

## بررسی ویژگی‌های آکوستیکی نانو کامپوزیت پلیمری با خصوصیات توام جاذب و عایق صوتی

روح اله حاجی زاده<sup>۱</sup>، علی خوانین<sup>۲\*</sup>، احمد جنیدی جعفری<sup>۳</sup>، محمد برمر<sup>۴</sup>، سمیه فرهنگ دهقان<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup> مرکز تحقیقات تکنولوژی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

<sup>۵</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۰

### چکیده

**مقدمه:** کنترل مبتنی بر جذب و عایق بندی یکی از انواع روش های کنترل فنی و مهندسی صدا می باشد. در جاهایی که بتوانیم از تاپلی استفاده کنیم که هم بتواند به عنوان جاذب صوت و هم ویژگی عایق صوت داشته باشد باعث می شود میدان صوتی در قسمت منبع صوتی به سمت میدان آزاد سوق داده شود و همچنین باعث افزایش افت انتقال صوت به بخش های دیگر شود. این مطالعه به منظور ارتقاء خصوصیات آکوستیکی فوم پلی یورتان نرم با خصوصیات توام جاذب و عایق صوتی صورت گرفت.

**روش کار:** برای بهینه سازی افت انتقال و ضریب جذب صوت توام و تعیین طرح آزمایش از نرم افزار Expert Design از طریق روش سطح پاسخ استفاده شد. در این طرح، پارامترهای ضخامت، فاصله هوایی در پشت تایل آکوستیکی، میزان نانوالیاف پلی آکریلونیتریل (PAN NF)، پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF NF) و نانوذرات خاک رس به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شد. نانو الیاف پلی آکریلونیتریل و پلی وینیلیدین فلوراید با استفاده از تکنیک الکترورسی ساخته شد. نانوذرات خاک رس با قطر ۱-۲ نانومتر از نوع مونتمریلونیت از شرکت سیگما آلدریچ تهیه شد. طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Expert Design 7 تعیین گردید. ۵۰ نمونه نانو کامپوزیت بر اساس ران های آزمایشی ساخته شدند. اندازه گیری افت انتقال صوت براساس استاندارد ASTM E2611-09 و اندازه گیری ضریب جذب بر اساس استاندارد ISO10534-2 با استفاده از دستگاه امپدانس تیوب BSWA SW477 550005 صورت گرفت. کامپوزیت های بهینه برای هر محدوده فرکانسی تعیین شدند.

**یافته ها:** بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در محدوده فرکانسی پایین و میانی در ران آزمایشی که فوم پلی یورتان حاوی ۱/۵ درصد نانوذرات خاک رس، ۰/۵ درصد PAN NF، ۱/۵ درصد PVDF NF، ضخامت ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی ۱/۵ سانتیمتر بود بدست آمد (به ترتیب ۲/۰۲ و ۰/۶۴). نانو کامپوزیت های دارای بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام نسبت به فوم پلی یورتان خالص بودند و در محدوده فرکانسی پایین، میانی و بالا به ترتیب ۲/۰۲، ۱/۹۱ و ۲/۵۳ برابر دارای ضریب جذب و افت انتقال توام بالاتری بودند. با افزایش ضخامت و فاصله هوایی ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در همه محدوده های فرکانسی افزایش یافت. در ضخامت ۲ سانتیمتر، با افزایش هر دو نانوالیاف، ضریب جذب و افت انتقال صوت توام افزایش یافت. بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام زمانی اتفاق افتاد که هر دو نانوالیاف در حداکثر مقدار خود بودند.

**نتیجه گیری:** این مطالعه نشان داد که اضافه کردن نانوذرات خاک رس، نانو الیاف پلی آکریلونیتریل و نانوالیاف پلی وینیلیدین فلوراید به فوم پلی یورتان باعث افزایش ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در مقایسه با فوم پلی یورتان خالص می شود. می توان از نانو کامپوزیت های بهینه در بخش هایی که بطور همزمان نیاز به جذب و کاهش انتقال صدا می باشند، استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** جذب و افت انتقال توام، نانو کامپوزیت، فوم پلی یورتان، نانوالیاف و نانوذرات

انتخاب مواد نقش مهمی در جذب و افت انتقال صوت در یک ساختار بازی می‌کند. بنابراین، تلاش‌های زیادی در طی سال‌های اخیر برای درک مکانیزمی که مواد، موج صوتی بر خوردی را از طریق جذب و افت انتقال کاهش می‌دهد و توسعه مواد کنترل‌کننده صوت انجام شده است. از جمله این مواد نانوکامپوزیت‌ها هستند که در واقع مواد مرکبی می‌باشند که حداقل یکی از اجزای تشکیل‌دهنده آن با ابعادی در محدوده نانومتری، در فاز دیگری که پیوسته است به صورت متفرق توزیع شده باشد (۱۰، ۱۱).

کنترل مبتنی بر جذب و عایق بندی یکی از انواع روش‌های کنترل فنی و مهندسی صدا است. اساس کار این روش کنترلی این است که از طریق افزایش ضریب جذب سطوح کارگاه، میزان صدای انعکاسی کم شده و در نتیجه صدای کلی کاهش می‌یابد (۱۲). همچنین با عایق بندی مناسب، باعث جلوگیری از افزایش مواجهه افراد دیگر بخش‌ها با صدا شد. در جاهایی که بتوانیم از تایل‌های استفاده کنیم که هم بتواند به عنوان جاذب صوت و هم ویژگی عایق صوت داشته باشد استفاده شود باعث می‌شود که میدان صوتی در قسمت منبع صوتی را به سمت میدان آزاد سوق دهیم و همچنین باعث افزایش افت انتقال صوت به بخش‌های دیگر شویم.

در میان پلیمرها، پلی‌یورتان به دلیل ارزان بودن، راحتی ایجاد فوم و تخلخل برای این مطالعه انتخاب شد. همچنین نانوالیاف حاصل از پلیمرها، هم به دلیل ایجاد محیط‌های پر پیچ و خم در مسیر انتقال صوت و افزایش سطح تماس، باعث میرایی بیشتر صوت می‌شود. مطالعه‌ای که Gayathri و همکاران انجام دادند نشان داد که نانو خاک رس باعث افزایش جذب در تمامی فرکانس‌ها به خصوص در فرکانس‌های پایین در فوم پلی‌یورتان می‌شود (۱۳). هدف از این مطالعه ساخت تایل آکوستیکی با خصوصیات توام جاذب و عایق صوتی با استفاده از فوم پلی‌یورتان، نانوذرات خاک رس، PAN و NF و PVDF NF می‌باشد.

صنعتی شدن سبب گردیده تا نیروی انسانی شاغل در خیلی از مواقع در تماس با وسایل ماشینی و تجهیزات قرارگیرد که همین مسئله مخاطرات گوناگونی را برای انسان پدید می‌آورد. یکی از این مخاطرات، انتشار صدای آزار دهنده ناشی از فعالیت ماشین‌آلات و دستگاه‌های مختلف است. صدا یکی از عوامل زیان‌آور فیزیکی در بسیاری از محیط‌های کاری و محیط زیست می‌باشد (۱-۳). مواجهه طولانی مدت با صدا میتواند باعث افت شنوایی افراد مواجهه یافته گردد. محیط پر سر و صدا موجب بیدقتی در فعالیتهای ذهنی، تاثیرات قلبی - عروقی، اختلال در کارهای فکری و همچنین باعث اختلال در مکالمات و تفهیم آنها می‌شود. صدا میتواند از طریق منابع مختلف مثل کارخانجات صنعتی، ترافیک جاده‌ها و مناطق تجاری حاصل شود (۴، ۵). همچنین مواجهه با صدا باعث افزایش حوادث و غیبت از کار و کاهش بهره‌وری کارگران در معرض می‌شود (۶). در محیط‌های صنعتی، علاوه بر توان صوتی مجموع منابع موجود در محیط کار، انعکاس صدا از سطوح داخلی و صدای منتقل شده از بخش‌های دیگر می‌تواند نقش تشدید کننده داشته باشد. کنترل صدای انعکاس یافته در اطراف منابع صوتی و صدای منتقل شده از بخش‌های دیگر می‌تواند از افزایش تراز فشار صوت جلوگیری کند. وجود سطوح انعکاسی در اطراف منابع صوتی باعث می‌شود که تراز فشار صوت به علت انعکاس مکرر افزایش یابد (۷). جذب صدا و جلوگیری از انتقال آن یکی از ملزومات راحتی بشر در جوامع امروزی می‌باشد (۸).

نانو فن‌آوری در تولید مصالح مختلف کاربردهای فراوانی دارد که می‌تواند باعث کاهش وزن، افزایش مقاومت، افزایش سطح، افزایش طول عمر، خواص خود تمیز شونده‌گی و ویژگی‌های دیگر می‌شود. در سال‌های اخیر نانو مواد در ساخت جاذب‌ها و عایق‌های صوتی رشد فزاینده‌ای به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد داشته است (۹).

## روش کار

فاصله ۱۵ سانتیمتر تا کالکتر، ولتاژ ۱۰ کیلوولت و نرخ تزریق ۱ cc/hr الکتروریسی شد.

