جلد ۲، شماره ٤، اسفند ۹٤، ص‌ص ۳۷- ٤٤

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی تجربی خواص فوم‌های نانوکامپوزیت پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی چند دیواره توسط روش تاگوچی

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

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

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۴- کارشناس ارشد، 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: ۹۴/۶/۱۸

پذیرش: ۹۴/۷/۲۵

کلیدواژگان:

فوم پلیمری

نانولوله کربنی چند دیواره

استحکام کششی

SEM

روش تاگوچی

چکیده

در پژوهش حاضر، خواص فوم‌های نانوکامپوزیت پلیمری با مقادیر مختلف نانولوله کربنی چند دیواره و تحت شرایط فرآیندی مختلف بررسی شده است. به این منظور پلیمر پلی‌آمید۶ به‌عنوان فاز زمینه انتخاب شد و با نانولوله‌های کربنی چند دیواره توسط دستگاه اکسترودر دو ماردونه در درصدهای وزنی نانولوله کربنی شامل ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵، اختلاط ذوبی شد. سپس نانوکامپوزیت‌های تولید شده توسط عامل فوم‌زای آزودی‌کربنامید در دستگاه تزریق بر پایه طراحی آزمایش‌ها به‌روش تاگوچی مطابق آرایه متعامد L16 فوم شدند. تاثیر درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و شرایط فرآیندی شامل فشار نگهداری و زمان اعمال فشار نگهداری هر کدام در چهار سطح مختلف، بر خواص مکانیکی و ساختاری نمونه‌های فوم نانوکامپوزیت بررسی شده است. استحکام کششی ویژه به‌عنوان خاصیت مکانیکی بررسی شد و برای بررسی خواص ساختاری، نمونه‌ها تحت آزمایش SEM قرار گرفتند که تصاویر مربوط به این تست نشان داد که ساختار میکروسلولی بسیار مناسبی حاصل شده است. مطابق نتایج آنالیز سیگنال به نویز، درصد وزنی نانولوله کربنی موثرترین پارامتر روی استحکام کششی ویژه و خواص ساختاری نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام کششی ویژه نمونه‌ها به میزان ۱۴۷٪ بهبود یافت. همچنین با افزودن نانولوله‌های کربنی، چگالی سلولی افزایش و متوسط اندازه سلولی کاهش یافت که به معنی دست‌یابی به شرایط بهینه برای تولید فوم می‌باشد.

Experimental investigation of properties of polymeric nanocomposite foams containing multi-walled carbon nanotubes using Taguchi method

Rezgar Hasanzadeh[1*], Taher Azdast[1], Ali Doniavi[1], Parastoo Esmaili[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

Polymeric foam
Multi-walled carbon nanotubes
Tensile strength
SEM
Taguchi method

Abstract

In the present study, the properties of polymeric nanocomposite foams investigated in variant multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) content and under various processing parameters. For this purpose, polyamide 6 (PA6) selected as matrix and melt compounded with MWCNT in variant weight percentages (i.e. 0, 0.5, 1 and 1.5%) using a twin-screw extruder. Then, the prepared nanocomposites were foamed using Azodicarbonamide as blowing agent by injection molding machine based on Design of Experiments (DOE) using Taguchi method according to L16 orthogonal array. Influence of weight percentage of MWCNTs and injection molding processing parameters including holding pressure and holding pressure time (all in four levels) investigated on mechanical and structural properties of nanocomposite foam samples. Specific tensile strength investigated as mechanical property and for investigation of structural properties of nanocomposite foam samples, SEM test has been done that the results of this test showed that a well microcellular structure achieved. According to the results of signal to noise ratio (S/N) weight percentage of MWCNTs is the most effective parameter on specific tensile strength and structural properties of nanocomposite foam samples. The results demonstrated that by adding 1 wt% of MWCNTs, specific tensile strength of samples increased about 147%. Also, the results indicated that by addition of MWCNTs, cell density increased and mean cell size decreased that means providing optimal conditions for foaming.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hasanzadeh, R. Azdast, T. Doniavi, A. Esmaili, P. Mamaghani, S. and Eungkee Lee, R., "Experimental investigation of properties of polymeric nanocomposite foams containing multi-walled carbon nanotubes using Taguchi method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 37-44, 2016.

۱- مقدمه

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 بی‌نظیر، نسبت به مواد کامپوزیتی در مقیاس‌های متداول، در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند.

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 عموما دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند.

پلاستیک یک ماده بسیار فراگیر و رایج در ساخت و تولید قطعات می‌باشد. یکی از خواص مهم پلاستیک‌ها انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌باشد. پلاستیک می‌تواند به راحتی و به ارزانی تغییر فرم یابد؛ به همین دلیل امروزه بسیاری از قطعات با پلاستیک ساخته می‌شوند. از آنجا که برای تمامی مواد، استفاده از پلاستیک کمتر مقرون به صرفه می‌باشد، برای صنعت بسیار با ارزش است که روشی برای کاهش مقدار ماده مصرفی در فرآیند تولید قطعه ابداع شود [۱].

امروزه در هر جا که از پلاستیک‌های جامد استفاده می‌شود، می‌توان برای کاهش مقدار ماده مصرفی وارد عمل شد. این صرفه‌جویی در هزینه‌های ماده مصرفی و حمل و نقل در بسیاری از موارد اثر مهمی بجا می‌گذارد. روش تولید فوم یا ایجاد حباب در توده ماده (خصوصا مواد پلاستیکی) یکی از روش‌های کاهش مواد مصرفی می‌باشد، به شرطی که بر عملکرد قطعه تاثیر منفی نگذارد. فوم‌ها به طور طبیعی و مصنوعی به شکل‌های مختلف وجود دارند. استفاده از فوم سبب کاهش وزن، کاهش هزینه و بهبود خصوصیاتی نظیر عایق حرارتی و صوتی می‌گردد [۲].

