

مقاوم‌سازی تیرهای بتنی توسط الیاف پلیمری شیشه‌ای

موسی مظلوم^{۱*}، مرتضی مهروند^۲، عظیم سواری پور^۳

- ۱- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
۳- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

چکیده

استفاده از الیاف پلیمری مسلح شده، FRP، یکی از روش‌های مقاوم‌سازی و تعمیر سازه‌های بتنی می‌باشد. در این تحقیق به بررسی تقویت برشی، پیچشی و خمشی تیرهای بتنی خودمترکم با ورق تقویتی دارای الیاف پلیمری شیشه‌ای، GFRP، پرداخته شده است. برای مقاوم سازی تیرهای تحت اثر برش، خمش و پیچش، ورق‌های GFRP به ترتیب به صورت نوارهای U شکل، مستقیم در سطح زیرین و دور پیچ چسبانده شده‌اند. در این مطالعه ابتدا نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از مدل‌های عددی مقایسه شده‌اند و صحت مدل سازی مورد تایید قرار گرفته است. سپس ورق‌های تقویتی در یک و دو لایه بر روی مدل‌های تیر بتنی چسبانده شده‌اند. با بررسی نتایج عددی که از نرم‌افزار آباکوس بدست آمده است، مشاهده می‌شود که با افزایش ترک‌ها در تیرهای بتنی، سختی آنها کاهش می‌یابد و سپس تنش‌ها توسط لایه چسب و ورق‌های GFRP تحمل می‌شوند، که این امر منجر به افزایش ظرفیت باربری تیرهای مورد مطالعه در این تحقیق گردیده است. نتایج حاصل از مدل سازی عددی نشان می‌دهد که با تقویت تیرهای بتنی با یک لایه ورق GFRP، مقاومت‌های برشی و پیچشی به ترتیب به میزان ۳۲ و ۴۷ درصد افزایش یافته‌اند. در صورتی که از دو لایه ورق تقویتی استفاده شود، میزان ظرفیت باربری تیرها در اثر برش و پیچش به ترتیب حدود ۴۵ و ۶۱ درصد افزایش داشته‌اند. همچنین ظرفیت باربری تیرهای بتنی که تحت اثر خمش قرار گرفته‌اند، با اضافه کردن یک و دو لایه ورق تقویتی GFRP به ترتیب به میزان ۳۲ درصد و ۴۸ درصد افزایش داشته‌اند.

کلمات کلیدی: تیر بتنی، الیاف پلیمری شیشه‌ای، آباکوس، برش، خمش، پیچش.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.109130.1397	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.109130.1397	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۷/۰۴/۱۲	۱۳۹۶/۱۲/۲۶	۱۳۹۶/۰۹/۱۱
			موسی مظلوم		*نویسنده مسئول:	
			mazloom@srutu.edu		پست الکترونیکی:	

Strengthening of Concrete Beams Using Glass Fiber Reinforced Polymers

Moosa Mazloom^{1*}, Morteza Mehrvand², Azim Savari Pour³

1 -Associate Professor, dept. of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2 -Ph.D. Student, dept. of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

3 -Ph.D. Student, dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

ABSTRACT

The use of fiber reinforced polymers, FRP, is one of the methods for strengthening and retrofitting concrete structures. In this research, the strengthening of reinforced self-compacting concrete beams against shear, torsion and bending has been investigated using GFRP. For reinforcing the beams against shear, bending and torsion, the strips of GFRP were used in the forms of U-shape, straight on the bottom surface and screwed around the beams respectively. In this study, the experimental results were compared with the results of the numerical models and their accuracies were confirmed. Then reinforcement sheets were applied in one and two layers on concrete beam models. By studying the numerical results obtained from Abaqus software, it was observed that with the increase of cracks in the concrete beams, their stiffness decreased and then the stresses were tolerated by the adhesive layers and the GFRP sheets, which has led to an increase in the bearing capacity of the beams. The results of numerical finite elements modeling show that by reinforcing the concrete beams with one layer of GFRP, the load bearing capacities of the beams improved in shear and torsion about 32% and 47% respectively. Moreover, if two layers of reinforcement sheets were used, the shear and torsion capacities of the beams increased about 45% and 61% respectively. The bending capacities of the concrete beams strengthened with one and two layers of GFRP increased up to 32% and 48% respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 December 2017

Revise Date: 17 March 2018

Accept Date: 03 July 2018

Keywords:

Concrete Beam,
GFRP,
Abaqus,
Shear,
Bending,
Torsion

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/jsce.2018.109130.1397

*Corresponding author: Moosa Mazloom
Email address: Mazloom@srttu.edu

۱- مقدمه

بتن خودتراکم نخستین بار توسط پروفسور هاشیمه اوکامورا^۱ در سال ۱۹۸۶ در ژاپن پیشنهاد گردید و در سال ۱۹۸۸ این بتن در کارگاه ساخته شد و نتایج قابل قبولی از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ارائه داد [۱]. بتن خودتراکم به بتنی اطلاق می‌گردد که تحت وزن خود جاری شده و با توجه به روانی بالا، بدون نیاز به تراکم و لرزش، به راحتی در هر قالب و با هر میزان تراکم آرماتور به صورت همگن شکل قالب را به خود بگیرد. در واقع بتن خودتراکم مخلوطی با روانی و قابلیت شکل‌پذیری بالا است، با استفاده از این بتن بدون به وجود آمدن مسئله جداسازی سنگدانه‌ها می‌توان به یک بتن یک دست و کاملاً متراکم رسید. علاوه بر امتیازات فوق با استفاده از بتن خودتراکم، هزینه و زمان بتن کاهش می‌یابد [۲].

در یک دهه گذشته، بتن خودتراکم به علت روانی و قابلیت اجرا در نقاط پر آرماتور، کاربرد بیشتر در سازه‌های بتنی پیدا کرده است. این نوع بتن تحت اثر وزن خود و بدون نیاز به لرزش، متراکم شده و روانی آن حتی از بتن با کارایی بالا نیز بیشتر است. بتن با کارایی بالا دارای دانه‌بندی ریزتری نسبت به بتن خودتراکم بوده و اسلامپ آن نیز بزرگتر است [۳ و ۴]. به این دلیل، استفاده از بتن خودتراکم در اعضای پر میلگرد مانند ستون‌ها و اتصالات مناسب است. علاوه بر سادگی اجرا، برخی از مطالعات نشان داده‌اند که پیوستگی بتن خودتراکم با میلگردها و همچنین شکل‌پذیری آن از بتن معمولی بیشتر بوده [۵، ۶ و ۷] و در مواردی نیز، سختی، مقاومت و شکل‌پذیری کمتری نسبت به بتن معمولی داشته است [۷ و ۸]. برای ایجاد روانی مناسب در بتن خودتراکم لازم است تا درصد وزنی درشت‌دانه‌ها تا حد امکان کاهش داده شود. به طور معمول، وزن درشت‌دانه در SCC در حدود ۷۵۰ تا ۱۸۵۰ kg/m³ می‌باشد. میزان درشت‌دانه و آب در بتن تازه، اثر زیادی در رفتار بتن پس از سخت‌شدگی دارد زیرا دانه‌ها هنگام تغییر شکل خمیر سیمان با یکدیگر درگیر می‌شوند و در صورت استفاده از آب بیش از حد و کاهش درشت‌دانه، مقاومت بتن کاسته خواهد شد. علاوه بر این، طبق ACI 209 [۹] مصرف آب زیاد و درشت‌دانه کم موجب افزایش احتمال خزش و جمع‌شدگی بتن سخت شده می‌شود.

