

دوام ورق‌های کامپوزیتی و نمونه‌های دورپیچی با آن در ناحیه جزر و مد خلیج فارس

امین کاشی^۱، علی اکبر رمضانیاپور^۱، فرامرز مودی^{۲*}

^۱ دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲ مرکز تحقیقات، تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ اسفند ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۶ دی ۱۳۹۵
پذیرش: ۹ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

دوام
ورق کربن/اپوکسی
ورق شیشه/اپوکسی
محیط دریایی خلیج فارس
دورپیچی

چکیده: بدر این مقاله به منظور ارزیابی دوام ورق‌های کامپوزیتی در محیط دریایی در مدت زمان کوتاه‌تر، محیط شبیه‌ساز دریایی مشابه با ناحیه‌ی جزر و مدی حاشیه‌ی خلیج فارس طراحی و ساخته شد. علاوه بر پدیده‌ی جزر و مد، تابش سیکلی اشعه‌ی یووی، رطوبت و دمای بالا از دیگر ویژگی‌های محیط شبیه‌سازی شده است. با قرار دادن نمونه‌های مختلف داخل محیط، تغییرات خواص مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی، مقاومت چسبندگی ورق‌ها به بتن و اثر دورپیچ کردن نمونه‌های بتنی بررسی شده است. مقاومت نهایی و مدول الاستیک ورق‌های کربن/اپوکسی ۲٪ و ۱۸٪ کاهش داشته و این مقادیر برای ورق‌های شیشه/اپوکسی ۲۸/۸٪ و ۱۷٪ بوده است. کاهش مقاومت چسبندگی ورق‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی به سطح بتن به ترتیب ۱۳/۹٪ و ۱۵/۹٪ مشاهده شده است. همچنین محیط دریایی موجب کاهش مقاومت نهایی نمونه‌های دورپیچ شده با یک لایه کربن/اپوکسی، یک و دو لایه شیشه/اپوکسی به ترتیب برابر ۱۱/۶٪، ۴۱٪ و ۳۴٪ شده است. مقدار کاهش مدول ناحیه‌ی پلاستیک نیز برابر ۱۷٪، ۱۸٪ و ۱۲٪ به ترتیب در نمونه‌های فوق بوده است.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از مواد مرکب در زمینه‌ی ترمیم و تقویت سازه‌های بتنی رشد چشمگیری داشته است. مقاومت کششی بالا، سبکی، نصب آسان و سریع و نیز مقاومت بالا در برابر پدیده‌ی خوردگی از جمله خصوصیات هستند که مهندسين و طراحان را به استفاده‌ی از این مصالح ترغیب می‌کنند [۱] با تمام ویژگی‌های مثبتی که ورق‌های کامپوزیتی در زمینه‌های عمرانی دارند باید به این نکته اشاره کرد که دوام و عملکرد آن‌ها در محیط‌های خاص هنوز مورد سؤال و تحقیق است. آیین‌نامه‌ی انجمن بتن ایالات متحده بسته به نوع الیاف به کار رفته در ورق‌های کامپوزیتی^۱، ضرایب کاهش را برای کرنش و مقاومت کششی نهایی در محیط‌های خاص پیشنهاد داده است. این در حالیست که دسته‌بندی محیط‌های مخرب در این آیین‌نامه بسیار کلی است و به اذعان خود آن ضرایب کاهش ارائه شده محافظه‌کارانه بوده و نیاز به تحقیقات وسیع‌تر به ویژه در محیط‌های خشن که مجموعه‌ای از عوامل مخرب محیطی در آن وجود دارند احساس می‌شود

[۲]. در ادامه خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده بر روی دوام ورق‌های کامپوزیتی که به نوعی مرتبط با محیط‌های دریایی هستند آورده شده است. میسلی^۲ و همکاران با قرار دادن نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های کامپوزیتی در محلول نمک ۱۵٪ به مدت ۱۲۰ روز مقدار ۲۷ و ۱۰ درصد کاهش مقاومت به ترتیب برای نمونه‌های دورپیچ با یک لایه شیشه/اپوکسی^۳ و کربن/اپوکسی^۴ را مشاهده کردند [۳]. بلاربی^۵ و همکاران به بررسی اثرات شرایط محیطی مختلف بر روی رفتار طولانی مدت ستون‌های بتنی مسلح، تقویت شده با ورق‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی پرداختند. در بین سیکل‌های طراحی شده در این تحقیق آب شور تأثیر زیادی بر روی کاهش بار نهایی و شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده با شیشه/اپوکسی داشته است. این در حالیست که ورق‌های کربن/اپوکسی دوام بهتری را در این محیط از خود نشان داده‌اند [۴]. کرهبهاری^۶ و همکاران در بخشی از تحقیق خود که به

2 Micelli
3 GFRP
4 CFRP
5 Belarbi
6 Karbhari

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fmoody@aut.ac.ir

1 FRP sheets

است. در تحقیق پیش رو محیط تسریع شده مشابه با محیط واقعی ناحیه جزر و مد خلیج فارس ساخته شد و مطالعه بر روی دوام نمونه‌ها در مدت زمان کوتاه‌تر در این محیط انجام گرفت.

۲- برنامه‌ی آزمایشی

به منظور ارزیابی دوام ورق‌های کامپوزیتی در محیط دریایی، برنامه‌ی آزمایش کاملی طراحی شد. بدین ترتیب سه نوع نمونه آماده و هر کدام از آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی و نیز در محیط دریایی شبیه‌سازی شده قرار گرفتند. نوع اول نمونه‌ها، شامل ورق‌های کامپوزیتی بوده که تغییرات پارامترهای کششی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. نوع دوم نمونه‌های منشوری بتنی هستند که تغییرات مقاومت چسبندگی ورق‌ها به سطح آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نوع سوم نمونه‌ها استوانه‌ای بتنی بوده که اثر محیط دریایی بر رفتار فشاری نمونه‌های دورپیچ شده در آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. جدول ۱ نام اختصاری هر یک از نمونه‌ها بر اساس شکل، نوع و تعداد لایه‌ی ورق‌های کامپوزیتی به کار رفته در آن و نیز شرایط محیطی که نمونه در آن قرار گرفته است، نشان داده شده است.

