

ساخت فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان سخت با استفاده از نانو ذرات SiC و بررسی خواص مکانیکی و جذب انرژی آن تحت بار دینامیکی

احسان اله شاهی^۱، محمدجواد رضوانی^{۲*}، احسان برهانی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵	در این مقاله، خواص مکانیکی و جذب انرژی فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان با چگالی مشخص و تقویت شده با درصد وزنی از نانو ذرات کاربید سیلیسیم (SiC) تحت بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی بررسی می شوند. به منظور ساخت نمونه های آزمایش، ابتدا نانو ذرات کاربید سیلیسیم در مایع پلی آل ترکیب شده و سپس با اضافه کردن مایع متیلن دی ایزوسیانات، فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان بدست می آید. برای بررسی خواص مکانیکی نمونه های آزمایش، آزمون های کشش، فشار و تست دینامیکی انجام شده است. علاوه بر این، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی تأثیر نانو ذرات در رفتار مورفولوژی سلولی فوم نانو کامپوزیت مشخص گردید. نتایج حاصل از آزمون های تجربی نشان دادند، که استحکام کششی، فشاری و جذب انرژی برای فوم نانو کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات کاربید سیلیسیم بیشتر از فوم پلی یورتان خالص می باشد. علاوه بر این، با افزودن ۱٪ نانو ذره SiC به فوم پلی یورتان، مدول الاستیسیته و جذب انرژی به ترتیب به میزان ۷٪ و ۶۳٪ افزایش می یابد. همچنین توزیع اندازه سلول در فوم نانو کامپوزیت تقویت شده با ذرات SiC در مقایسه با فوم پلی یورتان خالص کوچکتر شده و منجر به افزایش چگالی سلول می شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات SiC می تواند به عنوان جاذب انرژی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶	
واژگان کلیدی: نانو ذرات SiC، فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان، خواص مکانیکی، جذب انرژی.	

۱- مقدمه

بر این، مقاومت خمشی و فشاری مناسب این فوم ها تابع دانسیته و وزن مخصوص آن می باشد. امروزه تحقیقات گسترده ای در زمینه مواد مرکب پایه پلی یورتان صورت گرفته است. نتایج تحقیقات حاکی از آن است که به دلیل مقاومت حرارتی پایین و به واسطه رشد سلول درون قالب، سطوح محیطی قالب مستحکم تر از هسته مرکزی آن می باشد. لذا اضافه کردن افزودنی ها به پلی یورتان خالص باعث بهبود خواص متعددی از قبیل افزایش قابلیت میزان جذب انرژی، استحکام کششی و فشاری می گردد.

فوم های پلی یورتان از نوع پلیمرهای گرماسخت، با خواص متنوع از واکنش پلی آل و متیلن دی ایزوسیانات تهیه می شوند. با توجه به نوع و شکل آن در مصارفی چون صنایع خودروسازی، پوشش پل ها، کف مخازن و ضربه گیرهای آسانسور استفاده می شوند. مهم ترین امتیاز این نوع فوم ها، تولید آسان، تمایل به چسبندگی بالا، افزایش جذب انرژی، مقاومت در برابر سایش و خوردگی می باشد. خواص مکانیکی فوم ها وابسته به دیواره و هندسه سلول دارد. علاوه

* نویسنده مسئول: m.rezvani@semnaniau.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
۲. استادیار، مرکز تحقیقات استراتژیک انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
۳. دانشیار، دانشکده فناوری نانو، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

هدف اصلی این تحقیق بررسی نقش نانوکاربید سیلیسیم به عنوان تقویت کننده به فوم پلی یورتان برای بهبود خواص مکانیکی و میزان جذب انرژی می باشد. در این مطالعه، یک درصد وزنی [۱۱] از نانو ذره SiC به عنوان تقویت کننده به مخلوط پلی آل و متیلن دی ایزوسیانات اضافه نموده که این مقدار در بازه ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی از تزریق نانو ذرات باعث بهبود خواص فوم پلیمری می شود [۱۳ و ۱۲]. نتایج حاصل از این تحقیق در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی و هوافضا که تحت بارهای دینامیکی می باشند، به عنوان جاذب انرژی کمک شایانی خواهد نمود.

