

بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و صوتی شبکه‌های درهم نفوذ کرده پلی یورتان و پلی متیل

متاکریلات

محمدرضا منظم^۱، غلامرضا مرادی^۲، پروین نصیری^۳، امیر ارشاد لنگرودی^{۳*}

۱ مرکز تحقیقات آلودگی هوا، پژوهشکده محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

۲ دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران، تهران، ایران

۳ گروه رنگ و روکشهای سطح، پژوهشکده فرآیند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران



تاریخ دریافت:

۹۶/۸/۲۳

تاریخ پذیرش:

۹۶/۱۱/۲۰

مقاله

امروزه کنترل آلودگی صوتی اهمیت زیادی دارد. آلودگی صوتی سبب آسیب رساندن به انسان و آرامش او می‌شود. یکی از روشهای کنترل صدا استفاده از مواد جاذب صدا (بخصوص فوم‌های پلیمری) می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری به ویژه شبکه‌های پلیمری در هم نفوذ کرده (IPN) در ساخت مواد جاذب صدا مورد توجه قرار گرفته‌اند. کامپوزیت‌های IPN بطور گسترده‌ای به عنوان عامل میرایی صدا و ارتعاش به علت خواص ویسکوالاستیک بالا در محدوده دمای انتقال شیشه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه، از طریق پلیمریزاسیون درجا با استفاده از نسبت‌های متفاوتی از پلی یورتان (PU) و پلی متیل متاکریلات (PMMA) فوم شبکه‌های پلیمری درهم نفوذ کرده PU/PMMA تهیه شدند.

اجزای سازنده IPN شامل پلی یورتان و پلی متیل متاکریلات بطور جداگانه جهت مقایسه خواص حرارتی، میرایی، مکانیکی و ضریب جذب صوت پلیمر سنتز شدند. ساختار شیمیایی ترکیبات توسط طیف سنجی FT-IR مورد بررسی قرار گرفت و خواص مکانیکی با استفاده از آزمایش کشش مطالعه شد. خواص میرایی و حرارتی نمونه‌ها به ترتیب با آزمون‌های دینامیکی مکانیکی انجام شد. اندازه‌گیری ضریب جذب صوت با استفاده از امپدانس تیوب دو میکروفنی در فرکانس ۶۳ تا ۶۳۰۰ مطابق با استاندارد ISO 10534-2 انجام شد. متغیرهایی از قبیل مدول اتلاف و دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) همچنین افزایش فواصل دمایی با میرایی موثر ($\tan\delta > 0.3$) به عنوان شاخص جهت توانایی میرایی موثر استفاده شدند.

تشکیل موفولوژی نیمه سازگار از طریق گستردگی منحنی $\tan\delta$ و مشاهده دو پیک مجزا در منحنی DMA در IPN‌ها مشخص شد. نتایج آشکار کرد که با تشکیل ترکیب فوم IPN، دمای انتقال شیشه‌ای به سمت دماهای بالاتر جابجا شده و گستره دمایی میرایی (گستره دمایی با $\tan\delta > 0.3$) افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه خواص میرایی IPN/PMMA بهبود می‌یابد. همچنین نتایج ضریب جذب صوت نشان داد که به علت تشکیل فوم IPN، عملکرد ماده در یک فرکانس خاص به شکل راکتیو یا تشدید درآمده و با افزایش نسبت PMMA در IPN، فرکانس رزونانس به سمت فرکانس‌های پایین منتقل می‌شود. بنابراین با تغییر ترکیب مواد در سنتز شبکه‌های پلیمری درهم نفوذ کرده، امکان انتخاب هدفمند از مواد میرا کننده صوت برای حل مشکلات خاص تکنولوژیکی وجود دارد.