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها و مصالح بکار رفته

۲-۱-۱- نمونه‌های کامپوزیتی

ورق‌های کامپوزیت از دو نوع کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی بوده که به روش خیس^۶ ساخته شده‌اند. از چسب اپوکسی برای قسمت رزین ورق‌ها استفاده شده است. بر اساس مدارک منتشر شده توسط کارخانه‌ی سازنده، این محصول مقاومت خوبی در محیط‌های مرطوب و شیمیایی داشته و همچنین مقاومت چسبندگی بالایی را به سطح بتن از خود نشان داده است. مقاومت چسبندگی به سطح بتن و مقاومت کششی این چسب به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۳۰ مگاپاسکال گزارش شده است. مشخصات مکانیکی ورق‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. جهت الیاف موجود در مصالح صفر درجه است. پس از قرار دادن ورق‌ها در محیط دریایی، آزمایش کشش طبق استاندارد^۷ بر روی نمونه‌ها انجام شده و تأثیر شرایط محیطی بر مقاومت نهایی کششی، کرنش نهایی کششی و مدول الاستیک ورق‌های کامپوزیتی بررسی شده است. نتایج نشان داده شده در جدول ۲ از متوسط‌گیری از تعداد چهار نمونه‌ی مشابه به دست آمده است. با توجه به وابسته بودن میزان ضخامت ورق‌ها به مقدار اپوکسی مصرفی در روش اجرای خیس، این متغیر نیز به صورت متوسط از تعداد حداقل چهار نمونه‌ی مشابه در جدول ۲ آورده شده است.

بررسی تأثیر آب‌شور بر مقاومت چسبندگی ورق‌های کامپوزیتی به سطح بتن در دمای آزمایشگاه اختصاص داشت، نشان دادند که آب شور تأثیر به مراتب مخرب‌تری نسبت به آب‌شرب در پدیده‌ی جدایش ورق‌های از سطح بتن داشته است [۵]. کرومویل^۱ در تحقیق خود به بررسی تغییرات پارامترهای مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی قرار داده شده در آب‌شور پرداخته است. میزان کاهش مقاومت نهایی ورق‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی قرار گرفته در این محیط به مدت ۱۰۰۰۰ ساعت به ترتیب برابر ۶ و ۳ درصد بوده است. همچنین میزان چسبندگی این ورق‌ها به بتن به ترتیب ۱۳/۵ و ۶/۳ درصد کاهش یافته است [۶]. در تحقیق انجام شده توسط قراچورلو و رمضانپور بر روی نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی بیشترین کاهش مقاومت مربوط به نمونه‌های در معرض دمای بالا به همراه سیکل‌های تر و خشک آب شور بوده و در تمامی موارد تقویت با کربن/اپوکسی نتایج بهتری را نشان داده است [۷]. ناردان^۲ و همکاران با قراردادن ورق‌های کربن/اپوکسی در محیط با رطوبت ۶۵٪ به این نتیجه رسیدند که افزایش دما تأثیر به سزایی در کاهش دوام این ورق‌ها در محیط مرطوب دارد. افزایش دما تا ۷۰ درجه‌ی سانتیگراد [۸]. دربخشی از مطالعه‌ی بور^۳ و همکاران که به بررسی اثر آب‌شور بر دوام مصالح کامپوزیتی اختصاص داشت مشخص شد که تماس با آب شور موجب کاهش شدید مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌های تقویت شده با ورق‌های شیشه/اپوکسی شده است البته مقداری افت مقاومت در ستون‌های تقویت شده با کربن/اپوکسی نیز مشاهده شده همچنین در مواجهه با آب شور اولین اثر تخریبی از ناحیه رطوبت بوده این در حالیست که با گذشت زمان تشکیل کریستال‌های نمک داخل میکروترک‌ها موجب تخریب این ورق‌ها شده است [۹]. سیلوا^۴ و همکاران با قراردادن نمونه‌های کامپوزیتی داخل آب‌شور مشاهده کردند که این محیط اثر تخریبی زیادی بر روی خواص مکانیکی این مصالح به ویژه مقاومت نهایی کششی ورق‌های شیشه/اپوکسی داشته است. همچنین اثر تخریبی این محیط با افزایش دما بیشتر مشاهده شده است [۱۰].

نتایج بدست آمده حاکی از کاهش دوام ورق‌های کامپوزیتی به ویژه ورق‌های شیشه/اپوکسی در مواجهه با شرایط محیطی مخرب نظیر رطوبت بالا، آب شور و دمای بالا دارد. هدف اصلی این مقاله بررسی دوام ورق‌های کامپوزیتی در منطقه‌ی خاص حاشیه‌ی خلیج فارس است. این منطقه شرایط تخریبی فوق‌العاده بالایی دارد که به دلیل حضور یون‌های کلرید موجود در آب‌دریا، دما و رطوبت بالا، پدیده‌ی جزر و مد و همچنین تابش اشعه‌ی فرابنفش^۵ خورشید است. در این مطالعه، دوام نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های کامپوزیتی، دوام ورق‌ها به تنهایی و همچنین مقاومت چسبندگی آن‌ها به سطح بتن در ناحیه‌ی جزر و مد خلیج فارس مورد مطالعه قرار گرفته

- 1 Cromwell
- 2 Nardone
- 3 Böer
- 4 Silva
- 5 UV radiation

6 wet lay-up technique
7 ASTM D3039

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها و آزمایش‌های طراحی شده (ابعاد نمونه‌ها به سانتیمتر)

Table 1. Specimens characteristic and test methods (dimensions in cm)

