

**10. ULUSAL AKUSTİK KONGRESİ**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ODİTORYUMU, İSTANBUL**  
**16-17 Aralık 2013**

**VEKTÖR SENSÖR DİZİNLERİ İÇİN AKUSTİK MOD HÜZME**  
**OLUŞTURUCU**

**M. Berke Gür<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>**Bahçeşehir Üniversitesi, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye**  
Tel: 212 381 05 56, e-posta: berke.gur@bahcesehir.edu.tr

**ÖZET**

Bu bildiride, akustik vektör sensörlerden oluşan kısa doğrusal dizinler için geliştirilen çıkarmalı hüzmeye oluşturucu tanıtılmakta ve bu yöntemin performans analizi sunulmaktadır. Önerilen doğrusal dizin işaret işleyicisi, dalgaboyuna göre kısa aralıklarla yerleştirilmiş algılayıcılarda ölçülen partikül hızı değerlerinden, sonlu fark metodu uygulanarak elde edilen uzaysal gradyanları kullanılarak, alanın yüksek yönsellikte akustik modlarının çıkartılması ve işlenmesine dayalıdır. Elde edilebilecek mod sayısı, dizinde yer alan algılayıcı sayısı ile sınırlıdır. Sunulan yöntem, iskele-sancak ayırımı, frekans ve yönlendirme doğrultusundan bağımsız hüzmeye örüntüsü, uzayda ve zamanda ilintili gürültülü ortamlarda çalışabilme gibi ek bazı performans avantajları da sağlamaktadır. Önerilen yöntemin sağladığı boyutsal avantajlar, bu yöntemeye dayalı dizinleri işitme cihazlarında ve otonom sulatı platformlarında kullanıma uygun kılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** akustik vektör sensör, dizin işaret işleme, çıkarmalı hüzmeye oluşturma.

***ACOUSTIC MODE BEAMFORMER FOR VECTOR SENSOR ARRAYS***

***ABSTRACT***

*In this paper, a subtractive beamforming algorithm for short linear arrays of acoustic vector sensors is described. The proposed array processor is linear and relies on extracting the highly directional acoustic modes from the spatial gradients of the particle velocity field measured at closely spaced (relative to the wavelength) sensors along the array. The number of modes that can be extracted is shown to be limited by the number of sensors available. The acoustic mode beamformer possesses capabilities such as left-right discrimination, frequency and steer direction independent response, and robustness to correlated ambient noise. Small inter-sensor spacing that results in very compact apertures makes the proposed beamformer suitable for space constrained applications such as hearing aids and short towed arrays for autonomous underwater platforms.*

**Keywords:** *acoustic vector sensor; array processing; subtractive beamforming.*

## 1. GİRİŞ

Alan ve diğer akustik değişkenler en doğru şekilde akustik şiddet ile ifade edilmektedir. Akustik şiddet ise skaler akustik basınç ve vektörel akustik partikül hareketi değişkenlerine bağlıdır. Partikül hareketi, yönsellik içeren bir değişken olması sebebi ile akustik alan hakkında basınca göre daha fazla bilgi içermektedir ve genellikle akustik partikül hızı cinsinden ifade edilir. Ancak pek çok akustik dizin uygulaması, ölçümü standart mikrofon veya hidrofona ile kolaylıkla yapılabilen akustik basınç üzerine kurulmuştur. Bu dizinlerde basınç algılayıcıları arasındaki mesafe, yüksek yönsellik sağlamak amacı ile dalga boyunun yarısına sabitlenmektedir. Algılayıcılarda ölçülen basınç alanları, eklemeli olarak işlenerek hüzmeye oluşturulmaktadır. Dizin ve diğer akustik uygulamalarda partikül hızı, ölçümünün zor olması sebebi ile genellikle göz ardı edilmiştir. Son yıllarda, özellikle tek kristalli yeni nesil seramik ve MEMS algılayıcı teknolojisinde gerçekleşen ilerlemeler sonucu, basınç ve partikül hareketi ölçümünü bir arada yapabilen ve akustik vektör sensör (AVS) olarak tanımlanan algılayıcılar geliştirilmeye başlanmıştır. Yazarın daha önceki yayınında, konvansiyonel dizinlerdekine göre çok daha sık aralıklarla yerleştirilmiş AVS'lerden oluşan bir dizin yapısı için geliştirilen, ölçülen akustik alan değişkenlerinin çıkarmalı olarak işlendiği yeni bir hüzmeye oluşturma yöntemi tanıtılmıştır [1]. Bu bildiri de ise, önerilen hüzmeye oluşturunun performansı detaylı olarak irdelenmekte, performans analizi sonucu elde edilen yeni bulgular ve sonuçlar açıklanmaktadır.

