

بررسی رفتار تیرهای عمیق بتنی مسلح شده با میلگردهای FRP

فهیمه مالکی

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

مجید قلهکی *

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

علی خیرالدین

استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

امید رضائی فر

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

میلگردهای کامپوزیتی مسلح پلیمری (FRP)، مقاوم در برابر خوردگی و مغناطیس بوده و مقاومت کششی بالایی دارند. ولی استفاده از این نوع میلگردها در تیرهای بتنی سبب کاهش شکل پذیری و افزایش ترک خوردگی آنها می‌گردد. در این مقاله تأثیر استفاده از میلگردهای FRP به عنوان جایگزین میلگردهای فولادی بررسی شده است و درصد و چیدمان آرماتورهای GFRP، افزایش پوشش بتن، استفاده از میلگردهای فشاری بر رفتار تیر عمیق بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. تیرهای عمیق بتنی از جمله اعضاء متداول در سازه‌ها می‌باشند، این تیرها در دیوارهای برشی، شاه تیر پل‌ها، سازه‌های دریایی و ساختمان‌های بلند کاربرد دارند. به دلیل رفتار متفاوت تیرهای عمیق بتنی در مقایسه با تیرهای خمشی، این تیرها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش کاور بتن از ۳۸ میلی‌متر به ۹۸ میلی‌متر مقاومت تیر تا ۳۱/۷ درصد کاهش یافت و استفاده از میلگردهای فشاری تغییری در ظرفیت باربری تیر ایجاد نکرد. همچنین با افزایش درصد میلگردهای GFRP، نیروی قابل تحمل تیر تا حدود ۴۶ درصد نسبت به تیر با یک ردیف میلگرد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: تیر عمیق بتنی، مقاومت برشی، روش اجزا محدود، میلگرد FRP.

* نویسنده مسئول: mgholhaki@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

تیرهای تقویت شده به روش NSM ظرفیت باربری و تغییر شکل نهایی تیرها به ترتیب تا ۶ درصد و ۱۵ درصد بیشتر از تیرهای تقویت شده به روش EB افزایش یافته است.

عربزاده و نوری [۱۰] به بررسی رفتار تیرهای عمیق با بتن سبک و معمولی و با نسبت‌های مختلف دهانه برشی و ارتفاع تیر به کمک نرم افزار آباکوس پرداختند و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با روش‌های تحلیل خرابایی موجود در آیین‌نامه‌ها نشان می‌دهد که تمام روش‌ها در تیرهای با ارتفاع کم محافظه کارانه بوده و با افزایش ارتفاع از حاشیه ایمنی کاسته می‌شود. زیدان^۵ و همکاران [۱۱] با مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی سایر محققان و با انجام آزمایش تیرهای بتنی مسلح شده با میلگرد FRP و نسبت آرماتور طولی کم، دریافتند که برای محاسبه مقاومت برشی بتن در تیرهای بتن آرمه با میلگرد FRP، رابطه انجمن تحقیق ساختمان (BRI)^۶ ژاپن بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در حالی که معادله ACI برای پیش‌بینی مقاومت برشی بتن، در اعضا مسلح با میلگرد طولی FRP بسیار محافظه کارانه می‌باشد. آل سونا^۷ و همکاران [۱۲] پاسخ خمشی المان‌های بتن آرمه با FRP را از طریق آزمایشات بار-تغییر مکان بر روی ۲۴ تیر و دال بتن آرمه با CFRP و GFRP، شامل محدوده وسیعی از نسبت‌های میلگرد بررسی کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که مشارکت برش و پیوستگی، تغییر مکان‌هایی را موجب می‌شود که می‌تواند در اعضا بتنی مسلح با FRP با نسبت‌های میلگرد متعادل تا بالا، اهمیت بیشتری داشته باشد. معادلات موجود برای محاسبه تغییر مکان کوتاه مدت اعضا مسلح شده با FRP بحث و با مقادیر تجربی مقایسه نمودند. نهدی و همکاران [۱۳] به بررسی آزمایشگاهی تیرهای عمیق بتنی مسلح با میلگردهای فولادی، CFRP و GFRP پرداختند. متغیرهای اصلی مورد بررسی شامل نسبت a/d ، ارتفاع موثر، سختی محوری میلگردها و مقاومت بتن بود. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که با فرض در نظر گرفتن نسبت a/d ، عمق موثر و مقاومت بتن یکسان برای دو گروه مورد بررسی تیرهای مسلح با میلگردهای CFRP ظرفیت برشی بیشتری نسبت به تیرهای بتن آرمه دارند. ابراهیم^۸ و همکاران [۱۴] تأثیر

تیرهای بتن آرمه در محیط‌های خورنده از قبیل سازه‌های دریایی، پل‌ها و پارکینگ‌ها، در معرض خوردگی میلگرد قرار دارند. خوردگی میلگرد سبب کاهش قابلیت بهره‌برداری تیرها می‌گردد. میلگردهای کامپوزیت FRP مقاوم در برابر خوردگی و مغناطیس بوده و مقاومت کششی بالایی دارند و از این رو، جایگزین مناسبی برای میلگردهای فولادی می‌باشند. یکی دیگر از ویژگی‌های میلگرد کامپوزیت FRP، تسلیم نشدن آن‌ها است و این میلگردها تا لحظه شکست دارای رفتار الاستیک خطی می‌باشند؛ که این ویژگی سبب کاهش شکل‌پذیری و افزایش ترک خوردگی در تیرهای مسلح شده با این نوع میلگردها می‌گردد. با توجه به هزینه بالای تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن آرمه، استفاده از میلگردهای کامپوزیت FRP در سراسر جهان گسترش فراوانی یافته است. به طور کلی، تیرهای بتن آرمه بر اساس رفتار برشی به دو گروه اعضا لاغر و عمیق دسته‌بندی می‌شوند [۱]. اگرچه در آیین‌نامه‌ها و راهنمای طراحی اعضا بتنی مسلح شده با FRP مدل‌های برشی متعددی ارائه شده است اما تمایزی بین مقررات تحلیل برای اعضا لاغر و عمیق قائل نمی‌شوند [۲-۴]. در مقابل، راهنمای طراحی برای سازه‌های بتن آرمه فولادی، مدل‌های تحلیلی متفاوتی را برای ارزیابی ظرفیت برشی در اعضا لاغر و عمیق پیشنهاد نموده است [۵-۷]. مقاومت تیرهای عمیق بیشتر وابسته به نسبت a/d می‌باشد، که در آن a دهانه برشی و d عمق تیر می‌باشد. در نتیجه روش‌های دیگری برای مدل‌سازی و طراحی این قبیل تیرها معرفی شده است [۸].

