

## عملکرد سطوح شیاردار (PRD) در مانع‌های صوتی T شکل به منظور کنترل نوافه 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 نوافه محیط محافظت کنند. این مقاله نتایج بررسی عملکرد آکوستیکی پخش کننده (PRD) را روی مانع T شکل زیست محیطی ارایه می‌کند.

**روش بررسی:** جهت پیش‌بینی افت صدای مانع‌های مورد آزمایش از روش عنصر مرزی دو بعدی استفاده شد. هم‌جنین 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 پایین تر هدایت می‌کند که بدین صورت افت صدا در شبکه A نیز بهبود می‌یابد. از طرفی کاربرد وایر مشن با مقاومت موثر در سطح فوقانی (PRD)، بازده مانع‌های پخش‌نده را بالا می‌برد. با این وجود به کارگیری وایر مشن برروی یک مانع (PRD) با مقاومت جریان بیش از امپدانس صوتی ویژه‌هوا، باعث کاهش چشم‌گیر عملکرد مانع پخش کننده 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 دسی بل می‌باشد. در حالی که این بهبود نسبت به مدل مانع QRD به ۴ تا ۶ دسی بل هم می‌رسد.

**نتیجه گیری:** 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، استاد دانشکده محیط زیست و انرژی واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

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

## مقدمه

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 مقاومت‌های مختلف با هم مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## مواد و روش ها

### جذب توسط پخش کننده‌های (PRD، QRD)

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

پخش کننده‌ها انواع مختلفی دارند از رایج ترین پخش کننده‌هایی که توسط شرودر در سال ۱۹۷۰ معرفی شده بود می‌توان پخش کننده با تناوب عمق بر اساس حداقل باقی مانده توان دوم اعداد اول (QRD) و پخش کننده با تناوب عمق بر اساس ریشه اولیه (PRD) را نام برد. پخش کننده‌های 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 پخش کننده‌گی امواج روی سطح از خود نشان می‌دهد که این واکنش پخش کننده‌گی

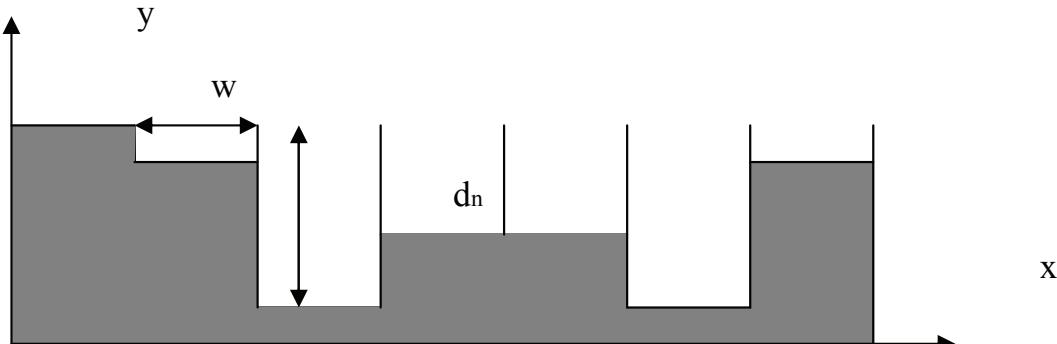
آلودگی صوتی به عنوان یک مشکل جدی زیست محیطی شناخته شده، توسط پروژه‌های راه‌سازی مثل پروژه‌های ساخت و ساز بزرگراه، راه‌آهن، شاهراه و غیره ایجاد می‌شود. آنچه مسلم است نوفه ناشی از تردد و سایل نقلیه اعم از جاده‌ای و ریلی و ... منجر به کاهش رفاه مردم و ایجاد اثرات منفی بر سلامت جامعه می‌باشد. از این رو موانع 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 پر اندمان ترین آنها به شمار می‌آید که به صورت تکی در کنار بزرگرهای 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 پخشندۀ 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).

