

## بررسی تجربی خواص مکانیکی و مورفولوژیکی فوم میکروسلولی پلی استایرن

احسان صائمی<sup>۱\*</sup>، عبدالحسین فریدون<sup>۲</sup>، علیرضا آلبویه<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸	فوم‌های میکروسلولی (Microcellular Foams) به آن دسته از فوم‌ها اطلاق می‌شود که دارای تعداد بسیاری سلول‌های ریز در اندازه‌های حدود ۱۰ میکرون هستند. در این فوم‌ها از گاز خنثی (نیتروژن یا دی اکسید کربن) به‌عنوان ماده پف‌دهنده استفاده می‌شود. به دلیل کوچکی سلول‌های این فوم‌ها خواص مکانیکی و فیزیکی برتری (مانند استحکام خستگی، استحکام به ضربه، خواص حرارتی و دی الکتریکی) حتی نسبت به پلاستیک فوم‌نشده دارند. در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی فوم‌های میکروسلولی پلی استایرن پرداخته شده است. میزان چگالی نسبی، تعداد سلول‌ها، اندازه سلول‌ها، ساختار فوم و همچنین استحکام کششی و استحکام در برابر ضربه فوم مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد برای به دست آوردن ساختار بهینه، دما و زمان فوم کردن پلیمر باید به دقت تحت کنترل قرار گیرد. این شرایط در دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰۰ ثانیه است. همچنین استحکام کششی نمونه‌های فوم‌شده نسبت به فوم‌نشده کاهش و میزان جذب انرژی نمونه‌های فوم‌شده به فوم‌نشده افزایش چشمگیری داشته است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۵	
<b>واژگان کلیدی:</b> فوم‌های میکروسلولی، فوم پلی استایرن، خواص مکانیکی، خواص ساختاری، دی اکسید کربن.	

### ۱- مقدمه

اهمیت کاهش مصرف منابع طبیعی با توجه به محدودیت این منابع قابل توجه است. روش تولید فوم با ایجاد حباب‌ها یکی از روش‌های کاهش مواد مصرفی است به شرطی که شرایط کاری را تأمین کند. تحقیقات نشان داده است که یک قطعه ساخته‌شده از پلاستیکی‌های فوم‌شده به روش سنتی، خواص مکانیکی بسیار ضعیف‌تری نسبت به یک قطعه ساخته‌شده از پلاستیک فوم‌نشده دارد [۱-۳]. بنابراین برای کاربردهایی که نیاز به استحکام کششی، استحکام به ضربه، چقرمگی، مقاومت به شکست خوب و سفتی مناسب وجود دارد، استفاده از فوم‌های سنتی پیشنهاد نمی‌شود. فوم‌های میکروسلولی به آن دسته از فوم‌ها اطلاق می‌شود که توسط جوانه‌زنی گاز در ترموپلاستیک‌ها ایجاد می‌شوند و دارای تعداد بسیار زیادی از سلول‌های ریز (معمولاً بیش از  $10^8$  سلول در سانتی‌متر مکعب) هستند که قطر سلول‌ها از مرتبه  $10\mu m$  است [۱]. اساس این پدیده این است که

اگر به اندازه کافی حباب‌هایی کوچک‌تر از ترک‌های بحرانی در قطعه ایجاد شوند، چگالی بدون از دست دادن خواص مکانیکی مطلوب کاهش خواهد یافت. به این ترتیب پلاستیک‌های میکروسلولی می‌توانند بدون لطمه به محیط‌زیست و بدون کاهش خواص مکانیکی، جایگزین فوم‌های سنتی یا حتی پلاستیک‌های فوم‌نشده شون، ضمن اینکه برخی از خواص را بهبود می‌بخشند. یک قطعه تولیدشده و فوم‌شده با روش میکروسلولی می‌تواند تا ۷۰ درصد صرفه‌جویی در ماده اولیه داشته باشد. ضمن اینکه خواصی نظیر استحکام به ضربه و عایق بودن پلیمر فوم‌شده بهبود می‌یابد. اگرچه فوم‌هایی با چگالی نسبی ۰/۱ تا ۱ با این روش تولید شده‌اند، اما به نظر می‌رسد فوم‌هایی با چگالی نسبی ۰/۳ تا ۰/۷ مقرون به‌صرفه‌تر هستند [۴]. از طرفی در تولید فوم‌های سنتی اغلب از کلورو فلورو کربن‌های (CFCs و HCFCs) مضر برای لایه اوزون و هیدروکربن‌های قابل‌اشتعال، به‌عنوان عوامل تولیدکننده

