

مطالعه عددی رفتار تیرهای همبند بتن آرمه مقاوم‌سازی شده با ورق و میلگرد FRP

نجمه پوررجبی *

کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

رحمت مدندوست

دانشیار گروه عمران، دانشگاه گیلان

چکیده

مقاوم‌سازی تیرهای همبند در دیوار برشی به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای خود می‌تواند یک گزینه با ارزش باشد. امروزه کامپوزیت‌های پلیمری الیافی (FRP) به طور گسترده در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف این پژوهش بررسی عددی و مقایسه نتایج حاصل از مقاوم‌سازی برشی تیر همبند بتن آرمه توسط ورق‌های CFRP و GFRP به روش چسباندن به وجوه جانبی (EBR) و هم‌چنین میلگرد GFRP به روش نزدیک سطح (NSM) توسط نرم‌افزار المان محدود (ABAQUS)، می‌باشد. بنابراین مطالعات عددی جهت بررسی تاثیر روش‌های مذکور انجام شد. نتایج نمایانگر این مطلب است که استفاده از کامپوزیت‌های FRP در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری تیر مقاوم‌سازی شده تاثیر به‌سزایی داشته است. در روش EBR الیاف شیشه و کربن به ترتیب در افزایش شکل‌پذیری و افزایش مقاومت مؤثرتر واقع می‌شوند. البته روش NSM با افزایش ۴۴ درصدی مقاومت برشی و ۷۰ درصدی شکل‌پذیری تیر همبند، بسیار مؤثرتر از روش EBR است.

واژه‌های کلیدی: تیر همبند، مقاوم‌سازی، المان محدود، روش چسباندن به وجوه جانبی (EBR)، روش نزدیک سطح (NSM).

* نویسنده مسئول: Poor.rajabi.apr@gmail.com

۱- مقدمه

به همین دلیل روش مسلح سازی خارجی با میلگرد نیز مد نظر قرار گرفت. در سال ۱۹۹۷ کارنیز و همکاران جهت مسلح سازی خارجی تیرهای بتن مسلح، دو میله هر یک در طرفین تیر همتراز با میلگردهای داخلی قرار دادند، اما این روش تنها برای تقویت خمشی مناسب می باشد [۶].

در سال ۲۰۰۶ ادھیکاری و موتسویوشی، طی یک تحقیق آزمایشگاهی در مورد تقویت قاب صلب بتن آرمه در مقابل شکست برشی ادعا کردند که خاموت های مهار خارجی موثرترین روش بوده چون مقاومت تیر تقویت شده به اندازه ی ۱۱۷٪ بالاتر از تیر کنترل بدست آمد [۷].

هاویله در سال ۲۰۱۴ نیز آرایشی را برای مقاوم سازی تیر بتن آرمه توسط میلگرد GFRP به روش NSM ارائه نمود. بررسی نتایج در هر دو فاز آزمایشگاهی و عددی نشان داد که این روش مقاومت برشی را ۴۰ تا ۶۰ درصد و شکل پذیری تیر بتنی را تا ۷۰ درصد ارتقا می دهد [۸].

از آنجایی که تیرهای همبند به عنوان تیر عمیق نسبت به تیرهای معمولی بیشتر مستعد شکست برشی هستند و مطالعات در این زمینه محدود می باشد در مطالعه حاضر به بررسی مقاوم سازی برشی تیر همبند بتن آرمه توسط ورق های FRP چسبانده شده به وجوه تیر (EBR) و همچنین توسط میلگرد FRP با روش نزدیک سطح (NSM)، با استفاده از مدلسازی عددی در نرم افزار آباکوس پرداخته شده است.

۲- تشریح نمونه آزمایشگاهی مورد استفاده جهت صحت سنجی

فرتنی به منظور بررسی رفتار دیوارهای برشی کوپله تیر همبند آن را تحت بارگذاری چرخه ای مورد آزمایش قرار داد [۹]. تیر با عمق ۳۵۶ میلی متر، طول ۹۱۴ میلی متر و عرض ۲۵۴ میلی متر ساخته شد. مقاومت فشاری بتن ۳۵ مگاپاسکال می باشد. از میلگردها با رده فولاد A36 با مدول الاستیسیته ۱۹۹۹۴۶ مگاپاسکال استفاده شد. هندسه و جزییات نمونه در شکل (۱)، اعمال بار، شرایط تکیه گاهی و نمودار بارگذاری رفت و برگشتی در شکل (۲) ارائه گردیده است.

تیرهای کوپله برای متصل کردن دو دیوار برشی در محل بازشو و انتقال نیروها بین آنها مورد استفاده قرار می گیرد. سختی، مقاومت و شکل پذیری تیرهای کوپله تاثیر قابل توجه ای بر رفتار دیوار برشی داراست، به گونه ای که خرابی موضعی تیرهای کوپله تحت تاثیر نیروی برشی ممکن است منجر به تخریب کلی سیستم باربر جانبی ساختمان گردد. بنابراین در صورت نیاز مقاوم سازی این تیرها امری ضروری می باشد. کامپوزیت های FRP برای این منظور بسیار موثر و کاربردی می باشد.

