

بررسی رفتار و شکل پذیری برشی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده با FRP

معصومه بهرامی^۱، رضا آقایی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۵	
واژگان کلیدی:	
تیر عمیق،	
ظرفیت برشی،	
تقویت برشی،	
FRP،	
ضریب شکل پذیری برشی.	

در سال‌های اخیر با مطرح شدن بحث تقویت اعضاء بتن مسلح توسط ورق‌های FRP فصل جدیدی از مطالعات در این زمینه شکل گرفته است، که بخش قابل توجهی از این مطالعات بر طراحی برشی اعضاء تقویت شده با FRP متمرکز می‌باشد. با توجه به نسبت ابعاد تیرهای عمیق و بالا بودن تغییر شکل برشی ضعف عمده تیرهای عمیق را می‌توان پائین بودن ظرفیت برشی و به دنبال آن شکست برشی و ضریب شکل پذیری پائین دانست. برای تقویت این اعضاء بتنی روش‌های متعددی بکار رفته که یکی از موثرترین آن‌ها تقویت جان تیر عمیق به کمک ورق‌های کامپوزیت می‌باشد، به منظور بررسی عملکرد این روش، در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، ۱۰۴ نمونه تیر عمیق با تکیه‌گاه ساده تحت دوبرم متمرکز مدل‌سازی شده است و با استفاده از روش اجزاء محدود غیرخطی علاوه بر تعیین مناسب‌ترین الگوی نصب الیاف پلیمری (FRP) تاثیر نسبت دهانه‌ی برشی به عمق، مقاومت فشاری بتن، تاثیر نسبت آرماتور برشی و تاثیر تعداد لایه‌های FRP مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصله میزان اثر بخشی پارامترهای در نظر گرفته شده جهت تقویت تیرهای عمیق و مناسب ترین الگوی نصب بررسی شد. نتایج حاکی از افزایش متوسط ۱۵ الی ۶۵ درصد در ظرفیت برشی بدست آمده از بکارگیری هرکدام از الگوهای مورد بحث می‌باشد. همچنین در این تحقیق ضریب شکل‌پذیری برشی برای تیرهای عمیق تقویت شده بررسی گردید که نتایج نشان می‌دهد ضریب شکل‌پذیری برشی متأثر از نسبت ابعادی تیر عمیق، مقاومت فشاری و الگوی تقویت می‌باشد، به طوری که وجود لایه‌های FRP باعث افزایش ۵ تا ۳۰ درصدی شکل‌پذیری در تیرهای عمیق تقویت‌شده، می‌شود.

۱- مقدمه

با توجه به ابعاد آنها دارای تنوع در کیفیت و عملکرد می‌باشند که در طول زمان، ممکن است به دلایل مختلفی از جمله خطاهای طراحی، آسیب دیدگی ناشی از بلایای طبیعی، خطاهای اجرائی، تغییر در کاربری سازه، اعمال بارهای بیش از بارهای پیش‌بینی‌شده در هنگام طراحی و ... نیاز به ترمیم و تقویت داشته باشند، استفاده از ژاکت‌های بتن مسلح، صفحات فولادی به صورت پوشش خارجی، مرمت موضعی، استفاده از الیاف‌های پلیمری FRP و پس کشیدگی خارجی، تعدادی از روش‌های ترمیم و تقویت سازه‌ها می‌باشند که استفاده از FRP برای تعمیر و مقاوم سازی سازه‌ها به طور پیوسته در سال‌های اخیر افزایش یافته است، این امر به دلیل برتری‌های متعدد این

تیرهای عمیق بتن مسلح، یکی از مهم‌ترین اعضاء بتنی در سازه‌های ساختمانی و غیرساختمانی به شمار می‌روند، در مقایسه با تیرهای معمولی رفتار پیچیده و متفاوتی دارند، این پیچیدگی بیشتر شامل حالت گسیختگی غالب یعنی شکست برشی آنها می‌باشد. در این تیرها از آنجایی که توزیع کرنش در اثر بالا بودن میزان تغییر شکل برشی به صورت غیرخطی است و تغییر شکل برشی در آن قابل توجه است مقاومت این تیرها معمولاً توسط برش کنترل می‌شود، به عبارت بهتر ضعف عمده‌ی این سازه پائین بودن ظرفیت برشی و به دنبال آن شکست ترد برشی و پائین بودن ضریب شکل‌پذیری آنها در بارهای لرزه‌ای می‌باشد، تیرهای عمیق

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: reza_agh@razi.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی

۲. دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی

اجزاء محدود مدل سازی و تحلیل غیر خطی استاتیکی شده اند.

یکی از مسائل مهم در خصوص تیرهای عمیق شکل پذیری می باشد؛ که در این زمینه مطالعات محدودی انجام شده است، ضریب شکل پذیری اعضای خمشی بتن آرمه بستگی به میزان آرماتورهای طولی، آرماتورهای فشاری، درصد و میزان آرماتور برشی و مقاومت فشاری بتن دارد، شکل پذیری خمشی یک امر ضروری برای سازه ها در مناطق لرزه ای می باشد. اما گزارشات زیادی حاکی از آن است که سازه های بتن آرمه در بارگذاری لرزه ای شکل پذیری قابل توجهی از خود نشان نمی دهند. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تیرهای عمیق انجام شده است که بیشتر این مطالعات بر بار ترک خوردگی، ظرفیت نهایی و مقاوم سازی متمرکز شده است، و از طرفی بررسی ضریب شکل پذیری برشی برای درک بهتری از رفتار بتن در مناطق لرزه ای ضروری می باشد، Yuliang Xie و همکاران [۱۸] به صورت آزمایشگاهی ضریب شکل پذیری برشی را بررسی کرده و نتیجه گیری نمودند که با افزایش مقاومت فشاری و درصد آرماتور برشی ضریب شکل پذیری افزایش می یابد که نرخ تغییرات این ضریب به نسبت دهانه ی برشی به عمق بستگی دارد. در این تحقیق ضریب شکل پذیری برشی برای تیرهای عمیق تقویت شده، تعریف و بررسی می شود که نتایج نشان می دهد ضریب شکل پذیری برشی متناسب با ابعاد تیر عمیق، الگوی نصب و مقاومت فشاری بتن می باشد.

۲- پارامترهای مورد مطالعه جهت بررسی رفتار تیرهای عمیق تقویت شده

در این تحقیق پس از کالیبره کردن نرم افزار، پارامترهای از جمله نسب دهانه ی برشی به عمق، مقاومت فشاری بتن، تاثیر نسبت آرماتور برشی، اثر میزان آرماتور برشی بر ظرفیت تیر تقویت شده و همچنین تاثیر تعداد لایه های FRP مورد بررسی قرار گرفته است؛ که نتایج حاصل از تحلیل این پارامترها در بخش ۴ تحت عنوان مطالعات پارامتریک ارائه شده است. علاوه بر مطالعات پارامتریک اثر الگوهای مختلف FRP بررسی شده است که نتایج حاصل از مدل سازی تیرهای تقویت شده در جدول ۳ ارائه شده است که این نتایج شامل حداکثر ظرفیت برشی، درصد افزایش ظرفیت برشی، حداکثر تغییر مکان وسط تیر و ضریب شکل پذیری می باشد که این موارد با توجه به نمودار

کامپوزیت ها در مقایسه با مصالح سنتی حادث شده است این مزایا عبارت از مقاومت کششی و گسیختگی بالا، دوام بالا، سادگی و سرعت بالای اجرا و وزن کم می باشد؛ Khalifa و همکاران [۳]، [4] J.Sim, Kachlaker و همکاران [۵]، Sherif و همکاران [۶]، رهایی و همکاران در دانشگاه امیرکبیر [۷] و عربزاده و همکاران [۸] به صورت آزمایشگاهی اثر پارامترهای موثر بر ظرفیت برشی تیرهای تقویت شده از جمله الگوهای مختلف مقاوم سازی با FRP، تعداد لایه های FRP، زاویه ی قرار گیری الیاف و مقاومت فشاری را بررسی نمودند بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی لایه های FRP رشد و پخش ترک های برشی را محدود کرده و باعث افزایش ظرفیت برشی تیرهای تقویت شده می شود به طوری که این افزایش ظرفیت متاثر از الگوی نصب و زاویه ی قرار گیری الیاف ها و تعداد لایه ها و مقاومت فشاری بتن می باشد. Adhikary و همکاران [۹]، [10] Anil و Kim و همکاران [۱۱] علاوه بر اثر پارامترهای موثر بر ظرفیت برشی، به بررسی اثر طول مهاری لایه های FRP روی سطح فوقانی تیر ها پرداختند و نتیجه گیری نمودند که عملکرد الگوی FRP با طول مهاری از الگوی U شکل بهتر است و همچنین نشان دادند که نوع ماده FRP (AFRP, GFRP, CFRP) تفاوت چشمگیری در ظرفیت برشی ندارد. Ahmed Godat و همکاران در سال (۲۰۱۲) به بررسی اثر میزان آرماتورهای برشی و تعداد لایه های FRP بر افزایش ظرفیت برشی تیرهای عمیق تقویت شده به صورت آزمایشگاهی پرداختند و نهایتاً برای تخمین ظرفیت برشی تیرهای تقویت شده با CFRP یک مدل خرابایی ارائه نمودند [۱۲].

