جلد ۲، شماره ۳، آذر ۹۴، ص‌ص ۶۷- ۷۴

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی تجربی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری تزریقی حاوی نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر پایه‌ی طراحی آزمایش‌ها

پرستو اسماعیلی[۱]، طاهر ازدست[۲]، علی دنیوی[۳]، رزگار حسن‌زاده[۴*]، سجاد ممقانی شیشوان[۴]، ریچارد لی[۵]

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۴- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۵- شرکت مهندسی ماکرو، میسیساگا، آنتاریو، کانادا

*ارومیه، صندوق پستی ۱۵۳۱۱۵۷۵۶۱، st_r.hasanzadeh@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۶/۱۶

پذیرش: ۹۴/۷/۲۰

کلیدواژگان:

نانوکامپوزیت

پلیمر

نانولوله کربنی

خواص مکانیکی

طراحی آزمایش‌ها

چکیده

در تحقیق حاضر به بررسی استحکام کششی و سختی نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی چند دیواره پرداخته شده است. به این منظور، پلیمر پلی‌آمید ۶ و نانولوله‌های کربنی چند دیواره در درصدهای وزنی مختلف به روش ذوبی در دستگاه اکسترودر دو ماردونه با هم اختلاط پیدا کردند. به‌منظور بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره و شرایط فرآیندی تزریق بر استحکام کششی و سختی، نمونه‌ها در درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی شامل ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد و شرایط فرآیندی مختلف شامل فشار تزریق و دمای تزریق بر پایه‌ی طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، قالب‌گیری شدند. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری تزریقی، تحت آزمایش کشش و سختی قرار گرفتند. مطابق نتایج به‌دست آمده از آنالیز سیگنال به نویز، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی موثرترین پارامتر بر استحکام کششی و سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام کششی نمونه‌ها تقریبا به میزان ۳۱٪ و با افزودن ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی، سختی به میزان ۱۵٪ بهبود یافت. نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که درصد وزنی نانولوله کربنی با ۶۸٪ و ۷۶٪ تاثیرگذاری به ترتیب روی داده‌های استحکام کششی و سختی، موثرتر از شرایط فرآیندی می‌باشد.

Experimental investigation of mechanical properties of injected polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes according to design of experiments

Parastoo Esmaili[1], Taher Azdast[1], Ali Doniavi[1], Rezgar Hasanzadeh[1*], Sajjad Mamaghani[1], Richard Eungkee Lee[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.
2-Macro Engineering and Technology Inc., Mississauga, Ontario, Canada
*P.O.B 1531157561, Urmia, Iran, st_r.hasanzadeh@urmia.ac.ir

Keywords

Nanocomposite
Polymer
Carbon nanotube
Mechanical properties
Design of experiments

Abstract

In present study, the tensile strength and hardness of polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) are investigated. For this purpose, polyamide-6 and MWCNTs in various weight percentages are melt compounded using a twin-screw extruder. To investigate the influence of MWCNTs and injection molding processing parameters on tensile strength and hardness, the samples in various MWCNT contents including 0, 0.5, 1 and 1.5 weight percentages and under different processing parameters including holding pressure and injection temperature, are injection molded according to Taguchi design of experiments. According to the results of signal to noise (S/N) ratio, the weight percentage of MWCNT is the most effective parameter on the tensile strength and hardness of samples. Also, the results indicate that by adding 1 wt% of MWCNT, the tensile strength of samples increased almost 31% and by addition of 1.5 wt% MWCNT, the hardness increased about 15%. Furthermore The results of analysis of variance (ANOVA) indicates that wt% of MWCNT with 68% and 76% contribution percentage on tensile strength and hardness of samples, are the most effective processing parameters, respectively.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Esmaili, P. Azdast, T. Doniavi, A. Hasanzadeh, R. Mamaghani, S. and Eungkee Lee. R., ‘‘Experimental investigation of mechanical properties of injected polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes according to design of experiments’’, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 3, pp. 67-74, 2015.

۱- مقدمه

فن‌آوری نانو یا نانوتکنولوژی رشته‌ای از دانش کاربردی و فنآوری است که جستارهای گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. موضوع اصلی آن نیز مهار ماده یا دستگاه‌های در ابعاد کمتر از یک میکرومتر، معمولا حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. در واقع نانوتکنولوژی، فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی عمدتاً متاثر از غلبه‌ی خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند. نانوفنآوری یک دانش به شدت میان رشته‌ای است و به رشته‌هایی چون مهندسی مواد، مهندسی مکانیک، پزشکی، داروسازی، مهندسی شیمی، مهندسی برق، زیست شناسی و غیره نیز مربوط می‌شود.

برخی از مزایای پیشرفت در این عرصه عبارتند از: توسعه‌ی مستمر در الکترونیک و الکترواپتیک برای فنآوری اطلاعات، ساخت و تولید موادی با کارایی بالا و هزینه‌ی نگهداری پایین‌تر، کاربردهای دفاعی، فضایی و زیست محیطی و پیشرفت‌های شتابان بیوفنآوری در پزشکی، مراقبت‌های بهداشتی و کشاورزی و تولید کامپوزیت‌های در مقیاس نانو و غیره.

