

Optimization of Mechanical Properties of PP-Polymer Foam Fabricated via Extruder

Hamidreza Azimi^{*1}, Davoud Jahani², Amin Mohebbifar³,
Mohammadreza Yazdan panah⁴

1- Asistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, Postal Code: 5375171379

2- Asistant Professor, Department of mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran, Postal Code: 551761167

3- M.Sc., Department of Polymer Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, maragheh, Iran, Postal Code: 8311155181

4- M.Sc., Department of Polymer Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran, Postal Code: 551761167

Abstract

Research subject: Well-designed plastic foams, with respect to their cell density and cell size, open-or-close cells, and the cell uniformity, compared to their counterpart unfoamed plastic parts, beside of having the advantages of less material consumption, dimensional stability, better processability, and a higher surface quality, they can have superior mechanical and physical properties, including strength to weight, impact strength, thermal and dielectric properties. The temperature distribution in the different zones of the extruder, the qualities and quantities of the nanoparticle additives and their dispersion in the polymer matrix can have significant effect on the mechanical properties of the produced foams by the extruder.

Research approach: In this study, using an extruder, MA-g-polypropylene microcellular foams, containing 3, 7 and 9 wt. % of nano-clay particles, were produced under three temperature arrangements on the extruder and the material and the processing effects on the mechanical properties were investigated.

Main results: The result of this investigation shows that adding of nanoclay improves the mechanical properties of MA-g-PP.s foams. As an example, the results show that the sample with 7 wt. % of surface modified nanoclay, owns about 10% higher impact toughness compared to the samples produced without nanoclay. Also, for the same samples a rise of about 5% was recorded in Young's modulus. The microstructural studies of the produced foams by scanning electron microscope (SEM) show that adding of nanoclay can result on more foam uniformity and smaller cell size. In this study, the smallest average cell size (87.5 μm) and the lowest density (0.3 g/cm^3) were recorded for a sample with 7 wt. % nanoclay.

key words

Extruder

MA-g-polypropylene

Mechanical

Properties

Nanoclay

Nanocomposites

*To whom correspondence should be addressed:

h.azimi@azaruniv.ac.ir

پژوهش‌های کاربردی مهندسی پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای
سال چهارم، شماره ۴، نسخه ۱
بهار ۱۴۰۰، صفحه ۱۰۵-۱۲۰

بهینه‌سازی خواص مکانیکی فوم‌های پلی‌پروپیلن تولید شده با اکسترودر

حمیدرضا عظیمی^{۱*}، داود جهانی^۲، امین محبی فر^۳، محمدرضا یزدان پناه^۴

۱- استادیار، مهندسی پلیمر، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی
آذربایجان، تبریز، ایران

کد پستی: ۵۳۷۵۱۷۱۳۷۹

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران

کد پستی: ۵۵۱۷۶۱۱۶۷

۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

کد پستی: ۵۵۱۸۱ ۸۳۱۱۱

۴- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پلیمر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران

کد پستی: ۵۵۱۷۶۱۱۶۷

چکیده

موضوع تحقیق: فوم‌های پلاستیکی خوب طراحی شده از دیدگاه چگالی سلول‌ها و اندازه آن‌ها، باز یا بسته بودن و یکنواخت بودن سلول‌ها، در کنار داشتن امتیازهایی از قبیل مصرف مواد کمتر، ثبات ابعادی بالاتر، فرایندپذیری بهتر و کیفیت سطح مطلوب‌تر نسبت به پلاستیک‌های فوم نشده متناظر خود، می‌توانند خواص مکانیکی و فیزیکی برتری، مانند استحکام به وزن، استحکام به ضربه، خواص حرارتی و دی الکتریکی داشته باشند. چگونگی توزیع دما در نواحی مختلف اکسترودر، کمیت و کیفیت نانوذرات افزودنی و چگونگی توزیع آن‌ها در زمینه پلیمر می‌تواند تأثیر چشمگیری در خصوصیات مکانیکی فوم‌های اکسترودر داشته باشد.

روش تحقیق: در این تحقیق با استفاده از دستگاه اکسترودر، فوم‌های میکروسلولی پلی‌پروپیلن پیوندخورده با مالئیک‌انیدرید با افزودن ۳، ۷ و ۹٪ وزنی نانورس اصلاح سطح شده، در سه شرایط دمایی اکسترودر تولید و اثر مواد و فرایندها در خواص مکانیکی مورد تحقیق قرار گرفت.

نتایج اصلی: نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانورس موجب بهبود خواص مکانیکی فوم پلی‌پروپیلن پیوندی با مالئیک‌انیدرید می‌شود. به عنوان مثال، نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های درست شده حاوی ۷٪ رس اصلاح شده سطحی، حدود ۱۰ درصد مقاومت به ضربه بیش‌تری نسبت به نمونه‌های بدون نانورس دارد. همچنین برای همین نمونه‌ها افزایش حدود ۵ درصدی در مدول ینگ نسبت به سایر نمونه‌ها ثبت شده است. همچنین بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پویشی، نشان‌دهنده این است که افزودن نانورس موجب یکنواخت شدن ساختار فوم و سلول‌های ریزتر می‌شود. در این تحقیق، کم‌ترین اندازه متوسط سلول‌ها (۸۷/۵ میکرومتر) و پایین‌ترین چگالی فوم (۰/۳ گرم بر سانتی متر مکعب) برای نمونه حاوی ۷٪ رس که در حالت کاری دو تولید شده بود، ثبت

کلمات کلیدی

اکسترودر

پلی‌پروپیلن پیوندی با مالئیک
انیدرید

خواص مکانیکی

نانورس

نانو کامپوزیت

*مسئول مکاتبات:

h.azimi@azaruniv.ac.ir شد.

۱ مقدمه

فوم یا پلیمر سلولی که پلیمر اسفنجی منبسط شده نیز خوانده می‌شود، ماده‌ای است که به دلیل حضور حفره‌هایی در توده‌اش حجم آن افزایش و چگالی آن کاهش یافته است. در واقع فوم‌ها، سامانه‌های دو فازی گاز - جامد هستند که فاز جامد پیوسته و فاز گازی بخش ناپیوسته را تشکیل می‌دهد [۱-۳]. فاز گاز در یک فوم معمولاً در داخل حفره‌هایی قرار دارد که سلول نام گرفته است. اگر سلول‌ها به یکدیگر متصل باشند، فوم را سلول باز و در غیر این صورت آن را سلول بسته می‌نامند [۴-۶]. هر کدام از فوم‌های سلول باز و سلول بسته کاربرد خاص خود را دارند. در حالی که فوم‌های سلول بسته می‌توانند در بسته‌بندی و عایق‌سازی حرارتی و اکوستیکی استفاده شوند [۷-۸]، فوم‌های سلول باز در حوزه‌های پزشکی کاربردهای وسیعی پیدا کرده‌اند [۹-۱۱].

برای تهیه فوم باید به نحوی فاز گازی (هوا، دی‌اکسید کربن، نیتروژن، فرئون یا غیره) را داخل فاز مایع یا جامد پلیمری پراکنده کرد که برای این کار از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود [۱۲ و ۱۴]. در فرایند فوم کردن به عاملی که گاز تولید می‌کند عامل فوم‌زا گفته می‌شود. عوامل فوم‌زا به دو دسته کلی، عوامل فوم‌زای فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند [۱۵-۱۷]. عوامل فوم‌زای فیزیکی طی فرایند، از شکلی به شکل دیگر مثلاً از حالت مایع به گاز تغییر می‌کنند که این تغییر صرفاً فیزیکی است. عوامل فوم‌زای فیزیکی می‌توانند به صورت گاز بوده و مستقیماً بدون هیچگونه تغییری در فرایند فوم استفاده شوند. برای نمونه از عوامل فوم‌زای فیزیکی می‌توان به گازهای فشرده شده‌ای مانند نیتروژن و دی‌اکسید کربن یا مایع‌های فرار مانند هیدروکربن‌های آلیفاتیک فلورینه اشاره کرد [۱۸]. عوامل فوم‌زای شیمیایی معمولاً ترکیبات جامد (پودری شکل) هستند که در دمای فرایند تجزیه می‌شوند و سبب تولید گاز در زمینه پلیمری می‌شوند. دستگاه‌های تزریق پلاستیک [۸] و اکسترودرها [۱۸] هم با اصلاحاتی می‌توانند برای تهیه فوم‌های پلاستیکی به کار روند. توسط فرایند اکسترودر می‌توان صفحات نازک را به صورت مداوم و در چگالی‌های پایین یا به شکل پرسی روی سیم و کابل در چگالی‌های بالا تهیه کرد. درجه انبساط در چنین فرایندهایی معمولاً ۱۰۰ درصد است و از این رو شکست سلول‌ها و پایداری اسفنج از مشکلات جدی محسوب می‌شود [۱۹-۲۱]. در روش‌های فیزیکی، مایع فرار تحت فشار، به قسمت مخلوط‌کن اکسترودر تزریق می‌شود و به صورت همگن با مذاب پلیمر مخلوط می‌شود. همان طور که مذاب پلیمر از دای عبور می‌کند فشار کاهش یافته و حباب‌ها شکل می‌گیرند. سلول‌ها سریعاً رشد کرده و

پس از خارج شدن از دای خنک می‌شوند. در روش‌های شیمیایی، عوامل فوم‌زای مورد استفاده در ساخت اسفنج‌های پلی‌الفینی تحت شرایط کنترل شدت دمایی قادر به آزادسازی گاز هستند [۲۲-۲۳]. این امر می‌تواند در اکسترودری صورت گیرد که امکان اعمال فشار پیوسته‌ای بر مواد وجود نداشته باشد.

