

کاربرد کامپوزیت‌های FRP در سازه‌های بتن آرمه و بررسی دوام آنها

دکتر داود مستوفی‌نژاد
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

خلاصه

خوردگی قطعات فولادی در سازه‌های مجاور آب و نیز خوردگی میلگردهای فولادی در سازه‌های بتن آرمه ای که در معرض محیط‌های خورنده کلروری و کربناتی قرار دارند، یک مسأله بسیار اساسی تلقی می‌شود. در محیط‌های دریایی و مرطوب وقتی که یک سازه بتن آرمه معمولی به صورت دراز مدت در معرض عناصر خورنده نظیر نمک‌ها، اسیدها و کلورها قرار گیرد، میلگردها به دلیل آسیب دیدگی و خوردگی، قسمتی از ظرفیت خود را از دست خواهند داد. به علاوه فولادهای زنگ زده بر پوسته بیرونی بتن فشار می‌آورد که به خرد شدن و ریختن آن منتهی می‌شود. تعمیر و جایگزینی اجزاء فولادی آسیب دیده و نیز سازه بتن آرمه‌ای که به دلیل خوردگی میلگردها آسیب دیده است، میلیون‌ها دلار خسارت در سراسر دنیا به بار آورده است. به همین دلیل سعی شده که تدابیر ویژه‌ای جهت جلوگیری از خوردگی اجزاء فولادی و میلگردهای فولادی در بتن اتخاذ گردد که از جمله می‌توان به حفاظت کاتدیک اشاره نمود. با این وجود برای حذف کامل این مسأله، توجه ویژه‌ای به جانشینی کامل اجزاء و میلگردهای فولادی با یک ماده جدید مقاوم در مقابل خوردگی معطوف گردیده است. از آنجا که کامپوزیت‌های (Fiber Reinforced FRP (Polymers/Plastics) بشدت در مقابل محیط‌های قلیایی و نمکی مقاوم هستند که در دو دهه اخیر موضوع تحقیقات گسترده‌ای جهت جایگزینی کامل با قطعات و میلگردهای فولادی بوده‌اند. چنین جایگزینی بخصوص در محیط‌های خورنده نظیر محیط‌های دریایی و ساحلی بسیار مناسب به نظر می‌رسد. در این مقاله مروری بر خواص، مزایا و معایب مصالح کامپوزیتی FRP صورت گرفته و قابلیت کاربرد آنها به عنوان جانشین کامل فولاد در سازه‌های مجاور آب و بخصوص در سازه بتن آرمه، به جهت حصول یک سازه کاملاً مقاوم در مقابل خوردگی، مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱ - مقدمه

بسیاری از سازه‌های بتن آرمه موجود در دنیا در اثر تماس با سولفات‌ها، کلریدها و سایر عوامل خورنده، دچار آسیب‌های اساسی شده‌اند. این مسأله هزینه‌های زیادی را برای تعمیر، بازسازی و یا تعویض سازه‌های آسیب دیده در سراسر دنیا موجب شده است. این مسأله و عواقب آن گاهی نه تنها به عنوان یک مسأله مهندسی، بلکه به عنوان یک مسأله اجتماعی جدی تلقی شده است [۱]. تعمیر و جایگزینی سازه‌های بتنی آسیب‌دیده میلیون‌ها دلار خسارت در دنیا به دنبال داشته است. در امریکا، بیش از ۴۰ درصد پلها در شاهراهها نیاز به تعویض و یا بازسازی دارند [۲]. هزینه بازسازی و یا تعمیر سازه‌های پارکینگ در کانادا، ۴ تا ۶ میلیارد دلار کانادا تخمین زده شده است [۳]. هزینه تعمیر پل‌های شاهراهها در امریکا در حدود ۵۰ میلیارد دلار برآورد شده است؛ در حالیکه برای بازسازی کلیه سازه‌های بتن آرمه آسیب‌دیده در امریکا در اثر مسأله خوردگی میلگردها، پیش‌بینی شده که به بودجه نجومی ۱ تا ۳ تریلیون دلار نیاز است [۳]!

از مواردی که سازه‌های بتن آرمه به صورت سنتی مورد استفاده قرار می‌گرفته، کاربرد آن در مجاورت آب و نیز در محیط‌های دریایی بوده است. تاریخچه کاربرد بتن آرمه و بتن پیش‌تنیده در کارهای دریایی به سال ۱۸۹۶ بر می‌گردد [۴]. دلیل عمده این مساله، خواص ذاتی بتن و منجمله مقاومت خوب و سهولت در قابلیت کاربرد آن چه در بتن‌ریزی در جا و چه در بتن پیش‌تنیده بوده است. با این وجود شرایط آب و هوایی و محیطی خشن و خورنده اطراف سازه‌های ساحلی و دریایی همواره به عنوان یک تهدید جدی برای اعضاء بتن آرمه محسوب گردیده است. در محیط‌های ساحلی و دریایی، خاک، آب زیرزمینی و هوا، اکثراً حاوی مقادیر زیادی از نمکها شامل ترکیبات سولفور و کلرید هستند. در یک محیط دریایی نظیر خلیج فارس، شرایط جغرافیایی و آب و هوایی نامناسب، که بسیاری از عوامل خورنده را به دنبال دارد، با درجه حرارت‌های بالا و نیز رطوبت‌های بالا همراه شده که نتجتاً خوردگی در فولادهای به کار رفته در بتن آرمه کاملاً تشدید می‌شود. در مناطق ساحلی خلیج فارس، در تابستان درجه حرارت از ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند، در حالیکه گاه اختلاف دمای شب و روز، بیش از ۳۰ درجه سانتیگراد متغییر است. این در حالی است که رطوبت نسبی اغلب بالای ۶۰ درصد بوده و بعضاً نزدیک به ۱۰۰ درصد است. به علاوه هوای مجاور مرکز بالایی از دی‌اکسید گوگرد و ذرات نمک دارد [۵]. به همین جهت است که از منطقه دریایی خلیج فارس به عنوان یکی از مخرب‌ترین محیطها برای بتن در دنیا یاد شده است [۶]. در چنین شرایط، ترک‌ها و ریزترک‌های متعددی در اثر انقباض و نیز تغییرات حرارتی و رطوبتی ایجاد شده، که این مساله به نوبه خود، نفوذ کلریدها و سولفاتهای مهاجم را به داخل بتن تشدید کرده، و شرایط مستعدی برای خوردگی فولاد فراهم می‌آورد [۷-۹]. به همین جهت بسیاری از سازه‌های بتن مسلح در نواحی ساحلی ایران نظیر سواحل بندرعباس، در کمتر از ۵ سال از نظر سازه‌ای غیر قابل استفاده گردیده‌اند.

نظیر این مساله برای بسیاری از سازه‌های در مجاورت آب، که در محیط دریایی و ساحلی قرار ندارند نیز وجود دارد. پایه‌های پل، آبگیرها، سدها و کانال‌های بتن آرمه نیز از این مورد مستثنی نبوده و اغلب به دلیل وجود یون سولفات و کلرید، از خوردگی فولاد رنج می‌برند.

۲ - راه حل مساله

تکنیک‌هایی چند، جهت جلوگیری از خوردگی قطعات فولادی الحاقی به سازه و نیز فولاد در بتن مسلح توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است که از بین آنها می‌توان به پوشش اپوکسی بر قطعات فولادی و میلگردها، تزریق پلیمر به سطوح بتنی و حفاظت کاتدی کمیلگردها اشاره نمود. با این وجود هر یک از این تکنیک‌ها فقط تا حدودی موفق بوده است [۱۰]. برای حذف کامل مساله، توجه محققین به جانشین کردن قطعات فولادی و میلگردهای فولادی با مصالح جدید مقاوم در مقابل خوردگی، معطوف گردیده است.

