

"مدل سازی و اثبات پلی یورتان به عنوان یک عامل جاذب آکوستیک در زیر آب"

چکیده:

رفتار آکوستیکی پلی یوریان شفاف^۱ و یک شبکه پلیمری درهم نفوذ کرده^۲ از پلی یورتان و با پلی دی متیل سیلو کسان با استفاده از آنالیز دینامیکی-مکانیکی، مدل سازی المانهای نامحدود و سنجش آزمایش ها، جهت تعیین خصوصیات آکوستیکی با استفاده از یک تیوب پر از آب که پالس های صوتی تولید می کند: بررسی شده است.

تست دینامیکی-مکانیکی در رنج دمایی بین 50- تا 70+ درجه سانتیگراد انجام شده است و داده ها با استفاده از روش انطباق زمان-دما^۳ به کار رفته است، تا خصوصیات ماده در فرکانس های بالا را نشان دهد. این داده ها جهت مدل سازی رفتار آکوستیکی مواد با استفاده از ATILA استفاده شده است. که نوعی از کد المانهای محدود^۴ تجاری می باشد که قادر به محاسبه کردن خصوصیات انعکاس و انتقال مواد می باشد. با استفاده از این داده ها خصوصیات جذب قابل محاسبه کردن می باشد.

داده های مدل سازی با داده های حاصل از آزمایش که با استفاده از دستگاه مخصوص (تیوب تولید پالس پر از آب^۵) بدست آمده است، با همدیگر مقایسه شده اند.

مقدمه:

موادی که به صورت موثر قسمت عمده ای از شدت امواج آکوستیکی انتشار یافته رو تلف می کنند این مواد به عنوان مواد تضعیف کننده^۶ شناخته شده می باشند این گونه مواد اساسا یک پوشش رادارگریز برای کشتی ها و زیردریایی ها می باشند. هم چنین این مواد به عنوان یک پوشش ضد صوت برای تاسیسات تانکر پر از آب که جهت کالیبراسیون و سنجش وسایل آکوستیکی زیر آب مورد استفاده قرار می گیرند

¹ Transparent

² Interpenetrating Polymer Network

³ Time Temperature Superposition

⁴ Finite Element Code

⁵ Water-Filled Pulse Tube

⁶ Attenuating Materials

تحقیق و توسعه مواد تلف کننده مناسب برای این کار بسیار مهم می باشد. در بسیاری از مواقع دستیابی به بیشترین اتلاف توسط یک ماده به تنهایی کافی نمی باشد، در عوض اختلاط چند لایه از مواد مختلف لازم می باشد.

چندین روش جهت بهبود اتلاف پلیمرها انتخاب شده است، شبکه های در هم نفوذ کرده پلیمرها (IPN) یک دسته از موادی هستند که یک رنج گسترده از اتلاف را پوشش می دهند این مواد دارای مورفولوژی میکروناهمگن^۷ هستند و شامل اختلاط کامپوزیت های مختلفی از پلیمرها می باشند

پیک مدول ها اتلاف هر یک از پلیمرها در IPN در هم آمیخته شده است و در نتیجه یک محدوده وسیع از فرکانس ها را شامل می گردد که بالاترین مدول اتلاف نیز مشاهده می شود. این نیز یکی از تکنیک های متداول توسط محققان می باشد که یک محدوده رنج وسیع و موثر از اتلاف، توسط پلیمرها به دست می آید. به هر حال برای رسیدن به جذب آکوستیکی در زیر آب، مواد باید با آب در طول امپدانس آکوستیکی سازگار باشد استفاده از چند لایه جاذب به طور خیلی اساسی در کاهش دادن صوت موثر می باشد، این مواد جهت اتلاف محدوده فرکانس وسیعی ضروری می باشد. جهت خواسته و احتیاجات آینده برای مواد جاذب در زیر آب و طراحی آنها، توانایی مدل سازی و پیش بینی کارایی در شرایط مختلف بسیار حائز اهمیت می باشد. مدل سازی می تواند با توجه به ضخامت لایه ها، اندازه و نسبت درصد مواد پرکننده موجب افزایش بهینه سازی تئوری شده و خواسته های مطرح شده را محیا کنند.

دستیابی به تولید با هزینه کم و کارایی بالای مواد، منجر به تولید ساختار و دستگاه های جدید می گردد. در کار انجام شده، پلیمر شفاف (EPU) و هم چنین یک شبکه پلیمری در هم نفوذ کرده از پلی یورتان با پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) استفاده شده است.

رفتار آکوستیکی این مواد با استفاده از (ATILA) مدل سازی شده است. مدل سازی کد المانهای محدود تجاری (FEM) با استفاده از ISEN توسعه داده شده است. نتایج حاصل از مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی حاصل از تیوب پالس دار پر از آب با همدیگر مقایسه شده اند.

آزمایش ها:

ماده خام EPV از شرکت Rand polyproduct هند تهیه شده و سیلیکون خام از شرکت m/s Amabond، چین تهیه شده است. برای EPU، رزین: نسبت سختی 100:40 نگهداری شده است. مواد به طور کامل میکس و به مدت دو دقیقه جهت خالی کردن گازهای آن خالی شده (این گازها ناشی از حباب ها که هنگام اختلاط تولید می گردد). پلی یورتان (PU) قبل از اینکه در داخل قالب ریخته شود، در دمای اتاق پخت شده که به PU درون مقاله EPU اشاره می شود.

کامپونت PDMS توسط Anabond1217 نوع A و B و C طبق دستورالعمل (97:3:6) میکس شده PDMS تولیدی با پیش پلیمر PU توسط دستگاه proper mixing در دمای اتاق اختلاط پیدا کرده و نسبت درصد EPDM: PU به یک به یک می باشد. IPN به صورت پلیمریزاسیون همزمان PDMS و EPU در دمای اتاق شکل گرفته است. چگالی مواد با استفاده از densimeter model mirgempd اندازه گیری شده اند
اندازه گیری دینامیکی-مکانیکی:

تست دینامیکی-مکانیکی یک دستگاه چند کاره و حساس می باشد که به طور کامل مکانیسم آسایش یافتگی⁸ مواد ویسکوالاستیک نظیر پلاستیک ها و لاستیک ها بررسی می کند این تکنیک شامل جا به جایی دینامیکی قطعه و نمونه و اندازه گیری نیروی انتقالی درون نمونه می باشد. آنالیزور دینامیکی-مکانیکی جهت اندازه گیری مکانیسم مکانیکی می باشد. نحوه تست گرفتن شکل نمونه و اندازه سختی. اجازه محاسبه انواع مدولها، مدول مختلط، (E^*) مدول ذخیره E' و مدول اتلافی E'' مواد را می دهند.

