معرفی استفاده از مصالح FRP به روش NSM به عنوان روشی کارآمد در مقاوم سازی سازه‌ها

علی حاجی‌هاشمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
alihajihashemi@gmail.com
داود مستوفی‌نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
dmostofi@cc.iut.ac.ir
مجتبی ازهری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
mojtaba@cc.iut.ac.ir

چکیده

مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح با استفاده از مصالح FRP در مقایسه با سایر روش‌های مقاوم سازی به دلیل حصول مقاومت بالاتر در ازای زحمت کمتر و همچنین بدون تغییر باقی ماندن ابعاد و شکل سازه پس از مقاوم سازی، به عنوان روشی متداول در سرتاسر جهان پذیرفته شده است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از این مصالح به شیوه " تسلیح با اتصال خارجی (EBR)" یعنی چسباندن ورقه‌های FRP بر سطوح خارجی سازه‌ها، به علت جدا شدگی پیش از موعد، امکان استفاده از تمامی مقاومت کششی FRP را فراهم نمی‌کند. برای غلبه بر این ضعف تلاش‌های گوناگونی صورت گرفته که یکی از کارآمدترین آنها استفاده از مصالح FRP به روش "نصب در نزدیک سطح (NSM)" می‌باشد که بر اساس ایده‌ی کارگذاشتن مصالح مقاوم کننده در شیارهای تعبیه شده در سطح سازه‌ها شکل گرفته است.

در این تحقیق سعی می‌شود تا با معرفی کامل روش NSM به عنوان روشی کارآمد در مقاوم سازی سازه‌های بتنی با مصالح FRP، مزیت‌های این روش در مقایسه با روش EBR نشان داده شده و تحقیقات انجام شده بر کاربرد این روش در زمینه‌های مختلف مقاوم سازی مورد اشاره قرار گیرند.

کلید واژه‌ها: *بتن مسلح، مصالح FRP، روش NSM، مقاوم سازی.*

۱- مقدمه

تعمیر یک سازه بتن آرمه وقتی که اجزای آن قادر به تامین سرویس دهی یا مقاومت لازم نباشند، ضروری می‌گردد. در عمل این موقعیت هنگامی پیش می‌آید که سازه‌های بتنی و یا قسمت‌هایی از آنها، به دلایل گوناگون، ضعیف تشخیص داده شده و احتیاج به مقاوم سازی داشته باشند. این ضعف می‌تواند در اثر آسیب‌های مکانیکی، خوردگی آرماتور و یا تغییر کاربری بوجود آمده باشد. بر مبنای نوع سازه و کاربری آن، روش‌های موفق و متفاوتی برای تعمیر و مقاوم سازی تمام و یا قسمت‌هایی از سازه‌های بتنی گسترش داده شده‌اند. در دهه‌های اخیر و با تولید چسب‌های شیمیایی بسیار قوی، چسباندن ورقه‌های مقاوم کننده به اجزای بتن آرمه به عنوان روش موثری در افزایش سرویس دهی و بالا بردن مقاومت نهایی

سازه‌های بتنی مطرح شده است. سادگی و سرعت اجرای بالا در کنار افزایش کم در وزن سازه بتنی را می‌توان به عنوان مزایای این روش برشمرد [۱].

بطور سنتی، تعمیر یا بهسازی تیرهای بتن آرمه با چسباندن ورقه‌های فولادی انجام می‌پذیرفته است. با وجود آنکه کارآیی این روش در عمل به اثبات رسیده است، اما این روش معایب بزرگی از جمله: ۱) در معرض خوردگی بودن ورق‌ها و ۲) وزن زیاد ورق‌ها به خصوص در تیرهای بلند دهانه را دارد [۲]. در سال‌های اخیر، ورق‌های "پلیمر مسلح شده با الیاف (Fiber Reinforced Polymer)" مزایای بسیاری از خود به عنوان جایگزین ورقه‌های فولادی در تعمیر و بهسازی سازه‌های بتنی، نشان داده‌اند. در کنار نسبت بالای مقاومت به وزن، این مصالح در برابر خوردگی و دیگر آسیب‌های شیمیایی مقاوم می‌باشند.

