



اثر مخرب آب دریا، آب اسیدی و آب بازی بر رفتار مکانیکی چسب‌های نانوکامپوزیتی

زهرة شمساى¹، هادى خرمشاد^{2*}

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، Khoramishad@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

هدف از این تحقیق مقایسه تخریب چسب‌های نانوکامپوزیتی تحت شرایط محیطی مختلف می‌باشد. برای این منظور نمونه‌های حجمی چسب نانوکامپوزیتی با افزودن درصدهای وزنی مختلف 0، 0.1، 0.3 و 0.5 از نانولوله‌های کربنی چند جداره به یک چسب از نوع اپوکسی ساخته شدند. سپس نمونه‌ها در سه نوع آب، شامل آب دریا (خلیج فارس)، آب دو بار یون زدایی شده و سپس اسیدی شده با اسید صنعتی هیدروکلریک (HCl) و آب دو بار یون زدایی شده و سپس بازی شده با باز صنعتی سدیم هیدروکسید (NaOH) به مدت 360 ساعت غوطه‌ور شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، افزودن نانولوله‌های کربنی باعث کاهش میزان جذب آب در چسب و به تبع آن بهبود خواص مکانیکی گردید اگرچه این اثر تقویت‌کنندگی وابسته به شرایط محیطی نیز بود. نانوکامپوزیت‌های حاوی 0.1 درصد نانولوله کربنی کمترین میزان جذب آب و بیشترین میزان خواص مکانیکی را در شرایط مخرب محیطی مختلف از خود نشان دادند. از میان انواع مختلف شرایط مخرب، آب اسیدی بیشترین میزان نفوذ و بیشترین اثر مخرب را بر روی خواص مکانیکی رزین داشت. در آب دریا به علت وجود اکسید فلزات قلیایی نفوذ رطوبت نسبت به حالت اسیدی کمتر گردید و در نهایت کمترین میزان مربوط به جذب آب و اثر مخرب آن بر روی رزین مربوط به آب بازی بود.

دریافت: 1401/05/30

پذیرش: 1401/07/30

کلیدواژگان

چسب نانوکامپوزیتی،

تخریب محیطی،

جذب آب،

استحکام باقیمانده

Deleterious Effects of Seawater, Acidic water and Alkali water on Mechanical Properties of Nanocomposite adhesives

Zohreh Shamsaei¹, Hadi Khoramishad^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, Khoramishad@iust.ac.ir

Keywords

Nanocomposite adhesive, Environmental degradation, Water uptake, Residual strength

Abstract

This paper aims to compare the detrimental effects of different environmental conditions including seawater, acidic water and alkali water on the mechanical properties of nanocomposites. Nanocomposite adhesive specimens were fabricated by the inclusion of different weight percentages (0, 0.1, 0.3 and 0.5) of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) into an epoxy adhesive. Then, the specimens were immersed in three types of water including seawater (from Persian Gulf), de-ionized water acidified with industrial hydrochloric acid (HCl) and de-ionized water alkalinized with industrial sodium hydroxide (NaOH) for 360 hours. The experimental results showed that adding MWCNTs reduced the water uptake and consequently improved the mechanical properties of the adhesive. However, this improving effect depended on the environmental conditions. The nanocomposite adhesive specimen containing 0.1 wt% MWCNTs presented the lowest water uptake and the highest mechanical properties for different environmental conditions. Amongst different environmental conditions, the acidic water imposed the most deleterious effect with the highest water uptake. In seawater, the water ingress was lower than acidic water due to the existence of alkali metal oxides. Finally, the lowest water ingress and destructive effect was found to be for alkali water.

1- مقدمه

خورنده منجر به محدودیت در گسترش بیش از پیش چسب در صنایع دریایی شده است. یکی از روش‌های مهم و پرکاربرد در بررسی ماندگاری و بقای اتصالات چسبی در محیط‌های مرطوب انجام آزمایش می‌باشد. در ساخت کامپوزیت‌های پلیمری، استفاده از رزین‌های بر پایه اپوکسی در صنایع مختلف به دلیل خواص مناسب مکانیکی و حرارتی و مقاومت

امروزه استفاده از چسب برای اتصال قطعات مختلف به دلیل مزایای آن نسبت به سایر روش‌های اتصال مانند اتصال جوش، پیچ و مهره و پرچ در صنایع مختلف گسترش خوبی پیدا کرده است. لیکن به دلیل برخی نقاط ضعف اتصالات چسبی مانند حساسیت چسب‌های پلیمری به محیط مرطوب یا

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Shamsaei, Z., Khoramishad, H., "Deleterious Effects of Seawater, Acidic water and Alkali water on Mechanical Properties of Nanocomposite adhesives," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 1, pp. 1927-1936, 2022.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.560628.1799

پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که افزودن نانولوله‌های کربنی تأثیر مثبتی بر خواص کششی و خمشی رزین اپوکسی دارد، به طوری که در اثر افزودن 0.3٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام خمشی آن‌ها 28.3٪ بهبود پیدا می‌کند. در یک مطالعه دیگر، کیم و همکاران⁵ [10] تأثیر دو نوع مختلف نانولوله کربنی اصلاح شده با اسید و اصلاح شده با عامل سیلانی⁶ بر خواص خمشی و سایشی کامپوزیت الیاف کربن/اپوکسی را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که خواص خمشی و سایشی کامپوزیت‌ها در اثر افزودن هر دو نوع نانولوله‌های کربنی بهبود جدی پیدا می‌کند.

برخلاف این تصور که افزودن نانولوله‌های کربنی همیشه موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها می‌شود، اما مطالعاتی مبنی بر تأثیر منفی این ماده بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها نیز وجود دارد. در یک مطالعه شکرپه و همکاران [11] به بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی یک کامپوزیت با زمینه پلی‌استر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، اما تغییری در خواص کششی نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود.

در یک تحقیق، فریدون و همکاران [12] تأثیر درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی چند جداره و نانولوله‌های کربنی عامل دار با عامل کربوکسیل⁷ را بر روی استحکام برشی اتصال بین چسبنده آلومینیومی و چسبنده کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که مؤثر بودن نانولوله کربنی بستگی به طول آن‌ها دارد. همچنین آن‌ها گزارش کردند، استحکام برشی اتصالات لبه‌ای با افزودن 1.5٪ وزنی نانولوله کربنی، حدود 40٪ افزایش می‌یابد. در حالی که وقتی 1.5٪ وزنی نانولوله کربنی چند جداره کربوکسیل‌دار استفاده شود، استحکام برشی نسبت به نمونه بدون نانولوله کربنی حدود 22٪ کاهش می‌یابد. آن‌ها نتیجه گرفتند که نانولوله‌های کربنی بدون عامل به دلیل روش تولید خود دارای طول بلندتری نسبت به نانولوله‌های عامل دار شده هستند و در نتیجه عملکرد بهتری در مکانیزم پل‌زنی از خود نشان می‌دهند.

در تحقیق حاضر با استفاده از روش آزمایشگاهی، میزان جذب رطوبت نمونه‌های حجمی نانو کامپوزیت که در سه نوع آب دریا (خلیج فارس)، آب دوبار یون زدایی شده ترکیب شده با اسید صنعتی پر مصرف به اسم هیدروکلریک اسید (HCL) و آب دوبار یون زدایی شده ترکیب شده با باز پرمصرف در صنعت به اسم سدیم هیدروکسید (NaOH) بررسی شده و آثار مخرب حاصل از حل شونده‌های موجود در آب بر رفتار مکانیکی رزین اپوکسی در حالتی که نمونه‌ها با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی تقویت شده‌اند، تحلیل می‌گردد.

2- مکانیزم نفوذ رطوبت

ماهیت ساختار پلیمرها به گونه‌ای است که تمایل به جذب آب دارند. آن‌ها به دلیل داشتن گروه‌های هیدروکسیل⁸ (OH) در ساختار مولکولی‌شان با جذب مولکول‌های آب، پیوندهای هیدروژنی⁹ برقرار می‌کنند [13, 14]. ورود رطوبت در پلیمر به وسیله فرایند نفوذ¹⁰ صورت می‌گیرد.

