



بررسی رفتار خمشی تیرهای مقاوم سازی شده با میلگرد FRP به روش (NSMR)

قربان مهدوی پیراقوم^۱، موسی اکبری آقبلاغ^۲

تلفن: ۰۹۱۴۱۵۷۳۴۲۵

mahdavy1556@yahoo.com

خلاصه

استفاده از FRP به منظور بهسازی لرزه‌ای در سال‌های اخیر بسیار گسترش یافته است. در این تحقیق ضمن تشریح روش نصب، به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح شده با کامپوزیت FRP پرداخته می‌شود. بدین منظور نمونه‌ها به ۴ روش مختلف ساخته شده است که در نمونه اولی با استفاده از دو عدد میلگرد شیشه به روش شیاری به ترمیم تیر پرداخته شد. نمونه بعدی با استفاده از دو عدد میلگرد شیشه به روش شیاری و یک لایه الیاف کربن بر روی آن به نصب گردید. و نمونه بعدی با استفاده از دو عدد میلگرد فولادی که در داخل شیاری به قطر ۱/۵ سانتیمتر قرار داده شد. و در نهایت یک تیر نیز بدون ترمیم و به عنوان تیر کنترل در نظر گرفته شد. و بارگذاری نمونه‌ها تا مرحله انهدام نمونه‌ها ادامه داشت.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، FRP، مقاوم سازی، تورق، تیر بتن مسلح، اپوکسی.

مقدمه

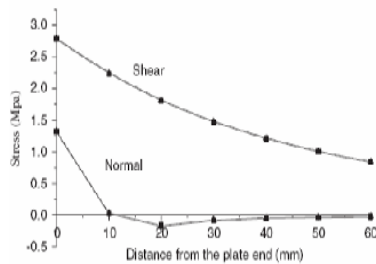
تلاش محققان در سالهای اخیر در راستای مقاوم سازی به منظور تقویت ساختمانهای فرسوده و یا به خاطر بالا بردن ظرفیت خمشی اعضای بتنی باعث ارائه راهکار های جدیدی در علم مهندسی ترمیم سازه ها شده است، که با جایگزینی شیوه های جدید مقاوم سازی در جهت سهولت مقاوم سازی و بالا بردن ظرفیت سازه ها باعث شده تا مهندسين سازه روی به استفاده از سیستم های پلیمری تقویت شده (FRP) بیاورند، همچنین عدم ساخت ساز صحیح و اصولی بعضی از ساختمانها و تاسیسات در گذشته و آسیب پذیر بودن آنها در برابر زلزله مقاوم سازی در برابر زلزله را می توان به عنوان یکی از مهم ترین سیاست های اصولی دولت در چندسال آینده قرار داد [۱]. FRP ماده کامپوزیتی با مقاومت کششی بالاست که با رزین آغشته شده است، که بدلیل مقاومت کششی بالا، وزن پایین، دوام مناسب (در مقابل خوردگی) دارای کاربرد گسترده در مقاوم سازی سازه های بتنی در مقابل نیروی زلزله است [۲ و ۳]. علیرغم کاربرد وسیع FRP در تقویت عضو های بتنی، شکست زود هنگام این سیستم در اثر تورق، باعث می شود که این مصالح به مقاومت نهایی خود نرسند و ما نتوانیم از تمام ظرفیت باربری این سیستم استفاده کنیم [۴ و ۵] که برای اجتناب از این پدیده تحقیقات نشان داده است که بهتر است انتهای وصله FRP در تیرها به طور مناسب مهار شود که با توجه به اصول مکانیک شکست هرگونه ترک خوردگی را می توان به صورت ترکیبی از سه مود پایه‌ای شکست در نظر گرفت مود اول باز شدگی ناشی از کشش (Opening mode)، مود دوم لغزش ناشی از برش در صفحه (mode shearing) و مود سوم ناشی از پارگی)

