

# الگوسازی و ارزیابی تجربی کاهنده‌های نوفه برای سامانه‌های حسگری طیفی پایین - بسامد

سعید خدای اشکذری<sup>۱</sup>، حامد صادقی<sup>۲\*</sup>، عباس رضانی<sup>۳</sup>

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت

۲. آزمایشگاه مخابرات بی‌سیم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشکده فنی و مهندسی رسانه، دانشگاه صدا و سیما

## چکیده

در این مقاله مسئله ارزیابی روش الگوسازی برقی صافی‌های صوتی پایین- بسامد مطالعه می‌گردد. در همین راستا پس از مرور مبانی روش الگوسازی برقی صافی‌های صوتی، عناصر صوتی پایه با عناصر برقی متناظر معادل‌سازی شده و با تشکیل یک مدار معادل با صافی‌های صوتی موردنظر، تابع تبدیل کل مدار تعیین شده است. به منظور ارزیابی کارایی روش الگوسازی پیشنهادشده، نمونه‌ای از یک صافی صوتی طراحی و در میدان ساخته‌شده و با اتصال به سامانه حسگری اکتساب داده‌ها، در شرایط واقعی اقدام به داده‌برداری گردید. در نهایت، نتایج داده‌برداری سامانه مذکور با نتایج شبیه‌سازی به روش الگوسازی برقی مقایسه و ارائه گردیدند. نتایج تأیید می‌کنند که روش الگوسازی پیشنهادی می‌تواند با خطای قابل قبولی خروجی‌های واقعی را شبیه‌سازی نماید.

**کلیدواژه‌ها:** صافی صوتی، حسگر طیفی صوتی، بسامد- پایین، صدا.

## ۱. مقدمه

مشخص، این دو موج تنها در صورتی هم‌فاز هستند که فاصله همبستگی<sup>۳</sup> آن‌ها، بسته به نوع منبع تولید موج و مسیر انتشار، به‌طور صحیح انتخاب شده‌باشد. در این صورت، این دو موج را اصطلاحاً همدوس<sup>۴</sup> می‌نامند [۵] (به‌طور مثال برای بسامد یک هرتز، فاصله همبستگی در حدود یک کیلومتر است).

طبق نظریه تیلور، بسامد گردابه‌های محلی خود-متشابه<sup>۱</sup> که از اختلاف فشار سطوح جو (بر اثر جریان باد) ایجاد می‌شوند با متوسط سرعت باد در آن ناحیه متناسب می‌باشد [۶]. با توجه به تغییرات مداوم باد در ارتفاعات مختلف جوی، اندازه این گردابه‌ها و به دنبال آن موج فشاری ناشی از آن‌ها گستره وسیعی از بسامدهای مختلف را تولید می‌کنند. این مسئله باعث می‌شود که علامت‌های نمونه‌برداری شده از فشار نوفه باد در فواصل مختلف به‌هیچ‌وجه با یکدیگر هم‌فاز (یا به تعبیر دیگر همدوس) نباشند.

راهبرد اصلی صافی‌های نوفه باد بسامد- پایین بر پایه تفاوت نوفه باد ناهمدوس با علامت‌های پایین- بسامد

در گستره طیف بسامدی صدا، بسامدهای زیر ۲۰۰ هرتز را امواج صوتی پایین- بسامد می‌نامند [۱-۲]. به دلیل بسامد بسیار پایین، این امواج استهلاک کم‌تری داشته و مسافت‌های بسیار طولانی را می‌پیمایند [۳].

مهم‌ترین منبع نوفه در بازه بسامدهای بسیار پایین، باد است که عملکرد حسگرها را در اندازه‌گیری دچار مشکل می‌کند. به عبارت دیگر افزایش شدت باد، شدت نوفه را نیز افزایش می‌دهد [۴] که مهم‌ترین مشکل فنی در زمینه دریافت و پردازش علامت‌های<sup>۱</sup> موردنظر می‌باشد. لذا قبل از اینکه موج فشاری باد به حسگر برسد و با این علامت‌ها در حوزه بسامد ادغام شود، به وسیله صافی‌های مکانیکی، باید اقدام به کاهش اثر آن نمود.

یکی از موفق‌ترین رویکردها در این مقوله، میانگین‌گیری مکانی<sup>۲</sup> مقادیر اندازه‌گیری شده فشار است که در ادامه، اساس این روش توضیح داده می‌شود. در نمونه‌برداری از یک جبهه موج پایین- بسامد در دو نقطه با فاصله

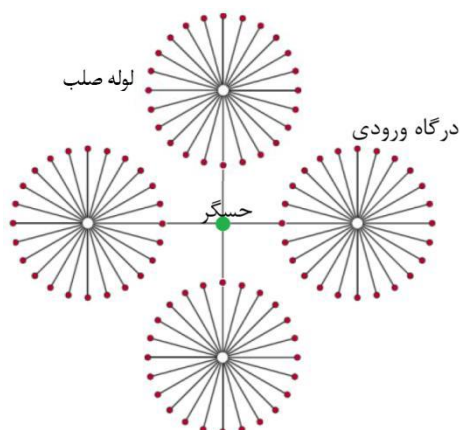
<sup>3</sup> Correlation distance

<sup>4</sup> Coherency

<sup>1</sup> Signals

<sup>2</sup> Spatial Averaging

ورودی‌ها در یک الگوی هندسی منظم دایروی چیده شده‌اند و فاصله پیمایش صدا از همه ورودی‌ها تا مرکز (حسگر) به یک اندازه می‌باشد. نمونه اولیه صافی گلبرگی در شکل ۱ نشان داده شده‌است که شامل ۳۲ ورودی توزیع شده در فضایی با قطر ۱۶ متر می‌باشد. بیش‌ترین میزان بهبود علامت-به-نوفه برای این صافی ۱۵ دسی‌بل بوده‌است. ویژگی مهم دیگر در این نوع صافی‌ها هم‌زمانی نسبی پیمایش علامت و نوفه در داخل و خارج لوله‌ها می‌باشد. خاطرنشان می‌گردد که طراحی این صافی‌ها از سال ۲۰۰۵ تاکنون در حال بهبود و تغییر می‌باشد [۱۲]. پس از آلکارو، هدلین<sup>۷</sup> با انجام تحقیقات متعدد روی انواع صافی‌های پایین- بسامد فعالیت‌های آلکارو را توسعه داد [۱۳]. هم‌چنین، راسپت<sup>۸</sup> و همکارانش [۱۴-۱۵] روی نمونه‌های دیگر صافی‌های پایین- بسامد مانند صافی‌های حصاری نیز موفقیت‌هایی داشتند و توانستند میزان علامت به نوفه را حدود ۲۰ تا ۲۵ دسی‌بل افزایش دهند.



شکل ۱ یک نمونه نوعی صافی گلبرگی.

