

بررسی تأثیر ساختار مولکولی الاستومرهای پلی‌یورتان گرمانرم بر خواص آکوستیکی و اتلاف صوت

علی یزدانی^۱، حبیب دانش منش^{۲*}، مجتبی زبرجد^۳

a.yazdani@shirazu.ac.ir

daneshma@shirazu.ac.ir

mojtabazabarjad@shirazu.ac.ir

^۱ دانشجوی دکتری، گروه متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز

^{۲*} نویسنده مسئول، استاد، گروه متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

^۳ گروه متالورژی، استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

چکیده

در این مقاله تأثیر نسبت استوکیومتری الاستومرهای ترموپلاستیکی پلی‌یورتان (TPUE) سنتز شده با مواد اولیه HDI، PTMG و BD در نسبت‌های مولی مختلف ۱-۴/۲-۳، ۱-۲-۱ و ۱-۲/۴-۳ بر خواص جذب صوت و اتلاف آن‌ها بررسی شده است. برای بررسی ساختار و خواص مواد سنتز شده، از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)، گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)، تفرق اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، وزن مخصوص و آنالیز مکانیکی دینامیکی (DMTA) استفاده شده است. بررسی‌های XRD و DSC نشان داد تغییر درصد فاز سخت از ۱۲ به ۳۳ سبب تغییر ساختار آمورف پلی‌یورتان به نیمه کریستال می‌شود. این تغییر ساختار سبب تغییر چگالی، مدول ذخیره و مدول اتلاف شده و فاکتور اتلاف را ۷۵ درصد کاهش و علاوه بر این، سرعت و ضریب جذب صوت در دمای محیط و فرکانس یک هرتز را ۲۰۰ درصد تغییر می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پلی‌یورتان، نسبت مولی، مدول اتلاف، سرعت صوت

۱. مقدمه

تماس با آب حفاظت می‌کنند ولی درعین حال اجازه می‌دهند انرژی آکوستیکی بدون انعکاس و اتلاف قابل ملاحظه‌ای از پلیمر عبور کند. پارامترهایی مثل نزدیکی چگالی و سرعت صوت این مواد با آب، اتلاف مکانیکی پایین، مدول ذخیره

از پلیمرها در ساختار بدنه بسیاری از هیدروفن و پروژکتورهای آکوستیکی استفاده می‌شود. این مواد، حسگر و قطعات الکترونیکی داخلی را از تخریب‌های فیزیکی و

آکوستیک زیر آب است [۱۹]. اگرچه گزارش‌های اندکی در تحقیقات درباره استفاده از مواد PTMG، HDI و BD در ساخت پلی‌یورتان وجود دارد [۲۰، ۲۱]، اما در هیچ یک از تحقیقات قبلی اثر نسبت مولی این مواد را بر خواص آکوستیکی و اتلاف صوت بررسی نشده است.

در این تحقیق TPUEs با مواد PTMG، HDI و BD در نسبت‌های مولی مختلف سنتز شده و تأثیر میزان HS بر ساختار و خواص آکوستیکی از جمله چگالی، سرعت و اتلاف صوت آن‌ها بررسی و ساختار شیمیایی و خواص آکوستیکی مواد سنتز شده با تست‌های FTIR، DSC، XRD، SEM، DMTA و چگالی سنجی استخراج شده است.

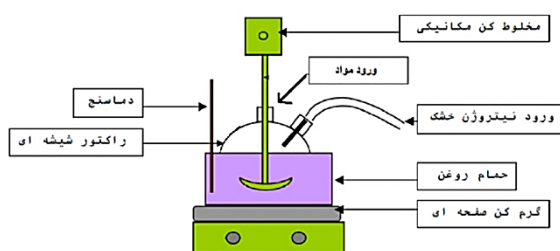
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد مصرفی

هگزامتیلن دی ایزوسیانات (HDI)، ۴-۱ بوتان دی‌ال (BD) و دی‌متیل فرم‌آمید (DMF) مورد استفاده در این مقاله همگی از شرکت مرک خریداری و پلی‌تترا متیلن گلاکول با وزن ۲۰۰۰ گرم بر مول (PTMG-2000) از شرکت پتروشیمی اراک تهیه شد. از هم‌زن مکانیکی (2000 rpm) و هم‌زن مغناطیسی برای هم‌گن کردن و از آن معمولی برای پخت استفاده شد.