مواد کامپوزیتی FRP (Fiber Reinforced Polymers/Plastics) موادی بسیار مقاوم در مقابل محیط‌های خورنده همچون محیط‌های نمکی و قلیایی هستند. به همین دلیل امروزه کامپوزیت‌های FRP، موضوع تحقیقات توسعه‌ای وسیعی به عنوان جانشین قطعات و میلگردهای فولادی و کابل‌های پیش‌تنیدگی شده‌اند. چنین تحقیقاتی به خصوص برای سازه‌های در مجاورت آب و بالاص در محیط‌های دریایی و ساحلی، به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند.

۳ - ساختار مصالح FRP

مواد FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ فایبر (الیاف) و رزین (ماده چسباننده). فایبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در ماده FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع فایبر، قطر آن در محدوده ۵ تا ۲۵ میکرون می‌باشد [۱۱].

رزین اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند، که فایبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد. با این وجود، ماتریس‌های با مقاومت کم به صورت چشمگیر بر خواص مکانیکی کامپوزیت نظیر مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی آن اثر نمی‌گذارند. ماتریس (رزین) را می‌توان از مخلوط‌های ترموست و یا ترموپلاستیک انتخاب کرد. ماتریس‌های ترموست با اعمال حرارت سخت شده و دیگر به حالت مایع یا روان در نمی‌آیند؛ در حالیکه رزین‌های ترموپلاستیک را می‌توان با اعمال حرارت، مایع نموده و با اعمال برودت به حالت جامد درآورد. به عنوان رزین‌های ترموست می‌توان از پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی، و به عنوان رزین‌های ترموپلاستیک از پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن (PP)، نام برد [۳].

فایبر ممکن است از شیشه، کربن، آرامید و یا وینیلون باشد که در اینصورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نام‌های GFRP، CFRP، AFRP و VFRP شناخته می‌شود. در ادامه شرح مختصری از بعضی از فایبرهای متداول ارائه خواهد شد.

۱-۳- الیاف شیشه

فایبرهای شیشه در چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰]؛

- ۱ - E-Glass: متداول ترین الیاف شیشه در بازار با محتوای قلیایی کم، که در صنعت ساختمان به کار می‌رود، (با مدول الاستیسیته $E = 70 \text{ GPa}$ ، مقاومت نهایی $\sigma_u = 1500 - 2500 \text{ MPa}$ ، و کرنش نهایی $\epsilon_u = 1.8\% - 3\%$).
- ۲ - Z-Glass: با مقاومت بالا در مقابل حمله قلیائیه‌ها، که در تولید بتن الیافی به کار گرفته می‌شود.
- ۳ - A-Glass: با مقادیر زیاد قلیایی که امروزه تقریباً از رده خارج شده است.
- ۴ - S-Glass: که در تکنولوژی هوا-فضا و تحقیقات فضایی به کار گرفته می‌شود و مدول الاستیسیته بسیار بالایی دارد، ($E = 87 \text{ GPa}$ و $\sigma_u = 3900 \text{ MPa}$).

۲-۳- الیاف کربن

الیاف کربن در دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند؛

- 1- الیاف کربنی از نوع PAN در سه نوع مختلف هستند. تیپ I که تردترین آنها با بالاترین مدول الاستیسیته محسوب می‌شود. ($E = 380 \text{ GPa}$ ، $\sigma_u = 2000 \text{ MPa}$ و $\epsilon_u = 0.5\%$). تیپ II که مقاوم‌ترین الیاف کربن است ($\sigma_u = 2800 \text{ MPa}$ ، $E = 240 \text{ GPa}$ و $\epsilon_u = 1\%$)؛ و نهایتاً تیپ III که نرمترین نوع الیاف کربنی با مقاومتی بین تیپ I و II می‌باشد.
 - 2 - الیاف با اساس قیری (Pitch-based) که اساساً از تقطیر زغال سنگ بدست می‌آیند. این الیاف از الیاف PAN ارزان‌تر بوده و مقاومت و مدول الاستیسیته کمتری نسبت به آنها دارند ($E = 37.5 - 140 \text{ GPa}$ ، $\sigma_u = 765 - 2350 \text{ MPa}$ و $\epsilon_u = 2.1\%$).
- لازم به ذکر است که الیاف کربن مقاومت بسیار خوبی در مقابل محیط‌های قلیایی و اسیدی داشته و در شرایط سخت محیطی از نظر شیمیایی کاملاً پایدار هستند.

۳-۳- الیاف آرامید

آرامید، یک کلمه اختصاری از آروماتیک پلی‌آمید است [۱۲]. آرامید اساساً الیاف ساخته دست بشر است که برای اولین بار توسط شرکت DuPont در آلمان تحت نام کولار (Kevlar) تولید شد. چهارنوع کولار وجود دارد که از بین آنها کولار ۴۹ برای مسلح کردن بتن، طراحی و تولید شده و مشخصات مکانیکی آن بدین قرار است: $E = 120 \text{ GPa}$ ، $\sigma_u = 2700 - 3500 \text{ MPa}$ و $\epsilon_u = 2.0\% - 2.7\%$.

۴- انواع محصولات FRP

۱- میله‌های کامپوزیتی: میله‌های ساخته شده از کامپوزیت‌های FRP هستند که جانشین میله‌های فولادی در بتن آرمه خواهند شد. کاربرد این میله‌ها به دلیل عدم خوردگی، مساله کربناسیون و کلراسیون را که از جمله مهم‌ترین عوامل مخرب در سازه‌های بتن آرمه هستند، به کلی حل خواهند نمود.

۲- شبکه‌های کامپوزیتی: شبکه‌های کامپوزیتی FRP (Grids) محصولاتی هستند که از برخورد میله‌های FRP در دو جهت و یا در سه جهت ایجاد می‌شوند. نمونه‌ای از این محصول، شبکه کامپوزیتی NEFMAC است که از فایبرهای کربن، شیشه یا آرامید و رزین وینیل استر تولید می‌شود و منجمله برای مسلح کردن بتن مناسب است.

۳- کابل، طناب و تاندن‌های پیش‌تنیدگی: محصولاتی شبیه میله‌های کامپوزیتی FRP، ولی به صورت انعطاف‌پذیر هستند، که در سازه‌های کابلی و بتن پیش‌تنیده در محیط‌های دریایی و خورنده کاربرد دارند. این محصولات در اجزاء پیش‌تنیده در مجاورت آب نیز بکار گرفته می‌شوند.

۴- ورقه‌های کامپوزیتی: ورقه‌های کامپوزیتی FRP (Sheets)، ورقه‌های با ضخامت چند میلیمتر از جنس FRP هستند. این ورقه‌ها با چسب‌های مستحکم و مناسب به سطح بتن چسبانده می‌شوند. ورقه‌های FRP پوشش مناسبی جهت ایزوله کردن سازه‌های آبی از محیط خورنده مجاور هستند. همچنین از ورقه‌های کامپوزیتی FRP جهت تعمیر و تقویت سازه‌های آسیب دیده (ناشی از زلزله و یا ناشی از خوردگی آب‌های یون‌دار) استفاده می‌شوند.

۵- پروفیل‌های ساختمانی: مصالح FRP همچنین در شکل پروفیل‌های ساختمانی به صورت I شکل، T شکل، نبشی و ناودانی تولید می‌شوند. چنین محصولاتی می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای قطعات و سازه‌های فولادی در مجاورت آب تلقی شوند.

۵- میله‌های کامپوزیتی FRP

در حال حاضر، تولیدکنندگان مختلفی در دنیا میله‌های کامپوزیتی FRP را تولید و عرضه می‌کنند. بعضی از انواع مشهور تولیدات میله‌های FRP که به آسانی در بازار دنیا یافت می‌شوند، به قرار زیر هستند [۱۰-۱۳]:

۱- پ: این محصول توسط کمپانی شیمیایی میتسوبیشی ژاپن از الیاف کربن با اساس قیری تولید می‌شوند. خصوصیات مکانیکی این نوع میله‌های کامپوزیتی عبارت است از: $\sigma_u = 2550 \text{ MPa}$, $E = 147 \text{ GPa}$, و $\epsilon_u = 1.3\%$. این میله‌ها که از جنس CFRP هستند، به شکل مدور در قطرهای ۱ تا ۱۷ میلیمتر به صورت صاف، و در قطرهای ۵ تا ۱۷ میلیمتر به صورت آجدار تولید می‌شوند.

