

بررسی استحکام فشاری و شکل شناسی اسفنجهای سخت پلی یورتانی

The Study of Compression Strength and Morphology of Rigid Polyurethane Foams

میراسد میرزا پور، محمدحسین بهشتی*، مهدی وفائیان

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه کامپوزیت و چسب، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵
دریافت: ۸۵/۳/۱۶، پذیرش: ۸۵/۷/۱۱

چکیده

خواص فیزیکی - مکانیکی اسفنجهای پلی یورتانی سخت تا حد زیادی به شرایط فرایند تهیه آنها بستگی دارد. بسته به شرایط فرایند ساخت، استحکام فشاری و شکل شناسی سلولهای تشکیل شده در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج یا جهت عمود بر آن کاملاً متفاوت است. در این پژوهش، استحکام فشاری و شکل شناسی سلولی اسفنجهای پلی یورتانی سخت تهیه شده از ۴-دی فنیل متان دی ایزوسیانات و پلی ال پلی استری بررسی شده است. در شرایط فرایندی مختلف و با استفاده از قالب فلزی بسته به ارتفاع ۲۰ cm، قالب کاغذی بسته به ارتفاع ۵۰ cm و قالب کاغذی باز به ارتفاع ۵۰ cm نمونه های آزمون اسفنجی با گستره چگالی ۷۵ تا 200 kg/m^3 تهیه شدند، استحکام فشاری و شکل شناسی اسفنجها به کمک میکروسکوپ الکترون پویشی بررسی شد. نتایج نشان می دهد که استحکام فشاری و شکل شناسی سلولی اسفنجهای تشکیل شده در جهات موازی و عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج در قالبهای بسته و قالبهای با ارتفاع کم تفاوت چندانی با هم ندارند. در حالی که استحکام و مدول فشاری اسفنجهای تهیه شده در قالب باز و با ارتفاع زیاد، در جهت موازی بسیار بیشتر از جهت عمود بر آن است و اسفنج خواص ناهمسان دارد.

واژه های کلیدی

پلی یورتان سخت، اسفنج، شکل شناسی
استحکام فشاری، چگالی

مقدمه

به روش شیمیایی نیز انجام می شود. برخی از مواد شیمیایی با عوامل تولیدکننده گاز واکنش می کنند و حبابهای گاز تولید می شود. یکی از عوامل پف زای شیمیایی که از آن بسیار زیاد استفاده می شود، آب است که با دی ایزوسیانات واکنش داده و کربن دیوکسید تولید می کند. فرایند اسفنجی

اسفنجهای پلی یورتانی از واکنش دی ایزوسیاناتها و پلی الها تشکیل می شوند. این واکنش گرمازاست، گرمای حاصل از واکنش بر تشکیل ساختار سلولی اثر می گذارد. این واکنش با تبخیر عوامل پف زای فیزیکی مثل کلروفلوروئورکر بنها یا هیدروکلروفلوروئورکر بنها انجام می شود. پف زایی

Key Words

rigid polyurethane, foam, morphology
compression strength, density

* مؤلف مسئول مکاتبات، پیام نگار: m.beheshty@ippi.ac.ir

تجربی

مواد

در این پژوهش، از دی ایزوسیانات و پلی ال ۶۱۰W شرکت System Urethan استفاده شد. با توجه به بررسی انجام شده این مواد شامل ۴،۴- دی فیل متان دی ایزوسیانات و پلی ال پلی استری است. نسبت اختلاط این دو ماده براساس برگه مشخصات سازنده به نسبت ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی ایزوسیانات به پلی ال است. پس از توزین، دو ماده به مدت ۵۰ s به کمک مخلوطکن با سرعت ۱۵۰۰rpm مخلوط شدند. زمان کرمی شدن این مواد ۶۵-۵۵ و زمان ژل شدن آنها ۱۴۰-۱۲۰ است.

دستگاهها و روشها

به منظور انجام آزمونهای فشاری از دستگاه Instron مدل ۶۰۲۵ استفاده شد. از اسفنجهای ساخته شده، نمونه هایی به ابعاد $20 \times 13 \times 6/5$ mm در جهات موازی و عمود برجهت بالا آمدن اسفنج برش داده شد. سپس، استحکام و مدول فشاری آنها اندازه گیری شد. آزمون فشاری طبق استاندارد ISO ۸۴۴-۱۹۷۸ انجام شد. سرعت کشش در این آزمونها ۵ mm/min بوده است.

شکل شناسی نمونه های اسفنج پلی یورتانی به وسیله میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) مدل S ۳۶۰ ساخت شرکت Cambridge Instruments انگلستان بررسی شد. نمونه ها در دمای محیط برش داده شدند، سپس روی آنها با لایه ای نازک از طلا پوشش داده شد. ولتاژ دستگاه ۲۰ kV تنظیم شد. برای مخلوط کردن دو جزء پلی ال و پلی ایزوسیانات از همزن مکانیکی Heidolph مدل ۲۱۰۲ ساخت کشور آلمان استفاده شد.

