# کاربرد کامپوزیت‌های FRP در سازه‌های بتن آرمه

# و بررسی دوام آنها


ProjehCenter.ir

**خلاصه**

خوردگی قطعات فولادی در سازه‌های مجاور آب و نیز خوردگی میلگردهـای فـولادی در سازه‌های بتن آرمه ای که در معرض محیط‌های خورندۀ کلروری و کربناتی قـرار دارنـد، یـک مسالۀ بسیار اساسی تلقی می‌شود. در محیط‌هـای دریـایی و مرطـوب وقتـی کـه یـک سـازۀ بتن‌آرمۀ معمولی به صورت دراز مدت در معـرض عناصـر خورنـده نظیـر نمک‌هـا، اسـیدها و کلرورها قرار گیرد، میلگردها به دلیل آسیب دیدگی و خوردگی، قسمتی از ظرفیت خـود را از دست خواهند داد. به علاوه فولادهای زنگ زده بر پوستۀ بیرونی بتن فشار می‌آورد که به خرد شدن و ریختن آن منتهی می‌شود. تعمیر و جایگزینی اجزاء فولادی آسیب دیده و نیـز سـازۀ بتن آرمه‌ای که به دلیل خوردگی میلگردها آسـیب دیـده اسـت، میلیون‌هـا دلار خسـارت در سراسر دنیا به بار آورده است. به همین دلیل سعی شده که تدابیر ویژه‌ای جهت جلـوگیری از خوردگی اجزاء فولادی و میلگردهای فولادی در بتن اتخـاذ گـردد کـه از جملـه می‌تـوان بـه حفاظت کاتدیک اشاره نمود. با این وجود برای حذف کامل ایـن مسـاله، توجـه ویـژه ای بـه جانشینی کامل اجزاء و میلگردهای فولادی با یـک مـادۀ جدید مقـاوم در مقابـل خوردگی معطـوف گردیـده اسـت. از آن‌جـا کـه کامپوزیت‌هـای FRP (Fiber Reinforced Polymers/Plastics) بشدت در مقابل محیط‌های قلیایی و نمکی مقاوم هستند که در دو دهۀ اخیر موضوع تحقیقات گسترده‌ای جهت جایگزینی کامل با قطعات و میلگردهای فولادی بوده‌اند. چنین جایگزینی بخصوص در محیط‌های خورنده نظیر محیط‌های دریـایی و سـاحلی بسیار مناسب به نظر می‌رسد. در این مقاله مروری بر خواص، مزایا و معایب مصالح کامپوزیتی FRP صورت گرفته و قابلیبت کاربرد آنها به عنوان جانشین کامل فولاد در سازه‌های مجـاور آب و بخصوص در سازۀ بتن آرمه، به جهت حصول یک سازۀ کاملاً مقاوم در مقابل خـوردگی، مورد بحث قرار خواهد گرفت.



ProjehCenter.ir

## 1 – مقدمه

بسیاری از سازه‌های بتن آرمهٔ موجود در دنیا در اثر تماس با سولفاتها، کلریدها و سایر عوامل خورنده، دچار آسیب‌های اساسی شده‌اند. این مساله هزینه‌های زیادی را برای تعمیر، بازسازی و یا تعویض سازه‌های آسیب دیده در سراسر دنیا موجب شده است. این مساله و عواقب آن گاهی نه تنها به عنوان یک مسالهٔ مهندسی، بلکه به عنوان یک مسالهٔ اجتماعی جدی تلقی شده است [1]. تعمیر و جایگزینی سازه‌های بتنی آسیب‌دیده میلیون‌ها دلار خسارت در دنیا به دنبال داشته است. در امریکا، بیش از 40 درصد پلها در شاهراهها نیاز به تعویض و یا بازسازی دارند [2]. هزینهٔ بازسازی و یا تعمیر سازه‌های پارکینگ در کانادا، 4 تا 6 میلیارد دلار کانادا تخمین زده شده است [3]. هزینهٔ تعمیر پلهای شاهراهها در امریکا در حدود 50 میلیارد دلار برآورد شده است؛ در حالیکه برای بازسازی کلیهٔ سازه‌های بتن آرمهٔ آسیب‌دیده در امریکا در اثر مسالهٔ خوردگی میلگردها، پیش‌بینی شده که به بودجهٔ نجومی 1 تا 3 تریلیون دلار نیاز است [3 ]!