برای ساخت کامپوزیت های مورد نظر، PAN NF و PVDF NF به پلی ال آماده که با سیستم MDI برای ساخت آن استفاده شده بود اضافه شد. سپس به مدت دو ساعت با همزن مغناطیسی (استیرر) هم زده شد و به مدت ۳۰ دقیقه در داخل التراسونیک قرار داده شد. نانوذرات خاک رس به ایزوسیانات اضافه شد و بر روی استیرر به مدت ۲ ساعت همزده شد سپس به مدت ۳۰ دقیقه در داخل التراسونیک قرار داده شد (۱۴). در نهایت پلی ال حاوی نانو الیاف پلی آکریلونیتریل و پلی ونیلیدین فلوراید با ایزوسیانات حاوی نانوذرات خاک رس در داخل قالب با استفاده از همزن مکانیکی مخلوط گردید و کامپوزیت های مورد نظر ساخته شد.

پس از ساخت نمونه های مورد نظر برای هر محدوده فرکانسی، میانگین میزان افت انتقال و ضریب جذب بهینه به صورت توام (با در نظر گرفتن ۷۰٪ ارزش ضریب جذب و ۳۰٪ ارزش افت انتقال) در سه محدوده ی فرکانسی پایین، متوسط و بالا از طریق دستگاه امپدانس تیوب اندازه گیری شد. مدل های افت انتقال -ضریب جذب توام و همچنین مقادیر بهینه توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت و روش سطح پاسخ برای هر محدوده فرکانسی تعیین شد. به منظور دست یابی به نمونه بهینه از نظر میزان جذب و افت انتقال به صورت توام، با توجه به میزان پراکندگی بالای افت انتقال نسبت به میزان جذب و هم مقیاس نبودن آنها ابتدا هر یک از نمونه ها را با توجه میانگین و انحراف معیار مجموعه نمونه ها استانداردسازی کرده و سپس نمونه ای را که میزان جذب و افت انتقال بالایی به صورت همزمان دارد به عنوان نمونه بهینه انتخاب خواهیم کرد. نمره های استاندارد، نمره ها را نسبت به میانگین تعیین می کنند. به عبارت دیگر این نمره ها نشان می دهند که یک نمره در بالا یا پائین میانگین در چه محلی واقع شده اند. نمره استاندارد یک نمره بنیادی است و عبارت است از حاصل تقسیم انحراف خام از میانگین بر انحراف معیار که آن را

این مطالعه به صورت تجربی به منظور ارتقاء خصوصیات جذب و عایق صوتی توام فوم پلی یورتان نرم انجام شد. برای بهینه سازی افت انتقال و ضریب جذب صوت توام و تعیین طرح آزمایش از نرم افزار Expert Design (Version 7, Stat-Ease, Minneapolis) از طریق روش سطح پاسخ استفاده شد. در این طرح، پارامترهای ضخامت ۰/۵ تا ۲/۵ سانتیمتر، فاصله هوایی ۰ تا ۲ سانتیمتر در پشت تابل آکوستیکی، میزان نانوالیاف پلی آکریلونیتریل (PAN NF)، پلی ونیلیدین فلوراید (PVDF NF) و نانوذرات خاک رس ۰ تا ۲٪ وزنی به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شد و افت انتقال و ضریب جذب صوت توام در فرکانس های پایین (۵۰۰-۶۳۰ هرتز)، فرکانس های متوسط (۱۶۰۰-۵۰۰ هرتز) و فرکانس های بالا (۶۳۰۰-۱۶۰۰ هرتز) به عنوان متغیر خروجی یا پاسخ در نظر گرفته شد.

در این مطالعه نانوذرات خاک رس شرکت Sigma-Aldrich Chemie GmbH از نوع مونت مونتمریلونیت با قطر ۱-۲ نانو متر، پلی ال با سیستم MDI با کد HR-338 و ایزوسیانات با کد ۸۰۰۱ از شرکت مهندسی مواد مکرر، پلی آکریلونیتریل (PAN) شرکت پلی آکریل اصفهان، پلی ونیلیدین فلوراید (PVDF) شرکت فلوراین، حلال دی متیل فرم آمید و دی متیل استامید ساخت شرکت مرک، حلال استون شرکت دکتر مجللی استفاده گردید.

PAN با استفاده از حلال DMF با غلظت ۱۰٪، ولتاژ مثبت ۲۶ ولت، ولتاژ منفی ۲۵- ولت، فاصله حوضچه محلول تا فویل جمع کننده نانوالیاف ۱۳ سانتیمتر و دمای محیط الکتروریسی ۵±۳۰ درجه سانتیگراد با دستگاه الکتروریسی ساخت شرکت فن آوران نانومقیاس (ایران) به روش غوطه وری الکتروریسی شد. PVDF با استفاده از حلال حاوی ۷۰٪ DMAC و ۳۰٪ استون با استفاده از دستگاه الکتروریسی محلول ساخت شرکت فن آوران نانومقیاس (ایران) به روش تزریقی با غلظت ۳۰٪،

با Z نشان می دهند

فرکانس های بالا کاربرد دارد.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

X: مقدار ضریب افت انتقال یا ضریب جذب در یک سوم اکتاوباند فرکانس های مورد نظر در محدوده مورد نظر (پایین، میانی و بالا)

$\mu$ : میانگین کل نمونه ها

$\sigma$ : انحراف معیار نمونه ها

هنگامی که کلیه نمره ها به نمره استاندارد تبدیل می شوند، توزیع جدید بدست می آید که دارای انحراف استاندارد یک و میانگین صفر هستند در حالیکه شکل توزیع نمره های استاندارد شده همان شکل توزیع نمره های اصلی است.

برای تعیین میزان افت انتقال و ضریب جذب صوت به صورت توام به صورت زیر انجام می شود:

$$\text{مقدار افت انتقال و ضریب جذب صوت توام} = \text{افت انتقال}(0.3Z) + \text{ضریب جذب}(0.7Z)$$

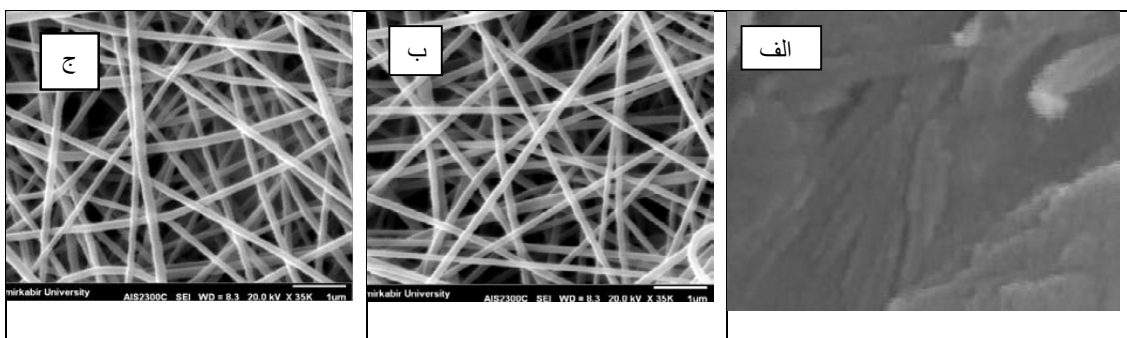
اندازه گیری افت انتقال صوت با استفاده از استاندارد ASTM E2611-09 و اندازه گیری ضریب جذب بر اساس استاندارد ISO10534-2 (1998) و با استفاده از دستگاه امپدانس تیوب ساخت شرکت BSWA SW477 550005 کشور چین شرکت BSWA SW477 550005 انجام می شود. لوله های بزرگ برای اندازه گیری افت انتقال و ضریب جذب در فرکانس های پایین و لوله های با قطر کوچکتر برای اندازه گیری افت انتقال و ضریب جذب در

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار Design Expert7. ارائه مدل ریاضی چند جمله ای برای متغیرهای مورد بررسی به منظور پیش بینی متغیرهای پاسخ مدنظر، تعیین شرایط بهینه متغیرهای آزمایش جهت بیشینه و کمینه کردن مقدار متغیرهای پاسخ، و تجزیه و تحلیل اثرات مستقیم و تداخل بین پارامترها با کمک این نرم افزار صورت گرفت (۱۵، ۱۶).