۲-۲. سنتز الاستومر پلی‌یورتان ترموپلاست

در ابتدا پلی‌تترا متیلن گلاکول را به مدت ۲ ساعت در دمای 120°C در آن خلأ آب‌زدایی کردیم. سپس دمای آن را در یک بالون ۲۵۰ ml به 70°C کاهش دادیم، هگزامتیلن دی ایزوسیانات را به آن اضافه کردیم و محلول را تحت گاز نیتروژن به مدت ۱/۵ ساعت با هم‌زن مکانیکی هم زدیم. سپس ۱-۴ بوتان دی‌ال را به آن اضافه کرده و با دور زیاد به مدت ۱۵ دقیقه محلول هم زدیم (شکل ۱).



شکل ۱. شماتیک راکتور برای سنتز

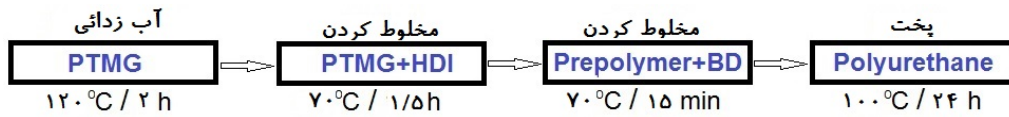
برشی پایین، ضریب پواسان نزدیک به ۰/۵ و نداشتن تغییر فاز پلیمری زیاد در دما و فرکانس کاری، سبب افزایش کارایی آکوستیکی این مواد می‌شوند [۱]. در این گروه، الاستومرهای پلی‌یورتان به دلیل خواص منحصربه‌فردی که دارند، در کاربردهای دریایی از جمله آب‌بندی ترانسدیوسر به میزان زیادی استفاده می‌شوند [۲، ۳]. تحقیقات نشان می‌دهد خواص آکوستیک الاستومرهای پلی‌یورتان تحت تأثیر ترکیب شیمیایی آن قرار دارد [۴] و می‌توان با تغییر نسبت مولی مواد مصرفی به خواص دلخواه رسید [۵، ۶].

الاستومرهای پلی‌یورتان یکی از ۶ گروه اصلی مواد سنتزی هستند که در دسته مواد پلیمری و بین لاستیک‌های عمومی و پلاستیک‌های سخت قرار می‌گیرند [۷]. الاستومرهای پلی‌یورتان ترموپلاستیک، یکی از گروه‌های مهم الاستومرهای پلی‌یورتان است. این مواد خواص فیزیکی و مکانیکی خوبی از جمله استحکام کششی بالا، مقاومت قابل قبول نسبت به سایش، سوخت و حلال، توانایی تحمل دما و چسبندگی خوب به زیر لایه‌ها را دارند [۸]. فاکتورهای مختلفی از جمله میزان جدایش فازها، نحوه توزیع فاز سخت، نوع گستراننده، ساختار شیمیایی فازهای سخت (HS) و نرم و تکنیک سنتز بر روی ساختار فازهای ایجاد شده و به تبع خواص فیزیکی و مکانیکی الاستومر پلی‌یورتان مؤثر است [۹-۱۳]. الاستومرهای پلی‌یورتان خواص الاستیسیته بالا و سختی‌های متفاوتی دارند که این ناشی از تغییرات فازهای سخت و نرم در ساختار آن‌ها است [۱۴]. با تغییر نسبت مولی NCO/OH، میزان جدایش بین فازهای سخت و نرم در پلیمر تغییر می‌کند که این سبب تغییر خواص آن می‌شود.

الاستومرهای TPU از پلی‌ال^۱ و دی‌ایزوسیانت‌های^۲ مختلف با نسبت مولی متفاوتی ساخته می‌شوند [۷-۱۲]. قسمت سخت از مواد ایزوسیانات از جمله هگزامتیلن دی ایزوسیانات^۳ (HDI) [۱۵] با اضافه شدن گستراننده از جمله بوتان دی‌ال (BD) ساخته شده و قسمت نرم شامل مواد پلی‌ال از جمله پلی‌تترا هیدرو فورن^۴ (PTMG-2000) است [۱۶-۱۸]. قابل ذکر است که یکی از کاربردهای الاستومرهای پلی‌یورتان با پایه PTMG که در این مقاله به آن‌ها پرداخته شده است، حوزه

پلی یورتان قالب از نمونه جدا شد (شکل ۲). با تغییر نسبت مولی مواد مصرفی، پلی یورتان‌های مختلفی سنتز شد (جدول ۱).