Çıkarmalı hüzmeye oluşturunlar, özellikle oda akustiği uygulamalarında yarım yüzyıldan beri kullanılmaktadır [2]. Ancak bu hüzmeye oluşturma yönteminin teorik altyapısına son yıllarda önemli katkılar yapılmış ve bu yöntemler daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır [3], [4]. Ancak literatürde yer alan hüzmeye oluşturunlar, mikrofon dizinlerine uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. Oda akustiğinde yer alan yöntemlere benzer bir yöntem su altı akustiği uygulamaları için de geliştirilmiştir [5]. Bu yayınlarda, çıkarmalı dizinlerle elde edilen yönsellik performansının, bu dizinlere kıyasla ancak 1.5-15 kat daha uzun eklemeli dizinlerle elde edilebileceği gösterilmiştir. Buna göre eklemeli ve çıkarmalı dizinlerde aynı sayıda algılayıcı kullanılmakta, dizin uzunlukları arasındaki fark, çıkarmalı dizinlerde algılayıcılar arasındaki mesafenin çok daha kısa olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak gerek oda akustiği, gerekse su altı akustiği için geliştirilen bu dizinlerin en önemli dezavantajı, (dizinlerde eş-yönlü mikrofon veya hidrofona kullanılması sebebi ile) bu dizinlerin sadece baş/kıç yönlerinde iyi yönselliğe sahip olmaları, diğer yönlere yönlendirilememeleridir. Bu sebeple, literatürde yer alan çıkarmalı dizinlerin uygulama alanları sınırlı kalmaktadır.

AVS'ler ile kardioid şeklinde hüzmeye örgüsü oluşturularak yönsellikte eş-yönlü mikrofonlara göre 4.8 dB kazanım sağlanmaktadır. İskele-sancak ayırımından feragat edilirse, süper-kardioid hüzmeye örgüsü oluşturularak eş-yönlü basınç algılayıcılarına göre basınç algılayıcılarına göre 6 dB daha yönsel bir hüzmeye örüntüsü elde edilmektedir. Bu yönsellik avantajlarından dolayı, akustik alanın yönselliğinin kestirimini içeren doğrusal dizilim uygulamalarında, AVS dizilimleri mikrofon/hidrofona dizilimlerine göre performans ve/veya boyutsal avantajlar sağlamaktadır [6]. Literatürde yer alan doğrusal AVS dizinlerinde temel yaklaşım, konvansiyonel eklemeli hüzmeye oluşturma yöntemleridir [6], [7].

Bu bildiri de, doğrusal AVS'ler için geliştirilen yeni bir dizilim hüzmeye oluşturma ve işaret işleme yöntemi açıklanmaktadır. Bu yöntem, geleneksel yöntemlerin aksine, AVS'lerde ölçülen sinyallerin birbirlerinden çıkarılması ile elde edilen uzaysal gradyanları kullanılarak, akustik alanın yönselliği yüksek akustik modlarının çıkartılması ve işlenmesine dayalıdır. Geliştirilen bu yöntem, boyutsal avantajlarının yanı sıra, geniş bantta çalışabilme, iskele-

sancak ayrımı yapabilme gibi basınç algılayıcılarından oluşan konvansiyonel dizilimlerde olmayan ek özelliklere sahiptir. Boyutsal ve performans avantajlarından dolayı bu yöntemin işitme cihazları, mobil telekonferans sistemleri ve sualtı insansız araçları için kısa çekili dizilimler gibi pek çok uygulama alanı bulması öngörülmektedir.