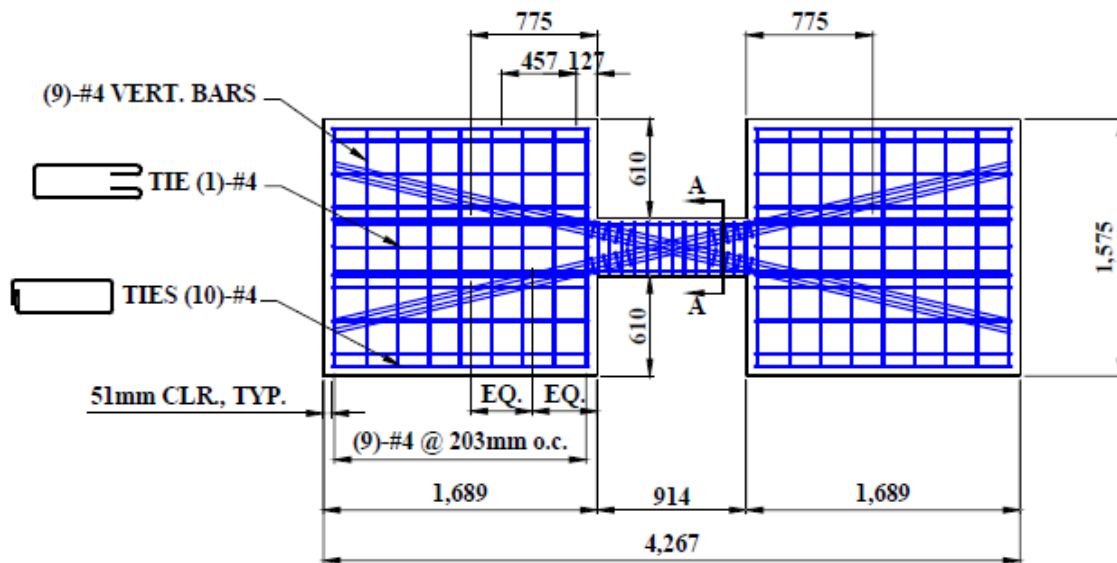
اولین پیشگام استفاده از FRP، میر در سال ۱۹۸۷ برای ترمیم شاهتیر های یک پل بوده است [۱]. در سال ۲۰۰۳ دیاگانا و دلمااس، با ارایه مدلی براساس پارگی و شکست الیاف کربن مشخص نمودند که روش مقاوم سازی با ورق خارجی FRP می تواند به طور چشمگیری ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح با ضعف برشی را افزایش دهد [۲].

ریاضی و همکاران در سال ۲۰۰۷، با بررسی نتایج آزمایشگاهی تیرهای همبند با آرماتورگذاری های مختلف که پس از شکست مورد تعمیر و تقویت با CFRP قرار گرفتند به این نتیجه دست یافتند که مقاومت تیر تقویت شده مطلوب و حتی بیش تر از تیر اولیه بوده اما سختی آن کم تر است. برای جبران ترد شکنی تیر همبند با آرماتورگذاری معمولی در این آزمایش از مسلح سازی قطری استفاده شد که مشکلات سازه ای در برداشت. بنابراین استفاده از CFRP که ظرفیت برشی را از ۳۳/۱ کیلونیوتن در تیر اولیه به ۲۵۳ کیلونیوتن در تیر تقویت شده می رساند مناسب و منطقی محسوب می گردد [۳].

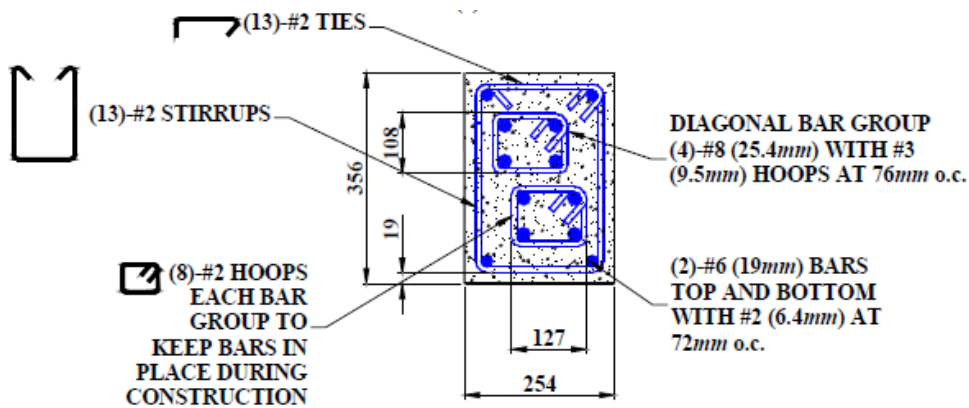
سانداراجا و راجماهان در سال ۲۰۰۹، با مقایسه آرایش های مختلف نوار و ورق های GFRP به این نتیجه رسیدند که استفاده از قنداق U شکل موثرترین گزینه در افزایش ظرفیت باربری برشی می باشد و هم چنین استفاده از نوارهای مورب در افزایش سختی بسیار کارآمدند [۴].

البته مطالعات انجام شده طی دهه ۱۹۹۰ برای تقویت برشی تیرهای بتن مسلح توسط ورق FRP، نمایانگر این مطلب بودند که تیرهای تقویت شده تحت تاثیر یکی از دو مود گسیختگی کششی FRP و یا جدا شدگی FRP، دچار شکست برشی می گردند [۵].

مطالعه عددی رفتار تیرهای همبند بتن آرمه مقاوم سازی شده ...

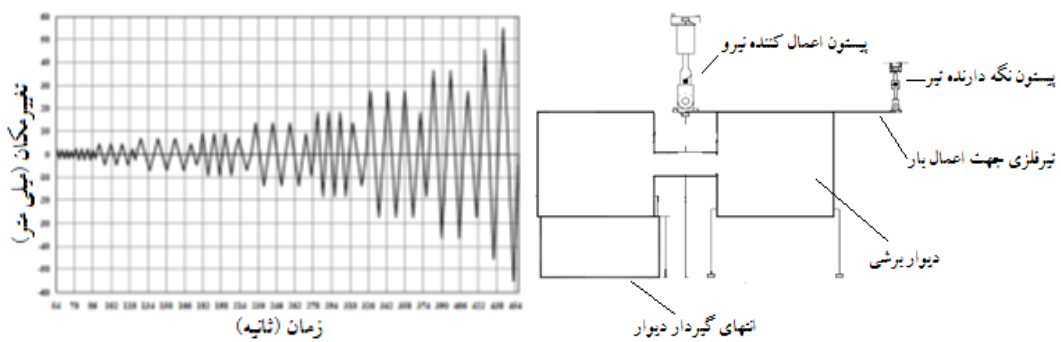


الف- دیوار برشی و تیر همبند



ب- مقطع A-A

شکل ۱- جزئیات نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی و تیر همبند [۹]



ب- نمودار بار گذاری

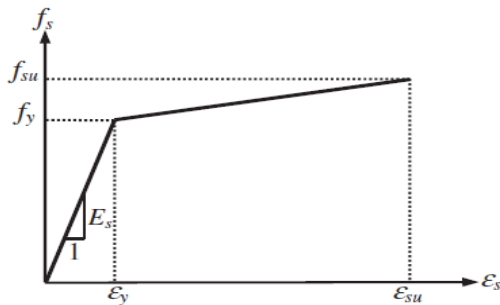
الف- شرایط تکیه گاهی و اعمال بار

شکل ۲- شرایط تکیه گاهی، اعمال بار و نمودار بار گذاری رفت و برگشتی [۹]

۳- مدل المان محدود

خطی الاستوپلاستیک استفاده گردید که منحنی آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. برای مدلسازی اندرکنش بتن و فولاد از قید مدفون استفاده شد.