در دهه‌ی آخر قرن بیستم، زمینه‌ی جدیدی تحت عنوان نانوکامپوزیت وارد عرصه‌ی علم و فنآوری کامپوزیت‌ها شد. نانوکامپوزیت‌ها مواد مرکبی هستند که حداقل یکی از اجزای تشکیل دهنده‌ی آن‌ها دارای ابعادی در محدوده‌ی نانومتری (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) باشد. این کامپوزیت‌ها به دلیل تغییر در ترکیب و ساختار مواد در مقیاس نانومتری و ارائه‌ی خواص ویژه و بی نظیر، نسبت به مواد کامپوزیتی در مقیاس‌های متداول، در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند.

براساس ماده‌ی زمینه، نانوکامپوزیت‌ها به سه دسته‌ی پایه سرامیکی، پایه فلزی و پایه پلیمری تقسیم بندی می‌شوند.

نیاز اقتصادی و رو به افزایش سوخت در عرصه‌های مختلف، تقاضا برای استفاده از مواد جدید سبک وزن مانند پلیمرها را افزایش داده است. اما از طرفی با توجه به پایین‌تر بودن میزان استحکام پلیمرها در مقایسه با فلزات، تقویت آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تقویت پلیمرها با مواد رایج سبب لطمه خوردن به دو ویژگی اصلی پلیمرها یعنی سبکی و سهولت فرآیند پذیری می‌شود. از این رو در تحقیقات اخیر از مقادیر کمی (کمتر از ۱۰٪ وزنی) نانوذرات به عنوان تقویت‌کننده در پلیمرها استفاده می‌شود.

نایلون ۶ اولین پلیمری بود که توسط شرکت تویوتا در سال ۱۹۹۰ برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها به کار گرفته شد، اما امروزه از پلیمرهای ترموست نظیر اپوکسی، پلی‌ایمید و پلیمرهای ترموپلاست نظیر پلی‌پروپیلن و پلی‌استایرن نیز به عنوان ماده‌ی زمینه‌ی این کامپوزیت‌ها استفاده می‌گردد.

در بین نانوکامپوزیت‌ها بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانوکامپوزیت‌های پلیمری، خواص بی‌نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموماً دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند. دلیل دوم توسعه نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری و افزایش تحقیقات در این زمینه، کشف نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ میلادی است. استحکام و خواص الکتریکی نانولوله‌های کربنی به طور قابل ملاحظه‌ای با نانولایه‌های گرافیت و دیگر مواد پرکننده تفاوت دارد. نانولوله‌های کربنی موجب رسانایی و استحکام فوق العاده‌ای در پلیمرها می‌شوند، به طوری که کاربردهای حیرت‌انگیزی همچون آسانسور فضایی را برای آن می‌توان متصور شد. این دسته از نانوکامپوزیت‌ها به دلیل خواص منحصر به فردی که دارند، به طور گسترده‌ای در صنایع خودرو، هوا و فضا و بسته‌بندی مواد غذایی گسترش یافته‌اند. از دیگر کاربردهای نانوکامپوزیت‌های پلیمری، پوشش‌های مقاوم به سایش، پوشش‌های مقاوم به خوردگی، پلاستیک‌های رسانا، حسگرها، آسترهای مقاوم در دمای بالا و غشاهای جداسازی گازها و سیالات نفتی می‌باشند. به عنوان مثال می‌توان به نوعی غشاء نانوکامپوزیتی ساخته شده از یک نوع پلیمر و نانولایه‌های سیلیکا اشاره کرد که توسط محققان دانشگاه کارولینای شمالی ساخته شده است [۱].

با توجه به اینکه در این تحقیق از روش قالب‌گیری تزریقی پلاستیک برای تولید نمونه‌های نانوکامپوزیت پلیمری استفاده شده است، به شرح مختصری از این روش پرداخته می‌شود. در قالب‌گیری تزریق پلاستیک، ابتدا به دانه‌های پلاستیکی (گرانول‌ها) حرارت داده می‌شود تا ذوب شوند. سپس مذاب با فشار به درون حفره قالب تزریق می‌شود تا حجم حفره را پر کرده و فرم موردنظر را به خود بگیرد. در این حالت، فشار برای مدت زمانی نگه داشته می‌شود تا تراکم بهتری حاصل شود. پس از انجماد درگاه ورودی مذاب به قالب، پیستون به عقب برمی‌گردد تا دوباره موادگیری صورت گیرد. با سرد شدن و انجماد کامل قطعه، قالب باز شده و محصول به بیرون انداخته می‌شود. در انتها قالب دوباره بسته شده و سیکل بعدی شروع می‌شود [۲].

از مهم‌ترین و برجسته‌ترین کارهای انجام گرفته در این زمینه می‌توان به کار فلیسیا و همکاران [۳] اشاره کرد. ایشان به بررسی تاثیر پارامترهای تزریق، نرخ کرنش و درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری پلی‌پروپیلن/ نانولوله کربنی پرداختند. آن‌ها دمای مذاب و فشار تزریق را به عنوان پارامترهای تزریق و نرخ کرنش و درصد وزنی نانولوله کربنی را به عنوان دو پارامتر دیگر درنظر گرفتند و تاثیر این پارامترها را بر روی خواص مکانیکی شامل مدول یانگ، استحکام نهایی، کرنش نهایی، تنش در نقطه شکست و کرنش در نقطه شکست در سه نرخ کرنش متفاوت مطابق روش تاگوچی بررسی کردند. در تحقیق ایشان، درصدهای وزنی ۱، ۳ و ۵ به عنوان درصدهای نانولوله کربنی درنظر گرفته شد. مطابق نتایج تحقیق ایشان، درصد وزنی بهینه برای دست‌یابی به بیشترین استحکام، ۵٪ بوده است درحالی‌که ۱٪ وزنی نانولوله بهینه‌ترین حالت برای رسیدن به بیشترین کرنش بوده است.