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ehsan\_saemi@yahoo.com

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

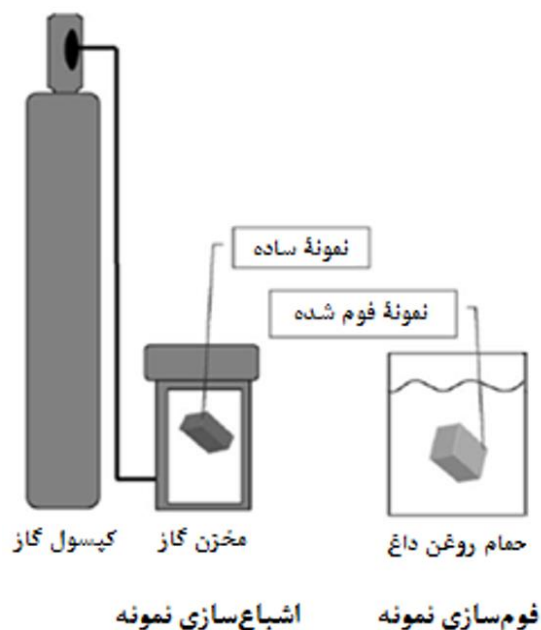
۲. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۳. استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه دامغان

میکروسلولی PS را جایگزین PS کرد. هرچند در خصوص خواص ساختاری و همچنین فرآیند ساخت فوم‌های میکروسلولی کارهای زیادی انجام شده، تاکنون درباره خواص مکانیکی این نوع فوم‌ها گزارشی دقیق منتشر نشده است [۱۰].

### ۳- تئوری

فوم کردن میکروسلولی به‌طور کلی شامل سه مرحله است: جذب گاز، جوانه‌زنی و رشد سلول. در روش توده‌ای (Batch) در مرحله اول نمونه پلیمری توسط گاز خنثی و با فشار بالا در یک مخزن تحت فشار همانند شکل (۱) اشباع می‌شود. با گذشت زمان مولکول‌های گاز در پلیمر نفوذ کرده، تا پلیمر از گاز اشباع شود. پس از اشباع جذب متوقف شده، توزیع گاز درون قطعه یکنواخت می‌شود. به‌طور معمول چندین ساعت تا چندین روز زمان لازم است تا یک ورق نازک پلاستیکی اشباع شود. این زمان به جنس پلاستیک، قابلیت نفوذ گاز استفاده‌شده در پلاستیک، ضخامت، دمای اشباع و فشار گاز بستگی دارد.



شکل ۱: مراحل تولید فوم به روش توده‌ای حالت جامد [۲]

شکل (۲) نمودار حلالیت - دما - فشار را نشان می‌دهد [۲]. همان‌طور که مشاهده می‌شود حلالیت گاز با ازدیاد فشار اشباع گاز و با کاهش دما افزایش می‌یابد. در فرآیند شکل (۱)، پس از اشباع نمونه در فشار بالا شیر خروج گاز باز شده، فشار مخزن به‌صورت آبی به فشار محیط افت پیدا می‌کند. سپس نمونه در داخل ظرف حاوی

حباب استفاده می‌شود. در حالی که در تولید فوم‌های میکروسلولی به‌علت استفاده از گازهای خنثی (نیتروژن و دی‌اکسید کربن) مضرات مذکور وجود نخواهد داشت. این مواد در بسیاری از صنایع از قبیل بسته‌بندی، خودروسازی، لوازم خانگی، اسباب بازی، هوافضا، اعضای مصنوعی و صنایع پزشکی و... تأثیر بسزایی دارد.

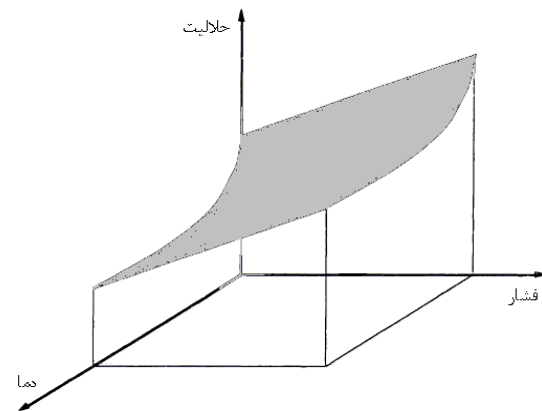
خواص ساختاری و مکانیکی بهبودیافته، کاهش تناژ (برای تعداد مشخصی قطعه) و زمان تزریق و کاهش نیروی کلمپ، کاهش قیمت و وزن محصول و امکان تولید فوم با ضخامت بسیار کم، از دیگر مزایای فوم‌های میکروسلولی است [۵].

