

## Investigating mechanical, electrical and morphological properties of polycarbonate/polyacrylonitrile-butadiene-styrene/nanographene nanocomposites

Msoud Sabet, Mohsen Najafi\*, Mehdi Haji Bagherian

Department of Polymer Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, P.O. Box 37195-1519, Qom, Iran

### Abstract

**Research subject:** Polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene alloy is one of the most widely used polymer alloys in the world, which has become very widespread due to the excellent properties and characteristics of these alloys as well as other advantages. However, it seems that strengthening the properties and efficiency of these alloys can increase their scope of application. Typically, polymers have a high resistance to the passage of electricity. In recent years, increasing the electrical conductivity or reducing the electrical resistance of polymers by using conductive nanoparticles has received much attention.

**Research approach:** For this purpose, first, alloys of polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene were prepared by melt mixing method and were tested and evaluated in terms of physical and mechanical properties, thermal properties and behavior of the melt. Next, by adding nanographene to the best alloy, the electrical, mechanical and morphological properties of nanocomposites were investigated. In order to increase the electrical conductivity of nanocomposites, different amounts of nanographene (1, 2 and 3%) were used.

**Main results:** By increasing the amount of polycarbonate, tensile strength and modulus, flexural strength and modulus, and HDT of the alloys increased. The results showed that the alloy with 68% polycarbonate generally has better properties than other alloys, so this alloy was considered as the polymer base of nanocomposites. The results of the mechanical test show an increase in the tensile strength and tensile modulus of the samples with an increase in the percentage of nanoparticles. Also, the examination of the electrical resistance of nanocomposites showed that in all samples, nanographene has been able to reduce the electrical resistance of the polymer to a very significant extent. By examining the mechanical and electrical properties of the samples, it was determined that the Percolation threshold of nanoparticles is equal to 2%. The FE-SEM images of the nanocomposites showed that the graphene nanoparticles were well dispersed in the polymer matrix and no traces of clumps or clusters resulting from the accumulation of nanoparticles were observed.

### key words

Polycarbonate

Acrylonitrile butadiene styrene

Nanocomposite

Graphene nanoparticles

Electrical resistance

\*To whom correspondence should be addressed:  
Najafi.m@qut.ac.ir

بررسی خواص مکانیکی، الکتریکی و ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌های  
پلی کربنات/پلی‌اکریلونیتریل - بوتادی‌ان - استایرن/نانوگرافن

مسعود پیروثابت، محسن نجفی\*، مهدی حاجی باقریان

قم، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۳۷۱۹۵-۱۵۱۹

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای  
سال هفتم، شماره ۱، نسخه ۱  
بهار ۱۴۰۲، صفحه ۷۲-۶۱

## چکیده

**موضوع تحقیق:** آلیاژ پلی کربنات/آکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن یکی از پرکاربردترین آلیاژهای پلیمری در جهان است که به دلیل خواص و ویژگی‌های ممتاز و مزایای دیگر بسیار فراگیر شده است. با این حال به نظر می‌رسد تقویت هر چه بیشتر خواص و کارایی این آلیاژها بتواند دامنه کاربرد آنها را گسترده‌تر از پیش کند. به‌طور معمول، پلیمرها مقاومت زیادی در برابر عبور جریان الکتریسیته دارند. در سال‌های اخیر افزایش هدایت الکتریکی یا کاهش مقاومت الکتریکی پلیمرها با استفاده از نانوذرات رسانا بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

**روش تحقیق:** به همین منظور ابتدا آلیاژهایی از پلی کربنات و آکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن به روش اختلاط مذاب تهیه و از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی، خواص گرمایی و رفتار مذاب مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه با افزودن نانوگرافن به بهترین آلیاژ، خواص الکتریکی، مکانیکی و ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها بررسی شد. به‌منظور افزایش هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها از نانوگرافن با مقادیر مختلف (۱، ۲ و ۳ درصد) استفاده شد.

**نتایج اصلی:** با افزایش مقدار پلی کربنات، استحکام و مدول کششی، استحکام و مدول خمشی و نیز HDT آلیاژها افزایش یافت. نتایج نشان داد که آلیاژ دارای ۶۸٪ پلی کربنات به‌طور کلی خواص بهتری نسبت به آلیاژهای دیگر دارد بنابراین این آلیاژ به‌عنوان بستر پلیمری نانوکامپوزیت‌ها در نظر گرفته شد. نتایج آزمون مکانیکی نشان‌دهنده افزایش استحکام کششی و مدول کششی نمونه‌ها با افزایش درصد نانوذرات است. همچنین بررسی مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها نشان داد که در همه نمونه‌ها نانوگرافن توانسته است مقاومت الکتریکی پلیمر را تا حد بسیار چشمگیری کاهش دهد. با بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی نمونه‌ها مشخص شد که آستانه نفوذ نانوذرات برابر ۲ درصد است. تصاویر FE-SEM نانوکامپوزیت‌ها نشان داد که نانوگرافن به‌خوبی در زمینه پلیمری پخش شده و اثری از حضور کلوخه یا خوشه‌های حاصل از تجمع نانوذرات مشاهده نشد.

## کلمات کلیدی

پلی کربنات  
آکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن  
نانوکامپوزیت  
نانوگرافن  
مقاومت الکتریکی

\*مسئول مکاتبات:

Najafi.m@qut.ac.ir

ABS، این آلیاژ در صنایع هوافضا و خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. همچنین خواص منحصر به فرد PC/ABS موجب مصرف آن در کاربردهای متنوع و گسترده از قبیل صنایع الکتریکی، لوازم خانگی و وسایل ورزشی شده است [۸]. مورفولوژی و خواص مکانیکی آلیاژ مذکور به وزن مولکولی PC، شرایط فرایندی، نوع، اندازه و واحدهای ساختاری ABS بستگی دارد. PC و ABS به لحاظ قطبیت با یکدیگر مشابه هستند که این موضوع شانس پایداری آلیاژ آن‌ها را بالا می‌برد [۹].

نانوکامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌هایی هستند که حداقل یکی از ابعاد ماده اضافه‌شونده در آن در محدوده یک تا صد نانومتر باشد که به‌عنوان تقویت‌کننده یا مواد پرکننده به‌منظور اهداف خاص از قبیل استحکام، مقاومت و هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و غیره در درون زمینه توزیع می‌شوند. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموماً دارای استحکام زیاد، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بسیار خوب و مقاومت شیمیایی بالایی هستند [۱۰]. عوامل مختلفی از جمله نوع نانوذره یا نانوذرات، نوع زمینه، میزان توزیع و وضعیت پخش تقویت‌کننده در زمینه، شرایط فرایندی، میزان بارگذاری ذرات، نسبت‌منظر، اصلاح سطحی، عامل‌دار کردن و غیره بر خواص نانوکامپوزیت‌ها مؤثرند [۱۱].

در بین خانواده ذرات تقویت‌کننده با ساختار کربنی، گرافن از بهترین خواص از جمله خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و غیره برخوردار است [۱۱]. در حال حاضر، روش‌های تولید گرافن با مقیاس بالا بر پایه ورقه‌ورقه‌شدن و نیز احیای اکسیدگرافیت است. در حقیقت، اکسیدگرافن توسط روش هامرز تولید می‌شود [۱۲]. اکسیدگرافن یکی از نانوپرکننده‌های صفحه‌ای از خانواده کربن است که به شکل صفحات جدا از هم از اسیدی شدن گرافیت به‌دست می‌آید و دارای مدول مکانیکی بسیار بالا و قابلیت رسانش گرمایی و الکتریکی مناسب است [۱۳]. از جمله مهم‌ترین خواص گرافن‌ها قابلیت هدایت الکتریکی آن‌ها بوده و از تعیین‌کننده‌ترین فاکتورها در این خصوص نسبت‌منظر آن است؛ هر چقدر این ذرات نسبت‌منظر بالاتری داشته باشند، برای تشکیل شبکه هدایت الکتریکی در یک آمیزه، نیاز به استفاده از مقادیر کمتری از آن در آمیزه است [۱۰]. برای رسیدن به کمترین میزان آستانه تداخل هدایت الکتریکی، ذره در فصل مشترک دو فاز تشکیل‌دهنده آلیاژ قرار می‌گیرد که به نظر می‌آید بیشترین برهم‌کنش بین ذره و زمینه‌های آلیاژ اتفاق می‌افتد. موقعیت قرارگیری ذرات تقویت‌کننده به‌خودی‌خود وابسته به چسبندگی فصل مشترک، زمان اختلاط و شرایط اختلاط است. فاکتور مؤثر دیگر وضعیت پخش گرافن در زمینه‌های آلیاژ است که در بعضی موارد برای بهبود میزان پراکنش ذرات در زمینه‌های آلیاژ به روش عامل‌دار کردن ذرات و به این واسطه بیشتر

پلی‌کربنات (Polycarbonate, PC) پلیمری خطی و گرمانرم است که حجم بزرگ و برهم‌کنش گروه‌های فنیل در زنجیره اصلی باعث کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمری می‌شود. این امر باعث افزایش مقاومت حرارتی و گراندرویی بالای این پلیمر می‌شود. تحرک‌پذیری و انعطاف‌پذیری کم زنجیره‌های پلیمری از ایجاد ساختار بلوری جلوگیری می‌کند و ساختار آمورف این پلیمر باعث شفافیت و عبورپذیری بالای نور و پایداری ابعادی بالای آن می‌شود [۱]. با این حال استفاده از PC با محدودیت‌هایی نیز همراه بوده است که از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به آب‌گریزی بسیار بالا، عملکرد شیمیایی نسبتاً ضعیف، حساسیت به شکاف و نرمی نسبی اشاره کرد [۲].

آکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) متشکل از آکریلونیتریل، بوتادی‌ان و استایرن است که در میان اجزای ABS، آکریلونیتریل جزئی است که مقاومت شیمیایی و پایداری در برابر شرایط آب‌وهوایی را در پلیمر ایجاد می‌کند. بوتادی‌ان نیز موجب چقرمگی و استایرن سبب شفافیت، فرایندپذیری و مزیت‌های اقتصادی می‌شود. تغییر ترکیب درصد اجزا در این ترپلیمر می‌تواند محدوده وسیعی از کاربردها را برای آن ایجاد کند. ABS از استحکام بالایی در محدوده حرارتی ۴۰- تا ۷۱ درجه سانتی‌گراد برخوردار است. این پلیمر در برابر الکل‌ها و هیدروکربن‌های آلیفاتیک مقاوم است، پایداری ابعادی خوبی داشته و براق است؛ از استحکام و سفتی خوبی برخوردار است و برخلاف PC در برابر شکاف حساس نیست. خواص مکانیکی این گرمانرم به‌طور کلی از پلیمرهای مهندسی پایین‌تر است و دمای تغییرشکل در اثر حرارت این پلیمر زیر ۱۰۰ °C است [۳].

فناوری آلیاژهای پلیمری یکی از زمینه‌های اصلی تحقیق و توسعه در علم پلیمر در چند دهه گذشته بوده است که با استفاده از آن می‌توان کاربردهای هر پلیمر را تا حد زیادی افزایش داد [۴]. آلیاژ ترکیبی از مواد است که در حوزه مهندسی و تولید پلیمر، به معنی ترکیب پلیمرها با هدف ایجاد خواص مطلوب در آن‌هاست. آلیاژهای پلیمری به‌دلیل سهولت فرایند، وزن کم، قیمت مناسب و نسبت خواص به وزن مناسب خود از اهمیتی ویژه برخوردارند. عمده موارد مصرف آلیاژها، در صنایع خودرو، بسته‌بندی و لوازم خانگی است [۵]. افزودن مقداری از ABS به PC منجر به بهبود فرایندپذیری و مقاومت به ضربه PC و هم‌چنین کاهش هزینه نهایی می‌شود [۲]. به عبارتی مقاومت شیمیایی، فرایندپذیری و قابلیت چکش‌خواری آلیاژ به واسطه ABS و مقاومت به اشعه UV، مقاومت در برابر شعله، سفتی، کاهش وزن و سازگاری محیط‌زیست به واسطه PC بهبود می‌یابد [۶]. به‌دلیل چقرمگی بالای آلیاژ PC/

پتروشیمی قائد بصیر ایران با نام تجاری ABS-50 است. نانوگرافن PDR-200-N ساخت شرکت Global graphene group آمریکا که به صورت تک‌لایه بوده و ضخامت لایه‌ها برابر ۲ nm - ۰/۳۵ تخمین زده شده است، برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به منظور افزایش پایداری نمونه‌ها از آنتی‌اکسیدان ایرگانوکس ۱۰۱۰ و ایرگافوس ۱۶۸ استفاده شد. از عامل اتصال ۶۶۴۸ به منظور افزایش سازگاری میان فازهای ABS و PC موجود در آلیاژها بهره گرفته شد. همچنین موم ABS-g-MA به منظور بهبود فرایندپذیری آمیزه‌ها به کار گرفته شد.