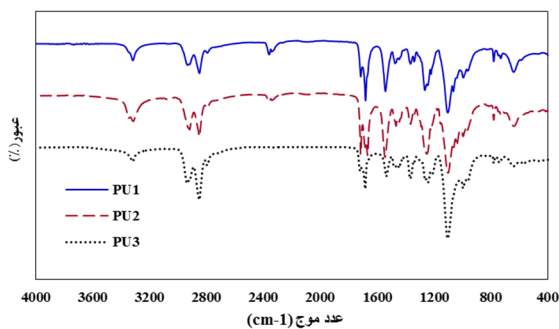
در انتها محلول به یک قالب شیشه‌ای که به جداکننده آغشته شده بود انتقال داده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه قرار دادیم. بعد از خشک شدن الاستومر ترموپلاست



شکل ۲. فرایند سنتز پلی یورتان

۱-۱/۱-۲، ۲-۳/۱-۲-۴ سنتز و با استفاده از آنالیز FTIR، ساختار شیمیایی مواد بررسی شده است (شکل ۳). طیف سنجی پلی یورتان‌ها شامل دو پیک مشخصه مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های N-H و کربونیل است. پیک جذبی N-H که در 3318 cm^{-1} به وجود آمده نشان‌دهنده پیوند هیدروژنی در گروه N-H است. در این نمونه‌های سنتزی، پیک گروه کربونیل در 1716 cm^{-1} ایجاد شده است که نشان‌دهنده شرکت پلی اتر و دی ایزوسیانات در واکنش است. محصول نهایی پلی یورتان (PU) خواهد بود.

در نمونه‌های سنتز شده یادشده، درصد وزنی قسمت‌های سخت بر اساس نسبت وزنی مواد اولیه مصرفی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. تغییر در ترکیب شیمیایی، سبب تغییر در ساختار مناطق سخت می‌شود [۱۹]. با افزایش میزان جزء سخت، کریستالیتی پلی یورتان افزایش می‌یابد و این سبب افزایش چگالی می‌شود [۲۲].



شکل ۳. طیف پلی یورتان‌های سنتز شده

۲-۳. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

مورفولوژی پلی یورتان تعیین کننده مشخصه‌های حرارتی و مکانیکی ماده است. برای بررسی مورفولوژی نمونه‌های شکسته شده (منظور از شکسته شده توضیح داده شود) از

جدول ۱. پلی یورتان‌های سنتز شده

شماره پلیمر	نسبت مولی PTMG/HDI/BD	درصد وزنی فاز سخت	چگالی (Kg/m ³)
PU1	۳-۴/۲-۱	۱۲	۱۰۰۵
PU2	۱-۱/۲-۱	۱۸	۱۰۱۶
PU3	۱-۴/۲-۳	۳۳	۱۰۲۸

۲-۳. ارزیابی خواص پلی یورتان‌های سنتز شده

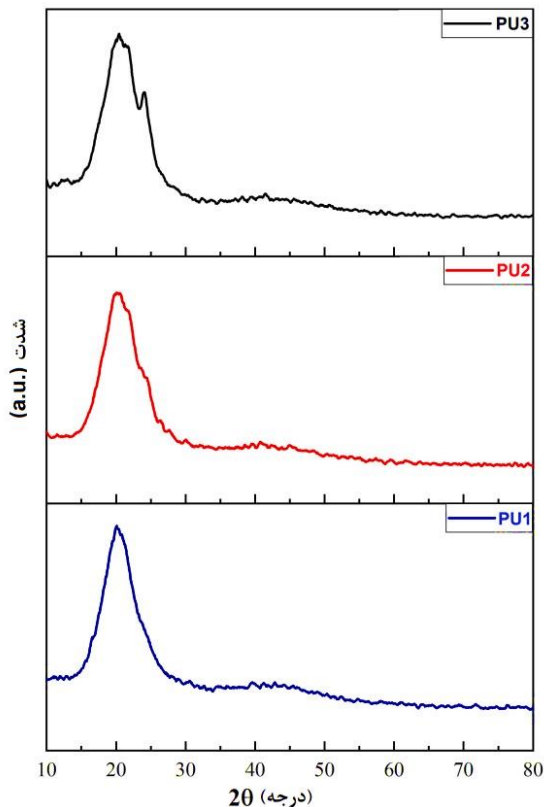
از دستگاه FTIR ساخت کمپانی بروکر آلمان مدل Tensor II در دامنه $4000-400\text{ cm}^{-1}$ برای شناسایی ساختار شیمیایی نمونه‌های سنتز شده استفاده شد. آنالیز پارامترهای حرارتی با دستگاه DSC مدل Mettler Toledo در محدوده دمای $20-320\text{ }^\circ\text{C}$ و با سرعت گرمادهی 10 C/min روی نمونه‌هایی به وزن تقریبی 10 mg انجام شد. آنالیز DMTA با دستگاه METTLER TOLEDO در فرکانس 1 Hz ، در محدوده دمایی $80-140\text{ }^\circ\text{C}$ با سرعت پویش 1 min^{-1} در $5\text{ }^\circ\text{C}$ در مد خمش انجام شد. در این آزمایش از نمونه‌های با ابعاد $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ استفاده شد. آزمون پراش اشعه ایکس با دستگاه شرکت بروکر آلمان مدل D8-ADVANCE در زوایای $2\theta = 10-80$ با سرعت 1 sec/step انجام شد. همچنین برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN-Vega3 استفاده شد.

