



Experimental Study of the Water Absorption and Fatigue Life of PMMA/MWCNTs Nanocomposites

ARTICLE INFO

Article Type

Research Note

Authors

Ebrahimzadegan A.¹ MSc,

Mohammadpour Fattahi A.^{*1} PhD

How to cite this article

Ebrahimzadegan A, Mohammadpour Fattahi A. Experimental Study of the Water Absorption and Fatigue Life of PMMA/MWCNTs Nanocomposites. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1819-1825.

ABSTRACT

Carbon nanotubes have special importance due to unique properties as an amplifier phase. In this paper, the effect of multiwall carbon nanotubes on water absorption and fatigue life of poly methyl methacrylate is investigated. To this end, nanocomposites based on polymethyl methacrylate, containing 0-1.5 weight percentage of multiwall carbon nanotubes are produced with screw and injection molding process. The morphology was studied, using scanning electron microscopy. Microscopic images examination showed that carbon nanotubes have been well released in the field of polymer. The fatigue testing of each of the prototypes was carried out under identical conditions. Based on the results of fatigue test, nanocomposite fatigue strength containing 0.5% carbon nanotubes increased than base polymer. Also, based on the results of water absorption test, the existence of multiwall carbon nanotubes in polymer field decreased absorption water of the samples.

Keywords Polymethyl Methacrylate; Multiwall Carbon Nanotubes; Injection Molding; Water Absorption; Fatigue Life

CITATION LINKS

- [1] Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites-effects of processing techniques and maleated polypropylene ... [2] The effect of temperature and nano-sized calcium carbonate on tensile properties of medium density ... [3] Polymeric nanocomposites, theory ... [4] Evolution of collective damage in a polyamide 6-silicate ... [5] Experimental determination of mechanical properties of PMMA reinforced with ... [6] PMMA/CB and PMMA/MWCNTs nanocomposites: Assessments through ... [7] The electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of injection molded multi-walled carbon ... [8] Experiment research of environment effect on mechanical ... [9] Fatigue and biocompatibility properties of a poly(methyl methacrylate) bone cement with multi-walled carbon ... [10] Incorporation of MWCNTs to PMMA bone cements: Effects on fatigue ... [11] Analysis of fatigue life of PMMA at Different frequencies based on a new damage ... [12] Influence of processing condition and carbon nanotube on mechanical properties of injection molded multi-walled carbon nanotube/poly(methyl ... [13] Experimental study on mechanical properties of ... [14] Prediction on fatigue life of U-notched ... [15] Effect of organoclay modification on the mechanical, morphology, and thermal properties of injection molded polyamide6/polypropylene ... [16] Effects of surface quality and loading history on fatigue life of laser-machined poly ... [17] Study of fatigue properties of PMMA with typical ... [18] Performance and anti-wear mechanism of CaCO₃ nanoparticles as green additive in poly-... [19] Water absorption of poly(methyl methacrylate) measured by vertical interference ... [20] Mechanical performance, water absorption behavior and biodegradability of poly(methyl methacrylate)-modified ... [21] Experimental study on the water absorption and tribological properties of PA6/CaCO₃ ... [22] Water absorption of poly(methyl methacrylate) containing 4-methacryloxyethyl ... [23] Fatigue resistance of denture teeth [24] Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, ...

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
Postal Code: 4453351579
Phone: +98 (41) 33318688
Fax: +98 (41) 33318688
a.fattahi@iaut.ac.ir

Article History

Received: June 30, 2018

Accepted: January 15, 2019

ePublished: July 01, 2019

مطالعه تجربی جذب آب و عمر خستگی نانوکامپوزیت‌های PMMA/MWCNTs

علی ابراهیم زادگان MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

اصغر محمدپور فتاحی PhD*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص منحصربه‌فرد به عنوان فاز تقویت‌کننده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در این مقاله تاثیر نانولوله‌های کربنی چنددیواره بر جذب آب و عمر خستگی پلی‌متیل‌متاکریلات مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه پلی‌متیل‌متاکریلات حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره صفر تا ۱/۵ درصد وزنی به روش اکسترودر دوپیچه و قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند. ساختار نانوکامپوزیت‌های تولیدشده با استفاده از میکروسکوپ گسیل میدانی بررسی می‌شود. بررسی تصاویر میکروسکوپی حاکی از آن بوده که نانولوله‌های کربنی به‌خوبی در زمینه پلیمر پخش شده‌اند. آزمون خستگی برای هر یک از نمونه‌ها در تحت شرایط یکسان انجام گرفت. طبق نتایج آزمون، عمر خستگی نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵٪ از نانولوله‌های کربنی چنددیواره نسبت به پلیمر پایه بهبود یافت. همچنین براساس نتایج آزمون جذب آب حضور نانولوله‌های کربنی چنددیواره در زمینه پلیمری باعث کاهش جذب آب در نمونه‌های نانوکامپوزیتی شد.