نمونه آزمایشگاهی بالا و المان های مورد استفاده جهت تقویت توسط نرم افزار المان محدود ABAQUS با استفاده از تحلیل استاتیکی، به شرح زیر مدلسازی شد:



شکل (۳) منحنی تنش- کرنش فولاد [۱۱]

۳-۱- بتن

المان در نظر گرفته شده جهت مدلسازی بتن، المان C3D8R از نوع SOLID هشت گرهی با ۳ درجه آزادی در هر گره و با روش انتگرال گیری کاهش یافته می باشد. هم چنین برای مدلسازی رفتار بتن از مدل آسیب پلاستیک بتن در نظر گرفته شد.

۳-۳- ورق FRP

برای مدلسازی الیاف CFRP و GFRP از المان S4R، از خانواده SHELL، با ۴ گره و ۶ درجه آزادی در هر گره استفاده شد. رفتار آن نیز در ناحیه الاستیک به صورت Lamina و گسیختگی آن بر پایه تئوری هاشین در نظر گرفته شد. خصوصیات مورد استفاده مطابق جدول (۱) است [۱۰].

۳-۲- فولاد

برای معرفی آرماتورهای طولی تیر از المان خطی دو نقطه‌ای Beam (B31) و سایر آرماتورها از المان های خرپایی Truss (T3D2) استفاده می شود. المان های خرپایی تنها قادر به انتقال نیروی محوری هستند. هم چنین جهت مدلسازی رفتار آرماتورها از مدل دو

جدول ۱- مشخصات مورد نیاز جهت مدلسازی ورق های FRP در نرم افزار [۱۰]

خصوصیات	E-galss/Epoxy	Carbon/Epoxy [AS4/3501-6]
چگالی [kg/m ³]	۲۱۰۰	۱۵۸۰
مدول الاستیسیته طولی E ₁ [GPa]	۳۹	۱۵۱
مدول الاستیسیته عرضی E ₂ [GPa]	۸/۶	۱۰/۱
مدول برشی درون صفحه‌ای G ₁₂ [GPa]	۳/۸	۵/۷
مدول برشی برون صفحه‌ای G ₂₃ [GPa]	۳/۰	۳/۴
ν ₁₂	۰/۲۸	۰/۲۴
ν ₂₁	۰/۰۶	۰/۰۲
مقاومت کششی طولی F _{1,t} [MPa]	۱۰۸۰	۲۲۸۰
مقاومت کششی عرضی F _{2,t} [MPa]	۳۹	۵۷
مقاومت برشی درون صفحه‌ای F ₆ [MPa]	۸۹	۷۱
مقاومت فشاری طولی F _{1,c} [MPa]	۶۲۰	۱۴۴۰
مقاومت فشاری عرضی F _{2,c} [MPa]	۱۲۸	۲۲۸

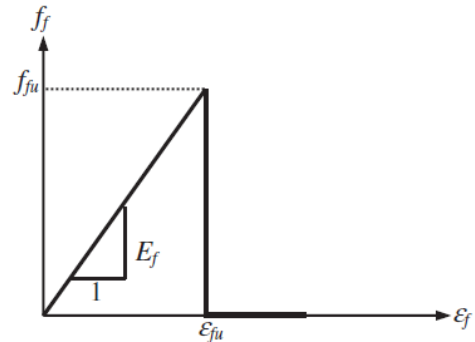
۳-۴- میلگرد GFRP

میلگردهای مورد استفاده در این مطالعه دارای قطر ۱۰ میلی متر، مدول الاستیسیته ۴۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲۶ می باشد. مشخصات مواد مورد استفاده جهت مدلسازی اجزای محدود مطابق جدول (۲) می باشد.

المسلم و همکاران این میلگردها را نیز با استفاده از المانهای دوگره‌ی Truss مدل کرد و رفتار آن ها با توجه به شکل (۴) با استفاده از نرخ کرنش و منحنی تنش کرنش مدل می شود [۱۱].

جدول ۲- مشخصات مواد مورد استفاده جهت مدل سازی

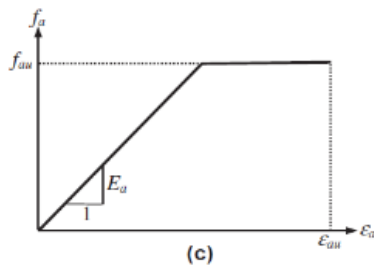
مصلح	چگالی (kg/m ³)	تنش تسلیم (MPa)	کرنش پلاستیک
میلگرد GFRP	۱۹۹۰	۷۴۳	۰/۰۰۰۰۱
اپوکسی	۱۶۵۰	۱۵	۰/۴۹۶



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش GFRP [۱۱]

۴- صحت سنجی مدل اجزا محدود

جهت صحت سنجی مدل اجزا محدود، تیر DBCB در مطالعه فرتی تحت بارگذاری رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفت [۹]. این اعمال بار و اندازه گیری جابجایی در وسط دهانه تیر است. این مدل سازی در شکل (۷) نمایش داده شده است. صحت سنجی از طریق مقایسه پوش نمودار نیروی برشی-تغییر مکان انجام گرفته و مطابق شکل (۸) تطابق خوبی بین مدل آزمایشگاهی با نمونه المان محدود حاصل شد. هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی در جا بجایی های تقریباً یکسانی (حدود ۳۷ میلی متر) به ظرفیت نهایی خود رسیدند. همانطور که مشخص است ظرفیت نهایی مدل آزمایشگاهی و عددی به ترتیب ۶۰۰/۹۳ کیلو نیوتن و ۵۵۰/۱۱۹ کیلو نیوتن می باشد بنابراین درصد خطا در حدود ۸ درصد تخمین زده می شود.