برای تهیه اسفنجهای پلی یورتانی، قالبی فلزی به ابعاد $30 \times 20 \times 1$ cm و قالب کاغذی استوانه ای به قطر ۱۲ cm و ارتفاع ۵۰ cm بکار گرفته شد. برای تزریق مخلوط اجزای سازنده اسفنج به داخل قالب فلزی، در وسط لبه کناری آن روزنه ای کوچک به قطر ۳ mm ایجاد شد، مواد پس از اختلاط به کمک سرنگ با حجم ۶۰ mL تزریق شدند.

از قالبهای کاغذی با ارتفاع ۵۰ cm و قطر ۱۲ cm برای تهیه نمونه هایی با ارتفاع زیاد استفاده شد. برای بررسی خواص فشاری اسفنجهای تهیه شده در قالب ۵۰ cm از سه نمونه اسفنج با سه چگالی مختلف استفاده شد. بدین ترتیب، با اختلاط اجزای سازنده در دمای محیط، وزنها مشخصی از اسفنجهای پلی یورتانی (۶۰، ۹۰ و ۱۲۰g) تهیه و پس از اختلاط، به قالبهای کاغذی منتقل شدند و در قالب برای مدت زمان نسبتاً طولانی بسته نگه داشته شد. در این حالت، فشار خاصی روی

شدن رامی توان به وسیله هسته زایی و رشد هسته های تولید شده توضیح داد [۴-۱]. اسفنجهای پلی یورتانی معمولاً به دو گروه انعطاف پذیر و سخت دسته بندی می شوند، اگر چه مرز مشخصی بین این دو گروه وجود ندارد. شیمی هر دو گروه اساساً یکسان است، اما خواص فیزیکی و مکانیکی و همچنین کاربردهای آنها با یکدیگر بسیار متفاوت است. تفاوتها به این دلیل است که اسفنجهای انعطاف پذیر از زنجیرهای با وزن مولکولی بزرگتر و خطی تر تشکیل شده اند. این امر باعث می شود تا دمای انتقال شیشه ای اسفنجهای انعطاف پذیر کمتر از دمای محیط باشد، در حالی که این دما برای اسفنجهای سخت بیشتر از دمای محیط است. عامل دیگری که باعث ایجاد تفاوت بین این دو گروه اسفنج می شود، سلول باز بودن انواع انعطاف پذیر در مقایسه با اسفنجهای سخت سلول بسته است.

تفاوت در خواص اسفنجهای پلی یورتانی به تفاوت در کاربردهای آنها منجر می شود. انعطاف پذیری و قابلیت جذب انرژی زیاد در پلی یورتانهای انعطاف پذیر به کاربرد آنها به عنوان مواد تشکی انجامیده است [۲،۱]. اسفنجهای نرم پلی یورتانی علاوه بر مصارف فراوان خانگی کاربردهای ویژه ای نیز دارند. به عنوان مثال انواع اسفنج با اندازه سلولی بزرگ در ساخت صافیهای سرامیکی مصرف می شوند [۵].

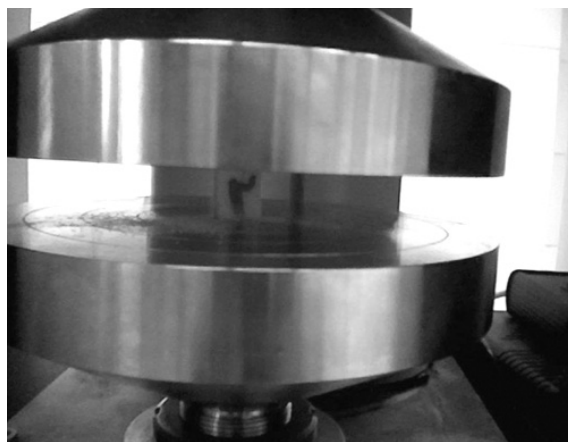
کاربردهای اسفنجهای پلی یورتانی سخت به شکنندگی یا چقرمگی آنها بستگی دارد. به طور کلی، اسفنجهای شکننده به عنوان عایقهای گرمایی و انواع چقرمه به عنوان مواد ساختاری به ویژه در صنایع مبلمان و ساختمان سازی بکار می روند. ساختار نهایی و خواص اسفنجهای پلی یورتانی سخت به معماری مولکولی پلیمر بکار رفته و شرایط فرایند ساخت آن بستگی دارد [۶]. اسفنجهای ساختاری به دلیل بهینه بودن از نظر وزن و خواص مکانیکی کاربردهای ویژه ای یافته اند [۷].

باتوجه به نوع کاربردهای مختلف اسفنجهای سخت، خواص مکانیکی فشاری، به ویژه مدول فشاری و تنش تسلیم فشاری اهمیت زیادی دارد. از طرفی خواص مکانیکی اسفنجهای سخت، ناهمسان (anisotropic) و تابع جهت اندازه گیری است. بنابراین ضرورت دارد که خواص اندازه گیری شده در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج و جهت عمود بر آن به دقت بررسی شود [۹-۸].