ایده تولید حباب‌های بسیار ریز توسط جوانه‌زنی گاز در پلاستیک‌ها ابتدا توسط مارتینی (Martini) در انستیتو تکنولوژی ماساچوست (MIT) در اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان راهی برای کاهش قیمت بسیاری از پلاستیک‌های تولید دسته‌ای ارائه شد [۱]. روش تولید توده‌ای فوم‌های میکروسلولی، تئوری‌های تشکیل و رشد حباب‌ها و نرخ جوانه‌زنی در سیستم فوق‌اشباع گاز-پلیمر توسط مارتینی بررسی شد [۱]. وی همچنین رشد سلول و اندازه آن را به‌عنوان تابعی از زمان بررسی کرد [۶]. کلتن نیز جوانه‌زنی در ترموپلاستیک‌های بی‌شکل و حضور عامل جوانه‌زا را مطالعه کرد [۷]. کومار سینتیک تولید قطعات میکروسلولی با هندسه مشخص و ساختار میکروسلولی را بررسی کرد [۳]. تحقیقات زیادی بر روی فوم‌های میکروسلولی تولیدشده به روش توده‌ای بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ صورت پذیرفت. با توجه به اهمیت فرآیندهای معمول پلاستیک مانند اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی، کار بر روی فرآیند تولید فوم میکروسلولی به روش اکستروژن توسط پارک [۲] آغاز شد و با تحقیق به روش [۸ و ۹] ادامه یافت. در این تحقیقات نحوه ایجاد مخلوط یکنواخت، هسته‌زایی و رشد سلول‌ها برای به‌دست‌آوردن چگالی پایین بررسی و آزمایش شد و تولید صنعتی فوم‌های میکروسلولی تجربه شد.

### ۲- هدف تحقیق

هدف از انجام تحقیق، بررسی تجربی خواص ساختاری و مکانیکی فوم میکروسلولی است. در این مقاله تحقیق بر روی فوم میکروسلولی PS (پلی استایرن) انجام شده است. در صنایع مختلف مانند بدنه کامپیوتر، اجزای داخلی خودرو، اثاث و لوازم منزل و مصالح ساختمانی استفاده می‌شود. در بسیاری از این کاربردها می‌توان فوم‌های

گلیسرول که دمای آن تحت کنترل است انداخته می‌شود. این دو ناپایداری ترمودینامیکی، افت فشار و افزایش دما، دو نیروی رانش اصلی برای جوانه‌زنی سلول‌ها هستند [۷].



شکل ۲: نمودار حلالیت-دما-فشار [۲]

$$H = H_0 \times \exp\left(-\frac{\Delta H_S}{RT}\right) \quad (3)$$

که در آن R ثابت گاز (J/K)، T دما (K)،  $H_0$  ضریب حلالیت ([STP]/g-pa) و  $\Delta H_S$  گرمای مولار جذب (J) است که در بیشتر سیستم‌های گاز پلیمر منفی است. می‌توان از گازهای بی‌اثر مختلفی استفاده کرد اما استفاده از نیتروژن و دی‌اکسید کربن رایج‌تر است؛ چون حلالیت آن‌ها در پلیمرها بالا و هزینه آن‌ها کم است. گاز دی‌اکسید کربن نرخ حلالیت و نفوذ متفاوتی با نیتروژن دارد. در اغلب مواد نرخ نفوذ  $\text{CO}_2$  حدود ۲۰٪ بیشتر از نیتروژن است. به طوری که در اغلب سیستم‌های میکروسلولی، دی‌اکسید کربن جذب‌شده از لحاظ وزنی ۳/۵ برابر نیتروژن است [۱۳]. همان‌طور که قبلاً اشاره شد نرخ نفوذ گاز به داخل پلیمر بسیار پایین است. زمان موردنیاز برای نفوذ گاز در پلیمر توسط رابطه زیر تخمین زده می‌شود [۴]:

$$t \approx \frac{h^2}{D} \quad (4)$$

که در آن h ضخامت قطعه برحسب cm و D ضریب نفوذ برحسب ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) است. مقدار D را می‌توان به صورت تجربی به دست آورد یا از جدول موجود استخراج کرد. در این صورت t برحسب ثانیه به دست می‌آید. برای بررسی تعداد سلول‌ها از روش تعداد سلول در واحد حجم پلیمر فوم‌شده، تعداد سلول ایجادشده در واحد به آن چگالی سلول می‌گویند و می‌توان آن را از رابطه زیر به دست آورد [۲]:

$$N = \left(\frac{n}{l^2}\right)^{3/2} \frac{\rho_P}{\rho_F} \times 10^{12} \quad (5)$$

که در آن n تعداد حباب‌ها در سطحی با ابعاد ۱\*۱ است.  $\rho_P$  چگالی پلیمر فوم‌نشده و  $\rho_F$  چگالی فوم به دست آمده است. اندازه سلول‌ها از تصویر میکروسکوپ الکترونی قابل اندازه‌گیری است. در صورت یکنواختی توزیع اندازه‌ها می‌توان به راحتی اندازه سلول‌ها را با خطای قابل قبولی برداشت کرد. در صورت تنوع اندازه‌ها می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه قطر حباب‌ها استفاده کرد [۱۴]:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6(\rho_P - \rho_F)}{\pi N \rho_F}} \quad (6)$$

که N از رابطه (۵) به دست می‌آید.

