



کار آئی مانع های صوتی با استفاده از سطوح پخش کننده شیار دار

دکتر محمد رضا منظم

چکیده

زمینه و هدف: مانع های صوتی یکی از موثرترین روشهای کنترل صدا برای آلودگیهای صوتی محیطی و همچنین کنترل سر و صدا در صنایع میباشد. اساسا مانع صوتی از انتقال مستقیم موج صوتی توسط منبع صوتی به گیرنده جلوگیری بعمل می آورد. اگر ساختار مانع صوتی بخوبی طراحی شود، موج صوتی فقط از راههای غیر مستقیم میتواند به گیرنده منتقل شود.

روش بررسی: بر اساس اطلاعات قبلی از مدلهای مختلف مانعهای صوتی و تاریخچه توسعه آنها، نتایج یک تحقیق گسترده در باره کار آئی مانعهای صوتی با اشکال T, Y, Arrow (پیکان) و Cylinder (استوانه ای) مجهز به پخش کننده های صوتی «Quadratic Residue Diffuser QRD» در این مقاله ارائه می گردد. برای محاسبه افت صدا در این تحقیق از یک روش شبیه سازی دو بعدی حد مرزی (BEM) استفاده گردیده است.

یافته ها: نتایج بدست آمده از مانعهای شیار دار (QRD) با مانعهای سخت (صلب یا سطوح کاملا منعکس کننده) و همچنین جاذب دار مقایسه گردیده اند. روش ساده و سریع جعبه های با امپدانس متغیر در مدل شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن در مقایسه با روش استاندارد مدل سازی تمام سطوح در یک باند فرکانسی وسیع با دقت بالائی گزارش گردید. مانعهای T و پیکان شکل کار آئی بهتری را نسبت به سایر اشکال مانعهای صوتی ایجاد کردند. همچنین مشخص گردید که بهترین شکل برای استفاده از سطوح شیار دار (QRD) مانع T شکل است.

نتیجه گیری: نتایج این تحقیق همچنین نشان میدهد که اگر فرکانس طراحی سطوح پخش کننده صوتی (QRD) پایین آورده شوند، کار آئی مانع صوتی شیار دار نیز در فرکانسهای پایینتر بهبود پیدا خواهد کرد. بنابر این در بین مدلهای تست شده بهترین مانع صوتی برای کنترل سر و صدای ترافیک یک دیوار T شکل شیار دار با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز میباشد.

کلید واژه ها: مانعهای صوتی، مانعهای شیار دار (QRD)، روش حد مرزی (BEM)

مقدمه

امروزه مانعهای صوتی یکی از موثرترین روشهای کنترل سرو صدای محیطی ناشی از عواملی همچون ترافیک شهری، قطار و هواپیما و ... در سرتاسر دنیاست. تا کنون در پروژه های متعدد تحقیقات زیادی بمنظور افزایش کار آئی مانعهای صوتی بعمل آمده است. سیر تکاملی این دسته از روشهای کنترل صدا را میتوان در سه دسته بشرح زیر خلاصه کرد.

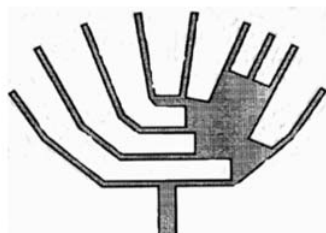
اولین گروه از محققین با استفاده از افزایش فاصله غیر مستقیم بین مانع و گیرنده، میزان قابل قبولی به کار آئی مانعهای صوتی افزودند. بعنوان مثال Hothersall در سال ۱۹۹۱ با افزایش ارتفاع مانع از ۳ متر به ۵ متر توانست ۳۰.۸ دسی بل به کار آئی آن بیافزاید (۱). همچنین Watts در سال ۱۹۹۴ مانعهای صوتی چندگانه را معرفی کرد و نتیجه گرفت که وقتی دو مانع در فاصله ۸ متری یکدیگر قرار گیرند میتوانند به میزان ۳۰.۶ دسی بل کار آئی مانع صوتی ساده را

۱- نویسنده پاسخگن، استادیار گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران (email: mmonazzam@hotmail.com)



کرد. در این ارتباط Crombi و همکارانش در سال ۱۹۹۵ ثابت کردند که با اضافه کردن یک لبه ۱.۵ متری در فاصله یک متری لبه بالائی دیوار بمیزان ۲.۶ دسی بل میتوان به کارآئی مانع افزود (۵). بهترین مثال برای مانعهای انفعالی صوتی مانعی است که توسط Fujiwara در سال ۱۹۹۸ طراحی شد (شکل ۱). این مانع کارآئی بسیار خوبی در بسیاری از فرکانسهای صوتی مخصوصاً فرکانسهای میانی صوتی از خود نشان میدهد (۶). البته این روش قابلیت بهینه‌سازی و طراحی بسیار ضعیفی دارد چون مبنای طراحی آن بر اساس تجربه و خطاست و روش ریاضی خاصی در این مورد ارائه نگردیده است.

شکل ۱- سطح مقطع یک بعدی از مانع راکتیو طراحی شده توسط Fujiwara



Fujiwara's Reactive Barrier

لازم بذکر است که عده معدودی از محققین هم به روش بهینه‌سازی در صدد افزایش کارآئی مانعهای صوتی برآمدند که در این زمینه Thorsson در سالهای ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ نتایج تئوری خوبی بدست آورد ولی متأسفانه نتایج بدست آمده با مواد و سطوح واقعی مطابقت نداشته و بهمین دلیل قابل استفاده در کاربردهای عملی نیستند (۷ و ۸). اگر چه دور نمای بسیار خوبی برای تحقیقات بیشتر در این زمینه محسوب می‌گردد.

بر اساس تجربیات بدست آمده از تحقیقات گروههای قبلی این تحقیق در نظر دارد که افق تازه‌ای را برای طراحی مانعهای صوتی با کارآئی بالا با استفاده از پخش‌کننده‌های صوتی (QRD) بگشاید. سطوح مورد استفاده قابلیت محاسبه و طراحی داشته و مدارک فراوانی از عملکرد پخش‌کنندگی بسیار خوب آنها در استودیوهای صوتی؛ آمفی تاترها و سالنهای سینما در دست است. در واقع این پخش‌کننده‌ها یکسری سطوح شیار دار با عمقهای متفاوت هستند که

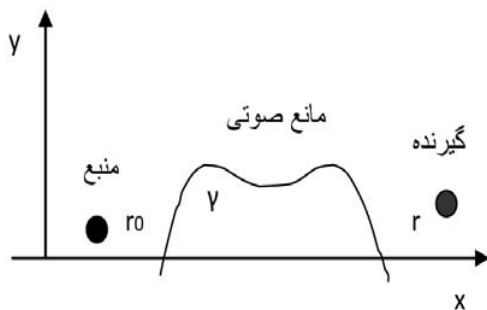
افزایش دهند (۲). May در سال ۱۹۸۰ مانعهای عریض را معرفی کرد و میزان ۳۰.۱ دسی بل افزایش کارآئی را با یک دیوار به ضخامت ۲.۴۴ متر اندازه‌گیری نمود (۳). پر واضح است که تمام تلاشهای انجام شده در این مسیر دارای مشکلات کاربردی، زیبایی‌شناسی و همچنین هزینه بالاست. شاید به همین دلیل است که این روشها امروزه آنچنان مرسوم نمی‌باشند.

دسته دوم از تلاشهای انجام شده برای بهبود کارآئی مانعهای صوتی بر اساس تغییر در شکل و فرم و جنس سطوح بالائی دیوارهاست. در این روش موج شکست از آخرین گوشه مانع با استفاده از مواد جاذب صوتی جذب شده و یا اینکه با استفاده از لبه‌های متعدد بر اساس اصل عکس مجذور فاصله از انرژی آن کاسته میگردد. این روشها تا کنون موفقیت‌های زیادی را بدنبال داشته است و در این زمینه میتوان از مانعهای به شکل Y، T، Arrow (پیکان شکل، استوانه ای (Cylinder) شکل و همچنین استفاده از مواد جاذب در سطوح فوقانی مانع را نام برد. بعنوان مثال Hothersall نشان داد که یک مانع صوتی بشکل T با لبه بالائی با طول بازوی ۲.۴۴ متر میتواند بمیزان ۴.۲ دسی بل به کارآئی مانع صوتی بیافزاید (۴). همچنین این محقق نشان داد که استفاده از مواد جاذب در سطح بالائی همین دیوار به میزان ۵.۹ دسی بل به کارآئی مانع صوتی میافزاید. گر چه این دسته از تحقیقات تحول عظیمی در طراحی مانعهای صوتی با کارآئی بالا ایجاد نموده ولی هر کدام بتنهائی مشکل کاربردی خاصی داشته که مانع از گسترش وسیع کاربردهای عملی آنها گردیده است. بعنوان مثال استفاده از مواد جاذب بیشترین تاثیر روی افزایش کارآئی این دسته از روشهای کنترل صدا دارد ولی در کاربردهای عملی تقریباً استفاده از آن غیر ممکن است.

