

# روش‌های مصورسازی صدا در تحلیل‌های آکوستیکی

## سه‌نند اطهری

کارشناس ارشد مهندسی آکوستیک، مؤسسه تحقیقاتی صدا و ارتعاشات، دانشگاه ساوتهمپتون، انگلستان  
s\_athari@alum.sharif.edu

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۰۴

### چکیده

تحلیل‌های آکوستیکی در پایه عبارتند از مطالعاتی که بر روی نحوه تولید صدا، و نحوه انتشار آن در محیط‌های مادی نظیر جامدات و سیالات انجام می‌شوند. یکی از دشواری‌ها در این تحلیل‌ها این است که موضوع مورد مطالعه، یعنی صدا، قابل دیدن نیست. به همین دلیل در بسیاری تحلیل‌های آکوستیکی سعی بر این است که صدا، مصورسازی شود تا از این طریق درک بهتری از رفتار صوت به دست بیاید. در این مقاله، به رایج‌ترین روش‌ها و تکنیک‌های مصورسازی صدا در تحلیل‌های آکوستیکی اشاره شده است و برای هر روش یا تکنیک، کاربردهایی برشمرده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مصورسازی صدا، تحلیل آکوستیکی، موج، حوزه زمانی، حوزه فرکانسی، نمودار طیفی، باند فرکانس، تبدیل فوریه، نمودار آبشاری طیفی سه‌بعدی، طیف‌نگاشت، چگالی طیفی، تحلیل مودال، تمام‌نگاری صوتی

### ۱. مقدمه

شد. اما از این بین، مرحله‌ای که دشواری‌های بیشتری دارد و می‌توان گفت از پیچیدگی بیشتری برخوردار است، مرحله تحلیل است. دلیل این دشواری نیز این واقعیت است که صوت، قابل رؤیت نیست. به همین دلیل، آنچه به طور معمول سعی می‌شود در مرحله تحلیل انجام شود، نوعی «مصورسازی» صدا<sup>۱</sup> است. به عبارت دیگر، مستقل از اینکه چه صدایی مورد تحلیل قرار گرفته است و یا هدف از اندازه‌گیری و تحلیل آکوستیکی در حال انجام چیست، ابزارهایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند به گونه‌ای، صدا را مصورسازی می‌کنند. این مصورسازی می‌تواند در قالب ساده رسم یک موج به صورت «شکل موج» باشد و یا در قالب انجام مدل‌سازی‌های پیچیده‌تری نظیر «تحلیل مودال» و یا «تمام‌نگاری صوتی» انجام شود. در این مقاله سعی شده تا روش‌ها و تکنیک‌های رایج در «مصورسازی صدا» در تحلیل‌های آکوستیکی به طور اجمالی معرفی شوند، کاربردهای هرکدام ذکر شوند و در هر مورد نمونه‌هایی ارائه شود.

### ۲. شکل موج

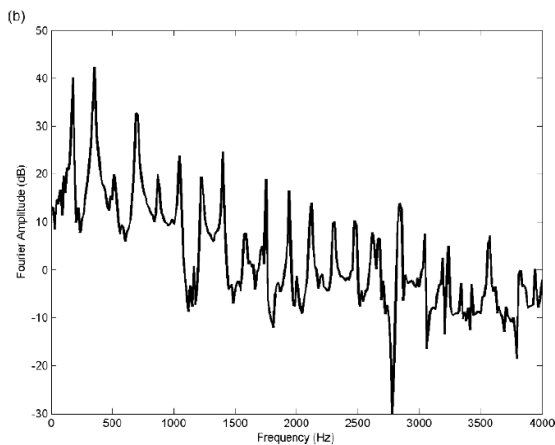
ساده‌ترین روش مصورسازی صدا، رسم آن به صورت «شکل موج» است. شکل موج حالتی از نمایش صدا است که در آن دامنه یا بزرگی صدا، به طور لحظه‌به‌لحظه اندازه‌گیری و رسم می‌شود [۱]. این عمل معمولاً توسط

تحلیل‌های آکوستیکی در زمینه‌های فراوانی کاربرد دارند. از جمله این زمینه‌ها می‌توان به کنترل نوفه در محیط‌های صنعتی، کاهش سروصدای تولیدات صنعتی، بهینه‌سازی وضعیت صدا در محیط زیست، تحلیل گفتار و آواشناسی، تحلیل فیزیکی موسیقی، سازشناسی، جانورشناسی، اقیانوس‌شناسی و آکوستیک زیردریایی اشاره کرد. هدف رایج در بسیاری تحلیل‌های آکوستیکی عبارت است از مطالعه ویژگی‌های صوت برآمده از یک منبع، نحوه انتشار آن در محیط و در برخی موارد، منطبق کردن شرایط صوتی با آنچه در استانداردها یا قوانین محلی ملزم داشته شده است. در این راستا، مراحل اولیه که معمولاً طی می‌شوند عبارتند از شناسایی منبع صدا، اندازه‌گیری صدا، تحلیل صدا و در صورت لزوم مقایسه نتایج تحلیل با استانداردها و قوانین موجود و در نهایت ارائه راه حل برای کنترل نوفه یا بهینه‌سازی نحوه انتشار صدا در محیط. طبیعتاً هرکدام از این مراحل اهمیت خاص خود را دارند. به‌عنوان مثال، تا زمانی که منبع صدا شناسایی نشود، تحلیل آن و یا ارائه راه حل برای کنترل آن دشوار یا بعضاً غیرممکن خواهد بود. و یا در صورتی که استاندارد برای اندازه‌گیری وجود نداشته باشد، عملاً اعتبار اندازه‌گیری محل پرسش خواهد بود، عواملی که به نوبه خود باعث ناکارآمدی راه‌حل‌های فرضی برای کنترل نوفه خواهند

