

12. ULUSAL AKUSTİK KONGRESİ ve SERGİSİ
İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ, URLA, İZMİR
14-15 Eylül 2017

**KÜÇÜK BOYUTLU VEKTÖR ALGILAYICI DİZİNLER: DENEYLER
VE DOĞRULAMA**

Berke Gür

Bahçeşehir Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye
Tel: 212 381 05 56, e-posta: berke.gur@eng.bau.edu.tr

ÖZET

Vektör algılayıcılar, tek bir noktadaki akustik basınç ve parçacık hızı hareketlerini ölçme kabiliyetine sahip yeni nesil algılayıcılardır. Bu özellikleri sayesinde, tek bir vektör algılayıcı ile akustik enerji akış yönü ve büyüklüğünü ölçmek mümkündür. Daha önceki çalışmalarda çembersel vektör algılayıcı dizinleri için akustik alanın kiplerine dayalı hüzme oluşturma yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerde hüzme örüntüsü, dizin boyunca yapılan ölçümlerden çekilen ‘akustik alan kiplerinin’ uygun biçimde birleştirilmesi ile elde edilir. Bu bildiride, çembersel vektör algılayıcı dizinler için geliştirilen hüzme oluşturuçuların doğrulanması amacı ile gerçekleştirilen deneyler açıklanmaktadır. Öncelikle, algılayıcıların kalibrasyonun izlenen yöntemler açıklanmıştır. Ardından, elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Söz konusu hüzme oluşturuçuların öncelikli uygulama alanları olarak savunma sanayi uygulamalarına yönelik pasif akustik dinleme sistemleri olması öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Vektör algılayıcılar, dizin işaret işleme, hüzme oluşturuçucu, akustik alan kipleri.

**COMPACT VECTOR SENSOR ARRAYS: EXPERIMENTS AND
VALIDATION**

ABSTRACT

Vector sensors are directional acoustic sensors that can make collocated measurements of both the acoustic pressure and the particle velocity, thereby enabling the determination of the acoustic energy flow at a point. Recently, several novel beamforming methods have been proposed that enable the development of compact circular vector sensor arrays with inter-sensor spacing much less than the traditional spacing of one-half the design wavelength. These methods rely on the extraction and processing of the so-called ‘acoustic modes’ of the sound field. In this paper, a compact circular array constructed from miniature 1-D acoustic vector sensors is described. The performance of the array is experimentally evaluated in terms of directivity and compared to theoretically predictions.

Keywords: Vector sensors, array signal processing, beamforming, acoustic field modes.

1. GİRİŞ

Akustik vektör algılayıcılar (AVA), mikrofon veya hidrof fonların ölçebildiği skaler bir değişken olan basınca ek olarak akustik alandaki çok küçük boyutlu kütsel ivme [1] veya parçacık hızını [2] ölçebilen yeni nesil algılayıcılarıdır. Parçacık hızının vektörel (yönsel) bir alan değişkeni olması sebebi ile vektör algılayıcılar kullanılarak akustik alan hakkında daha fazla bilgi toplamak mümkündür. Bu sebeple AVA dizinleri, yönsel olmayan basınç algılayıcılarından oluşan geleneksel pasif doğrusal dizinlere kıyasla daha yüksek yönselliğe sahiptir [3]. Bu karşılaştırmada varsayılan doğrusal geciktir-ve-topla hüzmeye oluşturunun yerine doğrusal olmayan dizin işaret işleme yöntemlerinin kullanılması durumunda yönsellik kazanımı daha da artmaktadır [4]. Basınç algılayıcıların AVA'lar ile değiştirilmesi ile yönsellik bakımından iyileşmeler sağlanmakla birlikte, geleneksel geciktir-ve-topla hüzmeye oluşturma yöntemine dayalı bu yaklaşımlarda özellikle düşük frekanslarda yüksek yönselliğin elde edilmesi için oldukça geniş algılayıcı açıklıklarına ve dolayısı ile de büyük boyutlu dizinlere olan mahkûmiyet ortadan kalkmamaktadır. Bu durumda, söz konusu dizinlerin pratik uygulamalarda kullanımında sorunlara yol açmaktadır.

Düşük frekanslarda büyük boyutlu geleneksel dizinler ile benzer yönsellik başarımının elde edilmesi için akustik alanın kiplerine dayalı hüzmeye oluşturunlar önerilmiştir [5], [6]. Bu hüzmeye oluşturunlar, akustik alanın yüksek yönselliğe sahip kiplerinin dizin boyunca yapılan ölçümlerden çekilmesi ve bu kiplerin uygun bir şekilde bir araya getirilmesine dayalıdır. Doğrusal AVA dizinleri için kipsel hüzmeye oluşturun bu bildirinin yazarı tarafından önerilmiştir [7]. Bilimsel yazımda küçük çembersel dizinler için radyal ve çevresel yönde parçacık hızını ölçebilen 2-B AVA'lara dayalı kipsel bir hüzmeye oluşturun yer almaktadır [8]. Yakın bir zamanda ise, yine bu bildirinin yazarları tarafından 1-B çembersel AVA dizinlerine yönelik bir kipsel hüzmeye oluşturun betimlenmiştir [9]. Bu bildiri de, söz konusu bu 1-B parçacık hızı algılayıcılarına dayalı kipsel hüzmeye oluşturun ile elde edilen öncü deneysel sonuçlar paylaşılmaktadır. Bu deneylerden görüldüğü üzere, önerilen hüzmeye oluşturun kuramsal sonuçlara oldukça yakın bir yönsellik başarımı göstermektedir.