^۱ کارشناس ارشد عمران سازه، دانشگاه گیلان Mahdavy1556@yahoo.com

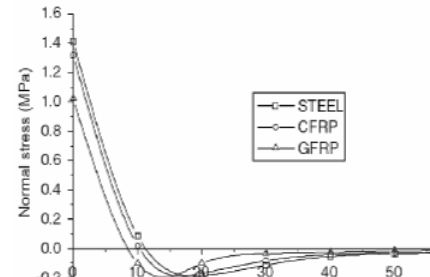
^۲ کارشناس ارشد عمران سازه، دانشگاه گیلان MosesAkbari@gmail.com



tearing mode) می‌باشد. که در فولاد تنها مود اول موثر است ولی در یک عضو کامپوزیت مود دوم و سوم بویژه در پدیده تورق لایه‌ها موثرند. [۶] در تیرهای بتنی که توسط کامپوزیت FRP و به شیوه نصب لایه به لایه تقویت شده اند جدایی ورق از تیر بتنی غالباً در مود مرکب ناشی از تمرکز تنش برشی و تنش کششی عمودی بین بتن و ورق کامپوزیت اتفاق می‌افتد در این مورد می‌توان گفت که ترک های خمشی معمولاً به تمرکز تنشهای برشی زیاد در یک ناحیه کوچک در بین بتن و کامپوزیت FRP اتفاق می‌افتد در حالی که ترک های قطری ناشی از تمرکز تنش برشی و نرمال در تیر زیاد شود جدایی ورق FRP بر اثر ترکیب عملکرد کشش و برش به وقوع می‌پیوندد [۷]. توزیع تنش در طول الیاف را می‌توان در شکل ۱ و ۲ مشاهده کرد. [۸].



شکل ۲- توزیع تنش برشی و نرمال در طول FRP [۸]



شکل ۱- توزیع تنش نرمال در طول مواد مختلف الصافی [۸]

در تحقیقاتی که توسط Tang و همکارانش در سال ۲۰۰۴ بر روی تیرهای بتنی مسلح شده به روش شیاری با استفاده از میلگرد شیشه انجام شد نشان داد که افزایش مقاومت خمشی از ۲۳ تا ۵۳ درصد در نمونه‌ها مشاهده می‌شود [۹]. در آزمایش دیگری که در سال ۲۰۰۷ توسط Amr El-Ragaby در دانشگاه Sherbrooke کانادا انجام گرفت به این ترتیب بود که دالهایی بتنی که به وسیله میلگرد شیشه مسلح شده بودند ساخته شد. و مورد آزمایش بارگذاری سیکلی قرار گرفت نتایج حاصل نشان دهنده تحمل بارهای سیکلی توسط سیستم بود [۱۰].

همچنین سازه‌های مختلفی با استفاده از FRP مقاوم سازی شده‌اند. که در این بین می‌توان به پروژه مقاوم سازی چهار سیلو در Boston Massachusetts اشاره کرد این سیلوها در سال ۱۹۶۲ در بوستون ساخته شد که ارتفاع سیلوها برابر ۴۷/۵ متر و قطر آنها برابر ۶/۷ متر و ضخامت دیواره این سیلوها نیز برابر ۲۰۳ mm بود. که در اثر مرور زمان و به علت بارگذاری زیاد در سیلوها هم در جهت عمودی و هم در جهت افقی ترکهایی ایجاد شد بعد از بررسی و باز طراحی سیلوها شروع به ایجاد شیاری بر روی سیلوها گرفتند که شیارها توسط دستگاه دریل بر روی سازه ایجاد شد و بعد از ایجاد شیار بر روی سازه اقدام به نصب میلگرد CFRP توسط چسب اپوکسی بر روی سطح سیلو هم در جهت عمودی و هم در جهت شعاعی کردند [۱۱].