ولتاژ یا تراز فشار صوت باشد که نمایش‌دهنده دامنه موج هستند. از جمله کاربردهای این شیوه نمایش صدا می‌توان به ضبط و تحلیل موسیقی و صدا، تحلیل لحظه‌ای دامنه صوت و اندازه‌گیری‌های عمومی آکوستیکی اشاره کرد.

### ۳. تبدیل فوریه

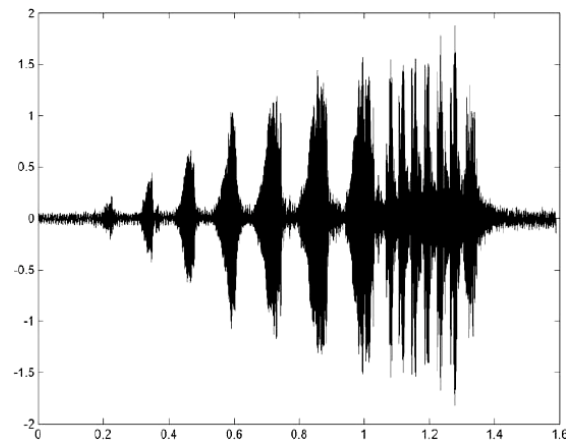
بسیاری از اندازه‌گیری‌های مهندسی آکوستیک در محیط‌هایی انجام می‌شوند که در آنها مجموعه‌ای از صداها با فرکانس‌های مختلف و شدت‌های متفاوت در حال تولید و انتشار هستند. بنابراین، ممکن است شکل موج، یا به عبارت دیگر نمایش موج در حوزه زمانی سیگنال، اطلاعات کافی درباره فرکانس‌های غالب موجود در صدا را به دست ندهد. در حالی که اگر سیگنال به حوزه فرکانس برده شود اطلاعات کامل‌تری درباره‌ی فرکانس‌های مختلف موجود در صدا به دست می‌آید [۴]. این امر به کمک تبدیل فوریه انجام می‌شود. به عنوان مثال، می‌توان تبدیل فوریه سیگنال‌های یک نُتِ نواخته شده روی پیانو را در شکل (۳) مشاهده کرد [۳] (شکل موج این سیگنال در شکل ۲ نشان داده شد).



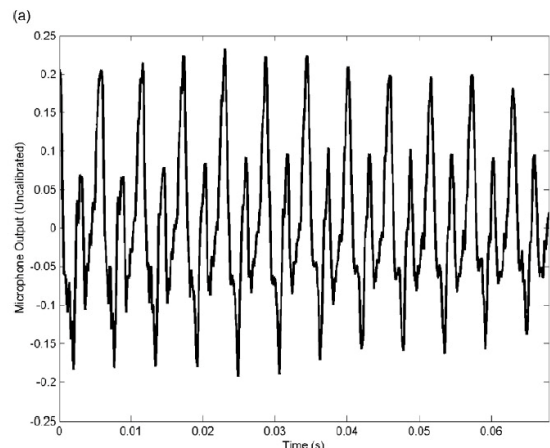
شکل ۳. نمایش یک نُتِ نواخته شده روی پیانو، در حوزه فرکانس

از نمودارهای سیگنال صوت در حوزه فرکانس استفاده‌های زیادی می‌شود، از جمله شناخت هارمونیک‌های فرکانس اصلی به ویژه در آکوستیک موسیقایی و سازشناسی، مطالعه‌ی بازگشت‌های صدا از سطوح مختلف موجود در ساختمان‌ها و فضاهای داخلی، بررسی بارزها<sup>۲</sup> در تحلیل گفتار، پژواک‌یابی<sup>۳</sup> و ردیابی بازتاب‌ها در آکوستیک زیردریایی و یا شهرسازی برای نابینایان.