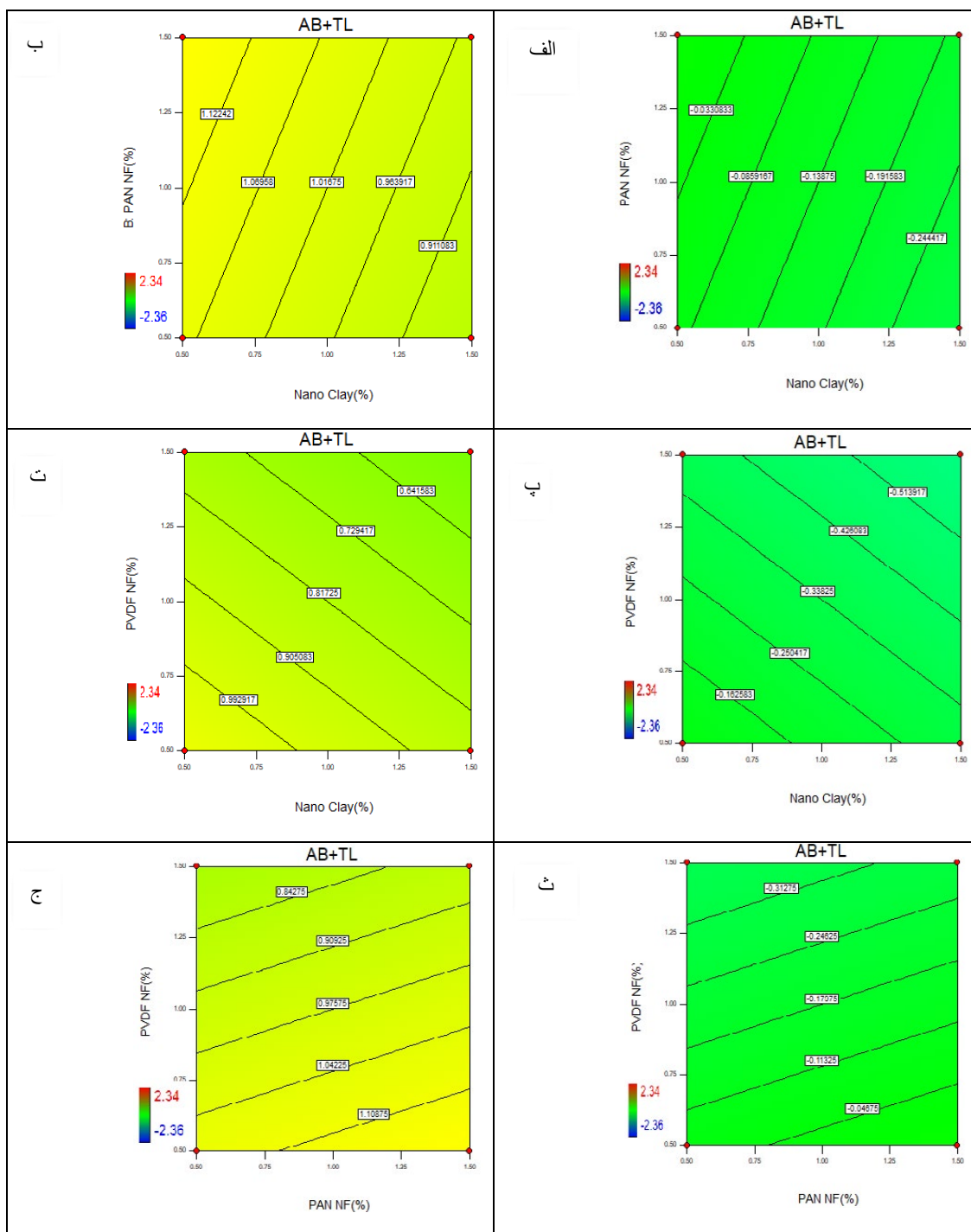
### یافته ها

با شرایط مذکور الکترورسی، قطر PAN NF و PVDF NF الکترورسی شده به ترتیب  $20 \pm 85$  و  $20 \pm 96$  بدست آمد. نمونه ای از اشکال نانوالیاف و نانوذرات مورد استفاده در نانوکامپوزیت ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در محدوده فرکانسی پایین در ران آزمایشی که فوم پلی یورتان حاوی ۱/۵ درصد نانوذرات خاک رس، ۰/۵ درصد PAN NF، ۱/۵ درصد PVDF NF، ضخامت ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی ۱/۵ سانتیمتر بود بدست آمد (۲/۰۲) که در مقایسه با فوم پلی یورتان خالص (۰/۵۵) ۳/۶۷ برابر بیشتر بود. شکل ۲ تاثیر نانوذرات خاک رس و PAN NF و PVDF NF به صورت توام بر افت انتقال و ضریب جذب صوت به صورت توام در فرکانس های پایین در ضخامت ۱ سانتی متر و ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی ۱/۵ سانتیمتر را



شکل ۱. SEM گرفته شده از نانوالیاف و نانوذرات الف: نانوذرات خاک رس ب: PAN NF ج: PVDF NF



شکل ۲. پلات کنتروری از تاثیر تعاملی مواد افزودنی بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس های پایین الف: نانوذرات خاک رس و 1.5cm فاصله هوایی (air gap) در ضخامت 1cm و فاصله هوایی 1.5cm ب: نانوذرات خاک رس و 2cm فاصله هوایی 1.5cm در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm ج: نانوذرات خاک رس و 2cm فاصله هوایی 1.5cm در ضخامت 1cm د: نانوذرات خاک رس و 2cm فاصله هوایی 1.5cm در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm ه: نانوذرات خاک رس و 2cm فاصله هوایی 1.5cm در ضخامت 1cm و فاصله هوایی 1.5cm

۰/۵ سانتیمتر بود بدست آمد (۱/۲۹) که در مقایسه با فوم پلی یورتان خالص با شرایط ضخامت و فاصله هوایی یکسان (۰/۸۴-) ۲/۵۳ برابر بیشتر بود. شکل ۴ اثر تعاملی نانوذرات خاک رس و PAN NF و PVDF NF بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس های بالا در ضخامت ۱ سانتی متر و ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی ۱/۵ سانتیمتر را نشان می دهد. طبق این اشکال بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در صورت استفاده توام دو جزء از پر کننده ها، زمانی اتفاق می افتد که نانوخاک رس و PAN NF و همچنین نانو خاک رس و PVDF NF به صورت توام استفاده شده و میزان نانوذرات خاک رس در محدوده ۱٪ و PAN NF و PVDF NF بیشترین مقدار در رنج مورد بررسی باشند.

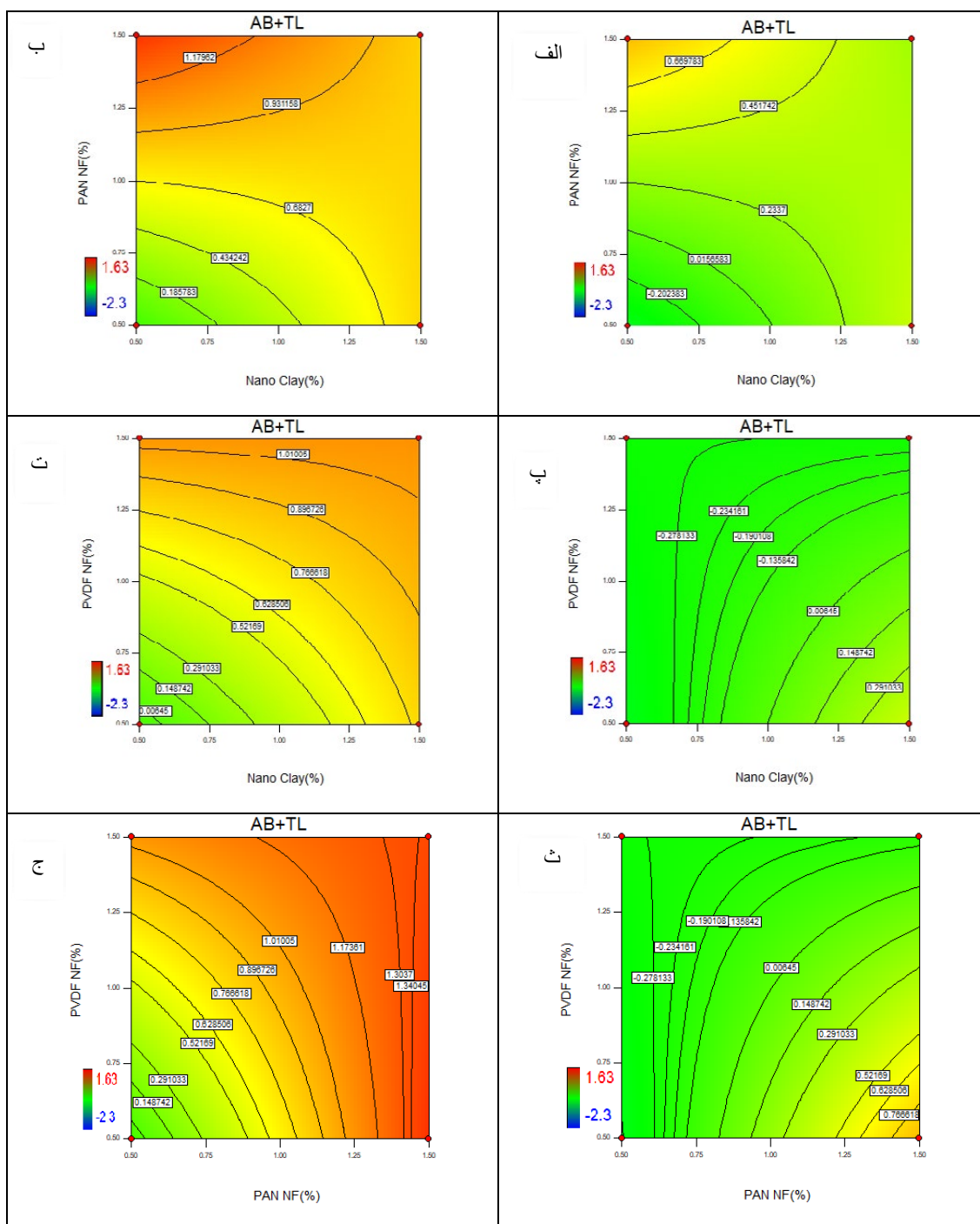
مدل سازی بر اساس داده های ران های آزمایشی انجام شد. برای افزایش اعتبار مدل ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس های میانی فاکتورهای CE, AD و BE، در فرکانس های بالا فاکتورهای AE, AB و CE که از نظر آماری معنی دار نبودند از مدل حذف گردیده اند. نرم افزار Design Expert مدل رابطه خطی بین افت انتقال و ضریب جذب صوت توام و متغیرهای ورودی در فرکانس های پایین، مدل رابطه ۲ عاملی (2FI) در فرکانس های میانی و مدل رابطه درجه دوم در فرکانس های بالا پیشنهاد نمود.