سومین گروه از محققین با الهام از نتایج تحقیقات گروههای قبلی در صدد بهبود کارآئی مانعهای صوتی با استفاده از تئوریهای نوین صوتی برآمدند. در این دسته عمده تئوریهای مورد استفاده عبارتند از کاهش هم‌فازی صوتی و خنثی‌سازی انفعالی (راکتیو) امواج صوتی که عمدتاً در لبه بالائی دیوارچه بصورت طولی و یا بصورت عرضی مورد استفاده قرار میگیرند. در این خصوص مثالهای بسیار زیادی وجود دارد که از آن جمله میتوان به مانعهای چند گوشه ای اشاره

انجام خواهد گرفت در شکل ۳ نشان داده شده است. محور x ها منطبق بر زمین، محور y ها عمود بر سطح زمین و γ سطح مقطع مانع صوتی روی زمین میباشد.

شکل ۳- مدل دو بعدی شبیه سازی



اگر یک منبع خطی تک فرکانس در نقطه (x_0, y_0) برابر $r_0 = (x_0, y_0)$ استقرار یابد، در نقطه $r = (x, y)$ فشار صوتی $p(r, r_0)$ خواهد بود. در این مدل مانع صوتی بطول بینهایت روی زمین سفت واقع شده بگونه ای که شرایط آکوستیکی در طول مانع بدون تغییر خواهد ماند. بنابر این میتوان این مدل را بجای سه بعدی به شرایط دو بعدی کاهش داد. در این شرایط محور z ها موازی با محور طولی مانع خواهد بود. لازم بذکر است که در این متد امپدانس آکوستیکی (مقاومت آکوستیکی) سطوح با تغییر زاویه تابش تغییر نخواهند کرد (اصطلاحاً سطوح Locally reacting) ادیمیتانس (عکس امپدانس) سطحی ویژه در نقطه $r_s = (x_s, y_s)$ روی γ ، $\beta(r_s)$ خواهد بود.

در این متد معادله موج هلم هولتز بوسیله معادله انتگرال سطحی (Boundary Integral Equation) در هر فرکانس بطور مجزا حل میشود. به این منظور سطح مانع به تعدادی پاره خط بطولهای:

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n, \dots, \gamma_N$$

تقسیم میشوند. طول پاره خطها به اندازه ای در نظر گرفته میشوند که بتوان فشار صوتی $p(r_n, r_0)$ در وسط پاره خط (نقطه r_n) را در طول پاره خط یکسان در نظر گرفت. لذا در این تحقیق طول پاره خطها (المنتها) کمتر از $\lambda/5$ در نظر گرفته شده تا بتوان شرط یکسان بودن فشار صوتی در طول المنت را با تقریب بالائی تامین نمود (۱۰). لازم بذکر است هر چه طول المنتها کوچکتر انتخاب شوند دقت نتایج بالاتر خواهد بود. با

ترتیب قرارگیری آنها بر اساس حداقل باقیمانده توان دوم اعداد اول میباشد (QRD مخفف Quadratic Residue Sequence) بوده و این سطوح به همین نام تجارتي معروف میباشند. این سطوح اولین بار توسط Schroeder در سال ۱۹۷۵ معرفی و بسرعت روشهای محاسبه و طراحی آنها مورد تحقیق قرار گرفت و بطور اعجاب انگیزی در سرتاسر دنیا در سالنهای سر بسته برای بهبود کیفیت صدا مورد استفاده روز افزون قرار گرفتند (۹). در این مدل امواج تابشی وارده هر شیار شده و پس از برخورد به ته شیار منعکس می گردند. موجهای انعکاسی در سطح بالائی دارای اختلاف فاز بوده که این اختلاف فاز را هم مدیون اختلاف مسیر پیموده شده در یک رفت و برگشت می باشند. میزان پخش کنندگی هر دسته از این پخش کننده ها بستگی به میزان اختلاف فاز امواج وارده به سطح دارد. Schroeder ثابت کرد که سطوح شیار دار با ترتیب قرارگیری ذکر شده میتوانند یک سطح موج تقریباً یکنواخت را در مقابل پخش کننده ایجاد نمایند. تا کنون این سطوح در کاربردهای محیطی بمنظور کنترل صدا مورد بررسی قرار نگرفته اند که این تحقیق اولین گام در زمینه استفاده از این پخش کننده ها در کنترل سر و صدای محیطی بشمار میرود. شکل شماره ۲ یک نمونه شماتیک مانع راکتیو (پخش کننده شیاردار) معرفی شده در این پژوهش را نشان می دهد.

شکل ۲- سطح مقطع یک مانع T شکل شیاردار (QRD)

QRD barrier



روش بررسی

در این تحقیق روش شبیه سازی دو بعدی از نوع BEM (Boundary Element Method) مورد استفاده قرار گرفته است. شرایطی که در آن محاسبات



توجه به فرضیات فوق معادله انتگرال به شکل زیر خلاصه می شود.

(1)

$$\varepsilon(\mathbf{r})p(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = G(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) + \sum_{n=1}^N p(\mathbf{r}_n) \int_{\gamma} \left(\frac{\partial G(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_n)}{\partial n(\mathbf{r}_s)} - ik\beta(\mathbf{r}_s)G(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}) \right) ds(\mathbf{r}_s)$$

$d_s(\mathbf{r}_s)$ نشان دهنده طول هر پاره خط و k عدد موج (نسبت طول موج به سرعت صوت) است. $\varepsilon(\mathbf{r})$ یک ضریب ثابت است که با توجه به محل استقرار گیرنده تعیین میگردد. به استثناء مواردی که گیرنده روی مانع صوتی است در تمام حالات $\varepsilon(\mathbf{r})$ مساوی یک است. وقتی گیرنده روی سطح مانع است و بالبه ها فاصله دارد $\varepsilon(\mathbf{r})$ مساوی 0.5 و وقتی که گیرنده در لبه ها واقع شود مساوی $(2\pi)/\Omega$ است (Ω زاویه فضائی است).

فرمولهای تجربی Delany and Bazley محاسبه گردیده (۱۱) و محاسبه امپدانس اکوستیکی در بالای سطوح شیار دار با استفاده از فرمول زیر بوده است (۱۲).

$$Z_{ch} = j \cot(kl) \quad (3)$$

"عمق شیار است"

بمنظور جلوگیری از تداخل اثرات تصویر منبع صوت در انعکاس امواج؛ منبع صوتی روی سطح زمین صلب در فاصله ۵ متری از مانع قرار گرفت. و نهایتاً فشار صوتی در مراکز فرکانسهای $1/15$ اکتاو باند بین ۵۰ تا ۴۰۰۰ هرتز در محل گیرنده های مختلف اندازه گیری شده و کار آئی مانع برحسب افت صدا (Insertion Loss) با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید.

$$IL = -20 \log_{10} \left| \frac{p(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)}{G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)} \right| \text{ dB} \quad (4)$$

مدلهای مورد استفاده در پژوهش

مدلهای مورد استفاده در این تحقیق در شکل شماره ۴ ارائه گردیده اند. ارتفاع تمام شده کلیه مانعهای مورد بررسی ۳ متر بوده که با ارتفاع مانع های صوتی Fujiwara (۶) یکسان هستند. در تمامی مدلها ضخامت پایه و لبه بالائی دیوار بترتیب 0.1 و 0.3 متر میباشد. طول بازوی رف بالائی مانع T شکل ۱ متر، قطر استوانه (Cylinder) ۱ متر و هر طرف از لبه بالائی مانعهای Y و پیکان شکل نیز ۱ متر می باشد.

