است. میزان جذب انرژی اولیه به ترتیب افزایش ۱۳۳ و ۲۰۹ درصدی داشته و نیز مقدار جذب انرژی نهایی به ترتیب به میزان ۳۶ و ۳۹ درصد افزایش یافته است. شکل پذیری نیز به ترتیب به میزان ۲۳ و ۱۲ درصد کاهش یافته است. نمای شکست تیرها نیز به صورت شکل ۱۶ می باشد.



شکل ۱۵- نتایج بارگذاری برای نمونه های دارای ضعف خمشی

جدول ۷- نتایج بدست آمده از آزمایش

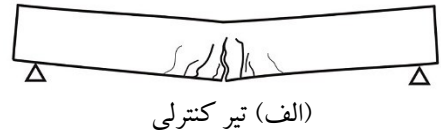
L35	L33	Control	مشخصه
۳۱	۲۷	۱۷	P_{cr} (kN)
۳۶	۲۹	۲۴	P_u (kN)
۵/۶	۶/۱	۳/۹	Δ_{cr} (mm)
۶۴	۶۶	۵۵	Δ_u (mm)
۱۲/۳	۱۰/۸۱	۱۴/۱	Δ_u / Δ_{cr}
۱۰۲	۷۷	۳۳	E_{cr} (J)
۱۷۹۳	۱۷۵۸	۱۲۸۶	E_u (J)

بدلیل وجود آرماتورهای طولی حداقل، تیر کنترلی دچار ترک های خمشی شدید شده است. با مقاوم سازی به روش SGFRP، ضعف خمشی تیر بتنی جبران شده و سبب افزایش ظرفیت باربری نمونه شده است. مشابه حالت قبل، هیچگونه جدایشی مابین لایه های مقاوم ساز و تیر بتنی مشاهده نشده است.

۳-۳- نمونه های بدون ضعف

شکل ۱۷ و جدول ۸ نتایج آزمایش خمش نمونه های بدون ضعف را ارائه می دهند.

نمای شکست تیرها نیز به صورت شکل ۱۸ می باشد.



(ب) تیر مقاوم سازی شده L35

شکل ۱۸- نمای شکست تیرهای دارای ضعف خمشی

نرم افزار ABAQUS مابین 5° الی 50° می باشد و با افزایش آن، شکل پذیری بتن افزایش پیدا می کند [6]. از طرفی، مقدار حداقل 13° و حداکثر 32° الی 35° توسط برخی از پژوهش های پیشین پیشنهاد شده است [20-23]. در این تحقیق، مقدار 15° برای تمامی مدل ها پس از انجام آنالیز حساسیت این پارامتر بر روی نتایج، در نظر گرفته شده است. در ادامه، از رابطه زیر برای محاسبه نسبت $\frac{f'_{bo}}{f'_c}$ استفاده شده است [24]:

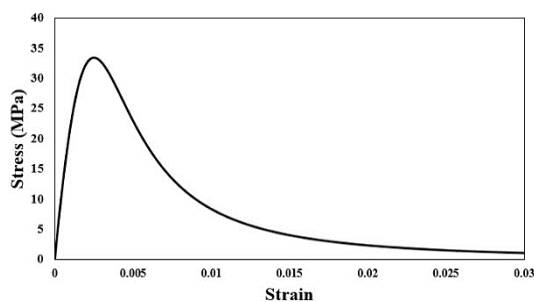
$$\frac{f'_{bo}}{f'_c} = 1.5(f'_c)^{-0.075} \quad (1)$$

با توجه به مقاومت فشاری مشخصه بتن (ارائه شده در جدول ۳)، مقدار نسبت تنش فشاری در حالت بارگذاری دومی محوره به تک محوره برابر $1/15$ محاسبه می شود. همچنین، مقادیر $0/1$ و $0/667$ به ترتیب برای پارامترهای e و K در نظر گرفته شده اند. برای مدل سازی رفتار بتن در فشار از رابطه زیر استفاده شده است [25]:

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^3} \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{f'_c}{\varepsilon_0}; R_E = \frac{E_c}{E_0}; R = \frac{R_E(R_E - 1)}{(R_E - 1)^2}$$

که در آن R_σ ، R_E و ε_0 به ترتیب برابر 4 ، 4 و $0/025$ می باشند. با قراردادی مقاومت فشاری مشخصه بتن ($33/42$ MPa) در رابطه ۱ و در نظرگیری مدول الاستیسیته بتن برابر $27/2$ GPa، نمودار تنش - کرنش فشاری بتن به صورت شکل ۱۹ به دست می آید.