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش رزین اپوکسی [۱۱]

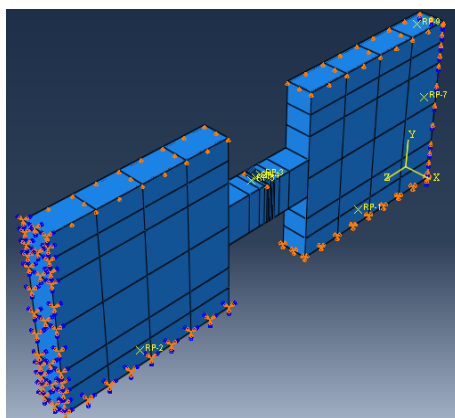
۳-۵- رزین اپوکسی

با توجه به این که اپوکسی مورد استفاده برای NSM بعد از شیارزنی سطح بتن و قرار گرفتن داخل شیار، مقطعی مطابق شکل (۵) را به خود اختصاص داده، بنابراین جهت مدل سازی آن از المان SOLID استفاده شد.

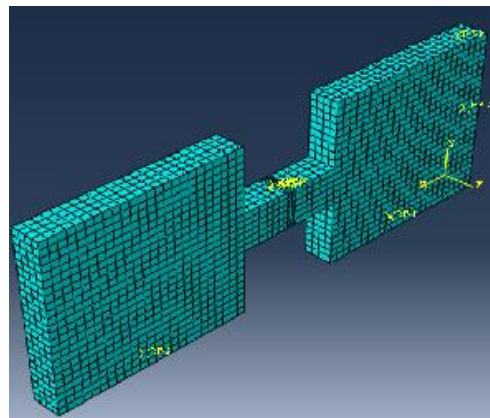


شکل ۵- شیار بتن و قرار گیری اپوکسی در روش NSM

رفتار اپوکسی های مورد استفاده در هر دو روش به عنوان یک ماده الاستوپلاستیک با توجه به شکل (۶)، با استفاده از نرخ کرنش و منحنی تنش-کرنش مدل می گردد. اپوکسی مورد استفاده دارای مدول الاستیسیته ۴/۳ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۷ می باشد [۱۱]. مشخصات مواد مورد استفاده جهت مدل سازی اجزای محدود مطابق جدول (۲) می باشد.

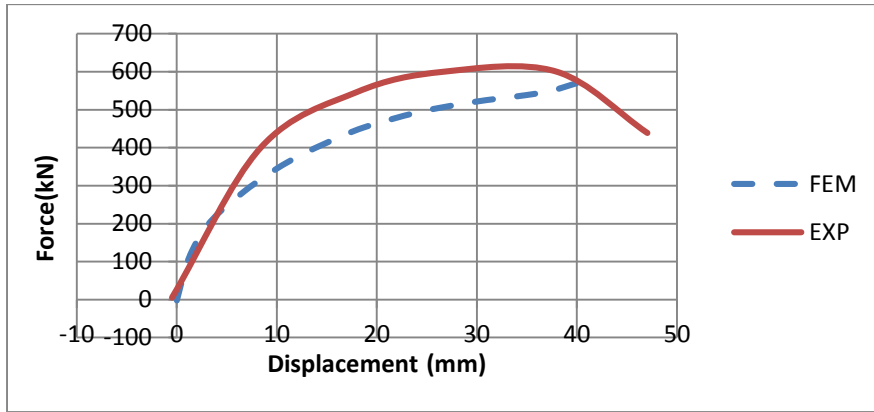


ب- شرایط مرزی



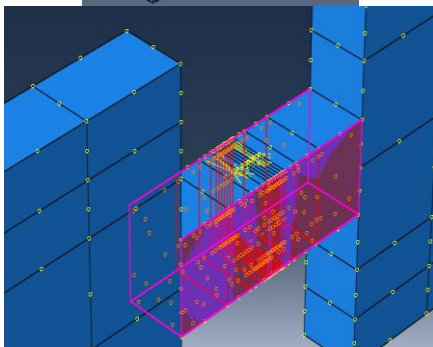
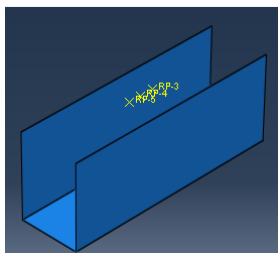
الف- مش بندی

شکل ۷- مدل اجزا محدود تیر همبند DBCB

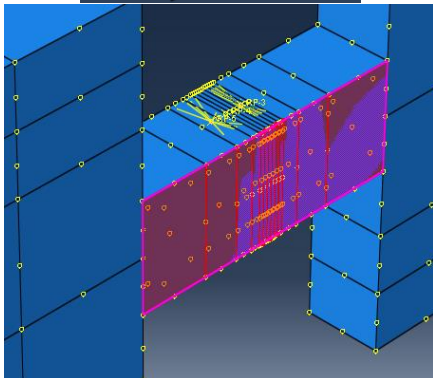
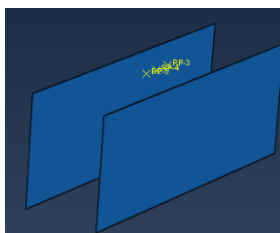


شکل ۸- مقایسه پوش نمودار نیرو-تغییر مکان (وسط دهانه تیر) آزمایشگاهی با مدل اجزای محدود

قطر خاموت به کار برده شده در این تیر ۶ میلی متر می باشد، در صورتی که حداقل قطر آرماتور برشی طبق مبحث نهم مقررات ملی، ۸ میلی متر است [۱۲]. بنابراین تیر نیازمند تقویت است.



شکل ۹- تقویت U شکل



شکل ۱۰- تقویت جانبی

۵- تشریح روش های تقویت

در ادامه به منظور بررسی تأثیر مقاوم سازی، تیر مدلسازی شده، توسط ورقهای CFRP و GFRP در سراسر طول دهانه با دو آرایش U شکل (شکل ۹) و جانبی (شکل ۱۰) تقویت شد. ورق های FRP دارای ضخامت ۰/۱۷۶ میلی متر می باشند. هم چنین از میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی متر با آرایش نمایش داده شده در شکل (۱۱)، نیز استفاده گردید. این آرایش جهت تقویت برشی در روش NSM، توسط هاویله و همکاران مورد بررسی آزمایشگاهی و عددی قرار گرفته است. به این ترتیب که در هر دو وجه جانبی در فواصل ۱۲۰ میلی متری شکاف هایی عمودی با مقطعی به ابعاد ۱۶*۱۶ میلیمتر مربع ایجاد گردیده و با اپوکسی پر شده و سپس میلگردها به صورت عمودی داخل این حفره ها قرار می گیرد [۸].

