

بررسی آزمایشگاهی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ترمیم شده با ورق های FRP تحت بارهای رفت و برگشتی

سید علیرضا فاموری حسینی زاده^۱، محمد امیر نجفقلی پور^۲، سید مهدی دهقان^۳، نویسا اصغر نژاد^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه صنعتی شیراز
A.Famouri@sutech.ac.ir
- ۲- استادیار دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز
Najafgholipour@sutech.ac.ir
- ۳- استادیار دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز
SMDehghan@sutech.ac.ir
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه صنعتی شیراز
N.Asgharnejad@sutech.ac.ir

چکیده

برای ترمیم ساختمان های آسیب دیده که یک زلزله مخرب را تجربه کرده اند، روش های ترمیم مختلفی پیشنهاد شده است. استفاده از ورق های الیاف کربنی (FRP) به عنوان مصالح نوین ساختمانی با خواص مکانیکی مناسب به تازگی توسط محققان و مهندسان برای ترمیم و همچنین مناسب جهت ترمیم بتن مسلح آسیب دیده موجود در نظر گرفته شده است. هدف مقاله حاضر، بررسی اثر ترمیم خمشی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده با استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (FRP) بر عملکرد و رفتار تیرهای بتن مسلح آسیب دیده تحت بارهای رفت و برگشتی می باشد. در این بررسی آزمایشگاهی، از پنج تیر بتن مسلح آسیب دیده در مقیاس واقعی تحت بارهای رفت و برگشتی و بار یکنوا بر اساس روش پیشنهادی ترمیم شده با الیاف FRP به عنوان نمونه های آزمایشگاهی در آزمایشگاه زلزله دانشگاه صنعتی شیراز استفاده شده است. ضخامت ورق های FRP، نوع بارگذاری و وضعیت چیدمان دورپیچ های FRP پارامترهای مورد آزمایش در این بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده ترمیم شده با الیاف کربنی نشان می دهد استفاده از این روش می تواند تیرها را از لحاظ مقاومت به وضعیت قبل از آسیب بازگرداند لازم به یادآوری است که تحقق این امر تا حد فراوانی به مهار لایه های تقویت به سطح بتن برای جلوگیری از هر گونه جداشدگی زودهنگام به خصوص تحت بارهای رفت و برگشتی وابسته است.

کلمات کلیدی:

الیاف کربن FRP، تیر بتن مسلح، بررسی آزمایشگاهی، ترمیم، بارگذاری رفت و برگشتی

۱. مقدمه

امروزه در کشور ما به دلیل شرایط لرزه خیزی، وجود سازه های قدیمی، نواقص ناشی از شرایط محیطی یا داخلی مصالح و نیز ضعف های موجود در طراحی و اجرای سازه ها، بحث ترمیم سازه ها مطرح است. با توجه به گسترش روزافزون صنعت ساختمان در ابعاد مختلف، استفاده از ایده های نو و جدید در کیفیت و نحوه اجرا، انتخاب مصالح و... از ملزومات این پیشرفت ها می باشد.

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی در تمامی کشورها مورد استفاده قرار می گیرد. در بعضی از کشورها، بتن مسلح اصلی ترین مصالح ساختمان به شمار می رود. بتن مسلح در ساخت پل ها، انواع ساختمان ها، سازه های زیر زمینی، مخازن آب، برج های مخابراتی، سازه های ساحلی و سکوهای نفتی و حتی در ساخت کشتی ها مورد استفاده قرار می گیرد.

یکی از مشکلات اصلی در صنعت ساختمان آسیب ساختمان های بتنی بعد از وقوع زلزله به شمار می رود؛ به گونه ای که ترمیم سازه ها یکی از زمینه های پویا در صنعت ساختمان می باشد. این کار به خصوص در مورد آثار و ابنیه تاریخی از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردار است. از سوی دیگر با توجه به اینکه عناصر باربر لرزه ای تحت بارهای رفت و برگشتی قرار می گیرند، از این رو ارزیابی عملکرد عناصر ترمیم شده تحت بارهای رفت و برگشتی از اهمیت بالایی برخوردار است. با این وجود با توجه به پیچیدگی رفتار FRP انجام مطالعات آزمایشگاهی بدین منظور اهمیت ویژه ای دارد.

از سوی دیگر با توجه به اینکه یکی از زوایای مرسوم در عناصر تقویت شده و ترمیم شده توسط FRP جداشدگی^۱ زود هنگام می باشد بنابراین استفاده از ایده های کاربردی برای جلوگیری از این نوع شکست زود هنگام از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

بر این اساس در این تحقیق با هدف بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ترمیم شده توسط الیاف FRP (شکل ۳) تحت بارهای رفت و برگشتی تعدادی تیر که از قبل تحت بارگذاری آسیب دیده شده اند و ترمیم شده اند تحت آزمایش رفت و برگشتی قرار می گیرد.

معرفی الیاف کربنی FRP

امروزه روش های متعددی برای ترمیم سازه های موجود بتن مسلح ارائه شده اند که در این جا به تعدادی از آنها اشاره می شود [۱ و ۲]:

– استفاده از پوشش و غلاف فولادی

– استفاده از ورقهای پوششی FRP^۲

– استفاده از لایه های پوششی بتنی FRC^۳

هر یک از روش های مذکور محاسن و معایبی دارد که در انتخاب روش مقاوم سازی و ترمیم سازه ها تاثیر گذار است.

حرکت استمراری علم در عرصه ی مهندسی سازه و زلزله موجب شده است تا ترمیم سازه ها در سال های اخیر از روشهای نوین و مصالحی جدید بهره گیرد که در پیشینه طولانی ساخت و ساز سابقه نداشته است. در این میان، کامپوزیت های FRP از جایگاه ویژه برخوردار است؛ تا آن جا که به نظر برخی از متخصصان، FRP را باید مصالح ساختمانی هزاره ی سوم نامید [۲].

