

## عملکرد سطوح شیاردار (PRD) در مانع‌های صوتی T شکل به منظور کنترل نوفه محیطی

محمد رضا منظم<sup>۱</sup>، مهدیه نادرزاده<sup>۲</sup>، پروین نصیری<sup>۳</sup>، سمانه مومن با...<sup>۴</sup>

نویسنده مسئول: تهران، دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت حرفه‌ای [mmonazzam@gmail.com](mailto:mmonazzam@gmail.com)

دریافت: ۸۸/۱۲/۲۲ پذیرش: ۸۹/۰۳/۰۴

### چکیده

**زمینه و هدف:** در سال‌های اخیر به کاربرد مانع‌های صوتی توجه زیادی شده است. مانع‌های صوتی به عنوان یک راهکار کنترل صوت می‌توانند با افزایش افت صدا گیرنده‌ها را در مقابل نوفه محافظت کنند. این مقاله نتایج بررسی عملکرد آکوستیکی پنخس‌کننده (PRD) را روی مانع T شکل زیست‌محیطی ارایه می‌کند.

**روش بررسی:** جهت پیش‌بینی افت صدای مانع‌های مورد آزمایش از روش عنصر مرزی دو بعدی استفاده شد. هم‌چنین نتایج به دست آمده از مانع سفت با مانع پوشیده شده با (QRD) مورد مقایسه قرار گرفت.

**یافته‌ها:** کاهش فرکانس طراحی (PRD) آثار فرکانس را به سمت فرکانس‌های پایین‌تر هدایت می‌کند که بدین صورت افت صدا در شبکه A نیز بهبود می‌یابد. از طرفی کاربرد وایر مش با مقاومت موثر در سطح فوقانی (PRD)، بازده مانع‌های پنخس‌نده را بالا می‌برد. با این وجود به کارگیری وایر مش بر روی یک مانع (PRD) با مقاومت جریان بیش از امپدانس صوتی ویژه هوا، باعث کاهش چشم‌گیر عملکرد مانع پنخس‌کننده در محدوده باند فرکانس پهن می‌شود. در نواحی دور و نزدیک به زمین عملکرد مانع T شکل با پوشش (PRD) در فرکانس ۲۰۰ هرتز بهتر از عملکرد مانع‌های (QRD) معادل آن می‌باشد. میزان بهبود ناشی از استفاده مانع (PRD) در مقایسه با مانع سفت معادل آن در نواحی دور از زمین حدود ۲ تا ۳ دسی‌بل می‌باشد. در حالی که این بهبود نسبت به مدل مانع QR<sup>۴</sup> به ۴ تا ۶ دسی‌بل هم می‌رسد.

**نتیجه‌گیری:** عملکرد موانع در صورت به کارگیری (PRD) بر روی سطح مانع T شکل در مقایسه با کاربرد پوشش سفت و (QRD) در گیرنده‌های مورد بررسی بهبود می‌یابد.

واژگان کلیدی: مانع صوتی، لایه مقاوم، مانع T شکل، PRD

۱- دکترای بهداشت حرفه‌ای، استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

۳- دکترای بهداشت حرفه‌ای، استادیار دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

## مقدمه

آلودگی صوتی به عنوان یک مشکل جدی زیست محیطی شناخته شده، توسط پروژه‌های راه‌سازی مثل پروژه‌های ساخت و ساز بزرگراه، راه‌آهن، شاهراه و غیره ایجاد می‌شود. آنچه مسلم است نوفه ناشی از تردد وسایل نقلیه اعم از جاده‌ای و ریلی و ... منجر به کاهش رفاه مردم و ایجاد اثرات منفی بر سلامت جامعه می‌باشد. از این رو موانع صوتی به عنوان یک راهکار کنترل آلودگی صوت جهت کاهش آن اثرات استفاده می‌گردد که می‌تواند افت صدا را افزایش داده و باعث حفاظت از گیرنده‌ها شود. در این میان موانع صوتی T شکل یکی از رایج‌ترین و پراندامان‌ترین آنها به شمار می‌آید که به صورت تکی در کنار بزرگراه‌ها و جاده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. چندین مطالعه نشان داده‌اند که مانع T شکل می‌تواند باعث بهبود قابل توجه بازده مانع شود. فوجیوارا و همکارانش در سال ۱۹۹۶ بیان کرده‌اند که یک مانع T شکل با یک سطح پخشنده می‌تواند یک بهبود ۵ دسی‌بل در فرکانس پایین داشته باشد (۱). هم چنین به عملکرد بهتر در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ هرتز اشاره نموده‌اند و در سال ۱۹۹۸ وی خاطر نشان می‌کند که شیارها در بالای سطوح یک مانع T شکل افت صدای یکسانی را در مقایسه با سطوح نرم ایجاد می‌کند (۲). منظم و همکارانش در سال (۲۰۰۵) نشان دادند که افت صدای ایجاد شده در یک مانع T شکل با پوشش سطوح پخشنده با تناوب عمق بر اساس حداقل باقی مانده توان دوم اعداد اول (QRD (Quadratic Residue Diffuser) سطح فوقانی آن بیش تر از کاربرد یک نوع ماده جاذب فیبری در مانع می‌باشد (۳). هم چنین یک نوع مشابه در ارتباط با بررسی مانع های T شکل در سال (۲۰۰۸) توسط بااولاک و همکارانش انجام شده است (۴). هدف این مقاله بررسی عملکرد مانع صوتی T شکل پوشیده شده با سطوح پخشنده با تناوب عمق ریشه اولیه PRD (Primitive Root Diffuser) می‌باشد. به این منظور افت صدا توسط مراحل زیر تخمین زده می‌شود. در ابتدا عمق شیارهای هر پخشنده از مدل‌های مختلف با یکدیگر

مقایسه می‌شوند. سپس جهت صحت سنجی اثر بخشی PRD، محاسبات در فرکانس‌های طراحی متفاوت انجام می‌شود. در نهایت عملکرد PRD پوشیده شده با لایه‌ای از مقاوم‌های مختلف با هم مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## مواد و روش‌ها

## جذب توسط پخش‌کننده‌های (PRD, QRD)

زمانی که موج صوتی بر روی یک صفحه با سطح کاملاً مسطح برخورد می‌کند با همان زاویه انعکاس می‌یابد. در واقع بخشی از انرژی به جهتی غیر از زاویه انعکاس منتشر می‌شود. این انتشار و پراکندگی موج انعکاسی را به جهات مختلف پخش می‌گویند. هر سطح ناصافی می‌تواند به عنوان یک پخش‌کننده باشد ولی به هر حال یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در امر توسعه عملکردی پخش‌کننده‌ها اختراع سطوح شیاردار با عمق‌های متفاوت توسط شرودر بود (۵ و ۶).