مجموعه‌ای از تجهیزات شامل دستگاه‌های داده‌برداری و نمایشگرهای سیگنال انجام می‌شود. داده‌برداری از سیگنال‌ها ممکن است به طور زمان-پیوسته انجام شود و به نمایش در بیاید (مثلاً روی صفحه اسیلوسکوپ) و یا به طور زمان-گسسته صورت بگیرد (پردازش سیگنال گسسته) [۲]. طی این فرایندها، انرژی مکانیکی صوت تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود (در تراگذارهایی همچون میکروفون یا هیدروفون) و سپس این سیگنال صوتی به صورت مجموعه بهم‌پیوسته‌ای از ولتاژها، در قالب یک شکل موج رسم می‌شود. شکل‌های (۱) و (۲) نمونه‌هایی از این حالت مصورسازی صدا را نشان می‌دهند [۳].



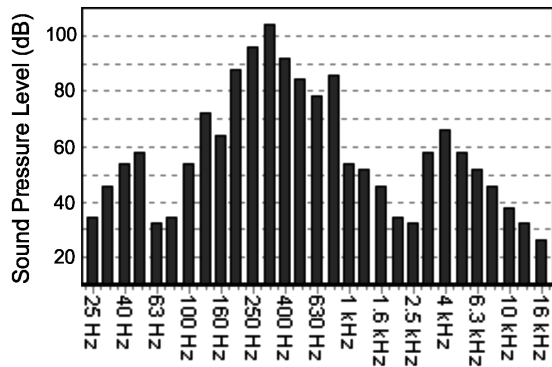
شکل ۱. نمایش شکل موج صدای یک بلبل در حوزه زمان



شکل ۲. نمایش شکل موج یک نُتِ نواخته شده روی پیانو در حوزه زمان

این حالت از مصورسازی سیگنال صدا، در واقع ارائه دهنده پایه‌ای‌ترین اطلاعات مربوط به موج است. محور افقی این نمودار، زمان است و محور عمودی آن می‌تواند

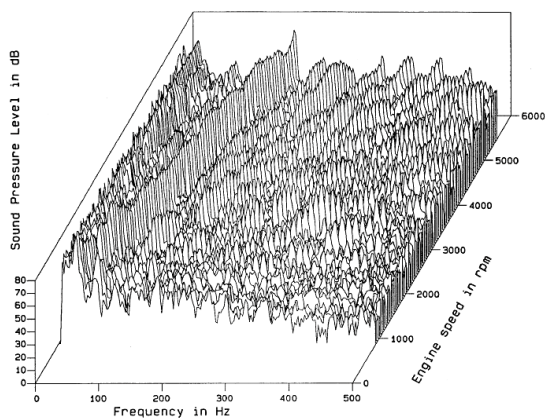
داخلی، بررسی وضعیت صدا جهت صدابرداری در سالن های اجرای موسیقی، مطالعه و شناخت فرکانس های غالب در طول مدتی مشخص (مثلاً یک شبانه روز) در یک محل جهت مقایسه با استانداردها و قوانین، و رسم منحنی های توزین<sup>۴</sup> استاندارد اشاره کرد [۶].



شکل ۵. باندهای فرکانسی ۱/۳ اکتاو رایج در نمایش طیف فرکانسی

#### ۵. نمودار آبخار طیفی سه بُعدی

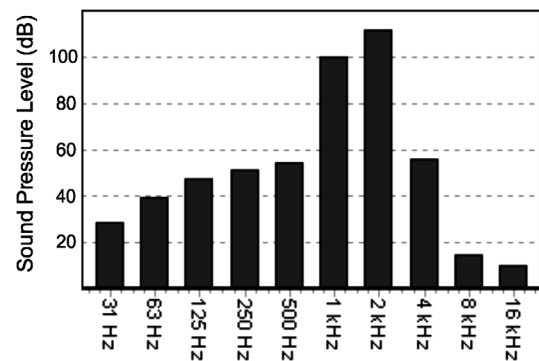
نمودار طیفی سه بُعدی در واقع گونه ای از نمودار نمایش تبدیل فوریه است که پارامتر سوم می تواند زمان یا متغیر مستقل دیگری از شاخصه های سیستم یا منبع صوت مورد مطالعه باشد. به عنوان مثال شکل (۶) یک نمودار آبخاری طیفی سه بُعدی صدای موتور یک اتومبیل را نشان می دهد [۷]. در این نمودار، متغیر مستقل، دور موتور است که در مراحل مختلف آزمایش تغییر داده شده است.



شکل ۶. نمودار آبخاری طیفی سه بُعدی صدای موتور یک اتومبیل بر حسب دور موتور

#### ۴. طیف فرکانسی باند اکتاو یا ۱/۳ باند اکتاو

اطلاعات حاصل از تبدیل فوریه را می توان به صورت نمودارهای ستونی نیز نمایش داد. محور افقی چنین نمودارهایی نمایش دهنده فرکانس های تحلیل و محور عمودی آنها معمولاً معرف تراز فشار صوت است. فرکانس وسط هر ستون در این نمودارها، معرف آن ستون است که خود با میانگین گیری هندسی از حد بالا و پایین باند فرکانسی به دست می آید. هر کدام از این ستون ها، «باند تحلیل فرکانس» نامیده می شود. پهن ترین باند در تحلیل فرکانسی، باند اکتاو است. در این نوع باند، حد فرکانسی بالا تقریباً دو برابر حد فرکانسی پایین است. باند اکتاوهای رایج در نمایش های طیف فرکانسی، در شکل (۴) نشان داده شده اند [۵]. به فرکانس های نشان داده شده در شکل (۴)، «فرکانس های میانی باند اکتاو» گفته می شود.