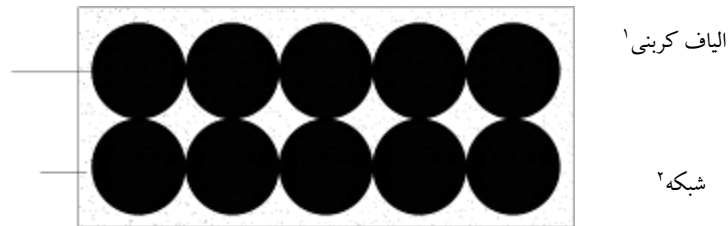
در کاربردهای مهندسی، اغلب به تلفیق خواص مواد نیاز است. کامپوزیت ها موادی چند جزئی هستند که در مجموع خواص آنها از هر کدام از اجزاء بهتر است ضمن آن که اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می بخشند.

کامپوزیت به موادی اطلاق میشود که حداقل از دو ماده متفاوت تشکیل شده باشد، که نقش یکی از آنها تقویت خواص مکانیکی و دیگری نقش شکل دادن و در کنار هم قرار دادن فاز دیگر را بر عهده دارد. ماده اول را فاز تقویت کننده و ماده دوم را فاز پرکننده یا زمینه می نامند (شکل ۱).

۱ - Debonding

۲ - Fiber Reinforced Polymer

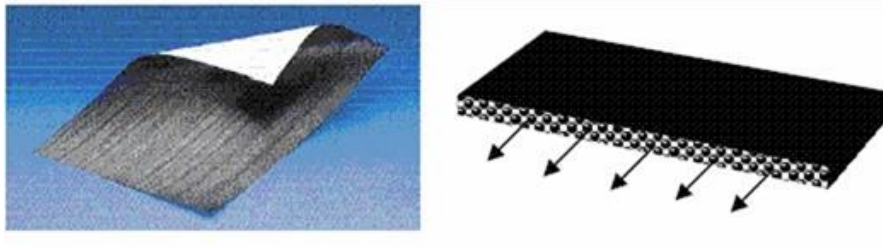
۳- Fiber Reinforced Concrete



شکل ۱- نمایی از مواد کامپوزیت

FRP چیست؟

این کلمه اختصاری از کلمات **Fiber Reinforced Polymer or Plastic** می باشد. به عبارت دیگر به یک ماده مرکب و کامپوزیتی اطلاق می شود که از فیبر یا الیاف تقویتی و ماتریس (ماده در برگیرنده) یا رزین از جنس پلیمر مطابق شکل ۲ تشکیل شده است. [۲]



شکل ۲- ورق FRP ساخته شده از فیبرهای ناهمسانگرد یک طرفه

در شکل ۳، نمونه ای از لایه های الیاف کربنی در آزمایشگاه عمران در دانشگاه صنعتی شیراز جهت انجام کار بر روی نمونه ها را مشاهده می شود.



شکل ۳- ورق های الیاف کربنی موجود در محل آزمایش

یکی از متداول ترین روش های تقویت و ترمیم سازه های بتن آرمه، استفاده از ورق های تقویتی FRP جهت بالابردن مقاومت خمشی و برشی اعضای بتنی می باشد. بر اساس ACI 440^۳ آیین نامه طراحی و مقاوم سازی با الیاف کربنی به دلیل مقاومت بالا، سبکی، اجرای ساده و مقاوم بودن در برابر خوردگی، استفاده از این مصالح روز به روز گسترش بیشتری پیدا کرده است. [۳]

۱ - Fiber Reinforced Polymer

۲- Matrix

۳ - ACI 440.2R-17 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures)

پیشینه پژوهش

در سال های اخیر پژوهش های بسیاری در زمینه ترمیم و تقویت بتن مسلح آسیب دیده با کمک روش های گوناگون انجام شده است. با این همه، این موضوع هنوز از اصلی ترین موضوع ها در زمینه کاربرد ورق های FRP در ترمیم می باشد که نظر پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است که به اختصار در زیر بیان شده است:

برخی از مزایای استفاده از FRP عبارتند از: دوام بالا، سبک بودن، مقاومت و مدول ارتجاعی بالای برخی از نمونه های آن، مقاومت در برابر شرایط محیطی و ترکیبات شیمیایی، نفوذ ناپذیری مغناطیسی، مقاومت در برابر ضربه، ضخامت کم، حمل و نقل آسان می باشد. [۳]

J.G.Teng و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۴]، با بررسی اثر FRP بر روی تیر بتنی مسلح تقویت شده با آن به این نتیجه رسیدند که مقاومت خمشی تیرهای بتن آرمه با تکیه گاه های ساده با چسباندن ورق های FRP به وجه کششی تیر بهبود می یابد. در بارگذاری یکنوا، تیرهای بتن آرمه ی تقویت شده با ورق های FRP، به دلیل جداشدگی زودرس و ناگهانی ورق به دلیل مهار نشدن آن، ممکن است تیر به ظرفیت نهایی خود نرسد.

Omrane Benjeddou و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۵]، با بررسی تعداد هشت نمونه از تیرهای بتنی مسلح آسیب دیده و ترمیم آن با ورق های FRP با آزمایش چهار نقطه ای تیرهای مذکور تحت بار یکنوا به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف کربنی باعث افزایش ظرفیت باربری و افزایش سختی تیرهای آسیب دیده و استفاده از دورپیچ^۲ در تغییر جداشدگی زودرس نیز موثرتر است. در این تحقیق سعی می شود ضمن رسیدن به اهداف فوق، با بررسی عرض های مختلف لایه FRP طولی به اندازه ۱۰ و ۵ سانتی متر، شکل های مختلف شکست را نشان بدهد و نتایج نشان داد ورق FRP طولی به عرض ۵ سانتی متر اتصال مناسب بین ورق و سطح بتن برقرار نمی کند و در پایان اثر سرعت در اجرا که منجر به اقتصادی بودن طرح می گردد را نیز با این روش تقویت مورد نظر قرار داد.