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 1896 بر می‌گردد [4]. دلیل عمدهٔ 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 خورندهٔ 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.


ProjehCenter.ir

در یک محیط دریایی نظیر خلیج فارس، شرایط جغرافیایی و آب و هوایی نامناسب، که بسیاری از عوامل خورنده را به دنبال دارد، با درجهٔ حرارت‌های بالا و نیز رطوبت‌های بالا همراه شده که نتیجتاً خوردگی در فولادهای به کار رفته در بتن آرمه کاملاً تشدید می‌شود. در مناطق ساحلی خلیج فارس، در تابستان درجهٔ حرارت از 20 تا 50 درجهٔ سانتیگراد تغییر می‌کند، در حالیکه گاه اختلاف دمای شب و روز، بیش از 30 درجهٔ سانتیگراد متغیر است. این در حالی است که رطوبت نسبی اغلب بالای 60 درصد بوده و بعضاً نزدیک به 100 درصد است. به علاوه هوای مجاور تمرکز بالایی از دی‌اکسید گوگرد و ذرات نمک دارد [5]. به همین جهت است که از منطقهٔ دریایی خلیج فارس به عنوان یکی از مخرب‌ترین محیط‌ها برای بتن در دنیا یاد شده است [6]. در چنین شرایط، ترک‌ها و ریزترک‌های متعددی در اثر انقباض و نیز تغییرات حرارتی و رطوبتی ایجاد شده، که این مساله به نوبهٔ خود، نفوذ کلریدها و سولفاتهای مهاجم را به داخل بتن تشدید کرده، و شرایط مستعدی برای خوردگی فولاد فراهم می‌آورد [7-9]. به همین جهت بسیاری از سازه‌های بتن مسلح در نواحی ساحلی ایران نظیر سواحل بندرعباس، در کمتر از 5 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.

**2 – 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 کاتدیک میلگردها اشاره نمود. با این وجود هر یک از این تکنیک‌ها فقط تا حدودی موفق


ProjehCenter.ir

بوده است [10]. برای حذف کامل مساله، توجه محققین به جانشین کردن قطعات فولادی و میلگردهای فولای 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 بالاخص در محیط‌های دریایی و ساحلی، به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند.

## 3 – ساختار مصالح FRP

مواد FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ فایبر (الیاف) و رزین (مادۀ چسباننده). فایبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در مادۀ FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع فایبر، قطر آن در محدودۀ 5 تا 25 میکرون می‌باشد [11].

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 پلی پروپیلن (PP)، نام برد


ProjehCenter.ir

.[3]

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.

### 3-1- الیاف شیشه

فایبرهای شیشه در چهار دسته طبقه‌بندی می‌شوند [10]؛

1 – **E-Glass**: متداول ترین الیاف شیشه در بازار با محتوای قلیایی کم، که در صنعت ساختمان به کار می‌رود، (با مدول الاستیسیتهٔ $E = 70\ GPa$، مقاومت نهایی $\sigma_u = 1500 - 2500\ MPa$، و کرنش نهایی $\varepsilon_u = 1.8\% - 3\%$).

2 – **Z-Glass**: با مقاومت بالا در مقابل حملهٔ قلیائیها، که در تولید بتن الیافی به کار گرفته می‌شود.

3 – **A-Glass**: با مقادیر زیاد قلیایی که امروزه تقریباً از رده خارج شده است.

4 – **S-Glass**: که در تکنولوژی هوا-فضا و تحقیقات فضایی به کار گرفته می‌شود و مقاومت و مدول الاستیسیتهٔ بسیار بالایی دارد، ( $E = 87\ GPa$ و $\sigma_u = 3900\ MPa$).

### 3-2- 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.( $E = 380\ GPa,\ \ \sigma_u = 2000\ MPa$ و $\varepsilon_u = 0.5\%$). تیپ II که مقاوم‌ترین الیاف کربن است ( $E = 240\ GPa,\ \ \sigma_u = 2800\ MPa$ و $\varepsilon_u = 1\%$)؛ و نهایتاً تیپ III که نرمترین نوع الیاف کربنی با مقاومتی بین تیپ I و II می‌باشد.