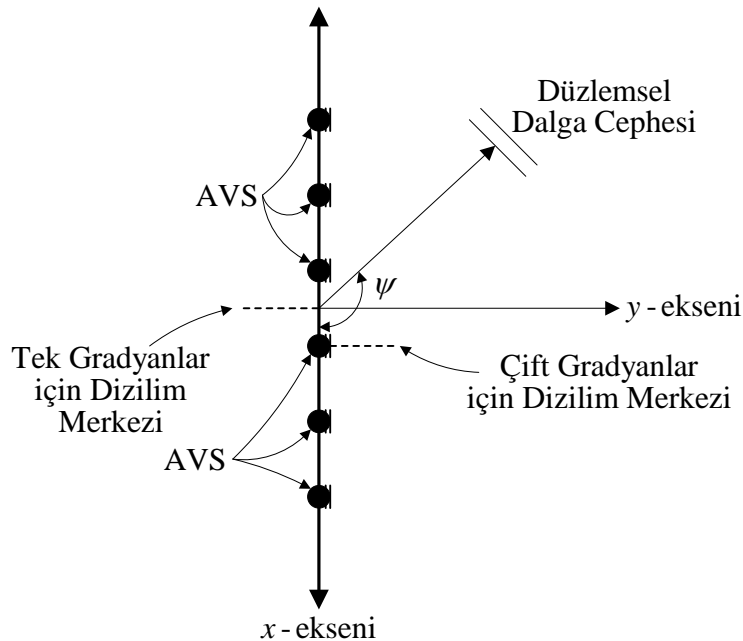
## 2. AKUSTİK MOD DOĞRUSAL DİZİLİM TEORİSİ

Bu bölümde, bildiride önerilen akustik mod hüzmeye oluşturucusunun teorisi özetlenmiştir. Akustik alan değişkenleri ve bu değişkenlerin gradyanları, gradyanların sonlu fark yöntemi ile kestirimi ve hüzmeye oluşturucusu hakkında daha detaylı açıklamalara yazarın daha önceki bir yayında yer almaktadır [1].

Eşit aralıklar ile yerleştirilmiş AVS'lerde oluşan doğrusal bir dizilim boyunca (dizilimin kartezyen koordinat sisteminde  $x$ -ekseni boyunca uzandığı varsayılmaktadır, Şekil 1) düzlemsel, zaman-harmonik dalgalardan kaynaklı iki boyutlu akustik basınç ( $p$ ) ve ( $v$ ) partikül hızı alan değişkenleri

$$\begin{aligned} p(x) &= P \cdot \exp(jk \cos \psi x), \\ v_x(x) &= V \cos \psi \cdot \exp(jk \cos \psi x), \\ v_y(x) &= V \sin \psi \cdot \exp(jk \cos \psi x) \end{aligned} \quad (1)$$

denklemleri ile verilir [zaman değişkenini içeren  $\exp(j\omega t)$  terimi ihmal edilmiştir]. Bu denklemlerde  $j = \sqrt{-1}$ ,  $P$  ve  $V$  basınç ve partikül hızı genliğini,  $\psi$  akustik dalganın geliş (azimut) açısını,  $k$  dalga numarasını ifade etmektedir.



**Şekil 1.** Altı AVS'den oluşan kısa dizilimin kartezyen koordinat eksenine göre konumu.

Denklem (1)'de verilen akustik partikül hızı alan değişkenlerinin  $x$ -ekseni boyunca  $n$ . dereceden uzaysal gradyanlarının  $x = 0$  noktasındaki değerleri

$$\begin{aligned}\frac{\partial^n}{\partial x^n} v_x(0) &= V(jk)^n (\cos \psi)^{n+1}, \\ \frac{\partial^n}{\partial x^n} v_y(0) &= V(jk)^n \sin \psi (\cos \psi)^n\end{aligned}\quad (2)$$

olarak hesaplanır. Denklem (2)'de verilen ve akustik partikül hızı gradyanlarının dizinin merkezindeki değerlerini, dizin üzerindeki AVS'lerde yapılan ölçümlerden kestirimi için,

$$g_n[v(\xi)] = \frac{\sum_{l=0}^n (-1)^{n-l} \binom{n}{l} v[\xi + (l - n/2)d]}{d^n} \quad (3)$$

sonlu fark operatörü kullanılmaktadır. Bu denklemde  $v(\xi)$  akustik partikül hızı değişkeninin  $x = \xi$  kordinatındaki değerini,  $d$  ölçüm yapılan AVS'ler arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Denklem (3)'te yer alan iki terimli (binom) katsayıları,

$$\binom{n}{l} = \frac{n!}{l!(n-l)!} \quad (4)$$

eşitliği ile elde edilmektedir.