## ۲-۲ دستگاه‌ها

استحکام ضربه آیزود نمونه‌ها توسط دستگاه آزمون ضربه ساخت شرکت سنتام مدل SIT-20E ارزیابی شد. به منظور شکاف‌دار کردن نمونه‌ها از دستگاه ناچزن شرکت سنتام مدل BHO-CA بهره گرفته شد. فرایندپذیری نمونه‌ها توسط دستگاه آزمون MFI مدل SMF-300 ساخت شرکت سنتام در دمای ۲۵۰ °C و وزنه ۲/۱۶ kg بررسی شد. به منظور تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه‌شده، دستگاه کشش مکانیکی مدل STM-20 شرکت سنتام با سرعت ۵۰ mm/min و در دمای محیط استفاده شد. دمای HDT یا دمای تغییرشکل خمشی تحت بار یک پلیمر، معیاری از پایداری یا مقاومت حرارتی پلیمر تحت بار یا خزش عملی بر نمونه است. در این آزمون افزایش دما با سرعت ۱۲۰ °C بر ساعت صورت می‌گیرد و آنقدر فرایند را ادامه می‌دهیم تا به مقدار تغییرشکل مطابق استاندارد برسیم. دمایی که به این تغییرشکل رسیدیم را به عنوان دمای HDT گزارش می‌کنیم. به این آزمون از دستگاه HDT/VICAT دیجیتال، مدل SHV-303، شرکت سنتام استفاده شد.

از میکروسکوپ الکترونی پویشی گسیل میدانی مدل Mira3 محصول شرکت Tescan جمهوری چک برای بررسی ریخت‌شناسی پلیمرها و آمیزه‌های پلیمری بهره گرفته شد.

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی (DC) نانوکامپوزیت‌ها تحت شرایط استاندارد ASTM D257 در آزمایشگاه مؤسسه اندیشه برتر میران با دستگاه Electrostatic Discharge انجام پذیرفته است.

## ۲-۳ روش‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها از دستگاه مخلوط‌کن داخلی Rheosens ساخت پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران با ظرفیت حجمی ۶۰ cc در دمای ۲۳۰ °C و مدت زمان اختلاط حدود ۶ دقیقه استفاده شد. در دو دقیقه ابتدایی به ترتیب PC، سپس مخلوط افزودنی‌ها و در ادامه ABS به مخلوط‌کن داخلی که سرعت چرخش روتورها آن روی مقادیر ۳۰ rpm تنظیم شده بود اضافه

کردن میزان چسبندگی اتصال فصل مشترک ذرات با زمینه‌های آلیاژ اقدام می‌کنند [۹].

وی‌جی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ به بررسی خواص مکانیکی PC/ABS در حضور نانوگرافن با درصدهای وزنی ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ با استفاده از روش چاپگر (FDM) (Fused deposition modelling) پرداختند. با افزودن نانوگرافن، استحکام کششی به‌طور خطی در ترکیب افزایش می‌یابد و در ۰/۸ درصد وزنی نانوگرافن در این آزمون، استحکام کششی نسبت به PC/ABS خالص ۵۷٪ افزایش می‌یابد. هم‌چنین آن‌ها دریافتند که با افزودن نانوگرافن مقاومت ضربه افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد [۱۴]. گابریل و همکاران به مطالعه خواص مکانیکی ترکیب (۸۵/۱۵) PC/ABS در حضور انیدریدمالئیک پیوند شده به ABS و نانوگرافن با ۳ و ۵ درصد وزنی پرداختند. در این پژوهش مشخص شد که افزودن نانوگرافن باعث افزایش سفتی، مدول و استحکام کششی ترکیب‌ها می‌شود که مربوط به پراکندگی همگن نانوگرافن در پلیمر و ایجاد تعامل خوب بین فازها است [۱۵]. در پژوهش دیگری نانوکامپوزیت PC/ABS (۷۰/۳۰) در مقادیر مختلف ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نانوگرافن به روش اختلاط مذاب در اکسترودر دوپیچه تهیه شد. مشخص شد که تا ۳ درصد وزنی نانوگرافن در ترکیب پایداری حرارتی افزایش قابل توجهی یافته است. مشخص است که با افزودن نانوگرافن، نانوکامپوزیت دارای دمای بالاتر و پایداری بیشتر و نرخ تخریب کمتری نسبت به نمونه خالص PC/ABS است [۱۶]. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ اکسیدگرافن را به روش هامر تهیه کرده و سپس آن را به سه روش شیمیایی، حرارتی و مایکروویو احیا کرده و با افزودن آن به کوبلیمر PC-ABS نانوکامپوزیت تهیه کردند. اکسیدگرافن احیاشده به روش شیمیایی پایداری حرارتی کامپوزیت را بهبود بخشید و اکسیدگرافن احیاشده به روش حرارتی در زمینه تقویت مکانیکی مناسب‌تر و اکسیدگرافن احیاشده به روش مایکروویو بهترین هدایت الکتریکی را موجب شد [۱۷].

هدف از پژوهش حاضر ابتدا یافتن ترکیب درصد مناسب از آلیاژ PC و ABS و در ادامه بهبود خواص مکانیکی در کنار کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها با افزودن نانوگرافن است که برای اولین بار این پژوهش و آزمون‌ها در مقیاس صنعتی و با جنبه کاربردی در تولید قطعات صنایع خانگی انجام شده است.