برای الگوسازی سامانه‌های گلبرگی، آلکارو و لی‌پیشون<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۵ تلاش‌هایی انجام داده‌اند که شامل: ارزیابی پاسخ بسامدی و فاز بر اساس الگوی برقی-صوتی، ارزیابی صافی‌های مکانی امواج صوتی به‌عنوان تابعی از پراکندگی ورودی‌ها و زاویه برخورد موج با آن‌ها و هم‌چنین محاسبه کاهش نوفه در الگوی آزمایشگاهی جریان باد آشفته می‌باشند [۱۲]. هم‌چنین، هدلین و آلکارو روی الگوسازی کاهش بازآوایش<sup>۲</sup> در ساختارهای گلبرگی پژوهش

همدوس در فواصل خاص می‌باشد [۷]. در این مقاله برای نخستین بار در سطح کشور با استفاده از روش برقی- صوتی<sup>۲</sup> رفتار این نوع صافی‌ها شبیه‌سازی شده‌است. سپس، با انجام آزمون‌های تجربی روی نمونه‌ای ساخته‌شده از آن‌ها نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی می‌گردد. بر این اساس، پس از معرفی مسئله، در بخش دوم الگوی ریاضی و هندسی صافی لوله‌ای بررسی می‌شود و اجزای آن معادل‌سازی می‌گردند؛ در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی و در بخش چهارم نیز نتایج آزمون تجربی ارائه شده‌اند. در آخرین بخش هم نتایج مقاله تحلیل می‌گردند.

## ۲. الگوسازی صافی صوتی

### ۱-۲. مقدمات

دانیلز در سال ۱۹۵۹ [۸] نشان داد که این امکان وجود دارد که به وسیله میانگین‌گیری از فشار هوای جو در طول یک خط افقی، مقدار علامت-به-نوفه را برای بسامدهای زیر یک هرتز تا بیش از ۲۰ دسی‌بل (در باد بیش از ۱۳ متربرثانیه) افزایش داد. دانیلز در یک لوله به طول ۶۰۳/۵ متر که قطر آن در فواصل مشخص کم می‌شد ۱۰۰ ورودی ایجاد کرد و از این ورودی‌ها صدا را تا حسگر هدایت می‌نمود. مهم‌ترین مشکل این روش وابستگی صافی طویل او به جهت موج ورودی بود. پس از دانیلز باریج<sup>۳</sup> از یک ساختار ساده‌تر بدون تغییر در قطر لوله‌ها استفاده کرد که به‌صورت شعاعی چیده می‌شدند و روی آن‌ها سوراخ‌هایی در فواصل معین تعبیه شده بودند [۹]. این ساختار «عنکبوتی»<sup>۴</sup> نامیده می‌شد، در همان سال گراور<sup>۵</sup> توانست نسخه بهبودیافته‌ای از صافی باریج ارائه دهد [۱۰].

آنچه تکامل این فن‌آوری را سرعت بخشید، تحقیقات آلکارو در اواخر دهه ۱۹۹۰ بود [۱۱]. طرح وی که به صافی‌های رزگون (یا گلبرگی)<sup>۶</sup> مشهور شد، به‌سرعت برای سامانه‌های آشکارسازی پایین- بسامد فراگیر شد و تاکنون نیز از آن استفاده می‌شود. در صافی‌های گلبرگی،

<sup>1</sup> Self-similar localized eddies (or Turbules)

<sup>2</sup> Electero-acoustics

<sup>3</sup> Burrige

<sup>4</sup> Spider

<sup>5</sup> Grover

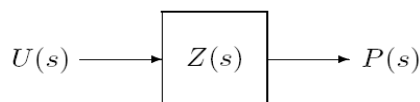
<sup>6</sup> Rosette

<sup>7</sup> Hedlin

<sup>8</sup> Raspet

نموده‌اند [۱۶].

تعمیم است که دارای معادله افتراقی خطی<sup>۵</sup> مستقل از زمان باشند [۱۸]. یک سامانه صوتی را تنها وقتی می‌توان خطی و مستقل از زمان در نظر گرفت که ابعاد آن بسیار کمتر از طول موج صدای جاری در آن باشد؛ در این صورت بسامد جریان یا ولتاژ در نقاط مختلف مدار به گونه‌ای است که فاز آن‌ها در تمام نقاط داخل هر عنصر مدار، مقدار یکسانی دارند (شکل ۲).



شکل ۲ پاسخ مقاومت‌ظاهری (ورودی سرعت - خروجی فشار) [۱۸].

اگر شرط مذکور در سامانه‌های صوتی برقرار نباشد باید از روش تحلیل سامانه‌های صوتی گسترده<sup>۷</sup>، اجزا را الگوسازی کرد. بر این اساس می‌توان گفت روش تحلیل سامانه‌های فشرده<sup>۸</sup> یک حالت خاص از روش تحلیل سامانه‌های گسترده می‌باشد [۱۸].

### ۲-۳. الگوسازی صافی صوتی

برای الگوسازی برقی یک سامانه فشرده لوله‌ای، ابتدا باید یک الگوی برقی به ازای یک هندسه معین (قطر متوسط و تعداد دهانه‌های ورودی هوا) و پارامترهای ساختمانی مفروض (ورودی‌های هوا، لوله‌ها، محفظه جمع‌کننده و الگوی حسگر مورد استفاده) استخراج گردد.

در یک صافی نوفه باد که اقدام به نمونه‌برداری از فضای اطراف خود می‌کند، عناصر موجود عبارت‌اند از درگاه‌های ورودی؛ ورودی لوله‌ها، لوله‌ها، جمع‌کننده‌ها، و در نهایت حسگر. این عناصر الگوهای چینش بسیار متنوعی دارند که بر اساس بازه بسامدی مورد نیاز برای اندازه‌گیری

<sup>۵</sup> سامانه خطی، سامانه‌ای است که اصل برهم‌نهی (جمع آثار) در مورد آن صادق باشد. پس برای سامانه‌های خطی پاسخ به چند ورودی را می‌توان با در نظر گرفتن ورودی‌ها به طور جدا از هم و جمع پاسخ‌های حاصل از آن‌ها به دست آورد.

<sup>۶</sup> در سامانه مورد نظر این مقاله که امواج صوتی پایین- بسامد می‌باشند ( $f_{max} \ll 100 \text{ Hz}$ )، با توجه به سرعت صدا در هوا، کمترین طول موج صوتی عبارت‌است از  $\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} \approx 3.4$  بنابراین سامانه‌هایی که ابعادشان در مقابل  $\frac{\lambda_{min}}{4}$  (۱/۷ متر) به اندازه کافی کوچک باشند فشرده می‌باشند.

<sup>۷</sup> Expanded

<sup>۸</sup> Lumped element system

به علاوه، مارستون<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۹ با استفاده از ماتریس انتقال سرعت و فشار صوتی در طول لوله‌ها با فرضیات ساده‌کننده‌ای، الگویی را برای تعیین پاسخ بسامدی و فاز این سامانه‌ها ارائه داده‌است [۱۷]. پیچیدگی محاسبات و زمان حل طولانی مهم‌ترین مشکلات این الگو محسوب می‌شوند. البته در عوض قابلیت بالای تعمیم‌پذیری به ساختارهای متنوع نیز از نقاط قوت آن می‌باشد. همچنین، در این روش ساده‌سازی‌های زیادی انجام شده‌اند که دقت را در محاسبات کاهش می‌دهند. مثلاً نوع ورودی‌ها، اتصالات و مؤلفه‌های حسگر مورد استفاده در این شبیه‌سازی لحاظ نشده‌اند.