۲- انواع محصولات FRP و کاربرد آنها در سازه‌های بتن آرمه

کامپوزیت‌ها (مواد مرکب)، دسته‌ای از مواد هستند که همان‌طور که از نامشان برمی‌آید، از اجزاء مختلفی تشکیل یافته‌اند. به طور کلی FRP از دو جزء تشکیل شده است؛ جزء اول که قسمت باربر FRP محسوب می‌شود، الیاف هستند. این الیاف کاملاً الاستیک رفتار می‌کنند، شکننده هستند و مقاومت کششی بسیار بالایی دارند. قطر این الیاف بسته به نوع آن‌ها در محدوده ۵ تا ۲۵ میکرون قرار دارد؛ جنس الیاف می‌تواند از شیشه، کربن، آرامید یا وینیل باشد که FRP ساخته شده با هر یک از این مواد را به ترتیب GFRP، CFRP، AFRP و VFRP می‌نامند. در بین انواع ذکر شده، CFRP به خاطر خواص بهتر نسبت به ۳ دسته دیگر دارای بیشترین کاربرد است. الیاف بکار رفته در CFRP، با نام شیمیایی پلی آکریلونیتریل، مقاومت بسیار بالایی دارند؛ به‌طوری‌که گاه مقاومتی نزدیک به ۴۰۰۰MPa از خود نشان می‌دهند [۳]. جزء دوم ساختار FRP چسب یا رزین است. این جزء که به عنوان یک محیط چسبنده الیاف را در کنار هم نگاه می‌دارد، نقش چندانی در باربری ندارد. چسب‌های موجود در ساخت FRP از دو نوع ترکیب ترموست و ترموپلاستیک ساخته می‌شوند.

مقاومت FRP در برابر خوردگی با هیچ ماده‌ای قابل مقایسه نیست. این خصیصه FRP را به عنوان جایگزین مناسبی برای فولاد در بتن مطرح ساخته‌است.

به عنوان کاربردهای مختلف مصالح FRP در ترکیب با سازه‌های بتنی به این موارد می‌توان اشاره نمود:

۱) استفاده به عنوان تاندون‌های پیش تنیدگی با استفاده از الیاف پیوسته هم‌راستا.

۲) استفاده به عنوان مسلح کننده‌های داخلی در محیط‌های خورنده یا سازه‌هایی که باید نارسانای الکتریسیته باشند.

۳) استفاده به عنوان محصور کننده در ساخت ستون‌ها.

۴) استفاده به عنوان مقاوم کننده خارجی [۴].

۳- روش " نصب در نزدیک سطح (Near Surface Mounted) "

برای مقاوم سازی اجزای بتن آرمه، ورقه‌ها و تسمه‌های FRP عموماً بر روی سطح آنها چسبانده می‌شوند که این روش متداول را "تسلیح با اتصال خارجی (Externally Bonded Reinforcement)" می‌نامند. تحقیقاتی که تاکنون انجام شده نشان می‌دهد که در این روش، به علت جدا شدگی پیش از موعد، امکان استفاده از ظرفیت کششی کامل مصالح FRP وجود ندارد که برای بر طرف کردن این نقیصه سیستم‌های مهار گوناگونی پیشنهاد شده‌اند. هم‌چنین در این روش کارکرد مصالح FRP به علت اثرات نامناسب سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن و تغییرات شدید دمایی، دچار افت می‌گردد [۵]. از طرفی سیستم‌های EBR در معرض حرکات خرابکارانه نیز قرار دارند.

برای غلبه بر این ضعف‌ها تلاش‌های متعددی صورت گرفته است که از موفق‌ترین آنها باید به روش نصب در نزدیک سطح (NSM) اشاره نمود. این روش بر مبنای کار گذاشتن مصالح مقاوم کننده در شیارهای از پیش تعبیه شده در پوشش اجزای بتنی استوار است و قدمت آن در مورد میله‌های مقاوم کننده فولادی به دهه ۱۹۵۰ بر می‌گردد. اخیرا موارد جدید دیگری نیز از کاربرد این روش در مورد میله‌های ضد زنگ فولادی به عنوان مقاوم کننده در مقاوم سازی سازه‌های بنایی و پل‌های قوسی گزارش شده‌اند. استفاده از مصالح FRP به عنوان مقاوم کننده در روش NSM دارای مزایای متعددی نسبت به فولاد می‌باشد که از جمله می‌توان به مقاومت در برابر خوردگی، راحتی و سرعت نصب بالاتر به دلیل وزن کم و کاهش اندازه شیارها به دلیل نسبت بالای مقاومت کششی به سطح مقطع در مصالح FRP اشاره نمود [۶].