روش نصب NSMR:

استفاده از روش NSMR (Near Surface Mounted Reinforcement) برای مقاوم سازی سازه‌های بتنی پدیده جدیدی می‌باشد. چراکه شکلی از آن در دهه ۴۰ میلادی متداول بوده با این تفاوت که در روش قدیمی به جای کامپوزیت از میلگرد فولادی استفاده می‌شد. در این روش ابتدا شیاری بر روی عضو ایجاد شده سپس با استفاده از بتن پاشی لایه‌ای از بتن روی آن قرار می‌گیرد در دهه ۶۰ میلادی به جای استفاده از بتن برای چسباندن میلگرد فولادی چسبهای پلیمری (اپوکسی) کاربرد داشته است. این روش قدیمی در نصب FRP نیز مورد استفاده قرار گرفت. در این سیستم میله‌ها کامپوزیتی FRP جایگزین میله‌های فولادی قرار گرفته است مزیت این میله‌ها نسبت به میله‌های فولادی مقاومت در برابر خوردگی، کاهش وزن و راحتی اجرا می‌باشد که مراحل نصب کامپوزیت FRP در این شیوه ذیلاً بیان می‌شود [۵ و ۱۲].

الف) توسط سنگ تروست شیاری در پوشش بتن ایجاد گردد (عمق شیاری در پوشش بتن به قطر میله کامپوزیت و ضخامت پوشش بستگی دارد).

ب) بعد از ایجاد شیاری با استفاده از آب با فشار حدود ۱۵۰-۱۰۰ اتمسفر شیاری از وجود غبار و ذرات بتن زودوده شود.

پ) قبل از چسباندن کامپوزیت سطح شیاری باید کاملاً خشک شود.

ت) تا حدود نیمی از شیاری توسط چسب پلیمری پر می‌شود و میله کامپوزیت FRP در شیاری قرار داده می‌شود. سپس بقیه چسب را به آن اضافه گردد. نکته اینکه در استفاده از این روش برای اتصال کامپوزیت FRP به پوشش ضحیمی در عضو نیاز می‌باشد.

در این شیوه مقاوم سازی از آنجایی که سه ضلع از کامپوزیت با بتن درگیر است عملکرد مطلوبتری از اندرکنش عضو و کامپوزیت بدست می‌آید. کامپوزیت FRP در این شیوه اتصال، در مقابل پوسته شدن خیلی مقاومتر است و از طرفی در برابر خطراتی مثل آتش سوزی و ضربه، بسیار مقاوم می‌کند که در شکل ۳ نحوه قرار گیری میلگرد FRP در داخل شیاری نشان داده می‌شود.

**مراحل ساخت نمونه ها:**

تیرها با استفاده از مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۱ و مصالح سنگی درشت دانه با حداکثر قطر دانه mm برابر ۱۶ و ماسه با مدول نرمی ۲۰۹ بر اساس استاندارد ASTM ساخته شدند و پس از ۲۴ ساعت قالب آن باز گردیده و برای عمل آوری نمونه ها را به مدت ۲۸ روز در مخزن آب نگهداری شدند [۱۳]. آماده سازی سطح: شامل کلیه عملیاتی بود که سطح المان را برای اتصال کامپوزیت FRP مهیا می نمود و بدلیل اهمیت اتصال لایه FRP این مرحله با دقت مناسب انجام گرفت که شامل برداشتن مواد سست اضافی از سطح بستر کار و پاک کردن موادی مثل شیره سیمان باقی مانده روی سطح نمونه و زدودن مواد شیمیایی و همچنین صیقلی نمودن سطح با سمباده بطوریکه مقدار ناصافی به کمتر از یک میلی متر برسد و در نهایت FRP در دمای آزمایشگاهی، در حدود ۲۰ درجه سانتیگراد، توسط چسب اپوکسی بر روی سطح تیر نصب گردید (شکل ۳).