پخش‌کننده‌ها انواع مختلفی دارند از رایج‌ترین پخش‌کننده‌هایی که توسط شرودر در سال ۱۹۷۰ معرفی شده بود می‌توان پخش‌کننده با تناوب عمق بر اساس حداقل باقی مانده توان دوم اعداد اول (QRD) و پخش‌کننده با تناوب عمق بر اساس ریشه اولیه (PRD) را نام برد. پخش‌کننده‌های شیاردار شرودر شامل یکسری شیار یا چاه با عرض یکسان و عمق‌های متفاوت می‌باشد. شیارها توسط تیغه‌هایی از هم جدا گردیده‌اند. در هر دوره از عمق شیارها نحوه ترتیب قرارگیری از تناوب‌های متفاوت ریاضی موجود هم چون حداقل باقی مانده توان دوم اعداد اول یا ریشه اولیه تبعیت می‌کند. در هر شیار موج تابشی یک موج فشار را به سمت ته شیار حرکت داده که آن نیز پس از برخورد به ته شیار به سمت بالا منعکس می‌شود. امواجی از شیارهای مختلف به سطح می‌رسند با یکدیگر اختلاف فاز خواهند داشت زیرا مسیری که در شیارها به دلیل تغییر عمق آنها پیموده‌اند با یکدیگر یکسان نخواهد بود. اگر اختلاف فاز به قدر کافی بزرگ باشد، سازه یک واکنش پخش‌کنندگی امواج روی سطح از خود نشان می‌دهد که این واکنش پخش‌کنندگی

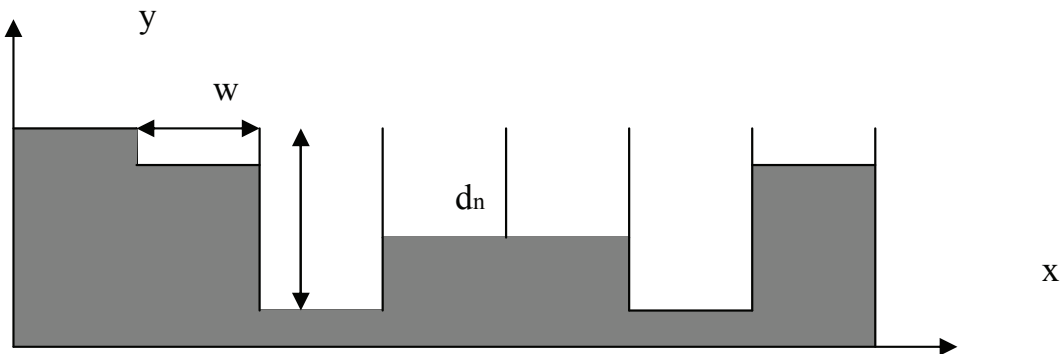
جدول ۱: شماره ترتیب در QRD

شماره ترتیب	N
۰.۱.۱	۳
۰.۱.۴.۴.۱	۵
۰.۱.۴.۲.۲.۴.۱	۷
۰.۱.۴.۹.۵.۳.۳.۵.۹.۴.۱	۱۱
۰.۱.۴.۹.۳.۱۲.۱۰.۱۰.۱۲.۳.۹.۴.۱	۱۳
۰.۱.۴.۹.۱۶.۸.۲.۱۵.۱۳.۱۳.۱۵.۲.۸.۱۶.۹.۴.۱	۱۷
۰.۱.۴.۹.۱۶.۶.۱۷.۱۱.۷.۵.۵.۷.۱۱.۱۷.۶.۱۶.۹.۴	۱۹
۰.۱.۴.۹.۱۶.۲.۱۳.۱۸.۱۲.۸.۶.۸.۸.۱۲.۱۸.۳.۱۳.۱۶.۹.۴.۱	۲۳

به تناوب عمق شیارهای هر دوره بستگی دارد در این خصوص برای پخش کننده‌های شرودر مقدار زیادی تناوب عمق شیار طراحی و به اجرا در آمده است.

### پخش کننده QRD

شکل ۱ سطح مقطع دو بعدی یک QRD با عدد اول ۷ را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود هر پخش کننده دارای تعداد مشخصی شیار می‌باشد که آن را با حرف (N) نمایش می‌دهیم که در اینجا (N=۷) در واقع همان عدد اول انتخابی است که توسط طراح تعیین می‌گردد و نیز در این نوع پخش کننده همواره عمق یکی از شیارها صفر می‌باشد.



شکل ۱: سطح مقطع دو بعدی QRD

هم چنین محاسبات ریاضی آن به شکل زیر می‌باشد:

$$sn = 1 \bmod 7 = 1 - 7 \times \text{floor} \left( \frac{1}{7} \right) = 1 - 7 \times 0 = 1$$

$$n = 1 \rightarrow$$

$$sn = 4 \bmod 7 = 4 - 7 \times \text{floor} \left( \frac{4}{7} \right) = 4 - 7 \times 0 = 4$$

$$n = 2 \rightarrow$$

$$sn = 9 \bmod 7 = 9 - 7 \times \text{floor} \left( \frac{9}{7} \right) = 9 - 7 \times 1 = 2$$

$$n = 3 \rightarrow$$

که در آن floor به معنی گرد کردن اعداد به سمت منفی بی‌نهایت می‌باشد. در این عملیات اعداد به سمت منفی گرد می‌شوند مثلاً  $\text{floor} \left( \frac{3}{3} \right) = 3$  و  $\text{floor} \left( -\frac{1}{2} \right) = -1$  می‌شود. جهت اطلاع بیش تر در این مورد به منظم (۲۰۰۵) مراجعه شود (۳).

در هر پخش کننده یک شماره ترتیب تعریف می‌شود که با داشتن این شماره ترتیب می‌توان نحوه قرار گیری شیارها کنار یکدیگر را طراحی نمود که از فرمول زیر به دست می‌آید.

$$sn = n^2 \bmod N, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

mod حداقل باقی مانده غیر منفی است و یک عمل ریاضی است که هم به طور دستی و هم با استفاده از نرم افزارهای ریاضی تعیین می‌شود. به عنوان مثال زمانی که برابر ۷ باشد شماره ترتیب طبق جدول ۱ عبارت خواهد بود از:

$$sn = (0, 1, 4, 2, 2, 4, 1)$$

$N$ : ریشه اول از  $N$   
 $N$ : عدد اول انتخاب شده

جدول ۲: شماره ترتیب در PRD

N	r	شماره ترتیب
۳	۲	۱.۲
	۲	۱.۲.۴.۳
۵	۳	۱.۳.۴.۲
	۲	۱.۳.۲.۶.۴.۵
۷	۲	۱.۵.۴.۶.۲.۳
	۲	۱.۲.۴.۸.۵.۱۰.۹.۷.۳.۶
۱۱	۶	۱.۶.۳.۷.۹.۱۰.۵.۸.۴.۲
	۷	۱.۷.۵.۲.۳.۱۰.۴.۶.۹.۸
۱۳	۸	۱.۸.۹.۶.۴.۱۰.۳.۲.۵.۷
	۲	۱.۲.۴.۸.۳.۶.۱۲.۱۱.۹.۵.۱۰.۷
۱۳	۶	۱.۶.۱۰.۸.۹.۲.۱۲.۷.۳.۵.۴.۱۱
	۷	۱.۷.۱۰.۵.۹.۱۱.۱۲.۶.۳.۸.۴.۲
۱۳	۱۱	۱.۱۱.۴.۵.۳.۹.۱۲.۲.۲.۹.۸.۱۰.۶