شیمیایی کاربرد فراوانی پیدا کرده است. رطوبت جذب شده اثر مخربی روی خواص فیزیکی و مکانیکی اپوکسی‌ها دارد و به شدت عملکرد آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این رطوبت جذب شده نقش مؤثری در نرم شدن ماده و افزایش حرکت زنجیره‌های مولکولی دارد [1]. بطور ویژه اگر محیط مخرب ماهیت اسیدی داشته باشد می‌تواند حساسیت موضوع را بیشتر کند. محققین مختلفی به بررسی اثر تخریبی محیط‌های مخرب بر قطعات پلیمری پرداخته‌اند. فرهی‌فر و همکاران [2] به بررسی تجربی رشد تورق در مود I کامپوزیت الیاف شیشه تک‌جهته/وینیل‌استر تحت پیرشدگی اسیدی پرداختند. آن‌ها نمونه‌های تیر یک‌سر گیردار دو لبه را پس از ساخت در بازه‌های زمانی 0، 1، 2، 5 و 10 هفته در محلول 20٪ وزنی تهیه شده از اسید سولفوریک 98٪ قرار دادند. آن‌ها کاهش چقرمگی شکست پایا در نمونه‌ها با اعمال شرایط محیطی را گزارش کردند. علاوه بر آن‌ها دریافتند، روند تغییر چقرمگی شکست شروع رشد ترک در 5 هفته اول به‌صورت افزایشی بوده و پس از آن در هفته دهم با کاهش قابل توجهی همراه بوده است. خرمی شاد و عباسی [3] به بررسی و مدل‌سازی اثر مخرب نفوذ آب بر رفتار آسیب در اتصالات چسبی ساخته شده از چسب پلیمری پرداختند. در این تحقیق، آن‌ها ابتدا توزیع رطوبت داخل لایه چسب را در زمان‌های در معرض گذاری مختلف 30، 60 و 90 روز در محیط با رطوبت نسبی 100٪ به دست آوردند. سپس با استفاده از مدل ناحیه چسبیده، آزمون کشش اتصال تک لبه‌ای در زمان‌های مختلف را شبیه‌سازی کردند و استحکام باقیمانده‌ی آن را تخمین زدند. امینی و خاوندی [4] تأثیر میزان جذب آب را بر خواص دی‌الکتریک و استحکام کششی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه تک‌جهته مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند تغییرات در میزان رطوبت اثر ویژه‌ای بر روی خواص مکانیکی و الکتریکی مواد کامپوزیتی دارد.

یکی از روش‌های بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بدون تغییر محسوس در وزن آن‌ها استفاده از ذرات نانو است. محققان انواع و اقسام ذرات نانو با جنس‌ها و هندسه‌های مختلفی را مورد استفاده و بررسی قرار دادند. از این میان نانولوله‌های کربنی با توجه به مشخصات مکانیکی، حرارتی و الکتریکی توجه ویژه‌ای را به خود جلب نموده است. یوانگینگ لی و همکارانش [5] از نانولوله‌های کربنی چندجداره برای بهبود رفتار مکانیکی رزین اپوکسی استفاده نمودند. آن‌ها توانستند با افزودن 0.04٪ وزنی نانولوله‌های کربنی، استحکام کششی رزین را تا 12٪ و با افزودن 0.06٪ وزنی نانولوله‌های کربنی، مدول یانگ را تا 11٪ افزایش دهند. پین نینگ و همکاران² [6] اثر نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت برای درصد‌های مختلف نانولوله کربنی بررسی نمودند و با افزودن 0.1٪ وزنی نانولوله کربنی، 26.4٪ افزایش استحکام خمشی، 22٪ افزایش استحکام کششی و 24.3٪ افزایش مدول خمشی را به دست آوردند. ویکانگ لی و همکاران⁷ [7]، اثر نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت بررسی نمودند و برای افزودن 0.24٪ وزنی نانولوله کربنی، 20٪ افزایش استحکام کششی و 14٪ افزایش مدول یانگ را به دست آوردند.

تأثیرگذاری نانولوله‌های کربنی به عوامل مختلفی مانند نوع نانولوله کربنی، میزان خلوص، میزان پخش آن‌ها درون زمینه پلیمری و همچنین ماهیت زمینه پلیمری بستگی دارد [8]. برای مثال، ژو و همکاران⁴ [9] به بررسی تأثیر نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی رزین اپوکسی 862

⁶ Silane

⁷ Carboxyl

⁸ Hydroxyl

⁹ Hydrogen bonds

¹⁰ Diffusion

¹ Y. Li, R et al

² P.-N. Wang et al

³ W. Li et al

⁴ Zhou et al

⁵ Kim et al

وابستگی ضریب نفوذ به دما، پیرو رابطه آرنیوز⁹ می‌باشد. رابطه (2) بیان‌گر این موضوع می‌باشد.

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

که در آن Q انرژی فعال‌سازی نفوذ، R ثابت گازها و T دما می‌باشد. مقدار رطوبت جذب شده با افزایش میزان دما، افزایش می‌یابد. حرکت زنجیره‌های مولکولی با افزایش دما زیاد می‌شود از این رو موجب کاهش چگالی به دلیل انبساط حرارتی می‌شود. این افزایش فضای آزاد پلیمر موجب افزایش مقدار رطوبت حالت اشباع می‌شود [22]. رطوبت نسبی محیط از دیگر عوامل مؤثر بر نفوذ رطوبت می‌باشد [23].

ماهیت و ذات پلیمر در جذب رطوبت بسیار مهم است. پلیمرهای آب‌گریز^۸ نسبتاً مقدار کمتری رطوبت جذب می‌کنند و این در مقدار ضریب نفوذ تأثیرگذار است. در مقابل، پلیمرهای آب‌دوست^۹ میزان جذب آب بیشتر و در نتیجه ضریب نفوذ بیشتری دارند.

بریس و همکاران^{۱۰} [24] بررسی کردند با قرار دادن فیلم نازک چسب در دمای 50°C با افزایش رطوبت نسبی، ضریب نفوذ از مقدار $7.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ در 23٪ رطوبت نسبی محیط به مقدار $14 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ در 100٪ رطوبت نسبی محیط افزایش می‌یابد. همچنین مقدار رطوبت حالت اشباع از مقدار 0.54٪ وزنی به مقدار 2.1٪ وزنی افزایش می‌یابد.

مقدار هاردنر^{۱۱} افزوده شده به رزین اپوکسی بر رطوبت جذبی اشباع اثرگذار است. بریس و همکاران [23] به بررسی تأثیر هاردنر ریچ و فیلم چسب DGEBA پرداختند و مشاهده کردند با افزایش میزان هاردنر، مقدار رطوبت اشباع در چسب‌ها افزایش می‌یابد.

آب سبب ایجاد تغییرات بسیاری در ساختار پلیمر می‌شود. این تغییرات شامل نرم شدن^{۱۲}، افزایش حجم آزاد، ایجاد تورم [25]، ریزترک‌ها^{۱۳} [26]، برش زنجیره‌های مولکولی [27] و عکس‌العمل‌های شیمیایی در پلیمر می‌باشد. این تغییرات می‌توانند برگشت‌پذیر یا برگشت‌ناپذیر باشند [28].

تأثیر نفوذ رطوبت به صورت تغییر در خواص مکانیکی پلیمر مشاهده می‌شود. هنگامی که مقدار رطوبت جذب شده افزایش یابد مدول الاستیک^{۱۴} و استحکام تسلیم^{۱۵} پلیمر کاهش می‌یابد [24, 29]. همچنین با افزایش مقدار نفوذ رطوبت تنش و اماندگی رو به کاهش می‌رود.

3- روش ساخت و آزمایش

ابتدا با استفاده از مدل IBA در استاندارد BS EN ISO 527-2 1996، قالب مورد نظر توسط دستگاه سی ان سی^{۱۶} ساخته می‌شود. شکل 1 نقشه نمونه حجمی مورد استفاده را نشان می‌دهد. قالب مورد استفاده از جنس تفلون پلی تترا فلئور اتیلن^{۱۷} (PTFE) می‌باشد که در شکل 2 نشان داده شده است.