استفاده از لایه های FRP برای مقاوم سازی انواع سازه های بتن مسلح در چند دهه ی اخیر بررسی شده است و مطالعات نشان می دهد که FRP مقاوم سازی خمشی تیرها [۱۳] و [۱۴]، مقاوم سازی برشی تیرها [۱۲-۳]، مقاوم سازی ستون ها [۱۵] و مقاوم سازی دال ها [۱۶ و ۱۷] بسیار کارا و مفید است و مزایای بسیاری نسبت به سایر روش های مقاوم سازی دارد، از موارد مهم در بررسی رفتار تیرهای تقویت شده، مطالعات پارامتریک و مقایسه الگوهای مختلف تقویت می باشد که برای این منظور در تحقیق حاضر علاوه بر مطالعات چهار گروه تیر با نسبت دهانه برشی به عمق مختلف (۰/۸۹، ۱/۱۹، ۱/۳۴ و ۱/۴۵) با الگوهای مختلف تقویت با FRP با استفاده از نرم افزار ABAQUS به روش

تغییر مکان و لنگر - انحنا می‌توان شکل‌پذیری خمشی را به دو روش شکل‌پذیری جابجایی (μ_θ) و شکل‌پذیری انحنا (μ_ϕ) را تعیین نمود که شکل‌پذیری جابجایی عبارتست از نسبت جابجایی در بار نهائی (Δ_u) به جابجایی در اولین نقطه‌ای که فولاد کششی جاری می‌شود (Δ_y) و عموماً برای بررسی رفتار کلی تیر استفاده می‌شود، شکل‌پذیری انحنا عبارتست از نسبت انحنا در بار نهائی (ϕ_u) به انحنا در اولین نقطه‌ای که فولاد تسلیم می‌شود (ϕ_y) که عموماً برای بررسی رفتار انفرادی مقاطع استفاده می‌شود. ضریب شکل‌پذیری خمشی برای سازه‌های در مناطق لرزه‌ای بسیار ضروری می‌باشد [۱۹-۲۱]. اما در تیرهای عمیق بتن مسلح، با توجه به ابعاد تیر شکست عمدتاً برشی می‌باشد به همین دلیل در این‌گونه اعضا شکل‌پذیری برشی (shear ductility) مطرح می‌باشد. برای تعیین شکل‌پذیری برشی دو روش کلی داریم:

μ_1 به صورت نسبت سطح زیر نمودار بار - تغییر مکان تا نقطه‌ای $0.75P_{max}$ ، به سطح زیر نمودار تا نقطه‌ای P_{max} تعریف می‌شود (شکل (۱)).

μ_2 به صورت نسبت سطح زیر نمودار بار - تغییر مکان تا نقطه‌ای $3\Delta_0$ ، به سطح زیر نمودار تا نقطه‌ای Δ_0 تعریف می‌شود (شکل (۱)).

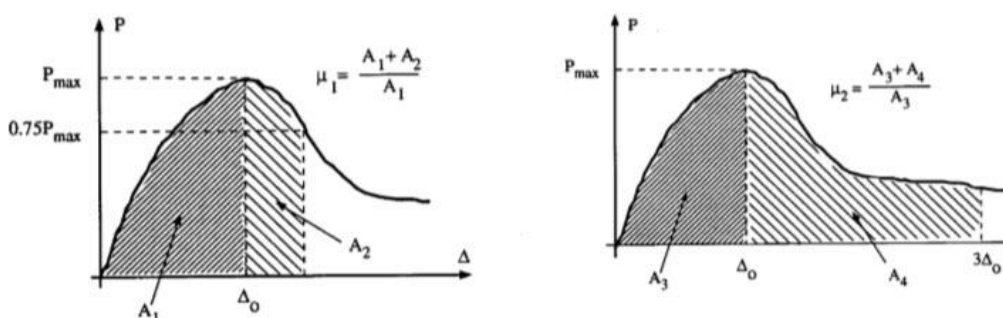
بار - تغییر مکان و تعریف شکل‌پذیری برشی حاصل شده است.

۲-۱- نمودار بار - تغییر مکان

در این نمودار محور افقی تغییر مکان وسط تیر و محور قائم ظرفیت برشی رانشان می‌دهد که با توجه به این نمودار حداکثر ظرفیت برشی و حداکثر تغییر مکان وسط تیر را استخراج نمودیم علاوه بر این با توجه به شکل نمودار می‌توان مود شکست غالب را تا حدی مشخص نمود.

۲-۲- ضریب شکل‌پذیری برشی

شکل‌پذیری خصوصیتی از سازه است که در آن اعضا، بدون تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت، قادر به قبول تغییر شکل‌های عمدتاً پلاستیک می‌باشند. در حالت کلی ضریب شکل‌پذیری را می‌توان در دو دسته‌ی ضریب شکل‌پذیری برشی و ضریب شکل‌پذیری خمشی تقسیم‌نمائیم؛ که ضریب شکل‌پذیری خمشی در طراحی مقاطع خمشی بتن مسلح بویژه بتن با مقاومت زیاد به دلیل ترد بودن آن مطرح است و پارامترهای زیادی مانند مقاومت فشاری بتن، درصد آرماتور کششی و فشاری، مقدار خاموت محصورکننده‌ی بتن، فاصله‌ی دو خاموت، مقاومت تسلیم فولادهای طولی و نسبت دهانه به عمق و همچنین شکل هندسی مقطع بر شکل‌پذیری سازه‌های بتنی موثرند. با رسم نمودار بار -



شکل ۱: نمایش نموداری برای تعریف ضریب شکل‌پذیری (μ_1 و μ_2) [۱۸]

جدول ۱: جزئیات نمونه‌های مدل‌سازی شده

$\frac{a}{d}$	ابعاد (میلی‌متر)				آرماتور پائین		آرماتور بالا		آرماتور برشی
	L	h	b	a	نوع	f_y	نوع	f_y	نوع
۰/۸۹	۱۶۰۰	۴۵۰	۸۰	۳۷۵	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	Ø ۶ @ ۱۰۰
۱/۱۹	۱۶۰۰	۴۵۰	۸۰	۵۰۰	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	Ø ۶ @ ۱۰۰
۱/۳۴	۱۶۰۰	۴۵۰	۸۰	۵۶۵	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	Ø ۶ @ ۱۰۰
۱/۴۵	۱۶۰۰	۴۵۰	۸۰	۶۱۰	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	۱ Ø ۳۰	۴۰۰	Ø ۶ @ ۱۰۰

۳- شرح مسئله

۳-۱- مدل سازی نمونه ها در نرم افزار

در مدل سازی، انتخاب نوع المان به منظور مطابقت رفتاری با مواد به کار رفته در نمونه، ارائه مدل صحیح تری از شرایط مرزی و نحوه اعمال بار و همچنین شناخت رفتار خطی و غیر خطی مواد جهت انجام تحلیلی مناسب بسیار حائز اهمیت می باشد. در این مقاله سه مواد بتن و فولاد و ورق FRP با ویژگی مخصوص به خود وجود دارد. برای مدل سازی رفتار بتن از مدل پلاستیک آسیب دیده استفاده شده است که این مدل با بیان رفتار مجزای بتن در فشار و کشش رفتار این ماده را به صورت واقعی تر بیان می کند. این مدل قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی را داراست. در مدل پلاستیک آسیب دیده ترک های کششی و خردشدگی فشاری دو مکانیزم شکست هستند و برای مدل سازی بتن از المان C3D8R استفاده شده است که هر المان شامل ۸ گره می باشد و هر گره ۳ درجه انتقالی دارد. در این تحقیق برای مدل سازی آرماتورها از مدل دو خطی الاستو پلاستیک فولاد و المان T2D3 استفاده شده است که این المان یک المان خردپائی سه بعدی شامل ۲ گره و ۳ درجه انتقالی در هر گره می باشد. برنامه ای المان محدود ABAQUS قادر است برای آنالیز مدل هایی با ساختار مرکب استفاده شود، در این تحقیق برای مدل کردن FRP از المان S4R - SHELL استفاده شود، این المان پوسته ای چهار گرته قابلیت کاهش دادن نقاط انتگرال گیری برای به حداقل رساندن محاسبات و در نتیجه کاهش زمان آنالیز را دارا می باشد.