به طور کلی فوم‌های پلاستیکی، مواد سبک وزنی هستند که در صنایع مختلف کاربرد دارند. با این حال کاربردهای فوم به دلیل خواص مکانیکی ضعیف و پایداری گرمایی کم، محدود بوده است. امروزه فوم‌های نانوکامپوزیتی به دلیل نداشتن یا کم کردن این نقص‌ها و به سبب خصوصیات منحصربه‌فردی که با کامپوزیت بودن پیدا کرده‌اند توانسته نه تنها در کاربردهای زیادی جایگزین فوم‌های سنتی شود بلکه کاربردهای جدیدی را نیز پیدا کرده است. امروزه استفاده از فوم‌های نانوکامپوزیتی به دلیل عایق الکتریسیته و حرارت بودن، سبکی، مقاومت به خوردگی بالا و غیره بسیار معمول شده است. به عنوان مثال از جمله کاربردهای این نوع محصولات در صنعت برق، میل مقرر، سینی کابل، پایه‌های روشنایی و دکل است [۲۴-۲۷]. از سویی دیگر وجود ذرات نانو باعث شده است فرایند فوم کردن پلیمر از جهاتی راحت‌تر صورت بگیرد. به عنوان مثال دی‌اکسید کربن حلالیت کم و نفوذپذیری زیادی در زمینه پلیمری دارد و این باعث می‌شود کنترل ریختار (Morphology) فوم با دشواری همراه شود. استفاده از نانوذرات با توزیع مناسب در زمینه، با ایجاد مراکز هسته‌گذاری، فرایند هسته‌گذاری را تسهیل و باعث افزایش حلالیت آن‌ها در پلیمر می‌شود [۲۸]. همچنین حضور این نانوذرات موجب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، دمای انتقال شیشه‌ای و مقاومت در برابر آتش فوم‌های پلیمری می‌شود. فوم‌های نانوکامپوزیتی جدید که ترکیبی از نانوذرات و عامل فوم‌زا هستند دسته‌های جدیدی از مواد را به وجود می‌آورند که دارای وزن کم، استحکام زیاد و ویژگی چند کاربری هستند [۲۹-۳۲]. پژوهش‌های بسیار متنوعی در این حوزه انجام گرفته است. به عنوان مثال فامیلی و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۱۰، اثر نانوذرات بر سامانه اسفنجی پلیمر/نانوذره را در حضور گاز دی‌اکسید کربن بررسی کرده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش درصد عامل هسته‌زا، میزان هسته‌گذاری افزایش یافته است؛ همچنین، با ریزتر شدن عامل هسته‌زا، میزان هسته‌گذاری افزایش یافته است. در این بررسی، با وجود این که از گاز دی‌اکسید کربن استفاده شده است نمونه‌ها به صورت دینامیکی مورد مطالعه قرار نگرفته و با استفاده از تصاویر میکروسکوب الکترونی پویشی (SEM) نتایج گزارش شده است [۳۴]. عظیمی و همکاران در

کربن مورد استفاده با خلوص ۹۹/۹۹٪ و از شرکت هوا مایع زاگرس تهیه شد. این گاز، دوست‌دار محیط‌زیست است. نانورس‌های مورد استفاده در این پروژه از نوع نانورس مونت‌موریلونیت با و بدون اصلاح سطح با دی‌متیل‌آمین است. این محصولات تولید شرکت سیگما آلدریچ هستند.

۲-۲ آماده‌سازی آمیزه اولیه مورد استفاده

برای اختلاط ذوبی مواد و تهیه نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مختلف از دستگاه اکسترودر دو ماردرنه با نام تجاری کوپریون ورنر فلایدر مدل زد اس کا ۱۱۲۵ ساخت آلمان و با نسبت طول به قطر ۴۰ استفاده شد. پودر پلی‌پروپیلن و نانورس پیش از مخلوط‌سازی در آون‌ی با دمای 90°C به مدت ۱۴ ساعت، خشک شدند. پودر پلی‌پروپیلن با نانورس مخلوط‌سازی شد. سپس مخلوط حاصل ذوب شد تا بدین صورت ترکیب یکنواختی از این دو ماده تشکیل شود. کار ذوب در داخل مخلوط‌کنی مجهز به گرم‌کن و در دمای 180°C انجام شد. ماده حاصله سپس در داخل مخلوط‌کن کوچکی به گرانول تبدیل شد. بدین صورت نانوکامپوزیت با درصد نانورس ۳، ۷ و ۹ درصد وزنی تولید شد.

۲-۳ آماده‌سازی نانوکامپوزیت توسط اکسترودر کردن فوم

شکل ۱ طرح‌واره فرایند عمومی فوم کردن مواد پلیمری را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲ نشان‌دهنده اکستروژن به‌کار گرفته شده در این مطالعه است. در این مطالعه برای فوم کردن، مواد گرانول نانوکامپوزیت حاوی پلی‌پروپیلن و نانورس در داخل قیف مربوط به اکسترودر ریخته شد. مواد قبل از اکسترودر به مدت ۲ ساعت و در دمای 90°C در دستگاه خشک‌کن به منظور حذف رطوبت، خشک شدند. اکسترودر مورد استفاده در این پژوهش دارای سه ناحیه حرارتی است. فشار گاز دی‌اکسید کربن ورودی به محفظه اکسترودر برابر با ۷۸۰ psi در نظر گرفته شد تا در نهایت، میزان

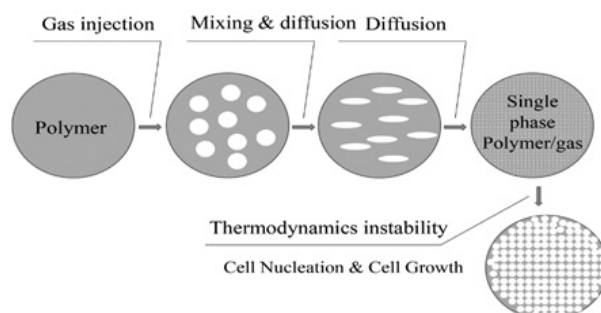
سال ۲۰۱۱، دینامیک فوم‌شدن ذرات کوپلیمر استایرن متیل‌متاکریلات را در حالت ناپیوسته با استفاده از روش کاهش ناگهانی فشار مطالعه و اثر شرایط انبساطی همچون دما، مدت زمان اشباع شدن و فشار اشباع بر نسبت انبساطی ذرات را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، از ذرات کوپلیمر استایرن متیل‌متاکریلات استفاده شده است، همچنین، نانوذره‌ای به عنوان عامل هسته‌زا استفاده نشده است [۳۴]. خصوصیات مکانیکی مواد پلیمری به‌وسیله محققان مختلفی بررسی شده است [۳۵-۳۶]. گودرزی و همکاران مطالعه ریز ساختاری را برای فوم‌های پلی‌پروپیلن/دی‌اکسید کربن و گرافن انجام داده‌اند. در این کار نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی کامپوزیت‌ها با فرایند فوم کردن کاهش پیدا می‌کند. افزودن گرافن به پلی‌پروپیلن سبب یکنواختی ساختار سلولی فوم‌ها شده و به واسطه نقش هسته‌زایی خود، چگالی سلولی را افزایش می‌دهد. از طرفی خواص مکانیکی فوم‌های تولیدی نسبت به نمونه‌های فوم نشده کاهش نشان می‌دهد [۳۶].

