

## عوامل موثر در توسعه ناحیه سکوت در محفظه با سیستم کنترل فعال نویز چند کاناله

مسعود مرادخانی، محمد حسین کهائی و جواد پشتان

**چکیده:** در این مقاله چگونگی ایجاد و توسعه ناحیه سکوت در یک محفظه توسط سیستمهای کنترل فعال نویز مورد توجه قرار می‌گیرد. ابتدا بر اساس همدوسی سیگنالها تخمینی از میزان تضعیف نویز قابل دستیابی در داخل محفظه ای به ابعاد  $1 \times 1 \times 2$  متر بدست می‌آید. سپس اثرات عوامل مهم جهت ایجاد و توسعه ناحیه سکوت مانند آرایش و تعداد منابع ثانویه و میکروفن های خطا در داخل محفظه و اثر توان منابع ثانویه بررسی می‌شود. بدین منظور سیستمهای کنترل فعال نویز تک کاناله و چند کاناله  $1 \times 1 \times 2$  و  $1 \times 2 \times 4$  در داخل محفظه پیاده سازی می‌گردد. میزان تضعیف در محدوده میکروفن های خطا و در صفحات مختلف فضای محفظه ارائه شده و توانایی سیستمهای مذکور در ایجاد نواحی سکوتی مطابق با نتایج تئوری مقایسه می‌شوند.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل فعال نویز - الگوریتم FXLMS - ایجاد ناحیه سکوت

### ۱. مقدمه

کنترل فعال نویز<sup>۱</sup> ANC شامل یک سیستم الکتروآکوستیکی است که نویز ناخواسته را براساس اصل جمع آثار حذف می‌کند. برای اینکار یک ضد نویز با دامنه یکسان و فاز مخالف تولید و با نویز اولیه ترکیب شده که منجر به حذف نویز مزاحم می‌شود. نویزهای فرکانس پایین (معمولا کمتر از ۶۰۰ Hz) که کنترل آنها با روشهای غیرفعال<sup>۲</sup> عملی نمی‌باشد، توسط سیستم کنترل فعال نویز بطور موثری تضعیف می‌شوند. استفاده از ANC بدلیل وزن و حجم کم و هزینه مناسب آن سرعت در حال گسترش است [1]. از کاربردهای آن می‌توان به گوشی های فعال و حذف صدای ناشی از موتور اتومبیل و هواپیما در محدوده سرراندده و مسافرت اشاره کرد [2].

اصول یک سیستم ANC تک کاناله در یک لوله باریک در شکل ۱ دیده می‌شود. نویز ناخواسته ناشی از یک منبع نویز اولیه، توسط

میکروفن مرجع<sup>۳</sup> اندازه گیری می‌شود. سیگنال مرجع پس از عبور از فیلتر وقتی  $W(z)$  برای راه اندازی یک منبع ثانویه<sup>۴</sup> (بلندگوی ثانویه) بکار می‌رود تا نویز آکوستیکی مزاحم را حذف کند. نویز باقیمانده  $e(n)$  توسط یک میکروفن خطا<sup>۵</sup> اندازه گیری شده و به فیلتر وقتی برای تجدید ضرائب آن اعمال می‌شود. این کار تا زمانی که نویز باقیمانده به حداقل مقدار خود همگرا شود، ادامه می‌یابد. در اینصورت  $W(z)$  تخمینی از تابع انتقال ناشناخته  $P(z)$  بین مسیر آکوستیکی از میکروفن مرجع تا میکروفن خطا را ایجاد می‌کند.

### ۲. اثر مسیر ثانویه

یک مدل واقعی از سیستم ANC، پیچیده تر از سیستم شکل ۱ می‌باشد. زیرا پس از فیلتر وقتی اجزای فیزیکی از قبیل مبدلهای آنالوگ به دیجیتال و دیجیتال به آنالوگ، فیلتر ضد تاخوردگی، مسیر آکوستیکی بین بلندگوی ثانویه و میکروفن خطا، تقویت کننده توان، پیش تقویت کننده میکروفن، بلندگو و میکروفن نیز وجود دارد [۳]. اثرات این اجزاء تحت عنوان مسیر ثانویه و با تابع انتقال  $S(z)$  در شکل ۲ نشان داده شده است. برای جبران  $S(z)$  در سیستم ANC از تخمین آن یعنی تابع انتقال  $\hat{S}(z)$  استفاده می‌شود. الگوریتم وقتی بکار رفته در این سیستم که بر پایه الگوریتم LMS<sup>۶</sup>

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۹/۸ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۱۶ به تصویب نهایی رسیده است.

مسعود مرادخانی دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران، [moradkhani@yahoo.com](mailto:moradkhani@yahoo.com)

محمد حسین کهائی دانشیار دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران، [kahaei@iust.ac.ir](mailto:kahaei@iust.ac.ir)

جواد پشتان دانشیار دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران، [jposhtan@iust.ac.ir](mailto:jposhtan@iust.ac.ir)

<sup>3</sup> Reference Microphone

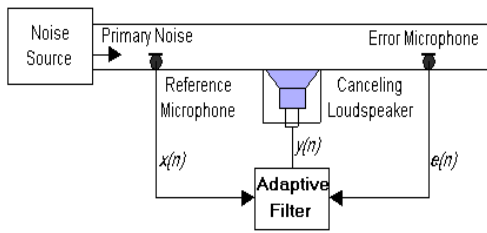
<sup>4</sup> Secondary Source

<sup>5</sup> Error Microphone

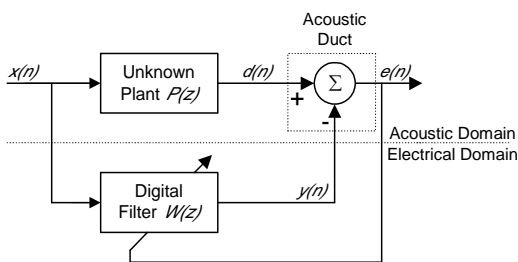
<sup>6</sup> Least Mean Squares

<sup>1</sup> Active Noise Control

<sup>2</sup> Passive



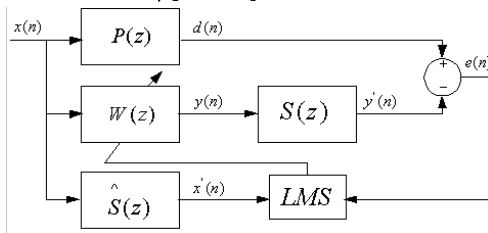
(الف)



(ب)

شکل ۱. (الف) اساس کار یک سیستم ANC در لوله (ب)

## بلوک دیاگرام معادل



شکل ۲. سیستم ANC با الگوریتم FXLM

سیگنال بردار  $x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T$  مرجع و  $\hat{S}_{mk}(n)$  تخمین پاسخ ضربه مسیر ثانویه از منبع ثانویه  $k$  ام تا میکروفن خطای  $m$  ام می باشد.

## ۳. تخمین میزان تضعیف قابل دستیابی در محفظه با اندازه

گیری تابع همدوسی<sup>۲</sup>

عملکرد یک سیستم ANC در کاهش نویز با استفاده از مفهوم همدوسی قابل پیش بینی می باشد. همدوسی بین دو سیگنال  $x(n)$  و  $d(n)$  بصورت زیر تعریف می شود:

$$\gamma_{dx}(\omega) = \frac{S_{dx}(\omega)}{\sqrt{S_{dd}(\omega)S_{xx}(\omega)}} \quad (7)$$

که  $S_{dd}(\omega)$  و  $S_{xx}(\omega)$  بترتیب طیف توان سیگنالهای  $d(n)$  و  $x(n)$  و  $S_{dx}(\omega)$  تبدیل فوریه تابع همبستگی متقابل بین  $d(n)$  و  $x(n)$  یا طیف توان متقابل می باشد. با استفاده از (7) تخمین میزان تضعیف قابل دستیابی در یک محفظه بصورت زیر داده می شود[5]:

استوار است، به نام FXLMS<sup>۱</sup> شناخته می شود[4]. زیرا سیگنال ورودی مورد استفاده در آن  $x'(n)$ ، سیگنال فیلتر شده مرجع ورودی  $x(n)$  می باشد. بلوک دیاگرام سیستم ANC با الگوریتم FXLMS در شکل ۲ دیده می شود. مطابق این الگوریتم بردار ضرائب فیلتر وقتی  $W(z)$  بصورت زیر بهنگام می شود[5]:

$$w(n+1) = w(n) + \mu x'(n)e(n) \quad (1)$$

که

$$w(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{L-1}(n)]^T \quad (2)$$

بردار ضرائب در زمان  $n$  و  $L$  طول فیلتر است. همچنین  $x'(n)$  بردار سیگنال مرجع فیلتر شده عبارت است از:

$$x'(n) = [x'(n), x'(n-1), \dots, x'(n-L+1)]^T \quad (3)$$

که

$$x'(n) = \hat{S}(n) * x(n) \quad (4)$$

و  $\hat{S}(n)$  بترتیب سیگنال مرجع و پاسخ ضربه تخمین مسیر ثانویه در زمان  $n$  می باشند.