تانژانت اتلاف⁹ برابر است با نسبت E' به E'' به خوبی مشخص است که رفتار و ویسکوالاستیک خطی پلیمرهای آمورف و الاستومرها از قاعده انطباق زمان-دما پیروی می کند. این قاعده تابعی از خصوصیات ویسکوالاستیک که در دمای مختلف اندازه گیری شده ممکن است با استفاده انتقال موازی در طول محورهای فرکانس و دما بدست آمده باشد. این قاعده سبب می شود که خصوصیات مواد را در رنج وسیعی از فرکانس ها با استفاده از داده های محدود حاصل از آزمایش به دست آورد.

Relaxation⁸

Loss Tangent⁹

معادله ویلیام-لندل-فری (WLF) عمدتاً برای توصیف رفتار زمان-دما، پلیمر در محدوده انتقال شیشه‌ای استفاده می‌شود (این دما انتقال بین ناحیه شیشه‌ای به رابری اتفاق می‌افتد که با T_g نشان داده می‌شود). در ناحیه انتقال (T_g تا $T_g + 50^\circ\text{C}$) معادله قاعده انتقال WLF عمدتاً برای پلیمرهای مختلفی به کار می‌رود. معادله WLF برابر است با:

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}$$

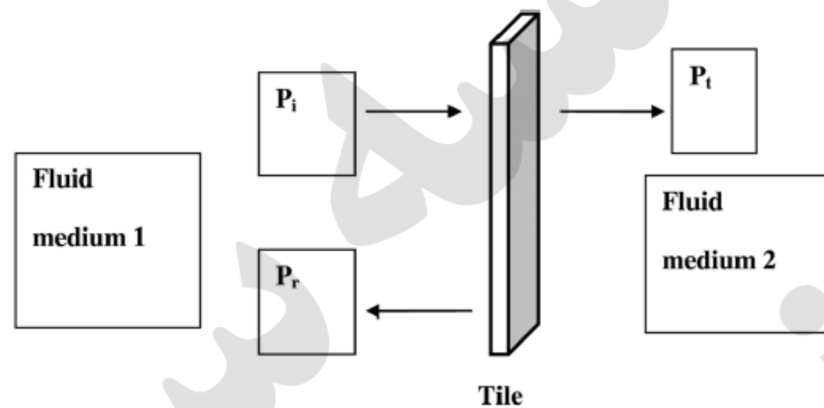
αT : فاکتور انتقال T_r : دمای مرجع C_1 , C_2 : ثوابت که مقدار آنها در دمای T_g به ترتیب برابر با 17/4 و 51/6 می‌باشد.

ابعاد نمونه جهت آزمایش دینامیکی-مکانیکی DMA دارای طول 35 میلی‌متر، عرض 12/75 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر می‌باشد. نمونه در دمای بین 50°C تا 70°C مورد آزمایش DMA قرار گرفته‌اند. تنش دینامیکی اعمال شده بر نمونه به اندازه‌ای بود که کرنش دینامیکی 15 میکرومتر را تولید کرد. آزمایش در فرکانس‌های مختلف 0, 50, 20, 10, 5, 2, 1/5 هرتز با گام‌های 5 درجه سانتی‌گراد در محدوده دمایی انجام گرفته است. با کمک نرم‌افزار TTS و دمای مرجع 30 درجه سانتی‌گراد، داده‌ها بصورت هم‌دما در نمودار انتقال می‌یابند. بصورت هم‌زمان تمام نقاط داده‌ها انتقال پیدا کرد و نمودار کامل مستر برای E' و E'' و δ و در محدوده فرکانسی وسیع‌تری به دست آمد. در طول انتقال، فاکتور انتقال توسط کامپیوتر به عنوان تابعی از دما ذخیره شد.

معادله WLF به عنوان یک رابط بین فاکتور انتقال به دما انتخاب شده داده‌های جمع شده. داده‌های جمع شده بصورت بیست تایی از فرکانس را می‌توان به فرکانس‌های صد تایی انتقال داد. پارامترهای ویسکو الاستیک به دست آمده را می‌توان برای مدل‌سازی رفتار ماده با استفاده از ATILA استفاده کرد.

اندازه‌گیری آکوستیک:

خصوصیات آکوستیک نمونه ها با استفاده از دستگاه تیوب پالس دار پر از آب اندازه گیری شده است. یک موج تخت^{۱۰} با دامنه فشار معین در طول محور تیوب پالس دار انتشار یافته و به صورت نرمال به نمونه برخورد می کند. موج برخوردی قسمتی از آن توسط سطح انعکاس می یابد، قسمتی توسط ماده جذب می شود و قسمتی توسط ماده در طول ضخامت انتقال می یابد همانطور که در شکل یک توصیف شده است.