۲- ساخت نمونه های آزمایش

نمونه های نانوکامپوزیت، از دو ماده اصلی شامل فوم پلی یورتان و تقویت کننده تشکیل شده است. فوم پلی یورتان شامل مایع پلی آل و متیلن دی ایزوسیانات (MDI) از شرکت هومان شیمی و نانو ذرات (SiC) با میانگین اندازه قطر ۵۰ نانومتر به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. در این مطالعه، نمونه های آزمایش مطابق جدول ۱، برای آزمون های کشش و فشار با چگالی 200 kg/m^3 آماده شده اند.

برای ساخت نمونه ها، ابتدا نانو ذرات کاربید سیلیسیم به مایع پلی آل اضافه شده و با همزن مکانیکی اختلاط صورت می گیرد. سپس با اضافه کردن مایع متیلن دی ایزوسیانات، فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان بدست می آید.

جدول ۱- مقدار وزنی مواد برای ساخت نمونه های استاندارد

مشخصات	نمونه فشاری	نمونه کششی
چگالی (kg/m^3)	۲۰۰	۲۰۰
پلی آل (gr)	۱۹	۵/۷
دی ایزوسیانات (gr)	۱۵	۴/۵
نانوذرات (gr)	۰/۳۴	۰/۱۰۲

۳- آزمون های تجربی

۳-۱- آزمون کشش

رفتار کششی نمونه های تولید شده فوم پلی یورتان خالص

نانو کامپوزیت ها دسته جدیدی از مواد هستند که در مقایسه با ذرات میکرونی، به علت داشتن سطح ویژه بسیار زیاد سبب تماس بیشتر با زمینه پلیمری می شوند و در نتیجه فومی با ساختار یکنواخت تر و خواص مطلوب تر تولید می کنند [۱]. نانو ذرات عموماً دارای ویژگی های مکانیکی و گرمایی خیلی بالایی هستند. در حالی که مواد پلیمری در هر دو ویژگی گرمایی و مکانیکی ضعیف می باشند. علاوه بر این انرژی سطحی نانو ذرات بسیار بالاست. بنابراین در سطح مولکولی توانایی خوبی در مخلوط شدن با زنجیرهای پلیمری دارند [۲]. با اتکا به سطح واکنش بین نانو ذرات و یک زنجیر پلیمری، می توان ماده ای ممتاز تر و با ثبات گرمایی بیشتر تولید کرد. انرژی سطحی بالا در نانو ذرات، به تراکم آنها بستگی دارد و در بیشتر مواد پخش کردن نانو ذرات در یک بستر پلیمری بسیار دشوار است. نانو ذرات متراکم شده همانند یک نقص عمل می کنند و می توانند بر روی عملکردهای پلیمر اثر منفی بگذارند. به این ترتیب، برای پخش کردن نانو ذرات در داخل بستر شبکه ای پلیمر هنگامی که آن ها در حالت مایع هستند ضروری می باشد [۲]. مطالعات اخیر نشان داده است که تزریق مقدار کمی نانو ذرات می تواند هردو ویژگی مکانیکی و گرمایی کامپوزیت های پلیمری را بهبود بخشد. فامیلی و همکاران [۳]، اثر اندازه و مقدار نانو سیلیکا راروی فوم پلی استایرن بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در فوم پلی استایرن خالص، توزیع اندازه سلول پهن تر و در نتیجه چگالی کمتری در مقایسه با فوم نانو کامپوزیت پلی استایرن نانو سیلیکا دارد.

محفوظ و همکاران [۴] نشان دادند که افزودن ۳ درصد وزنی نانو ذرات اکسید تیتانیوم به ترتیب منجر به افزایش مقاومت خمشی و مدول یانگ به اندازه ۳۰٪ و ۶۲٪ می شود. زو و همکاران [۵] نشان دادند که فوم پلی یورتان تقویت شده با ۱/۹۶ درصد وزنی نانو ذرات رس باعث افزایش حدود ۱۵۲٪ مقاومت فشاری و افزایش ۱۱۰٪ مقاومت کششی در مقایسه با فوم پلی یورتان خالص می شود. علاوه بر این، چندین مطالعه نشان دادند که با افزودن مقادیر کمی از نانو ذرات سیلیکا، بهبود در خواص مکانیکی فوم پلی یورتان بوجود می آید [۶-۹]، در حالی که مطالعه انجام شده توسط جاوونی و همکاران، برخلاف نانو ذرات سیلیکا، خواص مکانیکی فوم پلی یورتان با اضافه کردن نانوذرات SiO_2 کاهش می یابد [۱۰].