پلیمر از دو بخش فضای اشغال شده توسط زنجیره‌های مولکولی و فضای آزاد تشکیل شده است [14]. وجود فضای آزاد به دلیل حفره‌های بین زنجیره‌های پلیمری می‌باشد. میزان نفوذ آب به داخل یک ماده پلیمری وابسته به داشتن میزان فضای آزاد در آن می‌باشد به طوری که هرچه میزان این فضا بیشتر باشد جذب رطوبت بیشتر است. پلیمرهایی که جذب رطوبتشان بالاست حجم آزاد برای عبور مولکول‌های آب بیشتری دارند [15, 16]. کارتر و کیبلر^۱ [17] بیان کردند که آب نفوذ کرده به داخل پلیمر می‌تواند به صورت آزاد یا متصل به مولکول‌های پلیمری باشند. اگر پیوندهای شیمیایی بین آب و پلیمر رخ دهد در این صورت مولکول‌های آب به پلیمر متصل می‌شوند و دیگر آزاد به حرکت نمی‌باشند این در حالی است که مولکول‌های آب موجود در فضای آزاد پیوسته قادر به جابجایی هستند.

کارتر و کیبلر به ارائه مدل لنگ مویر^۲ برای پیش‌بینی مکان‌هایی از مولکول‌های آب که احتمال جدا شدن از اتصال با پلیمر را دارند و مکان‌هایی که احتمال ایجاد پیوند شیمیایی با پلیمر را دارند، پرداختند. این مکانیزم نفوذ رطوبت توسط بسیاری از محققان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است [18, 19]. نفوذ رطوبت در پلیمرها بر اساس قانون فیک^۳ بیان می‌شود که در رابطه (1) بیان شده است.

$$F = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

که در این رابطه F شار رطوبتی، D ضریب نفوذ رطوبت، C غلظت رطوبت و x راستای حرکت رطوبت می‌باشد. مقادیر ضریب نفوذ^۴ پلیمرها از مرتبه حدود $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ می‌باشد [20]. بیشینه مقدار رطوبتی که می‌تواند جذب یک ماده پلیمری شود با عنوان رطوبت اشباع شده بیان شده و با نماد M_∞ شناخته می‌شود. ضریب نفوذ و مقدار رطوبت جذب شده معمولاً به عنوان مشخصه‌های اصلی نفوذ رطوبت در پلیمرها در نظر گرفته می‌شوند.

1-2- عوامل مؤثر بر نفوذ رطوبت

نفوذ رطوبت در پلیمرها متأثر از عوامل متعددی همچون دما و میزان رطوبت محیط می‌باشد. تأثیر این عوامل بر جرم رطوبت جذب شده در شرایط اشباع و ضریب نفوذ توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته شده است. وابستگی دمایی جذب آب پلیمر در دماهای مختلف توسط گلدیل و همکاران^۵ [21] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با بررسی ضخامت لایه‌های چسب بین 0.7 تا 1.3 میلی‌متر در دماهای 20°C، 40°C، 60°C و 90°C و اندازه‌گیری رطوبت جذب شده، مشاهده کردند ضریب نفوذ از مقدار $2.43 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ به مقدار $60.7 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ با افزایش دما از 20°C تا 90°C افزایش می‌یابد. دانکن و همکاران^۶ مشاهده کردند هنگامی که نمونه‌های حجمی با ضخامت 1 میلی‌متر در آب دوبار یون زدایی شده با دماهای 4°C، 23°C، 44°C و 64°C قرار بگیرند، ضریب نفوذ از مقدار $1.26 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای 4°C به مقدار $3.23 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای 64°C می‌رسد. بیان شده است که

¹ Carter and Kibler

² Langmuir

³ Fick's law

⁴ Diffusion Coefficient

⁵ Gledhill et al

⁶ Duncan et al

⁷ Arrhenius relationship

⁸ Hydrophobic

⁹ Hydrophilic

¹⁰ Brewis et al

¹¹ Hardner

¹² Plasticization

¹³ Micro Cracks

¹⁴ Elastic Modulus

¹⁵ Yield Stress

¹⁶ CNC

¹⁷ Poly Tetra Fluoro Ethylene

مربوط به پراب^۵ به همراه دماسنج و یک صفحه اسکن می‌باشد. پراب با انتشار امواج مافوق صوت و انرژی صوتی به داخل ظرف، موجب جدا شدن نانولوله‌های کربنی و اختلاط مناسب با پلیمر و عدم کلوخه شدن آن‌ها می‌شود.



Fig. 3 Mixing of epoxy resin and MWCNTs using a sonication process
شکل 3 اختلاط رزین اپوکسی و نانوذره با استفاده از فرایند سونیکیشن

پس از ترکیب مخلوط رزین و نانولوله‌ها با هاردنر، مخلوط حاصل به قالب منتقل می‌شوند تا در کوره با دمای 110°C و به مدت 270 دقیقه به مرحله پخت کامل برسند.

2-3- تهیه آب اسیدی و بازی

برای بررسی میزان اثر مخرب آب دریا و آب‌های اسیدی و بازی، به ترتیب آب خلیج فارس و آب‌های دوبار یون زدایی شده^۶ ترکیب شده با اسید و باز صنعتی تهیه گردید. برای ساخت این دو نوع آب از پی‌اچ سنج^۷ استفاده گردید. در این مرحله با ریختن آب دوبار یون زدایی شده در بشر، پی‌اچ اولیه با دستگاه پی‌اچ سنج اندازه‌گیری شد. سپس سدیم هیدروکسید^۸ به آب اضافه شد و هم‌زمان پی‌اچ آن اندازه‌گیری گردید و تا رسیدن به پی‌اچ مورد نظر یعنی 10.5، افزودن سدیم هیدروکسید ادامه یافت. همین روند برای ترکیب آب دوبار یون زدایی شده با هیدروکلریک اسید^۹ برای ایجاد پی‌اچ 3.5 تکرار گردید. مشاهده شد آب دریا دارای پی‌اچ 8.4 می‌باشد. در مرحله بعد تمامی نمونه‌های حجمی ساخته شده با ضخامت 2 میلی‌متر در کوره با دمای 60°C به مدت 360 ساعت قرار داده شد. برای محاسبه میزان جذب رطوبت در نمونه‌ها، آن‌ها را در بازه‌های زمانی 1، 5، 8، 24، 30، 48، 76، 96، 168، 196، 220، 240، 290، 336 و 360 ساعت از درون ظرف‌ها خارج کرده و میزان افزایش جرم با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت یک هزارم گرم، اندازه‌گیری شد. درصد رطوبت جذبی در نمونه‌های حجمی که با نماد M_t نشان داده می‌شود با استفاده از رابطه (4) محاسبه گردید.

$$M_t = \frac{w_t - w_0}{w_0} \times 100 \quad (4)$$

که در آن w_0 جرم نمونه در حالت خشک و w_t جرم نمونه در زمان t غوطه‌وری در محیط مرطوب می‌باشد. سپس خواص مکانیکی نمونه‌های قرار

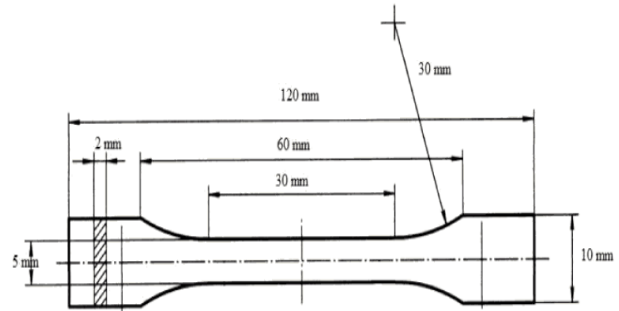


Fig. 1 Model 1BA for manufacturing bulk samples
شکل 1 مدل 1BA برای ساخت نمونه حجمی



Fig. 2 Teflon mold

شکل 2 قالب تفلونی

1-3- مراحل ساخت نمونه خالص و تقویت‌شده

در این مرحله برای ساخت نمونه‌های خالص، مقدار متناسبی از رزین اپوکسی کر 828 و هاردنر تتا^۱ ترکیب می‌شوند و در مکان‌های مشخص شده روی قالب تفلونی ریخته می‌شوند. سپس قالب به مدت 270 دقیقه در دمای 110°C داخل کوره^۲ گذاشته می‌شود تا نمونه‌ها به طور کامل به مرحله پخت برسند. برای ساخت نمونه حجمی تقویت‌شده از نانولوله کربنی چند جداره^۳ که مشخصات آن در جدول 1 آورده شده است، استفاده می‌شود. علت استفاده از این نانوذره، افزایش استحکام ماده در شرایط خشک و غوطه‌وری در آب می‌باشد.