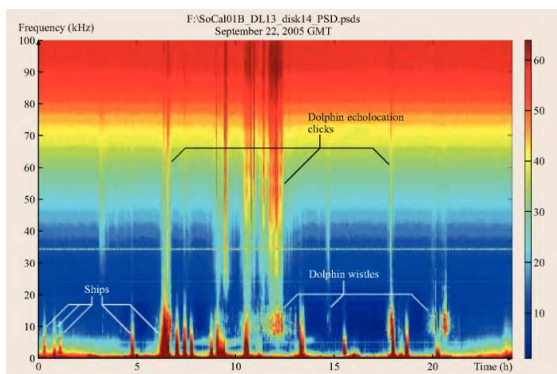


شکل ۴. باند اکتاوهای رایج در نمایش طیف فرکانسی

در برخی تحلیل ها و کاربردها، لازم است اطلاعات بیشتری درباره سایر فرکانس های صدا نیز به دست بیاوریم. به عبارت دیگر، در برخی تحلیل ها به دقت فرکانسی بالاتری برای مطالعه صدا نیاز داریم. برای این منظور می توان باندهای فرکانس را باریک تر انتخاب کرد. به عنوان مثال می توان از باندهایی به پهنای ۱/۳ اکتاو استفاده کرد. همانطور که از نام این باندها پیداست، پهنایشان یک سوم پهنای باندهای اکتاو است. باندهای فرکانسی ۱/۳ اکتاو که به طور معمول در نمایش های طیف فرکانسی مورد استفاده قرار می گیرند در شکل (۵) نشان داده شده اند. به فرکانس های نشان داده شده در شکل (۵)، «فرکانس های میانی ۱/۳ باند اکتاو» گفته می شود.

از جمله کاربردهای متنوع نمایش باندهای فرکانسی می توان به تحلیل لحظه ای صدا در محیط های خارجی و

آنجایی که سیگنال‌های برداشت‌شده در این موارد، اغلب زمان کوتاهی دارند، مدت زمان طیف‌نگاشت‌ها نیز در این مصارف نسبتاً کوتاه است (از یک ثانیه تا یک دقیقه). اما علاوه بر این کاربردها، طیف‌نگاشت‌ها در آکوستیک زیردریایی نیز به کار برده می‌شوند. به عنوان مثال شکل (۸)، فرکانس‌های باند وسیعی<sup>۹</sup> را نشان می‌دهد که در یک کانال بزرگ آب ثبت شده اند [۹]. در این نمودار، زمان نمایش چگالی طیفی، یک شبانه‌روز است. از جمله صداهای ثبت شده در این کانال می‌توان به صدای کشتی‌ها و دلفین‌ها اشاره کرد.



شکل ۸. فرکانس‌های باند وسیع یک کانال بزرگ آب

از جمله کاربردهای دیگر طیف‌نگاشت می‌توان تحلیل موسیقی، تحلیل صدای سازها، سونار، رادار، پردازش گفتار و لرزه‌نگاری را نام برد.

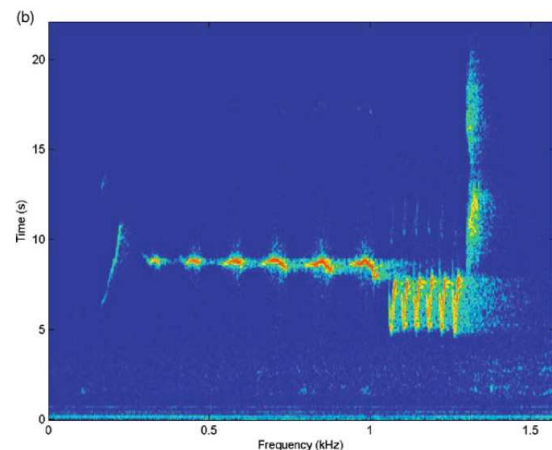
## ۷. نقشه نوفه

هدف در بسیاری از مطالعات و تحلیل‌های آکوستیکی، به دست آوردن تصویری از وضعیت سروصدا، نوفه یا اصطلاحاً «آلودگی صوتی» در یک منطقه یا محدوده شهری یا صنعتی است. در واقع می‌توان گفت آلودگی صوتی مجموعه‌ای از صداهای نامطلوب (نوفه یا نویز) است که از تراز صوتی مشخصی تجاوز می‌کند. این تراز صوتی مشخص، معمولاً توسط استانداردها و قوانین کشورها تعیین می‌گردد. برای بررسی و تحلیل آکوستیکی در چنین شرایطی، اندازه‌گیری‌های متعددی در نقاط مختلف محدوده مورد نظر انجام می‌شود و سپس به کمک این اندازه‌گیری‌ها تصویری از تراز صوتی آن محدوده رسم می‌شود که نقشه نوفه<sup>۱۰</sup> نام دارد. شکل (۹) نمونه‌ای از نقشه نوفه به‌دست‌آمده برای یک نیروگاه را نشان می‌دهد.