۳-۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM)

برای بررسی مورفولوژی سطح و تعیین چگالی سلول، نمونه‌های فوم پلی‌یورتان خالص و فوم نانوکامپوزیت پلی‌یورتان را به مدت ۵ دقیقه در نیتروژن مایع غوطه‌ور و سپس می‌شکنند. سطوح شکسته شده با طلا توسط دستگاه لایه نشان مدل DSR پوشش داده شده و در نهایت به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشیمدل XL30 مورد بررسی قرار گرفت. چگالی سلول‌ها با شمارش تعداد سلول‌های موجود در یک عکس از معادله زیر تعیین می‌شوند [۱۴].

$$N_0 = \left[\frac{NM^2}{A} \right]^{3/2} \quad (1)$$

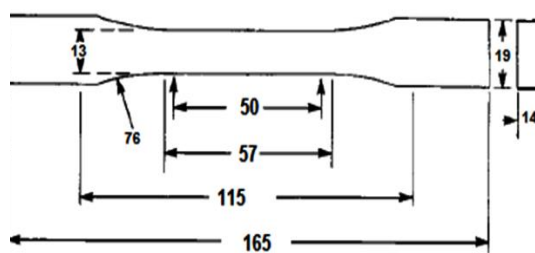
در معادله (۱) N_0 چگالی سلول در واحد حجم، A مساحت تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، N تعداد سلول‌های شمارش شده در مساحت A ، M بزرگنمایی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌باشد.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- بررسی مورفولوژی سلولی

برای بررسی دقیق‌تر مورفولوژی سطحی و اندازه سلول‌ها به ترتیب از نرم افزارهای Material Plus و Microstructure Measurement استفاده شده است. تصویر برداری نمونه‌ها با بزرگنمایی ۲۰ برابر با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت طوری انتخاب گردید، که حداقل ۵۰ سلول در تصویر نمایان شود. در شکل (۳)، مورفولوژی سلولی برای نمونه‌های فوم خالص پلی‌یورتان (شکل ۳-الف) و فوم نانوکامپوزیت پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات SiC (شکل ۳-ب) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص می‌باشد، چگونگی توزیع اندازه سلول با تجزیه تحلیل آماری از روی داده‌های سلول بدست می‌آید. بنابراین، با مرتب کردن اندازه سلول از بزرگترین به کوچکترین قطر سلول می‌توان به توزیع یکنواخت سلول‌ها پی برد. در شکل (۴)، نسبت بزرگترین قطر سلول به کوچکترین قطر سلول نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، این نسبت در نمونه فوم پلی‌یورتان خالص برابر ۱/۳۷ بوده و نشان دهنده یکنواختی بیشتر سلول‌ها است.

ورفوم نانو کامپوزیت پلی‌یورتان به وسیله دستگاه کشش SANTAM مدل M40 بررسی و مطالعه شد. مطابق شکل (۱)، نمونه‌های دمبلی شکل با سطح مقطع 14×13 میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM D638 آماده و با سرعت 20 mm/min تحت کشش قرار گرفتند. علاوه بر این برای ثبت مدول کشسانی در ناحیه الاستیک، از یک دستگاه کرنش‌سنج استفاده شد. به منظور کاهش خطای فردی و آزمایشگاهی، آزمون کشش بر روی هر یک از نمونه‌ها سه بار انجام شده و میانگین نتایج محاسبه شدند.



(الف)

شکل ۱- نمونه استاندارد تست کشش

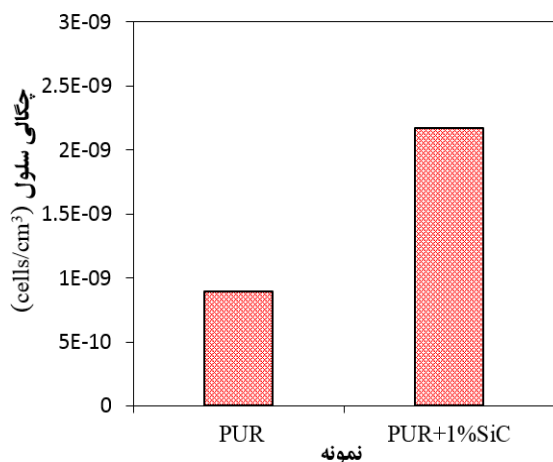
۳-۲- آزمون فشار

برای بدست آوردن منحنی نیرو-جابجایی تحت بارگذاری شبه استاتیک و دینامیک، نمونه‌هایی بر اساس استاندارد ASTM-C365 و با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر مطابق شکل (۲) ساخته شده و با سرعت 10 mm/min و با حداکثر ۷۰٪ فشردگی مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۲- مراحل مختلف آزمون فشار