ال سید^۱ و همکاران [۸] اصلاحاتی برای معادله طراحی برش ACI 440.1R.03 پیشنهاد کردند، معادله پیشنهادی به کمک مقاومت برشی ۹۸ نمونه آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردید و با مقادیر محاسباتی تطابق خوبی داشت. اکبر زاده بنگر و همکاران [۹] به بررسی رفتار تیرهای عمیق مسلح شده با ورق CFRP^۲ به دو روش نصب خارجی^۳ (EB) و روش نصب نزدیک سطح^۴ (NSM) به منظور مقاوم‌سازی برشی تیرها پرداختند. در این پژوهش آرایش ورق CFRP بر روی جان تیرها به صورت قطری و عمود بر خط واصل بین محل اعمال بار تا تکیه‌گاه بود. نتایج نشان داد که در

⁵ Zeidan

⁶ Building Research Institute

⁷ Al-Sunna

⁸ Ibrahim

¹ El-Sayed

² Carbon Fiber Reinforced Polymer

³ Externally Bonded

⁴ Near Surface Mounted

در مدل‌سازی عددی در نرم افزار آباکوس، تعریف رفتار دقیق مصالح در کشش و فشار و در دو فاز الاستیک و پلاستیک، تأثیر زیادی بر نتایج خروجی نرم افزار دارد. مشخصات بتن مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است. برای مدل‌سازی رفتار بتن از مدل پلاستیسیته‌ی آسیب دیده،^۳ (CDP) استفاده شده است. در این مدل با استفاده از مفاهیم الاستیسیته‌ی آسیب دیده ایزوتروپیک و پلاستیسیته‌ی کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌گردد. در مدل پلاستیسیته آسیب دیده بتن، دو مکانیزم برای انهدام بتن پیش بینی شده است. مکانیزم اول، ترک خوردگی بتن تحت کشش و مکانیزم دوم، خردشدگی بتن تحت فشار می‌باشد. مشخصات مکانیکی بتن و میلگرد GFRP به ترتیب در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی بتن

مصالح	مقاومت فشاری (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی
بتن	۶۶/۴	۳۸/۳	۰/۰۰۳۵

جدول ۲- مشخصات مکانیکی میلگرد GFRP

مصالح	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی
میلگرد GFRP	۷۰۹	۴۱/۱	۰/۰۰۱۷

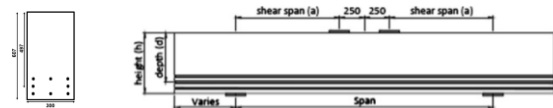
برای مدل‌سازی بتن از المان سه بعدی هشت گرهی با تابع شکل درجه یک و انتگرال کاهش یافته C3D8R و برای مدل‌سازی خاموت و میلگرد FRP، از المان سه بعدی تیر با تابع شکل درجه یک B31 استفاده شده است.

بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان وسط دهانه تیر می‌باشد. نحوه انجام آزمایش و نقاط مرجع برای اعمال نیرو و قیود تکیه گاهی مشابه مدل صحت سنجی شده می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. تیر با تکیه گاه ساده تحت بار استاتیکی چهار نقطه‌ای می‌باشد. از این رو تیر با تحلیل استاتیکی غیر خطی بار افزایش یافته مورد بررسی قرار گرفت. برای تعریف اندرکنش بین بتن و آرماتورها از قید ناحیه مدفون^۴ استفاده شده است. که در آن بتن به عنوان ناحیه میزبان و آرماتورها به عنوان ناحیه مدفون در نظر گرفته شدند. با در

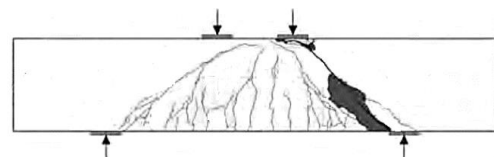
استفاده از نوارهای FRP ترکیبی از کربن و شیشه را به منظور مقاوم‌سازی برشی تیرهای عمیق به روش نصب نزدیک سطح (NSM) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که استفاده از نوارهای ترکیبی FRP به روش NSM سبب افزایش مقاومت برشی تا ۵۵/۸ درصد، کاهش جداشدگی بین بتن و مصالح مقاوم‌سازی شده و افزایش خصوصیات تغییر شکل تیرها می‌گردد. در این مقاله رفتار تیر عمیق بتنی مسلح شده با میلگرد FRP به کمک مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر پارامترهای میزان پوشش بتن، چیدمان و تعداد آرماتور کششی و فشاری بر رفتار تیر عمیق بتن آرمه مسلح شده ارزیابی گردید.

۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

از نمونه آزمایشگاهی آندرمات^۱ و لوبل^۲ [۱] به منظور صحت‌سنجی و بررسی نتایج مدل‌سازی عددی استفاده گردید. بر اساس نمونه آزمایشگاهی B5، مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای بتنی ۶۶/۴ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. ابعاد مقطع تیر بتنی مستطیلی ۶۰۷ × ۳۰۰ میلی متر مربع و طول آن ۳۲۰۰ میلی متر با دهانه برشی ۷۳۶ میلی متر و نسبت d/d برابر با ۱/۴۸ می‌باشد. نحوه میلگردگذاری و بارگذاری تیر در شکل (۱) نشان داده شده است. میزان پوشش بتنی برابر ۳۸ میلی متر در نظر گرفته شده است. از میلگردهای GFRP با قطر اسمی ۲۲ میلی متر و سطح مقطع ۳۹۶ میلی متر مربع استفاده شده است. بارگذاری بر روی تیر در آزمایش به صورت خمش چهار نقطه‌ای است. در شکل (۲) نحوه شکست و ترک خوردگی تیر بتنی مسلح با FRP نشان داده شده است.