مشابه نمودار نمایش تبدیل فوریه یا همان حوزه فرکانسی سیگنال، نمودارهای طیفی سه‌بعدی نیز می‌توانند در زمینه‌های بسیاری کاربرد داشته باشند از جمله تحلیل‌های سروصدا- ارتعاشات- خشکی<sup>۵</sup> اتومبیل‌ها و اندازه‌گیری و تحلیل آبی صدا<sup>۶</sup> در محیط‌های صنعتی یا مسکونی. همان طور که اشاره شد، پارامتر سوم در این مصورسازی، می‌تواند در ساده‌ترین حالت، زمان باشد و یا در صورت لزوم متغیر مستقل دیگری از منبع صوت که در حال تغییر است به جای زمان انتخاب گردد.

## ۶. طیف‌نگاشت

طیف‌نگاشت یک سیگنال صدا، در واقع نمایش چگالی طیفی آن سیگنال بر حسب زمان و فرکانس است. به عبارت دیگر، یک صوت ضبط شده را می‌توان به گونه‌ای مصورسازی کرد که تغییرات چگالی طیفی آن بر حسب زمان و فرکانس‌های موجود در صدا قابل رؤیت باشد. این مصورسازی که معمولاً در پردازش سیگنال دیجیتال، با محاسبه‌ی مجذور تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۷</sup> به دست می‌آید، طیف‌نگاشت<sup>۸</sup> نام دارد [۳]. محورهای افقی و عمودی بسته به موضوع تحلیل، می‌توانند نشان‌دهنده فرکانس یا زمان باشند. میزان چگالی طیفی نیز به کمک رنگ‌های مختلف نشان داده می‌شود. شکل (۷) نمونه‌ای از طیف‌نگاشت را نشان می‌دهد که از سیگنال صدای یک بلبل به دست آمده است [۳] (شکل موج این سیگنال در شکل ۱ نشان داده شد).

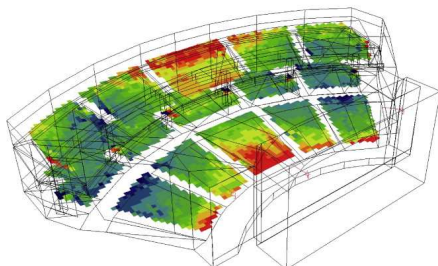
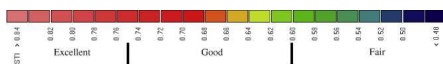


شکل ۷. طیف‌نگاشت سیگنال صدای یک بلبل

این شیوه مصورسازی صدا کاربرد گسترده‌ای در آکوستیک جانوری و آواشناسی آکوستیک دارد [۸].