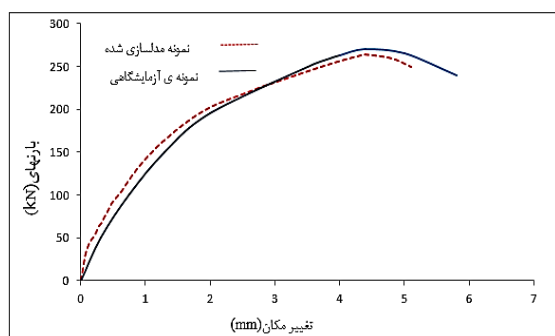
۳-۲- مواد و روش ها

در این تحقیق، جهت بررسی عوامل موثر بر رفتار تیرهای عمیق، در نمونه های مدل سازی شده فاکتورهایی از جمله نسبت دهانه ی برشی به عمق، مقاومت فشاری و درصد آرماتور برشی متغییر می باشد و به منظور بررسی اثر الگوهای مختلف FRP بر افزایش مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح عمیق، چهار گروه تیر عمیق با نسبت دهانه برشی به عمق مختلف (۰/۸۹، ۱/۱۹، ۱/۳۴۵ و ۱/۴۵) با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. هر گروه شامل یک تیر بدون تقویت به عنوان تیر مرجع و چهار نمونه تقویت شده با چهار الگوی مختلف تقویت می باشد، شکل (۸). مدل سازی برای تعداد مختلف لایه های FRP

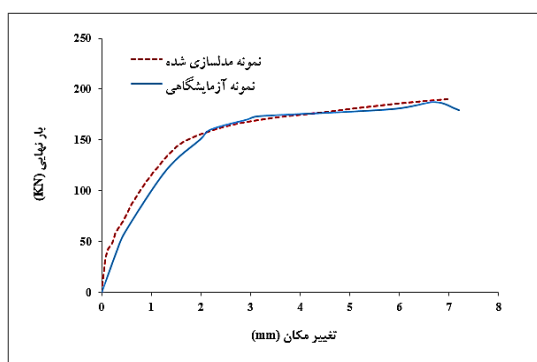
انجام شد. کلیه ی تحلیل ها برای بتن با مقاومت ۲۵MPa و ۵۰MPa انجام شده است. تیرهای مدل سازی شده دارای تکیه گاه ساده، تحت دوبر متمرکز یکسان قرار گرفته اند. جزئیات مربوط به ابعاد نمونه های مدل شده در جدول ۱ ارائه شده است.

۳-۳- صحت سنجی

به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از مدل سازی، یک تست آزمایشگاهی که شامل یک تیر عمیق و یک تیر عمیق تقویت شده با استفاده از ورق های CFRP بر روی وجوه کناری با زاویه قرارگیری الیاف در راستای ۴۵ و ۱۳۵ درجه (SP45/135)، با بارگذاری متمرکز در وسط دهانه، مورد بررسی قرار گرفت. پاسخ های بار تغییر مکان نهایی نمونه آزمایشگاهی و نتایج حاصل از تحلیل، برای نمونه تقویت نشده و تقویت شده به ترتیب در شکل های (۲) و (۳) آورده شده است.



شکل ۲: پاسخ بار - تغییر مکان نمونه های تحلیلی و آزمایشگاهی برای نمونه ی تقویت شده



شکل ۳: پاسخ بار - تغییر مکان نمونه های تحلیلی و آزمایشگاهی برای نمونه ی تقویت نشده

۴- مطالعات پارامتریک

نسب دهانه ی برشی به عمق، مقاومت فشاری بتن، تاثیر نسبت آرماتور برشی، اثر میزان آرماتور برشی بر ظرفیت تیر تقویت شده و تاثیر تعداد لایه های FRP پارامترهای بررسی

شده در مطالعه‌ی حاضر می‌باشند.

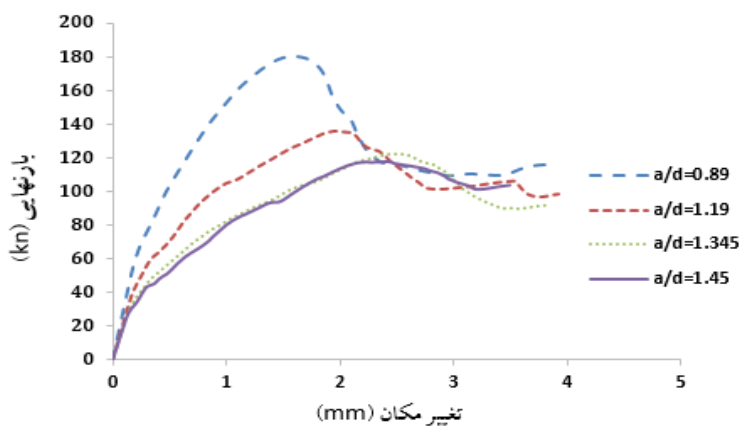
به برشی نزدیک می‌شود.

۴-۱- نسبت دهانه‌ی برشی به عمق ($\frac{a}{d}$)

به دلیل نقش تعیین‌کننده در میزان ترک‌های کششی در راستای خط واصل تکیه‌گاه و محل اعمال بار، عاملی موثر در تعیین میزان باربری تیرهای عمیق می‌باشد. در این بخش چهار گروه تیر عمیق با نسبت دهانه برشی به عمق $\frac{a}{d}$ ۰/۸۹، ۱/۱۹، ۱/۳۵ و ۱/۴۵ با آرماتورگذاری یکسان مدل سازی شده است. در شکل (۴) نمودار بار - تغییر مکان برای تحلیل‌های انجام‌شده آورده شده، نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش $\frac{a}{d}$ مقاومت و میزان انرژی جذب شده‌ی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. شکست نمونه‌ها از خمشی

۴-۲- مقاومت فشاری بتن

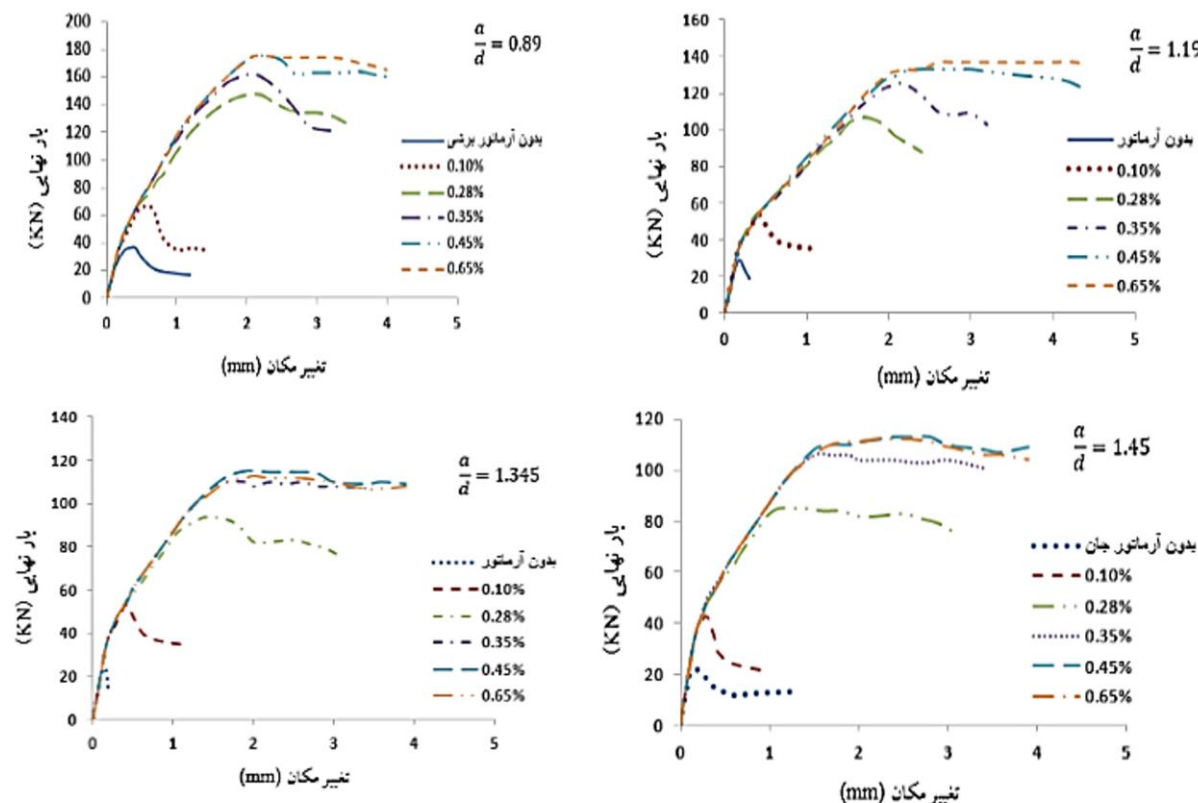
مقاومت فشاری به دلیل نقش تعیین‌کننده بر میزان تردشکنی و نرم‌شوندگی فشاری بتن عاملی موثر در تعیین میزان ظرفیت برشی تیر عمیق به حساب می‌آید، در این بخش سه نمونه C25، C35 و C50 با هندسه و آرماتورگذاری یکسان مدل‌سازی شدند خلاصه نتایج تحلیل‌ها در جدول ۲ آورده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش ظرفیت و کاهش تغییر مکان وسط تیر و همچنین کاهش ضریب شکل‌پذیری برشی می‌شود.