همان طور که در جدول ۲ دیده می شود مثلاً اگر تعداد شیارها را در PRD (۷) و ریشه اول را (۳) در نظر بگیریم، عدد ترتیب به صورت (۴و۵و۶و۷و۸و۹و۱۰و۱۱و۱۲و۱۳) خواهد بود هم چنین طبق معادله (۵) می توان عمق هر یک از شیارها را در PRD محاسبه نمود.

$$d_n = \frac{s_n \lambda_o}{r(N-1)} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که در PRD عمق هیچ کدام از شیارها صفر در نظر گرفته نمی شود.

هر پخش کننده دارای یک فرکانس طراحی  $f_0$  می باشد که با کمک آن و سرعت صوت می توان طول موج  $\lambda_0$  را به دست آورد.

$$\lambda_o(M) = \frac{C}{f_o} \quad (2)$$

C: سرعت صوت m/s

$f_0$ : فرکانس طراحی Hz

با استفاده از طول موج محاسبه شده می توان عمق هر یک از شیارها را به شکل معادله (۳) تعیین نمود.

$$d_n = \frac{s_n \lambda_o}{2(N)} \quad (3)$$

$\lambda_0$ : طول موج طراحی برای شیار مورد نظر (حداکثر طول موجی که این شیار در آن به عنوان پخش کننده عمل خواهد نمود)

N: تعداد شیارهای پخش کننده و یا عدد اول انتخاب شده

$s_n$ : شماره ترتیب

d: عمق هر یک از شیارها (m)

برای مثال برای شیار با شماره ترتیب (۱) و طول موج m ۰/۸۵ میزان عمق آن را به شکل زیر تعیین می نمایم.

$$d_n = \frac{1 \times 0.185}{2 \times 7} = 0.1061m$$

### پخش کننده PRD

یکی از پخش کننده های مهم شرودر (PRD) می باشد. ساختار این پخش کننده ها مانند QRD از شیارهایی با عرض های یکسان و عمق های متفاوت تشکیل شده است. که این عمق ها می تواند توسط شماره ترتیب و طول موج طراحی به راحتی محاسبه شود معادله (۴) نحوه به دست آمدن شماره ترتیب را در PRD نشان می دهد.

$$S_n = r^n \cdot \text{mod } N, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

## روش مدل سازی عددی

یک روش عددی که می‌توان با استفاده از آن کارایی انواع مختلف مانع‌های صوتی را با اشکال پیچیده و سطوح پوشیده شده با مواد مختلف محاسبه کرد، در تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته و اعتبار سنجی نیز گردیده است (۷).

این روش عددی عمدتاً یک روش دو بعدی BEM بوده که با استفاده از آن می‌توان با نامحدود در نظر گرفتن طول مانع‌ها نتایج را برای مسایل سه بعدی نیز تعمیم داد (۳). در این مطالعه، بعد المنت‌ها کم تر از  $\lambda/5$  در نظر گرفته شده تا این که یک بازنمایی معقول از فشار سطحی ثابت بر یک عنصر یا المنت به دست می‌آید (۷). لذا در مدل‌سازی انجام شده در این طرح نیز طول هر المان  $0.2$  کوتاه ترین طول موج صوتی مورد بررسی در نظر گرفته شده است مقدار المان‌ها در طراحی مانع T شکل ۳۹۷ می‌باشد (۳).

هم چنین در این مقاله منبع صوتی همواره در فاصله ۵ متری از مانع روی سطح زمین قرار دارد تا این که تحت تاثیر تداخلات میان منبع و تصویر زمین قرار نگیرد. ۹ گیرنده در فاصله‌های (۲۰ و ۵۰ و ۱۰۰) متری از مانع و در ارتفاع‌های (۳ و ۱/۵ و ۰) متری نسبت به زمین انتخاب گردیده و افت صدا در مراکز  $1/3$  اکتاو باند از فرکانس‌های ۵۰ تا ۴۰۰۰ هرتز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$IL = -20 \cdot \log \left| \frac{p(r, r)}{G(r, r)} \right| dB \quad (6)$$

$p_b$  = فشار صوت در گیرنده با وجود مانع و زمین سخت

$p_g$  = فشار صوت در گیرنده فقط با وجود زمین سخت

## امپدانس پخش کننده‌های شرودر

الف. امپدانس یا مقاومت آکوستیکی در سطح بالایی شیارها در پخش کننده‌های شرودر

دو عامل مهم به نام گرما و ویسکوزیته در شیارها وجود دارد که در خیلی از طراحی‌ها از آن، چشم پوشی می‌شوند. هر چند که با کاهش دادن سائیز عرض شیارها نیاز می‌باشد این دو

مورد ملاحظه قرار گیرند، چرا که اعتقاد بر اینست که افت‌ها در شیارهای باریک بوسیله شرایط گرمایی و ویسکوزیته ایجاد می‌شوند و نباید از آن‌ها صرف نظر شود در صورت عدم توجه به این موضوع ممکن است نتایج دقیقی حاصل نشود. در این تحقیق جهت تعیین امپدانس سطح شیارها از مدل شرح داده شده در مقاله وو و همکاران استفاده گردید (۸ و ۹).

ب. مقاومت آکوستیکی سطح بالایی شیارهای حاوی لایه مقاوم در بخش کننده‌های شرودر  
تحلیل ذیل جهت تخمین مقاومت آکوستیکی یک لایه مقاوم استفاده گردید. در این روش  $Z_1$  مقاومت یا امپدانس شیار با عمق  $L_{n1}$ ،  $r$  مقاومت یک ماده مقاوم می‌باشد (۸ و ۹).

$$z_w = \frac{\rho C Z_1 \cot(jk_l l_{n1}) + (\rho c)^2}{z_1 + \rho c \cot(jk_l l_{n1})} + r \quad (7)$$

## مشخصه‌های مدل‌های طراحی شده

به عنوان پایه، تعدادی مانع صوتی T شکل طراحی گردید. در همه مدل‌ها، ارتفاع کلی مانع ثابت و ۳ متر می‌باشد و ضخامت سرپوش و بدنه به ترتیب  $0.3$  متر و  $0.1$  متر، طول سرپوش مانع ۱ متر در نظر گرفته می‌شود. مشخصه‌های مدل‌های متفاوت در جدول ۳ ارایه شده است.