۳. نتایج

۱-۳. سنتز و ساختار

در این پژوهش با استفاده از مواد اولیه PTMG، HDI و BD پلی یورتان‌های الاستومر با نسبت‌های مولی ۱-۴/۲-۳،

بیانگر جدایش فازهای سخت در زمینه است [۲۳]. در نمودار مربوط به نمونه PU1 که میزان فاز سخت ۱۲ درصد است، هیچ پیک شاخصی دیده نمی‌شود که این بیانگر آمورف بودن فازهای سخت و نرم در ساختار است. زمانی که درصد وزنی فاز سخت در حدود ۳۳ درصد است (نمونه PU3)، یک پیک کریستالی مشخص در $2\theta = 24^\circ$ دیده می‌شود که بیانگر نیمه کریستالی بودن این پلی‌یورتان است.

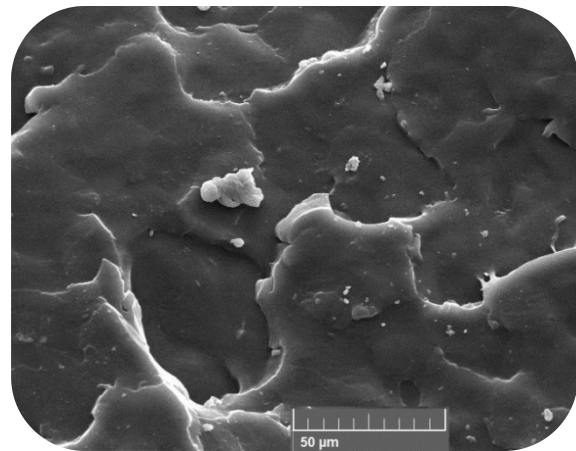


شکل ۶. پروفیل XRD نمونه‌های سنتزی

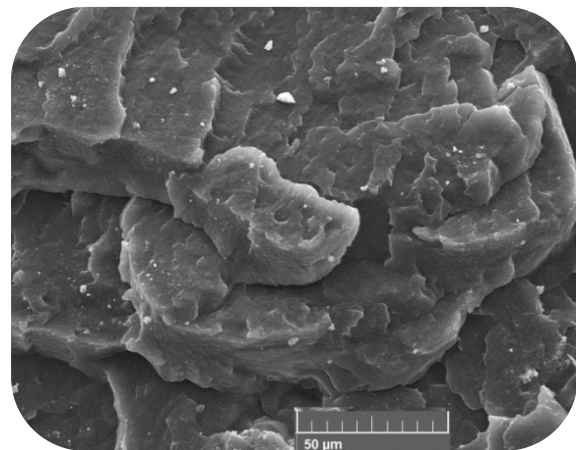
۳-۴. گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

در تکنیک گرماسنجی روبشی تفاضلی، تغییرات سرعت جریان حرارتی نسبت به درجه حرارت بررسی می‌شود. در شکل ۷ نمودار DSC پلی‌یورتان‌های سنتزی آورده شده است. با افزایش درصد فاز سخت از PU2 به PU3 تغییرات حرارت که بیانگر آنتالپی ذوب است افزایش یافته [۲۴، ۲۵] که این بیانگر افزایش بلورینگی پلیمر است. در نمونه PU1 به دلیل آمورف بودن، پلیمر هیچ نقطه ذوب مشخصی ندارد [۲۶]. با افزایش میزان فاز سخت از ۱۸ به ۳۳ درصد، پیک‌های گرماگیر تغییر کرده و چند نقطه ذوب دیده می‌شود [۲۷].

SEM استفاده شد. شکل‌های ۴ و ۵ جدایش فازها را در نمونه‌های با بیشترین (PU3) و کمترین (PU1) میزان فاز سخت نشان می‌دهد. فاز پیوسته‌ای که در تصاویر SEM مشاهده می‌شود، از فاز نرم و فاز میانی آمورف که زمینه را تشکیل می‌دهند تشکیل شده است. ذرات فازی پخش شده‌ای که در مورفولوژی سطح مقطع نمونه‌ها دیده می‌شود؛ شامل فاز سخت و مناطق کریستالی فاز نرم است. سطح مقطع شکست صاف که در گراف نمونه PU1 دیده می‌شود، بیانگر کم بودن مناطق فاز سخت است.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی PU1