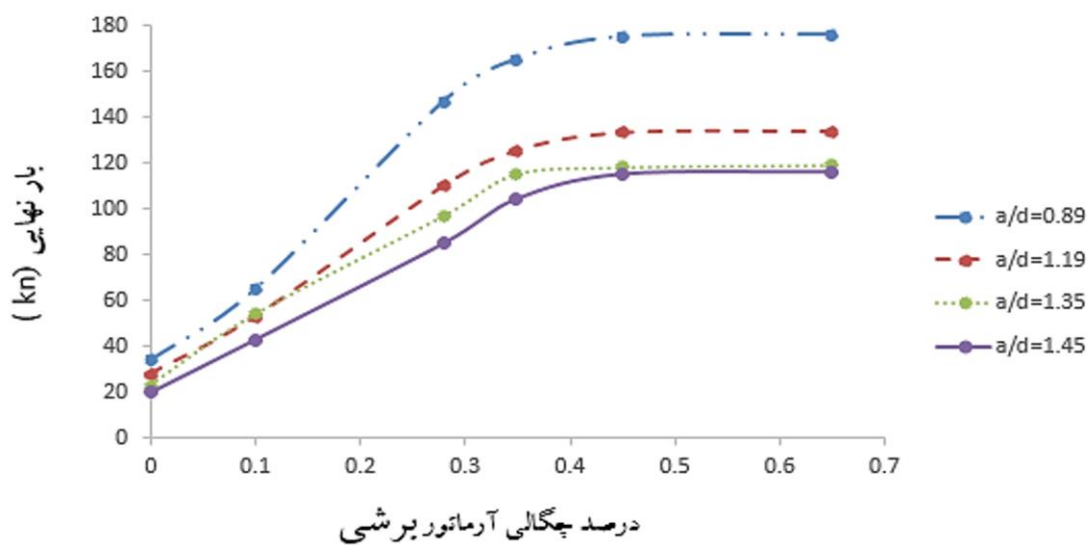
شکل ۴: تاثیر نسبت دهانه‌ی برشی به عمق بر ظرفیت برشی تیر عمیق (C50)

جدول ۲: بار و تغییر مکان نمونه‌ها با مقاومت‌های فشاری ۲۵، ۳۵ و ۵۰ مگاپاسکال

مقاومت فشاری	$\frac{a}{d}$	مقاومت نهایی (kn)	تغییر مکان وسط تیر (mm)	ضریب شکل‌پذیری (μ_1)	ضریب شکل‌پذیری (μ_2)
C25	۰/۸۹	۱۱۵	۱/۶۲	۱/۸۵	۳/۰۲
	۱/۱۹	۹۸	۲	۲	۳/۲۵
	۱/۳۴	۸۴	۲/۳۲	۲/۱۵	۳/۴۵
	۱/۴۵	۸۱	۲/۶۵	۲/۳۱	۳/۶۲
C35	۰/۸۹	۱۴۰	۱/۵	۱/۷۷	۳/۰۲
	۱/۱۹	۱۱۸	۲	۱/۹۴	۳/۱۸
	۱/۳۴	۱۰۵	۲/۴	۲/۰۵	۳/۳۹
	۱/۴۵	۹۸	۲/۵	۲/۲	۳/۵۶
C50	۰/۸۹	۱۷۹/۵	۱/۵۶	۱/۶۳	۲/۹۵
	۱/۱۹	۱۳۵/۵	۱/۹۵	۱/۷۵	۳/۱
	۱/۳۴	۱۲۱	۲/۵۲	۱/۸۹	۳/۳
	۱/۴۵	۱۱۷	۲/۴	۲/۰۲	۳/۴۶



شکل ۵: نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌ها با درصد مختلف آرماتور برشی



شکل ۶: نمودار میزان تاثیر درصد چگالی آرماتور برشی بر ظرفیت برشی تیر عمیق

۳-۴- بررسی اثر میزان آرماتور برشی

به منظور بررسی اثر میزان آرماتور برشی ۵ نمونه تیر عمیق با درصدهای مختلف آرماتور برشی مدل‌سازی شده که نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد مساحت آرماتورهای عرضی موثر در سطح از اثر فزاینده‌ی آرماتور برشی می‌کاهد، به عبارت بهتر چنانچه درصد آرماتور برشی از حدی بیشتر شود تاثیر بسیار ناچیزی در ظرفیت تیر دارد بدیهی است

که در نسبت‌های کم آرماتور برشی شکست نمونه‌ها برشی بوده و با افزایش آرماتورهای عرضی شکست خمشی محتمل‌تر می‌باشد بنابراین افزایش آرماتور برشی از حد مشخصی موثر نمی‌باشد (شکل‌های (۵) و (۶)). با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی آرماتورهای موجود در وسط دهانه‌ی برشی نسبت به سایر آرماتورها موثرتر می‌باشند و تنش ایجادشده در آنها بیشتر است، وجود چنین پدیده‌ای

قائم FRP تقویت می‌شود، در الگوی ۲ نوارهای FRP به صورت مورب و عمود بر ترک‌های برشی قرار می‌گیرند. الگوی ۳؛ دهانه‌ی برشی با استفاده از صفحات قائم FRP و در الگوی ۴ صفحات FRP به صورت مورب و عمود بر ترک‌های برشی قرار می‌گیرند (شکل ۸). خلاصه نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۳ آورده شده است، با توجه به حجم بالای تحلیل‌ها برای یک $\frac{a}{d}$ مشخص نتایج تحلیل به صورت نمودار بار - تغییر مکان در شکل (۹) آورده شده است.

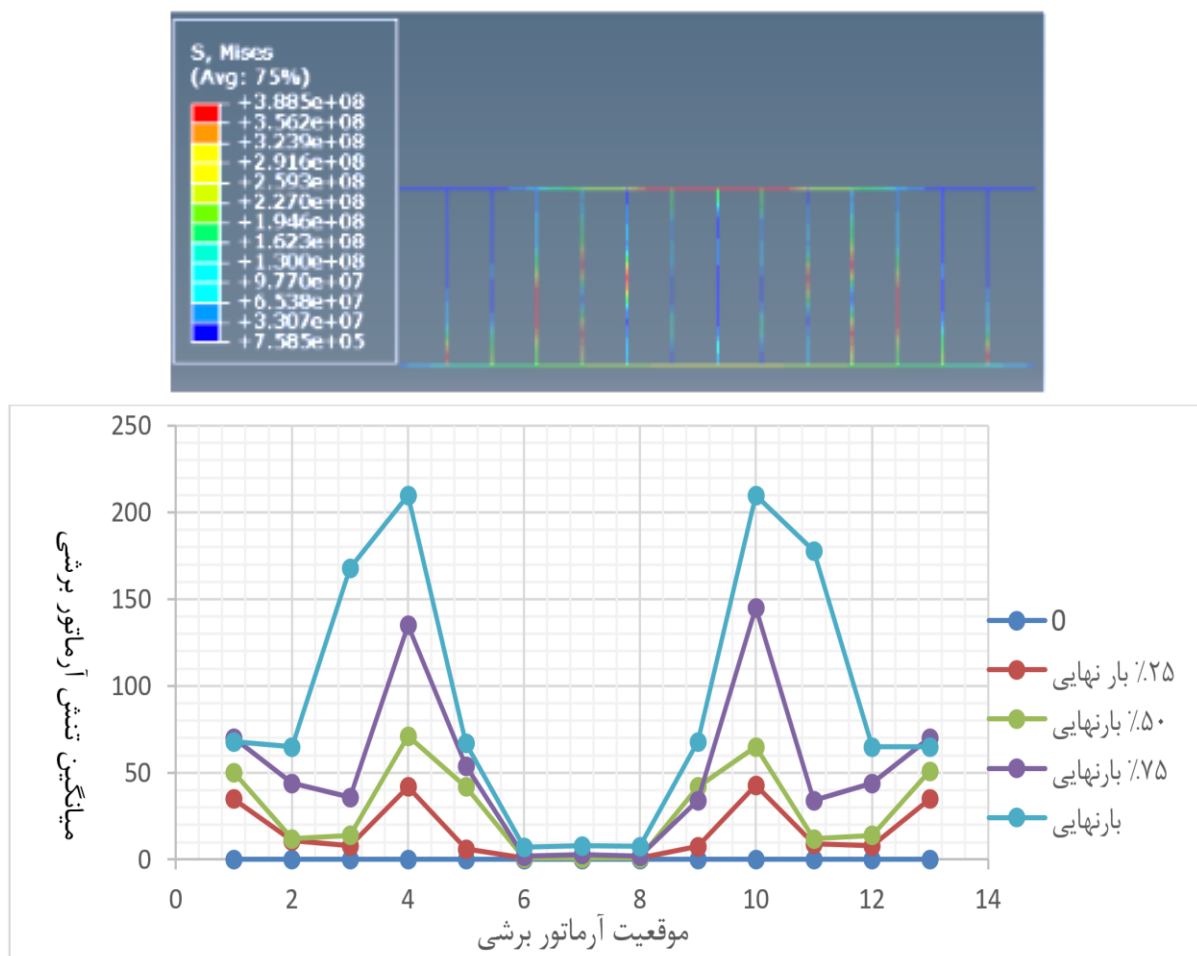
۶- بحث و نتایج

در این تحقیق علاوه بر بررسی رفتار کلی تیرهای عمیق، اثر الگوهای مختلف نصب FRP و تعداد لایه‌ها پارامتری تحت عنوان ضریب شکل‌پذیری برشی معرفی شده است که این پارامتر برای نسبت‌های مختلف $\frac{a}{d}$ ، مقاومت فشاری مختلف، آرایش‌های مختلف نصب FRP و تعداد لایه‌های آن محاسبه و مقایسه شده است.