۲- FIBRA-Rod: این محصول توسط کمپانی میتسوی ژاپن و از کولار ۴۹ تولید می‌شود. خصوصیات مکانیکی این میله‌های کامپوزیتی AFRP، بدین قرار است: $\sigma_u = 1290 - 1310 \text{ MPa}$, $E = 65 \text{ GPa}$, و $\epsilon_u = 2.1\%$.

۳- TECHNORA: این محصول توسط شرکت تی‌جین (Teijin) ژاپن و از آرامید تولید شد و خواص مکانیکی آن عبارت است از: $\sigma_u = 1864 \text{ MPa}$, $E = 53 \text{ GPa}$, و $\epsilon_u = 3.6\%$.

۴- CFCC: این محصول، کابل کامپوزیتی CFRP بوده و توسط شرکت توکیورپ (Tokyo Rope) از فایبرهای کربنی PAN تولید می‌شود. این محصول در قطرهای ۳ تا ۴۰ میلیمتر و با مقاومت ۱۰ تا ۱۱۰۰ kN تولید می‌شود.

۵- ISOROD: این محصول توسط شرکت پولترال (Pultrall Inc. of Thetford Mines) در ایالت کبک از کانادا تولید می‌شود. این محصول از فایبرهای شیشه و رزین پلی‌استر تولید شده و مشخصات مکانیکی آن بدین قرار است: $\sigma_u = 700 \text{ MPa}$, $E = 44.8 \text{ GPa}$.

کاربرد کامپوزیت‌های FRP در سازه‌های بتن آرمه و بررسی دوام آنها

دکتر داود مستوفی‌نژاد

۶- C-Bar: این محصول توسط شرکت کامپوزیت‌های صنعتی مارشال در جکسون ویل از ایالت فلوریدا در آمریکا تولید می‌شود. این محصول از فایبرهای شیشه که در رزین وینیل استر قرار گرفته، تولید می‌شود. مشخصات مکانیکی C-Bar بدین قرار است: $\sigma_{ii} = 660 \text{ MPa}$, $E = 41.5 \text{ GPa}$,

توجه شود که امروزه تولید میله‌های کامپوزیتی یک زمینه نو در دنیا محسوب شده و به همین دلیل، متناوباً شرکت‌های جدید تولید کننده در دنیا ایجاد می‌شود. به همین دلیل در این قسمت فقط مروری بر بعضی از این محصولات انجام گردید.

۶- مشخصات اساسی محصولات کامپوزیتی FRP

۶-۱- مقاومت در مقابل خوردگی

بدون شک برجسته‌ترین و اساسی‌ترین خاصیت محصولات کامپوزیتی FRP مقاومت آنها در مقابل خوردگی است. در حقیقت این خاصیت ماده FRP تنها دلیل نامزد کردن آنها به عنوان یک گزینه جانسین برای اجزاء فولادی و نیز میلگردهای فولادی است. به خصوص در سازه‌های بندری، ساحلی و دریایی، مقاومت خوب کامپوزیت FRP در مقابل خوردگی، سودمندترین مشخصه میلگردهای FRP است [۱۴]. در قسمت ۷، به صورت مفصل در مورد دوام کامپوزیت‌های FRP بحث خواهد شد.

۶-۲- مقاومت

مصالح FRP معمولاً مقاومت کششی بسیار بالایی دارند، که از مقاومت کششی فولاد به مراتب بیشتر است. مقاومت کششی بالای میلگردهای FRP کاربرد آنها را برای سازه‌های بتن آرمه، خصوصاً برای سازه‌های پیش‌تنیده بسیار مناسب نموده است. مقاومت کششی مصالح FRP اساساً به مقاومت کششی، نسبت حجمی، اندازه و سطح مقطع فایبرهای بکار رفته در آنها بستگی دارد. مقاومت کششی محصولات FRP برای میله‌های با الیاف کربن ۱۱۰۰ تا ۲۲۰۰ MPa، برای میله‌های با الیاف شیشه ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ MPa، و برای میله‌های با الیاف آرامید ۱۳۵۰ تا ۱۶۵۰ MPa گزارش شده است [۱۵]. با این وجود، برای بعضی از این محصولات، حتی مقاومت‌های بالاتر از ۳۰۰۰ MPa نیز گزارش شده است. توجه شود که بطور کلی مقاومت فشاری میله‌های کامپوزیتی FRP از مقاومت کششی آنها کمتر است؛ به عنوان نمونه مقاومت فشاری محصولات ISOROD برابر ۶۰۰ MPa و مقاومت کششی آنها ۷۰۰ MPa است [۳].

۶-۳- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته محصولات FRP اکثراً در محدوده قابل قبولی قرار دارد؛ اگر چه اصولاً کمتر از مدول الاستیسیته فولاد است. مدول الاستیسیته میله‌های کامپوزیتی FRP ساخته شده از الیاف کربن، شیشه و آرامید به ترتیب در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ GPa، ۴۵ GPa و ۶۰ GPa گزارش شده است [۱۵].

۶-۴- وزن مخصوص

وزن مخصوص محصولات کامپوزیتی FRP به مراتب کمتر از وزن مخصوص فولاد است؛ به عنوان نمونه وزن مخصوص کامپوزیت‌های CFRP یک سوم وزن مخصوص فولاد است. نسبت بالای مقاومت به وزن در کامپوزیت‌های FRP از مزایای عمده آنها در کاربردشان به عنوان مسلح کننده بتن محسوب می‌شود [۱۴].

۵-۶- عایق بودن

مصالح FRP خاصیت عایق بودن بسیار عالی دارند. به بیان دیگر، این مواد از نظر مغناطیسی و الکتریکی خنثی بوده و عایق محسوب می‌شوند. بنابراین استفاده از بتن مسلح به میله‌های FRP در قسمتهایی از بیمارستان که نسبت به امواج مغناطیسی حساس هستند، و در مسیرهای هدایتی قطارهای شناور مغناطیسی [۱۶]، و همچنین در باند فرودگاهها و مراکز رادار بسیار سودمند خواهد بود.

۶-۶- خستگی

خستگی خاصیتی است که در بسیاری از مصالح ساختمانی وجود داشته و در نظر گرفتن آن ممکن است به شکست غیر منتظره، خصوصاً در اجزایی که در معرض سطوح بالایی از بارها و تنش‌های تناوبی قرار دارند، منجر شود. در مقایسه با فولاد، رفتار مصالح FRP در پدیده خستگی بسیار عالی است؛ به عنوان نمونه برای تنش‌های کمتر از یک دوم مقاومت نهایی، مواد FRP در اثر خستگی گسیخته نمی‌شوند [۱۷].

۷-۶- خزش

پدیده گسیختگی ناشی از خزش اساساً در تمام مصالح ساختمانی وجود دارد؛ با این وجود چنانچه کرنش ناشی از خزش جزء کوچکی از کرنش الاستیک باشد، عملاً مشکلی بوجود نمی‌آید. در مجموع، رفتار خزشی کامپوزیت‌ها بسیار خوب است؛ به بیان دیگر، اکثر کامپوزیت‌های در دسترس، دچار خزش نمی‌شوند [۱۸].

