AMNC
available online @ amnc.aut.ac.ir
Advanced Materials and Novel Coatings, 46, (2023-4), 158-164

Investigating the effect of applying carbon nanotubes (CNT) on the physical and mechanical properties of rigid polyurethane nanocomposite foam

Amir Hossein Haeri[1,*], Yasser Nafari[2], Reza Darvishi[3], Amir Ali Mostafavi Mousavi[1], Fateme Asoode[4]

1- Color & Polymer Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Chemistry, Imam Hossein University, Tehran, Iran
3- Semiconductors of Department, Materials and Energy Research Institute, Meshkin Dasht, Alborz, Iran
4- Department of Chemistry, Material and Polymer Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran

Abstract Polyurethane foams have always been of interest to researchers due to their cheap price, many applications, and unique properties. In order to improve the mechanical and thermal properties of polyurethane foam, carbon nanotubes are used as reinforcement. One of the most common methods to improve the dispersion of carbon nanotubes is to modify their surface with functional groups. In this research, the effect of carbon nanotubes on the physical and mechanical properties of rigid polyurethane nanocomposite foam was investigated. Then, carbon nanotubes were used to make polyurethane nanocomposite foam. In order to evaluate the foam properties, the manufactured samples were subjected to compression test (Compression) and thermal calorimetry test (TGA). Also, scanning electron microscope (SEM) test was used to evaluate the changes in the cavity characteristics and morphology of polyurethane foam due to the addition of carbon nanotubes.

The obtained results show that carbon nanotubes in the foam matrix may act as heterogeneous nucleation agents, hence the number of nuclei formed in the presence of carbon nanotubes is more. Also, due to the addition of raw carbon nanotubes, the density of the samples increases, which is probably due to the increase in the viscosity of the resin in the presence of carbon nanotubes. Also, due to the addition of carbon nanotubes, the compressive strength and thermal resistance of the samples have increased by 494.56% and 172.72%, respectively.

Keywords Foam, Polyurethane foam, Nano carbon tube, Nanocomposite

Article history:
Received: 29-07-2024
Accepted: 21-08-2024

Corresponding author:
*amirhossein.haeri@aut.ac.ir

AMNC
available online @ amnc.aut.ac.ir
نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش‌های نوین- ۴۶(۳-۱۴۰۲)۱۶۴-۱۵۸

بررسی تاثیر اعمال نانولوله کربنی (CNT) روی خواص فیزیکی و مکانیکی فوم نانو کامپوزیت پلی‌یورتان سخت

امیر حسین حائری[۱،*]، یاسر نفری[۲]، رضا درویشی[۳]، امیر علی مصطفوی موسوی[۱]، فاطمه آسوده[۴]

۱- پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- دانشکده شیمی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران
۳- پژوهشکده نیمه هادی‌ها، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران
۴- دانشکده مهندسی شیمی،مواد و پلیمر، دانشگاه فنی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین، ایران

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۵/۳۱

چکیده

فوم‌های پلی‌یورتان بدلیل قیمت ارزان و کاربردهای فراوان و خواص منحصر بفرد همواره مورد توجه محققین بوده‌اند. به منظور بهبود خواص مکانیکی و حرارتی فوم پلی‌یورتان از نانولوله‌های کربنی به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود. از متداول‌ترین روش‌ها برای بهبود پراکندگی نانولوله‌های کربنی اصلاح سطح آن‌ها با گروه‌های عاملی است. در این پژوهش تاثیر نانولوله‌های کربنی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی فوم نانو کامپوزیت پلی‌یورتان سخت بررسی شد. سپس از نانولوله کربنی برای ساخت فوم نانو کامپوزیت پلی‌یورتان استفاده شد. به منظور ارزیابی خواص فوم، نمونه‌های ساخته شده تحت آزمون فشار (Compression) و آزمون گرماسنجی حرارتی (TGA) قرار گرفتند. همچنین به منظور ارزیابی تغییرات مشخصات حفره و مورفولوژی فوم پلی‌یورتان در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

