

الیاف پلیمرهای تقویت شده با فیبر بر روی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح

آرمان ابراهیمی اردی^۱، حمیدرضا احمدی^۲^۱ کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه.

Armanebrahimierdi77@gmail.com

^۲ استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه.

hamidreza.ahmadi@hotmail.com

چکیده

تقویت سازه‌های بتنی به منظور تحمل بارهای مضاعف بهره‌برداری، بهبود نارسایی‌های ناشی از خوردگی و فرسایش و همچنین شکل‌پذیری سازه‌ها انجام می‌گیرد. از جمله روشهای تقویت موجود می‌توان به غلاف‌های بتنی یا فولادی، صفحات فولادی به صورت پوشش خارجی و پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) اشاره نمود. یکی از قابلیت‌های FRP، بالابردن ظرفیت برشی تیرهای بتن‌آرمه می‌باشد. از این‌رو زمانی‌که تیر بتن‌آرمه دارای ظرفیت برشی کمتر از ظرفیت خمشی خود بعد از تقویت خمشی باشد و یا اینکه دارای مقاومت برشی ناکافی باشد تکنیک تقویت برشی با استفاده از نوارهای FRP می‌تواند مفید باشد. در این پژوهش مدل‌سازی تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با FRP به منظور صحت‌سنجی به کمک نرم‌افزار Abaqus صورت پذیرفت همچنین پس از حصول اطمینان از صحت‌سنجی مدل‌های ساخته شده، تأثیر نحوه قرارگیری ورق‌های FRP (از منظر راستای قرارگیری و فاصله‌ی مابین ورق‌ها) ارزیابی شده و رابطه‌ی جهت ارزیابی رفتار تیرهای مقاوم‌سازی شده با ورق‌ها FRP به کمک روش مبتنی بر محاسبات نرم MGP ارائه گردید و رابطه‌ی ارائه شده با رابطه‌ی که قبلاً طی پژوهشی ارائه شده بود مقایسه گردید که نتایج این مقایسه از مطلوب‌تر بودن و برتری رابطه‌ی ارائه شده در طی پژوهش حاضر، حکایت می‌کند. لازم به ذکر است، از آنجایی که نوع FRP، نوع بارگذاری بر روی نتایج نهایی تأثیر گذار می‌باشد لذا در صورت بهره‌مندی از نتایج این پژوهش بایستی به این نکات دقت شود.

واژه‌های کلیدی: پلیمرهای تقویت شده با الیاف، تیر برشی، بتن آرمه نرم‌افزار آباکوس

مقدمه

یکی از کارآمدترین تکنیکها برای تقویت سازه های بتن آرمه بهره گیری از ورق های پلیمری FRP به منظور محصور کردن اجزای سازه می باشد. این مصالح کامپوزیتی که به نام Fiber Reinforced Plastic معروف اند، امروزه به عنوان روشی جدید برای تقویت سازه های ساختمان ها و پل ها مورد استفاده قرار می گیرند. مقاوم سازی تیرهای بتن مسلح با الیاف پلیمری FRP بیش از دو دهه به علت مزایای بهتری که نسبت به روش های سنتی دارد، به طور متداولی استفاده می شود که این مزایا عبارت اند از: افزایش مقاومت و استحکام سازه به ویژه در مقابل زلزله، افزایش سختی، افزایش طول عمر سازه در برابر ارتعاش، مقاومت مناسب در برابر خوردگی، ضخامت کم، حمل و نقل و نصب راحت (سهولت و سرعت اجرا)، خاصیت الکترومغناطیس خنثی، افزایش مقاومت کششی و افزون بر موارد فوق FRP در مقایسه با فایبر گلاس و آهن صرفه اقتصادی بهتری دارد. اخیرا بهره گیری از FRP، هم چنین برای ترمیم و به سازی سازه های بتنی با توجه به کاربردهای فراوانی که این مصالح می توانند داشته باشند، نظر محققان را به خود جلب کرده است. سازه های بتنی ممکن است بنا به دلایلی آسیب دیده و مستلزم ترمیم یا به سازی باشند، لذا پیش از جدی شدن آسیب در سازه بایستی تمهیدات لازم جهت ترمیم و یا به سازی اندیشیده شود. از آنجایی که هزینه های ساخت مجدد سازه بیش از تقویت نمودن آن است، ضرورت به کارگیری روش های متنوع برای به سازی سازه ها مطرح می گردد.

حال با توجه به مزایای ذکر شده برای FRP و با اتکا به سهولت و سرعت اجرا همچنین صرفه ی اقتصادی، یکی از بهترین روش های موجود برای به سازی سازه های بتنی استفاده از مصالح کامپوزیتی FRP می باشد. با این وجود حدود پنجاه سال است که استفاده از مصالح کامپوزیتی FRP برای سازه های نو، ترمیم و به سازی رفتار سازه ها محدود می باشد. صدمات و خسارات ناشی از زمین لرزه های گذشته نشانگر این است که در صد عمده ای از سازه های بتن آرمه ی ساخته شده در کشورمان در مقابل زلزله مقاوم نبوده و یا مقاومت مناسب و کافی ای ندارند. دلیل این امر، آن است که ساختمان های بتن آرمه مطابق با آیین نامه های قدیمی طراحی شده و اکثر آنها دستورالعمل های لازم ذکر شده در آیین نامه های جدید را ارضا نمی کنند. از آنجایی که میدانیم کشور عزیزمان بر روی گسل و کمر بند زلزله قرار دارد، مقاوم سازی ساختمان ها خصوصا در مواجهه با نیروهای جانبی زلزله ضرورت دارد. به این علت بهره گیری از مصالح کامپوزیتی FRP، با توجه به ویژگی های بیان شده در فوق به خصوص مقاومت در برابر ارتعاش و زلزله، به منظور تقویت و به سازی لرزه ای در سنوات اخیر توسعه یافته است. میلگردهای FRP که از لحاظ شکل شبیه به میلگردهای رایج بوده با این تفاوت که در تولید آنها از رزین پلیمری مخصوص و الیاف (معمولا الیاف ها از جنس شیشه و کربن بوده و مقاومت بالاتری از فولاد دارند استفاده می شود. از آرماتورهای FRP، همان گونه که در بسیاری از پروژه ها استفاده شده است، می توان به عنوان جایگزین آرماتورهای فولادی به منظور مسلح نمودن بتن استفاده نمود. همان گونه که قبلا نیز ذکر گردید، FRP خاصیت الکترومغناطیسی خنثی دارد و در مقابل خوردگی نیز مقاوم می باشد و لذا بهره گیری این نوع از مصالح کامپوزیتی FRP می تواند بر مشکلات ناشی از خوردگی میلگردها و تداخل الکترومغناطیسی فائق شود. علاوه بر این، به دلیل مقاومت کششی بالا، مصالح FRP می توانند ضعف بتن در کشش را نیز جبران نمایند. لازم به ذکر است که مقاوم سازی به مجموعه عملیاتی گفته می شود که روی بخشی از سازه یا کل سازه انجام می شود تا سازه بتواند بارهای بیشتری نسبت به حالت اولیه تحمل نماید و خصوصیات رفتاری بهتری را از خود نشان دهد. در حالی که به سازی به مجموعه تمهیدات و راه کارهایی گفته می شود که بتوان رفتار عضو یا سازه را در برابر بارهای جانبی ناشی از زلزله بدون نیاز به تقویت مستقیم اعضا بهبود بخشید.

اهمیت، ضرورت و نوآوری در تحقیق

اگرچه فولاد و بتن جز آن دسته از مصالح ساختمانی حائز اهمیت و اصلی سازه های امروزی می باشند، اما تقویت سازه ها خصوصا سازه هایی که دارای اهمیت بالایی بوده در برابر بارهای ناگهانی وارده ضرورت دارد. زلزله هایی که اخیرا رخ داده اند، گواه بر این می باشند که بعضی از سازه ها به دلیل عدم مقاومت و شکل پذیری مناسب دچار آسیب دیدگی و یا تخریب شده اند که عوامل گوناگونی مانند افزایش بار وارد بر سازه، مشکلات مربوط به نقشه های اجرایی، قدیمی بودن آیین نامه های موجود،

عوامل محیطی مخرب و غیره باعث بروز این مشکلات می شوند. در اکثر مواقع به سازی برخی از قسمت های سازه منجر به مقاومت، سختی و شکل پذیری آن شده و جایگزین بسیار مناسبی برای تخریب سازه می باشد. روش های مختلفی برای مقاوم سازی سازه ها وجود دارد که یکی از بهترین آنها مقاوم سازی با مصالح کامپوزیتی FRP است. با توجه به پژوهش های صورت گرفته بر روی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با الیاف پلیمری FRP، نتایج حاصله مربوط به محصور شدگی تیرهای بتن آرمه به وسیله الیاف پلیمری FRP تحت زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه بوده و از آنجایی که نتایج برای دیگر زوایا به منظور مقایسه با نتایج موجود و یافتن مؤثرترین و مطلوب ترین نتیجه وجود ندارد، در این مطالعه محصور شدگی تیرهای بتن آرمه توسط الیاف پلیمری FRP، علاوه بر زاویه ۴۵ درجه، تحت زوایای ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به افق بررسی می شود تا از بین آنها کارآمدترین نحوه محصورشدگی برای رفتار برشی تیرها اتخاذ گردد. در ادامه نیز جهت ارزیابی رفتار تیر مقاوم شده با FRP، با استفاده از روش (MGP) (Multigenetic program)، رابطه ای بر اساس پارامترهای تعریف شده برای بررسی رفتار برشی تیرهای تقویت شده با FRP ارائه شود. شایان ذکر است، از آنجایی که نوع FRP، نوع بارگذاری بر روی نتایج نهایی تاثیر گذار می باشد لذا در صورت بهره مندی از نتایج این پژوهش بایستی به این نکات دقت شود.