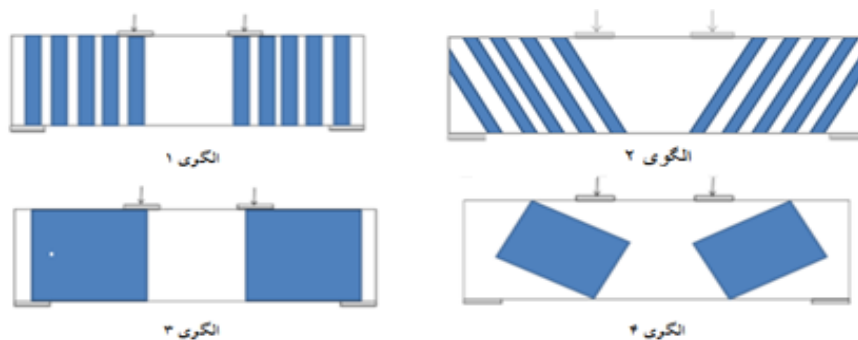
بدیهی است زیرا با توجه به شرایط بارگذاری در محل تکیه‌گاه و محل اعمال بار محصورشدگی فشاری وجود دارد و بروز ترک‌ها اولین بار از وسط دهانه‌ی برشی شروع می‌شود و سپس به سمت تکیه‌گاه‌ها و محل بارگذاری پیشروی می‌کند. و به همین دلیل در آرماتورهای برشی موجود در وسط دهانه‌ی برشی نسبت به سایر آرماتورهای برشی تنش بیشتری ایجاد می‌شود (شکل ۷).

۵- مقاوم‌سازی

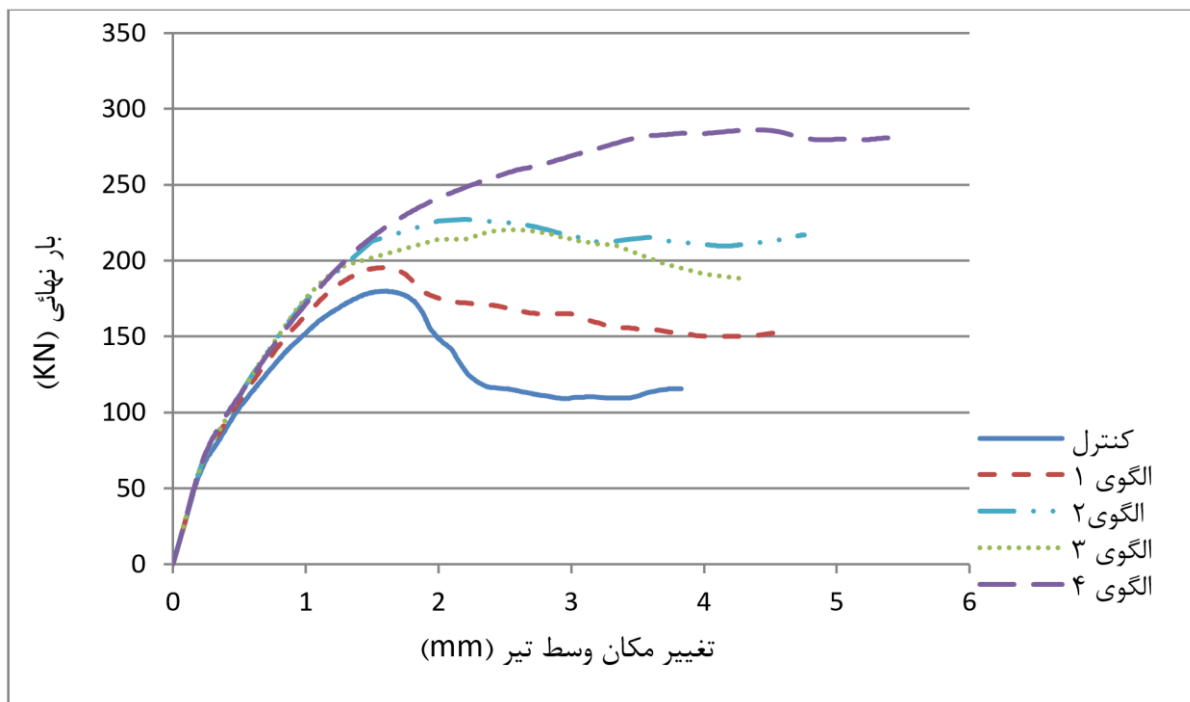
همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، به منظور بررسی رفتار برشی تیرهای تقویت‌شده با سیستم FRP چهار گروه تیر عمیق با نسبت دهانه برشی به عمق متفاوت مدل‌سازی و تحلیل شدند که هر گروه شامل یک تیر بدون تقویت (نمونه مرجع) و چهار تیر تقویت‌شده با چهار الگوی متفاوت می‌باشد و تحلیل‌های مذکور برای لایه‌های مختلف FRP انجام شده است. الگوی ۱؛ دهانه‌ی برشی با استفاده از نوارهای



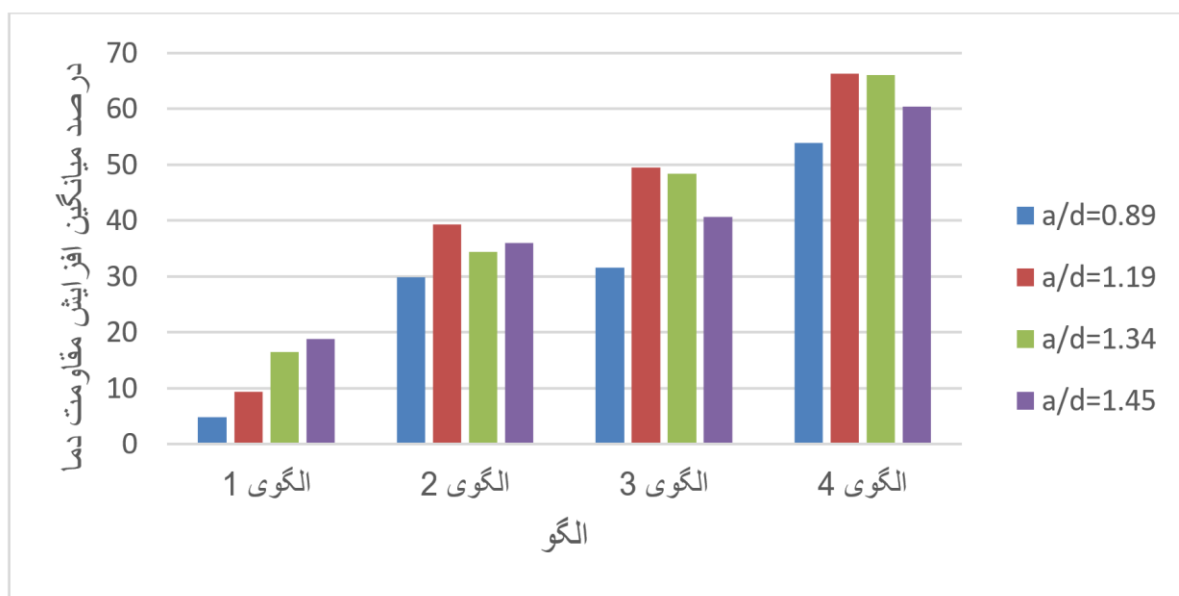
شکل ۷: کانتور و نمودار میانگین تنش آرماتورهای برشی در طول تیر