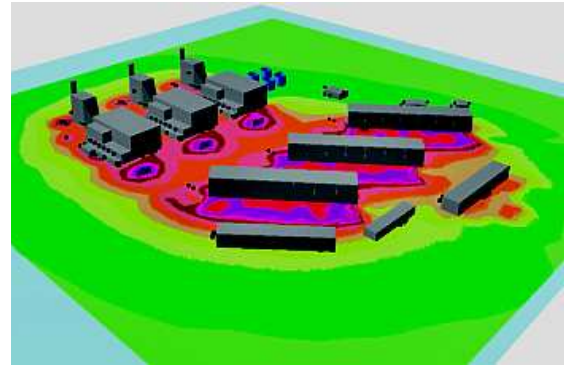
## ۸. مدلسازی آکوستیکی در فضاهای معماری

یکی از مراحل مهم در پروژه‌های معماری، به ویژه پروژه‌های ساخت سالن‌های اجرای موسیقی، همایش، سخنرانی و اجتماعات، تحلیل آکوستیکی طرح مورد نظر است. در این مرحله، معمولاً دو معیار مد نظر قرار می‌گیرند. اول اینکه میزان عبور صدا از دیوارها، سقف و کف سالن از حد مشخصی که در استانداردها آمده است بیشتر نباشد (چه عبور صدای داخل به بیرون و چه ورود صدای بیرون به داخل). دوم اینکه کیفیت صدایی که در فضای داخلی منتشر می‌شود به لحاظ صمیمیت<sup>۱۳</sup>، پخشی<sup>۱۴</sup>، تداخل بازتاب‌ها<sup>۱۵</sup> و تعاریفی از این دست [۱۱]، متناسب با کارکرد آن فضا باشد. در این راستا، مصورسازی صدا بر اساس معماری فضای داخلی می‌تواند کمک مؤثری در انتخاب هندسه طرح‌های داخلی و مواد مورد استفاده در ساخت محسوب شود. این مصورسازی ممکن است قبل از ساخت، یا بعد از ساخت انجام شود. در مواردی که مدلسازی قبل از ساخت انجام می‌شود، معمولاً به کمک نرم‌افزارهای مدلسازی منابع صوتی فرضی در نقاط مناسب از طرح تعریف می‌شوند و با انتخاب مواد و هندسه مورد نظر، رفتار صوت در فضا مصورسازی می‌شود. اگر این مدلسازی بعد از ساخت انجام شود، می‌توان به کمک منبع صوت واقعی و اندازه‌گیری‌های متعدد در محل، مانند آنچه در بخش ۷ آمد، به مصورسازی صوت اقدام کرد. شکل (۱۱) یک سالن سینما را نشان می‌دهد که بعد از ساخت مورد مطالعه قرار گرفته و «کیفیت» صدایی که به نقاط مختلف از جایگاه تماشاچیان (شنوندگان) می‌رسد به تصویر کشیده شده است [۱۲]. اینگونه مصورسازی‌ها معمولاً به کمک نرم‌افزارهای مدلسازی آکوستیکی چون اودیون<sup>۱۶</sup>، روم تولز<sup>۱۷</sup> و ساوندپلن<sup>۱۸</sup> انجام می‌شوند.



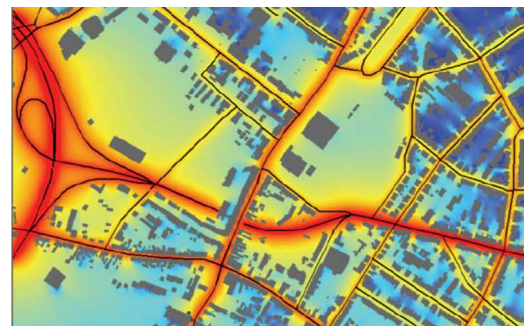
شکل ۱۱. مدلسازی کیفیت صدا در یک سالن سینما پس از ساخت

در این شکل، رنگ‌های تیره‌تر نماینده ترازهای فشار صوت بالاتر هستند.



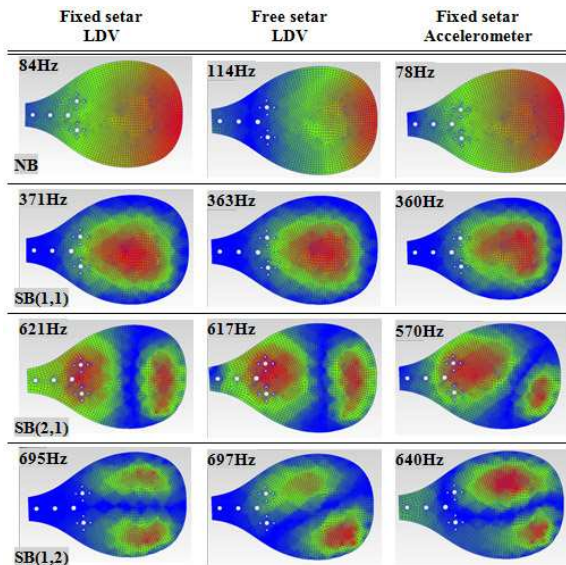
شکل ۹. نقشه نوفه به‌دست آمده برای یک نیروگاه

برای به دست آوردن نقشه‌های نوفه بر اساس اندازه‌گیری‌های آکوستیکی، معمولاً از نرم‌افزارهای مدلسازی آکوستیکی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به نرم‌افزارهای نویزمپ<sup>۱۱</sup> یا کدنا<sup>۱۲</sup> اشاره کرد. در طول این فرایند، نقشه معماری یا شهری محدوده مورد نظر در نرم‌افزار ترسیم می‌شود و سپس اطلاعات صوتی به‌دست آمده، بر آن نقشه‌ها منطبق می‌گردد. شکل (۱۰) نقشه نوفه یک منطقه شهری را نشان می‌دهد که شامل خیابان‌ها، مناطق مسکونی و بزرگراه‌های متقاطع است [۱۰].



شکل ۱۰. نقشه نوفه یک منطقه شهری شامل خیابان‌ها، مناطق مسکونی و بزرگراه‌های متقاطع

همان‌طور که اشاره شد، از جمله کاربردهای مهم نقشه‌های نوفه، می‌توان به مصورسازی صدا در آکوستیک زیست‌محیطی جهت برنامه‌ریزی شهری، کنترل نوفه در پروژه‌های صنعتی و ساختمانی بزرگ اشاره کرد. اگرچه، این نمونه از مدلسازی صوتی را برای محیط‌های داخلی و فضاهای ساخته‌شده نیز می‌توان انجام داد.