2. ÇEMBERSSEL VEKTÖR ALGILAYICI DİZİNLER

Bu bölümde, öncelikle çembersel bir vektör algılayıcı dizinde ölçülen akustik işaretler, ardından da basınç ve 1-B parçacık hızı algılayıcısı için geliştirilen kipsel hüzmeye oluşturunlar açıklanmaktadır.

2.1. Çembersel Dizinin Boyunca Akustik Alan

Şekil 1'de gösterildiği gibi merkezinde Kartezyen koordinat sistemi yer alan M adet 1-B vektör algılayıcıdan oluşan a yarıçapına sahip bir çembersel dizin varsayılmıştır. Vektör algılayıcıların her biri konumlandırıldıkları noktadaki akustik basıncı ve radyal (merkezden dışa doğru) yöndeki parçacık hızını ölçebilmektedir. Parçacık hızı ölçüm yönü Şekil 1'de \hat{e}_r birim vektörü ile gösterilmiştir. Dizinin iraksak alanında bulunan bir kaynaktan (ψ_0, θ_0) yanca ve yükseklik açısından gelen $k = \omega/c$ dalga sayısına sahip bir zaman-harmonik ses dalgası da aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Burada $\omega = 2\pi f$ sesin açısal frekansını, c ise ses hızını ifade etmektedir. Dizinin üzerinde $\mathbf{r}_m = [r_m = a \quad \psi_m = 2\pi m/(M-1) \quad \theta_m = 0]^T$ küresel koordinatlarında yer alan bir akustik vektör algılayıcısının basınç kanalının ölçümü

$$p_m = P \exp[ika \cos \theta_0 \cos(\psi_m - \psi_0)] \quad (1)$$

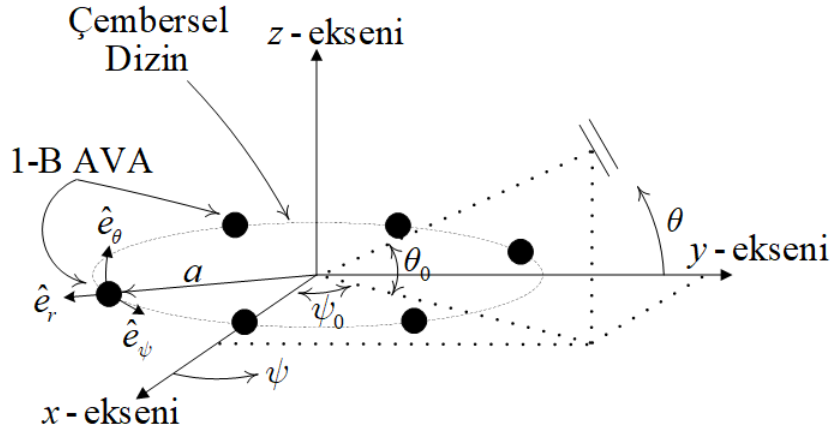
olarak gerçekleşir. Denklem (1)'de $i = \sqrt{-1}$ karmaşık sayısını, P basınç genliğini ifade etmekte, $m=0,1,\dots,M-1$ ise algılayıcıları dizinlemede kullanılmaktadır. Bu denklemde basınç alanının zamana bağlı bileşeni olan $\exp(i\omega t)$ sadeleştirme amacı ile ihmal edilmiştir. Jacobi-Anger açılımı kullanılarak basınç, akustik alanın kipleri cinsinden yazılabilir

$$p_m = P \cdot \sum \varepsilon_n i^n J(ka \cos \theta_0) \cos[n(\psi_m - \psi_0)]. \quad (2)$$

Denklem (2)'de $J_n(\cdot)$ birinci türden Bessel işlevini ifade etmektedir. Bu denklemde yer alan ε_n katsayısı ise $\varepsilon_0 = 1$ ve $\varepsilon_n = 0$, $n \neq 0$ olarak tanımlanmaktadır. Basınçtan parçacık hızına geçişte $\rho \cdot \partial \bar{v}(\mathbf{r}, t) / \partial t = -\bar{\nabla} \cdot p(\mathbf{r}, t)$ olarak yazılan Euler denkleminden faydalanılır. Burada \bar{v} parçacık hızı vektörünü, ρ ortam öz kütleliğini, kutupsal koordinatlarda $\bar{\nabla} = (\partial/\partial r) \cdot \hat{e}_r + (1/r \cos \theta) \cdot (\partial/\partial \psi) \cdot \hat{e}_\psi + (1/r) \cdot (\partial/\partial \theta) \cdot \hat{e}_\theta$ olarak tanımlanan ise değişim (gradyan) operatörünü temsil etmektedir. Değişim operatörünün açılımında \hat{e}_r daha önceden tanımlandığı üzere radyal yöndeki, \hat{e}_ψ ve \hat{e}_θ ise çevresel ve yükseklik yönlendeki birim vektörleri temsil etmektedir (bkz. Şekil 1). Denklem (2) ve Euler denkleminin bir araya getirilmesi ile m . algılayıcıda kutupsal koordinatlarda radyal yöndeki akustik parçacık hızı

$$v_{r,m} = -V \cos \theta_0 \sum \varepsilon_n i^{n+1} J'_n(ka \cos \theta_0) \cos[n(\psi_m - \psi_0)] \quad (3)$$

olarak elde edilir. Denklem (3)'te yer alan $V = P/(\rho c)$ gelen düzlemsel dalganın parçacık hızı genliğini, $J'_n(\cdot)$ ise Bessel işlevinin türevini ifade etmektedir.