بررسی تأثیر برخی پارامترهای ورودی بر روی ظرفیت برشی تیر بتن مسلح

در اینجا به طور نمونه به بررسی تأثیر برخی پارامترهای ورودی نظیر عرض، ضخامت، فاصله و زاویه قرار گیری FRP بر روی ظرفیت برشی تیر بتن مسلح و همچنین ظرفیت برشی FRP پرداخته می شود.

بررسی تأثیر ضخامت و عرض نوارهای FRP بر روی ظرفیت برشی تیر بتن مسلح

در این قسمت، نتایج حاصل از مدل سازی تیرهای تقویت شده با FRP، با ضخامت و عرض های متفاوت مورد مقایسه قرار گرفته می شود. پس از تجزیه و تحلیل خروجی های حاصل از مدل سازی تیرهای بتن مسلح تقویت شده، نتایج مختلف به دست آمده که در ذیل قابل ارائه می باشد.

۱- با ضخامت، زاویه و فاصله یکسان نوارهای FRP، ظرفیت برشی تیر بتن مسلح و متعاقباً ظرفیت برشی FRP با افزایش عرض نوارها زیاد شده و با کاهش عرض نوار، کاهش می یابد.

جدول ۱- مقایسه ظرفیت برشی تیر بتن مسلح برای تقویت با زاویه ۴۵ درجه با ضخامت و فاصله یکسان

ظرفیت برشی FRP	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده (kN)	عرض نوارهای FRP (mm)	ضخامت نوار FRP	فاصله نوارهای FRP (mm)	زاویه قرارگیری نوارهای FRP
۶۳،۰۱	۲۲۰	۲۸۳،۰۱	۳۰	۰،۴۳	۳۰۰	۴۵
۸۱،۷۶	۲۲۰	۳۰۱،۷۶	۴۰	۰،۴۳	۳۰۰	۴۵
۱۰۵،۸۱۱	۲۲۰	۳۲۵،۸۱۱	۵۰	۰،۴۳	۳۰۰	۴۵

جدول ۲- مقایسه ظرفیت برشی تیر بتن مسلح برای تقویت با زاویه ۷۵ درجه و ۶۰ درجه با ضخامت و فاصله یکسان

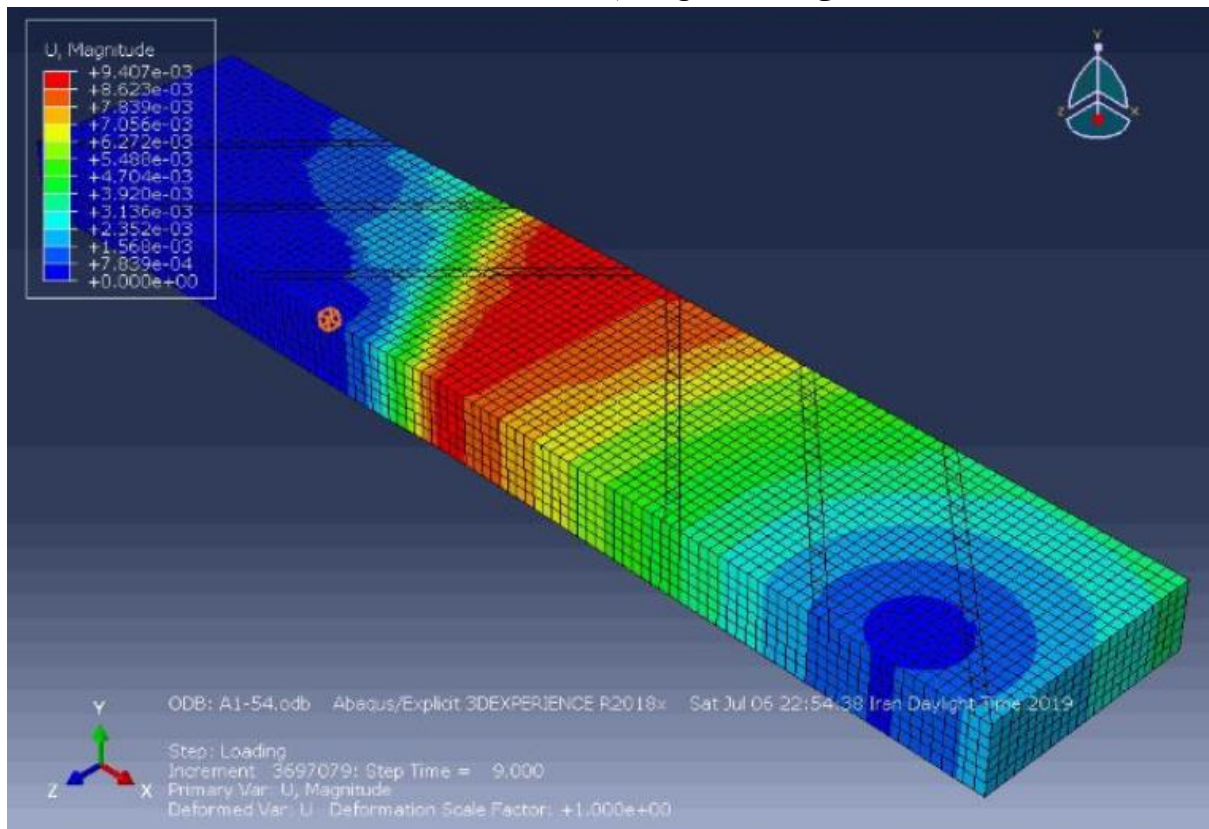
ظرفیت برشی FRP	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده (kN)	عرض نوارهای FRP (mm)	ضخامت نوار FRP	فاصله نوارهای FRP (mm)	زاویه قرارگیری نوارهای FRP
۵۴،۵۷۲	۲۲۰	۲۷۴،۵۷۲	۳۰	۰،۴۳	۳۰۰	۷۵
۷۲،۷۶۳	۲۲۰	۲۹۲،۷۶۳	۴۰	۰،۴۳	۳۰۰	۷۵
۹۵،۷۷۸	۲۲۰	۳۱۵،۷۷۸	۵۰	۰،۴۳	۳۰۰	۷۵
۶۵،۴۸	۲۲۰	۲۸۵،۴۸	۳۰	۰،۴۳	۲۵۰	۷۵
۸۷،۳۱	۲۲۰	۱۰۷،۳۱	۴۰	۰،۴۳	۲۵۰	۷۵