باتوجه به کاربردهای متنوع اسفنجهای سخت پلی یورتانی، در این کار پژوهشی استحکام و مدول فشاری نوعی از این اسفنج در دو جهت عمود و موازی با جهت بالا آمدن اسفنج، شکل شناسی سلولها و اثر چگالی اسفنج، همچنین نوع قالب و اثر آن بر آرایش سلولها و خواص اسفنج مطالعه شده است.

جدول ۱ نتایج آزمون فشاری اسفنج پلی‌یورتانی در جهت‌های عمود و موازی با جهت بالا آمدن اسفنج.

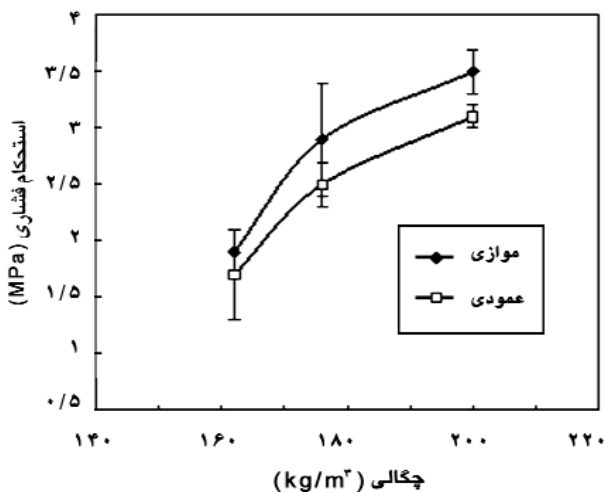
قطعه	چگالی (kg/m ³)	مدول فشاری (MPa)		استحکام فشاری (MPa)	
		جهت موازی	جهت عمود	جهت موازی	جهت عمود
۱	۱۶۲	۵۶	۵۸	۱/۷	۱/۹
۲	۱۷۶	۹۰	۸۲	۲/۵	۲/۹
۳	۲۰۰	۱۰۳	۱۰۰	۳/۱	۳/۵



شکل ۱ آزمون فشاری نمونه اسفنجی.

$$(1) \quad B^3 (\text{چگالی}) = A = \text{استحکام یا مدول}$$

در این معادله ثابت A با دما و خواص فیزیکی رزین و توان B با ساز و کار تغییر شکل مواد سلولی مرتبط است. برای توان B اعداد بین ۱ تا ۲ گزارش شده است [۸،۹]. در حالت اعمال معادله (۱) به نتایج شکل ۱، توان B برای هر دو جهت برابر و معادل ۲/۷ بدست می‌آید. نکته قابل توجه برابر بودن ثابت A و توان B برای هر دو جهت بالا آمدن اسفنج است. با رسم تغییرات مدول بر حسب چگالی، مشاهده می‌شود که تغییرات آن دقیقاً مشابه تغییرات استحکام است و توان B برای آنها نیز یکسان است. نتایج نشان می‌دهد که استحکام فشاری در جهت موازی بیش از جهت عمود است. استحکام در جهت موازی در حداکثر مقدار تقریباً ۱۳ درصد بیشتر از جهت عمود است. در حالی که نتایج سایر پژوهشگران [۱۰،۱۱]



شکل ۲ تغییر استحکام فشاری اسفنج پلی‌یورتانی بر حسب چگالی در جهت‌های موازی و عمود با جهت بالا آمدن اسفنج.

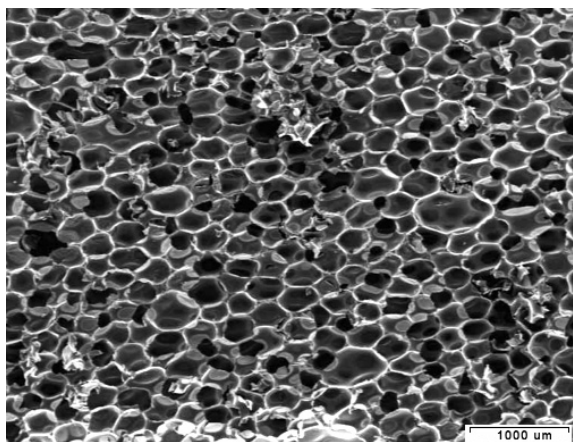
قالب اعمال نشده، فقط درب قالب بسته شد تا موادی از آن خارج نشود. به همین ترتیب نمونه‌های با قالب درب باز نیز تهیه شد. نمونه‌ها بعد از قالبگیری به مدت یک هفته در دمای محیط باقی ماندند، سپس از آنها نمونه‌های آزمون تهیه شد. در شکل ۱ نحوه اجرای آزمون فشاری نمونه‌های اسفنجی تهیه شده بعد از یک هفته نشان داده شده است. استحکام و مدول فشاری ذکر شده متوسط حداقل پنج اندازه‌گیری است.