شکل ۱۹- نمودار تنش - کرنش فشاری بتن در نظر گرفته شده برای تحلیل های عددی

همچنین، از روش انرژی گسیختگی (Fracture energy) برای مدل سازی رفتار بتن در کشش استفاده است. بدین منظور مقدار تنش حداکثر کششی بتن (f'_t) و انرژی آزاد شده پس از ترک خوردگی (G_F) از روابط زیر محاسبه شده اند [26]:

$$f_{t,min} = 0.7 \left\{ 0.3 (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \right\} \quad (3)$$

$$G_F = 73 (f_{ck})^{0.18}$$

مشابه حالات قبل، هیچگونه جدایشی مابین لایه های مقاوم ساز و تیر بتنی مشاهده نشده است. خرابی تیر مقاوم سازی شده با ایجاد ترک های خمشی آغاز شده و سپس به صورت جدایش پوشش بتنی ادامه گسترش یافته است.

۴- مدل سازی عددی

هدف این بخش بیان روشی برای مدل سازی عددی رفتار تیرهای بتنی مقاوم سازی شده با استفاده از روش پاشش الیاف می باشد. تمامی مدل سازی ها در نرم افزار عناصر محدود ABAQUS\standard با روش انتگرال گیری ضمنی (Implicit) و روش تکراری نیوتن - رافسون انجام شده است. مقادیر پیش فرض نرم افزار برای تمامی تحلیل ها در نظر گرفته شده است.

۴-۱- مصالح

۴-۱-۱- بتن

از مدل آسیب پلاستیک بتن (CDP) برای شبیه سازی رفتار بتن استفاده شده است. پارامترهای این مدل رفتاری شامل زاویه اتساع (ψ)، نسبت تنش فشاری در حالت بارگذاری دومی محوره به تک محوره ($\frac{f'_{bo}}{f'_c}$)، خروج از مرکزیت سطح تسلیم (e)، نسبت نامتغیر دوم تنش در کشش و فشار (K) و قاعده سخت شوندگی در فشار و کشش می باشد. محدوده تغییرات زاویه اتساع در

۴-۱-۳-۲- خرابی مصالح SGFRP

FRP ها به صورت مصالح خطی ارتوتروپیک تا لحظه خرابی فرض شده‌اند. از معیار خرابی Tsai-Wu جهت مدل سازی خرابی های ایجاد شده در مصالح SGFRP استفاده شده است. معیار مذکور به صورت زیر بیان می شود [34]:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \leq 1 \quad (6)$$

که در آن F_i و F_{ij} پارامترهای خرابی می باشند. با صرف نظر کردن از تنش در راستای ضخامت لایه SGFRP، رابطه ۶ برای لایه SGFRP به صورت رابطه زیر بازنویسی می گردد:

$$F_1 \sigma_x + F_2 \sigma_y + F_{11} \sigma_x^2 + F_{22} \sigma_y^2 + 2F_{12} \sigma_x \sigma_y + F_6 \sigma_{xy} + F_{66} \sigma_{xy}^2 \leq 1$$

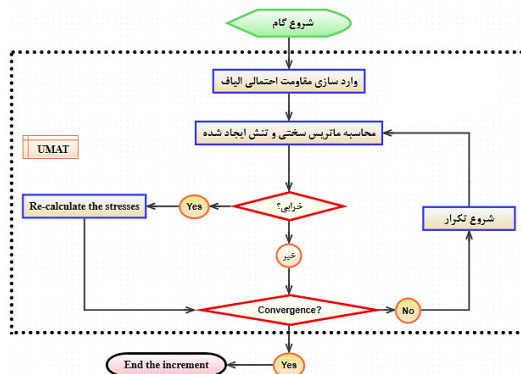
$$F_1 = \left(\frac{1}{\sigma_{xu}^T} - \frac{1}{\sigma_{xu}^C} \right); \quad F_2 = \left(\frac{1}{\sigma_{yu}^T} - \frac{1}{\sigma_{yu}^C} \right)$$

$$F_6 = \left(\frac{1}{\sigma_{xyu}^T} - \frac{1}{\sigma_{xyu}^C} \right); \quad F_{66} = \frac{1}{\sigma_{xyu}^T \sigma_{xyu}^C} \quad (7)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{xu}^T \sigma_{xu}^C}; \quad F_{22} = \frac{1}{\sigma_{yu}^T \sigma_{yu}^C}$$

$$F_{12} = -0.5 \sqrt{\frac{1}{\sigma_{xu}^T \sigma_{xu}^C} \frac{1}{\sigma_{yu}^T \sigma_{yu}^C}}$$

که در آن T و C به ترتیب مین کشش و فشار بوده و اندیس u مین حداکثر مقاومت می باشد. همچنین، مقادیر σ_x ، σ_y و σ_{xy} از حل عناصر محدود بدست می آیند. در حالت کلی، تعیین میزان دقیق تنش های حداکثر در فشار و راستاهای عرضی نیازمند آزمایش می باشند. در این تحقیق، از مقاومت فشاری الیاف بر اساس توضیه آیین نامه ACI440 [33] صرف نظر شده است. همچنین، مقدار $0.1 \sigma_{xu}^T$ برای تنش حداکثری راستاهای عرضی پس از انجام آنالیز حساسیت پارامتر مذکور در نظر گرفته شده است. معیار مذکور به صورت کد UMAT در نرم افزار آباکوس پیاده سازی شده است. فلوجارت کد مذکور به صورت شکل ۲۰ می باشد.