Şekil 1. M adet 1-B vektör algılayıcıdan oluşan çembersel dizin ve bu dizine gelen düzlemsel ses dalgası.

2.2. Basınç Algılayıcı Diziner için Kipsel Hüzme Oluşturucu

Bu bölümde, basınç algılayıcılarından oluşan açık çembersel dizinlerde uygulanabilecek kipsel hüzme oluşturucu, Franklin'in türetimleri doğrultusunda açıklanmıştır [5]. Kipsel hüzme oluşturucular üç aşamada uygulanmaktadır: 1) ölçümlerden kiplerin çıkartılması, 2) kip güçlerinin dengelenmesi ve 3) kiplerin birleştirilerek istenen hüzmenin oluşturulması. İlk aşama olan kiplerin çıkartılmasında

$$X(l) = \sum_{m=0}^{M-1} x_m \exp(i2\pi ml/M) \quad (4)$$

olarak tanımlanan ayrık uzaysal Fourier dönüşümünden faydalanılmaktadır. Denklem (4)'te $l=0,1,\dots,M-1$ uzaysal frekans indekslerini göstermektedir. Uzaysal Fourier dönüşümünün denklem (2)'de verilen basınç ölçümlerine uygulanması ile pozitif uzaysal indeksler olan $l=0,1,\dots,L$ için

$$P(l) \approx P i^l J_l(ka \cos \theta_0) M \exp(-il\psi_0) \quad (5)$$

olarak ifade edilen Fourier katsayıları elde edilir. Akustik alan hakkında ek bir bilgi içermedikleri için negatif indeksler olan $l=L+1,L+2,\dots,M-1$ ihmal edilmiştir. En yüksek Fourier katsayı indeksi, M 'in tek olduğu durumlarda $L=(M-1)/2$, çift olduğu durumlarda ise $L=M/2-1$ olarak elde edilmektedir. Buradan görüleceği üzere dizinde tek sayıda veya bu tek sayıdan bir fazla çift sayıda algılayıcı kullanılması, elde edilebilen Fourier katsayılarının üst indeksini (L) değiştirmemektedir. Bu durumda, algılayıcı sayısı sabit olan dizinlerin tek sayıda algılayıcı ile tasarlanması daha uygun olacaktır. Ancak algılayıcı sayısı değiştirilebilen, esnek dizin tasarımı için çift sayıda algılayıcı tercih edilmesi daha uygundur. Denklem (5)'nin türetimi yer darlığından dolayı burada açıklanmamıştır. Ancak bu türetimdeki yaklaşık eşitliğin geçerli olması için $ka \leq 1$ koşulunun sağlanması gerekmektedir. Bu koşul, herhangi bir a yarıçapına sahip dairesel dizin kullanılarak işlenebilecek akustik dalgaların üst frekans limitini $f \leq c/(2\pi a)$ olarak belirlemektedir.

Fourier katsayılarının indeksleri arttıkça bu katsayılara karşılık gelen kiplerin güçleri azalmaktadır. Bu sebeple, elde edilen Fourier katsayıları önce $b_p(l) = [i^l J_l(ka)M]^{-1}$ katsayıları ile çarpılarak güçleri dengelenir. Ardından, katsayıların gerçek ve karmaşık kısımları alınarak sırası ile

$$\begin{aligned} \text{Re}[b_p(l) \cdot P(l)] &= P \frac{J_l(ka \cos \theta_0)}{J_l(ka)} \cos(l\psi_0) \\ \text{Im}[b_p(l) \cdot P(l)] &= -P \frac{J_l(ka \cos \theta_0)}{J_l(ka)} \sin(l\psi_0) \end{aligned} \quad (6)$$

ile ifade edilen akustik basınç alanının derecesi ile artan yönselliğe sahip kosinüs ve sinüs kipleri elde edilir.

Üçüncü ve son aşama olan yönlendirilebilir hüzme oluşturulmasında, bir önceki aşamada elde edilen kosinüs ve sinüs kiplerine

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{\text{Re}} &= [\tilde{w}_0 \quad \tilde{w}_1 \cos \psi_s \quad \dots \quad \tilde{w}_L \cos(L\psi_s)]^T \\ \mathbf{w}_{\text{Im}} &= [0 \quad -\tilde{w}_1 \sin \psi_s \quad \dots \quad -\tilde{w}_L \sin(L\psi_s)]^T \end{aligned} \quad (7)$$

süzgeçleri uygulanarak ana hüzmenin ψ_s yanca yönüne yönlendirilmesi sağlanır. Denklem (7)'da yer alan \tilde{w}_l katsayısı, hüzme oluşturulmasında her kipe verilen ağırlıktır. Ayrıca, ana hüzmenin akustik dalganın geldiği yöne yönlendirildiği durumda, hüzme oluşturucunun birim tepki vermesi için dizin çıktısına $\sum_{l=0}^L \tilde{w}_l$ ile ifade edilen ek bir düzeltme uygulanır. Bu

durumda, dizin düzleminde ($\theta_0 = 0$) gelen bir akustik dalgaya dizinin tepkisi, merkezinde yer alan eş-yönlü bir basınç algılayıcısına göreceli olarak

$$R(\psi_s) = \frac{\sum_{l=0}^L \tilde{w}_l \cos[l(\psi_s - \psi_0)]}{\sum_{l=0}^L \tilde{w}_l} \quad (8)$$

olarak gerçekleşir.