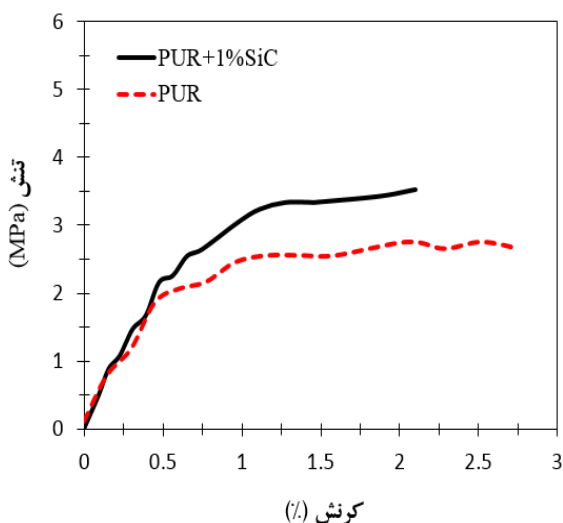
^۱ Scanning Electron Microscopy



شکل ۵- چگالی سلول نمونه‌های فوم پلی یورتان خالص و فوم نانو کامپوزیت

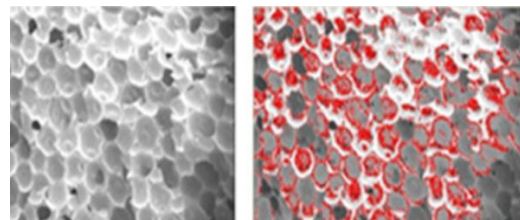
۲-۴- خواص کششی

منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های فوم پلی یورتان خالص و فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان تقویت شده با ذرات SiC در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین، به منظور مقایسه بهتر، مقادیر تنش تسلیم-استحکام کششی و مدول الاستیسیته فوم پلی یورتان و فوم نانو کامپوزیت پلی یورتان به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ۱٪ نانو ذرات SiC به فوم پلی یورتان، مدول الاستیسیته به میزان ۸٪ و تنش تسلیم و استحکام کششی به ترتیب به میزان ۷٪ و ۲۲٪ و نسبت فوم پلی یورتان خالص افزایش یافته است.

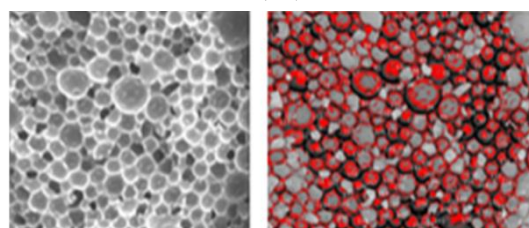


شکل ۶- نمودار تنش-کرنش فوم پلی یورتان و فوم نانو کامپوزیت

اما وجود نانو ذرات کاربید سیلیسیم باعث شده تا این نسبت برابر ۳/۳۷ شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود نانو ذرات در فوم پلی یورتان منجر به کاهش یکنواختی اندازه سلول‌ها و افزایش تعداد سلول‌ها می‌شود.

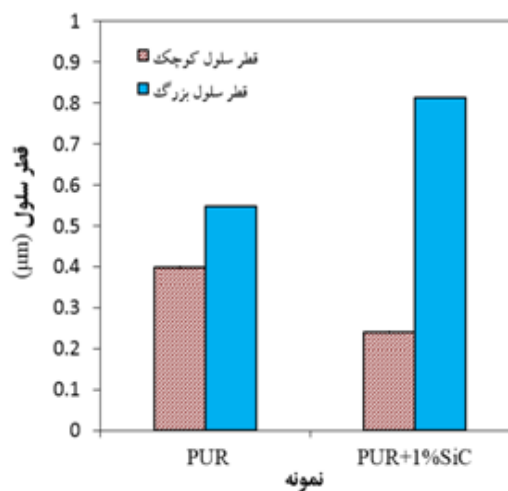


(الف)