شکل ۲۰- فلوجارت کد UMAT

با توجه به روابط مذکور، مقادیر $2/17 \text{ MPa}$ و $0/13 \text{ mJ}$ به ترتیب برای تنش حداکثر کششی و انرژی ترک خوردگی بتن برای تمامی تحلیل های عددی در نظر گرفته شده است.

۴-۱-۲- فولاد

آرماچورهای فولادی از نوع مصالح الاستوپلاستیک در فشار و کشش و به صورت مدفون در بتن مدل شده‌اند. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد به ترتیب برابر 200 GPa و $0/3$ در نظر گرفته شده‌اند.

۴-۱-۳- مصالح SGFRP

۴-۱-۳-۱- مقاومت احتمالاتی SGFRP

جهت محاسبه مدول یانگ لایه SGFRP از رابطه زیر استفاده شده است [27]:

$$E = \sum_{i=1}^n V_i E_i \quad (4)$$

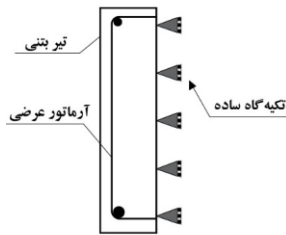
که در آن V_i و E_i به ترتیب حجم و مدول یانگ چسب مخلوط شده و الیاف شیشه می باشند. با توجه مقادیر ذکر شده برای مدول یانگ مصالح و نیز نسبت حجمی چسب به الیاف، مدول یانگ لایه SGFRP برابر $8/24 \text{ GPa}$ به دست می آید. جهت شبیه سازی مقاومت تصادفی الیاف شیشه در هنگام مقاوم سازی بدلیل پخش تصادفی، از تابع احتمال Weibull استفاده شده است. نتایج تحقیقات نشان داده‌اند که تابع مذکور به صورت مناسبی مقاومت تصادفی الیاف را تخمین می زند [28,29]. تابع دو پارامتری Weibull برای تخمین مقاومت حداکثری الیاف بصورت زیر می باشد [30-32]:

$$\sigma = \sigma_u \left[\frac{-l}{l_0} \ln(1-p) \right]^{1/q} \quad (5)$$

که در آن σ_u ، l ، l_0 ، q ، p به ترتیب مقاومت کششی نهایی الیاف (با وارد سازی ضریب اطمینان مقاومت برابر $0/65$ [33])، طول اولیه الیاف (18 mm)، طول مشخصه الیاف، پارامتر تابع Weibull و عددی تصادفی مابین صفر و یک می باشد. طول مشخصه الیاف بر اساس اندازه مش لایه SGFRP تعیین می شود [29]. با توجه به اندازه مش در نظر گرفته شده برای لایه مذکور، مقدار طول مشخصه برابر 3 mm می باشد. مقدار q نیز برابر $1/5$ در نظر گرفته شده است [30,32]. موارد مذکور به صورت کد UMAT در نرم افزار آباکوس پیاده سازی شده است.

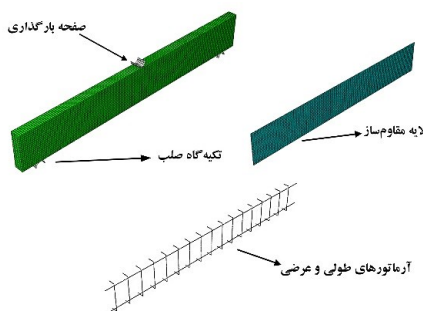
۴-۱-۴- چسبندگی میان بتن و FRP

شده‌اند. به علاوه، آرماتورهای طولی و عرضی با استفاده از عناصر تیری (Beam) مدل شده‌اند. همچنین، صفحات بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها با استفاده از عناصر صلب (Rigid) مدل‌سازی شده‌اند. به دلیل وجود تقارن در راستای طولی نمونه‌ها، نیمی از تیرها با شرایط تکیه‌گاهی مناسب مطابق شکل ۲۲ جهت ساده‌سازی و نیز کاهش زمان تحلیل‌ها در نرم‌افزار مدل شده است.



شکل ۲۲- شرایط مرزی تیرهای مدل‌ساز شده

از آنجایی که نسبت حجمی الیاف استفاده شده به چسب در لایه‌های مقاوم‌ساز برابر ۰/۲۵ می‌باشد، ضخامت لایه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار برابر یک پنجم ضخامت کل لایه مقاوم‌ساز بوده و مابقی به صورت لایه چسبی مدل‌سازی شده‌اند. به طور مثال، برای مدل‌سازی تیر مقاوم‌سازی شده با ۵ لایه پاشش به ضخامت ۳ میلی‌متر، ۱۲ میلی‌متر برای ضخامت چسب و ۳ میلی‌متر برای ضخامت الیاف در نظر گرفته شده است. همچنین، آنالیز حساسیت مش بر روی مدل عناصر محدود انجام شده و حداقل و حداکثر اندازه مش به ترتیب برابر ۳ و ۵ میلی‌متر برای تمامی عناصر در نظر گرفته شده است. شکل ۲۳ شمای مش‌بندی مدل عناصر محدود تیرهای مقاوم‌سازی شده را نشان می‌دهد.