کلیدواژه‌ها: پلی‌متیل‌متاکریلات، نانولوله‌های کربنی چنددیواره، قالب‌گیری تزریقی، جذب آب، عمر خستگی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵

*نویسنده مسئول: a.fattahi@iaut.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های پلیمری، به دلیل برخورداری از خواص بهبودیافته خود نسبت به پلیمرهای خالص، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته‌اند. با افزودن مقادیر کمی از پرکننده‌های معدنی در مقیاس نانومتری به جای ذرات میکرونی و بزرگ‌تر می‌توان خواص سایشی، حرارتی و مکانیکی پلیمرها را بهبود بخشید. به‌ویژه هنگامی که ذرات به‌طور یکنواخت در بستر پلیمری پراکنده شوند، بهبودیافتگی خواص به حداکثر خود خواهند رسید. انواع مختلفی از پرکننده‌ها با ابعاد نانو به کار گرفته شده‌اند که از میان آنها می‌توان به نانوالیاف‌ها مانند نانولوله‌های کربنی، سیلیکات‌های لایه‌ای مانند خاک رس و نانوذرات همسان‌گرد از قبیل سیلیکا یا کربنات کلسیم اشاره کرد^[1-2]. افزودن نانوذرات پرکننده در پلیمرهای نیمه‌بلوری سبب افزایش جوانه‌های بلوری در هنگام انجماد شده و از این رو علاوه بر کوچک‌تر شدن اندازه دانه‌های بلوری، موجب افزایش درجه ساختار بلوری و بهبود یکنواختی در زمینه پلیمری می‌شود^[3-4]. نانولوله‌های کربنی یکی از مستحکم‌ترین موادی است که بشر تاکنون شناخته که این ماده یکی از آلوتروپ‌های کربن مثل گرافیت، الماس و فلوئرن است^[5]. پس از سال ۱۹۹۴ که *آجایان* و همکاران برای اولین بار نانولوله‌های چنددیواره کربنی را به‌عنوان مواد پرکننده در ماتریس‌های پلیمری معرفی کردند، پژوهش‌های بسیاری روی ساخت، بهبود، مدل‌سازی و شناسایی چنین ساختارهایی متمرکز شده است^[6]. خصوصیات استثنایی نانولوله‌های کربنی از جمله چگالی پایین، نسبت وجهی بالا، مقاومت کششی خوب و مدول الاستیسیته غیرمعمول آن

باعث شده تا آنها به‌عنوان پرکننده ایده‌آل برای تقویت پلیمرها مطرح شوند^[7]. پلی‌متیل‌متاکریلات یک پلیمر بی‌شکل شفاف با مشخصات مکانیکی مطلوب است. از جمله این خصوصیات، مقاومت خوب در آب و هواهای گوناگون و سختی بالا است^[8]. پلی‌متیل‌متاکریلات بیش از ۵۰ سال است به‌عنوان سیمان ارتوپدی در پزشکی و دندان‌پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو بررسی خواص خستگی و جذب آب این پلیمر و نانوکامپوزیت‌های آن از اهمیت بالایی برخوردار است. *ورمنزی* و همکاران در سال ۲۰۱۲، خواص خستگی و زیست‌سازگاری سیمان استخوانی پلی‌متیل‌متاکریلات مخلوط‌شده با نانولوله‌های چنددیواره کربنی را مورد مطالعه قرار دادند. نانولوله‌های کربنی را در درصدهای ۰/۱ تا یک‌درصد وزنی به سیمان استخوانی اضافه کردند و آزمون خستگی به‌وسیله دستگاه زوییک رول با فرکانس ۲ هرتز، کمترین تنش ۰/۳ و بیشترین تنش ۲۲ مگاپاسکال به نمونه‌ها اعمال شد که در نتیجه آن سیمان استخوانی دارای ۰/۱٪ نانولوله‌های کربنی بیشترین افزایش استحکام خستگی را از خود نشان دادند^[9]. در سال ۲۰۱۴ *نیزلین* و *خو* پژوهشی در مورد تاثیر نانولوله‌های چنددیواره کربنی بر خواص خستگی سیمان استخوانی پلی‌متیل‌متاکریلات انجام دادند. نانولوله‌ها با درصدهای ۰/۱ و ۰/۶ درصد وزنی به سیمان استخوانی اضافه شدند و تست خستگی با فرکانس ۴ هرتز، کمترین تنش اعمالی ۰/۳ مگاپاسکال و بیشترین تنش ۲۲ مگاپاسکال بر نمونه‌ها اعمال شد. بنا بر نتایج آزمون خستگی، بیشترین بهبود در سیمان استخوانی دارای ۰/۱٪ نانولوله‌های چنددیواره کربنی مشاهده شد^[10]. همچنین *هو/نگ* و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی تاثیر فرکانس بارگذاری بر عمر خستگی پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات پرداختند. نمونه‌ها در ۵ تراز تنش و ۳ فرکانس مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند که مشخص شد با افزایش فرکانس عمر خستگی نیز افزایش یافته است^[11]. *نویدفر* و همکاران به بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های چنددیواره کربنی و شرایط فرآیندی روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌متیل‌متاکریلات پرداختند. بدین منظور نانوکامپوزیت‌ها را با درصدهای وزنی صفر، ۰/۵ و ۱ و ۱/۵٪ از نانولوله‌های چنددیواره به‌روش قالب‌گیری تزریقی، تولید و خواص آنها را مورد مطالعه قرار دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان به افزایش سختی و استحکام ضربه نمونه‌ها با افزایش غلظت نانولوله‌ها اشاره کرد^[12]. *فتاحی* و *ناجی‌پور* به بررسی تاثیر نانولوله‌های چنددیواره کربنی بر پلی‌اتیلن پرداختند. به این ترتیب که نانوکامپوزیت‌هایی با درصدهای وزنی صفر، ۰/۵ و ۱ و ۱/۵٪ از نانولوله‌های چنددیواره کربنی به‌روش قالب‌گیری تزریقی، با دو فشار تزریق ۶۰ و ۸۰ مگاپاسکال، تولید و سپس خواص مکانیکی آنها به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش سختی و استحکام ضربه نمونه حاوی ۱٪ از نانولوله‌های کربنی نسبت به پلیمر پایه و کاهش همین مقادیر برای نانوکامپوزیت حاوی ۱/۵٪ از نانولوله‌های کربنی از نتایج این پژوهش است^[13]. اخیراً *لیو* و همکاران پژوهشی با عنوان پیش‌بینی عمر خستگی صفحه PMMA دارای ناچ یوشکل انجام دادند. در این پژوهش از روش شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. این پژوهش نشان داد که آغاز و رشد ترک خستگی در نسبت تنش ۰/۴ خیلی بیشتر از نسبت تنش ۰/۱ در همان سطح تنش است. همچنین حد خستگی مدل ناچ‌دار با ضریب تمرکز تنش ۲/۵، بیشتر از همان مدل دارای ضریب تمرکز تنش ۴ است. نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود با نتایج تجربی به نسبت بالایی با هم همخوانی داشتند^[14]. در پژوهش