AVS'ler arasındaki mesafenin dalgaboyuna göre çok daha az olduğu durumlarda ( $kd \ll 1$ ),  $n$ . dereceden sonlu fark operatörü  $g_n(\cdot)$ , akustik alan değişkenlerinin dizilimin merkezindeki  $n$ . dereceden uzaysal gradyanlarının kestiriminde kullanılabilir (örneğin,  $\partial^n v_x(0)/\partial x^n \approx g_n[v_x(0)]$ ). Tablo 1'de, 5. dereceye kadar olan gradyanların kestiriminde  $g_n(\cdot)$  operatörü ile birlikte kullanılan AVS'lerin pozisyonları ve bu AVS'lerin ağırlık katsayıları verilmiştir.

**Tablo 1.** Beşinci dereceye kadar gradyan çıkarımı için ölçüm noktaları ve katsayılar.

Uzaysal Gradyan Derecesi ( $n$ )	Ölçüm Noktaları [ $\xi = 0, (l - n/2) \cdot d$ ]	İki Terimli (Binom) Katsayıları $(-1)^{(n-l)} \cdot [n!/(l! \cdot (n-l)!)]$
0	0	1
1	$+d/2, -d/2$	1, -1
2	$+d, 0, -d$	1, -2, 1
3	$+3d/2, +d/2, -d/2, -3d/2$	1, -3, 3, -1
4	$+2d, +d, 0, -d, -2d$	1, -4, 6, -4, 1
5	$+5d/2, +3d/2, +d/2, -d/2, -3d/2, -5d/2$	-1, 5, -10, 10, -5, 1

Denklem (2)'den görülebileceği üzere, partikül hızının  $x$ - ve  $y$ -ekseni doğrultusundaki  $n$ . dereceden alan gradyanları, sırası ile  $(\cos \psi)^{n+1}$  ve  $\sin \psi (\cos \psi)^n$  terimlerini içermektedir. Chebyshev polinomlarının özelliklerinden faydalanılarak,  $x$ -ekseni doğrultusundaki uzaysal gradyanlar,

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} v_x(0) = \mathcal{V}(jk)^n \cdot \begin{cases} \left[ \frac{2}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{n/2} \binom{n+1}{l} \cos[(n-2l+1)\psi] \right], & n \text{ çift} \\ \left[ \frac{2}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{(n-1)/2} \binom{n+1}{l} \cos[(n-2l+1)\psi] + \underbrace{\frac{1}{2^{n+1}} \binom{n+1}{(n+1)/2}}_{C_1} \right], & n \text{ tek,} \end{cases} \quad (5)$$

y-ekseni doğrultusundaki uzaysal gradyanlar ise,

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} v_y(0) = \mathcal{V}(jk)^n \cdot \begin{cases} \left[ \frac{1}{2^n} \sum_{l=0}^{n/2} \left[ \frac{n!(n-2l+1)}{l!(n-l+1)!} \right] \sin[(n-2l+1)\psi] \right], & n \text{ çift} \\ \left[ \frac{1}{2^n} \sum_{l=0}^{(n-1)/2} \left[ \frac{n!(n-2l+1)}{l!(n-l+1)!} \right] \sin[(n-2l+1)\psi] \right], & n \text{ tek,} \end{cases} \quad (6)$$

ifadelerine indirgenebilir. Denklem (5)'te yer alan  $\cos[(n-2l+1)\psi]$  terimleri akustik alanın cosinüs modları, denklem (6)'daki  $\sin[(n-2l+1)\psi]$  terimleri ise sinüs modlarıdır. Bu modların, gradyan derecesi ile artan yüksek yönsellik özellikleri bulunmaktadır.

Tablo 1'den de görülebileceği üzere, tek ve çift gradyanların kestiriminden kullanılması gereken AVS'lerin konumları örtüşmemektedir. Ancak, çift dereceli gradyan kestirimini için dizilimin merkezinin pozitif  $x$ -ekseni doğrultusunda  $d/2$  kadar kaydırılması ile çift ve tek gradyan kestiriminde kullanılan AVS'lerin örtüşmesi sağlanabilir (Şekil 1). Bu durumda,  $N$ . dereceye kadar olan gradyanların kestiriminde  $d$  aralıklarla yerleştirilmiş  $M = N + 1$  AVS yeterli olacaktır.

