



ارزیابی تأثیر میزان جذب آب بر خواص دی‌الکتریک و استحکام کششی کامپوزیت پلیمری

محمد امینی^{1*}، علیرضا خاوندی²

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* m_amini@email.kntu.ac.ir، 19919-43344، تهران

چکیده	اطلاعات مقاله
در این تحقیق، آزمون جذب آب بر روی کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه تک جهته (GFRP) به‌منظور به‌کارگیری در عایق‌های کامپوزیتی ولتاژ بالا انجام شد. نمونه‌های کامپوزیتی در دمای اتاق در آب مقطر، به‌صورت غوطه‌وری قرار گرفتند و مقاومتشان به جذب رطوبت برحسب نرخ جذب رطوبت، میزان جذب رطوبت و ضریب نفوذ ظاهری تعیین شد. همچنین اثر هندسه نمونه (اثر لبه) بر روی جذب رطوبت کامپوزیت موردبررسی قرار گرفت. بر طبق نتایج می‌توان پی برد که تغییرات در میزان رطوبت اثر ویژه‌ای بر روی خواص مکانیکی و الکتریکی مواد کامپوزیتی خواهد داشت. آزمون کشش به‌منظور تعیین خواص مکانیکی، اندازه‌گیری ولتاژ شکست و جریان نشتی به‌منظور بررسی خواص الکتریکی و تصویربرداری به کمک میکروسکوپ الکترونی عبوری برای مشاهده مورفولوژی نمونه‌های GFRP صورت گرفت. با افزایش زمان غوطه‌وری استحکام کششی و مدول یانگ نمونه‌ها کاهش یافت بطوریکه بعد از 29 روز غوطه‌وری این مقادیر به ترتیب از 491 به 432 مگاپاسکال و از 26.3 به 21.5 گیگاپاسکال کاهش یافت. علاوه، آب جذب‌شده به‌وسیله نمونه‌های کامپوزیتی منجر به افت ولتاژ شکست به میزان 13 V/Cm و افزایش 2 میکروآمپر جریان نشتی کامپوزیت شد که می‌تواند نشان‌دهنده تخریب آن‌ها باشد.	دریافت: 97/02/04 پذیرش: 97/06/05 کلیدواژگان: کامپوزیت پلیمری جذب آب ولتاژ شکست جریان نشتی استحکام کششی بررسی ریزساختاری

Evaluation of the water absorption content effect on the dielectric properties and tensile strength of polymer composites

Mohammad Amini^{1*}, Alireza Khavandi²

1-Faculty of Materials Science and Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2-School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 43344-19919, Tehran, m_amini@email.kntu.ac.ir

Keywords

Polymer composite
Water absorption
Breakdown voltage
Leakage current
Tensile strength
Microstructural characterization

Abstract

Water absorption tests were performed on unidirectional glass/polymer composite materials used in high voltage composite (nonceramic) insulators. The composites were based on E-glass fibers with polyester resin. The composites were exposed to distilled water at room temperature and their resistance to moisture absorption in terms of the rate of moisture absorption, maximum moisture content and apparent diffusivity was determined. In particular, the effects of specimen geometry (the edge effect) on moisture absorption by the composites were evaluated. It was found that changes in moisture content have a special effect on the mechanical and electrical properties of the composite material. The tensile test was conducted to determine the mechanical properties, breakdown voltage and the leakage current were measured to determine the electrical properties and scanning electron microscopy was used to observe the morphological property of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) samples. A reduction in both module and tensile strength was observed with water aging. Module and tensile strength decline from 491 to 432MPa and from 26.3 to 21.5GPa respectively. Furthermore, Water absorbed by composite samples had a detrimental influence on the breakdown voltage and leakage current of composite specimens that could be an indicator of degradation. As a result of this degradation, we have a drop of 13V/Cm and an increment of 2μA in the amount of breakdown voltage and leakage current respectively.

Please cite this article using:

Amini, M., Khavandi, A., "Evaluation of the water absorption content effect on the dielectric properties and tensile strength of polymer composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 300-309, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری به‌طور گسترده در کاربردهای مختلف مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ بنابراین این مواد در معرض شرایط نامطلوب محیطی از قبیل دماهای بالا و پایین، رطوبت و مواد شیمیایی قرار می‌گیرند که منجر به کاهش عمر کاری آن‌ها می‌شود؛ بنابراین بررسی عملکرد این مواد در شرایط محیطی مختلف اهمیت پیدا می‌کند [1،2]. این مواد می‌توانند به‌عنوان عایق‌های کامپوزیتی غیر سرامیکی در کاربردهای انتقال نیروی الکتریکی¹ مورد استفاده قرار گیرند. یک مقره کامپوزیتی تشکیل شده است از هسته، چترک‌های عایق لاستیکی و یراق‌آلات. هسته از جنس FRP² است که از دو لحاظ حائز اهمیت است: یکی از لحاظ رفتار الکتریکی که به‌عنوان اصلی‌ترین جزء عایقی عمل می‌کند و دیگری از لحاظ رفتار مکانیکی که بار مکانیکی را تحمل می‌نماید. الیاف شیشه E یا ECR تک‌جهته به‌عنوان فاز تقویت‌کننده و رزین پلیمری به‌عنوان فاز زمینه برای ساخت هسته کامپوزیتی به کار می‌روند [3،4].

تحت شرایط خاصی از کارایی میله‌های کامپوزیتی و تابع آن از عایق‌های کامپوزیتی کاسته می‌شود. ورود آب به داخل کامپوزیت‌های پلیمری می‌تواند خواص دی الکتریکی مقره‌ها را تغییر دهد و از کارایی آن‌ها هنگام به‌کارگیری در عایق‌های ولتاژ بالا بکاهد. همچنین می‌تواند باعث افت خواص مکانیکی آن شود. استانداردهایی برای آزمودن عایق‌های کامپوزیتی غیر سرامیکی به‌منظور بررسی خواص الکتریکی آن‌ها به کمک اندازه‌گیری جریان نشتی الکتریکی بعد از نفوذ آب به درون ماده کامپوزیتی وجود دارد که این استانداردها در IEC 61109 Section 5.4.2 و ANSI C29.11 Section 7.4.2 تشریح شده‌اند. فاکتور اصلی در قابل‌قبول بودن و یا رد شدن نمونه‌ها در هر دو استاندارد مذکور برپایه ی میزان جریان نشتی 1 mA در 12 kV می‌باشد [5].

تأثیر محیط آبی بر روی خواص کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه در تحقیقات مختلفی [6-8] مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتیجه جذب رطوبت در مواد کامپوزیتی نرم شدگی آن‌هاست و در نتیجه دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) را کاهش می‌دهند و زمینه را ضعیف‌تر می‌کند. علاوه بر این بادکردگی غیریکنواخت زمینه می‌تواند آزادسازی تنش‌ها را در پی داشته باشد. استحکام فصل مشترک الیاف-زمینه نیز ممکن است در حضور رطوبت کاهش یابد. فرض بر این است که به‌جای نفوذ از طریق زمینه، در یک فرایند آهسته و وابسته به دما، رطوبت با سهولت بیشتری در راستای الیاف به درون کامپوزیت نفوذ می‌کند و منجر به تخریب اتصال فصل مشترک می‌شود. از آنجایی که فصل مشترک الیاف-رزین نقش اساسی را استحکام کامپوزیت به‌واسطه انتقال بار ایفا می‌کند لذا خواص مکانیکی کامپوزیت می‌تواند در اثر نفوذ رطوبت دستخوش تغییر شود. در تحقیقات پیشین نشان داده شده است که الیاف شیشه اگر در معرض رطوبت واقع شوند؛ به‌واسطه نفوذ یون به سطح آن‌ها دچار خوردگی تنشی³ می‌شوند [9-11]. طبق بررسی‌های جونز خوردگی تنشی در آب به این صورت است که یون‌های موجود در الیاف از قبیل Al_3^+ و Fe_3^+ ، Ca_2^+ به‌واسطه حضور آب شسته و حل می‌شود و توانایی الیاف را در حمل بار کاهش می‌دهد [12].