به دلیل هزینه‌های بالای روش‌های شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (سی‌اف‌دی)<sup>۴</sup> و عدم حصول نتایج قابل قبول در پیش‌بینی‌ها، تاکنون اقدام خاصی روی شبیه‌سازی این نوع صافی‌ها با این روش مشاهده نشده‌است.

روش پیشنهادی این مقاله در ادامه فعالیت‌های آکاورو بوده و با بهره‌گیری از الگوسازی برقی- صوتی، مقایسه‌ای را با نمونه‌ای آزمایش شده ارائه می‌دهد. روش حاضر به دلیل حذف برخی مؤلفه‌های کم تأثیر در حصول نتیجه، از روش مذکور سریع‌تر نیز می‌باشد.

### ۲-۲. روش الگوسازی پیشنهادی

رفتار دینامیکی بسیاری از سامانه‌ها، اعم از سامانه‌های مکانیکی، الکترونیکی، حرارتی، اقتصادی، زیست‌شناختی و غیره را می‌توان برحسب معادلات افتراقی (دیفرانسیل) توصیف کرد. این معادلات افتراقی را می‌توان با استفاده از قوانین فیزیکی حاکم بر سامانه، به دست آورد. یافتن یک نمونه ریاضی مناسب، مهم‌ترین بخش از تحلیل یک سامانه است [۱۸].

الگوسازی برقی- صوتی بر مفهوم معادل‌سازی اجزای سامانه با اجزای یک سامانه برقی استوار است. باید توجه داشت که مفهوم تابع تبدیل تنها به سامانه‌هایی قابل

<sup>۱</sup> Le Pichon

<sup>۲</sup> Resonance

<sup>۳</sup> T.M. Marston

<sup>۴</sup> CFD; Computational Fluid Dynamics

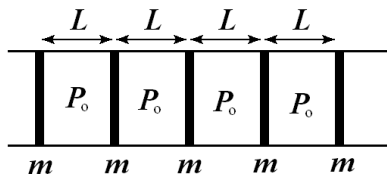
$$Z_{apr} = R_{apr} + j\omega L_{apr} \quad (1)$$

که در آن  $R_{apr}$  و  $L_{apr}$  از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۲]:

$$R_{apr} = Z_c \frac{(ka)^2}{1+(ka)^2} \quad , \quad L_{apr} = Z_c \frac{ka}{1+(ka)^2} \quad (2)$$

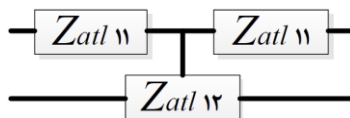
$$Z_c = \frac{\rho c}{\pi a^2} \quad , \quad k = \frac{2\pi f}{c}$$

پس از دهانه ورودی، نوفه و موج صوتی به لوله‌ها می‌رسند. با توجه به ابعاد لوله‌ها نمی‌توان در مرحله اول آن‌ها را سامانه فشرده فرض نمود، اما می‌توان به دلیل فیزیک لوله که ماهیتی خطی دارد آن را چند لوله کوتاه‌تر در نظر گرفت و هر لوله کوچک‌تر را به‌عنوان یک سامانه فشرده تحلیل کرد و با جمع آثار این عناصر سری باهم کل لوله را ساخت (شکل ۴). از آنجاکه در هر جزء از لوله، نسبت شعاع لوله به ضخامت لایه مرزی ( $r_v$ ) در رابطه  $r_v \gg 1$  صدق کند، می‌توان آن جزء را یک سامانه فشرده در نظر گرفت (محاسبه در رابطه (۵)). این پارامتر در مسئله مورد نظر این مقاله قابل اثبات بوده و صادق است.



شکل ۴ یک لوله با سطح مقطع ثابت را می‌توان در الگوسازی برقی-صوتی با چند لوله سری باهم معادل سازی نمود.

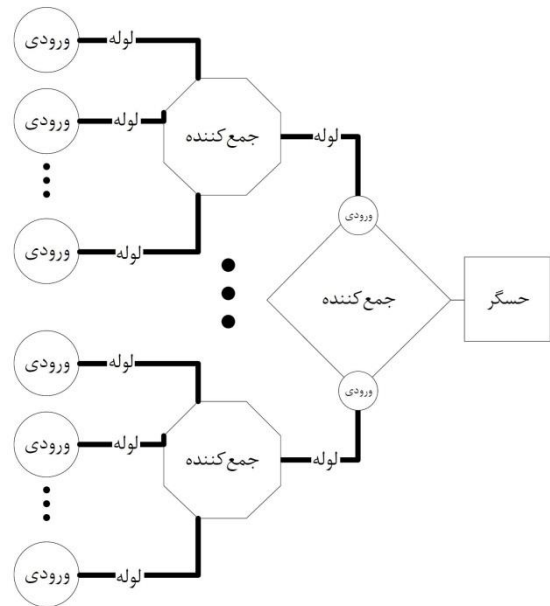
شکل ۵ نمونه‌ای از مدار معادل یک لوله را به‌صورت کلی نشان می‌دهد.



شکل ۵ مدار معادل تی شکل [۱۲].

اگر طول هر لوله  $L$  باشد مقادیر مقاومت‌ظاهری عناصر برابر است با [۱۲]:

انتخاب می‌شوند. ابعاد آرایه، تعداد ورودی‌ها، تعداد شاخه‌های اصلی و فرعی و طول لوله‌های کوچک و بزرگ در پاسخ بسامدی تأثیر مستقیم دارند. در این مقاله یک نمونه متداول از این نوع صافی‌های گلبرگی مطابق شکل ۱ با مشخصات مندرج در جدول ۱ بررسی می‌شود. معادل با ساختار مفروض، می‌توان الگوی شکل ۳ را پیشنهاد داد که به راحتی قابل تفسیر است.



شکل ۳ پیکربندی و طرح کلی سامانه صافی مفروض.

### ۲-۳-۱. عناصر مورد استفاده در الگوی برقی

تابع تبدیل فشاری که حسگر محاسبه می‌کند نسبت به آنچه در ورودی هوا اندازه‌گیری می‌شود  $H_i(w)$  نامیده می‌شود. پاسخ بسامدی دامنه و فاز برای این ساختار به وسیله محاسبه تابع تبدیل  $H_i(w)$  به دست می‌آیند. برای بدست آوردن تابع تبدیل، باید ابتدا مقاومت‌ظاهری اجزای مدار و سپس مقاومت‌ظاهری معادل کل مدار را محاسبه نمود. در این مرحله ابتدا به تعیین مقاومت‌ظاهری اجزا پرداخته می‌شود.

ابتدای لوله، دهانه ورودی قرار دارد. با توجه به کوچکی ابعاد دهانه نسبت به طول موج، دهانه را می‌توان سامانه‌ی صوتی فشرده در نظر گرفت.