پلی یورتان، پلی متیل متاکریلات، شبکه‌های پلیمری نفوذ

کرده (IPN)، ضریب جذب صوت

واژگان کلیدی

۱) مقدمه

با توجه به آلودگی جدی صدا در محیط زندگی بشر، تمایل فزاینده‌ای در زمینه کنترل این نوع آلودگی بوجود آمده است. یک راه حل برای کنترل صدا و ارتعاش ناشی از آن، استفاده از مواد میرا کننده است [۱]. آن دسته از مواد میرا کننده‌ای که در گستره مشخصی از دما و فرکانس، ظرفیت میرایی بالایی دارند بیشتر مورد توجه می‌باشند. در بسیاری از موارد لازم است این مواد از مقاومت مکانیکی بالا و پایداری حرارتی خوبی نیز برخوردار باشند. از مواد میرا کننده جهت کاهش صدا در هواپیما، اتومبیل و ماشین آلات و ساختمان استفاده می‌شود [۲]. جذب امواج آکوستیکی توسط مواد جامد ویسکوالاستیک کافی نیست؛ بنابراین به منظور بهبود عملکرد، از مواد متخلخل ویسکوالاستیک استفاده می‌شود. مولکول‌های هوا که توسط انرژی امواج صوتی حمل می‌شود؛ به داخل فوم‌های سلول باز نفوذ می‌کند. زمانی که هوا از داخل مواد متخلخل عبور می‌کند. به دلیل اصطکاک با مقاومت سطح حفره‌ها، تبدیل انرژی رخ می‌دهد و انرژی صوتی تبدیل به انرژی گرمایی شده و اتلاف رخ می‌دهد. ساده‌ترین و متداول‌ترین روش برای تهیه فوم پلیمری، تولید مواد متخلخل می‌باشد. مواد متخلخل بسته به نوع کاربری، اندازه و چگالی سلولی متفاوتی دارند. کامپوزیت‌های پلیمری به ویژه شبکه‌های پلیمری درهم نفوذ کرده به خاطر خواص بالای ویسکوالاستیکی در محدوده دمای انتقال شیشه‌ای، بطور گسترده‌ای به عنوان مواد میرا کننده استفاده می‌شوند. اتصال عرضی، درگیری متقابل زنجیرهای پلیمری و در نهایت پیوند بین شبکه‌ای در شبکه‌های پلیمری درهم نفوذ کرده، باعث می‌شود که یک پلیمر، پراکندگی مناسبی در پلیمر دیگر داشته باشد. IPN‌ها به دلیل دارا بودن درهم تنیدگی فیزیکی و تعاملات بین شبکه‌ای در مقایسه با شبکه‌های شبکه‌ی شده یکسان، مقاومت مکانیکی و حالت ارتجاعی پلیمر بهتری دارند [۳]. شبکه‌های پلیمری درهم نفوذ کرده نوعی آلیاژ پلیمری هستند که در قالب دو یا چند شبکه پلیمری مجاور هم معرفی می‌شوند و به عبارتی دیگر آلیاژ منحصر به فردی از پلیمرهای شبکه‌ای شده می‌باشند که ضرورتاً پیوندهای کووالانسی بین آن‌ها وجود ندارد. یک مثال از IPN ترکیب یک پلیمر گرمانرم با گرماسخت است که در هر فاز مشخصات ذاتی آن‌ها در ترکیب شرکت می‌کنند. پلیمرهای گرمانرم‌ها انعطاف پذیری خوبی دارند اما مدول الاستیک و دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) پایین دارند. در حالی که گرماسخت‌ها به طور معمول شکننده اما سفت، قوی و Tg بالاتر دارند. مفهوم IPN، ترکیب بهترین ویژگی‌ها از هر دو نوع پلیمر به منظور دستیابی مهندسی به مواد جدید با بهینه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و حرارتی است. درجه درگیری یا درهم نفوذ کردن فیزیکی وابسته به درجه جداسازی فازی در زمان درگیری است. تشکیل IPN تنها راه ترکیب پلیمرهای شبکه‌ای شده است که جداسازی فازی در آن اتفاق می‌افتد. IPN‌ها با توجه به چهار فاکتور سنتز زنجیره‌ای، ساختار شبکه‌ای، طبیعت اتصالات عرضی و نوع اختلاط دسته بندی

می‌شوند. خواص مناسب IPN‌ها با کنترل بیشتر بر مورفولوژی، ثبات فازی عامل شبکه‌ای کننده و مناطق انتقال شیشه‌ای گسترده حاصل می‌شود. استفاده از IPN‌ها بعنوان مواد میرا کننده انرژی در پژوهش‌های مختلفی، گزارش شده است [۴-۷]. پلی یورتان‌ها از جمله پلیمرهای دارای خواص ویژه و برجسته‌اند که ویژگی‌های آنها از مواد گرما سخت تا الاستومر نرم، بسته به تفاوت در ماهیت شیمیایی، وزن مولکولی و ترکیب درصد اجزای مختلف آنها متغیر است. پلی یورتان و پلیمرهای ویسکوالاستیک توانایی تبدیل انرژی مکانیکی به گرمایی را دارند. خواص نامطلوب پلی یورتان خالص شامل جذب انرژی مکانیکی در محدوده باریک، مقاومت مکانیکی و حرارتی کم، می‌تواند توسط تهیه بصورت IPN بهبود یابد. مطالعه انجام گرفته برای ساخت IPN‌های پلی یورتان و پلی متیل متاکریلات مشخص کرد که اگرچه دو پلیمر بسیار ناسازگار می‌باشند اما با تشکیل IPN، اختلاط مولکولی مشخصی را از خود نشان می‌دهند [۸]. در پژوهش‌های انجام گرفته دیگر بر روی IPN‌های بر پایه پلی یورتان و کوپلیمرهای آکریلیکی و همچنین رزین اپوکسی نشان داده شد که میزان جدایی فازی با سازگاری پلیمرهای سازنده ارتباط دارد [۹، ۱۰]. سیستم‌های پلیمری که رفتار انتقالی گسترده‌ای در محدوده وسیع دمایی و فرکانسی از خود نشان دهند؛ بهترین مواد برای جذب و یا اتلاف انرژی می‌باشند. جستجو به منظور یافتن موادی با این ویژگی‌ها به فناوری IPN‌ها می‌رسد که امروزه بسیار مورد توجه می‌باشد. شبکه‌های پلیمری درهم نفوذ کرده نیمه سازگار با ترکیبی از Tg پایین و بالا باعث اتلاف صدا و ارتعاش در گستره وسیع دمایی و فرکانسی می‌شوند [۱۱]. این پدیده نیاز به تبدیل انرژی مکانیکی به گرما دارد که این تبدیل با بیشترین بازده در دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر حاصل می‌شود. توانایی در جذب انرژی مکانیکی و تبدیل آن به گرما در بالاترین دمای انتقال شیشه‌ای رخ می‌دهد [۱۲]. ظرفیت میرایی توسط خواص مکانیکی و دینامیکی تعیین می‌شود. برای تعیین میرایی صوتی از دیدگاه مهندسی، مشخص نمودن مدول اتلاف اهمیت زیادی دارد. مدول اتلاف برای IPN‌های ناسازگار پلی یورتان و پلی متیل متاکریلات در گستره دمایی بین ۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت و مقدار مدول اتلاف بین ۰/۱ تا ۰/۵ مشاهده شده است که نشان می‌دهد سیستم IPN برای کاربردهای صوتی و ارتعاشی مناسب می‌باشد. در این پژوهش خواص آکوستیکی، مکانیکی و حرارتی IPN بر پایه پلیمرهای پلی یورتان و پلی متیل متاکریلات مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این مطالعه استفاده از پلی یورتان با دمای انتقال شیشه‌ای پایین و پلی متیل متاکریلات با دمای Tg بالا جهت تشکیل ترکیب جدید به صورت IPN بوده است که توانایی جذب انرژی صوتی را در گستره دمایی و فرکانسی مشخص داشته باشد. برای رسیدن به این هدف، ابتدا پیش پلیمر یورتانی سنتز و در پیش پلیمر متیل متاکریلاتی مخلوط شد تا IPN‌های پلی یورتانی و پلی متیل متاکریلاتی تهیه شود. از اهداف دیگر این تحقیق تعیین نسبت بهینه