نتایج بدست آمده نشان می دهد که نانولوله‌های کربنی در ماتریس فوم ممکن است به عنوان عوامل هسته زایی ناهمگن عمل کنند که از این رو تعداد هسته‌هایی که در حضور نانولوله‌های کربنی تشکیل می‌شود، بیشتر است. همچنین در اثر افزودن نانولوله کربنی خام چگالی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این نتیجه احتمالا ناشی از افزایش گرانروی رزین در حضور نانولوله‌های کربنی است. همچنین در اثر افزودن نانولوله کربنی مقاومت فشاری و مقاومت حرارتی نمونه‌ها به ترتیب به میزان ٪۴۹۴/۵۶ و ٪۱۷۲/۷۲ افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: فوم، فوم پلی‌یورتان، نانولوله کربنی، نانو کامپوزیت

عهده دار مکاتبات: amirhossein.haeri@aut.ac.ir

۱- مقدمه

فوم پلی‌یورتان فرآیند تولید ساده و ارزان قیمتی دارد. همچنین این فوم به طور گسترده به عنوان هسته مرکزی در پنل‌ها و ساختارهای ساندویچی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ساختارها بیشتر در هواپیماها، کشتی زیر دریایی، بدنه اتومبیل وسایل الکترونیکی و تجهیزات ورزشی به کار گرفته می شوند [۱].

به طور کلی گروهی از پلیمرها که در ساختار آن‌ها پیوند یورتانی (-NH-CO-O-) وجود دارد را پلی‌یورتان می‌نامند پلی‌یورتان‌ها از واکنش ایزوسیانات با ترکیباتی که دارای هیدروژن فعال هستند (مانند پلی ال‌ها)، در حضور کاتالیزورها تشکیل می‌شوند [۲]. فوم پلی‌یورتان می تواند به دو صورت سلول بـاز یـا سلول بسته باشد. در صورتی که فوم سلول بسته باشد، درون سلول‌ها هوا یا گاز محبوس می شود به همین دلیل فوم از لحاظ حرارتی به عنوان عایق قوی عمل می‌کند. همچنین فوم پلی‌یورتان سلول باز به دلیل ساختار شبکه‌ای خاص خود قابلیت انعطاف پذیری بالایی دارد و از آن در مصارف مبلمان، تشک و ... استفاده می‌شود. علاوه بر این به دلیل باز بودن سلول‌ها در زمینه فیلتراسیون و کاتالیست‌ها نیز کاربرد دارد.

همانطور که پیشتر گفته شد، فوم پلی‌یورتان کاربردهای متعددی دارد. در بسیاری از کاربردها فوم معمولا تنش‌های فشاری کششی و برشی زیادی را متحمل می‌شود عدم توانایی فوم پلی‌یورتان در تحمل تنش‌های وارده منجر به کاهش کارایی آن در زمینه‌های کاربردی مختلف می‌شود. برای بهبود خواص مکانیکی فوم پلی‌یورتان تاکنون تلاش‌های زیادی صورت گرفته است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تهیه کامپوزیت‌هایی از این فوم اشاره کرد. از این رو در سال‌های اخیر گرایش‌های قابل توجهی به تهیه نانو کامپوزیت‌هایی از ایـــن فوم در بین محققین مشاهده شده است. در مقایسه با پرکننده‌های در مقیاس میکرو مقدار کمی از نانو ذرات لازم است تا تغییرات برجسته‌ایی را در خصوصیات مکانیکی ماده ایجاد کند. نانو ذرات نسبت طول به قطر بالا و سطح مخصوص بسیار زیادی دارند به همین دلیل مکان‌های استحکام بخشی را برای بهبود خواص مکانیکی ایجاد می‌کنند. همچنین فعل و انفعالات شیمیایی در سطح مشترک نانو ذرات و پلیمر در قابلیت انتقال بار موثر است [۳]. در این بخش به مطالعاتی که تاکنون در زمینه فوم نانو کامپوزیت پلی‌یورتان صورت گرفته است پرداخته می‌شود.

ساها و همکاران به مطالعه اثر افزودن سه نانوذره مختلف بر خواص مکانیکی و گرمایی فوم پلی‌یورتان پرداخته‌اند. در این پژوهش از سه نانو ذره کروی اکسید تیتانیم صفحه‌ایی (نانوکلی) و فیبری (نانو فیبرکربنی) استفاده شده و نتایج حاصل از آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. ایشان از دستگاه اولتراسونیک برای توزیع نانو ذرات در رزین پلی ال استفاده کرده‌اند. همچنین مرحله اختلاط ایزوسیانات نیـــز بـا همزن مغناطیسی انجام شده است.