برای به دست آوردن افت صدا مدل‌های مختلفی استفاده گردید. عملکرد هر مدل در  $1/3$  اکتاوباند در ۹ محل گیرنده مذکور زمین پیش‌بینی گردید. ضخامت تیغه در همه مدل‌ها قابل چشم پوشی فرض می‌شود.

جهت ساده سازی رهیافت مدل سازی آماری، بعد یک مانع T شکل معرفی شده تحت عنوان مدل PR۴ در شکل (۲) ارایه می‌شود.

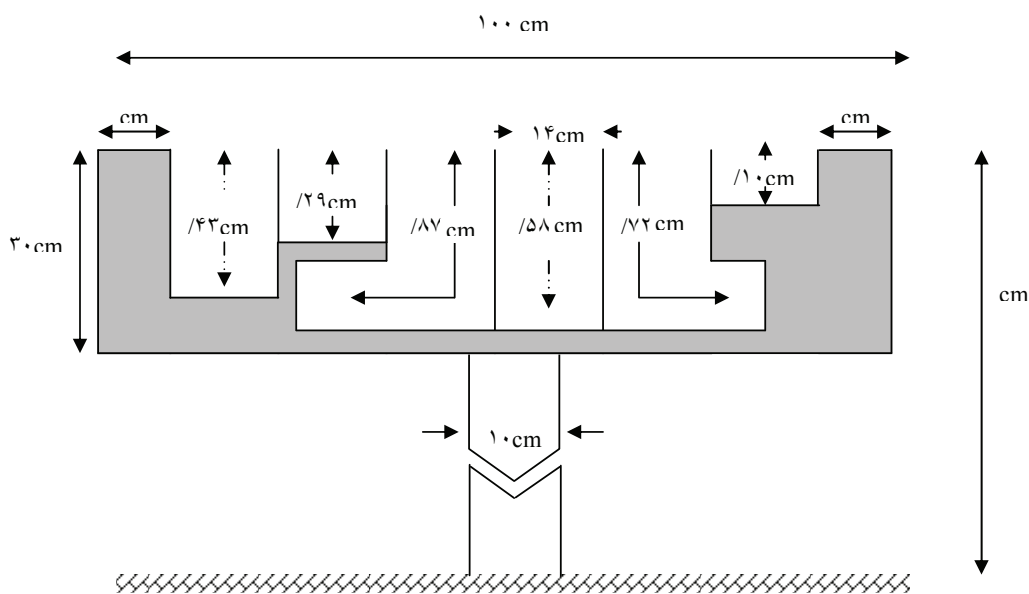
## یافته‌ها

## اثر شماره ترتیب (Sequences)

در ابتدا عملکرد پخش کننده‌های (PRD) در مانع T شکل تحت عنوان مدل (PR۴) با (QRD) با نام مدل (QR۴)

جدول ۳: مشخصه‌های مدل‌های مختلف مانع

مدل‌ها	انواع پخش‌کننده‌ها	(N)	فرکانس طراحی $f_r$ (KHz)	عرض شیار $w$ (cm)	شماره ترتیب	توضیحات
T	-	-	-	-	-	مانع ساده سخت
QR4	QRD	۷	۰/۴	۱۲	(۰۱۴۲۲۴۱)	Q مانع شیار دار
PR4	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	P مانع شیار دار
PR5	PRD	۶	۰/۵	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	P مانع شیاردار
PR10	PRD	۶	۱	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	P مانع شیاردار
PWL	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	P مانع شیاردار (با ورقه مقاوم) ( $r = ۵/۷$ Rayls (MKS))
PWM	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	P مانع شیاردار (با ورقه مقاوم) ( $r = ۵۵$ Rayls (MKS))
PWH	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	P مانع شیاردار (با ورقه مقاوم) ( $r = ۵۵۰$ Rayls (MKS))



شکل ۲: دیاگرام شماتیک نمای جانبی مدل مانع PR4

مرجع در شکل (۴) مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که اثر هر دو پخش کننده در فرکانس‌های زیر ۲۵۰ Hz پایین تر از مانع سخت معادلشان می‌باشد. به خاطر تفاوت عمق شیارهای این دو پخش کننده، نقاط کمینه و بیشینه تولید شده توسط آن‌ها متفاوت است. شکل ۴ بهبود حاصل از کاربرد پخش کننده‌های مختلف در مانع T شکل سخت را نشان می‌دهد. نتیجه آن است که مانع مدل (PR۴) در چهار فرکانس متمایز ۲۰۰ و ۲۵۰ و ۴۰۰ و ۸۰۰ هرتز عملکرد بهتری را نسبت به مانع مدل (QR۴) دارا می‌باشد. لازم به ذکر است که درگیرنده (۰ و -۵۰) مانع مدل QR۴ افت صدای توزین شده A مانع مرجع را تا ۲/۵ dB(A) و نیز مانع مدل PR۴ آن را به اندازه ۳/۲ dB(A) بهبود می‌بخشد.

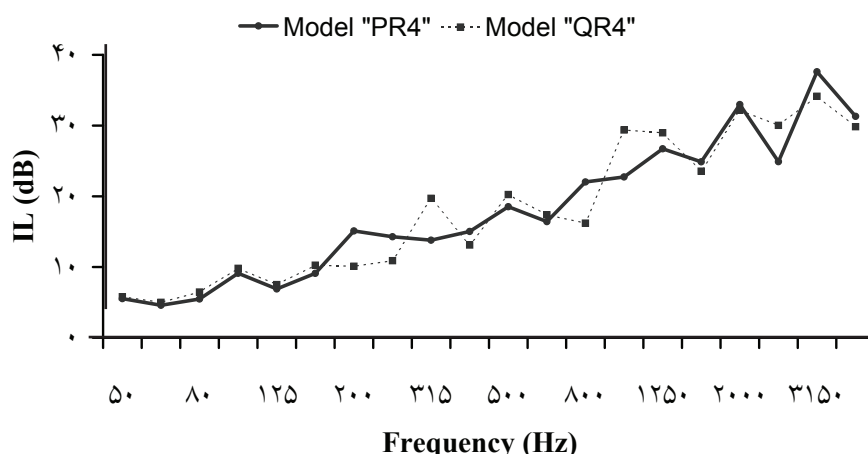
جزئیات بهبود عملکرد مانع PR۴ و QR۴ در محدوده نزدیک و دور از زمین در فرکانس ۲۰۰ هرتز طبق شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. جهت به دست آوردن این نتایج، پیش‌بینی‌هایی در ۲۵۰۰ نقطه گیرنده در فاصله ۲ تا ۲۵۰ متری از خط مرکز مانع بر روی زمین و تا ۱۰ متر بالای زمین سخت انجام گردید. هدف اصلی محققین از بهبود عملکرد مانع، بهبود آن در فرکانس‌های