پلی یورتان به پلی متیل متاکریلات در IPN ها بود.

۲) تجربی

۱) مواد

پلی تترا هیدرو فوران (PTMG) با جرم مولی ۲۰۰۰ گرم بر مول، ۴-بوتان دی ال، تری متیلول پروپان (TMP) از شرکت سیگما-آلد ریچ تهیه شد. آزودی کربونامید (ACDA) از شرکت بایر خریداری شد. متیل متاکریلات (MMA)، اتیلن دی متاکریلات (EDMA)، تولوئن دی ایزوسیانات (TDI) و بنزوئیل پروکساید (BPO) از شرکت مرک خریداری شدند.

۲) دستگاه ها

در این پژوهش، برای بررسی واکنش گروه ها از دستگاه طیف سنجی مادون قرمز Equinox-55 ساخت شرکت آلمانی بروکر با استفاده از تکنیک ATR استفاده شد. اندازه گیری خواص مکانیکی در حالت کششی با استفاده از دستگاه کشش ایرانی سنتام مدل STM-20 صورت پذیرفت. خواص دینامیکی مکانیکی با استفاده از دستگاه آلمانی Triton مدل Triton-2000DMA مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز گرما وزن سنجی با دستگاه Netzsch ساخت آلمان و بررسی میزان جذب صوت با دستگاه BSWA و لوله SW422 ساخت آمریکا بر اساس استاندارد ISO-10534-2 انجام شد.

۳) روش کار

۱) تهیه پیش پلیمر پلی یورتان

ابتدا هوای موجود درون راکتور به کمک گاز نیتروژن خارج و تا پایان واکنش، اتمسفر نیتروژن درون راکتور حفظ شد. دمای راکتور نیز همواره توسط حمام آب، 75°C نگه داشته شد. سپس مقدار لازم PTMG درون راکتور ریخته شده و TDI به تدریج به محیط واکنش اضافه شد تا واکنش میان گروه های OH پلی ال و NCO دی ایزوسیانات آغاز گردد. میزان پیشرفت واکنش با استفاده از استاندارد ASTM D 2572 محاسبه گردید. با استفاده از این آزمون میزان % NCO آزاد سیستم در هر لحظه به دست آمد. از آنجایی که در این مرحله هدف تهیه پیش پلیمر یورتان با گروه های انتهایی NCO است، نسبت مولی NCO/OH از ابتدا ۲/۱ در نظر گرفته شد.

۲) تهیه پیش پلیمر PMMA

بالن سه دهانه مجهز به کندانسور رفلکس، ترمومتر، هم زن مغناطیسی و ورودی نیتروژن در داخل حمام آب قرار گرفت. واکنش با ۸۰ گرم MMA، ۱% EDMA و ۰/۱۵ BPO آغاز شد. پیشرفت واکنش از طریق آزمون یک قطره از مخلوط در الکل ایزوپروپانول و رسوب در آن مشخص گردید. واکنش تا ۱۰-۱۵% تبدیل ادامه یافت و سپس داخل حمام یخ قرار گرفت.

۳) سنتز PU/PMMA IPN

برای سنتز IPN پلی یورتان / پلی متیل متا آکریلات ابتدا پلی ال، تری متیلول پروپان و ۱،۴ بوتان دی ال درون آن خلاء خشک شد. در این راستا از یک راکتور شیشه ای چهار دهانه ۵۰۰ ml، وسیله هم زن مکانیکی و حمام آب 75°C استفاده شد. با توجه به مشاهدات تجربی زمان بین ۴۵ تا ۵۵ دقیقه لازم است تا در مرحله تهیه پیش پلیمر یورتان، گروه های انتهایی NCO به نصف مقدار تئوری اولیه خود برسد. پس از اینکه واکنش کامل شد و پیش پلیمر با گروه های انتهایی NCO بدست آمد، از مخلوط ۱/۴ بوتان دی ال و TMP به نسبت ۱:۴ والان ۱:۴ به عنوان شبکه ای شدن و عامل توسعه دهنده زنجیر برای شبکه PU استفاده شد.