Vatani و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۶]، با بررسی تعداد دو عدد اتصال تیر به ستون بتنی مسلح آسیب دیده که دو لایه و یک جهت با ورق FRP تقویت شده بود و انتهای آن با روش دورپیچ کرد. انتهای ورق به صورت U شکل را تحت بار رفت و برگشتی^۳ مورد آزمایش خمشی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان دهنده افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۷ و ۳۲ درصد و افزایش شکل پذیری و سختی و میرایی به دلیل اتصال مناسب بین بتن و الیاف کربنی توسط چسب اپوکسی موجب گردیده است.

M.Fayyadh و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۷]، چهار نمونه تیر بتنی مسلح آسیب دیده ترمیم شده با ورق FRP تحت بار رفت و برگشتی تحت آزمایش قرار دادند. این مقاطع بتنی شامل میلگرد کششی و خاموت است. در نهایت نتایج نشان داد که ظرفیت باربری تیر ۵۳٪ و ۴۸٪ و سختی آن ۱۷٪ و ۱۰٪ افزایش داشته است.

Adel Elsafty و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۸]، پانزده تیر بتنی آسیب دیده ترمیم شده به روش معمول با الیاف FRP تحت بار یکنوا قرار دادند. نتایج حاکی از ایجاد شکست زودرس بود. پس از بررسی نظری و آزمایشگاهی، به این نتیجه رسیدند که در این روش تقویت با دورپیچ زیر تیر با استفاده از الیاف FRP تحت خمش چهار نقطه ای ادامه پیدا کرد که منجر به حذف این پدیده در یکی از تیرها و تعویق این پدیده در بقیه تیرهای مورد آزمایش گردید.

۱ – Monotonic

۲ - Wrap

۳ - Cyclic

Juanix Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۹]، به بررسی تاثیر ضخامت های متفاوت لایه طولی و نیز مقاومت فشاری هشت نمونه تیر بتنی تقویت شده با الیاف FRP تحت بار یکنوا، برای جلوگیری از وقوع پدیده جداشدگی زودرس در نمونه های بتنی فاقد آرماتور و تقویت شده با ورق FRP پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش عمق لایه بر کنترل جداشدگی زودرس اثر مثبت دارد و باعث افزایش شکل پذیری همچنین نشان داده شد.

Juanix Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۰]، آزمایش هایی بر روی شش تیر بتنی مسلح تقویت شده با هدف عرض های متفاوت لایه طولی لایه FRP، با بارگذاری یکنوا، به صورت سه نقطه ای انجام شد. نتایج آزمایش های انجام شدخ نشان داد که در تیرهای تقویت شده با این روش به میزان ۳۵ تا ۴۰ درصد افزایش در باربری را نشان می دهد.

Sinan Kayar و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۱]، به بررسی عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده و ترمیم شده با ورق فولادی پرداختند. سیزده نمونه تیر ابتدا به صورت چهار نقطه ای بارگذاری شده تا دچار شکست شوند. سپس نمونه ها ترمیم شده و به صورت یکنوا بارگذاری شدند. نتایج نشان می دهد که ترمیم با استفاده از ورق فولادی باعث بالا رفتن مقاومت خمشی تیر می شود.

Jianxin Peng و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۲]، به بررسی ترمیم ۱۸ تیر بتن مسلح آسیب دیده مستطیل شکل با ورق های فولادی تحت بارگذاری یکنوا پرداختند. هدف اصلی رسیدن به گسیختگی خمشی برای نمونه های تقویت شده می باشد و در نهایت نتایج با تیر کنترل مقایسه شده اند. در این تحقیق از سه نوع عضو فولادی با چیدمان مختلف برای جان تیر ها استفاده کردند:

- تسمه های فولادی باریک

- تسمه های فولادی پهن

- صفحه های فولادی

اتصال ورق ها با سطح تیر ها به وسیله چسب اپوکسی بر قرار شد و نتایج نشان داد ورق فولادی باعث افزایش مقاومت و سختی تیرها شده اند و اندازه ضخامت ورق فولادی اثر مهمی بر نقش بهبود دو پارامتر دارد.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق برای بررسی اثر الیاف کربنی FRP بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده در شرایط آزمایشگاهی، ۵ تیر بتنی در ابعاد کامل منطبق بر ضوابط [۱۳] ACI ۳۱۸-۱۴ و [۳] ACI ۴۴۰-۱۷ طراحی شده و پس از ترمیم تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند. بارگذاری همه نمونه ها به صورت بار متمرکز دو نقطه ای در یک سوم میانی تیر اعمال شد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی در این بخش بررسی می شوند.

۱.۲ مشخصات مصالح

بر اساس داده های موجود از آزمایش های قبل، مقاومت فشاری بتن نیرها ۳۰ مگاپاسکال بوده است. میلگردها با مقاومت کششی متوسط میلگرد با قطر ۱۶ میلیمتر از آزمون کشش ۳۹۳ مگاپاسکال بود. الیاف FRP با ضخامت ۰,۱۷ میلی متر جهت ترمیم استفاده شده است. مشخصات الیاف FRP مصرفی و چسب اپوکسی مصرفی جهت چسباندن الیاف در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول یک - مشخصات الیاف کربنی مصرفی

Technical Data

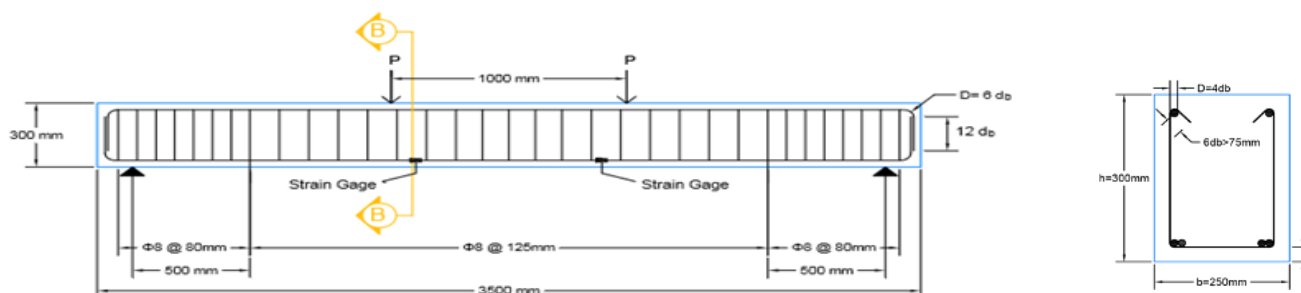
Fiber type	High strength carbon fibers
Fiber orientation	0° (unidirectional)
Construction	Warp: Carbon fibers (99 % of total areal weight) Weft: Thermoplastic heat-set fibers (1 % of total areal weight)
Areal weight	300g/m ² + 5 %
Fiber Density	1.80 g/cm ³
Fabric design thickness	0.17 mm (based on total carbon content)
Tensile strength of fibers	3'900 N/mm ² (nominal)
Tensile E-modulus of fibers	230'000 N/mm ² (nominal)