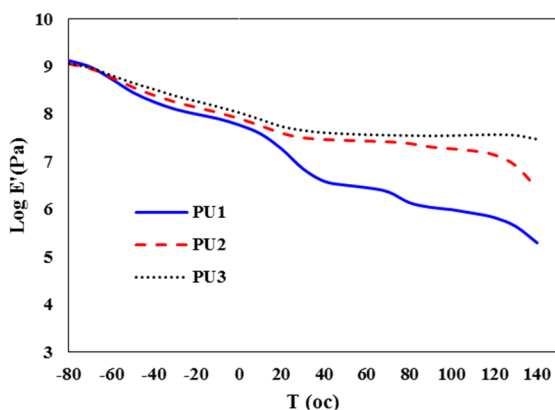
شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی PU3

۳-۳. پراش اشعه ایکس (XRD)

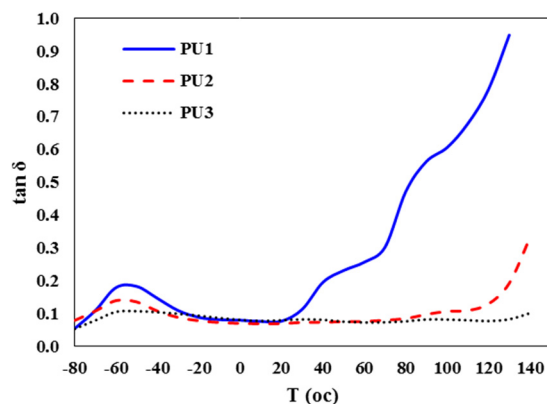
الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های پلی‌یورتان با میزان فاز سخت متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده است، در همه نمونه‌ها در محدوده $2\theta = 10^\circ - 30^\circ$ پیک‌های شاخصی مشاهده می‌شود. در پلی‌یورتان خالص پیک پهن در 20°

استفاده قرار می‌گیرد. مدول اتلاف تابع فرکانس، دما و ساختار ماده است و با افزایش دما یا کاهش فرکانس به شدت کاهش می‌یابد [۶]. نمودار $\tan\delta$ بیانگر مورفولوژی فازی در نمونه است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش محتوای قسمت سخت به دلیل افزایش کریستالیتی پلیمر، آزادی زنجیرهای پلیمری کمتر شده و حرکت آن‌ها سخت‌تر می‌شود، بنابراین فاکتور اتلاف به شدت کاهش می‌یابد (شکل ۹).

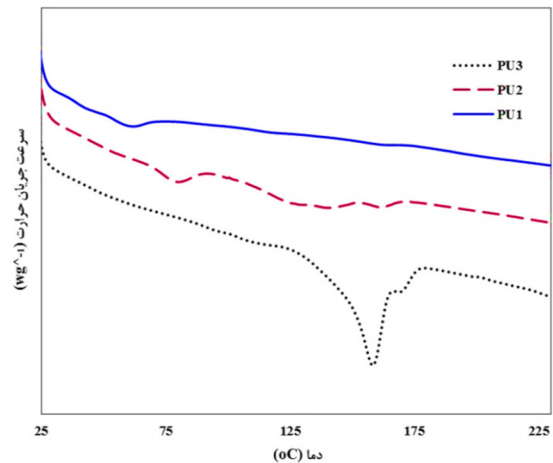
در تمام نمونه‌ها، با افزایش دما از 80°C - مدول اتلاف افزایش یافته و در یک دما که ما به عنوان دمای انتقال شیشه‌ای فاز نرم در نظر گرفته‌ایم (حدود 60°C -) به دلیل تغییر فاز پلیمری به یک پیک می‌رسد (جدول ۲). در نمونه PU1، با افزایش دما در محدوده‌ای که دی‌ال شروع به ذوب شدن می‌کند، دوباره شاهد افزایش شدید مدول اتلاف هستیم.



شکل ۸. روند تغییرات مدول ذخیره با دما در پلی‌یورتان‌های سنتزی



شکل ۹. روند تغییرات ضریب اتلاف با دما در پلی‌یورتان‌های سنتزی



شکل ۷. نمودارهای DSC پلی‌یورتان‌های سنتزی

۳-۵. آنالیز مکانیکی دینامیکی (DMTA)

آزمون DMTA تکنیکی قوی برای مطالعه رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها در برابر دما و درک بهتر ارتباط بین خواص و ساختار پلیمر است. طبق روال معمول نتایج این آزمون با سه پارامتر اصلی، یعنی مدول ذخیره (E')، مدول اتلاف (E'') و فاکتور اتلاف ($\tan\delta$) ارائه می‌شود [۲۸].