طبق شکل (۳) مقایسه می‌شود. همان طور که دیده می‌شود عملکرد مدل‌های مانع (PR۴) و (QR۴) در دامنه فرکانس پایین (۵۰-۱۶۰) هرتز تقریباً یکسان می‌باشد، در فرکانس‌های بین (۱۶۰ تا ۲۰۰۰ هرتز) PRD نسبت به QRD بهبود عملکرد بیش تری را نشان می‌دهد. اگر چه بازده آن در سه فرکانس (۱۲۵۰، ۱۰۰۰، ۳۱۵) هرتز پایین تر است. در واقع بهبود عملکرد در مدل مانع (PR۴) از فرکانس‌های پایین تری نسبت به مدل مانع (QR۴) شروع شده است.

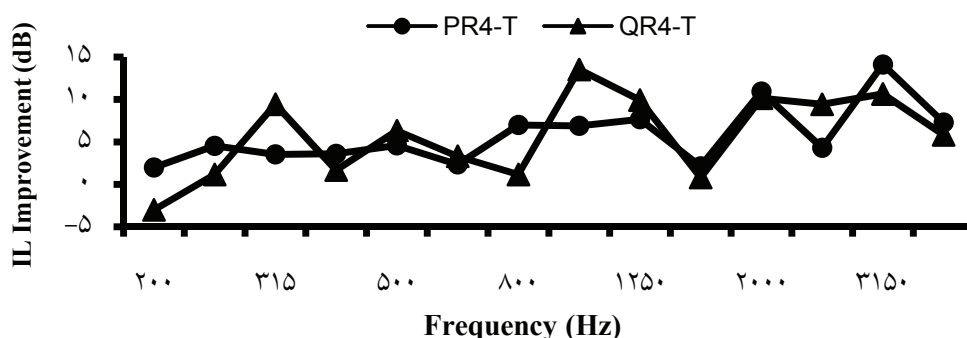
نتایج طیف نوفه ترافیک توزین شده برای این مدل‌ها در نقطه گیرنده (۰ و -۵۰) نیز نشان می‌دهد که افت صدا در (PR۴) به اندازه ۰/۷ dB(A) نسبت به QR۴ افزایش یافته است.

عمق شیارهای بیشتر در (PR۴) نسبت به QR۴ می‌تواند توضیح این امر است. اگر چه هر دو مانع، مانع‌های پخش کننده می‌باشند اما مانع PR۴ وابستگی به فرکانس کم تری دارد. این امر احتمالاً به این خاطر است که پخش کننده ریشه اول همه دنباله‌های ممکن از ۱ تا ۶ را داراست، در حالی که پخش کننده (QRD) فقط سه دنباله ۱ و ۲ و ۴ را دارا می‌باشد.

عملکرد این مدل‌ها با یک مانع T شکل ساده به عنوان مدل



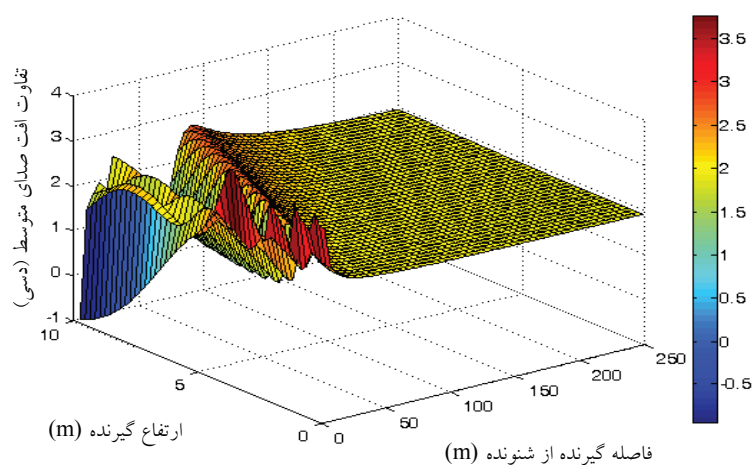
شکل ۳: مقایسه یک مانع T، شکل QRD (مدل QR۴) و یک مانع T، PRD، شکل (مدل PR۴) در نقطه گیرنده (۰ و -۵۰) (فرکانس طراحی دو پخش کننده یکسان و ۴۰۰۰ هرتز می‌باشد)



شکل ۴: بهبود افت صدای حاصل از مانع مدل PR۴ و QR۴ نسبت به مانع مرجع در نقطه گیرنده (۵۰ و -۵)

به نظر می‌رسد که سطح پخش کننده مقداری از موج صوتی را به سمت بالا هدایت می‌کند بنابراین عملکرد پایینی از مانع پخشنده در این مناطق مورد انتظار است، امری که در مانع PRD هم مشهود می‌باشد. این پدیده در شکل ۶ به صورت روشن تری مشخص می‌باشد. در این شکل دو مانع مدل (PR۴) و (QR۴) ارایه شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود، مانع (PR۴) اثر بیش تری را در این فرکانس در منطقه نزدیک به مانع با ارتفاع بلند نشان می‌دهد. این امر به این خاطر است که دنباله‌ها در PR۴ کاری می‌کنند که عمق بالاتر شیارها در پخش کننده با فرکانس‌های پایینی تنظیم شود، بنابراین در این فرکانس‌ها اثر پخش کنندگی بیش تر در سطح فوقانی مانع ارایه شده مشاهده می‌گردد و در نهایت همان طور که در هر دو شکل می‌بینیم،