## ۲ تجربی

### ۲-۱ مواد

پلی‌کربنات با چگالی ۱/۲ g/cm<sup>۳</sup> از شرکت آیتک پلیمر با نام تجاری PGPC ۱۰۱۲ تهیه شد. آکریلونیتریل بوتادیان استایرن استفاده‌شده در این پژوهش از

جدول ۱ ترکیب درصد نمونه‌های تهیه شده  
Table 1. Composition of the prepared samples

Samples	PC	ABS	Coupling	Antioxidant 1010	Antioxidant 168	Wax
PC100	100	0	0	0	0	0
ABS100	0	100	0	0	0	0
PC68	68	28	3	0.2	0.4	0.4
PC48	48	48	3	0.2	0.4	0.4
PC28	28	68	3	0.2	0.4	0.4

شدند و پس از آن سرعت چرخش روتورها را به ۶۰ rpm افزایش داده شد تا گشتاور نشان داده شده به مقدار ثابتی برسد. این اتفاق برای نمونه‌های مختلف پس از حدود ۴ دقیقه رخ داد. جدول ۱ ترکیب درصد نمونه‌های تهیه شده را نشان می‌دهد.

ABS و کاهش صلبیت ناشی از کاهش مقدار PC است [۵]. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در آزمون خمشی نیز به مانند آزمون کششی، پلی‌کربنات خالص دارای بیشترین مقدار استحکام و کرنش است. در آلیاژها نیز با افزایش مقدار ABS، مقادیر استحکام خمشی و کرنش خمشی کاهش یافته که این امر به دلیل مدول و مقاومت خمشی پایین ABS است. در نتیجه با افزایش مقدار ABS در آلیاژهای تهیه شده، مقادیر استحکام خمشی و کرنش خمشی کاهش یافته است.

آزمون شاخص جریان مذاب (MFI) شکل ۱ مقادیر شاخص جریان مذاب نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقایسه شاخص جریان مذاب نمونه‌ها نشان می‌دهد که ABS دارای شاخص جریان مذاب به مراتب

### ۳ نتایج و بحث

#### ۱-۳ بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها

جدول ۲ نتایج آزمون کشش مکانیکی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت پلی‌کربنات خالص دارای استحکام کششی بیشتری نسبت به ABS خالص است. با افزایش درصد ABS، مقادیر استحکام کششی و کرنش تسلیم آلیاژها کاهش یافته است که دلیل آن افزایش انعطاف‌پذیری ناشی از افزایش مقدار

جدول ۲ نتایج آزمون کشش مکانیکی نمونه‌ها

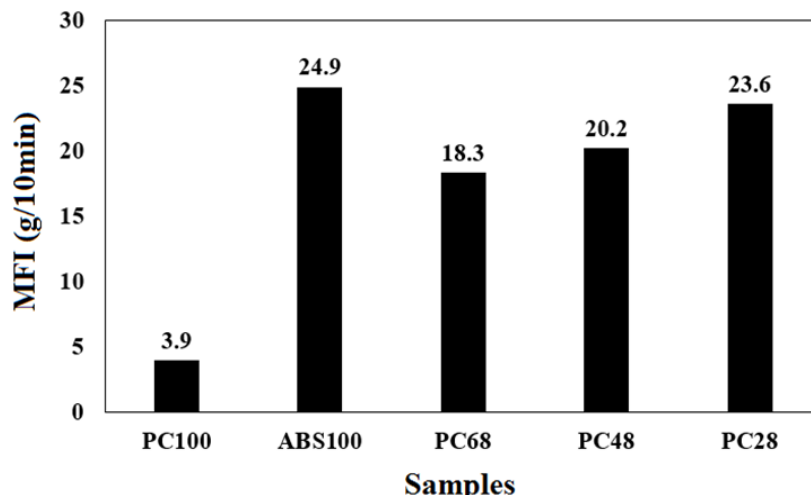
Table 2. Mechanical tensile test results of samples

Samples	Tensile Strength (MPa)	Yield Strain (%)
PC100	59.9	6.1
ABS100	42.5	2.3
PC68	51.5	4.4
PC48	47.5	3.6
PC28	43.4	2.5

جدول ۳ نتایج آزمون خمش مکانیکی نمونه‌ها

Table 3. Mechanical bending test results of samples

Samples	Bending Strength (MPa)	Bending Strain (%)
PC100	84.7	7.8
ABS100	62.5	5.2
PC68	77.9	6.5
PC48	71.6	6.1
PC28	66	5.6



شکل ۱ مقادیر شاخص جریان مذاب نمونه‌ها  
Figure 1. Melt flow index values of the samples

به ABS است؛ چرا که دمای خمش گرمایی PC100 و ABS100 به ترتیب برابر ۱۲۴/۳ °C و ۷۵/۹ °C است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ABS، دمای خمش گرمایی آلیاژها کاهش یافته است. با توجه به اینکه HDT نشان‌دهنده سفتی پلیمر است، دلیل کاهش HDT در اثر افزودن ABS را می‌توان افزایش انعطاف‌پذیری و تحرک‌پذیری زنجیره‌ها دانست که با آزمون مکانیکی مطابقت دارد.

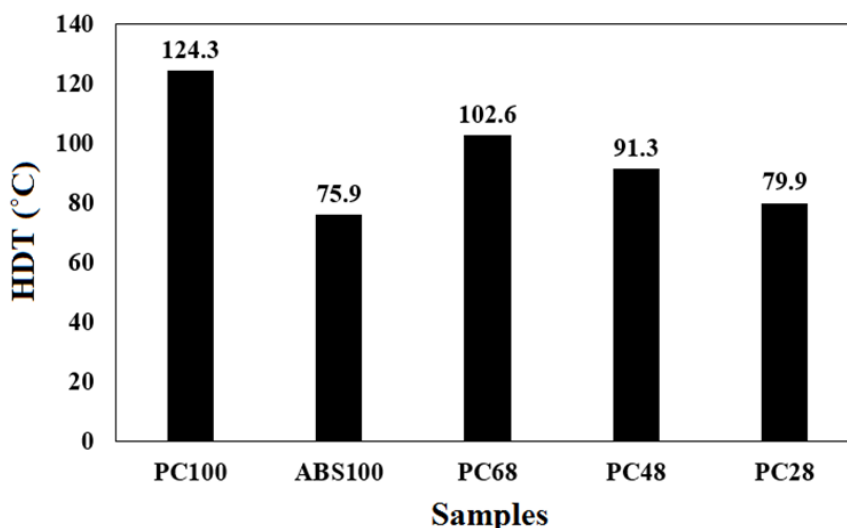
### ۳-۳ استحکام ضربه آلیاژها در دو حالت بدون شکاف و شکاف‌دار