همانطور که از معادله ۱ دیده می شود انتگرال فوق در روی سطح γ گرفته شده که نکته تمیز دهنده این روش از روش FEM (Finite Element Method) می باشد. در روش FEM انتگرال روی حجم گرفته میشود لذا مدلسازی آن معمولاً مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار بالا است.

$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ (گرین فانکشن) فشار صوتی در نقطه \mathbf{r} در اثر منبع صوتی \mathbf{r}_0 است در شرایطی که مانع صوتی حضور ندارد.

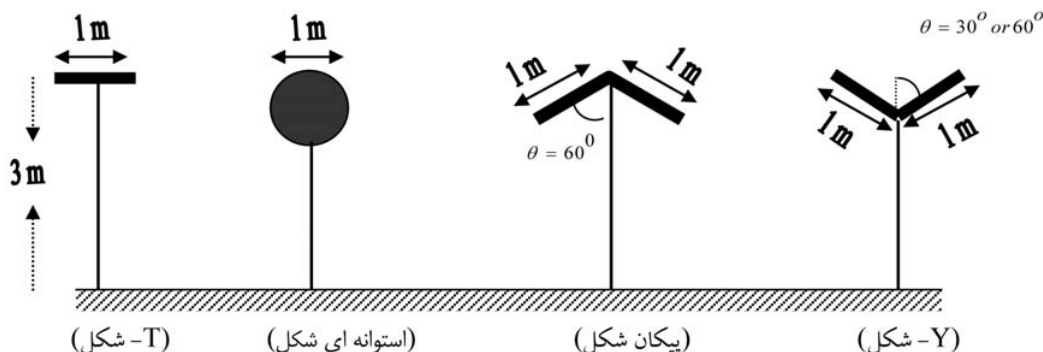
(2)

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -\frac{i}{4} \left\{ H_0^{(1)}(k|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|) + H_0^{(1)}(k|\mathbf{r}'_0 - \mathbf{r}|) \right\}$$

$\mathbf{r}'_0 = (x_0, -y_0)$ مختصات تصویر منبع صوتی در زمین است. $H_0(1)$ هانکل فانکشن نوع اول و ترتیب صفر است. در این مدل معادله (۱) برای محاسبه فشار صوتی در محل گیرنده مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق بمنظور کاهش تعداد المنتهای مورد نیاز و همچنین سرعت بخشیدن به محاسبات بجای سطوح واقعی شیارها از سطوح فرضی هموار با خصوصیات اکوستیکی معادل استفاده شد. عبارتی سطوح شیار دار در پخش کننده صوتی بصورت جعبه هائی با امپدانسهای اکوستیکی متفاوت در نظر گرفته شدند که روش بسیار خوبی برای شبیه سازی این سطوح تا بالاترین فرکانس موثر پخش کننده صوتی بشمار میروند. البته تست لازم در این خصوص نیز بعمل آمده که نتایج آن در قسمتهای بعدی خواهد آمد.

امپدانس اکوستیکی مواد جاذب با استفاده از

شکل ۴- سطح مقطع مانعهای صوتی با اشکال مختلف



شده‌اند. این ضخامت معادل بیشترین عمق شیارها در مانعهای شیاردار QRD می‌باشند. ضمناً سطح ماده جاذب نیز باندازه سطح کلی QRD خواهد بود. مانعهای شیاردار (QRD): در این دسته از مانعها سطوح فوقانی مانعهای مورد اشاره در شکل ۴ با استفاده از سطوح شیاردار (QRD) پوشانده شده‌اند. تمامی QRDها دارای طول کلی یکسان هستند گرچه که طراحی آنها از نظر تعداد شیار، عمق و عرض شیار متفاوت خواهد بود. در واقع طراحی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا تاثیر فاکتورهای مختلف اکوستیکی پخش کننده‌ها صوتی

زاویه شاخه‌های مانع مدل پیکان شکل ثابت و برابر ۶۰ درجه است در صورتی که برای مدل Y شکل دو زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه تست شده‌اند. در مدل‌های فوق سه سطح فوقانی مختلف شامل سفت (صلب)، جاذب و QRD (شیاردار) مورد بررسی قرار می‌گیرند. سطوح سفت (صلب): در این دسته کلیه سطوح دارای ادیتمانس صفر می‌باشند. سطوح جاذب: در این دسته لبه بالائی مانع با استفاده از مواد جاذب با مقاومت شماره‌ای 20,000 و ضخامتی معادل ۰/۲۴۵ متر پوشانده

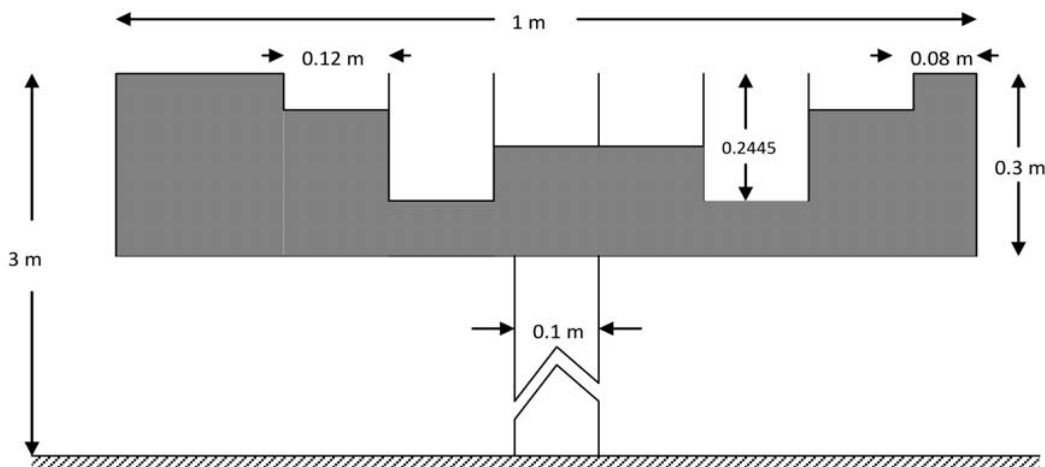
جدول ۱- خصوصیات و جزئیات طراحی مانعهای شیاردار مورد استفاده در تحقیق

مدل	سطح مقطع	تعداد QRD	فرکانس طراحی fr (kHz)	عرض شیار w (cm)	توضیحات
A	T	۱	۱	۱۲	-
B	T	۲	۱	۶	-
C	T	۶	۱	۲	-
D	T	۱	۰/۵	۱۲	-
E	T	۲	۰/۵	۶	-
F	T	۶	۰/۵	۲	-
G	T	۱	۰/۴	۱۲	-
H	T	۲	۰/۴	۶	-
I	T	۶	۰/۴	۲	-
L	پیکان شکل	۲	۰/۵	۱۲	* $\theta = 60^\circ$
M	پیکان شکل	۲	۰/۴	۱۲	$\theta = 60^\circ$
N	پیکان شکل	۴	۰/۴	۱۲	بالا و پایین
O	استوانه‌ای شکل	۲	۰/۴	۱۲	-
R	Y	۲	۰/۴	۱۲	$\theta = 30^\circ$
S	Y	۲	۰/۴	۱۲	$\theta = 60^\circ$

* θ زاویه لبه بالائی مانعهای زاویه دار اشاره شده در شکل ۲ است.



شکل ۵- ابعاد یک مانع T شکل با یک پخش کننده با $N=7$ و فرکانس طراحی $f_r = 400 \text{ Hz}$



• تعداد شیارها هفت عدد میباشد ولی در شکل بنظر ۶ می آید دلیل آن اینست که در پخش کننده های نوع QRD عمق یکی از شیارها همیشه صفر است.

روی مانها مورد بررسی قرار گیرند.

عرض شیار "w"، بیشترین عمق d و همچنین n_{\max} بیشترین تعداد شیارها در ترتیب قرارگیری $(n \bmod N)$ میباشد. بنابراین برای یک QRD با $N=7$ و با عرض شیار ۱۲ سانتی متر، باند فرکانسی موثر عبارت خواهد بود از محدوده فرکانس طراحی تا حدود $1/4 \text{ kHz}$ که در کاربردهای محیطی محدوده بسیار خوبی بشمار میرود.