2.3. 1-B Parçacık Hızı Algılayıcı Dizinler için Kipsel Hüzme Oluşturucu

Parçacık hızı ölçümleri ile gerçekleştirilen kipsel hüzme oluşturucular, bir önceki bölümde verilen basınç algılayıcı dizin hüzme oluşturucuları ile önemli benzerlikler göstermektedir. Bu yaklaşımda, dizinin sadece radyal yönde ölçüm yapabilen 1-B parçacık hızı algılayıcılarından oluştuğu kabul edilir. Bu algılayıcılarda yapılan ölçümler denklem (3)'te verilmiştir. Radyal doğrultudaki parçacık hızı ölçümlerine denklem (4)'da verilen uzaysal Fourier dönüşümünün uygulanması ile

$$Y_r(l) \approx -Vi^{l+1} \cos \theta_0 J'_l(ka \cos \theta_0) M \exp(-il\psi_0) \quad (9)$$

olarak açılabilen $l = 0, 1, \dots, L$ dereceli Fourier katsayıları elde edilir. Bu Fourier katsayıları $b_r(l) = -[i^{l+1} J'_l(ka) M]^{-1}$ oranları ile dengelenerek

$$\begin{aligned} \text{Re}[b_r(l) \cdot Y(l)] &= V \frac{J'_l(ka \cos \theta_0)}{J'_l(ka)} \cos(l\psi_0) \\ \text{Im}[b_r(l) \cdot Y(l)] &= -V \frac{J'_l(ka \cos \theta_0)}{J'_l(ka)} \sin(l\psi_0) \end{aligned} \quad (10)$$

ile ifade edilen radyal akustik parçacık hızı alanının kosinüs ve sinüs kipleri elde edilir. Basınç algılayıcıları kipsel hüzme oluşturucularda kullanılan ve denklem (7)'de verilen yönlendirme süzgeç katsayıları kullanılarak elde edilen yönlendirilebilir dizin tepkisi yine basınç algılayıcı dizinler için denklem (8)'de verilen ile aynı olmaktadır.

Bir düzlemde gelen bir akustik dalgaya basınç ve 1-B parçacık hızı algılayıcılarından oluşturulan dairesel dizinlerin tepkileri aynı çıkmaktadır. Ancak, bir sonraki bölümde gösterileceği üzere parçacık hızı ölçümlerine dayalı dizinlerin beyaz Gauss gürültüsüne daha dirençli olmaları sebebi ile dizin başarımları daha iyidir.

3. BAŞARIM ANALİZİ

Akustik dizinlerin en önemli başarımlar ölçütlerinden birisi olan dizin kazanımı (DK), dizinin eş-yönlü tek bir basınç algılayıcısına göre işaret-gürültü oranındaki sağlanan iyileşme olarak tanımlanmaktadır. DK değerine etki eden iki önemli etken yönsellik çarpanı (YÇ) ve beyaz gürültü kazanımıdır. Bu bölümde, başarımlar analizi deneysel doğrulamaların temelini oluşturan YÇ cinsinden irdelenmiştir. Beyaz gürültü kazanımına ilişkin analizler ise daha önceki bir çalışmada açıklanmıştır [9].

Yönsellik çarpanı (YÇ), birden fazla algılayıcıdan oluşan dizinin bu algılayıcılardan elde ettiği ölçümleri işleyerek yön bakımından seçici dinleme yapabilme kabiliyetinin ölçüsüdür. Matematiksel olarak

$$Y\mathcal{C} = \frac{\int_0^{2\pi} d\psi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\theta \cdot F(\psi, \theta) \cos \theta}{\int_0^{2\pi} d\psi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\theta \cdot B(\psi, \theta) F(\psi, \theta) \cos \theta} \quad (11)$$

oranı ile hesaplanmaktadır. Denklem (11)'te $F(\psi, \theta)$ gürültü alanının yönsel yeğinliğini [5], $B(\psi, \theta) = |R(\psi, \theta)|^2$ ise dizinin yönsel tepki gücünü göstermektedir. 2-B ve 3-B eş-yönlü gürültü alanları için yönsel yeğinlik, sırasıyla $F_{2-B}(\psi, \theta) = \delta(\theta)$ ve $F_{3-B}(\psi, \theta) = 1$ 'dir. Bir önceki bölümde türetilen basınç ve parçacık hızı kipsel hüzme oluşturucuların dizin tepkileri aynı olup denklem (8)'de verilmiştir. Dolayısı ile, her iki dizinin de yönsel tepki güçleri aynıdır. Denklem (8)'de verilen dizin tepkisi ve $F(\psi, \theta)$ olarak ifade edilen gürültü yönsel yeğinlik değerlerinin denklem (11)'e yerleştirilmesi ile 2-B ve 3-B gürültü alanlarındaki kipsel hüzme oluşturucuların $Y\mathcal{C}$ 'leri elde edilir.