مقادیر استحکام ضربه آلیاژها در دو حالت شکاف‌دار و بدون شکاف اندازه‌گیری شد. نمونه‌های بدون شکاف استحکام ضربه بسیار عالی از خود نشان دادند به گونه‌ای که هیچ‌کدام از نمونه‌ها (نه پلیمرهای خالص و نه آلیاژها) دچار شکستگی نشدند. شکل ۳

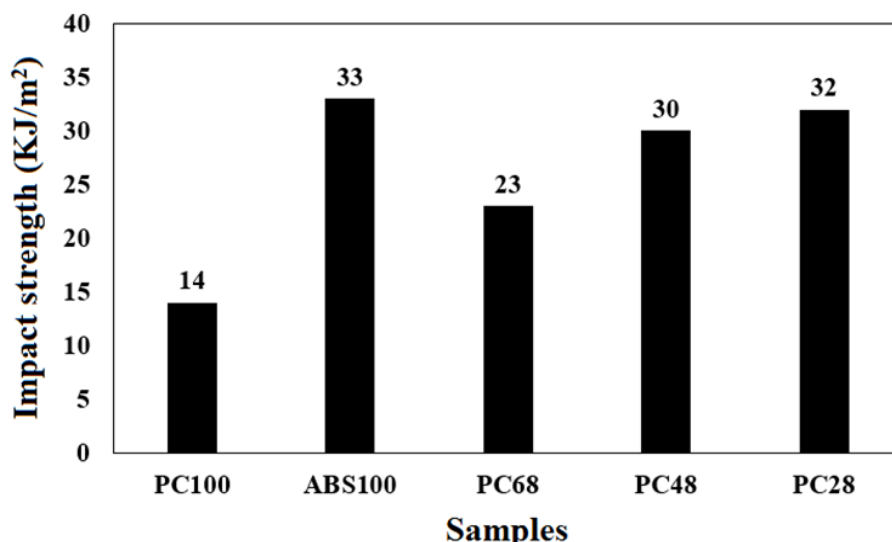
بالاتری نسبت به PC است؛ دلیل این امر گرانبوی بالای PC است که یکی از نقایص PC نیز به شمار می‌آید. این بدین معنی است که ABS فرایندپذیری بهتری نسبت به PC دارد [۴،۵]. با افزایش مقدار ABS در نمونه‌ها، گرانبوی آلیاژ کاهش یافته در نتیجه مقدار MFI افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده فرایندپذیری بهتر آلیاژهای تهیه‌شده در مقایسه با پلی‌کربنات خالص است.

### ۳-۲ دمای خمش گرمایی نمونه‌ها (HDT)

دمای خمش گرمایی پلیمرها یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین حداکثر دمایی است که یک پلیمر می‌تواند با حفظ خواص خود خدمت‌رسانی کند. اساساً این پارامتر سفتی یک پلیمر در دمای بالا را نشان می‌دهد [۱۸،۱۹]. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود PC دارای خواص گرمایی بهتری نسبت



شکل ۲ دمای خمش گرمایی نمونه‌ها  
Figure 2. Heat deflection temperature of samples



شکل ۳ استحکام ضربه آلیاژها  
Figure 3. Impact strength of alloys

الکتریکی آمیزه انتخاب‌شده با افزودن نانوگرافن تأثیر آن و مقدار بهینه برای این منظور مشخص شود. جدول ۴ ترکیب درصدهای انتخابی نانوکامپوزیت‌ها تهیه و بررسی شده را نشان می‌دهد. فرایند تهیه نانوکامپوزیت‌ها نیز مشابه با شرایط و رویه اتخاذ شده برای آلیاژها بوده است. با ذکر این نکته که نانوگرافن به‌عنوان آخرین جزء و پیش از افزایش سرعت چرخش روتورها به ۶۰ rpm به مخلوط‌کن اضافه شد.

### ۳-۴ بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها

حضور نانوذرات درون پلیمرها، در صورت توزیع و پخش مناسب یا عدم ناسازگاری چشمگیر با بستر پلیمری می‌تواند موجب بهبود قابل توجه خواص مکانیکی به‌خصوص استحکام کششی و مدول پلیمرها شود [۲۰-۲۲]. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، حضور نانوگرافن موجب افزایش مدول کششی و استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه

مقادیر استحکام ضربه نمونه‌ها در حالت شکاف‌دار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ABS۱۰۰ مقاومت به ضربه بالاتری نسبت به PC۱۰۰ دارد و در نمونه‌های آلیاژی نیز با افزایش مقدار ABS، استحکام ضربه افزایش یافته است که نشان‌دهنده بهبود ضربه‌پذیری این آلیاژها در اثر افزودن ABS است. دلیل این رفتار انعطاف‌پذیری و قابلیت چکش‌خواری بهتر ABS نسبت به PC و به‌خاطر وجود دسته‌های انعطاف‌پذیر بوتادی‌انی در بدنه زنجیرهای ABS بوده، که باعث می‌شود با افزایش مقدار ABS در آلیاژها، جذب انرژی حاصل از وارد کردن ضربه افزایش یافته و نمونه‌ها مقاومت به ضربه بالاتری را از خود نشان دهند.

با بررسی آزمون‌های مکانیکی، ضربه و MFI نمونه‌های تهیه‌شده و نمونه‌های شاهد، رفتار نسبتاً خطی و بینابینی در خواص و ویژگی‌های بررسی‌شده

جدول ۴ ترکیب درصد نانوکامپوزیت‌های تهیه‌شده  
Table 4. Composition of prepared nanocomposites

Samples	PC68	Nanographene
N-G1	99	1
N-G2	98	2
N-G3	97	3

با آلیاژ PC۶۸ گشته است. همچنین افزایش درصد نانوگرافن موجب افزایش استحکام کششی و مدول نانوکامپوزیت‌ها شده است. با این حال نرخ افزایش این پارامترها وقتی که درصد نانوذرات از ۱٪ به ۲٪ افزایش پیدا می‌کند، بیشتر از زمانی است که از ۰٪ به ۱٪ و از ۲٪ به ۳٪ افزایش می‌یابد. بنابر این مشاهده می‌توان ادعان داشت که مقدار مناسب و احتمالاً آستانه همپوشی (Percolation threshold) نانوگرافن