۶- تحلیل و مقایسه نتایج

پس از اعمال روش های تقویت، جهت نمایش تاثیر روش های مذکور بر افزایش ظرفیت برشی تیر همبند، مقایسه ای بین نمودارهای نیرو- تغییر مکان نمونه های تقویت شده با نمونه صحت سنجی شده انجام گرفت.

مطالعه عددی رفتار تیرهای همبند بتن آرمه مقاوم سازی شده ...

NSM می باشد. لازم به ذکر است تغییر مکان های نهایی ذکر شده بر اساس گسیختگی تیر همبند و تجاوز از تنش های مجاز می باشد.

جدول ۳- راهنمای نامگذاری نمونه ها

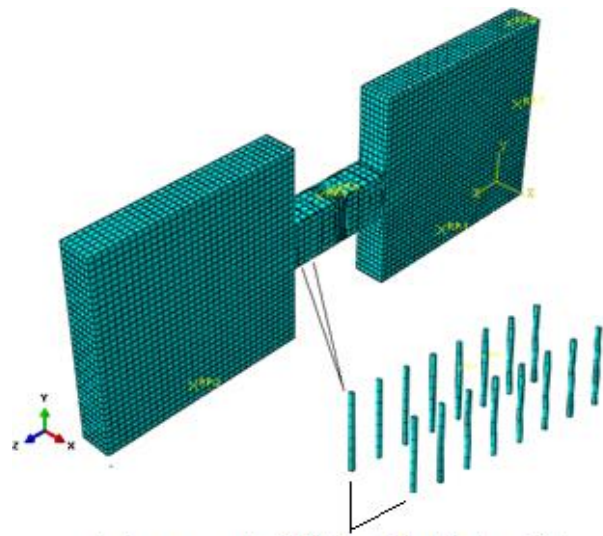
نامگذاری	نمونه ها
CM	تیر مرجع بدون تقویت
GU	تقویت U شکل با ورق GFRP
CU	تقویت U شکل با ورق CFRP
GL	تقویت جانبی با ورق GFRP
CL	تقویت جانبی با ورق CFRP
GR	تقویت جانبی با میلگرد (NSM) GFRP

لازم به ذکر است CM مخفف Control Model، حرف G در هر یک از نامگذاری ها نماد Glass، حرف C نماد Carbon، حرف U نماد تقویت U شکل، حرف L نماد تقویت وجوه جانبی و حرف R نماد Rod است.

به طور مشخص تقویت در همه موارد موجب افزایش شکل پذیری و مقاومت برشی تیر همبند شده است. بررسی شکل (۱۳) در کنار موارد (الف و ب) از شکل (۱۲) نشان می دهد که آرایش U شکل ورق های کربنی بیشترین تاثیر را روی ظرفیت برشی در روش EBR داراست و ورق های کربنی نسبت به شیشه در افزایش ظرفیت برشی موفق تر عمل می کنند. این امر را می توان از یک طرف به دلیل مدول الاستیسیته بالاتر الیاف کربن و از طرف دیگر، به دلیل وجود هماهنگی بیشتر در رفتار تیر با الیاف کربن که ناشی از کرنش گسیختگی پایین تر الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه می باشد، دانست. همچنین بررسی شکل (۱۳) در کنار موارد (الف و ج) در شکل (۱۲) نشان می دهد که الیاف شیشه نسبت به کربن در افزایش شکل پذیری مؤثرتر است و این مسأله به دلیل کرنش تسلیم بالاتر الیاف شیشه می باشد. البته در نهایت با بررسی شکل (۱۳) در کنار مورد (و) در شکل (۱۲) میتوان دریافت که مؤثرترین روش در تقویت تیر یاد شده، استفاده از میلگردهای FRP به روش NSM می باشد. زیرا در این روش با افزایش سطوح تماس بین مصالح تقویت کننده و تیر از طریق ایجاد شیار، هماهنگی بیشتری در رفتار تیر و مصالح افزوده شده ایجاد می شود. تنش فون مایسز این نمونه ها به عنوان معیاری برای گسیختگی ورق های FRP در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.



الف- فواصل میلگردها



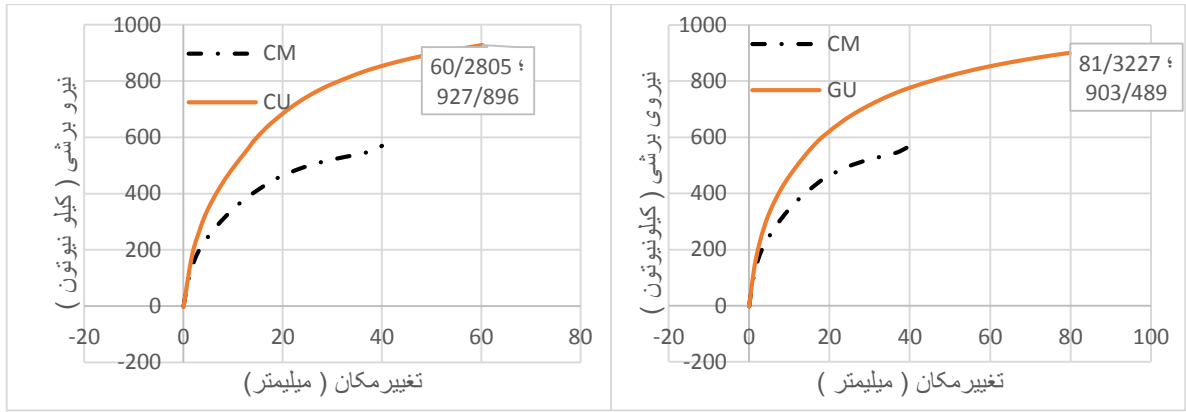
اپوکسی های قرار گرفته در شکاف های دو وجه جانبی تیر