ASTM D638 برای تست خستگی و استاندارد ASTM D6110 برای تست جذب آب و مقطع راهگاه به شکل نیم‌دایره بودند. در نتیجه فیلم به منظور ایجاد هم‌محوری نانولوله‌ها با راستای تزریق در نظر گرفته شد [8]. برای خنک‌کاری یا ثابت‌نگه‌داشتن دمای قالب در حین تزریق، کانال‌های خنک‌کاری نیز در روی قالب در نظر گرفته شد. قالب شامل بلوک ثابت و متحرک، پشت‌بند، فاصله‌اندازها، میل راهنما و بوش تزریق است. شکل ۲ نمونه‌های آزمون خستگی و شکل ۳ نمونه‌های آزمون جذب آب را نشان می‌دهند. جدول ۲ نمونه‌های تولیدشده براساس درصد وزنی حضور نانولوله‌های چنددیواره کربنی را در نانوکامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲) نمونه‌های تست خستگی



شکل ۳) نمونه‌های آزمون جذب آب

جدول ۲) دسته بندی نمونه‌های آزمایش بر اساس درصد نانولوله‌های چنددیواره کربنی

ترکیب	درصد وزنی پلیمر زمینه	درصد وزنی نانولوله های چند دیواره
PMMA+0%MWCNT	۱۰۰	۰
PMMA+0.5%MWCNT	۹۹/۵	۰/۵
PMMA+1%MWCNT	۹۹	۱
PMMA+1.5%MWCNT	۹۸/۵	۱/۵

۲-۳- میکروسکوپ گسیل میدانی

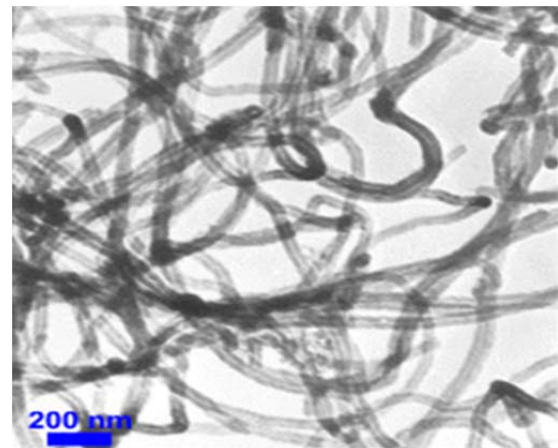
از دستگاه میکروسکوپ گسیل میدانی مدل میرا ۳- ایکس‌ام‌پوی واقع در پژوهشگاه متالورژی رازی برای تصویربرداری الکترونی از نمونه‌ها به منظور مطالعه ساختار نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده است. پیش از قراردادن نمونه‌ها در میکروسکوپ، اولاً هر کدام در نیتروژن مایع خشک شده‌اند، ثانیاً برای اجتناب از تجمع الکترونی و همچنین افزایش هدایت الکترونی به منظور جلوگیری از پالس‌های زائد، سطح شکست نمونه‌ها توسط طلا روکش‌دهی شدند.