شکل ۱- نحوه اعمال بارگذاری و سطح مقطع تیر B5 عمیق



شکل ۲- دیاگرام ترک خوردگی نمونه آزمایشگاهی B5 پس از شکست

³ Concrete Damaged Plasticity

⁴ Embedded Region

¹ Andermatt

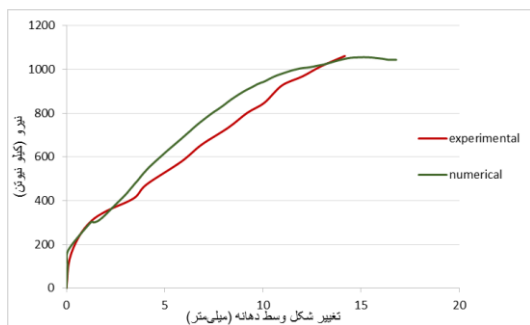
² Lubell

مقادیر صحت‌سنجی برای پارامترهای مدل پلاستیسته آسیب دیده بتن که منجر به نتایج نزدیک‌تری با مقادیر آزمایشگاهی شده، در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۳- پارامترهای صحت‌سنجی شده در مدل CDP

پارامتر	ψ	ϵ	f_{b0}/f_{c0}	K	μ
مقادیر	۲۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷	۰/۱۰۰۶

در جدول فوق ψ معرف زاویه اتساع کرنش پلاستیک بر اثر برش در فاز بعد از الاستیک، ϵ معرف پارامتر خروج از مرکزیت، f_{b0}/f_{c0} معرف مشخصات تابع گسیختگی، K معرف شکل سطح تسلیم و μ معرف زمان آسودگی سیستم ویسکو پلاستیک است. که در جدول (۳) مقایسه نتایج تحلیل مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی در شکل (۷) نشان داده شده است. بررسی نمودار نشان می‌دهد که نمونه مدل‌سازی شده در نرم افزار آباکوس رفتار نمونه آزمایشگاهی را به خوبی شبیه‌سازی نموده است.

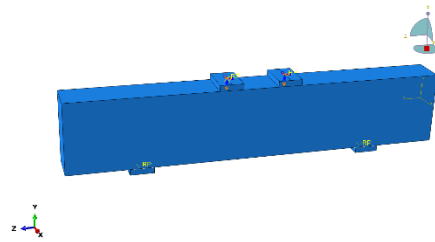


شکل ۷- مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان قائم حاصل از آباکوس با نتایج آزمایشگاهی تیر عمیق

۳- میلگرد FRP

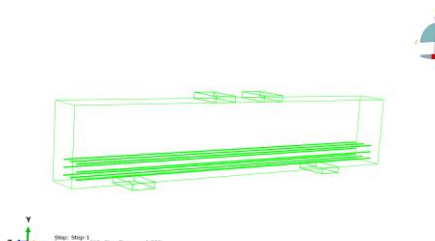
به منظور بررسی رفتار تیر بتن آرمه با جایگزینی میلگرد FRP به جای میلگرد فولادی، ابتدا لازم است رفتار و انواع این میلگردها مشخص شود. میلگردهای FRP از ترکیب الیاف پیوسته و ماتریس متشکل از رزین پلیمری ساخته شده‌اند. رزین وظیفه اتصال الیاف به یکدیگر و انتقال نیرو به الیاف و حفاظت الیاف را به عهده دارد و الیاف نیرو وارده را تحمل می‌نمایند. نوع و درصد حجم الیاف تأثیر قابل توجهی بر مقاومت و سختی میلگرد FRP دارد. در حالیکه نوع رزین بر مکانیزم شکست و گسیختگی تأثیرگذار

نظر گرفتن این قید، آرماتورهای طولی و عرضی به صورت پیوسته با بتن در ارتباط می‌باشند. به طوری که درجات آزادی میلگرد و بتن اطراف آن سازگار بوده و هیچگونه لغزشی بین بتن و آرماتور وجود ندارد. برای اتصال جسم صلب به تیر از قید اتصال^۱ یکپارچه استفاده شده که این قید امکان ترکیب نمودن و اتصال کامل دو سطح با مش‌بندی متفاوت به یکدیگر را فراهم می‌نماید.

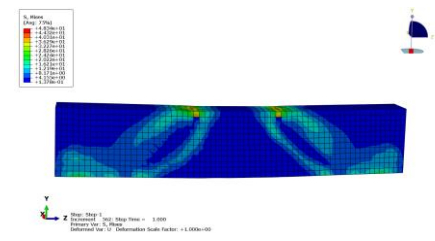


شکل ۳- شرایط مرزی و اعمال نیرو در مدل اجزا محدود

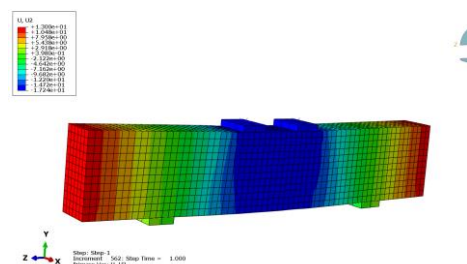
در شکل (۴) آرماتورگذاری مدل اجزا محدود نشان داده شده است. وضعیت تنش بتن و تغییر مکان قائم تیر به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۴- آرماتور بندی تیر بتنی مدل‌سازی شده در آباکوس



شکل ۵- وضعیت تنش فون مایسز در تیر تحت بارگذاری



شکل ۶- تغییر مکان قائم تیر تحت نیروی اعمالی

¹ Tie

آرمه است، برای میلگردهای FRP نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت برشی طراحی V_n باید بزرگتر از نیروی برشی ماکزیمم V_u در مقطع در نظر گرفته شود. بر اساس ACI 318، مقاومت برشی اسمی یک مقطع بتن آرمه V_n ، حاصل جمع مقاومت برشی بتن V_c و میلگردهای برشی فولادی V_s می‌باشد. در مقایسه با مقطع مسلح با فولاد دارای مساحت یکسانی از میلگردهای طولی، مقطع با میلگردهای خمشی FRP بعد از ترک خوردگی به دلیل سختی محوری کمتر، عمق محور خنثی کوچکتری دارند. ناحیه فشاری مقطع کاهش و عرض ترک افزایش می‌یابد، در نتیجه مقاومت برشی حاصل از قفل شدگی سنگدانه‌ها و بتن فشاری کمتر می‌گردد. تحقیقات انجام شده بر ظرفیت برشی اعضاء خمشی بدون میلگردهای برشی نشان می‌دهد که مقاومت برشی بتن تحت تأثیر سختی میلگردهای کششی است [۱۶-۲۱].