در مقایسه با کاربرد مصالح FRP به روش EBR، روش NSM دارای مزایای زیر می‌باشد [۶]:

۱) به علت عدم نیاز به عملیات آماده سازی سطح، حجم عملیات مقاوم سازی کاهش می‌یابد،

۲) مسلح کننده‌های NSM به مراتب کمتر در معرض جدا شدگی قرار دارند،

۳) مسلح کننده‌های NSM را می‌توان به راحتی در سطوح جنبی قطعات مهار نمود تا مانع از جدا شدگی آنها گردید؛ این مزیت به خصوص در مقاوم سازی خمشی اجزای قاب‌های خمشی در نواحی لنگر منفی مورد توجه می‌باشد،

۴) مسلح کننده‌های NSM راحت‌تر پیش تنیده می‌گردند،

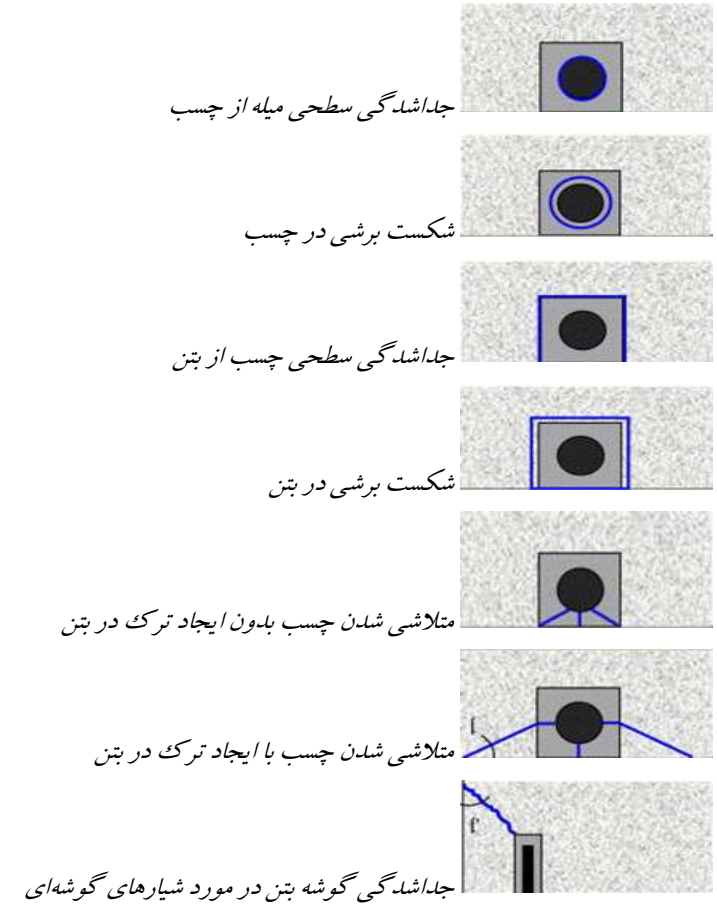
۵) مسلح کننده‌های NSM بوسیله پوشش بتنی محافظت شده و در نتیجه کمتر در معرض ضربه‌ها و آسیب‌های مکانیکی، آتش سوزی و حرکات خرابکارانه قرار دارند، و

۶) ظاهر سازه پس از مقاوم سازی بدون تغییر باقی می‌ماند.

مراحل انجام روش NSM به این ترتیب است که ابتدا شیاری در راستای مورد نظر در سطح بتن ایجاد می‌گردد. اندازه شیار طوری انتخاب می‌شود که فضای کافی برای نفوذ چسب به اطراف مقاوم کننده

وجود داشته باشد. داخل شیار با فشار متوسط آب یا هوا از ذرات گرد و غبار تمیز شده و سپس شیار تا نیمه با چسب پر می‌شود. مصالح FRP درون شیار قرار گرفته و برای اطمینان از نفوذ چسب به تمامی فضاهای اطراف، به آرامی فشار داده می‌شود. در انتها شیار با چسب اضافه پر شده و سطح تراز می‌گردد [۷].