۸-۶ - چسبندگی با بتن

خصوصیت چسبندگی، برای هر ماده‌ای که به عنوان مسلح کننده بتن بکار رود، بسیار مهم تلقی می‌شود. در مورد میله‌های کامپوزیتی FRP، اگر چه در بررسی بسیار اولیه، مقاومت چسبندگی ضعیفی برای کامپوزیت‌های از الیاف شیشه گزارش شده بود، تحقیقات اخیر در دنیا مقاومت چسبندگی خوب و قابل قبولی را برای میله‌های کامپوزیتی FRP گزارش می‌کند.

۹-۶- خم شدن

چنانچه کامپوزیت‌های FRP در بتن مسلح بکار گرفته شوند، به جهت مهار میلگردهای طولی، میلگردهای عرضی و تنگ‌ها، لازم است در انتها خم شوند. با این وجود عمل خم کردن میله‌های FRP بسیار دشوارتر از خم کردن میلگردهای فولادی بوده و در حال حاضر برای مصالح موجود FRP، نمی‌توان خم کردن را در کارگاه انجام داد. اگر چه در صورت لزوم، می‌توان خم میله‌های کامپوزیتی FRP را با سفارش آن به تولید کننده در کارگاه انجام داد.

۱۰-۶- انبساط حرارتی

خصوصیات انبساط حرارتی فولاد و بتن بسیار به هم نزدیک هستند؛ ضریب انبساط حرارتی این دو ماده به ترتیب: $\alpha_{steel} = 12 \times 10^{-6} (1/^\circ C)$ و $\alpha_{con.} = 10 \times 10^{-6} (1/^\circ C)$ می‌باشد. ضریب انبساط حرارتی میله‌های FRP اغلب از بتن متفاوت است. به طور خلاصه ضریب انبساط حرارتی مصالح FRP با الیاف کربن و شیشه به ترتیب برابر با $\alpha_{CFRP} = (0.6 - 1.0) \times 10^{-6} (1/^\circ C)$ و $\alpha_{GFRP} = (9 - 10) \times 10^{-6} (1/^\circ C)$ می‌باشد. بدترین حالت مربوط به آرمید است که ضریب انبساط حرارتی آن منفی بوده و برابر با $\alpha_{AFRP} = [(-6) - (-2)] \times 10^{-6} (1/^\circ C)$ می‌باشد [۱۹].

۷- دوام کامپوزیت‌های FRP

کامپوزیت‌های FRP شاخه جدیدی از مصالح محسوب می‌شوند که دوام آنها دلیل اصلی و اولیه برای کاربرد آنها در محدوده وسیعی از عناصر سازه‌ای شده است. به همین جهت است که از آنها نه تنها در صنعت ساختمان، بلکه در فضاپیما، بال هواپیما، درهای اتومبیل، مخازن محتوی گاز مایع، نردبان و حتی راکت تنیس نیز استفاده می‌شود. بنابراین از نقطه نظر مهندسی نه تنها مسأله مقاومت و سختی، بلکه مسأله دوام آنها تحت شرایط مورد انتظار، کاملاً مهم جلوه می‌کند.

مکانیزم‌هایی که دوام کامپوزیت‌ها را کنترل می‌کنند عبارتند از :

(۱) تغییرات شیمیایی یا فیزیکی ماتریس پلیمر

(۲) از دست رفتن چسبندگی بین فایبر و ماتریس

(۳) کاهش در مقاومت و سختی فایبر

محیط نقش کاملاً تعیین کننده‌ای در تغییر خواص پلیمرهای ماتریس کامپوزیت دارد. هر دوی ماتریس و فایبر ممکن است با رطوبت، درجه حرارت، نور خورشید و مشخصاً تشعشعات ماوراء بنفش (UV)، ازن و نیز حضور بعضی از مواد شیمیایی تجزیه کننده نظیر نمک‌ها و قلیایی‌ها تحت تأثیر قرار گیرند. همچنین تغییرات تکراری دما ممکن است به صورت سیکل‌های یخ‌زدن و ذوب شدن، تغییراتی را در ماتریس و فایبر باعث گردد. از طرفی تحت شرایط بارگذاری مکانیکی، بارهای تکراری ممکن است باعث خستگی (Fatigue) شوند. همچنین بارهای وارده در طول زمان مشخص به صورت ثابت، ممکن است مسأله خزش (Creep) را به دنبال داشته باشند. مجموعه‌ای از تمام مسائل مطرح شده در بالا، دوام کامپوزیت‌های FRP را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۱-۷- پیرشدگی فیزیکی ماتریس پلیمر

نقش ماتریس پلیمر و تغییرات آن یکی از جنبه‌های مهمی است که در مسأله دوام کامپوزیت‌ها باید در نظر گرفته شود. نقش اولیه ماتریس در کامپوزیت انتقال تنش بین فایبرها، محافظت از سطح فایبر در مقابل سائیدگی مکانیکی و ایجاد مانعی در مقابل محیط نامناسب است. همچنین ماتریس نقش به سزایی در انتقال تنش برشی در صفحه کامپوزیت ایفا می‌کند. بنابر این چنانچه ماتریس پلیمر خواص خود را با زمان تغییر دهد، باید تحت توجه خاص قرار گیرد. برای کلیه پلیمرها کاملاً طبیعی است که تغییر فوق‌العاده آهسته‌ای در ساختار شیمیایی (مولکولی) خود داشته باشند. این تغییر با محیط و عمدتاً با درجه حرارت و رطوبت کنترل می‌شود. این پروسه تحت نام پیرشدگی (Aging) نامیده می‌شود. تأثیرات پیرشدگی در اکثر کامپوزیت‌های ترموست متداول، در مقایسه با کامپوزیت‌های ترموپلاستیک، خفیف‌تر است. در اثر پیرشدگی فیزیکی، بعضی از پلیمرها ممکن است سخت‌تر و تردتر شوند؛ نتیجه این مسأله تأثیر بر خواص غالب ماتریس و منجمله رفتار برشی کامپوزیت خواهد بود. با این وجود در اکثر موارد این تأثیرات بحرانی نیست؛ زیرا نهایتاً روند انتقال بار اصلی از طریق فایبرها رخ داده و تأثیرات پیرشدگی بر فایبرها فوق‌العاده جزئی است.

۲-۷- تأثیر رطوبت

بسیاری از کامپوزیت‌های با ماتریس پلیمری در مجاورت هوای مرطوب و یا محیط‌های مرطوب، با جذب سطحی سریع رطوبت و پخش آن، رطوبت را به خود می‌گیرند. معمولاً درصد رطوبت ابتدا با گذشت زمان افزایش یافته و نهایتاً پس از چندین روز تماس با محیط مرطوب، به نقطه

اشباع (تعادل) می‌رسد. زمانی که طول می‌کشد تا کامپوزیت به نقطه اشباع برسد به ضخامت کامپوزیت و میزان رطوبت محیط بستگی دارد. خشک کردن کامپوزیت می‌تواند این روند را معکوس کند، اما ممکن است منجر به حصول کامل خواص اولیه نگردد. جذب آب به وسیله کامپوزیت از قانون عمومی انتشار فیک (Fick's Law) تبعیت کرده و با جذر زمان متناسب است. از طرفی سرعت دقیق جذب رطوبت به عواملی همچون میزان خلل و فرج، نوع فایبر، نوع رزین، جهت و ساختار فایبر، درجه حرارت، سطح تنش وارده، و حضور ریزترکها بستگی دارد. در ادامه تأثیر رطوبت را به صورت مجزا بر اجزاء کامپوزیت مورد بحث قرار می‌دهیم.