اگرچه دمای بالاتر نفوذ گاز در پلاستیک را شتاب می‌بخشد، با توجه به اینکه حلالیت گاز در پلیمر با دما رابطه معکوس دارد و در دمای اتاق مقدار بیشتری گاز حل خواهد شد، مرحله اشباع معمولاً در دمای اتاق انجام می‌شود. پس از آنکه پلیمر اشباع شد آن را از مخزن تحت فشار بیرون آورده می‌شود، تا در مرحله بعد فوم شود. در این مرحله نمونه اشباع‌شده تا دمای فوم‌شدن گرم می‌شود. این دما کمتر از دمای گذار شیشه‌ای پلیمر خالص است که برای پلیمر PS تقریباً برابر ۱۰۰ درجه است. در طی این مرحله تعداد بسیاری هسته تشکیل شده، رشد می‌کنند. رشد حباب‌ها با نگهداری در دمای فوم‌شده با طول زمانی مشخص کنترل می‌شود که به آن زمان فوم‌کردن می‌گویند. غلظت لحظه‌ای گاز حل‌شده در پلیمر توسط رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp\left[-\frac{D(2m+1)^2 \pi^2 t}{h^2}\right] \quad (1)$$

که در آن D قابلیت نفوذ برحسب ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )،  $M_t$  جرم پس از زمان t برحسب (g)، h ضخامت نمونه برحسب (cm)،  $M_\infty$  جرم تعادلی پس از زمان بی‌نهایت برحسب (g) و t زمان سپری‌شده برحسب (s) است. حداکثر مقدار گاز حل‌شده در پلیمر را که به فشار و دمای سیستم بستگی دارد، می‌توان توسط قانون هنری (Henry) تخمین زد [۱۲].

$$C_S = H \times P_S \quad (2)$$

که  $C_S$  قابلیت انحلال گاز در پلیمر ( $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ )، H ثابت هنری

آماده‌سازی‌های موردنیاز جهت تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونیکی ساختار سطح نمونه فوم‌شده مشاهده شد و تعداد سلول‌ها و اندازه آن‌ها به دست آمد.

زمان لازم برای اشباع نمونه مطابق رابطه (۴) (  $D = 19.2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$  ) برابر با ۸ ساعت است [۱۵]. برای به‌دست‌آوردن زمان اشباع به‌صورت تجربی در زمان‌های مختلف وزن نمونه‌های در حال اشباع‌شدن خوانده شده، زمان لازم برای اشباع نمونه‌ها و همچنین درصد افزایش وزن نمونه‌ها به دست آمد.

برای انجام آزمایش‌ها فشار اشباع ثابت گرفته و زمان اشباع نیز ۲۴ ساعت انتخاب شد تا نمونه‌ها کاملاً اشباع شوند. به این ترتیب دو پارامتر دمای فوم‌کردن و زمان فوم‌کردن بررسی شدند. برای بررسی این دو پارامتر دماهای تنظیم‌شده حمام گلیسرول عبارت‌اند از: ۱۰۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های نگهداری (غوطه‌وری نمونه‌ها) در هر دما عبارت‌اند از: ۱۰۰، ۶۰، ۴۰ و ۱۲۰ ثانیه. بنابراین تعداد سطوح آزمایش ۲۰ عدد بوده است که در هر سطح آزمایش حداقل سه نمونه مربعی و دمبلی موردآزمایش قرار گرفتند. به‌عنوان مثال ۱۵ نمونه مربعی و ۱۵ نمونه دمبلی اشباع‌شده در دمای ۶۰ درجه قرار داده شدند و سه نمونه مربعی و سه نمونه دمبلی‌شکل دیگر پس از ۴۰ ثانیه، سه نمونه مربعی و سه نمونه دمبلی‌شکل دیگر پس از ۶۰ ثانیه، سه نمونه مربعی و سه نمونه دمبلی‌شکل باقی‌مانده پس از ۸۰ ثانیه، سه نمونه مربعی و سه نمونه دمبلی‌شکل باقی‌مانده پس از ۱۰۰ ثانیه و بالاخره سه نمونه مربعی و سه نمونه دمبلی‌شکل باقی‌مانده پس از ۱۲۰ ثانیه از حمام ۶۰ درجه خارج شدند. در سایر دماها نیز به همین ترتیب عمل شد. در نهایت ۶۰ نمونه مربعی و ۶۰ نمونه دمبلی‌شکل فوم‌شده به دست آمد. چگالی این نمونه‌ها به دست آمد و نمودار چگالی آن‌ها نسبت به چگالی نمونه فوم‌نشده در زمان و دمای مختلف (نمودار دانسیته نسبی) رسم شد. همچنین نتایج آزمون کشش و ضربه در زمان و دماهای مختلف رسم شد.