Sonlu fark yöntemi ile elde edilen akustik modların yapıcı bir şekilde toplanması ve dizilimin istenen istikamete yönlendirilmesi için  $x$ - ve  $y$ -ekseni gradyanlarına uygulanması gereken filtre katsayıları  $\mathbf{w}_x$  ve  $\mathbf{w}_y$ ,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_x \cdot \mathbf{w}_x &= \mathbf{b}_x, \\ \mathbf{A}_y \cdot \mathbf{w}_y &= \mathbf{b}_y \end{aligned} \quad (7)$$

eşitliklerinden en küçük kareler yöntemi ile elde edilir. Denklem (7)'de  $\mathbf{A}_x$  matrisi  $(N+1) \times (N+1)$  boyutlarındadır ve matrisin  $a_x(l, n)$  katsayısı  $n$ . gradyandaki  $(1 \leq n \leq N)$   $\cos(l\psi)$  teriminin katsayısına karşılık gelmektedir. Benzer şekilde,  $\mathbf{A}_y$  matrisi  $(N+1) \times (N+1)$  boyutlarındadır ve matrisin  $a_y(l, n)$  katsayısı  $n$ . gradyandaki  $\sin(l\psi)$  teriminin katsayısına karşılık gelmektedir. Bu katsayılar denklem (5) ve denklem (6)'dan hesaplanmaktadır. Ayrıca, denklem (7)'de yer alan  $\mathbf{b}_x$  ve  $\mathbf{b}_y$  vektörleri,

$$\mathbf{b}_x = \begin{bmatrix} \cos \psi_s \\ \cos 2\psi_s \\ \vdots \\ \cos[(N+1)\psi_s] \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_y = \begin{bmatrix} \sin \psi_s \\ \sin 2\psi_s \\ \vdots \\ \sin[(N+1)\psi_s] \end{bmatrix} \quad (8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır ve dizilimin yönlendirilmesi istenen istikametın azimut açısı bilgisini içerir. Denklem (5)'te görüleceği üzere,  $x$ -ekseni doğrultusundaki uzaysal gradyanlar,  $\cos[(n-2l+1)\psi]$  ile ifade edilen akustik cosinüs modlarının yanı sıra,  $C_1$  ile ifade edilen bir ek sapmaya neden olmaktadır. Sapma dizilimin merkezine yerleştirilen bağımsız bir mikrofon veya çift gradyan merkezinde bulunan AVS'in basınç ölçümlerinden faydalanılarak düzeltilebilir. Düzeltilmiş dizilimin tepkisi,

$$r(\psi_s) = \sum_{n=0}^{N+1} \cos[n(\psi - \psi_s)] \quad (9)$$

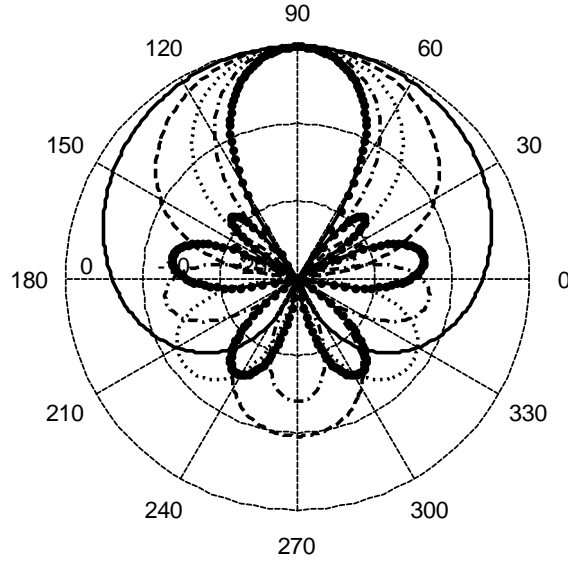
halini alır. Denklem (9)'da partikül hızı genliği  $V=1$  olarak kabul edilmiştir ve genliğin değişik değerler alması sonucu değiştirmemektedir. Denklem (9)'de elde edilen dizilim tepkisi en yüksek değerine akustik dalğanın geliş ve dizilimin yönlendirilme azimut açılarının uyuştuğu ( $\psi = \psi_s$ ) durumda ulaşır. Dizinin hüzme örüntüsü, dizin tepki genliğinin karesi alınarak bulunur  $B(\psi, \theta) = |r(\psi, \theta)|^2$ . Beş ve daha az AVS'ten oluşan dizinlerin hüzme örüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, tek AVS'in hüzme örüntüsü, standard kardioid şeklindedir. Tek sayıda AVS'ten oluşan dizinlerde tam iskele-sancak ayrımı sağlanabilirken, çift AVS'li dizinlerde bu ayrım azalmaktadır.  $M=2$  algılayıcıdan oluşan dizinler için  $-10$  dB iskele-sancak ayrımı elde edilir ve AVS sayısı arttıkça bu ayrım oranı iyileşmektedir. Altı adet AVS'ten oluşan bir dizilimin, değişik yönlendirme durumlarında tepkisine göre elde edilen teorik hüzme örüntüleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere AVS dizininde iskele-sancak belirsizliği oluşmamaktadır. Yine konvansiyonel dizilimlerden farklı olarak dizin bordadan baş ya da kış tarafına yönlendirildiğinde, hüzme paterninde önemli bozulmalar gözlenmemektedir. Aynı şekil üzerinde,  $0.1$  m aralıklarla yerleştirilmiş altı adet 2-B AVS'ten oluşan (dizin uzunluğu  $0.5$  m) bir çekili dizinin  $0.5$  kHz'lik bir işaret ve  $10$  dB işaret-gürültü oranı varsayılarak benzetim yolu ile elde edilen hüzme örüntüsü gösterilmiştir. Benzetimlerde 3-B eş-yönlü gürültü varsayılmıştır.