سیستم نشان داده شده در شکل ۲ از آنجا که تنها دارای یک میکروفن خطا و یک منبع ثانویه است، سیستم ANC تک کاناله نامیده می شود. اینگونه سیستمها تنها قادر به تضعیف نویز در محیطهای ساده‌ای مانند لوله‌های باریک می باشد و در محفظه یا فضای آزاد کارایی کمی دارد. در چنین کاربردهایی باید از سیستم ANC چند کاناله با چند میکروفن خطا و بلندگوی ثانویه استفاده کرد. این سیستمها شامل  $K$  منبع ثانویه و فیلتر وقتی موازی و  $M$  میکروفن خطا می باشند. سیگنال مرجع  $x(n)$  بعنوان ورودی برای تمام  $K$  فیلتر وقتی بکار می رود. ضرائب فیلترهای وقتی براساس حداقل کردن مجموع مربعات نویزهای باقیمانده‌ای که توسط  $M$  میکروفن خطا اندازه‌گیری می شوند، بهنگام می شوند. در این سیستمها به تخمین  $M \times K$  تابع انتقال مسیر ثانویه بین  $K$  بلندگوی ثانویه و  $M$  میکروفن خطا نیاز می باشد.

الگوریتم FXLMS برای سیستمهای ANC چندکاناله بصورت زیر است[6]:

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu \sum_{m=1}^M x'_{km}(n)e_m(n) \quad (5)$$

که

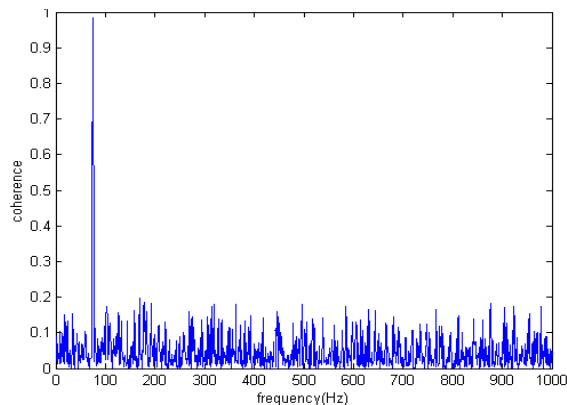
$$x'_{km}(n) = \hat{S}_{mk}(n) * x(n), \quad (6)$$

سیگنال میکروفن  $e_m(n)$ ،  $k = 1, 2, \dots, K$ ،  $m = 1, 2, \dots, M$

خطای  $m$  ام،  $w_k(n) = [w_{k,0}(n), w_{k,1}(n), \dots, w_{k,L-1}(n)]^T$  بردار ضرائب فیلتر وقتی  $k$  ام (به طول  $L$ ).

<sup>2</sup> Coherence<sup>1</sup> Filterd-X Least Mean Square

می‌گردد که هدف تضعیف نویز صوتی و ایجاد سکوت در آن ناحیه است. بنابراین مساله اساسی جایابی منابع ثانویه بگونه ای که در محل میکروفن های خطا ناحیه سکوت مورد نظر ایجاد شود. در ادامه این بخش تاثیر مکان منابع ثانویه در اندازه ناحیه سکوت و توان صوتی داخل محفظه بررسی می‌گردد.



شکل ۳. تابع همدوسی سیگنالهای  $x(n)$  و  $d(n)$  برای نویز اولیه سینوسی ۷۵Hz

#### ۴-۱. اثر مکان منابع ثانویه در اندازه ناحیه سکوت

اساس کار یک سیستم ANC تولید یک سیگنال ضد نویز و تداخل آن با نویز اولیه جهت صفر کردن فشار صوتی در محل میکروفن خطا (نقطه حذف) می‌باشد. در شکل ۴ یک منبع ثانویه در مبدا مختصات و یک میکروفن خطا در نقطه حذف  $x_0$  واقع شده است. قطر ناحیه سکوت ایجاد شده توسط منبع ثانویه  $(2\Delta x)$  در نقطه  $x_0$  عبارت است از [7]:

$$2\Delta x = \left( \frac{\sqrt{\mathcal{E}}}{\pi} \right) \lambda |\zeta_{\Delta x}(x_0)| \quad (11)$$

که  $\lambda$  طول موج صوتی،  $\Delta x = x - x_0$  و  $\zeta_{\Delta x}(x_0)$  امپدانس ویژه صوتی نرمالیزه نسبت به امپدانس فضای آزاد (امپدانس موج) در نقطه حذف  $x_0$  و درجهت  $\Delta x$  می‌باشد.  $\mathcal{E}$  نیز میزان تضعیف فشار صوتی پس از کنترل توسط سیستم ANC می‌باشد. با توجه به رابطه فوق می‌توان گفت که فرآیند مشخص کردن مکانهای بهینه منابع ثانویه و میکروفن های خطا جهت ایجاد بزرگترین ناحیه سکوت، معادل است با پیدا کردن مکان‌هایی که در آنها امپدانس ویژه صوتی نرمالیزه ماکزیمم باشد.



شکل ۴. آرایش بلندگوی ثانویه و میکروفن خطا در ANC

Attenuation(dB) =  $-10 \log_{10}[1 - C_{dx}(\omega)]$  (۸)  
که  $C_{dx}(\omega) = |\gamma_{dx}(\omega)|^2$  می‌باشد. مشابهاً اگر سیستم ANC چند کاناله با  $J$  سیگنال مرجع و  $M$  سیگنال خطا باشد، تابع همدوسی چندگانه<sup>۱</sup> بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{d_m x}(\omega) = \sum_{j=1}^J C_{d_m x_j}(\omega), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

در نتیجه برای یک سیستم ANC با یک میکروفن مرجع ( $J=1$ )، میزان تضعیف در محل میکروفن خطای  $m$  بصورت زیر می‌باشد:

$$\text{Attenuation(dB)} = -10 \log_{10}[1 - C_{d_m x}(\omega)] \quad (10)$$

بنابراین برای نویز اولیه داده شده با یک میکروفن مرجع تابع (۱۰) مقدار مشخصی را می‌دهد و استفاده از یک سیستم ANC چندکاناله با میکروفن های خطا و بلندگوهای بیشتر تاثیری در افزایش تضعیف قابل دستیابی ندارد. بلکه میزان تضعیف به جنس محیط صوتی و سخت افزار مورد استفاده برای ایجاد سیگنال ضد نویز با همبستگی بالا با نویز اولیه بستگی دارد و مستقل از تعداد کانالهای استفاده شده می‌باشد.

در پیاده سازی زیر مقدار همدوسی در داخل محفظه آزمایشگاهی مستطیلی با ابعاد  $1 \times 1 \times 2$  متر تخمین و امکان ایجاد ناحیه سکوت برای یک نویز اولیه سینوسی ۷۵ Hz بررسی گردید. این نویز توسط کامپیوتر تولید شده  $(x(n))$  و تعداد ۴۰۰۰۰ نمونه از آن با فرکانس نمونه برداری ۲ KHz پس از عبور از مبدل D/A توسط بلندگو در محفظه پخش شد. سپس سیگنال دریافتی میکروفن خطا پس از عبور از مبدل A/D  $(d(n))$  در کامپیوتر ذخیره و تابع همدوسی بین سیگنالهای  $x(n)$  و  $d(n)$  محاسبه گردید. این کار با تغییر محل میکروفن خطا در نقاطی که هدف ایجاد ناحیه سکوت است و همچنین برای مکانهای مختلف بلندگو تکرار و متوسط توابع همدوسی مطابق شکل ۳ بدست آمد که مقدار آن در ۷۵ Hz حدود ۰/۹۸۵ می‌باشد. با قرار دادن مربع این مقدار در رابطه (۸) مقدار dB ۱۸/۲۴ تضعیف بدست می‌آید که در واقع تخمینی از بهترین عملکرد ممکن سیستم ANC می‌باشد. در عمل بدلیل غیرایده‌ال بودن پارامترهای سخت افزاری بکار رفته، میزان تضعیف کمتر از مقدار فوق خواهد بود.

#### ۴. ویژگیهای تئوری و عملی در آرایش منابع ثانویه و میکروفن های خطا

یکی از عوامل مهم در کارایی سیستم ANC آرایش منابع ثانویه و میکروفن های خطا در داخل محفظه می‌باشد. بطوری که اگر مکان آنها بدرستی انتخاب نشود، صرف نظر از نوع الگوریتم و سخت افزار مورد استفاده، سیستم ناپایدار شده و یا به تضعیف بسیار اندک نویز منجر خواهد شد [1]. محل میکروفن های خطا در ناحیه ای انتخاب

<sup>1</sup> Multiple Function

$$|\zeta_{x1}(x)| = \frac{1}{k} \left[ \frac{2 - 2 \cos k(x - \sqrt{x^2 + a^2})}{1 + \frac{x^2}{(x^2 + a^2)} - \frac{2x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \cos k(x - \sqrt{x^2 + a^2})} \right] \quad (17)$$

که  $x$  فاصله منبع ثانویه از میکروفن خطا می باشد. برای فواصل بزرگ  $x$ ، مقدار  $\zeta_{x1}(x)$  بازای تمام مقادیر  $a$  تقریباً برابر با یک می شود و در نتیجه مطابق (۱۱) قطر ناحیه سکوت برابر با  $0.1$  طول موج صوتی خواهد شد. با شرط  $kx < 1$  چنانچه فاصله میکروفن تا بلندگو از شعاع بلندگو کوچکتر باشد ( $x \ll a$ )، با استفاده از بسط تیلور رابطه (۱۷) به صورت  $|\zeta_{x1}(x)| \approx ka$  در می آید که با قرار دادن آن در (۱۱) بدست می آوریم:

$$2\Delta x_\varepsilon \approx 2a\sqrt{\varepsilon}, \quad kx < 1, \quad x \ll a \quad (18)$$

در این حالت اندازه ناحیه سکوت مستقل از موقعیت نقطه حذف و فرکانس نویز می باشد. بعبارت دیگر گسترش ناحیه سکوت در فواصل کوچکتر از شعاع بلندگوی ثانویه تنها توسط شعاع بلندگو تعیین و با افزایش آن ناحیه سکوت افزایش می یابد. همچنین در این شرایط اندازه ناحیه سکوت با تغییر فرکانس نویز اولیه تغییر نمی کند.