#### ۶- نتایج و بحث

زمان لازم برای اشباع نمونه‌ها توسط گاز در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود زمان لازم برای اشباع تقریباً ۸ ساعت است که با عدد به‌دست‌آمده از رابطه ۴ مطابقت دارد. این نمودار همچنین

نرخ جوانه‌زنی همگن  $\dot{N}$  به‌صورت زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\dot{N} = C_x f_0 \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{KT}\right) \quad (7)$$

که در آن  $f_0$  فاکتور فرکانسی معادل  $(10^{-5}/s)$  برای تشکیل یک جوانه بحرانی توسط مولکول‌ها [۷]،  $C_0$  غلظت مولکول‌های گاز،  $T$  دما برحسب (k) و  $K$  ثابت بولتزمن برحسب (J/K) است.  $\Delta G^*$  نیز انرژی اکتیواسیون برای جوانه‌زنی همگن است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta P)^2} \quad (8)$$

که در آن  $\gamma$  کشش سطحی پلیمر و  $\Delta P = P_s - P_0$  است.  $P_s$  فشار اشباع گاز و  $P_0$  فشار محیطی است که در آن جوانه‌زنی اتفاق می‌افتد.

#### ۴- مواد موردآزمون و تجهیزات

در این تحقیق ۶۰ نمونه مربعی از جنس PS به ابعاد  $40 \times 20 \times 3$  mm برای بررسی ساختار فوم و تست کشش مطابق استاندارد ASTM-D638-MIII به روش توده‌ای تولید شد و مورد استفاده قرار گرفت.

برای انجام آزمایش‌ها سامانه شکل ۱ ساخته و نصب شد. یک ترازوی دقیق با ریزسنجی  $0.0001$  گرم برای اندازه‌گیری چگالی به روشن نیوتن و یک دستگاه تست کشش (STM 400) SANTAM برای اندازه‌گیری استحکام کششی مورد استفاده قرار گرفت. سپس از مقطع نمونه‌های آماده‌شده، توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل Philips X130 برای بررسی ساختاری فوم (اندازه و تعداد سلول‌ها) تصویربرداری صورت گرفت.

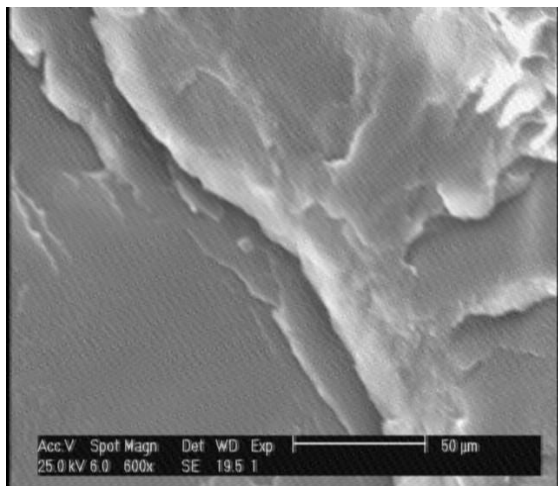
#### ۵- روش انجام آزمایش

در فرآیند فوم‌کردن میکروسولولی چهار متغیر مختلف برای کنترل فرآیند وجود دارد که عبارت‌اند از: زمان اشباع، فشار اشباع، زمان فوم‌کردن و دمای فوم‌کردن. پارامترهای متغیر در این تحقیق دمای فوم‌کردن و زمان فوم‌کردن بودند. ابتدا نمونه تحت آزمایش در مخزن دی‌اکسید کربن با فشار ۷ Mpa قرار گرفت. پس از مدت قابل قبول (اندازه‌گیری شده) با اطمینان از اشباع، فشار مخزن با بازکردن شیر به‌طور لحظه‌ای به صفر کاهش داده شد. سپس نمونه در حمام گلیسرول در دمای تعیین‌شده قرار گرفت و زمان نگهداری نیز اندازه‌گیری شد. پس از فوم‌شدن چگالی آن توسط روش ارشمیدس اندازه‌گیری شده، در ادامه پس از انجام

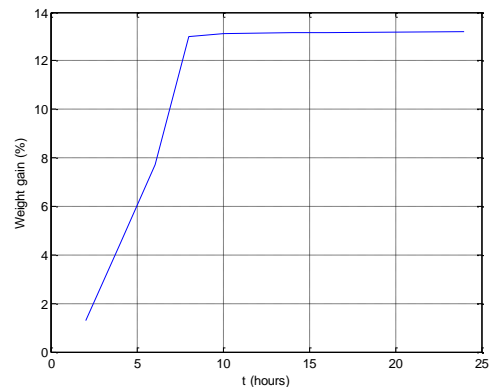
فوم شدن ملاحظه می‌شود که قطعه درون حمام داغ به جوش می‌آید که در واقع همان فرار ملکول‌های گاز به خارج قطعه است. بنابراین با فرار کردن بخش اعظمی از گاز اشباع شده، میزان افزایش حجم محدود خواهد شد. این میزان افزایش حجم با زمان ماندگاری بیش از حد قطعه در حمام داغ کمتر می‌شود؛ زیرا زمان لازم برای فرار شدیدتر گازها فراهم آمده، به طوری که در نهایت میزان پف کردن قطعه (با کاهش اندازه سلول‌ها یا از بین رفتن آن‌ها) کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش زمان و دما نه تنها باعث رانش گازها به داخل سلول‌ها شده، بلکه باعث فرار آن‌ها به بیرون قطعه می‌شود. به همین دلیل امکان کاهش چگالی به روش توده‌ای محدود است.