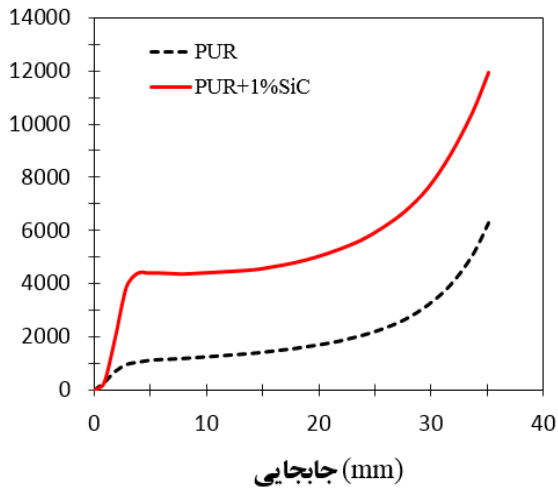
(ب)

شکل ۳- تصاویر مورفولوژی سلولی با میکروسکوپ الکترونی فوم خالص پلی یورتان با چگالی $8/94 \times 10^{-10} \text{ cell/cm}^2$ (الف) و فوم نانو کامپوزیتی تقویت شده با ذرات SiC با چگالی $2/17 \times 10^{-10} \text{ cell/cm}^2$ و ۲۰۸ سلول

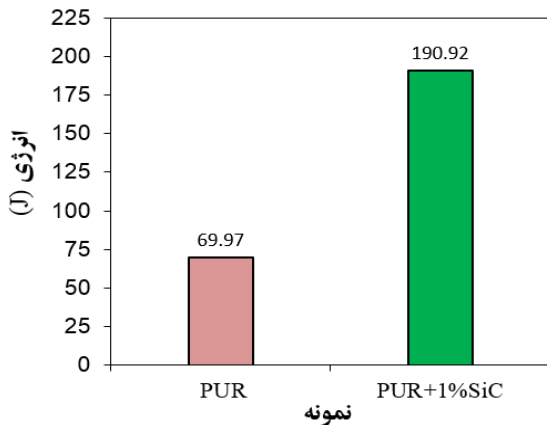


شکل ۴- اندازه قطر سلول در نمونه‌های فوم پلی یورتان خالص و فوم نانو کامپوزیت

همچنین، توزیع یکنواخت نانو ذرات در فرآیند تولید فوم و گسستن پیوند پلیمری در ساختار فیزیکی پلی یورتان، باعث ریز شدن و تراکم سلول‌ها شده است. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزودن ۱٪ نانو کاربید سیلیسیم به فوم پلی یورتان، ۲۷٪ رشد تراکم سلولی بوجود می‌آید.



شکل ۹- مقایسه نمودار نیرو جابجایی بین فوم خالص و فوم نانو کامپوزیت تحت نیروی فشاری شبه استاتیک



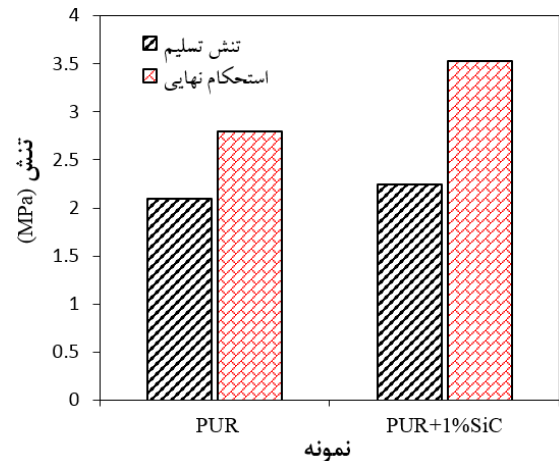
شکل ۱۰- مقایسه میزان جذب انرژی بین فوم خالص و فوم نانو کامپوزیت تحت نیروی فشاری شبه استاتیک