آزمایش‌های چسبندگی، حالات مختلف شکست چسبندگی در سیستم‌های NSM را مطابق شکل ۱ نشان می‌دهند.



شکل ۱ *حالات محتمل شکست چسبندگی در سیستم‌های NSM[۶]*

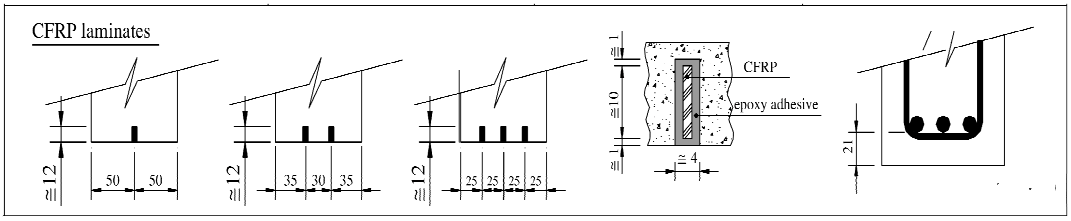
٤- کاربرد روش NSM در مقاوم سازی خمشی تیرهای بتن آرمه

٤-١ استفاده از تسمه‌های FRP

باروس و فورتس [۵] با هدف دو برابر کردن ظرفیت باربری، چهار سری تیر را با مقادیر مختلف مصالح FRP مورد آزمایش قرار دادند (شکل۲).

نتایج گزارش شده توسط آنها به شرح زیر می‌باشند:

۱) حالت شکست در همه نمونه‌ها، به جز یکی از آنها، جداشدگی لایه تحتانی بتن بود.
۲) افزایش ۳۲ تا ۴۷ درصدی در میزان بار ترک خوردگی وبار تسلیم نمونه‌ها مشاهده شد.
۳) بار سرویس (بار معادل تغییر شکل l/400) تا ۴۵ درصد افزایش داشت.
۴) کرنش ثبت شده برای تسمه‌های CFRP از ۶۲ تا ۹۱ درصد کرنش نهایی مصالح بود.
۵) سختی تیر به میزان قابل توجهی افزایش یافته و تغییر شکل‌ها مشخصاً کم شده بودند.



شکل۲ *مقاوم سازی به روش NSM و با مقادیر مختلف تسمه‌های CFRP[۵]*

۲-٤ استفاده از میله‌های FRP

تنگ و همکاران [۸] با هدف بررسی اثرات نوع بتن(بتن سبک و معمولی)، نوع میلگردهای تقویتی (فولادی یا GFRP) و نوع چسب مصرفی، تعداد ۱۰ نمونه تیر را مورد آزمایش قرار دادند.
نتایج بدست آمده به این شرح می‌باشند:

۱) حالت شکست در تیرهای تقویت شده باNSM GFRP، شکست برشی یا متلاشی شدن چسب و بطور همزمان پارگی میله‌های GFRP بوده است.
۲) بطور کلی تقویت تیرها با NSM GFRP موجب کاهش تغییر شکل نهایی و افزایش سختی خمشی و ظرفیت خمشی تیر بوده است.
۳) افزایش قطر میلگرد GFRP باعث افزایش سختی خمشی وکاهش تغییر شکل‌ها بوده است.
۴) بطور کلی تیرهای تقویت شده با NSM GFRP افزایش ۲۳ تا ۵۳ درصدی در مقدار لنگر نهایی داشتند.

۵- کاربرد روش NSM در مقاوم سازی برشی تیرهای بتن آرمه

۵-۱ با استفاده از تسمه‌های FRP

باروس و دیاس [۹] با هدف مقایسه روش‌های EBR و NSM و همچنین اثر زاویه قرار گیری تسمه‌ها در وجه جانبی تیر، چهار سری تیر را مورد آزمایش قرار داده و نتایج زیر را گزارش نمودند:

۱) ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده با روش‌های EBR و NSM به ترتیب ۵۴ و ۸۳ درصد افزایش داشتند،