شکل ۸: الگوهای مختلف قرارگیری FRP



شکل ۹: نمودار بار - تغییر مکان تیر مقاوم‌سازی‌شده با الگوهای مختلف FRP



شکل ۱۰: نمودار ستونی میانگین مقاومت نهایی الگوهای تقویت

جدول ۳: نتایج مربوط به نمونه‌های مدل‌سازی شده

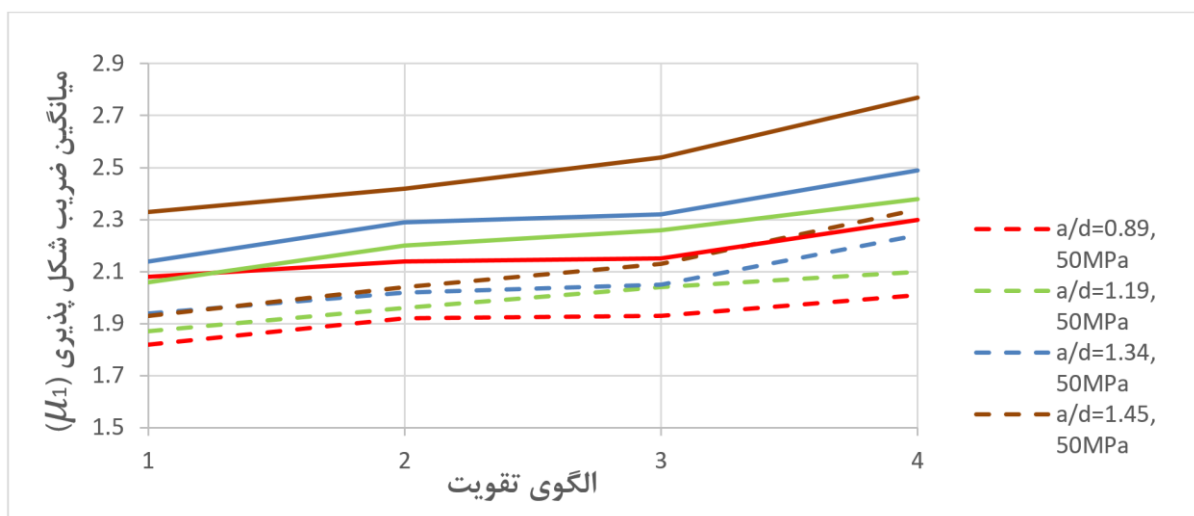
نمونه	مقاومت نهایی (KN)	تغییر مکان وسط تیر (mm)	درصد افزایش بار نسبت به نمونه شاهد	μ_1	μ_2
کنترل	۱۱۵	۱/۶۲	-	۱/۸۵	۳/۰۲
C1-1-1-25	۱۲۵	۱/۷	۸/۷	۲/۰۴	۳/۶۱
C1-2-1-25	۱۳۰	۱/۹۵	۱۳	۲/۱	۳/۷۸
C1-3-2-25	۱۳۷	۲/۶۵	۱۹/۱۳	۲,۱۴۵	۳/۸۳
C1-4-1-25	۱۴۷	۳/۹۵	۲۷/۸	۲/۲۵	۳/۹۶
C1-1-2-25	۱۲۸	۱/۷۲	۱۱/۳	۲/۰۸	۳/۷۶
C1-2-2-25	۱۴۷	۲/۷۶	۲۷/۸۲	۲,۱۵	۳/۹
C1-3-4-25	۱۵۸	۳/۳۵	۳۷/۴	۲/۱۴	۳/۹۲
C1-4-2-25	۱۶۵	۳/۹۵	۴۳/۴۷	۲/۳	۴/۱۲
C1-1-3-25	۱۳۶	۱/۹۳	۱۶/۵۲	۲/۱۳	۳/۸۲
C1-2-3-25	۱۵۵	۳/۳۴	۳۴/۷۸	۲,۱۸	۳/۹۴
C1-3-6-25	۱۷۵	۳/۸	۵۲/۱۷	۲,۱۷	۳/۸۹
C1-4-3-25	۱۸۶	۴/۱۲	۶۱/۷۳	۲/۳۵	۴/۳۵
کنترل	۹۵	۲	۱	۲	۳/۳۵
C2-1-1-25	۱۰۶	۲/۹۵	۱۱/۸	۲/۰۷	۳/۸
C2-2-1-25	۱۱۶	۳	۲۲/۱	۲/۱۵	۴
C2-3-2-25	۱۲۴	۳/۴۵	۳۰/۵۲	۲/۲۲	۳/۹۵
C2-4-1-25	۱۲۹	۳/۹۸	۳۲/۶۳	۲/۳۵	۴/۱۲
C2-1-2-25	۱۱۹	۲/۵	۲۵/۲	۲/۰۹	۳/۹۳
C2-2-2-25	۱۲۴	۳/۱	۳۰/۵۲	۲/۲۵	۴/۰۳
C2-3-2-25	۱۳۳	۳/۸۵	۴۰	۲/۲۸	۳/۹۶
C2-4-2-25	۱۳۸	۳/۹۵	۴۵/۲۶	۲/۴۲	۴/۲۳
C2-1-3-25	۱۲۵	۲/۳۴	۳۱	۲/۱۲	۳/۹۵
C2-2-3-25	۱۳۰	۳/۶۴	۳۵/۷۸	۲/۳۲	۴/۱۲
C2-3-6-25	۱۴۶	۴/۳	۵۳/۶۸	۲/۳۶	۴/۱۳
C2-4-3-25	۱۵۸	۴/۱۵	۶۶/۳۱	۲/۵۲	۴/۳
کنترل	۸۴	۲/۳۲	۱	۲/۱۵	۳/۴۵
C3-1-1-25	۱۰۰	۳/۴۴	۱۹	۲/۲	۳/۹۲
C3-2-1-25	۱۰۷	۳/۱۵	۲۷/۳۸	۲/۲۲	۴/۱۳
C3-3-2-25	۱۱۷	۳/۴۵	۳۹/۲۸	۲/۳	۴/۳۰
C3-4-1-25	۱۲۱	۴/۲۵	۴۱/۶۷	۲/۳۵	۴/۳
C3-1-2-25	۱۰۳	۳/۶۷	۲۰	۲/۱۲	۳/۹۵
C3-2-2-25	۱۱۳/۷	۳/۹۲	۳۵/۳۵	۲/۳	۴/۱۸
C3-3-4-25	۱۲۷	۴/۱۵	۵۱/۱۹	۲/۳	۴/۳۵
C3-4-2-25	۱۲۸	۴/۴۳	۵۲/۳۸	۲/۴۴	۴/۴
C3-1-3-25	۱۰۶/۷	۳/۷۶	۲۶/۱۹	۲/۱۸	۳/۹۸
C3-2-3-25	۱۱۰/۷	۳/۶۴	۳۰/۹۵	۲/۳۸	۴/۲۳
C3-3-6-25	۱۳۴	۴/۲۵	۵۹/۵۲	۲/۴	۴/۲۸
C3-4-3-25	۱۴۸	۴/۵۵	۷۲/۶۱	۲/۶۷	۴/۴۸

ادامه‌ی جدول ۳: نتایج مربوط به نمونه‌های مدل‌سازی شده

نمونه	مقاومت نهایی (KN)	تغییر مکان وسط تیر (mm)	درصد افزایش بار نسبت به نمونه شاهد	μ_1	μ_2
کنترل	۸۱/۸	۲/۶۵	۱	۲/۳۱	۳/۶۲
C4-1-1-25	۹۹	۳/۵۴	۱۷	۲/۳۶	۳/۹۹
C4-2-1-25	۱۰۳	۳/۱۵	۲۴/۳۹	۲/۴	۴/۲۲
C4-3-2-25	۱۱۳	۳/۶۱	۳۷/۸	۲/۵۵	۴/۳۲
C4-4-1-25	۱۱۶	۴/۷۱	۴۱/۴۶	۲/۶۲	۴/۴۹
C4-1-2-25	۱۰۳	۳/۸	۲۶	۲/۴۸	۴/۱۵
C4-2-2-25	۱۰۵	۴/۱۲	۲۸/۰۴	۲/۵	۴/۳۸
C4-3-4-25	۱۲۱	۴/۲۵	۴۷/۵۶	۲/۵۸	۴/۳۷
C4-4-2-25	۱۲۳	۴/۳۷	۵۰	۲/۶۸	۴/۶
C4-1-3-25	۱۰۵	۳/۸	۲۷	۲/۴۹	۴/۱۹
C4-2-3-25	۱۰۸	۴/۲	۳۱/۷	۲/۵۴	۴/۴۳
C4-3-6-25	۱۳۱	۴/۲۵	۵۹/۷۵	۲/۵۵	۴/۴۵
C4-4-3-25	۱۳۸	۴/۶۴	۶۸/۲۹	۳/۰۴	۴/۷۱
کنترل	۱۷۹	۱/۵۶	-	۱/۶۳	۲/۹۵
C1-1-1-50	۱۸۳	۱/۵۶	۲/۲۳	۱/۷۲	۳/۴۶
C1-2-1-50	۲۰۷/۹	۲/۲	۱۶/۱۴	۱/۹	۳/۶۶
C1-3-2-50	۲۰۱/۶	۲/۵۶	۱۲/۶۲	۱/۹۵	۳/۶۱
C1-4-1-50	۲۶۲/۲	۴/۳۶	۴۶/۴۸	۱/۹۸	۳/۷۵
C1-1-2-50	۱۸۷/۷	۱/۶۸	۴/۸۶	۱/۷۸	۳/۶۴
C1-2-2-50	۲۳۲/۷	۳/۸	۳۰	۱/۹۵	۳/۸۳
C1-3-4-50	۲۲۹	۳/۶۷	۲۷/۹	۱/۹	۳/۷۵
C1-4-2-50	۲۶۵/۳	۳/۲	۴۸/۲	۲/۰۱	۳/۹۲
C1-1-3-50	۱۹۲	۱/۸	۷/۲۶	۱/۸۲	۳/۷۸
C1-2-3-50	۲۵۶/۶	۵	۴۳/۳	۱/۹	۳/۹
C1-3-6-50	۲۷۶	۴/۲	۵۴	۱/۹۴	۳/۸۵
C1-4-3-50	۳۰۴	۳/۸	۶۹/۵	۲/۰۵	۴/۰۵
کنترل	۱۳۵	۱/۹۵	-	۱/۷۵	۳/۱
C2-1-1-50	۱۴۲	۲/۷	۴/۸	۱/۸۳	۳/۵۶
C2-2-1-50	۱۶۹	۳/۳	۲۵/۱۸	۱/۹۴	۳/۷۸
C2-3-2-50	۱۶۹	۳	۲۵/۱۸	۲	۳/۷۹
C2-4-1-50	۲۰۸/۵	۴/۸	۵۴/۴۴	۲/۰۵	۳/۸۵
C2-1-2-50	۱۴۹	۲/۸	۱۰/۱	۱/۸۸	۳/۷۲
C2-2-2-50	۱۸۸/۶	۳/۵	۳۹/۷	۱/۹۵	۳/۹
C2-3-4-50	۲۰۴	۴/۴	۵۱/۱	۲/۰۶	۳/۸۸
C2-4-2-50	۲۲۷	۴	۶۸/۱۴	۲/۱	۴
C2-1-3-50	۱۵۳	۳/۳۷	۱۳/۱	۱/۹	۳/۸۵
C2-2-3-50	۲۰۷	۳/۹۴	۵۳/۳	۱/۹۸	۳/۹۸
C2-3-6-50	۲۳۲/۵	۴/۸۶	۷۲/۲	۲/۰۶	۳/۹۴
C2-4-3-50	۲۳۸	۳/۴۸	۷۶/۳	۲/۱۶	۴/۱۳