Dikkate alınması gereken bir diğer önemli etken de kiplerin alacağı ve \tilde{w}_l katsayıları ile temsil edilen ağırlıklardır. En temel yaklaşımda, her kip için eşit ağırlık (örneğin, $\tilde{w}_l = 1$) varsayılabılır. 2-B gürültü alanı için eşit kip ağırlıkları kullanılması durumunda denklem (11) sadeleşerek $Y\mathcal{C}_{2-B, \text{eşit}} = 2(L+1)^2 / L+2$ halini alır. Eşit kip ağırlıkları varsayımı altında 3-B gürültü alanı için ise

$$Y\mathcal{C}_{3-B, \text{eşit}} = \frac{4(L+1)^2}{\sum_{l=0}^L (\mu_l D_l)} \quad (12)$$

olarak hesaplanır. Denklem (12)'da μ_l katsayısı $\mu_0 = 2$ ve $\mu_l = 1, l \neq 0$ şeklinde ifade edilir. Ayrıca, $D(l)$ katsayısı

$$D(l) = \sqrt{\pi} \cdot \frac{\Gamma(l+1)}{\Gamma(l+3/2)} \quad (13)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $\Gamma(\cdot)$ gama işlevidir. Eşit kip katsayıları temel bir yaklaşım olmakla birlikte, olabilecek en iyi $Y\mathcal{C}$ 'yi vermemektedir. Buna alternatif olarak, mümkün olan azami $Y\mathcal{C}$ değerini sağlayan kip ağırlıkları tercih edilebilir. Azami $Y\mathcal{C}$ 'yi veren bu kip ağırlıkları, $Y\mathcal{C}$ için kip ağırlıkları cinsinden çok değişkenli en iyileme problemi olarak çözümlenebilir. Bunun sonucunda, 2-B gürültü alanı için azami $Y\mathcal{C}$ 'yi veren kip ağırlıkları

$$\tilde{w}_{2-B, \text{azami}}(l) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } l = 0 \\ 2 & \text{diğer kipler} \end{cases} \quad (14)$$

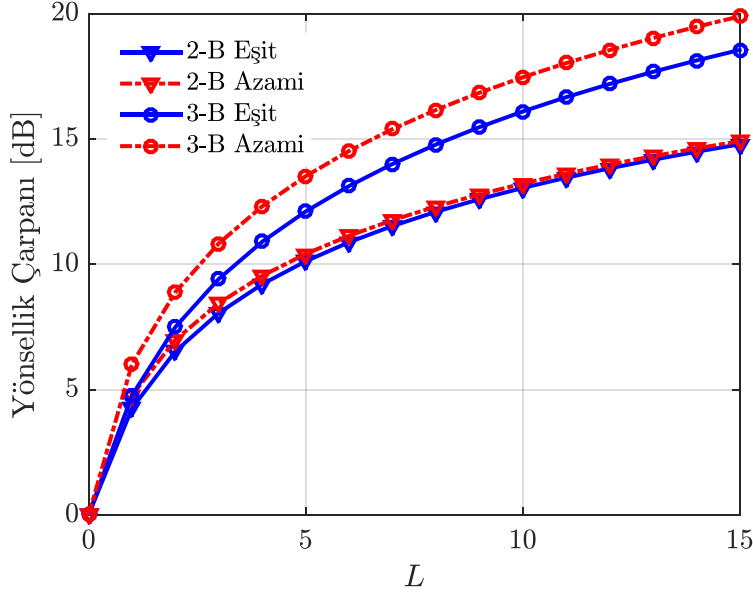
olarak hesaplanır. Bu durumda $Y\mathcal{C}_{2-B, \text{azami}} = 1 + 2L$ olarak gerçekleşir. 3-B gürültü alanı için ise bu ağırlıklar

$$\tilde{w}_{3-B, \text{azami}}(l) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } l = 0 \\ \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Gamma(l+3/2)}{\Gamma(l+1)} & \text{diğer kipler} \end{cases} \quad (15)$$

şeklinde hesaplanır. 3B gürültü alanı için azami yönsellik

$$Y_{\mathcal{C}_{3-B,azami}} = 1 + \sum_{l=1}^L \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Gamma(l+3/2)}{\Gamma(l+1)} \quad (16)$$

değerine ulaşır. Elde edilen YÇ değerlerinin kip derecesine (L) göre değişimi, Şekil 2’de gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi 2-B eş-yönlü gürültü alanı için kayda değer bir iyileşme görülmemekle birlikte, 3-B gürültü alanlarında uygun kip ağırlıkları kullanılarak YÇ ortalama 1,5 dB kadar iyileştirilebilmektedir.



Şekil 2. Kip derecesi (L) ve gürültü alanına göre elde edilen YÇ değerleri.

