



## ساخت و مقایسه خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات کربنات کلسیم

محمدجواد انصاری<sup>1</sup>، بهزاد جباری پور<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 28598، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 آبان 1397

پذیرش: 15 اسفند 1397

ارائه در سایت: مهر 1398

### کلیدواژگان:

الیاف کربن

نانوذرات کربنات کلسیم

تست کشش

تست خمش

تست ضربه

در تحقیق جاری، جهت ساخت نانو کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات کربنات کلسیم، گرانول پلی پروپیلن با درصدهای مشخصی از سازگار کننده مالئیک آنیدرید و نانو کربنات کلسیم، به دستگاه اکسترودر تغذیه و گرانول آمیخته خروجی اکسترودر، داخل قالبی تحت پرس گرم قرار گرفت. بعد از تولید ورق‌های رزین از این گرانولها، آنها به صورت ساندویچی مابین صفحات پارچه‌ای الیاف کربن لایه‌چینی و پرس گرم می‌شوند و نمونه‌های نانو کامپوزیتی آماده می‌شود. پس از تهیه نمونه‌های استاندارد آزمونه‌های کشش، خمش و ضربه از هر دو نوع کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن حاوی نانوذرات و فاقد نانوذرات، آزمونه‌های مکانیکی بر روی آنها انجام شد. نتایج نشان داد که نمونه کامپوزیتی حاوی نانو کربنات کلسیم 87% استحکام کششی بیشتر، 26% استحکام خمشی بیشتر و 40% استحکام ضربه بیشتر، نسبت به کامپوزیت فاقد نانوذرات دارا می‌باشد. سازگار کننده مالئیک آنیدرید به سبب تشکیل کوپلیمر پلی پروپیلن-کربنات کلسیم، منجر به بهبود یکنواختی ترکیب و افزایش چسبندگی بین فازهای پلی پروپیلن و نانوکربنات کلسیم می‌شود. به علت بالاتر بودن مدول الاستیسیته نانوذرات در مقایسه با زمینه پلی پروپیلن و همچنین خاصیت جوانه‌زنی احتمالی نانو ذرات در زمینه پلیمری، استحکام کلی نمونه نانوکامپوزیتی افزایش یافته است، همچنین به علت متقارن بودن شکل نانوذرات شبه‌کروی کربنات کلسیم، این ذرات در جهات مختلف خواص همسانگرد دارند و منجر به افزایش میزان بلورینگی در زمینه پلیمری و استحکام نانوکامپوزیت می‌شود. پراکندگی نانوذرات در زمینه پلی پروپیلن باعث می‌شود انرژی ضربه وارد شده در تمام مقطع پخش و در نتیجه، قابلیت جذب انرژی، پیش از شکست افزایش یابد.

## Manufacture and Comparison of Mechanical Properties of Reinforced Polypropylene Nanocomposite with Carbon Fibers and Calcium Carbonate Nanoparticles

Mohammad Javad Ansari, Behzad Jabbaripour\*

Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 28598, Tehran, Iran, beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 17 November 2018  
Accepted 6 March 2019  
Available September 2019

### Keywords:

Carbon Fibers  
Calcium Carbonate Nano-particles  
Tensile Test  
Bending Test  
Impact Test

### Abstract

In current research, in order to manufacture reinforced polypropylene composite with carbon fibers and CaCO<sub>3</sub> nano-particles, polypropylene granules were fed to an extruder with specific percentages of maleic anhydride compatibilizer and calcium carbonate nano-particles and then extruded compound granules were hot-pressed inside a mold. After generating resin sheets from these granules, they were sandwiched between carbon fiber plain fabrics and heat-pressed, consequently samples of nano-composite are prepared. Standard mechanical tests of tensile, bending and impact were performed on prepared samples of both types of reinforced polypropylene composite with carbon fibers containing nano-particles and without nano-particles. Results showed that composite specimens containing calcium carbonate nano-particles endure 87% more tensile strength, 26% more bending strength and 40% more impact strength than specimens without nano-particles. The maleic anhydride compatibilizer, due to formation of polypropylene-calcium carbonate copolymer, improves the uniformity of the compound and increases adhesion between polypropylene and calcium carbonate phases. Because of higher elasticity modulus of nano-particle compared to the polypropylene matrix as well as the possible nucleation of nano-particles in the polymer matrix, the overall strength of the nano-composite sample has increased. Also due to the symmetric shape of the quasi-spherical calcium carbonate nano-particles, these particles have isotropic properties in different directions and lead to an increase in the level of crystallinity in the polymeric matrix and the strength of the nano-composite. The dispersion of nano-particles in the polypropylene base causes the impact energy to be spread across the whole cross-section and thus the energy absorption capacity increases before fracture.

### Please cite this article using:

M. J. Ansari, B. Jabbaripour, Manufacture and Comparison of Mechanical Properties of Reinforced Polypropylene Nanocomposite with Carbon Fibers and Calcium Carbonate Nanoparticles, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 1-12, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

برای تغییر دادن و بهینه کردن خواص فیزیکی و شیمیایی مواد، آن‌ها را با یکدیگر ترکیب یا اصطلاحاً کامپوزیت می‌کنند. دلیل عمده توسعه کامپوزیت‌ها این است که نمی‌توان هیچ ماده‌ای با ساختار یکنواخت پیدا نمود که تمام خواص مطلوب را دارا باشند. مزایای عمده کامپوزیت‌ها نسبت به سایر مواد مهندسی مرسوم، سبکی، استحکام بالا، توانایی شکل‌دهی، بادوام بودن ذاتی، مقاومت به خوردگی می‌باشد. در این میان، کامپوزیت‌های پلیمری بیشترین حجم استفاده را دارند [1]. در سالهای اخیر نانو تکنولوژی به یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقات در تکنولوژی‌های نوین بدل شده است. این دانش به درک رفتار جدید ذراتی با اندازه کمتر از 100 نانومتر می‌پردازد که به نانو ساختارهای ایجاد شده از آن ذرات، وابسته است. نانو تکنولوژی، علم طراحی، ساخت و کاربرد نانو ساختارها یا نانو مواد و بررسی ارتباط خواص مختلف مواد (فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی، الکتریکی و ...) با ابعاد نانومتری آنها می‌باشد. در بحث نانو مواد، نانو کامپوزیت‌ها اخیراً مورد مطالعه وسیعی قرار گرفته‌اند. از نانو ذرات می‌توان به عنوان ماده تقویت کننده در نانو کامپوزیت‌ها استفاده کرد. افزودن ذرات معدنی، فلزی و یا برخی ذرات آلی در ابعاد نانو به ماده زمینه می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی و فرایندپذیری شود. در حالت معمول وقتی به پلیمرها، تقویت کننده پودری اضافه می‌شود بر هم کنش خوبی بین تقویت کننده و پلیمر وجود ندارد. اما اگر ذرات تقویت کننده کوچک‌تر شوند، این بر هم کنش بیشتر می‌شود و در صورتی که اندازه این ذرات در حد اتم یا مولکول باشد خاصیت تقویت‌کنندگی به حداکثر میزان ممکن می‌رسد. نانو کامپوزیت‌ها، به کامپوزیت‌هایی که حداقل یکی از ابعاد فاز پراکنده در آن در مقیاس نانو باشد، اطلاق می‌شود. آمیخته حاصل، می‌تواند مجموعه‌ای از خواص مطلوب هر یک از اجزای تشکیل دهنده در ترکیب را دارا باشد و یا خواص جدید و منحصر به فردی که در مواد سازنده ترکیب موجود نمی‌باشد را ایجاد می‌کند [2].