همان‌طور که از نمودار چگالی نسبی (شکل (۴)) مشاهده می‌شود، بیشترین میزان فوم‌شدگی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰۰ ثانیه اتفاق افتاده است. اما از لحاظ انعطاف‌پذیری در روش تولید در دمای ۱۲۰ درجه کنترل فرآیند کمی مشکل است؛ زیرا چگالی قطعه با افزایش دما بلافاصله در این شرایط افزایش می‌یابد.

از طرفی نمودار چگالی نسبی نشان می‌دهد که در دمای ۱۰۰ درجه و زمان ۱۰۰ ثانیه نیز می‌توان فومی با درصد چگالی نسبی پایین به دست آورد، به گونه‌ای که قابلیت کنترل بهتری در فرآیند حاصل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند حجم نمونه‌ها تا ۴ برابر افزایش یافته است (حجم نمونه فوم‌شده به حجم نمونه فوم‌نشده). شکل‌های (۵) تا (۶) نمونه‌های انتخاب شده از تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۶۰۰ برابر را نشان می‌دهد به طوری که نمودار (۵) مربوط به پلیمر فوم‌نشده و نمودار (۶) مربوط به نمونه بهینه فوم‌شده است.

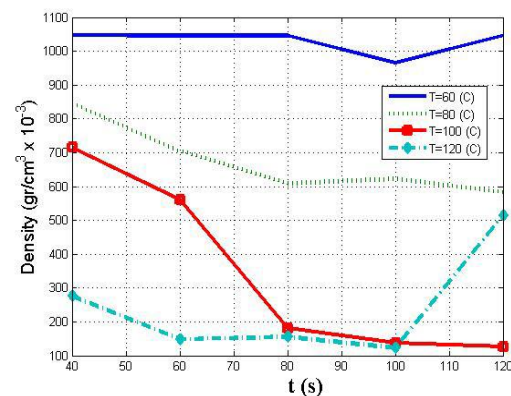


نشان می‌دهد حداکثر افزایش نسبی وزن نمونه تقریباً ۰/۱۳ وزن نمونه است.



شکل ۳: زمان لازم برای اشباع نمونه‌ها

در شکل (۴) نتایج چگالی قطعات فوم‌شده بر حسب دمای فوم کردن و زمان فوم کردن داده شده است.



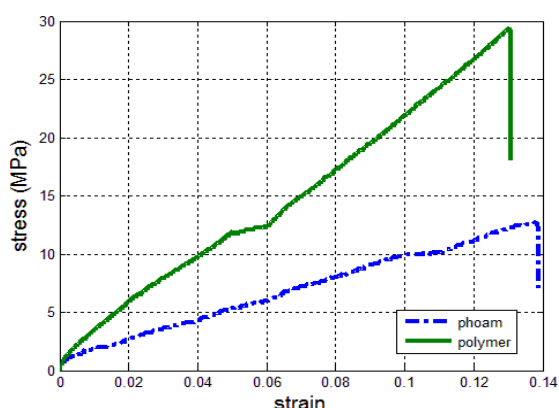
شکل ۴: نمودار چگالی نسبی - زمان فوم PS

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دما و زمان فوم شدن اثر قابل توجهی بر چگالی قطعه فوم‌شده دارند. با قراردادن قطعه در حمام داغ، نیروی رانش برای خارج کردن گاز از ماتریس پلیمری (به دلیل کاهش حلالیت در دمای بالا) سبب می‌شود ملکول‌های گاز اشباع شده به درون حباب‌ها نفوذ کرده، باعث رشد آن‌ها شود. بنابراین مطابق شکل (۴) با افزایش زمان فوم کردن در دماهای ۶۰°C، ۸۰°C و ۱۰۰°C چگالی کاهش می‌یابد، اما در دمای ۱۲۰°C مشاهده می‌شود که ابتدا چگالی کاهش یافته، با افزایش دما چگالی افزایش می‌یابد. این به دلیل ایجاد فرصت به گازها برای خروج از قطعه (فرار گازها) است [۱۳].

در واقع یکی از معایب روش توده‌ای این است که با گرم شدن سطح قطعه در ابتدای فوم شدن گازهای اشباع شده به خارج قطعه فرار می‌کنند. با مشاهده چگونگی

بیانگر اندازه سلول فوم PS است که اندازه این سلول کمتر از اندازه ترک‌های بحرانی در پلاستیک ( $10\mu$ ) است که این امر باعث جلوگیری از تمرکز تنش در فوم‌های تولیدی با این اندازه سلولی می‌شود.