۵- آزمون دینامیکی

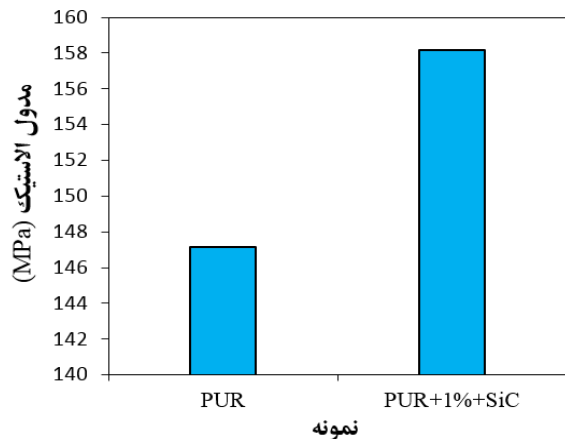
به منظور بررسی رفتار دینامیکی فوم پلی یورتان و فوم نانو کامپوزیت، از دستگاه سقوط وزنه^۱ مطابق شکل (۱۱) استفاده شده است. در این آزمون یک وزنه با جرم ۲۵ kg از یک ارتفاع مشخص و با سرعت ۲/۶ m/s بر روی نمونه‌هایی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر سقوط کرده و باعث لهیدگی فوم‌ها می‌شوند. با استفاده از سنسورهایی که بر روی دستگاه قرار گرفته، مقادیر نیرو و طول لهیدگی فوم تعیین می‌شود. همچنین، بر روی وزنه ضربه زننده یک شتاب سنج قرار دارد که این شتاب سنج به صورتی که در شکل (۱۱) نشان داده شده است به کامپیوتر وصل شده و نمودار تغییرات شتاب- زمان را نمایش می‌دهد.

۳-۴ جذب انرژی تحت بارگذاری شبه استاتیک

در شکل (۹)، منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌های آزمایش تحت فشار محوری شبه استاتیک نشان داده شده است. به طور کلی منحنی نیرو-جابجایی فوم دارای سه منطقه می‌باشد. منطقه اول: ناحیه الاستیک، منطقه دوم: تنش مسطح و منطقه سوم: ناحیه چگالش فوم.



شکل ۷- مقایسه تنش تسلیم و استحکام نهایی بین فوم خالص و فوم نانو کامپوزیت



شکل ۸- مقایسه مدول الاستیک بین فوم خالص و فوم نانو کامپوزیت

با توجه به شکل (۹)، سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی میزان انرژی جذب شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، جذب انرژی در نمونه‌های فوم پلی‌یورتان خالص و فوم نانو کامپوزیت پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات SiC به ترتیب برابر ۶۹/۹۷ kJ و ۱۹۰/۹۲ kJ می‌باشد. بنابراین، با افزودن ۱٪ نانو ذره SiC به فوم پلی‌یورتان جذب انرژی به اندازه ۶۳٪ افزایش می‌یابد.

¹Drop weight

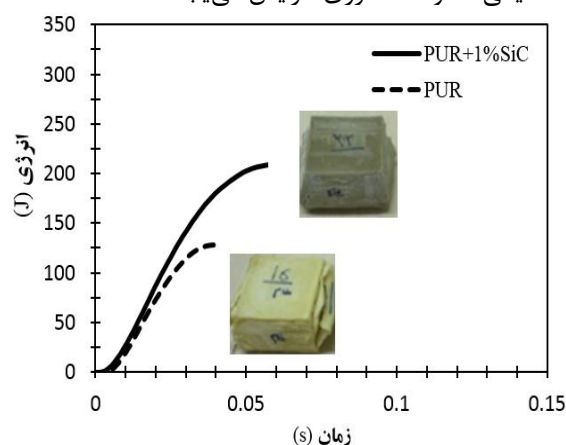
۶- نتیجه گیری

در این مقاله، مطالعه آزمایشگاهی در خصوص خواص مکانیکی و جذب انرژی فوم پلی یورتان خالص و فوم نانو کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات SiC تحت بارگذاری شبه استاتیک و دینامیک انجام گردید. برای این منظور، نمونه‌های آزمایش تحت کشش محوری و فشار محوری قرار داده شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که خواص کششی و فشاری فوم نانو کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات SiC نسبت به فوم پلی یورتان خالص بهبود یافته و جذب انرژی حاصل از بارگذاری دینامیکی در مقایسه با فوم خالص ۵۱٪ افزایش یافت. در واقع نانو ذرات مورد استفاده در این پژوهش اندازه سلول‌ها را کاهش داده و به واسطه نسبت ابعادی خوب سلول‌ها، مراکز هسته گذاری زیادی در پلیمر ایجاد کرده و منجر به افزایش چگالی سلولی گردید. همچنین چسبندگی سلولی پلیمر با وجود نانو ذرات SiC افزایش یافته و مقاومت به رشد سلول در حین فرآیند فوم شدن افزایش یافت. بنابراین نتایج حاصل از این تحقیق در سازه‌هایی که تحت بارهای دینامیکی می‌باشند، از فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات SiC می‌توان به عنوان جاذب انرژی استفاده نمود.