جدول دو - مشخصات چسب اپوکسی

Technical Data		
Chemical Base	Epoxy resin.	
Density	Mixed Resin: 1.31 kg/lt (at +23°C)	
Viscosity	Shear rate: 50 /s	
Mechanical / Physical Properties		
Tensile Strength	30 N/mm² (7 days at +23°C)	(DIN 53455)
Bond Strength	Concrete fracture on sandblasted substrate: > 1 day	(EN 24624)
E-Modulus	Flexural: 3800 N/mm² (7 days at +23°C)	(DIN 53452)
	Tensile: 4500 N/mm² (7 days at +23°C)	(DIN 53455)

۲.۲. مشخصات نمونه ها و پیکربندی سیستم آزمایش

۵ تیر بتنی در مقیاس واقعی با طول کلی ۳/۵ متر، عرض ۲۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر که یک تیر تحت بارگذاری بار افزون قرار گرفته است و سایر نمونه ها تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته اند و آسیب دیده اند. تیر بتنی با میلگرد طولی پیوسته با قطر ۱۶ میلی متر و خاموت ها به صورت U شکل و با قطر ۸ میلی متر و طبق فواصل مشخص در شکل ۴ قرار داده شدند. پوشش بتن در کلیه قسمت ها ۵۰ میلی متر در نظر گرفته شده و تکیه گاه های ابتدا و انتها به صورت مفصلی طراحی و اجرا شدند.



Section B-B

شکل ۴- مشخصات هندسی مقطع و فواصل خاموت گذاری

در شکل ۵، پنج نمونه آزمایشگاهی با مقیاس کامل انتخاب شده که قبلاً تحت آزمایش قرار گرفته اند نشان داده شده اند.



شکل ۵ - پنج نمونه تیر بتنی آسیب دیده جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی

۳.۲. مراحل انجام کار ترمیم تیرهای بتن مسلح در آزمایشگاه:

روش انجام کار بدین صورت انجام می شود که پنج تیر بتنی مسلح از قبل آسیب دیده تحت بارگذاری رفت و برگشت از نوع خمشی انتخاب شده اند. سپس تیرها با استفاده از روش های مناسب، ترمیم شده و رزین در آن تزریق شده و پس از تزریق با طرح های مختلف FRP^۱ تقویت شده اند. مراحل ترمیم تیر با الیاف FRP به صورت زیر می باشد:

– زدن ساب خشک بر روی تیرهای بتنی و پخ زدن لبه ها و در نهایت باز کردن ترک ها با دستگاه فرز (شکل ۶).



شکل ۶ - انجام ساب و پخ تیرهای بتنی آسیب دیده

– بتونه کشی با ترکیب مخصوص، جهت انجام ترمیم سطح بتن بر روی فرورفتگی ها و ترک ها (شکل ۷).



شکل ۷ - بتونه کشی بر روی ترک ها

- کاشت پستونک ها بر روی تیرها با چسب مخصوص و تزریق رزین بوسیله آنها با دستگاه پمپ تزریق و برداشتن پستونک ها و انجام ساب نهایی بر روی تیرها (شکل ۸).



شکل ۸- نصب پستونک ها و تزریق رزین

- زدن چسب اپوکسی بر روی سطح تیر قبل از نصب الیاف و نصب الیاف FRP (شکل ۹).

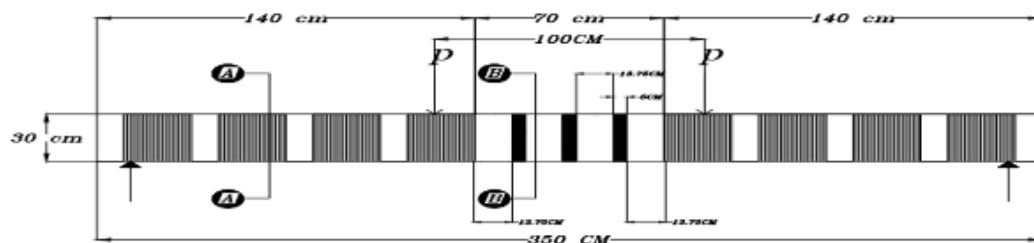


شکل ۹- نصب الیاف FRP

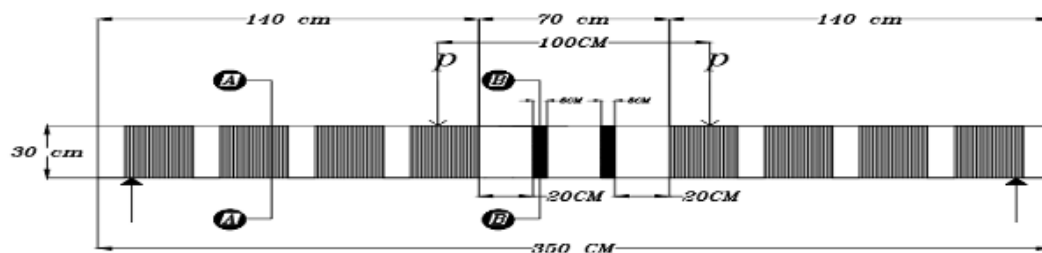
جهت نصب الیاف FRP بر اساس طرح های پیشنهادی به دست آمده، با استفاده از الیاف FRP به صورت طولی و عرضی انجام می گیرد:

- الیاف FRP طولی جهت تقویت خمشی تیر در یک و دو لایه
- الیاف FRP عرضی جهت تقویت برشی تیر و جلوگیری از جداشدگی^۱

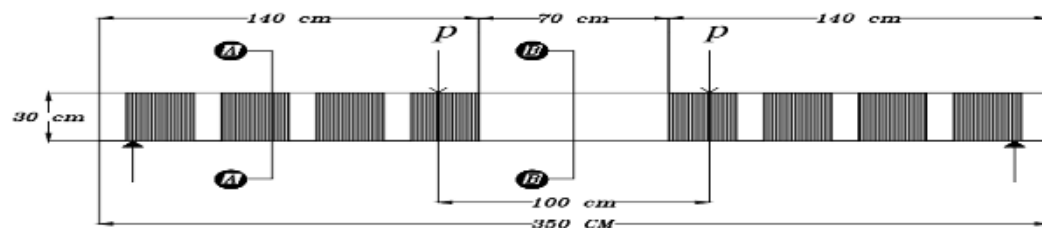
طرح پیشنهادی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده جهت انجام کار ترمیم با الیاف FRP به صورت زیر می باشد (شکل ۱۰ - الف تا د):



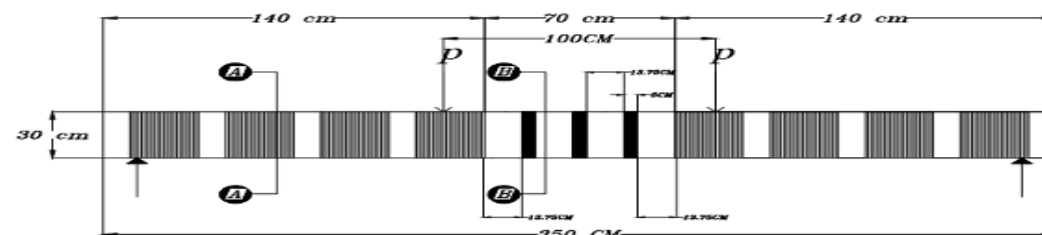
شکل ۱۰ الف - طرح پیشنهادی تیر شماره یک



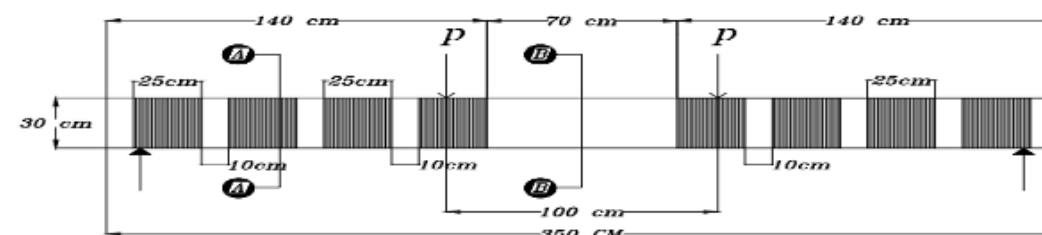
شکل ۱۰ ب - طرح پیشنهادی تیر شماره دو



شکل ۱۰ ج - طرح پیشنهادی تیر شماره سه



شکل ۱۰ د - طرح پیشنهادی تیر شماره چهار



شکل ۱۰ ذ - طرح پیشنهادی تیر شماره پنج

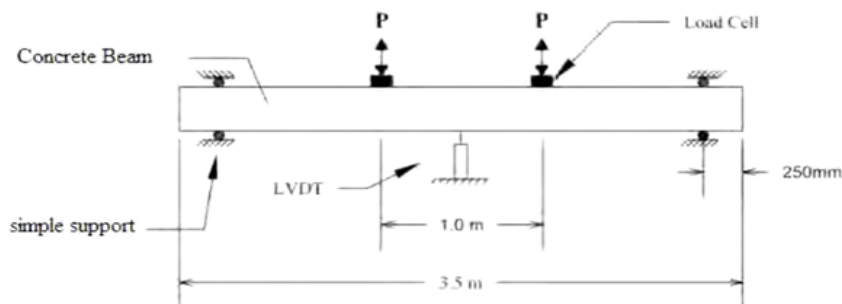
هدف از ترکیب چیدمان الیاف FRP در تیرهای بتن مسلح ترمیم شده بررسی اثر تعداد لایه های طولی و اثر نوع بارگذاری به صورت رفت و برگشتی و بار افزون و اثر نحوه مهار الیاف جهت جلوگیری از جداشدگی زودرس می باشد.

در جدول ۱ به طور خلاصه مشخصات نمونه های آزمایشگاهی نمایش داده شده است.

جدول یک - اطلاعات نمونه های آزمایشگاهی

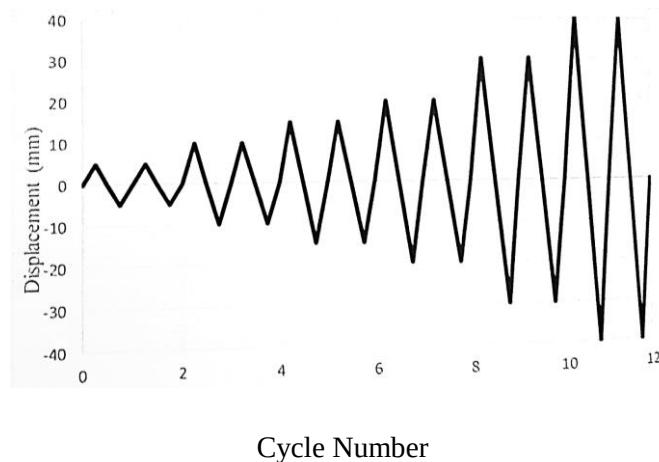
نمونه های آزمایشگاهی	قطر میلگرد مصرفی (میلی متر)	نوع آزمایش	تعداد لایه طولی مصرفی FRP (ضخامت ۰.۱۷ میلی متر)	تعداد دورپیچ وسط تیر (عرض ۵ سانتی متر)
تیر اول	۱۶	Cyclic	یک لایه در بالا و پایین تیر	۳
تیر دوم	۱۶	Cyclic	یک لایه در بالا و پایین تیر	۲
تیر سوم	۱۶	Pushover	یک لایه در پایین تیر	بدون دورپیچ
تیر چهارم	۱۶	Cyclic	دو لایه در بالا و پایین تیر	۳
تیر پنجم	۱۶	Cyclic	یک لایه در بالا و پایین تیر	بدون دورپیچ