یکی از مشخصه‌های مهم فوم‌های پلیمری این است که عامل فوم‌ساز در حین فرآیند در درون زمینه پلیمری وارد شده و به صورت حباب‌های پایدار در درون سیستم باقی می‌ماند. دو نوع کلی از عوامل فوم‌ساز وجود دارد: عوامل فوم‌ساز شیمیایی و عوامل فوم‌ساز فیزیکی.

منظور از عامل فوم‌ساز فیزیکی، استفاده از یک گاز مانند نیتروژن، دی‌اکسید کربن یا بوتان جهت تولید فوم‌های پلیمری می‌باشد. اصولا هر گازی را می‌توان به عنوان عامل فوم‌ساز به کار برد، اما تمامی گازها در پروسه فوم کردن پاسخ قابل قبولی را نمی‌دهند. در حقیقت برخی از آن‌ها واکنش بهتری نسبت به حلالیت، نفوذ و یا فراریت نشان می‌دهند. عامل فوم‌ساز فیزیکی بدون تغییر شیمیایی، مستقیما تحت فشار به داخل مذاب پلیمر وارد می‌شود و تقریبا همواره منابع اصلی گازهای دمشی برای فوم‌های کم تراکم‌اند [۳].

برخی از مواد شیمیایی با انجام یک واکنش شیمیایی یا تحت اثر گرما، گاز آزاد می‌نمایند. این‌گونه مواد عموما در دمای معمولی جامد هستند و پایداری حرارتی خوبی دارند و در دمای بالا دچار تجزیه سریع می‌شوند. عموما عوامل فوم کننده شیمیایی تولید گاز نیتروژن، دی‌اکسید کربن، مونواکسید کربن و هیدروژن می‌نمایند. ترکیبات زیادی توانایی تولید گاز در اثر حرارت را دارا هستند که از این میان ۶ نوع ترکیب کلیدی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل آزودی‌کربنامید[1]، پاراتولوئن سولفونیل هیدرازید[2]، فنیل تترازول[3]، پاراتولوئن سولفونیل سمی کربازید[4]، دی نیترول نپتامتیلن تترامین[5] و بی‌کربنات سدیم[6] می‌باشد که از این میان، آزودی کربنامید شناخته‌ترین عامل فوم کننده است که تقریبا ۸۵ درصد از کل حجم مصرفی را به خود اختصاص داده است [۳].

نایلون۶ یکی از اعضای خانواده‌ی پلیمرهای ترموپلاستیک نایلونی است که به نام پلی‌آمید شناخته می‌شوند. نایلون۶ نخستین بار توسط پول اسکلاک تولید شد. نایلون۶ یکی از پرکاربرد ترین پلیمرها است. الیاف نایلون۶ بسیار محکم بوده، و دارای استحکام کششی بالایی است.

با توجه به اینکه در این تحقیق از روش قالب‌گیری تزریقی پلاستیک برای تولید نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی استفاده شده است، به شرح مختصری از این روش می‌پردازیم. 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 مورد نظر 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 [۴].

کارهای متعددی در زمینه فوم‌های نانوکامپوزیت پلیمری صورت گرفته است که از برجسته‌ترین آن‌ها می‌توان به کار اکولیئوچا و همکاران [۵] اشاره کرد که در تحقیقشان خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های اکسترودی پلی-استایرن را بررسی کردند. ایشان در تحقیقشان پلی‌اورتان را با نانولوله‌های کربنی در درصدهای وزنی مختلف اختلاط کرده و مشاهده کردند که با افزودن نانولوله‌های کربنی، متوسط اندازه سلولی کاهش می‌یابد درحالی‌که چگالی فوم افزایش می‌یابد.

یکی دیگر از کارهای برجسته انجام گرفته در زمینه فوم‌های نانوکامپوزیت پلیمری، کار زنگ و همکاران [۶] می‌باشد. ایشان در این تحقیق پلی‌متیل‌متاکریلات را با نانولوله‌های کربنی چند دیواره ترکیب کرده و کامپوزیت حاصل را توسط کربن‌دی‌اکسید، فوم کردند. ایشان خواص ساختاری و کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی فوم‌شده و همچنین فوم‌نشده را بررسی کردند. بر اساس نتایج بدست آمده از تحقیق ایشان، با افزودن ۰/۵٪ وزنی نانولوله کربنی که به طور مناسب داخل زمینه پخش شده بود، بهبودی به میزان ۴۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ به ترتیب در استحکام کششی، مدول کششی و تنش در نقطه شکست مشاهده گردید.

از دیگر کارهای برجسته انجام گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهش وان و همکاران [۷]، مسینگر و همکاران [۸] و لین و همکاران [۹] اشاره کرد.

با توجه به تحقیقات فراوان انجام گرفته، تحقیقی که بر پایه طراحی آزمایش‌ها به بررسی خواص فوم‌های نانوکامپوزیتی پلی‌آمید۶/ نانولوله‌های کربنی چند دیواره پرداخته باشد، مشاهده نگردید. به این منظور در پژوهش حاضر به بررسی استحکام کششی و خواص ساختاری فوم‌های نانوکامپوزیتی با ماتریس پلی‌آمید۶ در حضور درصدهای متفاوت نانولوله کربنی و شرایط مختلف فرآیندی تزریق بر پایه طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی و توسط

1. ADCA
2. TSH
3. 5-PT
4. PTSS
5. DNPT
6. SBC

نرم‌افزار مینی‌تب[1] پرداخته شده است که کاری جدید در زمینه فوم‌های پلیمری می‌باشد.

۲- طراحی آزمایش‌ها

یکی از مهم‌ترین مسائلی که امروزه در مباحث مهندسی مطرح می‌شود، موضوع طراحی آزمایش‌ها[2] 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 [۱۰].