حاضر به علت برخورداری پلی‌متیل‌متاکریلات از خواص مکانیکی و زیستی مناسب، این پلیمر به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد. هدف بررسی تاثیر حضور نانولوله‌های چنددیواره کربنی بر عمر خستگی و جذب آب پلیمر زمینه است. بدین منظور ابتدا نمونه‌های آزمایش به روش قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شود. سپس تاثیر نانولوله‌های چنددیواره کربنی بر جذب آب و عمر خستگی هر یک از آنها، به طور تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این تحقیق از پلیمر متیل‌متاکریلات با نام تجاری PMMA محصول شرکت شیمی تایوان با وزن مخصوص 1.19 gr/cm^3 به عنوان پلیمر زمینه استفاده شده است. نانوذرات استفاده شده در این پژوهش، نانولوله‌های چنددیواره کربنی محصول شرکت آمریکایی نانوسترکچراند آمورف متریالس است. شکل ۱، تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانولوله‌های چنددیواره کربنی را نشان می‌دهد. سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی مواد اولیه در جدول ۱ ذکر شده است.



شکل ۱) تصویر SEM از نانولوله‌های چنددیواره کربنی

جدول ۱) مشخصات فیزیکی و مکانیکی مواد اولیه

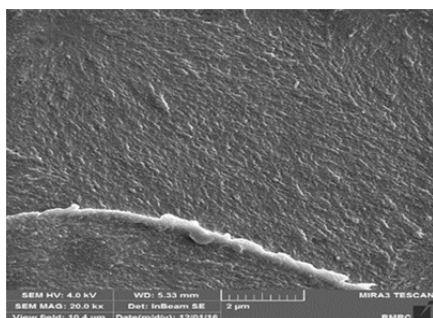
پلی‌متیل‌متاکریلات	نانولوله‌های چنددیواره کربنی
چگالی 1.19 gr/cm^3	چگالی 2.1 gr/cm^3
استحکام کششی 73 مگاپاسکال	سطح ویژه $90-120 \text{ m}^2/\text{g}$
دمای ذوب 115°C	نسبت طول به قطر $200-767$
دمای انحراف حرارتی 95°C	درصد خلوص 95%
مقاومت و مدول کششی 103 مگاپاسکال	قطر داخلی و خارجی $10-15$
$2/8$ گیگاپاسکال	5 میلی‌متر: $30-50$ میلی‌متر

۲-۲- قالب‌گیری نمونه‌ها

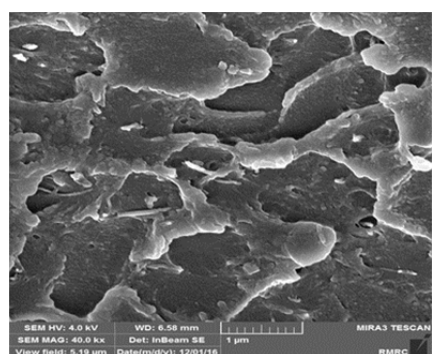
تولید ترکیب‌های مورد نظر در کارگاه پلاستیک پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد. ترکیبات مورد نظر نخست به صورت مکانیکی، مخلوط و پس از آن در یک مرحله ذوبی توسط دستگاه اکسترودر همسوگرد دو مارپیچه تولید شدند. قبل از مخلوط کردن مواد، تمامی مواد در دمای 80°C به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی رطوبت‌گیری شدند. در مرحله ترکیب مکانیکی به دلیل باردار شدن سطحی پلیمر پایه پس از رطوبت‌گیری، نانولوله‌ها به سطح آن می‌چسبند. برای تزریق قطعات نانوکامپوزیتی از یک قالب دوحفره‌ای استفاده شده است. ابعاد حفره‌ها مطابق استاندارد

۴-۲- آزمون جذب آب

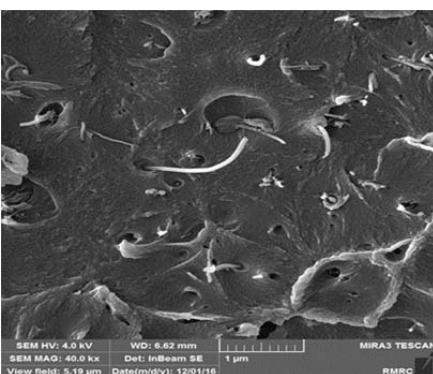
آب شده و با افزایش درصد نانولوله‌های چنددیواره کربنی، میزان جذب نمونه‌ها نیز کاهش یافته است. علت این کاهش را می‌توان ساختار آمورف این پلیمر دانست، به این صورت که حضور نانولوله‌های چنددیواره کربنی باعث کاهش بی‌نظمی در ساختار پلیمر و در نتیجه کاهش میزان جذب آب می‌شوند [16, 20-23].