در این تحقیق برای نخستین بار با استفاده از دستگاه اکسترودر، فوم‌های میکروسلولی پلی‌پروپیلن پیوندی با مالئیک انیدرید و با افزودن ۳، ۷ و ۹٪ وزنی نانورس، در سه شرایط دمایی اکسترودر (دماهای مربوط به سه ناحیه اکسترودر از سمت قیف خوراک‌دهی (Hopper) به سمت خروجی اکسترودر تولید شد. اثر نانوذرات افزودنی و فرایندها در خواص مکانیکی فوم‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پویشی، ریزساختار فوم‌ها بررسی و علت ساختار ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت.

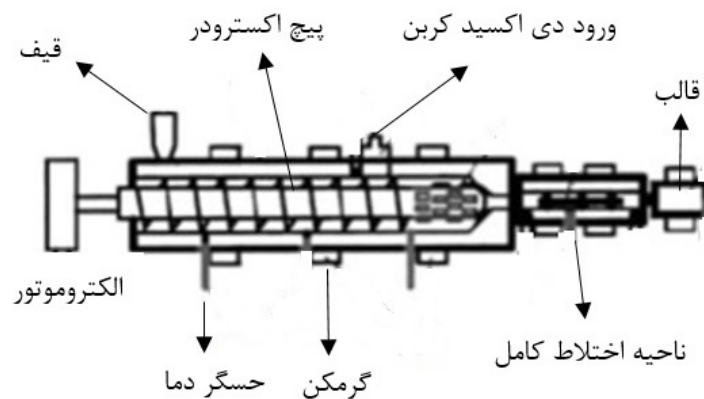
۲ تجربی

۲-۱ مواد

در مطالعه حاضر از پلیمر پلی‌پروپیلن با نام تجاری [۵۵۰] ساخت شرکت جم ایران با شاخص جریان مذاب $76/10 \text{ gr min}$ ($2/16 \text{ kg}$ و 230°C) به عنوان فاز زمینه استفاده شد. از گاز دی‌اکسید کربن به عنوان عامل فوم‌زای فیزیکی استفاده شده است. گاز دی‌اکسید



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از فرایند فوم [۸]
Fig. 1 Schematic of the foaming process [8]



شکل ۲ تصویری از دستگاه اکستروژن بکارگرفته شده در این مطالعه
Fig. 2 Schematic of the used extrusion in this study

جدول ۱ دماها در نواحی مختلف اکستروژن در شرایط کاری مختلف (°C)
Table 1 Temperature of extruder zones at different working conditions (°C)

Mode	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Work condition 1	160	180	160
Work condition 1	180	200	170
Work condition 1	200	220	190

این میکروسکوپ مجهز به آشکارساز تفرق انرژی الکترون‌ها است. این میکروسکوپ دارای تفنگ الکترونی از جنس تنگستن است. برای رسانا کردن سطح نمونه از پوشش طلا استفاده شده است. برای بررسی خواص کششی و اندازه‌گیری مدول الاستیک نمونه‌های فوم تولیدی، نمونه‌های میله‌ای شکل آزمون کشش محوری در ابعاد استاندارد ۱۰۰ mm و سطح مقطع ۲۵ mm^۲ از فوم اکستروژن شده، برش داده شد. برای انجام این آزمون از دستگاه کشش محوری ساخت شرکت zwick-Roell آلمان مدل Z250 استفاده شده است. برای هر حالت سه عدد نمونه آزمون استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت. آزمون کشش بر طبق استاندارد ASTM D ۶۳۸ انجام شد. نرخ کشش در این آزمون برابر ۱-۲/۰ است. برای بررسی مقاومت در برابر ضربه، ارزیابی خصوصیات سطح مقطع شکست، تخمین و طبقه‌بندی رفتار شکست و تعیین چقرمگی آزمون ضربه بر نمونه‌های فوم انجام شد. برای این کاری نمونه‌های فوم تولیدی بر اساس استاندارد ۲۵۶ ASTM آماده‌سازی شد. این آزمون بر طبق روش آیزود انجام شد. در این روش، نمونه استاندارد به شکل مکعبی در ابعاد ۱۰ در ۱۰ با شکافی به عمق ۲ mm در آن ایجاد شد. این دستگاه ساخت شرکت سنتام بود.

گاز دی‌اکسید کربن موجود در ساختار فوم تشکیل شده، ۳٪ باشد. این فشار در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. دستگاه در سه وضعیت حرارتی مختلف کار می‌کند. توزیع دمای موجود در سه ناحیه حرارتی موجود در اکسترودر، در جدول ۱ آورده شده است (ناحیه اول ناحیه نزدیک به قیف خوراک‌دهی و ناحیه سوم ناحیه نزدیک به خروجی اکسترودر است). سرعت اکسترودر برای تولید تمام نمونه‌ها ۲۰ دور بر دقیقه قرار داده شد. نمونه‌های تولیدی در شرایط مختلف اکستروژن وارد بخش شناسایی و تحلیل شد.

۴-۲ بررسی ریزساختاری و آزمایش‌های مکانیکی

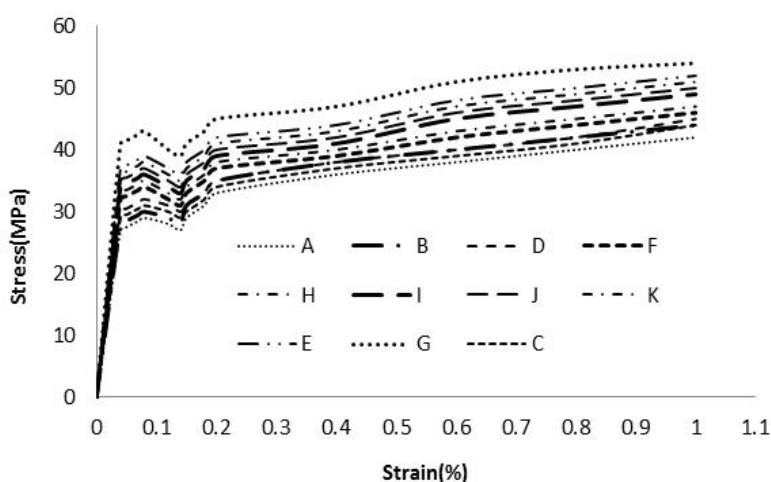
به منظور محاسبه فاصله بین صفحات نانورس از آزمون XRD با مدل (Bruker D-8 or Siemens Kristallo Flex) استفاده شد. طول موج دستگاه برابر ۰/۱۵۴ نانومتر، ولتاژ آن ۳۰ kV و آمپراژ آن ۱۰ mA بوده است. برای بررسی ساختار سلولی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی تولید شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی پویشی میرا ساخت کشور چک استفاده شد بدین منظور 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،

۳ نتایج و بحث

۳-۱ خواص مکانیکی

۳-۱-۱ خواص کششی

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های پیوند پلی‌پروپیلن/مالئیک‌انیدرید/نانورس در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شیب نمودارهای شکل ۳ مدول یانگ می‌توان دریافت که حضور نانورس باعث افزایش مدول کشسان نانوکامپوزیت نسبت به پلیمر خالص می‌شود. این ارتقا در مدول یانگ توسط [۳۷] هم، دیده شد. با توجه به اینکه نانوذره به عنوان ماده معدنی دارای مدول کشسان بالاتری نسبت به زمینه پلیمری است، بنابراین انتظار این است که مدول کشسان در نانوکامپوزیت نسبت به پلی-پروپیلن خالص با افزایش همراه باشد



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها
Fig. 3 Stress-strain diagram of the samples

لوله‌های نفت و گاز و... استفاده شود. همچنین در این نمودار اثر اعمال فرایند سطحی بر نانورس نشان داده شده است. نمونه پلیمر حاوی نانورس اصلاح سطحی شده، دارای خواص بهبود یافته بهتری نسبت به نمونه پلیمر حاوی نانورس بدون دی‌متیل‌آمین است. یکی از مسائل مهم، اثر نانورس بر مدول الاستیک نانوکامپوزیت پلیمری است. این مسئله در حقیقت با افزایش شیب نمودارها در نتایج این تحقیق نمایان شده است. با مقایسه خواص مکانیکی نمونه B و G در جدول ۲، نتیجه می‌شود که اصلاح سطحی بر نانورس اثر قابل توجهی بر خواص مکانیکی دارد. در حقیقت استحکام تسلیم و مدول الاستیک نمونه G بیش‌تر از نمونه B (حاوی ۷٪ وزنی نانورس بدون اصلاح سطحی و تولید شده در حالت کاری ۲) است. افزودن نانورس در پلیمر می‌تواند باعث افزایش دمای تبلور و تغییر در میزان تبلور شود. نانورس می‌تواند حتی حلالیت گاز در پلیمر را تغییر دهد. البته افزایش حلالیت فقط زمانی اتفاق می‌افتد که نانورس به میزان مناسب به پلیمر اضافه