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 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)، مثلا رسیدن به مقدار مشخص چگالی در تولید ترکیبی خاص. اما ممکن است هدف از انجام آزمایش، دسترسی به بیشترین مقدار اسمی باشد (بزگتر-بهتر)، مثلا حداکثر میزان استحکام کششی در تولید یک قطعه. آخرین حالت متغیر پاسخ، رسیدن به کم‌ترین مقدار اسمی است (کوچکتر-بهتر)، مثلا کمترین متوسط اندازه سلولی در فوم‌های پلیمری [۱۰].

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. 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 موردنظر 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 تقریبا غیر ممکن است، می‌توان با درصد قابل قبولی تصور کرد که آزمایش مورد نظر به دقت و صحت مورد نظر دست یافته است [۱۰].

در این تحقیق، طراحی آزمایش‌ها مطابق با روش تاگوچی[3] انجام گرفت. روش تاگوچی که ترکیبی از تکنیک‌های آماری و ریاضی است، می‌تواند با کم‌ترین تعداد آزمایش‌ها، شرایط بهینه را تعیین کند که این روش به اصول مهندسی کیفیت اشاره دارد و شامل فرآیند کنترل آماری و روش‌های جدید مدیریت کیفیت می‌شود و مزیت اصلی آن کاهش در مدت زمان تولید محصولات می‌باشد. در تحقیق حاضر، تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره و شرایط فرآیندی شامل پارامترهای فرآیند تزریق بر روی خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های شیمیایی پلی‌آمید۶/ نانولوله‌ی کربنی بررسی می‌شود. به همین جهت، خواص ساختاری و خواص مکانیکی نمونه‌ها به عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته می‌شوند.

اولین و مهم‌ترین پارامتری که در پژوهش حاضر تاثیرش بر روی متغیرهای پاسخ بررسی می‌شود، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی می‌باشد. علاوه بر این پارامتر، با توجه به مطالعات انجام شده و شرایط عملی پیش‌آمده هنگام تولید نمونه‌ها و شرایط کنترل‌پذیری پارامترها، پارامترهای فشار نگهداری و زمان اعمال فشار نگهداری به عنوان پارامترهای فرآیندی که تاثیر آن‌ها بر روی متغیر پاسخ بررسی می‌شود، در نظر گرفته شدند.

پس از تعیین متغیرهای پاسخ و پارامترهای تاثیرگذار بر مسئله، گام بعدی تعیین سطوح هر یک از پارامترها می‌باشد. 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 به‌دست می‌آید؛ بنابراین در پژوهش حاضر ۳ سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی به عنوان سطوح نانولوله کربنی در نظر 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 ۸۰ مگاپاسکال نمونه‌ها به‌صورت کامل پر نمی‌شوند و نمونه‌های ناقصی تولید می‌شوند؛ پس ۸۰ مگاپاسکال به عنوان کم‌ترین فشار نگهداری در نظر گرفته شد. از طرفی دیگر با توجه به ظرفیت دستگاه تزریق، ۱۴۰ 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 ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. برای تعیین سطوح زمان اعمال فشار نگهداری با انجام آزمایش‌ها مشخص شد که در زمان‌های اعمال فشار نگهداری کمتر از ۱ ثانیه، نمونه‌ها به‌صورت مطلوب فوم نمی‌شوند؛ بنابراین ۱ ثانیه به عنوان کم‌ترین زمان اعمال فشار نگهداری در نظر گرفته شد. با توجه به مطالعات انجام شده مشخص شد که در زمان‌های اعمال فشار نگهداری بالا با توجه به انجماد درگاه تزریق، تاثیر این عامل قابل چشم‌پوشی است؛ بنابراین زمان اعمال فشار نگهداری نیز در چهار سطح شامل ۱، ۲، ۳ و ۴ ثانیه در نظر گرفته شد. به این ترتیب پارامترهای مسئله و سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها مطابق جدول ۱ انتخاب شدند.

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

پارامتر \ سطح	۱	۲	۳	۴
درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	۰	۰/۵	۱	۱/۵
زمان اعمال فشار نگهداری (s)	۱	۲	۳	۴
فشار نگهداری (MPa)	۸۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰

با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده و سطوح انتخابی برای آن‌ها، طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی مطابق با آرایه‌ی متعامد L16 توسط

1. Minitab
2. Design of Experiments
3. Taguchi method

نرم‌افزار مینی‌تب مطابق جدول ۲ انجام گرفت [۱۱]. به عبارتی دیگر مطابق این جدول به جای انجام ۶۴ آزمایش مختلف برای رسیدن به شرایط بهینه، مطابق روش تاگوچی ۱۶ آزمایش مطابق جدول ۲ انجام می‌گیرد که تعداد آزمایش‌ها، هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

جدول ۲ نحوه انجام آزمایش‌ها مطابق آرایه متعامد L16 روش تاگوچی

شماره آزمایش	درصد وزنی نانولوله کربنی (wt%)	زمان اعمال فشار نگهداری (s)	فشار نگهداری (MPa)
۱	۰	۱	۸۰
۲	۰	۲	۱۰۰
۳	۰	۳	۱۲۰
۴	۰	۴	۱۴۰
۵	۰/۵	۱	۱۰۰
۶	۰/۵	۲	۸۰
۷	۰/۵	۳	۱۴۰
۸	۰/۵	۴	۱۲۰
۹	۱	۱	۱۲۰
۱۰	۱	۲	۱۴۰
۱۱	۱	۳	۸۰
۱۲	۱	۴	۱۰۰
۱۳	۱/۵	۱	۱۴۰
۱۴	۱/۵	۲	۱۲۰
۱۵	۱/۵	۳	۱۰۰
۱۶	۱/۵	۴	۸۰

در روش تاگوچی، تابع زیانی وجود دارد که نهایتا بصورت نسبت سیگنال به نویز معرفی می‌شود. بسته به نوع مسئله، برای نسبت سیگنال به نویز از یکی از صورت‌های معادلات (۱) استفاده می‌شود [۱۱].

$$S/N=10\log[\frac{\bar{Y}^2}{S^2}] \quad \text{اسمی-بهتر}$$

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

$$S/N=-10\log[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2] \quad \text{کوچکتر-بهتر}$$

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 برای استحکام کششی و چگالی سلولی از حالت بزرگتر-بهتر و برای متوسط اندازه سلولی از حالت کوچکتر-بهتر استفاده شده است که در ادامه دلایل این امر بیان می‌شود [۱۱].