از دیگر کارهای مشابه انجام گرفته در این زمینه می‌توان به کار عثمان و همکاران [۴] اشاره کرد. ایشان در این تحقیق به بررسی تاثیر شرایط تزریق و افزودن نانورس بر روی خواص مکانیکی پلیمر پلی‌پروپیلن پرداختند. در تحقیق ایشان، ترکیبات در درصدهای وزنی ۰، ۱، ۵ و ۱۰ درصد از نانورس تهیه شدند. همچنین پارامترهای دمای مذاب، فشار نگهداری، دور ماردون و زمان پرکردن (همگی در سه سطح) به عنوان پارامترهای تزریق درنظر گرفته شدند. بر اساس پارامترها و سطوح درنظر گرفته شده، طراحی آزمایش‌ها تاگوچی مطابق آرایه متعامد L9 انجام گرفت. براساس طراحی آزمایش‌ها انجام گرفته، نمونه‌ها تولید شده و بهینه‌ترین حالت برای دست‌یابی به بیشترین مقدار استحکام کششی بدست آمد.

از جمله کارهای مهم انجام گرفته‌ی دیگر در زمینه نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری می‌توان به کار علی گولر و همکاران که به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌متاکریلیک اسید/ نانورس پرداخته‌اند [۵]، آرش و همکاران که به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی بر اساس مدل زبری پرداخته بودند [۶] و اقبال و همکاران که به بررسی خواص مکانیکی و الکترواستاتیکی

نانوکامپوزیت‌های پلی‌لاکتیک اسید/ نانولوله کربنی بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته بودند [۷]، اشاره کرد.

یکی از مهم‌ترین مسائلی که امروزه در مباحث مهندسی مطرح می‌شود، موضوع طراحی آزمایش‌ها[1] است. در همه فرآیندها، آزمایش به منظور کسب اطلاعات در مورد آن فرآیند یا سیستم خاص انجام می‌شود. در حقیقت آزمایش فرآیندی است که در آن با تغییر یک سری از متغیرهای ورودی سیستم، امکان مشاهده و شناسایی تغییرات ممکن در متغیر خروجی فراهم می‌شود.

هر آزمایش شامل یک سری ورودی و یک سری خروجی است. یک فرآیند میانی با استفاده از داده‌های ورودی و انجام عملیات روی آن‌ها، متغیر خروجی یا متغیر پاسخ[2] را تولید می‌کند. حالت‌های مختلفی را می‌توان برای متغیر پاسخ تعریف کرد. ممکن است هدف از انجام آزمایش، رسیدن به یک مقدار اسمی مشخص برای متغیر پاسخ باشد (اسمی-بهترین[3])، حالت دوم ممکن است هدف از انجام آزمایش دسترسی به بیشترین مقدار اسمی باشد (بزگتر-بهتر[4]). آخرین حالت متغیر پاسخ رسیدن به کم‌ترین مقدار اسمی است (کوچکتر-بهتر[5]) [۸].

همواره علاوه بر متغیرهای ورودی، یک سری متغیرهای دیگر در انجام آزمایش موثرند و اثر قابل توجهی روی متغیر پاسخ دارند. متغیرهای کنترلی و متغیرهای غیرکنترلی یا عوامل اغتشاش از این دسته‌اند. متغیرهای کنترلی همان طور که از اسم آن‌ها پیداست، متغیرهایی هستند که می‌توان آن‌ها را برای انجام آزمایش تنظیم کرد اما متغیرهای غیرکنترلی قابل تنظیم و کنترل نیستند و فقط می‌توان اثرات آن‌ها را تا حدی کم کرد.

حال به منظور بهینه‌سازی متغیر پاسخ مورد بررسی در حضور عوامل ذکر شده، از طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌شود زیرا طراحی آزمایش‌ها یک ابزار قدرتمند برای تشخیص این عوامل موثر در فرآیندهای مختلف و تعیین سطوح مختلف این عوامل به گونه‌ای است که متغیر پاسخ موردنظر بهینه شود. در واقع طراحی آزمایش‌ها عواملی که باعث می‌شوند فرآیند موردنظر تحت کنترل نباشد را کشف می‌کند. مهم‌ترین هدف در بحث طراحی آزمایش‌ها، دست‌یابی به مقدار متغیر پاسخ موردنظر با انجام کم‌ترین تعداد آزمایش موردنظر است زیرا هر چه تعداد آزمایش بیشتر شود، هزینه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کنند. از سوی دیگر بعضی از آزمایش‌ها مخرب هستند و بهتر است با کم‌ترین تعداد آزمایش در مورد این آزمایش‌های مخرب، به متغیر پاسخ مورد نظر دسترسی پیدا کرد.