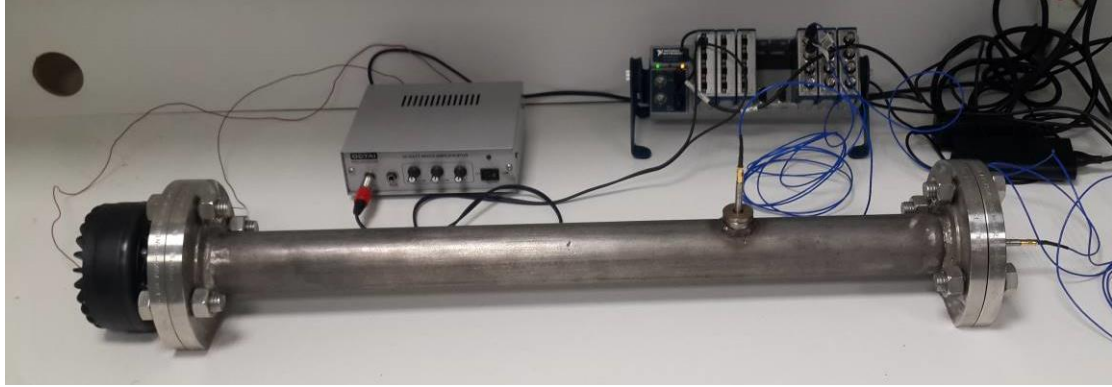
3. DENEYSEL DOĞRULAMALAR

Önerilen çembersel vektör algılayıcı dizinler için kipsel hüzme oluşturucunun doğrulanması için Microflown Technologies firması tarafından geliştirilen PU Mini tipi 1-B AVA kullanılmıştır. Söz konusu PU Mini tipi AVA, anemometre prensibi ile çalışan 1-B mikro elektromekanik parçacık hızı algılayıcısı ve düşük maliyetli bir basınç algılayıcısının bir arada barındırmaktadır (bkz.). Genellikle bu AVA’lar ait kalibrasyon bilgileri algılayıcı ile birlikte üretici tarafından sunulmaktadır. Ancak deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere tedarik edilen PU Mini AVA’larına ait kalibrasyon bilgileri üretici firma tarafından verilmemiştir. Bu sebeple, söz konusu AVA’lar dizinde kullanılmadan önce kalibrasyon edilmeleri zorunlu hale gelmiştir.

3.1. Kalibrasyon Düzenegi

PU Mini AVA’larının kalibrasyonu için paslanmaz çelikten bir duran dalga tüpü tasarlanıp üretilmiştir. Tüpün iç çapı $\phi_c = 52$ mm, duvar kalınlığı 4 mm, uzunluğu ise $l = 740$ mm’dir. Bu tasarımın üst frekans limiti $f_{üst} = c/(1,7\phi_c) = 4$ kHz olarak kestirilmektedir. Her iki uca kaynatılan flanşlar sayesinde, tüpün bir ucuna bir akustik kaynak, diğer zıt ucuna ise önceden kalibre edilmiş bir referans mikrofonu sabitlemek mümkün olmaktadır. Ayrıca, referans mikrofonu tarafından 220 mm uzaklıkta tüpe açılan bir delik ile kalibrasyonu gerçekleştirilecek AVA’ları monte edilmektedir. Alt frekans limitini mümkün olduğunda aşağıya çekebilmek için kaynak ve algılayıcı bağlantı noktalarındaki hava kaçaklarının

azaltılması için o-ring'ler kullanılmıştır. Kullanılan kalibrasyon düzeneği Şekil 3'te gösterilmiştir.



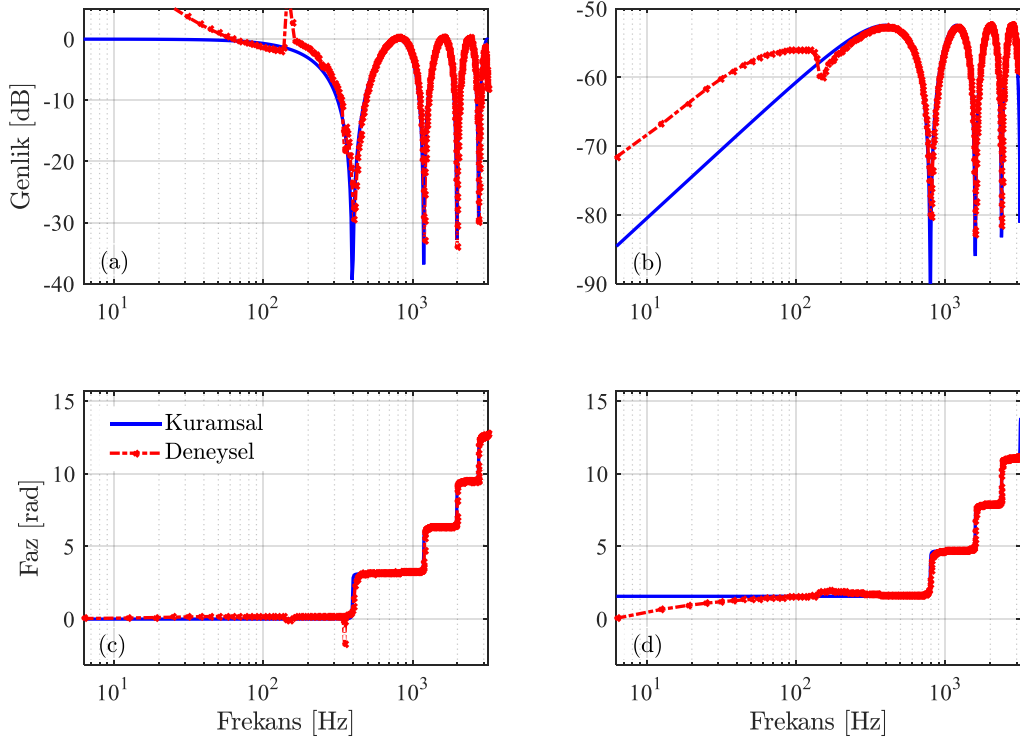
Şekil 3. AVA'ların kalibrasyonu için geliştirilen kapalı uçlu duran dalga tüpü deney düzeneği.