جدول 1 مشخصات نانولوله چند جداره کربن

Table 1 Specifications of multi-walled carbon nanotubes

چگالی	طول تقریبی	قطر متوسط
2.1 g.cm ³	30μm	20-30 nm

در این تحقیق درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی (0.1٪، 0.3٪ و 0.5٪) مورد استفاده قرار گرفته و به رزین اضافه شده است. سپس به مدت ده دقیقه ظرف حاوی پلیمر و نانولوله‌های کربنی توسط گرمکن برقی در دمای 50°C گرم و با استفاده از هم‌زن مغناطیسی ترکیب می‌شود.

در مرحله بعد بشر حاوی پلیمر و نانولوله‌های کربنی آماده قرار گرفتن در محفظه سونیکیشن^۴ می‌شود. با توجه به شکل 3 دستگاه شامل یک محفظه

⁶ Deionized water

⁷ PH meter

⁸ Sodium hydroxide

⁹ Hydrochloric Acid

¹ Tetra(Triethylenetetramine)

² Oven

³ Multiwalled Carbon Nanotube

⁴ Sonication

⁵ Probe

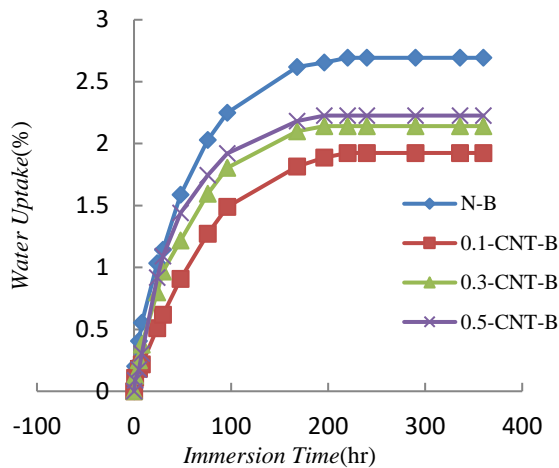


Fig. 6 Water uptake of samples immersed in alkali water under 60°C
شکل 6 درصد جذب رطوبت در نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت بازی تحت دمای 60°C

جدول 2 مقدار رطوبت جذب شده در نمونه‌های غوطه‌ور در آب دریا با دمای 60°C در حالت اشباع

Table 2 Water uptake of samples immersed in seawater under 60°C at saturated condition.

نمونه	جذب رطوبت (%)
خالص	2.86
0.1- MWCNT	2.03
0.3- MWCNT	2.375
0.5- MWCNT	2.545

جدول 3 مقدار رطوبت جذب شده در نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی با دمای 60°C در حالت اشباع

Table 3 Water uptake of samples immersed in acidic water under 60°C at saturated condition.

نمونه	جذب رطوبت (%)
خالص	3.045
0.1- MWCNT	2.187
0.3- MWCNT	2.299
0.5- MWCNT	2.362

جدول 4 مقدار رطوبت جذب شده در نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت بازی با دمای 60°C در حالت اشباع

Table 4 Water uptake of samples immersed in alkali water under 60°C at saturated condition.

نمونه	جذب رطوبت (%)
خالص	2.692
0.1- MWCNT	1.924
0.3- MWCNT	2.141
0.5- MWCNT	2.226

با مقایسه نمودار نمونه‌های خالص هر سه نوع آب مشاهده می‌شود که شیب اولیه این نمودارها که نشان دهنده نرخ نفوذ آب در آن‌ها می‌باشد نسبت به حالت تقویت‌شده بیشتر است علت امر این است که فضای خالی پلیمر برای حضور آب بیشتر است. از بین آن‌ها نمودار مربوط به نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی شیب بیشتری را به علت بالا بودن بار الکتریکی مثبت و افزایش میزان جاذبه الکترواستاتیک در سطوح زنجیره‌های مولکولی دارد. این شیب اولیه در نمودار نمونه‌های خالص موجود در آب با خاصیت بازی کم‌تر

گرفته شده در آب با استفاده از آزمون کشش با نرخ جابه‌جایی 1mm/min اندازه‌گیری گردید.

4- نتایج آزمایشگاهی

1- جذب آب

ورود رطوبت در پلیمر توسط فرایند نفوذ صورت می‌گیرد. همان طور که در نمودارهای 4 تا 6 مشخص است جذب رطوبت با افزایش زمان بیشتر می‌شود. البته در ابتدای فرایند نفوذ، نرخ نفوذ بالا بوده و به تدریج از آن کاسته شده تا به شرایط اشباع می‌رسد. دلیل این موضوع این است که در ناحیه اول فضاهای خالی موجود در پلیمر شروع به پر شدن توسط مولکول‌های آب می‌کند، اما با گذشت زمان اکثر فضاهای خالی پر شده و نرخ نفوذ کمتر می‌شود. مکانیزم‌های مختلفی از قبیل واکنش شیمیایی پلیمر با آب، تورم و ایجاد ریزترک‌ها در هنگام ورود آب رخ می‌دهد.

در شکل‌های 4 تا 6 مشاهده می‌شود که در گذر زمان، کاهش نرخ نفوذ رطوبت در همه نمونه‌های خالص و تقویت‌شده با نانولوله چند جداره کربنی وجود دارد. در جدول‌های 2 تا 4 نیز میزان رطوبت جذب شده در حالت اشباع برای هر سه نوع آب ارائه شده است.

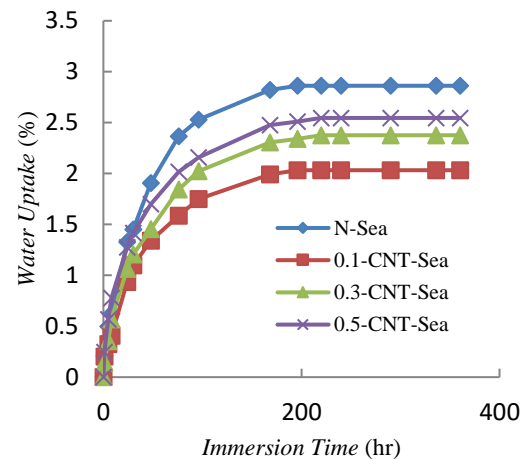


Fig. 4 Water uptake of samples immersed in seawater under 60°C
شکل 4 جذب رطوبت در نمونه‌های غوطه‌ور در آب دریا تحت دمای 60°C

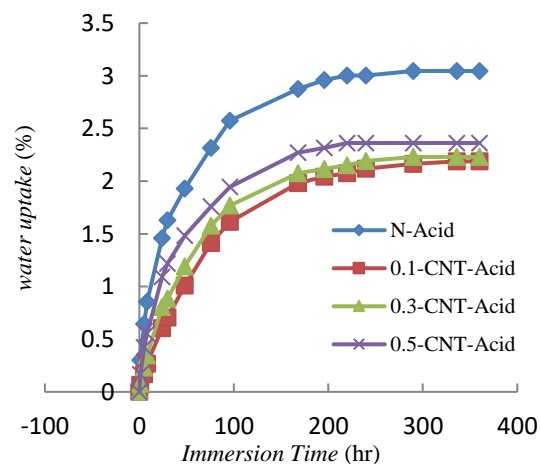


Fig. 5 Water uptake of samples immersed in acidic water under 60°C
شکل 5 درصد جذب رطوبت در نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی تحت دمای 60°C

جدول 6 ضریب نفوذ نمونه‌های غوطه‌ور در آب دریا

Table 6 Diffusion coefficient of samples immersed in seawater

D (mm ² /h)	%M _{Sat}	%M _{t=5}	نمونه
0.007418	2.8619	0.4977	خالص
0.006279	2.032	0.3252	0.1- MWCNT
0.007240	2.2695	0.3901	0.3- MWCNT
0.007375	2.5460	0.4358	0.5- MWCNT