اگر چگالی هوا  $\rho$ ، عدد موج (صوتی)  $k$ ، سرعت صدا در هوا  $c$  و شعاع دهانه لوله  $a$  باشند، مقاومت‌ظاهری تابشی لوله با انتهای منتهی به هوای آزاد برابر است با [۱۲]:

می‌شود به ساختار هندسی و نوع و ضرایب مکانیکی مواد به کار رفته در آن بستگی دارد. مقدار فشار اندازه‌گیری شده توسط حسگر ( $P_{sum}$ ) بر روی مدار شکل ۶ نشان داده شده است. پارامترهای  $R_{sen}$  و  $L_{sen}$  از روابط زیر به دست می‌آیند ( $l_p$  طول ورودی و  $r_p$  شعاع درگاه ورودی حسگر می‌باشند) [۱۲]:

$$R_{sen} = \frac{\lambda \eta l_p}{\pi r_p^4}, \quad L_{sen} = \frac{\rho l_p}{\pi r_p^4} \quad (7)$$

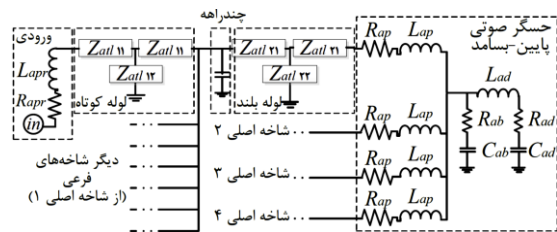
حجم محفظه داخلی با  $V_{ab}$  و اتلاف آن با  $R_{ab}$  نشان داده می‌شوند. بدین ترتیب، خازن معادل این محفظه صوتی طبق رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۱۲]:

$$C_{ab} = \frac{V_{ab}}{\rho c^2} \quad (8)$$

در نهایت، مقاومت ظاهری معادل برای ساختار پرده‌حاجز و ملحقات آن نیز بر اساس موارد مذکور، عبارت است از:

$$Z_{ad} = R_{ad} + j\omega L_{ad} + \frac{1}{j\omega C_{ad}} \quad (9)$$

که  $R_{ad}$ ،  $L_{ad}$  و  $C_{ad}$  به ترتیب اتلاف، القاگر و ظرفیت معادل پرده‌حاجز یک حسگر نوعی می‌باشند. با معرفی اجزای مختلف یک صافی لوله‌ای نوفه و معادل برقی آن‌ها و نیز محاسبه مقاومت ظاهری هر یک از اجزا، می‌توان مدار معادل برقی آن را مطابق شکل ۶ نشان داد.



شکل ۶ مدار معادل برقی صافی نوفه لوله‌ای.

### ۲-۳-۲. استخراج تابع تبدیل به روش ماتریسی

با محاسبه اجزای گسسته مدار معادل یک صافی، باید تابع تبدیل آن را محاسبه نمود. نمودار گره  $k$ -ام یک مدار برقی- صوتی در شکل ۷ نشان داده شده است. سرعت حجمی موج صوتی بین گره  $k$  و گره  $j$  برابر است با:

$$u_{(j,k)} = \frac{P_j - P_k}{Z_{(j,k)}} \quad (10)$$

$$Z_{atl1} = Z_c \tanh\left(\frac{\Gamma L}{2}\right), \quad Z_{atl2} = \frac{Z_c}{\sinh(\Gamma L)} \quad (3)$$

که در آن  $Z_c$  مقاومت ظاهری مشخصه لوله و  $\Gamma$  ضریب انتشار مختلط<sup>۱</sup> درون لوله (به خاطر وجود اتلاف) هستند [۱۲]:

$$Z_c = R_0 \left[ (1 + 0.369 r_v^{-1}) - j 0.369 r_v^{-1} \right], \quad (4)$$

$$\Gamma = k \left[ 1.045 r_v^{-1} + j(1 + 1.045 r_v^{-1}) \right].$$

و  $r_v$  و  $R_0$  از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$r_v = \sqrt{\frac{2\rho f S}{\eta}}, \quad R_0 = \frac{\rho c}{S} \quad (5)$$

در روابط بالا  $k$  عدد موج،  $s$  سطح مقطع لوله و  $\eta$  ضریب لزجت هوا می‌باشند. هم‌چنین، ماتریس انتقال هر لوله از روابط زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$\begin{bmatrix} P(x=0) \\ U(x=0) \end{bmatrix} = \dots \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma L) & Z_c \sinh(\Gamma L) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\Gamma L) & \frac{1}{Z_c} \cosh(\Gamma L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(x=L) \\ U(x=L) \end{bmatrix} \quad (6)$$

صدا از لوله‌ها به چندراهه وارد می‌شود. از آنجایی که ابعاد چندراهه جمع‌کننده نسبت به طول موج کوچک هستند، بنابراین، می‌توان آن را به‌عنوان یک سامانه صوتی فشرده تحلیل کرد. با توجه به اینکه چندراهه یک مخزن با حجم  $V_s$  می‌باشد، عنصر معادل برقی آن یک خازن است که ظرفیت آن متناسب با حجم، چگالی و سرعت صدا برابر با  $C_{avs} = V_s/\rho c$  می‌باشد. هم‌چنین، ماتریس انتقال معادل آن نیز  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{avs} & 1 \end{bmatrix}$  است که  $Y_{avs}$  برابر با مقاومت ظاهری تَقْتَلِیَّت (ادمیتانس)<sup>۳</sup> خازن معادل می‌باشد [۱۲].

بقیه اجزای مدار در ادامه تکرار می‌شوند تا در نهایت امواج صوتی به حسگر برسند. آشکار است که بدون داشتن الگوی مداری یا ماتریس انتقال حسگر امکان تحلیل لوله‌های کاهنده نوفه وجود ندارد، زیرا حسگر بر روی ساختار لوله‌ها اثر بارگذاری دارد. به عبارت دیگر، حسگر باری صوتی می‌باشد که به انتهای سامانه صوتی متصل شده است. اینک الگوی مداری حسگر چگونه تعیین

<sup>۱</sup> Complex transmission coefficient

<sup>۲</sup> در پوسته لوله‌ها این ضریب و ضریب ثابت انعکاس مختلط نمایانگر میزان افت انتقال در مسیر یک لوله طویل می‌باشند.

<sup>۳</sup> Admittance

$$\{P_{in}\} = \begin{Bmatrix} P_{in,m} \\ P_{in,k} \\ \vdots \\ P_{in,n} \\ \vdots \end{Bmatrix}, \quad \left\{ \frac{1}{z_{in}} \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{Ze_m} \\ \frac{1}{Ze_k} \\ \vdots \\ \frac{1}{Ze_n} \\ \vdots \end{Bmatrix}, \quad \{P_i\} = \begin{Bmatrix} P_m \\ \vdots \\ P_k \\ \vdots \\ P_n \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & -\sum_j \frac{1}{Z_{(j,m)}} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{1}{Z_{(m,k)}} & \dots & -\sum_j \frac{1}{Z_{(j,k)}} & \dots & \frac{1}{Z_{(n,k)}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -\sum_j \frac{1}{Z_{(j,n)}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

تابع تبدیلی که فشار اندازه‌گیری شده توسط حسگر  $P_{sum}$  را به فشار ورودی هر دهانه هوا ارتباط می‌دهد با استفاده از بردار  $\{P_{in}\}$  به دست می‌آید.