ProjehCenter.ir

**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 الاستیسیتهٔ کمتری نسبت به آنها دارند ( $\sigma_u = 765 - 2350\ MPa$ ، $E = 37.5 - 140\ GPa$ و $\varepsilon_u = 2.1\%$).

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.

### 3-3- الیاف آرامید

آرامید،یک کلمهٔ اختصاری از آروماتیک پلی‌آمید است [12].آرامیداساساً الیاف ساختهٔ 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 49 برای مسلح کردن بتن، طراحی و تولید شده و مشخصات مکانیکی آن بدین قرار است: $\sigma_u = 2700 - 3500\ MPa$ ، $E = 120\ GPa$ و $\varepsilon_u = 2.0\% - 2.7\%$.

### 4- انواع محصولات FRP

1- میله های کامپوزیتی: میله‌های ساخته شده از کامپوزیت‌هایFRP هستند که جانشین میلگردهای 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.

2- 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، شبکهٔ کامپوزیتی NEFMAC است که از فایبرهای کربن، شیشه یا آرامید و رزین وینیل استر تولید می‌شود و منجمله برای مسلح کردن بتن مناسب است.


ProjehCenter.ir

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

4- 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 خورندهٔ 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.

5- 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.

## 5- میله‌های کامپوزیتی FRP

در حال حاضر، تولیدکنندگان مختلفی در دنیا میله‌های کامپوزیتی FRP را تولید و عرضه می‌کنند. بعضی از انواع مشهور تولیدات میلگردهای FRP که به آسانی در بازار دنیا یافت می‌شوند، به قرار زیر هستند [10-13]؛

1 – پ: این محصول توسط کمپانی شیمیایی میتسوبیشی ژاپن از الیاف کربن با اساس قیری تولید می‌شوند. خصوصیات مکانیکی این نوع میلگرد کامپوزیتی عبارت است از: $\sigma_u = 2550\ MPa,\quad E = 147\ GPa$ و $\varepsilon_u = 1.3\%$. این میله‌ها که از جنس CFRP هستند، به


ProjehCenter.ir

شکل مدور در قطرهای 1 تا 17 میلیمتر به صورت صاف، و در قطرهای 5 تا 17 میلیمتر به صورت آجدار تولید می‌شوند.

2 – FiBRA-Rod: این محصول توسط کمپانی میتسوی ژاپن و از کولار 49 تولید می‌شود. خصوصیات مکانیکی این میله‌های کامپوزیتی AFRP، بدین قرار است: $E = 65\ GPa,\quad \sigma_u = 1290 - 1310\ MPa$ و $\varepsilon_u = 2.1\%$.

3 – TECHNORA: این محصول توسط شرکت تی‌جین (Teijin) ژاپن و از آرامید تولید شد و خواص مکانیکی آن عبارت است از: $E = 53\ GPa,\quad \sigma_u = 1864\ MPa$ و $\varepsilon_u = 3.6\%$.

4 – CFCC: این محصول،کابل کامپوزیتی CFRP بوده و توسط شرکت توکیوروپ(Tokyo Rope) از فایبرهای کربنی PAN تولید می‌شود. این محصول در قطرهای 3 تا 40 میلیمتر و با مقاومت 10 تا 1100 kNتولید می‌شود.

5 – 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: $\sigma_u = 700\ MPa$, $E = 44.8\ GPa$.

6 – C-Bar: این محصول توسط شرکت کامپوزیت‌های صنعتی مارشال در جکسون ویل از ایالت فلوریدا در امریکا تولید می‌شود. این محصول از فایبرهای شیشه که در رزین وینیل استر قرار گرفته، تولید می‌شود. مشخصات مکانیکی C-Bar بدین قرار است: $E = 41.5\ GPa,\quad \sigma_u = 660\ MPa$.

توجه شود که امروزه تولید میله‌های کامپوزیتی یک زمینهٔ 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.


ProjehCenter.ir

# ProjehCenter

www.ProjehCenter.ir

@projehcenter

@projehcenter_ir