نتایج ایشان نشان می‌دهد که در اثر افزودن هر نوع نانو ذره‌ای مدول و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. اما در میان ســـه نـــوع نانو ذره استفاده شده نانو فیبرکربنی اثر تقویت کنندگی بیشتری دارد به طوری که در اثر افزودن تنها ۱ درصد وزنی نانو فیبرکربنی مدول و مقاومت فشاری به ترتیب ٪۴۰ و ٪۵۷ افزایش می‌یابد در حالی که میزان افزایش این دو خاصیت برای فوم پلی‌یورتان کلی ٪۲۰ و ٪۳۸ است و برای فوم پلی‌یورتان/ تیتانیم دی اکسید ٪۱۲ و ٪۱۶ می باشد [۴].

ژان و همکاران به بررسی اثر درصد وزنی نانولوله کربنـی چـنـد جـداره بـر خـواص مکانیکـی فـوم پلی‌یورتان پرداخته‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدول و مقاومت فشاری فوم با تغییرات درصد وزنی رفتار مشابهی را نشان می‌دهند. فوم پلی‌یورتان خالص خواص مکانیکی ضعیفی را همواره از خود نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی مدول و مقاومت فشاری نانولوله‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به دلیل وجود نیروهای واندروالس نانولوله‌های کربنی تمایل به کلوخه شدن دارند. بنابراین هنگامی که درصد وزنی نانولوله افزایش می یابد توزیع همگن آن دشوار شده و همین مسئله باعث تضعیف خواص مکانیکی می‌شود. به عبارت دیگر مکان‌هایی که در آن نانولوله کلوخه شده است به عنوان نقاط آسیب پذیر در فوم نانو کامپوزیت عمل می‌کند و به همین دلیل خواص مکانیکی تضعیف می‌شود [۵].

نتایج بدست آمده توسط مین‌یو و همکاران نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانولوله های کربنی اضافه شده اندازه سلول‌ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. هنگامی که مقدار نانولوله کربنـی کـم اسـت، سلول‌ها بسیار کوچک هستند و توزیع اندازه آن‌ها یکنواخت است و تعداد سلول‌ها بیشتر از فوم خالص می‌باشد. در این حالت نانولوله‌های کربنی به عنوان مکان‌های هسته زایی ناهمگن عمل می‌کنند. در نتیجه تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد و اندازه آن‌ها کوچک می‌شود اما با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی اندازه سلول‌ها افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که در مقادیر کم نانولوله‌های کربنی قادر هستند که بـه عنـوان عوامل هسته‌زایی ناهمگن عمل کنند اما در درصدهای وزنی بالا این اثر کاهش می‌یابد [۶].

همانطور که پیشتر گفته شد، به منظور بهبود خواص مکانیکی گرمایی و الکتریکی فوم پلی‌یورتان از نانولوله‌های کربنی به عنوان

تقویت کننده استفاده می‌شود. تقویت خواص فوم در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی وابسته به دو فاکتور توزیع همگن نانولوله در ماتریس و بهبود برهمکنش ماتریس نانولوله است.

۲- تجربی

۲-۱- مواد

پلی ال پلی‌اتری (wood imitation) از شرکت رسام پلیمر نامی ایران و پلی متیلن پلی فنیلن ایزوسیانات PM200 (MDI) از شرکت Wanhua چین تهیه گردید. کاتالیست دی بوتیل دی لورات قلع (DBTDL) از شرکت Britur چین خریداری شد. همچنین از روغن سیلیکون برای تهیه فوم پلی‌یورتان استفاده شد. نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT) با قطر متوسط ۹/۵ نانومتر و طول متوسط ۱/۵ میکرومتر با کد NC7000 از شرکت Nano-cyl بلژیک خریداری شد. آب دیونیزه (مقطر) ساخت شرکت طب شیمی ایران نیز مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روش‌ها

برای تهیه فوم پلی‌یورتان با استفاده از روش دو مرحله‌ای، ابتدا مقدار ۰/۵ گرم کاتالیست (DBTDL)، ۲ گرم آب دیونیزه (مقطر)، ۱ گرم روغن سیلیکون و ۱۷ گرم پلی‌ال پلی‌اتری به مدت ۵ دقیقه با هم مخلوط می‌شوند. سپس با اضافه کردن مقدار ۱۷ گرم ایزوسیانات (شاخص ایزوسیانات= ٪۱۰۰) و هم زدن به مدت ۵ دقیقه، فوم پلی‌یورتان شروع به شکل گیری می‌کند. پس از شکل‌گیری کامل فوم، آن را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا فرایند پخت کامل شود. این نمونه سنتز شده را نمونه ۱ نامگذاری می‌کنیم.