یکی از اهداف اصلی طراحی تیرهای بتن مسلح، ایمنی می‌باشد. شکست ناگهانی به علت مقاومت کم برشی یکی از حالات شکست نامطلوب می‌باشد. تیرهای بتن مسلح در ابتدا برای خمش و برش طراحی می‌شوند. تیرها اعضایی هستند که برای حمل بارهای پیرامونی و داخلی تحت خمش و برش قرار می‌گیرند. در طراحی یک عضو بتن مسلح انعطاف‌پذیری یکی از پارامترهای اصلی می‌باشد که معمولاً در گام نخست طراحی مورد توجه طراحان می‌باشد و به اندازه ابعاد و چیدمان میلگردها برای ارائه مقاومت لازم در برابر برش و خمش ضروری می‌باشد [۱۰].

در اعضای سازه‌ای بتنی همانند تیرهای لبه که به یک دال طره متصل می‌باشند نیروی پیچشی به وجود می‌آید که باید کمتر از ظرفیت پیچشی مقطع باشد. در سال‌های اخیر، مقاوم‌سازی سازه‌های موجود بطور فزاینده‌ای مهم شده است. دلایل مختلفی باعث این امر شده است که فرسودگی سازه‌ها، افزایش خطاهای طراحی و اجرایی از جمله این عوامل هستند. بعلاوه، بسیاری از سازه‌های موجود، به علت افزایش بارهای وارده، نیاز به افزایش مقاومت دارند [۱۱]. از نقطه نظر محیط‌زیستی و اقتصادی نیز ترمیم، تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود بر تخریب و دوباره‌سازی ارجحیت دارد. همچنین در بسیاری از موارد، مقاوم‌سازی سازه‌ها کم هزینه‌تر و کم دردسرت‌تر از نوسازی آن‌ها است.

از جمله پیشرفت‌های اخیر در صنعت مقاوم‌سازی، استفاده از روکش‌های تقویت‌کننده پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) و (GFRP) است که برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی، فولادی، بنایی و حتی چوبی به کار گرفته می‌شود.

تعمیر اعضای بتنی خمشی تقویت نشده و یا آسیب‌دیده توسط اتصال با ورق‌های تقویتی پلیمری (FRP) یا صفحات خارجی به صورت فزاینده‌ای در صنعت ساختمان به یکی از روش‌های محبوب تبدیل می‌شود. استفاده از ورق‌های FRP به دلایل، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت بالا، وزن سبک و سهولت افزایش انعطاف‌پذیری برای مقاوم‌سازی یک روش مناسب می‌باشد [۱۲].

^۱ Hajime Okamura

امروزه در دنیا بسیاری از سازه‌های زیر بنایی که در گذشته ساخته شده‌اند نیاز به ترمیم و تقویت سازه‌ای دارند. یکی از روش‌های جدید ترمیم و تقویت سازه‌ها، استفاده از مواد کامپوزیتی می‌باشد. این مواد کامپوزیتی به صورت پلیمرهای مسلح شده با الیاف می‌باشد. این مواد با استفاده از چسب بر روی اجزای سازه‌ای چسبانده می‌شود. این پلیمرهای مسلح شده با الیاف شامل الیاف با مقاومت بالا می‌باشند که در یک رزین پلیمری بنام زمینه قرار داده شده است. برخی از مزایای پلیمرهای مسلح شده، مقاومت در برابر خوردگی، نارسا بودن، غیر مغناطیسی بودن، نسبت مقاومت بالا به وزن، راحتی نصب و هزینه پایین مراقبت می‌باشد. استفاده از مواد مرکب در ابتدا به دلیل قیمت بالای مواد اولیه و هزینه ساخت، به کندی صورت گرفت، اما مزایای این مواد نسبت به مصالح مرسوم مصرفی در صنعت ساختمان با وجود هزینه‌های بالای ساخت سبب افزایش کاربرد آنها شده است، به طوری که علاوه بر موارد فوق در تعمیر و تقویت سازه‌های بنایی نیز از آنها استفاده می‌شود [۱۳ و ۱۴]. تاکنون تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است. باروس و فورتس در سال ۲۰۰۵ [۱۵] با هدف افزایش ظرفیت باربری تیرهای بتن‌آرمه در حالت سرویس و حالت نهایی، بالابردن میزان تغییرشکل در تیرهای تقویت شده با تسمه‌های FRP به روش، NSM آزمایشات خمشی بر روی تیرهای بتن‌آرمه که با مقادیر مختلف تسمه‌های FRP به سطح مقطع تیر مقاوم شده بودند را انجام دادند. تنگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۱۶] آزمایشات خمشی را بر روی تیرهای بتن‌آرمه که با میله‌های GFRP به روش NSM مقاوم شده بودند، انجام دادند. بوانگ و همکاران [۱۷] با هدف بررسی رفتار تیر بتن‌آرمه تقویت شده با میله‌های GFRP آزمایشاتی را انجام داده‌اند.

بررسی اعضای تحت اثر لنگر پیچشی از دو دیدگاه قابل توجه است؛ اول اینکه در برخی اعضا که پیچش به عنوان عامل موثر اولیه مطرح باشد، ضعف مقاومت پیچشی می‌تواند یکپارچگی کل سازه را به مخاطره بیندازد چرا که گسیختگی پیچشی، سازوکاری ترد و شکننده محسوب می‌شود. نکته دوم- از دیدگاه تحلیل غیرخطی سازه‌ها- بدین صورت مطرح می‌شود که از بین چهار حالت بارگذاری اصلی یعنی نیروی محوری، نیروی برشی، لنگر خمشی و لنگر پیچشی، فقط پیچش است که یک میدان تنش سه محوری به وجود می‌آورد. پس مدل‌های رفتاری به دست آمده برای این مسائل می‌تواند با کمترین تغییرات برای حالا بارگذاری دیگر نیز به کار رود [۱۸].

به‌طور کلی دو رویکرد در شبیه‌سازی اعضای بتنی وجود دارد. رویکرد اول، مدلسازی به روش ترک مجزا بوده که هزینه محاسباتی بالایی داشته و استفاده از آن نیازمند مشخص بودن محل تشکیل ترک است بنابراین در مسائل خاص کاربرد دارد. رویکرد دوم، مبتنی بر رفتار متوسط نمونه بتنی است که مدل‌های ترک پخشی و خسارت-خمیری در این دسته قرار می‌گیرند. این روش‌ها، دارای هزینه محاسباتی کم و دقت بالایی بوده اما استفاده از این روش‌ها نیازمند به‌کارگیری مدل‌های رفتاری مناسب برای مصالح است. پس هدف این پژوهش، تحلیل غیرخطی تیرهای بتنی تحت پیچش با تمرکز روی مدل‌های رفتاری مصالح و ارائه روشی مدون برای مدلسازی می‌باشد [۱۸].

در این مقاله به بررسی روند مدل عددی اجزای محدود تیر بتنی خودتراکم با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحت اثر خمش، پیچش و برش پرداخته شده است. در ابتدا مدل را با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی که در مرجع [۱۹] بدست آمده است، تایید کرده و سپس با نوارهای GFRP نمونه را مقاوم سازی کرده و در انتها به بررسی نتایج عددی پرداخته شده است.