یافته ها

مدل سازی تمام سطوح

روش دقیق و استاندارد شبیه سازی در واقع مدل سازی تمام سطوح است در حالی که در این تحقیق بجای مدل سازی تمام سطوح (Whole surface modeling) از روش آسان و سریع جعبه های با امیدانسه های متغیر (Box Method) استفاده شده است. لذا قبل از هر چیز ضروری بنظر میرسد که دقت روش مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از روش دقیق و استاندارد مدل سازی تمام سطح، ارزیابی گردد. بهمین دلیل یکی از مانعهای شیاردار انتخاب و هر دو مدل شبیه سازی روی آن تست گردید. نتایج این بررسی در شکل ۶ ارائه گردیده است.

جزئیات مانعهای صوتی شیاردار مختلف استفاده شده در این تحقیق در جدول شماره ۱ ارائه گردیده اند. مشخصات یکی از مانعهای شیاردار بنام مانع مدل G در شکل ۵ نشان داده شده و بقیه مانعها در چارچوبی شبیه این مانع قرار گرفته اند.

عمیق ترین شیار در بین مانعهای شیار دار طراحی شده 0.245 متر بوده که مربوط به مانع مدل G با فرکانس طراحی 400 هرتز است. بمنظور بررسی افزایش کار آئی و تعمیم مانعهای ارائه شده، نتایج بدست آمده از تمام مانعهای شیاردار با یک مانع مرجع (مانع AT یا مانع T شکل جاذب دار) مقایسه میگردند. لازم بذکر است که بمنظور تعیین عمق شیارها با توجه به فرکانس طراحی از معادله ذیل استفاده گردیده است:

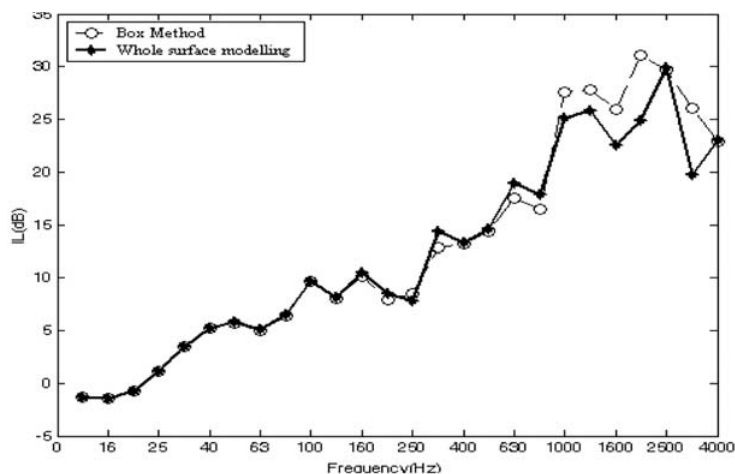
$$d_n = \frac{c(n^2 \bmod N)}{N(2f_r)} \quad (5)$$

n یک شمارنده است، N عدد اول (تعداد شیارها) و f_r فرکانس طراحی است.

طیف موثر سطوح شیار دار (QRD) را نیز میتوان با استفاده از روش زیر بطور تقریبی بدست آورد.

$$\lambda_{\max} \approx \frac{2Nd_{\max}}{n_{\max}}; \lambda_{\min} \approx 2w \quad (6)$$

شکل ۶- مقایسه نتایج بین دو روش شبیه سازی برای مانع مدل G وقتی گیرنده در فاصله ۵۰ متری مانع روی زمین قرار دارد



سطوح شیاردار (QRD) روی مانعهای با شکلهای مختلف

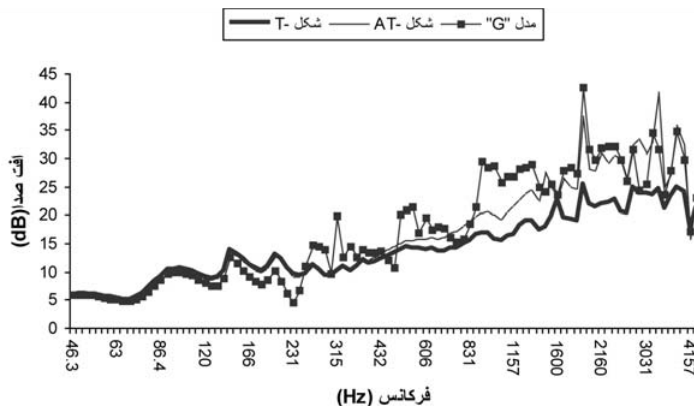
بمنظور بررسی اثر سطوح پخش کننده شیاردار روی مانعهای صوتی باشکال مختلف، پخش کننده (QRD) با فرکانس ۴۰۰ هرتز (فرکانس موثر بین ۴۰۰ تا ۱/۴ کیلو هرتز) بعنوان نمونه انتخاب و عملکرد آنها روی مانعهای باشکال مختلف تعیین و با مانع معادل جاذبشان بشرح زیر مقایسه گردیدند.

الف: QRD روی مانعهای T شکل

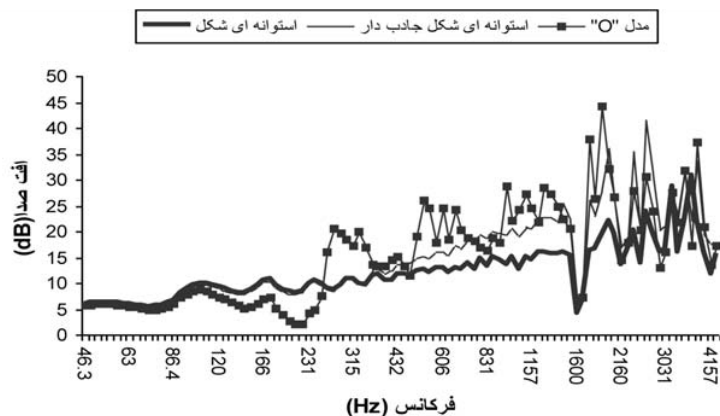
شکل شماره ۷ عملکرد سه مانع T شکل با

همانگونه که از شکل ۶ مشهود است در محدوده بسیار وسیع فرکانسی مدل جعبه های با امیدانس متغیر با دقت بسیار خوب عمل مینمایند. با این تفاوت که مدل استفاده در این تحقیق بسیار سریعتر از مدل استاندارد بوده و لذا محقق را قادر می سازد تا در زمان یکسان مدلهای بسیار بیشتری را مورد مطالعه قرار دهد. البته این روش در فرکانسهای خارج از محدوده فرکانسی پخش کننده صوتی دارای خطای معنی دار است. روش فوق (Box Method) در یک مقیاس آزمایشگاهی ۱/۴ نیز مورد تایید قرار گرفته که از ذکر جزئیات آن در این مقاله خودداری می شود.

شکل ۷- نتایج کاربرد QRD با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز روی مانع T شکل در فاصله ۵۰ متری روی سطح زمین در مراکز باندهای ۱/۱۵ اکتاو باند. (برای مقایسه بهتر نتایج مانع T شکل جاذب دار نیز ارائه گردیده است)



شکل ۸- نتایج کاربرد QRD با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز روی مانع استوانه ای شکل در فاصله ۵۰ متری روی سطح زمین در مراکز باندهای ۱/۱۵ اکتاو باند. (برای مقایسه بهتر نتایج مانع استوانه ای شکل جاذب دار نیز ارائه گردیده است)

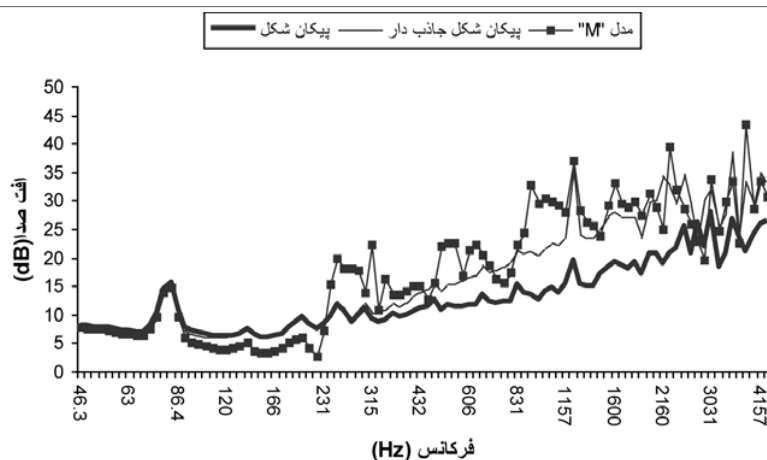


اینکه عملکرد این مانع شیار دار در فرکانسهای مختلف کاملاً انتخابی است، به این معنی که در برخی فرکانسها همچون ۲۵، ۶۳۰ و ۱۰۰۰ هرتز بهترین کار آئی و در برخی فرکانسها همچون فرکانسهای پایینتر از ۳۱۵ و بالاتر از ۲ کیلو هرتز، عملکرد آن در بعضی موارد حتی از مانع معادل صلب هم کمتر است. در این نوع مانع گرچه فرکانس های موثر پخش کننده مورد استفاده از ۴۰۰ هرتز شروع می شود ولی عملکرد آن در مانع شیار دار از ۱/۳ اکتاو باند پایینتر از آن آغاز گردیده و اثر آن تا ۱/۳ اکتاو باند پایینتر از حد بالای فرکانس موثر پخش کننده ادامه می یابد.