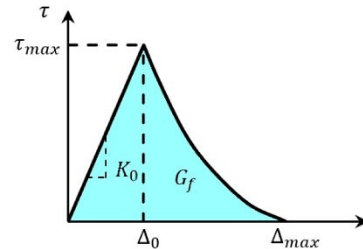


شکل ۲۳- مش‌بندی مدل عناصر محدود تیرهای مدل‌سازی شده

۴-۳- نتایج مدل‌سازی عددی

در این قسمت نتایج مدل‌سازی عددی برای تیرهای بتنی آزمایش شده ارائه داده می‌شود.

چسبندگی میان بتن و FRP که مبین چسب اپوکسی می‌باشد، توسط مدل Cohesive در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است. دیاگرام رفتاری مدل مذکور از نوع تنش- پارگی و به صورت شکل ۲۱ می‌باشد.



شکل ۲۱- دیاگرام تنش- پارگی [35]

بر اساس رابطه مذکور، مقادیر K_0 ، τ_{max} و G_f به صورت زیر تعیین می‌شوند [36]:

$$K_0 = \frac{1}{\frac{t_i}{G_i} + \frac{t_c}{G_c}}; G_f = 0.308 \beta_w^2 \sqrt{f_t}; \tau_{max} = \alpha_1 \beta_w f_t \quad (8)$$

$$\beta_w = \sqrt{(2.25 - \frac{b_f}{b_c}) / (1.25 + \frac{b_f}{b_c})}$$

که در آن b_c برابر عرض مقطع بتنی، b_f برابر عرض مقطع FRP، G_c مدول برشی بتن، G_i مدول برشی چسب، t_i ضخامت چسب و t_c ضخامت بتن درگیر با چسب می‌باشند. در این پژوهش ضخامت بتن برابر ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. از معیار انرژی گسیختگی B-K برای مدل‌سازی رفتار پس از خرابی چسب استفاده شده است. معیار مذکور به صورت بیان می‌شود [35]:

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_s}{G_T} \right\}^\eta = G^c \quad (9)$$

که در آن $G_T = G_n + G_s$ و $G_s = G_s + G_t$ انرژی گسیختگی در راستاهای برشی می‌باشند. مقدار پارامتر η در این پژوهش برابر ۲/۱ در نظر گرفته شده است.

۴-۲- اجزاء مدل عددی

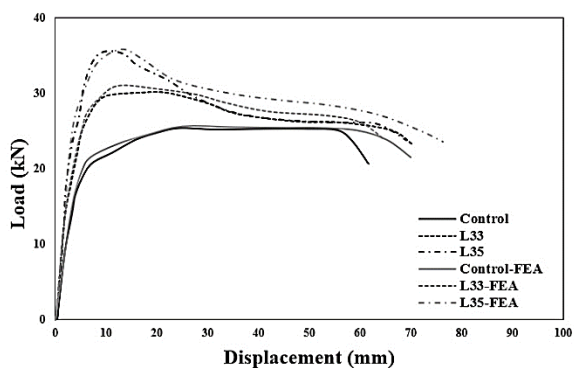
نوع تحلیل در نظر گرفته شده Static/General بوده و برای تمامی رواداری‌ها، مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. تیر بتنی و لایه مقاوم‌ساز با استفاده از عناصر هشت‌وجهی C3D8 با انتگرال‌گیری تام (Full Integration) مدل‌سازی

تیرها را ارائه می دهند.

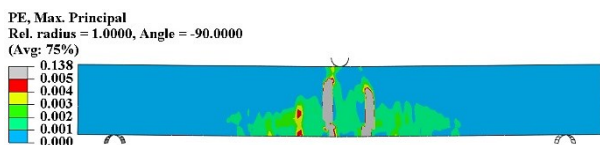
جدول ۹- مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش و تحلیل عددی

برای نمونه های دارای ضعف برشی

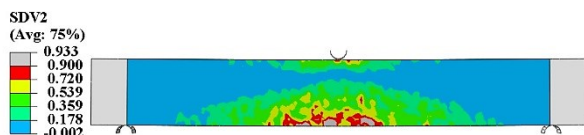
پارامتر	نمونه	آزمایش	تحلیل عددی	خطا (%)
P_{cr} (kN)	Control	۲۶	۲۵	-۳/۸
	L33	۳۸	۳۸	<۱
	L35	۴۰	۳۹	-۲/۵
P_u (kN)	Control	۳۷	۳۹	+۵/۴
	L33	۴۰	۴۱	+۲/۵
	L35	۴۵	۴۵	<۱
Δ_{cr} (mm)	Control	۴/۶	۴/۴	-۴/۳
	L33	۸/۱	۷/۹	-۲/۴
	L35	۷/۶	۷/۱	-۶/۵
Δ_u (mm)	Control	۸۷	۸۲	-۵/۷
	L33	۹۶	۹۹	+۳/۱
	L35	۹۲	۸۶	-۶/۵