به منظور تهیه فوم کامپوزیتی حاوی نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT)، به روش مشابه عمل کرده، با این تفاوت که به نسبت ۱ درصد وزنی از تقویت کننده نانو ساختار پیش از شکل گیری و ایجاد فوم، به داخل آن اضافه می‌شود. به طور مثال در خصوص فوم پلی‌یورتان تقویت شده با نانولوله کربنی چند دیواره، ابتدا مقدار ۰/۱۷ گرم نانولوله کربنی به مقدار ۱۷ گرم پلی ال اضافه شده و به مدت ۱ ساعت تحت همزن مغناطیسی (مگنت)، با دور ۱۰۰۰ rpm بر روی گرمکن با همزن مغناطیسی قرار گرفت. بعد از این مرحله ترکیب به دست آمده را به مدت ۳۰ دقیقه تحت التراسونیک قرار داده و به آن مقدار ۰/۵ گرم کاتالیست(DBTDL)، ۲ گرم آب دیونیزه (مقطر) و ۱ گرم روغن سیلیکون اضافه شده و تحت همزن مکانیکی به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰ rpm قرار گرفت. سپس با اضافه کردن مقدار ۱۷ گرم ایزوسیانات (شاخص ایزوسیانات=٪۱۰۰) و هم زدن به مدت ۵ دقیقه، فوم پلی‌یورتان شروع به شکل گیری می‌کند. پس از شکل‌گیری کامل فوم، آن را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا فرایند پخت کامل شود. این نمونه سنتز شده را نمونه ۲ نامگذاری می‌کنیم.

۲-۳- تجهیزات

برای بررسی چگالی نمونه‌های فوم سخت پلی‌یورتان سنتز شده از آزمون چگالی (Density) استفاده شد. در این آزمون از یک استوانه مدرج پر شده از آب استفاده شد. در این آزمون نمونه‌ها جهت انجام تست با وزن ۵ گرم تهیه شدند و در درون استوانه مدرج درون آب غوطه ور کرده و مقدار حجم تغییر یافته آب اندازه گیری شد. طبق قانون چگالی ($\rho=m/v$) با توجه به وزن و حجم نمونه‌ها، چگالی نمونه‌ها محاسبه شد.

برای بررسی رفتار مکانیکی و مقاومت فشاری نمونه‌های فوم پلی‌یورتان سنتز شده از آزمون فشار (Compression) استفاده شد. در این آزمون از دستگاه sun ۲۵۰۰ ساخت شرکت گالدبینی[1] ایتالیا استفاده شد. در این آزمون نمونه‌ها جهت انجام تست با ابعاد ۶ cm قطر ۲ cm ارتفاع تهیه شدند.

برای بررسی خواص حرارتی نمونه‌های فوم پلی‌یورتان سنتز شده از آزمون گرماسنجی حرارتی (TGA) استفاده شد. در این آزمون از دستگاه TGA-DSC 1 ساخت شرکت متلر تولدو[2] سوئیس استفاده شد. آزمون به صورت اسکن رفت با نرخ ۲۰° C/min از دمای ۳۰ تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی گراد تحت گاز آرگون انجام شد. هم چنین نمونه‌ها جهت انجام تست با ابعاد ۱×۱۰×۱۰ میلی متر تهیه شدند.

تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تکنیکی قدرتمند برای بررسی وضعیت مورفولوژی نمونه‌های فوم پلی‌یورتان سنتز شده می باشد. در این پژوهش از دستگاه SEM مدل MAIA3 ساخت شرکت تسکان[3] جمهوری چک استفاده شد. هم چنین نمونه‌ها جهت انجام تست در ابعاد ۱×۱۰×۱۰ میلی متر تهیه شدند. تصویر برداری SEM با بزرگنمایی ۲۰ میکرو متر و ۵۰۰ نانو متر برای هر یک از نمونه‌ها انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی چگالی

در این آزمون از نمونه‌های سنتز شده فوم، آزمون چگالی گرفته

1- Galdabini
2- Mettler Toledo
3- Tescan

شده و نتایج به دست آمده در نمودار ستونی برای نمونه‌های ۱ و ۲ در شکل ۱ رسم شده است.