جدول 7 ضریب نفوذ نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی

Table 7 Diffusion coefficient of samples immersed in acidic water

D (mm ² /h)	%M _{Sat}	%M _{t=5}	نمونه
0.01094	3.0459	0.6435	خالص
0.001451	2.1878	0.1683	0.1- MWCNT
0.002622	2.2299	0.2307	0.3- MWCNT
0.009052	2.3622	0.4540	0.5- MWCNT

جدول 8 ضریب نفوذ نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت بازی

Table 8 Diffusion coefficient of samples immersed in alkali water

D (mm ² /h)	%M _{Sat}	%M _{t=5}	نمونه
0.005570	2.6927	0.4058	خالص
0.002181	1.9244	0.1815	0.1- MWCNT
0.002461	2.1410	0.2145	0.3- MWCNT
0.002659	2.2261	0.2318	0.5- MWCNT

از بین نمونه‌های تقویت‌شده با نانوذره، نمونه‌های تقویت‌شده با 0.1٪ وزنی نانولوله کربنی چند جداره کم‌ترین میزان نفوذ و نمونه‌های تقویت‌شده با 0.5٪ وزنی نانوذره بیش‌ترین مقدار نفوذ رطوبت را از خود داشته‌اند. اما برای نمونه‌های موجود در آب دریا که با 0.3٪ و 0.5٪ وزنی نانوذره تقویت شده‌اند، نفوذ از سایر آب‌ها بیش‌تر است.

شکل‌های 7 تا 10 نشان دهنده استحکام نمونه‌ها در شرایط محیطی خشک و اشباع می‌باشد. با توجه به شکل‌های 7 تا 10، مشاهده می‌شود که نمونه‌های موجود در شرایط محیطی خشک بیش‌ترین استحکام را در تمامی موارد خالص و تقویت‌شده از خود داشته‌اند. نمونه‌های غوطه‌ور در هر سه نوع آب کاهش استحکام را داشته‌اند که در بین آن‌ها آب با خاصیت اسیدی کمترین میزان استحکام را در تمامی موارد داشته است، زیرا میزان نفوذ رطوبت در آب با خاصیت اسیدی نسبت به سایر موارد بیش‌تر می‌باشد. نمونه‌های موجود در آب دریا و آب با خاصیت بازی به ترتیب در مرتبه بعدی در از دست دادن استحکام قرار دارند. مشاهده می‌شود که افزودن نانوذره موجب تقویت استحکام مواد غوطه‌ور در هر سه نوع آب گشته است. نمونه‌های خالص چه در حالت خشک و چه در حالت غوطه‌ور در هر سه نوع آب دارای کمترین میزان استحکام می‌باشند، زیرا در نبود تقویت کننده آب بیش‌تری وارد حجم آزاد پلیمر می‌شود که منجر به کاهش استحکام نمونه می‌شود.

جدول‌های 9 تا 12، درصد افزایش استحکام نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه خالص را در حالت خشک و اشباع در هر سه آب نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی که با 0.1 درصد وزنی نانولوله تقویت‌شده‌اند به میزان 35.54٪ بیش‌ترین درصد افزایش استحکام را داشته‌اند. در مرتبه بعدی نمونه‌های غوطه‌ور در آب دریا با 33.39٪ و سپس نمونه‌های موجود در آب با خاصیت بازی با مقدار 30.42٪ بیش‌ترین درصد افزایش استحکام را داشته‌اند.

است که بیانگر وجود جاذبه الکترواستاتیک کم‌تر نسبت به آب دریا و آب اسیدی می‌باشد. هنگامی که نمونه‌ها داخل آب قرار می‌گیرند، سطوح زنجیره‌های مولکولی و وجوه مشترک پلیمر و نانوذرات، اکسید می‌شوند. سطوح اکسید شده دارای بار الکتریکی هستند. با توجه به حل شونده موجود در آب، مقدار بار مثبت و منفی سطوح متفاوت است. با افزودن اسید هیدروکلریک و ایجاد محیط اسیدی میزان بار مثبت سطوح زیاد و میزان بار منفی کم می‌شود با افزایش بار مثبت جاذبه الکترواستاتیک در سطوح زنجیره‌های مولکولی و وجوه مشترک نانوذره و پلیمر افزایش می‌یابد و در اثر افزایش این جاذبه، نفوذ آب بیشتر می‌شود و با ایجاد نرم شدگی، گسیختگی در وجه مشترک نانوذره و پلیمر به وجود می‌آید. در آب دریا با افزایش پی اچ به علت اکسید فلزات قلیایی میزان بار منفی سطوح نسبت به بار مثبت بیش‌تر است و جاذبه الکترواستاتیک نسبت به حالت اسیدی کم‌تر می‌شود. اما هم چنان در سطح و وجوه مشترک نانوذره و پلیمر جاذبه الکترواستاتیک موجب نفوذ رطوبت می‌شود و با افزایش نفوذ رطوبت، گسیختگی به وجود می‌آید. با افزودن سدیم هیدروکسید و ایجاد محیط بازی، اکسید فلزات قلیایی سطوح نسبت به آب دریا بیش‌تر می‌شود و میزان بار منفی موجود در وجوه مشترک نسبت به بار مثبت بسیار بیش‌تر می‌شود و به مراتب جاذبه الکترواستاتیک کم‌تری به وجود می‌آید و نفوذ آب کم‌تری در وجوه مشترک رخ می‌دهد و گسیختگی کم‌تر می‌شود.

جدول 5 میزان درصد کاهش جذب رطوبت در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی را نشان می‌دهد.

جدول 5 درصد کاهش جذب رطوبت نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه خالص در حالت اشباع برای آب‌های مختلف

Table 5 Percentage decrease in the water uptake of reinforced samples compared to the neat samples at the saturated condition for different types of water

نوع آب	درصد وزنی نانولوله‌های کربنی		
	0.5	0.3	0.1
آب دریا	11.18	20.97	29.02
آب اسیدی	22.49	27.09	28.17
آب بازی	17.47	20.44	27.50

2-4- ضریب نفوذ

برای محاسبه ضریب نفوذ رطوبت ابتدا درصد رطوبت جذبی با استفاده از روش ثقل‌سنجی محاسبه می‌شود. در مرحله اول جرم نمونه‌ها پیش از قرارگیری در شرایط محیطی مرطوب با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری می‌شود. سپس با قرار دادن در محیط مرطوب، در بازه‌های زمانی مشخص، میزان افزایش جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. بعد از تعیین میزان رطوبت جذبی در زمان اشباع (M_{Sat}) و با داشتن عرض نمونه (b)، میزان ضریب نفوذ رطوبت با استفاده از رابطه (5) محاسبه می‌شود [3].

$$D = \left(\frac{M_t}{M_{Sat}} \right)^2 \left(\frac{b}{8} \right)^2 \left(\frac{\pi}{t} \right) \quad (5)$$

جداول 6 تا 8 ضریب نفوذ رطوبت در نمونه‌های قرار گرفته شده در سه شرایط محیطی را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود در حالت خالص میزان نفوذ رطوبت و در نتیجه ضریب نفوذ در نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی از سایر نمونه‌ها بیش‌تر می‌باشد.

جدول 9 درصد افزایش استحکام نمونه‌های تقویت‌شده تحت شرایط محیطی خشک نسبت به نمونه خالص

Table 9 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples at dry environmental condition compared to the neat sample.

درصد افزایش استحکام	نمونه
29.90	0.1-MWCNT
23.25	0.3- MWCNT
15.85	0.5- MWCNT

جدول 10 درصد افزایش استحکام نمونه‌های تقویت‌شده غوطه‌ور در آب دریا در حالت اشباع نسبت به نمونه خالص

Table 10 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples saturated in seawater compared to the neat sample.

درصد افزایش استحکام	نمونه
33.39	0.1-MWCNT
25.08	0.3- MWCNT
18.08	0.5- MWCNT

جدول 11 درصد افزایش استحکام نمونه‌های تقویت‌شده غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی در حالت اشباع نسبت به نمونه خالص

Table 11 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples saturated in acidic water compared to the neat sample.