شکل ۲۶- مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش و FEA برای تیرهای دارای ضعف خمشی



(الف) تیر کنترلی



(ب) تیر مقاوم سازی شده L35

شکل ۲۷- نمای شکست تیرهای دارای ضعف خمشی بدست

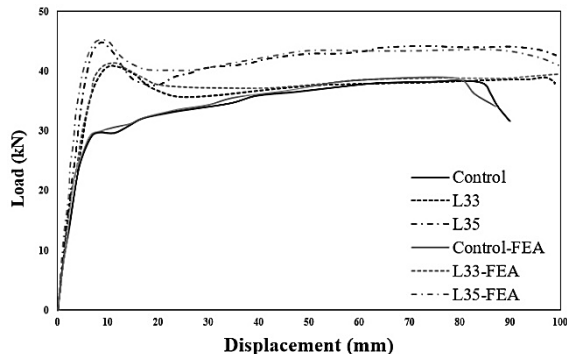
آمده از FEA

در شکل شماره (۲۷-ب)، پارامتر SDV2 مبین خسارت وارده بر

۴-۳-۱- نمونه های دارای ضعف برشی

اشکال ۲۴ و ۲۵ به ترتیب مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش و تحلیل عناصر محدود (FEA) و نمای شکست

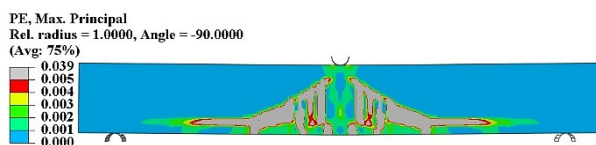
تیرها را ارائه می دهند



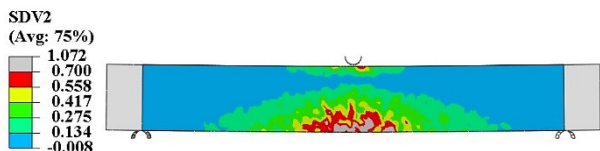
شکل ۲۴- مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان بدست آمده از

آزمایش و FEA برای تیرهای دارای ضعف برشی

در شکل شماره (۲۵-ب)، پارامتر SDV2 مبین خسارت وارده بر لایه مقاوم ساز بر اساس معیار خرابی Tsai-Wu می باشد. جدول ۹ مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش و تحلیل عددی را برای پارامترهای رفتاری نمونه ها ارائه می دهد. همانطور که مشاهده می شود، روش پیشنهادی بخوبی ظرفیت باربری و نحوه خرابی تیرهای مقاوم سازی شده را تخمین زده و خطای موجود برای تمامی پارامترها زیر ۱۰ درصد می باشند.



(الف) تیر کنترلی



(ب) تیر مقاوم سازی شده L35

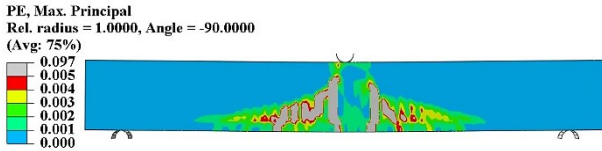
شکل ۲۵- نمای شکست تیرهای دارای ضعف برشی بدست آمده

از FEA

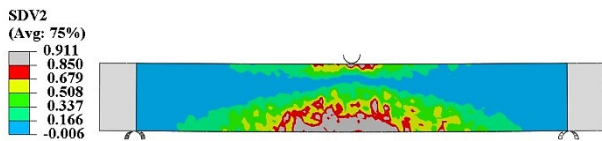
۴-۳-۲- نمونه های دارای ضعف خمشی

اشکال ۲۶ و ۲۷ به ترتیب مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش و تحلیل عناصر محدود (FEA) و نمای شکست

لایه مقاوم‌ساز بر اساس معیار خرابی Tsai-Wu می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی بخوبی توانسته است ظرفیت باربری و نحوه خرابی تیرهای مقاوم‌سازی شده را تخمین بزند. جدول ۱۱ مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش و تحلیل عددی را برای پارامترهای رفتاری نمونه‌ها ارائه می‌دهد.