نتایج آزمون DMTA برای نمونه‌های سنتزی نشان می‌دهد (شکل ۸)، در همه نمونه‌ها با افزایش دما مدول ذخیره کاهش می‌یابد و زمانی که به دمای انتقال شیشه‌ای فاز نرم (T_g) می‌رسیم، این کاهش شدیدتر خواهد بود. با توجه به ساختار بلوری فاز نرم نمونه‌های PU1 و PU2 که در آزمایش‌های DSC مشخص شد، در دمای حدود 130°C درجه، کاهش مضاعفی در E' می‌بینیم که این مربوط به ذوب بخش‌های بلوری قسمت‌های نرم است. هرچه درصد قسمت سخت کمتر باشد، کاهش مدول ذخیره در دمای پایین‌تر و با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد (شیب منحنی مدول ذخیره بر حسب دما در PU1 بیشتر از PU3 است). محتوای قسمت‌های سخت تأثیر زیادی بر رفتار ویسکوالاستیک و میزان جدایی فاز پلیمر دارد؛ همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، با افزایش درصد فاز سخت، مدول ذخیره افزایش یافته است.

فاکتور اتلاف، یعنی نسبت E''/E' ، معیاری است از میزان اتلاف انرژی توسط پلیمر که برای تعیین انتقالی که در تحرک مولکولی پلیمر اتفاق می‌افتد (مانند دمای T_g) مورد

جدول ۲- ارتباط ریزساختار با ضریب اتلاف

ردیف	درصد وزنی فاز سخت	دمای انتقال شیشه‌ای (°C)	فاکتور اتلاف (tanδ)
PU1	۱۲	-۵۴/۶	۰/۱۹۰
PU2	۱۸	-۵۶/۴	۰/۱۴۳
PU3	۳۳	-۵۴/۸	۰/۱۰۸

همان‌طور که دیده می‌شود به دلیل بالاتر بودن مدول ذخیره در نمونه‌ای که درصد فاز سخت بیشتری دارد، سرعت صوت زیادتر و ضریب جذب صوت کمتر شده است [۵]. همان‌طور که در جدول ۳ آورده شده است، نمونه PU3 به دلیل درصد فاز سخت زیاد، مدول اتلاف و مدول ذخیره بالاتری دارد و این صلیت بالاتر سبب افزایش سرعت صوت نسبت به نمونه‌های دیگر شده است. از طرفی در نمونه PU1 به دلیل آمورف بودن، شکل ۷، حرکت زنجیرهای پلیمری راحت‌تر بوده و این سبب افزایش ضریب جذب صوت در آن شده است.

جدول ۳. اثر تغییرات سرعت و ضریب جذب صوت با ساختار پلی‌یورتان در فرکانس ۱ Hz و دمای محیط

ردیف	درصد فاز سخت (wt%)	مدول ذخیره (MPa)	مدول اتلاف (MPa)	سرعت صوت طولی (m/s)	ضریب جذب صوت
PU1	۱۲	۷	۰/۸	۸۵	۰/۰۰۴۲
PU2	۱۸	۳۲	۲/۴	۱۷۹	۰/۰۰۱۳
PU3	۳۳	۴۶	۳/۸	۲۱۳	۰/۰۰۱۲

۴. نتیجه‌گیری

الاستومرهای ترموپلاستیک پلی‌یورتان با ماده اولیه PTMG، HDI و BD در نسبت‌های مولی ۱-۴/۳، ۱-۲/۱ و ۱-۳-۲-۱ سنتز شدند. بررسی‌های XRD و DSC نشان داد؛ تغییر درصد فاز سخت از ۱۲ به ۳۳ درصد سبب تغییر ساختار آمورف پلی‌یورتان به نیمه کریستالی می‌شود. این تغییر ساختار سبب تغییر در مدول ذخیره و مدول اتلاف شده و فاکتور اتلاف را ۷۶ درصد کاهش داده و در دمای محیط و فرکانس یک هرتز، سرعت و ضریب جذب صوت را تا ۳ برابر تغییر می‌دهد. در مجموع این تحقیق بیانگر اهمیت انتخاب دقیق پلی‌یورتان مصرفی در کاربردهای دریایی برای ایجاد تطابق آکوستیکی است.

همان‌طور که در بررسی‌های یادشده نشان داده شد، تغییر جزئی در میزان مواد مصرفی سبب تغییر زیاد در ساختار و مورفولوژی پلیمر شده که این نیز سبب تغییر در خواص مکانیکی-دینامیکی پلیمر می‌شود. یکی از پارامترهای اصلی برای بررسی تطابق آکوستیکی، سرعت صوت در مواد است که این خود با مدول الاستیسته آن‌ها در ارتباط است. در اصل با داشتن چگالی و مدول الاستیسته مواد می‌توان به سرعت صوت در آن‌ها دست یافت [۲].