نتایج و بحث

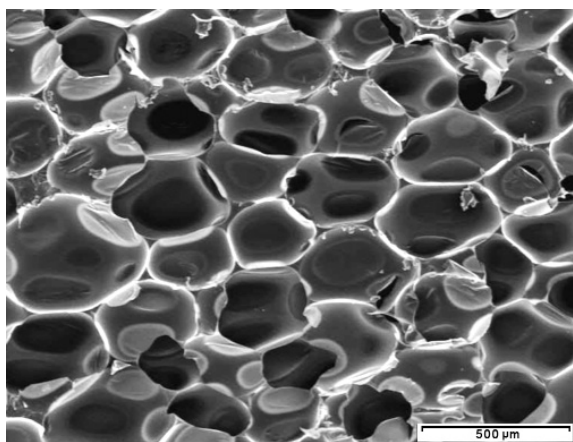
قالب فلزی بسته

خواص مکانیکی

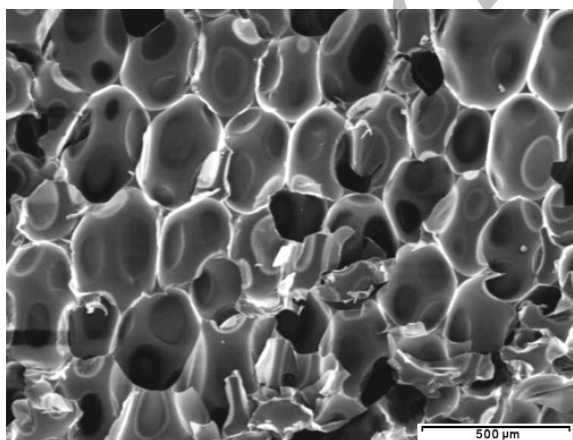
نتایج خواص خمشی نمونه اسفنج‌های سخت تهیه شده با چگالی‌های مختلف در دو جهت موازی و عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج در جدول ۱ آمده است. این جدول نشان می‌دهد که با افزایش چگالی اسفنج، مدول و استحکام فشاری افزایش می‌یابد. برای درک بهتر، تغییرات استحکام فشاری بر حسب چگالی اسفنج برای نمونه‌های تهیه شده در جهت موازی و عمود بر جهت پف کردن مواد به ترتیب در شکل ۲ به همراه انحراف معیار نتایج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام فشاری نمونه‌ها با افزایش چگالی افزایش می‌یابد، اما این افزایش به طور خطی نیست. خواص مکانیکی مواد سلولی اساساً به چگالی آنها بستگی دارد. از یک معادله توانی ساده می‌توان استفاده کرد تا رابطه بین خواص مکانیکی مانند استحکام و مدول با چگالی پیش بینی شود.



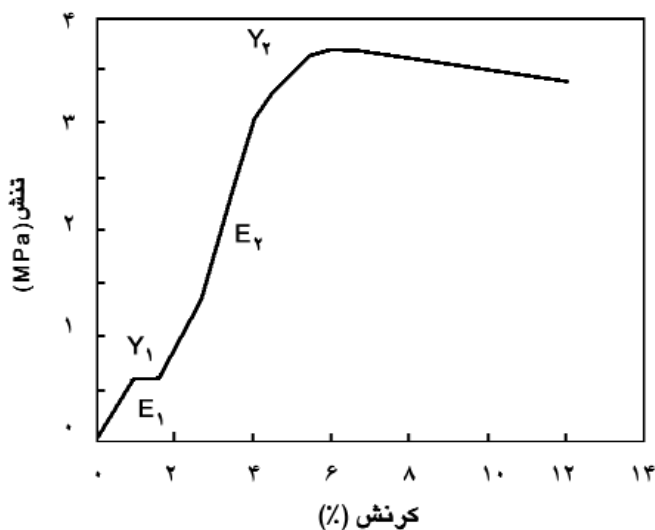
شکل ۴ تصویر SEM اسفنج ۱ (چگالی 162 kg/m^3) در جهت عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۲۰).



شکل ۵ تصویر SEM اسفنج ۱ (چگالی 162 kg/m^3) در جهت عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).

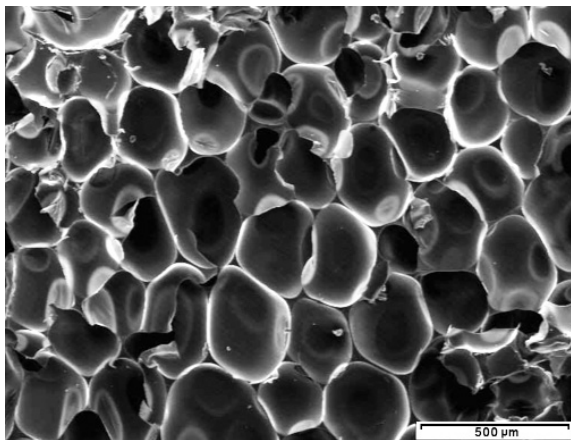


شکل ۶ تصویر SEM اسفنج ۱ (چگالی 162 kg/m^3) در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).