۳- نمونه‌سازی

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. هم‌چنین برای فوم کردن نمونه‌ها از عامل فوم‌زای آزودی‌کربنامید و برای فراهم شدن شرایط بهتر برای فوم شدن از مقدار اندکی روغن پارافین استفاده شد. جدول ۳ درصدهای وزنی در نظر گرفته شده برای مواد مختلف در این تحقیق را نشان می‌دهد.

پلی‌آمید۶ قبل از اختلاط به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در دستگاه خشک‌کن، رطوبت‌گیری شد (با توجه به اینکه در این مرحله گرانول‌ها از کیسه خارج شده و فاقد رطوبت بودند، زمان رطوبت‌گیری کم در نظر گرفته شد). سپس نانوکامپوزیت‌ها با درصدهای وزنی موردنظر، توسط دستگاه اکسترودر دو ماردونه همسوگرد ZSK-25 ساخت آلمان با قطر ماردون ۲۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر برابر با ۴۸، تولید شدند که جدول ۴ شرایط فرآیندی اکسترود را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مواد بعد از اکسترود کردن داخل حمام آب، خنک‌کاری شدند و مقدار زیادی رطوبت به خود گرفتند، گرانول‌های نانوکامپوزیت، قبل از تزریق به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در داخل قیف تغذیه دستگاه تزریق، خشک شدند. سپس نمونه‌های مورد نظر مطابق جدول ۲ در دستگاه تزریق پلاستیک محصول شرکت نکو بهینه ماشین، فوم شدند. قالب دستگاه تزریق، ورقه‌ای شکل به ابعاد ۸×۱۷/۵ سانتی‌متر مربع و با ضخامت ۳/۷ میلی‌متر می‌باشد که شکل ۱ این قالب و شکل ۲ تعدادی از نمونه‌های فوم تولید شده داخل این قالب را نشان می‌دهند.

جدول ۳ درصد وزنی مواد در سطوح مختلف

سطح / درصد وزنی مواد	۱	۲	۳	۴
نانولوله کربنی چند دیواره	۰	۰/۵	۱	۱/۵
آزودی‌کربنامید	۲	۲	۲	۲
روغن پارافین	۱	۱	۱	۱
پلی‌آمید۶	۹۷	۹۶/۵	۹۶	۹۵/۵

جدول ۴ شرایط فرایندی اکسترود کردن

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

شکل ۱ قالب دستگاه تزریق استفاده شده در پژوهش حاضر

شکل ۲ نمونه‌های فوم شده در درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی

سپس با استفاده از دستگاه برش لیزر NCC9012 ساخت کشور چین، نمونه‌هایی مطابق با استاندارد ASTM-D638 [۱۲] به منظور تست کشش بریده شدند که شکل ۳ تعدادی از نمونه‌های بریده شده را نشان می‌دهد.

شکل ۳ نمونه‌های فوم خالص برش خورده جهت انجام تست کشش

جهت انجام تست کشش از دستگاه گوتک[1] مدل AI-7000M با حداکثر ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتن و با توجه به مقالات مشابه در زمینه بررسی خواص مکانیکی پلی‌آمید۶ از سرعت کشش ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد.

سپس جهت مشاهده ساختار سلولی سطح مقطع نمونه‌ها، نمونه‌ها در داخل نیتروژن مایع شکسته شدند. استفاده از نیتروژن مایع باعث می‌شود که نمونه‌ها بسیار ترد شده و با اعمال نیروی کمی شکسته شوند که این اعمال نیروی کم باعث می‌شود که به ساختار سلولی سطح مقطع نمونه‌ها آسیبی وارد نشود. سپس به منظور بررسی بهتر ساختار سلولی نمونه‌ها، از آنجا که پلیمرها موادی غیر هادی هستند و برای تست SEM باید بین نمونه و پایه، اتصال الکتریکی برقرار باشد، سطح مقطع نمونه‌ها پوشش‌دهی طلا شد. پس از پوشش‌دهی طلا، نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی میرا ۳[2] ساخت کمپانی تسکان[3] چک قرار گرفتند که شکل ۴ تعدادی از تصاویر مربوط به این تست را نشان می‌دهد.

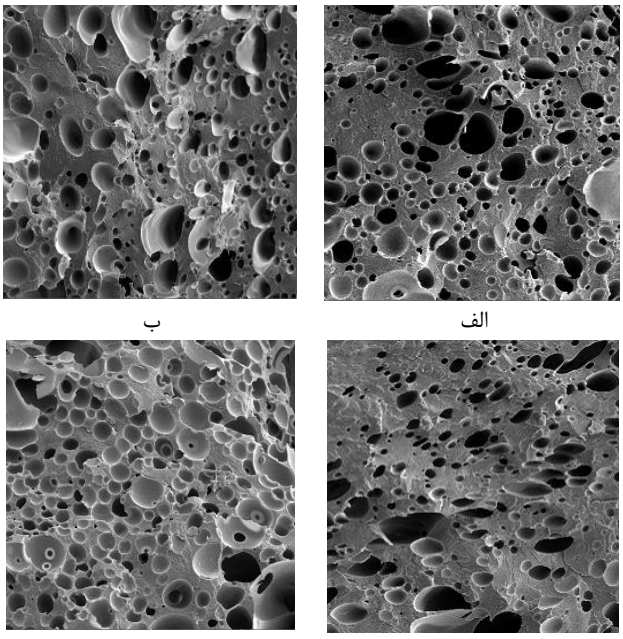
۴- نتایج و بحث

۴-۱- استحکام کششی ویژه

استحکام کششی ویژه هر نمونه عبارتست از استحکام کششی آن نمونه تقسیم بر چگالی همان نمونه. برای هر تست به طور متوسط از هر سطح، ۳ بار آزمایش تکرار شده است و میانگین این ۳ تکرار به عنوان داده‌ی نهایی مطابق جدول ۵ گزارش شده است.