ب مش بندی تیر تقویت شده و اپوکسی و محل قرار گیری اپوکسی در مدل اجزای محدود

شکل ۱۱- آرایش میلگرد GFRP در وجوه جانبی تیر

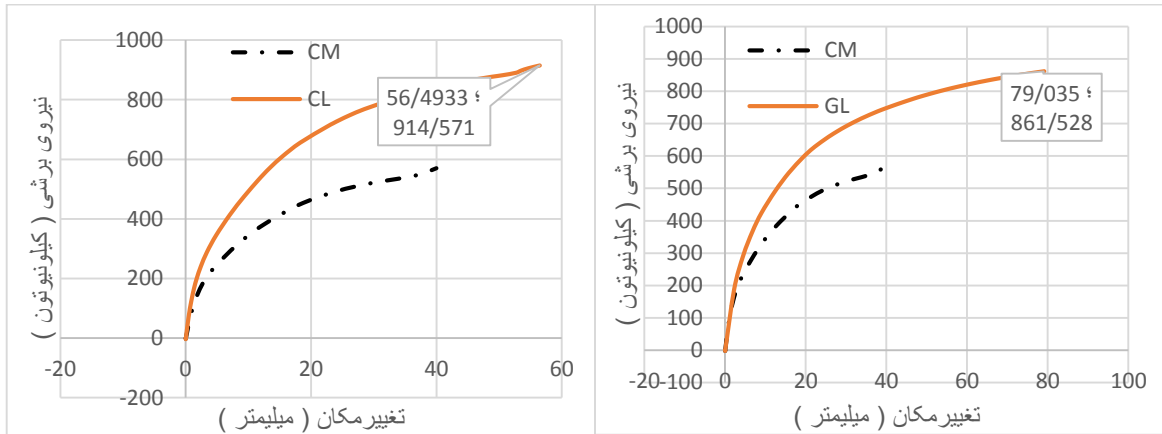
همان طور که از نتایج مطالعات گذشته انتظار می رود روش EBR در بهبود عملکرد برشی و شکل پذیری تیر موثر می باشد و قادر به افزایش ظرفیت باربری نهایی در حدود ۴۰ درصد است [۳ و ۱۳].

همچنین مطابق مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده در زمینه تاثیر NSM در تقویت برشی انتظار افزایش ۴۰ تا ۵۰ درصدی ظرفیت برشی می رود [۸]. راهنمایی نامگذاری نمونه ها در جدول (۳) ذکر شده است. نتایج تقویت به روش های مذکور با ارائه جدول (۴) و نمودار های نیرو-تغییر مکان هر یک از روش ها، در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. همچنین تاثیر هر یک از روش های مقاوم سازی مذکور بر ظرفیت برشی و شکل پذیری تیر همبند در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. موارد (الف) تا (د) در شکل (۱۲) مربوط به روش EBR و مورد (و) مربوط به روش



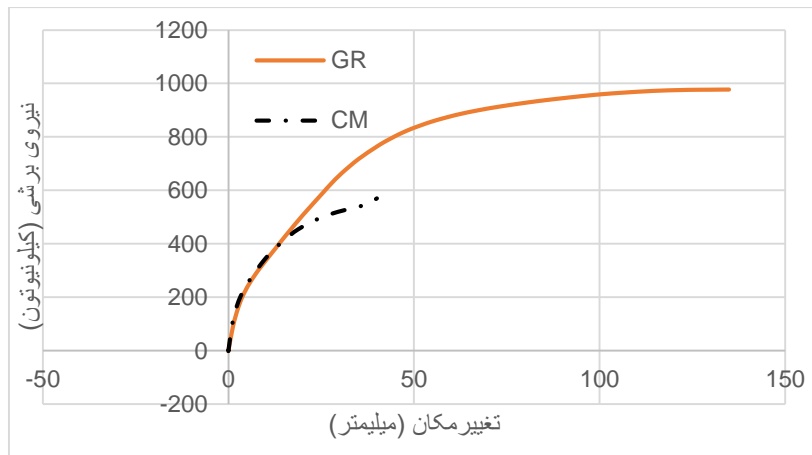
ب) تقویت U شکل با ورق CFRP (CU)

الف) تقویت U شکل با ورق GFRP (GU)



د) تقویت جانبی با ورق CFRP (CL)

ج) تقویت جانبی با ورق GFRP (GL)

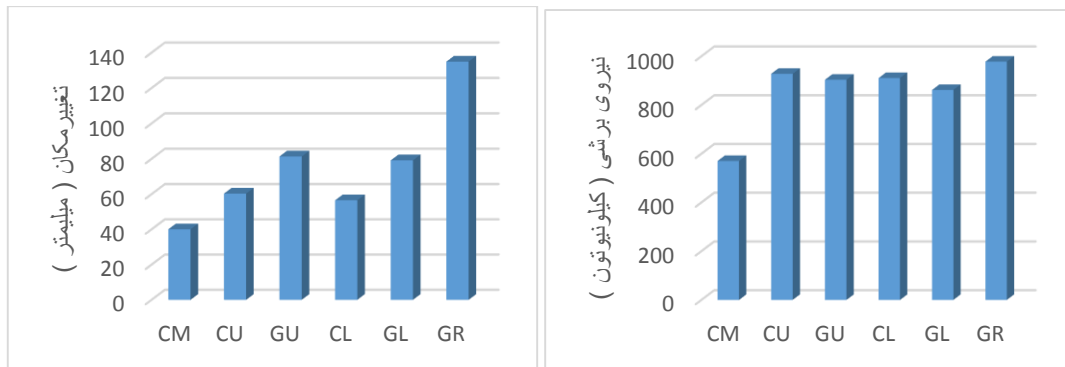


و) تقویت جانبی با میلگرد GFRP (NSM) (GR)

شکل ۱۲- (الف - و) - مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و مدل های عددی