۷۵	۲۵۰	۰,۴۳	۵۰	۳۲۷,۶۴۶	۲۲۰	۱۰۷,۶۴۶
۶۰	۳۰۰	۰,۴۳	۳۰	۳۲۱,۶۵۴	۲۲۰	۱۰۱,۶۵۴

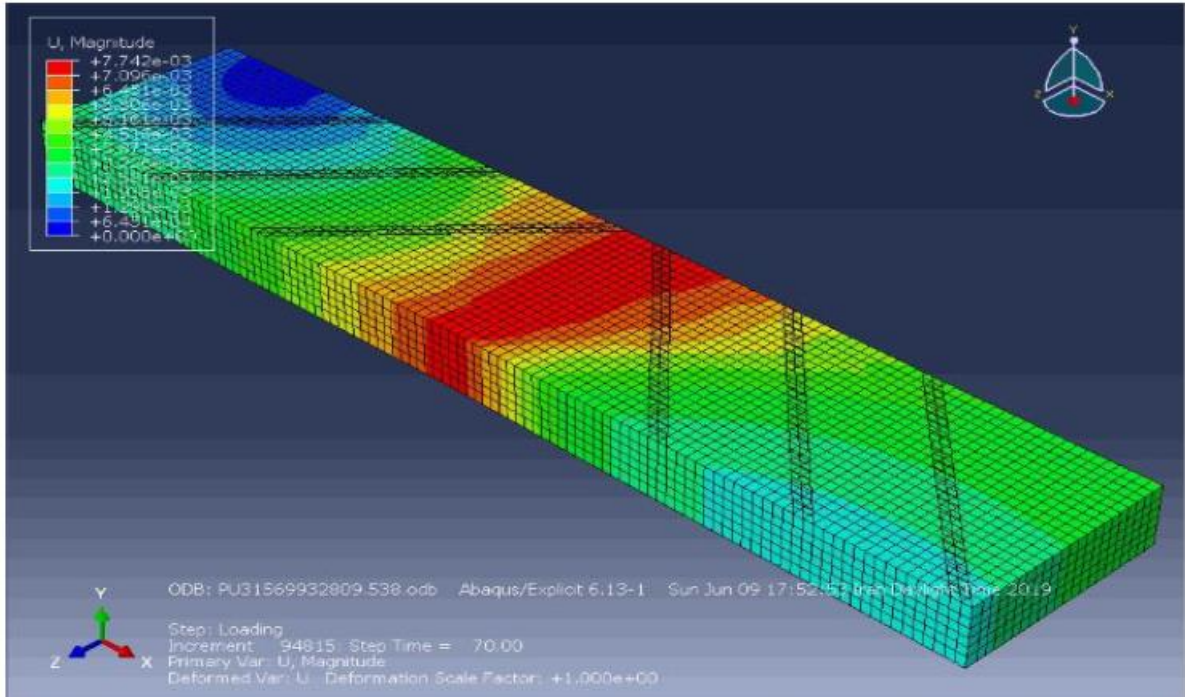
جدول ۳- مقایسه ظرفیت برشی تیر بتن مسلح برای تقویت با زاویه ۳۰ درجه با ضخامت و فاصله یکسان

زاویه قرارگیری نوار FRP	فاصله های نوار FRP (mm)	ضخامت نوار FRP	عرض نوارهای FRP (mm)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده (kN)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح	ظرفیت برشی FRP
۳۰	۲۵۰	۰,۱۱	۳۰	۲۹۵,۹۷۷	۲۲۰	۷۵,۹۷۷
۳۰	۲۵۰	۰,۱۱	۴۰	۳۱۱,۸۸۷	۲۲۰	۹۱,۸۸۷
۳۰	۲۵۰	۰,۱۱	۵۰	۳۳۶,۰۵۷	۲۲۰	۱۱۶

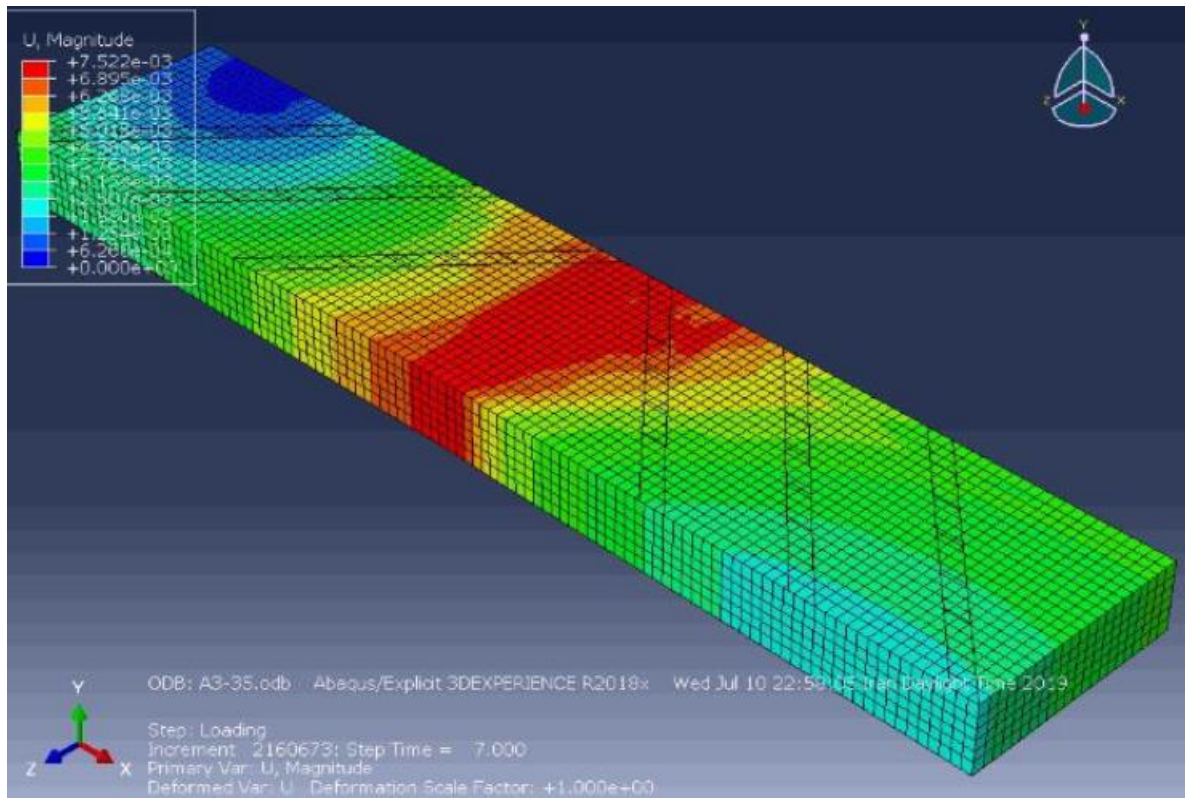
با ثابت بودن زاویه، فاصله بین نوارها و ضخامت نوارهای FRP و افزایش عرض نوارهای FRP، ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده افزایش می یابد که این خود بیانگر افزایش ظرفیت برشی نوارهای FRP می باشد. همچنین مشاهده می شود که در این پژوهش برای نمونه در بین ۳ زاویه ۴۵، ۷۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق که عرض، ضخامت و فاصله نوارها یکسان باشند، زاویه قرار گیری FRP به صورت ۶۰ درجه بیشترین ظرفیت برشی را از خود نمایش میدهد. به علاوه با توجه به اطلاعات جدول شماره دیده می شود که برای زاویه قرار گیری نوارهای FRP به صورت ۷۵ درجه، با عرض، ضخامت ثابت، کاهش فاصله نوارهای FRP سبب افزایش ظرفیت برشی تیر بتن مسلح مقاوم شده گردیده است.



شکل ۱- کانتور تنش مربوط به مدل سازی تیر بتن مسلح تقویت با FRP تحت زاویه ۴۵ درجه با عرض ۳۰ میلی متر



شکل ۲- کانتور تنش مربوط به مدل سازی تیر بتن مسلح تقویت با FRP تحت زاویه ۴۵ درجه با عرض ۴۰ میلی متر



شکل ۳- کانتور تنش مربوط به مدل سازی تیر بتن مسلح تقویت با FRP تحت زاویه ۴۵ درجه با عرض ۵۰ میلی متر

همان طور که نیز دیده می شود، افزایش عرض نوارهای FRP سبب کاهش تنش وارده به تیر بتن مسلح گردیده است. مقایسه تنش وارده به تیر و ظرفیت برشی نوارهای FRP تحت زاویه ۴۵ درجه با عرض متفاوت

زاویه قرارگیری نوار FRP	فاصله نوارهای FRP (میلی متر)	عرض نوارهای FRP (میلی متر)	حداکثر تنش وارده به تیر (Mpa)
۴۵	۳۰۰	۳۰	۹,۴۰۷
۴۵	۳۰۰	۴۰	۷,۷۴۲
۴۵	۳۰۰	۵۰	۷,۵۲۲

۲- با عرض، زاویه و فاصله یکسان نوارهای FRP، ظرفیت برشی تیر بتن مسلح و متعاقباً ظرفیت برشی FRP با افزایش ضخامت نوارها زیاد شده و با کاهش ضخامت نوار، کاهش می یابد.