برای اینکه بتوان تأثیر این تغییر ساختار را بر خواص آکوستیکی مواد بررسی کرد، با استفاده از رابطه‌های مربوطه [۲۹] می‌توان سرعت (فرمول ۱) و ضریب جذب صوت (فرمول ۲) این مواد را محاسبه کرد.

$$c_L^2 = \frac{2[(E')^2 + (E'')^2]}{p[(E')^2 + (E'')^2]^{0.5} + E'} \quad (۱)$$

$$a_L^2 = \frac{\omega^2 p [(E')^2 + (E'')^2]^{0.5} - E'}{2[(E')^2 + (E'')^2]} \quad (۲)$$

در مواد ویسکوالاستیک، سرعت صوت تابع مدول و مدول نیز تابع فرکانس و دماست و این سبب افزایش سرعت صوت با افزایش فرکانس [۳۰] یا کاهش دما می‌شود [۳۱، ۶]. همچنین ضریب جذب صوت نیز وابستگی زیادی به فرکانس [۳۲، ۳۳] و ساختار ماده دارد. مواد دارای خلل و فرج از جمله فوم‌های پلی‌یورتان بیشترین ضریب جذب را دارند [۳۴].

لازم به یادآوری است اطلاعاتی که از این رابطه‌ها استخراج شده مربوط به فرکانس ۱ Hz است، اما مقادیر عملی سرعت صوت مواد، در فرکانس‌هایی در حد مگاهرتز اندازه‌گیری می‌شود [۳۵]. مقادیر محاسبه شده سرعت صوت در فرکانس پایین در این مقاله با پژوهش‌های پیشین انطباق دارد [۶]. نتایج محاسبات سرعت و ضریب جذب صوت در فرکانس ۱ Hz و دمای ۲۵ °C در جدول ۳ آورده شده است.

- [6] Bandera W, Pawlaczyk K. Sound velocity and loss factor of polyurethane composites. Part I. Archives of Acoustics. 2014 May 1;16(3-4):433-9.
- [7] Zhang H, Chen Y, Zhang Y, Sun X, Ye H, Li W. Synthesis and characterization of polyurethane elastomers. Journal of Elastomers & Plastics. 2008 Apr;40(2):161-77.
- [8] Barikani M, Barmar M. Thermoplastic polyurethane elastomers: synthesis, and study of effective structural parameters. Iranian polymer journal. 1996 Oct;5:231-5.
- [9] Jouibari IS, Haddadi-Asl V, Mirhosseini MM. A novel investigation on micro-phase separation of thermoplastic polyurethanes: simulation, theoretical, and experimental approaches. Iranian Polymer Journal. 2019;28(3):237-50.
- [10] Bi D, Zhi W, Yu M, Zhou B, Qin WG. Study on the preparation and properties of polyurethane elastomers. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2010;49(10):996-1000.
- [11] Oprea S. The effect of chain extenders structure on properties of new polyurethane elastomers. Polymer bulletin. 2010;65(8):753-66.
- [12] Eceiza A, Martin MD, De La Caba K, Kortaberria G, Gabilondo N, Corcuera MA, et al. Thermoplastic polyurethane elastomers based on polycarbonate diols with different soft segment molecular weight and chemical structure: mechanical and thermal properties. Polymer Engineering & Science. 2008;48(2):297-306.
- [13] Fakirov S, editor. Handbook of condensation thermoplastic elastomers. John Wiley & Sons; 2006.
- [14] Sánchez-Adsuar MS, Papon E, Villenave JJ. Influence of the synthesis conditions on the properties of thermoplastic polyurethane elastomers. Journal of applied polymer science. 2000;76(10):1590-5.
- [15] Zhang L, Wang H, Dai Z, Zhao Z, Fu F, Liu X. The dynamic chain effect on healing performance and thermo-mechanical properties of a polyurethane network. Reactive and Functional Polymers. 2020 Jan 1;146:104444.
- [16] Jiang L, Ren Z, Zhao W, Liu W, Liu H, Zhu C. Synthesis and structure/properties characterizations of four polyurethane model hard segments. Royal Society open science. 2018 Jul 25;5(7):180536.
- [17] Hepburn C. Polyurethane elastomers. Springer Science & Business Media; 2012.
- [18] Shen Z, Zheng L, Li C, Liu G, Xiao Y, Wu S, Liu J, Zhang B. A comparison of non-isocyanate

۵. پیوست

- گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) در آزمایشگاه مرکزی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران طبق استاندارد ASTM D3418-08 انجام شده است.
- آنالیز مکانیکی دینامیکی (DMTA) در آزمایشگاه مرکزی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران طبق استاندارد ASTM D5992-96 انجام شده است.
- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز انجام شده است.
- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز طبق استاندارد ASTM D3677-10 انجام شده است.
- آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) در آزمایشگاه فیزیک دانشگاه شیراز انجام شده است.
- تعیین وزن مخصوص بر طبق استاندارد ASTM D792 در آزمایشگاه دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز انجام شده است