جدول 1 جزئیات ترکیب نمونه‌ی کامپوزیتی مورد مطالعه در این پژوهش.

Table 1 the composition Details of the composite specimen in this study.

اجزای کامپوزیت	جنس	درصد وزنی (%Wt.)
زمینه	پلی‌استر غیراشباع	60-70
	کربنات کلسیم	25-30
	خمیر رنگ	1.5-2
	ریلیز ایجنت	1.5-2
	انتی فایر	1.5-2
عامل پخت		1-2
تقویت‌کننده	الیاف شیشه از نوع E	50-70

هدف از این تحقیق بررسی میزان جذب آب و ارزیابی اثر جذب رطوبت بر روی خواص دی الکتریکی و مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه تک‌جهته می‌باشد. بجای استفاده از نمونه‌های میله‌ای شکل [13] و یا لوله‌ای شکل [14] که در مطالعات پیشین بکار گرفته شده‌اند، در اینجا نمونه‌های کامپوزیتی صفحه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. صفحات کامپوزیتی به‌منظور بررسی میزان ولتاژ شکست و همچنین ارزیابی جریان نشتی و استحکام کششی به‌عنوان تابعی از میزان جذب رطوبت مورد استفاده قرار گرفت.

2- مواد و روش تحقیق

پروفیل‌های کامپوزیتی تولیدشده به روش پالترژن در یک شرکت تولیدکننده‌ی انواع پروفیل‌های داخلی، به‌عنوان مواد اولیه‌ی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت که جزئیات مربوط به ترکیب آن‌ها بنا به اظهارات شرکت سازنده در جدول 1 ذکر شده است.

2-1- آزمون جذب آب

جذب آب پروفیل‌های کامپوزیتی زمینه پلی‌استر غیراشباع مقاوم شده با الیاف شیشه از نوع E، از استاندارد ASTM D5229M-92 استفاده شد. در این آزمایش 10 نمونه با ابعاد معین آماده شد. بعد از ماشین‌کاری، نمونه‌ها به کمک متانول در حمام آلتراسونیک تمیز می‌شوند. سپس نمونه‌ها در آون با دمای 50°C قرار داده می‌شود تا خشک شوند. وزن نمونه‌ها به‌طور پیوسته با ترازوی الکترونیکی به‌دقت 0.001g اندازه‌گیری می‌شود تا روند خشک شدن نمایش داده شود. روند خشک شدن تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که با توجه به رابطه‌ی (1)، مقدار a در سه اندازه‌گیری متوالی کوچک‌تر از 0.01% گردد.

$$a = \left| \frac{W_i - W_{i-1}}{W_b} \right| (0.0001) \quad (1)$$

که در آن W_i وزن نمونه در مرحله i ام، W_{i-1} وزن نمونه در مرحله $i-1$ ام و W_b وزن اولیه نمونه (بلافاصله بعد از خروج از آون) می‌باشد. بعد از پایدار شدن وزن، میزان وزن همه نمونه‌ها بعد از خشک شدن ثبت می‌شود و آزمون ولتاژ شکست و جریان نشتی بر روی نمونه‌های 1 تا 3 به‌منظور تعیین مقدار اولیه آن‌ها انجام می‌شود. سپس نمونه‌ها را به مدت‌زمان معین داخل بشری

¹ electrical transmission

² Fiber Reinforced Polymer

³ Stress corrosion cracking

کامپوزیت $(\frac{mm^2}{s})$ می باشد. با توجه به شکل 1، مقدار افزایش درصد وزن به یک حد ماکزیمم می رسد و با گذشت زمان نرخ افزایش جذب رطوبت، کاهش می یابد که دلیل آن پرشدن فضای خالی، ترک ها و حفره های موجود در کامپوزیت است. مشاهده شده است که در کامپوزیت های تک جهته، رطوبت در جهت موازی با الیاف سریع تر از جهت عمود بر آن حرکت می کنند. این به خاطر کیفیت فصل مشترک رزین/الیاف است. مدل ارائه شده توسط شن [16] که به طور کامل تری در مقاله ی آقای کوماسو [14] بیان شده است؛ می تواند منجر به درک بهتری بر این مطلب شود. او برای کامپوزیت تک جهته، ضریب نفوذ موازی و عمود در نظر گرفته است که به ترتیب از روابط (7) و (8) زیر پیروی می کند:

$$D^{\parallel} = D_R(1 - v_f) \quad (7)$$

$$D^{\perp} = D_R(1 - 2\sqrt{\frac{v_f}{\pi}}) \quad (8)$$

که v_f کسر حجمی الیاف و D_R ضریب نفوذ رزین است. در این مدل فرض بر این است که الیاف رطوبتی جذب نمی کنند. شن، روشی برای تعیین ضریب نفوذ ظاهری کامپوزیت به ضریب نفوذ رزین اش در نمونه های کامپوزیتی تک جهته ارائه کرد که اصلاحی را برای اثر لیه شامل می شود. به منظور آزمایش کردن اثر لیه نمونه بر روی ضریب نفوذ، لازم است که ضریب پخش رزین D_R طبق رابطه (9) محاسبه شود.

$$D_R = D_A \left[\left[(1 - v_f) \cos^2 \alpha + \left(1 - 2\sqrt{\frac{v_f}{\pi}} \right) \sin^2 \alpha \right] \times \left[1 + \frac{\square}{l} \frac{(1 - v_f) \cos^2 \beta + \left(1 - 2\sqrt{\frac{v_f}{\pi}} \right) \sin^2 \beta}{(1 - v_f) \cos^2 \alpha + \left(1 - 2\sqrt{\frac{v_f}{\pi}} \right) \sin^2 \alpha} \right] + \frac{\square}{n} \frac{\left((1 - v_f) \cos^2 \gamma + \left(1 - 2\sqrt{\frac{v_f}{\pi}} \right) \sin^2 \gamma \right)^2}{\left((1 - v_f) \cos^2 \alpha + \left(1 - 2\sqrt{\frac{v_f}{\pi}} \right) \sin^2 \alpha \right)^2} \right]^{-1} \quad (9)$$

α و β و γ ، زوایای بین صفحه کارتزین نمونه مکعب مستطیلی و جهت الیاف می باشد که در اینجا با توجه به شکل 2 به ترتیب برابر با 0، 90 و 90 درجه می باشد. n ، h ، طول، عرض و ضخامت نمونه کامپوزیتی بوده که به ترتیب برابر با 80، 40 و 3 میلی متر است و همچنین f_v کسر حجمی الیاف می باشد.



Fig. 2 Schematics of a flat plate sample.

شکل 2 شمای کلی نمونه کامپوزیتی صفحه ای شکل.

با به دست آمدن D_R ، ضریب نفوذ موازی و عمود و همچنین نسبت آن دو نیز با توجه به روابط (7) و (8) به دست می آید [14].