جدول ۴- مقایسه ظرفیت برشی تیر بتن مسلح برای تقویت با زاویه ۴۵ درجه با عرض و فاصله یکسان

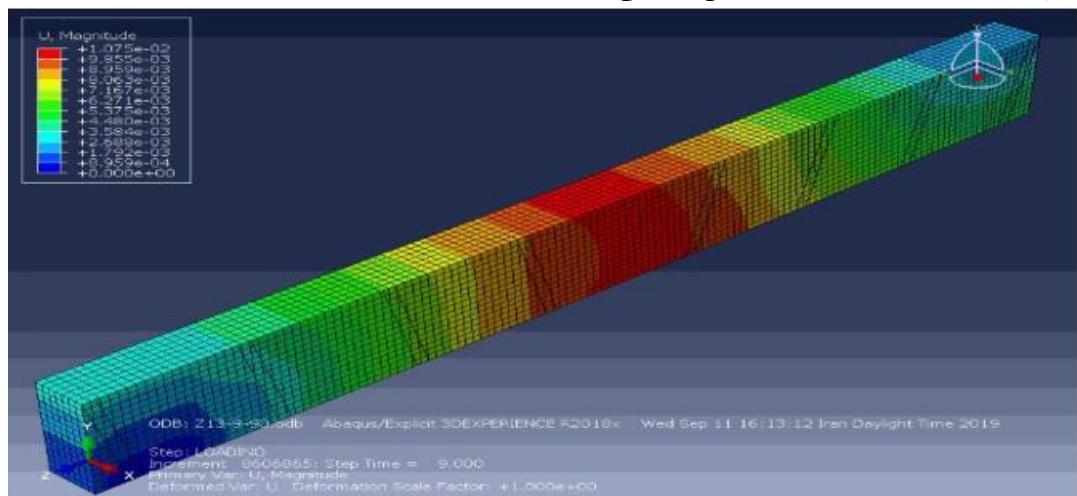
زاویه قرارگیری نوار FRP های	فاصله نوارهای FRP (mm)	ضخامت نوار FRP	عرض نوارهای FRP (mm)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده (kN)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح	ظرفیت برشی FRP
۴۵	۳۰۰	۰,۳۳	۴۰	۲۹۴,۳۷۹	۲۲۰	۷۴,۳۷۹
۴۵	۳۰۰	۰,۴۳	۴۰	۳۰۱,۷۶	۲۲۰	۸۱,۷۶
۴۵	۳۰۰	۰,۵۸	۴۰	۳۲۶,۷۲۴	۲۲۰	۱۰۶,۷۲۴

با ثابت بودن عرض، فاصله نوارها از یکدیگر و همچنین زاویه قرار گیری آنها، زیاد شدن ضخامت نوارها سبب افزایش ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده گردیده که این خود بیانگر این است که افزایش ضخامت نوارهای FRP منجر به افزایش ظرفیت برشی FRP ها می شود.

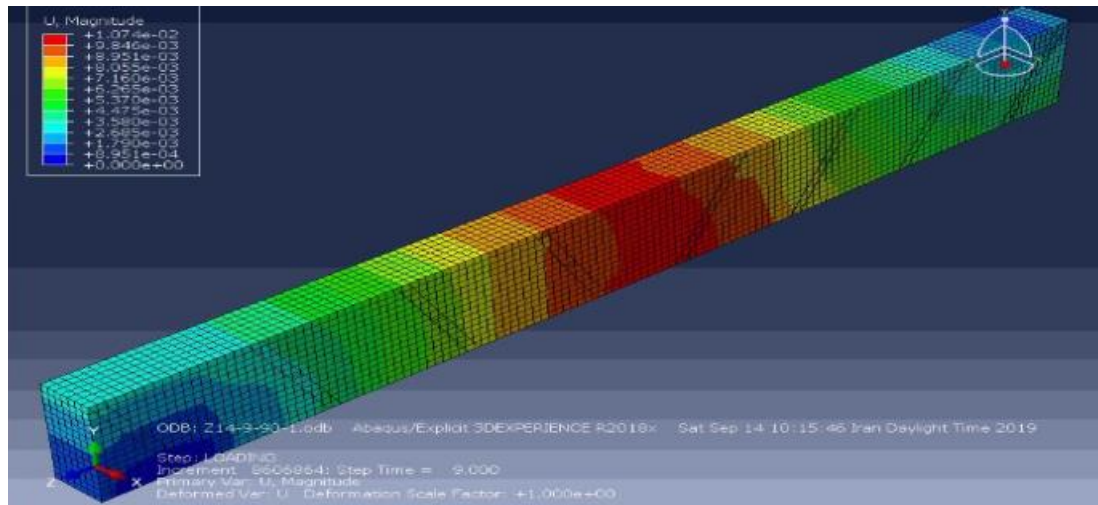
تأثیر فاصله و زاویه ی قرار گیری الیاف FRP بر روی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح

در این قسمت، نتایج حاصل از مدل سازی تیرهای تقویت شده با FRP، با زوایای و فواصل مختلف مورد مقایسه قرار گرفته می شود. پس از تحلیل خروجی های حاصل از مدل سازی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با زوایای مختلف به دست آمده، به طوری که نتایج زیر قابل ارائه می باشد.

۱- با ضخامت، عرض و فاصله یکسان ظرفیت برشی FRP تحت زاویه ۶۰ درجه در مقایسه با زاویه ۷۵ درجه بیشتر بوده و همچنین تنش کمتری به تیر بتن مسلح وارد می شود.



شکل ۴- کانتور تنش مربوط به مدل سازی تیر بتن مسلح تقویت با FRP تحت زاویه ۷۵ درجه با فاصله ۳۵۰ میلی متر



شکل ۵- کانتور تنش مربوط به مدل سازی تیر بتن مسلح تقویت با FRP تحت زاویه ۶۰ درجه با فاصله ۳۵۰ میلی متر جدول ۵-مقایسه تنش وارده به تیر و ظرفیت برشی نوارهای FRP تحت زاویه ۷۵ درجه با ۶۰ درجه

زاویه قرارگیری نوار FRP	فاصله نوار های FRP (mm)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده (kN)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح (KN)	ظرفیت برشی FRP	حداکثر تنش وارده به تیر (Mpa)
۶۰	۳۵۰	۱۰۶,۳	۴۱	۶۵,۳	۱۰,۷۴
۷۵	۳۵۰	۱۰۵	۴۱	۶۴,۲۳۳	۱۰,۷۵

۲- در تمامی حالت های تیرهای بتن مسلح مدل سازی شده (زوایای ۴۵، ۳۰، ۶۰ و ۷۵ درجه)، با ثابت بودن زاویه قرار گیری FRPها، در صورت کاهش فاصله بین نوارهای FRP، ظرفیت برشی FRP افزایش می یابد. همچنین اگر فاصله بین نوارهای FRP افزایش یابد، ظرفیت برشی FRP کاهش می یابد.

جدول ۶- مقایسه ظرفیت برشی نوارهای FRP تحت زوایای مختلف

زاویه قرارگیری نوار FRP	فاصله نوار های FRP (mm)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح تقویت شده (kN)	ظرفیت برشی تیر بتن مسلح (KN)	ظرفیت برشی FRP
۴۵	۳۰۰	۱۰۴,۲۳	۴۱	۶۳,۲۳۳
۴۵	۳۵۰	۱۰۳,۱۲۲	۴۱	۶۲,۱۲۲
۶۰	۳۵۰	۱۰۳,۴۸۸	۴۱	۶۲,۴۸۸
۶۰	۳۰۰	۱۰۶,۳	۴۱	۶۵,۳
۷۵	۳۵۰	۹۳,۴۵۸	۴۱	۵۲,۴۵۸
۷۵	۳۰۰	۱۰۳,۵۱۲	۴۱	۶۲,۵۱۲
۳۰	۲۰۰	۱۰۶,۲۵۴	۴۱	۶۵,۲۵۴
۳۰	۲۵۰	۱۰۴,۵۲۶	۴۱	۶۳,۵۲۶

همان طور که قبلا نیز برای زاویه ۴۵ درجه بیان گردید، با افزایش فاصله نوارهای FRP تنش وارده به تیر بتن مسلح نیز افزایش می یابد و این بیانگر آن است که کم بودن فاصله نوارها برای کاهش تنش ها مفید می باشد. مقایسه تنش و ظرفیت برشی FRP را برای زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه نمایش میدهد.

جدول ۷- مقایسه تنش وارده به تیر و ظرفیت برشی نوارهای FRP تحت زاویه ۳۰ درجه با ۶۰ درجه

زاویه قرارگیری نوار FRP	فاصله نوار های FRP (mm)	حداکثر تنش وارده به تیر (Mpa)
۳۰	۲۰۰	۱,۱۶
۳۰	۲۵۰	۹,۴۴
۶۰	۳۰۰	۷,۹۱
۶۰	۳۵۰	۹,۲۵

بررسی نتایج حاصل از مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی با مدل شبکه عصبی هوشمند

شبکه های عصبی هوشمند از لایه ها، نرونها و وزنها ایجاد می شوند. نرون های زیادی در هر لایه به نرونهای لایه ی قبلی توسط وزنها مرتبط می شوند. هر لایه داده های ورودی را پردازش کرده و آنها را به لایه ی بعدی منتقل می کند. شبکه ی عصبی پیش انتشار شامل یک لایه ی ورودی، دو یا تعداد بیشتری لایه ی مخفی و یک لایه ی خروجی می باشد. بدین منظور یک شبکه ی سه لایه در نظر گرفته می شود. ۷۰ درصد از کل دادهها یعنی داده های آزمایشگاهی به علاوه نتایج مدلسازی برای آموزش، ۱۵ درصد برای صحت سنجی و ۱۵ درصد باقیمانده نیز برای آزمودن شبکه ی عصبی استفاده می شوند. در شبکه ی عصبی تابع log-sigmoid انتخاب و یک لایه ی مخفی در نظر گرفته می شود. در ابتدا، تمامی داده های آزمایشگاهی موجود و نتایج مدلسازی عددی توسط فرمول زیر نرمال می شوند (نادر پور و همکاران ۲۰۱۰).