ظاهر شدن نانو تکنولوژی، پتانسیل لازم برای افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی در مواد پلیمری را فراهم می‌کند که سبب کاهش ضریب انبساط حرارتی، افزایش سفتی، استحکام و مقاومت حرارتی، بدون کاهش استحکام ضربه‌ای می‌شود [2]. نانو کامپوزیت‌های پلیمری توان بالقوه زیادی را در نشان دادن خواص ویژه نسبت به کامپوزیت‌های پلیمری رایج دارا می‌باشند. کامپوزیت‌های رایج برای دستیابی به خواص مکانیکی و گرمایی مطلوب معمولاً به مقدار زیادی فاز پرکننده غیرآلی (10 تا 50

درصد وزنی) نیازمند هستند، در حالی که نانو کامپوزیت‌ها با 3 تا 5 درصد پرکننده، به خواص مشابهی، مانند مدول کششی و مدول خزشی بهبود یافته، دست می‌یابند [3]. در نانو کامپوزیت‌های پلیمری، انواع مختلفی از پرکننده‌ها با ابعاد نانو به کار گرفته شده‌اند که از میان آن‌ها می‌توان به نانو الیاف مانند نانولوله‌های کربنی، سیلیکات‌های لایه‌ای مانند خاک رس و نانوذرات همسانگرد از قبیل کربنات کلسیم اشاره نمود [4]. پلی‌پروپیلن به علت فرایند پذیری خوب، مقاومت بالا در برابر جذب رطوبت، مقاومت شیمیایی خوب، قیمت مناسب، توان عملیاتی بالا و در دسترس بودن، یکی از پرکاربردترین پلیمرهای موجود است. علاوه بر این، پلی‌پروپیلن دارای خواصی از قبیل وزن مخصوص کم، سطح مقاوم در برابر خراش، مقاومت ضربه عالی، مقاومت حرارتی و شیمیایی خوب می‌باشد. با این وجود، پلی‌پروپیلن دارای نقاط ضعفی نیز می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به انقباض نسبتاً بالا و مقاومت کششی نسبتاً پایین اشاره کرد [5]. برای بهبود و تقویت برخی خواص پلیمرها، موادی را به آن‌ها اضافه می‌کنند. این مواد شامل الیاف تقویت کننده شیشه، کربن، کولار و الیاف طبیعی و ذرات معدنی همچون گرافیت و یا کربنات کلسیم می‌باشند. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن دارای ترکیبی از سفتی و استحکام عالی در عین داشتن چگالی پایین هستند. به طور کلی تقویت زمینه با استفاده از الیاف کربنی، مقادیر کرنش‌ها را کاهش داده و سبب افزایش مقاومت کششی و چقرمگی شکست می‌گردد [6]. موادی که در مقیاس نانو در نانو کامپوزیت‌ها به کار می‌روند سه شکل مختلف می‌توانند داشته باشند، که عبارتند از ذرات شبه‌کروی، مانند کربنات کلسیم، موادی که استوانه‌ای شکل هستند، مانند نانو لوله‌های کربنی و موادی که صفحه‌ای شکل هستند و تنها در یک بعد در مقیاس نانو هستند و در دو جهت دیگر در مقیاسه با ضخامت، ابعاد خیلی بزرگتری دارند، مانند رس و سیلیکات‌های لایه‌ای [7]. به طور کلی نانو ذرات شبه‌کروی دارای خواصی از قبیل افزایش چقرمگی به دلیل مکانیزم حفره‌زایی، خاصیت هسته‌زنی بلوری، همسانگرد بودن رفتار آن در جهات مختلف و خاصیت روان‌کنندگی می‌باشند [8، 9]. نانوذرات کربنات کلسیم پوشش داده شده، ذرات بسیار ریزی به شکل شبه‌کروی می‌باشند که سطح آن‌ها با اسید استئاریک، پوشش داده شده است. علت این پوشش‌دهی کاهش برهم‌کنش ذرات با یکدیگر و جلوگیری از پدیده کلوخه‌ای شدن نانوذرات می‌باشد. کربنات کلسیم رسوبی، نوعی کربنات کلسیم سنتزی می‌باشد که می‌تواند در ساختارهای بلوری متفاوت به

کششی، خمش و ضربه در مقایسه با PP خالص شود [4]. مطلبی و همکاران اثر افزودن نانوکربنات کلسیم را بر خواص مکانیکی و شاخص جریان مذاب PA6، مطالعه و نشان دادند که افزودن نانو کربنات کلسیم همراه با سازگار کننده مالئیک آنیدرید PP-g-MAH سبب افزایش قابل توجه مقاومت ضربه‌ای و MFI در نانوکامپوزیت PA6/CaCO<sub>3</sub> می‌شود [15]. شلش‌نژاد و همکاران، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های PA6/PP/CaCO<sub>3</sub> را بررسی کردند. افزودن سازگار کننده PP-g-MAH به PA6/PP باعث بهبود چسبندگی PA6 و PP به یکدیگر و افزایش استحکام کششی، درصد ازدیاد طول، مقاومت خمشی و ضربه‌ای نسبت به PA6/PP می‌شود. افزودن نانوکربنات کلسیم به PA6/PP/PP-g-MAH سبب افت جزئی در استحکام کششی اما باعث افزایش مدول کشسانی تا حدود 10 درصد بیشتر از PA6 خالص می‌شود. بیشترین استحکام کششی در نمونه دارای 5 جز وزنی نانوکربنات کلسیم مشاهده شد. به طوری که استحکام خمشی تا 16 درصد در مقایسه با PA6 خالص افزایش یافت. افزودن نانوکربنات کلسیم تا 7/5 جز وزنی، سبب افزایش مقاومت ضربه‌ای تا حدود 29 درصد در مقایسه با PA6 خالص می‌شود [16].

رایت و همکاران، الیاف تقویت کننده پارچه‌ای کربن را به صورت پیش‌فرم با صفحات ماتریس ترموپلاست پلی‌پروپیلن اشباع (Pre-Preg) نمودند و نمونه کامپوزیت نهایی را به روش پرس گرم تولید کردند. آنها سپس خواص مکانیکی نمونه‌ها مانند مقاومت خمشی و کششی را بررسی کردند و اظهار داشتند که افزایش یکنواختی توزیع پلی‌پروپیلن در زمینه منجر به افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها می‌گردد [17]. پولوپولو و همکاران نمونه‌های کامپوزیتی را با کمک الیاف شیشه از پیش آغشته شده (Pre-preg) به رزین ترموست اپوکسی ساختند. آنها نمونه‌های لوله‌ای شکل ساخته شده را تحت تستهای فشار هیدرواستاتیک خارجی به منظور بررسی شکست و کمانش قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که زاویه پیچش و لایه‌چینی الیاف در ساخت نمونه‌های لوله‌ای شکل بسیار اهمیت دارد و مکانیزم شکست و کمانش نمونه‌ها تحت تست هیدرواستاتیک بسیار وابسته به نحوه لایه چینی الیاف تقویت کننده می‌باشد [18].

بر طبق آخرین اطلاع نویسندگان تحقیق جاری، ساخت نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات کربنات کلسیم تاکنون توسط هیچ محقق دیگری گزارش نشده است و تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده در سطح بسیار محدود بوده است، به این صورت که در راستای ساخت

شکل بلورینه درآید [10]. یکی از این خواص مهم نانوذرات کربنات کلسیم خاصیت هسته‌زایی آنها است که در مقیاس میکرون چنین خواصی را در زمینه پلیمری ندارد. مطالعات نشان می‌دهد که اثر هسته‌زایی کربنات کلسیم (با حدود 10 درصد وزنی) بر روی پلی‌پروپیلن، می‌تواند مدول استحکام نانوکامپوزیت حاصل را 85 درصد و مقاومت ضربه‌ای را تا 300 درصد افزایش دهد. همچنین افزودن 15 درصد حجمی از نانو ذرات به پلی‌پروپیلن، باعث کاهش اندازه گویچه‌ها از حدود 40 میکرون به 20 میکرون شده است [11].