شکل ۱. آزمون چگالی نمونه‌های ۱ و ۲.

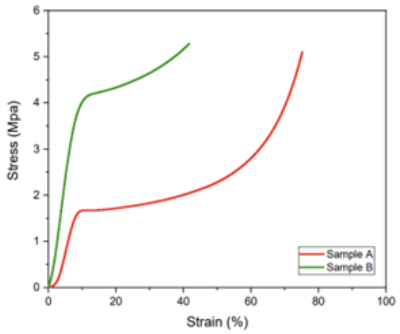
Figure1. Density test of samples 1 and 2.

نمونه ۱ با چگالی ۲۵۵ kg/m^3 نسبت به نمونه ۲ با چگالی ۵۳۲ kg/m^3، مقدار چگالی کمتری دارد. علت آن را می‌توان وجود نانو ذره در نمونه ۲ دانست که با افزایش ذرات نانو چگالی فوم نیز افزایش پیدا می‌کند و این به این دلیل است که، نانو ذرات باعث کوچک‌تر شدن سلول‌ها (که می‌توان آن را در عکس‌های SEM نیز مشاهده کرد) شده است. بنابراین با افزایش ذرات نانو چگالی فوم افزایش پیدا می‌کند و همچنین اندازه سلول‌ها کاهش و سلول‌های بسته‌تری ایجاد می‌کند. پس در این صورت با اعمال نانو ذرات، تعداد سلول‌های بسته بیشتر شده و به عبارتی مسیرهای هوایی و مسیرهای باز فوم کاهش داشته و باعث افزایش چگالی شده است. یک نکته قابل توجه در اندازه گیری چگالی، حجم اندازه گیری آب برای محاسبه چگالی، در همان لحظه اولیه ورود فوم به داخل آب اندازه گیری شده و اجازه نفوذ آب به داخل فوم داده نشده است. با توجه به این نکته خطای محاسبه چگالی برای فوم با سلول باز یا بسته کمتر شده است.

۳-۲- بررسی مقاومت فشاری

نتایج آزمون مقاومت فشاری برای دو نمونه فوم سخت پلی‌یورتان، نمونه ۱ و نمونه ۲ به شکل منحنی تنش-کرنش در شکل ۲ بیان شده است. معمولا مقاومت فشاری با استفاده از مدول یانگ[1] بیان می شود که شیب نمودار تنش-کرنش در ناحیه‌ی تغییر شکل الاستیک است و به مدول الاستیسیته نیز معروف می‌باشد. مدول یانگ برای ناحیه‌ی الاستیک نمونه‌ها محاسبه و در جدول ۱ گزارش شده است.

با مقایسه نمودار دو نمونه ۱ و ۲ به این نتیجه می‌رسیم که نمونه ۱ (۱۱/۰۴ N/mm^2) دارای مدول کمتری نسبت به نمونه ۲ (۵۴/۶۰ N/mm^2) است و علت آن این است که با افزایش نانو ذره به شدت مدول افزایش پیدا کرده و همچنین استحکام در نقطه شکست افزایش یافته است، اما کشیدگی نمودار آن را در نقطه شکست کاهش داده است و دلیل آن هم حضور ذرات نانو است که باعث تعاملات و برهمکنش‌های بین ذرات نانو و زنجیره‌های پلی ال و ایزوسیانات است. ذرات نانو باعث کوچک‌تر شدن سلول‌ها، افزایش سختی زنجیره‌ها و کاهش حرکات زنجیره‌ها می‌شود که منجر به افزایش مدول، استحکام و کاهش در نقطه شکست خواهد شد. کاهش استحکام و کاهش کشش در نقطه شکست مربوط به پیوندهای هیدروژنی بایدندیت در ساختار شیمیایی پلی‌یورتان است. پیوندهای هیدروژنی بایدندیت در پلی‌یورتان علاوه بر شکل فیزیکی که نانو ذره ایجاد می‌کند باعث تغییر ساختار شیمیایی پلی‌یورتان می‌شود و پیوندهای هیدروژنی بایدندیت در زمان وجود نانو ذره کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۲. آزمون فشار نمونه‌های ۱ و ۲.