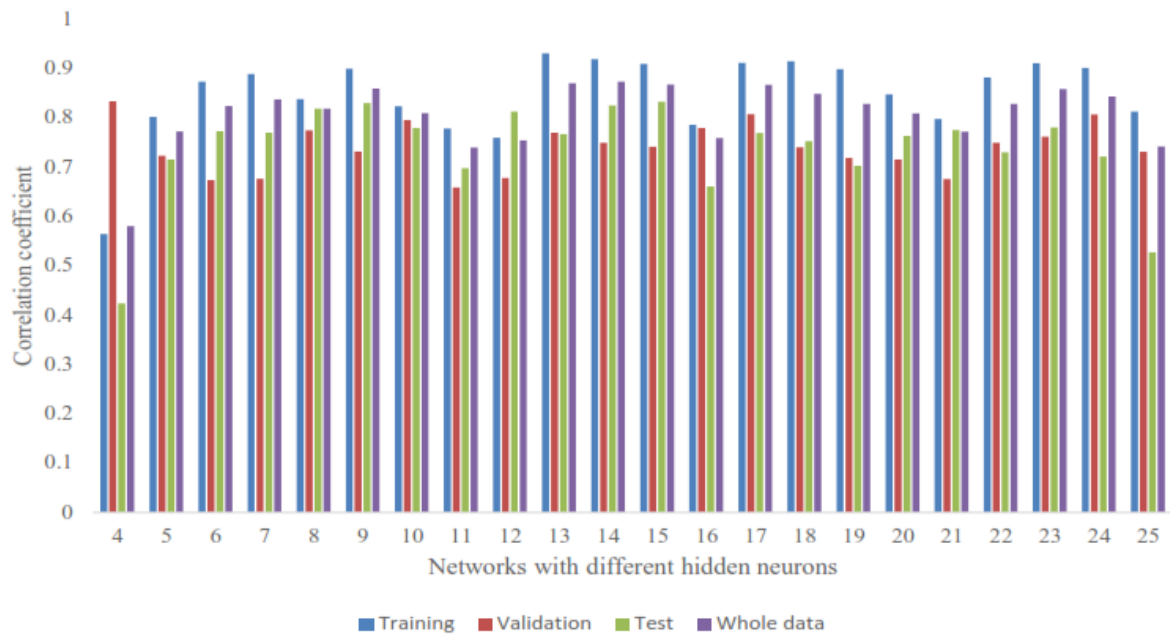
$$f_{scaled} = (0.9 - 0.1) \left(\frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \right) + 0.1$$

$$0.1 \leq f_{scaled} \leq 0.9$$

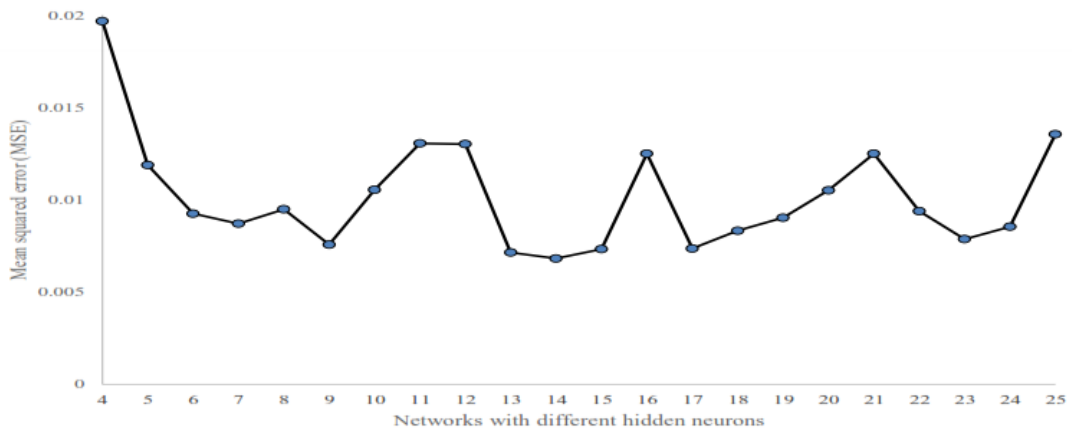
به گونه ای که در فرمول بالا f_{min} , f_{max} , f_{scaled} به ترتیب مقدار مقیاس شده ی متغیر و همچنین بیشینه و کمینه مقدار متغیر را نشان می دهند. همچنین الگوریتم Levenberg-Marquardt به منظور آموزش به صورت تصادفی بردارهای ورودی و خروجی استفاده می شود. به منظور پایان شبکه نیز مقدار میانگین مربع خطا به عنوان معیار در نظر گرفته می شود.

داده های آزمایش + مدل سازی عددی (۱۵۰ داده)

در اینجا مدل شبکه عصبی هوشمند برای هر دو مدل صحت سنجی شده به همراه نتایج آزمایشگاهی موجود که شامل ۱۵۰ داده بوده و در جدول A-1 در پیوست نیز آورده شده اند، پیاده سازی می شود. مقادیر رگرسیون شبکه ها با مقادیر مختلف نرون مخفی را نشان میدهند. شکل پایین نیز مقادیر بیشینه قدر مطلق خطای هر شبکه را نشان می دهد.