شکل ۳- نحوه قرار گیری کامپوزیت در طول تیر

مشخصات کلی تیرها:

با توجه به امکانات و محدودیت های تجهیزات موجود در آزمایشگاه اندازه نمونه ها با طولی معادل 1.2m و با سطح مقطع $14.8 \times 10 \text{ cm}$ در نظر گرفته شد که در آنها از دو عدد میلگرد $\phi 10$ برای تقویت ناحیه کششی و $\phi 8$ برای تقویت قسمت فشاری تیر و از آرماتور $\phi 6$ به فاصله 6cm بعنوان خاموت استفاده شده و بارگذاری تا مرحله انهدام تیر با سرعت یکنواخت اعمال گردید و نتایج آزمایش به صورت منحنی بار تغییر مکان ثبت گردید که برای اندازه گیری تغییر مکان کرنش سنجهایی با دقت 0.025 mm در وسط تیر و محل اعمال نیرو استفاده گردید میله های کامپوزیتی به قطر 10mm و طول 90cm به فاصله 5cm از تکیه گاه نصب شده بود بطوری که قبل از بارگذاری نمونه ها به مدت یک هفته در دمای محیط آزمایشگاهی نگهداری شدند در این تحقیق نمونه ها به 4 روش مختلف ساخته شد و تحت آزمایش بارگذاری خمشی قرار گرفتند که مشخصات نمونه های مقاوم سازی شده عبارتند از:

تیر **NSMR(G)**: با استفاده از دو عدد میلگرد شیشه به قطر 1cm و به روش شیاری به ترمیم تیر پرداخته شد در این شیوه مقاوم سازی از آنجایی که سه ضلع از کامپوزیت با بتن در گیر است عملکرد مطلوبتری از اندرکنش عضو و کامپوزیت بدست می آید کامپوزیت FRP در این شیوه اتصال در مقابل پوسته شدن خیلی مقاومتر است و از طرفی در برابر خطراتی مثل آتش سوزی و ضربه بسیار مقاوم می کند .

تیر **NSMR(G-C)** این اتصال نیز مثل اتصال بالا است با این تفاوت که برای مهار کرنش زیاد تیر مسلح شده با میلگرد شیشه، الیاف کربنی به ضخامت 0.176 mm بر روی اتصال نصب گردیده و این اتصال از ترکیب میلگرد شیشه در داخل شیاری و الیاف کربن بر روی سطح انجام شده. و این روش نصب به خاطر کم کردن خیز نهایی نمونه ها می باشد.

تیر **NSMR(F)** در این شیوه نیز به روش میلگرد شیشه شیاری در داخل بتن ایجاد کرده و میلگرد فولاد را در داخل آن قرار داده و سپس توسط چسب اپوکسی داخل شیاری را پر می کنیم.

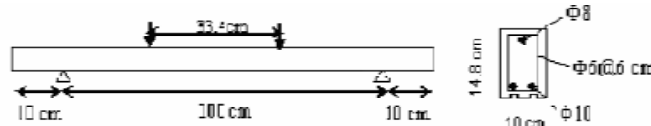
5 بتن مورد استفاده در این تحقیق با مقاومت فشاری 25 mpa و فولاد مورد استفاده با مقاومت کسختگی 400 mpa بوده و مشخصات FRP های مورد استفاده در این تحقیق طبق جدول ۱ می باشد.

جدول ۱ - مشخصات FRP های مورد استفاده

مشخصات الیاف	الیاف کربن	میلگرد شیشه
مدول الاستیسیته KN/mm^2	240	65
ضخامت (mm)	0.176	10
کرنش نهایی در صد	1.55	0.74
مقاومت کششی N/mm^2	3800	2250
وزن مخصوص g/m^3	300	430



همان طور که در شکل ۱ مشاهده شد تمرکز تنش در انتهای الیاف به اندازه حداکثر خود رسیده و باعث کنده شدن الیاف همراه بتن در ناحیه آرماتورهای کششی می شود برای جلوگیری از این پدیده FRP را به صورت شیاری در داخل تیر بتنی قرار دادیم تا از شکست زود هنگام تیر بتنی جلوگیری کنیم (شکل ۴). طراحی کلیه تیرهای ساخته شده بر مبنای آئین نامه آبا و با رعایت حداقل و حداکثر آرماتور در تیر و بر اساس شکست نرم انجام گرفته است [۱۴].