#### ۲-۴. توان کلی صوت در محفظه

ایجاد ناحیه سکوت در یک محدوده خاص در داخل محفظه، معمولاً به قیمت افزایش میزان نویز در نقاط دیگر همراه می باشد. اگر  $W_s$  قدرت صوت خروجی منبع ثانویه و  $W_p$  قدرت صوت خروجی منبع اولیه باشد، در این صورت داریم [9]:

$$\frac{\langle W_s \rangle}{\langle W_p \rangle} = \left( \frac{\langle |P_{pr}|^2 \rangle}{\langle |q_p|^2 \rangle Z_0^2} \right) [(kr_0)^2 - \sin^2(kr_0)] \quad (19)$$

که  $Z_0$  امپدانس صوتی فضای آزاد، عملگر  $\langle \cdot \rangle$  بیانگر متوسط فضایی کمیت مورد نظر (توان، فشار صوتی و ...) بازای تمام مکانهای ممکن منابع اولیه و ثانویه می باشد. اگر مشخصات منبع نویز اولیه ثابت باشد، رابطه (۱۹) تابعی از  $[(kr_0)^2 - \sin^2(kr_0)]$  خواهد بود که نشان دهنده وابستگی متوسط توان منبع ثانویه به فاصله  $r_0$  و طول موج  $\lambda$  می باشد. در شکل ۵ نسبت متوسط فضایی توان منبع ثانویه به منبع اولیه (dB) بر حسب  $\frac{r_0}{\lambda}$  نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش فرکانس نویز (کاهش  $\lambda$ ) توان کلی صوت در داخل محفظه افزایش می یابد. همچنین بازای یک طول موج ثابت هرچه فاصله منبع ثانویه از میکروفن خطا کمتر شود، مقدار افزایش در توان صوت بدلیل وجود منبع ثانویه کمتر می شود. بطوری که با نصف شدن فاصله  $r_0$  تقریباً ۱۰ dB از توان خروجی منبع ثانویه کاسته می شود. بنابراین اگر محدودیت عملی برای انتخاب مکان منبع ثانویه وجود نداشته باشد، بهتر است که آن را در نزدیکی میکروفن خطا قرار داد. در این صورت علاوه بر حذف نویز و

این امپدانس در حالت کلی به نحوه توزیع میدان صوتی بستگی دارد. برای منابع نقطه ای که در آنها نسبت شعاع منبع به طول موج صوتی بسیار کم است، امپدانس موج در امتداد شعاعی بصورت زیر است [8]:

$$\zeta_r(r_0) = \left\{ \frac{kr_0}{\sqrt{1 + (kr_0)^2}} \right\} e^{j\theta} \quad (12)$$

که  $r_0$  فاصله از منبع،  $k$  عدد موج و  $\cot g(\theta) = kr_0$  می باشد. جاگذاری  $\zeta_r(r_0)$  بجای  $\zeta_{\Delta x}(x_0)$  در رابطه (۱۱) به رابطه ای برای بیان قطر ناحیه سکوت ( $2\Delta r_\varepsilon$ ) ناشی از صفر شدن فشار صوتی در نقطه ای به فاصله  $r_0$  از منبع نقطه ای، منجر می شود:

$$2\Delta r_\varepsilon = \left( \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\pi} \right) \left\{ \frac{kr_0}{\sqrt{1 + (kr_0)^2}} \right\} \lambda \quad (13)$$

از (۱۳) دو ناحیه نزدیک<sup>۱</sup> و دور<sup>۲</sup> از منبع صوتی نقطه ای قابل تمایز است. در ناحیه نزدیک که با شرط  $kr_0 \ll 1$  مشخص می شود، قسمت موهومی امپدانس موج غالب بوده و قطر ناحیه سکوت بصورت (۱۴) قابل تقریب است

$$2\Delta r_\varepsilon \approx (2\sqrt{\varepsilon})r_0 \quad \text{for } kr_0 \ll 1 \quad (14)$$

این رابطه نشان می دهد که در نواحی نزدیک منبع ثانویه، قطر ناحیه سکوت متناسب با فاصله نقطه حذف (میکروفن خطا) تا منبع ثانویه می باشد. جالب اینکه در این حالت اندازه ناحیه سکوت از فرکانس نویز مستقل است. در نواحی دور از منبع ثانویه که  $kr_0 \gg 1$  به سمت بی نهایت میل می کند، قسمت موهومی امپدانس مختلط موج به سمت صفر و قسمت حقیقی آن به سمت امپدانس فضای آزاد میل می کند. لذا قطر ناحیه سکوت بصورت زیر تقریب زده می شود

$$2\Delta r_\varepsilon \approx \left( \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\pi} \right) \lambda \quad \text{for } kr_0 \gg 1 \quad (15)$$

بعنوان مثال از روابط (۱۴) و (۱۵) قطر ناحیه سکوت با حداقل تضعیف ۱۰ dB ( $\varepsilon = 0.1$ ) برابریست [7]:

$$\begin{cases} 2\Delta r_{0.1} \approx 0.63r_0 & kr_0 \ll 1 \\ 2\Delta r_{0.1} \approx 0.1\lambda & kr_0 \gg 1 \end{cases} \quad (16)$$

همانطور که دیده می شود در نواحی نزدیک، قطر ناحیه سکوت در مقایسه با طول موج صوتی بسیار کوچک است. در ناحیه دور، اندازه ناحیه سکوت به طول موج صوتی وابسته است و بنابراین با فرکانس رابطه معکوس دارد.

برای منابع واقعی (غیر نقطه ای می توان) ناحیه سکوت را با دانستن امپدانس صوتی آنها محاسبه کرد. در یک بلندگوی دایروی با شعاع  $a$ ، اندازه امپدانس صوتی ویژه در امتداد محور منبع،  $X_1$ ، برابر است با [8]:

<sup>1</sup> Near field

<sup>2</sup> Far field

بلندگوی ثانویه بگونه ای انتخاب شود که میدان صوتی تولید شده توسط آن با دامنه کافی و بدون اعوجاج توسط میکروفن خطا دریافت شود. علاوه براین، به منظور وجود تضعیف هرچه بیشتر نویز باید تفاوت فشار صوتی ناشی از منابع اولیه و ثانویه در محل میکروفن خطا ماکزیمم باشد. در غیر این صورت به دلیل اینکه فیلتر وقتی سیگنال ضد نویز را برای حذف نویز اولیه در محل میکروفن خطا تنظیم می کند، اگر چه پس از همگرایی فشار صوتی میدان صوتی ثانویه در محل میکروفن خطا برابر با فشار صوتی نویز اولیه می باشد، اما برای حذف نویز در نقاط دیگر که تفاوت فشار صوتی آنها بیشتر از محل میکروفن است کافی نبوده و بنابراین میزان تضعیف کاهش می یابد.

#### ۴-۴. تعداد منابع ثانویه و میکروفن های خطا

در یک سیستم ANC چندکاناله تعداد منابع ثانویه و میکروفن های خطا نسبت به هم، تاثیر زیادی بر عملکرد سیستم دارند. اگر  $M$  تعداد میکروفن های خطا و  $K$  تعداد منابع ثانویه باشد، می توان نوشت [5]:

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{S}(n) * \mathbf{y}(n) \quad (21)$$

که بردار خطا،  $\mathbf{e}(n) = [e_1(n) \ e_2(n) \ \dots \ e_M(n)]^T$  بردار نویز اولیه در محل میکروفن های خطا و  $\mathbf{d}(n) = [d_1(n), d_2(n), \dots, d_M(n)]^T$  بردار خروجی  $K$  فیلتر وقتی در لحظه  $n$  می باشد.  $\mathbf{S}(n)$  نیز یک ماتریس  $M \times K$  است که هر عنصر آن بصورت  $s_{mk}(n)$  پاسخ ضربه مسیر ثانویه از منبع ثانویه  $k$  ام به میکروفن خطای  $m$  ام می باشد. تابع هزینه در حوزه فرکانس بصورت زیر تعریف می شود:

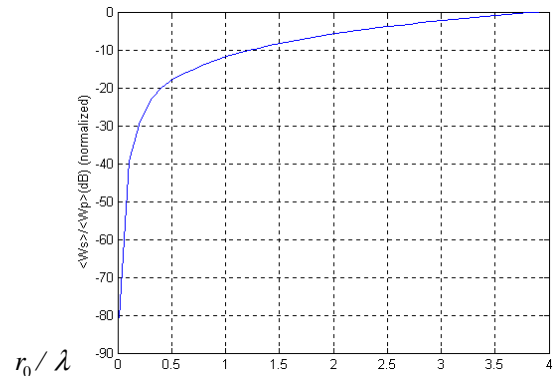
$$\mathbf{J} = \mathbf{e}^H(e^{j\omega_0 T}) \mathbf{e}(e^{j\omega_0 T}) \quad (22)$$

که  $\omega_0$  فرکانس نویز صوتی،  $T$  پریود نمونه برداری و  $\mathbf{H}$  بیانگر مزدوج ترانهاده می باشد. با توجه به (۲۱) و (۲۲)، تابع هزینه بصورت زیر بدست می آید:

$$\mathbf{J} = \mathbf{y}^H \mathbf{A} \mathbf{y} - \mathbf{y}^H \mathbf{b} - \mathbf{b}^H \mathbf{y} + c \quad (23)$$

که  $\mathbf{A} = \mathbf{S}^H \mathbf{S}$ ،  $\mathbf{b} = \mathbf{S}^H \mathbf{d}$  و  $c = \mathbf{d}^H \mathbf{d}$  (برای سادگی هزینه فوق را حداقل می کند، به تعداد منابع ثانویه  $K$  و میکروفن های خطای  $M$  بستگی دارد. سیستمهایی را که در آنها،  $M > K$ ،  $M < K$  و  $M = K$  می باشد، بترتیب Overdetermined، Underdetermined و Fullydetermined می گویند. سیستم Underdetermined مورد استفاده ندارد زیرا ماتریس  $\mathbf{S}^H \mathbf{S}$  حداقل دارای  $M-K$  مقدار ویژه صفر بوده و singular خواهد شد. در اینصورت سیستم به یک جواب یکسان همگرا نمی شود. در سیستم Fullydetermined بردار ضد نویز بهینه به شکل ساده زیر می باشد [10]:

ایجاد سکوت در ناحیه ای به قطر تقریبی  $0.1$  طول موج، در نقاط دیگر داخل محفظه توان کلی نویز تقریباً برابر با هنگامی است که سیستم ANC غیر فعال باشد.