منظمه و همکارانش در سال (۲۰۰۵) نشان دادند که افت صدای ایجاد شده در یک مانع T شکل با پوشش سطوح پخشندۀ با تناوب عمق بر اساس حداقل باقی مانده توان دوم دوم اعداد اول QRD (Quadratic Residue Diffuser) سطح فوقانی آن بیش تراز کاربردیک نوع ماده جاذب فیری درمانع می‌باشد(۳). هم چنین یک نوع مشابه در ارتباط با بررسی مانع های T شکل در سال (۲۰۰۸) توسط بالولاک و همکارانش انجام شده است(۴). هدف این مقاله بررسی عملکرد مانع صوتی T شکل پوشیده شده با سطوح پخشندۀ 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 پخشندۀ از مدل‌های مختلف با یکدیگر

جدول ۱: شماره ترتیب در QRD

شماره ترتیب	N
۰.۱	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
۰.۱.۴.۹.۱۶.۸.۲.۱۵.۱۳.۱۳.۱۵.۲.۱.۱۶.۹.۴.۱	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



شکل ۱: سطح مقطع دو بعدی QRD

هم چنین محاسبات ریاضی آن به شکل زیر می‌باشد:

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

$$n = 1 \rightarrow$$

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

$$n = 2 \rightarrow$$

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

$$n = 3 \rightarrow$$

که در آن  $\text{floor}$  به معنی گرد کردن اعداد به سمت منفی بی‌نهایت می‌باشد. در این عملیات اعداد به سمت منفی گرد  $\text{floor}(-\frac{1}{2}) = -1$  و  $\text{floor}(\frac{2}{3}) = 0$  می‌شوند مثلاً  $\text{floor}(\frac{3}{2}) = 1$  و  $\text{floor}(-\frac{1}{2}) = -1$  می‌شود. جهت اطلاع بیشتر در این مورد به منظم (۲۰۰۵) مراجعه شود(۳).

به تناوب عمق شیارهای هر دوره بستگی دارد در این خصوص برای پخش کنندهای شروع در 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=7) 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.

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.

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

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:

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

r: ریشه اول از N  
n: عدد اول انتخاب شده

جدول ۲: شماره ترتیب در PRD

N	r	شماره ترتیب
۳	۲	۱.۲
۵	۲	۱.۲.۴.۳
۷	۳	۱.۳.۴.۲
۹	۳	۱.۳.۲.۶.۴.۵
۱۱	۲	۱.۵.۴.۶.۲.۳
۱۳	۲	۱.۲.۴.۸.۵.۱۰.۹.۷.۳.۶
۱۱	۶	۱.۶.۳.۷.۹.۱۰.۵.۸.۴.۲
۱۳	۷	۱.۷.۵.۲.۳.۱۰.۴.۶.۹.۸
۱۳	۸	۱.۸.۹.۶.۴.۱۰.۳.۲.۵.۷
۱۳	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
۱۳	۷	۱.۷.۱۰.۵.۹.۱۱.۱۲.۶.۳.۸.۴.۲
۱۱	۱۱	۱.۱۱.۴.۵.۳.۹.۱۲.۲.۲.۹.۸.۱.۰.۶

همان طور که در جدول ۲ دیده می شود مثلا اگر تعداد شیارها را در PRD(۷) و ریشه اول را (۳) در نظر بگیریم، عدد ترتیب به صورت (۵و۴و۲و۳و۱) خواهد بود هم چنین طبق معادله (۵) می توان عمق هر یک از شیارها را در PRD محاسبه نمود.

$$d_n = \frac{s_n \lambda_o}{2(N-1)} \quad (5)$$

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

$f_0$  : 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

n : شماره ترتیب

d : عمق هریک از شیارها (m)

برای مثال برای شیار با شماره ترتیب (۱) و طول موج ۰/۸۵ m

میزان عمق آن را به شکل زیر تعیین می نماییم.

$$d_1 = \frac{1 \times 0.85}{2 \times 1} = 0.425m$$

### 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 توانند 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.

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

مورد ملاحظه قرار گیرند، چرا که اعتقاد بر اینست که افتها در شیارهای باریک بواسیله 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 بالای شیارهای حاوی لایه مقاوم در بخش کنندهای شرودر تحلیل ذیل جهت تخمین مقاومت آکوستیکی یک لایه مقاوم استفاده گردید. در این روش،  $Z_1$  مقاومت یا امپدانس شیار با عمق  $L_n$  مقاومت یک ماده مقاوم می‌باشد (۸ و ۹).

$$z_w = \frac{\rho CZ_1 \cot(jk_1 l_n) + (\rho c)}{z_1 + \rho c \cot(jk_1 l_n)} + r \quad (7)$$

**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  $\frac{1}{3}$  متر و  $\frac{1}{10}$  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  $\frac{1}{3}$  اکتاوباند در ۹ محل گیرنده مذکور زمین پیش‌بینی گردید. ضخامت تیغه در همه مدل‌ها قابل چشم پوشی فرض می‌شود.