الف- تأثیر رطوبت بر ماتریس پلیمری

جذب آب به توسط رزین ممکن است در مواردی بعضی از خصوصیات رزین را تغییر دهد. چنین تغییراتی عمدتاً در دمای بالای $120^{\circ}C$ درجه ممکن است اتفاق بیفتد و در اثر آن سختی کامپوزیت به شدت کاهش یابد؛ اگر چه چنین وضعیتی عمدتاً در مصارف کامپوزیت‌ها در مهندسی عمران و به خصوص در سازه‌های در مجاورت آب، کمتر پیش می‌آید و مورد توجه نیست. از طرفی جذب رطوبت یک تأثیر سودمند نیز بر کامپوزیت دارد؛ جذب رطوبت باعث تورم رزین شده که این مساله به نوبه خود تنش‌های پس‌ماند بین ماتریس و فایبر را که در اثر انقباض ضمن عمل‌آوری کامپوزیت ایجاد شده، کاهش می‌دهد. این مساله باعث آزاد شدن تنش‌های بین ماتریس و فایبر شده و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. از طرفی گزارش شده است که در کامپوزیت‌هایی که به صورت نامناسب ساخته شده‌اند، در اثر وجود حفره‌ها در سطح بین فایبر و ماتریس و یا در لایه‌های کامپوزیت، نفوذ آب در داخل حفره‌ها و یا در سطح مشترک فایبر و ماتریس ممکن است به سیلان رزین منجر شود [۲۰]. این مساله را می‌توان با انتخاب مناسب مواد رزین و یا آماده‌سازی مناسب سطح فایبرها و نیز بهبود تکنیک‌های ساخت، حذف نمود.

ب - تأثیر رطوبت بر فایبرها

اعتقاد عمومی بر آن است که فایبرهای شیشه چنانچه به صورت طولانی مدت در کنار آب قرار گیرند، آسیب می‌بینند. دلیل این مساله آن است که شیشه از سیلیکا ساخته شده که در آن اکسیدهای فلزات قلیایی منتشر شده‌اند. اکسیدهای فلزات قلیایی هم جاذب آب بوده و هم قابل هیدرولیز هستند. با این وجود، در اکثر موارد مصرف در مهندسی عمران، از E-glass و S-glass استفاده می‌شود که فقط مقادیر کمی از اکسیدهای فلزات قلیایی را داشته و بنابراین در مقابل خطرات ناشی از تماس با آب، مقاوم هستند. در هر حال کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف شیشه باید به خوبی ساخته شده باشند، بصورتیکه از نفوذ آب به مقدار زیاد جلوگیری کنند؛ زیرا حضور آب در سطح الیاف شیشه انرژی سطحی آنها را کاهش می‌دهد که می‌تواند رشد ترک خوردگی را افزایش دهد. از طرفی الیاف آرامید نیز می‌توانند مقادیر قابل توجهی از آب را جذب کنند که منجر به باد کردن و تورم آنها می‌شود. با این وجود اکثر الیاف با پوششی محافظت می‌شوند، که پیوستگی خوب با ماتریس داشته و نیز حفاظت از جذب آب را به همراه دارد. لازم به ذکر است که تحقیقات متعدد، نشان می‌دهد که رطوبت هیچگونه تأثیرات سوء شناخته‌شده‌ای را بر الیاف کربن به دنبال ندارد [۲۱].

ج- رفتار عمومی کامپوزیت‌های اشباع شده با آب

کامپوزیت‌های با آب اشباع شده معمولاً کمی افزایش شکل‌پذیری (Ductility) در اثر نرم‌شدگی (Softening) ماتریس از خود نشان می‌دهند. این مساله را می‌توان یک جنبه سودمند از جذب آب در کامپوزیت‌های پلیمری برشمرد. همچنین افت محدود مقاومت و مدول

الاستیسیته می‌تواند در کامپوزیت‌های با آب اشباع شده اتفاق بیفتد. چنین تغییراتی معمولاً برگشت‌پذیر بوده و بنابراین به محض خشک شدن کامپوزیت، ممکن است اثر خواص از دست رفته مجدداً جبران شود. شایان توجه است که افزایش فشار هیدرواستاتیک (مثلاً در مواردی که کامپوزیت‌ها در مصارف زیر آب و یا در کف دریا به کار می‌روند)، لزوماً به جذب آب بیشتر توسط کامپوزیت و افت خواص مکانیکی آن منجر نمی‌شوند. بدین ترتیب انتظار می‌رود که اکثر سازه‌های پلیمری زیر آب، دوام بالایی داشته باشند. در حقیقت، تحت فشار هیدرواستاتیک، جذب آب به دلیل بسته شدن ریزترک‌ها و ضایعات بین سطحی، کمی کاهش می‌یابد [۲۲].

لازم به ذکر است که جذب آب بر خواص عایق بودن کامپوزیت‌ها اثر می‌گذارد. حضور آب آزاد در ریزترک‌ها می‌تواند خاصیت عایق بودن کامپوزیت را به شدت کاهش دهد.

۳-۷- تأثیرات حرارتی - رطوبتی

درجه حرارت، نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیزم جذب آب کامپوزیت‌ها و تأثیرات متعاقب برگشت‌ناپذیر آن بازی می‌کند. درجه حرارت، بر توزیع آب، میزان آن و سرعت جذب آن، تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما، مقدار و سرعت جذب آب سریعاً افزایش می‌یابد [۲۳]. تحقیقات نشان داده است که ضایعات ناشی از قرار دادن کامپوزیت، در آب جوش به مدت چند ساعت، معادل جدا شدن اجزاء کامپوزیت، و ترک‌خوردگی آن در اثر قرار گرفتن آن در آب با دمای $50^{\circ}C$ به مدت ۲۰۰ روز می‌باشد. در دمای معمولی اطاق، نمونه‌های کامپوزیت هیچگونه خرابی و آسیبی را بروز ندادند. چنین مشاهداتی به توسعه تکنیک‌هایی برای آزمایشات تسریع شده پیرشدگی کامپوزیت‌ها منجر شده است.

۴-۷- محیط قلیایی

در کاربرد کامپوزیت‌های با الیاف شیشه در محیط قلیایی، ضروری است که از الیاف شیشه با مقاومت بالای قلیایی استفاده نمود؛ زیرا محلول قلیایی با الیاف شیشه واکنش داده و ژل انبساطی سلیکا تولید می‌کنند. این نکته به خصوص در کاربرد کامپوزیت‌های با الیاف شیشه به عنوان میلگردهای مسلح کننده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. امروزه علاقه به استفاده از میلگردهای FRP از جنس شیشه در رویه‌های بتنی، به عنوان جانشین میلگردهای فولادی که با نمک‌های یخزدا خورده می‌شوند، و نیز در سازه‌های در مجاورت آب افزایش یافته است. با این وجود در فرآیند هیدراسیون سیمان، محلول آب با قلیائیت بالا ($pH > 12$) شده، ایجاد می‌شود. این محلول قلیایی شدید، می‌تواند بر الیاف شیشه تأثیر گذاشته و دوام میلگردهای FRP ساخته شده با الیاف شیشه را کاهش دهد. الیاف شیشه از جنس E-glass که اکثراً ارزان بوده و به کار گرفته می‌شوند، ممکن است مقاومت کافی در مقابل حمله قلیایی‌ها را نداشته باشند. استفاده از رزین وینیل استر با ایجاد یک مانع مؤثر، تا حدودی حمله قلیایی‌ها را کاهش می‌دهد. مقاومت در مقابل حمله قلیایی‌ها را می‌توان با طراحی عضو سازه‌ای برای تحمل سطح تنش‌های کمتر، بهبود داد. همچنین می‌توان برای بهبود دوام، از الیاف شیشه با مقاومت بسیار خوب در مقابل قلیا استفاده نمود.

شایان ذکر است که FRP های ساخته شده از الیاف کربن و آرامید، مطلقاً در مقابل محیط‌های قلیایی از خود ضعفی نشان نمی‌دهند.