شکل ۱۲. شکل مودهای ارتعاش صفحه یک سه‌تار که با فرکانس‌های مختلف تحریک شده است

#### ۱۰. تمام‌نگاری صوتی

همان‌طور که در ابتدای این مقاله اشاره شد، یکی از دشواری‌های تحلیل صدا و نوبه، نمایان نبودن آنهاست. به همین دلیل، داشتن تصویری از صدا اغلب کمک می‌کند تا روش صحیح‌تری را در جهت کنترل نوبه انتخاب کنیم. پیشرفت‌های تحلیلی زیادی در راستای مصورسازی صدا و نوبه انجام شده و البته نتایج زیادی نیز حاصل شده است [۹]. اگرچه، روش تحلیل هنوز در وادی عمل دچار محدودیت‌هایی است. این در حالی است که پیشرفت سریع در زمینه ابزار دقیق این امکان را فراهم کرده که از تعداد زیادی میکروفن در کنار هم، و سیستم‌های پردازش سیگنال سریع استفاده شود. اگرچه، این روش‌ها نیز هنوز محدودیت‌هایی دارند ولی کمک کرده اند تا مصورسازی صوت، به ویژه برای منبع‌های ایستا، به گونه‌ای فراهم شود که بتوان تصویر تمام‌نمایی از وضعیت صوتی آنها داشت. به این تصاویر، تمام‌نگاری صوتی<sup>۱۹</sup> گفته می‌شود. شکل (۱۳) نمونه‌ای از یک تمام‌نگاری صوتی حرکت خودرو در اتاق بی‌بژواک<sup>۲۰</sup> به همراه باد و چرخش تایر را نشان می‌دهد که به کمک یک آرایه ۲۶ میکروفونی تهیه شده است [۹].

همان‌طور که در بالا آمد، کاربرد اصلی اینگونه مدلسازی، در طراحی‌های آکوستیک معماری یا آکوستیک فضاهای داخلی است. در بسیاری از شرکت‌های معماری، بخشی از شرکت اختصاص به مشاوران و طراحان آکوستیک دارد که یکی از وظایفشان انجام تحلیل‌ها و مدلسازی‌هایی از این دست می‌باشد.

#### ۹. تحلیل مودال

تحلیل مودال به طور گسترده برای تشریح ویژگی‌های دینامیکی یک سازه، بر حسب پارامترهای مودال نظیر فرکانس طبیعی، ضریب میرایی، جرم مودال و شکل مود به کار گرفته می‌شود. این تحلیل ممکن است به صورت تجربی یا به صورت ریاضیاتی انجام شود [۹]. در تحلیل مودال ریاضیاتی، سعی بر این است که معادلات حرکت سازه از هم جدا شوند تا قابل حل گردند. آنجا که معادلات جواب دقیقی به دست نمی‌دهند، روش‌های تقریب عددی چون اجزای محدود یا اجزای مرزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در آزمون مودال تجربی، یک نیروی معین از نقطه یا نقاطی مشخص سازه را تحریک می‌کند تا از این طریق توابع پاسخ فرکانسی شکل بگیرند. در نهایت، پارامترهای مودال با رسم نمودار بر داده‌های به‌دست‌آمده مشخص می‌شوند. بسته به فرکانس تحریک، سازه با شکل مود مشخصی نوسان می‌کند. روش‌های مختلفی برای مصورسازی شکل مودها وجود دارد. اگر اطلاعات آزمون توسط شتاب‌سنج گرفته شده باشد، مودهای ارتعاشی حاصل می‌شوند و اگر به جای شتاب‌سنج از میکروفن استفاده شده باشد، پارامترهای مودال میدان نزدیک و شکل مودهای آکوستیکی به دست می‌آیند. شکل (۱۲) نشان دهنده شکل مودهای صفحه یک سه‌تار است که با فرکانس‌های مختلف تحریک شده است [۱۳].

آزمون و تحلیل مودال کاربردهای بسیار گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد که از آن جمله می‌توان به صنایع هواپیماسازی، صنایع خودروسازی، سازه‌های بزرگ عمرانی و همچنین آکوستیک موسیقایی اشاره کرد.

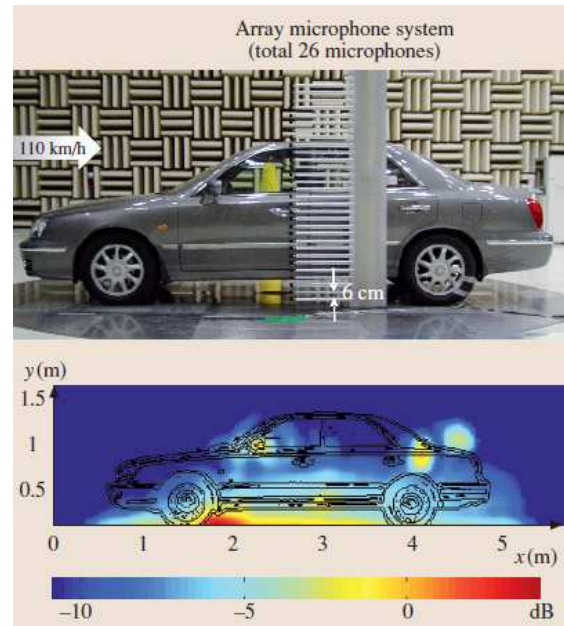
یا تکنیک مصورسازی متناسب با تحلیل مورد نظر را از بین روش‌های موجود انتخاب کرد و به کمک آن به درکی دقیق‌تر از رفتار صوت در مسأله مورد نظر دست یافت.