حاوی آب مقطر قرار می دهیم و هر هفته آب داخل بشر را تعویض می کنیم. شرط پایان مرحله جذب رطوبت، مشابه مرحله خشک کردن است. بعد از پایان جذب رطوبت میزان ولتاژ شکست و جریان ناشی ثانویه نمونه ثبت می شود و با مقدار اولیه آن مقایسه می شود. درصد رطوبت جذب شده در هر مرحله، از رابطه (2) به دست می آید:

$$M_i = \left| \frac{W_i - W_b}{W_b} \right| \times 100 \quad (2)$$

که در آن W_i وزن نمونه در مرحله i ام، W_b وزن اولیه نمونه و M_i درصد جذب رطوبت می باشد. برای مسائل تک جهته، نفوذ رطوبت در داخل اکثر کامپوزیت ها از قانون فیک (3) پیروی می کند:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (3)$$

که در آن c غلظت رطوبت نمونه $(\frac{g}{mm^3})$ ، t زمان (s) ، z ضخامت نمونه (mm) و D_z ضریب نفوذ در راستای ضخامت $(\frac{mm^2}{s})$ می باشد. با حل قانون دوم فیک به کمک شرایط مرزی، دو رابطه عملی (4) و (5) برای به دست آوردن درصد افزایش وزن به دست می آید:

$$M(T, t) = M_b + G(T, t)(M_m - M_b) \quad (4)$$

$$G(T, t) = 1 - \exp\left[-7,3 \left(\frac{D_z(T)t}{h^2}\right)^{0,75}\right] \quad (5)$$

به کمک رابطه (4) میزان رطوبت ماده در دما و زمان های متفاوت به دست می آید و رابطه (5) تابع جذب رطوبت می باشد؛ که M_b میزان جذب رطوبت اولیه و M_m میزان جذب رطوبت در حالت اشباع می باشد. اگر تنها یک طرف نمونه در تماس با محیط باشد، در معادله G به جای استفاده از پارامتر h به عنوان ضخامت، از $2h$ استفاده می شود. برای پیش بینی مقدار ماده نفوذ کننده در زمان t ، ضروری است که مقادیر D_z و M_m را داشته باشیم. با محاسبه شیب قسمت خطی نمودار افزایش وزن برحسب جذر زمان غوطه وری، می توان به کمک رابطه (6)، مقدار D را به دست آورد و مجانب افقی نمودار هم مقدار M_m را تعیین می کند [15].

$$D_z = \pi \left(\frac{h}{4M_m} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (6)$$

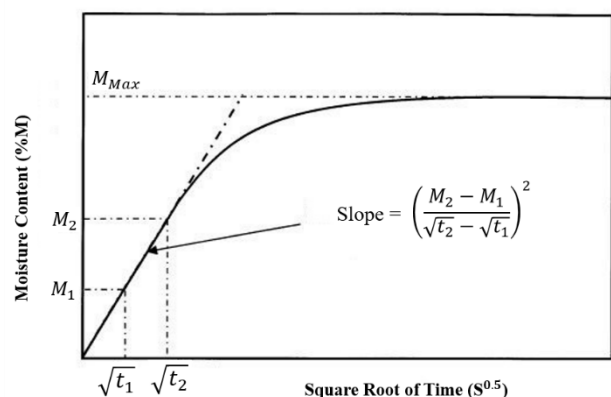


Fig. 1 Fickian diffusion process.

شکل 1 نمایش شماتیک روند نفوذ فیکین.

در رابطه (6)، h ضخامت نمونه (mm) ، M_m درصد رطوبت تعادلی، M_1 درصد رطوبت در زمان t_1 ، M_2 درصد رطوبت در زمان t_2 و D_z ضریب نفوذ

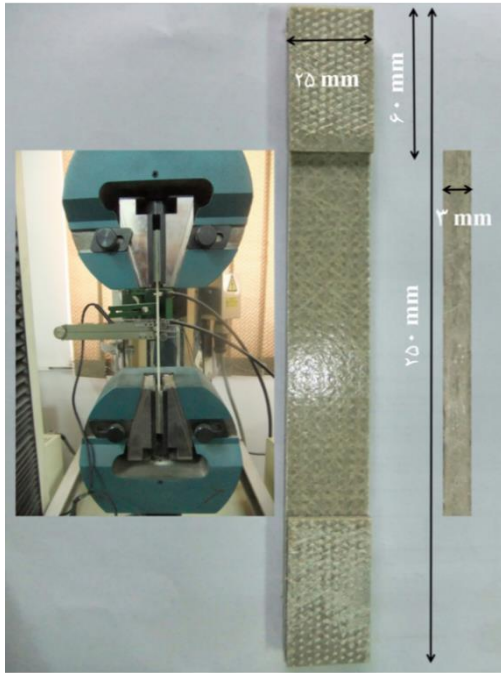


Fig. 4 Sample and tensile test machine.

شکل 4 نمونه و دستگاه آزمون کشش.

با توجه به استاندارد، ابعاد نمونه کامپوزیتی جهت انجام آزمون کشش، مطابق شکل 4 انتخاب شد. در این آزمون به منظور دستیابی به نتایج تغییر طول دقیق تر نمونه از دستگاه اکستنسومتر² استفاده شد.

3- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج مربوط به جذب آب و تأثیر آن روی خواص الکتریکی و مکانیکی بیان خواهد شد. همچنین مکانیسم‌های مربوطه مورد بحث قرار خواهد گرفت. به منظور بررسی توزیع الیاف و مورفولوژی کامپوزیت‌ها، سطح مقطع و نمونه‌ها با استفاده از SEM مورد بررسی واقع شد. کامپوزیت‌های مورد استفاده شامل الیاف شیشه تک جهته در راستای پروفیل، در زمینه پلی‌استر است. شکل 5 مربوط به تصاویر الکترون برگشتی از سطح مقطع کامپوزیت با زمینه پلی‌استر در راستای الیاف و عمود بر راستای الیاف می‌باشد. سطح مقطع نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه پلی‌استر است. همان‌گونه که در تصاویر مشخص است این کامپوزیت‌ها دارای الیاف هم‌راستا با قطر میانگین حدود 20 میکرومتر هستند که به صورت همگن از سطح تا مرکز کامپوزیت پخش شده است. ماهیت فصل مشترک تقویت‌کننده و زمینه در کامپوزیت‌ها تأثیر زیادی روی خواص آن‌ها دارد. در کامپوزیت‌های مورد استفاده در این پژوهش، فصل مشترک از طریق پیوندهای فیزیکی (چسبندگی) ایجاد می‌شود و فاقد منطقه نفوذی است.

3-1- نتایج آزمون جذب آب

پس از 73 ساعت قرارگیری در آون به منظور صفر شدن تقریبی میزان رطوبت اولیه، نمونه‌های m_1 تا m_3 از آون خارج و برای انجام آزمون ولتاژ شکست و جریان نشتی آماده شدند و سایر نمونه‌ها برای محاسبه میزان جذب رطوبت، در آب مقطر قرار داده شدند.

2-2- آزمون‌های بررسی خواص الکتریکی

اندازه‌گیری میزان ولتاژ شکست نمونه‌ها در این پژوهش مطابق استاندارد IEC 61109 انجام شد. نمونه‌های کامپوزیتی پلی‌استر به ابعاد $80 \times 40 \times 3$ mm به گونه‌ای که هر دو سطح بالایی و پایینی نمونه‌ها کاملاً موازی هم بوده و هیچ‌گونه ناهمواری در دو سطح آن وجود نداشته باشد، تهیه شد. در این آزمایش، بعد از ماشین‌کاری، نمونه‌ها به کمک متانول در حمام آلتراسونیک تمیز می‌شوند [17]. سپس نمونه‌ها در آون با دمای 50°C قرار داده می‌شود تا خشک شوند. وجود آلودگی سطحی باعث کاهش ولتاژ شکست نمونه‌ها می‌گردد و منجر به ایجاد خطا در نتایج می‌شود.

نمونه‌های آماده شده بین دو الکترود دستگاه تقویت‌کننده ولتاژ، مطابق شکل 3، قرار گرفته و با استفاده از اهرم افزایش ولتاژ، ولتاژ به آرامی افزایش می‌یابد تا زمانی که اتصال کوتاه برقرار شود. در این لحظه ولتاژ کاهش می‌یابد و ولتاژ اتصال کوتاه به عنوان ولتاژ شکست یا ولتاژی که در بیشتر از آن نمونه خاصیت عایق بودن خود را از دست می‌دهد، گزارش می‌گردد.