شکل (1): شماتیکی از امواج انتشار یافته در محیط. برای اندازه گیری TC محیط مایع 1 و 2 آب می باشد. برای اندازه گیری RC محیط مایع 1 آب و 2 هوا می باشد. P_i : فشار صوت برخوردی، P_t : فشار صوت منتقل شده، P_r : فشار صوت منعکس شده)

قسمت سیگنال آکوستیکی که انتقال می یابد با TC قسمتی که انعکاس پیدا می کند با RC نشان می دهیم و به صورت معادلات زیر نشان می دهیم:

$$TC = 10 \log (I_t/I_i) = 20 \log (P_t/P_i),$$

and

$$RC = 10 \log (I_r/I_i) = 20 \log (P_r/P_i),$$

I_i : شدت برخورد امواج

I_r : شدت انعکاس

I_t : شدت انتقال

P_r : فشار صوت منعکس شده

P_t : فشار صوت منتقل شده

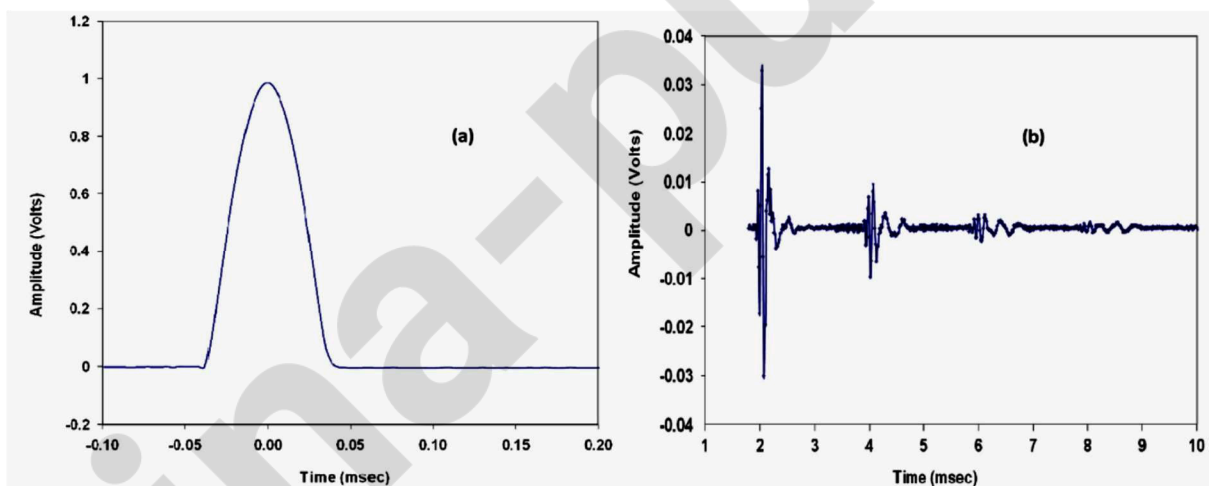
P_i : فشار صوت برخوردی

مجموع شدت انتقال، انعکاس و جذب در مقیاس خطی واحد می باشد. مجموع ثابت جذب (AC) با ثابت انعکاس و ثابت انتقال برابر با یک است.

$$TC+RC+AC=1$$

دستگاه اندازه گیری خصوصیات آکوستیک با استفاده از ژنراتور تولید پالس صوتی، ساخت شرکت HP می باشد. و تقویت کننده (بلندگو) L2 ساخت کالیفرنیا می باشد. همراه با یک فیلتر پایین گذر باند^{۱۱} ساخت دانمارک، برای جلوگیری از تحریک بالاتر نسبت به حالت خواسته شده در لوله. این مبدل صرفاً جهت این آزمایش ساخته شده و از دو سرپوش حلقوی ساندویچی از جنس زیرکونات که بین دو جرم فلزی قرار گرفته شده است. این مبدل در انتهای تیوب قرار گرفته و پالس های صوتی در طول محور تیوب تولید می کند. یک موج نیمه سینوسی موجب تحریک مبدل می شود. شکل 2a یک پالس تحریک کننده در محدوده زمانی را نشان می دهد. شکل 2b محدوده زمانی از سیگنال دریافتی را نشان می دهد. انعکاس های متعدد در محدوده زمانی دریافتی را نشان می دهد.

اولین پالس منعکس شده از نمونه برای تجزیه و تحلیل با استفاده از تابع آنالیزور انتخاب شد. یک آنالیزور سیگنالی دینامیکی (HP 3562 A) برای ضبط و تبدیل سریع فوریه از سیگنال های برخوردی و تجزیه و تحلیل آنها مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (2): محدوده زمانی (a) پالس تحریک کننده ورودی (b) دریافت خروجی با انعکاس های متعدد

TC از دامنه ی فشار موج منتشر شده به دست می آید و موج انتقال یافته در جهات مختلف نمونه انتقال می یابد. RC از دامنه ی فشار موج منتشر شده حاصل از انعکاس موج به دست می آید برای اندازه گیری TC در فرکانس بین 1-4 کیلو هرتز از یک تیوب پالس دار با قطر داخلی 200mm و طول 4/8 m استفاده شده است. نمونه 199mm قطر و 10mm ضخامت دارد.

نمونه در عمق 2 متری تیوب و درون یک نایلون استاندارد قرار گرفته است، هایدروفون در پشت نمونه جهت دریافت سیگنال های انتقالی از نمونه قرار می گیرد.

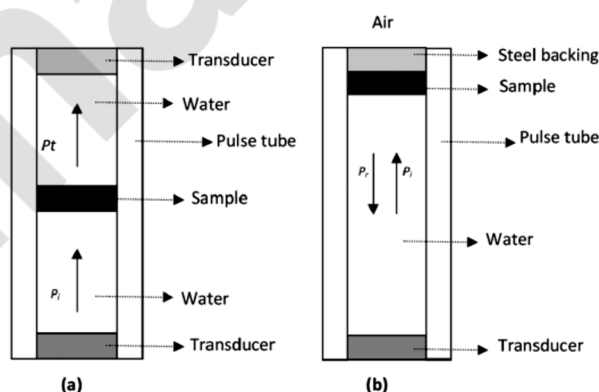
بعد از ثبت کردن این سیگنال ها نمونه برداشته می شود و هیدروفون مجددا جهت دریافت سیگنال (در غیاب نمونه) در جای خود قرار داده شده است. از سیگنال های دریافتی، TC با استفاده از معادله ی (2) محاسبه می گردد.

برای اندازه گیری RC در محدوده فرکانسی 2-15khz قطر داخلی تیوب پالس دار 50mm و طول آن 1/48m می باشد. نمونه دارای قطر و 49/5mm و ضخامت 25mm می باشد. پشت نمونه از یک صفحه استیل به ضخامت 10mm قرار گرفته و سپس درون تیوب درون قسمت بالایی قرار می گیرد.