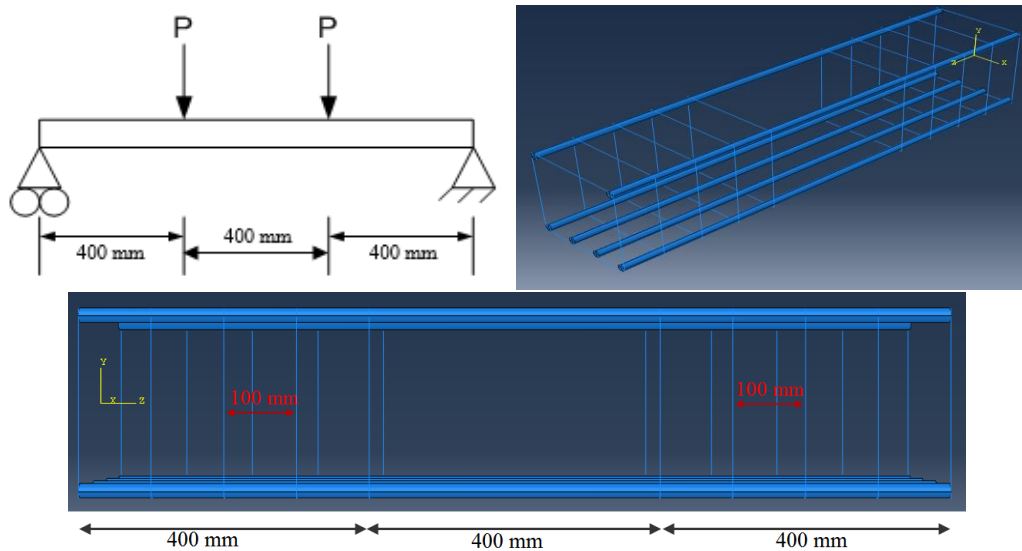
۲- روش تحقیق

در این مقاله از نرم‌افزار آباکوس برای مدل سازی تیرهای ساده و تقویت شده با ورق GFRP به کمک لایه چسب، و تحلیل اجزاء محدودی آن استفاده شده است. در این مطالعه به بررسی اثر برش، پیچش و خمش بر روی تیر بتنی خودتراکم پرداخته شده است. برای پیچش از تیر بتنی غیرمسلح و برای برش و خمش از تیر بتنی مسلح استفاده شده است. برای تیرهایی که جهت برش مدل سازی شده‌اند از ۴ آرماتور کششی با قطر ۲۰ میلیمتر استفاده شده است و برای تیر بتنی که برای خمش مورد مطالعه قرار داده شده است علاوه بر ۴ آرماتور کششی با قطر ۲۰ در پایین از ۲ تا آرماتور با قطر ۲۰ در بالای تیر بتنی ۲ تا آرماتور با قطر ۲۰ میلیمتر در قسمت فشاری بتن استفاده شده است و با خاموت به قطر ۱۲ میلیمتر در سرتاسر تیر محصور شده‌اند. فاصله خاموت‌ها به صورت یکسان و در فاصله ۱۰۰ میلیمتر از یکدیگر قرار داده شده است. در ابتدا با مدل سازی تیر بتنی با استفاده از آزمایش انجام شده توسط مظلوم و همکاران [۱۹] به

صحت مدل تیر بتنی بدون تقویت برای مدل تحت اثر برش و پیچش پرداخته شده است، سپس تیر بتنی را با ورق GFRP تقویت نموده و اثر برش، پیچش و خمش بر روی تیر بتنی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۲- مشخصات نمونه

ابعاد نمونه‌های مورد مطالعه جهت بررسی اثر برش، پیچش و خمش هر دو یکسان و برابر با 300×300 میلی‌متر بوده است. در شکل ۱ مشخصات مدل جهت بدست آوردن خمش نمایش داده شده است.



شکل ۱- مدل در نظر گرفته شده جهت بدست آوردن تنش خمشی

تیر تحت بارگذاری استاتیکی به روش سه نقطه‌ای برای انجام آزمایش خمشی قرار گرفته‌اند. مشخصات هندسی و مکانیکی تیر بتنی، فولاد مصرفی، GFRP و چسب در جداول ۱ الی ۴ آمده است.

جدول ۱- مشخصات و ابعاد تیر بتنی [۱۹]

GFRP		مدول الاستیسیته E_c MPa	مقاومت فشاری بتن f'_c MPa	مقاومت کششی بتن f'_t MPa	ابعاد (mm)			تیر
ضخامت ورق	تعداد لایه‌ها				L	h	b	
0	0	24870	30	3.17	1200	300	300	B1
0.165	1	24870	30	3.17	1200	300	300	B2
0.33	2	24870	30	3.17	1200	300	300	B3

جدول ۲- مشخصات ورق تقویتی GFRP

واحد	مقدار	مشخصه
gram/m ²	۴۴۰	وزن الیاف
MPa	۷۲/۴۱۳	مدول الاستیسیته
gr/cm ³	۲/۵۴	دانسیتته

جدول ۳- مشخصات فولادهای مصرفی

Poisson's Ratio	E	f_u	f_y	قطر	فولاد
	GPa	MPa	MPa	mm	
0.2	200	400	400	20	

جدول ۴- مشخصات چسب به کار رفته در تقویت تیر بتنی

E_a (MPa)	G_a (MPa)	t_a (mm)
۱۸۲۴	۶۲۲	۰.۶۲۶

۲-۲- شبیه سازی رفتار مصالح

در مدل سازی، رفتار تیرهای بتن آرمه تحت خمش چهار نقطه‌ای به روش اجزاء محدود (FEM) و به صورت حل غیرخطی، با در نظر گرفتن المان چسب برای مدل سازی رفتار سطح مشترک بتن و GFRP مورد بررسی قرار گرفته است. برای پیچش نیز از بارگذاری به صورت خارج از محور تقارن و در دو انتهای تیر بتنی اعمال شده است. برای مدل برش نیز از مدل دو نقطه‌ای به روش اجزای محدود و به صورت غیرخطی استفاده شده است.

۲-۲-۱ مشخصات اصلی بتن

بتن بنابر طبیعتش ماده‌ای با رفتار پیچیده است و حتی در سطوح تنش پایین هم رفتاری کاملاً غیرخطی دارد. از میان تئوری-هایی که برای توضیح بتن ارائه شده‌اند، دو تئوری پلاستیسیته و مکانیسم خرابی بیشتر تطابق را با رفتار واقعی بتن دارند. کامل ترین مدل برای شبیه سازی رفتار بتن، مدلی باشد که پلاستیسیته و خرابی را ترکیب نماید [۲۰]. در این تحقیق از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک یا مدل CDP برای مدل سازی بتن استفاده شده است. در این مدل دو مکانیسم گسیختگی برای بتن که عبارتند از ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری فرض می‌شود. هر دوی این پدیده‌ها ناشی از شروع و گسترش ترک‌ها می‌باشند. رفتار تنش-کرنش بتن تحت فشار تک محوری بعد از ناحیه الاستیک باید به صورت تنش برحسب کرنش غیرالاستیک تعریف شود. فرض می‌شود که رفتار بتن تحت کشش تک محوری تا تشکیل ترک‌های ریز اولیه در تنش حداکثر به صورت خطی است [۲۱].

رفتار بتن بعد از شکست باید به صورت تنش برحسب کرنش ترک خوردگی تعریف گردد. این رفتار اجازه می‌دهد تا بتوان اثرات اندرکنش بتن و آرماتور را یافت. برا یدر نظر گرفتن اثرات اندرکنش بین بتن و میلگرد مانند پیوستگی-لغزش بتن با میلگردها و اثر میخ پرچی (Dowel Action) می‌توان خواص ناشی از این اثرات را به صورت تقریبی و ساده شده با معرفی سخت‌شدگی کششی در مدل بتن در نظر گرفت و با دقتی نسبی اثر باز توزیع تنش‌های بتن پس از ترک خوردگی را وارد محاسبات نمود [۲۲].