با وارد کردن داده‌های استحکام کششی ویژه در نرم‌افزار مینی‌تب و آنالیز سیگنال به نویز مطابق مدل بزرگتر-بهتر (چراکه هدف، بهبود میزان استحکام کششی ویژه نمونه‌هاست)، اثرات اصلی پارامترها و نتایج سیگنال به نویز به ترتیب مطابق شکل ۵ و جدول ۶ به دست آمد. جدول ۶ همچنین ترتیب پارامترها بر اساس درجه تاثیرگذاری را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج آنالیز سیگنال به نویز، درصد وزنی نانولوله کربنی، موثرترین پارامتر روی استحکام کششی ویژه نمونه‌ها می‌باشد. پس از درصد وزنی نانولوله کربنی، زمان اعمال فشار نگهداری و فشار نگهداری به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند.



الف ب ج د

شکل ۴ تصاویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر مربوط به الف) آزمایش اول؛ فوم پلی-آمید۶ خالص، ب) آزمایش پنجم؛ فوم نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۵٪ وزنی نانولوله کربنی، ج) آزمایش نهم؛ فوم نانوکامپوزیتی حاوی ۱٪ وزنی نانولوله کربنی و د) آزمایش سیزدهم؛ فوم نانوکامپوزیتی حاوی ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی

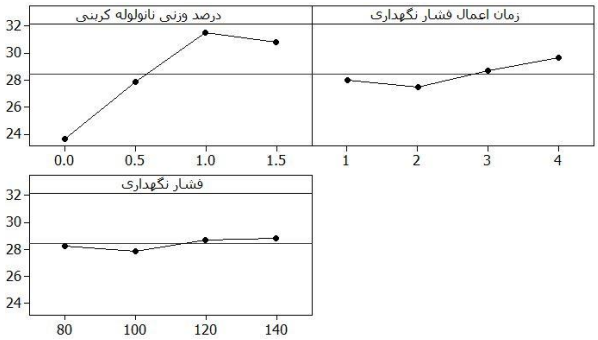
جدول ۵ نتایج استحکام کششی ویژه

نمونه	استحکام کششی ویژه (MPa)	انحراف معیار
۱	۱۴/۴۲	۰/۸۲
۲	۱۳/۹۳	۰/۶۴
۳	۱۵/۷۲	۰/۸۶
۴	۱۶/۷۸	۱/۰۵
۵	۱۹/۷۴	۰/۷۱
۶	۲۱/۵۷	۰/۹۱
۷	۲۷/۶۴	۱/۱۱
۸	۳۱/۰۳	۱/۲۶
۹	۳۸/۰۹	۰/۷۴
۱۰	۳۴/۱۸	۱/۱۴
۱۱	۳۶/۹۸	۰/۶۱
۱۲	۴۰/۹۴	۱/۲۹
۱۳	۳۶/۳۵	۰/۸۹
۱۴	۲۹/۷۲	۱/۱۵
۱۵	۳۳/۷۹	۱/۳۲
۱۶	۳۹/۲۹	۰/۸۴

همانطور که بیان شد، درصد وزنی نانولوله کربنی موثرترین پارامتر روی استحکام کششی ویژه‌ی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی می‌باشد که مطابق نتایج، با افزودن نانولوله کربنی به ماتریس فوم پلیمری، استحکام کششی ویژه‌ی آن‌ها به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد؛ به طوری‌که با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام کششی فوم پلیمری به میزان حدود ۱۴۷٪ بهبود یافت که دلیل این امر را می‌توان استحکام فوق‌العاده زیاد نانولوله‌های کربنی در مقایسه با پلی‌آمید۶ دانست که باعث می‌شود وقتی نانولوله کربنی را به پلی‌آمید۶ اضافه می‌کنیم، استحکام آن بصورت چشمگیری بالا برود. با

1. Gotech
2. MIRA 3
3. Tescan

افزایش بیشتر درصد وزنی نانولوله کربنی به سطح ۱/۵٪، استحکام کششی ویژه نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی مقداری پایین آمد که دلیل این امر را می‌توان کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربنی در درصدهای بالا بیان کرد که در اثر اشباع پلیمر روی می‌دهد که پلیمر توانایی حل کردن نانومواد داخل خود را از دست می‌دهد. از آنجایی که نانولوله‌های کربنی با نیروهای ضعیف واندروالسی کنار هم قرار می‌گیرند، این کلوخه‌ای شدن سبب کاهش استحکام می‌شود.



شکل ۵ اثرات اصلی پارامترها برای استحکام کششی ویژه

جدول ۶ نتایج سیگنال به نویز استحکام کششی ویژه

سطح	درصد وزنی نانو لوله کربنی (wt%)	زمان اعمال فشار نگهداری (s)	فشار نگهداری (MPa)
۱	۲۳/۶۲	۲۷/۹۸	۲۸/۲۷
۲	۲۷/۸۱	۲۷/۴۲	۲۷/۹۰
۳	۳۱/۴۷	۲۸/۶۷	۲۸/۷۱
۴	۳۰/۷۸	۲۹/۶۱	۲۸/۸۰
اختلاف	۷/۸۵	۲/۱۹	۰/۹۰
رتبه‌بندی	۱	۲	۳

مطابق نتایج، زمان اعمال فشار نگهداری دومین پارامتر موثر روی استحکام کششی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی می‌باشد که با افزایش آن، استحکام کششی ویژه افزایش می‌یابد. دلیل این امر را اینگونه می‌توان بیان کرد که با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری، فشار نگهداری مدت زمان بیشتری روی نمونه‌ها اعمال می‌شود و باعث می‌شود نمونه‌هایی فشرده‌تر و چگال‌تر تولید شوند که استحکام بالاتری دارند.