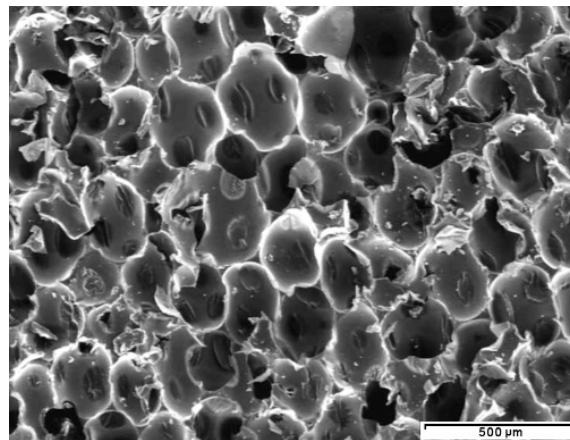


شکل ۳ نمودار تنش - کرنش اسفنج سخت پلی یورتانی تحت فشار.

نشان می دهد که استحکام فشاری اسفنجهای پلی یورتانی در جهت موازی تقریباً دو برابر جهت عمود است. افزایش استحکام فشاری در جهت موازی با بالا آمدن اسفنج ناشی از جهت گیری زنجیر مولکولهای پلیمری و سلولهای تشکیل شده در جهت موازی است. این ساختار آرایش یافته سبب می شود که اسفنج همانند شبکه ای مستحکم نیروهای فشاری بیشتری را تحمل کند. مطابق نتایج جدول ۱ اختلاف مقدار جهت گیری سلولها دقیقاً در جهت های موازی و عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج چندان زیاد نیست. دلیل این امر آن است که در قالب بسته، اسفنج بعد از رسیدن به لبه های قالب، چون هنوز در حال بالا آمدن است، در تمام جهتها به حرکت ادامه می دهد و بر جهت یابی سلولها اثر می گذارد. منحنیهای تنش - کرنش فشاری تمام نمونه های ۱ تا ۳ تهیه شده با چگالیهای مختلف مشابه شکل ۳ است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود در منحنی تنش - کرنش فشاری دو نقطه تسلیم (Y_1 , Y_2) وجود دارد. اولین نقطه تسلیم (Y_1) را می توان به سلولهای ضعیف تر موجود در نمونه ربط داد. دومین نقطه تسلیم (Y_2) به آغاز شکست ماکروسکوپی کل نمونه تحت فشار مربوط می شود. مدولهای E_1 و E_2 تقریباً با هم برابراند، ولی به هر حال E_2 به مقدار خیلی کمی از E_1 بزرگتر است. E_3 مدول در طول مدت زمان تغییر شکل نمونه است و اغلب به عنوان مدول نمونه در نظر گرفته می شود. در بررسی منحنیهای تنش - کرنش فشاری اسفنجهای پلی یورتانی باید در نظر داشت که بیش از ۹۵ درصد سلولها بسته هستند [۸، ۹]. اسفنجهای مورد بررسی در این پژوهش نیز همان طور که در بخش بعدی مشاهده خواهد شد، تقریباً چنین ساختاری دارند.



شکل ۸ تصویر SEM اسفنج ۲ (چگالی 176 kg/m^3) در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).



شکل ۷ تصویر SEM اسفنج ۲ (چگالی 176 kg/m^3) در جهت عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).

شکل‌شناسی سلولها

به دلیل کم بودن ارتفاع قالب، سلولها فرصت کافی برای جهت‌گیری مناسب ندارند. دومین دلیل ممکن است به بسته بودن قالب مربوط باشد، چرا که اسفنج در حال بالا آمدن نیروی زیادی به اطراف وارد می‌کند، وقتی به لبه‌های قالب می‌رسد با نیرویی که به لبه‌ها وارد می‌کند در جهت‌های مختلف شروع به حرکت خواهد کرد. این امر باعث می‌شود که زنجیرهای پلیمری و سلولهای تشکیل شده جهت‌گیری کاملاً مشخصی نداشته باشند.

بررسی اثر ارتفاع قالب

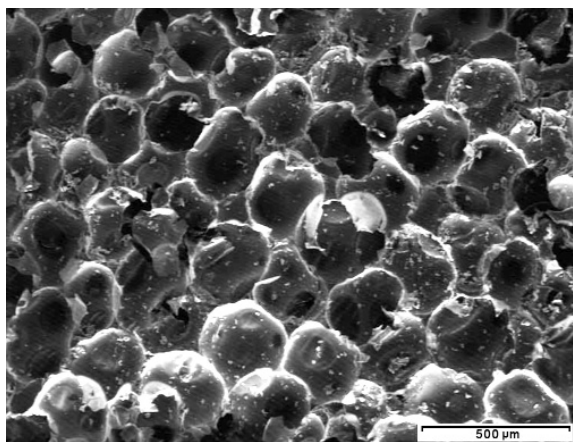
در بخش قبلی عنوان شد که دلیل عدم جهت‌گیری سلولها در اسفنج‌های مورد مطالعه ۱ تا ۳، کم بودن ارتفاع قالب است. بدین دلیل از قالبی استوانه‌ای با ارتفاع زیاد (۵۰ cm) استفاده شد، تا اثر این عامل نیز بررسی شود. نمونه اسفنج‌های ۴ تا ۶ با استفاده از این قالب تهیه شدند. در ضمن، پس از قالب‌گیری درب قالب بسته شد تا از پف کردن آزاد نمونه‌ها ممانعت شود.

در شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) نمونه برش داده شده از قطعه اسفنجی ۱ در جهت عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج با بزرگنمایی ۲۰ و در شکل ۵ تصویر SEM همین نمونه با بزرگنمایی ۶۰ نشان داده شده است.

تصویر SEM نمونه برش داده شده اسفنج ۱ در جهت موازی با بالا آمدن اسفنج در شکل ۶ نشان داده شده است. این تصاویر برای اسفنج ۲ در شکلهای ۷ و ۸ با بزرگنمایی ۶۰ نشان داده شده است. اندازه، شکل و ظاهر سلولها در جهات موازی و عمودی تقریباً با هم یکسان است، با این تفاوت که جهت‌گیری سلولها در حالت موازی بهتر از حالت عمودی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی، اندازه سلولها کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده از آزمونهای خمشی و تصاویر SEM را می‌توان از دو دیدگاه بررسی کرد. اولین مورد به ابعاد داخلی قالب (۳۰×۲۰×۱ cm) به ویژه ارتفاع آن (۲۰cm) مربوط می‌شود.

جدول ۲ نتایج آزمون فشاری اسفنج‌های پلی‌یورتانی تهیه شده در قالب با ارتفاع ۵۰ cm در جهت عمودی و موازی با جهت بالا آمدن اسفنج (اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار داده‌ها را نشان می‌دهند).

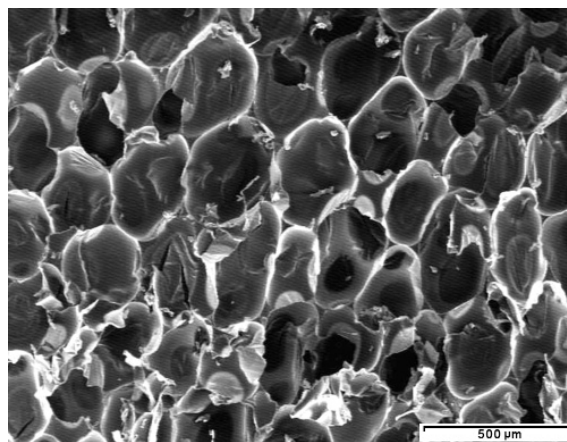
استحکام فشاری (MPa)		مدول فشاری (MPa)		چگالی (kg/m ³)	قطعه
جهت موازی	جهت عمود	جهت موازی	جهت عمود		
۱/۳ (۰/۱)	۱/۰ (۰/۲)	۳۲ (۴)	۲۱ (۵)	۱۰۵ (۳)	۴ (۶۰g)
۱/۵ (۰/۱)	۱/۴ (۰/۱)	۳۷ (۵)	۳۳ (۴)	۱۳۵ (۲)	۵ (۹۰g)
۲/۷ (۰/۱)	۲/۶ (۴)	۶۷ (۶)	۶۲ (۹)	۱۸۰ (۵)	۶ (۱۲۰g)



شکل ۱۱ تصویر SEM اسفنج ۵ (چگالی 5 kg/m^3) در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).

شکلهای ۹ تا ۱۲ آمده است. تصاویر بدست آمده در جهت موازی و عمود نمونه ۴ (شکلهای ۹ و ۱۰) نشان می دهد که سلولها در جهت موازی اندکی جهت یافته هستند، ولی در جهت عمودی کاملاً فاقد جهت گیری اند. تصاویر میکروسکوپی بدست آمده برای اسفنجهای ۵ و ۶ مشابه هم هستند. بنابراین، فقط این تصاویر برای اسفنج ۵ در شکلهای ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. این شکلهای نشان می دهند که جهت گیری سلولها در جهات موازی و عمودی نامعین است. شاید به همین دلیل است که استحکام و مدول فشاری اسفنج ۴ در جهات موازی و عمودی تفاوت بیشتری نسبت به اسفنجهای ۵ و ۶ دارد.

به طور کلی تصاویر SEM این نمونه ها نشان می دهد که جهت گیری سلولها در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج حتی کمتر از



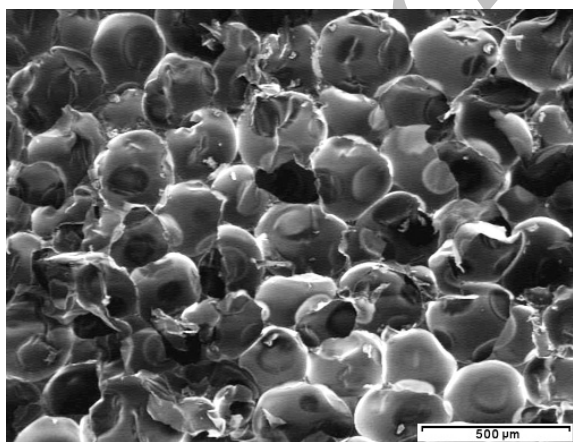
شکل ۹ تصویر SEM اسفنج ۴ (چگالی 4 kg/m^3) در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).