شکل ۱۱- شماتیک دستگاه سقوط وزنه و سنسور شتاب سنج

شکل (۱۲)، مقدار انرژی جذب شده توسط فوم پلی یورتان و فوم نانو کامپوزیتی تحت اثر بار دینامیکی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، میزان انرژی جذب شده فوم نانو کامپوزیت در مقایسه با فوم خالص ۵۱٪ افزایش یافته است. همچنین با مقایسه انرژی جذب شده در حالت بار شبه استاتیک و بار دینامیکی دیده می‌شود که انرژی جذب شده تحت بار دینامیکی برای فوم خالص $127/79 \text{ J}$ بوده که حدود ۴۵٪ نسبت به بارگذاری شبه استاتیک افزایش یافته است. در حالی که برای فوم نانو کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات SiC انرژی جذب شده تحت بار دینامیکی $209/64 \text{ J}$ بوده که نسبت به بارگذاری شبه استاتیک حدود ۹٪ انرژی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات انرژی جذب شده بر حسب زمان بین فوم خالص و فوم نانو کامپوزیت تحت بار دینامیکی

۷-مراجع

- [1] T. Masciangioli, W.X. Zhang, "Peer reviewed: environmental technologies at the nanoscale", *Environmental science & technology*, Vol. 37, No. 5, 2003, pp. 102A–108A.
- [2] M. Okamoto, *Polymer/layered silicate nanocomposites*, iSmithers Rapra Publishing, 2003.
- [3] S.E. Zakiyan, M.H.N. Famili, and M. Ako, "Heterogeneous Nucleation in Batch Foaming of Polystyrene Using Nanosilica as a Nucleating Agent", *Iranian journal of polymer science & technology*, (In Persian), Vol. 25, No. 3, 2012, pp. 231–240.
- [4] H. Mahfuz, V.K. Rangari, M.S. Islam, S. Jeelani, "Fabrication, synthesis and mechanical characterization of nanoparticles infused polyurethane foams", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 4, 2004, pp. 453–460.
- [5] Z. Xu, X. Tang, A. Gu, Z. Fang, "Novel preparation and mechanical properties of rigid polyurethane foam/organoclay nanocomposites", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 106, No. 1, 2007, pp. 439–447.
- [6] G. Hao, "Influences of manometer granule on mechanical properties of packaging materials rigid polyurethane foam", *Packaging Engineering*, Vol. 4, No. 018, 2006.
- [7] X. Fan, W. Xiao-Qing, "Study on compress mechanical properties of reinforced polyurethane rigid foam", *Fiber Reinforced Plastics*, Vol. 3, No. 014, 2009.
- [8] J. Wang, G. Si, W. Yi-Fei, W. Ping, W. Jian-hua, L. Yong-hua, "Preparation of nanosilicon dioxide reinforced rigid polyurethane foam", *Journal of National University of Defense Technology*, Vol. 26, No. 4, 2004, pp. 86–89.
- [9] H. Xie, Z. Wang, "In-site generating nano silicon dioxide and its effect as filler on properties of polyurethane rigid foam", *Plastics Science and Technology*, Vol. 5, No. 007, 2005.
- [10] I. Javni, W. Zhang, V. Karajkov, Z.S. Petrovic, V. Divjakovic, "Effect of nano- and micro-silica fillers on polyurethane foam properties", *Journal of cellular plastics*, Vol. 38, No. 3, 2002, pp. 229–239.
- [11] M.C. Saha, M.E. Kabir, and S. Jeelani, "Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nano-particles", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 479, 2008, pp. 213–222.
- [12] H. Mahfuz, M.S. Islam, V.K. Rangari, And M.C. Saha, Sh. Jeelani, "Response of sandwich composites with nano-phased cores under flexural loading", *Composites: Part B*, Vol. 35, No. 6–8, 2004, pp. 543–550.
- [13] M.E. Kabir, M.C. Saha, and S. Jeelani, "Effect of ultrasound sonication in carbon nanofibers/ polyurethane foam composite", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 459, 2007, pp 111–116.
- [14] T. Kuboki, "Mechanical properties and foaming behavior of injection molded cellulose fiber reinforced polypropylene composite foams", *Journal of cellular plastics*, Vol.50, No.2, 2013, pp. 129-143