و با افزایش درصد نانوذرات این روند ادامه یابد. به طور کلی مدول کامپوزیت‌های پلیمری مستقیماً به استحکام برهم‌کنش‌های بین‌سطحی بین زمینه و فاز تقویت‌کننده مربوط می‌شود. وجود سطح مشترک خوب، برش خوردن و تغییر شکل زنجیرهای پلیمر را در اطراف فاز تقویت‌کننده محدود می‌سازد و این منجر به دشوار شدن تغییر شکل اولیه مواد و به عبارتی افزایش مدول آن‌ها می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نمونه G حاوی ۷٪ وزنی نانورس و تولید شده در حالت کاری (شرایط حرارت‌دهی) ۲، بهترین عملکرد مکانیکی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشته است. استحکام تسلیم، مدول الاستیک و مقاومت به ضربه این نمونه در مقایسه با نمونه A (بدون افزودنی نانورس) بهبود یافته است. محققان دیگری نتایج مشابهی را با زمینه پلیمری و در حضور نانورس گرفته‌اند [۳۷-۴۰].

داده‌های این آزمون اعم از مدول یانگ نمونه‌ها، مقاومت کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست نمونه‌ها

جدول ۲ خواص مکانیکی استخراج شده از آزمون کشش نمونه‌ها
Table 2 Mechanical properties of the samples extracted from tensile test

Sample name	Presence of Nanoclay (%)	Thermal mode in the extrud	Yield stress (MPa)	Elastic module (MPa)	Impact Streangth (J/m)	Elongation at Yield (%)
A	0	2	33.2±1.5	1257±63	55.2±2.7	10.65±0.32
B*	7	2	34.6±1.4	1263±60	57.3±2.3	9.32±0.41
C	3	1	35.4±1.4	1256±69	56.9±2.9	9.64±0.35
D	3	2	36.6±1.5	1269±62	58.4±2.1	9.35±0.40
E	3	3	35.2±1.6	1273±65	57.8±2.2	9.45±0.44
F	7	1	37.5±1.3	1292±66	59.6±2.1	8.65±0.32
G	7	2	40.9±1.3	1320±71	65.5±3.1	8.55±0.36
H	7	3	38.2±1.6	1302±65	60.2±3.2	8.56±0.39
I	9	1	37.4±1.6	1374±60	58.6±2.9	8.67±0.32
J	9	2	39.3±1.5	1294±57	59.7±2.8	8.68±0.34
K	9	3	38.5±1.4	1300±68	59.8±2.8	8.76±0.39

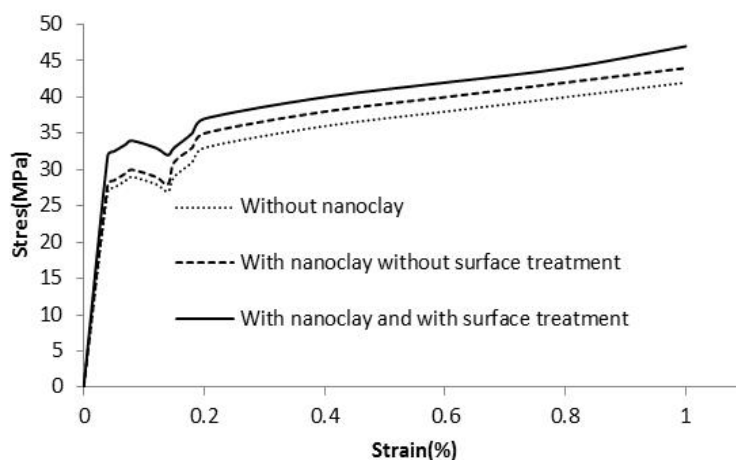
* نمونه B با افزودنی نانو بدون اصلاح سطحی است.

حالت حرارتی برای سه ناحیه مربوط به اکسترودر، حالت دمایی دوم است. در هر گروه از نمونه‌های مقایسه شده در بالا (با در نظر گرفتن درصد نانورس اضافه شده ثابت)، نمونه‌هایی با بهترین عملکرد از لحاظ خواص مکانیکی، نمونه‌های D، G و I بوده‌اند که تماماً در حالت کاری دوم تولید شده‌اند. در جدول ۱ دماهای مربوط به سه ناحیه اکسترودر آورده شده است. با توجه به داده‌های مربوط به خواص مکانیکی در جدول ۱، بهترین خواص مکانیکی در این حالت کاری ایجاد شده است. لازم به توضیح است که نمونه A و B پس از تعیین حالت بهینه کاری، آماده‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

می‌شود. درصد مناسب از افزودنی می‌تواند باعث ریز شدن سلول‌ها و افزایش تعداد آن‌ها شود.

۳-۱-۳ اثر حالت حرارتی بر استحکام کششی

برای بررسی اثر حالت کاری دمایی (تغییر در دمای نواحی مختلف اکسترودر) و بررسی این بر استحکام کششی، درصد نانورس برای مجموعه‌ای از نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد و تنها حالت کاری یا حالت حرارت‌دهی (گروه دماهای مربوط به سه ناحیه از اکسترودر) تغییر داده شد. با مقایسه استحکام تسلیم بین نمونه‌های D، C و E و نمونه‌های F، G و H یا نمونه‌های J، I و K مشخص می‌شود که بهینه‌ترین



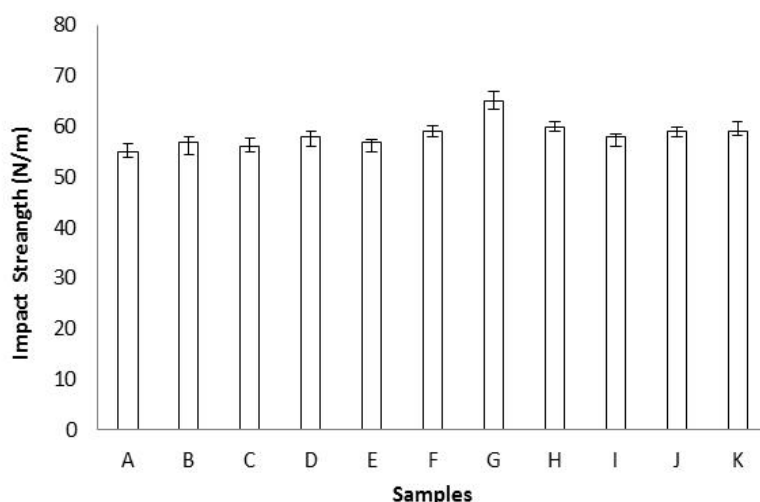
شکل ۴ نمودار تنش- کرنش برای نمونه‌ها با و بدون افزودنی نانورس
Fig. 4 Stress-strain diagram for the samples with/without nano-clay additive

همکاران [۴۱] در دانشگاه تورنتو نیز نشان می‌دهد وقتی دمای دستگاه در قسمت انتها کم می‌شود، تبلور سریع اتفاق می‌افتد و تعداد حفره‌ها و میزان پف‌شدگی به شدت افزایش می‌یابد و نهایتاً اعمال این تغییرات در ساختار فوم باعث بهبود خصوصیات مکانیکی می‌شود. در شکل ۵ مقاومت به ضربه نمونه‌های مورد بررسی در این پروژه، ترسیم شده است. همچنین در شکل ۶ مقاومت به ضربه برای نمونه‌های تولید شده در حالت‌های کاری مختلف، مقایسه شده است.