در یک مطالعه تجربی توسط زبرجد و همکاران، مشخص شد که افزودن مقادیر مختلف کربنات کلسیم (تا 20 درصد وزنی) به پلی‌پروپیلن، منجر به کاهش تنش تسلیم و افزایش ازدیاد طول تا شکست می‌شود، در حالی که مدول الاستیسیته را افزایش می‌دهد. تنش تسلیم، مدول الاستیسیته و ازدیاد طول تا شکست به طور عمده‌ای به اصلاح سطحی کربنات کلسیم، سازگار بودن و چسبندگی بین زمینه و مواد پرکننده بستگی دارد [12]. گوان و همکاران به مطالعه استحکام شکست کامپوزیت‌های PP/CaCO<sub>3</sub> و PP/CaCO<sub>3</sub>/PP-g-MAH پرداختند. آنها اظهار کردند که سطح ویژه شکست برای کامپوزیت‌های PP/CaCO<sub>3</sub> پایین‌تر از PP خالص بوده است. مقادیر سطح ویژه شکست برای کامپوزیت‌های ترکیبی PP/CaCO<sub>3</sub>/PP-g-MAH در مقایسه با PP خالص افزایش جزئی داشته است، اما با افزایش مقدار PP-g-MAH دوباره کاهش یافته است [13]. ژانگ و همکاران، اثر افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت PP/CaCO<sub>3</sub> را بررسی کردند. در نتیجه این بررسی، مقدار کمی افزایش در مدول و کاهش در استحکام تسلیم نانو کامپوزیت‌ها در حضور نانو ذرات کربنات کلسیم مشاهده شد. افزودن 1.5 درصد وزنی اصلاح‌کننده غیر یونی به کامپوزیت CaCO<sub>3</sub>/PP (15/85) تغییر زیادی در خواص مدول و مقاومت کامپوزیت نداشته است، اما افزایش چشمگیری در انرژی ضربه کامپوزیت‌ها داشته است [11]. وان‌تادو و همکاران اثر پلی‌پروپیلن را بر روی خواص مکانیکی و جذب آب کامپوزیت پلی‌پروپیلن و پلی‌آمید تقویت شده با الیاف کربن بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزودن پلی‌پروپیلن، استحکام کششی به دلیل قابلیت ذوب پایین در تزریق افزایش می‌یابد [14]. فواد و همکاران، اثر وجود نانوکربنات کلسیم در زمینه PP را بر خواص مکانیکی و گرمایی نانوکامپوزیت PP/CaCO<sub>3</sub> آزمایش کرده و نشان دادند که به کارگیری نانوذرات همراه با PP-g-MAH نه تنها بر رفتار تبلور زمینه اثر می‌گذارد، بلکه می‌تواند منجر به بهبود استحکام

تقویت‌کننده موجود در کامپوزیت با زمینه پلی‌پروپیلن، از سازگار کننده پلی‌پروپیلن پیوند خورده با مالئیک آنیدرید<sup>4</sup> PP-g-MAH استفاده می‌شود. سازگار کننده استفاده شده در این تحقیق محصول شرکت اکسون موبایل چیمیکال<sup>5</sup> آمریکا با نام تجاری Exxelor PO 1020 می‌باشد. در جدول 4، مشخصات سازگار کننده پلی‌پروپیلن ترکیب شده با مالئیک آنیدرید نشان داده شده است.

جدول 1 مشخصات فنی پلی‌پروپیلن (HP552R(Z69S) [22]

استاندارد	واحد	اندازه	خواص
ASTM D1238	gr/10min	25	شاخص جریان مذاب
ASTM D1505	gr/cm <sup>3</sup>	0/9	چگالی
ASTM D790	MPa	1500	مدول خمشی
ASTM D638	MPa	32	استحکام کششی
ASTM D638	%	13	درصد ازدیاد طول
ASTM D256	J/m	30	مقاومت ضربه (ایزود ناچ‌دار در 23 °C)
ASTM D785	Kg/m <sup>2</sup> (Rscale)	100	سختی (راکول)
ASTM D1525	°C	152	نقطه نرم‌شدگی (10 N)
ASTM D3012	hours	150	سرعت پیری کوره‌ای (در 150°C)

جدول 2 مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف کربن 200 plain [23]

Table 2 Physical and mechanical properties of carbon fiber, plain 200 [23]

مقدار	خواص
0/2 mm	ضخامت
200 g/m <sup>2</sup>	وزن
1/76 g/cm <sup>3</sup>	چگالی
230 GPa	مدول کششی
3530 MPa	استحکام کششی
1/7%	درصد کشیدگی
0/0015 Ω	مقاومت الکتریکی

جدول 3 مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانوذرات کربنات کلسیم [24]

Table 3 Physical and mechanical properties of calcium carbonate [24]

مقدار	خواص
80 nm	متوسط اندازه
0/3 g/cm <sup>3</sup>	چگالی توده‌ای
25 cm <sup>3</sup> /100g	جذب روغن
2/7 g/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص کریستالی
0/4 %	رطوبت
9/2	PH

<sup>4</sup> Maleic Anhydride

<sup>5</sup> Exxonmobil Chemical

کامپوزیت پلی‌پروپیلن تنها با الیاف تقویت کننده کربن و یا ساخت نانو کامپوزیت پلی‌پروپیلن با فقط نانوذرات کربنات کلسیم بوده‌اند [16، 19، 20]. در تحقیق فعلی پس از بیان دقیق فرایند ساخت و آماده‌سازی نمونه‌های کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و حاوی نانو ذرات کربنات کلسیم، خواص مکانیکی این نمونه‌ها با استفاده از آزمون‌های استاندارد کشش، خمش و ضربه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و با خواص مشابه نمونه‌های کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و فاقد نانوذرات مقایسه می‌شود.

## 2- مواد اولیه، ساخت نمونه‌های کامپوزیتی و آماده‌سازی

### نمونه‌های آزمون‌های خواص مکانیکی

#### 2-1- مواد اولیه

در این تحقیق از پلی‌پروپیلن نوع هموپلیمر محصول پتروشیمی جم با نام تجاری HP552R (Z69S) با شاخص جریان مذاب 25gr/10min به عنوان فاز زمینه استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی پلی‌پروپیلن به کار رفته در جدول 1 آمده است. همچنین از الیاف کربن پارچه‌ای نوع پلین<sup>1</sup>، با نام تجاری GG-200-P محصول شرکت آنجلونی<sup>2</sup> ایتالیا به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. وزن الیاف به کار برده شده 200 گرم در هر متر مربع می‌باشد. جدول 2، مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف کربن به کار برده شده را نشان می‌دهد. ذرات معدنی به کار رفته در این تحقیق، نانو ذرات کربنات کلسیم پوشش داده شده رسوبی می‌باشد. اندازه متوسط این ذرات در حدود 80 نانومتر، با نام تجاری CC-R، تولید شرکت امیا<sup>3</sup> کشور اتریش می‌باشد. در جدول 3، مشخصات فنی نانو ذرات کربنات کلسیم به کار برده شده نشان داده شده است. اکثر پلیمرها در شرایط عادی غیرقابل اختلاط با یکدیگر هستند و چسبندگی بین فازهای پلیمری مخلوط شده ضعیف خواهد بود. برای بهبود خواص این مخلوط‌ها از سازگار کننده استفاده می‌شود. سازگار کننده با کاهش تنش سطحی، امکان بوجود آمدن ساختار یکنواخت و ریزی را فراهم می‌کند. همچنین سازگار کننده با بهبود چسبندگی بین فازهای پلیمری در حالت جامد، امکان انتقال تنش بین فازها را فراهم کرده و باعث بهبود خواص مکانیکی مخلوط پلیمری می‌شود [21]. به دلیل ماهیت غیرقطبی پلی‌پروپیلن در پیوند خوردن با سایر مواد و به منظور سازگاری و چسبندگی بهتر این ماده با مواد

<sup>1</sup> Plain

<sup>2</sup> Angeloni

<sup>3</sup> Omya

بعد از خروج مذاب از نازل اکسترودر، در داخل مخزن آب سرد وارد شده تا به صورت رشته یا پروفیل نازک درآید. سپس با استفاده از دستگاه آسیاب با نام تجاری برابندر با سرعت 5/2 rpm این رشته خرد می‌شود. برخلاف کامپوزیت‌های لایه‌ای ترموست که معمولاً از حلالیت فاز زمینه زمینه در ماده سفت‌کننده ساخته می‌شود، ساخت کامپوزیت‌های زمینه ترموپلاستیک با توجه به ساختار شیمیایی آن‌ها، خاصیت تجدید در حرارت‌پذیری و فرایندپذیری، بدون ماده سفت‌کننده و معمولاً با حرارت دادن و سرد کردن امکان‌پذیر می‌باشد. به عبارت دیگر، چون ترموپلاستیک‌ها مواد هاردنر ندارند و از فرایندپذیری بالایی برخوردار هستند، روش‌های ذوبی به خوبی پاسخ‌گوی فرایندهای شکل‌دهی آنان می‌باشد. تارپانی و همکاران در یک مطالعه تجربی، پرس گرم را بهترین روش برای تولید کامپوزیت‌های زمینه ترموپلاستیک معرفی نمودند [26].