مخلوط پیش پلیمر پلی یورتان به مخلوط پیش پلیمر پلی متیل متاکریلات با نسبت های مختلف اضافه شد. مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه در دمای محیط مخلوط شد. سپس اختلاط در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت ادامه یافت. در انتها، عامل پف زای شیمیایی ADCA به داخل مخلوط اضافه گردید و اختلاط ادامه یافت. بعد از گذشت پنج دقیقه، مخلوط به داخل قالب تفلونی ریخته شد و در آن در دماهای ۵۵، ۶۵، ۸۵ و ۱۱۰ درجه سانتی گراد جهت پلیمریزاسیون نهایی به مدت هر کدام ۲۴ ساعت قرار گرفت. نسبت جرمی پلی یورتان به پلی متیل متاکریلات در سیستم IPN به ترتیب ۳۵/۶۵، ۲۵/۷۵ و ۱۵/۸۵ انتخاب شد. بنابراین IPN های گوناگون از طریق تغییر در نسبت های اجزاء PU و PMMA در سیستم تهیه شد [۱۳].

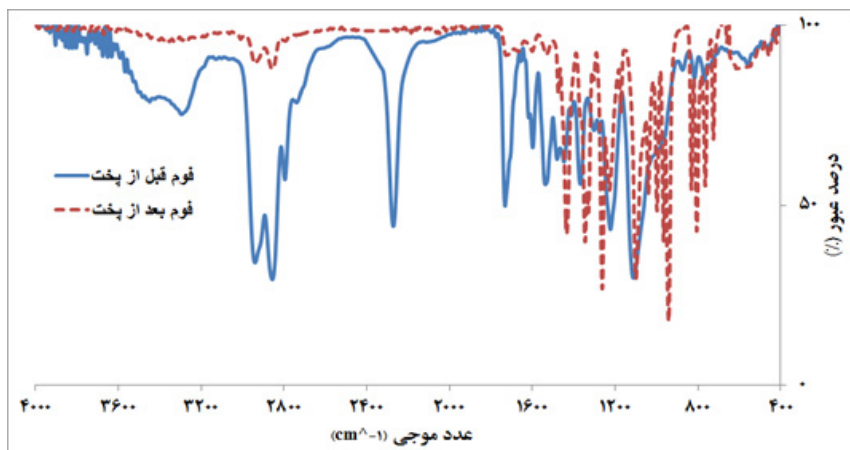
۳) نتایج و بحث

۱) بررسی واکنش و شناسایی پلیمر تشکیل شده

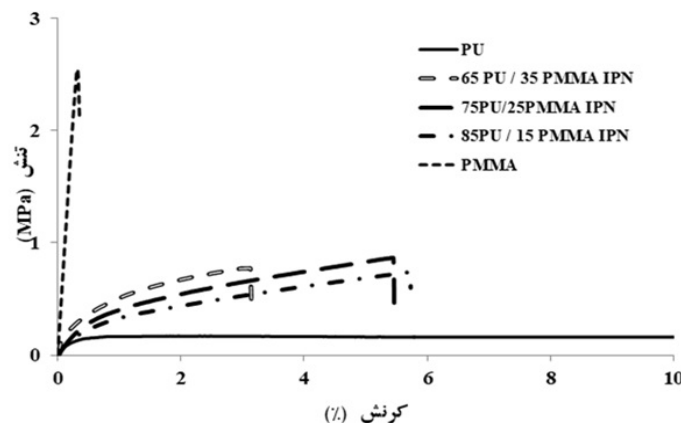
در شکل ۱ نمودار FTIR مخلوط نهایی پیش پلیمر پلی یورتان و پلی متیل متاکریلات قبل و بعد از پخت نشان داده شده است. بر این اساس، پلیمریزاسیون کامل اجزای پلیمری تایید می شود. حذف گروه عاملی ایزوسیانات ($\text{N}=\text{C}=\text{O}$) در 2235 cm^{-1} و حذف پیوند OH - پلی تترا هیدرو فوران در 3480 cm^{-1} و تشکیل پیوند NH - در عدد موجی بین 3100 cm^{-1} تا 3300 cm^{-1} واکنش کامل پلی یورتان را نشان می دهد. همچنین واکنش کامل منومر متیل متاکریلات از طریق حذف پیوند $\text{C}=\text{C}$ در عدد موجی 1637 cm^{-1} تایید گردید. حذف پیک های ایزوسیاناتی، هیدورکسیلی و آلکنی و همچنین تشکیل پیوند آمینی به معنی واکنش شیمیایی و در نتیجه تکمیل پخت و تشکیل پلیمرهای مورد نظر می باشد.

۲) بررسی خواص مکانیکی با آزمون تنش-کرنش

با استفاده از این آزمون خواص مکانیکی مدول، استحکام کششی، ازدیاد طول تا پارگی محاسبه شد. نمونه های آماده شده با سرعت ۵۰ میلی متر بر دقیقه تحت کشش قرار گرفت که در شکل ۲ مشاهده می



شکل ۱) طیف فروسرخ مربوط به پیش پلیمر اختلاط یافته (قبل و بعد از پخت)



شکل ۲) نمودار تنش - کرنش IPN با نسبت‌های مختلف در دمای ۲۵°C

با توجه به نتایج به دست آمده، IPN ۲۵/۷۵ در مقابل آزمایش‌های فیزیکی از شرایط بهتری نسبت به دو IPN دیگر برخوردار است و عملکرد آن در برابر آزمون‌های مکانیکی متوسط بوده است.