برای نمونه‌های آلیاژی با ترکیب درصد متفاوت در مقایسه با نمونه PC و ABS مشاهده می‌شود که این رفتار به‌طور غیرمستقیم بیانگر سازگاری خوب اجزای این آمیزه‌های تهیه‌شده است. در ادامه با توجه به خواص مکانیکی و فرایندپذیری مدنظر، نمونه PC۶۸ به‌عنوان نمونه با خواص مطلوب برای زمینه نانوکامپوزیت‌ها انتخاب شد. به‌منظور بهبود خواص

جدول ۵ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها  
Table 5. Mechanical properties of nanocomposites

Samples	Tensile Strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)
PC68	51.5	2529
N-G1	56.4	2752
N-G2	69.6	3240
N-G3	71.2	3421

پیوسته استحکام کششی و مدول نانوکامپوزیت‌ها در حضور درصدهای مختلف نانوگرافن، نشان می‌دهد که روش فرایندی به‌کاررفته در این پژوهش توانسته است نانوگرافن را در حد خوبی پخش و توزیع کند؛ چرا که در صورت عدم توزیع و پخش مناسب، نانوذرات تشکیل کلوخه و خوشه می‌دهند و نه تنها خواص زمینه پلیمری را بهبود نمی‌دهند، بلکه موجب افت آن نیز می‌شوند.

نکته دیگری که باید به آن توجه داشت این است که همانند تأثیر مشاهده‌شده از افزودن نانوگرافن به آلیاژ بر پایه PC/ABS بر روی خواص کششی نمونه‌ها، در اینجا هم افزایش مقدار نانوگرافن از ۱٪ تا ۲٪ کاهش

برای ماتریسی از جنس آلیاژ PC/ABS حاوی ۶۸٪ وزنی PC مقداری در حدود ۲٪ وزنی است. پساگوت و همکاران [۲۳] هم که نانوگرافن را بدون هیچ اصلاح شیمیایی، برای بهبود خواص زمینه‌ای از پلی‌اتر اتر کتون (PEEK) استفاده نمودند، مقدار ۲٪ نانوگرافن را برای رسیدن به آستانه نفوذ این نانوذرات در نانوکامپوزیت و رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب گزارش کردند.

### ۳-۵ تغییرات مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها با تغییر درصد نانوذرات

جدول ۶ مقادیر مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها در حضور مقادیر مختلف از نانوگرافن را نشان می‌دهد. هر

جدول ۶ تأثیر نانوگرافن بر مقاومت الکتریکی آلیاژ PC68  
Table 6. The effect of nanographene on the electrical resistance of PC68 alloys

Samples	Electrical resistance ( $\Omega$ )
PC68	$> 10^{11}$
N-G1	$10^5 - 10^{10}$
N-G2	$10^3 - 10^4$
N-G3	$10^3$

بسیار چشمگیرتری را برای مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نسبت به افزایش مقدار آن از ۰٪ تا ۱٪ و از ۲٪ به ۳٪ به همراه داشته است. بنابراین می‌توان مجدد ادعا کرد که مقدار مناسب و احتمالاً آستانه نفوذ نانوگرافن برای این آلیاژ در حدود ۲٪ است. در مطالعه دیگری نیز نشان داده شده که آستانه نفوذ نانوگرافن در آلیاژهای PC/ABS برای خواص الکتریکی بیش از ۱٪ وزنی از این نانوذرات است [۲۴].

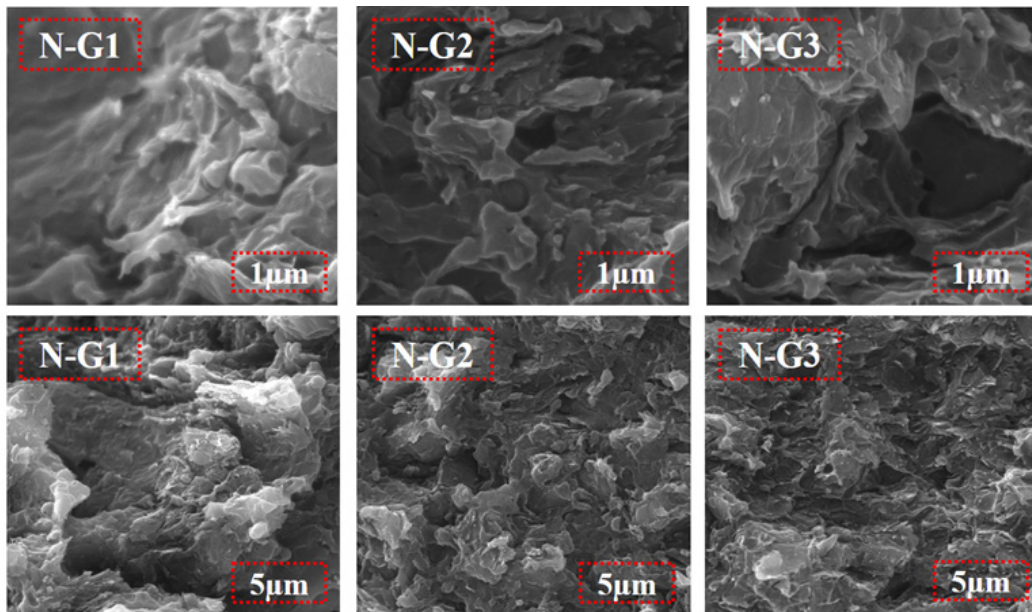
### ۳-۶ تصاویر ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها

بنابر آزمون‌های انجام‌شده باید انتظار داشت که توزیع و پخش نانوگرافن درون نانوکامپوزیت‌های N-G1 و N-G2 بهتر از توزیع و پخش این مواد درون نانوکامپوزیت N-G3 باشد. تصاویر موجود در شکل‌های ۴ و ۵ که ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها را در بزرگمایی‌های مختلف نشان می‌دهد، تأییدی بر آزمون‌های انجام شده است؛ چرا که در هیچ یک از این تصاویر اثری از خوشه‌ها و کلوخه‌های قابل‌رؤیت، دیده نمی‌شود.