در شکل (۸) منحنی تنش - کرنش پلیمر PS و فوم PS با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، مقادیر تنش تسلیم و استحکام کششی فوم متناسب با میزان کاهش چگالی کاهش یافته و این به معنای کاهش استحکام فوم پلیمری نسبت به پلیمر فوم‌نشده است. ضمناً نتایج آزمون کشش پلیمر PS و فوم PS در جدول ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۸: منحنی تنش - کرنش پلیمر PS و فوم PS

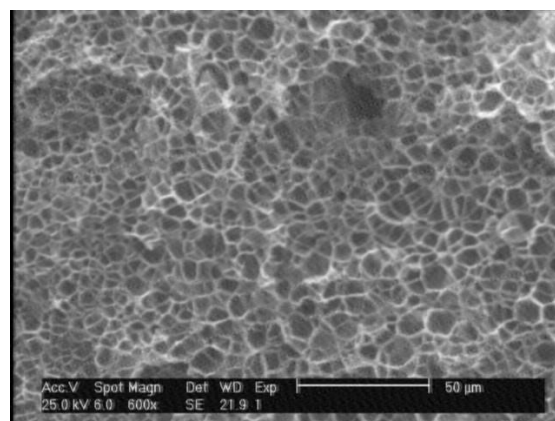
جدول ۱- مقایسه نتایج آزمون کشش پلیمر و فوم PS

خواص	پلیمر PS	فوم PS
ماکزیمم تنش نهایی (Mpa)	۲۹/۳۰۷۲	۱۲/۷۱۸۸
تنش تسلیم (Mpa)	۲۵/۴۳۱	۱۲/۵۲۹۸
مدول الاستیسیته (Mpa)	۲۱۰/۹۱۸۴	۸۷/۶۳۱۵۷

در مورد استحکام به ضربه تصور می‌شود که با افزایش مقاومت در برابر رشد ترک توسط حفره‌های میکرونی که از ترک بحرانی کوچک‌ترند و سبب رشد ترک نمی‌شوند، استحکام به ضربه بهبود می‌یابد.

هرچند استحکام کششی فوم کاهش می‌یابد، با افزایش درصد افزایش طول نمونه‌های فوم‌شده تحت آزمون کشش،

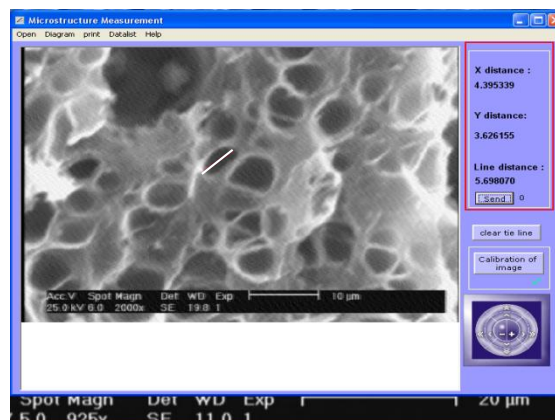
شکل ۵: پلیمر فوم‌نشده PS



شکل ۶: پلیمر فوم‌شده PS در حالت بهینه (دمای  $100^{\circ}\text{C}$  و زمان ۱۰۰ ثانیه)

برای تعیین چگالی سلول، نمونه‌های فومی به مدت ۳۰ دقیقه در نیتروژن مایع غوطه‌ور شده، سپس شکسته شدند. سطوح شکسته‌شده با طلا پوشش داده شدند. در نهایت به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر و ولتاژ 25KV از سطح مقطع عرضی نمونه‌ها عکس‌برداری شد. چگالی سلول‌ها با شمارش تعداد سلول‌های موجود در یک عکس از معادله (۵) تعیین می‌شود.

قابل ذکر است ابعاد متوسط سلول‌ها نیز با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و توسط نرم‌افزار پردازش تصویر microstructure measurement تعیین شدند (شکل (۷)).



شکل ۷: بررسی اندازه سلول فوم PS

در شکل (۶) مشاهده می‌شود تعداد حفره‌های موجود در طول خط مقایسه تقریباً برابر ۱۰ حفره است که این به معنای طول مناسب سلول‌های فوم تولیدی است. اندازه نشان‌داده‌شده انتخابی در شکل (۷) ( $5.6\mu$ ) نیز

بررسی پدیده فوم میکروسلولی بر روی این ماده انجام گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱. با کنترل دمای فوم‌شدگی و زمان فوم‌شدگی می‌توان به محدوده وسیعی از چگالی نسبی با خواص مکانیکی مطلوب دست یافت.

۲. فشار ۷۰ بار، دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰۰ ثانیه شرایط بهینه برای تولید فوم میکروسلولی ساده PS است.

۳. استحکام کششی فوم میکروسلولی تولیدی نسبت به پلیمر فوم‌نشده به مراتب پایین‌تر است، اما در قیاس با پلیمر معمولی نتایج رضایت‌بخش است.