برای معرفی رفتار کامل بتن باید علاوه بر پارامترهای الاستیک (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون)، با مدل CDP مقادیر عددی پنج پارامتر پلاستیک و پارامترهای اختصاصی معرف رفتار بتن در کشش و فشار به نرم افزار داده شوند که به شرح زیر است:

۱. زاویه اتساع (Dilation Angle) ϕ ، که نسبت تغییرات حجم به کرنش برشی است. بزرگترین مقادیر ϕ بتن را شکل پذیرتر می‌سازد.
۲. خروج از محوریت (Eccentricity) ϵ ؛ که سرعت نزدیک شدن تابع پتانسیل پلاستیک به مجانبش را به دست می‌دهد و هر چه مقدار آن بیشتر باشد انحنا در پتانسیل‌های کم، بیشتر می‌گردد. مقدار این خروج از محوریت به عنوان پیش فرض در نرم افزار 0.1 در نظر گرفته شده است.

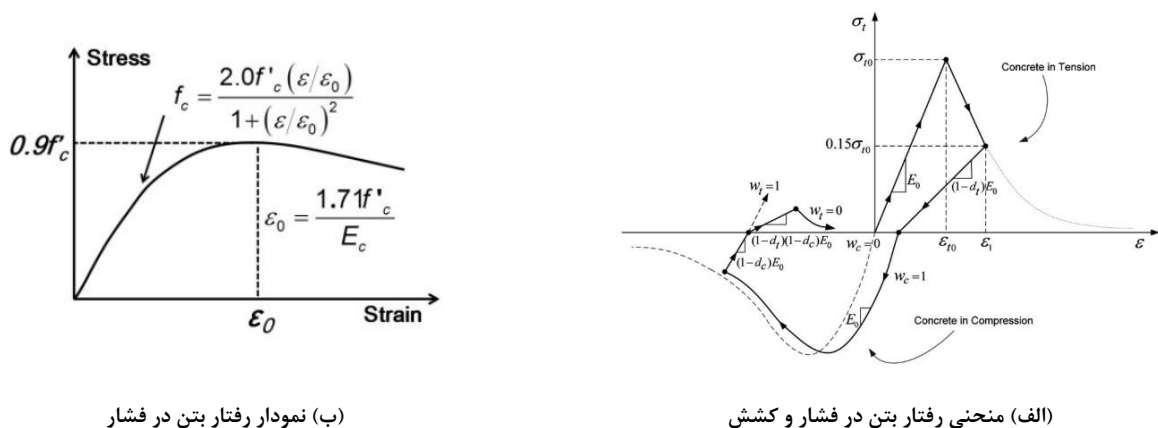
۳. f_{c0} ؛ که نسبت تنش تسلیم دو جهته فشاری به تنش تسلیم یک جهته فشاری است که در آزمایش‌ها معمولاً عددی بین ۱/۱ تا ۱/۱۶ به دست می‌آید. مقدار پیش فرض این پارامتر بدون بعد در نرم افزار ۱/۱۶ است.
۴. پارامتر k ؛ که شکل سطح تسلیم را مشخص می‌سازد و می‌تواند مقداری بین ۰/۵ تا ۱/۰ داشته باشد. مقدار پیش فرض k در نرم افزار تعیین شده است که بنا به اتفاق نظر مراجع موجود [۲۳] برای مدل سازی بتن تیر مناسب خواهد بود.
۵. پارامتر ویسکوزیته، μ ؛ که زمان آسودگی سیستم ویسکوپلاستیک را نشان می‌تواند با استانداردسازی و تنظیم ویسکوپلاستیک معادلات رفع نمود و بدین وسیله اجازه داد تنش‌ها از سطح تسلیم خارج شوند. پارامترهای معرفی شده در فوق در جدول ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای مورد نیاز مدل CDP بتن در تعریف رفتار پلاستیک بتن [۲۱]

Dilation angle	Eccentricity	$\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$	k	Viscosity Parameter
30	0.1	1.16	0.6667	0.01

۲-۲-۲ رفتار تنش- کرنش پس از شکست بتن

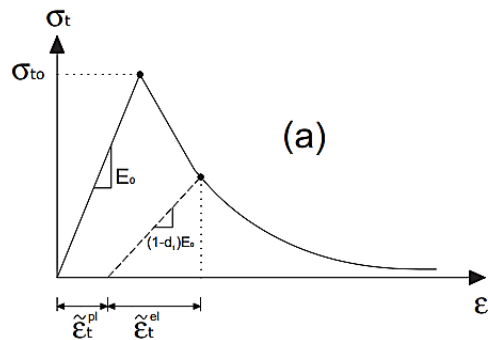
به طور کلی مشخص کردن رفتار پس از شکست در بتن و بیان تنش‌های بعد از شکست به صورت تابعی از کرنش ترک خوردگی ϵ_{cr} می‌باشد. کرنش ترک خورده به صورت کرنش کل منهای کرنش الاستیک بتن ترک نخورده تعریف می‌شود. با داشتن اطلاعات مربوط به باربرداری، منحنی‌های آسیب کششی در آباکوس به صورت $(dt-\epsilon_{cr})$ قابل حصول است. این برنامه به طور خودکار، مقادیر کرنش ترک خورده را به مقادیر کرنش پلاستیک تبدیل می‌کند. در شکل ۲ با داشتن مقادیر تنش و کرنش فشاری بتن، می‌توان پارامترهای خرابی و مدول الاستیسیته بتن، کرنش‌های پلاستیک معادل را به دست آورد [۲۱]. برای محاسبه منحنی تنش کرنش فشاری از روابط هاگنستاد اصلاح شده استفاده شده است (شکل ۴).



شکل ۲- کرنش غیرالاستیک در منحنی پاسخ بتن تحت بارگذاری فشاری تک محوره [۲۱]

۲-۲-۳ رفتار کششی بتن

زمانی که ترک در بتن مسلح ایجاد می‌شود باز هم قادر به تحمل مقدار کشش در جهت عمود به ترک می‌باشد که این پدیده سختی کششی باقی مانده نام دارد (شکل ۳). برای معرفی رفتار کششی بتن به نرم افزار از روش کرنش‌ها استفاده شده و از مدل ساده خطی جهت مدل کردن رفتار کششی بتن استفاده شده است.



شکل ۳- منحنی رفتاری بتن در کشش

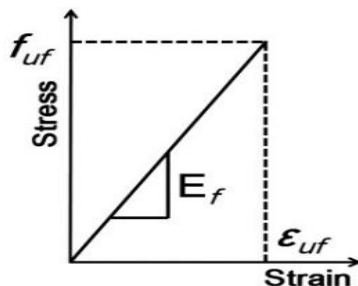
در جدول ۶ مشخصات تنش و کرنش ترک خوردگی بتن در کشش و پارامتر خرابی آن نمایش داده شده است.