به منظور مقایسه و ارزیابی نسبی و عددی (کمی) خواص مکانیکی، دو نوع نمونه کامپوزیتی از گرانول‌های پلی‌پروپیلن حاوی نانو ذرات کربنات کلسیم و همچنین گرانول‌های فاقد نانو ذرات کربنات کلسیم ساخته شدند. پس از آماده‌سازی، گرانول‌ها با ترازوی دیجیتال وزن شده و آماده قراردادی در قالب پرس گرم شدند. پس از اندازه‌گیری وزن، گرانول‌ها به صورت دستی بر روی قالب فولادی ریخته می‌شود. اندازه قالب برای تولید لایه پلی‌پروپیلن حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و فاقد نانوذرات کربنات کلسیم 150×150 میلی‌متر با ضخامت 1 میلی‌متر همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، می‌باشد.

گرانول وزن شده مطابق شکل 2، بر روی صفحات فولادی دستگاه پرس گرم ریخته می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دو صفحه فولادی زیر و روی قالب جهت تعادل و یکنواختی حرارت‌دهی گذاشته خواهد شد. برای جلوگیری از چسبیدن گرانول‌ها به صفحه‌ها در زیر قالب، قبل از ریختن گرانول و روی قالب، بعد از ریختن گرانول از دو ورق پارچه نسوز و نجسب تفلون مطابق شکل 3، استفاده شده است.

سپس با استفاده از دستگاه پرس گرم محصول شرکت سنتام ایران، ورق 1 mm (ورق‌های حاوی کربنات کلسیم و همچنین فاقد کربنات کلسیم) در قالب‌هایی با ابعاد 150×150 mm برای انجام آزمون‌های خواص مکانیکی آماده‌سازی شدند. دو نوع گرانول پلی‌پروپیلن حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و فاقد نانو ذرات، درون دستگاه پرس گرم در دمای 190°C، تحت فشار 4 MPa و زمان 5 min به ورق 1 mm تبدیل گردیدند.

جدول 4 مشخصات فیزیکی و مکانیکی سازگار کننده [25]

Table 4 Physical and mechanical properties of compatibilizer [25]	
مقدار	خواص
پلی‌پروپیلن پیوندخورده با مالئیک آنیدرید	نام سازگار کننده
12 g/10min	شاخص جریان مذاب (MFI)
0/9 g/cm <sup>3</sup>	چگالی
160 °C	نقطه ذوب

## 2-2- فرایند ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

درصدهای وزنی و حجمی مورد نظر برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی (حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و فاقد نانوذرات) برای آزمون‌های خواص مکانیکی (کشش، خمش و ضربه) مطابق جدول 5 انتخاب شده است. درصدهای نانوذرات کربنات کلسیم و نیز مالئیک آنیدرید در ساخت نانوکامپوزیت تحقیق جاری با بررسی مقالات مشابه سایر محققان [16، 19، 20]، برحسب جزء وزنی در تعداد صد جزء رزین (Phr) انتخاب شدند.

ابتدا الیاف تقویت کننده کربن پارچه‌ای شکل، به ابعاد 150×150 میلی‌متر متناسب با ساخت لایه‌های کامپوزیت مورد نظر در تحقیق جاری، به صورت پیش‌فرم، برش خورد.

برای تهیه‌ی آمیخته ابتدا نانوذرات کربنات کلسیم در کوره برقی در شرایط خلا به مدت 60 دقیقه، در دمای 30 درجه سانتیگراد، رطوبت‌گیری شده است. به منظور ترکیب بهتر گرانول‌ها و همچنین گرانول‌سازی آمیخته مواد، بعد از رطوبت‌گیری نانو ذرات توسط کوره، با توجه به جدول 5، مواد مورد نظر (نانوذرات کربنات کلسیم، پلی‌پروپیلن و مالئیک آنیدرید)، وزن شده و به صورت مکانیکی با یکدیگر مخلوط شده‌اند. آمیخته‌های مخلوط شده با استفاده از دستگاه اکسترودر دو ماردون همسوگرد، با نام تجاری برابندر<sup>1</sup>، ساخت کشور آلمان، با قطر ماردون 20 mm و نسبت طول به قطر 40، به صورت مذاب، با هم ترکیب شدند.

جدول 5 درصدهای وزنی برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

Table 5 Weight percentages for manufacturing composite samples				
نوع کامپوزیت	تعداد لایه‌های پلی‌پروپیلن	تعداد لایه‌های الیاف کربن	درصد وزنی نانو کربنات کلسیم	درصد وزنی مالئیک آنیدرید
پلی‌پروپیلن + الیاف کربن	4 لایه	3 لایه	0	7 phr
پلی‌پروپیلن + الیاف کربن + نانوذرات کربنات کلسیم	4 لایه	3 لایه	4 phr	7 phr

<sup>1</sup> Brabender

ASTM D256، از هر دو نوع کامپوزیت ساخته شده پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و فاقد نانوذرات، با استفاده از دستگاه فرز CNC مدل MNC-S1000 ساخت شرکت آدایا و ابزار فرز انگشتی با قطر 6 میلی‌متری از جنس HSS، مطابق استاندارد، دوربری و آماده‌سازی شدند.

### 3- انجام و تحلیل آزمون کشش<sup>1</sup>

به منظور تعیین استحکام کششی ماده از آزمون کشش استفاده می‌شود. آزمون کشش آزمونی است که در آن نمونه تحت یک بار کششی تک محوره قرار می‌گیرد تا گسیخته شود. شکل 5-ا، نشان دهنده دستگاه آزمون کشش به کار رفته در این تحقیق، در حین تست نمونه‌ها می‌باشد. نمونه‌های آماده‌سازی شده کشش در بخش گذشته درون فک‌های بالا و پایین این دستگاه جاگذاری شده و تحت کشش قرار گرفت. شکل 5- الف، نمونه‌های تحت کشش قرار گرفته کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن (حاوی نانو ذرات کربنات کلسیم و فاقد نانوذرات) در دستگاه کشش را نشان می‌دهد.

در شکل 5- ب، نمونه فاقد نانوذرات بر اثر آزمون کشش و پس از اعمال نیروی کششی معینی دچار شکست شده و از هم گسیخته شده است. در صورتی که نمونه حاوی نانو ذرات مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد و تحت نیروی کششی به مراتب بالاتری دچار گسیختگی و شکست می‌شود. نمودارهای تنش- کرنش حاصل از اطلاعات خام آزمون‌های کشش (به فرمت خروجی اکسل<sup>2</sup>) برای نمونه‌های کامپوزیت حاوی نانوذرات و فاقد نانوذرات در شکل 6، ارائه شده است.