نام اختصاری نمونه‌ها	شکل نمونه	تعداد لایه کامپوزیت	نوع کامپوزیت	شرایط محیطی	تعداد نمونه‌ها	روش آزمایش
SC-L	ورق	۱	کربن/اپوکسی	نرمال آزمایشگاهی	۴	کشش مستقیم (ASTM D3039)
SG-L	ورق	۱	شیشه/اپوکسی	نرمال آزمایشگاهی	۴	کشش مستقیم (ASTM D3039)
SC-M	ورق	۱	کربن/اپوکسی	شبیه‌ساز خلیج فارس	۴	کشش مستقیم (ASTM D3039)
SG-M	ورق	۱	شیشه/اپوکسی	شبیه‌ساز خلیج فارس	۴	کشش مستقیم (ASTM D3039)
PC-L	مشوری ۵۰×۱۵×۱۵	۱	کربن/اپوکسی	نرمال آزمایشگاهی	۳	مقاومت چسبندگی (Pull-Off ASTM D4541)
PG-L	مشوری ۵۰×۱۵×۱۵	۱	شیشه/اپوکسی	نرمال آزمایشگاهی	۳	مقاومت چسبندگی (Pull-Off ASTM D4541)
PC-M	مشوری ۵۰×۱۵×۱۵	۱	کربن/اپوکسی	شبیه‌ساز خلیج فارس	۳	مقاومت چسبندگی (Pull-Off ASTM D4541)
PG-M	مشوری ۵۰×۱۵×۱۵	۱	شیشه/اپوکسی	شبیه‌ساز خلیج فارس	۳	مقاومت چسبندگی (Pull-Off ASTM D4541)
CCO-L	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	-	-	نرمال آزمایشگاهی	۳	مقاومت فشاری
CC1-L	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	۱	کربن/اپوکسی	نرمال آزمایشگاهی	۳	مقاومت فشاری
CG1-L	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	۱	شیشه/اپوکسی	نرمال آزمایشگاهی	۳	مقاومت فشاری
CG2-L	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	۲	شیشه/اپوکسی	نرمال آزمایشگاهی	۳	مقاومت فشاری
CCO-M	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	-	-	شبیه‌ساز خلیج فارس	۳	مقاومت فشاری
CC1-M	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	۱	کربن/اپوکسی	شبیه‌ساز خلیج فارس	۳	مقاومت فشاری
CG1-M	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	۱	شیشه/اپوکسی	شبیه‌ساز خلیج فارس	۳	مقاومت فشاری
CG2-M	استوانه‌ای ۱۰×۲۰	۲	شیشه/اپوکسی	شبیه‌ساز خلیج فارس	۳	مقاومت فشاری

جدول ۲: مشخصات مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی در شرایط محیطی نرمال آزمایشگاهی

Table 2. Mechanical properties of FRP sheets in laboratory condition

نمونه	درصد حجمی الیاف (%)	ضخامت (mm)	مقاومت کششی نهایی (Mpa)	کرنش نهایی کششی (%)	مدول کششی الاستیک (GPa)
SC-L	۳۰	۱	۳۴۲	۰/۷۶	۴۴/۷
SG-L	۳۵	۱	۱۹۰	۱/۲۱	۱۵/۶

۲-۱-۲- نمونه‌های منشوری بتنی

منشورهای بتنی در ابعاد $50\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ به منظور ارزیابی مقاومت چسبندگی ورق‌های کامپوزیتی به سطح بتن ساخته شد. ورق‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی روی دو سطح مقابل منشور بتنی چسبانده شده است. در این قسمت آزمایش مقاومت چسبندگی طبق استاندارد^۱ بر روی نمونه‌های قرارگرفته در محیط آزمایشگاهی و همچنین نمونه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی دریایی شبیه‌سازی انجام شده است. مشخصات بتن مصرفی در این تحقیق در جدول ۳ آورده شده است. شکل ۱-الف نحوه‌ی ساخت نمونه‌های منشوری و چسباندن ورق‌ها روی سطح بتن نشان داده است.

۳-۱-۳- نمونه‌های بتنی استوانه‌ای

نمونه‌های استوانه‌ای در ابعاد $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ به منظور مطالعه‌ی رفتار اعضای فشاری دورپیچ‌شده با ورق‌های کامپوزیتی ساخته شدند. در این نمونه‌ها با انجام آزمایش مقاومت فشاری، تغییرات مقاومت نهایی فشاری، کرنش نهایی محوری و مدول ناحیه‌ی پلاستیک بتن‌های دورپیچ‌شده با ورق‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی در محیط دریایی شبیه‌سازی شده بررسی شده است. مشخصات بتن استفاده شده در این قسمت نیز مشابه نمونه‌های منشوری بوده است. شکل ۱-ب نحوه‌ی تقویت نمونه‌های استوانه‌ای را نشان داده است.

جدول ۳: طرح اختلاط بتن مصرفی در نمونه‌های منشوری و استوانه‌ای

Table 3. Mix properties of the concrete in cylindrical and prismatic specimens

نسبت آب به سیمان	مقدار سیمان (kg/m^3)	مقدار درشت دانه (kg/m^3)	مقدار ریز دانه (kg/m^3)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)
۰/۵۱	۳۴۱	۸۰۴	۹۴۷	۲۹/۸



ب



الف

شکل ۱: (الف) چسباندن ورق‌های کامپوزیتی روی سطح منشور بتنی (ب) دورپیچی نمونه‌های فشاری با ورق‌های کامپوزیتی

Fig. 1. (a) Overlaying FRP sheets on concrete prisms (b) Wrapping compressive members with FRP sheets

¹ ASTM D4541 (Pull-Off test)

۲-۲- شرایط محیطی

افزایش دما از طریق المنت‌های حرارتی داخل هر حوضچه و نیز المنت‌های نصب شده بر روی دیوار محیط صورت گرفته است. برای کاهش دما، فن مربوطه شکل ۲ فعال شده و هوای داخل را به بیرون منتقل کرده که این تبادل حرارتی ایجاد شده موجب کاهش دمای محیط خواهد شد. رطوبت موجود در داخل محیط شبیه‌ساز نیز از طریق سنسورهای رطوبت پایش شده و در صورت نیاز دستور کاهش و یا افزایش صادر می‌شود. افزایش رطوبت از طریق نازل‌های مه‌پاشی که در محیط قرار گرفته‌اند صورت می‌گیرد. این نازل‌ها از طریق پمپ تزریق رطوبت به مخزن آب در خارج از محیط متصل هستند که با فعال شدن پمپ، آب به صورت پودری از آن‌ها به داخل محیط تزریق می‌شود. کاهش رطوبت نیز از طریق فن مربوطه انجام خواهد شد. در قسمت جلوی این فن المنت‌های حرارتی نصب شده که در صورت افزایش رطوبت از حد مجاز، المنت‌ها فعال شده و با روشن شدن فن، باد گرم داخل اتاق جریان پیدا کرده و بدین ترتیب رطوبت کاهش پیدا خواهد کرد.