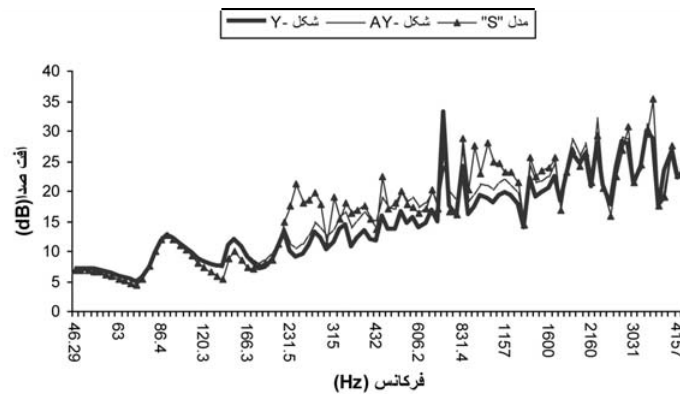
مشخصات لبه بالائی متفاوت را با یکدیگر مقایسه میکند.

همانگونه که از شکل دیده میشود، تقریباً در همه فرکانسها کار آئی مانع T شکل جاذب دار (شکل - AT) از مانع معادل صلب خود (شکل - T) بیشتر است. البته با افزایش فرکانس همانگونه که انتظار میرود عملکرد جذب صوتی و در نتیجه عملکرد مانع جاذب دار افزایش می یابد. مانع T شکل شیار دار (QRD) با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز) همانگونه که از شکل دیده میشود در طیف وسیع فرکانسی کار آئی بهتری نسبت به مانع جاذب دار از خود نشان میدهد. نکته قابل ذکر

شکل ۹- نتایج کاربرد QRD با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز روی مانع پیکان شکل در فاصله ۵۰ متری روی سطح زمین در مراکز باندهای ۱/۱۵ اکتاو باند. (برای مقایسه بهتر نتایج مانع پیکان شکل جاذب دار نیز ارائه گردیده است)



شکل ۱۰- نتایج کاربرد QRD با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز روی مانع Y شکل در فاصله ۵۰ متری روی سطح زمین در مراکز باندهای ۱/۱۵ اکتاو باند. (برای مقایسه بهتر نتایج مانع Y شکل جاذب دار نیز ارائه گردیده است)



کارآئی این مانعها را نسبت به نوع مشابه صلب و حتی جاذب دار بطور موثری افزایش دهد. در این نوع مانع اولین پیک در فرکانس ۲۵۰ هرتز دیده میشود و پیکهای فرکانسهای ۳۱۵، ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ نیز قابل ملاحظه می باشند.

د: QRD روی مانعهای Y شکل

همانطور که از شکل ۱۰ دیده میشود، گرچه در این نوع مانع نیز کارآئی مانع شیار دار و جاذب نسبت به مانع معادل صلبشان بیشتر است ولی منحنی های عملکرد آنها به همدیگر نزدیکتر است. بعبارتی میزان تاثیر مواد جاذب و همچنین سطوح شیار دار بالنسبه در این نوع مانع کمتر است. در این نوع مانع نیز کارآئی نوع شیار دار در فرکانسهای ۲۵۰، ۳۱۵، ۶۳۰ و ۱۰۰۰

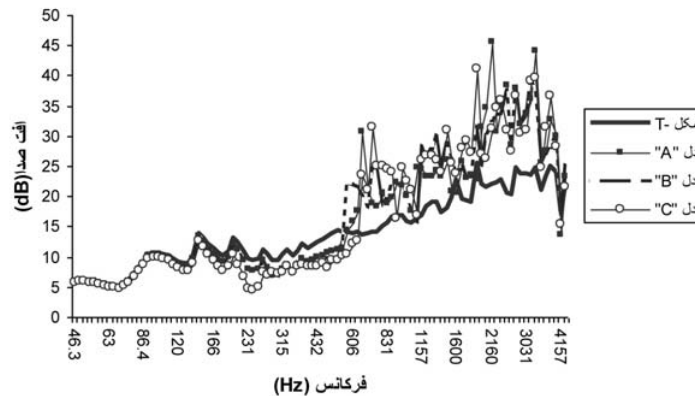
ب: QRD روی مانعهای استوانه ای شکل

نحوه عملکرد سطوح شیار دار روی مانعهای استوانه ای شکل تقریباً شبیه عملکرد آنها روی مانعهای T شکل است. همانطور که از شکل ۸ دیده میشود در این نوع موانع نیز طیف عملکرد این مانعها در محدوده ۱/۳ اکتاو باند کمتر از محدوده فرکانسهای موثر سطح پخش کننده مورد استفاده بود و همچنین نقاط بیشینه عملکرد در این نوع مانع در فرکانسهای ۳۱۵، ۶۳۰ و ۱۲۵۰ هرتز می باشد.

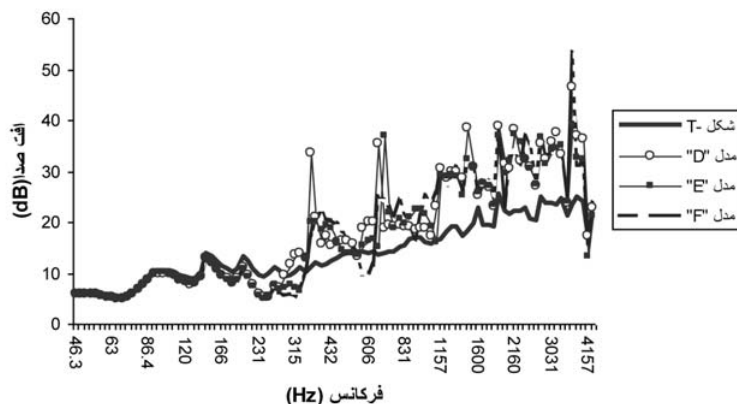
ج: QRD روی مانعهای پیکان شکل

استفاده از سطوح شیار دار روی مانع های پیکان شکل همانطور که از شکل ۹ دیده می شود قادر است

شکل ۱۱- بیناب افت صدا در سه مانع پخش کننده با تعداد QRD های ۱، ۲ و ۶ و فرکانس طراحی ۱۰۰۰ هرتز در فاصله ۵۰ متری روی سطح زمین در مراکز باندهای ۱/۱۵ اکتاو باند. (برای مقایسه بهتر نتایج مانع T شکل صلب نیز ارائه گردیده است)



شکل ۱۲- بیناب افت صدا در سه مانع پخش کننده با تعداد QRD های ۲، ۱ و ۶ و فرکانس طراحی ۵۰۰ هرتز در فاصله ۵۰ متری روی سطح زمین در مراکز باندهای ۱/۱۵ اکتاو باند. (برای مقایسه بهتر نتایج مانع T شکل صلب نیز ارائه گردیده است)



هرتز نسبت به مانع معادل جاذب دار افزایش پیدا نموده است. مواجهه موج صوتی با سطوح شیار دار توجه نمود.