شکل ۵ - توان صوتی داخل محفظه برحسب فاصله منبع ثانویه تا میکروفن خطا ( $r_0$ ) و طول موج صوتی ( $\lambda$ )

#### ۴-۳- تعیین مکان بهینه منابع ثانویه در داخل محفظه

از رابطه (۱۶) قطر ناحیه سکوت  $2\Delta r_{0,1}$  برای حداقل تضعیف  $dB$   $10$  و خطای حداکثر  $10$  درصد در مقابل نویز سینوسی  $75\text{Hz}$  در محفظه بدست می آوریم:

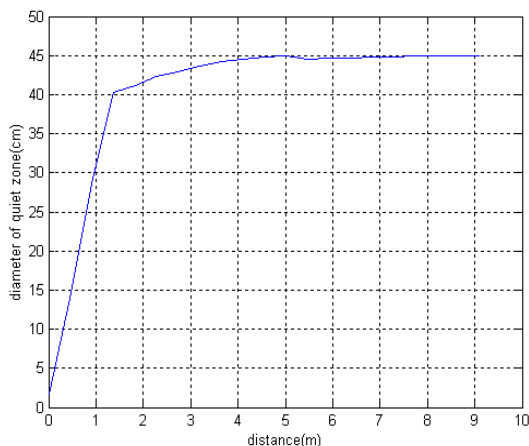
$$\begin{cases} 2\Delta r_{0,1} \approx 0.63r_0 & r_0 \leq 33.2\text{cm} \\ 2\Delta r_{0,1} \approx 0.1\lambda & r_0 \geq 1.6\text{m} \end{cases} \quad (20)$$

مطابق این رابطه اگر فاصله میکروفن خطا و بلندگوی ثانویه از  $33.2/2$  سانتیمتر کمتر باشد، قطر ناحیه سکوت متناسب با فاصله میکروفن خطا از بلندگوی ثانویه می باشد. همچنین اگر بلندگوی ثانویه در فاصله ای بیش از  $1/6$  متر از میکروفن خطا قرار بگیرد، در این صورت قطر ناحیه سکوت در حدود  $0.1$  طول موج صوتی می باشد. بنابراین در فرکانس  $75\text{Hz}$  در حالت ایده آل بزرگترین ناحیه سکوت به قطر  $4.5$  سانتیمتر می باشد. در فرکانس  $75\text{Hz}$  نمودار ناحیه سکوت برحسب فاصله منبع ثانویه از میکروفن خطا در شکل ۶ شبیه سازی شده است.

در مورد منابع دایروی نیز می توان با قرار دادن رابطه (۱۷) در رابطه (۱۱) و با توجه به اینکه در پیاده سازی از بلندگوهایی به شعاع دهانه  $7$  سانتیمتر استفاده شده است، اندازه ناحیه سکوت را شبیه سازی کرد. شکل ۷ ناحیه سکوت را در فرکانس  $75\text{Hz}$  ( $\lambda = 4.56\text{m}$ ) نشان می دهد. چنانکه ملاحظه می شود این شکل شباهت زیادی با شکل ۶ دارد زیرا نسبت شعاع بلندگو به طول موج صوتی بسیار کم بوده و در نتیجه بلندگو را می توان با تقریب خوبی یک منبع نقطه ای در نظر گرفت.

عملاً در سیستم ANC ممکن است فشار صوتی ناشی از منبع ثانویه بدلیل نحوه توزیع فضایی میدان صوتی تولید شده توسط آن، ناچیز بوده و قادر به تحریک میکروفن خطا نباشد. بنابراین لازم است محل

داده است که با استفاده از میکروفن‌های خطا به تعداد دو برابر منابع ثانویه تضعیف دلخواه با حداقل پیچیدگی سیستم حاصل می‌شود [10].



شکل ۷. ناحیه سکوت ایجاد شده توسط منبع دایروی به قطر ۱۴ سانتیمتر در فرکانس ۷۵ Hz برحسب فاصله منبع ثانویه از میکروفن خطا

#### ۴-۵. اثر بهره تقویت کننده توان بلندگوی ثانویه

بلندگوی ثانویه جهت حذف فشار صوتی در محل میکروفن خطا باید قادر به تولید میدان صوتی ضد نویز با توان لازم باشد. متوسط توان خروجی منبع نقطه ای ثانویه جهت حذف فشار صوتی در نقطه ای به فاصله  $r_0$  از آن عبارت است از [9]:

$$\langle W_s \rangle = \langle |P_{pr}|^2 \rangle \left[ \frac{(kr_0)^2 - \sin^2 kr_0}{2Z_0} \right] \quad (27)$$

که  $P_{pr}$  فشار صوتی ناشی از منبع نویز و  $Z_0$  امپدانس تابش فضای آزاد منبع ثانویه می باشد. از رابطه فوق با افزایش فرکانس نویز یا افزایش فاصله میکروفن خطا از منبع ثانویه لازم است که منبع ثانویه با توان بیشتری جهت حذف فشار صوتی راه اندازی شود. همچنین در صورت افزایش فشار صوتی منبع نویز، باید توان خروجی منبع ثانویه نیز افزایش یابد. از طرف دیگر توان بلندگو برحسب پارامترهای مکانیکی و الکتریکی بصورت زیر است [11]:

$$W_s = \frac{(BL)^2 ZV^2}{Z_m^2 Z_i^2} \quad (28)$$

که  $B$  چگالی شار مغناطیسی،  $L$  طول سیم پیچ صوتی<sup>۱</sup>،  $Z$  امپدانس تابشی،  $Z_i$  امپدانس الکتریکی ورودی و  $Z_m$  امپدانس مکانیکی است که به پارامترهای مکانیکی و جنس مواد منبع وابسته است و  $V$  دامنه ولتاژ سیگنال ورودی می باشد. از رابطه (۲۸) میتوان دید که افزایش ولتاژ ورودی  $V$  منجر به افزایش توان خروجی بلندگو خواهد شد. بنابراین اگر جهت حذف فشار صوتی در محل میکروفن خطا به توان مشخصی نیاز باشد، سیستم ANC سعی می کند با

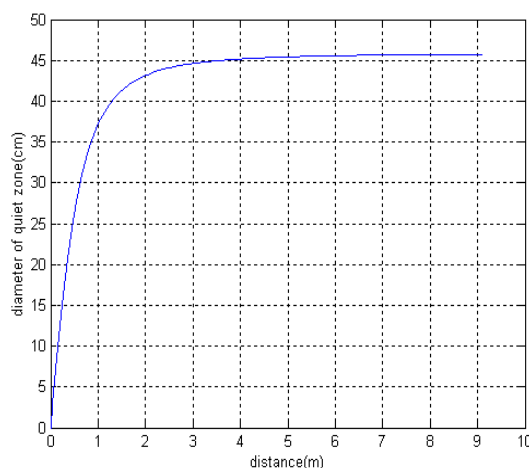
$$y_{opt} = S^{-1}d \quad (24)$$

حداقل مقدار تابع هزینه در این حالت صفر می باشد. اگرچه عملکرد یک سیستم Fullydetermined در محل میکروفن های خطا بسیار مناسب است اما در نقاط دیگر اینگونه نمی باشد و هیچ تضمینی مبنی بر کاهش سطح نویز در نقاطی غیر از محل میکروفن های خطا وجود ندارد. این مشکل با استفاده از سیستمهای Overdetermined و با افزایش تعداد میکروفن های خطا نسبت به تعداد منابع ثانویه برطرف می شود. در سیستم Overdetermined تعداد معادلات به شکل  $e_m = d_m - \sum_k S_{mk} y_k$  بیشتر از تعداد مجهولات  $y_m$  می باشد. در این سیستم بردار سیگنال ضد نویز بهینه  $y_{opt}$  که تابع هزینه (۲۲) را حداقل کند، با مشتقگیری از رابطه (۲۳) نسبت به  $y$  و مساوی قرار دادن آن با صفر بدست می آید [10]:

$$y_{opt} = (S^H S)^{-1} S^H d \quad (25)$$

با قرار دادن این مقدار در رابطه (۲۳) مقدار حداقل تابع هزینه که در حالت کلی غیر صفر است بصورت زیر بدست می آید:

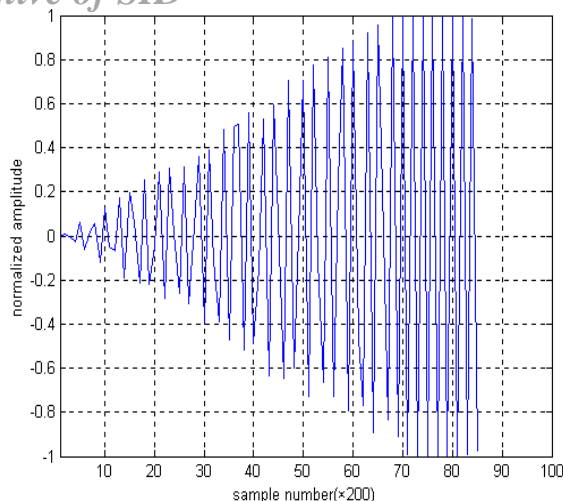
$$J_{min} = d^H [1 - S(S^H S)^{-1} S^H] d \quad (26)$$