جهت ساده سازی رهیافت مدل‌سازی آماری، بعد یک مانع T شکل معرفی شده تحت عنوان مدل PR<sup>4</sup> در شکل (۲) ارایه می‌شود.

### یافته‌ها

#### اثرشماره ترتیب (Sequences)

در ابتدا عملکرد پخش کننده‌های (PRD) در مانع T شکل تحت عنوان مدل (PR<sup>4</sup>) با (QRD) با نام مدل (QR<sup>4</sup>)

### 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 المنشاه کم تر از  $5/\lambda$  در نظر گرفته شده تا این که یک بازنمایی معقول از فشار سطحی ثابت بر یک عنصر یا المنش به دست می‌آید (۷). لذا در مدل‌سازی انجام شده در این طرح نیز طول هر المان  $20/2$  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 (۰/۵ و ۰/۳) 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.

$$IL = -20 \log \left| \frac{p(r, r_i)}{G(r, r_i)} \right| dB \quad (8)$$

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

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

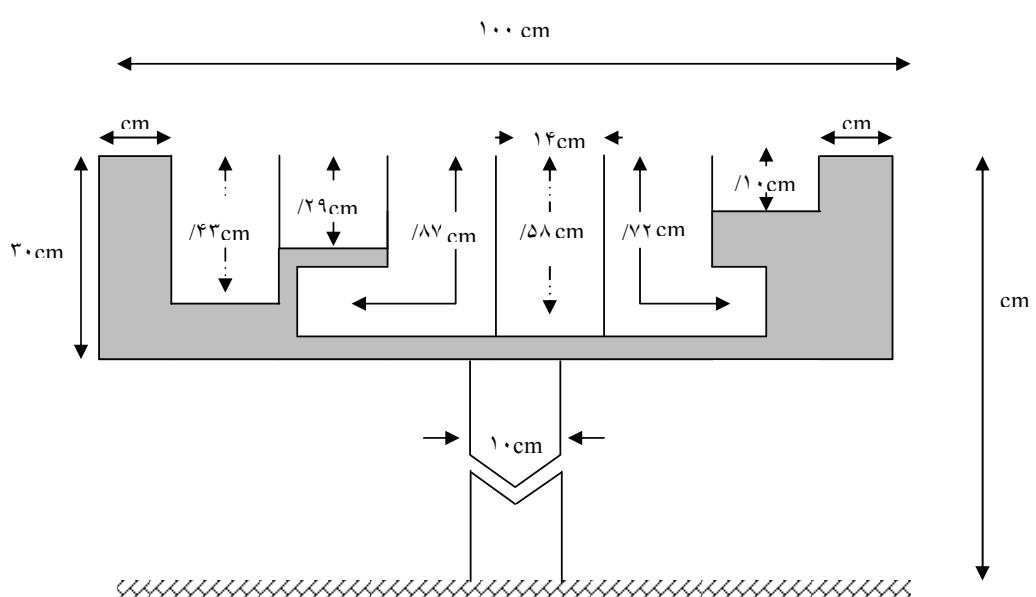
### امپدانس پخش کننده‌های شرودر

الف. امپدانس یا مقاومت آکوستیکی در سطح بالای 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 سایز عرض شیارها نیاز می‌باشد این دو

جدول ۳: مشخصه های مدل های مختلف مانع

مدل ها	نوع پخش کننده ها	(N)	فرکانس طراحی (KHz)	عرض شیار w (cm)	شماره ترتیب	توضیحات
T	—	—	—	—	—	مانع ساده سخت
QR4	QRD	۷	۰/۴	۱۲	(۰۱۴۲۲۴۱)	مانع شیار دار Q
PR4	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	مانع شیار دار P
PR5	PRD	۶	۰/۵	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	مانع شیار دار P
PR10	PRD	۶	۱	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	مانع شیار دار P
PWL	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	مانع شیار دار (با ورقه مقاوم) ( $r = 5/7$ Rayls (MKS))
PWM	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	مانع شیار دار (با ورقه مقاوم) ( $r = 55$ Rayls (MKS))
PWH	PRD	۶	۰/۴	۱۴	(۳۲۶۴۵۱)	مانع شیار دار (با ورقه مقاوم) ( $r = 550$ Rayls (MKS))