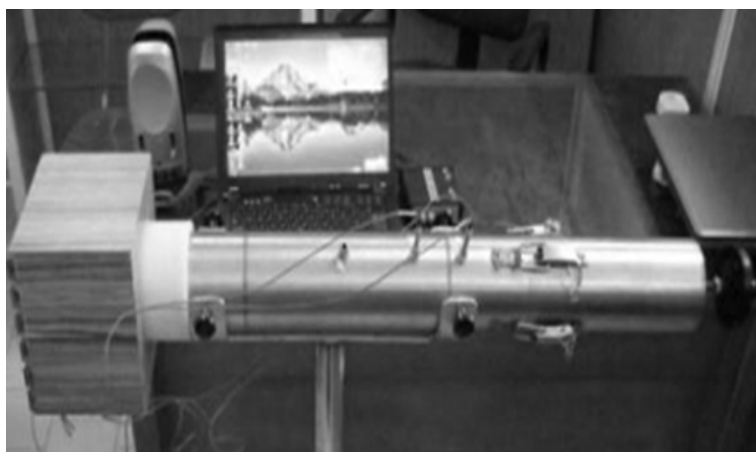
۳(۳) آنالیز ضریب جذب صوت

جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی از روش دو میکروفون در دستگاه لوله امپدانس مطابق شکل ۳ استفاده شده است. دستگاه شامل دو لوله به قطرهای ۳ و ۱۰ سانتی‌متر و نمونه‌های سنتزی در اندازه‌های دستگاه امپدانس تیوب تهیه شدند. لوله بزرگ‌تر برای فرکانس‌های از ۶۳ تا ۱۶۰۰ هرتز و لوله کوچک‌تر از ۸۰۰ تا ۶۳۰۰ هرتز استفاده شد. همه نمونه‌ها ۱٫۵ سانتیمتر ضخامت داشتند.

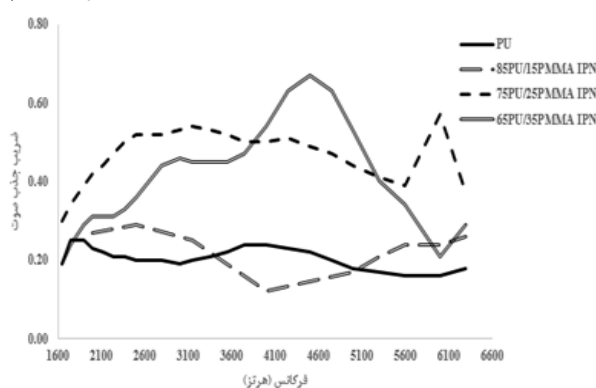
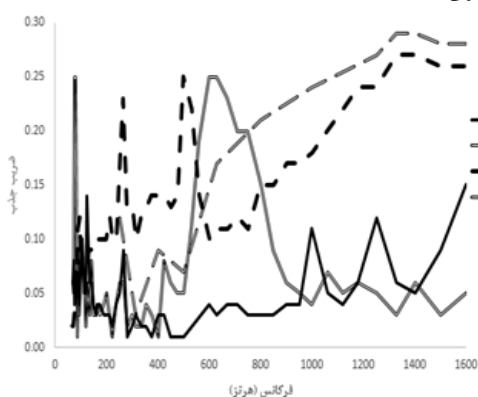
در این بخش، رفتار جذب صوتی IPN با تغییر نسبت‌ها بررسی شد. در شکل ۴ ضریب جذب صوتی نمونه‌های فوم با نسبت‌های مختلف و با ضخامت یکسان (۱/۵ سانتی‌متر) در فرکانس یک اکتاو باند برای فرکانس‌های پایین (۶۳ تا ۱۶۰۰ هرتز) و فرکانس‌های بالا (۱۶۰۰ تا ۶۳۰۰ هرتز) نشان داده شده است. مطابق با مفهوم کاهش آکوستیک، ضریب جذب به کسری از موج صوتی اشاره می‌کند، زمانی که موج صوتی با نمونه برخورد می‌کند و آن از ۰ (بدون کاهش) تا ۱ (۱۰۰٪ کاهش) متغیر است. مطابق با مقادیر متوسط ضریب جذب، افزایش

شود. با توجه به اینکه دمای انتقال شیشه‌ای هر جزء IPN (۱۰۷/۵) درجه سانتی‌گراد برای پلی متیل متاکریلات و ۵۰- درجه سانتی‌گراد برای پلی یورتان) می‌باشد، میزان کرنش وابسته به مدول کمتر می‌باشد. بنابراین هر جزء ماتریس پلیمری که در حالت لاستیکی یا شیشه‌ای قرار دارد، زمان نسبتاً کوتاهی وابسته به مدول می‌باشد [۳].

منحنی‌های مربوط به پلی یورتان خالص و ۷۵ درصد پلی یورتان-۲۵ درصد پلی متیل متاکریلات IPN، در گستره مدول پایین و منحنی در گستره مدول بالا قرار دارد. رفتار مدول سه گروه به خوبی با مورفولوژی و ظاهر نمونه‌های IPN ارتباط دارد. گروه مدول پایین شامل نمونه‌های الاستومری است که در آن فاز پلی یورتان پیوسته است، گروه مدول متوسط شامل نمونه‌های لاستیکی است که در آن فازها در فرایند معکوس قرار دارند و گروه دارای مدول بالا شامل نمونه‌ای شیشه‌ای است که در آن پلی متیل متاکریلات فاز پیوسته است. نتایج تنش-کرنش IPN‌ها نشان داد که مقاومت کرنش و مدول یانگ IPN‌ها، با افزایش محتوی متیل متاکریلات افزایش در حالیکه ازدیاد طول تا نقطه شکست کاهش یافت. احتمالاً پلی متیل متاکریلات باعث افزایش برهم‌کنش زنجیرهای پلیمری در تشکیل IPN و افزایش مقاومت پلیمر شده است [۳].