مبدل در حالت ترانس گیرنده راه اندازی شد، همان طوری که برای تولید سیگنال صوتی و همچنین برای دریافت سیگنال انعکاس یافته استفاده شد.

بعد از ثبت سیگنال های انعکاس یافته، نمونه برداشته شده و انعکاس حاصل از سطح بین آب و هوا اندازه گیری می شود. نسبت این دو میزان RC را طبق معادله ی 3 به دست می آورند. شماتیک جهت اندازه گیری RC و TC

طبق شکل 3(a) و 3(b) به ترتیب نشان داده شده است. اندازه تیوب پالس دار بنابر روش و محدود فرکانسی تعیین می گردد.



شکل (3): شماتیکی از دستگاه تیوبی پالس دار پر آب (a) : جهت اندازه گیری TC (b) : جهت اندازه گیری

RC

لوله پالس دار محدوده فرکانسی بالایی دارد که توسط قطر آن مشخص می شود. موج تخت تا فرکانس مورد نظر افزایش می یابد، و بالاتر از سایر مد ها نیز می تواند تولید کند، اندازه گیری ها فقط محدود به امواج تخت منتشره می باشد. محدوده فرکانسی بالا طبق فرمول زیر محاسبه می شود.

$$f_{upper} = 0.586 * c' / 2r$$

r : شعاع تیوب

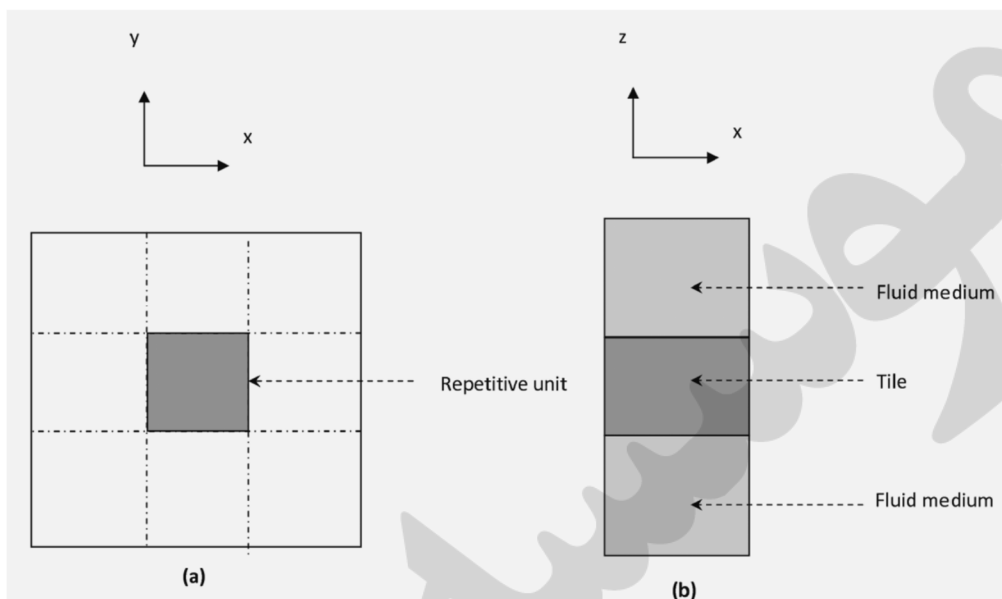
c' : سرعت صوت در محیط

ضخامت لوله تقریباً برابر با شعاع داخلی لوله می باشد، بنا براین آزمایش هایی با شرایط آزادی در داخل لوله شبیه سازی شده است. محدوده پایین فرکانس توسط طول لوله تعیین شده است.

FEM:

پک FEM ، ATILA ، برای مدلسازی خصوصیات آکوستیکی انتقال و انعکاس ماده به کار می رود. مواد آکوستیکی به فرم یک صفحه ی نازک مدل سازی شده است. صفحه در سطوح جانبی نامحدود می باشد، اما ضخامت محدود می تواند با استفاده از ATILA جهت مدل سازی قسمت کوچک از مواد و شرایط متغیر در سطوح جانبی به کار برده شود. کاهش اندازه جهت پردازش بهتر توسط رایانه اهمیت دارد یک مایع ناهمگن شبه محدود (آب یا هوا) در قسمت پایین و بالای مدل سازی لازم می باشد. امواج آکوستیکی با دامنه و فرکانس مشخص در جهت Z در محیط مایع انتشار می یابد.

شکل 4a: نمای بالایی از یک واحد تکراری از ساختار متناوب از مدل سازی را نشان می دهد. شکل 4b: نمای جلویی از برش عمودی از نمونه در مجاورت سیال را نشان می دهد. سیال می تواند آب یا هوا باشد. ضخامت نمونه 10mm برای پوششی که از دو طرف آب می باشد مدل سازی شده و ضخامت 25mm با 10mm از صفحه استیل هنگامی که نمونه یک طرف آب و طرف دیگر با هوا احاطه شده است. (این کار جهت شبیه سازی بهتر نمونه در حالت مدل سازی شده با حالت آزمایش می باشد).



شکل (4): شماتیکی از مدل FE مواد آکوستیکی (a) یک واحد تکراری از ساختار متناوب (b) برش عمودی از نمونه