شکل ۶. ناحیه سکوت ایجاد شده توسط یک منبع نقطه ای در فرکانس ۷۵ Hz برحسب فاصله منبع ثانویه از میکروفن خطا

سیستم ANC بر اساس سیگنال دریافتی در محل میکروفن خطا سیگنال ضد نویز ثانویه را تولید و دامنه و فاز آن را تنظیم می کند. در نقاط غیر از محل میکروفن های خطا، همبستگی سیگنالها با سیگنال موجود در محل میکروفن خطا کمتر بوده و بنابراین میزان کاهش نویز کم می شود. اما با افزایش تعداد میکروفن های خطا در سیستم ANC چند کاناله، سیستم شناخت دقیقتری از میدان صوتی پیدا کرده و دامنه و فاز سیگنالهای ضد نویز را متناسباً چنان تنظیم می کند که در محدوده میکروفن های خطا سطح نویز را کاهش دهد. نتایج عملی در سیستمهای Overdetermined نشان

<sup>1</sup> Voice Coil



شکل ۹. سیگنال خروجی بلندگوی ثانویه بازای بهره ۱/۵ در تقویت کننده قدرت بلندگو.

### ۵. پیاده سازی سیستم ANC تک کاناله، $1 \times 1 \times 2$ و $1 \times 2 \times 4$

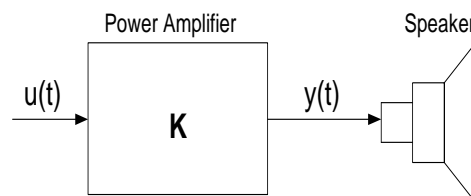
#### جهت بررسی ناحیه سکوت

برای بررسی نواحی سکوت و نکات ارائه شده در بخشهای قبل سه سیستم ANC تک کاناله، چندکاناله  $1 \times 1 \times 2$ ، و  $1 \times 2 \times 4$  (Overdetermined) در محفظه ای با ابعاد  $1 \times 1 \times 2$  متر پیاده سازی گردید. شکل ۱۱ آرایش میکروفنها و بلندگوها را در هر سه سیستم در داخل محفظه نشان می دهد. در این شکل  $mic_0$  میکروفن مرجع،  $mic_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) میکروفن های خطا،  $SP_0$  منبع نویز صوتی فرضی و  $SP_1$  و  $SP_2$  منابع ثانویه می باشند. مبدا مختصات (O) در سیستم تک کاناله در محل میکروفن خطا، در سیستم  $1 \times 1 \times 2$  در وسط خط واصل بین دو میکروفن خطا، و در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  در مرکز مربعی است که رئوس آن میکروفن های خطا می باشند.

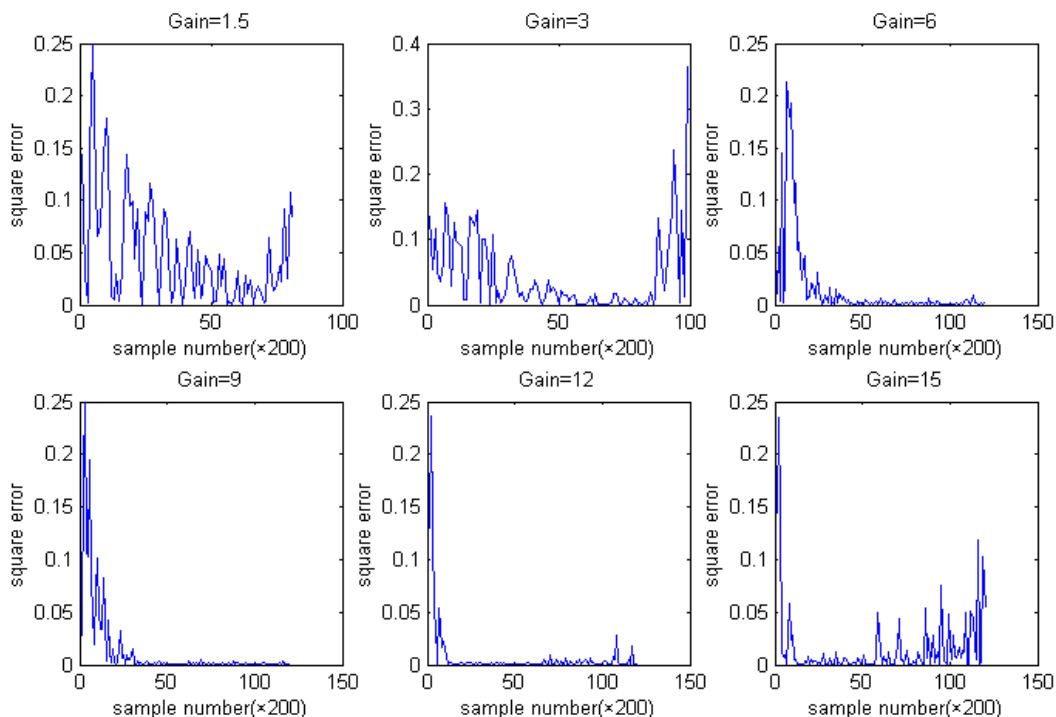
جهت پیاده سازی ابتدا لازم است توابع انتقال مسیره های ثانویه در یک برنامه مدل سازی به روش off-line تخمین زده شود [5]. این توابع اثر سخت افزارهای موجود در سیستم و اثر مسیره های بین بلندگوهای ثانویه و میکروفن های خطا در کانالهای مختلف را مدل می کنند. برای تخمین توابع مذکور، یک نویز سفید توسط کامپیوتر تولید شده و پس از عبور از مبدل D/A، فیلتر پایین گذر و تقویت کننده توان به بلندگوی ثانویه اعمال می شود. صوت تولید شده توسط بلندگوی ثانویه پس از عبور از مسیر آکوستیکی توسط میکروفن خطا دریافت می گردد. سیگنال خطا پس از عبور از پیش تقویت کننده، فیلتر ضد تا خوردگی و مبدل A/D به الگوریتم وقتی LMS داده می شود. این الگوریتم ضرایب وقتی یک فیلتر FIR را تنظیم می شود. بدلیل انتخاب متقارن محل بلندگو و میکروفن ها در میکند که ورودی آن همان نویز سفید است. پاسخ ضربه مسیر ثانویه تخمین زده شده برای یک کانال در شکل ۱۲ دیده می شود. بدلیل انتخاب متقارن محل بلندگو و میکروفن ها در محفظه و مشابه بوده

افزایش دامنه سیگنال ورودی منبع ثانویه توان مورد نیاز را تامین نماید. برای توضیح این عملکرد در شکل ۸ یک بلندگوی ثانویه با یک تقویت کننده توان با بهره K در نظر گرفته شده که در آن  $u(t)$  و  $y(t)$  سیگنالهای ورودی و خروجی تقویت کننده می باشند. اگر دامنه سیگنال  $y(t)$  برای ایجاد توان لازم جهت حذف نویز صوتی در محل میکروفن خطا V باشد، باید در خروجی D/A سیگنال  $u(t)$  با دامنه  $\frac{V}{K}$  تولید شود.

برای بهره K کوچک، باید دامنه  $u(t)$  یعنی  $V/K$  بزرگ گردد. لذا باید در سیستم ANC مقدار سیگنال ضد نویز افزایش یابد تا بلندگوی ثانویه بتواند میدان صوتی لازم جهت حذف نویز را ایجاد نماید. اما اگر سیگنال تولید شده از محدوده ورودی مجاز مبدل D/A فراتر رود، دامنه سیگنال آنالوگ خروجی مبدل در ناحیه اشباع معادل با حد بالای دقت مبدل خواهد بود. جهت بررسی این مشکل یک سیستم ANC تک کاناله با توان های متفاوت در تقویت کننده، پیاده سازی شد. شکل ۹ سیگنال ضد نویز تولید شده  $y(t)$  را در بهره ۱/۵ نشان می دهد. چنانکه ملاحظه می شود سیستم دامنه سیگنال ضد نویز را افزایش می دهد تا زمانیکه که در مقدار  $1 \pm$  ثابت می شود. در این حالت فیلتر وقتی سعی نموده است کمبود بهره را جبران نماید که باعث بروز مشکل فوق الذکر می گردد. این مشکل با استفاده از مبدل های با بیت های ورودی بیشتر قابل کاهش است. وجود این روند منجر به ناپایداری سیستم ANC می گردد که در نتایج شکل ۱۰ قابل مشاهده است. چنانکه می بینیم در بهره های پایین ۱/۵ و ۳ سیستم ANC اندکی پس از همگرایی سرعت ناپایدار شده و مقدار نهایی خطا افزایش می یابد. بتدریج با افزایش بهره به ۶ و ۹، سیستم پایدارتر شده و مقدار تضعیف بیشتر می شود بطوریکه بازای بهره ۹ تا ۲۰dB تضعیف حاصل می گردد. با افزایش میزان بهره به ۱۲ و ۱۵dB در تقویت کننده قدرت، سیگنال خروجی بیش از حد بزرگ شده و باعث به اشباع رفتن بلندگو می گردد. در نتیجه سیستم قادر به ایجاد میدان صوتی ثانویه نبوده و با افزایش خطا ناپایدار خواهد شد. بنابراین لازم است جهت عملکرد مناسب سیستم، میزان تقویت توان سیگنال ضد نویز با توجه به حداکثر توان بلندگو صورت گیرد در اینصورت باید از بلندگویی استفاده گردد که بتواند توان لازم را ایجاد نماید.