به منظور قرائت دقیق سنسورها، سیستم گردش هوا در داخل محیط تعبیه شده است (فن‌های گردش هوا) در شکل ۲ که وظیفه‌ی اصلی آن‌ها یکپارچه سازی دما و رطوبت در داخل محیط قبل از قرائت سنسورها است. سیستم هشدار اشعه‌ی فرابنفش به منظور کاهش خطر آسیب‌دیدگی ناشی از آن و نیز پایش از راه دور دما و رطوبت نیز برای محیط شبیه‌ساز دریایی تعبیه شده است. کنترل تمامی پارامترهای ذکر شده از طریق تابلوی برق مرکزی واقع در خارج محیط شبیه‌ساز انجام می‌گیرد.

شکل ۳ نمای بیرونی محیط شبیه‌ساز به همراه نمونه‌های قرار گرفته در آن را نشان داده است. بر اساس آمار و اطلاعات هواشناسی سایت بندرعباس، دما و رطوبت داخل محیط شبیه‌ساز به ترتیب ۴۰ درجه‌ی سانتیگراد و ۶۸٪ در نظر گرفته شد. غلظت نمک موجود در آب نیز ۳۶/۶ گرم بر لیتر تنظیم شده است. نمونه‌های مورد مطالعه ۳۰۰۰ ساعت داخل محیط شبیه‌ساز قرار گرفتند که در این مدت تعداد ۱۲۵ سیکل آب‌شور و نیز سیکل اشعه‌ی فرابنفش را تجربه کردند. لازم به ذکر است کاهش دوام سازه‌های واقع در منطقه‌ی خلیج فارس، اغلب به واسطه‌ی حضور یون‌های کلرید در آب دریا و آغاز پدیده‌ی خوردگی است. بنابراین در این مطالعه تمرکز اصلی بر روی یون کلرید موجود در آب دریا است.

۳- نتایج آزمایش‌ها و بحث پیرامون آن

۳-۱- تست کشش

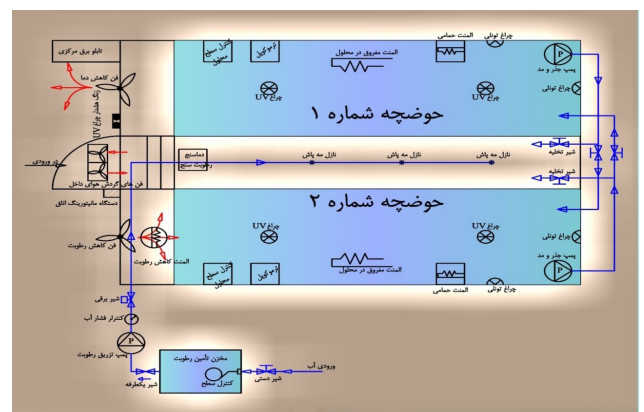
آزمایش مقاومت کششی ورق‌های کامپوزیتی در جهت الیاف توسط دستگاه کنش آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه امیرکبیر انجام شده است. نمونه‌ها طبق توصیه‌ی استاندارد آماده شده و ابعاد هر کدام برابر $400\text{mm} \times 50\text{mm} \times 1\text{mm}$ بوده است.

شرایط محیطی مورد مطالعه در این مقاله، شرایط دریایی واقع در سواحل خلیج فارس است. در این منطقه سازه‌های بتنی بسیار مهم نظیر اسکله‌ها، پل‌ها، سکوهای نفتی و دیگر موارد وجود دارد که اغلب به دلیل دوام پایین و وقوع پدیده‌ی خوردگی، نیاز به ترمیم و تقویت دارند. حضور عوامل مخربی نظیر یون‌های کلرید (در آب دریا)، دما و رطوبت بالا، پدیده‌ی جزر و مد و تابش اشعه‌ی یووی در این منطقه، دوام مصالح بکار رفته در سازه‌های موجود را دچار چالش جدی کرده است.

مطالعه بر روی دوام مصالح در چنین محیط خاصی فرآیند زمان‌بری است. بنابراین برای مطالعه‌ی دقیق در یک بازه‌ی زمانی مشخص، محیط شبیه‌ساز دریایی در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شد و نمونه‌های مورد مطالعه در آن قرار گرفتند. این محیط قادر به کنترل و پایش دما و رطوبت محیط، کنترل و پایش دمای آب، اعمال پدیده‌ی جزر و مد و نیز تابش سیکلی اشعه‌ی یووی است.

شکل ۲ نقشه‌ی داخلی محیط شبیه‌ساز و همچنین قطعات برقی و مکانیکی نصب شده در آن را به صورت شماتیک نشان داده است. دو حوضچه در داخل محیط تعبیه شده که نمونه‌ها داخل آن‌ها قرار داده شده‌اند. یکی از حوضچه‌ها همواره با آب شور پر است. آب شور از طریق دو پمپ قرار گرفته داخل هر حوضچه می‌تواند به حوضچه‌ی دیگر منتقل شود که بدین ترتیب پدیده‌ی جزر و مد داخل محیط، شبیه‌سازی خواهد شد. برای مدل کردن تابش اشعه‌ی یووی، روی هر حوضچه دو عدد چراغ یووی قرار گرفته است که با خالی شدن آب هر حوضچه چراغ‌های قرار گرفته روی آن روشن شده و اشعه مستقیماً به نمونه‌ها تابانیده خواهد شد.

دمای آب و هوا از طریق سنسورهای نصب شده در داخل محیط پایش شده و در صورت نیاز دستور افزایش و یا کاهش دما صادر خواهد شد.



شکل ۲: نقشه‌ی محیط شبیه‌ساز خلیج فارس به همراه قطعات نصب شده در آن

Fig. 2. General plan of Persian Gulf simulator with installed instruments

الیاف از یکدیگر پاره شده‌اند ولی ورق‌های کربن/اپوکسی اکثراً با شکست قسمت ماتریس و یا جدا شدن الیاف از چسب، مقاومت خود را از دست داده‌اند (شکل ۴).