اندازه‌گیری میزان جریان نشتی نمونه‌ها در این پژوهش مطابق استاندارد ANSI C29.11-1989 انجام شد. سطح نمونه‌ها باید کاملاً تمیز باشد. بلافاصله قبل از آزمون باید نمونه‌ها از آب خارج شده و با پارچه تمیز، خشک شوند و بین دو الکترود قرار گیرند. ولتاژ با نرخ $1.5 \frac{\text{KV}}{\text{s}}$ زیاد شده تا به 12KV برسد؛ سپس در این ولتاژ به مدت یک دقیقه نگاه داشته شده و بعد از این مدت، با نرخ $1.2 \frac{\text{KV}}{\text{s}}$ کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. به منظور ثبت جریان نشتی ac، از یک آمپر متر با دقت $0.1 \mu\text{A}$ استفاده شد. در نهایت، ماکزیمم مقداری که آمپر متر نشان می‌دهد را به عنوان جریان نشتی، ثبت می‌کنیم [18].

3-3- آزمون بررسی خواص مکانیکی

هدف از انجام این آزمون به دست آوردن خواص کششی نمونه‌های کامپوزیتی و تأثیر جذب آب در زمان‌های متفاوت، بر خواص کششی این نمونه‌ها است. این آزمایش با دستگاه Hounsfield-H100ks (10 تن) انجام شد. در این آزمون برای قرارگیری نمونه‌ها در فک دستگاه کشش از صفحات¹ کامپوزیتی هم‌جنس با نمونه در دو انتهای آن مطابق شکل 4 استفاده شد. سرعت انجام آزمون بر طبق استاندارد ASTM D3039، 2 mm/min می‌باشد [19]. آزمایش در دمای 24°C و رطوبت نسبی 45% انجام گرفت.



Fig. 3 High voltage test setup for measuring breakdown voltage and leakage currents.

شکل 3 دستگاه آزمون ولتاژ بالا برای اندازه‌گیری ولتاژ شکست و جریان نشتی.

² Extensometer

¹ Tab

در کامپوزیت‌های پلیمری، نفوذ رطوبت از طریق سه مکانیزم می‌تواند اتفاق بیفتد. نفوذ مولکول‌های آب به درون فواصل مابین زنجیره‌های پلیمری؛ انتقال مویبستگی مولکول‌های آب از طریق فواصل موجود در فصل مشترک رزین/الیاف به واسطه‌ی ترشوندگی ضعیف و انتقال از طریق میکرو ترک‌های موجود در رزین مکانیزم‌های مذکور می‌باشند [20, 21]

جدول 2 تغییرات وزن هر نمونه در اثر غوطه‌وری در آب مقطر را در بازه‌های زمانی متفاوت، بر طبق استاندارد ASTM D5229 نشان می‌دهد. همچنین با توجه به رابطه (2) می‌توان درصد جذب رطوبت را برای نمونه‌ها در هر مرحله محاسبه کرد. جدول 3 تغییرات درصد جذب آب هر نمونه را نشان می‌دهد.

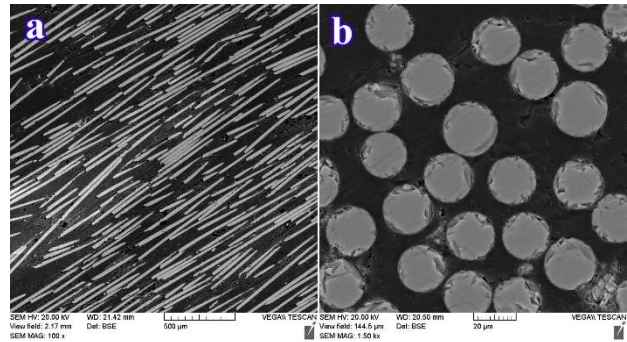


Fig. 5 SEM images of E-glass/polyester composite along with (a) and perpendicular to (b) fiber direction.

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از سطح در راستا (a) و عمود بر راستای

الیاف (b) در کامپوزیت با زمینه پلی‌استر و الیاف شیشه از نوع E

جدول 2 میزان تغییرات وزن نمونه‌ها در اثر غوطه‌وری در آب مقطر

Table 2 The variation in sample weight due to immersion in distilled water

M_{10} (gr)	M_9 (gr)	M_8 (gr)	M_7 (gr)	M_6 (gr)	M_5 (gr)	M_4 (gr)	زمان غوطه‌وری در آب مقطر (روز)
21.933	20.986	21.303	21.442	21.608	21.638	21.320	0
22.063	21.105	21.439	21.572	21.750	21.784	21.480	1
22.127	21.144	21.491	21.622	21.806	21.820	21.527	2
22.188	21.217	21.562	21.694	21.852	21.886	21.570	4
22.179	21.212	21.556	21.693	21.861	21.879	21.571	6
22.188	21.219	21.560	21.697	21.859	21.881	21.574	10
22.217	21.232	21.576	21.714	21.886	21.896	21.591	18
22.218	21.240	21.571	21.713	21.885	21.901	21.594	24
22.220	21.243	21.573	21.716	21.887	21.903	21.597	29

جدول 3 درصد جذب رطوبت نمونه‌های کامپوزیتی در بازه‌های زمانی متفاوت.

Table 3 The percentage of moisture absorption of composite specimens in different time periods.

میانگین	M_{10}	M_9	M_8	M_7	M_6	M_5	M_4	زمان غوطه‌وری (روز)
0.627	0.593	0.567	0.638	0.606	0.657	0.582	0.75	1
0.869	0.855	0.753	0.883	0.839	0.916	0.841	0.971	2
1.154	1.163	1.1	1.216	1.175	1.129	1.123	1.173	4
1.145	1.121	1.077	1.188	1.17	1.17	1.114	1.177	6
1.153	1.071	1.11	1.206	1.189	1.161	1.146	1.19	10
1.245	1.295	1.172	1.281	1.289	1.286	1.192	1.226	18
1.259	1.299	1.21	1.258	1.264	1.282	1.215	1.285	24
1.273	1.308	1.225	1.278	1.292	1.291	1.225	1.29	29

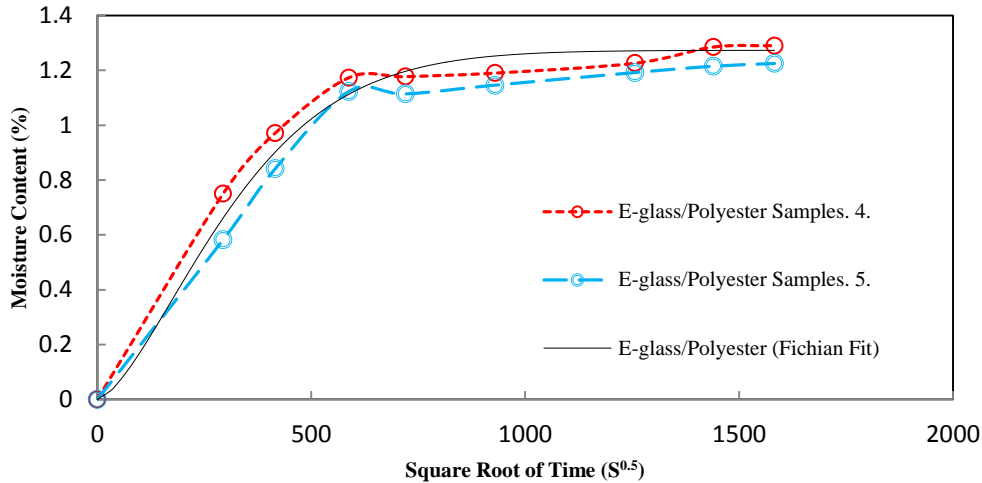


Fig. 6 Comparison of water absorption behavior of composite with Fick penetration model

شکل 6 مقایسه رفتار جذب آب کامپوزیت با مدل نفوذ فیک

به طور کلی ضریب نفوذ کامپوزیت‌های زمینه پلیمری در بازه 5-10 تا 10-6 می‌باشد. در مطالعه‌ای ضریب نفوذ پلی‌استر تقویت‌شده با الیاف شیشه $4.84 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ به دست آورده شده است [23]. همچنین جیانگ و همکاران [24] پی برد که ضریب نفوذ کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه وابسته به دما بوده و در بازه $4.727-29.380 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$ تغییر می‌کند. در تحقیق دیگری [25] مقدار $1.12 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ برای ضریب نفوذ رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب نفوذ به دست آمده در این تحقیق، نزدیک به ضرایب نفوذ حاصل از مقاله‌های دیگر است.