می توان از نرم افزار Design-Expert به منظور پیش بینی ترکیبات بهینه با استفاده از متغیرهای ورودی برای رسیدن به حداکثر، حداقل و یا مقدار خاصی از متغیر پاسخ استفاده کرد. بعد از کسب نتایج فوق، به منظور شرایط بهینه ضریب جذب و افت انتقال صوت توام، بهینه سازی با کمک این نرم افزار صورت گرفت. در دستورالعمل بهینه سازی نرم افزار، متغیرهای پاسخ در رنج یا گستره "تنظیم شدند. جدول ۲ برخی از راه حل های پیشنهادی در سطوح مختلف مورد نیاز از متغیرهای پاسخ که ضریب جذب و افت انتقال صوت توام بالا در فرکانس های پایین،

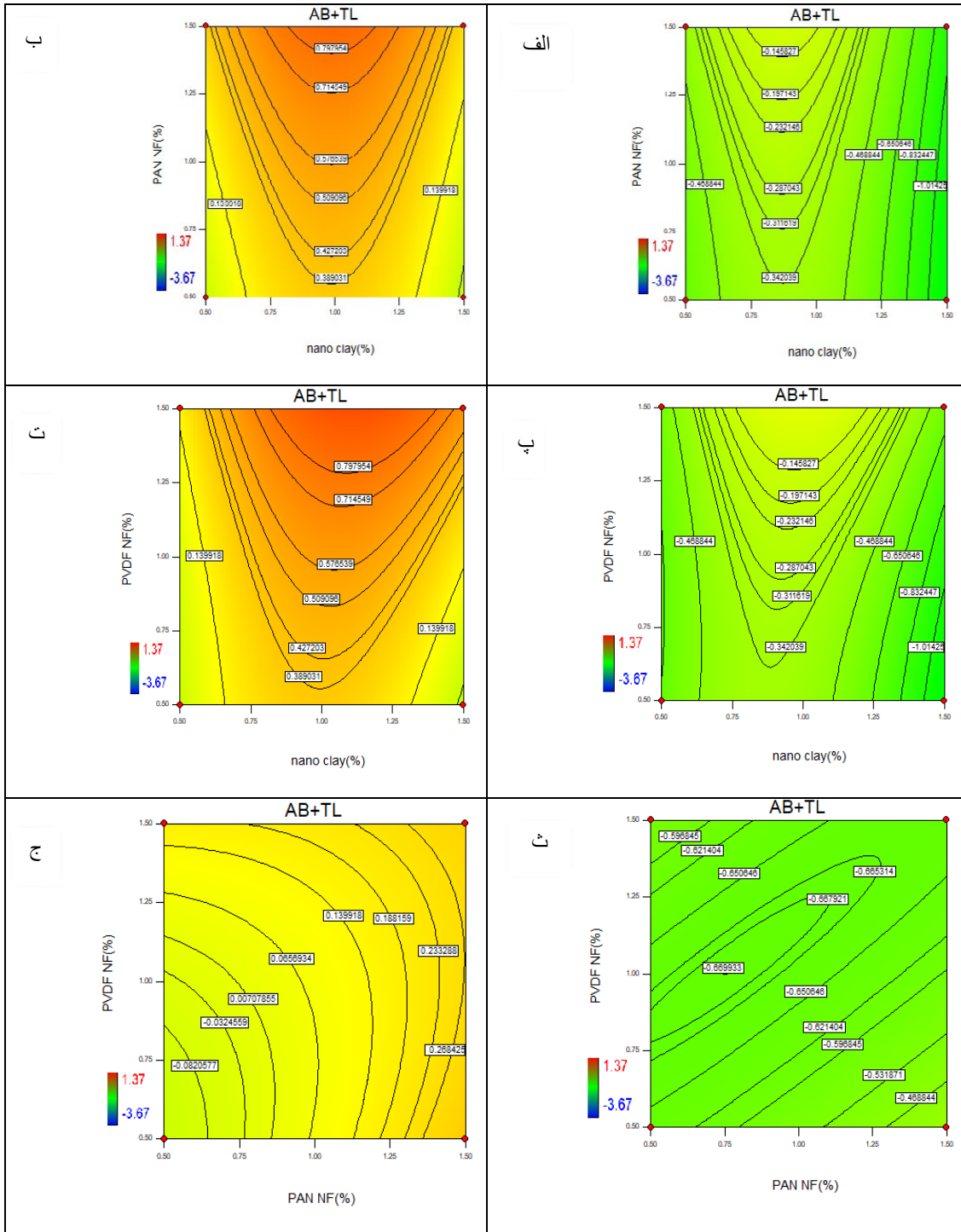
نشان می دهد. طبق شکل ۲ با افزایش همزمان نانوذرات خاک رس و PAN NF، افت انتقال و ضریب جذب به صورت توام کاهش می یابد ولی افت انتقال و ضریب جذب توام زمانی بیشترین مقدار را دارد که PAN NF بیشترین و نانوذرات خاک رس کمترین مقدار باشد. با افزایش همزمان نانوذرات خاک رس و PVDF NF، افت انتقال و ضریب جذب توام کاهش می یابد. با افزایش همزمان استفاده از PAN NF و PVDF NF افت انتقال و ضریب جذب صوت توام کاهش می یابد. بیشترین افت انتقال و ضریب جذب صوت توام زمانی بدست می آید که PAN NF بیشترین و PVDF NF کمترین مقدار باشد.

بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در محدوده فرکانسی میانی در ران آزمایشی که فوم پلی یورتان حاوی ۱/۵ درصد نانوذرات خاک رس، ۰/۵ درصد PAN NF، ۱/۵ درصد PVDF NF، ضخامت ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی ۱/۵ سانتیمتر بود بدست آمد (۰/۶۴) که در مقایسه با فوم پلی یورتان خالص با همان ضخامت و فاصله هوایی (۰/۷-) ۱/۹۱ برابر بیشتر بود. شکل ۳ تاثیر نانوذرات خاک رس و PAN NF و PVDF NF بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس های میانی در ضخامت ۱ سانتی متر و ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی ۱/۵ سانتیمتر را نشان می دهد. بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام زمانی بدست می آید که در صورت استفاده همزمان نانوالیاف PAN NF و PVDF NF، هر دو نانوالیاف بیشترین مقدار و ضخامت ۲ سانتیمتر باشند. و همچنین در صورت استفاده توام از نانوذرات خاک رس و PAN NF، بیشترین ضریب جذب و افت انتقال توام زمانی اتفاق می افتد که PAN NF بیشترین و نانو خاک رس کمترین مقدار و ضخامت ۲ سانتیمتر باشد.

بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در محدوده فرکانسی بالا در ران آزمایشی که فوم پلی یورتان حاوی ۱/۵ درصد نانوذرات خاک رس، ۰/۵ درصد PAN NF، ۰/۵ PVDF NF، ضخامت ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی



شکل ۳. پلات کنتروری از تاثیر تعاملی مواد افزودنی بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس های میانی الف: نانوذرات خاک رس و PAN NF در ضخامت 1cm و فاصله هوایی (air gap) 1.5cm ب: نانوذرات خاک رس و PAN NF در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm پ: نانوذرات خاک رس و PVDF NF در ضخامت 1cm و فاصله هوایی 1.5cm ت: نانوذرات خاک رس و PVDF NF در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm ث: PAN NF و PVDF NF در ضخامت 1cm و فاصله هوایی 1.5cm ج: PAN NF و PVDF NF در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm



شکل ۴. پلات کنٹوری از تاثیر تعاملی مواد افزودنی بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس های بالا الف: نانوذرات خاک رس و PAN در NF ضخامت 1cm و فاصله هوایی 1.5cm (air gap) ب: نانوذرات خاک رس و PAN NF در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm پ: نانوذرات خاک رس و PVDF NF در ضخامت 1cm و فاصله هوایی 1.5cm ت: نانوذرات خاک رس و PVDF NF در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm ث: PAN NF و PVDF NF در ضخامت 1cm و فاصله هوایی 1.5cm ج: PAN NF و PVDF NF در ضخامت 2cm و فاصله هوایی 1.5cm



جدول ۱. مدل‌های بدست آمده در فرکانس‌های مختلف

معادله	نوع مدل	فرکانس
$(AB+TL)^* = +0.001 - 0.11A^{**} + 0.047B^{***} - 0.15C^{****} + 0.58D^{*****} + 0.29E^{*****}$	خطی	پایین
$(AB+TL) = +0.0012 - 0.10A + 0.041B - 0.19C + 0.51D + 0.33E - 0.36AB - 0.21AC - 0.041AE - 0.30BC + 0.046BD + 0.24CD - 0.046DE$	2FI	میانی
$(AB+TL) = +0.37 - 0.018A + 0.072B + 0.15C + 0.46D - 0.12E + 0.13AC + 0.13AD - 0.088BC + 0.062BD + 0.023BE + 0.057CD + 0.039DE - 0.53A^2 + 0.034B^2 + 0.064C^2 - 0.093D^2 + 0.073E^2$	درجه دوم	بالا

\*ضریب جذب و افت انتقال صوت توام \*\*نانو خاک رس \*\* PAN NF/ % \*\*\*\*ضخامت (cm) \*\*\*\*\*فاصله هوایی (cm)