علاوه بر حداقل کردن تعداد آزمایش‌های انجام شده که می‌توان گفت مهم‌ترین هدف طراحی آزمایش‌ها می‌باشد، کسب دقت در کنار صحت نیز از اهداف آزمایش‌گر می‌باشد ولی از آنجایی که در شرایط واقعی برقراری هر دوی این فاکتورها تقریباً غیر ممکن است، می‌توان با درصد قابل قبولی تصور کرد که آزمایش مورد نظر به دقت و صحت مورد نظر دست یافته است [۹].

با توجه به مطالعات فراوان انجام گرفته، پژوهشی که به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌آمید۶/ نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر پایه طراحی آزمایش‌ها پرداخته باشد، مشاهده نگردید. به همین خاطر در تحقیق حاضر، برای اولین بار خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها شامل استحکام کششی و سختی توسط نرم‌افزار مینی‌تب۶ و براساس آرایه‌های متعامد L16 بررسی شد و تاثیر درصد وزنی نانولوله کربنی و شرایط فرآیندی بر روی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق طراحی آزمایش‌ها مطابق با روش تاگوچی[7] انجام گرفت. ابتدا پارامترهای تاثیرگذار مسئله انتخاب شدند. چون یکی از اهداف این تحقیق بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر روی خواص مکانیکی پلی‌آمید۶ می‌باشد، درصد وزنی نانولوله کربنی به عنوان اولین و مهم‌ترین پارامتر انتخاب شد. سپس با توجه به شرایط عملی هنگام تولید نمونه‌ها و کنترل‌پذیری عوامل، فشار نگهداری و دمای تزریق به عنوان دو عامل دیگر انتخاب شدند. پس از انتخاب عوامل، بایستی سطوح آن‌ها انتخاب می‌شدند.

با توجه به مطالعات فراوان انجام شده مشاهده شد که اغلب با افزودن درحدود ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به ماتریس‌های پلیمری بهترین شرایط جهت بهبود خواص آن‌ها بدست می‌آید؛ بنابراین در پژوهش حاضر ۳ سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی به عنوان سطوح نانولوله کربنی درنظر گرفته شدند. از طرفی دیگر از آنجا که هدف، بررسی تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی به ماتریس پلیمری بود، سطح خالص پلیمر یا به عبارتی دیگر سطح ۰ درصد وزنی نانولوله کربنی نیز به عنوان یکی از سطوح انتخابی جهت مقایسه در نظر گرفته شد. بنابراین در کل، درصد وزنی نانولوله کربنی در چهار سطح مختلف ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در نظر گرفته شد.

برای تعیین سطوح فشار نگهداری، با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که در فشارهای پایین‌تر از ۵۵ مگاپاسکال نمونه‌ها بصورت کامل پر نمی‌شوند و نمونه‌های ناقصی تولید می‌شوند؛ پس ۵۵ مگاپاسکال به عنوان کم‌ترین فشار نگهداری در نظر گرفته شد. از طرفی دیگر با توجه به ظرفیت دستگاه تزریق، ۱۱۵ مگاپاسکال به عنوان بیشترین فشار نگهداری در نظر گرفته شد و بین این دو فشار به چهار سطح مساوی تقسیم گردید. بنابراین در کل فشار نگهداری در چهار سطح ۵۵، ۷۵، ۹۵ و ۱۱۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. برای تعیین سطوح دمای تزریق، کم‌ترین و بیشترین دمای تزریق با توجه به شرایط عملی هنگام تولید نمونه‌ها به ترتیب ۲۱۰ و ۲۴۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد و مابین این دو دما به چهار سطح مساوی تقسیم شد. بنابراین سطوح دمای تزریق بصورت ۲۱۰، ۲۲۰، ۲۳۰ و ۲۴۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد.

جدول ۱، پارامترهای مسئله و سطوح انتخابی برای آن‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به پارامترهای درنظر گرفته شده و سطوح انتخابی برای آن‌ها، طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی مطابق با آرایه‌ی متعامد L16 توسط نرم‌افزار مینی‌تب مطابق جدول ۲ انجام گرفت.

در روش تاگوچی، تابع زیانی وجود دارد که نهایتا بصورت نسبت سیگنال به نویز معرفی می‌شود. بسته به نوع مسئله، از یکی از صورت‌های معادلات (۱) استفاده می‌شود [۸].

$$
\begin{aligned}
&S/N=10\log[\frac{y_i^2}{S^2}] && \text{اسمی-بهتر}\\
&S/N=-10\log[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}] && \text{بزرگتر-بهتر}\\
&S/N=-10\log[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2] && \text{کوچکتر-بهتر}
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

1. Design of Experiments
2. Response variable
3. Nominal the best
4. Larger the better
5. Smaller the better
6. Minitab
7. Taguchi method

که در این روابط y، متغیر پاسخ و n، تعداد تکرار آزمایش‌ها می‌باشد.

برای هر پارامتر، فارغ از نوع مسئله، سطحی که بیشترین مقدار سیگنال به نویز را داشته باشد، سطح بهینه است. در این تحقیق با توجه به اینکه هدف، بهبود خواص مکانیکی است، از معادله دوم نسبت سیگنال به نویز (بزرگتر-بهتر) استفاده شده است [۸].