۳-۳-۲. استخراج تابع تبدیل به روش معادل گذاری

از آن‌جا که روش ماتریسی نیاز به انجام محاسبات بالایی دارد و برای شبکه‌هایی با تعداد گره‌های زیادتر، انجام این محاسبات مستلزم صرف زمان بیشتری است روش دوم پیشنهاد می‌گردد. در این روش تابع انتقال (تابع تبدیل) مدار برحسب بسامد به صورت لگاریتمی با استفاده از محاسبه مقاومت ظاهری در گره‌های مختلف مدار معادل محاسبه می‌شود. تعداد کل گره‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

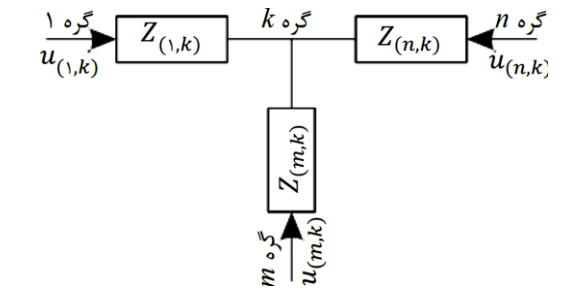
$$N_n = N_{ul} + (\gamma m) + 1. \quad (14)$$

هم‌چنین، برای ساده‌سازی و کاهش تعداد گره‌ها و در نتیجه کاهش ابعاد ماتریس  $T_{\text{تقلیبت}}$  (ادمیتانس)  $(Y)$  و افزایش سرعت محاسبات، معادل‌سازی‌های رابطه زیر به کار رفته‌اند:

$$\begin{aligned} Z_{e1} &= R_{apr} + j\omega M_{apr} + Z_{alt11}, \\ Z_f &= Z_{alt21} + R_{ap} + j\omega M_{ap}, \end{aligned} \quad (15)$$

با توجه به اینکه در گره  $k$ -ام به قرار  $\sum_{j=1}^n u(j,k) = 0$  است، پس:

$$\sum_{j=1}^n \frac{p_j}{Z_{(j,k)}} - p_k \times \sum_{j=1}^n \frac{1}{Z_{(j,k)}} = 0 \quad (11)$$



شکل ۷ نمودار گره  $k$ -ام معادل برقی یک سامانه صوتی [۲۰].

مطابق شکل ۷ اگر یک دهانه ورودی هوا به وسیله یک لوله به گره (چندراهه)  $k$ -ام متصل شود مقاومت ظاهری الگوسازی شده  $Ze_k$  را از معادله (۱۱) به صورت زیر می‌توان بازنویسی کرد ( $Ze_k$  جایگزین  $Z_{(1,k)}$  می‌شود):

$$\sum_{j=2}^n \frac{p_j}{Z_{(j,k)}} - p_k \times \left( \frac{1}{Ze_k} + \sum_{j=2}^n \frac{1}{Z_{(j,k)}} \right) = -\frac{1}{Ze_k} \times p_1, \quad (12)$$

در رابطه فوق  $p_1$  فشار در ورودی دهانه هوا می‌باشد. به منظور ساده‌سازی روابط و به دست آوردن یک رابطه ماتریسی،  $[Y]$  ماتریس  $T_{\text{تقلیبت}}$  (ادمیتانس) ویژه مدار (با ماتریس  $T_{\text{تقلیبت}}$  (ادمیتانس) یک شبکه تفاوت دارد)،  $\{P_n\}$  بردار فشار گره‌های مدار،  $\left\{ \frac{1}{Z_{in}} \right\}$  بردار  $T_{\text{تقلیبت}}$  (ادمیتانس) دهانه‌های ورودی و در نهایت  $\{P_{in}\}$  بردار فشار در دهانه‌های ورودی فرض می‌شوند. در این حالت می‌توان گفت:

$$[Y] \cdot \{P_i\} = \left\{ \frac{1}{Z_{in}} \right\} \{P_{in}\}, \quad (13)$$

که مقادیر ماتریس‌ها عبارت‌اند از:

## ۳. نتایج شبیه‌سازی

روش الگوسازی برقی- صوتی برای ساختارهای لوله‌ای در بخش‌های قبل تشریح گردید. بر اساس روابط مذکور و با جایگذاری مقادیر پیش‌فرض (مندرج در جدول ۱) در روابط ارائه‌شده در بازه بسامدی ۰/۰۱ تا ۲۵ هرتز، نمودارهای پاسخ دامنه و پاسخ فاز آرایه مطابق شکل ۹ می‌باشند.

جدول ۱ مقادیر پیش‌فرض در الگوسازی صافی‌های لوله‌ای گلبرگی.

عنوان	مقدار	توضیح
نوع صافی	-	آرایه لوله چنددرگاه
آرایش هندسی	-	گلبرگی
دهانه	۱۸	متر
تعداد چندراهه‌ها	۴	عدد
طول لوله بلند	۵/۷۵	متر
طول لوله کوچک	۳/۲۵	متر
قطر لوله بلند و کوچک	۱/۲۷	اینچ
درگاه‌های یک چندراهه	۲۴	عدد
طول ورودی لوله حسگر	۳۰	میلی‌متر
شعاع ورودی لوله حسگر	۵	میلی‌متر
چگالی هوا	۱/۲۲۵	کیلوگرم بر مترمکعب
ضریب لزجت هوا	$18,6 \times 10^{-5}$	پاسکال در ثانیه
حجم جمع‌کننده	$0,3 \times 10^{-3}$	مترمکعب
حجم محفظه حسگر	$0,6 \times 10^{-3}$	مترمکعب
اتلاف محفظه حسگر	۵۰۰	اهم
اتلاف مدار معادل	$2,62 \times 10^5$	اهم
سرعت صدا در هوا	۳۴۳	متر بر ثانیه
حجم صافی مدخل درگاه	۰/۰۰۶	مترمربع
$M_{ad}$	$2,85 \times 10^4$	کیلوگرم بر مترمکعب
$C_{ad}$	$5,1 \times 10^{-11}$	مترمکعب بر پاسکال

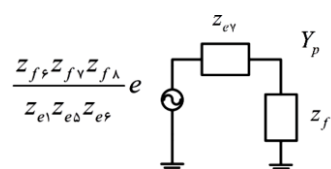
شکل ۹ نشان می‌دهد بدون احتساب تأثیر درگاه‌های ورودی و اثرات محیطی (مانند باد)، صافی گلبرگی ۱۸ متری حدوداً در ۱۲ هرتز، علامت ورودی را دچار بازآوایش می‌کند؛ این نکته منفی برای این نوع صافی‌ها نشان

$$Z_{mb} = Z_{ad} \parallel Z_{ab} .$$

در محاسبه تابع تبدیل،  $Z_{alt11}$  و  $Z_{alt12}$  مقاومت‌ظاهری لوله ثانویه و هم‌چنین،  $Z_{alt21}$  و  $Z_{alt22}$  مربوط به لوله اولیه می‌باشند. برای ساده‌سازی الگو و افزایش سرعت محاسبات، معادل‌سازی‌های رابطه زیر به کار رفته است.