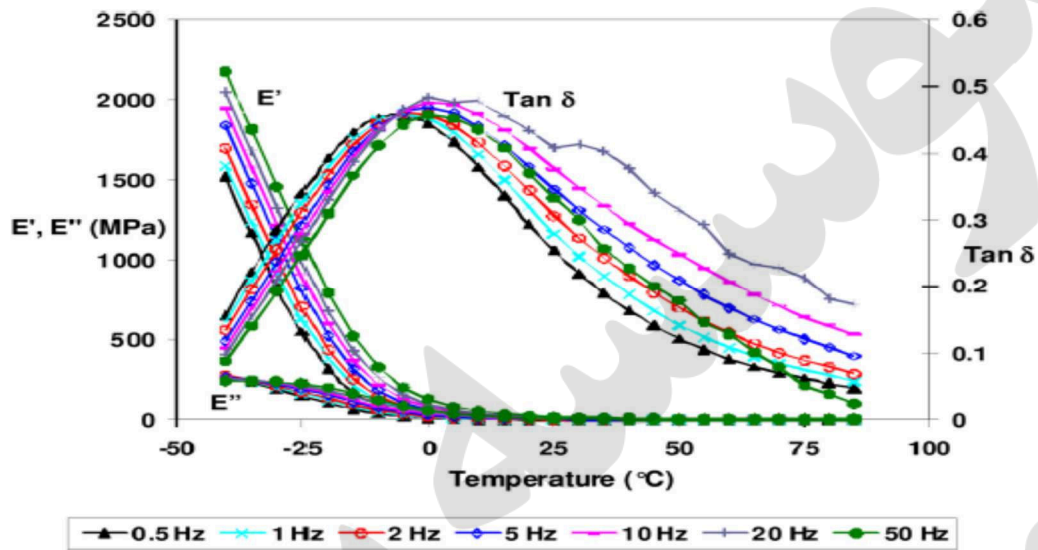
مدل به تعداد بی شماری المان سه بعدی تقسیم شده است و اندازه مش از اجزای مختلف مواد کمتر از یک پنجم از بالاترین طول موج می باشد. برای مایع، EPU, IPN و استیل از المان های با 20 گره شش ضلعی استفاده شده.^{۱۲} در حالیکه برای سطح مشترک از المان های با 16 گره چهار ضلعی^{۱۳} استفاده شده. مدول یانگ و پارامتر اتلاف EPU, IPN به فرکانس وابسته و در نتیجه پارامترهای دینامیکی مورد نیاز می باشد. پارامتر مواد استفاده شده در مدل سازی از آزمایش DMA و انطباق زمان-دما بدست آمده است. اندازه گیری های آکوستیک در این کار در محدوده 1-15 کیلو هرتز بدست آمده است.

بحث و نتیجه گیری:

نتایج به دست آمده شامل مدول ذخیره، مدول اتلافی (E' و E'') با $\text{nat}\delta$ استفاده از دستگاه DMA برای EPV و IPN به عنوان تابعی از دما در شکل 5 و 6 به ترتیب نشان داده شده است. در شکل 5: نتایج به دست آمده نشان می دهد که EPU، $\text{nat}\delta$ کمتری دارد و می تواند به عنوان یک ماده شفاف آکوستیکی مورد

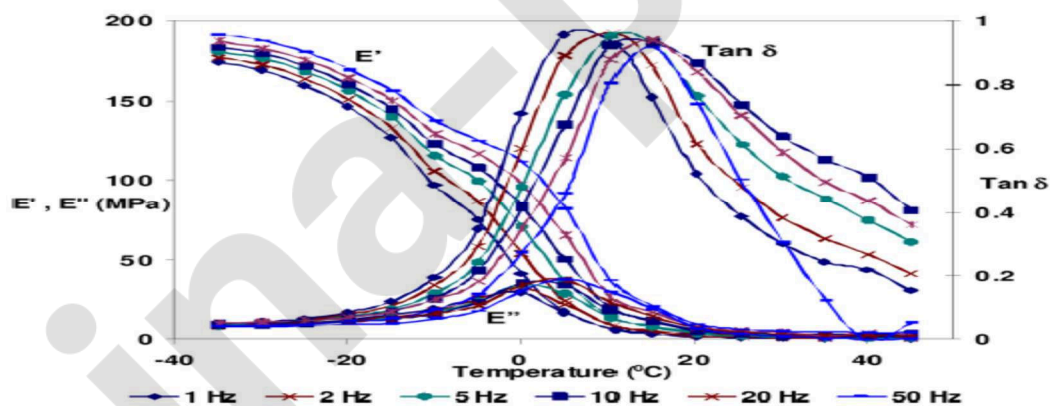
¹² 20-node hexahedral elements
¹³ 16-node quadrilateral elements

استفاده قرار بگیرد. شکل 6 نشان می دهد که $\text{nat}\delta$ برای IPN بسیار بزرگ تر می باشد مخصوصا در نواحی فرکانس پایین تر (کمتر).



شکل (5) آنالیز داده های تست دینامیکی مکانیکی EPU

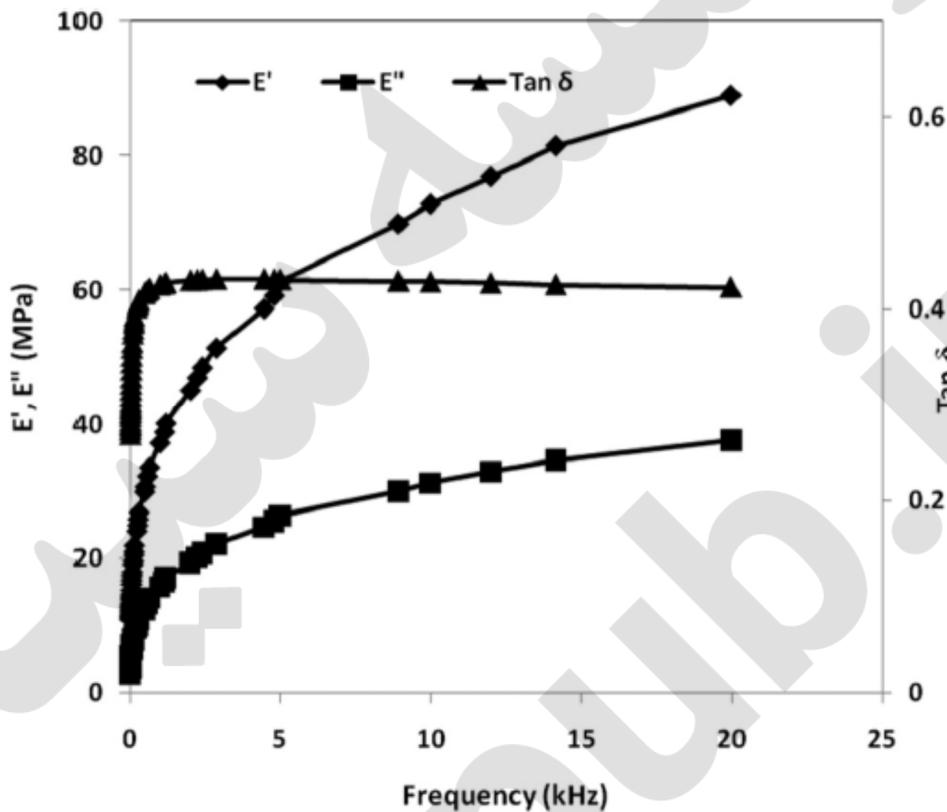
شبهه با ساختار در هم نفوذ کرده محدوده مورفولوژی میکروناهمگن را فراهم می کند که در تضعیف بهتر امواج آکوستیکی موثر می باشد. IPN، همانطور که از مدول کم آن مشخص است نسبت به EPU نرم تر و انعطاف پذیر می باشد. برای EPU مدول در دمای T_g برابر با 2000 apM است. در حالی که IPN مدول آن در دمای T_g برابر 190 apM است. که در نتیجه دارای اتلاف زیاد ویسکوالاستیکی می باشد. (هرچه مدول کمتر اتلاف بیشتر می باشد).