Figure2. Pressure test of samples 1 and 2.

جدول ۱. مدول یانگ نمونه‌های ۱ و ۲.

Table1. Young's modulus of samples 1 and 2.

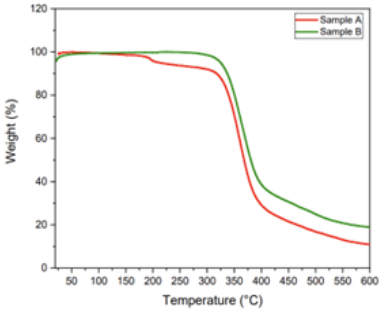
Sample	Sample 1	Sample 2
Young's modulus (N/mm^2)	11/04	54/60

۳-۳- بررسی خواص حرارتی

نمودار آزمون گرماسنجی حرارتی (TGA) و مشخصات مربوط به آن، به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ برای دو نمونه ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند تا رفتار این نمونه‌ها در برابر حرارت مورد بررسی قرار گیرد. فوم‌ها با سلول‌های بسته مقاومت حرارتی بالاتری نسبت به فوم‌های با سلول‌های باز دارند. نمونه ۲، دارای سلول‌های بسته‌تر نسبت به نمونه ۱ است. دلیل باز بودن سلول‌های نمونه ۱، وجود مقدار آب بیشتر در فوم می باشد. در آزمون TGA، باز بودن سلول‌های فوم باعث می‌شود که حرارت سریع‌تر به اجزای داخلی فوم رسیده و زودتر تخریب انجام شود. پس با توجه به نتایج بدست

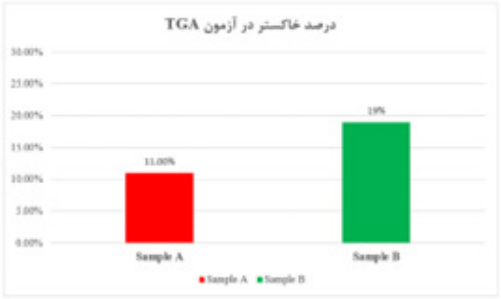
1- Young's modulus

آمده از آزمون TGA، نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ دیرتر تخریب می‌شود و مقاومت حرارتی بالاتری دارد. دلیل بالاتر بودن مقاومت حرارتی نمونه ۲ مربوط به حضور فیزیکی نانو ذرات است. همچنین علت اینکه خاکستر نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ بیشتر است، وجود نانو ذره CNT است که مواد معدنی در آزمون TGA تخریب نشده و باقی می‌ماند و باعث ازیاد خاکستر می‌شود و به همین دلیل میزان خاکستر نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ بیشتر است. درنتیجه مقاومت حرارتی نمونه ۲ بیشتر از نمونه ۱ است.



شکل۳. آزمون TGA نمونه‌های ۱ و ۲.

Figure3. TGA test samples 1 and 2.



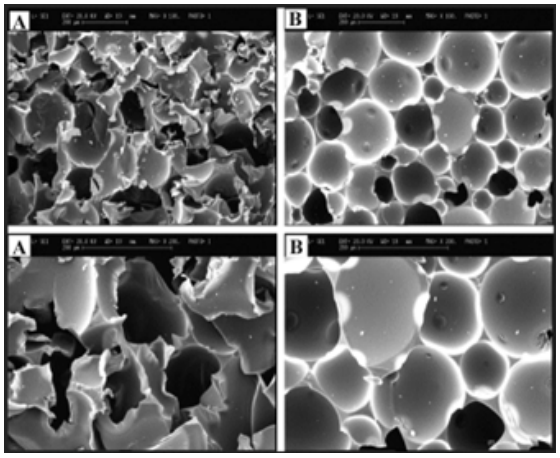
شکل٤. درصد خاکستر در آزمون TGA نمونه‌های ۱ و ۲.

Figure4. Ash percentage in TGA test of samples 1 and 2.

٤-۳- بررسی مورفولوژی

شکل ۵ تصویر SEM نمونه‌های ۱ و ۲ را در مقیاس ۲۰۰ میکرومتر نشان می دهد.