نتایج نشان داد که فشار نگهداری کم تاثیرترین پارامتر روی استحکام کششی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی می‌باشد که با افزایش آن، استحکام کششی ویژه به مقدار اندکی افزایش می‌یابد.

۴-۲- چگالی سلولی

چگالی سلولی در واقع مقیاسی از مقدار سلول موجود در واحد حجم نمونه را به دست می‌دهد که با توجه به رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید.

$$N_{cell} = \left(\frac{nM^2}{A}\right)^{3/2} * \frac{\rho_p}{\rho_f} \qquad (۲)$$

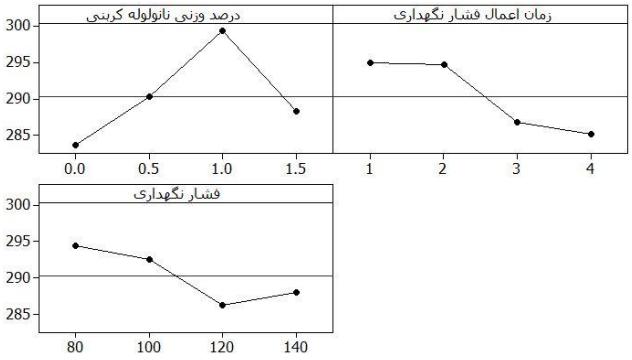
که در این رابطه n تعداد سلول‌های شمارش شده در تصاویر دوبعدی SEM با بزرگنمایی M و سطح مقطع A می‌باشد. ρ_p و ρ_f به ترتیب چگالی نمونه‌های فوم نشده و فوم شده می‌باشند.

با تحلیل تصاویر SEM، نتایج چگالی سلولی به صورت جدول ۷ حاصل شد.

با وارد کردن نتایج چگالی سلولی در نرم‌افزار مینی‌تب و آنالیز سیگنال به نویز برای نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی مطابق مدل بزرگتر-بهتر (چرا که هرچه مقدار چگالی سلولی بیشتر باشد، نشان دهنده‌ی میزان فوم‌شدن بیشتر و شرایط بهتر است)، اثرات اصلی پارامترها و نتایج آنالیز سیگنال به نویز به ترتیب مطابق شکل ۶ و جدول ۸ به دست می‌آید. همچنین رتبه‌بندی پارامترها براساس درجه تاثیرگذاری بر روی چگالی نسبی در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۷ نتایج چگالی سلولی

نمونه	چگالی سلولی (سلول در سانتی‌متر مکعب)
۱	$۵/۷۸۶۳۹\times۱۰^{۱۴}$
۲	$۴/۶۵۸۵۰\times۱۰^{۱۴}$
۳	$۵/۶۴۰۷۰\times۱۰^{۱۳}$
۴	$۳/۲۹۵۰۰\times۱۰^{۱۳}$
۵	$۴/۸۳۰۵۹\times۱۰^{۱۴}$
۶	$۶/۰۹۴۶۹\times۱۰^{۱۴}$
۷	$۳/۴۰۸۸۴\times۱۰^{۱۴}$
۸	$۱/۱۲۴۱۷\times۱۰^{۱۴}$
۹	$۹/۳۱۵۰۷\times۱۰^{۱۴}$
۱۰	$۹/۵۵۳۹۰\times۱۰^{۱۴}$
۱۱	$۸/۲۲۶۱۴\times۱۰^{۱۴}$
۱۲	$۱/۰۰۸۹۲\times۱۰^{۱۵}$
۱۳	$۳/۷۶۸۴۷\times۱۰^{۱۴}$
۱۴	$۳/۱۲۰۱۰\times۱۰^{۱۴}$
۱۵	$۱/۴۲۲۳۵\times۱۰^{۱۴}$
۱۶	$۲/۷۰۸۷۰\times۱۰^{۱۴}$



شکل ۶ اثرات اصلی پارامترها بر روی چگالی سلولی

جدول ۸ نتایج آنالیز سیگنال به نویز چگالی سلولی

سطح	درصد وزنی نانو لوله کربنی (wt%)	زمان اعمال فشار نگهداری (s)	فشار نگهداری (MPa)
۱	۲۸۳/۵	۲۹۵/۰	۲۹۴/۵
۲	۲۹۰/۳	۲۹۴/۶	۲۹۲/۵
۳	۲۹۹/۳	۲۸۶/۸	۲۸۶/۳
۴	۲۸۸/۳	۲۸۵/۰	۲۸۸/۰
اختلاف	۱۵/۸	۹/۹	۸/۱
رتبه‌بندی	۱	۲	۳

مطابق نتایج آنالیز سیگنال به نویز، موثرترین پارامتر بر روی چگالی سلولی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی، درصد وزنی نانولوله کربنی می‌باشد. نتایج نشان داد که بعد از درصد وزنی نانولوله کربنی به ترتیب زمان اعمال فشار نگهداری و فشار نگهداری در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

با افزودن نانولوله کربنی به ماتریس پلیمری، چگالی سلولی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی افزایش می‌یابد. برای درصد وزنی نانولوله کربنی بهترین سطح، سطح سوم که شامل ۱٪ وزنی نانولوله کربنی است، می‌باشد. دلیل این امر را اینگونه می‌توان بیان کرد که با افزودن نانولوله‌های کربنی داخل پلی-آمید۶، نقاط مناسبی جهت هسته‌زائی تشکیل می‌شود که این نقاط باعث افزایش تعداد سلول‌های تشکیل شده می‌شوند و چگالی سلولی افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر به سطح چهارم که شامل ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی می‌باشد، میزان چگالی سلولی کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان در اثر کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربنی در ماتریس پلیمری دانست که همانطور که بیان گردید در درصدهای بالای نانولوله کربنی و در اثر اشباع ماتریس پلیمری به‌وجود می‌آید که توانایی حل کردن نانولوله‌های کربنی داخل خود را از دست می‌دهد که این کلوخه‌ای شدن به نوبه‌ی خود موجب کاهش چگالی سلولی و عدم فوم شدن مناسب می‌گردد.