جدول ۱ پارامترهای انتخابی و سطوح در نظر گرفته شده برای هرکدام

پارامتر / سطح	۱	۲	۳	۴
درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	۰	۰/۵	۱	۱/۵
فشار نگهداری (MPa)	۵۵	۷۵	۹۵	۱۱۵
دمای تزریق (°C)	۲۱۰	۲۲۰	۲۳۰	۲۴۰

جدول ۲ نحوه انجام آزمایش‌ها مطابق آرایه متعامد L16 روش تاگوچی

شماره آزمایش	درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	فشار نگهداری (MPa)	دمای تزریق (°C)
۱	۰	۵۵	۲۱۰
۲	۰	۷۵	۲۲۰
۳	۰	۹۵	۲۳۰
۴	۰	۱۱۵	۲۴۰
۵	۰/۵	۵۵	۲۲۰
۶	۰/۵	۷۵	۲۱۰
۷	۰/۵	۹۵	۲۴۰
۸	۰/۵	۱۱۵	۲۳۰
۹	۱	۵۵	۲۳۰
۱۰	۱	۷۵	۲۴۰
۱۱	۱	۹۵	۲۱۰
۱۲	۱	۱۱۵	۲۲۰
۱۳	۱/۵	۵۵	۲۴۰
۱۴	۱/۵	۷۵	۲۳۰
۱۵	۱/۵	۹۵	۲۲۰
۱۶	۱/۵	۱۱۵	۲۱۰

۲-۲- تجربی

در این تحقیق، پلی‌آمید۶ (ساخت یوروتک ترکیه) با دانسیته ۱/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب به عنوان ماتریس زمینه و نانولوله‌های کربنی چند دیواره ساخت یو اس نانو آمریکا با درصد خلوص ۹۰٪ و قطر داخلی ۵ تا ۱۰ نانومتر و قطر خارجی ۱۰ تا ۳۰ نانومتر و طول ۱۰ تا ۳۰ میکرومتر به عنوان تقویت کننده استفاده شدند. دستگاه اکسترودر دو ماردونه همسوگرد ZSK-25 ساخت آلمان با قطر ماردون ۲۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر برابر با ۴۸ برای اختلاط ذوبی مواد و دستگاه تزریق پلاستیک محصول شرکت نکو بهینه ماشین برای تزریق نمونه‌ها استفاده شد.

قالب دستگاه تزریق استفاده شده در تحقیق حاضر (شکل ۱) دارای دو حفره مطابق با استانداردهای ASTM-D638 و ASTM-D6110 [۱۰] می‌باشد.

پلی‌آمید۶ قبل از اختلاط به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در دستگاه خشک‌کن، رطوبت گیری شد (به دلیل اینکه در این مرحله گرانول‌ها از کیسه خارج شده و فاقد هرگونه رطوبت می‌باشند، زمان خشک‌کردن کمی لازم دارند) و سپس نانوکامپوزیت‌ها با درصدهای وزنی موردنظر، توسط دستگاه اکسترودر دوماردونه، تولید شدند. شرایط اکسترود در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه پس از اکسترود، ترکیبات به منظور خنک‌سازی وارد حمام آب شدند و مقدار زیادی رطوبت به خود گرفتند، گرانول‌های نانوکامپوزیت و پلیمر خالص، قبل از تزریق به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در داخل قیف تغذیه دستگاه تزریق، خشک شدند. سپس نمونه‌های نانوکامپوزیتی در دستگاه تزریق مطابق جدول ۲، قالب‌گیری شدند که شکل ۲ تعدادی از نمونه‌های تولیدی را نشان می‌دهد. پس از تولید نمونه‌ها، جهت انجام تست کشش از دستگاه گوتک[1] مدل AI-7000M و جهت جهت انجام تست سختی از دستگاه ایندنتک[2] استفاده گردید. قابل ذکر است که آزمایش‌ها در هر سطح در ۳ تکرار انجام شد و میانگین این ۳ تکرار به عنوان داده نهایی گزارش شد.

شکل ۱ قالب دستگاه تزریق

شکل ۲ تعدادی از نمونه‌های تولیدی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- استحکام کششی

جدول ۴ استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاصل از تست کشش با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد.

۳-۱-۱- آنالیز سیگنال به نویز و اثرات اصلی پارامترها برای استحکام کششی

با وارد کردن نتایج استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی در نرم‌افزار مینی‌تب و آنالیز سیگنال به نویز داده‌ها مطابق روش بزرگتر-بهتر (چرا که هدف بهبود استحکام کششی نمونه‌هاست)، نتایج اثرات اصلی پارامترها و

1. Gotech
2. Indentec

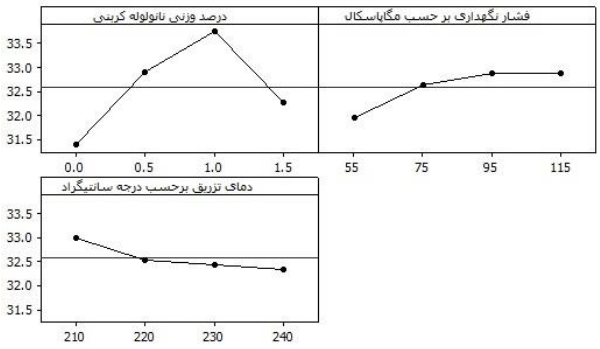
سیگنال به نویز به ترتیب مطابق شکل ۳ و جدول ۵ حاصل شد. جدول ۵ همچنین ترتیب پارامترها براساس درجه تاثیرگذاری را نشان می‌دهد.