بر اساس نتایج به دست آمده ضرایب تقلیل مقاومت نهایی کششی برای ورق‌های CFRP و GFRP در محیط دریایی مشابه خلیج فارس به ترتیب برابر با ۰/۹۸ و ۰/۷۱ پیشنهاد می‌شود. این ضرایب تقلیل برای مدول الاستیک کششی هر دو نوع ورق برابر با ۰/۸۲ است. برای کرنش نهایی کششی ورق CFRP ضریب افزایشی ۱/۱۹ و برای GFRP ضریب کاهش ۰/۸۵ به دست آمده است. لازم به ذکر است آیین‌نامه‌ی ACI ضرایب تقلیل ظرفیت ثابتی را برای مقاومت نهایی کششی و کرنش نهایی کششی ورق‌ها پیشنهاد داده که به تبع آن فرض کرده است مدول الاستیک کششی ثابت می‌ماند. ضرایب تقلیل پیشنهادی این آیین‌نامه برای مقاومت نهایی و کرنش نهایی کششی ورق‌های CFRP و GFRP در محیط‌های خشن به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۰/۵ است.

جدول ۴: مشخصات مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی پس از قرارگیری در محیط دریایی

Table 4. Mechanical properties of FRP sheets after marine exposure

نام نمونه	مقاومت کششی نهایی (MPa)	کرنش کششی نهایی (%)	مدول کششی الاستیک (GPa)
SC-M	۳۳۵/۱	۰/۹۱	۳۶/۷
	(%۰-۲)*	(%۱۹/۵)*	(%۰-۱۸)*
SG-M	۱۳۵/۳	۱/۰۴	۱۲/۹
	(%۰-۲۸/۸)*	(%۰-۱۴/۲)*	(%۰-۱۷)*

*درصدهای نشان داده شده داخل پرانتز نشان‌گر افزایش/کاهش مقادیر نسبت به نمونه‌های قرار گرفته شده در شرایط نرمال آزمایشگاهی هستند.



شکل ۴: (الف) پاره‌شدگی ورق شیشه/اپوکسی از ناحیه الیاف بعد از قرارگیری در محیط دریایی (ب) جدا شدن الیاف از چسب در ورق‌های کربن/اپوکسی حین تست کشش بعد از قرارگیری در محیط دریایی

Fig. 4. (a) Fiber rupture of GFRP after marine exposure (b) Fiber/Matrix debonding of CFRP in tension test after marine exposure



شکل ۳: (الف) نمای بیرونی از محیط شبیه‌ساز خلیج فارس (ب) نمونه‌های قرار گرفته داخل حوضچه‌ی محیط شبیه‌ساز خلیج فارس

Fig. 3. (a) Exterior view of Persian Gulf simulator (b) Specimens stored in tidal pool of Persian Gulf simulator

هر کدام از نمونه‌ها از دو سر تقویت شده تا پارگی آن‌ها از محلی دور از دو سر نمونه اتفاق بیفتد.

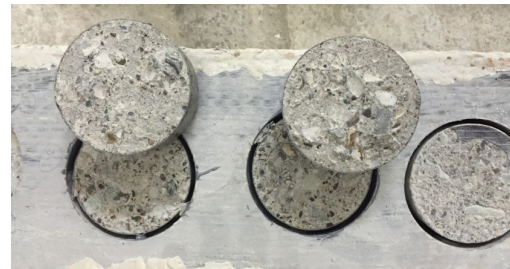
جدول ۲ نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های کنترل در نشان داده شده است. جدول ۴ نتایج تست کشش را بر روی ورق‌های قرار داده شده در محیط شبیه‌ساز خلیج فارس و همچنین درصد تغییرات آن‌ها را نسبت به محیط آزمایشگاهی نشان داده است. مقاومت نهایی کششی در ورق‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی به ترتیب ۲٪ و ۲۸/۸ درصد کاهش داشته است. مقدار کاهش مدول الاستیک به ترتیب در نمونه‌های فوق ۱۸٪ و ۱۷٪ مشاهده شده است. همچنین مقدار کرنش نهایی کششی در این ورق‌ها به ترتیب ۱۹/۵ درصد افزایش و ۱۴/۲ درصد کاهش داشته است. نتایج نشان می‌دهد که اثر تخریبی محیط مورد مطالعه بر پدیده‌ی پس عمل‌آوری نمونه‌ها فائق آمده است. ورق‌های کربن/اپوکسی در مقایسه با شیشه/اپوکسی دوام بهتری را از خود نشان داده‌اند. کاهش مقاومت ورق‌های کامپوزیتی در این محیط را می‌توان به دلیل سیکل‌های جزر و مد آب‌شور در دمای ۴۰ درجه، که موجب نفوذ آب داخل قسمت ماتریس و تشکیل کریستال‌های نمک شده دانست. این موضوع موجب افزایش فشار داخلی قسمت ماتریس شده و با ایجاد ترک‌هایی مقاومت را کاهش خواهد داد. همچنین تابش اشعه‌ی یووی موجب تخریب ضخامتی از لایه‌ی رویه ماتریس شود و نفوذپذیری را در این محیط افزایش دهد.

کاهش بیشتر خواص مکانیکی ورق‌های شیشه/اپوکسی در محیط دریایی به دلیل دوام کمتر الیاف شیشه در این محیط است. رطوبت موجب تخریب شیمیایی الیاف شیشه شده که این موضوع در حضور نمک تشدید می‌یابد [۱۱]. این مسئله را می‌توان در مدهای گسیختگی ورق‌ها مشاهده کرد. ورق‌های شیشه/اپوکسی پس از قراگیری در محیط دریایی، غالباً با گسیختن

۳-۲- آزمایش مقاومت چسبندگی

آزمایش مقاومت چسبندگی به منظور ارزیابی مقاومت چسبندگی ورق‌های کامپوزیتی به سطح بتن در محیط مورد مطالعه انجام شده است. نمونه‌ها طبق توضیحات داده شده ساخته و آزمایش مقاومت چسبندگی بر اساس استاندارد روی آن‌ها انجام شد (شکل ۵).

جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت چسبندگی را بر روی ورق‌های کامپوزیتی در شرایط محیطی نرمال و محیط شبیه‌ساز خلیج فارس نشان داده است.