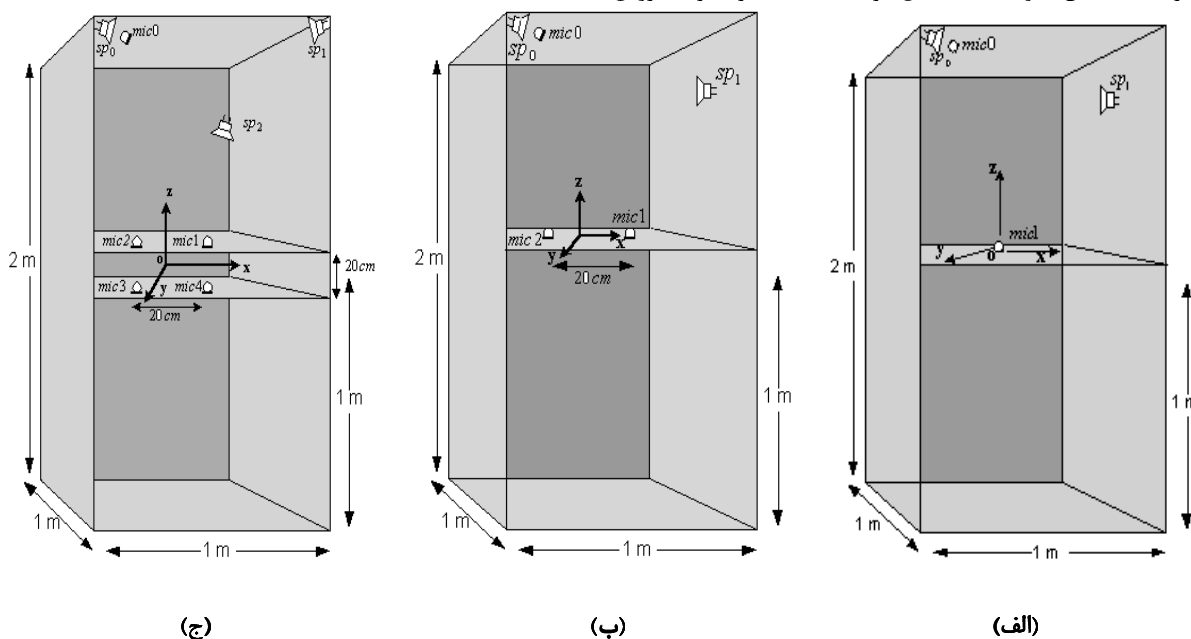
شکل ۸. تقویت کننده توان با بهره K و بلندگوی ثانویه.



شکل ۱۰. تاثیر بهره های متفاوت تقویت کننده بلندگوی منابع ثانویه (ضد نویز) در ناپایداری سیستم ANC

خطا قرار داده شود. در پیاده سازی در سیستمهای تک کاناله و  $1 \times 1 \times 2$  منبع ثانویه با توجه به فضای موجود در محفظه در فاصله  $1/3$  متری از میکروفن خطا قرار گرفت. در این فاصله با توجه به شکلهای ۶ و ۷ قطر ناحیه سکوت باید حدود ۴۵ سانتیمتر باشد. اما

سخت افزارهای مربوطه، پاسخهای ضربه مسیرههای ثانویه کانالهای دیگر نیز مشابه شکل ۱۲ می باشد. هدف در پیاده سازی ها حذف یک نویز ناخواسته سینوسی  $75\text{Hz}$  در محفظه و بررسی ناحیه سکوت ایجاد شده در اطراف میکروفن های خطا می باشد. چنانکه گفته شد، جهت ایجاد ناحیه سکوتی به قطر  $0.1\lambda$  منبع ثانویه باید حداقل در فاصله  $1/6$  متری از میکروفن



شکل ۱۱. آرایش میکروفنوها و بلندگوها در محفظه در سیستم ANC (الف) تک کاناله (ب) چند کاناله  $1 \times 1 \times 2$  و (ج) چند کاناله  $1 \times 2 \times 4$



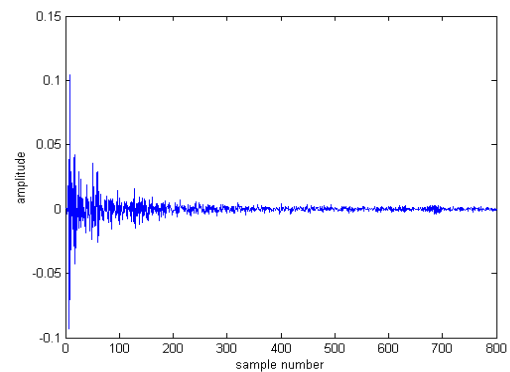
با استفاده از یک میکروفن مانیتورینگ<sup>۱</sup> میزان کاهش نویز در یکی از این نقاط اندازه گیری شد. اینکار برای سیستم  $1 \times 2 \times 4$  در صفحات افقی مربوط به میکروفن های مربوطه در  $Z=10$  و  $Z=-10$  سانتیمتر تکرار شد. شکل های ۱۷-۱۵ نواحی تضعیف و میزان آن را با رنگ های مختلف نشان می دهند.

در سیستم تک کاناله در صفحه  $Z=0$  در محل میکروفن خطا حدود  $20\text{dB}$  تضعیف بدست آمد که نسبت به دو صفحه دیگر تضعیف بیشتری است و ناحیه سکوت هم گسترش بیشتری یافته است. هر چه از محل میکروفن دورتر می شویم میزان تضعیف هم کاهش می یابد زیرا الگوریتم وفقی براساس میدان صوتی موجود در مکان میکروفن خطا، سیگنال ضد نویز ثانویه را ایجاد می نماید. پس در نقاط دورتر از میکروفن خطا، بدلیل کم شدن همبستگی متقابل بین میدان صوتی موجود در آن نقاط و میدان صوتی در مکان میکروفن خطا، میزان تضعیف کمتر می شود. در صفحات  $Z=20$  و  $Z=-20$  نیز حدود  $16-10\text{dB}$  تضعیف ایجاد شده است. با توجه به تئوری ارائه شده در بخش ۳-۴، در این حالت باید ناحیه سکوت قطر تقریبی  $45$  سانتیمتر داشته باشد. ایجاد تضعیف بیشتر از  $10\text{dB}$  در صفحات  $Z=20$  و  $Z=-20$  که فاصله آنها از همدیگر تقریباً برابر با قطر ناحیه سکوت در حالت ایده ال است، نشان می دهد که ناحیه سکوت حاصل با توجه به محدودیتهای صوتی و سخت افزاری با تقریب خوبی با تئوری تطابق دارد. البته میزان تضعیف در سه صفحه مذکور قدری متفاوت است که بدلیل نحوه توزیع فضایی میدانهای صوتی اولیه و ثانویه در صفحات مذکور می باشد.

در سیستم  $1 \times 1 \times 2$  در محل میکروفن های خطای ۱ و ۲ بترتیب ۱۸ و  $22\text{dB}$  تضعیف ایجاد شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از سیستم  $1 \times 1 \times 2$  با سیستم تک کاناله نشان می دهد که میزان تضعیف و ابعاد ناحیه سکوت در این سیستم افزایش یافته است. از آنجا که در این سیستم میکروفن های خطا در راستای محور  $x$  قرار گرفته اند، در جهت  $y$  نسبت به سیستم تک کاناله گسترش چندانی در ناحیه سکوت مشاهده نمی شود. اما در جهت محور  $x$  ناحیه سکوت تقریباً دو برابر شده است. در هر سه صفحه در ناحیه بین میکروفن ها بدلیل همپوشانی نواحی سکوت ایجاد شده توسط هر کدام، میزان تضعیف نسبت به نقاط دیگر بیشتر می باشد.

در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  ناحیه سکوتی با تضعیف حداقل  $10\text{dB}$  به ابعاد  $60 \times 30$  سانتیمتر در هر دو صفحه ایجاد شده است. در محل میکروفن های خطای ۱، ۲، ۳، ۴ که با توجه به شکل ۱۱-ج به مختصات  $(10,0,10)$ ،  $(-10,0,10)$ ،  $(10,0,-10)$  و  $(-10,0,-10)$  می باشند، بترتیب تضعیفهایی برابر با  $16\text{dB}$ ،  $14\text{dB}$ ،  $14\text{dB}$  و  $12\text{dB}$  ایجاد شده است. صفحه  $Z=0$  در سیستم  $1 \times 1 \times 2$  متناظر با صفحه  $Z=10$  در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  است و در هر دو سیستم شامل میکروفن