شکل (6) آنالیز داده های تست دینامیکی مکانیکی IPN

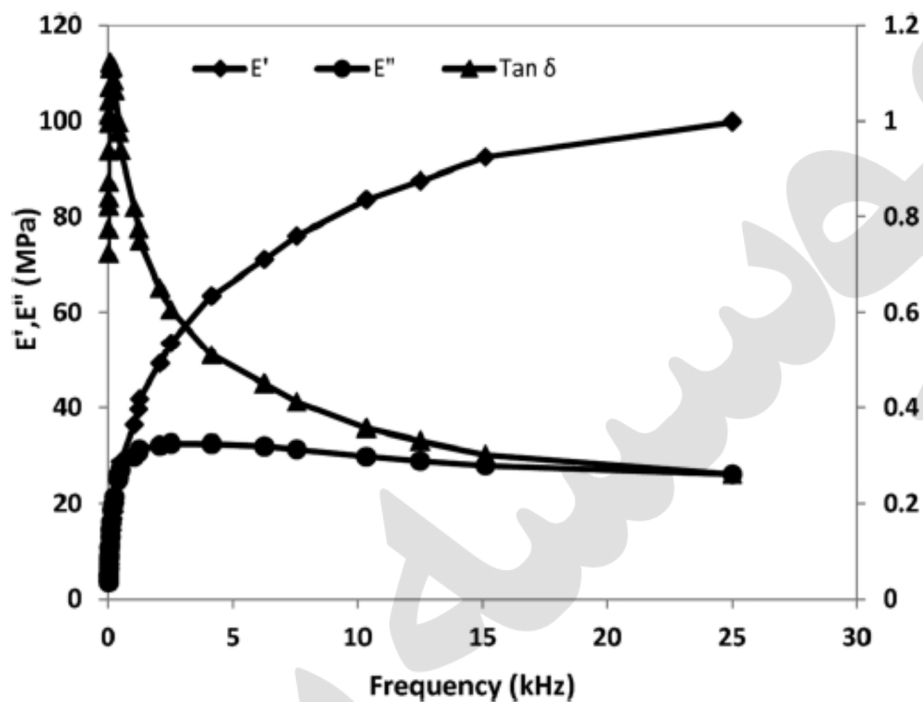
مدول ذخیره و اتلافی (E'' و E') نسبت به EPU بسیار کوچک تر می باشد زیرا IPN، انعطاف پذیری بیشتری دارد. این داده های خام برای انجام TTS استفاده شده و می توان داده هایی را با استفاده از TTS در فرکانس های بالاتر مدل سازی کرد.

شکل 7 و 8 نتایج پیش بینی شده از E' و E'' و $\tan \delta$ را برای IPN و EPU در فرکانس های 25KHZ را با استفاده از TTS نشان می دهد.



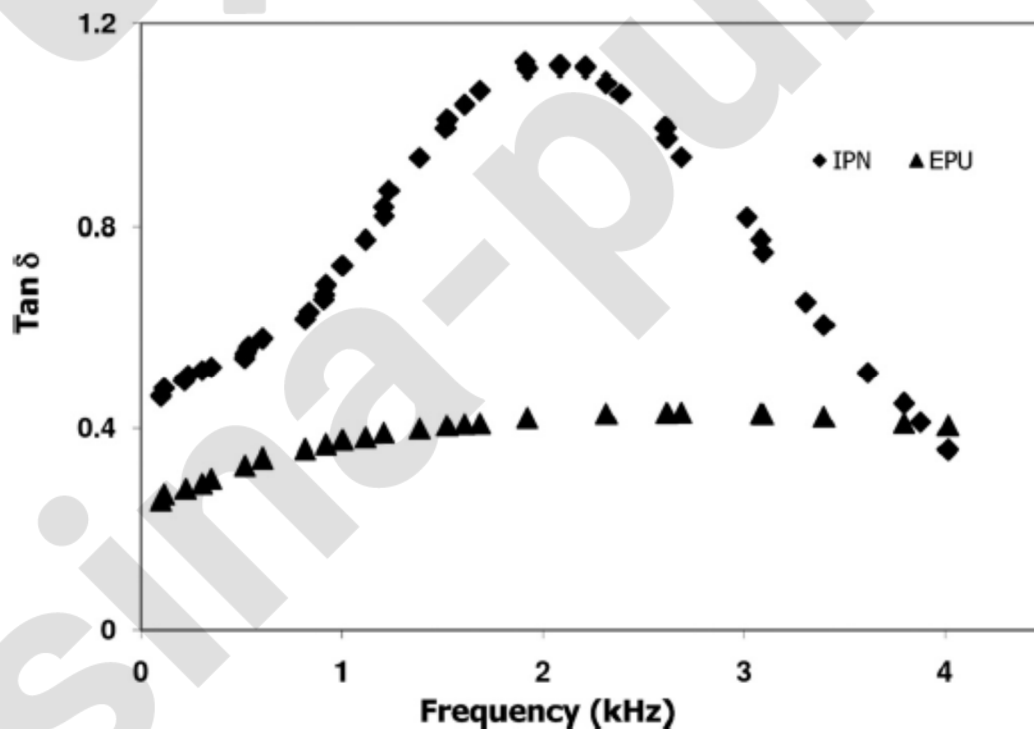
شکل (7) خصوصیات دینامیکی مکانیکی EPU با استفاده از پیش بینی انطباق زمان-دما

مشخص است که مدول اتلاف و تانژانت δ ، IPN در فرکانس های پایین (1-12Khz) از EPU بیشتر می باشد. این محدوده فرکانس برای پانل های جذب آکوستیک در کاربرد های زیر دریا زیاد اهمیت دارد.