جدول ۶- مشخصات تنش و کرنش ترک خوردگی بتن در کشش و پارامتر خرابی آن

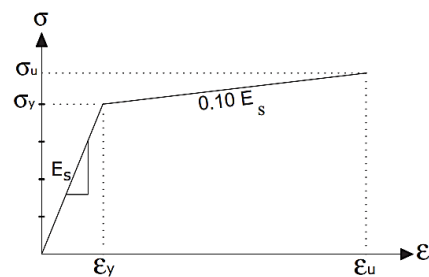
پارامتر خرابی	کرنش کششی (ϵ_{cr})	تنش کششی (MPa)
۰	۰	۳/۱۷
۰/۹	۰/۰۰۱۲۸	۰

۲-۲-۴ الیاف پلیمری شیشه‌ای

الیاف پلیمر مسلح کننده در جهت طولی به سختی دارای رفتار غیرخطی هستند و رفتار آن‌ها را به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. همچنین با بارگذاری‌های عرضی درون صفحه انحراف از رفتار غیرخطی مشاهده شده است. اما میزان غیرخطی شدن با برش درون صفحه‌ای قابل مقایسه نیست. معمولاً این رفتار غیرخطی را که با بارگذاری‌های عرضی توام است می‌توان نادیده گرفت. بنابراین مواد FRP تا لحظه گسیختگی (رسیدن به کرنش نهایی، ϵ_u) رفتار الاستیک و خطی دارند و در مقاومت نهایی خود دچار شکستگی ترد می‌شوند (شکل ۴ب). بنابراین رفتار موارد FRP را می‌توان با معرفی یک رفتار خطی الاستیک معرفی نمود [۲۴].



(ب)



(الف)

شکل ۴- الف) منحنی تنش-کرنش فولاد ب) منحنی تنش کرنش FRP

۲-۲-۵ لایه چسب

بررسی خرابی‌های زودرس حاصل از جداسازی منوط به اضافه کردن مدل سطح واسط به مدل کلی است. در این تحقیق این امر با مدل سازی لایه چسب و تعریف خصوصیات و رفتار مکانیکی این لایه انجام شده است. رفتار چسب در نرم افزار به صورت مدل کشش-جدایی (Traction-Separation) تعریف شده است. این مدل دو حالت دارد؛ از بین رفتن چسبندگی، و رابطه الاستیک خرابی، بین تنش مماسی (یا کششی) (τ) و جابجایی نسبی ناشی از لغزش (δ) در میان لایه چسب را شامل می‌شود. شکل ۷ نمایش رفتار مدل کشش-

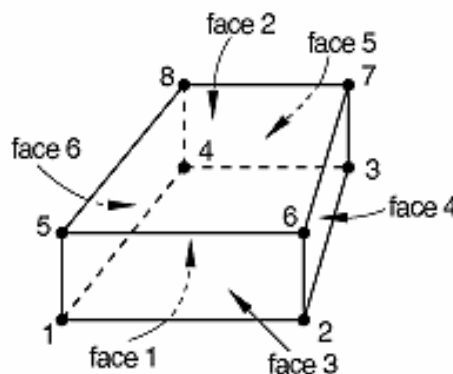
جدایی است که توسط پارامترهای موثر کشش (τ) و جابجایی نسبی ناشی از جداسازی (δ) بوجود آمده است. در این مدل مقدار نهایی جابجایی نسبی (δ_f) و مقدار ترک خوردگی اولیه (δ_0) به پارامترهای ورودی زیر بستگی دارد:

$$k_0 = \frac{\tau_{\max}}{\delta_0}, \quad \delta_f = \frac{2G_{cr}}{\tau_{\max}} \quad (1)$$

رفتار لایه چسب با تعریف دو بخش الاستیک و بخش خرابی چسب صورت می‌گیرد. رفتار آغازین لایه چسب در شروع خرابی به شکل رفتار الاستیک-خطی بوده و می‌بایست بردار سختی اولیه برای آن تعریف شود:

$$K_{mm} = \frac{E}{t}, \quad K_{nn} = \frac{G_1}{t}, \quad K_{ss} = \frac{G_2}{t} \quad (2)$$

در رابطه بالا، t ضخامت چسب، E مدول الاستیسیته چسب، G_1 و G_2 مدول برشی چسب در جهات دوم و سوم صفحه، K_{tt} و K_{ss} مقدار سختی اولیه در جهات عمود و ۲ جهت اصلی دیگر و با توجه به شکل ۵ می‌باشد.

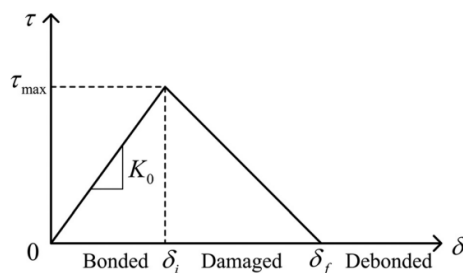


شکل ۵- المان Cohesive. ۸ گرهی سه بعدی؛ COH3D8

تعریف بخش خرابی به نرم‌افزار، شامل رفتار آغاز خرابی و گسترش خرابی می‌باشد. در فرضیه خرابی چسب، آغاز خرابی هنگامی روی می‌دهد که معادله کشش درجه دو شامل نسبت‌های تنش اصلی به عدد یک برسند:

$$\left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_n}{\tau_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_t}{\tau_n^0} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

پارامترهای σ_n ، σ_t و σ_s عبارتند از مقادیر حداکثر تنش‌های کششی و برشی ماکزیمم چسب و n و s و t جهت‌های مولفه‌های تنش در شکل ۶ در محدوده الاستیک می‌باشند.



شکل ۶- رفتار لایه چسب

مقادیر این پارامترها به صورت $\sigma_n = f_{ct}$ و $\sigma_s = \sigma_t = \tau_{max}$ پیشنهاد شده است. که در آن تنش برشی ماکزیمم بتن است و مقدار تنش برشی ماکزیمم بتن است و مقدار تنش برشی ماکزیمم، τ_{max} ، از رابطه زیر به دست می آید:

$$\tau_{max} = 1.5 \beta_w f_{ct} \quad (4)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{(2.25 - \frac{b_f}{b_c})}{(1.25 + \frac{b_f}{b_c})}} = 0.75 \quad (5)$$

مقدار $\frac{b_f}{b_c}$ در تیر تقویت شده، برابر عدد ۱ می باشد؛ bf عرض صفحه FRP، bc عرض بتن و fct مقاومت کششی بتن می باشند. شبیه سازی عددی نشان داده اند که این مقدار برای تنش برشی ماکزیمم بسیار زیاد می باشد و به جای آن مقدار $\frac{\tau_{max}}{2}$ جایگزین شده است. مقادیر مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از:

$$\tau_s^0 = \tau_t^0 = \frac{\tau_{max}}{2} = 1.78 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$\sigma_n^0 = f_{ct} = 3.17 \text{ MPa} \quad (7)$$

فرضیه گسترش خرابی چسب با توجه به انرژی آزاد شده، بیان شده است. در آباکوس، وابستگی انرژی شکست به مود براساس معیار گسیختگی BK تعریف شده است:

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_\phi}{G_\psi} \right\}^\eta = G^c \quad (8)$$

که در آن، $G_\psi = G_n + G_s$ ، $G_\phi = G_s + G_t$ و η پارامترهای مصالح هستند. G_n ، G_s و G_t به ترتیب، اشاره به کار انجام شده به وسیله کشش و جدایش همزمان با آن در جهت عمودی، اولین و دومین جهت های کششی، دارند. این معیار، بویژه هنگامی که انرژی های شکست بحرانی در طی تغییر شکل کلی در طول اولین و دومین جهت های تنش؛ یکسان هستند؛ سودمند است. یعنی $G_s^c = G_t^c$.