الف) تیر کنترلی



ب) تیر مقاوم‌سازی شده L35

شکل ۲۹- نمای شکست تیرهای بدون ضعف به‌دست آمده از

FEA

جدول ۱۱- مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش و تحلیل

عددی برای نمونه‌های بدون ضعف

پارامتر	نمونه	آزمایش	تحلیل عددی	خطا (%)
P_{cr} (kN)	Control	۲۷	۲۹	+۷/۴
	L33	۳۴	۳۴	<۱
	L35	۴۰	۳۹	-۲/۵
P_u (kN)	Control	۳۶	۳۹	+۸/۳
	L33	۴۲	۴۲	<۱
	L35	۴۴	۴۵	+۲/۲
Δ_{cr} (mm)	Control	۵/۱	۴/۷	-۷/۸
	L33	۴/۲	۴/۳	+۲/۳
	L35	۳/۲	۳/۱	-۳/۱
Δ_u (mm)	Control	۸۳	۹۱	+۹/۶
	L33	۸۹	۹۳	+۴/۴
	L35	۸۱	۸۶	+۶/۱

همانطور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی بخوبی ظرفیت باربری و نحوه خرابی تیرهای مقاوم‌سازی شده را تخمین زده و حداکثر خطای موجود در حدود ۹/۵ درصد می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر استفاده از روش مقاوم‌سازی پاشش الیاف

لایه مقاوم‌ساز بر اساس معیار خرابی Tsai-Wu می‌باشد. جدول ۱۰ مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش و تحلیل عددی را برای پارامترهای رفتاری نمونه‌ها ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی بخوبی ظرفیت باربری و نحوه خرابی تیرهای مقاوم‌سازی شده را تخمین زده و حداکثر خطای موجود در حدود ۱۱ درصد می‌باشد.

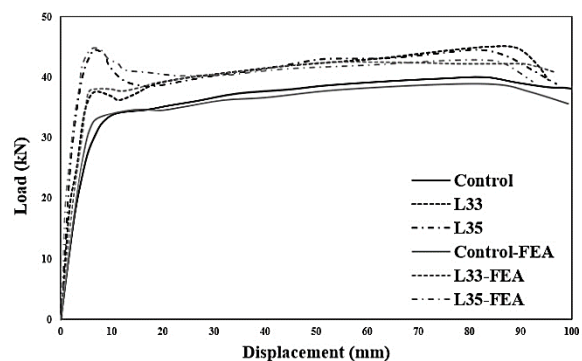
جدول ۱۰- مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش و تحلیل

عددی برای نمونه‌های دارای ضعف خمشی

پارامتر	نمونه	آزمایش	تحلیل عددی	خطا (%)
P_{cr} (kN)	Control	۱۷	۱۷	<۱
	L33	۲۷	۲۸	+۳/۷
	L35	۳۱	۳۰	-۳/۲
P_u (kN)	Control	۲۴	۲۵	+۴/۱
	L33	۲۹	۳۱	+۶/۸
	L35	۳۶	۳۵	-۲/۷
Δ_{cr} (mm)	Control	۳/۹	۳/۶	-۷/۶
	L33	۶/۱	۶/۰	-۱/۶
	L35	۵/۶	۵/۵	-۱/۷
Δ_u (mm)	Control	۵۵	۵۹	+۷/۲
	L33	۶۶	۶۰	-۹/۰
	L35	۶۴	۵۷	-۱۰/۹

۴-۳-۳- نمونه‌های بدون ضعف

اشکال ۲۸ و ۲۹ به ترتیب مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش و تحلیل عناصر محدود (FEA) و نمای شکست تیرها را ارائه می‌دهند.



شکل ۲۸- مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان بدست آمده از

آزمایش و FEA برای تیرهای بدون ضعف

در شکل شماره (۲۹-ب)، پارامتر SDV2 مبین خسارت وارده بر

۶- مراجع

- [1] Shahawy M. A, Arockiasamy M, Beitelmant T, Sowrirajan R, "Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates", *Compos Part B:Eng*, 225–233, 1995.
- [2] Kachlakev D, McCurry D. D, "Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates", *Compos Part B:Eng*, 31, 445–452, 2000.
- [3] Sim J, Park C, Moon D. Y, "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures", *Compos Part B:Eng*, 27, 504–512, 2005.
- [4] Elbana A, Junaid M. T, "Determination of flexural capacity for GFRP-reinforced concrete beams retrofitted using external CFRP sheet", *Structures*, 27, 2020.
- [5] Manibalan P, Kesavan S, Abirami G, Baskar R, "Fatigue response of RC beam strengthened by BFRP laminate", *Case Stud. Constr. Mater.*, 18:e01707, 2023.
- [6] Aghani K, Afshin H, Abedi K, "Finite element-based prediction of the long-term deflection of reinforced concrete beams strengthened with prestressed fiber-reinforced polymers", *Structures*, 43, 358–373, 2022.
- [7] Obaidat Y. T, Heyden S, Dahlblom O, Abu-Farsakh G, Abdel-Jawad Y, "Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates", *Constr. Build. Mater.* 25, 591–597, 2011.
- [8] Boyd A. J, Liang N, Green P. S, Lammert K, "Sprayed FRP repair of simulated impact in prestressed concrete girders", *Constr. Build. Mater.*, 22, 411–416, 2008.
- [9] Lee H. K, Hausmann L. R, "Structural repair and strengthening of damaged RC beams with sprayed FRP", *Compos. Struct.*, 63, 201–209, 2004.
- [10] Banthia N, Boyd A. J, "Sprayed fibre-reinforced polymers for repairs", *Can. J. Civ. Eng.*, 27, 907–915, 2000.
- [11] Ross S, Boyd A, Johnson M, Sexsmith R, Banthia N, "Potential Retrofit Methods for Concrete Channel Beam Bridges Using Glass Fiber Reinforced Polymer", *J. Bridg. Eng.*, 9, 66–74, 2004.
- [12] Yang Z, Liu Y, Li J, "Study of Seismic Behavior of RC Beam-Column Joints Strengthened by Sprayed FRP", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018.
- [13] Getahun M. B, Gu Q, Li B, Sun C. F, "Experimental study on earthquake-damaged RC frame columns repaired with sprayed basalt FRP", *Adv. Mater. Res.*, 1438–1444, 2014.
- [14] Hussain Q, Pimanmas A, "Shear strengthening