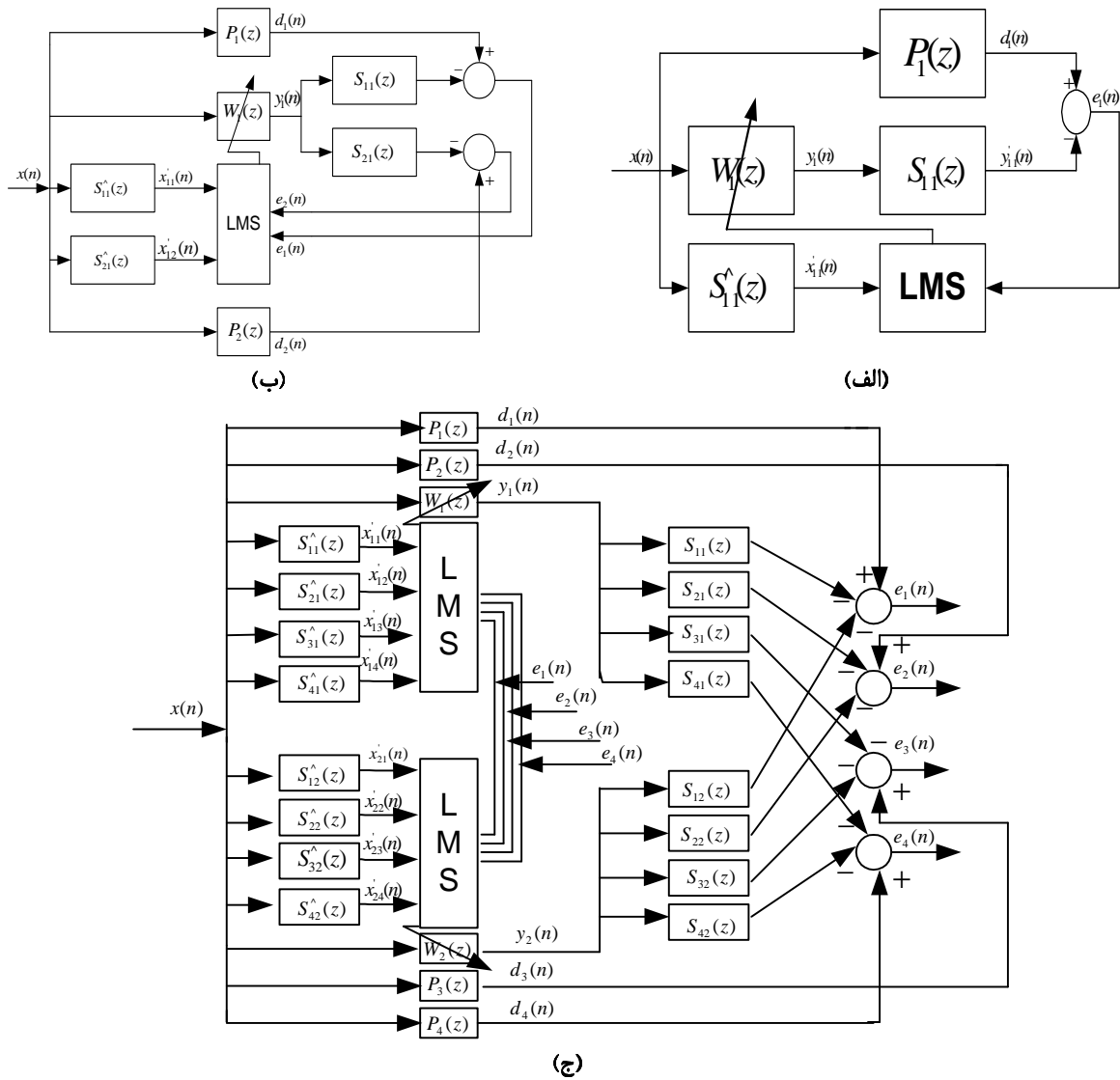
همانطور که گفته شد هرچه فاصله بین بلندگوی ثانویه و میکروفن خطا بیشتر شود، میزان افزایش توان صوتی کل در داخل محفظه نیز بیشتر می شود. قرار دادن بلندگو در فاصله مذکور بدون کاهش قابل توجه ناحیه سکوت، باعث می شود که فشار صوتی در نقاط دور از میکروفن خطا افزایش چندانی نیابد. علاوه بر این میزان تاخیر هم کاهش می یابد که باعث بهبود پایداری و افزایش سرعت همگرایی می شود. از بین مکانهای ممکن منبع ثانویه در فاصله  $1/3$  متری از میکروفن خطا مکانی انتخاب شد که با پخش نویز سینوسی  $75\text{Hz}$  از آن میکروفن های خطا یک سیگنال سینوسی  $75\text{Hz}$  را بدون اعوجاج و با دامنه کافی دریافت کرده و همچنین تفاوت فشارهای صوتی منابع اولیه و ثانویه در محل میکروفن های خطا بیشترین باشد. در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  نیز بروشی مشابه بلندگوهای ثانویه در فواصل تقریبی  $1/4$  و  $1/2$  متری از میکروفن های خطا قرار داده شده اند. در این پیاده سازیها از تراشه های  $AD667$  و  $AD1674A$  که بترتیب مبدل های  $A/D$  و  $D/A$  دوازده بیتی می باشند، استفاده شده است. فرکانس نمونه برداری  $2\text{KHz}$ ، طول فیلترهای وفقی و تابع انتقال تخمین مسیره های ثانویه بترتیب  $60$  و  $80$  و ضرایب همگرایی نیز بترتیب در سیستمهای تک کاناله،  $1 \times 1 \times 2$  و  $1 \times 2 \times 4$  برابر با  $0.004$ ،  $0.001$  و  $0.0005$  انتخاب شده اند. بلوک دیاگرام سه سیستم پیاده سازی شده فوق در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



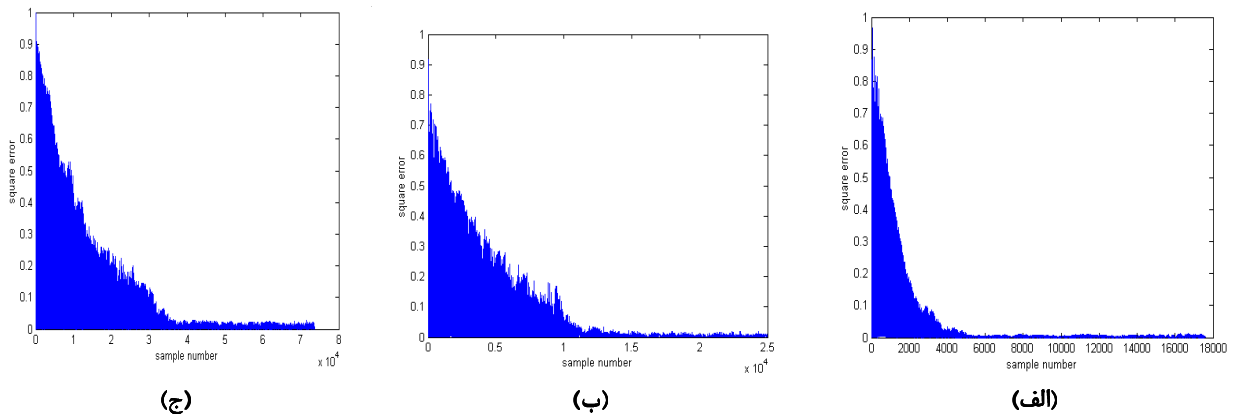
شکل ۱۲. پاسخ ضربه تخمین مسیر ثانویه  $\hat{s}_{11}(n)$  در سیستم ANC تک کاناله

شکل ۱۴ مربع سیگنال خطای حاصل در محل میکروفن شماره یک در سه سیستم پیاده سازی شده را نشان می دهد. برای اندازه گیری ناحیه سکوت در سیستمهای تک کاناله و  $1 \times 1 \times 2$  در هر یک از صفحات  $Z=0$ ،  $Z=20$  و  $Z=-20$  سانتیمتر، شبکه ای از نقاط که در آن فاصله بین هر دو نقطه مجاور در راستای محورهای  $x$  و  $y$  یکسان و برابر با  $10$  سانتیمتر بود، مشخص گردید. در هر آزمایش

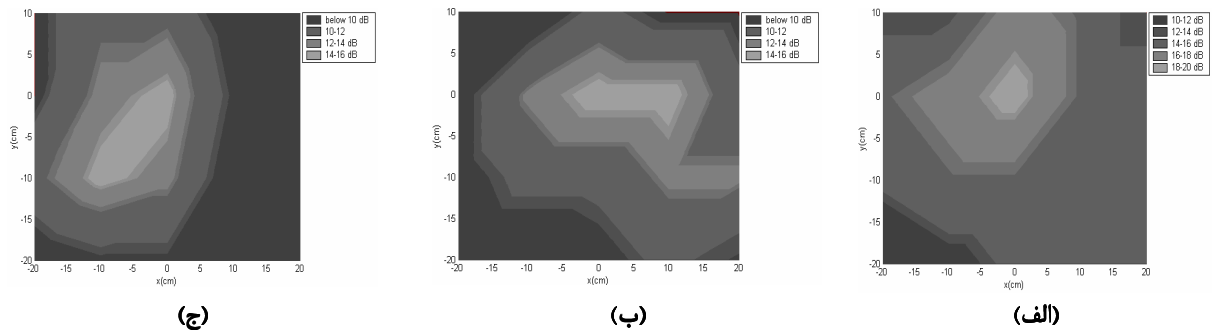
<sup>1</sup> Monitoring Microphone



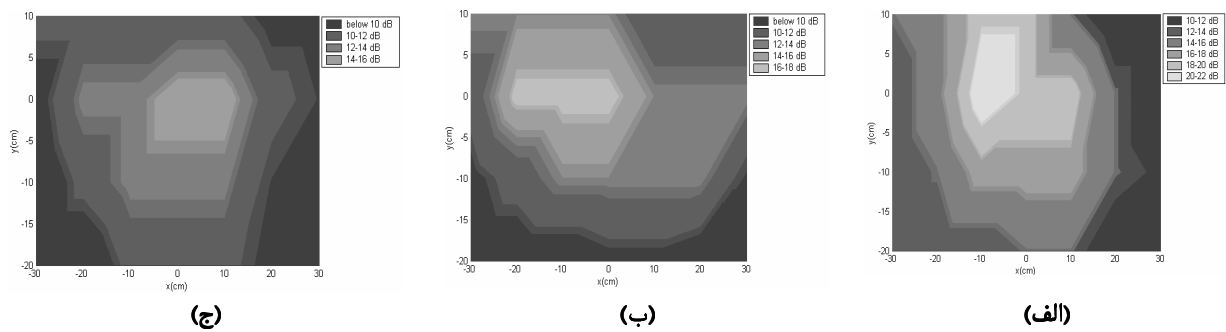
شکل ۱۳. جزییات بلوک دیاگرام سیستمهای ANC پیاده سازی شده (الف) تک کاناله (ب)  $1 \times 1 \times 2$  و (ج)  $1 \times 2 \times 4$