جدول ۲. برخی راه‌حل‌های پیشنهادی در مرحله بهینه‌سازی ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در محدوده‌های فرکانسی مختلف توسط نرم افزار Design-Expert

فرکانس	نانوذرات خاک رس (%)	PAN NF (%)	PVDF NF (%)	ضخامت (cm)	فضای خالی (cm)	ضریب جذب و افت انتقال توام
فرکانس پایین	۰/۵	۱/۵	۰/۵۲	۲	۱/۵	۱/۱۶
	۰/۵	۱/۳۲	۰/۵	۲	۱/۵	۱/۱۵
فرکانس میانی	۰/۵۵	۱/۵	۰/۵	۲	۱/۵	۱/۳۹
	۰/۵	۱/۵	۰/۵	۱/۹۶	۱/۳۴	۱/۳
فرکانس بالا	۱/۰۸	۱/۴۷	۱/۵	۲	۰/۵	۱/۲۳
	۱/۱۱	۱/۲۳	۱/۵	۲	۰/۵	۱/۱۹

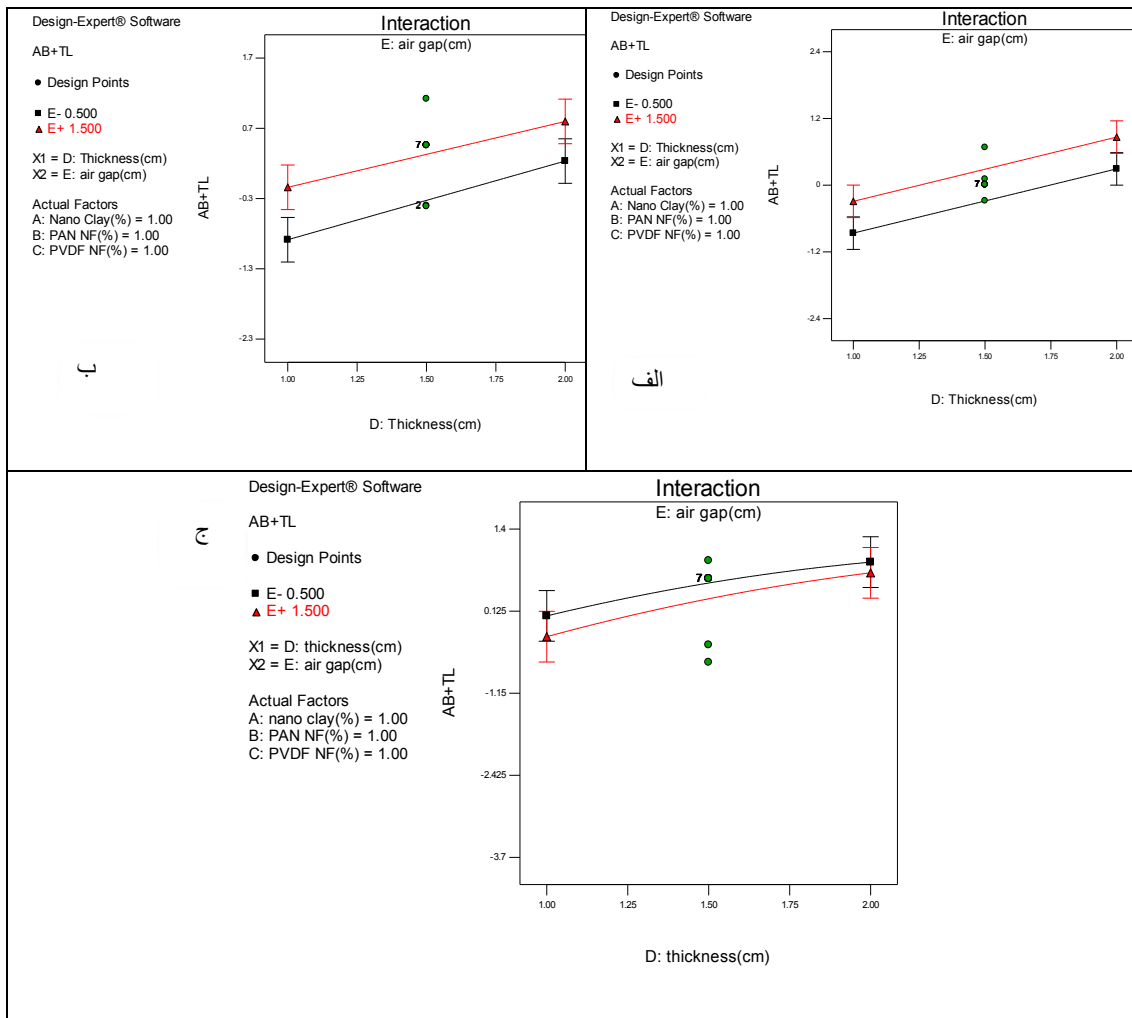
میانی و بالا داشت ارائه شده است.

شکل ۵ تاثیر ضخامت و فاصله هوایی بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در محدوده‌های فرکانسی پایین، میانی و بالا را نشان می‌دهد. طبق شکل زیر با افزایش ضخامت و فاصله هوایی، ضریب جذب و افت انتقال صوت توام افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت و فاصله هوایی، ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس‌های پایین و میانی بیشتر از فرکانس‌های بالا افزایش می‌یابد.

### بحث

طبق نتایج با افزایش فاصله هوایی ضریب جذب صوت در فرکانس‌های پایین، میانی و بالا افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مطالعه نشان داد که افزایش ضخامت و فاصله هوایی در فرکانس‌های میانی و پایین تاثیر بیشتری نسبت به فرکانس‌های بالا بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام دارد. مطالعه‌ای که Liu و همکاران برای بررسی تخلخل ساختاری بر ضریب جذب

الیاف پارچه‌ای در فرکانس‌های پایین انجام دادند نشان داد که با افزایش فاصله هوایی، ضریب جذب افزایش می‌یابد (۱۷). مطالعه‌ای که Ersoy و همکاران برای بررسی خصوصیات آکوستیکی پسماندهای چای صنعتی انجام دادند نشان داد با افزایش ضخامت، ضریب جذب افزایش می‌یابد (۸). مطالعه‌ای که Han و همکاران برای بررسی رفتار جذب آکوستیکی سلول‌های باز فوم آلومینیوم انجام دادند به این نتیجه رسیدند که در صورت استفاده از لایه‌های هوا پشت جاذب فوم آلومینیوم، میزان جذب بیشتر می‌شود (۱۸). مطالعه‌ای که seddeq و همکاران برای بررسی خصوصیات جذب صوتی مواد الیاف بازیافتی شامل الیاف طبیعی، الیاف مصنوعی و الیاف لیگنوسلوازی کشاورزی (باگاس و کنف) انجام دادند نشان داد که با افزایش ضخامت، ضریب جذب در همه فرکانس‌ها افزایش می‌یابد. همچنین این مطالعه نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌ها پیک جذب به سمت فرکانس‌های پایین حرکت می‌کند (۱۹). ضریب جذب صوت زمانی



شکل ۵. تاثیر فضای خالی و ضخامت بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام الف: فرکانس های پایین ب: فرکانس های میانی ج: فرکانس های بالا

ماندن بقیه متغیرها در مقدار متوسط، با افزایش ضخامت میزان افت انتقال صوت در همه محدوده های فرکانسی افزایش می یابد. اما با افزایش ضخامت، افت انتقال صوت به همان میزان افزایش نمی یابد. مطالعه ای که Hai-jun و همکاران (۲۱) Antonio و همکاران (۲۲) Asdrubali و همکاران (۲۳) انجام دادند نشان داد که با افزایش ضخامت و فاصله هوایی افت انتقال صوت افزایش می یابد مطالعات صورت گرفته و همچنین مطالعه حاضر نشان می دهد که ضخامت و فاصله هوایی یکی از متغیرهای مهم در طراحی و استفاده از عایق های صوتی می باشد. نتایج مطالعه نشان داد که PAN NF در صورت

موثر واقع می شود که ضخامت نمونه مواد متخلخل به یک دهم طول موج صوت برخوردی برسد. فاصله هوایی در پشت نمونه می تواند به جذب انرژی صوتی در فرکانس های میانی و پایین کمک کند بنابراین با افزایش فاصله هوایی جذب انرژی صوتی در طول موج های بلند افزایش می یابد (۱۹، ۲۰). همچنین با ایجاد فاصله هوایی پشت جاذب، پدیده رزونانس (resonance) در فرکانس های پایین تر رخ می دهد و باعث جذب بهتر صوت در فرکانس های پایین شود (۱۷). با مقایسه سمت راست و چپ نمودارهای شکل های ۲، ۳ و ۴ همچنین شکل ۵ آنالیز هایی که صورت گرفت در صورت ثابت

یکی از دلایل این امر می‌تواند به این علت باشد که در ضخامت‌های بالا، امواج صوتی با نانوالیاف زیادی برخورد دارد که باعث افزایش ضریب جذب و افت انتقال توام می‌شود. نانوذرات خاک رس به همراه یکی از نانوالیاف، باعث افزایش بیشتر دانسیته می‌شود. یکی از علت‌های تاثیر زیاد نانوذرات خاک رس و ضخامت در افزایش ضریب جذب و افت انتقال توام در فرکانس‌های میانی، افزایش افت انتقال در ناحیه کنترل از طریق جرم می‌باشد. با دوبرابر شدن ضخامت، دانسیته سطحی دو برابر می‌شود. در این ناحیه با دو برابر شدن دانسیته سطحی یا فرکانس افت انتقال  $6\text{ dB}$  افزایش می‌یابد (۲۵)