3.2. AVA'ların Kalibrasyonu

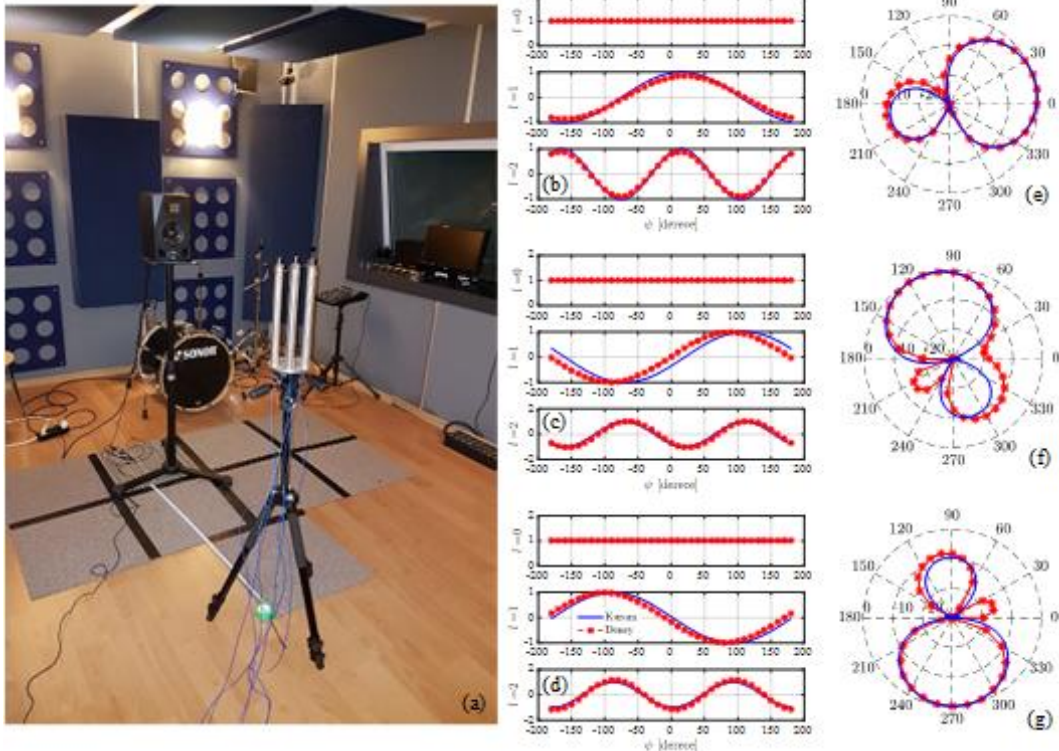
PU Mini AVA'ların kalibrasyonu, kapalı uçlu duran dalga tüpü içerisinde oluşan akustik alanın, bu yapıdaki tüpler için geçerli olan kuramsal akustik alan ile karşılaştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Buna göre, tüp sonundaki referans mikrofonuna göre kuramsal basınç alanı $H_{p-p}^{kuram} = P(f)/P_{ref}(f) = \cos(kd)$, kuramsal parçacık hızı alanı ise $H_{p-v}^{kuram} = Y(f)/P_{ref}(f) = (i/\rho c) \cdot \sin(kd)$ olarak gerçekleşmektedir. Bu denklemlerde d tüpün kapalı ucuna olan uzaklığı ifade etmektedir (kullanılan tüpte bu mesafe $d = 220$ mm'dir). Deneysel akustik alan ise $H_{x-y}^{deney} = Y(f)/X(f) = S_{xy}(f)/S_{xx}(f)$ ifadesi ile hesaplanmaktadır. Bu ifadede $S_{xy}(f)$ referans mikrofonu ile ölçüm yapılan algılayıcı arasındaki çapraz spektral güç yoğunluğunu, $S_{xx}(f)$ ise referans mikrofonun öz spektral güç yoğunluğunu temsil etmektedir. Deneysel güç yoğunluklarının kuramsal denklemler ile örtüşmesi için gereken ve frekansa bağlı genlik ve faz olarak ifade edilen düzeltme katsayıları doğrusal olmayan Levenberg-Marquardt eğri uydurma yöntemi ile hesaplanmaktadır. Bu düzeltme katsayıları daha sonradan AVA'ların frekans tanım kümesinde kalibrasyonlarında kullanılmıştır. Düzeltme katsayılarının algılayıcı üreticileri tarafından verilen algılayıcı hassasiyetlerinin tersidir. Tipik bir PU Mini algılayıcısının basınç ve parçacık hızı kalibrasyonuna ait eğriler Şekil 4'te verilmiştir. Fazda meydana gelen atlamalar trigonometrik işlevlerdeki (basınç için kosinüs, parçacık hızı için sinüs) işaret değişikliklerine karşılık gelmektedir.