در ادامه با جایگذاری مقادیر h و Dz به دست آمده در رابطه (5) تابع $G(T,t)$ در دمای اتاق به دست می‌آید؛ و همچنین با جایگذاری رابطه (10) در رابطه (4) می‌توان میزان رطوبت کامپوزیت را به صورت تابعی از زمان طبق رابطه (11) محاسبه کرد (M_b را صفر در نظر می‌گیریم و مقدار میانگین را برای M_m قرار می‌دهیم):

به کمک رابطه (11) می‌توان در دمای اتاق، میزان رطوبت نمونه‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری با زمینه پلی‌استر و الیاف شیشه را در هر زمان دلخواهی به دست آورد. با توجه به جدول 5، میانگین درصد حجمی الیاف 47.45% می‌باشد؛ که با جایگذاری آن در رابطه‌های (6)، (7)، (8) و (9) و با فرض برابر بودن ضریب جذب در راستای ضخامت با ضریب جذب ظاهری، می‌توان جدول 5 را تکمیل کرد:

جدول 5 ضریب جذب رزین و کامپوزیت در جهت‌های مختلف

Table 5 Resin and composite absorption coefficient in different directions

$\frac{D^{\parallel}}{D^{\perp}}$	عمودبر	موازی	رزین	ظاهری	ضخامت
	الیاف	الیاف	(D_R)	(D_A)	(D_z)
	(D^{\perp})	(D^{\parallel})			
2.36	1.78E-06	4.19E-06	7.97E-06	4.86E-06	4.86E-06

$$G(T, t) = 1 - \exp[-1.454 \times 10^{-4} t^{0.75}] \quad (10)$$

در شکل 6 مشاهده می‌شود که با افزایش زمان غوطه‌وری، جذب رطوبت افزایش پیدا می‌کند اما نرخ افزایش جذب رطوبت با گذشت زمان کاهش می‌یابد؛ که دلیل آن پر شدن فضای خالی، ترک‌ها و حفره‌های موجود در کامپوزیت می‌باشد. با مقایسه‌ی منحنی‌های جذب آب نمونه‌های 4 و 5 با مدل نفوذ فیک می‌توان پی برد که رفتار کامپوزیت پلی‌استر تقویت‌شده با الیاف شیشه، علیرغم شباهت زیادی که با مدل نفوذ فیک دارد نمی‌توان به طور قطع اذعان داشت که از قانون فیک پیروی می‌کند. از طریق قسمت خطی نمودار جذب برحسب مجذور زمان و به کمک رابطه (6)

می‌توان ضریب نفوذ کامپوزیت را به دست آورد. ضریب نفوذ نمونه‌های کامپوزیتی در جدول 4 درج شده است. نفوذ به دست می‌آید. افزایش سریع وزن در مرحله‌ی ابتدایی، به سبب نفوذ مولکول‌های آب به داخل نواحی آمورف پلیمر می‌باشد. در این تحقیق میانگین ضریب نفوذ نمونه‌های کامپوزیتی $4.86 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ به دست آمد.

جدول 4 مقدار ضریب جذب نمونه‌های کامپوزیتی.

Table 4 absorption coefficient of composite sample

نمونه	M_m	$(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}})^2$	$\pi(\frac{h}{4M_m})^2$	$D_z (\frac{\text{mm}^2}{\text{s}})$
4	1.29	6.51E-06	1.062	6.91E-06
5	1.225	3.92E-06	1.178	4.62E-06
6	1.291	4.10E-06	1.060	4.35E-06
7	1.292	4.25E-06	1.059	4.50E-06
8	1.281	4.71E-06	1.077	5.07E-06
9	1.225	3.72E-06	1.178	4.38E-06
10	1.308	4.07E-06	1.033	4.20E-06
میانگین	1.273	---	---	4.86E-06

جدول 6 نتایج آزمون ولتاژ شکست و جریان نشتی برای نمونه‌های کامپوزیت پلی‌استر.

Table 6 Breakdown voltage and leakage test results of polyester composite specimens.

نمونه	ولتاژ شکست قبل از جذب آب (V/Cm)	ولتاژ شکست بعد از جذب آب (V/Cm)	جریان نشتی قبل از جذب آب (μA)	جریان نشتی بعد از جذب آب (μA)
1	36.7	24.3	0.1	2.1
2	37.1	23	0.2	2.1
3	37	23.5	0.2	2
4	36.9	23.7	0.2	2.2
5	37	24	0.2	2.1
میانگین	36.94	23.7	0.16	2.1

می‌شود ناکافی باشد و یا در فرسایش¹ آسیب ببیند؛ آب نفوذ کرده می‌تواند با ازن و دی‌اکسید نیتروژن که محصولات پدیده کرونا² در اطراف خطوط فشارقوی هستند ترکیب شده و دی‌اکسید نیتروژن در نتیجه واکنش با آب روی سطح مفره، تشکیل اسید نیتریک داده که این اسید با حل کردن مواد سطحی چترک‌ها می‌تواند منجر به شکست گردد [30].

یکی از واکنش‌هایی منجر به تولید نیتریک اسید در مفره‌ها می‌شود به صورت واکنش (1): $2NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HNO_2$ می‌باشد که نشان می‌دهد علاوه بر نیترات، نیتريد نیز جزء محصولات این واکنش است. [31]

طبق مطالعات مکالیستر و کریستون³ [32] وقتی موادی با دو دی‌الکتریک متفاوت در یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرند، بار حاصل شده بر روی حفرات موجود بر روی محیطی (ماده‌ای) با ثابت دی‌الکتریک کمتر، افزایش می‌یابد. این اثر و این افزایش بار، با افزایش مقدار ماده دارای ضریب دی‌الکتریک بیشتر، شدت می‌یابد. اثر احتمالی دیگر که منجر به کاهش ولتاژ شکست و افزایش جریان نشتی کامپوزیت می‌شود این است که آب و یا نیتریک اسید، مسیرهای رسانای میکرونی را روی سطح و یا نزدیک سطح کامپوزیت ایجاد می‌کند. این مسیرهای رسانا باعث متمرکز شدن میدان الکتریکی می‌شود و اگر حفره‌ای نزدیک آن باشد تخلیه الکتریکی⁴ رخ خواهد داد. اگر نمونه خشک شود، این مسیرهای رسانا از بین می‌روند و جریان نشتی به مقدار اولیه‌اش بازمی‌گردد مگر اینکه رزین پلیمری هیدرولیز شود و حفرات و ترک‌های جدید در داخل کامپوزیت ایجاد شود [33].