هنگامی که پرکننده‌ها در سلول یا داخل فوم قرار می‌گیرد افت انرژی به صورت گرما از طریق هیستریزس می‌تواند افزایش یابد زیرا سلول یا دیواره فوم باید تغییر شکل ناشی از امواج صوتی را بهبود ببخشند (۲۶). شکل ۴ اثر تعاملی نانوذرات خاک رس، PAN NF و PVDF بر ضریب جذب و افت انتقال صوت توام در فرکانس‌های بالا در ضخامت ۱ سانتی‌متر و ۲ سانتیمتر و فاصله هوایی ۱/۵ سانتیمتر را نشان می‌دهد. با افزایش هر دو نانوالیاف در ضخامت ۲ سانتیمتر ضریب جذب و افت انتقال توام افزایش می‌یابد بیشترین ضریب جذب و افت انتقال صوت توام زمانی اتفاق می‌افتد که هر دو نانوالیاف در حداکثر مقدار خود باشند. این نتایج نشان می‌دهد که در ضخامت‌های بیشتر، امواج صوتی بیشتر تحت تاثیر نانوالیاف قرار می‌گیرند و همچنین استفاده از نانوالیاف به همراه نانوذرات خاک رس تا حدی باعث افزایش ضریب جذب و افت انتقال صوت توام می‌شود ولی افزایش بیش از حد پرکننده‌ها باعث ایجاد اختلال در تشکیل فوم می‌شود که باعث کاهش کارایی نانوکامپوزیت می‌شود.

### نتیجه‌گیری

بررسی تاثیر نانو الیاف و نانوذرات بر خصوصیات آکوستیکی فوم پلی یورتان نرم نشان داد که اضافه کردن نانوذرات خاک رس، PAN NF و PVDF NF به این پلیمر

استفاده توام با نانوذرات خاک رس یا PVDF NF در کامپوزیت، افت انتقال و ضریب جذب صوت توام مناسبی ندارد. یکی از دلایل این امر به این دلیل می‌باشد که PAN NF دانسیته کمتری داشته و در نتیجه حجم زیادی دارد در صورت استفاده همزمان با پرکننده‌های دیگر باعث اختلال در تشکیل فوم می‌شود. دلیل دیگر به این خاطر می‌باشد که استفاده بیش از حد پرکننده‌ها، حجم سلول‌ها را کاهش می‌دهد که می‌تواند باعث کاهش جذب و افت انتقال در فرکانس‌های پایین شود (۲۴).

طبق نتایج، در فرکانس‌های میانی در صورت استفاده توام از نانوذرات خاک رس و PAN NF، با افزایش نانوذرات خاک رس و PAN NF، ضریب جذب و افت انتقال صوت توام افزایش می‌یابد. بیشترین ضریب جذب و افت انتقال توام زمانی اتفاق می‌افتد که PAN NF بیشترین و نانو خاک رس کمترین مقدار باشد. در صورت استفاده توام از نانوذرات خاک رس و PVDF NF، با افزایش نانو خاک رس و PVDF NF، در ضخامت ۱ سانتیمتر ضریب جذب و افت انتقال توام ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد ولی در ضخامت ۲ سانتیمتر افزایش می‌یابد. بیشترین ضریب جذب و افت انتقال توام در ضخامت ۱ سانتیمتر زمانی اتفاق می‌افتد که نانو خاک رس بیشترین و PVDF NF کمترین مقدار باشد ولی در ضخامت ۲ سانتیمتر بیشترین ضریب جذب و افت انتقال توام زمانی اتفاق می‌افتد که PVDF NF و نانو خاک رس بیشترین مقدار باشند. در صورت استفاده توام از PAN NF و PVDF NF، با افزایش PAN NF و PVDF NF، در ضخامت ۱ سانتیمتر ضریب جذب و افت انتقال توام ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد ولی در ضخامت ۲ سانتیمتر افزایش می‌یابد. بیشترین ضریب جذب و افت انتقال توام در ضخامت ۱ سانتیمتر زمانی اتفاق می‌افتد که PAN NF بیشترین و PVDF NF کمترین مقدار باشد ولی در ضخامت ۲ سانتیمتر بیشترین ضریب جذب و افت انتقال توام زمانی اتفاق می‌افتد که PAN NF و PVDF NF بیشترین مقدار باشند.

فوم و کاهش عملکرد آکوستیکی فوم پلی یورتان نرم می شود. همچنین پیشنهاد می شود در پژوهش های آینده تاثیر نانوالیاف PVDF و نانوذرات خاک رس بر خصوصیات ایزولاسیون صوتی دیگر مواد مورد بررسی قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان نامه دکترا می باشد. نویسندگان مراتب تشکر خود را از حمایت های مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس تهران اظهار می دارد.

باعث افزایش ضریب جذب و افت انتقال صوت توام می شود. در این پژوهش مشاهده شده است که می توان با استفاده از نانوذرات خاک رس، PVDF NF و PAN NF ضریب جذب و افت انتقال صوت فوم پلی یورتان نرم، در فرکانس های پایین، بالا را بیش از دو برابر و در فرکانس های پایین ۱/۹۲ برابر ارتقاء داد. نانوالیاف در ضخامت های بالا تاثیر بیشتری بر امواج صوتی و ارتقاء خصوصیات آکوستیکی ضریب جذب و افت انتقال صوت توام دارد. استفاده از نانوالیاف با دانسیته پایین، می تواند خصوصیات آکوستیکی فوم پلی یورتان نرم را هم در ضخامت های پایین و هم در ضخامت های بالا افزایش دهد. استفاده بیش از حد از پر کننده ها باعث ایجاد اختلال در تشکیل

### REFERENCES

- Mizoue T, Miyamoto T, Shimizu T. Combined effect of smoking and occupational exposure to noise on hearing loss in steel factory workers. *Occupational and environmental medicine*. 2003;60(1):56-9.
- Nassiri P, Koohpaei A, Zeraati H, Shalkouhi PJ. Evaluation of exposure to whole-body vibration and its health effects on train operators in Tehran-Andimeshk line, Iran. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*. 2009;28(4):285-94.
- Nassiri P, Koohpaei A, Zeraati H, Shalkouhi PJ. Train passengers comfort with regard to whole-body vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2011;30(2):125-36.
- Alimohamadi I, Soltani R, Azkhash M, Gohari M, Moosavi B. Study of role extroversion of caused by traffic noise on mental function of the students. *Iran Occupational Health*. 2011;7(4):7-0.
- Aliabadi M, Mahdavi N, Farhadian M, Shafe Motlagh M. Evaluation of noise pollution and acoustic comfort in the classrooms of Hamadan University of medical sciences in 2012. *Iranian Journal of Ergonomics*. 2013;1(2):19-27.
- Clark C, Stansfeld SA. The effect of transportation noise on health and cognitive development: A review of recent evidence. *International Journal of Comparative Psychology*. 2007;20(2).
- Setaki F, Tenpierik M, Turrin M, van Timmeren A. Acoustic absorbers by additive manufacturing. *Building and Environment*. 2014;72:188-200.
- Ersoy S, Küçük H. Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. *Applied Acoustics*. 2009;70(1):215-20.
- Fu F. Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element modeling method. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009;65(6):1269-78.
- Wang X, You F, Zhang FS, Li J, Guo S. Experimental and theoretic studies on sound transmission loss of laminated mica-filled poly (vinyl chloride) composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011;122(2):1427-33.
- Ahmadi S, Nassiri P, Ghasemi I, Esmailpoor MRM. Sound transmission loss through nanoclay-reinforced polymers. *Iranian polymer journal*. 2015;24(8):641-9.
- Arunkumar M, Pitchaimani J, Gangadharan K, Lenin Babu M. Sound transmission loss characteristics of sandwich aircraft panels: Influence of nature of core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2017;19(1):26-48.
- Gayathri R, Vasanthakumari R, Padmanabhan C. Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2013;4(5):301-8.
- Lee J, Kim GH, Ha CS. Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams. *Journal*

- of applied polymer science. 2012;123(4):2384-90.
15. DEHGHAN SF, GOLBAAEI F, MADDAH B, YARAHMADI R, ZADEH AS. Experimental Investigations on electrospun mat production: for use in high-performance air filters. *International Journal of Occupational Hygiene*. 2015;7(3):110-8.
  16. Dehghan SF, Golbabaie F, Maddah B, Latifi M, Pezeshk H, Hasanzadeh M, et al. Optimization of electrospinning parameters for polyacrylonitrile-MgO nanofibers applied in air filtration. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2016;66(9):912-21.
  17. Liu X, Yan X, Zhang H. Effects of pore structure on sound absorption of kapok-based fiber nonwoven fabrics at low frequency. *Textile Research Journal*. 2016;86(7):755-64.
  18. Han F, Seiffert G, Zhao Y, Gibbs B. Acoustic absorption behaviour of an open-celled aluminium foam. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003;36(3):294.
  19. Seddeq HS, Aly NM, Marwa A A, Elshakankery M. Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials. *Journal of Industrial Textiles*. 2013;43(1):56-73.
  20. Seddeq HS. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2009;3(4):4610-7.
  21. Yu H-J, Yao G-C, Wang X-L, Bing L, Yao Y, Ke L. Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam bare board material. *Transactions of nonferrous metals society of China*. 2007;17(1):93-8.
  22. Antonio J, Tadeu A, Godinho L. Analytical evaluation of the acoustic insulation provided by double infinite walls. *Journal of sound and vibration*. 2003;263(1):113-29.
  23. Asdrubali F. Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control. *Proceedings of Euronoise, Tampere, Finland*. 2006;30.
  24. Li T-T, Chuang Y-C, Huang C-H, Lou C-W, Lin J-H. Applying vermiculite and perlite fillers to sound-absorbing/thermal-insulating resilient PU foam composites. *Fibers and Polymers*. 2015;16(3):691-8.
  25. Hung T-C, Huang J-S, Wang Y-W, Lin K-Y. Inorganic polymeric foam as a sound absorbing and insulating material. *Construction and Building Materials*. 2014;50:328-34.
  26. Chen S, Jiang Y. The acoustic property study of polyurethane foam with addition of bamboo leaves particles. *Polymer Composites*. 2018;39(4):1370-81.