شکل ۲: دیاگرام شماتیک نمای جانبی مدل مانع PR4

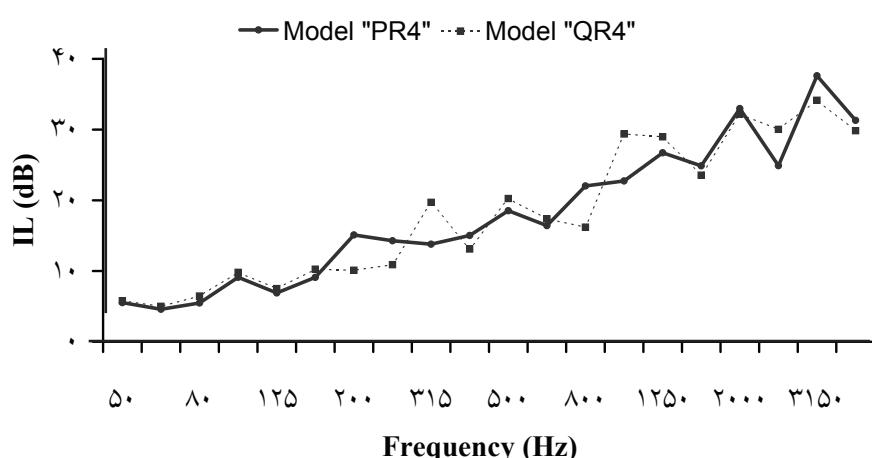
مرجع در شکل (۴) مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که اثر هر دو پخش کننده در فرکانس‌های زیر ۲۵۰ Hz پایین تر از مانع سخت معادلشان می‌باشد. به خاطر تفاوت عمق شیارهای این دو پخش کننده، نقاط کمینه و بیشینه تولید شده توسط آن‌ها متفاوت است. شکل ۴ بهبود حاصل از کاربرد پخش کننده‌های مختلف در مانع T شکل سخت را نشان می‌دهد. نتیجه آن است که مانع مدل (PR<sup>۴</sup>) در چهار فرکانس می‌دهد. مانع مدل (QR<sup>۴</sup>) افت صدای توزین شده A مانع (و ۵۰-۵۰) مانع مدل PR<sup>۴</sup> افت صدای توزین شده A مانع را تا ۲/۵ dB(A) و نیز مانع مدل PR<sup>۴</sup> آن را به اندازه ۳/۲ dB(A) بهبود می‌بخشد.

جزیيات بهبود عملکرد مانع PR<sup>۴</sup> و QR<sup>۴</sup> در محدوده نزدیک و دور از زمین در فرکانس ۲۰۰ هرتز طبق شکل ۵ و 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

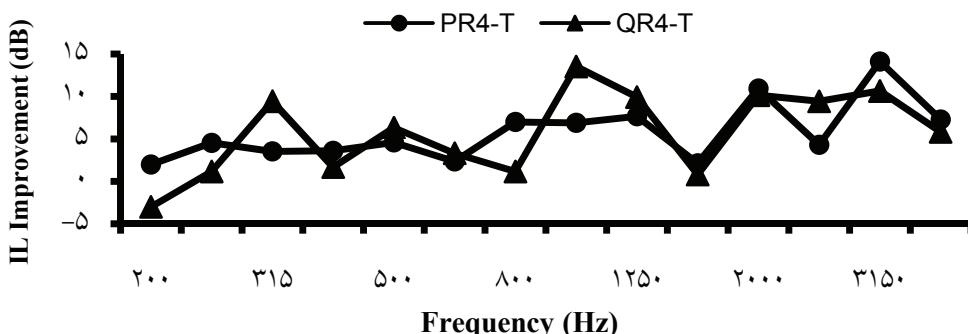
طبق شکل (۳) مقایسه می‌شود. همان طور که دیده می‌شود عملکرد مدل‌های مانع (PR<sup>۴</sup>) و (QR<sup>۴</sup>) در دامنه فرکانس پایین (۵۰-۱۶۰) هرتز تقریباً یکسان می‌باشد، در فرکانس‌های بین (۱۶۰ تا ۲۰۰۰ هرتز) QRD نسبت به PRD بهبود عملکرد بیش تری را نشان می‌دهد. اگر چه بازده آن در سه فرکانس (۱۲۵۰، ۱۰۰۰، ۳۱۵) هرتز پایین تر است. در واقع بهبود عملکرد در مدل مانع (PR<sup>۴</sup>) از فرکانس‌های پایین تری نسبت به مدل مانع (QR<sup>۴</sup>) شروع شده است.