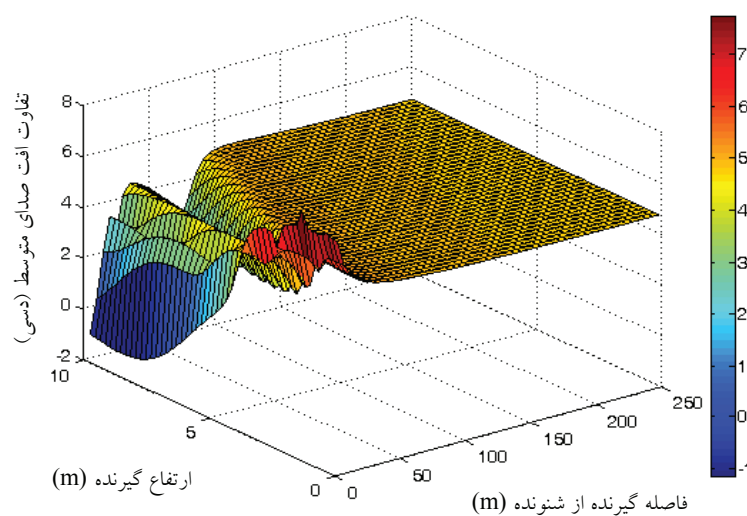
پایینی است که کمک شایانی جهت کنترل نوفه ترافیک و بهبود عملکرد کلی توزین شد A خواهد بود. در این مورد هر دو شکل ۵ و ۶ در ۲۰۰ هرتز ارایه شده‌اند تا اثر بخشی دنباله ریشه نخست را در فرکانس‌های پایین نشان دهد. سه ناحیه مجزا مشتمل بر نزدیک به زمین، در ارتفاع بالاتر و دور از زمین به روشنی در هر دو شکل بالا قابل مشاهده است. بیش ترین بهبود توسط مانع مدل PR۴ در نزدیک به زمین ایجاد می‌شود. میزان بهبود نسبت به مانع مرجع در این مناطق ۳/۵ تا ۴/۵ دسی بل می‌باشد. کم ترین اثر مانع مدل PR۴ در نزدیکی زمین در ارتفاع بالای ۳ متر مشاهده می‌شود. توضیح این امر پیشاپیش توسط منظم و همکارانش در سال ۲۰۰۵ در مورد مانع لبه‌دار QRD ارایه شده است (۳).



شکل ۵: نمودار سطحی بهبود افت صدای مانع مدل PR۴ نسبت به مانع مرجع در ۲۰۰ هرتز

به علاوه افت صدای کلی توزین شده A این مدل‌ها در نقطه گیرنده (۵۰ و -۵۰) نشان می‌دهد که عملکرد مانع پوشیده شده با PRD با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز به ترتیب ۰/۲ و dB(A) و ۲/۲ از مانع‌های PRD دار با فرکانس‌های طراحی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز بهتر می‌باشد. در واقع تغییر فرکانس طراحی به فرکانس‌های بالاتر در مانع مدل PR1۰ باعث پایین آمدن بازده کلی توزین شده A مانع می‌شود.

مانع مدل (PR۴) در نواحی دور از زمین در حوزه گسترده‌ای عملکرد بهتری را دارد. میزان بهبود حاصل از مدل مانع (PR۴) نسبت به مانع سخت معادل آن در این نواحی حدود ۲ تا ۳ دسی بل می‌باشد. در حالی که بهبود نسبت به مانع مدل QR۴ به ۴-۶ دسی بل هم می‌رسد. در واقع در این فرکانس، مانع QR۴ عملکرد کم تری نسبت به یک سطح سخت دارد. اما PR۴ می‌تواند ضعف مانع QR۴ را در این نواحی بپوشاند.



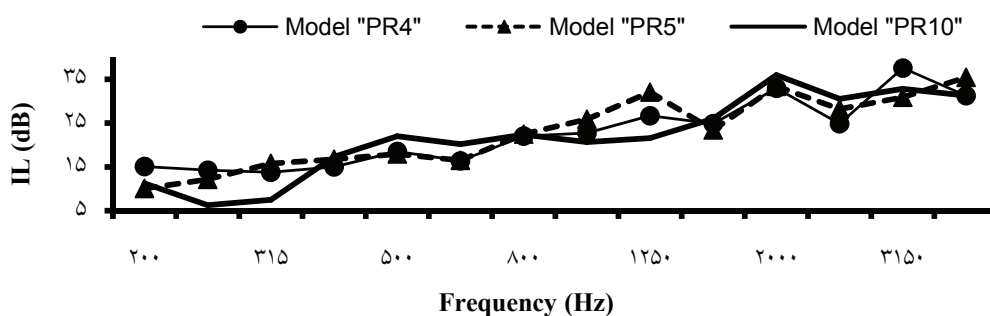
شکل ۶: نمودار سطحی بهبود افت صدا مانع مدل PR۴ نسبت به مانع مدل QR۴ در ۲۰۰

### اثر فرکانس طراحی

در این مرحله اثر فرکانس‌های طراحی متفاوت بر عملکرد آکوستیکی مانع T شکل پوشیده با PRD بررسی می‌شود. در این مورد، سه مدل متفاوت به نام‌های PR۴، PR۵ و PR۱۰ به ترتیب با فرکانس طراحی ۴۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز طراحی می‌شود. ویژگی‌های مدل‌های طراحی شده در جدول ۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده می‌شود، PR۴ با تفاوت جزئی نسبت به PR۵ بالاترین بازده را دارد. با افزایش فرکانس طراحی، بازده پخش کننده‌ها در فرکانس‌های پایین از دست می‌رود. این امر به این خاطر است که فرکانس موثر منجر به سمت فرکانس‌های بالاتر سوق داده می‌شود.

### اثر لایه‌های مقاوم

بسیاری از محققان اثر لایه‌های مقاوم بر سطح پخش کننده را با استفاده از مدل‌های مقیاسی یا مطالعات تئوریک بررسی کرده‌اند. (۱۰، ۱۱ و ۱۲). آن‌ها نشان دادند که با استفاده از لایه‌های مقاوم (وایر مش) روی سطوح شیوارها متفاوت می‌توان در بسیاری از فرکانس‌ها بهبود قابل توجهی در عملکرد آکوستیکی را به دست آورد. این بخش بهبود افزایش عملکرد سطوح واکنش را از طریق قراردادن یک لایه مقاوم بر مانع‌های PRD پروفایل شده ارایه می‌کند. سه لایه وایر مش با مقاومت جریان متفاوت، ۵/۷ و ۵/۵ و ۵۵۰ به ترتیب در مانع‌های مدل PRL و PRM و PRH استفاده گردیده است.



شکل ۷: اثر PRD با فرکانس‌های طراحی متفاوت در مانع T شکل نقطه گیرنده (۵۰ و ۰-)

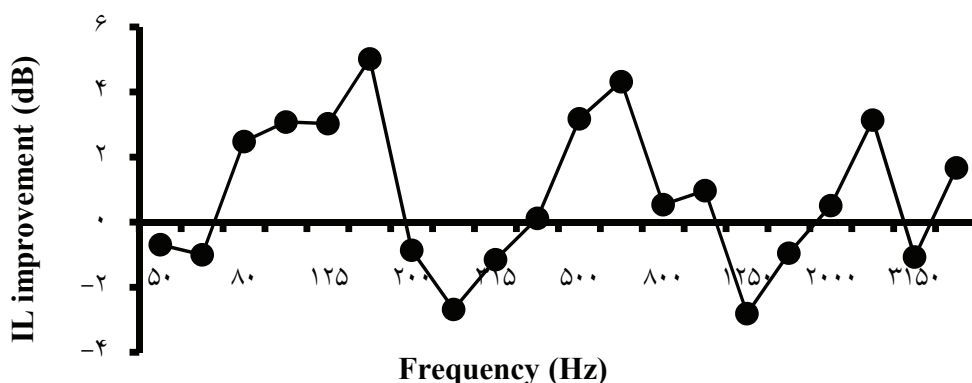
استفاده می‌کند،  $1 \text{ dB(A)}$  بالاتر از افت صدای توزین شده  $A$  مانع مدل  $\text{PR}^4$  می‌باشد. افزایش مقاومت به بیش از امیدانس آکوستیکی ویژه هوا می‌تواند اثر رزونانس را در شیار کاهش دهد که نشان دهنده اثر منفی بر عملکرد مانع‌های پخشنده می‌باشد.