در تصاویر SEM با مقایسه دو نمونه ۱ و ۲، به دلیل وجود ذرات نانو، هسته گذاری درون محیط واکنش بیشتر می‌شود و درنتیجه در نمونه ۲ سلول‌هایی کاملا مشخص و واضح نسبت به نمونه ۱ که فاقد نانو ذره می‌باشد، ایجاد می‌کند. وجود نانو ذرات علاوه بر افزایش هسته گذاری سلول‌های فوم، باعث استحکام دیواره‌های سلول و همچنین سلول‌های بسته‌تری ایجاد می‌کند. در کل نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱، سلول‌های بسته‌تر، مشخص‌تر و با مرز مشخص نشان می‌دهد در حالی که در نمونه ۱، مرز سلول‌های آن از بین رفته و استحکام چندانی بین مرز و سلول‌ها وجود ندارد.



شکل۵. تصویر SEM نمونه‌های ۱ و ۲.

Figure5. SEM images of samples 1 and 2.

٤- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر افزودن نانولوله کربنی به فوم پلی‌یورتان بررسی گردید که شامل موارد زیر است:

۱- نتایج نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی به فوم پلی‌یورتان باعث افزایش چگالی نمونه‌ها می‌شود که این امر به دلیل کوچک‌تر شدن سلول‌ها در حضور نانو ذره است. بنابراین با افزایش ذرات نانو چگالی فوم افزایش پیدا می‌کند و همچنین اندازه سلول‌ها کاهش و سلول‌های بسته‌تری ایجاد می‌کند.

۲- نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانولوله‌های کربنی باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری می‌شود. به طور خاص، در نمونه‌ای که ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به آن افزوده شده است، مقاومت فشاری تقریبا تا ۵ برابر افزایش یافته است. این افزایش مقاومت فشاری به دلیل اثر تقویت‌کننده نانولوله‌های کربنی است که بهبود پیوستگی بین فازهای ماتریس و ذرات نانو را تسهیل می‌کند و در نتیجه باعث بهبود خواص مکانیکی ماده می‌شود.

۳- نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانولوله‌های کربنی به این فوم‌ها باعث بهبود مقاومت حرارتی آن‌ها می‌شود. این بهبود به دلیل اثر نانولوله‌های کربنی در توزیع یکنواخت حرارت و کاهش انتقال حرارت است که بهبود پایداری حرارتی و کاهش دمای تخریب را به همراه دارد.

۴- مورفولوژی فوم نانوکامپوزیت پلی‌یورتان با نانولوله‌های کربنی به شکل قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی در ماتریس فوم به عنوان عوامل هسته‌زایی ناهمگن عمل می‌کنند. این امر منجر به افزایش تعداد هسته‌ها و در نتیجه کاهش اندازه سلول‌ها و افزایش چگالی فوم می‌شود.

۵- مراجع

[1] Ashida, K., ''Polyurethane and Related Foams Chemistry and Technology''. 2007, United States of America: Taylor & Francis.

[2] Lee, S.T., Ramesh, N.S, ''Polymeric foams Mechanisms and Materials''. 2004, United States of America: CRC Press LLC.

[3] ثابت زاده، ن، بهرام بیگی، ح، نصوری، ک، ربی، ا، موسوی شوشتری، ا، " بررسی تاثیرنانوذرات کلی و نانولوله های کربنی بر خواص فوم پلی‌یورتان". چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، ۱۳۹۱.

[۴] Saha, M.C., Kabir, M.E, Jeelani, S, ''Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles''. Materials Science and Engineering, 2007. Vol.479(Elsivier): p. 213-222.

[5] Zhang, L., Yilmaz, E.D, Thomsen, J.S, Rauhe, J.C, Pyrz, R, ''MWNT reinforced polyurethane foam: Processing, characterization and modelling of mechanical properties''. Composites Science and Technology, 2011. Vol.71(Elsevier): p. 877-884.

[6] You, K.M., Park, S.S, Lee, C.S, Kim, J.M, Park, G.P, Kim, W.N, ''Preparation and characterization of conductive carbon nanotube-polyurethane foam composites''. Mater Sci, 2011. Vol.46(Springer): p. 6850-6855.