مقادیر استفاده شده در این تحقیق عبارتند از: $G_n^c = 111.52 \frac{J}{m^2}$ و $G_s^c = G_t^c = 900 \frac{J}{m^2}$. همچنین $\eta = 1.45$ بوده و مقدار G_n^c از روابط تجربی انرژی شکست، برابر با سطح زیر منحنی نرم شونده بتن به دست آمده است [۲۵].

$$G_F = 2.5 \alpha_0 \left(\frac{f_c'}{0.051} \right)^{0.46} \left(1 + \frac{d_a}{11.27} \right)^{0.22} \left(\frac{w}{c} \right)^{-0.3} \quad (9)$$

منحنی نرم شونده بتن تحت بارگذاری کششی تک محوری در این مطالعه مورد نظر می باشد که در آن، f_t' مقاومت کششی بتن است که شروع ترک های ریز در بتن را کنترل می کند، G_F کل انرژی شکست است که بنابر تعریف، میزان انرژی لازم برای شروع، گسترش و شکست کامل یک ترک در واحد سطح می باشد. در رابطه ۹، مقاومت فشاری بتن f_c' (MPa)، انرژی شکست بتن $G_F \left(\frac{N}{m} \right)$ ، برای سنگدانه d_a (mm) = 9 و نسبت آب به سیمان در اختلاط بتن $\frac{w}{c} = 0.5$ است. زمانیکه پارامترهای f_t' و G_F معلوم شوند، می توان نرم شونده را با استفاده از توابع تخمین زد.

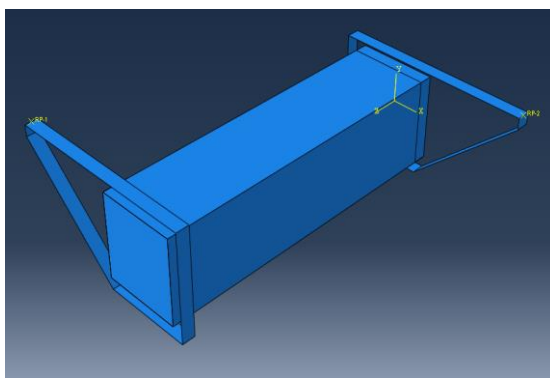
۳- المان‌های به کار رفته در تحلیل عددی

برای مدل سازی بتن به دلیل رفتار سه بعدی آن از المان C3D8R، برای فولادهای کششی و فشار از المان T3D2 و برای صفحه GFRP از المان Shell از نوع S4R که المان ۴ گرهی با ۶ درجه آزادی انتقالی و دورانی در هر گره می‌باشد، استفاده شده است. برای صفحه چسب از المان COH3D8 استفاده شده است.

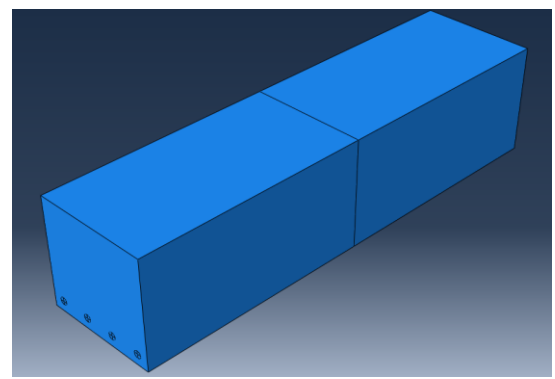
در مدل سازی برای المان تیر بتنی و لایه چسب، مش بندی به شکل Hex و برای صفحه GFRP از Quad استفاده شده است.

در شکل ۷ مدل ساخته شده جهت بررسی نتایج عددی تحت خمش و پیچش نمایش داده شده است.

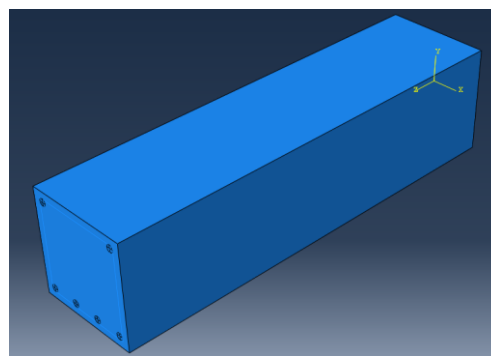
برای تقویت تیر خمشی از ورق GFRP در زیر تیر استفاده شده است. برای تقویت تیر در مقابل پیچش نیز از ورق GFRP به صورت دور پیچ بر روی تیر بتنی استفاده شده است. در شکل ۸ نحوه مقاوم سازی تیر بتنی تحت اثر بارگذاری خمشی و پیچشی نمایش داده شده است.



(B)

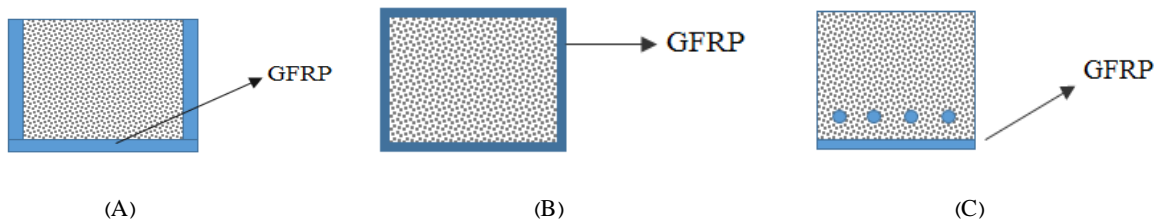


(A)



(C)

شکل ۷- مدل ساخته شده جهت انجام، (A) آزمایش برشی و (B) آزمایش پیچشی، (C) آزمایش خمشی



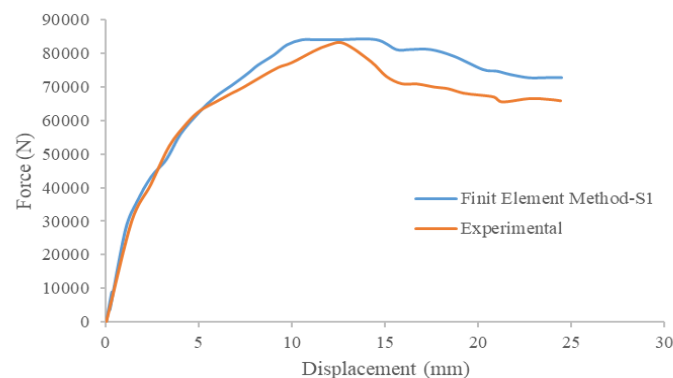
شکل ۸- نحوه مقاوم سازی (A) تیر بتنی تحت برش، (B) تیر بتنی تحت پیچش و (C) تیر بتنی تحت خمش

۴- نتایج مدل سازی عددی

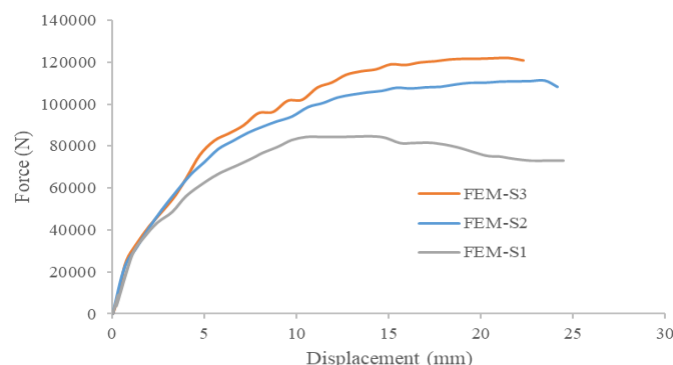
در ابتدا به بررسی نتایج عددی بدست آمده از بارگذاری که برای محاسبه برش انجام شده، پرداخته می شود و سپس نتایج عددی بارگذاری پیچشی و در انتها نتایج حاصل از آزمایش برای خمش بیان شده است. برای تحلیل غیرخطی، رابطه نیرو-تغییرمکان نیز به صورت غیرخطی بوده و سختی سازه تابعی از تغییرمکان خواهد بود. برای حل این گونه معادله ها نمی توان بار وارده را یکباره به سازه اعمال نمود، بلکه با تقسیم بار به صورت نمونه های کوچک به حل مساله پرداخته می شود. هر چه نمونه بارها کوچکتر باشند باعث نزدیکی حالت مفروض با واقعیت موجود خواهد شد و شرط وقوع هم گرایی در جوابها کوچک بودن نمونه بارها است. در این تحقیق از روش تکرار نیوتن رافسون برای دستیابی به هم گرایی به کار گرفته شده است.