$$\begin{aligned} Z_{e1} &= R_{apr} + j\omega M_{apr} + Z_{alt11} , \\ Z_{f1} &= Z_{e1} \parallel Z_{alt12} , \\ Z_{e2} &= Z_{f1} + Z_{alt11} , \\ Z_{f2} &= i\omega C_{avs} \parallel \underbrace{Z_{e2} \parallel \dots \parallel Z_{e2}}_{Nu} , \\ Z_{e2} &= Z_{f2} + Z_{alt21} , \\ Z_{f2} &= Z_{e2} \parallel Z_{alt22} , \\ Z_{e3} &= Z_{f2} + Z_{alt21} + R_{ap} + j\omega M_{ap} , \\ Z_{f3} &= i\omega C_{avs} \parallel \underbrace{Z_{e3} \parallel \dots \parallel Z_{e3}}_{Nu-1} , \\ Z_{ab} &= R_{ab} + \sqrt{j\omega C_{ab}} , \\ Z_{ad} &= R_{ab} + j\omega M_{ad} + \sqrt{j\omega C_{ad}} , \\ Z_{f3} &= Z_{ab} \parallel Z_{ad} \parallel \underbrace{Z_{e3} \parallel \dots \parallel Z_{e3}}_{m-1} . \end{aligned} \quad (16)$$

با تعاریف فوق و با استفاده از مدار معادل تونن و نورتن<sup>۱</sup> متعدد، مدار ساده‌شده شکل ۸ بدست می‌آید.



شکل ۸ مدار معادل آرایه پس از ساده‌سازی‌های متعدد تونن و نورتن.

در نتیجه به کمک این شکل و تقسیم ولتاژ رابطه ساده‌شده زیر برای تابع انتقال شبکه بدست می‌آید.

$$H(\omega) = \frac{Y_p}{e} = \frac{Z_{f3} Z_{f2} Z_{f1}}{Z_{e1} Z_{e2} Z_{e3}} \cdot \frac{Z_{f3}}{Z_{f3} + Z_{e3}} \quad (17)$$

نتیجه این تابع انتقال با نتیجه‌ای که از تحلیل گره در روش ماتریسی (بخش قبل) بدست آمد یکسان است، اما این روش دارای پیچیدگی محاسباتی کمتر و سرعت محاسبه بالاتر می‌باشد.

<sup>1</sup> Thévenin and Norton

درگاه و با درگاه در شکل ۱۰ توسط یک تابع چندجمله‌ای نمایی در رابطه (۱۸) تقریب زده می‌شود.

$$P(f) = (P_{Screened} - P_{OpenPipe}) = \dots$$

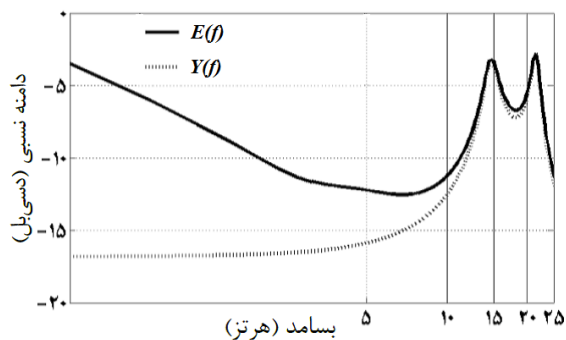
$$\dots 83e^{-\left(\frac{f+2.8}{2.2}\right)^2} - 0.46e^{-\left(\frac{2.5-f}{1.6}\right)^2} \dots \quad (18)$$

$$\dots - 3.2e^{-\left(\frac{4.5-f}{9.8}\right)^2} - 4.2e^{-\left(\frac{17.2-f}{15.7}\right)^2} - 6.2e^{-\left(\frac{44.6-f}{23.8}\right)^2}$$

کاهش نوفه شبیه‌سازی شده در نهایت برحسب تابعی از بسامد به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$E(f) = \frac{P(f)|Y(f)|}{|W(f)|}, \quad (19)$$

که در آن  $W(f)$  و  $Y(f)$  به ترتیب تبدیل فوریه  $y(t)$  (نوفه شبیه‌سازی بدون توجه به ورودی) و  $w_i(t)$  (نوفه باد منطقه بدون وجود صافی نوفه) می‌باشند. بدین ترتیب،  $E(f)$  به عنوان چگالی توان طیفی نوفه شبیه‌سازی شده با توجه به درگاه‌های ورودی ساخته شده، می‌باشد. پس، می‌توان شبیه‌سازی اولیه (شکل ۹) را نسبت به شبیه‌سازی جدید با در نظر گرفتن این دو مسئله در شکل ۱۱ مشاهده نمود.

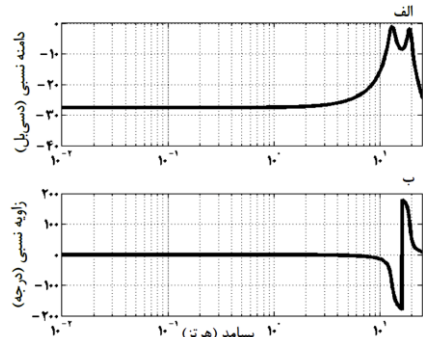


شکل ۱۱ مقایسه شبیه‌سازی ساختاری بدون اثر باد و درگاه ورودی ( $Y$ ) با حالتی که اثر آن‌ها در نظر گرفته شوند ( $E$ ).

#### ۴. نتایج تجربی (اندازه‌گیری میدانی)

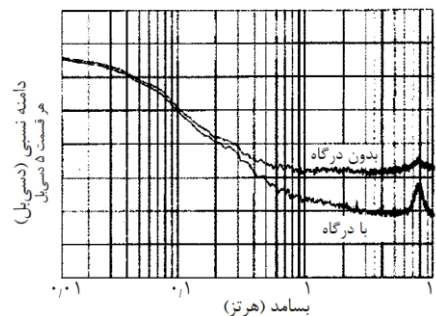
برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها آزمونی طراحی شد که می‌تواند شرایط واقعی اندازه‌گیری را ارائه دهد. بر همین اساس، نمونه اولیه‌ای از یک صافی ۱۸ متری گلبرگی با شرایط مندرج در جدول ۱ ساخته شد و در طی ۹۰ ساعت داده‌برداری مورد آزمون قرار گرفت. در این آزمون از یک حسگر افتراقی با قابلیت ثبت بسامدهای زیر

می‌دهد اگر اهداف رصدی در بسامدهای حوالی ناحیه بازآوایش ویژگی خاصی برای شناسایی داشته باشند، این صافی‌ها نمی‌توانند به درستی آن ویژگی را حفظ نمایند.



شکل ۹ الف) دامنه و ب) فاز، صافی ۱۸ متری گلبرگی ۹۶ ورودی.