شیشه SGFRP در رفتار تیرهای بتن مسلح دارای ضعف برشی و خمشی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. همچنین، یک روش عددی برای مدل‌سازی و تخمین ظرفیت باربری و نحوه خرابی تیرهای بتنی مقاوم‌سازی با روش SGFRP ارائه شد. در حالت کلی نتایج ذیل از این پژوهش حاصل می‌شود:

- در مقاوم‌سازی تیرها با استفاده از پاشش، به دلیل استفاده از فشار پاششی بالا، چسب نفوذ بیشتری در سطح بتن داشته و مانع از جداشدگی لایه مقاوم‌ساز از سطح بتن شده است.

- در حالت کلی، مقاوم‌سازی به روش SGFRP با پنج لایه نتایج مطلوب‌تری نسبت به حالت سه لایه داشته است. در مقاوم‌سازی پنج لایه، ظرفیت باربری و جذب انرژی کل در تیرهای دارای ضعف خمشی و برشی به ترتیب ۸۲ و ۳۰ درصدی، ۳۹ و ۲۸ درصد افزایش داشته است. در نمونه‌های بدون ضعف، مقادیر فوق به ترتیب برابر ۲۲ و ۱۳ درصد می‌باشد. همچنین، روش مقاوم‌سازی مذکور سبب کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها به میزان میانگین ۳۰ درصد شده است.

- در تیرهای دارای ضعف برشی، استفاده از روش مقاوم‌سازی مذکور از ایجاد ترک‌های مورب در سطح بتن جلوگیری کرده و به عبارتی مکانیزم خرابی از حالت برشی به حالت خمشی تغییر یافته است.

- جذب انرژی و ظرفیت باربری تیرهای مقاوم‌سازی شده افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه‌های کنترلی داشته است. با توجه به اینکه در روش SGFRP، الیاف به صورت تصادفی در سطح بتن پخش می‌شوند، افزایش پارامترهای مذکور حاکی از موثر بودن روش مقاوم‌سازی مذکور است.

- روش مقاوم‌سازی SFRP در بهبود صرفه زمانی و تبدیل مقاوم‌سازی معمول به حالت مکانیکی بسیار مؤثر بوده است. در این روش مقاوم‌سازی علاوه بر نفوذ بیشتر چسب به سطح بتن، سرعت و دقت عملیات نیز افزایش دارد.

- روش عددی ارائه شده برای مدل‌سازی تأثیر مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح به روش SGFRP بخوبی توانسته است رفتار تیرهای مذکور را شبیه‌سازی کرده و نتایج عددی بدست آمده نسبت به نتایج تجربی از دقت مناسبی برخوردار هستند. لذا، از روش عددی پیشنهادی می‌توان برای مطالعات آینده بهره برد.