شکل ۴- جزئیات میلگرد گذاری نمونه ها

بررسی نتایج آزمایشگاهی:

بررسی شکل ظاهری شکست نمونه ها در شکل ۵ و همچنین نوع مد شکست نمونه ها در جدول ۲ آمده است و همانطور که ملاحظه می شود همه نمونه به خاطر جداسدگی پوشش بتن در اثر تمرکز تنش کسب شده اند. و در جدول ۳ نیز مقاومت نهایی نمونه ها به علاوه مقدار خیز نمونه ها در لحظه شکست نشان داده می شود و در آخر نیز منحنی بار تغییر مکان نمونه ها در اشکال ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

در این تحقیق بر خلاف روشهای اتصال FRP در سطح رویی بتن نبوده بلکه برای کریز از جدا شدگی زود هنگام شیاری در روی سطح بتن در ناحیه کششی ایجاد شد. و میلگرد FRP را در داخل شیاری توسط چسب اپوکسی قرار دادیم و همان طور که انتظار می رفت در این شیوه مقاوم سازی نیروی بیشتری توسط نمونه تحمل شد. و پدیده تورق در رنج بالاتری از نیرو مشاهده گردید. ولی از آنجا که میلگرد FRP قیمت بالاتری دارد. شاید از لحاظ قیمت این روش هزینه بالاتری نسبت به روشهای دیگر دارد. ولی درگیری از سه سمت میلگرد با بتن سبب افزایش بار بری نمونه شده بود. و از آنجایی که شیشه کرنش پذیری بیشتری دارد بنابراین تغییر شکل نمونه مقداری بالاتر بود مقدار افزایش باربری نمونه برابر است با ۶۱/۸ درصد. که در شکل ۵ نمودار نیرو و جابه جایی نمونه فوق نشان داده می شود. و در نهایت شکست این نمونه ها نیز همراه با جدا شدگی پوشش بتن همراه میلگردشیشه بود که در شکل ۵ نحوه شکست نمونه نشان داده می شود.

در نمونه بعدی برای اینکه تغییر شکل تیر را کنترل کرده باشیم از الیاف کربن برای افزودن سختی به نمونه استفاده شد و همانگونه که انتظار می رفت تغییر شکل نسبت به استفاده از میلگرد تنها کمتر بود. همچنین مقداری افزایش نیرو را در نمونه داشتیم و شاید استفاده از ترکیب کربن و شیشه گزینه مناسبی برای تقویت باشد. که مقدار افزایش باربری نمونه فوق برابر است با ۷۶/۶ درصد که در شکل ۷ نمودار نیرو و جابه جایی نمونه نشان داده می شود. و در نهایت شکست نمونه فوق نیز در اثر پدیده تورق لایه ها انجام شد. که در شکل ۵ نحوه شکست نمونه نشان داده می شود.

جدول ۲- نتایج ظاهری نوع مد شکست نمونه ها

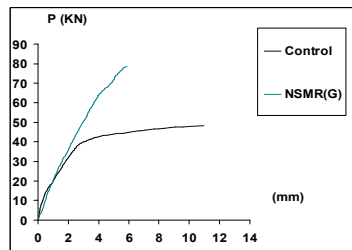
نوع تیر	نوع مد شکست
کنترل	گسیختگی بتن در ناحیه کششی همراه با جاری شدن فولادکششی
NSMR(G)	جداسدن FRP همراه کاور بتن در قسمت انتهای FRP
NSMR(G-C)	جداسدن FRP همراه کاور بتن در قسمت انتهای FRP
NSMR(F)	جداسدن میلگرد فولادی همراه کاور بتن در قسمت انتهای FRP