ادامه‌ی جدول ۳: نتایج مربوط به نمونه‌های مدل‌سازی شده

نمونه	مقاومت نهایی (KN)	تغییر مکان وسط تیر (mm)	درصد افزایش بار نسبت به نمونه شاهد	μ_1	μ_2
کنترل	۱۲۱	۲/۵۲	-	۱/۸۹	۳/۳
C3-1-1-50	۱۳۲	۳/۴۵	۹/۹	۱/۹۵	۳/۶۴
C3-2-1-50	۱۵۸	۴	۳۰/۵	۲/۰۲	۳/۸۷
C3-3-2-50	۱۶۲	۳/۳	۳۳/۹	۱/۹۸	۳/۹۱
C3-4-1-50	۱۹۱	۴/۹	۵۷/۸	۲/۰۷	۴/۰۴
C3-1-2-50	۱۴۲	۳/۶	۱۷/۳۵	۱/۹۴	۳/۸۱
C3-2-2-50	۱۶۴/۵	۳/۷	۳۵/۹۵	۲/۰۲	۳/۹۷
C3-3-4-50	۱۸۵/۵	۴/۹	۵۳/۳	۲/۰۵	۳/۹۵
C3-4-2-50	۲۰۴	۴/۳	۶۸/۶	۲/۱۵	۴/۱۵
C3-1-3-50	۱۴۸	۳/۴۴	۲۲	۱/۹۸	۳/۹
C3-2-3-50	۱۶۷	۳/۹۴	۳۸	۲/۰۷	۴/۱
C3-3-6-50	۱۹۱	۴/۶۸	۵۷/۸	۲/۱۲	۴/۱۸
C3-4-3-50	۲۰۷/۵	۳/۹۷	۷۱/۴۸	۲/۵	۴/۲۹
کنترل	۱۱۷	۲/۴	-	۲/۰۲	۳/۴۶
C4-1-1-50	۱۳۲	۲/۵	۱۲/۸۲	۲/۱۵	۳/۷
C4-2-1-50	۱۴۲/۵	۳/۸	۲۱/۷۹	۲/۲۵	۳/۹
C4-3-2-50	۱۵۸	۳/۳۶	۳۵	۲/۳	۴/۰۵
C4-4-1-50	۱۸۳	۴/۴	۵۳	۲/۴	۴/۲۴
C4-1-2-50	۱۴۰	۳/۲۶	۱۹/۶۵	۲/۲۴	۳/۹۴
C4-2-2-50	۱۵۳/۵	۴/۲۵	۳۱/۱۹	۲/۳۲	۴/۱
C4-3-4-50	۱۶۳/۵	۳/۳۶	۳۹/۷۴	۲/۳۳	۴/۱
C4-4-3-50	۱۸۹/۵	۳/۶	۶۱/۹۶	۲/۴۸	۴/۳۱
C4-1-3-50	۱۴۵	۳/۱	۲۳/۹۳	۲/۲۵	۴/۰۴
C4-2-3-50	۱۵۸	۳/۶۵	۳۵	۲/۳۲	۴/۱۵
C4-3-6-50	۱۷۲	۳/۴۴	۴۷	۲/۴	۴/۲۳
C4-4-3-50	۱۹۵	۴/۱۱	۶۶/۶۷	۲/۵۶	۴/۳۸



شکل ۱۱: تاثیر مقاومت فشاری و الگوهای تقویت بر ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت‌شده

۶-۱- بررسی رفتار کلی تیرهای عمیق

نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که رفتار کلی تیرهای عمیق متأثر از مقاومت فشاری، نسبت دهانه‌ی برشی به عمق، درصد و آرایش آرماتورهای برشی می‌باشد به طوری که با افزایش مقاومت فشاری ظرفیت برشی افزایش می‌یابد و با توجه به نسبت ابعاد تیر شکست موضعی در مقاومت پائین نیز مطرح می‌باشد، با افزایش $\frac{a}{d}$ ظرفیت نهایی تیر عمیق کاهش می‌یابد اما نرخ کاهش ظرفیت برای مقاومت‌های بالا محسوس‌تر می‌باشد زیرا در مقاومت‌های فشاری پائین، ظرفیت عضو فشاری ما بین تکیه‌گاه و محل اعمال بار تحت اثر شکست موضعی بوده و در واقع تسلیم آرماتورهای برشی (شکست تیر) بیشتر تحت تاثیر شکست موضعی می‌باشد. تحلیل‌های انجام شده در ارتباط با میزان آرماتور برشی نشان می‌دهد که افزایش درصد مساحت آرماتورهای عرضی موثر در سطح از اثر فزاینده‌ی آرماتور برشی می‌کاهد زیرا در نسبت‌های کم آرماتور برشی شکست نمونه‌ها برشی بوده و با افزایش آرماتورهای عرضی شکست خمشی محتمل‌تر می‌باشد بنابراین افزایش آرماتور برشی موثر نمی‌باشد، شکل‌های (۵) و (۶). با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی آرماتورهای موجود در وسط دهانه‌ی برشی نسبت به سایر آرماتورها موثر تر می‌باشند و تنش ایجاد شده در آنها بیشتر است، وجود چنین پدیده‌ای بدیهی است زیرا بروز ترک‌ها اولین بار از وسط دهانه‌ی برشی شروع می‌شود و سپس به سمت تکیه‌گاه‌ها و محل بارگذاری پیشروی می‌کند (شکل (۷)).

۶-۲- بررسی رفتار نمونه‌های تقویت‌شده

۶-۲-۱- مساله تاثیر الگوهای تقویت با سیستم FRP بر ظرفیت برشی

یک روش موثر برای تقویت برشی تیرهای عمیق استفاده از ورق‌های FRP در دهانه‌ی برشی می‌باشد که باعث افزایش ظرفیت برشی و انرژی جذب شده (سطح زیر نمودار بار - تغییر مکان) که این اثر افزایشی علاوه بر نسبت دهانه‌ی برشی به عمق متأثر از الگوی تقویت می‌باشد. مناسب‌ترین الگوی تقویت تیرهای عمیق استفاده از سیستم تقویتی ورق‌های FRP بر روی وجوه کناری با زاویه قرارگیری الیاف در راستای عمود بر ترک می‌باشد به عنوان مثال در بتن با مقاومت 50MPa برای $\frac{a}{d}=1.19$ افزایش باری به میزان ۵۴، ۶۸ و ۷۶ درصد به ازای ضخامت‌های یک لایه، دو لایه

و سه لایه می‌باشد.

شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با افزایش $\frac{a}{d}$ اثر مثبت الگوی ۱ (دهانه‌ی برشی با استفاده از نوارهای قائم FRP تقویت می‌شود) افزایش می‌یابد، بدیهی است که با افزایش $\frac{a}{d}$ ترک‌های برشی به حالت افقی نزدیک می‌شوند و رکابی‌های قائم عمود بر ترک قرار می‌گیرند و افزایش ظرفیت بیشتری داریم. به طور کلی در هر نسبتی از $\frac{a}{d}$ بیشترین افزایش ظرفیت برای نمونه‌های تقویت شده با الگوی ۴ (سیستم تقویتی ورق‌های FRP بر روی وجوه کناری با زاویه‌ی قرارگیری الیاف در راستای عمود بر ترک) می‌باشد که میزان افزایش ظرفیت در این الگو بیشتر از ۵۰ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که درصد مساحت FRP برای الگوی ۴ نسبت به الگوی ۳ کمتر است.

۶-۲-۲- مقایسه‌ی نمودارهای بار - تغییر مکان

همان‌گونه که در شکل (۹) دیده می‌شود سختی نمونه‌ها در محدوده‌ی ارتجاعی تیر شاهد بر هم منطبق می‌باشند سپس سختی تیر شاهد کاهش می‌یابد. سختی نمونه‌های تقویت شده بستگی به الگوی نصب FRP دارد ولی در نهایت سختی نمونه‌های تقویت شده همانند منحنی شاهد (بعد از رسیدن به ظرفیت حداکثر) کاهش می‌یابد.

۶-۲-۳- بررسی مود شکست نمونه‌ها

شکست تیرهای تقویت‌نشده به سبب ترک‌های قطری و جاری شدن آرماتورهای برشی می‌باشد پس از تقویت رشد ترک‌های قطری کاهش یافته و بار ترک خوردگی تیر افزایش می‌یابد. در تیرهای تقویت‌شده بهترین مود شکست پارگی الیاف می‌باشد زیرا در این صورت از حداکثر ظرفیت الیاف استفاده می‌شود که این مود شکست متأثر از الگوی تقویت می‌باشد و چنانچه تیر با استفاده از سیستم تقویتی ورق‌های FRP در وجوه کناری با زاویه‌ی قرارگیری الیاف عمود بر ترک، پارگی الیاف محتمل می‌باشد. اما در بیشتر نمونه‌های تقویت‌شده، با توجه به اینکه ترک‌های قطری کاملاً محصور نمی‌شوند و همچنین به دلیل کمبود آرماتورهای کششی و فشاری و ضعف بتن در زیر نقطه بارگذاری شکست حاکم عمدتاً شکست موضعی و خمشی می‌باشد، لازم به ذکر است در الگوی تقویتی ۱ شکست برشی محتمل می‌باشد.