شکل ۳) دستگاه امیدانس تیوب دو میکروفونی



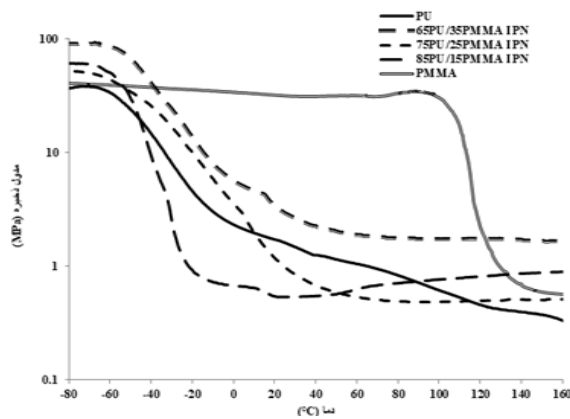
شکل ۴) طیف فرکانسی ضریب جذب صوت برای PU و IPN با نسبت های مختلف اجزا برای فرکانس های پایین و فرکانس های بالا

انرژی آکوستیکی و مکانیکی توسط خواص ویسکوالاستیک دینامیکی نشان داده شد. مورفولوژی نیمه سازگار الاستومرها و انتقال شیشه ای گسترده، رفتار مناسبی در کاربرد جذب صوت می باشد. آنالیز دینامیکی مکانیکی روش مفیدی برای انتخاب مواد برای جذب انرژی و میرایی باشد. موادی که مدول اتلاف گسترده و بالایی داشته باشند می توانند به عنوان مواد میراکننده استفاده شوند. مدول اتلاف نسبت اتلاف انرژی بصورت گرما به بیشینه انرژی ذخیره شده در نمونه می باشد که بصورت نسبتی از مدول افت (E'') بر مدول ذخیره سازی (E') تعریف می شود. پیک مجزا و باریک مدول اتلاف نشان دهنده امتزاج پذیری بالا است و دو پیک جدا از هم و واضح با مقدار مدول اتلاف کمتر نتیجه برهم کنش کمتر و نشان از جدایی فازی بزرگ دارد. همچنین دو پیک با یک ارتفاع یکسان برای مدول اتلاف، می تواند دلیلی بر پیوستگی فازی یا فاز معکوس باشد. معمولاً گستره دمایی با $0.3 <$ δTan به عنوان یک استاندارد جهت ارزیابی ظرفیت میرایی استفاده می شود [۱۴، ۱۵]. مقایسه طیف پلی یورتان و پلی متیل متاکریلات خالص با IPN های سنتزی، مورفولوژی نیمه امتزاج پذیری را از طریق گسترده δTan و وجود دو پیک انتقال نشان داد. شکل ۵ خواص میرایی IPN سنتزی را با نسبت های مختلفی از PU و PMMA در فرکانس ۱ هرتز نشان می دهد. منحنی مربوط به PU و PMMA به عنوان نمونه مرجع نشان داده شده است. در شکل ۵

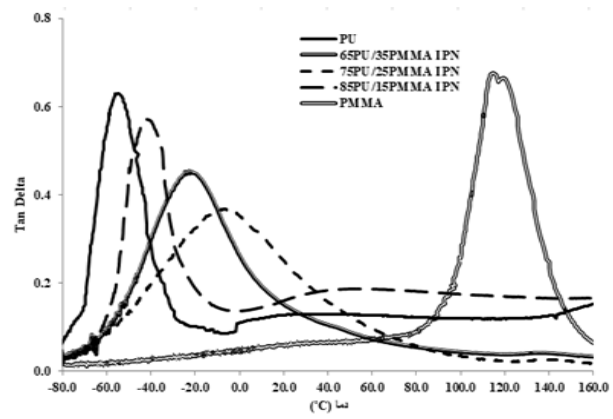
PU به PMMA منجر به شکل گیری IPN با ضریب جذب صوتی بالاتر می شود. ضریب جذب صوتی فوم PU در مقایسه با IPN های سنتزی نسبتاً کمتر است، که دلیل آن احتمالاً خواص میرایی بهتر نمونه در حالت IPN در مقایسه با نمونه خالص PU می باشد. ماکزیمم مقدار ضریب جذب صوت برای نمونه IPN ۷۵/۲۵ در فرکانس های ۱۲۵۰، ۲۵۰۰ و ۵۰۰۰ هرتز به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۵۲ و ۰/۴۴ بدست آمد. نمونه IPN ۲۵/۷۵ نسبت به دو IPN دیگر، از افزایش محسوسی در ضریب جذب صوت برخوردار است. که مطابق با نتیجه بدست آمده از آزمون DMTA می باشد. آزمون DMTA نشان داد که مدول اتلاف نمونه IPN ۷۵/۲۵ نسبت به PU خالص و IPN های سنتزی دیگر بیشتر است. نتایج ضریب جذب صوت نشان داد که به علت تشکیل فوم IPN، عملکرد ماده در یک فرکانس خاص تشدید می شود. با افزایش نسبت PMMA فرکانس رزونانس به سمت فرکانس های پایین تغییر پیدا می کند. علت این افزایش مربوط به افزایش فضای سلولی در مسیر موج می باشد.