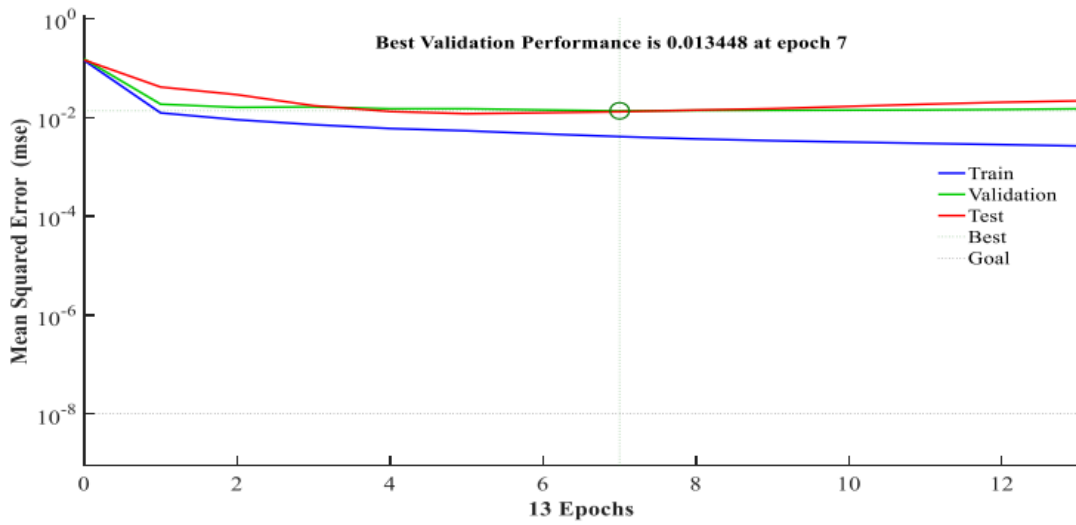


شکل ۶- ضریب همبستگی به ازای مقادیر مختلف در شبکه ی عصبی 6-n-1

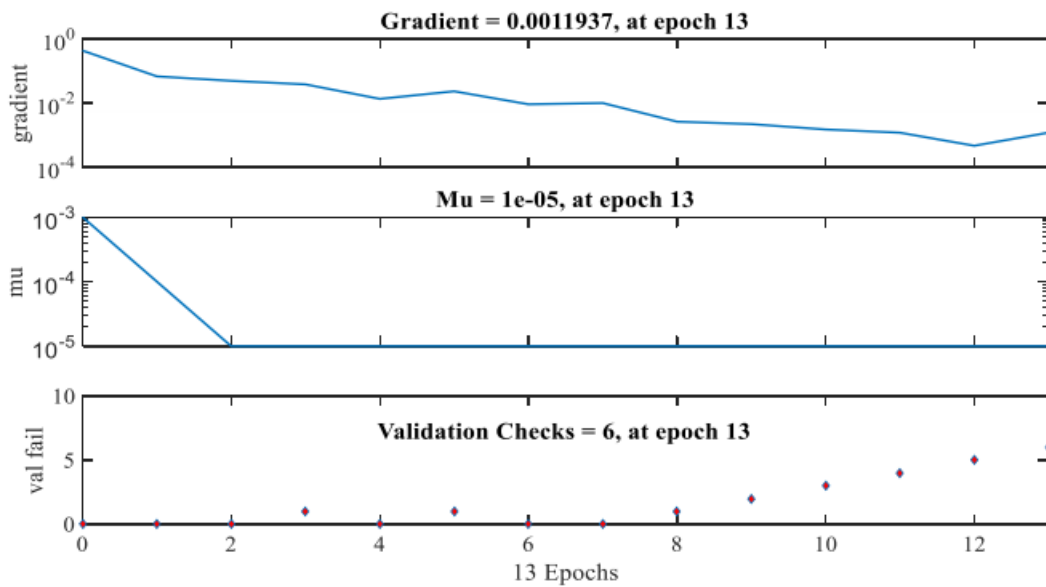


شکل ۷- مقدار میانگین خطا به ازای مقادیر مختلف لایه ی مخفی در شبکه ی عصبی 6-n-1

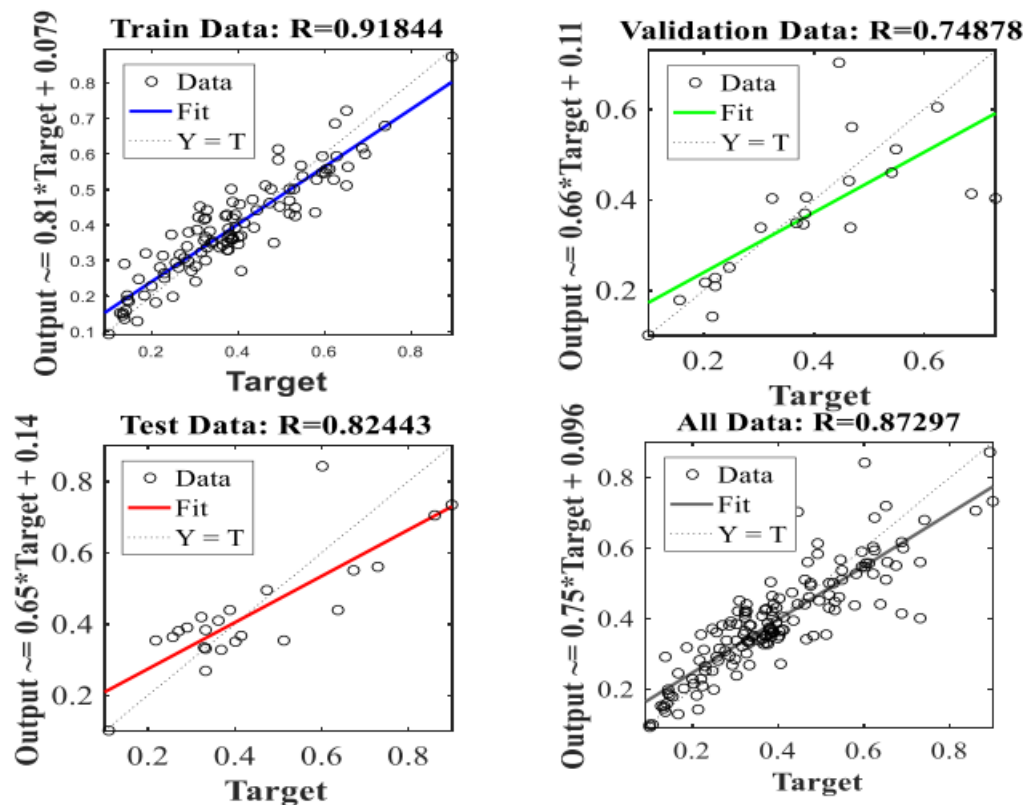
نظر به اینکه مقدار میانگین خطای این شبکه از مقدار زیادی شروع شده و در مقدار کوچکی پایان یافته است، بنابراین شبکه به خوبی آموزش دیده و ایجاد شده است.



شکل ۸- عملکرد شبکه عصبی



شکل ۹- آموزش شبکه عصبی



شکل ۱۰- مقدار رگرسیون آموزشی، صحت سنجی و آزمون داده های شبیه سازی شده با استفاده از شبکه ی عصبی

بحث و نتایج

پس از بررسی نتایج حاصل از مدل سازی های عددی و نتایج آزمایشگاهی موجود، با استفاده از MGP داده ها بهینه - سازی شده و رابطه ای جهت تعیین ظرفیت برشی نوارهای FRP ارائه شد. این رابطه به گونه ای آموزش دیده است که کارآمدترین ظرفیت برشی FRP را برای زوایای ۹۰، ۴۵، ۷۵، ۶۰ و ۳۰ درجه با توجه به پارامترهای تعریف شده مانند: عرض، ضخامت، فاصله، مدول الاستیسیته FRP و غیره را ارائه میدهد. از ویژگی های فرمول پیشنهادی این است که بسیار ساده بوده و می توان با استفاده از ماشین حساب یا اکسل به دست آید. به طور نمونه شکل درخت Gene17 در شکل ۵-۳۳ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود عمق درخت به ۱۰ رسیده است.

رابطه پیشنهادی برای ظرفیت برشی FRP طی پژوهش در ذیل آورده شده است.

$$y = 165.0 X_2 + 3.63 X_3 + 7.41 X_4 + 169.0 X_5 - 4.37 X_6 - 236.0 \sin(\sin(\exp(\text{real}(X_2)))) - 73.1 \log(X_6^2) - 62.9 \sin(X_5^2) - 4.06 \sin(X_6^{1/2}) + 5.79 \sin(\text{abs}(X_2)) - 15.0 \tanh(\text{abs}(X_2)) + 248.0 \sin(\sin(X_6)) - 5.83 \sin(2.0X_2 + X_5) + 11.6 \sin(\sin(135.0 \cos(X_2))) + 3.01 \sin(\sin(\log(X_3)(X_4 + X_6))) + 195.0 \sin(\exp(\text{real}(X_2))) - 60.6 \log(\log(\exp(X_3))) - 165.0 \text{abs}(X_2) - 6.67 \cos(X_2) + 34.3 \log(X_1) - 36.6 \log(X_6) - 8.72 \sin(\log(X_6^{1/2}) \cos(X_3) (\cos(X_2) + \text{COS}(X_6) + \exp(X_4))) - 226.0 \sin(X_6) - 15.3 \tanh(X_6) - 13.4 \sin(135.0 \log(X_6)) - 5.85 \cos(\sin(X_2^{1/2}))^{1/2} + 148.0 \cos(\sin(X_6^{1/2}))^{1/2} + (0.00582 X_2)/\sin(X_2) - 36.6 \text{abs}(X_5)^{1/2} + 36.6 \tanh(X_2)^{1/2} - 36.4 \cos(\sin(X_4^{1/2} \log(X_5)))^{1/2} + 124.0 \cos(\sin(X_6 \log(\log(X_2))))^{1/2} + (0.0757 \log(X_1 + X_3))/\sin(X_6) + (1.06e - 4 \log(X_6))/\text{abs}(X_1)^2 + (0.00207 \cos(X_4 + X_4^{1/2}))/\text{abs}(X_1)^2 - (39.1 X_3)/X_6^3 - 44.0 \cos(\sin(X_6 \log(\log(\log(X_6)))))^{1/2} - 0.0209 X_3^2 + 0.00325 X_6^2 + 87.0 X_6^{1/2} + 165.0 X_6^{1/4} - 67.0 \cos(\sin((X_4 + X_6)^{1/2}))^2 + 35.8 \cos(\sin((X_4 + X_6)^{1/2}))^{1/2} - 74.0 \cos(\sin(X_2 \text{abs}(X_2)))^{1/2} - (0.00463 X_2)/\sin(\sin(X_6^{1/2})) - 0.613 X_5 \cos(\sin(X_6 \log(\log(\log(X_6)))))^{1/2} (X_4 + X_5 + X_6) - 0.0644 X_4 X_5 (X_5 + X_6 + \text{abs}(X_2)) + 0.0426 X_5 \sin(135.0 \log(X_3))(2.0 X_5 + \text{Cos}(\cos(X_2))) - 0.0597 X_5 (X_1 + X_5 + \sin(X_2)) (X_6 + \text{abs}(X_2) - 1.0 \log(X_1)) + 0.00111 X_5 (X_5 + X_6 + \text{abs}(X_2)) (X_2 + X_4 + X_5) - 14.9$$

مقایسه مدل های MGP برای این پژوهش و مدل کامگار و همکاران (۲۰۱۹)

در این بخش فرمول پیشنهادی با استفاده از MGP برای این پژوهش با مدل پیشنهادی ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) مقایسه شده است. برای این منظور مقادیر پیش بینی شده توسط MGP برای رابطه پیشنهادی طی این پژوهش با فرمول ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، خطاهای مدل MGP برای فرمول پیشنهادی جدید و رابطه ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) برحسب میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، کسر مطلق واریانس (R2) و خطای ریشه متوسط مربعات (RMSE) مطابق با معادلات محاسبه و مقایسه می شوند. همچنین خطاهای حاصل از فرمول جدید پیشنهادی طی این پژوهش را نشان میدهد.