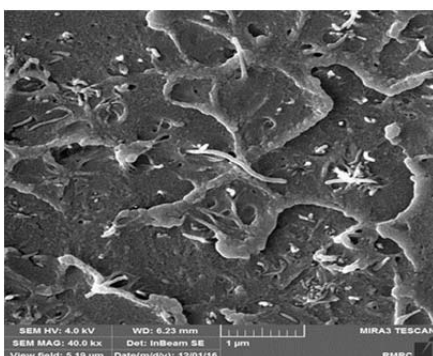
شکل (۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی از پلیمر زمینه



شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوکامپوزیت حاوی ۵٪ نانولوله‌های چنددیواره



شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوکامپوزیت حاوی ۱٪ نانولوله‌های چنددیواره کربنی



شکل (۷) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوکامپوزیت حاوی ۵٪ نانولوله‌های چنددیواره کربنی

آزمون جذب رطوبت تحت استاندارد ASTM D570 انجام شد. مدت‌زمان پیشنهادشده در استاندارد مذکور برای انجام آزمون جذب رطوبت ۲۴ ساعت ذکر شده است. ولی طی آزمایش مشاهده شد که در این مدت‌زمان نمونه‌ها جذب آب زیادی انجام می‌دهند. به همین سبب آزمایش مذکور تا زمان ثبات میزان جذب آب ادامه داده شد. از این رو علاوه بر بازه زمانی ۲۴ ساعت، میزان جذب آب نمونه‌ها در فواصل زمانی ۳، ۵، ۷ و ۱۴ روز نیز اندازه‌گیری شد. برای افزایش سطح تماس نمونه‌ها با آب، آنها به شکل افقی و روی تکیه‌گاه‌های سیمی در داخل حمام آب قرار داده شدند. میزان جذب رطوبت با اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرارگیری در حمام آب معین شد. شایان ذکر است که در طول انجام آزمایش‌ها، حمام آب در دمای ۲۰°C، در تعادل دمایی با محیط قرار داشت و از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم برای وزن کردن نمونه‌ها استفاده شد.

۵-۲- آزمون خستگی

در این پژوهش از دستگاه تست خستگی محوری SAF-250 ساخت شرکت سنتام با ظرفیت ۲۵ تن واقع در دانشگاه صنعتی شریف استفاده شد. تست با تنش بیشینه ۱۵، ۲۲ و ۳۰ مگاپاسکال، کمترین تنش صفر و فرکانس ۴ هرتز (۴ بارگذاری در ثانیه) روی نمونه‌ها اعمال شد. علت انتخاب این بارگذاری، استفاده از این پلیمر در مقاصد پزشکی و ارتوپدی مخصوصاً دندانپزشکی است که در هنگام عمل جوییدن به‌طور میانگین ۴ بارگذاری در ثانیه روی دندان‌ها انجام می‌گیرد [15]. علت دیگر انتخاب این بارگذاری، رسیدن نمونه‌ها به تعداد سیکل شکست قابل مقایسه و استناد با توجه به تحقیقات گذشته بود [16, 17].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شکل شناسی

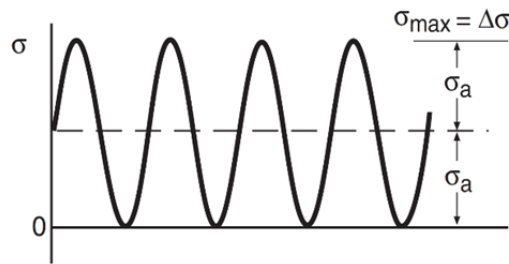
شکل‌های ۴ تا ۷، تصاویر به‌دست‌آمده از سطح مقطع عمود بر راستای تزریق نانوکامپوزیت‌های تولیدشده را نشان می‌دهد که با بزرگ‌نمایی بالا، نانولوله‌های کربنی و پخش یکنواخت نانولوله‌ها قابل تشخیص است. در درصدهای بالا، با وجود اینکه تراکم نانولوله‌ها در پلیمر زمینه زیاد شده، ولی نقاط به‌صورت کلوخه رویت نمی‌شود که نشان‌دهنده پخش قابل قبول نانولوله‌های کربنی است. همچنین تصاویر اثبات می‌نماید که شرایط در نظر گرفته‌شده به‌منظور تولید نانوکامپوزیت از نکته‌نظر پخش نانولوله‌ها مناسب بوده است. همان‌طوری که در تصاویر مشاهده می‌شود، نانولوله‌ها از مقطع شعاعی قابل رویت است که به این شیوه استنباط می‌شود، جهت‌گیری نانولوله‌ها موازی با راستای تزریق است. عدم تماس فیزیکی نانولوله‌ها با یکدیگر از سایر موارد قابل مشاهده در تصاویر است. در متراکم‌ترین شرایط، فاصله بین نانولوله‌ها تقریباً بیشتر از ۲۵ میکرون متر است [18, 19].