جدول ۳ شرایط اکسترود

دمای نواحی اکسترود (°C)	۲۴۰-۲۴۰-۲۳۵-۲۳۰-۲۲۰-۲۱۰
دور ماردون (rpm)	۲۵۰

جدول ۴ نتایج استحکام کششی

نمونه	استحکام کششی (MPa)	انحراف معیار
۱	۳۱/۴۹	۰/۴۸۷
۲	۳۸/۷۶	۰/۲۲۰
۳	۳۹/۹۳	۰/۴۹۸
۴	۳۸/۸۳	۰/۵۶۱
۵	۴۲/۳۰	۰/۶۷۸
۶	۴۹/۷۶	۰/۶۳۲
۷	۴۳/۴۰	۰/۸۳۲
۸	۴۱/۶۹	۱/۱۳۲
۹	۴۸/۵۱	۰/۲۴۸
۱۰	۴۵/۸۵	۰/۴۱۵
۱۱	۵۲/۶۶	۰/۰۰۶
۱۲	۴۷/۹۵	۰/۷۹۰
۱۳	۳۸/۱۵	۰/۳۵۴
۱۴	۳۷/۸۲	۱/۲۷۷
۱۵	۴۰/۹۹	۰/۴۴۸
۱۶	۴۸/۲۱	۰/۴۷۲



شکل ۳ نمودار اثرات اصلی پارامترها برای استحکام کششی

جدول ۵ نتایج آنالیز سیگنال به نویز استحکام کششی

سطح	سیگنال به نویز درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	سیگنال به نویز فشار نگهداری (MPa)	سیگنال به نویز دمای تزریق (°C)
۱	۳۱/۳۸	۳۱/۹۶	۳۳/۰۰
۲	۳۲/۹۰	۳۲/۶۲	۳۲/۵۴
۳	۳۳/۷۵	۳۲/۸۶	۳۲/۴۲
۴	۳۲/۲۸	۳۲/۸۷	۳۲/۳۵
اختلاف	۲/۳۶	۰/۹۱	۰/۶۵
رتبه	۱	۲	۳

مطابق نتایج سیگنال به نویز (جدول ۵)، درصد وزنی نانولوله کربنی موثرترین پارامتر روی استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد که با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به سطح دوم و سوم (۰/۵ و ۱ درصد وزنی)، استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و مقدار سیگنال به نویز افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله‌های کربنی به ماتریس پلیمری، استحکام کششی نمونه‌ها به میزان حدود ۳۱٪ بهبود می‌یابد که دلیل این امر را می‌توان خواص مکانیکی فوق‌العاده نانولوله‌های کربنی در مقایسه با پلی‌آمید۶ دانست که با افزودن آن به پلیمر، استحکام کششی به میزان چشمگیری بهبود می‌یابد. شکل ۳ همچنین نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به سطح چهارم (۱/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی)، استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی کاهش می‌یابد که این کاهش را می‌توان در اثر کلوخه‌ای شدن ذرات نانو به دلیل بالا رفتن مقدار آن‌ها در ماتریس پلیمری دانست که پلیمر در این مقدار بالای ذرات نانو، توانایی لازم برای توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی را در خود ندارد و این کلوخه‌ای شدن و انباشته شدن نانولوله‌های کربنی در برخی نقاط نمونه‌های نانوکامپوزیتی، سبب تضعیف نمونه‌ها و کاهش استحکام کششی آن‌ها می‌شود.

نتایج مربوط به جدول ۵ نشان داد که فشار نگهداری دومین پارامتر موثر روی استحکام کششی نمونه‌هاست که با افزایش مقدار فشار نگهداری، استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و مقدار سیگنال به نویز افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش فشار نگهداری، نمونه‌هایی با چگالی بالاتر و فشرده‌تر تزریق می‌شوند که استحکام کششی بالاتری خواهند داشت.

مطابق نتایج جدول ۵، پارامتری که کمترین تاثیر را روی استحکام کششی نمونه‌ها داشت، دمای تزریق می‌باشد. با افزایش دمای تزریق، استحکام کششی نمونه‌ها و مقدار سیگنال به نویز کاهش می‌یابد. به عبارتی بهترین سطح برای دمای تزریق، سطح اول (۲۱۰ درجه سانتیگراد) می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان تخریب مواد در دماهای بالای تزریق دانست که باعث پایین آمدن استحکام نمونه‌ها می‌شود

۳-۱-۲- آنالیز واریانس برای استحکام کششی

با وارد کردن داده‌های استحکام کششی در نرم‌افزار مینی‌تب و آنالیز آن‌ها، نتایج اختصار یافته آنالیز واریانس بصورت جدول ۶ حاصل شد. مطابق نتایج آنالیز واریانس جدول ۶، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با بیشترین میزان مشارکت به میزان ۶۸/۰۷٪، موثرترین پارامتر بر روی استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد.

پارامترهای فشار نگهداری و دمای تزریق به ترتیب با ۱۰/۸۵٪ و ۹/۳۷٪ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این ترتیب تاثیرگذاری پارامترها با نتایج آنالیز سیگنال به نویز که در جدول ۵ ارائه شده است، همخوانی دارد. نتایج آنالیز واریانس همچنین نشان داد که خطای آزمایش به میزان ۱۱/۷۱٪ در نتایج دخیل بوده است.