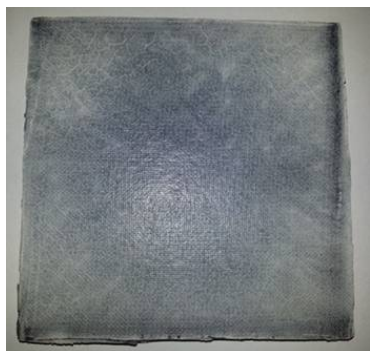


Fig. 4 Nano-composite sample of polypropylene reinforced by carbon fibers and containing calcium carbonate nano-particles

شکل 4 نمونه کامپوزیت ساخته شده پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و حاوی نانو ذرات کربنات کلسیم



Fig. 1 Applied steel mold with the dimensions of 150x150x1 mm

شکل 1 قالب 150x150 میلی‌متر با ضخامت 1 میلی‌متر فولادی به کار رفته

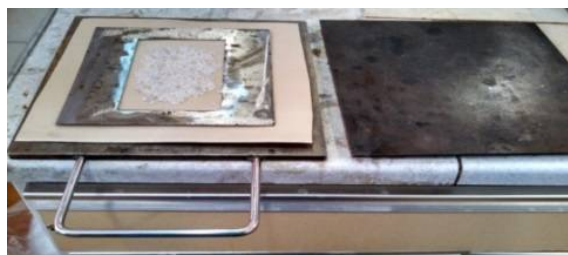


Fig. 2 Steel plains of hot-press machine

شکل 2 صفحه‌های فولادی دستگاه پرس گرم



Fig. 3 Applied Teflon fabric

شکل 3 پارچه تفلون به کار رفته

در مرحله بعد، دو نوع کامپوزیت مجزا که شامل 3 لایه الیاف کربن برش خورده و 4 لایه ورق پلی‌پروپیلن حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و فاقد کربنات کلسیم می‌باشد، برای مقایسه در آزمون‌های خواص مکانیکی، بر روی یکدیگر در قالب 3 میلی‌متری (به علت استناد به استانداردهای ASTM و اشاره شده در بخش بعد برای انجام آزمون‌های خواص مکانیکی که نیازمند ضخامت 3 mm برای تمام نمونه‌ها می‌باشند) لایه‌چینی می‌شوند. سپس درون دستگاه پرس گرم در دمای 190°C تحت فشار 4 MPa و زمان 8 min، آماده‌سازی می‌شوند که نمونه نهایی کامپوزیت ساخته شده پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و حاوی کربنات کلسیم، در شکل 4 نشان داده شده است.

### 3-2- آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد آزمون‌های مکانیکی

نمونه‌های استاندارد آزمون‌های کشش، خمش و ضربه (ایزود) به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D638، ASTM D790 و

<sup>1</sup> Tensile Test

<sup>2</sup> Excel

$S_{uts}$  حداکثر استحکام کششی،  $F_{max}$  بیشترین نیروی اعمالی و  $A_0$  سطح مقطع اولیه نمونه تحت کشش می‌باشد، می‌توان مقادیر استحکام (تنش) کششی هر نمونه کامپوزیتی را محاسبه کرد. با توجه استاندارد ذکر شده، سطح مقطع اولیه تحت کشش، مقطعی مستطیلی است با عرض 3 mm و طول 6 mm می‌باشد. با جاگذاری بیشترین مقادیر نیروها برای کامپوزیت حاوی نانوذرات در معادله (2) و کامپوزیت فاقد نانو ذرات در معادله (3) مقادیر متفاوتی بدست خواهد آمد. بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های کششی، حداکثر استحکام کششی نمونه کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و حاوی نانوذرات کربنات کلسیم برابر با 102/2 MPa است، در حالی که حداکثر استحکام کششی نمونه کامپوزیتی پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و فاقد نانوذرات کربنات کلسیم برابر با 54/6 MPa می‌باشد. به عبارتی نمونه کامپوزیتی حاوی نانوذرات حدود 87% میزان استحکام کششی بیشتری نسبت به نمونه فاقد نانوذرات را دارا می‌باشد.

$$S_{uts} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (1)$$

$$S_{uts} = \frac{F_{max}}{A_0} = \frac{1840 \text{ (N)}}{18 \text{ (mm}^2\text{)}} = 102.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 102.2 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$S_{uts} = \frac{F_{max}}{A_0} = \frac{983 \text{ N}}{18 \text{ mm}^2} = 54.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 54.6 \text{ MPa} \quad (3)$$

وجود سازگار کننده مالئیک آنیدرید PP-g-MAH در کامپوزیت حاوی نانوذرات کربنات کلسیم، اثر جوانه‌زنی دارد و می‌تواند باعث افزایش درجه بلورینگی در زمینه پلیمری کامپوزیت شود [28]. وجود نانو کربنات کلسیم باعث کوچک شدن گویچه‌ها شده و کاهش ابعاد گویچه‌ها و حذف مرزهای تیز بین آنها می‌تواند منجر به افزایش کرنش تا شکست نانوکامپوزیت شود [11]، افزون بر این افزایش در ازدیاد طول نمونه حاوی نانوذرات تا مرحله شکست می‌تواند در نتیجه فرایند شکل‌گیری حفره‌های بیضی شکل در زمینه پلیمری باشد که امکان تغییر شکل از نوع شکل‌پذیر را فراهم می‌سازد [29]. شکل‌گیری این حفره‌ها در محل قرارگیری نانوذرات در زمینه پلیمر به دلیل اثر تمرکز تنش نانوذرات است. تعداد و گستردگی وجود این حفره‌ها با افزایش درصد به کارگیری نانوذرات افزایش می‌یابد [9].

همچنین به کارگیری سازگار کننده PP-g-MAH به سبب تشکیل کوپلیمر پلی پروپیلن-کربنات کلسیم، منجر به بهبود یکنواختی ترکیب و افزایش چسبندگی بین فازهای پلی‌پروپیلن و نانوکربنات کلسیم می‌شود. مدول نانوکربنات کلسیم بیشتر از مدول پلی‌پروپیلن زمینه است و افزودن نانوذرات سبب افزایش



a) Tensile testing machine

الف) دستگاه تست کشش



b) Composite samples after tensile test

ب) نمونه‌های کامپوزیتی تحت آزمون کشش قرار گرفته

Fig. 5 Tensile testing machine and composite samples after tensile test

شکل 5 دستگاه کشش و نمونه‌های کامپوزیتی تحت کشش قرار گرفته

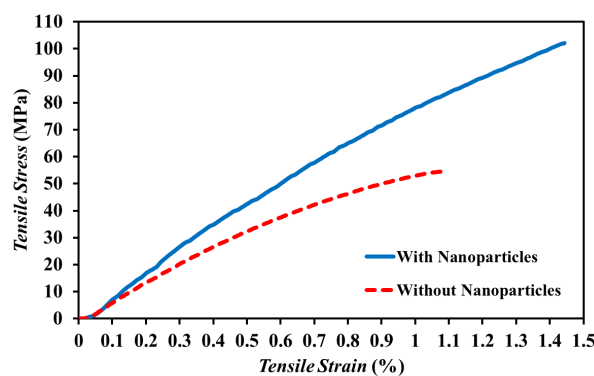


Fig. 6 Stress-strain diagram of two composite samples after tensile test

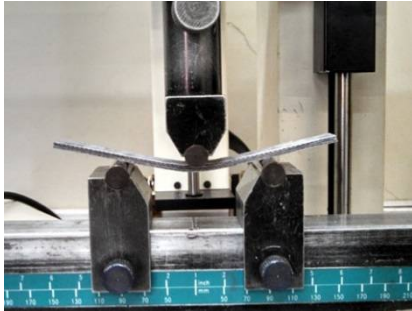
شکل 6 نمودار تنش - کرنش دو نمونه کامپوزیتی تحت آزمون کشش

همان‌طور که در شکل 6، مشاهده می‌شود، کامپوزیت حاوی نانوذرات در مقایسه با کامپوزیت فاقد نانوذرات، تحمل تنش بسیار بیشتری تا سرحد گسیخته شدن دارد. بر اساس بیشترین نیروی تحمل شده و ثبت گردیده در هر آزمون کشش و سطح مقطع اولیه نمونه تحت کشش و بر اساس معادله (1) [27]، که در آن



a) Bending test machine

(الف) دستگاه تست خمش



b) Sample placement on bending machine supports

(ب) قرار گیری نمونه بر روی تکیه‌گاه‌های دستگاه خمش

Fig. 7 Applied bending test machine and placement supports of sample in this machine