نتایج طیف نویه ترافیک توزین شده برای این مدل‌ها در نقطه گیرنده (۵۰-۵۰) نیز نشان می‌دهد که افت صدا در (PR<sup>۴</sup>) به اندازه (۵۰/۷ dB(A)) نسبت به QR<sup>۴</sup> افزایش یافته است. عمق شیارهای بیشتر در (PR<sup>۴</sup>) نسبت به QR<sup>۴</sup> می‌تواند توضیح این امر است. اگرچه هر دو مانع، مانع‌های پخش کننده می‌باشند اما مانع PR<sup>۴</sup> 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 دارد، در حالی که پخش کننده (QRD) فقط سه دنباله اول و ۴ را دارا می‌باشد.

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



شکل ۳: مقایسه یک مانع T، QRD شکل (مدل QR<sup>۴</sup>) و یک مانع PRD، شکل (مدل PR<sup>۴</sup>) در نقطه گیرنده (۵۰-۵۰) (فرکانس طراحی دو پخش کننده یکسان و ۴۰۰۰ هرتز می‌باشد)

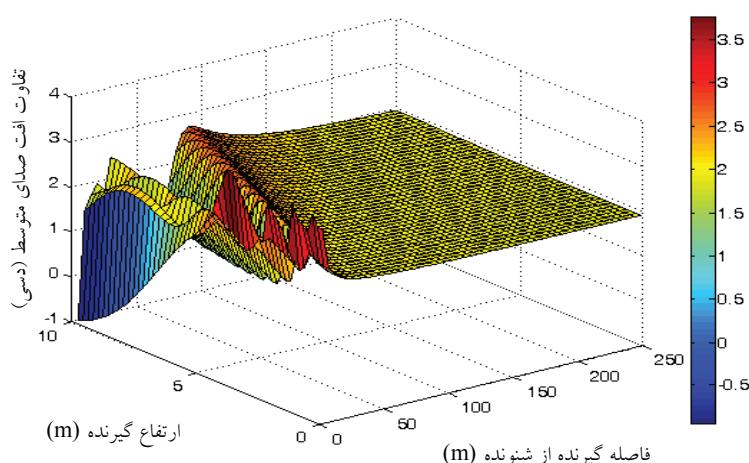


شکل ۴: بهبود افت صدای حاصل از مانع مدل PR4 و QR4 نسبت به مانع مرجع در نقطه گیرنده (۰° و ۵۰°)

به نظر می‌رسد که سطح پخش کننده مقداری از موج صوتی را به سمت بالا هدایت می‌کند بنابراین عملکرد کمک شایانی جهت کنترل نویه ترافیک و بهبود پخشندگان در این مناطق مورد انتظار است، امری که در مانع PRD هم مشهود می‌باشد. این پدیده در شکل ۶ به صورت روشن‌تری مشخص می‌باشد. در این شکل دو مانع مدل (PR4) و (QR4) ارایه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، مانع (PR4) اثر بیشتری را در این فرکانس در منطقه نزدیک به مانع با ارتفاع بلند نشان می‌دهد. این امر به این خاطر است که دنباله‌ها در PR4 کاری می‌کنند که عمق بالاتر شیارها در پخش کننده با فرکانس‌های پایینی تنظیم شود، بنابراین در این فرکانس‌ها اثر پخش کننده‌گی بیشتر در سطح فوقانی مانع ارایه شده مشاهده می‌گردد و در نهایت همان‌طور که در هر دو شکل می‌بینیم،

پایینی است که کمک شایانی جهت کنترل نویه 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 پخشی دنباله ریشه نخست را در فرکانس‌های پایین نشان دهد.