۵-۷- تأثیر دمایی پائین

تغییرات شدید دما بر کامپوزیت‌ها چندین اثر عمده به دنبال دارد. اکثر مواد با افزایش دما انبساط پیدا می‌کنند. در کامپوزیت‌های FRP با ماتریس پلیمری، ضریب انبساط حرارتی ماتریس معمولاً در رتبه بالاتری از ضریب انبساط حرارتی الیاف قرار دارد. کاهش دما ناشی از سرد شدن در ضمن مرحله ساخت و یا شرایط عملکرد کامپوزیت در دمای پایین، باعث انقباض ماتریس خواهد شد. از طرفی انقباض ماتریس با مقاومت الیاف نسبتاً سخت که در مجاورت ماتریس قرار گرفته‌اند، روبرو می‌شود؛ که این مساله تنش‌های پس ماندی را در ریز ساختار ماده به‌جای می‌گذارد.

بزرگی تنش‌های پس ماند با اختلاف دما در شرایط عمل‌آوری و شرایط عملکرد کامپوزیت متناسب خواهد بود. با این وجود، مگر در محیط فوق‌العاده سرد، تنش‌های پس ماند ایجاد شده چندان قابل توجه نخواهد بود. در جایی که تغییر دمای بسیار شدید وجود دارد (مثلاً نواحی نزدیک به قطب شمال و قطب جنوب) ممکن است تنش‌های پس ماند بزرگی ایجاد شود که منجر به ایجاد ریزترک در ماده می‌گردد. چنین ریزترکهایی به نوبه خود سختی کامپوزیت را کاهش داده و نفوذپذیری و ورود آب از طریق لایه مرزی ماتریس و الیاف را افزایش می‌دهند و بدین ترتیب در فرآیند تجزیه کامپوزیت شرکت می‌کنند.

تأثیر بسیار مهم دیگر درجه حرارت‌های پایین‌تر، تغییر متناظر در مقاومت و سختی ماتریس است. اکثر مواد رزین ماتریس، با سرد شدن، سخت‌تر و مقاوم‌تر می‌شوند. چنین تغییراتی بر وضعیت شکست اثر می‌گذارد. برای مثال، نشان داده شده است که شکست فشاری نمونه‌های استوانه‌ای کامپوزیت با قطر ۳۸ میلی‌متر در دمای $50^{\circ}C$ نسبت به شکست نمونه‌های مشابه در دمای اطاق با $17/6$ درصد افزایش در مقاومت فشاری ولی شکست به صورت تردتر، همراه است [۲۴]. بدین ترتیب جذب انرژی قبل از شکست در دمای پایین‌تر نسبت به دمای اطاق، بیشتر خواهد بود. این جنبه ویژه از نظر آزاد شدن انرژی زیاد در لحظه شکست، در طراحی کامپوزیت‌هایی که تحت بارهای ضربه‌ای و در دمای پایین قرار می‌گیرند، باید در نظر گرفته شود.

۶-۷- تأثیرات سیکل‌های حرارتی در دمایی پایین (یخ‌زدن- ذوب شدن)

به جز در مواردی که کامپوزیت درصد قابل توجهی حفره‌های متصل به یکدیگر پر از آب داشته باشد، تأثیرات یخ‌زدن و ذوب شدن در محدوده دمایی متداول ($30^{\circ}C$ تا $-20^{\circ}C$) بر مقاومت، جزئی بوده و حائز اهمیت نیست. کامپوزیت‌های ساخته شده از فایبرهای شیشه که به طور متداول در دسترس هستند، در حدود $0/4$ درصد حفره دارند که اجازه یخ‌زدگی قابل توجهی را نداده و امکان هیچگونه آسیب جدی را فراهم نمی‌کند. با این وجود، سیکل‌های حرارتی در دمای پایین اثرات دیگری را بر کامپوزیت‌ها می‌گذارد. تنش‌های پس‌ماند در موارد کامپوزیت، بدلیل تفاوت‌های موجود در ضرائب انبساط حرارتی اجزاء موجود در ریز ساختار ماده، ایجاد می‌شود. در شرایط دمایی بسیار پایین، چنین تنش‌هایی می‌تواند منجر به تشکیل ریزترک‌ها در رزین ماتریس و یا در سطح مشترک رزین و فایبر شود. تغییرات رشد ریزترک در محدوده متداول دمای بهره‌برداری (از $30^{\circ}C$ تا $-20^{\circ}C$)، معمولاً جزئی و یا حاشیه‌ای است؛ با این وجود تحت شرایط سیکل‌های حرارتی شدید، مثلاً بین $60^{\circ}C$ تا $-60^{\circ}C$ ، ریزترک‌ها امکان رشد و بهم پیوستن پیدا کرده که منجر به تشکیل ترک در ماتریس و انتشار آن در ماتریس و یا در اطراف سطح مشترک ماتریس و فایبر می‌شود [۲۵]. چنین ترک‌هایی تحت سیکل‌های حرارتی طولانی مدت، از نظر تعداد و اندازه رشد کرده که می‌تواند منجر به زوال سختی و یا زوال سایر خواص وابسته به ماتریس گردد.

همچنین مشاهده شده است که در دمای بسیار پایین، مقاومت کششی کلیه کامپوزیت‌های پلیمری در جهت الیاف، تمایل به کاهش دارد؛ اگر چه مقاومت‌های کششی در سایر جهات و منجمله در جهت متعامد، افزایش می‌یابد. چنین نتایجی با سخت شدن ماتریس پلیمری در دمای پایین توجیه می‌شود. از طرفی سیکل‌های حرارتی بین دمای حداکثر و حداقل در زمان طولانی، همچنین زوال مقاومت و سختی در کلیه جهات را در پی دارد. چنین تغییرات خصوصیت برای طراحی سازه‌ای در مناطق سرد، مهم تلقی می‌شوند.

۷-۷- تأثیر تشعشع امواج ماوراء بنفش (UV)

تأثیر نور ماوراء بنفش بر ترکیبات پلیمری کاملاً شناخته شده است. تحت تابش طولانی مدت نور خورشید، ممکن است ماتریس سخت و یا بی‌رنگ شود. این مساله را عموماً می‌توان با بکارگیری یک پوشش مقاوم در مقابل اشعه ماوراء بنفش بر کامپوزیت، برطرف نمود. در همین ارتباط از جمله مسائل بسیار قابل توجه، زوال فایبرهای پلیمری مسلح کننده نظیر آرامید است. به عنوان مثال برای آرامید ساخته شده از الیاف نازک پس

کاربرد کامپوزیت‌های FRP در سازه‌های بتن آرمه و بررسی دوام آنها

دکتر داود مستوفی‌نژاد

از پنج هفته قرار گرفتن در نور آفتاب فلوریدا، ۵۰ درصد افت مقاومت گزارش شده است [۲۶]. با این وجود این اثر معمولاً سطحی است؛ بنابراین در کامپوزیت‌های ضخیم‌تر، تأثیر این زوال بر خصوصیات سازه‌ای جزئی است. در مواردی که خواص سطحی نیز مهم تلقی شوند، لازم است ملاحظات دیگری را جهت کاهش ترک‌خوردگی سطحی تحت اشعه خورشید، منظور نمود.

۸- استفاده از مواد FRP به عنوان مسلح‌کننده خارجی در سازه‌ها

به دنبال فرسوده شدن سازه‌های زیربنایی و نیاز به تقویت سازه‌ها برای برآورده کردن شرایط سخت‌گیرانه طراحی، طی دو دهه اخیر تأکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم‌سازی سازه‌ها در سراسر جهان، صورت گرفته است. از طرفی، بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها به‌خصوص در مناطق زلزله‌خیز، اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک‌های استفاده از مواد مرکب FRP به‌عنوان مسلح‌کننده خارجی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن، از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم‌سازی و احیاء سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از طرف دیگر، این تکنیک‌ها به دلیل اجرای سریع و هزینه‌های کم جذابیت ویژه‌ای یافته‌اند.