خواص مکانیکی

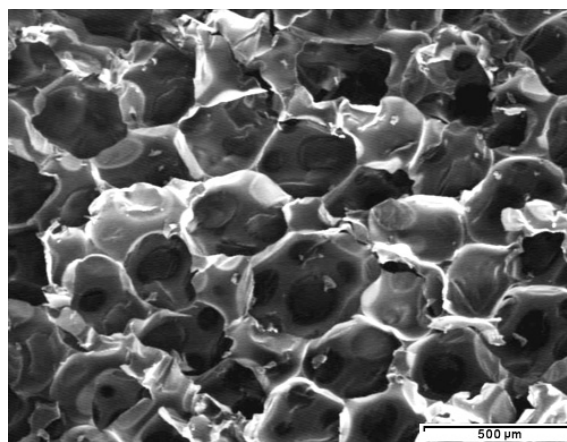
نتایج خواص فشاری اسفنجهای ساخته شده در قالب با ارتفاع زیاد در جهت عمودی و موازی در جدول ۲ آمده است. همان طور که مشاهده می شود در این نمونه ها نیز همچون قالب با ارتفاع کم، مدول و استحکام فشاری با چگال تر شدن نمونه ها افزایش می یابد. به عنوان مثال با افزایش چگالی از 105 kg/m^3 به 180 kg/m^3 استحکام فشاری در جهت موازی از $1/3$ به $2/7 \text{ MPa}$ افزایش می یابد. از طرفی، در این نمونه ها نیز استحکام فشاری در جهت موازی تفاوت خیلی کمی با جهت عمودی دارد.

شکل شناسی سلولها

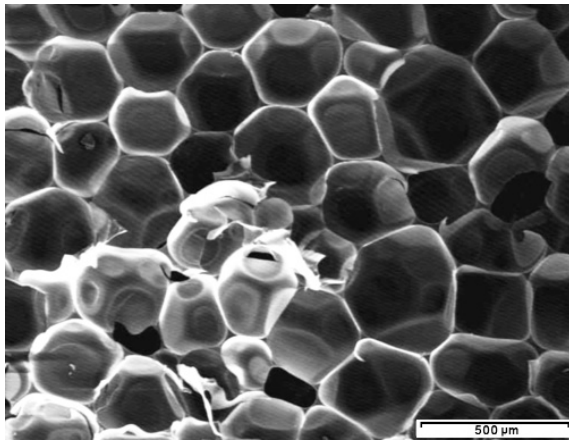
تصاویر میکروسکوپ الکترون پویشی اسفنجهای ۴ و ۵ به ترتیب در



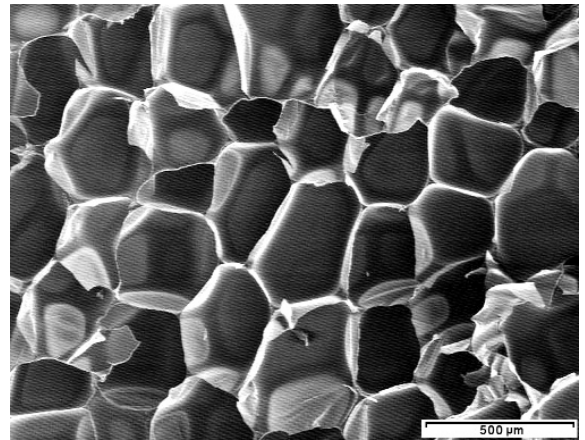
شکل ۱۲ تصویر SEM اسفنج ۵ (چگالی 5 kg/m^3) در جهت عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).



شکل ۱۰ تصویر SEM اسفنج ۴ (چگالی 4 kg/m^3) در جهت عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).



شکل ۱۴ تصویر SEM اسفنج ۷ (چگالی 75 kg/m^3) در جهت عمود بر جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).



شکل ۱۳ تصویر SEM اسفنج ۷ (چگالی 75 kg/m^3) در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج (بزرگنمایی ۶۰).

خواص مکانیکی

نتایج آزمون فشاری اسفنج تهیه شده در حالت پف کردن آزاد، در جهت عمود و موازی با بالا آمدن اسفنج در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند استحکام و مدول فشاری این اسفنج در جهت موازی به ترتیب ۱۶۰ و ۲۷۲ درصد بیشتر از جهت عمود بر بالا آمدن اسفنج است. اگر چه چگالی اسفنج ۷ (75 kg/m^3) به مراتب از چگالی اسفنج ۴ (105 kg/m^3) کمتر است، اما از مدول برابر با آن در جهت موازی برخوردار است. در ضمن باید توجه داشت از آنجا که اسفنج مزبور خواص ناهمسان دارد، هنگام استفاده از این روش برای تولید قطعات صنعتی باید جهت اعمال نیروها با جهت پف کردن اسفنج تطابق داشته باشد.