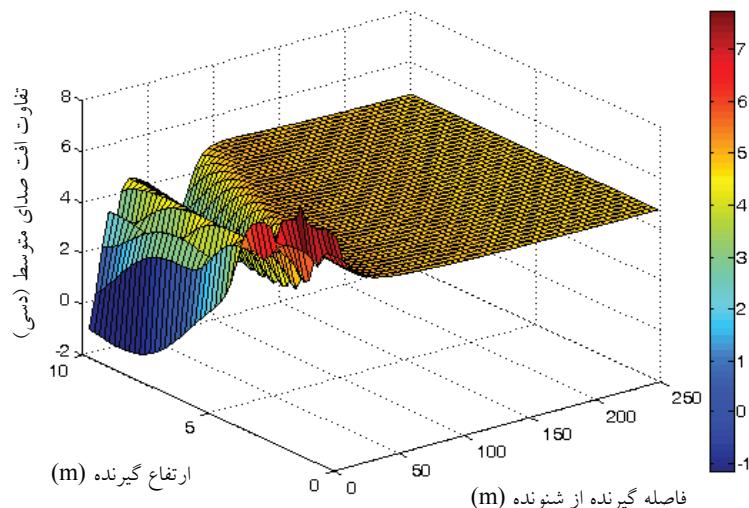
سه ناحیه مجزا مشتمل بر نزدیک به زمین، در ارتفاع بالاتر و دور از زمین به بیشترین در هر دو شکل بالا قابل مشاهده است. بیشترین بهبود توسط مانع مدل PR4 در نزدیک به زمین ایجاد می‌شود. میزان بهبود نسبت به مانع مرجع در این مناطق ۳/۵ تا ۴/۵ دسی بل می‌باشد. کمترین اثر مانع مدل PR4 در نزدیکی زمین در ارتفاع بالای 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 PR4 نسبت به مانع مرجع در ۲۰۰ هرتز

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

مانع مدل (PR4) در نواحی دور از زمین در حوزه گسترهای عملکرد بهتری را دارد. میزان بهبود حاصل از مدل مانع (PR4) نسبت به مانع سخت معادل آن در این نواحی حدود ۲ تا ۳ دسی بل می‌باشد. در حالی که بهبود نسبت به مانع مدل QR4 به ۴-۶ دسی بل هم می‌رسد. در واقع در این فرکанс، مانع QR4 عملکرد کم تری نسبت به یک سطح سخت دارد. اما PR4 می‌تواند ضعف مانع QR4 را در این نواحی پوشاند.



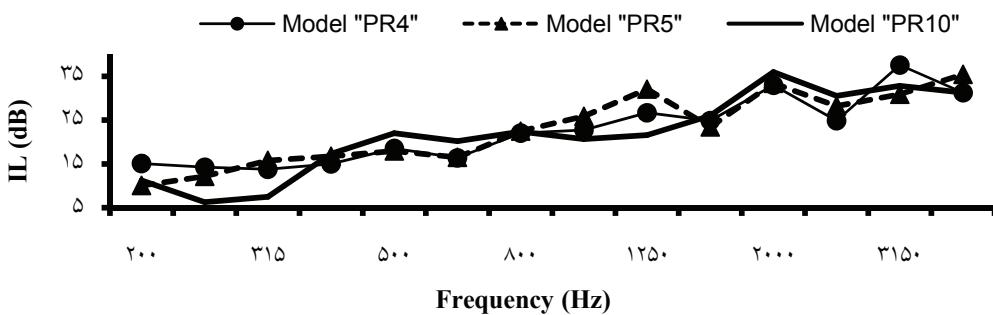
شکل ۶: نمودار سطحی بهبود افت صدا مانع مدل PR4 نسبت به مانع مدل QR4 در ۲۰۰

#### 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 شیارها متفاوت می‌توان در بسیاری از فرکانس‌ها بهبود قابل توجهی در عملکرد اکوستیکی 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 وایرمش با مقاومت جریان متفاوت، ۵/۷ و ۵/۵ و ۵۵۰ به ترتیب در مانع‌های مدل PRL و PRM و PRH استفاده گردیده است.

#### 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 PR4، PR5 و PR10 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، PR4 با تفاوت جزیی نسبت به PR5 بالاترین بازده را دارد. با PR4 با تفاوت جزیی نسبت به PR5 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.