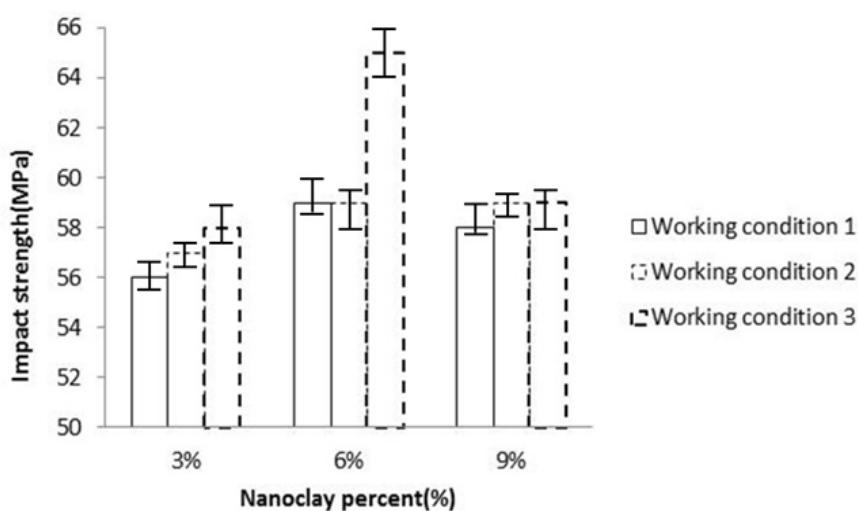
۳-۱-۵ اثر مقدار نانورس بر مقاومت به ضربه
برای بررسی اثر میزان نانورس بر مقاومت ضربه،

۳-۱-۴ اثر حالت حرارتی بر مقاومت به ضربه

برای بررسی اثر حالت حرارتی بر مقاومت به ضربه، این خاصیت مکانیکی نمونه‌های دارای درصد ثابتی از نانورس که در حالت حرارتی مختلف تولید شدند، اندازه‌گیری شد. با مقایسه مقاومت به ضربه نمونه‌های تولید شده در حالت‌های کاری ۱، ۲ و ۳، بهترین مقاومت ضربه برای نمونه‌های E، G و J ایجاد شده است. این نمونه‌ها در حالت کاری ۲ تولید شده‌اند. در این حالت دمای سه ناحیه (از سمت قیف خوراک‌دهی به سمت خروجی اکسترودر) به ترتیب ۱۸۰، ۲۰۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. نتایج تحقیقاتی کشتار و



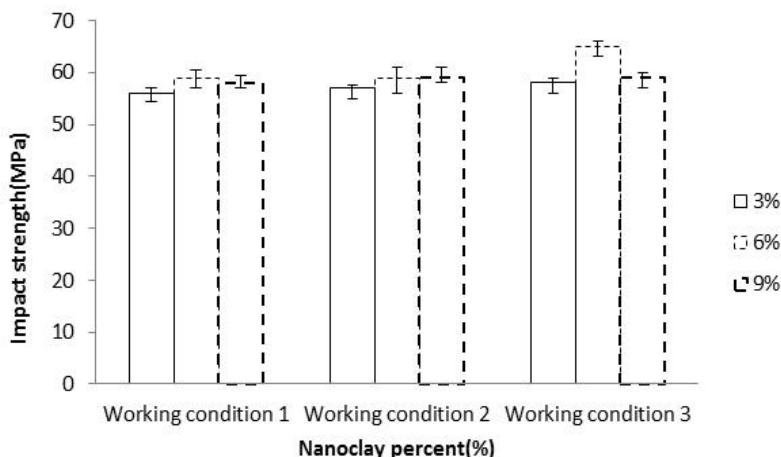
شکل ۵ مقاومت به ضربه برای نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن - نانورس
Fig. 5 Impact strength for different polypropylene-nanoclay nanocomposite samples



(شکل ۶ مقایسه نمونه‌های تولید شده در حالت‌های کاری مختلف (در هر حالت شرایط کاری، درصد نانورس ثابت است)
Fig. 6 Comparison of samples produced in different working conditions (in each working condition, the percentage of nanoclay is constant.)

فوم‌سازی، اثرگذار است. نمونه‌های فوم تولیدی با SEM مورد بررسی قرار گرفتند تا بدین صورت بسته یا باز بودن سلول‌ها تعیین شود. نمونه A که حاوی نانورس نیست، دارای ساختاری باز با اندازه سلول‌های بسیار بزرگ است. ساختاری با سلول‌های نسبتاً باز در نمونه

نمونه‌های تولید شده در حالت‌های کاری مشابه مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که در هر حالت کاری، با افزایش درصد رس، مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد اما در زمانی که درصد رس اضافه شده از ۷٪ بیش‌تر می‌شود، مقاومت به ضربه افزایش قابل



شکل ۷ نمودار مقاومت به ضربه در حالت‌های کاری مختلف
Fig. 7 Diagram of impact resistance in different operating modes

B (حاوی نانورس بدون اصلاح سطح) نیز مشاهده شده است. در بقیه نمونه‌ها، ساختار به‌صورت سلول‌های کاملاً بسته بودند. چگالی توده برای نمونه‌های فوم مختلف در جدول ۳ آورده شده است. چگالی توده مربوط به نمونه B نزدیک به توده نمونه A است اگر چه در نمونه اول ساختار سلول‌های فوم باز است. به دلیل شرایط فوم‌سازی مشابه، چگالی سلول‌ها، اندازه سلول‌ها و چگالی توده برای بیش‌تر نمونه‌ها مشابه است.

۳-۲-۱ بررسی ریزساختار

شکل ۸ میکروگراف SEM از فوم‌های بدون افزودنی و فوم‌هایی که نانورس به آن‌ها اضافه شده است را نشان می‌دهد. ساختار فوم‌ها کاملاً شفاف و آشکار است. نانورس روی اندازه سلول و چگالی سلولی نانوکامپوزیت‌ها تأثیر بسزایی داشته است. استفاده از نانورس اندازه سلول و چگالی فوم را تغییر داده است. که به‌طور کلی، اندازه سلول کاهش یافته و چگالی سلول با افزایش میزان نانورس برای تمام نانوکامپوزیت‌ها افزایش یافته است. مراحل هسته‌گذاری در مرحله تشکیل فوم روی چگالی آن‌ها بسیار تأثیرگذار است. همچنین نانوذرات در زمینه پلیمری پخش شده که عامل بسیار مهمی در هسته‌گذاری سلول‌ها است. تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی مربوط به فوم بدون افزودنی (شکل ۸-A) نشان‌دهنده انعقاد‌های سلولی شدید و وجود ناحیه‌های ناهمگن سلولی با چگالی سلولی بسیار پایین است. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از

توجهی ندارد و تا حدی افت مقاومت به ضربه نیز مشاهده می‌شود که این مسئله بیانگر این است که با افزایش بیش‌تر درصد وزنی نانورس کلوخه شدن و تجمع ذرات رس بیش‌تر می‌شود به طوری که در نمونه ۹٪ وزنی نانورس، تجمع ذرات نانورس به حداکثر خود رسیده و تشکیل کلوخه‌های بزرگ‌تر دیده می‌شود که این مسئله را می‌توان به کم شدن فاصله ذرات از یکدیگر و تأثیر نیروی واندروالسی ذاتی موجود در بین ذرات نانورس نسبت داد. تحقیقات چن و همکاران نشان می‌دهد که بر اساس درصد و نوع نانورس مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های پلیمری به‌سختی پیش‌بینی می‌شود. دلیل این را حجم بالایی فاکتورهای اثرگذار بر مقاومت به ضربه دانسته‌اند [۴۵].

۳-۲ ساختار فوم ایجاد شده

همان‌طور که مشاهده شد درصد وزنی نانورس، مؤثرترین پارامتر روی افزایش استحکام نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی داشته است که مطابق نتایج با افزودن نانورس به زمینه فوم پلیمری استحکام آن‌ها به‌طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است و قابلیت ایجاد سه اثر در ریزساختار را دارد: (۱) افزایش مساحت سطح برای جوانه‌زنی حفرات، (۲) تغییر در نرخ تبلور پلی-پروپیلن و (۳) افزایش کرنش سختی در حالت مذاب. نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن-نانورس به واسطه افزودن نانورس و استفاده از پیوند مالیک انیدرید، موجب تقویت دو اثر اول می‌شوند. به هر حال، رفتار کرنش سختی نیز در ایجاد جریان مذاب در طی فرایند

جدول ۳ ویژگی فوم‌های نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن - نانورس
Table 3 Cell morphology of the polypropylene-nanoclay foams