جدول ۶ نتایج اختصار یافته آنالیز واریانس استحکام کششی

منبع	مجموع مربعات	درصد اشتراک
درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	۹۴/۰۳	۶۸/۰۷
فشار نگهداری (MPa)	۱۴/۹۸	۱۰/۸۵
دمای تزریق (°C)	۱۲/۹۴	۹/۳۷
خطا	۱۶/۱۸	۱۱/۷۱
کل	۱۳۸/۱۳	۱۰۰

۳-۲- سختی

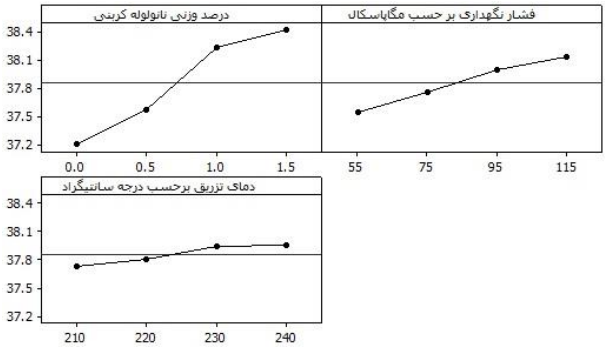
جدول ۷ نتایج تست سختی راکول به روش M را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۷ نتایج سختی

نمونه	سختی	انحراف معیار
۱	۷۰/۴	۰/۵۴
۲	۷۳/۳	۰/۳۹
۳	۷۳/۴	۰/۸۷
۴	۷۲/۸	۰/۸۱
۵	۷۱/۷	۱/۱۰
۶	۷۰/۸	۰/۸۰
۷	۷۸/۱	۰/۹۱
۸	۸۲/۳	۰/۰۵
۹	۷۷/۸	۰/۱۴
۱۰	۸۳/۲	۰/۳۳
۱۱	۸۲/۶	۰/۷۹
۱۲	۸۲/۸	۰/۷۴
۱۳	۸۲/۳	۰/۷۴
۱۴	۸۲/۴	۰/۳۷
۱۵	۸۳/۵	۰/۷۱
۱۶	۸۵/۳	۰/۹۲

۳-۲-۱- آنالیز سیگنال به نویز و اثرات اصلی پارامترها برای سختی

با وارد کردن نتایج سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی در نرم‌افزار مینی‌تب و آنالیز سیگنال به نویز داده‌ها مطابق روش بزرگتر-بهتر (چرا که هدف بهبود سختی نمونه‌هاست)، نتایج اثرات اصلی پارامترها و سیگنال به نویز به ترتیب مطابق شکل ۴ و جدول ۸ حاصل شد. جدول ۸ همچنین ترتیب پارامترها براساس درجه تاثیرگذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۴ نمودار اثرات اصلی پارامترها برای سختی

جدول ۸ نتایج آنالیز سیگنال به نویز سختی

سطح	درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	فشار نگهداری (MPa)	دمای تزریق (°C)
۱	۳۷/۲۰	۳۷/۵۵	۳۷/۷۳
۲	۳۷/۵۷	۳۷/۷۶	۳۷/۸۰
۳	۳۸/۲۳	۳۷/۹۹	۳۷/۹۴
۴	۳۸/۴۲	۳۸/۱۴	۳۷/۹۴
اختلاف	۱/۲۲	۰/۵۹	۰/۲۲
رتبه	۱	۲	۳

مطابق نتایج سیگنال به نویز (جدول ۸)، درصد وزنی نانولوله کربنی موثرترین پارامتر بر روی سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی بود. پس از این پارامتر، فشار نگهداری و دمای تزریق به ترتیب پارامترهای موثر بعدی بوده‌اند.

مطابق نتایج شکل ۴، با افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره به ماتریس پلیمری، سختی راکول نمونه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. به‌طوری که در بهترین حالت با افزودن ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی، سختی راکول نمونه‌ها تقریباً به میزان ۱۵٪ بهبود داشته است. دلیل این امر را می‌توان خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ی نانولوله‌های کربنی چند دیواره بیان کرد که با افزوده شدن به ماتریس پلیمری باعث بهبود خواص مکانیکی آن می‌شوند.

جدول ۸ نشان داد که فشار نگهداری دومین پارامتر موثر روی سختی نمونه‌ها می‌باشد که با افزایش آن، سختی راکول نمونه‌ها افزایش می‌یابد که دلیل این امر را اینگونه می‌توان بیان کرد که با افزایش فشار نگهداری، فشرده‌گی نمونه‌ها بیشتر شده و سختی آن‌ها افزایش می‌یابد. مطابق جدول ۸، دمای تزریق نیز به عنوان سومین و کم تاثیرترین پارامتر موثر بر روی سختی نمونه‌ها، رفتاری مشابه با فشار نگهداری بر روی سختی داشت؛ به گونه‌ای که با افزایش دمای تزریق، سختی راکول نمونه‌ها به مقدار اندکی افزایش یافت. با افزایش دمای تزریق همانطور که نتایج آنالیز سیگنال به نویز برای استحکام کششی نیز نشان داد، سوختگی اندکی در مواد به وجود آمده است که این سوختگی به نوبه خود سبب افزایش سختی گردیده است.