#### افت کلی صدا

جدول ۴ افت صدای متوسط توزین شده  $A$  از همه مدل‌های طراحی و تفاوتشان را با مانع T شکل به عنوان مرجع در ۹ گیرنده مذکور تحت عنوان ( $\Delta IL$ ) نشان می‌دهد. روش استاندارد بریتانیا برای محاسبه افت صدای توزین شده  $A$  ترافیک استفاده گردید (۱۳). همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، افت صدای متوسط توزین شده  $A$  همه مدل‌های طراحی شده بالاتر از مدل T شکل مرجع می‌باشد.

شکل ۸ بهبود حاصل از یک لایه وایریش با مقاومت جریان  $5/7 \text{ (Mks) Rayls}$  استفاده شده در یک مانع PRD دار را نشان می‌دهد. در واقع این شکل تفاوت‌های افت صدای مانع مدل  $\text{PWL}$  نسبت به مانع مدل  $\text{PR}^4$  را مشخص می‌کند. همان طور که به روشنی در شکل مشهود است، بهبود قابل توجه با استفاده از یک لایه بسیار کم مقاوم در دامنه گسترده‌ای از فرکانس‌ها به دست می‌آید. این لایه مقاوم می‌تواند با افزایش توانایی جذب سطح عملکرد کلی را بهبود بخشد.

به این علت است که افت صدای مانع مدل  $\text{PR}^4$  در این مکان گیرنده به میزان  $0/8 \text{ dB(A)}$  افزایش می‌یابد. این بهبود با افزایش مقاومت لایه از  $5/7$  تا  $55$  رایلز قابل افزایش می‌باشد. در این مورد افت صدای توزین شده  $A$  مانع مدل  $\text{PWM}$  که از وایریش با مقاومت  $55$  رایلز در نقطه گیرنده (۵۰ و ۰-)



شکل ۸: بهبود افت صدای حاصل از به کارگیری وایریش با مقاومت  $r=1/5 \text{ Rayls}$  در مانع مدل  $\text{PR}^4$  در نقطه گیرنده (۵۰ و ۰-)

شیاردار با اعداد ترتیب، فرکانس طراحی، و توانایی جذب متفاوت در بیش از ۹ مکان گیرنده با استفاده از طیف صوتی ترافیک توزین شده A از ۵۰ تا ۴۰۰۰ هرتز در فرکانس‌های ۱/۳ اکتاو باند پیش‌بینی گردید. عملکرد مانع‌های PRD دار با مانع‌های QRD دار معادل مقایسه و خلاصه نتایج به شرح ذیل است.

۱- همان‌گونه که پیش‌پیش در کارهای قبلی هم گفته شده، با استفاده از ساختار QRD در سطح فوقانی مانع T شکل، بهبود قابل توجه عملکرد همه جانبه مانع ایجاد می‌شود. در این بررسی مشاهده شد که کاربرد پخش کننده‌های شرودر دارای توالی‌های بیش‌تر که باعث تغییر امپدانس بیش‌تر در سطح فوقانی مانع‌های می‌گردد، عملکرد همه جانبه بهتر مانع‌های PRD را موجب می‌شود. در این مورد، یک مانع PRD دار با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز عملکرد متوسط توزین شده A مانع QRD معادل خود را به میزان ۰/۷ dB(A) بهبود می‌بخشد. شایان ذکر است که طبق یافته پیشین، مانع QRD با فرکانس ۴۰۰ هرتز پر بازده‌ترین مدل موجود جهت کنترل نوفه ترافیک می‌باشد (۳). دلیل بازده بالای مانع‌های PRD می‌تواند تغییر امپدانس بیش‌تر در سطح فوقانی و امکان عمق شیار بالاتر در ساخت آن می‌باشد. تغییر امپدانس بالا باعث می‌شود که دستگاه‌ها اثر فرکانس گسترده تری داشته باشند و عمق شیار بالا اولین فرکانس موثر را به فرکانس‌های پایین‌تر می‌برد.

۲- با ثابت نگه داشتن فرکانس طراحی در ۴۰۰ هرتز، هر مانع PRD طراحی شده می‌تواند عملکرد همه جانبه مانع QRD دارای همان فرکانس طراحی را افزایش دهد.

۳- اگر چه استفاده از PRD به روی مانع T شکل یک مانع مستقل از فرکانس تولید می‌کند، طیف افت صدا در قیاس با طیف به دست آمده برای مانع QRD، هموارتر می‌باشد. علت این امر می‌تواند به خاطر مقدار تغییرات امپدانس یا مقاومت آکوستیکی که در PRD از QRD بیش‌تر است، باشد.

۴- هم چنین مشخص گردید که افزایش فرکانس طراحی سطوح PRD مورد استفاده باعث کاهش اثر یا ضعیف شدن

مقایسه نتایج کلی دو پخش کننده شرودر مورد استفاده در مانع نشان می‌دهد که افزایش اعداد ترتیب در PRD منجر به تغییر بیش‌تر امپدانس یا مقاومت آکوستیکی در سطح فوقانی مانع می‌شود. همین امر سبب شده تا عملکرد مانع PRD دار نسبت به بازده کلی مانع QRD دار به میزان ۰/۷ dB(A) بهبود یابد. علاوه بر این، مانع T شکل پخشنده با یک ماده مقاوم از مانع‌هایی که فقط سطح فوقانی پخشنده دارند مانند (PR۴، QR۴) بازده بیش‌تری دارد.

در مورد لایه‌های وایر مش دارای مقاومت جریان متفاوت هم روندهایی بسیار مشابه با این موضوع مشاهده می‌شود. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده می‌شود، (PWM) با یک وایر مش ۵۵ عملکرد کلی بهتری را نسبت به مانع‌ها با مقاومت‌های دیگر بروز می‌دهد. افزایش فرکانس طراحی PRD عملکرد آن را به فرکانس‌های بالاتر می‌برد که این امر منجر به افت صدای متوسط توزین شده A پایین‌تر می‌شود.