تأثیر درگاه ورودی در تغییرات پاسخ دامنه و فاز سامانه پیش از این در مرجع [۱۲] بررسی شده و لذا با تخمین آماری قابل الگوسازی می‌باشد<sup>۱</sup>. درگاه‌های ورودی هوا با ۱۵ سانتی‌متر قطر توسط توری‌های مشبک محافظ یک میلی‌متری پوشش داده می‌شوند تا مانع از ورود اجسام خارجی به داخل لوله و انسداد آن گردند. مقایسه نوفه اندازه‌گیری شده در حالت وجود و عدم این درگاه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است که اختلاف این دو در بسامدهای بالای ۵ هرتز مشهود است.



شکل ۱۰ مقایسه طیف نوفه تولید شده در تونل باد (سرعت دو متر بر ثانیه) در حالت حضور و عدم حضور درگاه ورودی [۱۲].

اطلاعات این شکل نتایج یک آزمون عملیاتی بوده است که برای محاسبه اثر درگاه ورودی، اختلاف طیف نوفه بدون

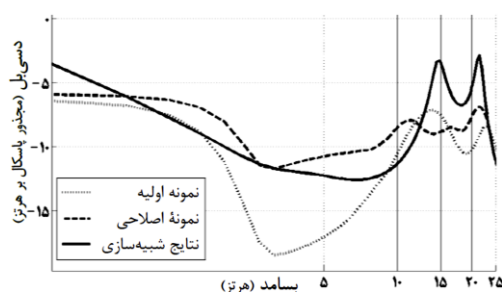
<sup>۱</sup> برای بهبود عملکرد یک صافی، لازم است ابتدای ورودی لوله‌ها به یک درگاه دوش مانند که مقاومت‌ظاهری پایینی ایجاد می‌کند متصل شود. این درگاه‌ها از مفتول‌های نازک و متراکم فولادی در هم تنیده پر شده‌اند که در اصطلاح به آن‌ها پشم فولاد زنگ‌نزن گفته می‌شود.

اصلی در شرایط محیطی آزمایش شده حدود ۱۰ دسی‌بل کاهش تراز فشار را نشان می‌دهد.

در بخش قبل مشاهده شد در شرایط تقریباً مشابه صافی‌های ۱۸ متری به‌طور متوسط ۱۵ دسی‌بل کاهش نوفه ایجاد می‌کنند، این مسئله نشان می‌دهد صافی ساخته‌شده (که با حداقل قیمت سرهم شده‌است)، می‌تواند با اصلاحاتی در اتصالات، تغییر جنس لوله‌ها و بهبود چندراهه‌ها به میزان مطلوب خود برسد.

در بخش‌های پیشین شبیه‌سازی صافی در شرایط مختلف انجام شد. بر این اساس، برای تشخیص موفقیت این شبیه‌سازی شکل ۱۴ ارائه شده‌است.

شکل ۱۴ نشان می‌دهد روند کلی شبیه‌سازی نسبت به شرایط واقعی قابل‌اعتماد می‌باشد. لازم به توضیح است برای مقایسه بین دو حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده، لازم بود شرایط یکسان‌سازی گردند. در بخش‌های پیشین، روش الگوسازی و نتایج شبیه‌سازی صافی گلبرگی ۱۸ متری ارائه گردیدند. در تفسیر شکل ۱۴ می‌توان اشاره کرد که در حالت شبیه‌سازی اولین بازآوایش ناشی از صافی ۱۸ متری در بسامد ۱۴/۸ پیش‌بینی شده‌است، در حالی که با کمی اختلاف این بازآوایش در حالت واقعی برای نمونه اولیه صافی واقعی در ۱۴ هرتز و در نمونه اصلاح‌شده در حدود ۱۲ هرتز رخ داده‌است. این نشان‌دهنده اختلاف کم شبیه‌سازی با حالت واقعی در جواب‌ها و همچنین صحت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد.

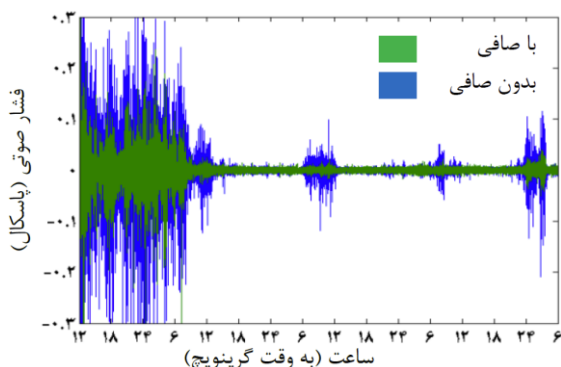


شکل ۱۴ مقایسه شبیه‌سازی پاسخ دامنه با داده‌های دریافتی از نتایج تجربی در طی دو داده‌برداری.

با تخمین میزان مشابهت نمودارهای موجود در شکل ۱۴ با استفاده از روش تخمین همبستگی متقابل (همبستگی-مقاطع)<sup>۵</sup>، مشاهده شد میزان همبستگی نوفه شبیه‌سازی

<sup>۵</sup> Cross-Correlation

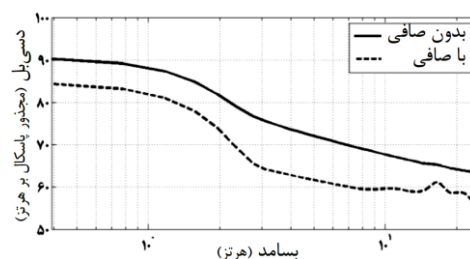
۱۵۰ هرتز، حساسیت<sup>۱</sup> ۰/۶ ولت بر پاسکال، بازه پویایی<sup>۲</sup> ۱۲۰ دسی‌بل و نوفه ذاتی<sup>۳</sup> ۰/۷۱ میکرو مجذور پاسکال بر هرتز استفاده شد. نمودار فشار برحسب زمان این آزمون در شکل ۱۲ تصویر شده‌است.



شکل ۱۲ نمایش حوزه زمان نوفه صوتی پشت زمینه در بازه زمانی اندازه‌گیری تجربی.

در شکل ۱۲ مشخص است که با استفاده از صافی، تراز فشار در نوفه‌های زیاد به میزان فراوانی کاهش می‌یابد. اما در نوفه‌های کم (در شرایط بی‌بادی) تراز فشار نوفه اندازه‌گیری شده در حسگر شاهد (بدون صافی) و تراز فشار حسگر دارای صافی تقریباً یکسان هستند.

برای درک بهتر میزان تأثیر صافی در نوفه دریافتی، مشاهده و مقایسه نمودار چگالی طیف توان<sup>۴</sup> این دو حسگر در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳ نمودار چگالی طیف توان حسگر شاهد و حسگر دارای صافی ۱۸ متری گلبرگی در شرایط یکسان.