درصد افزایش استحکام	نمونه
35.54	0.1-MWCNT
28.08	0.3- MWCNT
20.11	0.5- MWCNT

جدول 12 درصد افزایش استحکام نمونه‌های تقویت‌شده غوطه‌ور در آب با خاصیت بازی در حالت اشباع نسبت به نمونه خالص

Table 12 Percentage increase in the strength of nanocomposite samples saturated in alkali water compared to the neat sample.

درصد افزایش استحکام	نمونه
30.42	0.1-MWCNT
24.06	0.3- MWCNT
17.78	0.5- MWCNT

شکل‌های 11 تا 14 بیانگر میزان مدول الاستیک نمونه‌ها در شرایط محیطی خشک و اشباع می‌باشند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت نمونه‌های موجود در شرایط محیطی خشک بیش‌ترین مقدار مدول الاستیک را در تمامی موارد تقویت‌شده و خالص از خود داشته‌اند. نمونه‌های غوطه‌ور در هر سه نوع آب کاهش در مدول الاستیک داشته‌اند که از بین آن‌ها آب با خاصیت اسیدی به خاطر تخریب ساختار پلیمر به علت واکنش‌های شیمیایی مولکول‌های آب با زنجیره‌های مولکولی پلیمر، کمترین میزان مدول الاستیک را در تمامی موارد داشته است.

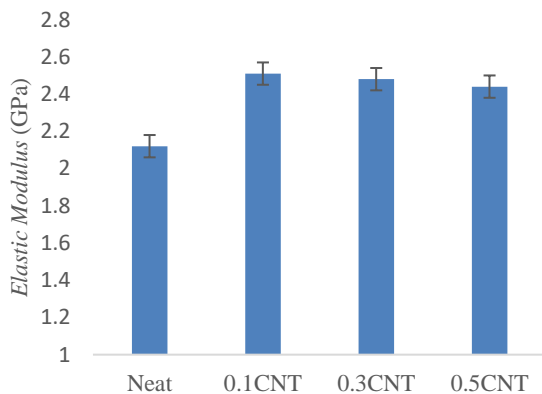


Fig. 11 Elastic modulus of the samples at dry environmental condition.

شکل 11 مدول الاستیک نمونه‌های موجود در شرایط محیطی خشک

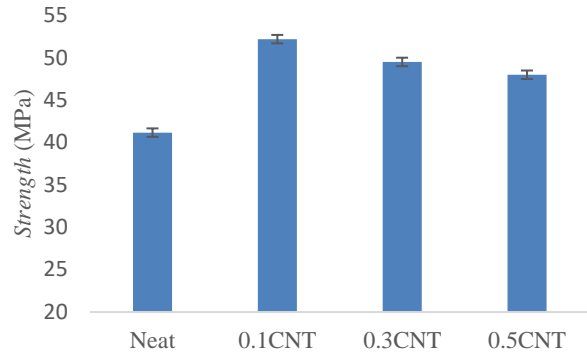


Fig. 7 Strength of samples in dry environmental condition

شکل 7 استحکام نمونه‌های موجود در شرایط محیطی خشک

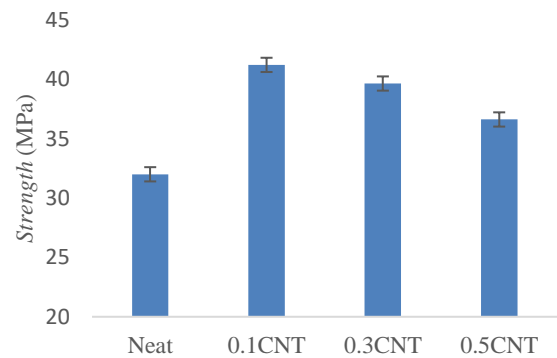


Fig. 8 Strength of samples immersed in seawater at saturated condition

شکل 8 استحکام نمونه‌های غوطه‌ور در آب دریا در حالت اشباع

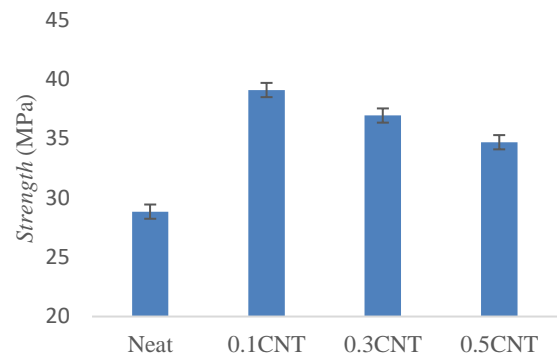


Fig. 9 Strength of samples immersed in acidic water at saturated condition

شکل 9 استحکام نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی در حالت اشباع

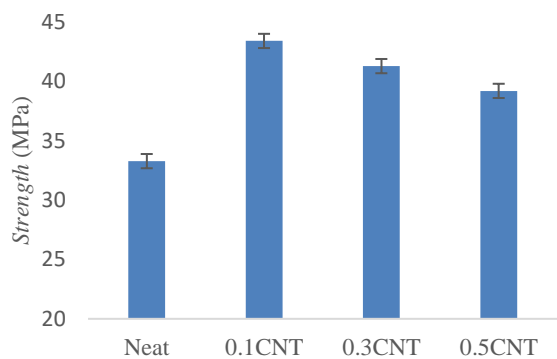


Fig. 10 Strength of samples immersed in alkali water at saturated condition

شکل 10 استحکام نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت بازی در حالت اشباع

جدول 13 درصد افزایش مدول الاستیک نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه خالص در حالت خشک

Table 13 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to pure samples at dry condition.

درصد افزایش مدول الاستیک	نمونه
18.39	0.1-MWCNT
16.50	0.3- MWCNT
15.09	0.5- MWCNT

جدول 14 درصد افزایش مدول الاستیک نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه خالص در آب دریا

Table 14 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to neat samples saturated in seawater.

درصد افزایش مدول الاستیک	نمونه
29.31	0.1-MWCNT
25.86	0.3- MWCNT
22.98	0.5- MWCNT

جدول 15 درصد افزایش مدول الاستیک نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به خالص در آب با خاصیت اسیدی

Table 15 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to neat samples saturated in acidic water.

درصد افزایش مدول الاستیک	نمونه
31.51	0.1-MWCNT
28.48	0.3- MWCNT
26.66	0.5- MWCNT

جدول 16 درصد افزایش مدول الاستیک نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به خالص در آب با خاصیت بازی

Table 16 Percentage increase in the elastic modulus of reinforced samples compared to neat samples saturated in alkali water.

درصد افزایش مدول الاستیک	نمونه
26.59	0.1-MWCNT
23.93	0.3- MWCNT
21.80	0.5- MWCNT

شکل‌های 15 تا 18 میزان جابجایی نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع در سه نوع آب را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزودن نانوذره میزان جابجایی کاهش می‌یابد. این کاهش در نمونه‌های تقویت‌شده با 0.1٪ وزنی نانولوله دارای کمترین مقدار می‌باشد. با افزایش مقدار نانولوله جابجایی افزایش می‌یابد. از آن جا که نمونه‌های خشک شکست تردی از خود نشان می‌دهند، میزان جابجایی آن‌ها نسبت به نمونه‌های موجود در سه نوع آب کم‌تر است.

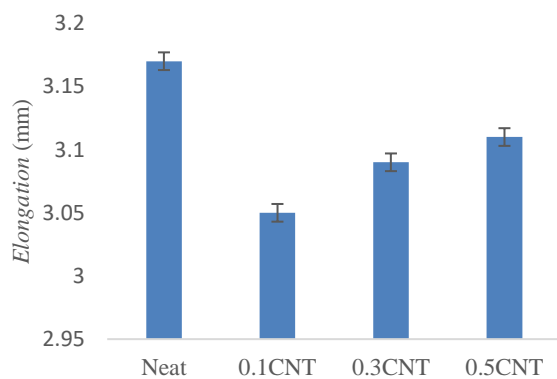


Fig. 15 The elongation of samples at dry condition

شکل 15 میزان جابه‌جایی نمونه‌ها در شرایط خشک

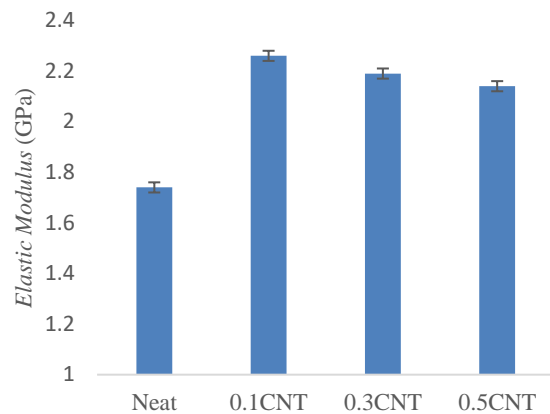


Fig. 12 Elastic modulus of the samples immersed in seawater at saturated condition.