3.3. Oda Deneyleri

Küçük çembersel 1-B AVA dizinler için geliştirilen kipsel hüzme oluşturucusunun doğrulanması için bir kayıt stüdyosunda deneyler gerçekleştirilmiştir (bkz). Bir yakınsak alan hoparlöründen yapılan dar ve geniş bantlı ses yayınları 115 mm çapında bir çember üzerine eşit aralıklar ile yerleştirilmiş 6 adet 1-B AVA'dan oluşan dizinde kaydedilmiştir. Ses kaynağı ile dizin arasındaki mesafe tüm deneylerde en az iki dalga boyu olacak şekilde ayarlanmıştır. Tipik bir deney düzeneği ve 1-B parçacık hızı algılayıcıları kullanılarak dar bantlı kaynaktan eşit kip ağırlıkları ile elde edilen sonuçlar [her kipe karşılık gelen yönsel dizin tepkisi ve toplam dizin tepkisi denklem (8)] Şekil 5'te gösterilmiştir. Benzer sonuçlar basınç algılayıcılı dizinler, geniş bantlı kaynaklar ve azami yönsellik kip ağırlıkları için de elde edilmiştir. Ancak yer darlığından dolayı bu sonuçlara burada yer verilememiştir. Buradan da görüleceği üzere kuramsal hüzme yapısı ile deneysel sonuçlar uyumludur.



Şekil 4. Microflown Technologies PU Mini tipi bir AWA'ya ait tipik kalibrasyon sonuçları: basınç algılayıcısına ait a) genlik ile c) faz ve parçacık hızı algılayıcısına ait b) genlik ile d) faz eğriler. Mavi-düz eğriler kuramsal, kırmızı-noktalı eğriler ise deneysel sonuçları temsil etmektedir.



Şekil 5. Küçük boyutlu çembersel 1-B AWA dizini ile yapılan deneysel çalışmalar: a) deney düzeneği, kaynağın (ψ_0) 15° b)-e), 110° c)-f) ve 270° d)-g) olduğu durumlarda, sırası ile kişsel ve toplam dizin tepkisi. Kuramsal sonuçlar mavi-düz, deneysel sonuçlar kırmızı-noktalı eğriler ile gösterilmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, bilimsel yazımda yer alan basınç [5] ve 2-B parçacık hızı [8] algılayıcılarından oluşan iki farklı çembersel dizine alternatif olarak önerilen ve 1-B parçacık hızı algılayıcılarından oluşan dizinler için geliştirilen bir kipsel hüzmeye oluşturucu açıklanmaktadır. Önerilen yöntemde, 1-B parçacık hızı algılayıcılarından elde edilen ölçümlerin uzaysal Fourier dönüşümü alınarak akustik alanın yüksek yönselliğe sahip kipleri çekilmektedir. Bu kiplerin uygun oranlarda birleştirilmesi ile yönlendirebilir ve dar ana hüzmeli bir dizin elde edilmektedir. Eş-yönlü ve ilintili ortam gürültüsü altında önerilen 1-B parçacık hızı algılayıcı dizininin yönsellik başarımları hesaplanmıştır. Ardından söz konusu dizinin doğrulanması için yapılan kalibrasyon ve öncü deneysel çalışmaların sonuçlarına açıklanmıştır. Bu sonuçlar, söz konusu kipsel hüzmeye oluşturucunun kuramsal kestirimler ile uyumlu sonuçlar verdiğini ve pratik olarak çok algılayıcı dizinlerde kullanılabileceğini göstermiştir. Ortam gürültüsüne karşı dizinin yönselliğini arttırmak için kip ağırlıkları özenle seçilmelidir. Ancak bu doğrultuda yapılan ağırlık tercihleri, dizinin beyaz Gauss gürültüsüne karşı başarımını azaltmaktadır. Pratik dizin tasarımında kip ağırlıklarının seçimi, dizinin çalışacağı tipik ortam gürültü özellikleri ve ilintisiz gürültü kaynakları (örneğin, algılayıcı elektroniğinin özellikleri) göz önüne alınarak yapılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Silvia, M. T., Richards, R. T., A Theoretical and Experimental Investigation of Low-Frequency Acoustic Vector Sensors, in Proc. MTS/IEEE OCEANS'02 Conf., pp.1886-1897, 2002.
- [2] Jacobsen, F., de Bree, H. E., The Microflown Particle Velocity Sensor, in Handbook of Signal Processing in Acoustics, ed. D. Havelock, S. Kuwano, M. Vorlander. New York: Springer, pp. 1283-1291, 2009.
- [3] Cray, B. A., Nuttall, A. H., Directivity Factors for Linear Arrays of Velocity Sensors, J. Acoust. Soc. Am. vol.110, no.1, pp.324-331, 2001.
- [4] Smith, K. B., Van Leijen, A. V., Steering Vector Sensor Array Elements with Linear Cardioids and Nonlinear Hippoids, J. Acoust. Soc. Am. vol.122 no.1, pp.370-377, 2007.
- [5] Franklin, J. B., Superdirective Receiving Arrays for Underwater Acoustic Application", DREA Contractor Report 97/444 P.O. Box 1012, Dartmouth, Nova Scotia, Canada, B2Y 3Z7, pp.1-44, 1997.
- [6] Van Trees, H. L., Optimum Array Processing, Wiley, New York, Ch.4.2, pp.274-304, 2002.
- [7] Gur, B. Particle Velocity Gradient Based Acoustic Mode Beamforming for Short Linear Vector Sensor Arrays, J. Acoust. Soc. Am. vol.135, no.6, pp.3463-3473, 2014.
- [8] Zou, N., Nehorai, A., Circular Acoustic Vector-Sensor Array for Mode Beamforming, IEEE Trans. Signal Process., vol.57, no.8, pp.3041-3052, 2009.
- [9] Gur B., Modal Beamforming for Circular Acoustic Vector Sensor Arrays, Proc. 25th SIU Conf., pp.1-4, 2017.