جدول ۴: میانگین افت کلی صدا مدل‌های مختلف در ۹ گیرنده

Barrier type	IL Mean (dB (A))	ΔIL
T "Ref"	۱۶/۹	۰
QR4	۱۹	۲/۱
PR4	۱۹/۷	۲/۸
PR5	۱۹/۵	۲/۶
PR10	۱۷/۵	۰/۶
PWL	۲۰/۵	۳/۶
PWM	۲۰/۷	۳/۸
PWH	۲۰/۴	۳/۵

## بحث و نتیجه گیری

عملکرد آکوستیکی مانع‌های صوتی ترافیکی PRD دار بر روی زمین سخت با استفاده از یک روش دو بعدی اعتبار سنجی شده عنصر مرزی بررسی گردید. افت صدا تعدادی سطوح

عملکرد مانع می‌شود در این مورد که از PRD با فرکانس طراحی ۱۰۰۰ هرتز استفاده می‌شود، عملکرد کلی توزین شده A مدل (PR<sub>۱</sub>) به میزان ۲/۲ dB(A) پایین تر از مدل PR<sub>۴</sub> با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز می‌باشد.

۵- طبق یافته‌های گذشته (۱۰) استفاده از وایر مش می‌تواند باعث افزایش قابل توجه عملکرد دیفیوزرهای شرودر شود. به هر حال یک وایر مش با مقاومت بالا باعث کاهش اثر رزونانس در شیارد می‌شود. بنابراین کاربرد وایر مش دارای مقاومت متوسط در سطح فوقانی PRD و هم چنین اثر شیارها در رزونانس باعث بهبود عملکرد همه جانبه مانع‌های پخشنده می‌شود. ولی قراردادن وایر مش مقاوم‌تر در سطح PRD یک مانع پخشنده به رغم افزایش زیاد جذب، کاهش چشم‌گیر عملکرد مانع در

باند پهن فرکانس دیده می‌شود. این امر به خاطر کاهش اثر تشدید شیارها می‌باشد، که عامل اصلی بازده بالا در یک مانع PRD دار است.

۶- عملکرد مانع T شکل پوشیده با PRD (مدل PR<sub>۴</sub>)، در فرکانس پایین هم در نواحی دور و نزدیک به زمین بهتر از عملکرد مانع‌های QRD معادل آن می‌باشد. مطالعه حاضر در مورد اثر به کارگیری اعداد ترتیب ریشه نخست در مانع‌های T شکل به روشنی بیانگر این امر است که توالی مورد استفاده در پخش کننده می‌تواند ضعف توالی مانع QRD را در کاربردهای کنترل نوفه زیست‌محیطی بپوشاند، بنابراین مطالعه در مورد ترکیب این توالی‌ها به منظور تقویت شیارها در افت صدای مانع‌های دیفیوزر شرودر پیشنهاد می‌شود.

### منابع

1. Fujiwara F, Nakia K. Sound field analysis near the surface of the Schroeder diffuser. *J Acoust Soc Am*. 1996;100(4):2700.
2. Fujiwara K, Hothersall DC, Kim CH. Noise barriers with reactive surfaces. *Appl Acoust*. 1998;53(4):225-72.
3. Monazzam MR, Lam YW. Performance of profile single noise barriers covered with quadratic residue diffusers. *Appl Acoust*. 2005;66:709-30.
4. Baulac M, Defrance J, Jean P. Optimisation with genetic algorithm of the acoustic performance of T-shaped noise barriers with a reactive top surface. *Appl Acoust*. 2008;69:332-42.
5. Schroeder MR. Diffuse sound reflection by maximum length sequence. *J Acoust Soc Am*. 1975;57(1):149-50.
6. Schroeder MR. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound. *J Acoust Soc Am*. 1979;65:958-63.
7. Hothersall DC, Chandler-Wilde SN, Hajmirzae MN. Efficiency of single noise barriers. *J Sound Vib*. 1991;146(2):303-22.
8. Wu T, Cox TJ, Lam YW. From a profiled diffuser to an optimized absorber. *J Acoust Soc Am*. 2000;108(2):643-50.
9. Wu T, Cox TJ, Lam YW. A profiled structure with improved low frequency absorption. *J Acoust Soc Am*. 2001;119(6):3064-70.
10. Monazzam MR, Lam YW. Performance of T-shape barriers with top surface covered with absorptive quadratic residue diffusers. *Appl Acoust*. 2008;69:93-109.
11. Cox TJ, D'Antonio P. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. London: Spon Press; 2004.
12. Mechel FP. The wide-angle diffuser – a wide-angle absorber? *Acoustica*. 1995;81:379–401
13. British Standards Institution. BS EN 1793-3:1998. Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance, Part 3. Normalized traffic noise spectrum. UK: British Standards Institution; 1998.

## **Performance of PRD Welled Surfaces in T Shape Noise Barriers for Controlling Environmental Noise**

**\*Monazzam M.R<sup>1</sup>, Naderzadeh M.<sup>2</sup>, Nassiri P.<sup>2</sup>, Momen Bellah S.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Occupational Engineering, Health 1 School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Environmental Engineering, Graduate School of the Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received 13 March 2010; Accepted 25 May 2010

### **ABSTRACT**

**Backgrounds and Objectives:** There is a considerable notice in the use of noise barriers in recent years. Noise barriers as a control noise solution can increase the insertion loss to protect receivers. This paper presents the results of an investigation about the acoustic efficiency of primitive root sequence diffuser (PRD) on environmental single T-shape barrier.

**Materials and Methods:** A 2D boundary element method (BEM) is used to predict the insertion loss of the tested barriers. The results of rigid and with quadratic residue diffuser (QRD) coverage are also predicted for comparison.

**Results:** It is found that decreasing the design frequency of PRD shifts the frequency effects towards lower frequencies, and therefore the overall A-weighted insertion loss is improved. It is also found that using wire mesh with reasonably efficient resistivity on the top surface of PRD improves the efficiency of the reactive barriers; however utilizing wire meshes with flow resistivity higher than specific acoustic impedance of air on the PRD top of a diffuser barrier significantly reduces the performance of the barrier within the frequency bandwidth of the diffuser. The performance of PRD covered T-shape barrier at 200 Hz was found to be higher than that of its equivalent QRD barriers in both the far field and areas close to the ground. The amount of improvement compared made by PRD barrier compared with its equivalent rigid barrier at far field is about 2 to 3 dB, while this improvement relative to barrier model "QR4" can reach up to 4- 6 dB.

**Conclusion:** Employing PRD on the top surface of T-shape barrier is found to improve the performance of barriers compared with using rigid and QRD coverage at the examined receiver locations.

**Key words:** Noise barrier, Resistive layers, T- shape barrier, Primitive RootDiffuser

---

**\*Corresponding Author:** [mmonazzam@gmail.com](mailto:mmonazzam@gmail.com)

**Tel:** +98 21 88992663 **Fax:** +98 21 88992663