ظرفیت برشی بتن (V_c) اعضاء خمشی مسلح با FRP بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w (kd) \quad (1)$$

که در رابطه فوق f'_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال، b_w عرض جان بر حسب میلی‌متر و d فاصله از تار فشاری خارجی تا مرکز میلگردهای کششی بر حسب میلی‌متر می‌باشد. پارامتر k از رابطه (۲) به دست می‌آید که $\rho_f n_f$ نسبت میلگرد FRP به سطح مقطع و n_f نسبت مدول الاستیسیته میلگردهای FRP به مدول الاستیسیته بتن است.

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (2)$$

مقاومت برشی حاصل از خاموت‌های FRP عمود بر محور عضو (V_f) را می‌توان از رابطه (۳) محاسبه نمود.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، A_{fv} مقدار میلگردهای برشی FRP در فاصله s بر حسب میلی‌متر مربع، f_{fv} مقاومت کششی FRP برای طراحی برش بر حسب مگاپاسکال و s فاصله خاموت‌ها یا گام‌های متوالی اسپیرال بر حسب میلی‌متر می‌باشد و برای محاسبه f_{fv} از رابطه (۴) استفاده می‌گردد.

می‌باشد. جهت الیاف، سرعت عمل‌آوری رزین، فرایند تولید و کنترل کیفیت در طول ساخت از دیگر عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات میلگرد می‌باشد. در شکل (۸) نمونه‌هایی از میلگردهای FRP نشان داده شده است.



شکل ۸- نمونه‌هایی از میلگرد FRP [۱۵]

الیاف متداول مورد استفاده شامل شیشه، کربن، آرامید و بازالت می‌باشند. رزین مورد استفاده در میلگردها از نوع اپوکسی، وینیل استر و پلی استر می‌باشند. الیاف شیشه به دلیل تعادل میان هزینه و خصوصیات مقاومت مشخصه، اقتصادی بوده و در اغلب کاربردهای بتن آرمه نسبت به کربن و آرامید ارجحیت دارد. اخیراً از الیاف بازالت به عنوان جایگزینی برای الیاف شیشه استفاده می‌گردد.

میلگردهای FRP امروزه به صورت گسترده‌ای در سراسر جهان استفاده می‌گردد. برای طراحی و ساخت سازه‌های بتن آرمه با میلگردهای FRP می‌توان به آیین‌نامه‌هایی از جمله آیین‌نامه ACI 440-1R آمریکا، آیین‌نامه JSCE ژاپن، آیین‌نامه ISIS^۲ و استاندارد CSA-S6-06^۳ و CSA-S806-12 کانادا و آیین‌نامه fib اروپا اشاره نمود.

۴- ضوابط طراحی برش

بر اساس آیین‌نامه ACI 440-1R-15 طراحی اعضاء بتن مسلح با FRP مشابه اعضاء بتن آرمه است. هر چند خواص مکانیکی متفاوت میلگردهای FRP بر مقاومت برشی تأثیر داشته و باید در نظر گرفته شود. در طراحی اعضاء مسلح با FRP موضوعاتی باید در نظر گرفته شود. میلگردهای FRP دارای مدول الاستیسیته و مقاومت برشی عرضی نسبتاً پایین، مقاومت کششی بالا و فاقد نقطه تسلیم می‌باشند. طراحی میلگردهای برشی FRP بر اساس روش طراحی مقاومت است. بر اساس ACI 318 ضریب کاهش مقاومت ۰/۷۵ که به منظور کاهش ظرفیت برشی اسمی اعضاء بتن

³ Canadian Standards Association

¹ Japan Society of Civil Engineers

² Intelligent Sensing for Innovative Structures

است. به منظور مقایسه مناسب تر نمونه‌ها، مدل‌های مورد بررسی بر اساس پارامترهایی که در طول مدل‌سازی تغییر می‌کند، در پنج گروه مطابق جدول (۴) دسته‌بندی شده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها حروف (DB) مخفف تیر عمیق (Deep Beam) می‌باشد و شکل نمونه و جزئیات مربوط به هر نمونه در جدول ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات تیرهای عمیق بتن مسلح

شکل نمونه	ارتفاع (mm)	آرماتور فشاری (%)	آرماتور کششی (%)	نسبت مدل	گروه‌بندی
	۳۸	-	۲/۴ (GFRP)	DB1	گروه ۱ (بررسی درصدهای آرماتور)
	۳۸	-	۱/۵۹ (GFRP)	DB2	
	۳۸	-	۱/۲۵ (GFRP)	DB3	
	۳۸	-	۰/۷۱ (GFRP)	DB4	
	۹۸	-	۰/۸ (GFRP)	DB5	گروه ۲ (بررسی میزان پوشش بتن)
	۳۸	۰/۴۷	۰/۷۱ (GFRP)	DB6	گروه ۳ (بررسی تأثیر میلگرد فشاری)
	۳۸	-	۲/۱۲ (GFRP)	DB7	گروه ۴ (بررسی چیدمان آرماتور)
	۳۸	-	۲/۱۲ (GFRP)	DB8	
	۳۸	-	۲/۱۲ (GFRP)	DB9	
	۳۸	-	۱/۵ (GFRP)	DB10	گروه ۵ (بررسی میلگردهای ترکیبی)
	۳۸	-	۱/۵ (GFRP+steel)	DB11	
	۳۸	-	۱/۵ (steel+GFRP)	DB12	
	۳۸	-	۱/۵ ()	DB13	

$$f_{fv} = 0.004 E_f \leq f_{fb} \quad (۴)$$

که f_{fb} مقاومت بخش خمشی FRP بر حسب مگاپاسکال و E_f مدول الاستیسیته FRP بر حسب مگاپاسکال می‌باشد.

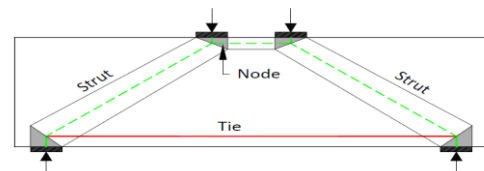
ACI 318 حداقل آرماتور برشی را زمانی که V_{II} از $\frac{\phi V_c}{2}$ بیشتر شود، به منظور جلوگیری از شکست برشی لازم می‌داند. رابطه (۵) مقدار حداقل آرماتور برشی FRP را پیشنهاد می‌کند.

$$A_{fv,min} = \frac{0.35 b_w s}{f_{fv}} \quad (۵)$$

مقدار آرماتور برشی ارائه شده در معادله فوق مستقل از مقاومت بتن می‌باشد.