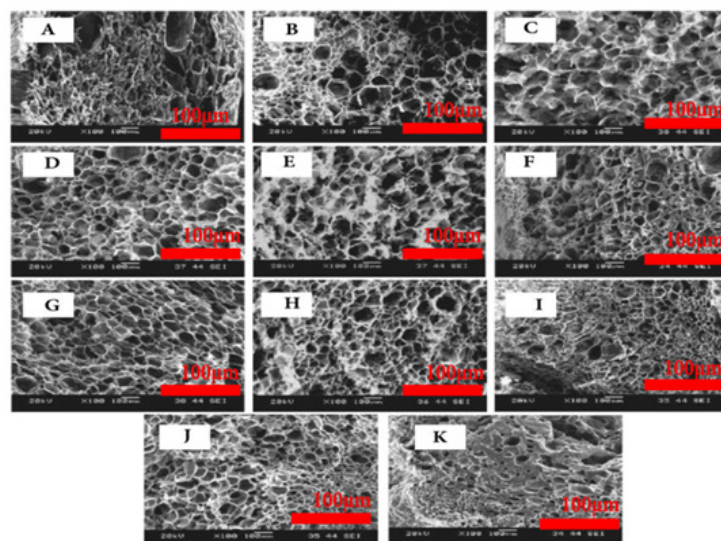
Sample name	Presence of Nano-clay (%)	Thermal mode in the extrud	Foam density (g/cm ³)	Medium cell size(μm)	Medium cell density (number of cells/ cm ³ ×10 ⁶)
A	0	2	0.431±0.022	160.5±8.3	0.22±0.02
B*	7	2	0.392±0.019	132.7±6.8	0.33±0.01
C	3	1	0.301±0.018	86.5±4.2	1.31±0.06
D	3	2	0.311±0.022	87.0±4.5	1.26±0.05
E	3	3	0.315±0.021	87.9±4.3	1.25±0.03
F	7	1	0.313±0.020	87.8±3.2	1.33±0.03
G	7	2	0.321±0.023	87.5±3.8	1.36±0.04
H	7	3	0.319±0.019	87.0±4.4	1.22±0.03
I	9	1	0.320±0.016	87.0±4.2	1.25±0.02
J	9	2	0.315±0.017	87.6±4.3	1.23±0.04
K	9	3	0.399±0.021	87.4±4.1	1.32±0.03

* نمونه B با افزودنی نانو بدون اصلاح سطحی است.

نمونه B (نمونه حاوی نانورس بدون اصلاح سطحی) (شکل ۸-B) نشان‌دهنده اندکی بهبود در کیفیت و بسته شدن ساختار سلولی است. در این تصویر نیز بیش‌تر سلول‌ها در ابعادی بزرگ‌تر از ۲۰۰ میکرون هستند. در مقابل اضافه کردن نانورس به ماده مرکب باعث ایجاد پستی و بلندی در فصل مشترک شده است. در تصاویر (C تا H) کاملاً مشخص است که استفاده از عامل اتصال پیوندی با مالئیک انیدرید چسبندگی بهتری بین زمینه پلیمری و نانوپرکننده اتفاق افتاده است که این مهم بر بهبود خواص مکانیکی نیز طبق داده‌های جدول ۲ تأثیر داشته است. بهبود در ساختار سلولی ممکن است به دلیل افزایش مساحت سطح و ایجاد مکان‌های جدید جوانه‌زنی باشد و به واسطه ورود نانورس به داخل ساختار، ایجاد شود. در سایر نمونه‌ها، ساختار سلولی همگن‌تری نسبت به نمونه A و B ایجاد شده است. توزیع یکنواخت اندازه و ایجاد ساختار سلولی بسته موجب شده است تا خواص مکانیکی فوم‌های حاوی نانورس اصلاح سطحی شده، به میزان قابل توجهی بهبود یابد. تجمع ذرات نانورس در شکل K به حداکثر خود رسیده و تشکیل کلوخه‌های بزرگ‌تر دیده می‌شود که این مسئله را به کم شدن فاصله ذرات از یکدیگر و تأثیر نیروی واندروالسی ذاتی موجود در بین ذرات نانورس می‌توان نسبت داد.

۳-۲-۲ اثر نانورس بر توزیع اندازه سلول‌ها

با اندازه‌گیری چگالی سلول‌ها از طریق تجزیه و تحلیل نرم‌افزاری تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی، مشخص



شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی پوششی از نمونه A (بدون افزودنی) و نمونه B (با ۷٪ افزودنی خاک رس بدون اصلاح سطحی)، نمونه‌های C (حاوی ۳٪ نانورس اصلاح سطحی شده در حالت‌های کاری یک، D) دو و E) سه تولید شده‌اند. نمونه‌های حاوی ۷٪ نانورس اصلاح سطحی شده که در حالت‌های کاری: F) یک، G) دو و H) سه تولید شده‌اند. نمونه‌های حاوی ۹٪ نانورس اصلاح سطحی شده که در حالت‌های کاری: I) یک، J) دو و K) سه تولید شده‌اند.

Fig. 8 Scanning electron microscope image of sample A (without additive) and sample B (with %4 clay additive without surface treatment) samples containing %3 nanoclay surface treatment produced in working modes: C) one, D) two, and E) two, samples containing %7 nanoclay surface treatment produced in working modes: F) one, G) two and H) two, samples containing %9 nanoclay surface treatment produced in working modes: I) one, J) two, and K) two.

یافته و سپس با افزایش نانورس به مقداری بیش از ۷ درصد، توزیع، بهبود آن چنانی پیدا نکرده است. بررسی نتایج حاصل از آزمون نشان داد در مقدار ۷ درصد نانورس توزیع اندازه سلول‌ها بسیار مناسب بوده (E، G، J) و حضور ۹٪ نانورس (I، J، K) موجب کلوخه‌ای شدن و کاهش توزیع سلولی شده که اثرات منفی همچون ایجاد سلول‌های بزرگ‌تر و تمرکز تنش به وجود می‌آورد و باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود.

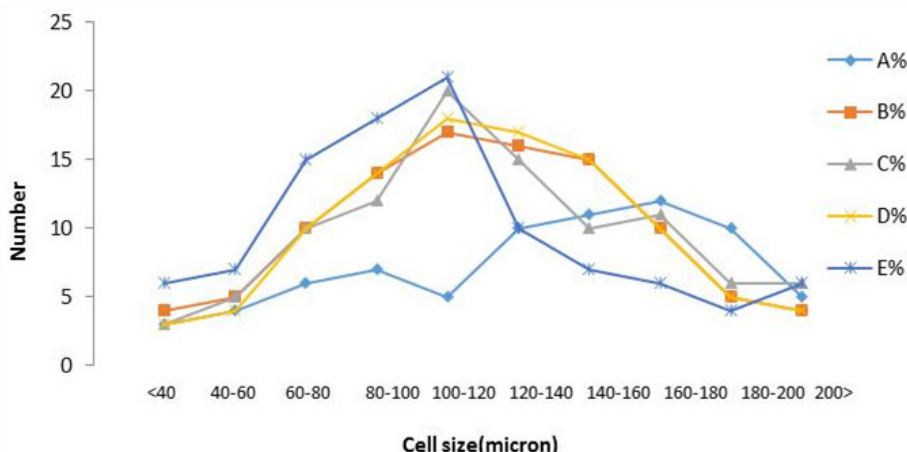
نانوکامپوزیت‌های پلیمری در حضور نانوذرات مختلف توسط سایر محققین گزارش شده است. اعتقاد آن‌ها بر این است که چسبندگی بیش‌تر بین زمینه و ذره منجر به جدایش کم‌تر آن‌ها در هنگام اعمال تنش می‌شود و در نتیجه استحکام و مدول کششی بهبود می‌یابد.

۳-۲-۳ اثر میزان نانورس بر توزیع اندازه سلول‌ها

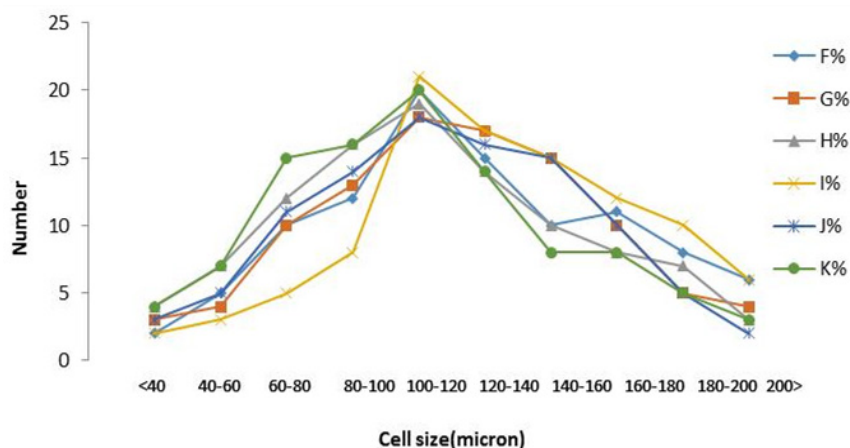
شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مربوط به توزیع اندازه سلول‌ها در هر حالت کاری اکسترودر است. با افزایش درصد نانورس در هر حالت کاری، توزیع سلول‌ها ابتدا بهبود