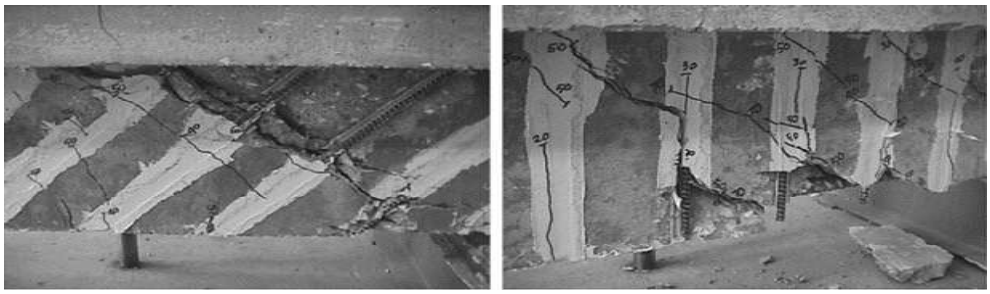
۲) تغییر شکل نهایی(تغییر شکل متناظر با بار$0.95F_u$) برای تیرهای تقویت شده با روش‌های EBRو NSM به ترتیب ۷۷ و ۳۰۷ درصد افزایش داشت.

۳) حالت شکست در نمونه‌های EBR تردتر از نمونه‌های NSM بود.

۴) اجرای روشNSM ، راحت‌تر و سریع‌تر از روش EBR بود.

۵-۲ با استفاده از میله‌های FRP

دی لورنزیس و نانی [۷] با هدف بررسی اثر فاصله میلگردها، زاویه قرار گیری آنها و تاثیر مهار کردن میلگردها در بال تیرهای T شکل آزمایشاتی را روی هشت تیر انجام دادند (شکل۳).



شکل ۳ *تیرهای مقاوم شده برشی پس از شکست [۶]*

نتایج تحقیق به این شرح منتشر گردیدند:

۱) استفاده از روش NSM بطور متوسط افزایش ۳۵ درصدی را در ظرفیت برشی مقطع نشان می‌دهد.

۲) مؤثرترین شیوه برای افزایش کارآیی مقاوم سازی، مهار میلگردها در بال تیر می‌باشد. قراردادن میلگردها با زاویه ۴۵ درجه نیز تأثیر خوبی نشان می‌دهد، اما کم کردن فاصله میلگردها اثر قابل توجهی ندارد.

۳) در این تحقیق دو مکانیسم شکست مشاهده شد :

اول، جداشدگی میلگردهای FRP که با اعمال مهارشدگی یا تغییر زاویه میلگردها قابل جلوگیری است.

دوم، متلاشی شدن پوشش بتنی آرماتورهای طولی که در اثر ناتوانی میلگردهای برشی تقویتی در مشارکت درعمل میخ پرچی (Dowel Action) می‌باشد.

٦- کاربرد روش NSM در مقاوم سازی ستون‌های بتن آرمه

باروس و همکاران [۱۰] با هدف بررسی اثر میزان فولاد مقطع (ρ) آزمایشاتی را بر روی ستون‌های مقاوم شده قبل از بارگذاری و مقاوم شده بعد از بارگذاری ترتیب داده و نتایج کار خود را چنین گزارش نمودند:

۱) افزایش ظرفیت باربری در مقاطع با درصد فولاد کمتر، به میزان بیشتری بوده است.

۲) افزایش ظرفیت باربری در مقاطعی که قبل یا بعد از بارگذاری تقویت شده‌اند، یکسان بوده است.

۳) چون این شیوه مقاوم سازی محصور شدگی درستون ایجاد نمی‌کند، اتلاف انرژی بسیار ناچیز بوده است.

۴) در اکثر نمونه‌ها کرنش تسمه‌های CFRP به حد پارگی نزدیک شده است.

۷- کاربرد روش NSM در مقاوم سازی دال‌های بتن آرمه

فورت و لیمام [۱۱] برای مقایسه روش‌های EBR و NSM در مقاوم سازی دال‌های بتنی دو طرفه با مصالح CFRP، آزمایشاتی را بر روی ۴ نمونه انجام دادند. ایشان از تسمه‌های CFRP در مقاوم سازی به روش EBR و از میله‌های CFRP در مقاوم سازی به روش NSM استفاده نمودند. در هر حالت مقاوم کننده‌ها در هر دو راستای x و y و به فواصل مساوی قرار گرفته و دال تحت یک بار استاتیکی در مرکز مورد آزمایش قرار گرفت.