۴-۱- نتایج حاصل از برش

منحنی های بار-جابجایی، برای تیرهای شاهد در شکل ۹ و تیرهای تقویت شده با GFRP توسط نرم افزار در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. که در این شکل مقادیر جابجایی و تغییرمکان عمودی وسط دهانه تیرها رسم شده است. با مقایسه نمودار نیرو-جابجایی عمودی وسط دهانه تیرها حاصل از تحلیل، تیر در نرم افزار (مدل سازی عددی) و همچنین نتایج آزمایشگاهی میزان دقت و صحت مدلها بسیار خوب می باشد و درصد خطای بین مدلها و نتایج آزمایشگاهی تقریباً کمتر از ۱۰ درصد می باشد. در ناحیه الاستیک نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی مطابقت خیلی خوبی با هم دارند.



شکل ۹- منحنی بار تغییرمکان تیر ساده تحت اثر بار برای محاسبه برش



شکل ۱۰- منحنی بار تغییرمکان تیر تقویت شده تحت اثر بار برای محاسبه برش

مشخصات عددی بدست آمده از مدل سازی در جدول ۷ ارائه شده است. در این جدول انواع تیرهای مورد مطالعه، نحوه تقویت و ضخامت لایه های GFRP، بار ماکزیمم نمونه ساده آزمایشگاهی و بار ماکزیمم عددی مدل سازی نمایش داده شده است. براساس اعداد حاصل از جدول ۷ درصد خطای حاصل مدل عددی و آزمایشگاهی نیز کمتر از ۲ درصد بدست آمده است.

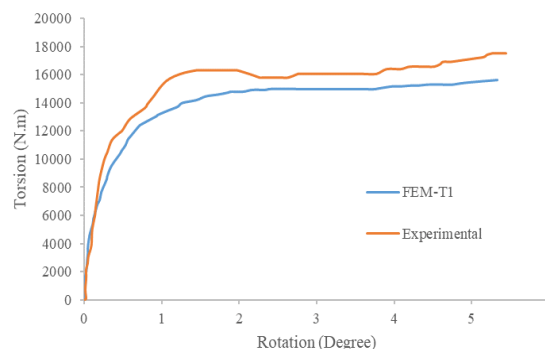
جدول ۷- مشخصات عددی بدست آمده از مدل ها تحت اثر بار برای محاسبه برش

تیر	نوع تقویت	ضخامت GFRP (mm)	بار ماکزیمم آزمایشگاهی (N) [۱۷]	بار ماکزیمم مدل سازی عددی	درصد افزایش ظرفیت تیر تقویت شده
S1	بدون تقویت	0	82953.16	84241.44	-----
S2	یک لایه GFRP	0.165	-----	111089.90	0.32
S3	دو لایه GFRP	0.33	-----	121950.35	0.45

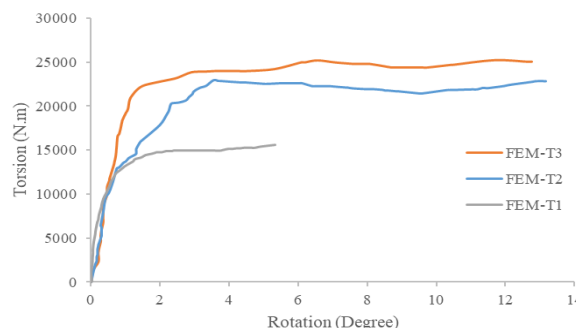
۴-۲- نتایج حاصل از پیچش

منحنی های بار-دوران، برای تیرهای شاهد در شکل ۱۱ و تیرهای تقویت شده با GFRP توسط نرم افزار در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. که در این شکل مقادیر دوران دو انتهای تیرها رسم شده است. با مقایسه نمودار نیرو-دوران تیرها حاصل از تحلیل، تیر در نرم-افزار (مدل سازی عددی) و همچنین نتایج آزمایشگاهی میزان دقت و صحت مدل ها بسیار خوب می باشد و درصد خطای بین مدل ها و نتایج آزمایشگاهی تقریباً کمتر از ۱۰ درصد می باشد.

در ناحیه الاستیک و پلاستیک نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی مطابقت خیلی خوبی با هم دارند.



شکل ۱۱- منحنی بار دوران تیر ساده تحت اثر بارگذاری برای محاسبه اثر پیچش



شکل ۱۲- منحنی بار دوران تیر تقویت شده تحت اثر بارگذاری برای محاسبه اثر پیچش

مشخصات عددی بدست آمده از مدل سازی در جدول ۸ ارائه شده است. در این جدول انواع تیرهای مورد مطالعه، نحوه تقویت و ضخامت لایه های GFRP، بار ماکزیمم نمونه ساده آزمایشگاهی و بار ماکزیمم عددی مدل سازی نمایش داده شده است. براساس اعداد حاصل از جدول ۸ درصد خطای حاصل مدل عددی و آزمایشگاهی نیز کمتر از ۱۱ درصد بدست آمده است.

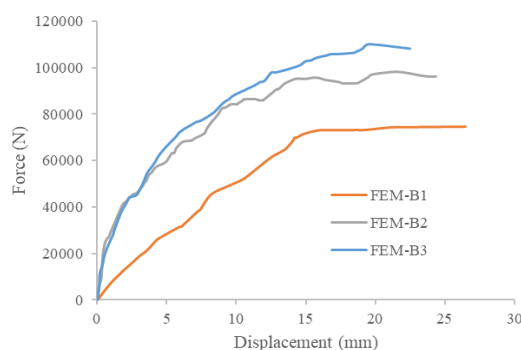
جدول ۸- مشخصات عددی بدست آمده از مدل ها تحت اثر بارگذاری برای محاسبه اثر پیچش

تیر	نوع تقویت	ضخامت GFRP (mm)	بار ماکزیمم آزمایشگاهی (N) [۱۷]	بار ماکزیمم مدل سازی عددی (N)	درصد افزایش ظرفیت تیر تقویت شده (%)
T1	بدون تقویت	0	17518.01	15631.34	-----
T2	یک لایه GFRP	0.165	-----	22965.53	0.47
T3	دو لایه GFRP	0.33	-----	25199.10	0.61

۳-۴- نتایج حاصل از خمش

با توجه به نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی و صحت خوب نتایج با مشخصات آزمایشگاهی سعی شده است که تیر بتنی برای مطالعه بیشتر تحت اثر بارگذاری ۴ نقطه ای نیز مدل سازی شود. در این بخش به بررسی نتایج عددی المان محدود حاصل از مدل سازی در نرم افزار آباکوس پرداخته شده است و سپس اثر تقویت ورق GFRP بر روی این مدل مورد بررسی قرار گرفته است.