همان‌طور که بیان شد مطابق نتایج، زمان اعمال فشار نگهداری دومین پارامتر موثر بر روی چگالی سلولی می‌باشد. با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری، چگالی سلولی نمونه‌ها کاهش می‌یابد به گونه‌ای که سطح اول که زمان اعمال فشار نگهداری ۱ ثانیه می‌باشد، بهترین سطح برای آن است. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری، فشار نگهداری مدت زمان بیشتری بر روی نمونه‌ها اعمال می‌شود که مانع از شکل‌گیری سلول‌ها و فوم شدن مناسب نمونه‌ها می‌شود.

نتایج نشان داد که فشار نگهداری کمترین تاثیر را بر روی چگالی سلولی نمونه‌ها داشت. مطابق نتایج با افزایش فشار نگهداری، چگالی سلولی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و بهترین سطح برای آن، سطح اول که ۸۰ مگاپاسکال است، می‌باشد. دلیل این امر را نیز می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش فشار نگهداری، نمونه‌ها تحت اعمال فشار بیشتری قرار می‌گیرند که این اعمال فشار بیشتر مانع از تشکیل حباب‌ها و فوم شدن مناسب نمونه‌ها می‌شود.

۴-۳- متوسط اندازه سلولی

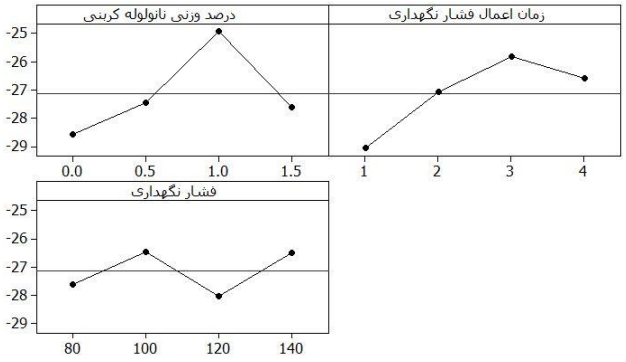
به منظور تعیین متوسط اندازه سلولی، اندازه تعدادی از سلول‌ها از روی تصاویر SEM اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها به عنوان متوسط اندازه سلولی در جدول ۹ گزارش شده است.

با وارد کردن داده‌های متوسط اندازه سلولی در نرم‌افزار مینی‌تب و تحلیل سیگنال به نویز آن‌ها مطابق روش کوچکتر-بهتر (چراکه هرچه اندازه سلول‌ها کوچکتر باشد، شرایط فوم بهینه‌تر است)، اثرات اصلی پارامترها و نتایج آنالیز سیگنال به نویز به ترتیب مطابق شکل ۷ و جدول ۱۰ حاصل شد. همچنین جدول ۱۰ ترتیب پارامترها بر اساس درجه تاثیرگذاری بر روی متوسط اندازه سلولی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج آنالیز سیگنال به نویز، ترتیب اثرگذاری پارامترها بر روی متوسط اندازه سلولی عبارت است از: درصد وزنی نانولوله کربنی، زمان اعمال فشار نگهداری و فشار نگهداری. همان‌طور که نتایج نشان داد و بیان گردید، درصد وزنی نانولوله کربنی موثرترین پارامتر بر روی متوسط اندازه سلولی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی می‌باشد. با افزودن نانولوله کربنی به ماتریس پلیمری، متوسط اندازه سلولی کاهش و مقدار سیگنال به نویز افزایش می‌یابد.

جدول ۹ نتایج متوسط اندازه سلولی

نمونه	متوسط اندازه سلولی (میکرومتر)	انحراف معیار
۱	۳۱/۹۵	۱/۵۴۶
۲	۲۴/۲۵	۱/۲۲۰
۳	۲۶/۰۹	۲/۱۱۲
۴	۲۵/۷۸	۰/۸۵۴
۵	۳۰/۰۸	۱/۷۳۹
۶	۲۵/۱۶	۱/۴۱۱
۷	۱۶/۸۲	۲/۰۸۶
۸	۲۴/۳۶	۱/۴۲۹
۹	۲۴/۱۲	۰/۶۱۴
۱۰	۱۶/۱۸	۱/۲۴۷
۱۱	۱۷/۴۸	۱/۴۱۵
۱۲	۱۴/۰۲	۲/۰۰۶
۱۳	۲۸/۲۴	۱/۳۸۲
۱۴	۲۶/۳۱	۲/۰۴۲
۱۵	۱۹/۱۰	۱/۴۶۴
۱۶	۲۳/۵۳	۲/۵۱۷



شکل ۷ اثرات اصلی پارامترها بر روی متوسط اندازه سلولی

جدول ۱۰ نتایج آنالیز سیگنال به نویز متوسط اندازه سلولی

سطح	درصد وزنی نانو لوله کربنی (wt%)	زمان اعمال فشار نگهداری (s)	فشار نگهداری (MPa)
۱	-۲۵/۵۸	-۲۹/۰۸	-۲۷/۶۰
۲	-۲۷/۴۶	-۲۷/۰۷	-۲۶/۴۵
۳	-۲۴/۹۰	-۲۵/۸۳	-۲۸/۰۳
۴	-۲۷/۶۲	-۲۶/۵۸	-۲۶/۴۸
اختلاف	۳/۶۸	۳/۲۵	۱/۵۷
رتبه‌بندی	۱	۲	۳