۵- مدل خرابایی (روش بست و بند)

روش بست و بند^۱ برای تیرهای عمیق بتن آرمه یک تکنیک تحلیلی است که انتقال نیرو در عضو را به کمک مدل خرابایی با اتصال مفصلی ایده‌آل می‌نماید. این مدل شامل اعضا فشاری (بست) که از بتن به تنهایی و یا بتن و آرماتور تشکیل شده‌اند و اعضا کششی (بند) که از آرماتورها تشکیل شده‌اند ساخته می‌شود. این اعضا در محل گره‌ها به یکدیگر متصل شده و یک سیستم خرابایی باربر را تشکیل می‌دهند. که در شکل (۹) نشان داده شده است. محل وارد شدن بارها فقط از طریق گره‌ها بوده و اجزا فشاری و کششی فقط تحت بارهای محوری قرار می‌گیرند، باید توجه داشت که هر عضو فشاری باید سایر اعضا فشاری را فقط در محل گره‌ها قطع نماید ولی اعضا کششی می‌توانند اجزا کششی دیگر و یا اجزا فشاری را در محلی غیر از گره‌ها قطع نمایند. همچنین زاویه بین محورهای اعضا کششی و فشاری در هر گره نباید کمتر از ۲۵ درجه باشد.



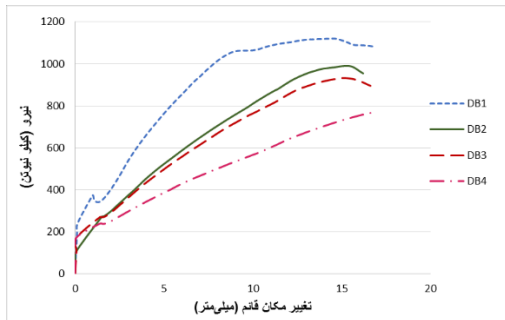
شکل ۹- مدل بست و بند برای تیر عمیق تحت خمش چهار نقطه‌ای

۶- نام‌گذاری نمونه‌های مورد بررسی

در این مطالعه یازده تیر عمیق بتنی مسلح با میلگردهای فولادی، میلگردهای FRP و ترکیبی از این دو نوع میلگرد مدل‌سازی شده

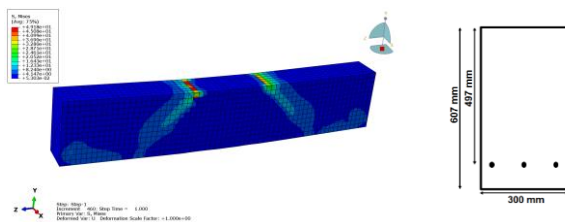
¹ Strut and tie modelling

می‌گردد. افزایش درصد آرماتورهای GFRP در تیر موجب افزایش سختی و افزایش ظرفیت باربری تیر می‌گردد و در نتیجه پیشنهاد می‌گردد که این نوع از تیرها با درصد بالاتری از آرماتور طراحی شوند.



شکل ۱۴- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان در چهار تیر عمیق با درصد مختلف آرماتور

۸- بررسی تأثیر میزان پوشش (کاور) بتن بر رفتار تیر عمیق
به منظور کاهش وزن تیرهای بتنی به عنوان یکی از اجزای اصلی سازه و تأثیر آن بر عملکرد ساختمان در هنگام زلزله، به بررسی تأثیر ضخامت پوشش بتن بر رفتار تیر عمیق پرداخته شده است. از سوی دیگر با کاهش ضخامت کاور بتن، تغییر دما بر میلگردهای طولی تأثیر بیشتری داشته و باعث ایجاد ترک و نفوذ رطوبت به داخل بتن می‌گردد، از این رو تعیین پوشش مناسب برای بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با هدف بررسی تأثیر پوشش بتن، دو تیر با یک ردیف آرماتور مورد بررسی قرار گرفت که در یک تیر میزان پوشش بتن ۳۸ میلی‌متر و در تیر دیگر ۹۸ میلی‌متر می‌باشد. منحنی تنش تیر با پوشش بتن ۹۸ میلی‌متر در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

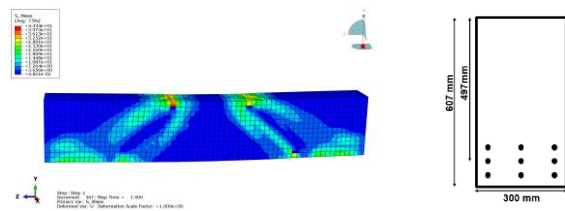


شکل ۱۵- سطح مقطع و منحنی تنش تیر عمیق DB5

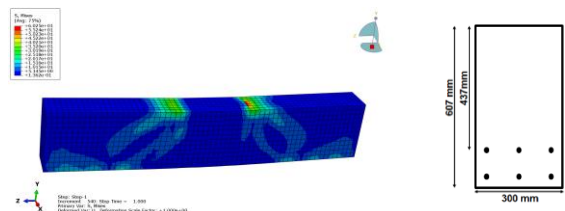
همان‌طور که از نمودار ارائه شده در شکل (۱۶) مشاهده می‌گردد، افزایش میزان کاور بتن سبب کاهش ظرفیت باربری تیر عمیق می‌گردد. رفتار دو تیر تا قبل از ترک خوردگی بتن یکسان بوده و پس از آن در تیر با پوشش بتن بیشتر، کاهش مقاومت تا $31/7$

۷- بررسی تأثیر درصد آرماتورهای GFRP بر رفتار تیر عمیق

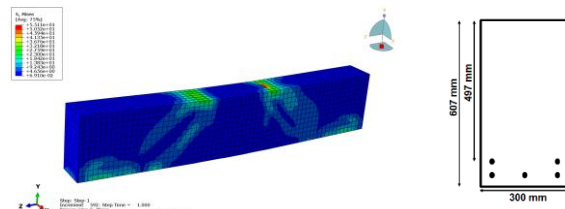
در گام نخست تیر عمیق بتنی با سه ردیف میلگرد مدل‌سازی و رفتار آن بررسی شد. سپس با تغییر چیدمان و درصد میلگردهای کششی، رفتار تیر عمیق مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل (۱۰) تا (۱۳) به ترتیب سطح مقطع و منحنی تنش تیر عمیق با سه ردیف میلگرد GFRP، تیر با دو ردیف میلگرد و فاصله آکس تا آکس ۱۱۰ میلی‌متر، تیر با دو ردیف میلگرد و فاصله مرکز تا مرکز ۵۵ میلی‌متر و تیر با یک ردیف میلگرد GFRP نشان داده شده است.