شکل 12 مدول الاستیک نمونه‌های غوطه‌ور در آب دریا در حالت اشباع

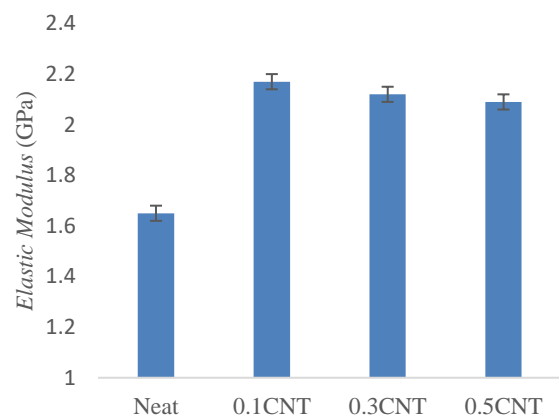


Fig. 13 Elastic modulus of the samples immersed in acidic at saturated condition.

شکل 13 مدول الاستیک نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت اسیدی در حالت اشباع

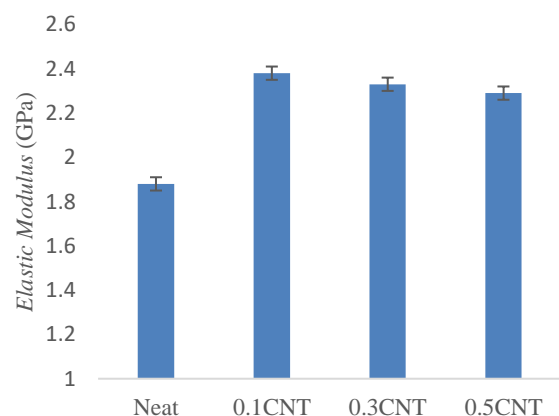


Fig. 14 Elastic modulus of the samples immersed in alkali at saturated condition.

شکل 14 مدول الاستیک نمونه‌های غوطه‌ور در آب با خاصیت بازی در حالت اشباع

جدول‌های 13 تا 16 نشان دهنده افزایش میزان درصد مدول الاستیک

نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه خالص می‌باشد.

جدول 17 درصد تغییر جابجایی نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه خالص در شرایط محیطی خشک

Table 17 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples at dry environmental condition.

درصد تغییر جابجایی	نمونه
-3.78	0.1-MWCNT
-2.25	0.3- MWCNT
-1.97	0.5- MWCNT

جدول 18 درصد تغییر جابجایی نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به حالت خالص در آب دریا

Table 18 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples saturated in seawater.

درصد تغییر جابجایی	نمونه
-4.58	0.1-MWCNT
-3.66	0.3- MWCNT
-2.75	0.5- MWCNT

جدول 19 درصد کاهش جابجایی نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به خالص در آب با خاصیت اسیدی

Table 18 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples saturated in acidic water.

درصد تغییر جابجایی	نمونه
-4.84	0.1-MWCNT
-3.93	0.3- MWCNT
-3.03	0.5- MWCNT

جدول 20 درصد کاهش جابجایی نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به خالص در آب با خاصیت بازی

Table 20 Percentage change in the elongation of reinforced samples compared to the neat samples saturated in alkali water.

درصد تغییر جابجایی	نمونه
-4.32	0.1-MWCNT
-3.39	0.3- MWCNT
-2.46	0.5- MWCNT

هر چه میزان نفوذ رطوبت به داخل پلیمر بیشتر باشد، میزان افت خواص مکانیکی ناشی از رطوبت هم بیشتر خواهد بود. همانطور که نتایج نشان دادند، میزان نفوذ رطوبت در پلیمر به ترتیب در آب اسیدی از همه بیشتر، پس از آن در آب دریا و در انتها در آب بازی بوده است. این ترتیب دقیقاً برای افت خواص مکانیکی هم برقرار بوده است. بدینصورت که میزان افت استحکام پلیمر بدلیل غوطه‌وری در آب به ترتیب در آب اسیدی، سپس در آب دریا و در انتها در آب بازی بوده است.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش آزمایشگاهی به بررسی اثر مخرب آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی بر رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها پرداخته شد. نمونه‌های حجمی خالص و تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی چند جداره در سه مقدار 0.1، 0.3 و 0.5٪ وزنی ساخته شدند و استحکام نهایی و مدول الاستیک نمونه‌ها در حالت خشک اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های حجمی خالص و تقویت‌شده با نانولوله در سه نوع آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی به مدت 360 ساعت غوطه‌ور و در بازه‌های زمانی مشخص افزایش جرم آن‌ها محاسبه شد. بیشترین اثر مخرب بر اثر غوطه‌وری در آب با خاصیت اسیدی در نمونه‌ها ظاهر گردید. پس از آن،

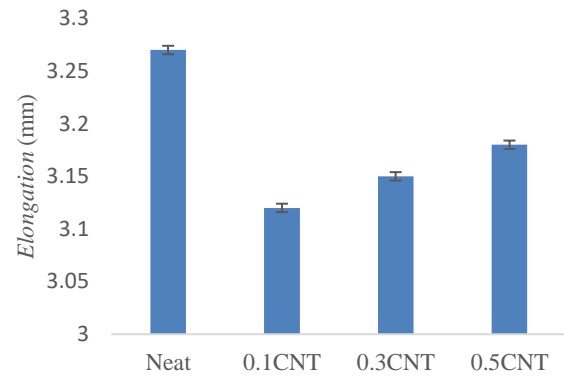


Fig. 16 The elongation of samples saturated in seawater

شکل 16 میزان جابجایی نمونه‌ها در حالت اشباع در آب دریا

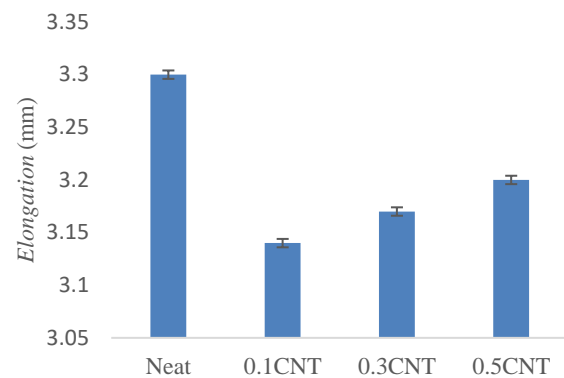


Fig. 17 The elongation of samples saturated in acidic water

شکل 17 میزان جابجایی نمونه‌ها در حالت اشباع در آب با خاصیت اسیدی

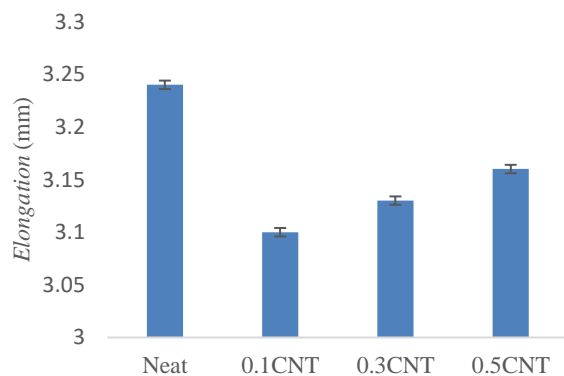


Fig. 18 The elongation of samples saturated in alkali water

شکل 18 میزان جابجایی نمونه‌ها در حالت اشباع در آب با خاصیت بازی

مشاهده می‌شود برای نمونه‌های قرار گرفته شده در آب اسیدی به علت افزایش در میزان آب جذب شده، جابجایی افزایش می‌یابد.