شکل ۵: آزمایش مقاومت چسبندگی بر روی ورق‌های کامپوزیتی

Fig. 5. Pull-Off test on FRP sheets

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت چسبندگی بر روی ورق‌های کامپوزیتی

Table 5. Results of pull-off test performed on FRP sheets

نام نمونه	مقاومت چسبندگی (MPa)	مد گسیختگی
PC-L	۲/۶۴	گسیختگی از بتن
PG-L	۲/۹۸	گسیختگی از بتن
PC-M	۲/۲۷ (%-۱۳/۹)*	گسیختگی از بتن
PG-M	۲/۵ (%-۱۵/۹)*	گسیختگی از بتن

*درصدهای نشان داده شده داخل پرانتز نشانگر کاهش مقادیر نسبت به نمونه‌های قرارگرفته شده در شرایط نرمال آزمایشگاهی هستند.

درصد کاهش مقاومت چسبندگی در ورق‌های شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی به ترتیب برابر ۱۵/۹ و ۱۳/۹ درصد است. قسمت ماتریس، چسبندگی ورق به سطح بتن را تأمین می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت

اثر تخریبی محیط بر این قسمت موجب کاهش مقاومت چسبندگی شده است. این موضوع با توجه به نزدیک بودن مقادیر کاهش برای هر دو نوع ورق کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی و اینکه نوع ماتریس برای هر دو ورق ثابت بوده است، قابل توجه است. بنابراین اندکی کاهش بیشتر در ورق‌های شیشه/اپوکسی می‌تواند به دلیل درصد کمتر قسمت ماتریس در این ورق‌ها باشد (جدول ۲). مد گسیختگی در تمامی موارد مطلوب بوده و از داخل بتن اتفاق افتاده است.

۳-۳- مقاومت فشاری نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های کامپوزیتی

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار مصالح کامپوزیتی در ترمیم و تقویت اعضای فشاری واقع در محیط دریایی، نمونه‌های استوانه‌ای دورپیچ شده ساخته و در محیط شبیه‌ساز قرار گرفت و تغییرات تنش محوری-کرنش محوری آن‌ها با نمونه‌های واقع در شرایط نرمال آزمایشگاهی مقایسه شدند. آزمایش مقاومت فشاری توسط دستگاه دارتک^۱ آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر انجام شده است.

رطوبت و سیکل‌های تر و خشک موجود در محیط شبیه‌ساز می‌تواند بر مقاومت فشاری هسته‌ی بتنی تأثیر بگذارد و آن را افزایش دهد (بدلیل عمل‌آوری بهتر) و نتیجتاً در بررسی اثر تخریبی محیط بر روی نمونه‌ها ایجاد خطا کند. بنابراین برای بررسی دقیق‌تر اثر محیط بر دورپیچی، در محیط دریایی مورد مطالعه نیز نمونه‌ی بدون دورپیچی قرار داده شده است و نمونه‌های واقع در محیط شبیه‌ساز با نمونه‌ی شاهد خود^۲ و نمونه‌های قرار گرفته در محیط آزمایشگاهی نیز با نمونه‌ی شاهد خود^۳ مقایسه شده و پس از آن مقادیر افزایش یا کاهش در دو شرایط محیطی مختلف با یکدیگر قیاس شده‌اند. شکل ۶ نمودارهای تنش-کرنش محوری نمونه‌ها را در دو محیط آزمایشگاهی و دریایی نشان داده است. پارامترهای استخراج شده از این نمودارها جدول ۶ خلاصه شده است.

نتایج به دست آمده نشان داده است که محیط دریایی اثرات منفی بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های دورپیچ شده داشته است. با مقایسه درصدهای افزایشی داخل پرانتز که در جدول ۶ نشان داده شده است می‌توان نتیجه گرفت دورپیچ کردن نمونه‌ها در شرایط محیطی آزمایشگاهی با یک لایه کربن/اپوکسی موجب افزایش مقاومت نهایی فشاری و کرنش نهایی محوری به میزان ۶۰ و ۱۶۷ درصد شده است. این مقادیر برای نمونه‌های دورپیچ شده با دو لایه شیشه/اپوکسی به ترتیب ۶۴ و ۲۱۹ درصد و برای یک لایه شیشه/اپوکسی به ترتیب ۲۸ و ۱۵۵ درصد بوده است. مقادیر فوق در شرایط محیطی دریایی به ترتیب برابر ۵۳ و ۱۲۱ درصد برای ورق‌های کربن/اپوکسی، ۴۲ و ۱۵۴ درصد برای دو لایه شیشه/اپوکسی، ۱۶/۵ و ۱۲۶ درصد برای دورپیچی با یک لایه شیشه/اپوکسی بوده است. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد این مسئله به دلیل حضور عوامل

1 DARTEC

2 CCO-M

3 CCO-L

شیب قسمت دوم نمودارها که مدول ناحیه‌ی پلاستیک نامیده می‌شود یک شاخص مهم در طراحی ستون‌های دورپیچ شده با ورق‌های کامپوزیتی است. این مسئله به دلیل ارتباط مستقیم مدول الاستیک کششی ورق‌های FRP با مدول ناحیه‌ی پلاستیک نمونه‌های دورپیچ شده است [۴]. مقدار بیشتر مدول در ورق‌های کربن/اپوکسی موجب شده است این پارامتر در نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های کربن/اپوکسی بیشتر باشد. محیط‌دریایی مدول ناحیه‌ی پلاستیک را در هر سه نمونه کاهش داده است. این مقدار کاهش برای نمونه‌های دورپیچ شده با یک لایه کربن/اپوکسی، یک لایه شیشه/اپوکسی و دو لایه شیشه/اپوکسی شده به ترتیب برابر ۱۷، ۱۸ و ۱۲ درصد بوده است. البته مقادیر بالای مدول ناحیه‌ی پلاستیک در نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های کربن/اپوکسی موجب شده است که این مقدار پس از کاهش نیز از مقادیر مشابه آن در نمونه‌های دورپیچ شده با یک و دو لایه شیشه/اپوکسی بیشتر باشد. به علاوه اینکه به کارگیری دو لایه شیشه/اپوکسی موجب کاهش کمتر مدول ناحیه‌ی پلاستیک شده است. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان رابطه ۱ را برای محاسبه‌ی درصد کاهش مدول ناحیه‌ی پلاستیک نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های GFRP بر حسب تعداد لایه‌های به کار رفته پیشنهاد داد:

$$E = -5.25n + 23.32 \quad (1)$$

که در آن:

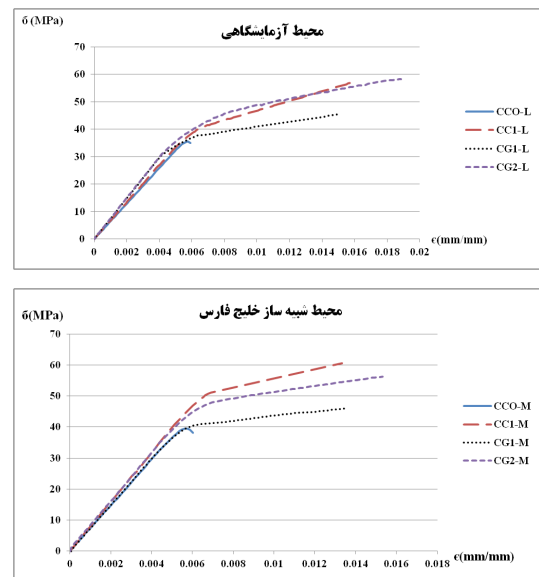
E: کاهش مدول ناحیه‌ی پلاستیک (بر حسب درصد)

n: تعداد لایه‌های GFRP (برای یک یا دو لایه)

کرنش نهایی یکی از پارامترهای تأثیرگذار در بحث طراحی اعضای فشاری دورپیچ شده است. دورپیچی موجب افزایش کرنش نهایی و نتیجتاً شکل‌پذیری خواهد شد که بحث بسیار مهم در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها است. در شرایط محیطی آزمایشگاهی، میزان افزایش کرنش نهایی در نمونه‌های دورپیچ شده با یک لایه کربن/اپوکسی و یک لایه شیشه/اپوکسی، تقریباً به صورت مساوی بوده است. با استفاده از دو لایه شیشه/اپوکسی مقدار کرنش نهایی افزایش بیشتری داشته است. محیط دریایی اثر منفی بر روی کرنش نهایی و شکل‌پذیری نیز داشته است. میزان کاهش کرنش نهایی برای نمونه‌های دورپیچ شده با یک لایه کربن/اپوکسی، یک لایه شیشه/اپوکسی و دو لایه شیشه/اپوکسی شده به ترتیب برابر ۲۷/۵، ۱۸/۷ و ۲۹/۷ درصد بوده است.

نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های دورپیچ شده نشان داده است که محیط دریایی موجب تضعیف ناحیه‌ی انتقال بین الیاف کربن و قسمت ماتریس شده و بنابراین پارگی ورق‌ها در جهت موازی با الیاف رخ داده است. در نمونه‌های دورپیچی با ورق‌های شیشه/اپوکسی با توجه به اینکه محیط بر الیاف شیشه نیز اثر گذاشته و موجب کاهش مقاومت آن شده، پارگی در جهت عمود بر الیاف اتفاق افتاده است (شکل ۷). با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که انتخاب نوع ورق و همچنین استفاده از دو لایه بر

مخری نظیر آب‌شور، رطوبت، دما و اشعه‌ی یووی بوده که موجب افزایش نفوذپذیری ورق‌ها و کاهش مقاومت آن‌ها شده است.



شکل ۶: نمودار تنش محوری-کرنش محوری نمونه‌های دورپیچ شده (الف) نمونه‌های قرار گرفته در محیط آزمایشگاهی (ب) نمونه‌های قرار گرفته در محیط شبیه‌ساز خلیج فارس

Fig. 6. Axial stress-strain curves of wrapped specimens which were placed in (a) laboratory condition (b) Persian Gulf simulator

جدول ۶: پارامترهای مکانیکی نمونه‌های دورپیچ شده در محیط آزمایشگاهی و شبیه‌ساز

Table 6. Mechanical properties of wrapped specimens in both laboratory condition and marine simulator

نام نمونه	مقاومت فشاری نهایی (MPa)	کرنش محوری نهایی (%)	مدول ناحیه‌ی پلاستیک (MPa)	
CCO-L	۳۵/۵	۰/۵۸۹	-	محیط آزمایشگاهی
CC1-L	۵۶/۹ (%۶۰) ^۱	۱/۵۷۶ (%۱۶۷) ^۱	۱۷۶۳	
CG1-L	۴۵/۵ (%۲۸) ^۱	۱/۵۰۷ (%۱۵۵) ^۱	۸۸۸	
CG2-L	۵۸/۳ (%۶۴) ^۱	۱/۸۸۵ (%۲۱۹) ^۱	۱۰۷۶	
CCO-M	۳۹/۵	۰/۶۰۲	-	محیط شبیه‌ساز خلیج فارس
CC1-M	۶۰/۵ (%۵۳) ^۲	۱/۳۳۲ (%۱۲۱) ^۲	۱۴۶۲	
CG1-M	۴۶ (%۱۶/۵) ^۲	۱/۳۶ (%۱۲۶) ^۲	۷۳۰	
CG2-M	۵۶/۲ (%۴۲) ^۲	۱/۵۳۱ (%۱۵۴) ^۲	۹۴۴	

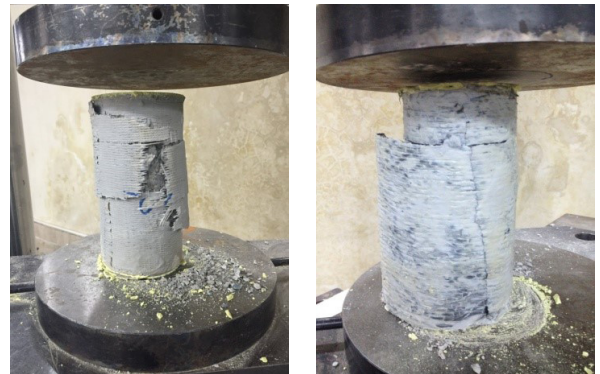
۱ مقادیر داخل پرانتز، درصدهای افزایشی مقادیر در مقایسه با نمونه‌ی CCO-L است.
۲ مقادیر داخل پرانتز، درصدهای افزایشی مقادیر در مقایسه با نمونه‌ی CCO-M است.