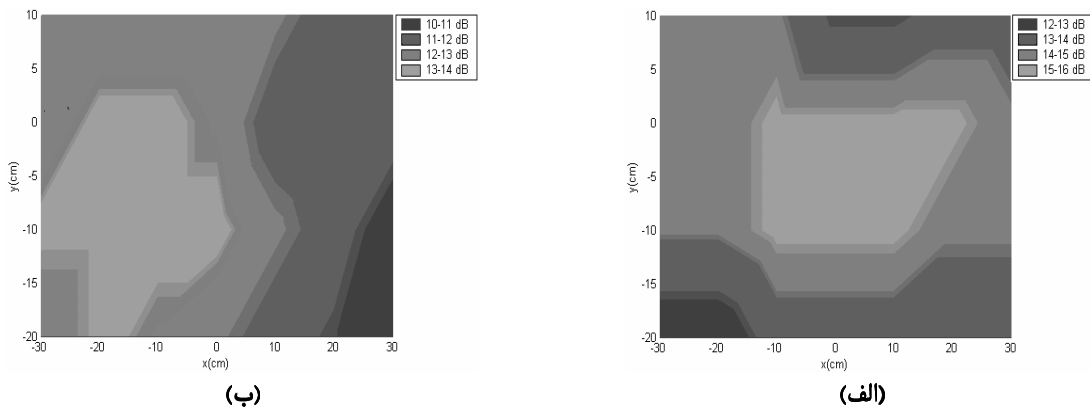
شکل ۱۴. نمودار خطا در محل میکروفن خطای ۱ ناشی از پیاده سازی سیستمهای ANC (الف) تک کاناله (ب)  $1 \times 1 \times 2$  و (ج)  $1 \times 2 \times 4$



شکل ۱۵. تضعیف حاصل از سیستم ANC تک کاناله در صفحات (الف)  $Z=0$  (ب)  $Z=20$  و (ج)  $Z=-20$  سانتیمتر



شکل ۱۶. تضعیف حاصل از سیستم ANC  $1 \times 1 \times 2$  در صفحات (الف)  $Z=0$  (ب)  $Z=20$  و (ج)  $Z=-20$  سانتیمتر



شکل ۱۷. تضعیف حاصل از سیستم ANC  $1 \times 2 \times 4$  در صفحات (الف)  $Z=10$  و (ب)  $Z=-10$  سانتیمتر

چنانکه اشاره شد در فرکانس ۷۵ Hz باید در حالت ایده ال ناحیه سکوتی به قطر تقریبی ۴۵ سانتیمتر (شعاع ۲۲/۵ سانتیمتر) در اطراف هر میکروفن خطا ایجاد گردد که با پیاده سازی سیستمهای ANC تک کاناله و  $1 \times 1 \times 2$  این موضوع نشان داده شد. در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  نیز از آنجا که در هر یک از صفحات  $Z=10$  و  $Z=-10$  دو میکروفن خطا وجود دارد، می توان گفت که در صفحات  $Z=30$  و  $Z=-30$  نیز که به فاصله ۲۰ سانتیمتری از صفحات حاوی میکروفنها قرار دارند، ناحیه سکوت ایجاد می شود. بنابراین بطور کلی متوسط تضعیف حاصل از سیستم ANC  $1 \times 2 \times 4$  پیاده سازی شده به میزان

های خطای ۱ و ۲ می باشد. با مقایسه نواحی سکوت ایجاد شده در این صفحه توسط دو سیستم می بینیم در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  میزان تضعیف کمتری نسبت به سیستم  $1 \times 1 \times 2$  حاصل شده است. در صفحه  $Z=-10$  در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  که متناظر با صفحه  $Z=-20$  در سیستم  $1 \times 1 \times 2$  است، می توان دید که عملکرد سیستم  $1 \times 2 \times 4$  بسیار بهتر از  $1 \times 1 \times 2$  می باشد. زیرا در سیستم  $1 \times 1 \times 2$  در ناحیه قابل توجهی از صفحه تضعیف نویز کمتر از ۱۰ dB می باشد در حالی که در سیستم  $1 \times 2 \times 4$  در تمام نقاط صفحه تضعیفی در حدود ۱۰-۱۴ dB ایجاد می شود.

ایده ال بودن پارامترهای سخت افزاری و دقت محدود آنها کمتر می باشد.

**تقدیر و تشکر:** نویسندگان این مقاله از پشتیبانی مرکز تحقیقات مخابرات ایران تشکر می نمایند.

### مراجع

[1] Hansen C. H., *Understanding Active Noise Cancellation*, London and Newyork: Spon press, 2001.

[2] Elliott S. J. and Nelson P. A., "Active noise control", IEEE Signal Processing magazine, pp. 12-35, Oct. 1993.

[۳] کهائی محمدحسین، صادقی محمد ابراهیم و پشتمان جواد، «شبیه سازی و پیاده سازی یک سیستم تک کاناله حذف فعال نویز در محفظه»، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، خرداد ۱۳۸۱.

[4] Kou S. M. and Morgan D. R., "Active noise ccontrol: A tutorial review", Proceedings of IEEE, vol. 87, no. 6, Jun. 1999.

[5] Kou S. M. and Morgan D. R., *Active Noise Control systems- Algorithms and DSP implementations*, John Wiley, 1996.

[6] Laugesen S. and Elliott S. J., "Multichannel active noise control of random noise in a small reverberant room", IEEE Trans. Signal Processing, 1, pp. 241-249, Apr. 1993.

[7] Joseph P., Elliott S. J. and Nelson P. A., "Near field zone of quiet", Journal of Sound and Vibration 172(5), pp. 605-627, 1994.

[8] Kinsler L. E. and Frey A. R., *Fundamental of acoustics*, John Wiley, 1950.

[9] Levine H., "On source radiation", J. Acoust. Soc. Am. 68, pp. 1199-1205, 1980.

[10] Elliott S. J., *Signal Processing for active control*, Academic Press, 2001.

[11] Kamichik S., *Practical acoustics*, Prompt Publications, Howard W. Sams & Company, 1998.

قابل توجهی بیشتر از سیستم  $1 \times 1 \times 2$  می باشد، اگرچه ممکن است در بعضی نقاط به دلیل نحوه توزیع فضایی میدانهای صوتی (صفحه  $Z=10$ ) نسبت به سیستم  $1 \times 1 \times 2$  ANC (صفحه  $Z=0$ ) میزان تضعیف کمتر باشد. حجم ناحیه سکوت در اینجا تقریباً دو برابر سیستم  $1 \times 1 \times 2$  می باشد. در عمل سیستم  $1 \times 2 \times 4$  دارای سرعت همگرایی کمتری نسبت به سیستم  $1 \times 1 \times 2$  می باشد. همچنین به علت استفاده از هشت تابع انتقال مسیر ثانویه در سیستم، حجم محاسبات بسیار زیادتر می گردد.

### ۸- نتیجه گیری

در این مقاله عوامل موثر در ایجاد و گسترش ناحیه سکوت در سیستم ANC جهت حذف نویز صوتی تک فرکانس در محفظه مورد بررسی قرار گرفت. برای اینکار ابتدا تئوری مربوطه و سپس نتایج مورد نظر در سیستمهای ANC تک کاناله، سیستم چند کاناله  $1 \times 1 \times 2$  و چند کاناله  $1 \times 2 \times 4$  مقایسه و تحلیل گردید. نتایج حاصل از پیاده سازی با در نظر گرفتن محدودیتهای صوتی و سخت افزاری با تقریب خوبی با تئوری مطابقت دارد. از لحاظ تئوری در حالت ایده ال در اطراف هر میکروفن خطا ناحیه سکوتی به قطر  $0.1 \lambda$  ایجاد می شود. جهت ایجاد این ناحیه سکوت لازم است که فاصله بین منابع ثانویه و میکروفن های خطا از حدود  $0.35 \lambda$  کمتر نباشد. همچنین باید تعداد میکروفن های خطا از تعداد منابع ثانویه بیشتر باشد. در غیر اینصورت سیستم به یک جواب بهینه جهت حداقل کردن تابع هزینه همگرا نشده و یا اینکه در غیر از محل میکروفن های خطا تضعیف چندانی ایجاد نمی گردد. علاوه بر این توان منبع ثانویه نیز در کارایی سیستم نقش مهمی دارد بطوری که در بهره های بسیار کم تقویت کننده قدرت، توان صوتی خروجی منبع ثانویه برای ایجاد ناحیه سکوت در محفظه نخواهد بود. همچنین در بهره های بسیار بالا نیز منبع ثانویه به اشباع رفته و سیستم ناپایدار می شود. حجم ناحیه سکوت ایجاد شده توسط سیستم  $1 \times 2 \times 4$  تقریباً دو برابر سیستم  $1 \times 1 \times 2$  و میزان متوسط تضعیف آن بیشتر می باشد. در ناحیه بین میکروفنها بدلیل همپوشانی نواحی سکوت ایجاد شده، میزان تضعیف بیشتری نسبت به نقاط دیگر بدست می آید. همچنین بطور کلی متوسط میزان تضعیف در صفحات مختلف از مقدار پیش بینی شده توسط تابع همدوسی ( $18 \text{ dB}$ ) بدلیل غیر