# Investigation of Acoustic Properties of Polymer Nanocomposites Polymer Regarding Combined Sound Absorption and Insulation Characteristics

Roohalah Hajizadeh<sup>1</sup>, Ali Khavanin<sup>2\*</sup>, Ahmad Jonidi Jafari<sup>3</sup>, Mohammad Barmar<sup>4</sup>, Somayeh Farhang Dehghan<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2\*</sup> Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Research Center for Environmental Health Technology, Department of Environmental Health Engineering, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Department of Polyurethane, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

<sup>5</sup> Department of Occupational Health, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

## ABSTRACT

**Introduction:** Nowadays multiple techniques have been developed to noise control. One the most important way is the control based on sound absorption and insulation. The purpose of current study was to improve the acoustic properties of soft polyurethane foam regarding combined sound absorption and insulation characteristics.

**Materials and Methods:** Polyacrylonitrile and polyvinylidene fluoride nanofibers are fabricated using solution electrospinning technique. Nano-clay particles (montmorillonite, 1-2 nm in diameter) were purchased from Sigma-Aldrich, Inc. Experimental design was prepared using Design-Expert ver.7 software. The 50 samples of nanocomposites were fabricated on the basis of experimental run. The measurement of sound transmission loss and the absorption coefficient was conducted using BSWA SW477 550005 Impedance Tubes according to the standard ASTM E2611-09 and ISO10534-2, techniques. Response surface methodology (RSM) with central composite design (CCD) was applied to optimize the conditions to produce nanocomposites for each frequency range.

**Results:** The polymer nanocomposites had the higher combined sound transmission loss and the absorption coefficient than pure polyurethane foam. Their combined transmission loss and the absorption coefficient in the low, middle and high frequency range was 02.02, 1.91 and 2.53 times higher than the pure polymer. The combined transmission loss and the absorption coefficient in all frequency ranges have been increased by increasing the thickness of the composites and air gap. At a thickness of 2 cm, the combined composites, sound transmission loss and the absorption coefficient increased with the increase of content of both nanofibers. The highest combined transmission loss and the absorption coefficient was observed when mass fraction of nanofibers was in at its maximum level.

**Conclusion:** This study showed that the adding nano-clay particles, polyacrylonitrile and polyvinylidene fluoride nanofibers to polyurethane foam can lead to increased sound transmission loss and the absorption coefficient. The obtained optimized nanocomposite can be applied to noise control where requiring the absorption as well as reduction of sound transmission.

**Keywords:** Noise, transmission loss, absorption coefficient, Polyurethane, nanofiber, nanoparticle

\*Corresponding Author: Ali Khavanin

Email Address: Khavanin@modares.ac.ir

## 1. Introduction

Noise control based on the absorption and isolation is an effective engineering control method. In this approach, by increasing in surface absorption coefficient, the level of sound reflection would decrease and the total sound level would drop down. In addition, with appropriate insulation, a less exposure level would happen to noise among the workers. In the case of using acoustic tile as sound absorption with insulation properties, it could shift sound field to free field around the source. Meanwhile a dramatic increase can be seen in transmission loss in other areas. Among the polymers, polyurethane was chosen for this study because of its low cost, ease of foaming and high porosity. Nanofibers Polymer also cause more damping of the sound due to the creation of tortuous path for the sound transmission and increased contact area. It has been shown that addition of nanoclays in polyurethane foam can improve the sound absorption level at all frequencies, especially at low frequencies. Therefore, the present study aimed to assess the acoustic properties of polyurethane containing nanofibers and nanoclays regarding combined sound absorption and insulation characteristics [1].

## 2. Materials and Methods

Polyacrylonitrile and polyvinylidene fluoride nanofibers were produced using solution electrospinning technique. Nano-clay particles (montmorillonite, 1-2 nm in diameter) was provided from Sigma-Aldrich, Inc. Experimental design was prepared using Design-Expert ver.7 software. The 50 numbers of nanocomposites samples were produced on the basis of experimental run. To make the nanocomposites samples, electro spun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber (NF) and polyvinylidene fluoride (PVDF) NF were added to the polyols with methylene diphenyl diisocyanate (MDI) system. It was stirred with a magnetic stirrer for two hours and placed in an ultrasonic for 30 minutes. The polyols containing PAN and PVDF nanofibers were mixed with isocyanate containing clay nanoparticles inside the mold and the desired composites were made using a mechanical [2].

After making the test samples, the average combined noise transmission loss and absorption coefficient (considering 70% absorption coefficient value and 30% transmission loss value) in three frequency bands (low, medium and high) was measured using tube impedance device. The measurement of sound transmission loss and the absorption coefficient was done using BSWA SW477 550005 Impedance Tubes according to the standard ASTM E2611-09 and ISO10534-2.

At first, each sample according to the mean and standard deviation was standardized for each sample set

to obtain the optimized test sample in terms of combined sound transmission loss and the absorption coefficient, due to the high dispersion rate of the transmission loss compared to the absorption coefficient and their non-coherence, Then, the sample with highest absorption coefficient and transmission loss was selected as the optimized sample. Standard score ( $Z$ ) determine scores relative to the mean.

To determine the combined transmission loss and absorption coefficient of the sound are performed as follows: Combined transmission loss and absorption coefficient of the sound =  $0.7 Z$  (absorption coefficient) +  $0.3 Z$  (transmission loss). Response surface methodology (RSM) with central composite design (CCD) was applied to optimize the conditions to produce nanocomposites for each frequency range.

## 3. Results

The diameter of PAN NF and PVDF NF was  $85 \pm 20$  nm and PVDF NF  $96 \pm 20$  nm, respectively. An example of the forms of nanofibers and nanoparticles used in nanocomposites is shown in Figure 1.

Design Expert software proposed a linear relationship between combined absorption coefficients and transmission loss and input variables (weighting percent of nanoclays and nanofibers, foam thickness and air gap distance) at low frequencies, two-factor relationship model (2FI) at middle frequencies and a quadratic

relationship model at high frequencies. To increase the validity of the models provided by Design-Expert, the combined absorption coefficients and transmission loss the factors which were not statistically significant, were excluded from the model. Design-Expert software was used to predict optimal combinations using input variables to achieve maximum, minimum, or specific amount of response variables. After obtaining the relevant results, optimization for the combined absorption coefficients and transmission loss was done with using Design-Expert software. Table 2 presents some solutions at different levels of response variables that had combined high absorption coefficients and transmission loss at low, mid and high frequencies.

Figure 2 shows the influence of thickness and air gap on the combined absorption coefficients and transmission loss in the low, mid and high frequency bands. The combined absorption coefficients and transmission loss increase with increasing foam thickness and air gap. This increase is higher for low and mid frequency than high frequency.

According to the results, as the air gap increases, the absorption coefficient increases at low, mid and high frequencies. The results also showed that increasing the foam thickness and distance at the mid and low frequencies had a higher effect on the absorption coefficient and transmission loss than the high frequencies. The air gap behind the sample can be effective in absorbing the acoustic energy at mid and low frequencies, with increasing the acoustic energy absorption at long wavelengths, as a result. Resonance phenomena also occur at lower frequencies by creating an air gap behind the absorber, resulting in better absorption of sound at low frequencies. The results of study showed that using PAN NF with clay nanoparticles or PVDF NF in composite didn't have the combined absorption coefficients and transmission loss. One reason can be that PAN NF has low density and, consequently, being too bulky, disrupts foam formation if used concurrently with other fillers. What is more the overuse of fillers reduces cell volume, which can reduce absorption and transmission loss at low

frequencies [3-5].

The highest combined absorption coefficients and transmission loss occurs at 1 cm thickness when PAN NF has the highest weighting percent and PVDF NF has the lowest percent but at 2 cm thickness the coefficient of absorption and coefficient of transmission occurs when PVDF NF and PAN NF have the highest weighting percent. At high thickness, the sound waves collide with many nanofibers, which increases the combined absorption coefficients and transmission loss [6]. The nanoclay along with one of the nanofibers increases the density of foam. That is due to may be the increase in mass transmission loss in the control region for the high effect of clay nanoparticles and thickness on the increase in combined absorption coefficients and transmission loss at mid frequencies. As the thickness doubles, the surface density doubles. In this area, dB6 transient doubling of surface density or frequency increases [7].

When fillers are placed in the cell or inside the foam, the energy loss in the form of heat can be increased because the wall of cell or foam must improve the deformation caused by sound waves. The combined highest absorption coefficients and transmission loss occur when both nanofibers are at their maximum weighting percent [8]. These results show that at higher thicknesses, the sound waves are more affected by nanofibers and also the use of nanofibers with clay nanoparticles partially increases the combined absorption coefficients and transmission loss.