جدول ۸- مقادیر خطاهای R2، RMSE و MAPE برای MGP در این پژوهش

models	Training data			Testing data			Whole data		
	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²	MAPE	RMSE	R ²	MAPE
Total 2	7.152	0.990	10.617	19.0262	0.917	23.351	9.835	0.981	12.485

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_f(\text{predict}) - V_f(\text{experiment})}{V_f(\text{experiment})} \right) \times 100$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_f(\text{predict}) - V_f(\text{experiment}))^2}{\sum_{i=1}^n (V_f(\text{predict}))^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_f(\text{predict}) - V_f(\text{experiment}))^2}$$

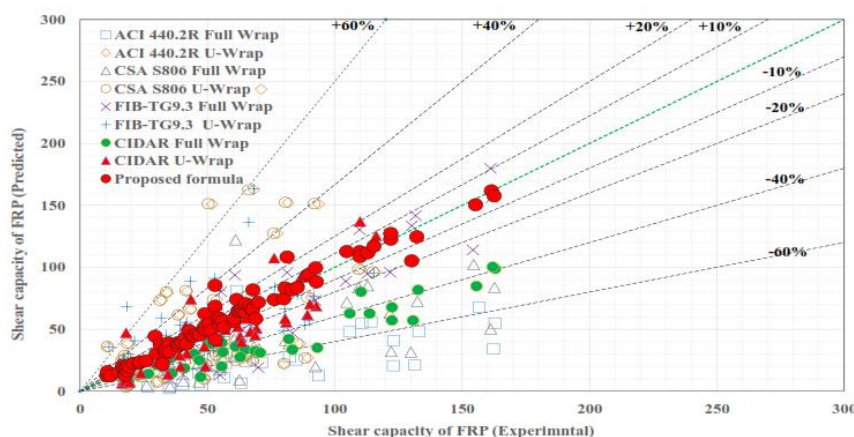
جدول ۹- مقایسه مقدار خطا بین فرمول جدید پیشنهادی با رابطه ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹)

models	Whole data		
	RMSE	R ²	MAPE
Kamgar et al.	106.1247	0.416	36.9691
New proposed formula	9.8357	0.9812	12.4848

بنابر این، می توان نتیجه گرفت که MGP می تواند ظرفیت برشی واقعی FRP را با فرمول پیشنهادی با دقت مناسب پیش بینی کند. همچنین همان طور که در جدول مشاهده می شود، مقادیر خطا در رابطه پیشنهادی جدید که طی این تحقیق به دست آمده به مراتب کمتر از فرمول پیشنهادی توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) بوده که این خود بیانگر برتری رابطه ارائه شده در این پژوهش است. رابطه پیشنهادی کامگار و همکاران (۲۰۱۹) در زیر آورده شده است.

$$y = 165.0 X_2 + 3.63 X_3 + 7.41 X_4 + 169.0 X_5 - 4.37 X_6 - 236.0 \sin(\sin(\exp(\text{real}(X_2)))) - 73.1 \log(X_6^2) - 62.9 \sin(X_5^2) - 4.06 \sin(X_6^{1/2}) + 5.79 \sin(\text{abs}(X_2)) - 15.0 \tanh(\text{abs}(X_2)) + 248.0 \sin(\sin(X_6)) - 5.83 \sin(2.0X_2 + X_5) + 11.6 \sin(\sin(135.0 \cos(X_2))) + 3.01 \sin(\sin(\log(X_3)(X_4 + X_6))) + 195.0 \sin(\exp(\text{real}(X_2))) - 60.6 \log(\log(\exp(X_3))) - 165.0 \text{abs}(X_2) - 6.67 \cos(X_2) + 34.3 \log(X_1) - 36.6 \log(X_6) - 8.72 \sin(\log(X_6^{1/2}) \cos(X_3) (\cos(X_2) + \text{COS}(X_6) + \exp(X_4))) - 226.0 \sin(X_6) - 15.3 \tanh(X_6) - 13.4 \sin(135.0 \log(X_6)) - 5.85 \cos(\sin(X_2^{1/2}))^{1/2} + 148.0 \cos(\sin(X_6^{1/2}))^{1/2} + (0.00582 X_2)/\sin(X_2) - 36.6 \text{abs}(X_5)^{1/2} + 36.6 \tanh(X_2)^{1/2} - 36.4 \cos(\sin(X_4^{1/2} \log(X_5)))^{1/2} + 124.0 \cos(\sin(X_6 \log(\log(X_2))))^{1/2} + (0.0757 \log(X_1 + X_3))/\sin(X_6) + (1.06e - 4 \log(X_6))/\text{abs}(X_1)^2 + (0.00207 \cos(X_4 + X_4^{1/2}))/\text{abs}(X_1)^2 - (39.1 X_3)/X_6^3 - 44.0 \cos(\sin(X_6 \log(\log(\log(X_6)))))^{1/2} - 0.0209 X_3^2 + 0.00325 X_6^2 + 87.0 X_6^{1/2} + 165.0 X_6^{1/4} - 67.0 \cos(\sin((X_4 + X_6)^{1/2}))^2 + 35.8 \cos(\sin((X_4 + X_6)^{1/2}))^{1/2} - 74.0 \cos(\sin(X_2 \text{abs}(X_2)))^{1/2} - (0.00463 X_2)/\sin(\sin(X_6^{1/2})) - 0.613 X_5 \cos(\sin(X_6 \log(\log(\log(X_6))))^{1/2} (X_4 + X_5 + X_6) - 0.0644 X_4 X_5 (X_5 + X_6 + \text{abs}(X_2)) + 0.0426 X_5 \sin(135.0 \log(X_3))(2.0 X_5 + \text{Cos}(\cos(X_2))) - 0.0597 X_5 (X_1 + X_5 + \sin(X_2)) (X_6 + \text{abs}(X_2) - 1.0 \log(X_1)) + 0.00111 X_5 (X_5 + X_6 + \text{abs}(X_2)) (X_2 + X_4 + X_5) - 14.9$$

همان طور که قبلا نیز بیان گردید رابطه پیشنهاد شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) برای ظرفیت برشی FRP با مدل ANFIS پیشنهاد شده توسط نادر پور و همکاران (۲۰۱۷) طی پژوهشی مقایسه گردید که نتایج حاکی از برتری این رابطه نسبت به مدل ANFIS است. حال همان طور که در شکل زیر نیز با دایره های قرمز رنگ مشاهده می شود فرمول پیشنهادی کامگار و همکاران (۲۰۱۹) که با استفاده از روش MGP حاصل شده است با برخی آیین نامه های موجود برای محاسبه ظرفیت برشی FRP نیز مقایسه شده که شکل مذکور بیانگر آن است که فرمول پیشنهادی توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) با درصد خطای کمتر و دقت بیشتری نسبت به روابط آیین نامه ای برای محاسبه ظرفیت برشی FRP می تواند استفاده شود.



شکل ۱۱- مقایسه بین MGP و نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه ای برای ظرفیت برشی FRP (کامگار و همکاران ۲۰۱۹) مقایسه MGP بین فرمول جدید پیشنهاد شده طی این پژوهش با رابطه ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) برای ظرفیت برشی FRP را نشان می دهد.

CSA-S806-12
(2012)

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f (\sin \alpha + \cos \alpha)}{S_f} ; A_{fv} = 2nt_f w_f ; f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f ; \varepsilon_{fe} \begin{cases} \varepsilon_{fe} = 0.006 & \text{for full wrap} \\ \varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 & \text{for U-wrap and side bonded} \end{cases}$$

$$K_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 ; L_e = \frac{23300}{(nt_f E_f)^{0.58}} ; k_1 = \left[\frac{f'_c}{27} \right]^{\frac{2}{3}} ; k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f}$$

ACI Committee 440
(2008)

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_f (\sin a + \cos a)}{S_f} = ; A_{fv} = 2 n t_f w_f ; f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f ; \varepsilon_{fe} \begin{cases} \varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \text{ for full wrap} \\ \varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \text{ for U-wrap} \end{cases}$$

$$K_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 ; L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} ; k_1 = \left[\frac{f'_c}{27} \right]^{\frac{2}{3}} ; k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} ; \text{ for U-wrap} \\ \frac{d_f - 2 L_e}{d_f} ; \text{ for side bonded} \end{cases}$$

CIDAR (2006)

$$V_f = 2 f_{fed} t_f \frac{W_f}{S_f} h_{fe} (\cot \theta + \cot a) \sin a ; h_{fe} = z_b - z_t ; z_b = 0.9d - d_{fb} ; z_t = d_{ft} ; f_{fed} = D_f f_{fd,max}$$

$$\text{For full wrap : } D_f = 0.5 \left(1 + \frac{z_t}{z_b} \right) ; f_{fd,max} = \begin{cases} \frac{1}{r_f} \phi_R f_{fu} ; \varepsilon_f \leq 1.5\% \\ \frac{1}{r_f} \phi_R E_f \varepsilon_f ; \varepsilon_f > 1.5\% \end{cases} ; \phi_R = 0.8 ; \gamma_f = 1.25$$

$$\text{For U-wrap and side bonded : } D_f = \begin{cases} \frac{2}{\lambda \pi} \frac{1 - \cos(\frac{\pi}{2} \lambda)}{\sin(\frac{\pi}{2} \lambda)} ; \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} ; \lambda > 1 \end{cases} ; \lambda = \frac{L_{max}}{L_e} ; L_{max} = \begin{cases} \frac{h_{fe}}{\sin a} ; \text{ for U-wrap} \\ \frac{h_{fe}}{2 \sin a} ; \text{ for side-bonded} \end{cases}$$