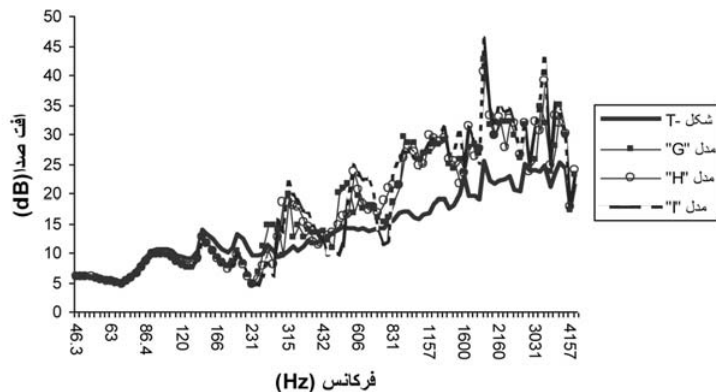
مانعهای شیاردار (QRD) با طراحیهای مختلف
 بمنظور مطالعه اثر فرکانس طراحی (یا عمق شیارها) در سطوح پخش کننده روی مانعهای T شکل، سه فرکانس طراحی ۴۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز بعنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفتند. علت تمرکز روی مانعهای T شکل نیز بالا بودن عملکرد آنها در مقایسه با سایر مانع مورد بررسی می باشد.

الف: فرکانس ۱۰۰۰ هرتز

در شکل ۱۱ کار آئی سه مانع شیار دار T شکل با فرکانس طراحی ۱۰۰۰ هرتز با مانع صلب معادل خود مقایسه گردیده اند. همانطور که از جدول ۱ نیز

با نگاه اجمالی به اشکال شماره ۷ تا ۱۰ میتوان نتیجه گرفت که میزان تأثیر استفاده از سطوح شیاردار روی مانعهای Y شکل به اندازه تأثیر آنها روی سایر سطوح نمی باشد. که این امر را میتوان با میزان تماس کم موج صوتی با سطوح مورد استفاده در لبه بالائی این مانع توجیه نمود. بهترین و بالاتری عملکرد سطوح شیار دار در موانع پیکان شکل و T شکل دیده میشود. در مانع پیکان شکل میزان مصالح مورد استفاده از مانع T شکل بیشتر بوده و عبارتی سطح در معرض موج صوتی پراش شده روی لبه بالائی در مانع پیکان شکل از مانع T شکل بیشتر میباشد. لذا براحتی میتوان بالا بودن میزان عملکرد مانع پیکان شکل را با بالا بودن

شکل ۱۳- بیناب افت صدا در سه مانع پخش کننده با تعداد QRD های ۲، ۱ و ۶ و فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز در فاصله ۵۰ متری روی سطح زمین در مراکز باندهای ۱/۱۵ اکتاو باند. (برای مقایسه بهتر نتایج مانع T شکل صلب نیز ارائه گردیده است)



مشخص است، تعداد QRD در مانع مدل C، ۳ برابر تعداد QRD در مانع B است. همچنین تعداد QRD در مانع B، دو برابر مانع A می باشد.

گرچه هر سه مانع شیار دار تا حدودی کارآئی مانع صلب را افزایش داده اند ولی تغییر قابل ملاحظه ای در بین مانعهای با QRD های متفاوت دیده نمی شود. اولین فرکانس موثر در این مانعها ۸۰۰ هرتز بوده که ۱/۳ اکتاو باند پایینتر از حد پایین فرکانس طراحی خود می باشد.

ب: فرکانس ۵۰۰ هرتز

در این بررسی نیز کارآئی سه مانع شیار دار با فرکانس طراحی ۵۰۰ هرتز ولی با تعداد QRD های متفاوت با یکدیگر مقایسه گردیده اند که نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

در این دسته از موانع شیار دار نیز کارآئی کلیه سطوح شیار دار در منطقه وسیع فرکانسی کارآئی آکوستیکی از نوع معادل صلب خود بطور محسوسی بیشترند ولی همانطور که در مانعهای شیار دار با فرکانس طراحی ۱۰۰۰ هرتز نیز شاهد بودیم در این نوع

جدول ۲- میانگین افت کلی در شبکه A مربوط به موانع صوتی مختلف در ۹ گیرنده مختلف.

نوع مانع	میانگین افت کلی در ۹ گیرنده بر حسب dB(A)	متوسط ΔIL
T شکل	۱۶/۹	-۱/۲
استوانه‌ای شکل	۱۳/۸	-۴/۳
پیکانی شکل	۱۴/۷	-۳/۴
Y شکل	۱۷/۱	-۱/۰
T شکل جاذب دار (مانع مرجع)*	۱۸/۱	۰/۰
استوانه‌ای شکل جاذب دار	۱۵/۵	-۲/۶
پیکان شکل جاذب دار	۱۷/۲	-۰/۹
Y شکل جاذب دار	۱۸/۸	۰/۷
مدل A	۱۶/۶	-۱/۶
مدل B	۱۶/۳	-۱/۸
مدل C	۱۶/۸	-۱/۳
مدل D	۱۷/۷	-۰/۴
مدل E	۱۶/۷	-۱/۴
مدل F	۱۶/۰	-۲/۱
مدل G	۱۹/۰	۰/۹
مدل H	۱۸/۳	۰/۱
مدل I	۱۶/۶	-۱/۶
مدل L	۱۶/۵	-۱/۶
مدل M	۱۷/۰	-۱/۲
مدل N	۱۷/۰	-۱/۲
مدل O	۱۴/۵	-۳/۶
مدل R	۱۸/۸	۰/۷
مدل S	۱۹/۰	۰/۹

* ماده جاذب استفاده شده در کلیه مانع های جاذب دار با ضخامت ۰/۲۴۴۵ متر (بیشترین عمق شیار مورد استفاده در این تحقیق) و مقاومت شارهای: $\sigma = 20000 \text{ Rayl (MKS)}$ بوده است.



محاسبه گردیدند. میزان میانگین افت کلی نیز با استفاده از فرمول ذیل بدست می آید:

$$Lp_a = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10}}{n} \right), \quad (7)$$

در فرمول فوق L_i تراز فشار صوت در شبکه A در محل گیرنده می باشد.

جدول شماره ۲ میزان میانگین افت کلی را برای تمام موانع طراحی شده را در شبکه A ارائه نموده است. در این جدول ΔIL مقادیر افزایش کار آئی توسط هر مانع نسبت به مانع مرجع می باشد. (مانع مرجع یک مانع T شکل جاذب دار است). مقادیر مثبت نشان دهنده افزایش کار آئی و مقادیر منفی نشان دهنده کاهش کار آئی می باشد.

از جدول ۲ میتوان دریافت که استفاده از سطوح شیار دار در تمام سطوح کار آئی مانع را نسبت به مانع صلب معادل بهبود بخشیده است. در این میان کار آئی مانعهای A، G، R، S حتی از مانع مرجع (مانع مرجع T شکل) نیز بیشتر است. همچنین میتوان از جدول فوق دریافت که کاهش فرکانس طراحی در مانعهای شیار دار میتواند کار آئی کلی مانع ها را در شبکه A بطور محسوسی افزایش دهد. گرچه بر اساس یافته های مطالعات قبلی (۱۳) کاهش قطر شیارها خاصیت جذب آکوستیکی سطوح شیار دار را افزایش می دهد ولی بعنوان مثال میزان افت کلی در مانع G با قطر شیار ۱۲ سانتی متر از ۱۹ dB(A) به ۱۶/۶ dB(A) در مانع A با قطر ۲ سانتی متر، کاهش پیدا کرده است. همانطور که از مقایسه عملکرد دو مانع M و N میتوان فهمید، استفاده از سطوح شیاردار در لبه زیرین مانع پیکان شکل تاثیری در افزایش کار آئی مانع ندارد.

افزایش زاویه لبه بالائی مانعهای Y شکل تا حدودی باعث افزایش کار آئی آنها می گردد که این امر بدلیل افزایش فاصله غیر مستقیم بین منبع و گیرنده در اثر افزایش زاویه می باشد. بالا بودن کار آئی سطوح شیار دار روی مانع T شکل در نتایج قبلی هم نشان داده شد ولی افزایش کار آئی کلی در مانع Y شکل در مانعهای مدل R و S با نتایج بخشهای قبلی همخوانی ندارد. علت

نیز تغییر در تعداد QRD تاثیر قابل ملاحظه ای در کار آئی مانع ندارد. بعبارتی میزان تاثیر فرکانس طراحی از تعداد شیار مورد استفاده بسیار بیشتر است. اولین فرکانس موثر ۴۰۰ هرتز بوده که ۱/۳ اکتاو باند پایینتر از حد پایین فرکانس موثر سطوح پخش کننده است.