۶-۲-۴- بررسی ضریب شکل‌پذیری برشی نمونه‌ها

در جدول ۳ ضریب شکل‌پذیری μ_1 و μ_2 برای نمونه‌ها

لایه‌ها و درصد آرماتور برشی، هرچند ظرفیت تیر افزایش می‌یابد اما اثر فزاینده‌ی سیستم FRP کاهش می‌یابد.

۴- نتایج تحلیل نشان می‌دهد که علاوه بر مقاومت برشی، نسبت دهانه‌ی برشی به عمق $(\frac{a}{d})$ بر ضریب شکل‌پذیری برشی تیرهای عمیق موثر است؛ به طوری که با افزایش $\frac{a}{d}$ و کاهش مقاومت فشاری ضریب شکل‌پذیری برشی افزایش می‌یابد. همچنین مقاوم‌سازی در نمونه‌ها C25 باعث افزایش μ_1 تا ۱۰/۲۷ درصدی شکل‌پذیری برشی μ_1 و ۱۹/۵ تا ۳۰ درصدی μ_2 می‌شود، که این مقادیر برای نمونه‌ها با C50 ۵/۵ تا ۲۶ درصدی شکل‌پذیری برشی μ_1 و ۱۷ تا ۲۶ درصدی μ_2 می‌شود.

۵- بهترین مود گسیختگی پارگی الیاف است که در این مود از حداکثر ظرفیت الیاف استفاده می‌شود که این نحوه‌ی گسیختگی برای نمونه‌های تقویت شده با الگوی ۴ صورت گرفته است، و لازم به ذکر است که استفاده از حداکثر ظرفیت الیاف در صورتی امکان‌پذیر است که شکست خمشی و موضعی به دلیل کمبود آرماتور فشاری و کششی و ضعف بتن در نقطه‌ی بارگذاری و محل تکیه‌گاه‌ها رخ ندهد.

آورده شده است، این جدول نشان می‌دهد که در تیرهای عمیق با افزایش نسبت دهانه‌ی برشی به عمق، شکل‌پذیری برشی افزایش پیدا می‌کند، بدیهی است که با افزایش $\frac{a}{d}$ تیر از حالت برشی فاصله گرفته و به حالت خمشی نزدیک می‌شود. از طرفی در تیرهای تقویت‌شده، وجود لایه‌های FRP در نمونه‌ها C25 باعث افزایش ۱۰/۲۷ تا ۳۱/۶ درصدی شکل‌پذیری برشی μ_1 و ۱۹/۵ تا ۳۰ درصدی μ_2 می‌شود، که این مقادیر برای نمونه‌ها با C50 ۵/۵ تا ۲۶ درصدی شکل‌پذیری برشی μ_1 و ۱۷ تا ۲۶ درصدی μ_2 می‌شود که این اثر مثبت متناسب با الگوی تقویت می‌باشد به طوری که الگویی که افزایش ظرفیت برشی بیشتری داشته باشد، شکل‌پذیری برشی بیشتری به دنبال خواهد داشت.

با افزایش مقاومت فشاری بتن شکل‌پذیری برشی کاهش پیدا می‌کند، که با افزایش $\frac{a}{d}$ تغییر شکل‌پذیری بیشتر محسوس می‌باشد. در واقع در تیرها تقویت شده با $\frac{a}{d}$ بالا با کاهش مقاومت فشاری، ضریب شکل‌پذیری برشی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند، می‌توان چنان استنباط کرد که در این حالات تقویت برشی تیر به ویژه با الگوی ۴ شکست غالب از حالت برشی فاصله می‌گیرد و به حالت خمشی نزدیک می‌شود، به همین دلیل تغییرات شکل‌پذیری برشی محسوس‌تر است (شکل (۱۱)).

۷- نتیجه‌گیری

نتایج حاصله نشان می‌دهد که:

۱- افزایش $\frac{a}{d}$ باعث کاهش ظرفیت برشی تیرهای عمیق و افزایش اثر تقویت‌کنندگی FRP بر ظرفیت برشی می‌شود، البته این اثر تقویت‌کنندگی علاوه بر نسبت دهانه‌ی برشی به عمق تیر متاثر از الگوی تقویت و تعداد لایه‌ها می‌باشد، به طوری که مناسب‌ترین الگوی تقویت تیرهای عمیق استفاده از سیستم تقویتی ورق‌های FRP بر روی وجوه کناری با زاویه قرارگیری الیاف در راستای عمود بر ترک می‌باشد.

۲- با افزایش درصد مساحت آرماتورهای عرضی مؤثر در سطح از اثر فزاینده‌ی آن کاسته می‌شود، اثر مثبت آرماتور برشی علاوه بر درصد آرماتور برشی متاثر از محل قرارگیری آرماتور می‌باشد به طوری که آرماتورهای موجود در وسط دهانه‌ی برشی مؤثرتر می‌باشند.

۳- اثر مثبت سیستم FRP متاثر از تعداد لایه‌های FRP و درصد آرماتور برشی می‌باشد به طوری که با افزایش تعداد

۸- مراجع

- [1] ACI 318-14. "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, 2014.
- [2] ACI 440.2R-08. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", American Concrete Institute, 2008.
- [3] A. Khalifa, G. Tumialan, A. Nanni, and A. Belarbi, "Shear Strengthening of Continuous Reinforced Concrete Beams Using Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets", ACI STRUCTURAL JOURNAL, SP-188, 1999, pp. 995-1008.
- [4] D.I. Kachlakev, and W.A. Barnes, "Flexural and Shear Performance of Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates", ACI Journal, Vol. 188, 1999, pp. 959-972.
- [5] J. Sim, G. Kim, C. Park, M. Ju, "Shear Strengthening Effects with Varying Types of FRP Materials and Strengthening Methods", ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol. 230, 2005, pp. 1665-1680.
- [6] Sherif H. Al-Tersawy, "Effect of fiber parameters and concrete strength on shear behavior of strengthened RC beams", Construction and Building Material, Vol. 44, 2013, pp. 15-24.
- [۷] ع.ر. رهائی، "تقویت تیرهای بتن آرمه با سیستم CFRP" هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۳۹۰.
- [۸] ا. عربزاده، م. میرزائی، "ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح ترمیم و تقویت شده با ورق‌های CFRP" هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۳۸۸.
- [9] B.B. Adhikary, H. Mutsuyoshi, and M. Ashraf, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer Sheets with Bonded Anchorage", ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol. 101, 2004, pp. 660-668.
- [10] O. Anil, "Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load", Cement & Concrete Composites, Vol. 28, 2006, pp.638-649
- [11] Y. Kim, Kevin T. Quinn, Christopher N. Satrom, Wassim M. Ghannoum, and James O. Jirsa, "Shear Strengthening RC T-beams Using CFRP Laminates and Anchors", ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol. 275, 2011, pp. 1-18.
- [12] A. Godat, O. Chaallal, "Strut- and- Tie Method for externally FRP Shear Strengthened Large scale RC Beams", Composite Structural, Vol. 99. 2013, pp. 327-338
- [13] J.A.O. Barros, A.S. Fortes, "Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits", Cement and Concrete Composites, Vol. 27, 2005, pp. 471-480
- [14] N. Attari, S. Amziane, and M. Chemrouk, "Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets" Construction and Building Material, Vol. 37, 2012, pp. 746-757
- [15] A. Bournas Dionysios, and C. Triantafillou Thanasis, "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Columns with near surface- mounted for FRP or Stainless Steel", ACI, Vol. 106, 2009, pp. 495-505.
- [16] G.M. Dalfré, J.A.O. Barros, "NSM technique to increase the load carrying capacity of continuous RC slab", Engineering Structures, Vol. 56, 2013, pp. 137-153.
- [17] G. Foret, and O. Limam, "Experimental and numerical analysis of RC two-way slabs strengthened with NSM CFRP rods", Const. and Build. Mat., Vol. 22, 2006, pp. 80-86.
- [18] S.H. Ahmad, S. Hino, W. Chung, Y. Xie, and T. Yu, "Shear Ductility of Reinforced Concrete Beams of Normal and High Strength Concrete", ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol. 91, 1994, pp. 140-149.
- [19] S.W. Shin, S.K. Ghosh, and J. Moreno, "Flexural Ductility of Ultra High- Strength concrete members", ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol. 86, 1989, pp. 394-400.
- [20] S.W. Shin, S.K. Ghosh, and M. Kamara, "Flexural Ductility, Strength Prediction and hysteretic behavior of Ultra High- Strength concrete members", ACI STRUCTURAL JOURNAL, SP-141, 1990, pp. 239-264
- [۲۱] ی. شریفی، ع.آ. مقصودی، "شکل‌پذیری اعضای خمشی بتن مسلح پر آرمه ساخته شده با مقاومت بالا"، امیرکبیر، مهندسی عمران، شماره ۲، ۱۳۹۱، صفحه ۴۶-۳۷.