جدول‌های 17 تا 20 در صد کاهش جابجایی نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به خالص را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت با افزودن نانوذرات، ساختار پلیمر استحکام بیشتری پیدا می‌کند و در وجه مشترک این نانولوله‌ها با پلیمر جابجایی کمتری در زنجیره‌های مولکولی پلیمر نسبت به نمونه خالص ایجاد می‌شود.

- Glass/Epoxy Composites and Alloy Aluminium Surface "World Appl Sci J, Vol. 9, No. 2, pp. 204-210, 2010.
- [13] Packham, D., "In Handbook of Adhesion Second Edition", Wiley Online Library, 2005 .
- [14] Adamson, M. J., "Thermal Expansion and Swelling of Cured Epoxy Resin Used in Graphite/Epoxy Composite Materials" Journal of materials science, Vol. 15, No. 7, pp. 1736-1745, 1980.
- [15] Masaro, L., Zhu, X., "Physical Models of Diffusion for Polymer Solutions, Gels and Solids" Progress in polymer science, Vol. 24, No. 5, pp. 731-775, 1999.
- [16] Drozdov, A. D., Christiansen, J. d., Gupta, R., Shah, A., "Model for Anomalous Moisture Diffusion through a Polymer-Clay Nanocomposite" Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, Vol. 41, No. 5, pp. 476-492, 2003.
- [17] Carter, H. G., Kibler, K. G., "Langmuir-Type Model for Anomalous Moisture Diffusion in Composite Resins" Journal of composite materials, Vol. 12, No. 2, pp. 118-131, 1978.
- [18] Doyle, G., Pethrick, R. A., "Environmental Effects on the Ageing of Epoxy Adhesive Joints" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 29, No. 1, pp. 77-90, 2009.
- [19] Popineau, S., Shanahan, M. E., "Simple Model to Estimate Adhesion of Structural Bonding During Humid Ageing" International journal of adhesion and adhesives, Vol. 26, No. 5, pp. 363-370, 2006.
- [20] Baker, A. A., Rose, L. F., Jones, R., "Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure", Elsevier, 2003 .
- [21] Gledhill, R., Kinloch, A., Shaw, S., "A Model for Predicting Joint Durability" The journal of Adhesion, Vol. 11, No. 1, pp. 3-15, 1980.
- [22] Duncan, B., Urquhart, J., Roberts, S., "Review of Measurement and Modelling of Permeation and Diffusion in Polymers", 2005.
- [23] Brewis, D., Comyn, J., Tegg, J., "The Uptake of Water Vapour by an Epoxide Adhesive Formed from the Diglycidyl Ether of Bisphenol-a and Di-(1-Aminopropyl-3-Ethoxy) Ether" Polymer, Vol. 21, No. 2, pp. 134-138, 1980.
- [24] Brewis, D., Comyn, J., Raval, A., Kinloch, A., "The Effect of Humidity on the Durability of Aluminium-Epoxy Joints" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 10, No. 4, pp. 247-253, 1990.
- [25] Lin, Y., Chen, X., "Moisture Sorption-Desorption-Resorption Characteristics and Its Effect on the Mechanical Behavior of the Epoxy System" Polymer, Vol. 46, No. 25, pp. 11994-12003, 2005.
- [26] Apicella, A., Nicolais, L., Astarita, G., Drioli, E., "Effect of Thermal History on Water Sorption, Elastic Properties and the Glass Transition of Epoxy Resins" Polymer, Vol. 20, No. 9, pp. 1143-1148, 1979.
- [27] De Nève, B., Shanahan, M., "Water Absorption by an Epoxy Resin and Its Effect on the Mechanical Properties and Infra-Red Spectra" Polymer, Vol. 34, No. 24, pp. 5099-5105, 1993.
- [28] Xu, S., Dillard, D. A., Dillard, J. G., "Environmental Aging Effects on the Durability of Electrically Conductive Adhesive Joints" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 23, No. 3, pp. 235-250, 2003.
- [29] De Nève, B., Shanahan, M., "Effects of Humidity on an Epoxy Adhesive" International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 12, No. 3, pp. 191-196, 1992.
- آب دریا و سپس آب با خاصیت بازی تأثیر مخرب بر رفتار مکانیکی اپوکسی گذاشت. افزودن نانولوله‌های کربنی باعث کاهش میزان نفوذ آب در نمونه‌ها شد. بیشترین میزان کاهش نفوذ رطوبت در اثر افزودن 0.1 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در نمونه‌ها بدست آمد. با افزودن 0.1 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به رزین، میزان نفوذ آب در حالت اشباع برای نمونه‌های غوطه‌ور در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی به ترتیب به میزان 29٪، 28.2٪ و 27.5٪ نسبت به نمونه‌های خالص کاهش پیدا کرد. پس از رسیدن به حالت اشباع، نمونه‌های مختلف تحت آزمون کشش قرار گرفته و استحکام، مدول الاستیسیته و میزان جابجایی آن‌ها بدست آمد. نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله که برای مدت 360 ساعت در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی غوطه‌ور بوده‌اند، به ترتیب به میزان 33.4٪، 35.5٪ و 30.4٪ استحکام بیشتری در مقایسه با نمونه‌های خالص داشتند. همچنین، نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی 0.1 درصد وزنی نانولوله که با غوطه‌وری در آب دریا، آب با خاصیت اسیدی و آب با خاصیت بازی به حالت اشباع رسیدند به ترتیب به میزان 29.3٪، 31.5٪ و 26.6٪ مدول الاستیسیته بیشتری در مقایسه با نمونه‌های خالص داشتند.

7- مراجع

- [1] Springer, G., "Environmental Effects on Composite Materials. Volume 3", 1988.
- [2] Farahifar, S., Shokrieh, M. M., Salamat-Talab, M., "Experimental Investigation of Mode I Delamination Growth in Unidirectional E-Glass/Vinyl Ester Composites on Acid Aging" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 731-739, 2020.
- [3] Khoramishad, H., Abbasi, Z., "Numerical Study of the Effect of Moisture-Induced Swelling Stresses on Damage Behavior of Adhesive Joints under Static Loading" Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 189-198, 2015.
- [4] Amini, M., Khavandi, A., "Evaluation of the Water Absorption Content Effect on the Dielectric Properties and Tensile Strength of Polymer Composites" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 300-309, 2019.
- [5] Li, Y., Umer, R., Isakovic, A., Samad, Y. A., Zheng, L., Liao, K., "Synergistic Toughening of Epoxy with Carbon Nanotubes and Graphene Oxide for Improved Long-Term Performance" RSC advances, Vol. 3, No. 23, pp. 8849-8856, 2013.
- [6] Wang, P.-N., Hsieh, T.-H., Chiang, C.-L., Shen, M.-Y., "Synergetic Effects of Mechanical Properties on Graphene Nanoplatelet and Multiwalled Carbon Nanotube Hybrids Reinforced Epoxy/Carbon Fiber Composites" Journal of Nanomaterials, Vol. 2015, 2015.
- [7] Li, W., Dichiaro, A., Bai, J., "Carbon Nanotube-Graphene Nanoplatelet Hybrids as High-Performance Multifunctional Reinforcements in Epoxy Composites" Composites Science and Technology, Vol. 74, pp. 221-227, 2013.
- [8] Jahan, N., Hosur, M. V., Jeelani, S., "Low-Velocity Impact Response of Woven Carbon Epoxy Composites with Mwcnts" in Proceeding of 1586 .
- [9] Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., Jeelani, S., "Experimental Study on the Thermal and Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy" Materials Science and Engineering: A, Vol. 452, pp. 657-664, 2007.
- [10] Kim, M., Rhee, K., Lee, J., Hui, D., Lau, A. K., "Property Enhancement of a Carbon Fiber/Epoxy Composite by Using Carbon Nanotubes" Composites Part B: Engineering, Vol. 42, No. 5, pp. 1257-1261, 2011.
- [11] Shokrieh, M., Saeedi, A., Chitsazzadeh, M., "Evaluating the Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Chopped Strand Mat/Polyester Composites" Materials & Design (1980-2015), Vol. 56, pp. 274-279, 2014.
- [12] Fereidoon, A., Kordani, N., Rostamiyan, Y., Ganji, D., Ahangari, M., "Effect of Carbon Nanotubes on Adhesion Strength of E-