شکل 7 دستگاه آزمون خمش به کار رفته و تکیه‌گاه‌های قرار گیری نمونه بر روی آن



Fig. 8 Composite samples after bending test

شکل 8 نمونه‌های کامپوزیتی تحت خمش قرار گرفته در آزمون خمش

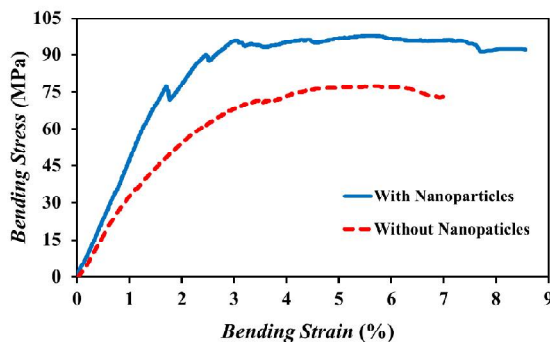


Fig. 9 Stress-strain diagram of two composite samples after bending test

شکل 9 نمودار تنش-کرنش دو نمونه کامپوزیتی تحت آزمون خمش

مدول کشسانی می‌شود [29]. مدول کشسانی تا حد زیادی به مقدار ذرات افزوده شده بستگی دارد. اما مقدار چسبندگی بین فازهای زمینه و تقویت کننده اثر کمتری بر مدول کشسانی دارد [30]. در نتیجه افزودن نانوذرات توانسته است باعث افزایش قابل توجه استحکام کششی نمونه کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات کربنات کلسیم در مقایسه با کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن فاقد نانوذرات گردد.

#### 4- انجام و تحلیل آزمون خمش<sup>1</sup>

مقاومت یک قطعه در برابر نیروهای خمشی با استفاده از آزمون خمش اندازه‌گیری می‌شود. استحکام خمشی بیشترین تنش تجربه شده توسط ماده در لحظه شکست یا تغییر شکل دائم به واسطه بارهای خمشی می‌باشد. برای به دست آوردن استحکام خمشی (مدول خمشی) از روش آزمون خمش سه نقطه‌ای<sup>2</sup> می‌توان استفاده کرد. شکل 7- الف، دستگاه خمش به کار رفته در حین تست نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌های استاندارد آماده‌سازی شده خمش، بر روی تکیه‌گاه‌های این دستگاه که در شکل 7- ب نشان داده شده است، جاگذاری و آماده آزمون می‌شود. شکل 8، نمونه‌های تحت خمش قرار گرفته کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و کربنات کلسیم، را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر، نمودارهای تنش-کرنش حاصل از اطلاعات خام آزمون‌های خمش (به فرمت خروجی اکسل)، برای نمونه‌های تحت خمش قرار گرفته در شکل 9، ارائه شده است. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، کامپوزیت حاوی نانو ذرات در مقایسه با کامپوزیت فاقد نانو ذرات، تحمل تنش خمشی بیشتری را دارد.

طبق نتایج نمودارهای شکل 9 و معادله (4) [27] که در آن  $\delta$  استحکام خمشی،  $W$  بیشترین نیروی فشاری،  $L$  فاصله دو تکیه‌گاه،  $b$  عرض نمونه و  $h$  ارتفاع نمونه می‌باشد، می‌توان مقادیر استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی تحت خمش قرار گرفته را به دست آورد.

$$\delta = \frac{3WL}{2bh^2} \quad (4)$$

$$\delta = \frac{3WL}{2bh^2} = \frac{3 \times 73.3 \times 63}{2 \times 10 \times 3^2} = 76.9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 76.9 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{3WL}{2bh^2} = \frac{3 \times 92 \times 63}{2 \times 10 \times 3^2} = 96.6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 96.6 \text{ MPa} \quad (6)$$

<sup>1</sup> Bending Test (Flexural Test)<sup>2</sup> Three Point Flexural Test

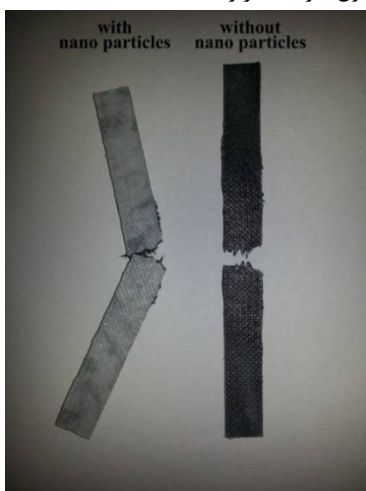


ایران و به کار رفته در تحقیق جاری، می‌باشد. پس از جاگذاری نمونه‌های کامپوزیتی استاندارد آماده شده بر روی دستگاه، آزمون ضربه انجام می‌گیرد. در شکل 10-ب، تصاویر نمونه‌های حاوی نانوذرات و فاقد نانوذرات که تحت ضربه قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه حاوی نانو ذرات کربنات کلسیم، گسست و جدایش کمتری نسبت به نمونه فاقد نانو ذرات ایجاد شده است. در آزمون ضربه میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های تعبیه شده کامپوزیتی روی فیکسچر دستگاه طی فرایند شکست در اثر ضربه اعمالی از طرف چکش (آونگ) دستگاه بر حسب ژول اندازه‌گیری می‌شود. صفحه دستگاه آزمون ضربه شاریبی مورد استفاده تا عدد 20 و با واحد ژول (J) مدرج شده است.



a) Applied impact test machine

الف) دستگاه آزمون ضربه به کار رفته



b) Composite samples after Charpy impact test

ب) نمونه‌های تحت ضربه قرار گرفته توسط دستگاه آزمون ضربه شاریبی

Fig. 10 Charpy impact test machine and composite samples after impact test

شکل 10 دستگاه آزمون ضربه شاریبی و نمونه‌های کامپوزیتی تحت ضربه قرار گرفته

استحکام ضربه‌ای یا مقاومت ضربه‌ای شاریبی نمونه شکافدار

تنها تفاوت در جایگذاری فرمولی قاعدتاً مقدار بیشترین نیروی فشاری تحملی نمونه‌های تحت آزمون خمش است که از اطلاعات نیرویی مربوط به تستهای خمش، قابل استخراج است و بقیه اعداد در فرمول‌ها یکسان جایگذاری شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل از تست‌های خمشی، حداکثر استحکام خمشی نمونه کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات کربنات کلسیم برابر با 96/6 مگاپاسکال است، در حالی که حداکثر استحکام خمشی نمونه کامپوزیتی فاقد نانوذرات برابر با 76/9 مگاپاسکال می‌باشد و به عبارتی نمونه کامپوزیتی حاوی نانوذرات کربنات کلسیم حدود 26% میزان استحکام خمشی بیشتری نسبت به نمونه فاقد نانوذرات را دارا می‌باشد. این افزایش استحکام خمشی نمونه کامپوزیتی حاوی نانوذرات به علت بالاتر بودن مدول الاستیسیته نانوذرات در مقایسه با زمینه پلی‌پروپیلنی و همچنین خاصیت جوانه‌زنی نانو ذرات معدنی کربنات کلسیم در فاز زمینه پلیمری می‌باشد که منجر به افزایش ساختار بلوری می‌شود. در ضمن با توجه به متقارن بودن شکل و فرم نانوذرات شبه‌کروی کربنات کلسیم، این ذرات در جهات مختلف رفتار یکسان و به اصطلاح خواص همسانگرد دارند و منجر به افزایش میزان بلورینگی در زمینه پلیمری و استحکام کلی نانوکامپوزیت در اثر حضور نانو ذرات می‌شود. وجود سازگار کننده PP-g-MAH باعث تشکیل کوپلیمر PP-g-CaCO<sub>3</sub> می‌شود و با افزایش یکنواختی و چسبندگی بین فازهای PP و CaCO<sub>3</sub>، خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد. مدول ذرات صلب نانوذرات کربنات کلسیم، بسیار بیشتر از زمینه پلیمری است، بنابراین افزودن نانوذرات باعث افزایش مدول خمشی شده است.