جدول ۳- نتایج بارگذاری خمشی بر روی نمونهها

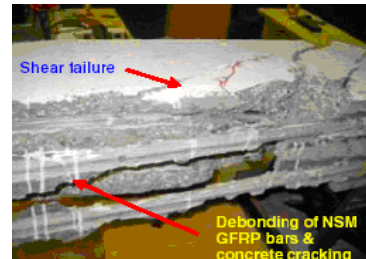
نوع تیر	خیز نهایی وسط تیر mm	نسبت مقاومت خمشی به مقاومت خمشی نمونه شاهد	بار نهایی آزمایشگاهی KN
کنترل	۱۰/۹۲	۱	۴۸/۳
NSMR(G)	۵/۸۶	۱/۶۱۸	۷۸/۵
NSMR(G-C)	۵/۱۵	۱/۷۶۶	۸۵
NSMR(F)	۳/۴۰۵	۱/۳۷۱	۶۶/۵



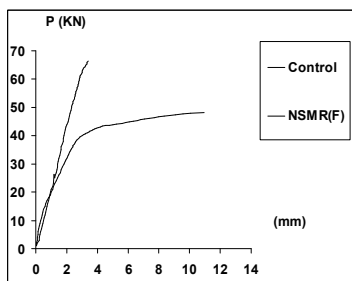
در روش NSMR(F) نیز به جای استفاده از میلگرد FRP از میلگرد فولادی در داخل شیار استفاده گردید و نقطه جالب توجه که در بار گذاری نمونه مشاهده شد این بود که این نمونه نیز رفتاری مثل نمونه های تقویتی با میلگرد شیشه داشت. البته میزان تغییر شکل تیر نسبت به روش مقاوم سازی شده با میلگرد شیشه و تیر کنترل کم بود. و مقدار آن برابر است با $3/40.5\text{mm}$ و مقدار افزایش باربری نمونه برابر $37/1$ در صد بود. در تقویت تیر با میلگرد فولادی نتوانستیم باربری میلگرد شیشه را داشته باشیم. و در واقع اضافه کردن میلگرد در شیار باعث افزایش سختی تیر گردیده بود که در شکل ۵ منحنی بار تغییر مکان نمونه نشان داده می شود.



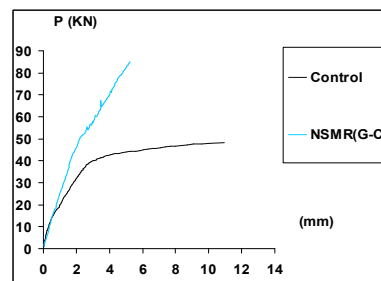
شکل ۵- نمودار نیرو و جابجایی تیر NSMR(G)



شکل ۶- نحوه شکست نمونه ها



شکل ۸- نمودار نیرو و جابجایی تیر NSMR(F)



شکل ۷- نمودار نیرو و جابجایی تیر NSMR(G-C)

نتیجه گیری:

استفاده از میلگرد شیشه به روش NSMR باعث می شود تا پدیده تورق در سیستم رخ ندهد. که این امر به خاطر درگیری کامپوزیت از ۳ سمت با بتن می باشد. بنابراین باربری تیرها به مراتب افزایش می یابد و در این حالت تقریباً می توان گفت که از ظرفیت کامپوزیت FRP به صورت بهینه استفاده می شود. و در باری معادل ۷۰ در صد بار نهایی قابل تحمل تیرها ترکهای برشی در تیر شروع به نمایان شدن می کنند. البته این روش مقاوم سازی با هزینه زیادی همراه است. استفاده از ترکیب الیاف شیشه و کربن باعث افزایش باربری در حدود ۱۰ درصد نسبت به تیر مشابه بدون الیاف کربن گردید در این نمونه ها از الیاف کربن برای افزودن سختی به نمونه استفاده شد و همانگونه که انتظار می رفت تغییر شکل نمونه ها نسبت به استفاده از میلگرد تنها در حدود ۱۳ درصد کاهش و باربری تیر در حدود ۹ درصد افزایش یافت.