۳. محیط دریایی موجب کاهش مقاومت چسبندگی ورق‌ها به سطح بتن شده است. این مقدار کاهش برای ورق‌های کربن/اپوکسی مقدار ۱۳/۹ درصد و برای ورق‌های شیشه/اپوکسی، ۱۵/۹ درصد بوده است. مد گسیختگی برای هر دو نوع ورق‌ها و در هر دو محیط از داخل بتن بوده است.
۴. محیط دریایی مورد مطالعه موجب کاهش ۱۱/۶، ۴۱ و ۳۴/۳ درصدی مقاومت نهایی به ترتیب در نمونه‌های دورپیچ شده با یک لایه کربن/اپوکسی، یک لایه شیشه/اپوکسی و دو لایه شیشه/اپوکسی شده است. بنابراین نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های کربن/اپوکسی دوام بالاتری در این محیط داشته و نیز استفاده از دو لایه می‌تواند موجب کاهش اثر تخریبی محیط شود.
۵. محیط دریایی موجب تخریب بیشتر الیاف موجود در ورق‌های شیشه/اپوکسی شده است. مقایسه‌ی مدهای گسیختگی ورق‌های کامپوزیتی و همچنین نمونه‌های دورپیچ شده نشان داد، ورق‌های شیشه/اپوکسی غالباً با پارگی الیاف گسیخته شدند ولی در ورق‌های کربن/اپوکسی گسیختگی به دلیل شکست قسمت ماتریس و یا جدا شدن الیاف از قسمت ماتریس اتفاق افتاده است.

مراجع

- [1] L.C. Bank, Composites for construction: Structural design with FRP materials, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2006.
- [2] ACI440.2R-08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structure, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331, 2008.
- [3] F. Micelli, J. Myers, S. Murthy, Performance of FRP Confined Concrete Subjected to Accelerated Environmental conditioning, in: 2nd International Conference on Durability of FRP, Sherbrooke, Canada, 2002.
- [4] A. Belarbi, S.W. Bae, An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets, Composites Part B: Engineering, 38(5) (2007) 674-684.
- [5] V.M. Karbhari, K. Ghosh, Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40(9) (2009) 1353-1363.
- [6] J.R. Cromwell, K.A. Harries, B.M. Shahrooz, Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures, Construction and Building Materials, 25(5) (2011) 2528-2539.

دوام آن‌ها در محیط‌های دریایی نقش به‌سزایی دارد. نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های کربن/اپوکسی عملکرد بهتری در محیط‌های دریایی از خود نشان داده‌اند. همچنین استفاده از دو لایه ورق‌های شیشه/اپوکسی تا حدودی توانسته است از اثرات تخریبی محیط جلوگیری کند. به نظر می‌رسد در کنار عوامل ذکر شده در افزایش دوام ورق‌های کامپوزیتی در محیط‌های دریایی، اجرای پوشش‌های محافظ بر روی ورق‌های با دوام کمتر و ارزان‌تر بتوانند نقش به‌سزایی در افزایش دوام آن‌ها در این محیط‌های خاص داشته باشند.



ب

الف

شکل ۷: (الف) گسیختگی از ناحیه ماتریس در نمونه‌های کربن/اپوکسی (ب) گسیختگی از ناحیه الیاف در نمونه‌های شیشه/اپوکسی

Fig. 7. (a) Matrix rupture in CFRP-wrapped specimens (b) Fiber rupture in GFRP-wrapped specimens

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌های متعددی به منظور ارزیابی دوام ورق‌های کامپوزیتی و نیز اعضای دورپیچ شده با آن‌ها در شرایط محیطی شبیه‌سازی خلیج فارس انجام شد. در این قسمت به خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده اشاره شده است:

- با قرار دادن ورق‌های کامپوزیتی در محیط دریایی، کاهش میزان مقاومت کششی نهایی و مدول الاستیک در ورق‌های کربن/اپوکسی برابر ۲ و ۱۸ درصد مشاهده شده است. این مقادیر به ترتیب ۲۸/۸ و ۱۷ درصد در ورق‌های شیشه/اپوکسی بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت دوام ورق‌های کربن/اپوکسی در محیط مورد مطالعه بیشتر از ورق‌های شیشه/اپوکسی بوده است.
- با قرار دادن ورق‌های کامپوزیتی در محیط دریایی، کاهش میزان مقاومت کششی نهایی و مدول الاستیک در ورق‌های کربن/اپوکسی برابر ۲ و ۱۸ درصد مشاهده شده است. این مقادیر به ترتیب ۲۸/۸ و ۱۷ درصد در ورق‌های شیشه/اپوکسی بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت دوام ورق‌های کربن/اپوکسی در محیط مورد مطالعه بیشتر از ورق‌های شیشه/اپوکسی بوده است.

- environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: A review, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 360-370.
- [10] M.A.G. Silva, B.S. da Fonseca, H. Biscaia, On estimates of durability of FRP based on accelerated tests, *Composite Structures*, 116 (2014) 377-387.
- [11] V.M. Karbhari, L. Zhao, Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening, *Composite Structures*, 40(3) (1997) 293-304.
- [7] A. Gharachorlou, A.A. Ramezani pour, Resistance of Concrete Specimens Strengthened with FRP Sheets to the Penetration of Chloride Ions, *The Arabian Journal for Science and Engin*, 35(1B) (2010) 141-154.
- [8] F. Nardone, M. Di Ludovico, F.J. De Caso y Basalo, A. Prota, A. Nanni, Tensile behavior of epoxy based FRP composites under extreme service conditions, *Composites Part B: Engineering*, 43(3) (2012) 1468-1474.
- [9] P. Böer, L. Holliday, T.H.K. Kang, Independent

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Kashi, A. A. Ramezani pour, F. Moodi, Durability of FRP Sheets and Wrapped Specimens with them in Tidal Zone of Persian Gulf, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(2) (2018) 293-302.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11473.5024