۳-۲-۲- آنالیز واریانس برای سختی

با وارد کردن داده‌های سختی در نرم‌افزار مینی‌تب و آنالیز آن‌ها، نتایج اختصار یافته آنالیز واریانس برای سختی مطابق جدول ۹ به دست آمد.

مطابق نتایج آنالیز واریانس جدول ۹، درصد وزنی نانولوله کربنی با بیشترین میزان مشارکت به میزان ۷۵/۹۴٪، موثرترین پارامتر روی سختی راکول نمونه‌ها می‌باشد. پس از درصد وزنی نانولوله کربنی، فشار نگهداری و دمای تزریق به ترتیب با ۱۵/۸۶٪ و ۲/۳۵٪ پارامترهای موثر بعدی می‌باشند. ترتیب تاثیرگذاری پارامترها مطابق آنالیز واریانس با نتایج سیگنال به نویز مطابق جدول ۸ همخوانی دارد. قابل ذکر است که خطای آزمایش به میزان ۵/۸۵٪ در نتایج سختی راکول نمونه‌ها موثر است.

جدول ۹ نتایج اختصار یافته آنالیز واریانس برای سختی

منبع	مجموع مربعات	درصد اشتراک
درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	۱۰۲/۶۶۰	۷۵/۹۴
فشار نگهداری (MPa)	۲۱/۴۳۵	۱۵/۸۶
دمای تزریق (°C)	۳/۱۷۳	۲/۳۵
خطا	۷/۹۲۰	۵/۸۵
کل	۱۳۵/۱۸۸	۱۰۰

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر پارامترهای درصد وزنی نانولوله کربنی و شرایط فرآیندی شامل فشار نگهداری و دمای تزریق بر روی استحکام کششی و سختی نانوکامپوزیت‌های پلی‌آمید۶/ نانولوله‌های کربنی چند دیواره توسط طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی و مطابق آرایه متعامد L16 بررسی شد. مواد اولیه به روش اختلاط ذوبی توسط دستگاه اکسترودر دو ماردونه ترکیب شدند و سپس نمونه‌های نانوکامپوزیتی مورد نظر در دستگاه تزریق مطابق با

استانداردهای ASTM-D638 و ASTM-D6110 تولید شدند. با انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار مینی‌تب مشخص شد که درصد وزنی نانولوله کربنی موثرترین پارامتر روی استحکام کششی و سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد و با افزودن نانولوله کربنی به ماتریس پلیمری، استحکام کششی و سختی آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که فشار نگهداری و دمای تزریق پس از درصد وزنی نانولوله کربنی پارامترهای تاثیرگذار بعدی بوده‌اند.

۵- مراجع

[1] Thakur, V. K., "Eco-Friendly Polymer Nanocomposites: Processing and Properties", Springer, Vol. 75, 2015.

[2] Yamaguchi, M. Sasaki, S. Suzuki, S. and Nakayama, Y., "Injection-Molded Plastic Plate with Hydrophobic Surface by Nanoperiodic Structure Applied in Uniaxial Direction", Journal of Adhesion Science and Technology,Vol. 29, No. 1, pp. 24-35, 2015.

[3] Stan, F. Sandu, L.I. and Fetecau, C., "Effect of Processing Parameters and Strain Rate on Mechanical Properties of Carbon Nanotube–Filled Polypropylene Nanocomposites", Composite Part B: Engineering, Vol. 59, pp. 109-122, 2014.

[4] Othman, M. H. Hasan, S. and Muhamad, W. W., "Polypropylene-Clay Composite: The Effect of Clay Content and Optimization of Processing Condition towards Ultimate Tensile Strength by Using Taguchi Method", International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 275-279, 2013.

[5] Guler, M. A. Gok, M. K. Figen, A. K. and Ozgumus, S., "Swelling, Mechanical and Mucoadhesion Properties of Mt/starch-g-PMAA Nanocomposite Hydrogels", Applied Clay Science, Vol. 112, pp. 44-52, 2015.

[6] Arash, B. Park, H. S. and Rabczuk, T., "Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Polymer Nanocomposites: a Coarse-Grained Model", Composite Part B: Engineering, Vol. 80, pp. 92-100,2015.

[7] Iqbal, Q. Bernstein, P. Zhu, Y. Rahamim, J. Cebe, P. and Staii, C., "Quantitative Analysis of Mechanical and Electrostatic Properties of Poly (Lactic) Acid Fibers and Poly (Lactic) Acid—Carbon Nanotube Composites Using Atomic Force Microscopy", Nanotechnology, Vol. 26, No. 10, pp. 105702, 2015.

[8] MacLean, A. L. Rosen, Z. Byrne, H. M. and Harrington, H. A., "Parameter-Free Methods Distinguish Wnt Pathway Models and Guide Design of Experiments", Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 112, No. 9, pp. 2652-2657, 2015.

[9] Morgan, N. R. Untaroiu, A. Migliorini, P. J. and Wood, H. G., "Design of Experiments to Investigate Geometric Effects on Fluid Leakage Rate in a Balance Drum Seal", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 137, No. 3, pp. 032501, 2015.

[10] Shishavan, S. M. Azdast, T. and Ahmadi, S. R., "Investigation of the Effect of Nanoclay and Processing Parameters on the Tensile Strength and Hardness of Injection Molded Acrylonitrile Butadiene Styrene–Organoclay Nanocomposites", Materials & Design, Vol. 58, pp. 527-534, 2014.