ج: فرکانس ۴۰۰ هرتز

تحقیق مشابهی نیز در خصوص تاثیر کاهش فرکانس طراحی از ۵۰۰ هرتز به ۴۰۰ هرتز نیز انجام گردید که نتایج آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج این قسمت نیز بسیار شبیه دو قسمت قبل است. نکته قابل توجه اینکه با کاهش فرکانس طراحی، فرکانس موثر نیز به سمت فرکانسهای پایینتر سوق داده شده است. بعبارتی رابطه نزدیک بین فرکانس طراحی و عملکرد غالب مانعهای شیاردار در سه شکل فوق براحتی قابل مشاهده است. مجددا در این دسته از مانعها نیز غلبه تاثیر فرکانس طراحی بر تعداد QRD های مورد استفاده در سطح نمایان گردید. لازم به تذکر است که گرچه افزایش تعداد QRD در سطح فوقانی بمعنی افزایش تعداد شیار در واحد طول میباشد که این نکته با افزایش تعداد شیار به ازاء هر QRD نباید اشتباه گرفته شود. در تحقیق فوق تعداد شیار در هر QRD مورد استفاده ثابت و برابر ۷ بوده است. بررسی اثر تعداد شیار در هر واحد QRD مورد استفاده میتواند موضوع تحقیقات آینده در این زمینه بشمار رود.

افت کلی مانعها

همانگونه که از بخشهای قبل ملاحظه گردید، سطوح شیار دار با طراحیهای مختلف کار آئی موانع با اشکال متفاوت را بطور محسوسی در محدوده فرکانس موثر خود افزایش می دهند بگو نه ای که تاثیر سطوح شیاردار در فرکانسهای مختلف متفاوت بوده و لذا میزان بهبود کار آئی کلی مانعها در آنها آشکار نمی باشد. لذا برای درک بهتر از عملکرد کلی مانعهای طراحی شده اولاً تعداد گیرنده ها را از یک نقطه به ۹ نقطه افزایش داده و با استفاده از استاندارد BS EN 1793-1998 (۱۳) میزان افت کلی صدا در شبکه A در محل ۹ گیرنده شامل فواصل ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری در ارتفاعات صفر، ۱/۵ و ۳ متر بالای سطح زمین

جدول ۲- مقایسه افت کلی مانعهای مختلف در شبکه A. (a) مانع T شکل، (b) مانع استوانه‌ای شکل، (c) مانع پیکان شکل، (d) مانع Y شکل.

فاصله از مانع (متر)	استوانه‌ای شکل		استوانه‌ای شکل جاذب دار		مدل O	
	میانگین	ΔIL	میانگین	ΔIL	میانگین	ΔIL
۲۰	۱۳/۶	۰/۰	۱۴/۶	۱/۱	۱۳/۲	-۰/۴
۵۰	۱۱/۱	۰/۰	۱۳/۱	۲/۰	۱۲/۵	۱/۴
۱۰۰	۱۱/۰	۰/۰	۱۲/۹	۱/۹	۱۲/۴	۱/۴

فاصله از مانع	T شکل		T- شکل جاذب دار (مانع مرجع)		مدل G	
	میانگین	ΔIL *	میانگین	ΔIL	میانگین	ΔIL
۲۰	۱۵/۹	۰/۰	۱۷/۲	۱/۴	۱۸/۲	۲/۳
۵۰	۱۵/۱	۰/۰	۱۶/۵	۱/۴	۱۷/۵	۲/۴
۱۰۰	۱۴/۹	۰/۰	۱۶/۲	۱/۴	۱۷/۳	۲/۴

فاصله از مانع (متر)	پیکان شکل		پیکان شکل جاذب دار		مدل M	
	میانگین	ΔIL	میانگین	ΔIL	میانگین	ΔIL
۲۰	۱۳/۴	۰/۰	۱۶/۵	۳/۱	۱۶/۳	۲/۹
۵۰	۱۲/۹	۰/۰	۱۵/۸	۲/۹	۱۵/۸	۲/۹
۱۰۰	۱۲/۸	۰/۰	۱۵/۶	۲/۸	۱۵/۷	۲/۹

فاصله از مانع (متر)	Y- شکل		Y- شکل جاذب دار		مدل S	
	میانگین	ΔIL	میانگین	ΔIL	میانگین	ΔIL
۲۰	۱۶/۳	۰/۰	۱۸/۳	۲/۱	۱۸/۴	۲/۱
۵۰	۱۵/۲	۰/۰	۱۷/۱	۱/۹	۱۷/۲	۲/۰
۱۰۰	۱۵/۰	۰/۰	۱۶/۸	۱/۸	۱۷/۰	۲/۱

* ΔIL در این جدول اختلاف عملکرد مانعها با مانع معادل صلبشان می باشد.

در شبکه A نسبت به نوع صلب خود افزایش داده است در حالیکه این رقم برای مانع Y شکل حدود ۲ دسی بل است.

کارآئی مانعهای پخش کننده شیار دار (QRD) در ناحیه سایه صوتی

بمنظور درک بهتر از عملکرد مانعهای شیار دار افت کلی مانع مدل G و مانع مدل M در ۴۰۰ گیرنده مختلف در فواصل بین ۲ تا ۵۰ متر از روی سطح زمین تا ارتفاع ۸ متری با مانعهای معادل جاذب خود در اشکال ۱۴ و ۱۵ مقایسه گردیده اند.

همانطور که از شکل ۱۴ دیده میشود، مانع شیار دار

این امر هم اینست که کارآئی این مانع با دولبه ۱ متری با یک مانع T شکل با یک لبه یک متری مقایسه گردیده است. لذا برای بررسی بهتر و مقایسه صحیح تر بین موانع مختلف، افت کلی مانعهای هم شکل در فواصل مختلف روی زمین در جدول ۳ با یکدیگر مقایسه گردیده اند.

همانطور که از این جدول نیز دیده میشود، سطوح شیار دار در تمام اشکال کارآئی مانع صلب خود را افزایش داده اند، البته میزان افزایش کارآئی در انواع مختلف مانعها متفاوت است. بعنوان مثال مانع پیکان شکل در تمام فواصل افت کلی را بمیزان ۲/۹ دسی بل

مانع در ارتفاع بالاتر از ۳ متر) کارآئی این مانع از مانع معادل جاذب کمتر است. این نکته شاید به این دلیل باشد که سطوح پخش کننده بخشی از انرژی را بسمت بالا پخش میکنند، که البته این امر نیاز به تحقیق بیشتر دارد.

مانع شیاردار M همانطور که از شکل ۱۵ میتوان دید در مقایسه با مانع پیکان شکل جاذب دار در فواصل دور و در ارتفاعات بالای ۳ متر کارآئی بهتری دارد. این مانع قادر است بین ۱.۵ تا ۲ دسی بل در شبکه A افت کلی مانع معادل جاذب دار را در دور دست در ارتفاعات ۶ تا ۸ متر بهبود ببخشد. در این مانع بر عکس مانع مدل G میزان بهبود کارآئی در سطح زمین تقریباً صفر و یا حتی منفی است. این نکته هم میتواند بدلیل میزان بیشتر انرژی پخش شده بسمت بالا توسط این مانع باشد که خود میتواند موضوع یک تحقیق جداگانه باشد.