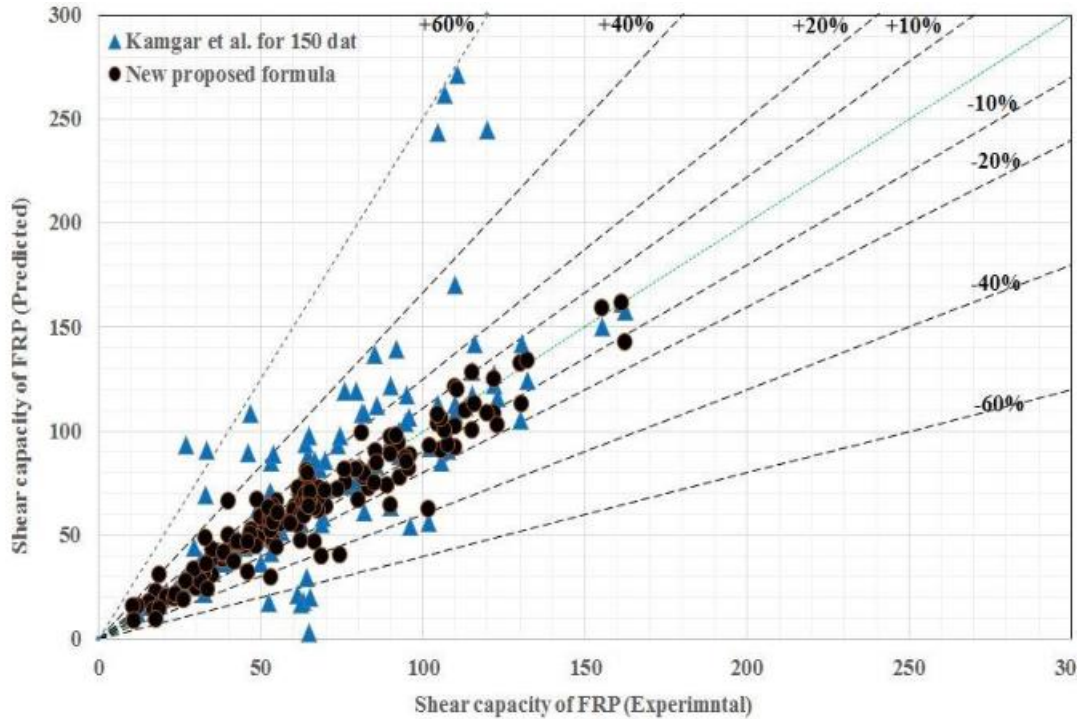
$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} ; f_{fd,max} = \min = \begin{cases} \frac{1}{r_f} \phi_R f_{fu} \\ \frac{1}{r_f} 0.35 \beta_L \beta_w \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f'_c}}{t_f}} \end{cases} ; \beta_L = \begin{cases} \lambda ; \lambda \leq 1 \\ 1 ; \lambda > 1 \end{cases} ; \beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{W_f}{S_f \sin a}}{1 + \frac{W_f}{S_f \sin a}}}$$

Fib - TG9.3 (2001)

$$V_f = 0.9 \varepsilon_{fe} E_f \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot a) \sin a ; \rho_f = \frac{2 t_f}{b_w S_f} \text{ (strips)} ; \rho_f = \frac{2 t_f \sin a}{b_w} \text{ (cont.)}$$

$$\text{For full wrap (CFRP)} : \varepsilon_{fe} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_f \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} ; \text{For full wrap (AFRP)} : \varepsilon_{fe} = 0.048 \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_f \rho_f} \right)^{0.47} \varepsilon_{fu}$$

$$\text{For U-wrap and side bonded : } \varepsilon_{fe} = \min \left[0.65 \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_f \rho_f} \right)^{0.56} \times 10^{-3}, 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_f \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} \right]$$



شکل ۱۲- مقایسه ظرفیت برشی FRP بین فرمول جدید پیشنهاد شده و رابطه ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) نمودار ترسیم شده مربوط به فرمول پیشنهادی جدید دارای دقت بیشتر و خطای کمتری است و بهتر بر روی خط $X = Y$ قرار گرفته و لذا، می توان نتیجه گرفت که MGP می تواند ظرفیت برشی واقعی FRP را با فرمول جدید پیشنهادی با دقت مناسب تری نسبت به رابطه ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) پیش بینی نماید. همچنین از دلایل برتری فرمول جدید پیشنهادی نسبت به رابطه ارائه شده توسط کامگار و همکاران می توان به موارد زیر نیز اشاره داشت :

۱- فرمول پیشنهاد شده در این پژوهش برای زوایای قرارگیری FRP تحت زوایایی علاوه بر ۴۵ و ۹۰ درجه آموزش دیده شده و مطرح گردیده است. زوایای به کار رفته در طی این پژوهش ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بوده که سبب شده جواب های بهتری و کامل تری نسبت به فرمول ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) که فقط برای زاویه قرار گیری FRP ها به صورت ۴۵ و ۹۰ درجه بوده، ارائه نماید.

۲- فرمول جدید پیشنهاد شده کوتاه تر از رابطه ی ارائه شده توسط کامگار و همکاران (۲۰۱۹) بوده که این خود از لحاظ مهندسی و محاسبات، دارای قابلیت استفاده ی آسان تر بوده ضمن آنکه فرمول حاضر دارای دقت بالاتری نیز هست.

۳- لازم به ذکر است که فرمول هایی آیین نامه ای روابط برای شکل نوارهای FRP به صورت U-Wrap و Full-Wrap را به صورت جداگانه ارائه می دهند در حالی که فرمول پیشنهادی جدید طی این پژوهش هر دو حالت را همزمان باهم محاسبه می نماید.

ارائه پیشنهادها

موضوعات زیر می توانند در آینده مورد بررسی قرار گیرند :

- ۱- ارائه ی رابطه ای به منظور ارزیابی ظرفیت خمشی تیر یا تیرستون بتن مسلح تقویت شده به کمک ورقه های FRP
- ۲- ارائه ی رابطه ای به منظور ارزیابی ظرفیت خمشی تیر یا تیرستون بتن مسلح تقویت شده به کمک میلگردهای FRP
- ۳- ارائه ی رابطه ای جهت ارزیابی شکل پذیری تیر یا ستون بتن مسلح تقویت شده به کمک ورقه های FRP-۴- ارائه ی رابطه ای جهت ارزیابی شکل پذیری تیر یا ستون بتن مسلح تقویت شده به کمک میلگردهای FRP

- [1] Ashour, A.F. (2006). Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*. 20(10): 1005-1015.
- [2] Al-Zaid, R.Z., Al-Negheimish, A.I., Al-Saawani, M.A., EI-Sayed, A.K. (2011). Analytical study on RC beams strengthened for flexure with externally bonded FRP reinforcement. *Composites: Part B: Engineering*. 43(2): 129-141.
- [3] Abduljalil, B.S. (2014). Shear resistance of reinforced concrete deep beams with opening strengthened by CFRP strips. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 18(1): 14-32.
- [4] Ahmadi, M., et al. (2017). ANN model for predicting the compressive strength of circular steel-confined concrete. *International Journal of Civil Engineering* 15(2): 213-221.
- [5] ACI 440R-96., State-of-the-Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Reported by ACI committee 44
- [6] ACI 318 Building Code and Commentary. Appendix A- Strut-and-Tie Models.
- [7] ABAQUS theory manual. Pawtucket, R.I: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.;(2011). Version 6.11.
- [8] Abaqus V6.10 Manuals Providence, Dassault Systemes. 2010
- [9] Abualigah, L. M. Khader, A. T. (2017). Unsupervised text feature selection technique based on hybrid particle swarm optimization algorithm with genetic operators for the text clustering. *The Journal of Supercomputing* 73: 4773-4795. <http://sci-hub.tw/10.1007/s11227-017-2046-2>
- [10] Abualigah, L. M. Khader, A. T. Hanandeh, E. S. (2018a). A combination of objective functions and hybrid Krill herd algorithm for text document clustering analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 73: 111-125. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.05.003>
- [11] Abualigah, L. M. Khader, A. T. Hanandeh, E. S. (2018b). Hybrid clustering analysis using improved krill herd algorithm. *Applied Intelligence* 48: 4047-4071. <http://scihub.tw/10.1007/s10489-018-1190-6>
- [11] Kamgar, R. Hatefi, S. M. Majidi, N. (2018). A fuzzy inference system in constructional engineering projects to evaluate the design codes for RC buildings. *Civil Engineering Journal* 4: 2155-2172. <https://doi.org/10.28991/cej-03091147>