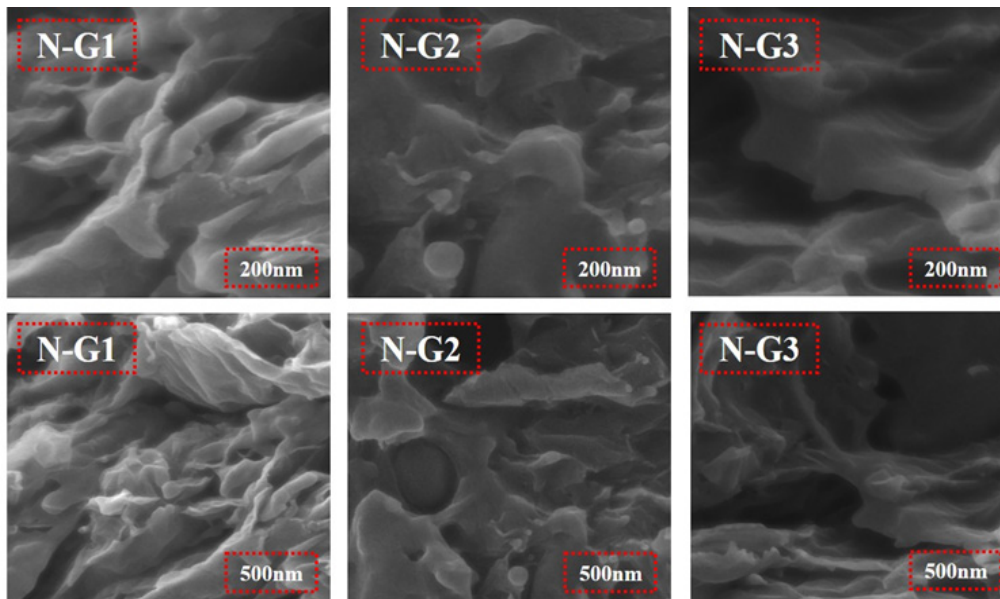
چه مقاومت الکتریکی ماده‌ای پایین‌تر باشد، رسانش الکتریکی آن بالاتر است. بر اساس اطلاعات عنوان‌شده در استاندارد ASTM-D257، موادی که مقاومت الکتریکی آن‌ها در بازه‌ی  $10^4 - 10^3 \Omega$  است، دارای حد قابل‌قبولی از رسانایی هستند. همچنین موادی که مقاومت الکتریکی آن‌ها در بازه‌های  $10^{10} - 10^5 \Omega$  باشد، نیمه‌رسانا هستند. از سوی دیگر، موادی که مقاومت الکتریکی بزرگتر از  $10^{11} \Omega$  داشته باشند نارسانا به شمار می‌آیند.

بر همین اساس و نیز بر پایه اطلاعات حاصله از جدول ۵ می‌توان گفت که نمونه‌های N-G2 و N-G3 دارای حد قابل‌قبولی از رسانایی الکتریکی هستند. همچنین می‌توان نمونه‌ی N-G1 را به‌عنوان نیمه‌رسانا شناخت. افزون بر این، آلیاژ PC68 با دارا بودن مقاومت الکتریکی بیشتر از  $10^{11} \Omega$  نارسانا به‌شمار می‌رود. بنابراین نانوگرافن توانسته است به خوبی موجب کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها و در نتیجه افزایش رسانش الکتریکی آن‌ها شوند. این نکته، در کنار افزایش





شکل ۴ تصاویر FE-SEM گرفته‌شده از سطح شکسته‌شده نانوکامپوزیت‌ها با بزرگنمایی‌های  $1\ \mu\text{m}$  و  $5\ \mu\text{m}$   
 Figure 4. FE-SEM images taken from the fractured surface of nanocomposites with magnifications of  $1\ \mu\text{m}$  and  $5\ \mu\text{m}$



شکل ۵ تصاویر FE-SEM گرفته‌شده از سطح شکسته‌شده نانوکامپوزیت‌ها با بزرگنمایی‌های  $200\ \text{nm}$  و  $500\ \text{nm}$   
 Figure 5. FE-SEM images taken from the fractured surface of nanocomposites with magnifications of  $200\ \text{nm}$  and  $500\ \text{nm}$

#### ۴ نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ابتدا آلیاژهایی از PC و ABS با ترکیب درصدهای گوناگون با روش اختلاط مذاب ساخته شدند و در ادامه خواص فیزیکی و مکانیکی، رفتار مذاب و خواص گرمایی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در آلیاژها نیز تقریباً همگام با افزایش مقدار PC استحکام و مدول کششی، استحکام و مدول خمشی و نیز HDT آلیاژها افزایش یافت. با توجه به نتایج آزمون‌ها، نانوکامپوزیت‌هایی از آلیاژ PC۶۸

افزون بر این، به نظر می‌رسد که نانوکامپوزیت N-G۲ نسبت به نانوکامپوزیت N-G۱ دارای ریخت‌شناسی ریزتر و نرم‌تری است. شاید بتوان این مشاهده را به تأثیر مثبت حضور نانوذرات بر ریخت‌شناسی قطره-ماتریس PC۶۸ ارتباط داد؛ چرا که دیده شده است حضور نانوذرات در فصل مشترک آلیاژها می‌تواند مانع از درشت و زیر شدن ریخت‌شناسی آلیاژها و نیز کاهش ابعاد فاز قطره آلیاژها شود [۲۵].

خواص مکانیکی و الکتریکی نمونه‌ها نشان داد که آستانه نفوذ نانوذرات برابر ۲ درصد است. نتایج حاصل از تحلیل تصاویر FE-SEM نانوکامپوزیت‌ها نشان داد که نانوگرافن به خوبی در ماتریس پلیمری پخش شده‌اند؛ چرا که اثری از حضور کلوخه یا خوشه‌های حاصل از تجمع نانوذرات مشاهده نشد.