## 5- انجام و تحلیل آزمون ضربه<sup>1</sup>

استحکام ضربه‌ای، مقاومت مواد به شکست در برابر نیروهای ناگهانی و با سرعت بالا را نشان می‌دهد. مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه بیانگر استحکام ضربه‌ای می‌باشد. برای اندازه‌گیری مقدار استحکام ضربه‌ای از آزمون شاریبی<sup>2</sup> و یا ایزود<sup>3</sup> می‌توان استفاده کرد. نتایج استحکام ضربه‌ای به صورت انرژی در واحد ضخامت شیار (J/mm) و یا انرژی در واحد سطح مقطع شیار (J/mm<sup>2</sup>) بیان می‌شود. در این تحقیق برای اندازه‌گیری استحکام ضربه‌ای از آزمون شاریبی استفاده شده است. شکل 10-الف، نشان دهنده دستگاه آزمون ضربه شاریبی ساخت شرکت سنتام

<sup>1</sup> Impact Test

<sup>2</sup> Charpy

<sup>3</sup> Izod

می‌تواند به دلیل شکل‌گیری حفره‌های میکرونی در پلیمر زمینه باشد. با اعمال انرژی ضربه، تمرکز تنش در محل تماس پلیمر زمینه و نانوذرات رخ می‌دهد که این امر باعث جداسدن پلیمر از نانوذرات و شکل‌گیری حفره میکرونی حول هر نانوذره می‌شود. حفره‌سازی در ابتدا منجر به تغییر شکل پلیمر محاطی نانوذرات و پس از آن باعث گسترش تغییر شکل پلاستیک می‌شود [9].

## 6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دو نوع کامپوزیت پایه پلی‌پروپیلن (پلیمر ترموپلاست) تقویت شده با الیاف کربن حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و فاقد نانوذرات کربنات کلسیم با به‌کارگیری اکسترودر دوپیچی و پرس گرم تولید شد. با استفاده از آزمون‌های استاندارد کشش، خمش و ضربه، خواص مکانیکی این دو نوع کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت.

- نتایج بدست آمده از آزمون‌های کشش نشان داد که نمونه حاوی نانو ذرات کربنات کلسیم، حدود 87% استحکام کششی بیشتر نسبت به نمونه فاقد نانو ذرات را دارا می‌باشد. وجود سازگار کننده مالئیک آنیدرید PP-g-MAH در کامپوزیت حاوی نانوذرات کربنات کلسیم، اثر جوانه‌زنی دارد و می‌تواند باعث افزایش درجه بلورینگی در زمینه پلیمری کامپوزیت شود. همچنین به کارگیری سازگار کننده PP-g-MAH به سبب تشکیل کوپلیمر پلی‌پروپیلن-کربنات کلسیم، منجر به بهبود یکنواختی ترکیب و افزایش چسبندگی بین فازهای پلی‌پروپیلن و نانوکربنات کلسیم می‌شود. مدول نانوکربنات کلسیم بیشتر از مدول پلیمر زمینه است و افزودن نانوذرات سبب افزایش مدول کشسانی می‌شود. در نتیجه افزودن نانوذرات کربنات کلسیم توانسته است باعث افزایش قابل توجه استحکام کششی فاز زمینه پلیمری در کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات کربنات کلسیم گردد.

- افزودن نانوذرات کربنات کلسیم منجر به افزایش استحکام خمشی در حدود 26% می‌شود. این افزایش استحکام خمشی نمونه کامپوزیتی حاوی نانوذرات به علت بالاتر بودن مدول الاستیسیته نانوذرات در مقایسه با زمینه پلی‌پروپیلنی و همچنین خاصیت جوانه‌زنی نانو ذرات معدنی کربنات کلسیم در فاز زمینه پلیمری می‌باشد که منجر به افزایش ساختار بلوری می‌شود. در ضمن با توجه به متقارن بودن شکل نانوذرات شبه‌کروی، این ذرات در جهات مختلف، خواص همسانگرد دارند و منجر به افزایش میزان بلورینگی در زمینه پلی‌پروپیلن و استحکام نانوکامپوزیت در اثر حضور نانو ذرات می‌شود، لذا

$(\alpha_{cN})$  برحسب ژول بر میلی‌متر مربع بر اساس معادله (7) [27]، بیان می‌شود، که در آن  $E_c$  انرژی جذب شده توسط نمونه (نشان داده شده توسط عقربه بر روی صفحه مدرج دستگاه ضربه شاریبی برحسب ژول)،  $h$  ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و  $b_N$  عرض نمونه برحسب میلی‌متر می‌باشد.

$$\alpha_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \quad (7)$$

$$\alpha_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} = \frac{2.5}{3 \times 8.5} = 98.04 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} = 0.0980 \text{ J/mm}^2 \quad (8)$$

$$\alpha_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} = \frac{3.5}{3 \times 8.5} = 0.1372 \text{ J/mm}^2 = 137.25 \text{ kJ/m}^2 \quad (9)$$

مقادیر انرژی اندازه‌گیری شده ( $E_c$ ) برای نمونه فاقد نانوذرات در معادله (8) و برای نمونه حاوی نانوذرات در معادله (9) جایگذاری شدند و ابعاد یکسان نمونه‌های استاندارد آماده شده، در هر دو این معادلات جایگذاری شدند و مطابق محاسبات ارائه شده، استحکام (انرژی) ضربه نمونه پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و حاوی نانوذرات کربنات کلسیم، برابر  $137/25 \text{ kJ/m}^2$  می‌باشد در حالی که استحکام ضربه نمونه پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن و فاقد نانوذرات، برابر  $98/04 \text{ kJ/m}^2$  می‌باشد و به عبارتی نمونه کامپوزیتی حاوی نانوذرات حدود 40% میزان استحکام ضربه بیشتری نسبت به نمونه فاقد نانوذرات را دارا می‌باشد. در کامپوزیت پایه پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف، هنگامی که تحت ضربه قرار می‌گیرد، پلی‌پروپیلن به علت ماهیت شدید کریستالی و هسته‌زایی دچار ترک شده و این ترک در راستای نیرو ادامه پیدا می‌کند. این امر باعث تضعیف انرژی ضربه و کاهش مدول می‌شود [31]. در بخش قبل مشاهده شد که با افزودن نانوذرات کربنات کلسیم به کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف کربن، استحکام کششی افزایش می‌یابد. با وجود نانوذرات کربنات کلسیم، مسیر انتشار نیرو با ذرات نانو برخورد کرده و این نشر تا حدود زیادی با وجود سختی مواد معدنی کاهش و در نتیجه استحکام ضربه بالا می‌رود. همان‌طور که بیان شد افزودن نانوذرات کربنات کلسیم به همراه سازگار کننده PP-g-MAH، سبب افزایش مقاومت ضربه‌ای نسبت به نانوکامپوزیت فاقد نانوذرات شده است که این موضوع به دلیل بهبود یکنواختی ساختار و افزایش چسبندگی بین دو فاز پلی‌پروپیلن و کربنات کلسیم است. پراکنندگی نانوذرات در پلیمر زمینه باعث می‌شود انرژی ضربه وارد شده در تمام مقطع پخش شود و در نتیجه، قابلیت جذب انرژی پیش از شکست افزایش یابد [11]. علاوه بر این، افزایش انرژی ضربه

50, pp. 4066-4079, 2009.