نتایج بدست آمده به این شرح می‌باشند:

۱) در خصوص افزایش ظرفیت باربری، نمونه‌های مقاوم شده به روش EBR و NSM افزایش تقریباً مشابه و به میزان ۶۷ درصد افزایش نسبت به نمونه مبنا از خود نشان دادند.

۲) دال‌های مقاوم شده به روش NSM، رفتار نرم‌تری در مقایسه با دال‌های مقاوم شده به روش EBR داشته‌اند.

۳) در همه نمونه‌ها، حالت شکست نهایی، جدا شدگی مقاوم کننده‌ها بوده که این امر در روش EBR بصورت ناگهانی و در روش NSM بصورت لغزش میله‌ها و تدریجی بوده است.

۴) روش NSM دارای برتری اقتصادی در مقایسه با روش EBR می‌باشد.

۸- کاربرد روش NSM در مقاوم سازی سازه‌های بنایی

۸-۱ مقاوم سازی دیوارهای بنایی

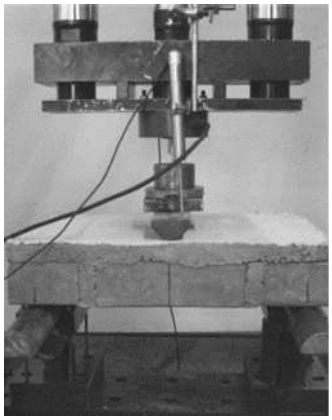
نانی و همکاران [۱۲] با هدف بررسی اثر میلگردهای GFRP و تسمه‌های GFRP در مقاوم سازی خمشی و برشی دیوارهای بنایی آزمایشاتی را ترتیب داده و نتایج زیر را بدست آوردند:

۱) در مقاوم سازی خمشی افزایش ۴ تا ۱۴ برابر برای دیوار بنایی مشاهده شد و عملکرد دیوارهای تقویت شده با میلگرد و تسمه یکسان بوده است.

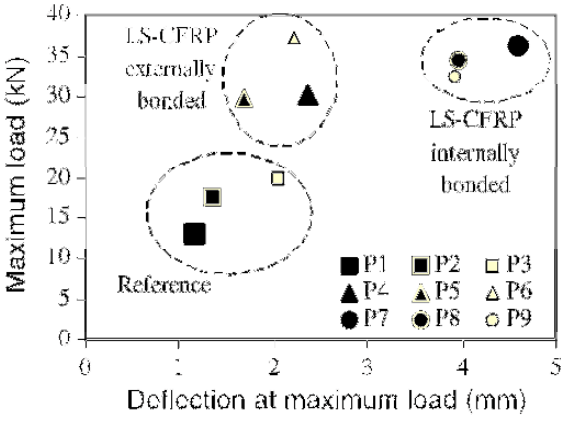
۲) در مقاوم سازی برشی افزایش ظرفیت در تقویت با میلگرد و تسمه یکسان بوده، ولی شکل پذیری در دیوار تقویت شده با میلگرد بیشتر بوده است.

۸-۲ مقاوم سازی دال‌های بنایی

باروس و همکاران [۱۰] با هدف مقایسه روش‌های EBR و NSM در مقاوم سازی پانل‌های بنایی آزمایشاتی را بر روی دال‌های بنایی تحت یک بار استاتیکی متمرکز در وسط، ترتیب داده (شکل۴) و با مقایسه ظرفیت باربری و تغییر شکل نمونه‌ها، نتایج زیر را بدست آوردند (شکل۵):



شکل ٤ *مقاوم سازی دال بنایی [۱۰]*



شکل ٥ *مقایسه روش‌های EBR و NSM در پانل بنایی [۱۰]*

۱) افزایش باربری در نمونه‌های EBR و NSM به ترتیب ۹۲ و ۱۰۴ درصد بوده است.

۲) افزایش تغییر شکل در لحظه شکست نهایی برای نمونه‌های EBR و NSM به ترتیب ۳۸ و ۱۰۸ درصد بوده است.