شکل (8) خصوصیات دینامیکی مکانیکی IPN با استفاده از پیش بینی انطباق زمان-دما

شکل 9 مقایسه بین $tg\delta$ ، EPU و IPN را در محدوده فرکانس (1-4Khz) نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که یک $tg\delta$ برای IPN در این محدوده عریض تر و پهناتر می باشد در حالیکه برای EPU تخت و صاف می باشد.



شکل (9) مقایسه بین $tg\delta$ ، EPU و IPN با استفاده از پیش بینی انطباق زمان-دما در محدوده فرکانس 1-

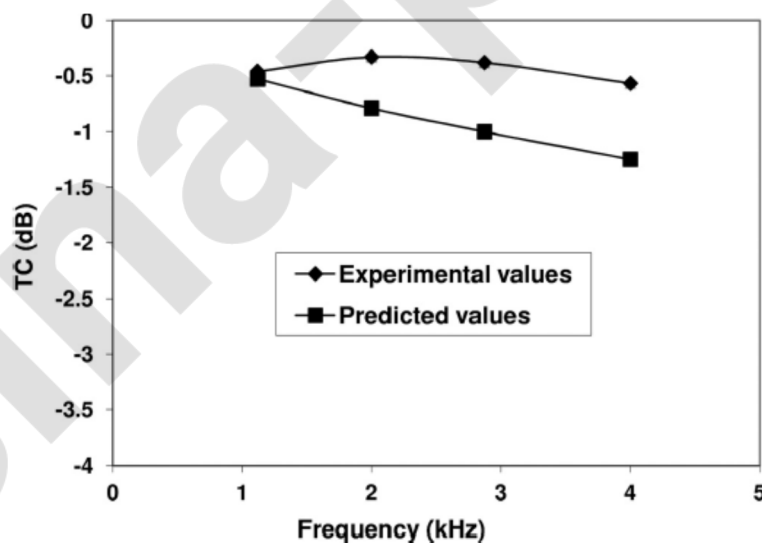
(4Khz)

از داده های E' و $tg\delta$ در شکل 7 و 8 برای مدل سازی رفتار آکوستیکی EPU و IPN با استفاده از ATILA استفاده شده است.

میزان دانسیته و ثابت پواسن از دیگر قسمت های مورد نیاز برای ATILA می باشد. میزان دانسیته برای EPU برابر با $1/1 \text{ g/cm}^3$ و برای IPN برابر با $0/99 \text{ g/cm}^3$ و ثابت پواسن برای EPU و IPN یک ثابت عمومی برای الاستومرها می باشد و برابر با 0/48 می باشد.

برای خصوصیات آکوستیکی یک ماده شفاف (تک و بدون اختلاط با سایر پلیمرها) مانند EPU، اندازه گیری TC به تنهایی برای نشان دادن رفتار آکوستیکی کافی می باشد. در نتیجه برای EPU مقایسه TC در حالت مدل سازی و آزمایشی باهم انجام شده است. با این حال، برای یک ماده جاذب مانند IPN، اندازه گیری RC به اندازه روش اندازه گیری معمولی، مناسب است. برای حالتی که هوا در بالای نمونه قرار دارد. کل امواج تابیده شده، بدلیل عدم انطباق امپدانس بین سطح نمونه/هوا با آب/هوا منعکس می شود.

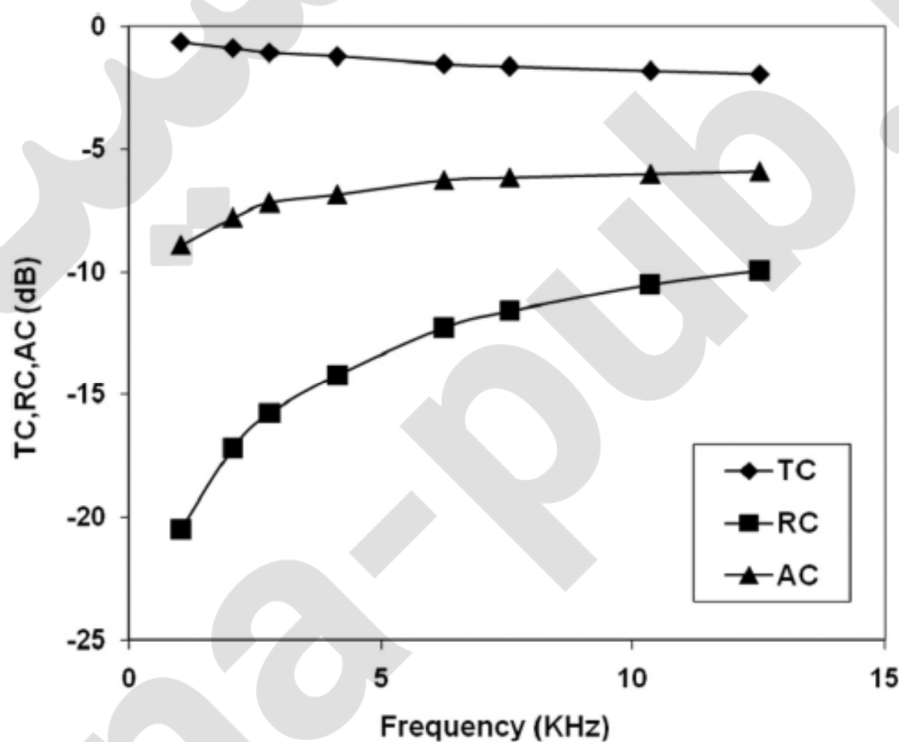
از این رو: برای IPN مقایسه بین مدل سازی و حالت تجربی (آزمایش) برای RC با همدیگر انجام شده است. نتایج مدل سازی برای هر فرکانس مستقلی انجام شده است. با توجه به محدودیت های آزمایشی تیوپ پالس دار، داده های تجربی TC در محدوده فرکانسی 1-4 KHZ بدست می آید. مقایسه بین داده های تجربی و مدل سازی در محدوده فرکانسی 1-4KHZ در شکل 10 با همدیگر مقایسه شده اند.