با توجه به اینکه در چهار عدد از نمونه ها بارگذاری چرخه ای اعمال می شود؛ تکیه گاه هم در بالا و هم در پایین تیر قرار گرفتند تا هم در فشار و هم در کشش عملکرد مناسب را ایجاد کنند. جهت ایجاد خمش خالص در ناحیه وسط، بارگذاری به صورت بار متمرکز دو نقطه ای و به فاصله یک متر از یکدیگر در یک سوم میانی تیر اعمال شد. میزان نیروی وارد شده توسط نیرو سنج و جابجایی وسط تیر توسط جابجایی سنج اندازه گیری و ثبت گردید. شکل ۱۱ نحوه بارگذاری محل تکیه گاهها و چیدمان وسایل اندازه گیری را نشان می دهد.



شکل ۱۱- بارگذاری، محل تکیه گاه و چیدمان وسایل اندازه گیری در سیستم آزمایش

شکل ۱۲ تاریخچه جابجایی اعمال شده توسط جک هیدرولیکی به نمونه در هر چرخه و در طول انجام آزمایش نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود در آزمایش نمونه ها از شکل بارگذاری شامل شش چرخه استفاده شده است که هر کدام از چرخه ها دو بار تکرار می شود.

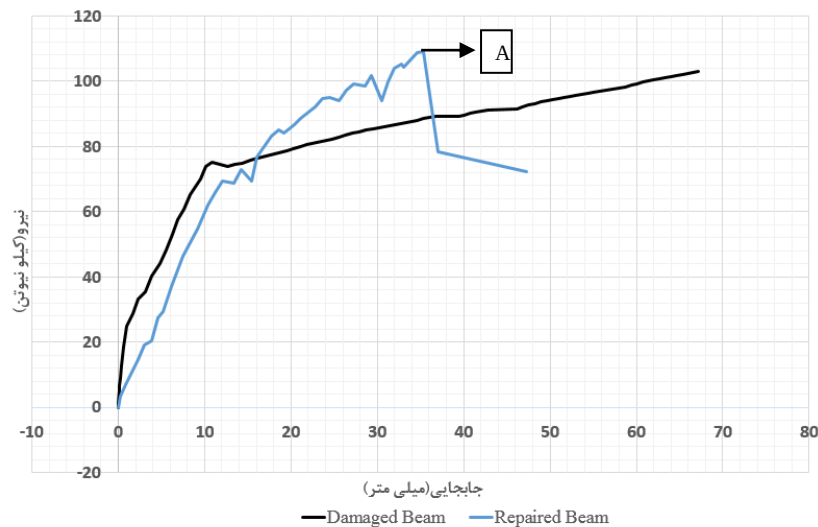


شکل ۱۲ - چرخه بارگذاری برای تیرهای بتن مسلح آسیب دیده با الیاف FRP

۳. نتایج آزمایش

۳.۱. بار گذاری بار افزون:

جهت به دست آوردن نیرو جابجایی تسلیم و نهایی، تیر شماره سه بدون دورپیچ در ناحیه وسط تیر بتنی با میلگرد به قطر ۱۶ میلی متر تحت بار گذاری بار افزون قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده جابجایی تسلیم در وسط تیر در ۴۷/۳۳ میلی متر ثبت شد. زوال نمونه در جابجایی نهایی با خرد شدگی بتن بخش فشاری همراه بود. شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی نمونه تحت بارگذاری بار افزون را نشان می دهد. در این شکل نمودار نیرو - جابجایی تیر بتن مسلح ترمیم شده با الیاف و نمودار نیرو - جابجایی تیر بتن مسلح آسیب دیده تحت بار افزون مشاهده می شود. براساس شکل ۱۳ نمودار نیرو - جابجایی تیر بتنی ترمیم یافته با الیاف افزایش مقاومت داشته و تا جابجایی نقطه متناظر A ادامه می یابد. اما بعد از آن به علت جداشدگی الیاف FRP از سطح بتن دچار کاهش مقاومت مطابق شکل ۱۴ افتاده است. همان طور در شکل ۱۳ مشاهده می شود وضعیت تیر بتن مسلح آسیب دیده شماره سه ترمیم یافته با FRP نسبت به وضعیت اولیه آن یعنی قبل از ترمیم تحت بار افزون افزایش مقاومت داشته اما از نقطه A به بعد به دلیل عدم نداشتن دورپیچ وسط دهانه باعث جداشدگی زودرس در الیاف کربنی از سطح بتن مطابق شکل ۱۴ شده است و دچار افت مقاومت گردیده است.



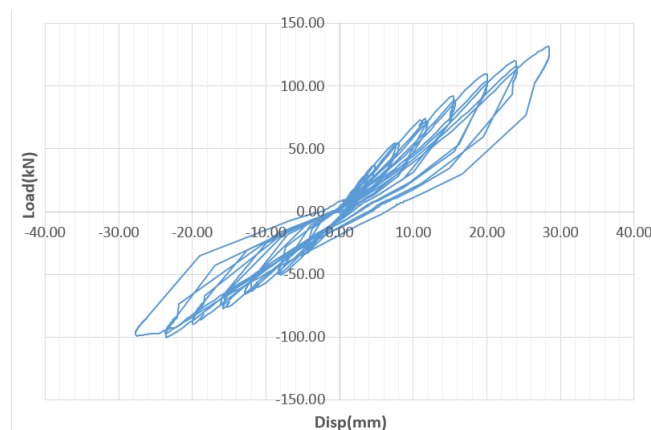
شکل ۱۳- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی تیر بتنی ترمیم یافته با FRP و تیر بتنی آسیب دیده قبل ترمیم شماره سه تحت بارگذاری بار افزون