#### 4. Conclusion

The polymer nanocomposites had the higher combined sound transmission loss and the absorption coefficient than pure polyurethane foam. Their combined transmission loss and the absorption coefficient in the low, middle and high frequency range was 02.02, 1.91 and 2.53 times higher than the pure polymer. By increasing the thickness of the composites and air gap, the combined transmission loss and the absorption coefficient in all frequency ranges were increased. At a thickness of 2 cm, the combined composites, sound transmission



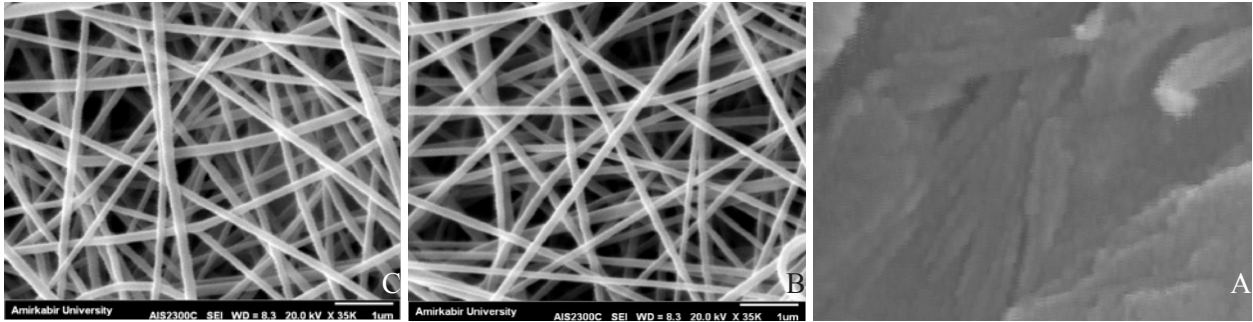


Fig. 1. SEM taken from nanofibers and nanoparticles A: Clay nanoparticles b: PAN NF C: PVDF NF

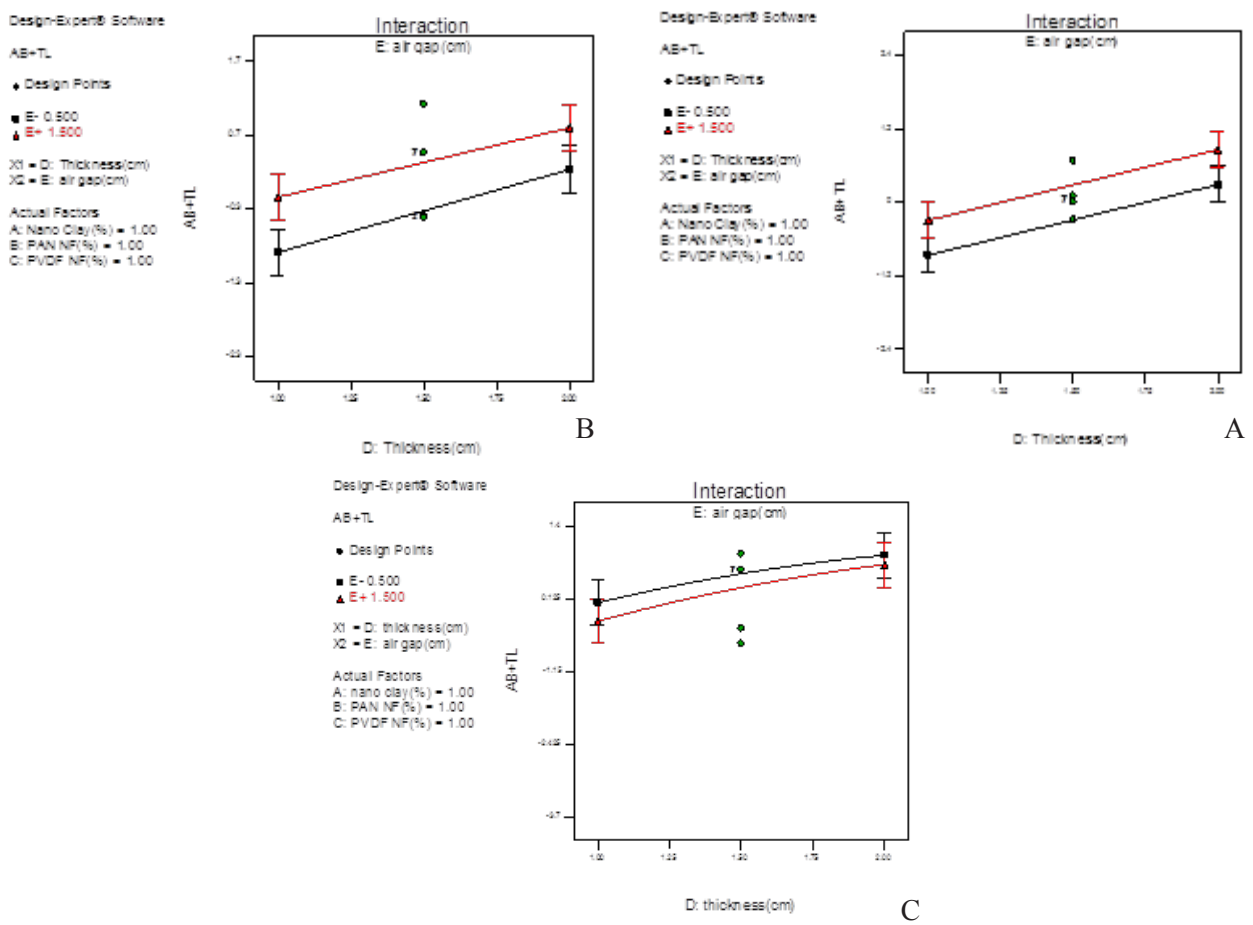


Fig. 2. Influence of air gap and thickness on absorption coefficients and transmission loss coincidentally A: Low frequencies B: Mid frequencies C: High frequencies

loss and the absorption coefficient was increased with the increase of content of both nanofibers. The highest combined transmission loss and the absorption coefficient was observed when mass fraction of nanofibers was in at its maximum level.

This study showed that adding nanoclay particles, polyacrylonitrile and polyvinylidene fluoride nanofibers to polyurethane foam can lead to increase sound transmission loss and the absorption coefficient. The obtained optimized nanocomposite

**Table 1.** Models obtained at different frequencies

frequency	Model type	Equation
low	Linear	$(AB+TL)^* = +0.001 - 0.11A^{**} + 0.047B^{***} - 0.15C^{****} + 0.58D^{*****} + 0.29E^{*****}$
middle	2FI	$(AB+TL) = +0.0012 - 0.10A + 0.041B - 0.19C + 0.51D + 0.33E - 0.36AB - 0.21AC - 0.041AE - 0.30BC + 0.046BD + 0.24CD - 0.046DE$
high	quadratic	$(AB+TL) = +0.37 - 0.018A + 0.072B + 0.15C + 0.46D - 0.12E + 0.13AC + 0.13AD - 0.088BC + 0.062BD + 0.023BE + 0.057CD + 0.039DE - 0.53A^2 + 0.034B^2 + 0.064C^2 - 0.093D^2 + 0.073E^2$
absorption coefficients and transmission loss coincidently * NF(%)**** D-thickness(cm) *****		A-nanoclay(%)** B-PAN NF(%)*** C-PVDF NF(%)*** E-Air Gap(cm) *****

**Table 2.** Some Proposed Solutions to Optimize the absorption coefficients and transmission loss coincidently in Different Frequency Bands by Design-Expert Software

frequency	Nano clay (%)	PAN NF (%)	PVDF NF (%)	Thickness(cm)	Air Gap(cm)	absorption coefficients
low	0.5	1.5	52/0	2	1.5	1.16
	0.5	1.32	0.5	2	1.5	1.15
middle	0.55	1.5	0.5	2	1.5	1.39
	0.5	1.5	0.5	1.96	1.34	1.3
high	1.08	1.47	51.	2	0.5	1.23
	1.11	1.23	1.5	2	0.5	1.19

can be applied for noise control in the environment where simultaneously requires the absorption and the reduction of sound transmission.

## 5. References

- Gayathri R, Vasanthakumari R, Padmanabhan C. Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2013;4(5):301-8.
- Lee J, Kim GH, Ha CS. Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams. *Journal of applied polymer science*. 2012;123(4):2384-90.
- Liu X, Yan X, Zhang H. Effects of pore structure on sound absorption of kapok-based fiber nonwoven fabrics at low frequency. *Textile Research Journal*. 2016;86(7):755-64.
- Seddeq HS, Aly NM, Marwa AA, Elshakankery M. Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials. *Journal of Industrial Textiles*. 2013;43(1):56-73.
- Seddeq HS. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2009;3(4):4610-7.
- Li T-T, Chuang Y-C, Huang C-H, Lou C-W, Lin J-H. Applying vermiculite and perlite fillers to sound-absorbing/thermal-insulating resilient PU foam composites. *Fibers and Polymers*. 2015;16(3):691-8.
- Hung T-C, Huang J-S, Wang Y-W, Lin K-Y. Inorganic polymeric foam as a sound absorbing and insulating material. *Construction and Building Materials*. 2014;50:328-34.
- Chen S, Jiang Y. The acoustic property study of polyurethane foam with addition of bamboo leaves particles. *Polymer Composites*. 2018;39(4):1370-81.