مراجع

- [1] Ramotowski T, Jenne K. NUWC XP-1 polyurethane-urea: a new, "acoustically transparent" encapsulant for underwater transducers and hydrophones. In: Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future (IEEE Cat. No. 03CH37492); 2003 Sep 22; San Diego, CA, USA. IEEE;2005.
- [2] Warnes LA. Some acoustical properties of certain polyurethane elastomers. Ultrasonics. 1989 Mar 1;27(2):97-100.
- [3] Mott PH, Roland CM, Corsaro RD. Acoustic and dynamic mechanical properties of a polyurethane rubber. The Journal of the Acoustical Society of America. 2002 Apr;111(4):1782-90.
- [4] Hartmann B. Relation of polymer chemical composition to acoustic damping. In: Abstracts of Papers of the American Chemical Society; 1989 Apr 9. WASHINGTON, DC 20036: Amer Chemical; 1990.
- [5] Burke M, Townend DJ. Acoustic and mechanical properties of polyurethanes based on polybutadiene soft segment. Plastics, rubber and composites. 1999 May 1; 28(5):185-90.

- [31] Benjamin S. Hydrophone for Acoustic Detection at South Pole. IceCube collaboration;2008.
- [32] Lee J, Kim GH, Ha CS. Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams. Journal of applied polymer science. 2012 Feb 15;123(4):2384-90.
- [33] Vasina M, Monkova K, Monka PP, Kozak D, Tkac J. Study of the sound absorption properties of 3D-printed open-porous ABS material structures. Polymers. 2020 May;12(5):1062.
- [34] Jiang X, Wang Z, Yang Z, Zhang F, You F, Yao C. Structural design and sound absorption properties of nitrile butadiene rubber-polyurethane foam composites with stratified structure. Polymers. 2018 Sep;10(9):946.
- [35] Cook RL, Kendrick D. Speed of sound of six PRC Polyurethane materials as a function of temperature. The Journal of the Acoustical Society of America. 1981 Aug;70(2):639-40.
- and HDI-based poly (ether urethane): Structure and properties. Polymer. 2019;175:186-94.
- [19] Thompson CM, Heimer WL. Relationship between acoustic properties and structure of polyurethanes. The Journal of the Acoustical Society of America. 1985 Mar;77(3):1229-38.
- [20] Tian D, Wang F, Yang Z, Niu X, Wu Q, Sun P. High-performance polyurethane nanocomposites based on UPy-modified cellulose nanocrystals. Carbohydrate polymers. 2019 Sep 1;219:191-200.
- [21] Zhang H, Zhang F, Wu Y. Robust stretchable thermoplastic polyurethanes with long soft segments and steric semisymmetric hard segments. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020 Feb 26;59(10):4483-92.
- [22] Furukawa M, Mitsui Y, Fukumaru T, Kojio K. Microphase-separated structure and mechanical properties of novel polyurethane elastomers prepared with ether based diisocyanate. Polymer. 2005 Nov 21;46(24):10817-22.
- [23] Pilch Pitera B, Król P, Pikus S. Supramolecular structure of cross linked polyurethane elastomers based on well-defined prepolymers. Journal of applied polymer science. 2008 Dec 5;110(5):3292-9.
- [24] Somdee P, Lassú-Kuknyó T, Konya C, Szabó T, Marossy K. Thermal analysis of polyurethane elastomers matrix with different chain extender contents for thermal conductive application. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019 Oct;138(2):1003-10.
- [25] Korley LT, Pate BD, Thomas EL, Hammond PT. Effect of the degree of soft and hard segment ordering on the morphology and mechanical behavior of semicrystalline segmented polyurethanes. Polymer. 2006 Apr 19;47(9):3073-82.
- [26] Seymour RW, Cooper SL. Thermal analysis of polyurethane block polymers. Macromolecules. 1973 Jan;6(1):48-53.
- [27] Hood MA, Wang B, Sands JM, La Scala JJ, Beyer FL, Li CY. Morphology control of segmented polyurethanes by crystallization of hard and soft segments. Polymer. 2010 May 4;51(10):2191-8.
- [28] Kevin PM. Dynamic mechanical analysis, a Practical Introduction. CRC Press; 1999.
- [29] Rodger C. Elastomeric Materials for Acoustic Application. Naval Sea Systems Command & ONR;1989.
- [30] Mark JE, editor. Physical properties of polymers handbook. New York: Springer; 2007 Mar 21.

پی نوشت

1. Polyol
2. Diisocyanate
3. Hexamethylene diisocyanate
4. Poly tetrahydrofuran