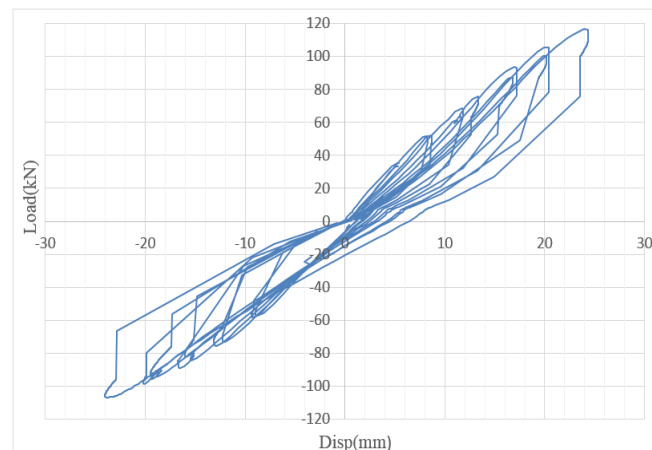
شکل ۱۴- ترک های متناظر و جداشدگی FRP در نقطه A در نمودار نیرو-جابجایی تیر شماره سه تحت بارگذاری بار افزون

۲.۳. بارگذاری رفت و برگشتی:

منحنی های نیرو-جابجایی نمونه های ۱، ۲، ۴ و ۵ در شکل های ۱۵ تا ۱۸ نمایش داده شده اند. به منظور تسهیل در مقایسه منحنی ها، پوش منحنی های هیستریسیس نیز در شکل ۱۹ ترسیم شده است. مقایسه منحنی ها نشان می دهد که رفتار نمونه های ترمیم شده همگی در محدوده خطی و تا حدود از محدوده غیرخطی مشابه است. اما با افزایش دامنه بارگذاری و جداسازی زود هنگام در نمونه هایی که مهار کافی بین لایه های FRP و سطح بتن تامین نشده است، افت مقاومت مشاهده می شود. نمونه ای از زوال در محل اتصال رویه به سطح بتن در شکل (۲۰) نشان داده شده است. لازم به ذکر است معیار توقف انجام بارگذاری بر روی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده ترمیم شده با FRP، بر اساس زمان جداسازی الیاف کربنی از سطح بتن و دچار کاهش مقاومت آن شدن و براساس پروتکل بارگذاری مشخص شده در شکل ۱۲ می باشد.

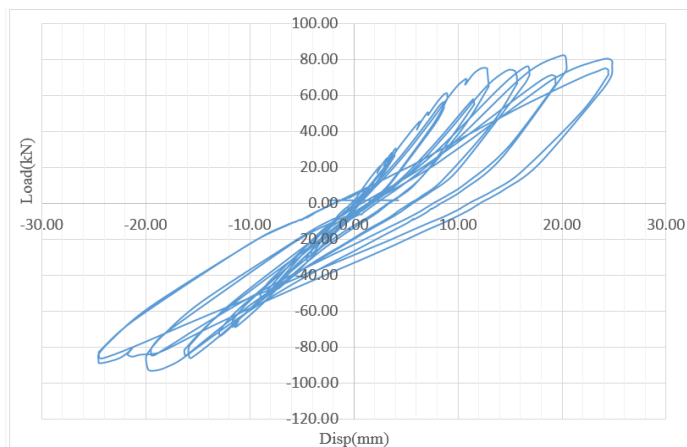


شکل ۱۵- نمودار نیرو-جابجایی تیر شماره یک با یک لایه طولی بالا و پایین تیر و سه دورپیچ در وسط تیر تحت بارگذاری رفت و برگشتی

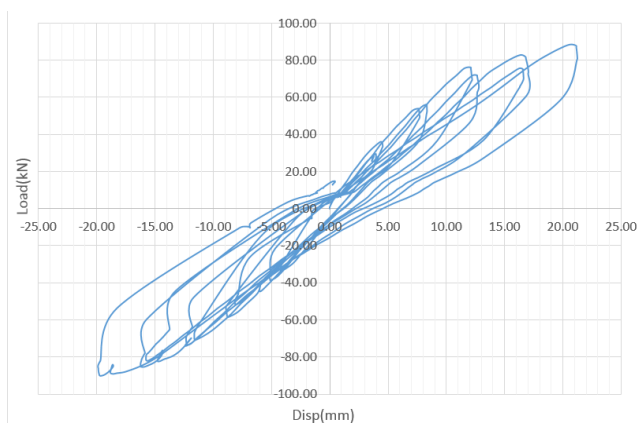


شکل ۱۶- نمودار نمودار نیرو-جابجایی تیر شماره دو با یک لایه طولی بالا و پایین تیر و دو دورپیچ در وسط تیر تحت بارگذاری رفت و برگشتی

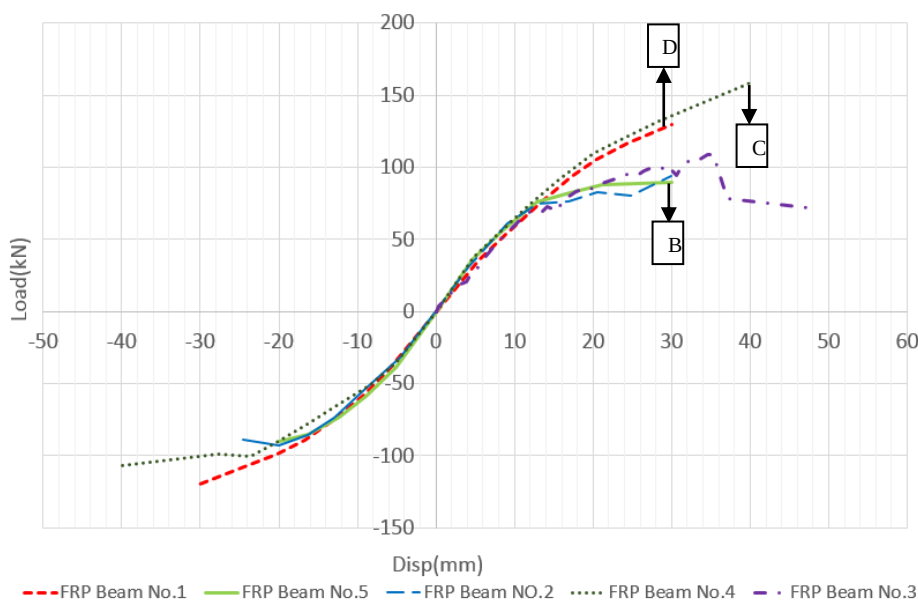
همان طور از مقایسه شکل ۱۵ و ۱۶ مشاهده می شود، در تیر شماره یک به دلیل داشتن سه دورپیچ ۵ سانتی متر در وسط تیر بتنی نسبت به تیر شماره دو با دو دورپیچ ۵ سانتی متر در وسط تیر تحت بار رفت و برگشتی به دلیل به تاخیر انداختن جداسازی الیاف کربنی با سه دورپیچ نیروی بیشتری را تحمل کرده است و افزایش مقاومت داشته است.