شکل‌شناسی سلولها

تصاویر SEM اسفنج ۷ در جهات موازی و عمود در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آمده است. این تصاویر نشان می‌دهند که سلولها در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج جهت‌گیری کرده‌اند. این پدیده تأییدکننده نتایج بدست آمده برای خواص فشاری این اسفنج است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اسفنج پلی‌یورتانی سخت، وقتی به حالت آزاد و در قالب‌های باز تهیه شود، استحکام و مدول فشاری آن در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج خیلی بیشتر از جهت عمود بر آن

جهت‌گیری سلولها در اسفنج‌های تهیه شده در قالب فلزی بسته است. در قالب فلزی ضخامت نمونه‌ها ۱۰ cm بوده، اما در قالب کاغذی قطر قالب استوانه‌ای ۱۲۰ cm بوده است. به نظر می‌رسد که نه فقط ارتفاع قالب بلکه نسبت ارتفاع به ضخامت (یا قطر) نیز حائز اهمیت است، همین امر روی جهت‌گیری سلولها اثر می‌گذارد.

بررسی اثر پف کردن آزاد

در بخش‌های قبلی عنوان شد که دلیل دیگر برابری تقریبی خواص خمشی اسفنج پلی‌یورتانی در دو جهت موازی و عمود بر جهت پف کردن اسفنج، بسته بودن قالب است. به عبارت دیگر مواد نمی‌توانند به شکل آزاد پف کرده (free rise) و سلولها جهت‌گیری کنند. بدین منظور، ۱۲۰ g مواد اولیه اسفنج آماده به داخل قالب استوانه‌ای با ارتفاع ۵۰ cm منتقل و اجازه داده شد تا مواد به طور آزاد پف کنند. بیش از یک سوم اسفنج از قالب خارج شد. از اسفنج بدست آمده نمونه‌هایی برای آزمون فشاری تهیه و شکل‌شناسی سلولها نیز به وسیله SEM بررسی شد.

جدول ۳ نتایج آزمون فشاری اسفنج پلی‌یورتانی تهیه شده در جهت عمود و موازی با جهت بالا آمدن اسفنج (اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار داده‌ها را نشان می‌دهند).

قطعه	چگالی (kg/m^3)	مدول فشاری (MPa)		استحکام فشاری (MPa)	
		جهت عمود	جهت موازی	جهت عمود	جهت موازی
۷ (۱۲۰g)	۷۵ (۲)	۸/۶ (۲)	۳۲ (۵)	۰/۲۷ (۰/۱)	۰/۷ (۰/۲)

پلیمری و سلولها در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج جهت گیری نمی کنند. به همین دلیل، استحکام و مدول فشاری اسفنج پلی یورتانی تهیه شده در قالبهای بسته در جهات موازی و عمودی تقریباً یکسان است و خواص مکانیکی همسان دارند.

است. به عبارت دیگر، خواص مکانیکی ناهمسان دارد. دلیل این پدیده امکان جهت گیری زنجیرهای پلیمری و سلولهای بوجود آمده در جهت موازی با جهت بالا آمدن اسفنج است. اما، برای اسفنجهای ساخته شده در قالب فلزی بسته، به دلیل ارتفاع کم و نیز بسته بودن قالب، زنجیرهای

مراجع

1. Wood G., *The ICI Polyurethanes Book*, John Wiley and Sons, New York, Chap. 7, 1990.
2. Oertel G., *Polyurethane Handbook*, Hanser, New York, Chap. 3, 1985.
3. Klemptner D. and Frisch K.C., *Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology*, Hanser, New York, Chap. 5, 1991.
4. Gibson L.H. and Asbby M.F., *Cellular Solid-structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University, Chap. 1, 1997.
5. Barmar M. and Barikani M., Preparation of Flexible Polyurethane of Large Cell Foam, *Iran. Polym. J. Sci. Technol.*, **15**, 295-299, 2003.
6. Barikani M., *Rigid Polyurethane Foam*, Iran Polymer Society, Tehran, 2005.
7. Akbarian M. and Beheshty M.H., *Structural Foams*, Iran. *Polym. J. Sci. Technol.*, **5**, 30-40, 1992.
8. Jung H.C. and Ryu C.S., Properties of Rigid Polyurethane Foams Blown by HCFC 141B and Distilled Water, *J. Appl. Polym. Sci.*, **81**, 486-493, 2001.
9. Feng J. and Ling Y., Structures and Physical Properties of Rigid Polyurethane Foams Prepared with Rosin-based Polyol, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 598-604, 2002.
10. Swyngedau S., Nussinovich A. and Pleleg M., Models for the Compressibility of Layered Polymeric Sponges, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 140-144, 1991.
11. Zhang Y., Heath R.Z., and Hourston D.J., Morphology, Mechanical Properties and Thermal Stability Polyurethane-epoxide Interpenetrating Polymer Network Rigid Foam, *J. Appl. Polym. Sci.*, **75**, 406- 416, 2000.