به عبارتی دیگر با توجه به نتایج آنالیز سیگنال به نویز برای متوسط اندازه سلولی و چگالی سلولی، با افزودن نانولوله کربنی به ماتریس پلیمری، سلول‌های ریزتر ولی با تعداد بیشتری ایجاد می‌شوند که بهینه‌ترین حالت برای تولید فوم می‌باشد. بهینه‌ترین شرایط برای درصد وزنی نانولوله کربنی، سطح سوم که شامل ۱٪ وزنی نانولوله کربنی می‌باشد، است. با افزایش بیشتر نانولوله کربنی به سطح چهارم که شامل ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی می‌باشد، متوسط اندازه سلولی افزایش و مقدار سیگنال به نویز کاهش می‌یابد. در این سطح از نانولوله کربنی، سلول‌های درشت‌تر و با تعداد کمتر نسبت به حالت ۱٪ وزنی تولید می‌شود.

نتایج نشان داد که زمان اعمال فشار نگهداری دومین پارامتر موثر بر روی متوسط اندازه سلولی می‌باشد. با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری، متوسط اندازه سلولی کاهش و مقدار سیگنال به نویز افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری، سلولی‌های ریزتری تولید می‌شود که دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری، فشار نگهداری مدت زمان بیشتری بر روی نمونه‌ها اعمال می‌شود و اجازه رشد به سلول‌ها نمی‌دهد و سلول‌های ریزی ایجاد می‌شود. بهترین حالت برای زمان اعمال فشار نگهداری سطح سوم یعنی ۳ ثانیه می‌باشد.

پارامتری که کمترین تاثیر را بر روی متوسط اندازه سلولی داشت، فشار نگهداری می‌باشد که رفتار قابل توجیهی را از خود نشان نداد. مطابق نتایج، بهترین حالت برای فشار نگهداری سطح دوم (۱۰۰ مگاپاسکال) می‌باشد.

۵-نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، استحکام کششی و خواص ساختاری حاصل از تست SEM مربوط به فوم‌های نانوکامپوزیتی پلی‌آمید۶/ نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر پایه طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی و بر اساس آرایه‌های متعامد L16 بررسی شدند. تاثیر درصد وزنی نانولوله کربنی در چهار سطح ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی و شرایط فرآیندی شامل فشار نگهداری و زمان اعمال فشار نگهداری بر روی خواص نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی بررسی شد. نتایج نشان داد که درصد وزنی نانولوله کربنی موثرترین پارامتر بر روی استحکام کششی، چگالی سلولی و متوسط اندازه سلولی بود. با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی به پلی‌آمید۶، استحکام کششی به میزان ۱۴۷٪، چگالی سلولی به میزان ۲۳۰٪ و متوسط اندازه سلولی به میزان ۳۴٪ بهبود یافت. به عبارتی دیگر با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی چند دیواره سلول‌هایی ریزتر ولی با تعداد بیشتری تولید شدند ضمن آنکه استحکام نمونه‌ها افزایش یافت. با افزودن بیشتر نانولوله کربنی چند دیواره به میزان ۱/۵٪ وزنی، خواص نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی کاهش یافت که دلیل این امر را می‌توان در کلوخه‌ای شدن نانولوله‌ها دانست که مانع از انتقال کافی خواص نانولوله‌ها به ماتریس پلیمری می‌شود.

۶- مراجع

[1] Clarke, A. J., "Tupperware: the Promise of Plastic in 1950s America: Smithsonian Institution", 2014.

[2] Agrawal, G. and Duan, P., "Polymer foam Cell Morphology Control and Use in Borehole Filtration Devices", Google Patents, 2015.

[3] Reglero Ruiz, J. A. Vincent, M. Agassant, J. A. Claverie, A. and Huck, S. "Morphological Analysis of Microcellular PP Produced in a Core-back Injection Process Using Chemical Blowing Agents and Gas Counter Pressure", Polymer Engineering & Science, 2015.

[4] 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.

[5] Okolieocha, C. Köppl, T. Kerling, S. Tölle, F. J. Fathi, A. Mülhaupt, R. and Altstädt, A., "Influence of Graphene on the Cell Morphology and Mechanical Properties of Extruded Polystyrene foam", Journal of Cellular Plastics, pp. 0021955X14566084, 2015.

[6] Zeng, C. Hossieny, N. Zhang, C. Wang, B. and Walsh, S. M., "Morphology and Tensile Properties of PMMA Carbon Nanotubes Nanocomposites and Nanocomposites foams", Composites Science and Technology, Vol. 82, pp. 29-37, 2013.

[7] Wan, F. Tran, M. P. Leblanc, C. Béchet, E. Plougonven, E. Léonard, A. Detrembleur, C. Noels, L. Thomassin, J. M. and Nguyen, V. D., "Experimental and Computational Micro–mechanical Investigations of Compressive Properties of Polypropylene/Multi–Walled Carbon Nanotubes Nanocomposite Foams", Mechanics of Materials, 2015.

[8] Messinger, R. Marks, T. Gleiman, S. Milstein, F. and Chmelka, B., "Molecular Origins of Macroscopic Mechanical Properties of Elastomeric Organosiloxane Foams", Macromolecules, 2015.

[9] Lin, N. Chen, Y. Hu, F. and Huang, J., "Mechanical Reinforcement of Cellulose Nanocrystals on Biodegradable Microcellular Foams with Melt-compounding Process", Cellulose, Vol. 22, No. 4, pp. 2629-2639, 2015.

[10] 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.

[11] Gordon, S., "Design of Experiments, in: Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle", Eds., pp. 187-200: Springer, 2015.

[12] 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.