۴(۳) آنالیز دینامیکی مکانیکی (DMA)

در حالت فشاری با فرکانس ۱ هرتز و نرخ افزایش دمای ۵ درجه بر دقیقه در محدوده دمایی تعیین شده برای مطالعه رفتار حرارتی و انتقال های موجود در نمونه ها استفاده شد. توانایی الاستومرها در جذب



شکل ۵) نمودار برای DMA (الف) مدول ذخیره و (ب) مدول اتلاف تابعی از دما برای فوم PU، PMMA، PU/PMMA IPN



پلیمری PU و PMMA در نمونه هاست. مطابق با شکل ۵ ب پیک اتلاف در محدوده دمای ۳۰- تا ۵۰- درجه می تواند بیانگر Tg پلی یورتان و پیک مشخصه اتلاف در محدوده دمای بین ۹۵ تا ۱۱۸ درجه سانتیگراد مربوط به Tg پلی متیل متا آکریلات است که بیانگر نیمه امتزاج پذیری اجزای آمیخته به دلیل تفاوت در قطبیت آن هاست. اثر تشکیل IPN با PU و PMMA باعث شد که ماکزیمم $\tan \delta$ به سمت دمای اتاق شیفت پیدا کند. این اثر به خاطر نفوذپذیری دو پلیمر در نتیجه مورفولوژی نیمه سازگاری آنهاست. همچنین می توان گفت که با تشکیل IPN، ارتفاع $\tan \delta$ کاهش یافته و مساحت کلی زیر نمودار و دما Tg افزایش می یابد، که نشان دهنده افزایش جذب انرژی در IPN ها است. دلیل بر کاهش $\tan \delta$ جزء پلیمری حالت شیشه ای، PMMA است که از حرکت بخشی از زنجیر جلوگیری کرده و باعث کاهش در مقدار پیک $\tan \delta$ می شود. همان طور که ملاحظه می شود، Tg ماده پلیمری در حدود ۱۱۴/۹ سانتیگراد است که در منحنی IPN ها قابل رویت نیست. دلیل آن ممکن است پخش کامل فاز PMMA در فاز PU باشد که منجر به ناپدید شدن دمای انتقال شیشه ای PMMA می شود [۱۷].

۴) نتیجه گیری

صدا و ارتعاش یکی از خطرهای محیطی جهان امروز است و مواجهه شغلی با صدا سلامت بسیاری از کارکنان را تهدید می کند، به طوری که سروصدا یکی از رایج ترین و شایع ترین عوامل زیان آور محیط کار در دنیا محسوب می شود. یکی از روش های کاهش صوت و ارتعاش استفاده از مواد میرا کننده است. مواد با میرایی خوب، ظرفیت میرایی بالایی در گستره دمایی و فرکانسی مورد نظر دارند. همچنین مقاومت مکانیکی بالا و پایداری حرارتی مناسب نیز از ویژگی های این مواد است. خواص نامطلوب پلی یورتان خالص، جذب انرژی مکانیکی در گستره باریک فرکانسی، مقاومت مکانیکی کم و مقاومت گرمایی ضعیف می تواند از طریق تهیه شبکه های پلیمری در هم نفوذ کرده IPN بهبود یابد. تهیه جاذب های صوتی بر پایه ترکیبات پلیمری از PU و PMMA به صورت شبکه های پلیمری در هم نفوذ کرده

الف و ب نمودار مربوط به مدول ذخیره (E') و مدول اتلاف مربوط به IPN سنتزی در نسبت های مختلفی از PU/PMMA نشان داده شده است. مدول ذخیره (E') برای IPNs در گستره دمای بین ۱۰۰- تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد نشان داد که همه IPN های تهیه شده نسبت به پلی یورتان خالص (PU) از مدول بالاتری برخوردارند. همچنین با ملاحظه مدول ذخیره در IPN ها، می توان گفت که IPN ۳۵/۶۵ دارای مدول بالاتری نسبت به دیگر IPN های سنتزی دارد. مدول ذخیره بالاتر می تواند به افزایش محتوای PMMA در سنتز IPN نسبت داده شود. می توان ملاحظه نمود زمانی که محتوای PMMA در کامپوزیت IPN افزایش یابد، الاستیسیته از ماده پلیمری نرم PU به حالت سخت شیشه ای در PMMA کاهش می یابد. می توان نتیجه گرفت که افزایش محتوای PMMA در تشکیل IPN، منجر به افزایش در مقاومت پلیمری IPN می شود مدول ذخیره بالاتر می تواند به افزایش محتوای PMMA در سنتز IPN نسبت داده شود. می توان ملاحظه نمود زمانی که محتوای PMMA در کامپوزیت IPN افزایش یابد، الاستیسیته از ماده پلیمری نرم PU به حالت سخت شیشه ای در PMMA کاهش می یابد. می توان نتیجه گرفت که افزایش محتوای PMMA در تشکیل IPN، منجر به افزایش در مقاومت پلیمری IPN می شود. از طرف دیگر همان طور که در بخش های قبلی گفته شد، زمانی که مقدار PMMA در IPN افزایش می یابد، تغییر فازی رخ می دهد، بخشی از IPN از فاز پیوسته به فاز دیسپرس تبدیل می شوند و منجر به افزایش سختی خواص مکانیکی می شود (۱۱). این موارد ممکن است دلیلی بر افزایش مدول در ۳۵/۶۵ IPN نسبت به دو IPN سنتزی دیگر باشد (بطور مثال ۱۵/۸۵ و ۲۵/۷۵). این مطالعه نشان داد که افزایش در مدول به برهم کنش و یا نفوذ پذیری فازها در IPN بستگی دارد [۱۶].