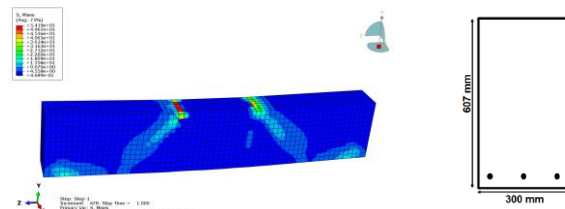
شکل ۱۰- سطح مقطع و منحنی تنش تیر عمیق DB1



شکل ۱۱- سطح مقطع و منحنی تنش تیر عمیق DB2



شکل ۱۲- سطح مقطع و منحنی تنش تیر عمیق DB3

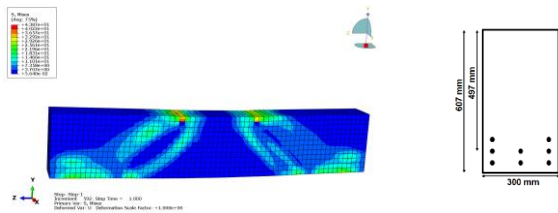


شکل ۱۳- سطح مقطع و منحنی تنش تیر عمیق DB4

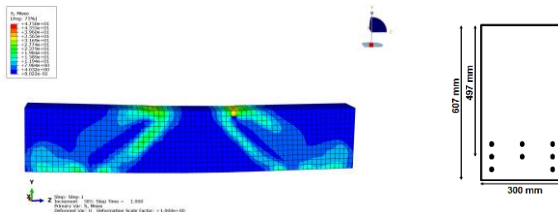
در شکل (۱۴) مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان تیرها نشان داده شده است. در این تیرها با افزایش درصد آرماتورها از $0/71$ به $1/25$ ، $1/59$ و $2/4$ به ترتیب سبب افزایش $21/64$ ، $28/50$ و $46/30$ درصدی نیروی ماکزیمم در تیر عمیق مسلح با میلگرد GFRP

۱۰- بررسی تأثیر چیدمان آرماتورهای GFRP بر رفتار تیر عمیق

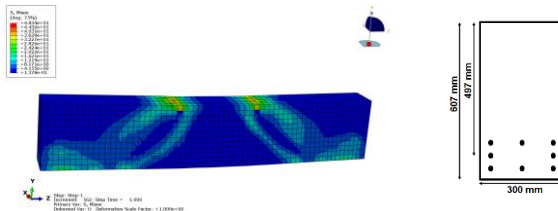
در گام بعدی با ثابت نگه داشتن درصد آرماتورهای GFRP، تأثیر نحوه قرارگیری آرماتورها مورد بررسی قرار گرفت. تنش‌های حاصل از رفتار تیر با سه ردیف میلگرد و هشت میلگرد GFRP با چیدمان ارائه شده در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) نشان داده شده است. با مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل (۲۲) می‌توان دریافت که بهتر است آرماتورها در ردیف‌های پایینی قرار گیرند.



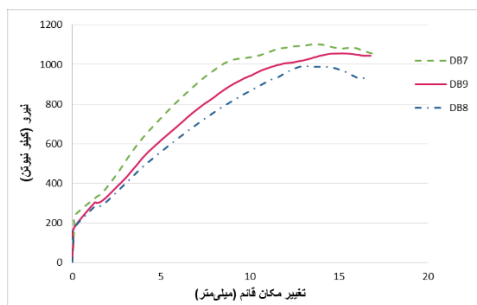
شکل ۱۹- سطح مقطع و نمودار تنش تیر عمیق DB7



شکل ۲۰- سطح مقطع و نمودار تنش تیر عمیق DB8



شکل ۲۱- سطح مقطع و نمودار تنش تیر عمیق DB9

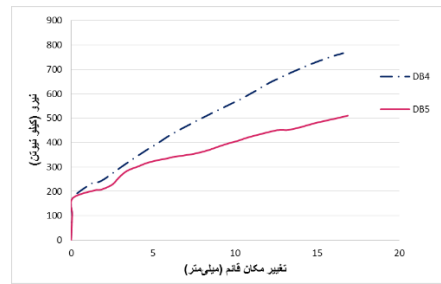


شکل ۲۲- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان در سه تیر عمیق با درصد آرماتور یکسان و چیدمان مختلف

۱۱- مقایسه تیرهای عمیق بتنی توکبایی با تیرهای عمیق مسلح با GFRP و تیر عمیق بتن آرمه

به دلیل خوردگی میلگردهای فولادی در سازه‌های واقع در

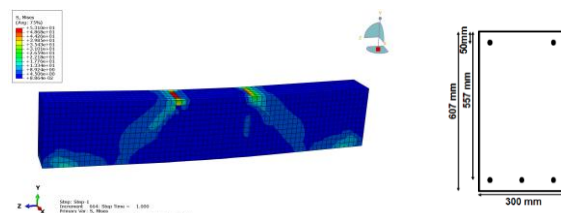
درصد مشاهده گردید که نشان دهنده تأثیر رفتار منفی افزایش کاور بتن بر رفتار تیر می‌باشد.