۴ نتیجه‌گیری

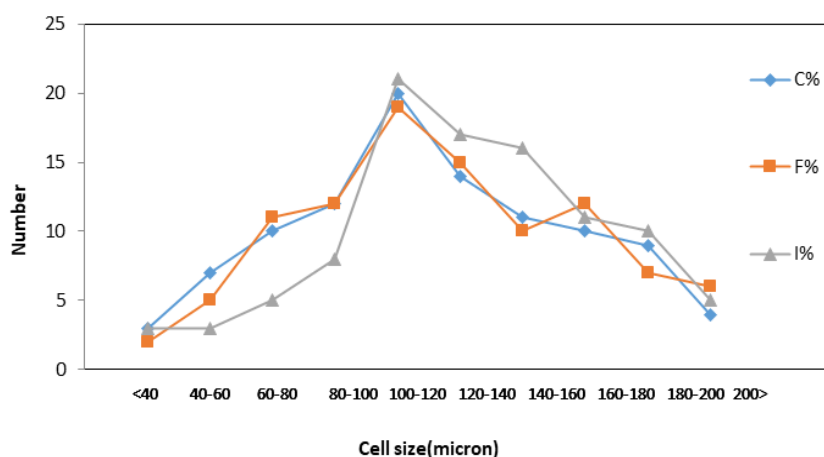
همگن‌سازی آمیزه اولیه یکی از اقدامات مهم در ایجاد خواص مکانیکی یکنواخت در نانوکامپوزیت‌های



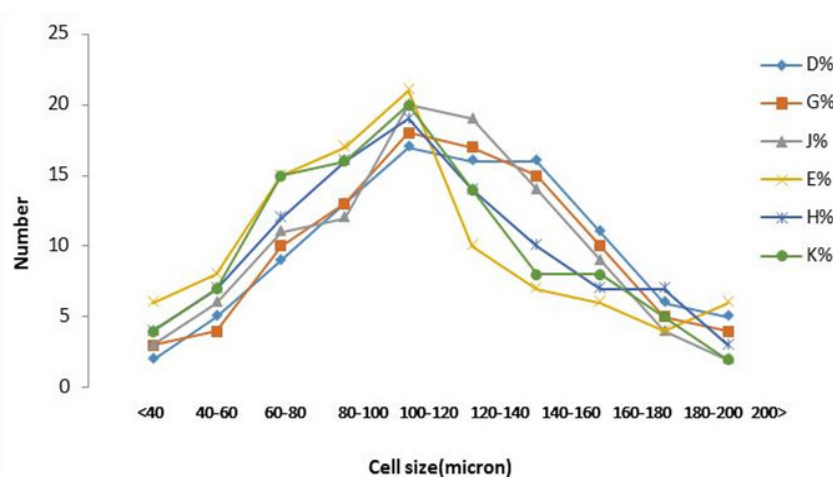
شکل ۹ توزیع اندازه سلول‌ها برای نمونه‌های پلی‌پروپیلن با و بدون افزودنی نانوذره
Fig. 9 Cell size distribution of the polypropylene samples with and without nanoparticles



شکل ۱۰ درصد توزیع اندازه سلول‌ها برای نمونه‌های پلی‌پروپیلن حاوی ۷ و ۹ درصد نانورس اصلاح سطحی شده
Fig. 10 Cell size distribution of polypropylene samples containing %7 and %9 surface modified nanoclay



شکل ۱۱ درصد توزیع اندازه سلول‌ها برای نمونه‌های پلی‌پروپیلن در حالت کاری یک
Fig. 11 Cell size distributions for the polypropylene samples produced in working condition 1



شکل ۱۲ درصد توزیع اندازه سلول‌ها برای نمونه‌های پلی‌پروپیلن در حالت کاری دو (D,G,J)، حالت کاری سه (E,H,K)
Fig. 12 Percentage distribution of cell size for polypropylene samples produced in dual working mode2 (D, G, J), dual working mode3 (E, H, K)

پلی‌پروپیلن پیوندی با مالئیک انیدرید- نانورس است. استفاده از نانورس در پلی‌پروپیلن گرافت‌پیوندی با مالئیک انیدرید موجب بهبود استحکام تسلیم، مدول الاستیک و مقاومت به ضربه به ترتیب به میزان‌های ۱۷/۵ و ۱۶ و ۱۵ درصد در مقایسه با نمونه بدون افزودنی می‌شود. همچنین اصلاح سطحی نانورس موجب بهبود بیش‌تر خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن پیوندی با مالئیک‌انیدرید می‌شود و بهترین استحکام مکانیکی در نمونه ایجاد شده مربوط به حالت کاری ۲ است. در این حالت دمای نواحی سه‌گانه اکسترودر از سمت قیف خوراک‌دهی به سمت خروجی اکسترودر، به ترتیب، ۱۸۰، ۲۰۰ و ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. در هر حالت کاری، با افزودن نانورس اصلاح سطحی شده، خواص مکانیکی (میزان استحکام تسلیم، مدول الاستیک و استحکام ضربه) نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن پیوندی با مالئیک انیدرید ابتدا افزایش می‌یابد تا جایی که پس از ۷٪ نانورس، استحکام، افزایش قابل توجهی پیدا نکرده و تا حدی افت در خواص نیز مشاهده شده است. بر اساس بررسی‌های ریزساختاری، با افزودن نانورس اصلاح‌شده به پلی‌پروپیلن پیوندی با مالئیک انیدرید، بهبود ریزساختار و افزایش یکنواختی در ساختار را به همراه دارد. بهبود ریزساختار افزایش یکنواختی ریزساختار، نتیجه افزایش مساحت سطح برای جوانه‌زنی حفره‌ها و تغییر در نرخ تبلور پلی‌پروپیلن است، در بررسی‌های نرم‌افزاری بر تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی مشخص شد توزیع اندازه سلول‌ها در حالت کاری ۲، یکنواخت‌تر است و توزیع اندازه سلول‌ها با افزایش میزان نانورس یکنواخت‌تر شده است و بهترین توزیع برای نمونه حاوی ۷٪ نانورس به دست آمده است. این نمونه در شرایط کاری ۲ تولید شده است.