نانوگرافن با مقادیر ۱، ۲ و ۳ درصد با روش اختلاط مذاب ساخته شد. نتایج آزمون مکانیکی نشان داد که در نانوکامپوزیت‌ها با افزایش درصد نانوذرات، استحکام کششی و مدول کششی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. افزون بر این، نتایج سنجش مقاومت الکتریکی نانوذرات نشان دادند که حضور نانوگرافن می‌تواند نمونه را از ماده‌ای کاملاً نارسانا به ترتیب به ماده نیمه‌رسانا و ماده‌ای با رسانایی قابل قبول تبدیل کند. همچنین

## مراجع

- [1] Krache R. and Debah I., Some Mechanical and Thermal Properties of PC/ABS Blends, *Materials Sciences and Applications*, 2 (5), 404-410, 2011.
- [2] Kausar A., A Review of Filled and Pristine Polycarbonate Blends and Their Applications, *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 34 (1), 60-97, 2018.
- [3] Tasdemir M., Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene/Polycarbonate blends with Styrene-Butadiene-Styrene block copolymer, *Journal of Applied Polymer Science*, 93 (6), 2521 - 2527, 2004.
- [4] Robeson L. M., *Polymer Blends: A Comprehensive Review*, Hanser, Munich, First Edition, 172-179, 2007.
- [5] Thomas S., Shanks R. and Chandrasekhara-kurup S., *Design and Applications of Nanostructured Polymer Blends and Nanocomposite Systems*, Elsevier, Oxford, First Edition, 15-38, 2016.
- [6] Pawlowski K. H. and Schartel B., Flame Retardancy Mechanisms of Triphenyl Phosphate, Resorcinol Bis(Diphenyl Phosphate) and Bisphenol A Bis(Diphenyl Phosphate) in Polycarbonate/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Blends, *Polymer International*, 56 (11), 1404-1414, 2007.
- [7] Hentati F., Barhoumi N. and Khelifi K., Characterization of the Surface Properties and Adhesion Behavior of Electroplated PC/ABS Using Nano-Indentation and Scratch Tests, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37(25), 1724-1735, 2022.
- [8] dos Anjos E. G. R., Vieira L. S., Marini J. and Brazil T. R., Influence of Graphene Nanoplates and ABS-g-MAH on the Thermal, Mechanical, and Electromagnetic Properties of PC/ABS Blend, *Journal of Applied Polymer Science*, 139(3), 51500, 2021.
- [9] Sun Y., Guo Z. X. and Yu J., Effect of ABS Rubber Content on the Localization of MWCNTs in PC/ABS Blends and Electrical Resistivity of the Composites, *Macromolecular Materials and Engineering*, 295 (3), 263-268, 2010.
- [10] Ghasemi I., Minaei Zaeim M. and Riahi-zhad M., *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Second Edition, 2-4, 2016.
- [11] Guo B., Tang Z. and Zhang L., Transport Performance in Novel Elastomer Nanocomposites: Mechanism, Design and Control, *Progress in Polymer Science*, 61, 29-66, 2016.
- [12] Cui Y., Kundalwal S. I. and Kumar S., Gas Barrier Performance of Graphene/Polymer Nanocomposites, *Carbon*, 98, 313-333, 2016.
- [13] Yarahmadi E., Didehban K., Shabaniam M. and Saeb M. R., Assessing the Crosslinking Behavior of Nanocomposites based on Epoxy and Starch-Modified Graphene Oxide Nanosheets Potent to be Applied as Engineering Coatings, *Applied Research in Chemical - Polymer Engineering*, 1(1), 61-70, 2017.
- [14] Tambrallimath V., Keshavamurthy R., Bavan S., Patil A., Yunus Khan T. M., Badruddin I. A. and Kamangar S., Mechanical Properties of PC-ABS-Based Graphene-Reinforced Polymer Nanocomposites Fabricated by FDM Process, *Polymers*, 13 (17), 2951, 2021.
- [15] dos Anjos E. G. R., Vieira L. D. S., Marini J., Brazil T. R., Gomes N. A. S., Rezende M. C. and Passador F. R., Influence of Graphene Nanoplates and ABS-g-MAH on the Thermal, Mechanical, and Electromagnetic Properties of PC/ABS Blend, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (3), 51500, 2022.
- [16] Pour R. H., Hassan A., Soheilmoghaddam M. and Cheraghi Bidsorkhi H., Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Graphene Reinforced Polycarbonate/Acrylonitrile Butadiene Styrene Nanocomposites, *Polymer Composites*, 37(6), 1633-1640, 2016.
- [17] Li Y., Wang A., Meng L. and Jiang N., Preparation of Graphene and its Application in Polycarbonate/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Composites, *Journal of Polymer Engineering*, 38(4), 399-407, 2018.
- [18] Andrzejewski J., Mohanty A. K. and Misra M., Development of Hybrid Composites Reinforced with Biocarbon/Carbon Fiber System, The Comparative Study for PC, ABS and PC/ABS Based Materials, *Composites Part B: Engineering*, 200, 108319, 2020.
- [19] Takemori M. T., Towards an Understanding of the Heat Distortion Temperature of Thermoplastics, *Polymer Engineering & Science*, 19 (15), 1104-1109, 1979.
- [20] Abubakar A. M., Biryani F. and Demirelli

K., Electrical Properties, Characterization, and Preparation of Composite Materials Containing a Polymethacrylate with  $\alpha$ -Naphthyl Side Group and Nanographene Fillers, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34 (1), 102-125, 2021.

[21] Rissanou A. N., Bacova P. and Harmandaris V., Investigation of the Properties of Nanographene in Polymer Nanocomposites through Molecular Simulations: Dynamics and Anisotropic Brownian Motion, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21, 23843-23854, 2019.

[22] Alipour A., Giffney T., Lin R. J. T. and Jayaraman K., Effects of Matrix Viscosity on Morphological and Rheological Properties and the Electrical Percolation Threshold in Graphene/Epoxy Nanocomposites, *eXPRESS Polymer Letters*, 15 (6), 541-553, 2021.

[23] Han C. D., *Rheology and Processing of Polymeric Materials: Volume 1: Polymer Rheology*, Oxford University Press, Oxford, First Edition, 547-614, 2007.

[24] Dal Lago E., Cagnin E., Boaretti C. and Roso M., Influence of Different Carbon-Based Fillers on Electrical and Mechanical Properties of a PC/ABS Blend, *Polymers*, 12 (1), 29, 2020.

[25] Hemmati M., Shariatpanahi H., Fereidoon A., Aalaie j. and Ghorbanzadeh Ahangari M., Study of a Polymer Blend/Nanoclay Nanocomposite of Polyethylene and Polyamide 6 Prepared by Mechanical Blending, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51 (1), 80-85, 2012.