### پی‌نوشت

1. Sound visualization
2. Formants
3. Echolocation
4. Weighting curves
5. NVH (Noise, Vibration, and Harshness)
6. RTA (Real-Time Analysis)
7. STFT (Short Time Fourier Transform)
8. Spectrogram
9. Broadband
10. Noise map
11. Noisemap
12. Cadna
13. Intimacy
14. Diffuseness
15. Reflections interference
16. Odeon
17. Room Tools
18. Sound Plan
19. Acoustic holography
20. Anechoic chamber
21. Reverberation
22. De-dopplerization
23. De-reverberation

### منابع

- [1] D.R. Raichel, *The Science and Applications of Acoustics*, 2nd ed., New York: Springer, 2006.
- [2] K. Shin, J. Hammond, *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*, London: Wiley, 2008.
- [3] D. Havelock, S. Kuwano, M. Vorländer, *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, Vol.1, Springer, 2008.
- [4] آ. اپنهایم، آ. ویلسکی، ج. نواب، *سیگنال‌ها و سیستم‌ها*، ترجمه پ. جبه‌دار مارالانی، ب. زنج، چاپ ششم، تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۸
- [5] The Official Web Page of Brüel & Kjær, Viewed 2012, available: <http://www.bksv.com>
- [6] ل. کینزله، آ. فرای، *مبانی آکوستیک*، ترجمه م. برکشلی، ض. اسماعیل‌بیگی، چاپ چهارم، انتشارات امیرکبیر، ۱۳۸۲
- [7] D. Thompson, *Noise Control*, Lecture Notes, Southampton: isvr, University of Southampton, 2008.
- [8] دی. بی. فرای، *مقدمه‌ای بر آواشناسی آکوستیک*، ترجمه ن. جهانگیری، چاپ دوم، تهران: نشر آگه، ۱۳۸۹



شکل ۱۳. تمام‌نگاری صوتی یک خودرو در اتاق بی‌پژواک به همراه باد و چرخش تایر

به طوری که اشاره شد، این روش همچنان دشواری‌هایی دارد که از آن جمله می‌توان به مسائل مربوط به تمام‌نگاری صوتی منابع متحرک اشاره کرد. مفاهیمی نظیر اثر داپلر و مقولات مربوط به واخندگی<sup>۲۱</sup> در مورد منابع متحرک صوت، باعث ایجاد اختلال در این مدل‌سازی می‌شوند، تا جایی که برای غلبه بر این مشکل، روش داپلرزدایی<sup>۲۲</sup> و واخندگی‌زدایی<sup>۲۳</sup> مورد توجه قرار گرفته است [۹]. از جمله کاربردهای تمام‌نگاری صوتی، می‌توان به مصورسازی صوتی منابع صدا نظیر وسایل نقلیه، هواپیماها، قطارها، و همچنین محصولات صنعتی مختلف که بنا به دلایل مختلف از جمله وجود موتورها یا فن‌ها، تولید صدا می‌کنند اشاره کرد.

### ۱۱. نتیجه‌گیری

در این مقاله برخی از روش‌ها و تکنیک‌های رایج در مصورسازی صدا در تحلیل‌های آکوستیکی معرفی شدند و برای هر کدام از آنها، نمونه‌های کاربردی ارائه شد. دشواری‌های موجود در تحلیل صدا، می‌تواند به کمک این تکنیک‌های مصورسازی ساده‌سازی شود. اگرچه مدل‌سازی تحلیلی صدا همچنان محدودیت‌هایی دارد اما مدل‌سازی تجربی صدا توانسته گام‌های مفیدی در راستای درک بهتر رفتار صوت در شرایط مختلف بردارد. با توجه به کاربردهای گسترده تحلیل‌های آکوستیکی، می‌توان روش

[12] Courtesy of Odeon, The Official Web Page, [online], Viewed 2012, available: <http://www.odeon.dk/>  
[13] H. Mansour, *A comparison of vibration analysis techniques applied to the Persian Setar*, MUMT 618, McGill University, 2012.

[9] T. Rossing, *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2007.  
[10] The UK's Department for Environment, Food and Rural Affairs (defra), [online], Viewed 2012, available: [Noisemapping.defra.gov.uk](http://Noisemapping.defra.gov.uk).  
[11] M. Long, *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, 2006.