- Compos. Sci. Technol., 61, 815–823, 2001.
- [28] Fariborz S. J, Harlow D. G, “The Tensile Behavior of Intraply Hybrid Composites II: Micromechanical Model”, J. Compos. Mater., 21, 856–875, 1987.
- [29] Wang X, Zhou C, “Numerical investigation for the flexural strengthening of reinforced concrete beams with external prestressed HFRP sheets”, Constr. Build. Mater., 189, 804–815, 2018.
- [30] Padgett W. J, Durham S. D, Mason A. M, “Weibull Analysis of the Strength of Carbon Fibers Using Linear and Power Law Models for the Length Effect”, J. Compos. Mater., 29, 1873–1884, 1995.
- [31] Landis C. M, Beyerlein I. J, McMeeking R. M, “Micromechanical simulation of the failure of fiber reinforced composites”, J. Mech. Phys. Solids., 48, 621–648, 2000.
- [32] Weibull W. "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mech. 1951.
- [33] ACI 440.2R-17, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", 2017.
- [34] Tsai S. W, Wu E. M. A, “General Theory of Strength for Anisotropic Materials”, J. Comp. Mat., 5(1), 1972.
- [35] SIMULIA, “Abaqus Analysis User’s Manual, version 2016”, The Dassault Systemes, Realistic Simulation, USA, 2015.
- [36] Lu X. Z, Teng J. G, Ye L. P, Jiang J. J, “Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete”, Eng. Struct. 27, 920–937, 2005.
- of RC deep beams with openings using Sprayed Glass Fiber Reinforced Polymer Composites (SGFRP) : Part 1. Experimental study”, KSCE J. Civ. Eng., 19, 2121–2133, 2015.
- [15] Ha S. K, Na S, Lee H. K, “Bond characteristics of sprayed FRP composites bonded to concrete substrate considering various concrete surface conditions”, Compos. Struct. 100, 270–279, 2013.
- [16] Yang Z, Li J, “Double shear test on bonding mechanical properties of sprayed FRP and concrete substrate”, Compos. Part B:Eng, 162, 388–396, 2019.
- [17] Lee H. K, Avila G, Montanez C, “Numerical study on retrofit and strengthening performance of sprayed fiber reinforced polymer”, Eng. Struct., 27, 1476–1487, 2005.
- [18] Lee H. K, Hausmann R. L, Seaman W. C, “Effectiveness of retrofitting damaged concrete beams with sprayed fiber-reinforced polymer coating”, J. Reinf. Plast. Compos., 27, 1269–1286, 2008.
- [19] Parghi A, Alam M. S, “A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector”, Compos. Struct., 187, 518–534, 2018.
- [20] Poliotti M, Bairán J. M, "A new concrete plastic-damage model with an evolutive dilatancy parameter", Eng. Struct. 189, 541–549, 2019.
- [21] Wosatko A, Winnicki A, Polak M. A, Pamin J. "Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete", Arch. Civ. Mech. Eng., 19, 1268–1283, 2019.
- [22] Lee J, Fenves G. L, "Return-mapping algorithm for plastic-damage models: 3-D and plane stress formulation" Int. J. Numer. Methods. Eng., 50, 487–506, 2001.
- [23] Oller S, Oliver J, Lubliner J, Oñate E. "Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales Parte - I: Variables fundamentales funciones de fluencia y potencial", Rev. Int. Métodos. Numéricos Para. Cálculo y Diseño En. Ing., 4, 433–461, 1988.
- [24] Papanikolaou V. K, Kappos A. J, “Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression”, Int. J. Solids. Struct., 44, 7021–7048, 2007.
- [25] Saenz L, “Discussion of “Equation for stress-strain curve of concrete” by Desayi P. Krishnan S”, ACI J., 61, 1229–1235, 1964.
- [26] Model Code 2010, “fédération internationale du béton (FIB)”, 2010.
- [27] Bakis C. E, Nanni A, Terosky J. A, Koehler S.W, “Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications”,

Experimental and numerical investigation on the behavior of reinforced concrete beams retrofitted by sprayed glass fiber-reinforced polymers (SGFRP)

Ali Abbaszadeh hassanlui

M.Sc. of civil engineering, Civil engineering faculty, Sahand University of Technology.

Kian Aghani

Ph.D. candidate of civil engineering, Civil engineering faculty, Sahand University of Technology.

Hassan Afshin *

Associate Professor, Civil engineering faculty, Sahand University of Technology.

Abstract

Nowadays, numerous innovative retrofitting methods for concrete members are introduced so as to reduce costs. Spraying fiber-reinforced polymers is a newly proposed method and is gaining high attention since a better bond between the concrete and the adhesive is achieved. In this article, the application of spraying glass fiber-reinforced polymers (SGFRPs) is evaluated and its effects on the behavior of reinforced concrete (RC) beams are investigated. For this purpose, nine concrete beams (200×100×1500 mm) are produced and retrofitted using three and five layers of SGFRP. The RC beams are divided into three categories, namely, beams having shear deficiencies, beams having flexural deficiencies, and beam with no defects. Moreover, the beams are retrofitted using the SGFRP layers. Then, the beams were subjected to the three-point test. The experimental results showed that the SGFRP strengthening method has significantly increased the bearing capacity and energy absorption of the beams. Moreover, the results showed that this retrofitting method possesses a high potential for practical cases. Overall, retrofitting using five layers of SGFRP led to more suitable results. In this regard, the bearing capacity of the beams having flexural, shear deficiencies and beams without deficiencies increased by 82%, 53%, and 48%, respectively. Furthermore, a numerical method in ABAQUS finite element package is presented for modeling the SGFRP strengthening method using user-defined material (UMAT) coding and the accuracy of the method was assessed by comparison against the experimental outcomes. The results indicate the appropriate accuracy of the numerical method.

Keywords: Retrofitting, Concrete Beams, SGFRP, ABAQUS, Innovative method.

* Corresponding Author: hafshin@sut.ac.ir