مواد مرکب FRP در ابتدا به‌عنوان مواد مقاوم‌کننده خمشی برای پل‌های بتن‌آرمه و همچنین به‌عنوان محصورکننده در ستون‌های بتن‌آرمه مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ اما به دنبال تلاش‌های تحقیقاتی اولیه، از اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه بسیار زیادی در زمینه استفاده از مواد FRP در مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ بطوری‌که دامنه کاربردهای آن به سازه‌هایی با مصالح بنایی، چوبی و حتی فلزی نیز گسترش یافته است. تعداد موارد کاربرد مواد FRP در مقاوم‌سازی، تعمیر و یا بهسازی سازه‌ها از چند مورد در ۱۰ سال پیش، به هزاران مورد در حال حاضر رسیده است. اجزاء سازه‌ای مختلفی شامل تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبد‌ها و خرپاها تا کنون توسط مواد FRP مقاوم شده‌اند.

مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه با مواد FRP

مواد مرکب FRP، دامنه وسیعی از کاربردها را برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه در مواردی که تکنیک‌های مرسوم مقاوم‌سازی ممکن است مسئله ساز باشند، به خود اختصاص داده‌اند. برای نمونه، یکی از معمول‌ترین تکنیک‌ها برای بهسازی اجزاء بتن‌آرمه، استفاده از ورق‌های فولادی است که از بیرون به این اجزاء چسبانده می‌شود. این روش، روشی ساده، مقرون به صرفه و کارا است؛ اما از جهات زیر مسئله ساز است: ۱- زوال چسبندگی بین فولاد و بتن که از خوردگی فولاد ناشی می‌شود. ۲- مشکلات ساخت صفحات فولادی سنگین در کارگاه ساختمان. ۳- نیاز به نصب داربست. ۴- محدودیت طول در انتقال صفحات فولادی به کارگاه ساخت (در مورد مقاوم‌سازی خمشی اجزاء بلند).

نوارها یا صفحات می‌توانند جایگزینی برای صفحات فولادی باشند. مواد FRP برخلاف فولاد، تحت تأثیر زوال الکتروشیمیایی قرار نمی‌گیرند و می‌توانند در مقابل خوردگی اسیدها، بازها و نمک‌ها و مواد مهاجم مشابه در دامنه وسیعی از دما مقاومت کنند. در نتیجه نیاز به سیستم‌های حفاظت از خوردگی نمی‌باشد و آماده‌کردن سطوح اعضاء قبل از چسباندن صفحات FRP و نگهداری از آن‌ها بعد از نصب، از صفحات فولادی آسان‌تر است.

علاوه بر این، الیاف مسلح‌کننده در FRP می‌توانند در موضع معین و در نسبت حجمی و جهت خاصی درون ماتریس قرار گیرند تا بیش‌ترین کارایی به‌دست آید. مواد حاصله تنها با درصدی از وزن فولاد، مقاومت و سختی بالایی در جهت الیاف دارند. آن‌ها همچنین حمل و نقل آسان‌تری داشته، نیازمند داربست کمتری برای نصب می‌باشند، و می‌توانند برای مکان‌هایی که دارای دسترسی محدود هستند، مورد استفاده قرار گیرند؛ و پس از نصب، بار اضافی قابل‌توجهی را به سازه تحمیل نمی‌کنند.

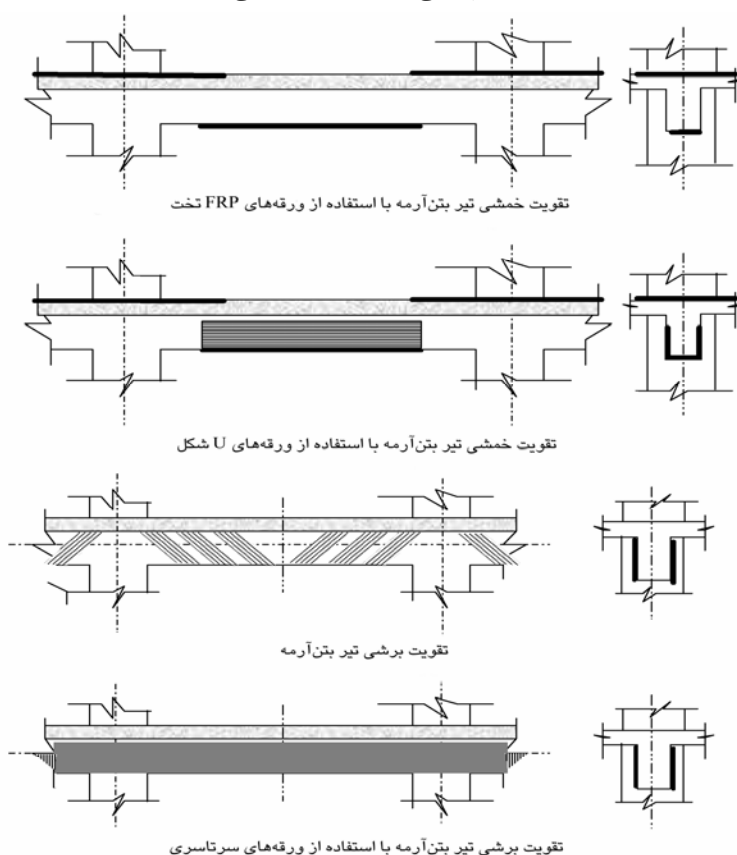
کاربرد کامپوزیت های FRP در سازه های بتن آرمه و بررسی دوام آنها

دکتر داود مستوفی نژاد

روش مرسوم دیگر در مقاوم سازی اعضای بتن آرمه، استفاده از پوشش هایی از نوع بتن آرمه، بتن پاشیدنی و یا فولاد می باشد. این روش تا جایی که مربوط به مقاومت، سختی و شکل پذیری می شود، کاملاً مؤثر است؛ اما باعث افزایش ابعاد مقاطع و بار مرده سازه می شود. همچنین این شیوه نیازمند عملیات پر دردسر و تخلیه ساکنین است و به صورت بالقوه باعث افزایش نامطلوب سختی اعضای بتن آرمه می شود. به عنوان یک جایگزین، صفحات FRP می توانند به دور اجزاء بتن آرمه پیچیده شوند و افزایش قابل توجه مقاومت و شکل پذیری را به دنبال داشته باشند؛ بدون آن که تغییر زیادی در سختی ایجاد نمایند. یک نکته مهم در ارتباط با مقاوم سازی اعضا با استفاده خارجی از FRP آن است که باید درجه مقاوم سازی (نسبت ظرفیت نهایی عضو مقاوم شده به ظرفیت نهایی عضو مقاوم نشده) را محدود کنیم تا حداقل سطح ایمنی در حوادثی مانند آتش سوزی که منجر به از دست رفتن کارایی FRP می شوند، حفظ گردد.

شکل ۱- نمونه هایی از تقویت خمشی و برشی تیر بتن آرمه با ورقه های FRP

امروزه مواد کامپوزیتی FRP به وفور جهت تقویت خمشی و برشی تیرهای بتن آرمه به کار می روند که نمونه ای از آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می شود که با متصل کردن صفحات FRP به وجه پایینی تیر ظرفیت خمشی مثبت و با متصل کردن آن به وجه



بالایی تیر ظرفیت خمشی منفی حاصل می شود. همچنین می توان با اتصال صفحات FRP به دو وجه کناری تیر، ظرفیت برشی مناسبی فراهم نمود.

در شکست تیرهای بتن آرمه تقویت شده با صفحات FRP مکانیزم‌های مختلف شکست، از جمله گسیختگی صفحات FRP، خرد شدگی بتن، شکست برشی بتن و ترک خوردگی در محل اتصال چسب با بتن، گزارش شده است. همچنین نشان داده شده است که نوع FRP، ضخامت و طول آن باعث ایجاد انواع مختلفی از شکست نرم یا ترد می‌شود. بخصوص خواص مکانیکی ناحیه اتصال FRP و بتن از اهمیت خاصی برخوردار است. در این میان جدا شدن صفحات FRP از بتن مسأله کاملاً حائز اهمیت است و امروزه توجه زیادی را در دنیا به خود جلب می‌نماید. در این ارتباط به نظر می‌رسد که استفاده از تقویت‌کننده‌های خارجی حتی به میزان کم، می‌تواند ایمنی قابل ملاحظه‌ای در برابر جدا شدن صفحات FRP از بتن، و نیز شکست‌های برشی ترد فراهم آورد.