شکل (10) مقایسه بین نتایج مدل سازی و آزمایش برای EPU (آب/پوشش/آب)

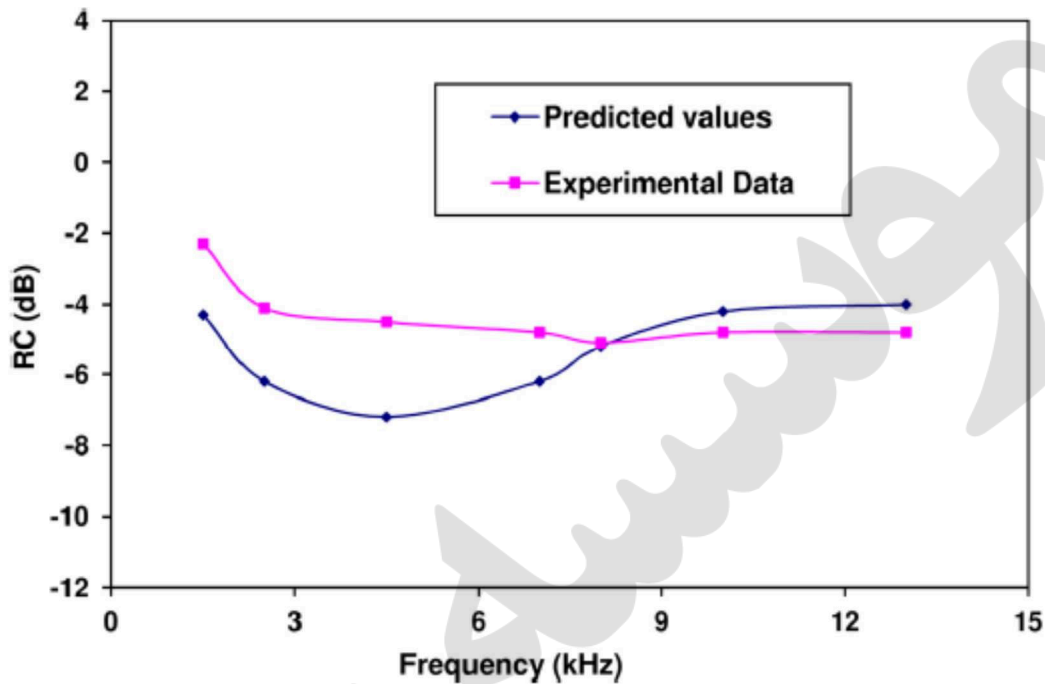
نتایج نشان می دهد که EPU یک ماده شفاف آکوستیکی در یک محدوده فرکانسی معین می باشد. نتایج تجربی و مدل سازی نشان می دهد که در 1db خصوصیات انتقال بر همدیگر منطبق هستند. برای AC, IPN از RC و TC بدست آورد زیرا مجموع همه ی ضریب (RC, TC, AC) برابر یک می باشد. نتایج در شکل 11 نشان داده شده است. که ضریب جذب 5-8db به دست آمده است.

شکل مدل سازی برای همه ی موارد توصیف شده از آب/پوشش/آب (در شکل 1 نشان داده شده است). برای مقایسه مقدار RC و IPN حاصل از آزمایش و مدل سازی، برحسب شکل 1 (آب سیال 1 و هوا سیال 2) و نتایج مدل سازی با تجربی با همدیگر مقایسه و در شکل 12 نشان داده شده است. مشاهده می شود که نتایج حاصل از مدل سازی و تجربی برای ماده شفاف EPU به خوبی منطبق هستند در حالیکه برای ماده IPN سری انحرافات دیده می شود.



شکل (11) داده های آکوستیکی IPN از مدل سازی FEM (آب/پوشش/آب)

در IPN، مکانیسم مختلفی جهت تضعیف موج، از جمله پراکندگی آکوستیکی، تغییر مسیر موج و ... که می تواند به دلیل ماهیت میکرو، ناهمگن مواد و همچنین اتلاف ویسکوالاستیکی نیز باشد. این ممکن است دلیلی برای انحراف نتیجه مدل با حالت تجربی باشد.



شکل (12) مقایسه بین نتایج مدل سازی و آزمایش برای IPN (آب/پوشش/هوا)

نتایج:

نتایج دینامیکی - مکانیکی حاصل از آزمایش برای مدل سازی FEM با استفاده از برنامه (ATILA) برای محاسبه خصوصیات آکوستیکی نمونه در فرکانس بالا استفاده شده است. نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشی حاصل از اندازه گیری در تیوپ پالس دار جهت اعتبار سنجی مقایسه شده اند. نتایج حاصل در مدل سازی و آزمایش در 1db برای ماده EPU با همدیگر منطبق هستند. در حالیکه برای ماده IPN در 3db انحراف برای ضریب انعکاس مشاهده شده است.

روش یک مسیری برای پیش بینی خصوصیات آکوستیکی و جاذب مواد با استفاده از مدل سازی FEM را نشان می دهد. این می تواند منجر به بهینه سازی کارایی مواد از جمله: پیکربندی، ضخامت لایه های مختلف، تأثیر اندازه و غلظت مواد پرکننده تا هزینه های ساخت را کاهش و بالاترین کارایی را به مواد بدهد و مواد با ساختار و دستگاههای جدید ساخته شود.. مطالعات بیشتر در این مورد منجر به پیشرفت لایه های چندگانه جاذب می گردد.