با توجه به شکل 7، تغییرات جذب رطوبت با جریان نشتی روندی تقریباً خطی را دنبال می‌کند؛ بنابراین می‌توانیم ماکزیمم میزان جذب رطوبت را با توجه به ماکزیمم جریان نشتی و با داشتن رابطه $y = 1.3939x + 0.1427$ تخمین زد. همچنین با داشتن زمان بیشترین میزان جذب رطوبت، می‌توانیم مدت‌زمانی را که در آن بیشترین جریان نشتی اتفاق می‌افتد به دست آوریم.

3-3- نتایج آزمون کشش

آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی خواص کششی آن‌ها، مطابق استاندارد ارائه شده در بخش 2-2 انجام شد. اندازه همه نمونه‌های کششی مساوی بوده و برابر با $250 \times 25 \times 3$ mm می‌باشد. برای هر یک از شرایط قرارگیری در آب،

$$M(T, t) = 1.273 - 1.273 \exp[-1.454 \times 10^{-4} t^{0.75}] \quad (11)$$

جدول 5 نشان می‌دهد که جذب آب در راستای الیاف 2.36 برابر جذب در راستای عمود بر الیاف است. همان‌طور که گفته شد، آب در راستای الیاف با سهولت بیشتری به درون کامپوزیت نفوذ می‌کند و منجر به تخریب اتصال فصل مشترک می‌شود. سه مکانیزم برای نفوذ آب به درون کامپوزیت وجود دارد که عبارت‌اند از: نفوذ مولکول‌های آب به درون فاصله‌های میکرونی مابین زنجیرهای پلیمری؛ نفوذ آب از طریق میکروتکرک‌های موجود در رزین و الیاف و انتقال موبینگی مولکول‌های آب از طریق فصل مشترک الیاف/رزین. نفوذ آب در راستای موازی الیاف از هر سه مکانیزم مذکور انجام می‌پذیرد اما در راستای عمود بر الیاف فقط مکانیزم اول و دوم صادق است. بنابراین جذب و نفوذ آب در راستای موازی الیاف بیشتر بوده و ضریب نفوذ در راستای الیاف بزرگتر از ضریب نفوذ در راستای عمود بر الیاف می‌باشد. وقتی کامپوزیت‌ها در آب غوطه‌ور می‌شوند، مولکول‌های آب توسط گروه‌های آب‌دوست الیاف شیشه و رزین پلی‌استر غیراشباع جذب می‌شوند. از طرف دیگر خاصیت موبینگی، مولکول‌های آب را به سمت حفره‌ها و ترک‌های موجود در کامپوزیت که مکان‌های ایده‌آلی برای جذب و پذیرفتن آن‌ها هستند هدایت می‌کند. این امر سبب افزایش وزن یا افزایش درصد جذب آب می‌شود [26-29].

3-2- نتایج آزمون ولتاژ شکست و جریان نشتی

بازوهای متقاطع پایه‌های توزیع برق که در محوطه باز استفاده می‌شوند و در معرض باران و برف هستند؛ جذب آب بالا می‌تواند برای آن‌ها مشکل‌ساز باشد. پروفیل‌های کامپوزیتی مورد آزمایش جذب آب کمی داشته و برای کاربرد به‌عنوان بازوهای متقاطع و مفره مناسب است اما در صورتی که مدت‌زمان طولانی در معرض رطوبت بالا قرار بگیرد، جذب آب منجر به کاهش خواص مکانیکی و عایقی کامپوزیت می‌شود.

ولتاژ شکست، حداکثر ولتاژی است که نمونه خاصیت عایق بودن خود را حفظ می‌کند و از آن ولتاژ به بالا با ایجاد اتصال کوتاه جریان را از خود عبور می‌دهد. نمونه‌های کامپوزیت پلی‌استر مطابق استاندارد مذکور آماده‌سازی شد. نتایج آزمون ولتاژ شکست و جریان نشتی مطابق جدول 6 می‌باشد. پراکندگی اندکی در نتایج مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل غیر همگن بودن نمونه‌ها باشد.

ولتاژ شکست اولیه نمونه‌ها بین 36 الی 37 ولت بر سانتی‌متر تغییر می‌کند درحالی‌که این بازه بعد از جذب آب به 23 الی 24 ولت بر سانتی‌متر تغییر می‌کند. به همین ترتیب نتایج مشابهی برای جریان نشتی حاصل شد بدین‌صورت که این جریان از 0.1 الی 0.2 میکرو آمپر قبل از جذب آب به 2 الی 2.2 میکرو آمپر بعد از جذب آب افزایش می‌یابد که به‌وضوح نشان‌دهنده افت خواص عایقی نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد.

جذب آب اثرات نامطلوبی بر روی خواص الکتریکی کامپوزیت می‌گذارد. عایق‌های کامپوزیتی ممکن است هنگام به‌کارگیری در شرایط محیطی مختلف در معرض رطوبت قرار گیرند که اگر اتصالات انتهایی آن‌ها به‌خوبی از نفوذ رطوبت جلوگیری نکنند، پدیده‌های مذکور رخ می‌دهد. همچنین اگر ضخامت روکش مفره که از الاستومرهای هیدروکربنی و سیلیکونی ساخته

¹ Erosion

² Corona

³ McAllister and Crichton

⁴ discharge

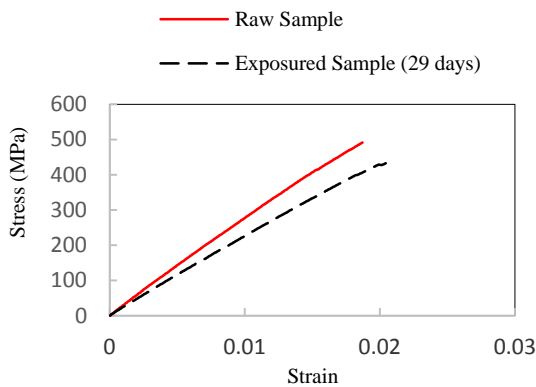


Fig. 8 Tensile stress-strain curves of pultruded E-glass fibre reinforced unsaturated polyester composite before and after exposure to distilled water

شکل 8 نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمون کشش نمونه کامپوزیت پلی استر غیراشباع تقویت شده با الیاف شیشه قبل و بعد از غوطه‌وری در آب مقطر

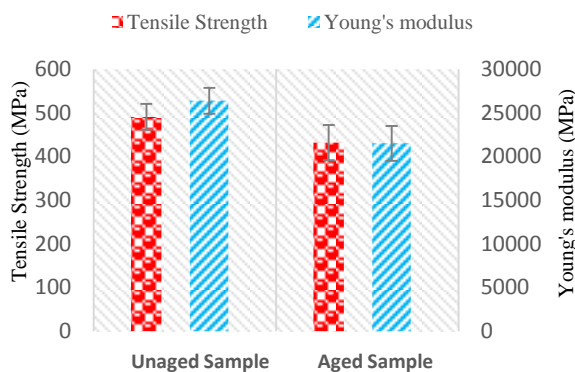


Fig. 9 Change in tensile strength and Young's modulus due to exposing

شکل 9 روند تغییرات استحکام کششی و مدول یانگ در اثر غوطه‌وری در سطح الیاف شده و اتصال الیاف و زمینه را ضعیف نماید که این باعث کاهش استحکام فصل مشترک بین زمینه و الیاف شیشه می‌شود و هنگام اعمال بار به قطعه، بار وارده به‌خوبی از زمینه به الیاف منتقل نمی‌شود و استحکام افت پیدا می‌کند [35]. بعلاوه، در صورت حضور دی‌اکسید نیتروژن و تشکیل نیتریک اسید از طریق واکنش (1)، به‌واسطه خاصیت موبینگی، محلول به درون کامپوزیت نفوذ کرده و یون هیدروژن موجود در اسید به سمت حفره‌ها، ترک‌ها و الیاف هدایت می‌شود. بین کاتیون‌های فلزی مانند Na^+ در سطح الیاف و یون H^+ در محلول اسیدی تبادل یونی رخ می‌دهد که منجر به انحلال کاتیون‌های فلزی از سطح خارجی الیاف می‌شود. تفاوت در اندازه یون H^+ و کاتیون‌های جابه‌جا شده باعث ایجاد تنش کششی در الیاف و در پی آن رشد ترک در فاز میانی یا فصل مشترک می‌شود که شکست در نمونه را در پی خواهد داشت.