- [10] S. L. Fávares, M. S. Lopes, A. Gonçalves Vieira, G. Neto, R. Rogério, Santana, E. Radovanovic, Chemical, morphological, and mechanical analysis of rice husk/post-consumer polyethylene, *composites*, pp. 154-160, 2010.
- [11] Q. X. Zhang, Z. Z. Yu, X. L. Xie, Y. W. Mai, Crystallization and Impact Energy of Polypropylene/CaCO<sub>3</sub> Nanocomposites with Nonionic Modifier, *Polymer*, Vol. 45, pp. 5985-5994, 2004.
- [12] S. M. Zebarjad, M. Tahani, S. A. Sajjadi, influence of filler particles on deformation and fracture mechanism of Isotactic polypropylene, *Journal of materials processing technology*, Vol. 155-156, pp. 1459-1464, 2004.
- [13] G. Guan, H. X. Bang, Y. Wei, Essential work of fracture (EWF) analysis for polypropylene grafted with maleic anhydride modified polypropylene/calcium carbonate composites, *polymer testing*, Vol. 24, PP. 410-417, 2005.
- [14] Van-Ta Do, Huu-Duc Nguyen-Tran, Doo-Man Chun, Effect of polypropylene on the mechanical properties and water absorption of carbon-fiber-reinforced-polyamide-6/polypropylene composite, *Composite Structures*, Vol. 150, pp. 240-245, 2016.
- [15] M. Motallebi, H. Orang, K. Shelesh-Nezhad, The Comparison of PA6/nano-CaCO<sub>3</sub> and PA6/nano-Silica Mechanical Properties, *The 11th Iranian Conference on Manufacturing Engineering, University of Tabriz*, 2010.
- [16] K. Shelesh-Nezhad, S. Montakhabi Koljahi, J. Ehsani Zonouz, The Mechanical Properties, shrinkage behavior and water absorption in PA6/PP/CaCO<sub>3</sub> nanocomposites, *Polymer science and technology journal*, Vol. 24, No. 6, pp. 481-492, 2011. (In Persian فارسی)
- [17] T. Wright, T. Bechtold, A. Bernhard, A.P. Manian, M. Scheiderbauer, Tailored fiber placement of carbon fiber rovings for reinforced polypropylene composite part 1: PP infusion of carbon reinforcement, *Composites Part B*, Article in press, 2019.
- [18] S. Pavlopoulou, S. S. Roy, M. Gautam, L. Bradshaw, P. Potluri, Numerical and Experimental Investigation of the Hydrostatic Performance of Fibre Reinforced Tubes, *Appl Compos Mater*, Vol. 16, pp. 325-357, 2016.
- [19] Y. Swolfs, J. Shi, Y. Meerten, P. Hine, V. Ward, I. Verpoest, L. Gorbatikh, The importance of bonding in intralayer carbon fibre /self-reinforced polypropylene hybrid composites, *Composites: Part A*, Vol. 76, pp. 299-308, 2015.
- [20] M. Gabr, W. Okumura, H. Ueda, W. Kuriyama, K. Uzawa, I. Kimpara, Mechanical and thermal properties of carbon fiber/polypropylene composite

افزودن نانوذرات باعث افزایش مدول خمشی شده است.

- بر اساس نتایج آزمون ضربه در کامپوزیت حاوی نانو ذرات، حدود 40% استحکام ضربه‌ای بیشتر نسبت به نمونه فاقد نانو ذرات مشاهده گردید. افزودن نانوذرات کربنات کلسیم به همراه سازگار کننده PP-g-MAH، سبب افزایش مقاومت ضربه‌ای نسبت به نانوکامپوزیت فاقد نانوذرات شده است که این موضوع به دلیل بهبود یکنواختی ساختار و افزایش چسبندگی بین دو فاز پلی‌پروپیلن و کربنات کلسیم است. پراکندگی نانوذرات در زمینه پلیمر باعث می‌شود انرژی ضربه وارد شده در تمام مقطع پخش شود و در نتیجه، قابلیت جذب انرژی پیش از شکست افزایش یابد. علاوه بر این، افزایش انرژی ضربه می‌تواند به دلیل شکل‌گیری حفره‌های میکرونی در پلیمر زمینه باشد. حفره‌سازی در ابتدا منجر به تغییر شکل پلیمر محاطی نانوذرات و پس از آن باعث گسترش تغییر شکل پلاستیک می‌شود.

## 7- مراجع

- [1] D.V. Rosato, *Reinforced plastics handbook*, Third Edition, Plastic source publication, Concord MA. USA, pp. 113-121, 2004.
- [2] C. Koch, I. Ovidko, S. Seal, S. Veprek, *structural nanocrystalline material, first published*, Cambridge University press, New York, pp. 346-347, 2007.
- [3] H. R. Dennis, D. L. Hunter, D. Chang, S. Kim, J. L. White, J. W. Cho, D. R. Paul, Effect of melt processing conditions on the extent of exfoliation in organoclay-based nanocomposites, *Polymer*, Vol. 42, pp 9513-9522, 2001.
- [4] M. Y. A. Fuad, H. Hanim, R. Zarina, Z. A. Mohd Ishak, A. Hassan, Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites – Effects of Processing Techniques and Maleated Polypropylene Compatibiliser, *EXPRESS Polym. Lett.*, Vol. 4, pp. 611-620, 2010.
- [5] M. B. Douglas, *Injection molding, SEM publications*, Dearborn, Michigan, pp. 89-107, 1997.
- [6] A. Ghasemi, A. Hyvadi, G. H. Payganeh, N. B. M. Arab, Effects of drilling parameters on delamination of glass-epoxy composites, *Australain journal of basic applied sciences*, Vol. 5, pp. 1433-1440, 2011.
- [7] K. Chrissafis, D. Bikiaris, Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part 1: an overview on thermal decomposition of addition polymers, *thermochimica acta*, Vol. 253, pp. 1-24, 2011.
- [8] K. G. Rakesh, K. Elliot, *polymer nanocomposites handbook*, CRC press, pp. 476-484, 2010.
- [9] I. Kemal, A. Whittle, R. Burford, T. Vodenitcharova, M. Hoffman, Toughening of Unmodified Polyvinylchloride through the Addition of Nanoparticulate Calcium Carbonate, *Polymer*, Vol.

- reinforced thermoplastic matrix solid composite laminate, *Procedia Materials Science*, Vol. 3, pp. 485–492, 2014.
- [27] V. Shah, *Handbook of plastics testing and failure analysis*, Wiley, Canada, pp. 342-371, 2007
- [28] W. S. Chow, Z. A. Mohd Ishak, J. Karger-Kocsis, A. A. Apostolov, U. S. Ishiaku, Compatibilizing, Effect of Maleated Polypropylene on the Mechanical Properties and Morphology of Injection Molded Polyamide 6/Polypropylene/Organoclay Nanocomposites, *Polymer*, Vol. 44, pp. 7427-7440, 2003.
- [29] X. L. Xie, Q. X. Liu, R. K. Y. Li, X. P. Zhou, Q. X. Zhang, Z. Z. Yu, Y. W. Mai, Rheological and Mechanical Properties of PVC/ CaCO<sub>3</sub> Nanocomposites Prepared by In Situ Polymerization, *Polymer*, Vol. 45, pp. 6665-6673, 2004.
- [30] S. Y. Fu, X. Q. Feng, B. Lauke, Y. W. Mai, Effects of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion and Particle Loading on Mechanical Properties of Particulate–Polymer Composites, *Composites*, Vol. 39, pp. 933-961, 2008.
- [31] F. Ke, X. Jiang, H. Xu, J. Ji, Y. Sub, Ternary nano-CaCO<sub>3</sub>/poly (ethylene terephthalate) fiber/polypropylene composites Increased impact strength and reinforcing mechanism, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, pp. 574–579, 2012.
- filled with nano-clay, *Composites: Part B*, Vol. 69, pp 94–100, 2015.
- [21] L. A. Utrachi, *polymer blends handbook*, London, Kluwer academic publishers, Vol. 1, pp. 167-179, 2002
- [22] *Technical Specifications of Materials*, Accessed on 13 November 2018; [https://wikiplast.ir/datasheets/Jampilen552R\\_\(Z69S\).pdf](https://wikiplast.ir/datasheets/Jampilen552R_(Z69S).pdf).
- [23] *Physical and mechanical specifications of carbon fiber*, Accessed on 13 November 2018; <http://www.g-angeloni.com/elenco-prodotti/reinforcements/fabrics/carbon/balanced/gg-200-p>.
- [24] *Physical and mechanical specifications of Calcium Carbonate Nanoparticles*, Accessed on 13 November 2018; [https://www.omya.com/Documents/SOG/Hakuenka\\_CCR.pdf](https://www.omya.com/Documents/SOG/Hakuenka_CCR.pdf).
- [25] *Physical and mechanical specifications of compatibilizer*, Accessed on 13 November 2018; <https://plastics.ulprospector.com/datasheet/e243881/exxelor-po-1020>.
- [26] J. R. Tarpani, R. B. Canto, R. G. M. Saracura, C. Ibarra-Castaneda, X. P. V. Maldague, Compression after impact and fatigue of reconsolidated fiber