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

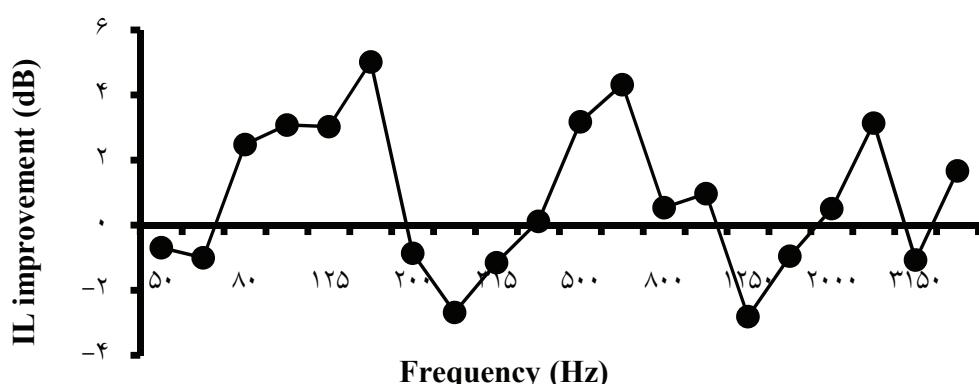
استفاده می‌کند، (۱ dB(A) بالاتر از افت صدای توزین شده A مانع مدل PR4 می‌باشد. افزایش مقاومت به بیش از امپدانس آکوستیکی ویژه هوا می‌تواند اثر رزونانس را در شیار کاهش دهد که نشان دهنده اثر منفی بر عملکرد مانع‌های پخشنه می‌باشد.

#### 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 واپرمش با مقاومت جریان ۵/۷(Mks)Rayls استفاده شده در یک مانع PRD دار را نشان می‌دهد. در واقع این شکل تفاوت‌های افت صدای مانع مدل PWL نسبت به مانع مدل PR4 را مشخص می‌کند. همان‌طور 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 PR4 در این مکان گیرنده به میزان (۸/۱) dB(A) افزایش می‌یابد. این بهبود با افزایش مقاومت لایه از ۵/۷ تا ۵۵ رایلز قابل افزایش می‌باشد. در این مورد افت صدای توزین شده A مانع مدل PWM که از واپرمش با مقاومت ۵۵ رایلز در نقطه گیرنده (۰ و -۵۰)

شکل ۸: بهبود افت صدای حاصل از به کارگیری واپرمش با مقاومت  $t=1/5$  Rayls در مانع مدل PR4 در نقطه گیرنده (۰ و -۵۰)

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 پیشاپیش 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(A)dB(۷) بهبود می‌بخشد. شایان ذکر است که طبق یافته پیشین، مانع QRD با فرکانس ۴۰۰ هرتز پر بازده‌ترین مدل موجود جهت کنترل نوفه ترافیک می‌باشد<sup>(۳)</sup>. 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 گسترشده 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 مورداستفاده در مانع نشان می‌دهد که افزایش اعداد ترتیب در PRD منجر به تغییر بیش تر امپدانس یا مقاومت اکوستیکی در سطح فوقانی مانع می‌شود. همین امر سبب شده تا عملکرد مانع PRD دار نسبت به بازده کلی مانع QRD دار به میزان(A)dB(۷) بهبود یابد. علاوه بر این، مانع T شکل پخشندۀ با یک ماده مقاوم از مانع‌هایی که فقط سطح فوقانی پخشندۀ دارند مانند PR4، PR4، QR4 بازده بیشتری دارد.

در مورد لایه‌های وايرمش درای مقاومت جريان متفاوت هم روندهایي بسيار مشابه با اين موضوع مشاهده می‌شود. همان طور که در جدول ۴ نشان داده می‌شود، (PWM) با يك وايرمش ۵۵ عملکرد کلی بهتری را نسبت به مانع‌ها با مقاومت‌های ديگر بروز می‌دهد. افزایش فرکانس طراحی PRD عملکرد آن را به فرکانس‌های بالاتر می‌برد که اين امر منجر به افت صدای متوسط توزین شده A پایین‌تر می‌شود.

جدول ۴: ميانگين افت کلي صدا مدل‌های مختلف در ۹ گيرنده

Barrier type	IL Mean (dB (A))	$\Delta IL$
T "Ref"	۱۶/۹	.
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 يك روش دو بعدی اعتبار سنجی شده عنصر مرزی بررسی گردید. افت صدا تعدادی سطوح

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 ۴)، 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 نوافه زیست‌محیطی پوشاند، بنابراین مطالعه در مورد ترکیب این توالی‌ها به منظور تقویت شیارها در افت صدای مانع‌های دیفیوزر شرودر پیشنهاد می‌شود.

عملکرد مانع می‌شود در این مورد که از PRD با فرکانس طراحی ۱۰۰۰ هرتز استفاده می‌شود، عملکرد کلی توزین شده A مدل (PR<sub>1,0</sub>) به میزان (A dB) ۲/۲ پایین تر از مدل PR با فرکانس طراحی ۴۰۰ هرتز می‌باشد.

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

## 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? *Acustica*. 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 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