4- نتیجه‌گیری

1- علیرغم ساده بودن آزمون جذب رطوبت کامپوزیت پلیمر/ شیشه، تحلیل نتایج آن بسیار پیچیده‌تر می‌باشد. عوامل زیادی می‌تواند بر روی تفسیر نتایج جذب رطوبت تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال اگر اثر لبه حذف

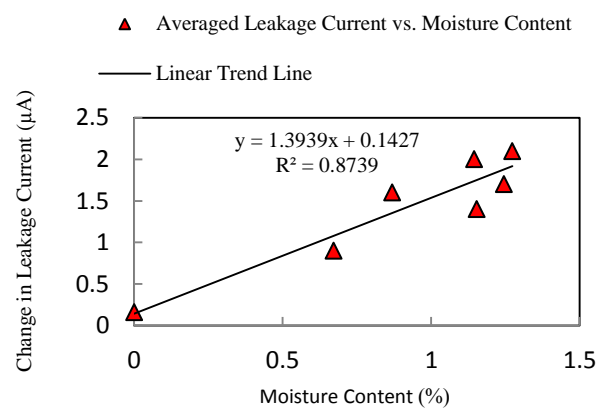


Fig. 7 Change in leakage current according to amount of moisture content

شکل 7 تغییرات جریان نشتی برحسب میزان رطوبت جذب شده توسط نمونه. 3 نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج میانگین گزارش شد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از برخی نمونه‌ها، به علت سرخوردگی در داخل فک و جدا شدن تب‌ها در حین آزمون کشش، حذف شده است.

شکل 8، نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش کامپوزیت‌های زمینه پلی‌استر را نشان می‌دهد. روند کلی رفتار کششی نمونه‌ها پس از قرارگیری در آب مشابه نمونه شاهد است. از این منحنی‌ها دانسته می‌شود که همه‌ی نمونه‌های کامپوزیتی، صرف‌نظر از میزان غوطه‌وری در آب مقطر، در تنش بیشینه می‌شکنند. کامپوزیت‌های غوطه‌ور شده هم‌چنین میزان کرنش بیشتری از خود نشان می‌دهند. با توجه به این نتیجه می‌توان استنباط کرد که جذب آب منجر به نرم شدگی کامپوزیت شده است و داکتیلیته آن را اندکی افزایش داده است به‌طوری‌که مقدار کرنش از 0.018 به 0.02 افزایش پیدا کرده است.

مقادیر استحکام کششی و مدول یانگ که از نمودار تنش-کرنش به‌دست آمده است در شکل 9 قابل مشاهده می‌باشد. وقتی نمونه کامپوزیتی در معرض محیط آبی قرار می‌گیرد، استحکام کششی آن بعد از 29 روز غوطه‌وری از 491 به 432 MPa کاهش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به نتایج، مقدار مدول کششی اولیه کامپوزیت برابر با 26.386 GPa می‌باشد. طبق آزمایش‌های آقای استامونویچ¹ بر روی عملکرد کامپوزیت‌های پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه، مقدار مدول کامپوزیت 20.73 GPa محاسبه شده است [34]. بعد از پایان غوطه‌وری کاهش 18.4 درصدی را در مدول یانگ نمونه‌ها خواهیم داشت.

نیروی کششی عمدتاً در اثر وزن کابل‌های طویل بین دو دکل و همچنین نیروی باد که به کابل‌های خطوط انتقال نیرو وارد می‌گردد، ایجاد شده و تحمل این نیروهای مکانیکی بر عهده میله عایق به‌عنوان هسته مرکزی مقرر هاست.

با توجه به نتایج مشخص است که در اثر قرار دادن نمونه‌ها در معرض آب، استحکام کششی آن‌ها افت می‌کند و با افزایش زمان غوطه‌وری، میزان این کاهش بیشتر می‌شود. نفوذ آب در پلیمرها باعث هیدرولیز شدن و قیچی شدن زنجیره‌های پلیمری می‌شود. در نتیجه کاهش وزن مولکولی ناشی از قیچی شدن زنجیره‌ها منجر به کاهش استحکام خواهد شد. همچنین نفوذ آب به درون نمونه‌های کامپوزیتی ممکن است باعث حل شدن مواد اتصال‌دهنده

¹ Stamenovic

fatigue loading using biaxially embedded FBG sensors," *Materials*, Vol. 9, No. 9, pp. 781. 2016.

[3] Ahmadi-Joneidi, I. Shayegani-Akmal, A. A. and Mohseni, H., "Leakage current analysis of polymeric insulators under uniform and non-uniform pollution conditions," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 11, pp. 2947-2957, 2017.

[4] Nekahi, A. McMeekin, S. G. and Farzaneh, M., "Effect of pollution severity on electric field distribution along a polymeric insulator," *IEEE 11th International Conference*, pp. 612-615, 2015.

[5] Armentrout, D. Kumosa, M. and Kumosa, L., "Water diffusion into and electrical testing of composite insulator GRP rods," *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, Vol. 11, No. 3, pp. 506-522, 2004.

[6] Ellyin, F. and Maser, R., "Environmental effects on the mechanical properties of glass-fiber epoxy composite tubular specimens," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 12, pp. 1863-1874, 2004.

[7] Jiang, X. Kolstein, H. Bijlaard, F. and Qiang, X., "Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: moisture diffusion characteristics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 57, pp. 49-58, 2014.

[8] Eslami, S. Honarbakhsh-Raouf, A. and Eslami, S., "Effects of moisture absorption on degradation of E-glass fiber reinforced Vinyl Ester composite pipes and modelling of transient moisture diffusion using finite element analysis," *Corrosion Science*, Vol. 90, pp. 168-175, 2015.

[9] Solis-Ramos, E. and Kumosa, M., "Synergistic effects in stress corrosion cracking of glass reinforced polymer composites". *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 136, pp. 146-157, 2017.

[10] Świt, G. and Adamczak, A., "Stress corrosion of epoxy-glass composites monitored using acoustic emission," *Technical Transactions*, Vol. 3, 2017.

[11] Tanks, J. D. Arao, Y. and Kubouchi, M., "Diffusion kinetics, swelling, and degradation of corrosion-resistant C-glass/epoxy woven composites in harsh environments," *Composite Structures*, 2018.

[12] Jones, F. R., "Durability of reinforced plastics in liquid environments," *Reinforced plastics durability*, pp. 70-110, 1999.

[13] Armentrout, D. Kumosa, M. & Kumosa, L., "The behavior of composite insulator rods subjected to the water diffusion electrical test," *IEEE Trans Dielectr Electr Insulat.*, 2004.

[14] Kumosa, L. Armentrout, D. Benedikt, B. & Kumosa, M., "An investigation of moisture and leakage currents in GRP composite hollow cylinders," *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, Vol. 12, No. 5, pp. 1043-1059, 2005.

[15] Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials, *ASTM International*, West Conshohocken, PA., D. 5229/D 5229M-92. 1998.

[16] Shen, C. H. and Springer, G. S., "Moisture absorption and desorption of composite materials," *Journal of composite materials*, Vol. 10, No. 1, pp. 2-20, 1976.