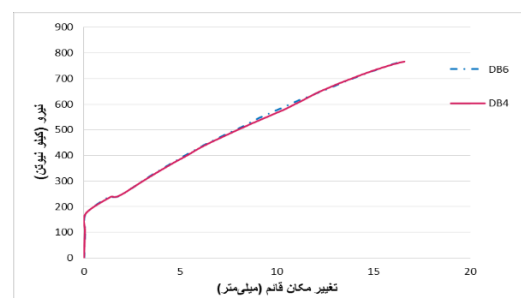
شکل ۱۶- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان در دو تیر عمیق با یک ردیف میلگرد FRP و پوشش بتن متفاوت

۹- بررسی تأثیر استفاده از میلگردهای فشاری بر رفتار تیر عمیق

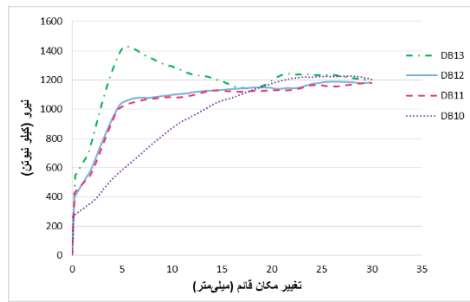
تیرهای با یک ردیف میلگرد GFRP یک بار با دو میلگرد GFRP به قطر ۲۲ میلی‌متر در ناحیه فشاری و یک بار بدون میلگرد فشاری مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل (۱۷) تنش در تیر بتنی عمیق با میلگرد فشاری نشان داده شده است و بر اساس نمودار ارائه شده در شکل (۱۸)، تفاوت چندانی در ظرفیت باربری تیر با و بدون میلگرد فشاری مشاهده نشده است. در تیرهای برشی عمیق نوع شکست در اکثر موارد از نوع شکست برشی بوده و به همین دلیل استفاده از میلگردهای فشاری تأثیر زیادی بر رفتار این نوع از تیرها نداشته و در صورت استفاده از خاموت از این میلگردها برای نگه‌داشتن خاموت استفاده می‌گردد.



شکل ۱۷- سطح مقطع و منحنی تنش تیر عمیق DB6



شکل ۱۸- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان در دو تیر عمیق با یک ردیف میلگرد FRP و پوشش بتن متفاوت



شکل ۲۷- نمودار نیرو - تغییر مکان در تیرهای عمیق مسلح شده با میلگردهای GFRP و فولادی

با توجه به نمودار فوق مقادیر نیرو و تغییر مکان تیرهای بتنی عمیق مسلح با میلگردهای FRP، فولادی و ترکیبی در جدول (۵) ارائه شده است. در تیر ترکیبی زمانی که آرماتور GFRP در ردیف پایین قرار داشته باشد (DB11) نسبت به حالتی که میلگرد فولادی در ردیف پایین قرار دارد (DB12) نیروی ترک خوردگی ۱۴/۴۲ درصد افزایش می‌یابد. ولی نیروی تسلیم در تیر DB12 نسبت به تیر عمیق DB11، ۳/۳۳ درصد افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از آرماتورهای ترکیبی در تیرهای عمیق نسبت به تیر عمیق بتنی مسلح با میلگرد GFRP، نیروی ترک خوردگی ۵۹/۱۳ درصد افزایش می‌یابد و تغییر مکان ترک خوردگی تیر عمیق ترکیبی ۶۶/۶ درصد نسبت به تیر عمیق بتنی مسلح با GFRP افزایش می‌یابد. در تیرهای ترکیبی به دلیل استفاده از مزایای هر دو میلگرد فولادی و GFRP، میزان سختی و شکل پذیری در این تیرها نسبت به تیر DB10 افزایش می‌یابد. با توجه به رفتار تیرهای ترکیبی نسبت به تیرهای عمیق مسلح با GFRP، استفاده از تیرهای عمیق ترکیبی پیشنهاد می‌گردد.

جدول ۵- مقادیر نیرو و تغییر مکان ترک خوردگی، تسلیم و

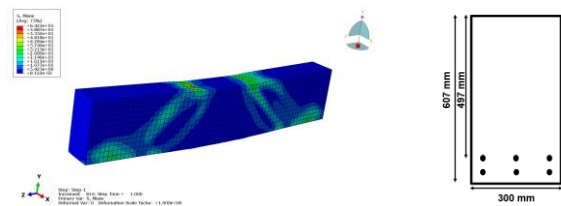
نیروی ماکزیمم تیرهای عمیق گروه ۵

Deep beam	Δ_{cr} (mm)	P_{cr} (kN)	Δ_y (mm)	P_y (kN)	P_{max} (kN)
DB10	۰/۱۵	۲۶۹/۶۸	-	-	۱۲۲۶/۵۲
DB11	۰/۲۵	۴۲۹/۱۴	۴/۹۰	۱۰۱۴/۰۴	۱۱۷۹/۹۴
DB12	۰/۲۱	۳۷۵/۰۵	۵/۰۸	۱۰۴۷/۷۶	۱۱۸۸/۸۷
DB13	۰/۳۴	۵۴۸/۷۰	۵/۳۵	۱۴۲۹/۷۵	۱۲۳۹/۲۰

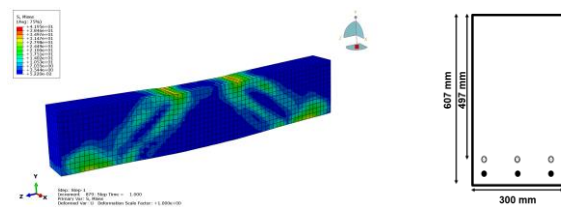
۱۲- نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به رفتار تیرهای عمیق و رفتار خطی میلگردهای FRP، به بررسی استفاده از این نوع میلگرد در تیرهای عمیق

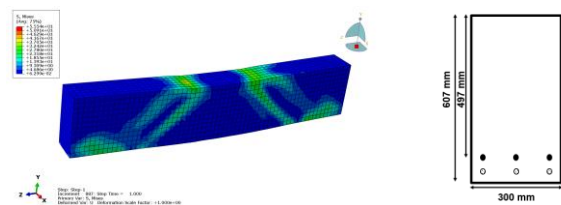
محیطهای خورنده، میلگردهای FRP می‌تواند به عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی انتخاب گردد. همچنین از میلگردهای FRP برای مقاوم‌سازی سازه‌ها نیز استفاده می‌گردد اما با توجه به رفتار خطی میلگردهای FRP، که سبب کاهش شکل پذیری و افزایش ترک خوردگی می‌گردد، تیرهای ترکیبی مسلح با میلگردهای فولادی و GFRP مورد بررسی قرار گرفت. تیرهای ترکیبی با درصد یکسان میلگردهای FRP و فولادی در دو چیدمان مختلف مدل‌سازی گردید و با تیرهای عمیق مسلح با میلگردهای فولادی و میلگردهای FRP مقایسه گردید. نتایج مربوط به این بررسی‌ها در شکل‌های (۲۳) تا (۲۶) ارائه شده است. در شکل (۲۷) نمودار نیرو - تغییر مکان مربوط به چهار تیر عمیق فوق به منظور مقایسه استفاده از میلگردهای FRP و میلگردهای ترکیبی در تیرهای عمیق با تیرهای عمیق بتن آرمه نشان داده شده است.