۹- رفتار بلند مدت سازه‌های بتنی تقویت شده به روش NSM FRP

میکلی و لاتگولا [۱۳] به منظور بررسی رفتار بلند مدت تیرهای تقویت شده با مصالح FRP و به روش NSM در شرایط محیطی سخت، آزمایشاتی را بر روی دو سری تیرهای تقویت شده با تسمه‌های CFRP و GFRP به روش NSM انجام دادند. ایشان از هر سری یک تیر را به عنوان شاهد در شرایط آزمایشگاهی نگه داشته و نمونه‌های دیگر را تحت سیکل‌های متعدد یخ زدن و ذوب شدن، درجه حرارت بالا و رطوبت زیاد قرار دادند. ایشان بدین منظور از شبیه سازی شرایط محیطی واقعی و شرایط تسریع شده استفاده کرده و نتایج زیر را گزارش نمودند:

۱) شرایط محیطی سخت تاثیری بر ظرفیت باربری نمونه‌ها در حالت سرویس و نهایی نداشته است.

۲) در مورد نمونه‌های تقویت شده با NSM GFRP، حالت شکست، پارگی FRP؛ و در مورد نمونه‌های تقویت شده با NSM CFRP، حالت شکست، متلاشی شدن چسب بوده است.

۳) تغییر شکل نهایی برای تمام نمونه‌های در معرض شرایط محیطی کاهش داشته است.

۴) روش NSM، روشی بسیار موثر برای مقاوم سازی بوده و کم‌ترین تاثیر منفی را از شرایط سخت محیطی متناوب می‌پذیرد.

۱۰- کاربرد روش NSM در مقاوم سازی سازه‌های بتنی با مصالح FRP پیش تنیده

نوردین و تالجستن [۱۴] با استفاده از پروفیل مربعی FRP که بصورت NSM پیش تنیده شده بود، آزمایشاتی را ترتیب دادند. در این آزمایش برای پیگیری افت‌ها در طول میله از کرنش سنج‌های متعددی استفاده شد. نتایج این تحقیق به صورت زیر منتشر شده است:

۱) افت‌های کرنشی در نواحی انتهایی بسیار زیاد (حتی تا ۱۰۰ درصد) می‌باشد؛ ولی با دور شدن از انتها این افت‌ها کاهش یافته و در مرکز تیر به حدود ۵ درصد می‌رسد که این امر نشان دهنده مزیت روش NSM نسبت به روش NSM در کاهش افت‌های نیروی پیش تنیدگی می‌باشد.

۲) تیرهای مقاوم شده با مصالح پیش تنیده در مقایسه با تیرهای مقاوم شده غیر پیش تنیده دارای سختی یکسان، اما بار ترک خوردگی و بار تسلیم بالاتری هستند.

۳) با تغییر طول میله‌های NSM پیش تنیده، تفاوت چشمگیری در مقدار نیروی نهایی رخ نمی‌دهد.

۴) با زیاد شدن مدول الاستیسیته مصالح FRP ، بار تسلیم آرماتورها زیاد می‌شود.

۵) اضافه کردن میزان نیروی پیش تنیدگی مشخصاً بار نظیر ترک خوردگی و بار نظیر تسلیم را افزایش داده و باعث کم شدن تغییر شکل‌ها می‌شود.

۶) استفاده از مصالح FRP پیش تنیده با کوچک کردن ترک‌ها، باعث بروز رفتار بهتری از تیر در ناحیه سرویس می‌شود.

۱۱- خلاصه و نتیجه گیری

مقاوم سازی سازه‌ها با استفاده از مصالح FRP و به روش NSM در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود به عنوان جایگزینی آسان و با صرفه برای استفاده از مصالح FRP به روش EBR، جلب کرده است. این روش در مقایسه با روش EBR مزایای قابل توجهی از جمله استفاده موثرتر از مصالح FRP (به دلیل کاهش امکان جدا شدگی) و محافظت بهتر مصالح مقاوم کننده در برابر آسیب‌های خارجی را دارا می‌باشد.