از طرفی مواد کامپوزیتی FRP به وفور جهت تقویت خمشی و فشاری و نیز افزایش شکل پذیری ستون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در همین ارتباط محصور شدگی بتن مهم‌ترین خصوصیتی است که می‌توان آن را با چسباندن این مواد در اطراف ستون‌ها فراهم نمود. از طرفی استفاده از مواد کامپوزیتی FRP برای افزایش شکل پذیری اتصالات و رفتار مناسب‌تر آن در زلزله نیز بسیار مطلوب خواهد بود.

۹ - خلاصه و نتیجه گیری

خوردگی اعضاء سازه‌ای بتنی که به صورت متداول با میلگردهای فولادی مسلح شده باشند، در محیط‌های خشن و خورنده یک معضل جدی محسوب می‌شود. این مسأله برای اعضاء بتنی سازه‌ای در مجاورت آب و به خصوص در محیط‌های دریایی و ساحلی که در معرض عوامل نمکی و قلیایی، آب در تماس با خاک، هوا و آب‌های زیرزمینی قرار دارند، بسیار جدی‌تر خواهد بود. این مسأله هر ساله میلیون‌ها دلار خسارت را سراسر دنیا به بار می‌آورد. اگر چه تا کنون روش‌های مختلفی نظیر حفاظت کاتدی و یا پوشش قطعات فولادی و میلگردها با اپوکسی جهت فائق آمدن بر این مشکل به کار گرفته شده است، به نظر می‌رسد که جانشینی کامل قطعات فولادی و میلگردهای فولادی با یک ماده مقاوم در مقابل خوردگی، یک راه حل بسیار اساسی و بدیع، در حذف کامل خوردگی اجزاء فولادی به شمار آید.

محصولات کامپوزیتی FRP با مقاومت بسیار عالی، در مقابل خوردگی در محیط‌های خشن و خورنده، توجه بسیاری از محققین و مهندسين در سراسر دنیا را به عنوان یک جانشین مناسب قطعات فولادی و میلگردهای فولادی در سازه‌های مجاور آب به خود جلب نموده است. اگر چه مزیت اصلی محصولات FRP مقاومت آنها در مقابل خوردگی است، خواص دیگری از آنها، نظیر مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته قابل قبول، وزن کم، مقاومت خوب در مقابل خستگی و خزش، خاصیت عایق بودن و چسبندگی خوب با بتن و نیز دوام بسیار خوب از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بر جاذبه آنها افزوده است. با این وجود بعضی از اشکالات و معایب این ماده نظیر مشکلات مربوط به خم کردن میله‌های FRP در محل آرماتوربندی، تفاوت خواص حرارتی آنها با بتن و نیز رفتار الاستیک خطی آنها تا لحظه شکست را نباید از نظر دور داشت. در مجموع، توجه بیشتر به کاربرد محصولات کامپوزیتی FRP در سازه‌های بتنی که در محیط‌های خشن و خورنده ساخته می‌شوند، نظیر سازه‌های آبی، ساحلی و دریایی، مشخصاً از آسیب‌های زودرس و ناخواسته و شکست سازه‌های بتنی مسلح در اثر خوردگی میلگردها جلوگیری خواهد نمود.

۱۰ - مراجع

- [1] Hamada, H., Fukute, T., and Yamamoto, K., "Bending Behavior of Unbounded Prestressed Concrete Beams Prestressed with CFRP Rods," *Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium, Sheffield, 1992*, pp. 1015-1026.
- [2] Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., "RC Beams Strengthened with GFRP Plates, I: Experimental Study," *Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 11, 1991*, pp. 3417-3433.

- [3] Bedard, Claude, "Composite Reinforcing Bars: Assessing Their Use in Concrete," *Concrete International*, 1992, pp. 55-59.
- [4] Sharp, B. N., "Reinforced and Prestressed Concrete in Maritime Structures," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Building*, Vol. 116, No. 3, 1996, pp. 449-469.
- [5] Hamid, Ahmad A., "Improving Structural Concrete Durability in the Arabian Gulf," *Concrete International*, July, 1995, pp. 32-35.
- [6] Ali, Mohammed Gholam, Dannish, Sami Abdulla, and Al-Hussaini, Adel, "Strength and Durability of Concrete Structures in Bahrain," *Concrete International*, July, 1996, pp. 39-45.
- [7] Matta, Z., "Chlorides and Corrosion in the Arabian Gulf Environment," *Concrete International*, May, 1992, pp. 47-48.
- [8] Matta, Z., "Deterioration of Concrete Structures in the Arabian Gulf," *Concrete International*, July, 1993, pp. 33-36.
- [9] Matta, Z., "More Deterioration of Reinforced concrete in the Arabian Gulf," *Concrete International*, November, 1993, pp. 50-51.
- [10] Razaqpur, A. G., and Kashef, A. H., "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Plastics for Buildings," Submitted to: *Institute for Research in Construction - National Research Council of Canada*, Carleton University, Ottawa, 1993.
- [11] Rostasy, F. S., "FRP Tensile Elements for Prestressed Concrete - State of the Art, Potentials and Limits," *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138*, 1993, pp. 347-366.
- [12] Minosaku, Koichi, "Using FRP Materials in Prestressed Concrete Structures," *Concrete International*, 1992, pp.41-45.
- [13] Erki, M. A., and Rizkalla, S. H., "Anchorage for FRP Reinforcement," *Concrete International*, 1993, pp. 54-59.
- [14] Martin, Roderick H., "Fiber Reinforced Plastic Standards for the Offshore Industry," *SAMPE Journal, Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, 1996, pp. 37-41.
- [15] Yamasaki, Y., Masuda, Y., Tanano, H., and Shimizu, A., "Fundamental Properties of Continuous Fiber Bars," *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138*, 1993, pp. 715-730.
- [16] Tarricone, Paul, "Plastic Potential," *Civil Engineering*, 1993, pp. 62-64.

- [17] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., and Tao, S., "Bond of GFRP Rebars to Ordinary- Strength Concrete," *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138*, 1993, pp. 333-346.
- [18] Char, M. S., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., "Concrete Girders Externally prestressed with Composite Plates," *PCI Journal*, 1994, pp. 40-51.
- [19] Mashida, M., and Iwamoto, K., "Bond Characteristics of FRP Rod and Concrete After Freezing and Thawing Deterioration," *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, ACI-SP-138*, 1993, pp. 51-70.
- [20] Hahn, H. T., and Kim, R. Y., "Swelling of Composite Laminates," *Advanced Composite Materials- Environmental Effects, ASTM-STP 658*, 1978, pp. 98-130.
- [21] Mallick, P. K., *Fiber Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., New Yoek, 1988.
- [22] Burnsell, A. R., "Long-Term Degredation of Polimeric Matrix Composites," *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, Pergamon Press, 1989, pp. 165-173.
- [23] Dewimille, B., and Burnsell, A. R., "Accelerated Aging of a Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin in Water," *Composites*, 1983, pp. 14-35.
- [24] Dutta, P. K., "Tensile Strength of Unidirectional Fiber Composites at Low Temperatures," *Proceedings, Sixth Japan-U.S. Conference on Composite Materials*, June, 1983, Orlando, pp. 782-792.
- [25] Lord, H. W., and Dutta, P. K., "On the Design of Polymeric Composite Structures for Cold Region Applications," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 7, 1988, pp. 435-450.
- [26] Larsson, F., "The Effect of Ultraviolet Light on Mechanical Properties of Kevlar 49 Composites," *Environmental Effects on Composite Materials*, Technomic Publishings Co., 1988, pp. 132-135.