۳-۲- جذب آب

نمودار ۱، داده‌های حاصل از تست را نشان می‌دهد که میزان جذب آب نمونه‌ها را به تفکیک روز آزمایش و درصد نانولوله‌ها نشان می‌دهد. اگر M_1 جرم اولیه نمونه و M_2 جرم ثانویه نمونه باشد، در این صورت میزان جذب آب نمونه با رابطه ۱ محاسبه می‌شود که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$\Delta w = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (1)$$

نتایج تست نشان می‌دهد که حضور نانولوله‌های چنددیواره کربنی در زمینه پلیمری پلی‌متیل‌متاکریلات، باعث کاهش میزان جذب



شکل ۸) تصویر نوع بارگذاری اعمال شده در آزمون خستگی

با توجه به نوع بارگذاری [17]:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

که σ_a دامنه تنش و σ_m تنش میانگین است. چون در این تست $\sigma_{\min}$ برابر با صفر است، در نتیجه:

$$\sigma_a = \sigma_m \quad (4)$$

براساس نتایج حاصل، همان‌طور که انتظار می‌رفت حضور نانولوله‌های چنددیواره کربنی بر خواص خستگی پلیمر پایه تأثیرگذار بود که با توجه به نتایج، استحکام خستگی نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵٪ از نانولوله‌های چنددیواره کربنی نسبت به پلیمر پایه افزایش یافته است. این در حالی است که استحکام خستگی نانوکامپوزیت حاوی ۱٪ از نانولوله‌های چنددیواره نسبت به پلیمر پایه کاهش جزیی یافته و در نهایت، استحکام خستگی نانوکامپوزیت ۱/۵٪ تغییر ملموسی نسبت به استحکام خستگی پلیمر پایه نداشته است.

اگر نمونه‌ای آزمایشی از یک ماده یا یک قطعه مهندسی در معرض یک تنش متناوب کاملاً شدید قرار گیرد، یک ترک خستگی یا آسیب دیگری گسترش می‌یابد و منجر به تخریب کامل عضو می‌شود. در صورتی که تست در یک تنش تراز بالاتر تکرار شود، مقدار سیکل‌های منجر به شکست، کمتر خواهند شد. نتایج چنین تست‌های حاصل از چندین تراز تنشی متفاوت می‌تواند به‌منظور فراهم‌کردن منحنی تنش-عمر ترسیم شوند [17].

شکل ۹ نمونه نانوکامپوزیتی را در هنگام انجام تست خستگی و بسته‌شده بین دو فک دستگاه نشان می‌دهد.

برای داده‌های حاصل از تست و توصیف نمودار S-N حاصل می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود [24]:

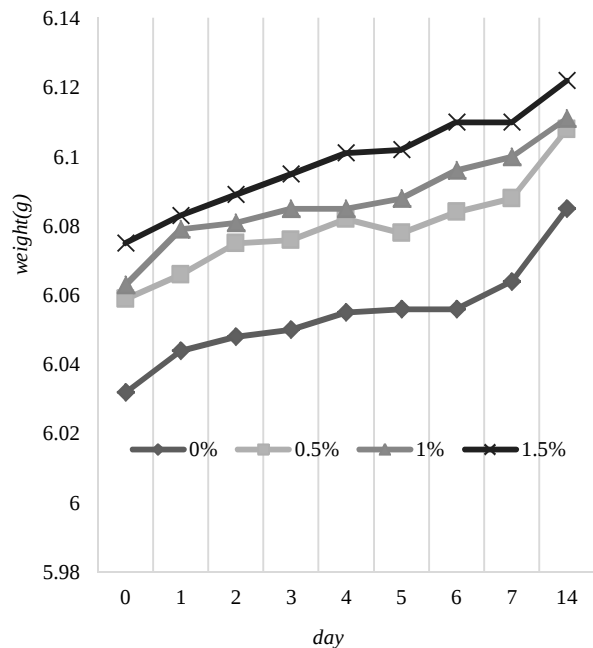
$$\sigma_a = A \cdot N_f^B \quad (5)$$

که A و B مقادیری هستند که به‌وسیله نتایج تست و رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^B \quad (6)$$

مقدار B از رابطه ۶ محاسبه می‌شود، سپس با قراردادن آن در رابطه ۵ مقدار A نیز به دست می‌آید.

نمودار ۲، منحنی S-N حاصل از نتایج آزمون خستگی را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۰، مقطع شکست نمونه حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد که در تصویر محل ایجاد و رشد ترک خستگی و در نهایت محل شکست ترد نمونه به‌خوبی مشخص بوده که در همه نمونه‌های تست‌شده، این پدیده به‌خوبی قابل مشاهده است.