جدول ۴- نتایج تقویت به روش های ذکر شده

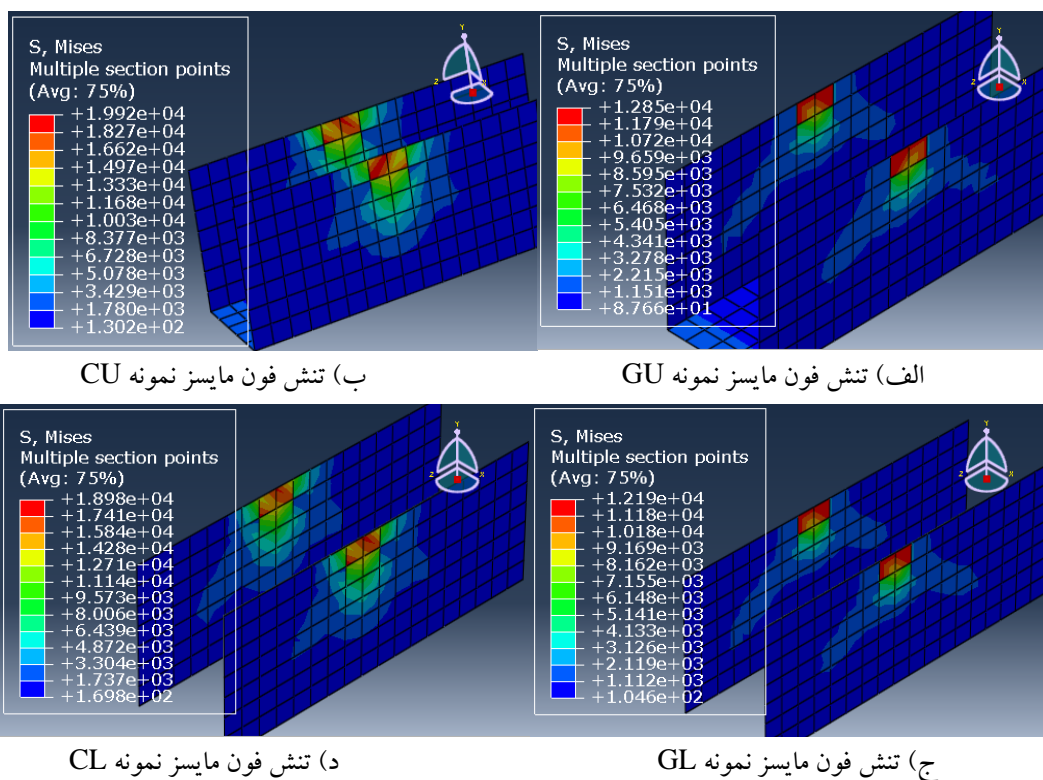
نمونه ها	نیرو (kN)	درصد افزایش نیرو	تغییر مکان نهایی (mm)	درصد افزایش تغییر مکان
CU	۹۲۷/۹۰	۴۰	۶۰/۲۸	۳۰
GU	۹۰۳/۴۵	۳۵	۸۱/۳۲	۵۱
CL	۹۱۴/۵۷	۳۷	۵۶/۴۹	۲۹
GL	۸۶۱/۵۳	۳۳	۷۹/۰۳	۴۹
GR	۹۷۷/۸۱	۴۴	۱۳۴/۹	۷۰



ب- مقایسه شکل پذیری تیرهای تقویت شده

الف- مقایسه نیروی برشی تیرهای تقویت شده

شکل ۱۳- مقایسه تاثیر روش های مذکور



ب) تنش فون مایسز نمونه CU

الف) تنش فون مایسز نمونه GU

د) تنش فون مایسز نمونه CL

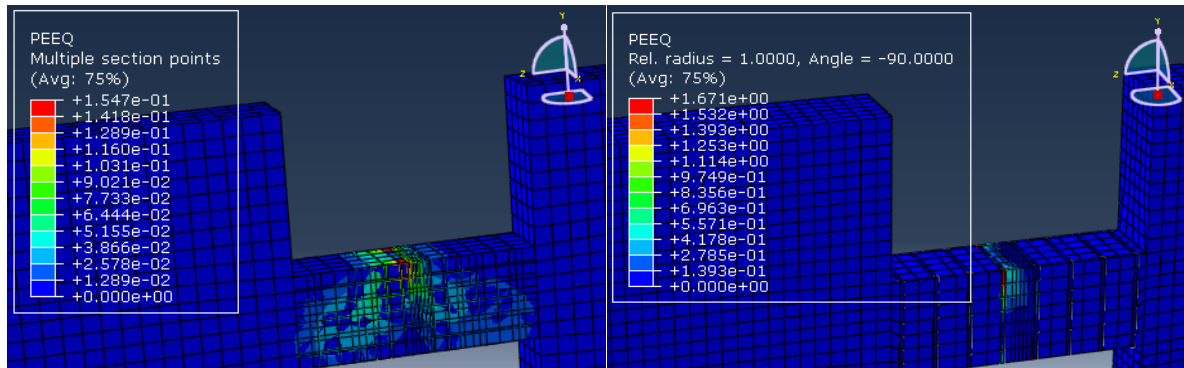
ج) تنش فون مایسز نمونه GL

شکل ۱۴- (الف-د)- تنش فون مایسز نمونه های تقویت شده با ورق

الیاف کربن با آرایش U شکل است. نتایج حاصله از روش NSM نیز با افزایش ۴۴ درصدی مقاومت برشی و ۷۰ درصدی شکل‌پذیری، تطابق خوبی با مطالعه آزمایشگاهی هاویلده برای تقویت برشی تیر بدون خاموت، را نشان داد. طبق این آزمایش تیر بدون خاموت پس از تقویت برشی با روش NSM با آرایش ذکر شده در شکل (۱۰) با افزایش ۴۰ تا ۵۰ درصدی مقاومت برشی و افزایش ۶۰ تا ۷۰ درصدی شکل‌پذیری همراه بوده است [۸]. شکل (۱۵) با نمایش ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک برای نمونه CU و GR تاثیر روش NSM

همان طور که قابل مشاهده است بیشترین تنش‌ها در وجوه جانبی تیر و در ورق‌های FRP ایجاد شده است. بنابراین تنش‌ها به خوبی از تیر به مصالح تقویت کننده انتقال یافته و می‌توان پیش‌بینی نمود که گسیختگی‌ها و خرابی‌های احتمالی در ورق‌ها، در وجوه جانبی و محل تشکیل مفصل پلاستیک تیر همبند ایجاد خواهد شد. همچنین ورق کربن نسبت به شیشه (به دلیل مدول الاستیسیته بالاتر) و آرایش U شکل نسبت به اتصال به وجوه جانبی (ایجاد سطح تماس بیشتر و امکان انتقال بیشتر تنش‌ها) تحمل تنش بیشتری دارند. به این ترتیب مناسب‌ترین گزینه در روش EBR استفاده از

را نمایش می دهد. این روش به وضوح بسیار موثرتر از روش EBR است. شکل (۱۵) نشانگر انتقال مناسب تنش ها به میلگرد و مصالح تقویت است. زیرا در تیر بدون تقویت، حداکثر تنش در وجه بالایی و



الف- محل تشکیل ناحیه پلاستیک نمونه GR ب- محل تشکیل ناحیه پلاستیک نمونه CU

شکل ۱۵- مکانیزم شکست تیر های همبند

میلگرد GFRP به روش NSM می باشد. این مطلب خود نمایانگر کارایی مناسب آرایش به کار رفته برای میلگردهای GFRP است. فاصله ۱۲۰ میلی متری بین میلگردهای GFRP به طور مطلوبی گسترش ترک را کنترل و محدود می کند.