منحنی های بار-جابجایی، برای تیرهای بدون تقویت و تیرهای تقویت شده با GFRP توسط نرم افزار در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. که در این شکل مقادیر جابجایی و تغییر مکان عمودی وسط دهانه تیرها رسم شده است.



شکل ۱۳- منحنی بار تغییر مکان تیر تقویت شده برای محاسبه خمش

مشخصات عددی بدست آمده از مدل سازی در جدول ۹ ارائه شده است. در این جدول انواع تیرهای مورد مطالعه، نحوه تقویت و ضخامت لایه های GFRP، بار ماکزیمم نمونه ساده آزمایشگاهی و بار ماکزیمم عددی مدل سازی نمایش داده شده است.

جدول ۹- مشخصات عددی بدست آمده از مدل ها برای محاسبه خمش

تیر	نوع تقویت	ضخامت GFRP (mm)	بار ماکزیمم مدل سازی عددی (N)	درصد افزایش ظرفیت تیر تقویت شده (%)
B1	بدون تقویت	0	74652.40	-----
B2	یک لایه GFRP	0.165	98351.76	0.32
B3	دو لایه GFRP	0.33	110175.31	0.48

۵- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

در مقاوم سازی تیرهای بتنی در برابر برش، با افزودن یک لایه ورق تقویتی GFRP ظرفیت باربری به مقدار ۳۲ درصد و با افزودن دو لایه ورق تقویتی به میزان ۴۵ درصد افزایش داشته است. لذا عملکرد GFRP در دولایه برای مقاوم سازی برشی مناسب ارزیابی می گردد. در صورت نیاز به مقاوم سازی بیشتر پیشنهاد می شود از CFRP در این زمینه استفاده گردد.

نتایج مقاوم سازی تیرهای بتنی تحت خمش تقریباً مشابه نتایج به دست آمده از برش است. یعنی با افزودن یک لایه ورق تقویتی GFRP در زیر تیر ظرفیت باربری به مقدار ۳۲ درصد و با افزودن دو لایه ورق تقویتی به میزان ۴۸ درصد افزایش داشته است. به عبارت دیگر عملکرد GFRP در دولایه برای مقاوم سازی خمشی نتایج کاملاً قابل قبول می دهد.

در مقاوم سازی تیرهای بتنی تحت بارگذاری پیچشی، ورق های GFRP راندمان بیشتری نسبت به برش و پیچش داشتند. به عبارت دیگر ظرفیت باربری پیچشی با افزودن یک لایه ورق دورپیچ تقویتی به مقدار ۴۷ درصد و با افزودن دو لایه ورق تقویتی به میزان ۶۱ درصد افزایش داشته است. در صورت نیاز به تقویت بیشتر میتوان از CFRP استفاده کرد.

منابع

- [1] Okamura, H. (1997). Self- Compacting high performance Concrete. *Concrete International*. pp. 50-54.
- [2] Nunes, S. and Figueiras, H. and Oliveira, P. M. and Coutinho, J. S. and Figueiras, J. (2006). A methodology to assess robustness of SCC mixtures, *Cement and Concrete Research*, Vol(36), pp. 2115- 2122.
- [3] Lin, C. H. and Lin, S.P. and Tseng, C. H. (2004). High Workability Concrete Columns under Concentric Compression, *ACI Structural Journal*, Vol(101), No. 1, Jan.-Feb, pp. 85-93.
- [4] Lin, C. H. and Lin, S.P. (2005). Flexural Behavior of High-Workability Concrete Columns under Cyclic Loading, *ACI Structural Journal*, Vol(102), No. 3, May-June, pp. 412-421.
- [5] Chan, y. w. and Chen, y. S. and Liu, y. S. (2003). Development of Bond Strength of Reinforcement Steel in Self-Consolidating Concrete. *ACI Structural Journal*, Vol(100), No. 4, July-Aug, pp. 490-498.
- [6] Paultre, P. and Khayat, K. H. and Cusson, D. and Tremblay, S. (2005). Structural Performance of Self Consolidating Concrete Used in Confined Concrete Column, *ACI Structural Journal*, Vol(102), No. 4, July-Aug, pp. 560-568.
- [7] Esfahani, M. R. and Lachemi, M. and Kianoush, M. R. (2008). Top-Bar Effect of Steel Bars in Self Consolidating Concrete (SCC), *Engineering Structures Journal*, Elsevier Sci Ltd, Oxford, England, No. 30, pp. 52-60.
- [8] Chen, y. F. (2003). *An Investigation on Confinement Behavior of Square Self-CoMPacting Concrete Columns*, MS thesis, National Taiwan University, Department of Civil Engineering.
- [9] ACI Committee 209, (2008). *Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, SP-76, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 93-300.
- [10] Al-Nasra, M. M. and Asha, N. M. (2013). Shear reinforcements in the reinforced concrete beams. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2(10), 2320-0847.
- [11] ACI 440.2R-02, (2002). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute.
- [12] El-Mihilmy, M. T. and Tedesco, J. W. (2000). Analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates. *Journal of Structural Engineering*, 126(6), pp. 684-691.
- [13] Al-Mahmoud, F. and Castel, A. and François, R. and Tourneur, C. (2009). Strengthening of RC members with near-surface mounted GFRP rods. *Composite Structures*, 91(2): 138-147.
- [14] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2003). Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymers Sheets. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 129(1), pp. 30-40.

- [15] Barros, J. A. and Fortes, A. S. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with GFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp. 471-480.
- [16] Tang, W. C. and Balendran, R. V. and Nadeem, A. and Leung, H. Y. (2006). Flexural Strengthening of Reinforced Light Weight Polystyrene Aggregate Concrete Beams with Near Surface Mounted GFRP Bars. *Building and Environment*, Vol(41), pp. 1381-1393.
- [17] BoWang, G. J. and Teng, L. and Delorenzis, L. (2006). StrainMonitoring of Rc Strengthened with Smart NSM FRP Bars. *Construction Building Material*.
- [18] Domone, P. L. (2007). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol(29), no.1 pp.1-12.
- [19] Mazloom, M. And Saffari, A. and Mehrvand, M. Compressive, (2015). shear and torsional strength of beams made of self-compacting concrete. *Computers and Concrete*, Vol(15), no. 6, pp. 935-950.
- [20] Hansen, E. and Willam, K. and Carol, I. (2001). A two surface anisotropic damage/plasticity model for plain concrete Proc. *Framcos Fracture Mechanics of Concrete Materials*, pp. 549-56.
- [21] Abaqus Theory manual and user manual and Example Manual Version 6.10. Providence, (2010).
- [22] Taqieddin, ZN. (2008). *Elasto-Plastic and damage modeling of reinforced concrete*. Ph.D. dissertation. Louisiana State Univ. Baton Rouge LA. Dept. Civil & Environmental Engineering,
- [23] ABAQUS Inc, ABAQUS/CAE User Manual, Version 6.10.
- [24] Kok, L. (2004). *Effect of beam size & FRP thickness on interfacial shear stress concentration failure mode in FRP strengthened beam*. MS thesis. Singapor university.
- [25] Lu, XZ. and Ten, JG. and Ye, LP. And Jaing, JJ. (2005). Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Eng Struct*, Vol (24(5)), pp. 920-37.