نمودار ۹) نتایج آزمون جذب آب

جدول ۳) تغییرات وزن نمونه‌های آزمون جذب آب

تغییرات وزن	درصد نانولوله‌های کربنی
۰/۰۰۸۸	۰
۰/۰۰۸۱	۰/۵
۰/۰۰۷۹	۱
۰/۰۰۷۷	۱/۵

۳-۳- خستگی

تست خستگی با شرایط گفته‌شده روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی انجام گرفت که نتایج حاصل در جدول ۴ نشان داده شده است. مود خستگی به‌کاررفته در تست، کششی بود. بدین معنی که دامنه تغییرات تنش نمونه‌ها بین تنش بیشینه اعمالی و صفر است. نمونه‌ها در سه تراز تنشی ۱۵، ۲۲ و ۳۰ مگاپاسکال مورد آزمایش قرار گرفتند، به‌طوری که نیرو از صفر تا تنش بیشینه به‌طور مثبت (کشش) تغییر می‌کرد. شکل ۸، نوع و شکل بارگذاری انجام‌گرفته در تست خستگی را نشان می‌دهد.

جدول ۴) نتایج حاصل از تست خستگی

نمونه (درصد)	بارگذاری (مگاپاسکال)	فرکانس بارگذاری (هرتز)	تعداد سیکل شکست
۰	۱۵	۴	۳۳۴۵۲
۰	۳۰	۴	۱۰
۰	۲۲	۴	۵۰۴۹
۰/۵	۱۵	۴	۳۸۶۴۳
۰/۵	۱۵	۴	۳۳۸۹۴
۰/۵	۳۰	۴	۲۵۰
۰/۵	۲۲	۴	۶۲۵۱
۱	۱۵	۴	۳۱۰۵۲
۱	۱۵	۴	۲۰۷۹
۱	۳۰	۴	۳۰
۱	۲۲	۴	۴۵۳۵
۱/۵	۱۵	۴	۳۳۲۹۵
۱/۵	۳۰	۴	۱۴۸
۱/۵	۳۰	۴	۱۰۰
۱/۵	۲۲	۴	۴۷۲۸

پلیمر پایه افزوده شده بود، به طور تجربی بررسی شد که نتایج حاصل به شرح زیر بیان می شوند:

- ۱- حضور نانولوله های چنددیواره کربنی در زمینه پلیمری باعث کاهش جذب آب در نمونه های نانوکامپوزیتی شد.
- ۲- با افزایش درصد نانولوله ها در زمینه پلیمری، میزان جذب آب کمتر شد.
- ۳- عمر خستگی نانوکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی از نانولوله های چنددیواره کربنی نسبت به پلیمر پایه بهبود یافت.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: علی ابراهیمزادگان (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)؛ اصغر محمدپور فتاحی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)

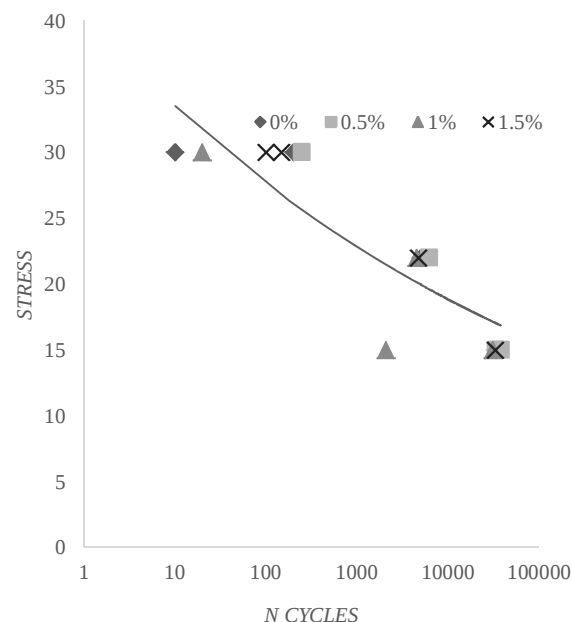
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- 1- Fuad MYA, Hanim H, Zarina R, Mohd-Ishak ZA, Hassan A. Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites-effects of processing techniques and maleated polypropylene compatibiliser. eXPRESS Polymer Letter. 2010;4(10):611-620.
- 2- Sahebhan S, Zebarjad SM, Sajjadi SA. The effect of temperature and nano-sized calcium carbonate on tensile properties of medium density polyethylene. Iranian Journal of Polymer Science and Technology. 2008;21(2):133-140. [Persian]
- 3- Bhattacharya SN, Gupta RK, Kamal MR. Polymeric nanocomposites, theory and practice. Munich: Carl Hanser Verlag; 2007.
- 4- Kong X, Chakravarthula SS, Qiao Y. Evolution of collective damage in a polyamide 6-silicate nanocomposite. International Journal of Solids and Structures. 2006;43(20):5969-5980.
- 5- Banks-Sills L, Guy Shiber D, Fourman V, Eliazi R, Shlayer A. Experimental determination of mechanical properties of PMMA reinforced with functionalized CNTs. Composites Part B: Engineering. 2016;95:335-345.
- 6- Alizadeh N, Safi M, Yousefi AA. PMMA/CB and PMMA/MWCNTs nanocomposites: Assessments through optical behavior. Iranian Journal of Polymer Science and Technology. 2012;25(4):255-263. [Persian]
- 7- Mahmoodi M, Arjmand M, Sundararaj U, Park S. The electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of injection molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites. Carbon. 2012;50(4):1455-1464.
- 8- Wang JY, Zhang JY, Shi XH. Experiment research of environment effect on mechanical properties of PMMA. Applied Mechanics and Materials. 2013;387:208-211.
- 9- Ormsby R, McNally T, O'Hare P, Burke G, Mitchell C, Dunne N. Fatigue and biocompatibility properties of a poly(methyl methacrylate) bone cement with multi-walled carbon nanotubes. Acta Biomaterialia. 2012;8(3):1201-1212.
- 10- Lin Y, Xu YZ. Incorporation of MWCNTs to PMMA bone cements: Effects on fatigue properties. Advanced Materials Research. 2014;971-973:1013-1016.
- 11- Huang A, Yao W, Chen F. Analysis of fatigue life of PMMA at Different frequencies based on a new damage