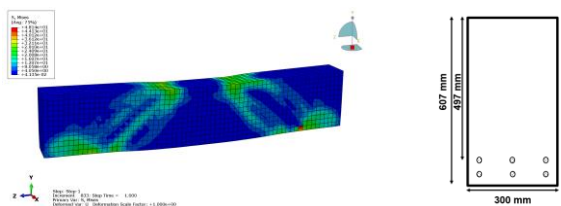
شکل ۲۳- منحنی تنش تیر عمیق DB10



شکل ۲۴- منحنی تنش تیر عمیق DB11



شکل ۲۵- منحنی تنش تیر عمیق DB12



شکل ۲۶- منحنی تنش تیر عمیق DB13

Noroozi, M. (2018). 'Experimental Investigations of RC Deep Beams Strengthened in Shear using NSM CFRP System', *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(3), 153-171.

[10] Arabzade, A., Noori Soola, A. (2015). 'Investigating Effective Parameters in Shear Strength of Deep Beams without Shear Reinforcement', *Concrete Research*, 7(2), pp. 17-30.

[11] Zeidan, M., Barakat, M., Mahmoud, Z., Khalifa, A. (2011). Evaluation of concrete shear strength for FRP reinforced beams. Paper presented at the Structures Congress 2011.

[12] Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M. (2012). Deflection behavior of FRP reinforced concrete beams and slabs: an experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 43(5), 2125-2134.

[13] Nehdi, M., Omeman, Z., & El-Chabib, H. (2008). Optimal efficiency factor in strut-and-tie model for FRP-reinforced concrete short beams with $(1.5 < a/d < 2.5)$. *Materials and structures*, 41(10), 1713-1727.

[14] Ibrahim, M., Wakjira, T., & Ebead, U. (2020). Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer strips. *Engineering Structures*, 210, 110412.

[15] www.comarcomnano.com

[16] Nagasaka, T., Fukuyama, H., & Tanigaki, M. (1993). Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups. Special publication, 138, 789-812.

[17] Japan Society of Civil Engineering, 1997b. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, *Concrete Engineering Series No.23*, 325 pp.

[18] Zhao, W., Maruyama, K., & Suzuki, H. (1995). Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced by FRP Rods as Longitudinal and Shear Reinforcement, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2)*, Ghent, Belgium, pp. 352-359.

[19] Sonobe, Y., Fukuyama, H., Okamoto, T., Kani, N., Kimura, K., Kobayashi, K. & Shimizu, A. (1997). Design guidelines of FRP reinforced concrete building structures. *Journal of composites for Construction*, 1(3), 90-115.

[20] Tureyen, A. K., & Frosch, R. J. (2002). Shear tests of FRP-reinforced concrete beams without stirrups. *Structural Journal*, 99(4), 427-434.

[21] Tureyen, A. K., & Frosch, R. J. (2003). Concrete shear strength: Another perspective. *Structural Journal*, 100(5), 609-615.

پرداخته شده است. نتایج نشان داد که استفاده از میلگردهای فشاری تفاوت چندانی در ظرفیت باربری این نوع تیر ایجاد نمی‌کند.

همچنین افزایش پوشش بتن در این نوع تیرها سبب کاهش ظرفیت باربری تیر عمیق می‌گردد و نیروی قابل تحمل تیر با افزایش پوشش

بتن از ۳۸ به ۹۸ میلیمتر، ۳۱/۷ درصد کاهش یافت. افزایش درصد آرماتورهای کششی سبب افزایش ظرفیت باربری تیر عمیق

می‌گردد و بهتر است که آرماتورها در نزدیکی دورترین تار کششی تیر قرار گیرند تا شاهد عملکرد بهتر در تیر عمیق باشیم. با

بررسی تیرهای ترکیبی مشاهده شد که در تیرهای عمیق در محیط‌های خورنده پیشنهاد می‌گردد که از تیرهای عمیق ترکیبی به

جای تیرهای مسلح با GFRP استفاده گردد.

۱۳- مراجع

[1] Andermatt, M. F., & Lubell, A. S. (2013). Behavior of concrete deep beams reinforced with internal fiber-reinforced polymer-experimental study. *ACI Structural Journal*, 110(4), 585.

[2] ACI Committee 440. (2015). Guide for the Design and Construction of structural concrete reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars (ACI 440.1 R-15). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

[3] Newhook, J., & Svecova, D. (2007). Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers: design manual no. 3. Canada: ISIS Canada Corporation, 151.

[4] Standard, C. S. A. (2002). Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers. S806-02, Canadian Standards Association.

[5] ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19). American Concrete Institute.

[6] AASHTO LRFD, (2018). Bridge Design Specifications, American Association of State Highway Transportation Officials, Eighth Edition, Washington, DC.

[7] Canadian Standards Association (2007) CAN/CSA A23.3-04—design of concrete structures. Canadian Standards Association, Mississauga.

[8] El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E. F., Benmokrane, B. (2006). Shear capacity of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *ACI Structural Journal*, 103(3), 383.

[9] Akbarzadeh Bengar, H., Ahmadnezhad, M.,

Investigating the behavior of concrete deep beams reinforced with FRP bars

Fahimeh Maleki

Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Majid Gholhaki *

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Ali Kheyroddin

Distinguished Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Omid Rezaifar

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract

Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars are corrosion-resistant and non-magnetic and have high tensile strength. However, using this type of bar in concrete beams reduces their ductility and increases their cracking. In this paper, the effect of using FRP bars as an alternative to steel bars has been investigated, and the percentage and arrangement of GFRP reinforcements, increase the cover of concrete, and use of compression reinforcement on the behavior of deep concrete beams have been evaluated. Deep concrete beams are common members of structures. These beams are used in shear walls, girder bridges, offshore structures, and tall buildings. Due to the different behavior of deep concrete beams compared to bending beams, these beams were evaluated. The results showed that by increasing the concrete cover from 38 mm to 98 mm, the strength of the beam decreased to 31.7%. Additionally, the use of compression bars did not change the bearing capacity of the beam. Also, increasing in GFRP bars, the bearing strength of the beam increased to about 46% compared to the beam with one row of bars.

Keywords: Concrete deep beam, Shear Strength, Finite Element Method, FRP bar.

* Corresponding Author: mgholhaki@semnan.ac.ir