در شکل ۵ ب پیک مشاهده شده بیانگر ضریب اتلاف دو ماده

۵ مراجع

- [۱] Flory PJ. Molecular morphology in semicrystalline polymers. *Nature*. 1978;272(5650):226.
- [۲] LeBaron PC, Wang Z, Pinnavaia TJ. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied clay science*. 1999;15(1-2):11-29.
- [۳] Kim SC, Klempner D, Frisch K, Frisch H. Polyurethane interpenetrating polymer networks. 3. Viscoelastic properties of polyurethane-poly (methyl methacrylate) interpenetrating polymer networks. *Macromolecules*. 1977;10(6):1187-91.
- [۴] Kohlhoff D, Ohshima M. Open Cell Microcellular Foams of Polylactic Acid (PLA)-based Blends with Semi-Interpenetrating Polymer Networks. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2011;296(8):770-7.
- [۵] Ting R, CAPPS R, Klempner D. Acoustical properties of some interpenetrating network polymers-Urethane- epoxy networks. *Sound and vibration damping with polymers*. 1990:366-81.
- [۶] Merlin DL, Sivasankar B. Synthesis and characterization of semi-interpenetrating polymer networks using biocompatible polyurethane and acrylamide monomer. *European Polymer Journal*. 2009;45(1):165-70.
- [۷] Lee JH, Kim SC. Synthesis and thermal properties of polyurethane, poly (butyl methacrylate), and poly (methylmethacrylate) multi-component IPN's. *Polymer journal*. 1984;16(6):453.
- [۸] Jajam K, Bird S, Auad M, Tippur H. Tensile, fracture and impact behavior of transparent Interpenetrating Polymer Networks with polyurethane-poly (methyl methacrylate). *Polymer Testing*. 2013;32(5):889-900.
- [۹] Bird S. Interpenetrating polymer networks with polyurethane and methacrylate-based polymers 2013.
- [۱۰] Jia Q, Zheng M, Shen R, Chen H. Synthesis, characterization and properties of organoclay-modified polyurethane/epoxy interpenetrating polymer network nanocomposites. *Polymer international*. 2006;55(3):257-64.
- [۱۱] Tsai MH, Huang SL, Chang PH, Chen CJ. Properties and pervaporation separation of hydroxyl-terminated polybutadiene-based polyurethane/poly

تهیه و پارامترهای موثر بر تشکیل آن نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. اثر نسبت اجزا پلیمری بر خواص میرایی، مورفولوژی و صوتی پرداخته شد و بهینه گردید. بدین منظور ابتدا پیش پلیمرهای یورتانی و آکریلاتی تهیه گردید و سپس برای بررسی اثر ترکیب درصد اجزا بر خواص فیزیکی و مکانیکی، نمونه های IPN با نسبت های متفاوت ۳۵-۶۵، ۲۵-۷۵، ۱۵-۸۵ تهیه گردید و با نمونه های خالص PU و PMMA مقایسه شد. مشخص گردید که نمونه فوم با نسبت ۷۵/۲۵ به علت نفوذ مناسب زنجیرهای هر دو پلیمر، افزایش سازگاری اجزا و کاهش نقص های موجود در هر یک از اجزای خالص، سطح مناسب، بهترین خواص مکانیکی و میرایی صوتی را دارا است. پس می توان نتیجه گرفت با تشکیل فوم IPN، میرایی موثر افزایش، در نتیجه مواد کامپوزیتی جدید با خواص میرایی صوتی بهتر تشکیل می شود. همچنین با تغییر نسبت اجزای پلیمری، می توان موادی با قابلیت جذب صوتی و میرایی برای حل مشکل آلودگی صوتی تهیه کرد.

(methyl methacrylate) interpenetrating networks membranes. Journal of applied polymer science. 2007;106(6):4277-86.

[۱۲] Chen Q, Ge H, Chen D, He X, Yu X. Investigation on damping behavior and morphology of polyurethane/polymethacrylates and polyacrylates interpenetrating polymer networks. Journal of applied polymer science. 1994;54(9):1191-7.

[۱۳] Moradi G, Nassiri P, Ershad-Langroudi A, Monazzam MR. Acoustical, damping and thermal properties of polyurethane/poly (methyl methacrylate)-based semi-interpenetrating polymer network foams. Plastics, Rubber and Composites. 2018;47(5):221-31.

[۱۴] Chen S, Wang Q, Wang T. Damping, thermal, and mechanical properties of montmorillonite modified castor oil-based polyurethane/epoxy graft IPN composites. Materials Chemistry and Physics. 2011;130(1-2):680-4.

[۱۵] Grates J, Thomas D, Hickey E, Sperling L. Noise and vibration damping with latex interpenetrating polymer networks. Journal of Applied Polymer Science. 1975;19(6):1731-43.

[۱۶] Akay M, Rollins S, Riordan E. Mechanical behaviour of sequential polyurethane-poly (methyl methacrylate) interpenetrating polymer networks. Polymer. 1988;29(1):37-42.

[۱۷] Kong X, Narine SS. Physical properties of sequential interpenetrating polymer networks produced from canola oil-based polyurethane and poly (methyl methacrylate). Biomacromolecules. 2008;9(5):1424-33.