شکل ۱۷ - نمودار نیرو- جابجایی تیر شماره چهار با دو لایه طولی بالا و پایین تیر و سه دورپیچ در وسط تیر تحت بار گذاری رفت و برگشتی



شکل ۱۸ - نمودار نیرو- جابجایی تیر شماره پنج با یک لایه طولی بالا و پایین تیر و فاقد دورپیچ در وسط تیر تحت بار گذاری رفت و برگشتی



شکل ۱۹- مقایسه پوش نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه های ترمیم شده



شکل ۲۰- ترک های متناظر و جدانشدگی FRP در نقطه B در نمودار نیرو-جابجایی تیر شماره پنج تحت بارگذاری رفت و برگشتی



شکل ۲۱- ترک های متناظر و جدانشدگی FRP در نقطه C در نمودار نیرو-جابجایی تیر شماره چهار تحت بارگذاری رفت و برگشتی



شکل ۲۲- ترک های متناظر و جدانشدگی FRP در نقطه D در نمودار نیرو-جابجایی تیر شماره یک تحت بارگذاری رفت و برگشتی

همان طور در شکل های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می شود در تیرهای بتن مسلح ترمیم یافته با FRP تیر شماره پنج به دلیل نداشتن دورپیچ ۵ سانتی متری در وسط ۷۰ سانتی متری تیر بتنی دچار کاهش مقاومت و جدانشدگی زودرس شده است اما در تیر شماره چهار به دلیل داشتن سه عدد دورپیچ ۵ سانتی متری در ۷۰ سانتی متری وسط تیر بتنی نسبت به سایر تیرها از جمله تیر شماره یک با دو عدد دورپیچ ۵ سانتی متر در ۷۰ وسط تیر افزایش مقاومت خود را حفظ کرده است و جدانشدگی را به تاخیر انداخته است.

۴. جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق استفاده از ورق های FRP به عنوان یک روش ترمیم برای تیرهای بتن مسلح که قبلاً تحت خمش دچار آسیب شده اند در قالب مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش های انجام شده نشان می دهد که روش پیشنهادی می تواند مقاومت تیرهای آسیب دیده را جبران نموده و از این حیث تیرها به وضعیت اولیه و چه بسا مقاومت بیشتر بازگردند. علاوه بر این لایه های FRP باید به نحو مناسبی به سطح زیرین خود اتصال داشته باشند تا از جدانشدگی زود هنگام تحت بارگذاری رفت و برگشتی جلوگیری شود. بیشتر خرابی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده ترمیم شده با الیاف کربنی در جدانشدگی الیاف FRP از سطح بتن می باشد از آن سو همان طور که در شکل ۱۹ مشاهده می شود تیرهای بتنی با دورپیچ نسبت به تیرهای بدون دورپیچ مقاومت بیشتری نشان داده است و جدانشدگی را به تاخیر انداخته است لذا بهترین نمونه ترمیم شده با الیاف که دارای بیشترین مقاومت و باعث به تاخیر انداختن مناسب جدانشدگی شده است نمونه شماره ۴ می باشد که با دو لایه الیاف طولی در بالا و پایین تیر و سه عدد دورپیچ در وسط تیر مطابق شکل ۲۱ بهترین نتیجه را دارا می باشد.

۵. مراجع

- [1] Wabo Mbrace. (2002). "Wabo MBrace Composite Strengthening System Design Guide". Chapter 7 Shear Strengthening.
- [2] S.T.Smith, J.G.Teng. (2001). "FRP-strengthened RC beams review debonding strength models". Engineering Structures Elsevier.
- [3] ACI 440.2R-17. (2017). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Concrete Structures", Strengthening.
- [4] J.G.Teng, J.F. Chen, S.T.Smith, L. lam. (2002). "FRP Strengthened RC Structures". Published by Wiley.
- [5] Omrane Benjeddou. (2006). "Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates". Journal of Construction and Building, ASCE.
- [6] Asghar Vatani. (2010). "Repairing of seismically damaged RC exterior beam-column connection using CFRP". Journal of reinforced & plastic composites, ASCE.
- [7] Moatasem M.Fayyadh. (2012). "Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams under different damage levels on flexural stiffness". Journal of Construction and Building, ASCE.
- [8] Adel ElSafy. (2013). "Optimum CFRP Configuration to Efficiently Repair laterally Damaged, Simply Supported Rectangular Rrinfomed RC Beams". Journal of Structural Design & Construction, ASCE.
- [9] Juanix ZHANG. (2016). "Experimental Study on Failure Mode of Concrete Beams Strengthened with FRP sheet". Journal of Construction and Building, ASCE.
- [10] Juanix ZHANG. (2016). "Experimental Study on Fracture Behaviors of Concrete Beams Strengthened with FRP sheet of Different Width". Journal of Construction and Building, ASCE.
- [11] Sinan Kayar. (2013). "Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Beams Using External Steel Plate", Journal of Construction and Building, ASCE.
- [12] Juanix Peng. (2017). "Structural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel Plate", Journal of Construction and Building, ASCE.
- [13] ACI 318-14 Standard. (2015). "Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)", American Concrete Institute.