با آنکه تحقیقات بر روی مقاوم سازی سازه‌ها با مصالح FRP و به روش NSM تنها چند سالی است که آغاز شده، اما هم‌اکنون تحقیق در این زمینه به شدت در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته است بطوریکه در این سال‌ها شمار زیادی کار تحقیقاتی بر روی این روش جدید، خصوصاً بر روی کاربرد آن برای مقاوم سازی سازه‌های بتن آرمه انجام پذیرفته‌اند. در این مقاله سعی شده است تا ضمن معرفی این روش نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده بر روی رفتار سازه‌ای اجزای مختلف بتن آرمه که به روش NSM FRP مقاوم شده‌اند، مورد بررسی قرار گیرد و به مزایای روش NSM برای موارد مختلف مقاوم سازی در عمل اشاره شود.

این بررسی نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده هنوز بسیار محدود بوده و تا رسیدن به کابرد گسترده این روش در پروژه‌های غیر تحقیقاتی، جنبه‌های گوناگون دیگری از آن، چه در زمینه بسط روابط تحلیلی و چه در زمینه رفتار واقعی، باید مورد بررسی و تحقیق واقع شوند.

مراجع

[1] Alfarabi Sharif, G. J., Al-Sulaimani, I. A., Basundul, M. H., Baluch and Ghaleb, B. N., "Strengthening of Initially Loaded Concrete Beams Using FRP Plates", *ACI Structural Journal*, 1994, Vol. 91, No. 2, pp. 160-168.

[2] Ross, C. A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W., and Hughes, M. L., "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Laminates", *ACI Structural Journal*, 1999, Vol. 96, No. 2, pp. 143-152.

[3] Mostofinejad, D., "An Overview on FRP Reinforced Concrete as a Corrosion-Resistant Element in Offshore Structures", *Proceeding of 4th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures, ICOPMAS 2000*, Iran, Nov. 2000.

[4] Triantafillu, T. C., Deskovic, N., and Deuring, M., "Strengthening of Concrete Structures with Prestressed FRP Sheets", *ACI Structural Journal*, 1992, Vol. 89, No. 3, pp. 235-244.

[5] Barros, J. A. O., and Fortes, A. S., "Flexural Strengthening of Concrete Beams with CFRP Laminates Bonded into Slits", *Cement and Concrete Composites*, 2005, No. 27, pp. 471-480.
[6] De Lorenzis, L., and Teng, G. J., "Near Surface Mounted FRP Reinforcement: An Emerging Technique for Strengthening Structures", *Composites Part B: Engineering*, 2007, No. 38, pp. 119-143.
[7] De Lorenzis, L., and Nanni, A., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted FRP Rods", *ACI Structural Journal*, 2001, Vol. 98, No. 1, pp. 60-68.
[8] Tang, W. C., Balendran, R. V., Nadeem, A., and Leung, H. Y., "Flexural Strengthening of Reinforced Lightweight Polystyrene Aggregate Concrete Beams with Near Surface Mounted GFRP Bars", *Building and Environment*, 2006, No. 41, pp. 1381-1393.
[9] Barros, J. A. O., and Dias, S. J. E., "Near Surface Mounted CFRP Laminates for Shear Strengthening of Concrete Beams", *Cement and Concrete Composites*, 2006, No. 28, pp. 276-292.
[10] Barros, J. A. O., Ferreira, D. R. S. M., Fortes, A. S., and Dias, S. J. E., "Assessing the Effectiveness of Embedding CFRP Laminates in the Near Surface for Structural Strengthening", *Construction and Building Materials*, 2006, No. 20, pp. 478-491.
[11] Foret, G. and Limam, O., "Experimental and Numerical Analysis of RC Two-Way Slabs Strengthened with NSM CFRP Rods", *Construction and Building Materials*, 2007, No. 10, pp. 10-16.
[12] Nanni, A., Tumilan. G., and Busel, J., "Retrofitting Techniques for Seismic Upgrade of Unreinforced Masonry Structures", *GoStructural.com*, 2006, paper id: 224.
[13] Micelly, F. and La Tegola, A., "Environmental Effects on RC Beams with Near Surface Mounted FRP Rods", *Proceeding of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6*, Singapore, July 2003, Vol. 2, pp. 749-758.
[14] Nordin, H. and Taljsten, B., "Concrete Beams Strengthened with Prestressed NSM CFRP", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2006, Vol. 10, No. 1, pp. 60-68.