مراجع

- [1] Park, C.B., Baldwin, D.F., Suh, N.P., Effect of the Pressure Drop Rate on Cell Nucleation in Continuous Processing of Microcellular Polymers. *Polymer Engineering Science*, (35) 1995, 440-432.
- [2] Nofar, M., Salehiyan, R., Ciftci, U., Jalali, A., Durmuş, A., Ductility Improvements of PLA-based binary and Ternary Blends with Controlled Morphology Using PBAT, PBSA, and Nanoclay. *Journal of Composites Part B: Engineering*, (2020), 107661, (182).
- [3] Wang, P., Aliheidari, N., Zhang, X., Ameli, A. Strong Ultralight Foams Based on Nanocrystalline Cellulose for High-Performance Insulation. *Journal of Carbohydrate Polymers*, (2019), 111-103, (218).
- [4] Nofar, M., Salehiyan, R., Sinha Ray, S., Rheology of Poly (lactic acid)-Based Systems. *Journal of Polymer Reviews*, 509-465, (3) 59 2019.
- [5] Wang, C., Shaayegan, V., Ataei, M., Costa, F., Han, S., Bussmann, M., Park, C.B., Accurate Theoretical Modeling of Cell Growth by Comparing with Visualized Data in High-Pressure Foam Injection Molding. *European Polymer Journal*, (2019), 199-189, (119).
- [6] Tabatabaei, A., Barzegari, M.R., Mark, L.H., Park, C.B., Visualization of Polypropylene's Strain-Induced Crystallization Under the Influence of Supercritical CO₂ in Extrusion. *Polymer*, (2017), 322-312, (122).
- [7] Jahani, D., Ameli, A., Jung, P., Barzegari, M., Park, C., and Naguib, H.J.M., Design Open-Cell Cavity-Integrated Injection-Molded Acoustic Polypropylene Foams, *Materials and Design*, (2014), 28-20, (53).
- [8] Jahani, D., Ameli, A., Saniei, M., Ding, W., Park, C.B., and Naguib, H.E., Engineering Characterization of the Structure Acoustic Property, Thermal Conductivity and Mechanical Property of Highly Expanded Open-Cell Polycarbonate Foams, *Macromolecular, Materials and Engineering*, (2015), 56-48, (300).
- [9] Enayati, M.S., Familiy, M.H.N., Janani, H. Production of Polystyrene Open-Celled Microcellular Foam in Batch Process by Super Critical CO₂. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 2010, 234-223. (107)23.
- [10] Jahani, D., Azimi, H., and Nazari, A., An Experimental Study on the Micro-and Nanocellular Foaming of Polystyrene/Poly (Methyl Methacrylate) Blend Composites, *Polymer Engineering*, (2019), 933-926, (39).
- [11] Nofar, M., Batı, B., Kuçuk, E.B., and Jalali, A., Effect of Soft Segment Molecular Weight on the Microcellular Foaming Behavior of TPU Using Supercritical CO₂, *The Journal of Supercritical Fluids*, (2020), 48-10, (16).
- [12] Noormohammad, A., Molla-Abbasi, P., Porous Poly (vinyl alcohol)/Carbon Nanotube Sensitive Layer for Detection of Lung Cancer Biomarkers. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 2020, 158-147, (2)33.
- [13] Ameli, A., Nofar, M., Jahani, D., Rizvi, G., Park, C.B., Development of High Void Fraction Polylactide Composite Foams Using Injection Molding: Crystallization and Foaming Behaviors, *Chemical Engineering Journal*, 262 2015, 87-78.
- [14] Ameli, A., Jahani, D., Nofar, M., Jung, P., Park, C.B. Processing and Characterization of Solid and Foamed Injection-Molded Polylactide with Talc, *Journal of Cellular Plastics*, 49 2013, 374.
- [15] Ding, W., Jahani, D., Chang, E., Alemdar, A., Park, C.B., and Sain, M., Development of PLA/Cellulosic Fiber Composite Foams Using Injection Molding Crystallization and Foaming Behaviors, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, (2016), 139-130, (83).
- [16] Yiu, H.H., Botting, C.H., Botting, N.P., and Wright, P.A., Size Selective Protein Adsorption on Thiol-Functionalised SBA15- Mesoporous Molecular Sieve, *Physical Chemistry Chemical Physics*, (2001), 2985-2983, (15).
- [17] Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., and Gorga, R.E., Polymer-Matrix Nanocomposites Processing Manufacturing and Application an Overview, *Journal of Composite Materials*, (40) 2006, 1575-1511.
- [18] Silvi, N., Buckley, D.J., Simon, D.A., Simone, D.L., and Pavlisko, J.A., Method of Making a Polymer Foam, Google Patents, 2017.
- [19] Khalkhali, T., Hossein Khanli, H., Sarabi, F. Die Design For Polyethylene Foam Extrusion with Azodicarbonamide as Foaming Agent. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 87) 20), P 2007, 9-3.
- [20] Fan, D., Li, M., Xing, J., Jiang, H., and Tang, Z., Interfaces Novel Method for Preparing Auxetic Foam from Closed-Cell Polymer Foam Based on the Steam Penetration and Condensation

- Process, Applied Materials and Interface, (10 2018 ,22677-22669.
- [21] Rueger, Z., and Lakes, S.J., Experimental Cosserat Elasticity in Open-Cell Polymer Foam, J. Philosophical Magazine, (2016 ,111-93 ,12.
- [22] Shafi, M., and Flumerfelt, R.J., Initial Bubble Growth in Polymer Foam Processes. Chemical Engineering Science, (1997 ,633-627 ,52.
- [23] Tomasko, D.L., Burley, A., Feng, L., Yeh, S.K., Nirmal-Kumar, K., Kusaka, S., and Koelling, I., Development of CO₂ for Polymer Foam Applications, The Journal of Supercritical Fluids, (2009 ,499-493 ,47.
- [24] Khosrokhavar, R., Naderi, G., Bakhshandeh, G.R., and Ghoreishy, M.H., Effect of Processing Parameters on PP/EPDM/Organoclay Nanocomposites Using Taguchi Analysis Method, Iranian Polymer Journal, (53-41 ,20 2011.
- [25] Shokoohi, S., Naderi, G.J.J., Development and Experimental Validation of Morphology Predictive Model for Compatibilized Ternary Polymer Blends 1. Effect of Interfacial Tension. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, (2016 ,48-37 ,68.
- [26] Lee, L.J., Zeng, C., Cao, X., Han, X., Shen, J., and Xu, G.J., Polymer Nanocomposite Foams, Composites Science and Technology, (65 2005 ,2363-2344.
- [27] Pilla, S., Kramschuster, A., Lee, J., Microcellular Processing of Polylactide-Hyperbranched Polyester-Nanoclay Composites. Journal of Material Science, (2010 ,2746-2732 ,45.
- [28] Ameli A., Kazemi Y, Wang S, Park C.B., and Potschke P., Process-microstructure-electrical conductivity relationships in injection-molded polypropylene/carbon nanotube nanocomposite foams, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, (-28 ,96 2017 ,36.
- [29] Klemmner, D., and Frisch, K.C., Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology, J. Hanser. Munich, 1991.
- [30] Karger-Kocsis, J., Polypropylene an A-Z Reference, Polymer Science and Technology Series , Springer, 2012.
- [31] Bao, J.B., Liu, T., Zhao, L., Hu, G.H., Miao, X., and Li, X.J.P., Oriented Foaming of Polystyrene with Supercritical Carbon Dioxide for Toughening. Polymer, (2012 ,5993-5982 ,53.
- [32] Zakiyan, S.E., Famili, M.H.N., and Ako, S.T., Heterogeneous Nucleation in Batch Foaming of Polystyrene in Presence of Nanosilica as a Nucleating Agent, Iranian Journal of Polymer Science and Technology, (2012 ,240-231 ,25.
- [33] Famili, M., Janani, H., and Enayati, M., Foaming of a Polymer-Nanoparticle System: Effect of the Particle Properties. Applied Polymer Science, (2011 ,2856-2847 ,119.
- [34] Azimi, H.R., Rezaei, M., and Abbasi, F.P., The Effect of Expansion Conditions on the Batch Foaming Dynamics of St-MMA Copolymer. Journal of Cellular Plastics, (2012 ,140-125 ,48.
- [35] Nakhaei, M.R., Naderi, G., Ghoreishy, M.H.R., Experimental Investigation of Mechanical Properties, Fracture Mechanism and Crack Propagation of PA6/NBR/Clay Nanocomposites. Iranian Journal of Polymer Science and Technology, 2020 ,172-159 ,233.
- [36] Goodarzi, V., Fasihi, M., Microstructure Mechanical and Electrical Eharacterizations of Bimodal and Nanocellular Polypropylene/graphene Nanoplatelet Composite Foams. Materials Today Communication, (-101 ,25 2020 ,447.
- [37] Jo, C., Fu, J., Naguib, H. E. Constitutive Modeling for Intercalated PMMA/Clay Nanocomposite Foams. Polymer Engineering and Science, 2006 ,1796-1787 ,1246.
- [38] Rafiee, R., Shahzadi, R., Predicting Mechanical Properties of Nanoclay/polymer Composites Using Stochastic Approach. Composites Part B: Enginnering, (42-31 ,152 2018.
- [39] Shettar, M., Kini, A., Sharma, S., Hiremath, P. Study on Mechanical Characteristics of Nanoclay Reinforced Polymer Composites. Advanced Materials, Manufacturing, Management and Thermal Science AMMT, -11158 ,10 4 2017 ,11162.
- [40] Chan, M., Lau, K.T., Wong, T.T., Ho, M.P., Hui, D., Mechanism of Reinforcement in a Nanoclay/polymer Composite. Composites Part B: Engineering, 2011 ,1712-1708 ,642.
- [41] Keshtkar, M., Nofar, M., Park, C.B., Carreau, P.J. Extruded PLA/clay Nanocomposite Foams Blown with Supercritical CO₂, Polymer, ,55 2014 ,4090-4077.
- [42] Bragg, W.L., The Diffraction of Short Electromagnetic Waves by a Crystal. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1929 ,153 ,45 23.
- [43] Lee, Y. H., Park, C. B., Sain, M., Kontopoulou,

M., Zheng, W., Effects of Clay Dispersion and Content on the Rheological /Mechanical Properties, and Flame Retardance of HDPE Clay Nanocomposites. Journal of Applied Polymer Science, (2007 ,1999–1993 ,(105.

[44] Nofar, M., Majithiya, K. Kuboki, T. and Park, C. B. The Foamability of Low-melt-strength Linear Polypropylene with Nanoclay and Coupling Agent. Journal of Cellular Plastics, 2012 ,287–271 ,(3)48.

[45] Chen, B., Evans, J.R.G. Impact Strength of Polymer-Clay Nanocomposites. Journal of Soft Matter, (2009 ,3584-3572 ,(5.