در نمودار فوق به‌خوبی می‌توان اثر بازآوایش را در بسامد حدود ۱۶ هرتز مشاهده نمود. هم‌چنین، به‌طور متوسط در بازه بسامدی ۱ تا ۱۵ هرتز، این صافی نسبت به علامت

<sup>۱</sup> Sensitivity

<sup>۲</sup> Dynamic Range

<sup>۳</sup> Self noise

<sup>۴</sup> Power Spectral Density

طول موج علائم موردنظر بسیار کم‌تر بودند). سپس، بر این اساس، استفاده از روش الگوسازی برقی - صوتی پیشنهاد گردید. در این الگوسازی ابتدا تک‌تک اجزای صافی با اجزایی از یک مدار معادل برقی جایگزین شدند. سپس، تابع تبدیل مدار معادل کل به دو روش ماتریسی و معادل‌گذاری محاسبه شد و پاسخ دامنه و فاز سامانه در حوزه بسامد محاسبه گردیدند. در نهایت، با اضافه کردن اثر درگاه‌های ورودی شبیه‌سازی کامل گردید. در بخش نهایی با نمونه عملی ساخته و آزمایش شده در شرایط واقعی مقایسه شد. نتایج مقایسه نشان دادند که با صرف‌نظر از خطاهای موجود در اندازه‌گیری به نسبت شبیه‌سازی، استفاده از روش برقی-صوتی می‌تواند این سامانه‌ها را الگوسازی نموده و نتایج حاصل را با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی قابل قبول کند.

#### ۶. فهرست منابع

- [1] A. Keiling, D.N. Lee, V. Nakariakov, "Low-Frequency Waves in Space Plasmas," John Wiley and Sons, 2016.
- [2] N. Popper, A. Hawkins, "The Effects of Noise on Aquatic Life II," Springer, 2015.
- [3] R.W. Whitaker, "Infrasound Monitoring," In Phillips Lab Monitoring Symposium, USA, 1995.
- [4] D. Christie, P. Campus, "The IMS infrasound network: Design and establishment of infrasound stations," Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, 2010.
- [5] A.E. Gelfand, P.J. Diggle, P. Guttorp, "Handbook of Spatial Statistics," Taylor and Francis Group, London, 2010.
- [6] G.I. Taylor, "The spectrum of turbulence," Proceedings Royal Society, vol. A164, pp. 476-490, 1938.
- [7] K.T. Walker, M.A.H. Hedlin, "A review of wind-noise reduction methodologies," Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, 2010.
- [8] F.B. Daniels, "Noise-reducing line microphone for frequencies below 1 cps," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 31, pp. 529, 1959.
- [9] R. Burridge, "The acoustics of pipe arrays," Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, vol. 26, pp. 53-69, 1971.
- [10] F.H. Grover, "Experimental noise reducers for an active microbarograph array,"

شده با صافی نوفه اولیه ۷۱/۸۲٪ و همان نوفه شبیه‌سازی شده با صافی اصلاح شده ۸۰/۴۶٪ می‌باشد<sup>۱</sup>. در اندازه‌گیری انجام شده موارد متعددی از عوامل ایجاد خطا وجود داشته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها موارد زیر هستند:

۱. وجود علامت‌های گذرا و/یا دائمی ناشناخته (به جز باد) که در تمام مدت اندازه‌گیری حضور داشتند.
  ۲. با کیفیت نبودن صافی لوله‌ای بکار گرفته شده<sup>۲</sup>
  ۳. آرمانی نبودن پاسخ بسامدی رقومی‌کننده بکار گرفته شده که باعث می‌گردد علامت برقی دریافتی در رایانه با موج مکانیکی قیاسی خروجی حسگر به‌طور صد درصد مشابهت نداشته باشد.
  ۴. خطای انسانی در نصب و راه‌اندازی صافی نسبت به نمونه شبیه‌سازی شده.
- با توجه خطاهای فوق‌الذکر و همچنین وجود عدم قطعیت در اندازه‌گیری می‌توان تفاوت حدوداً ۲۰ درصدی بین چگالی توان طیفی شبیه‌سازی مقاله با نمونه واقعی را توجیه‌پذیر دانست.

#### ۵. بحث و نتیجه‌گیری

مهم‌ترین چالش دریافت داده‌های پایین- بسامد، هم‌بسامدی با موج ناشی از گردابه‌های خود-متشابه موجود در بادهای سطحی می‌باشد. این نوفه‌ها از اندرکنش جریان‌های آشفته با یکدیگر حاصل می‌شوند و باید آن‌ها را کاهش داد. برای کاهش اثر این پدیده، یکی از راه‌حل‌ها استفاده از صافی‌های لوله‌ای بسامد-پایین می‌باشد که از راه‌کار میانگین‌گیری مکانی برای کاهش اثرات نوفه باد استفاده می‌کنند.

در این مقاله، ابتدا اجزای یک صافی لوله‌ای به‌صورت سامانه فشرده فرض شدند (زیرا ابعاد آن‌ها نسبت به

<sup>۱</sup> صافی ساخته شده ابتدا ضعف‌هایی در ساخت داشت که بعد از آزمایش اولیه، اصلاح شد و در سردوشی‌ها و همچنین کیفیت لوله‌ها و نوع پایه‌های آن تغییراتی انجام شد؛ لذا منظور از نمونه اولیه و اصلاحی در این مقاله اشاره به این مورد است.

<sup>۲</sup> به دلیل هزینه بالای تولید صافی طراحی شده، در این پژوهش سعی گردید تا حد امکان از قطعات موجود در بازار که حداکثر شباهت به طراحی آرمانی را داشته باشند استفاده گردد. لذا درصد بالایی از این تفاوت، ناشی از عدم یکسان بودن صددرصدی صافی پیاده‌سازی شده در عمل، با صافی طراحی شده آرمانی می‌باشد.

- Army Research Laboratory, USA, MD 20783-1197, 2014.
- [15] S.L. Collier, R. Raspet, J.M. Noble, J. Webster "Analysis of wind noise reduction by semi-porous fabric domes," Journal of Acoustical Society of America, 2014.
- [16] M.H. Hedlin, B. Alcoverro "The use of impedance matching capillaries for reducing resonance in rosette infrasonic spatial filters," Journal of Acoustical Society of America, vol. 117, pp. 1880-1888, 2005.
- [17] T.M. Marston, "Infrasonic Pistonphone Calibration," PhD Thesis, Pennsylvania State University, USA, 2009.
- [18] G.P. Scavone, "An acoustic analysis of single-reed woodwind instruments with an emphasis on design and performance issues and digital waveguide modeling techniques," PhD Thesis, Department of Music, Stanford University, 1997.
- Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, vol. 26, pp. 41-52, 1971.
- [11] B. Alcoverro, "Acoustic filters design and experimental results," Commissariat à l'Énergie, Bruyères-le-Châtel, Proceedings Workshop on Infrasound, France, pp. 21-24, 1998.
- [12] B. Alcoverro, A.L. Pichon, "Design and optimization of a noise reduction system for infrasonic measurements using elements with low acoustic impedance," Journal of Acoustical Society of America, vol. 117, pp. 1717-1727, 2005.
- [13] M.H. Hedlin, R. Raspet, "Infrasonic wind noise reduction by barriers and spatial filters," Journal of Acoustical Society of America, vol. 114, pp. 1379-1386, 2003.
- [14] J.M. Noble, R. Raspet and others, "Wind Noise Suppression for Infrasound Sensors,"