در مدل سوم نیز به جای استفاده از میلگرد FRP از میلگرد فولادی در داخل شیار استفاده گردید و نقطه جالب توجه که در بار گذاری نمونه مشاهده شد این بود که این نمونه نیز رفتاری مثل نمونه های تقویتی با میلگرد شیشه داشت. البته میزان تغییر شکل تیر نسبت به روش مقاوم سازی شده با میلگرد شیشه و تیر کنترل کم بود. و مقدار آن برابر است با $3/40.5\text{mm}$ و مقدار افزایش باربری نمونه برابر $37/1$ در صد بود. در تقویت تیر با میلگرد فولادی نتوانستیم باربری میلگرد شیشه را داشته باشیم. و در واقع اضافه کردن میلگرد در شیار باعث افزایش سختی تیر گردیده بود.

قدردانی:

در پایان از اساتید محترم دانشکده فنی مهندسی دانشگاه گیلان، دکتر صدر ممتازی و دکتر ملک محمد رنجبر، برای راهنمایی و مشاوره بی دریغشان در کلیه مراحل این تحقیق تشکر و قدردانی می شود.

مراجع

1. Hewlett, P.C. (1987), Material and techniques Keynote paper Structural Faults and Repair, London, 24.



2. Supaviriyakit, T., Pornpongsaroj, P. and Pimanmas, A.,(2004), Finite element analysis of FRP-strengthened RC beams , Song klanakarín J. Sci. Techno, 26(4) : 497-507
3. Paulay,T;and Priestley; M;(1992); seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings; John Wiley & Sons , New York , 744pp
۴. علی صدر ممتازی، ملک محمد رنجبر، قربان مهدوی پیراقوم بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح شده به الیاف CFRP و GFRP سومین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه تبریز ۱۳۸۶
۵. قربان مهدوی پیراقوم بررسی خصوصیات رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح و تقویت آنها یا استفاده از سیستم FRP پایان نامه کارشناسی ارشد ۱۳۸۶
6. J. E. Master, Basic Failure Modes of Continuous Fiber Composites , Eng. Materials Handbook, Vol. 1 , Composites. ASM International, 1987 , USA.
7. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440-ACI 440.2R-02, 2002
8. A. Tounsi_, S. Benyoucef, (2007), Interfacial stresses in externally FRP-plated concrete beams, International Journal of Adhesion & Adhesives , 207–215
9. W.C. Tang, R.V. Balendran_,A. Nadeem, (2006) Flexural strengthening of reinforced lightweight polystyrene aggregate concrete beams with near-surface mounted GFRP bars Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, China
10. Amr El rangaby , Ehab El Salakawy, Brahim BENmokrane (2007) Fatigue analysis of concrete bridge deck slabs reinforced with E-glass/vinyl ester FRP reinforcing bars,
11. A.Nanni ,(2001), North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP principles application and unresolved issues
۱۲. علی رضا رهایی، سعید نعمتی، ارزیابی عملکرد و روشهای مقاومسازی سازه‌های بتنی، انتشارات فدک ایساتیس، ۱۳۸۳.
۱۳. پرفسور مهتا، پرفسور مونته نیرو، ترجمه دکتر علی اکبر رمضانپور، دکتر پرویز قدوسی، دکتر اسماعیل گنجیان-ریز ساختار خواص، و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته) انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر ۱۳۸۳.
۱۴. علی رضا رهایی طرح و محاسبه سازه های بتن مسلح، مرکز نشر پرفسور حسابی ۱۳۷۸