[17] Standard test method for Composite Insulators for AC overhead lines with a nominal voltage greater than, 1000, *Standard, I. E. C.* 61109, 1992.

[18] Standard test method for Composite Suspension Insulators for Overhead Transmission Lines-Tests. *Lines, Standard, A. N. S. I.* C29. 11, 1989.

[19] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, ASTM Standard, D3039/D 3039M-08, 2008.

[20] Espert, A. Vilaplana, F. and Karlsson, S., "Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties," *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, Vol. 35, No. 11, pp. 1267-1276, 2004.

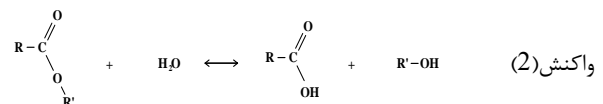
[21] Dhakal, H. N. Zhang, Z. Y. and Richardson, M. O. W., "Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites," *Composites science and technology*, Vol. 67, No. 7-8, pp. 1674-1683, 2007.

نشود نتایج جذب رطوبت به میزان زیادی به هندسه نمونه وابسته خواهد شد. حتی اگر اثر لبه با استفاده از نمونه‌های کامپوزیتی بسیار نازک با نسبت l/h بزرگ، حذف شود؛ خطای عددی مربوط به تعیین نرخ جذب رطوبت می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به انحراف از نتایج واقعی جذب رطوبت شود.

2- به‌منظور بررسی مقاومت کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه به جذب آب که در عایق‌های کامپوزیتی ولتاژ بالا استفاده می‌شود، در آب مقطر در دمای اتاق به‌صورت غوطه‌وری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه از نوع E دارای جذب آب 1.273 درصدی بوده است و این جذب رطوبت تدریجی، به‌صورت کامل به تعادل نمی‌رسد. لذا می‌توان رفتار آن را غیرفیکین در نظر گرفت.

3- در این تحقیق اثر رطوبت بر روی میزان ولتاژ شکست و جریان ناشی موردبررسی قرار گرفت. علیرغم مشاهده تعدادی پراکندگی در نتایج، یک رابطه خطی مابین مقدار رطوبت و میزان جریان ناشی AC به دست آمد. درنهایت می‌توان از روی مقدار رطوبت بیشینه، ماکزیمم میزان جریان ناشی کامپوزیت و زمان اشباع آن را پیش‌بینی کرد. نتایج نشان داد که بعد از 29 روز غوطه‌وری، به میزان 13 V/Cm کاهش در ولتاژ شکست و $2 \mu A$ افزایش در جریان ناشی نمونه‌های کامپوزیتی مشاهده شد. علیرغم پیشرفت‌های حاصل‌شده‌ی اخیر در زمینه‌ی آنالیز شکست، نیاز به بررسی بیشتر و درک عمیق‌تری از آنالیز شکست مفره‌ها وجود دارد. تا حتی‌الامکان از خرابی‌های آن‌ها در حین سرویس‌دهی جلوگیری به عمل آید.

4- در اثر قرار دادن نمونه‌ها در معرض آب، استحکام کششی آن‌ها افت می‌کند و با افزایش زمان غوطه‌وری، میزان این کاهش فزونی می‌یابد به‌طوری‌که بعد از اتمام زمان غوطه‌وری مقادیر استحکام کششی و مدول یانگ نمونه‌ها به ترتیب از 491 به 432 MPa و از 26.3 به 21.5 GPa کاهش می‌یابد. مولکول‌های کوچک مایع از طریق حفره‌ها و ترک‌های میکرونی به داخل نمونه نفوذ کرده و مکان‌ها را در میان مولکول‌های پلیمر اشغال می‌کند. درنتیجه درشت مولکول‌ها را مجبور می‌کند که از هم جدا شوند که ادامه‌ی این روند به منبسط شدن و باد کردن نمونه منجر می‌شود. بعلاوه این افزایش در فاصله‌ی بین زنجیره‌ها، نیروهای پیوندی بین‌مولکولی ثانویه را کاهش می‌دهد. درنتیجه ماده نرم‌تر و شکل‌پذیرتر (داکتیل‌تر) می‌شود. علاوه بر این بانفوذ مولکول‌های آب، بین رزین پلی‌استر و آب واکنش هیدرولیز اتفاق می‌افتد و یون هیدروکسید آزاد می‌شود؛ که وجود این یون منجر به قلیایی شدن محیط می‌شود و هیدرولیز رزین پلی‌استر را تسریع می‌کند. واکنش (2) این روند نشان می‌دهد.



5- کاهش نیروهای پیوندی بین‌مولکولی ثانویه به همراه هیدرولیز رزین، دو عامل مؤثر در کاهش میزان استحکام و مدول یانگ نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد.

5- مراجع

[1] Ray, B. C. and Rathore, D., "Environmental damage and degradation of FRP composites: A review report," *Polymer Composites*, Vol. 36, No. 3, pp. 410-423, 2015.

[2] Akay, E. Yilmaz, C. Kocaman, E. S. Turkmen, H. S. and Yildiz, M., "Monitoring Poisson's ratio degradation of FRP composites under

- [22] Haddar, N. Ksouri, I. Kallel, T. and Mnif, N., "Effect of hydrothermal ageing on the monotonic and cyclic loading of glass fiber reinforced polyamide," *Polymer Composites*, Vol. 35, No. 3, pp. 501-508, 2014.
- [23] Jefferson, G. D. Farah, B. Hempowicz, M. L. and Hsiao, K. T., "Influence of hydrothermal aging on carbon nanofiber enhanced polyester material systems," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 78, pp. 319-323, 2015.
- [24] Jiang, X. Kolstein, H. and Bijlaard, F. S., "Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced polymer composite bridge under hot/wet environment," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 407-416, 2013.
- [25] Guermazi, N. Tarjem, A. B. Ksouri, I. and Ayedi, H. F., "On the durability of FRP composites for aircraft structures in hydrothermal conditioning," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 85, pp. 294-304, 2016.
- [26] Huang, G. and Sun, H., "Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites" *Materials & design*, Vol. 28, No. 5, pp. 1647-1650, 2007.
- [27] Visco, A. M. Campo, N. and Cianciafara, P., "Comparison of seawater absorption properties of thermoset resins based composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 2, pp. 123-130, 2011.
- [28] Kootsookos, A. and Mouritz, A. P., "Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 10-11, pp. 1503-1511, 2004.
- [29] Mahmoud, M. K. and Tantawi, S. H., "Effect of strong acids on mechanical properties of glass/polyester GRP pipe at normal and high temperatures," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 677-688, 2003.
- [30] Kumosa, L. Benedikt, B. Armentrout, D. and Kumosa, M. Moisture absorption properties of unidirectional glass/polymer composites used in composite (non-ceramic) insulators. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 9, pp.1049-1063, 2004.
- [31] Liang, X. and Dai, J. Analysis of the acid sources of a field brittle fractured composite insulator. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, Vol. 13, No. 4, pp. 870-876, 2006.
- [32] McAllister, I. W. and Crichton, G. C., "Influence of bulk dielectric polarization upon partial discharge transients effect of heterogeneous dielectric geometry," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, No. 1, pp. 124-132, 2000.
- [33] Armentrout, D. Kumosa, M. and Kumosa, L. Water diffusion into and electrical testing of composite insulator GRP rods. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, Vol. 11, No. 3, pp. 506-522, 2004.
- [34] Stamenović, M. Putić, S. Rakin, M. Medjo, B. and Čikara, D., "Effect of alkaline and acidic solutions on the tensile properties of glass-polyester pipes," *Materials & Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 2456-2461, 2011.
- [35] Kalligudd, S. K., "Characterization and durability evaluation of recycled FRP composites and sandwich specimens," West Virginia University, 2010.