شکل ۹) نمونه نانوکامپوزیتی درون دستگاه تست خستگی



نمودار ۲) منحنی تنش - عمر حاصل از نتایج آزمون خستگی



شکل ۱۰) تصویر مقطع شکست نمونه نانوکامپوزیتی

۴- نتیجه گیری

تأثیر نانولوله های چنددیواره کربنی بر جذب آب و عمر خستگی پلی متیل متاکریلات که در نمونه های نانوکامپوزیتی حاوی صفر، ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی از نانولوله ها به روش قالب گیری تزریقی به

- Materials. 2013;387:212-215.
- 18- Zhang M, Wang X, Fu X, Xia Y. Performance and anti-wear mechanism of CaCO_3 nanoparticles as green additive in poly-alpha-olefin. *Tribology International*. 2009;42(7):1029-1039.
- 19- N'Diaye M, Pascaretti-Grizon F, Massin P, Baslé MF, Chappard D. Water absorption of poly(methyl methacrylate) measured by vertical interference microscopy. *Langmuir*. 2012;28(31):11609-11614.
- 20- Li MC, Ge X, Cho UR. Mechanical performance, water absorption behavior and biodegradability of poly(methyl methacrylate)-modified starch/SBR biocomposites. *Macromolecular Research*. 2013;21(7):793-800.
- 21- Nozad Bonab A, Mohsenzadeh R, Sayyed Noorani MR. Experimental study on the water absorption and tribological properties of PA6/ CaCO_3 Nanocomposites. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(5):108-114. [Persian]
- 22- Unemori M, Matsuya Y, Matsuya S, Akashi A, Akamine A. Water absorption of poly(methyl methacrylate) containing 4-methacryloxyethyl trimellitic anhydride. *Biomaterials*. 2003;24(8):1381-1387.
- 23- Heintze SD, Monreal D, Rousson V. Fatigue resistance of denture teeth. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016;53:373-383.
- 24- Dowling NE. *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th Edition. New Jersey: Pearson Prentice Hall; 2013.
- mechanics model. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014;2014:352676.
- 12- Navidfar A, Azdast T, Karimzad Ghavidel A. Influence of processing condition and carbon nanotube on mechanical properties of injection molded multi-walled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2016;133(31):43738-43747.
- 13- Fattahi AM, Najipour A. Experimental study on mechanical properties of PE/CNT Composites. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017;55(2):719-726.
- 14- Liu W, Yao X, Ma Y, Chen X, Guo G, Ma L. Prediction on fatigue life of U-notched PMMA plate. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2016;40(2):300-312.
- 15- Mohd-Ishak ZA, Kusmono K, Chow WS, Takeichi T, Rochmadi R. Effect of organoclay modification on the mechanical, morphology, and thermal properties of injection molded polyamide6/polypropylene/montmorillonite nanocomposites. PPS-24: the Polymer Processing Society 24th Annual Meeting; June 15-19, 2008, Salerno, Italy. Melville: Polymer Processing Society; 2008.
- 16- Abar F, Abadyan M, Aghazade J. Effects of surface quality and loading history on fatigue life of laser-machined poly(methyl methacrylate). *Materials and Design*. 2015;65:473-481.
- 17- Wang JY, Zhang JY, Shi XH. Study of fatigue properties of PMMA with typical damage. *Applied Mechanics and*