بحث

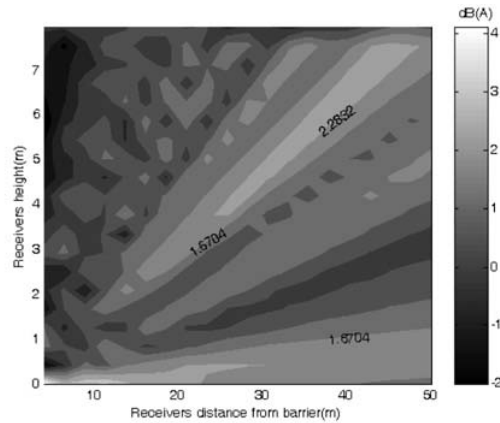
کاهش صدا توسط مانعهای شیاردار (QRD) با استفاده از روش شبیه سازی دو بعدی (BEM) مورد بررسی قرار گرفت. افت کلی صدا در یک رینج نسبتاً وسیعی از محل گیرنده های صوتی با استفاده از طیف شبکه A سر و صدای ترافیک در ۱/۱۵ اکتاو باند از ۵۰ تا ۴۰۰۰ هرتز نیز اندازه گیری شد. کارآئی سه جنس مختلف (صلب، جاذب و شیاردار) برای سطوح بالائی اشکال مختلف Y، T، Arrow (پیکان) و Cylinder (استوانه ای) مورد ارزیابی قرار گرفت. اثرات مانعهای شیاردار با مانعهای معادل جاذب و همچنین مانع جاذب مرجع مورد مقایسه قرار گرفت.

نتیجه گیری

روش شبیه سازی دو بعدی با جعبه های با امیدانس متغیر می تواند روش سریع و قابل اعتمادی برای محاسبات مانعهای شیاردار در رینج موثر فرکانسی آنان باشد.

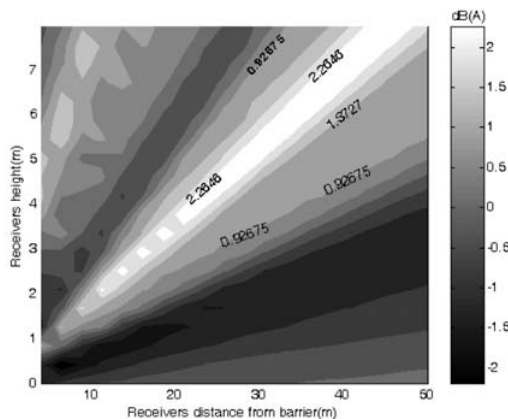
همانگونه که در تحقیقات قبلی ثابت شده، بکاربردن مواد جاذب در سطوح فوقانی مانع قادر است کارآئی آنرا بمیزان قابل توجهی افزایش دهد. در این خصوص بهترین شکل برای بکارگیری مواد جاذب مانعهای پیکان شکل با ۹dB(A) افزایش در فاصله ۵۰ متری

شکل ۱۴ - میزان اختلاف افت کلی در شبکه A مانع مدل G نسبت به مانع مرجع (مانع T شکل جاذب دار) (محور افقی: فاصله گیرنده از مانع، محور عمودی: ارتفاع گیرنده)



G در دو ناحیه مشخص کارآئی بهتری نسبت به مانع معادل جاذب خود دارا می باشد. این دو ناحیه شامل یک نواری نزدیک به سطح زمین و دیگری در یک مثلث میانی که از نزدیکی سطح زمین در فواصل حدود ۱۰ متری شروع شده و با افزایش فاصله به ارتفاع آن افزوده می شود. میزان بهبود کارآئی در فواصل دور در ارتفاعات ۶ تا ۸ متر به حدود ۳.۵ دسی بل A نیز میرسد. این در حالیست که میزان بهبود کارآئی در سطوح نزدیک به زمین در فواصل دورتر از ۱۰ متر تقریباً یکسان است. کارآئی این مانع در فواصل نزدیک مخصوصاً در ارتفاعات ضعیف است و همانطور که از شکل دیده میشود در برخی نواحی (خیلی نزدیک به

شکل ۱۵ - میزان اختلاف افت کلی در شبکه A مانع مدل M نسبت به مانع جاذب معادل خود (مانع پیکان شکل جاذب دار) (محور افقی: فاصله گیرنده از مانع و محور عمودی: ارتفاع گیرنده)



منابع

1. **Hothersall DC, Chandler-Wilde SN, Hajmirzai MN.** "Efficiency of single noise barriers", Journal of Sound Vibration, 146(2), pp.303-322, 1991
2. **Watts GR, Crombie DH, Hothersall DC.** "Acoustic performance of new design of traffic noise barriers: Full scale tests", Journal of Sound and Vibration 177, 289-305, 1994.
3. **May DN, Osman MM.,** "Highway noise barriers: New shapes", Journal of Sound and Vibration 71,73-101,1980.
4. **Hothersall DC, Crombie DH, Chandler-Wilde SN.** "The performance of T-shape profile and associated noise barriers", Applied Acoustics 32(4), pp.269-281, 1991.
5. **Crombie DH, Hothersall DC, Chandler-Wild SN.** "Multiple-edge noise barrier", Applied Acoustics 44(4), pp.353-367, 1995.
6. **Fujiwara K, Hothersall DC, Kim C.** "Noise barriers with reactive surfaces", Applied Acoustics, 53 (4), pp. 255-272, 1998.
7. **Thorsson PJ,** "Optimization of low-height noise barriers using the equivalent source method", Acta Acustica 86, 811-820, 2000.
8. **Thorsson PJ,** "Combined effects of admittance optimisation on both barrier and ground", Applied Acoustics 64, 693-711, 2003.
9. **Schroeder MR,** "Diffuse sound reflection by maximum-length sequences", Journal of the Acoustical Society of America 57, 149-150, 1975.
10. **Trevor J. Cox TJ, Lam YW,** "Prediction and evaluation of the scattering from quadratic residue diffusers", J. Acoust. Soc. Am. 95(1), pp.297-305, 1994.
11. **Delany M. E, Bazely E. N.** "Acoustical properties of fibrous absorbent material", Applied Acoustics 3(2), pp.105-116, 1970.
12. **Wu T, Cox T.J., Lam YW.** "From a profiled diffuser to an optimised absorber", J. Acoust. Soc. Am. 108 (2), pp.643-650, 2000.
13. Road traffic noise reducing devices- Test method for determining the acoustic performance, Part 3. Normalized traffic noise spectrum. SS-EN No:1793-3. 1998

از مانع می باشد. علت این تاثیر را می توان سطح تماس بالای ماده جاذب در مسیر انتقال موج صوتی از منبع تا گیرنده دانست.

تمام مانعهای شیاردار قادر هستند که کارآئی مانع را در یک محدوده فرکانسی خاص بسته به فرکانس طراحی افزایش دهند. همچنین میتوان محدوده اثر گذاری مفید را با تغییر در فرکانس طراحی پخش کننده به فرکانسهای پایین یا بالا جابجا نمود. افت ایجاد شده توسط مانعهای شیاردار به فرکانس موج صوتی وابسته است و آنها هم بشدت به فرکانس طراحی پخش کننده وابسته می باشد. بطور کلی مانعهای شیار دار T و Y شکل قادر هستند کارآئی مانع را حتی از مانع جاذب معادل هم بالاتر ببرند.

در بین سه فرکانس طراحی (۱۰۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰ هرتز) موثرترین طراحی مربوط به سطوح پخش کننده با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز می باشد. در واقع می توان با پایین آوردن فرکانس طراحی با ثابت نگه داشتن حد بالای فرکانس (عرض شیار)، طول باند فرکانسی موثر و در نتیجه کارآئی مانع را افزایش داد.

با کاربرد یک پخش کننده با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز روی مانع T شکل کارآئی مانع را در مقایسه با یک جاذب معادل بمیزان 0.9 dB(A) افزایش میدهد. در حالی که همین پخش کننده روی مانع استوانه ای (Cylinder) کارآئی مانع جاذب معادل را به اندازه یک dB(A) کاهش میدهد. با توجه به جمیع جوانب بهترین شکل برای بکارگیری پخش کننده های صوتی، مانع T شکل و بدترین آنها مانع استوانه ای (Cylinder) شکل می باشد.

کاهش عرض شیارهای پخش کننده صوتی گرچه باعث افزایش خاصیت جذب کنندگی سطوح شیار دار می شود ولی تاثیری در افزایش افت کلی مانعهای شیاردار در شبکه A ندارد.

مانع T شکل مجهز به سطوح شیار دار با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز (مانع مدل G) در فواصل دورتر از ۱۰ متر در نواحی نزدیک به زمین بهتر از مانع جاذب معادل است. در حالی که همین مانع در فواصل نزدیک در ارتفاعات بیشتر از ۳ متر کارآئی کمتری نسبت به مانع جاذب معادل دارد.