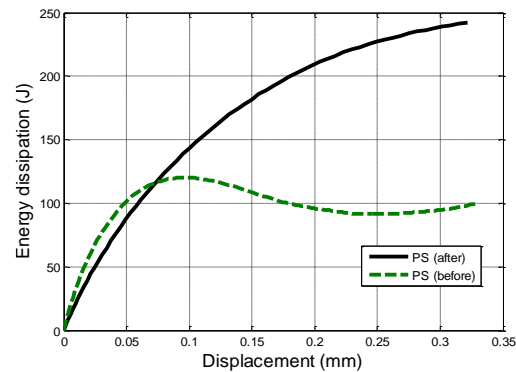
۴. استحکام به ضربه فوم‌های پلیمری و جذب انرژی آن به مراتب بالاتر از فوم‌های سنتی رایج و پلیمر فوم‌نشده است.

۵. ابعاد حباب‌های فوم‌های تولیدی، به شدت تحت تأثیر دما و زمان فوم‌شدگی است.

۶. محوشدن سلول‌ها (که می‌تواند عمدتاً به دلیل فرار گاز از درون قطعه به فضای محیط باشد) می‌تواند تعداد سلول‌ها را کاهش داده، در عین حال چگالی قطعه فوم‌شده را افزایش دهد.

۷. با افزایش دما، میزان کاهش چگالی قابل توجه است ولی با افزایش بیش از حد دما و زمان، چگالی افزایش می‌یابد. همین پدیده برای تعداد سلول‌ها است.

سطح زیر منحنی تنش-کرنش افزایش یافته، انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها در آزمایش ضربه مطابق شکل (۹) افزایش می‌یابد. درصد افزایش جذب انرژی برای فوم PS نسبت به پلیمر اولیه ۵۸ درصد است. همچنین حفره‌های میکرونی سبب کندشدن ترک ایجادشده در پلیمر شده، جلوی رشد ترک را می‌گیرد.



شکل ۹: مقایسه میزان جذب انرژی پلیمر PS و فوم PS

## ۷- نتیجه‌گیری

بررسی ساختاری و مکانیکی بر روی نمونه‌های فوم‌شده میکروسلولی PS به روش توده‌ای انجام گرفت. با توجه به اثر قابل توجه ساختار سلولی بر خواص نهایی محصول، اندازه سلول‌های ایجاد شده حائز اهمیت هستند. با عنایت به کاربرد گسترده PS در صنایع مختلف، به‌ویژه خودروبی،

## ۸- مراجع

- [1] Martini, J.E., "The production and Analysis of Microcellular Form", Ph.D. thesis in Mechanical Engineering, MIT, January 1981.
- [2] Park, C.B., Baldwin, D.F. and Suh, N.P., SME, "Cellular and Microcellular Materials", MD-Vol. 53, 1994, PP. 109-124, 1994.
- [3] Kumar, V. and Suh, N.P., "SPE ANTEC Tech", Papers, Vol.39, 1993, pp.715-718.
- [4] Cole, T.J., "Manufacturability of Microcellular Foamed Plastics", Ph.D. thesis in Mechanical Engineering, MIT, Juan 1991.
- [5] Hyde, L.J., Kishbaugh, L.A. (Trexel Inc.), Katterman, J.A. (Delphi Automotive Systems Corp.), SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan, Martini, 2002.
- [6] Martini, J.E., Waldman, F.A. and Suh, N.P., ANTEC, 82,28674.
- [7] Colton, J.S. and Suh, N.P., Pplym. Eng. And Sci., Mid-Apr., Vol 27, No.7, 1987, pp. 485-499.
- [8] Park, C.B., Behraves, A.H., Jaani, S. and Venter, R.D., "Recent Advances in Polymeric Foam", Chapter 8, Khemani, K., ed., ACS, Washington, 1996, pp. 115-129.
- [9] Behraves, A.H., Park, C.B., and Venter R.D., "Challenge to Production of low-Density, Fine cell HDPE Foams using CO<sub>2</sub>", Cellular Polymers. Vol.17, No.5, 1998, pp.309-326.
- [10] Kumar, V., Nedella, K.V., Handbook of Polymer Foams, Chapter 11, RAPRA Technology, UK 2004.
- [11] Crank, J. and Park, G.S., Diffusion in Polymers Academic Press Inc., Newyork. N.Y, 1968.
- [12] Van krevelen, D.w., Properties of Polymers, Elsevier Scientific Publishers Company, 1990.

- [13] Hwang, Y.D., cha, S.W., polymer testing 21, 2002, pp269-275.
- [14] Matuana, L., park, C.B., Balatinez, j.j., polymer Eng. And Science, vol.37, no. 7, july 1997, pp. 1137-1147.
- [15] Kumar, V., Weller, j., Murray, R., Microcellular foams, ANTEC 95, pp. 2202-2207