۸- مراجع

- [1] U. Meier, (1987), "Bridge repair with high performance composite materials", Material and Technique, 15: 125 – 128.
- [2] C. Diagona, A. Gedalia and y. Delmas, (2003), "Shear strengthening effectiveness with CFRP strips", Engineering Structures, 25: 507-516.
- [3] M. Riazi, M. R. Esfahani and H. Mohamadi, (2007), "Behavior of coupling beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets", IJE Transactions B: Applications Vol. 20, No. 1, April 2007 – 49.
- [4] M.C. Sundararaja and S. Rajamohan, (2009), "Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips – An experimental study", Construction and Building Materials, 23: 856–864.
- [5] Y. Mitsui, K. Murakami, K. Takeda and H. Sakai, (1998), "A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fiber sheets", Compos. Interfaces, 5(4): 285–295.
- [6] J. Cairns and S.F.A. Rafeeqi, (1997), "Behaviour of reinforced concrete beams strengthened by

۷- نتیجه گیری

از بررسی روش های مختلف تقویت تیر همبند موجود در این مطالعه نتایج زیر قابل استنتاج می باشد:

- ۱- بیشترین تنش ها در ورق های FRP در وجوه جانبی اتفاق افتاده است که نشان دهنده مستعد بودن گسیختگی ورق ها در این نقاط می باشد.
- ۲- مفصل پلاستیک در محل اعمال بار و جایی که تیر بیشترین میزان جا بجایی را داراست تشکیل شده است.
- ۳- الیاف کربن به دلیل رفتار هماهنگ تر با بتن، به دلیل کرنش گسیختگی پایین تر نسبت به الیاف شیشه، در افزایش ظرفیت تیر مؤثرتر است.
- ۴- آرایش U شکل ورق های FRP توان باربری را به اندازه ۳ تا ۵ درصد (۱۳ تا ۴۱ کیلو نیوتون) بیشتر از تقویت وجوه جانبی افزایش می دهد.
- ۵- الیاف کربن در افزایش باربری برشی، به اندازه ۵ درصد (۲۴ تا ۴۷ کیلو نیوتون) موثرتر از الیاف شیشه است.
- ۶- الیاف شیشه در افزایش شکل پذیری در حدود ۲۰ درصد موثرتر از ورق کربن عمل می کند. و این مطلب به دلیل کرنش تسلیم بالای این الیاف می باشد.
- ۷- موثرترین روش تقویت با افزایش چشمگیر و ۴۴ درصدی توان باربری برشی و ۷۰ درصدی شکل پذیری تیر همبند، استفاده از

external unbonded reinforcement”, *Construction and Building Materials*, 11 (5-6): 309-317.

[7] B. Adhikary and H. Mutsuyoshi, (2006), “Shear strengthening of RC beams with web-bonded continuous steel plates”, *Construction and Building Materials*, 20: 296–307.

[8] R. A. Hawileh, G. Sakar, M. Z. Naser, J.A.Abdalla and M.Tanarlan, (2014), “Nonlinear behavior of shear deficient RC beams strengthened with near surface mounted glass fiber reinforcement under cyclic loading”, *Materials and Design* 61 (2014) 16–25

[9] P.J. Fortney, (2005), *The Next Generation of Coupling beams*. Ph.D. Dissertation, University of Cincinnati. USA..

[۱۰] ص. یعقوبی، م. توکلی زاده، (بهار ۱۳۹۰)، «بررسی تاثیر چیدمان های مختلف ورق های FRP در مقاوم سازی لوله های مدفون بتنی»

[11] H. Tarek Almusallam, H. M. Elsanadedy, Y. A. Al-Salloum and H. Sale Alsayed, (2013), “Experimental and numerical investigation for the flexural strengthening of RC beams using near-surface mounted steel or GFRP bars”, *Construction and Building Materials* 40 145–161.

[۱۲] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان های بتن آرمه. ویرایش چهارم ۱۳۹۲.

[13] A. Kheyroddin, H. Naderpour, ; G. Ghodrati and S.R. Hoseini, (2011), “INFLUENCE OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS ON UPGRADING SHEAR BEHAVIOR OF RC COUPLING BEAMS”, *IJST, Transactions of Civil Engineering*, Vol. 35, No. C2, pp 155-169.

Numerical Study on Behavior of Reinforced Concrete Coupling Beams Strengthened with FRP Bar and Sheets

Najmeh Pourrajabi *

Msc, Civil Eng, Department of Civil Engineering, University of Guilan

Rahmat Madandoust

Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan

Abstract

Retrofitting coupling beams in shear walls to improve their seismic performance can be a viable option. Fiber reinforced polymer (FRP) composites are widely used in strengthening reinforced concrete (RC) structures. This paper aims to investigate and compare the result of shear strengthening of RC coupling beams by means of CFRP & GFRP sheets, with externally bonded reinforcement (EBR) method and GFRP rods, with near surface mounted (NSM) method, using ABACUS software. Hence, numerical studies were conducted to analyze these methods. The results show that using FRP composites can increase the shear strength and ductility of strengthened coupling beam, effectively. In EBR method, carbon and glass fiber sheets are more effective to increase the strength and ductility, respectively. The NSM method increased the shear strength by 44% and also the ductility by 70%.

Keywords: Coupling beam, Strengthening, Finite element, Externally bonded reinforcement method, Near surface mounted method.

* Corresponding Author: Poor.rajabi.apr@gmail.com