### 3. PERFORMANS ANALİZİ VE SAYISAL BENZETİMLER

Pasif bir dizin için yönsellik fonksiyonu, dizinin tepki fonksiyonu cinsinden

$$D(\psi) = \frac{r(\psi)}{r(\psi_{\max})} \quad (10)$$

olarak ifade edilebilir. Bu denklemde  $\psi_{\max}$  en yüksek tepkinin olduğu yöndeki azimut açısıdır. Çıkarımların kolaylaşması için ses dalgasının dizine  $\psi=0$  açısı ile geldiğini ve dizinin de bu yöne doğru yönlendirildiği varsayımı yapıldığında, Lagrange açılımından faydalanılarak dizinin yönsellik fonksiyonu



Şekil 2. Altı AVS'den oluşan kısa dizilimin kartezyen koordinat eksenine göre konumu.

$$D(\psi) = \frac{1}{2(M+1)} + \frac{\sin[(M+1/2)\psi]}{2(M+1)\sin(\psi/2)} \quad (11)$$

olarak belirlenir. Denklem 13'de verilen yönsellik fonksiyonuna bağlı olarak oluşan yarım güç ana hüzmeye genişlik açısı  $\psi_{-3\text{ dB}} = 155^\circ/M$  olarak hesaplanmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için,  $\lambda/2$  aralıkla yerleştirilmiş eş-yönlü algılayıcılardan oluşan, konvansiyonel zaman geciktirmesine dayalı hüzmeye oluşturucusu kullanılan bir dizinin yönsellik fonksiyonu

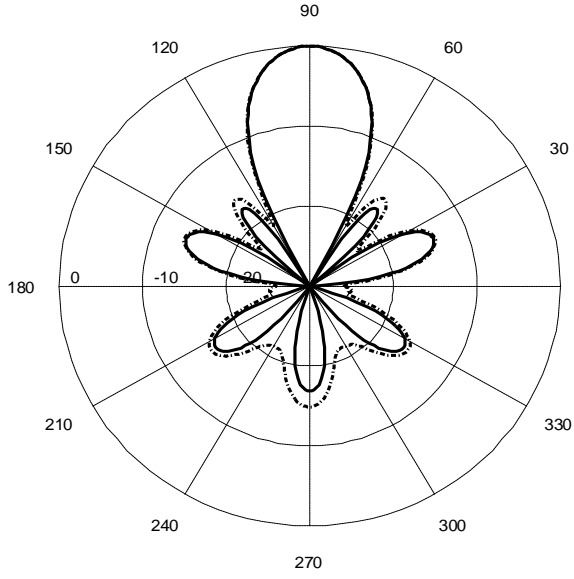
$$D_a(\psi) = \frac{\sin(M\pi/2 \cos \psi)}{M \sin(\pi/2 \cos \psi)} \quad (12)$$

ile ifade edilir. Konvansiyonel dizinler için yarım güç ana hüzmeye genişlik açısı  $\psi_{-3\text{ dB}} = 102^\circ/(M-1)$  olarak çıkarılabilir. Dizin kazanımı (DK), dizinin tek bir eş-yönlü bir algılayıcıya göre sağladığı işaret-gürültü oranındaki iyileşme olarak tanımlanır ve

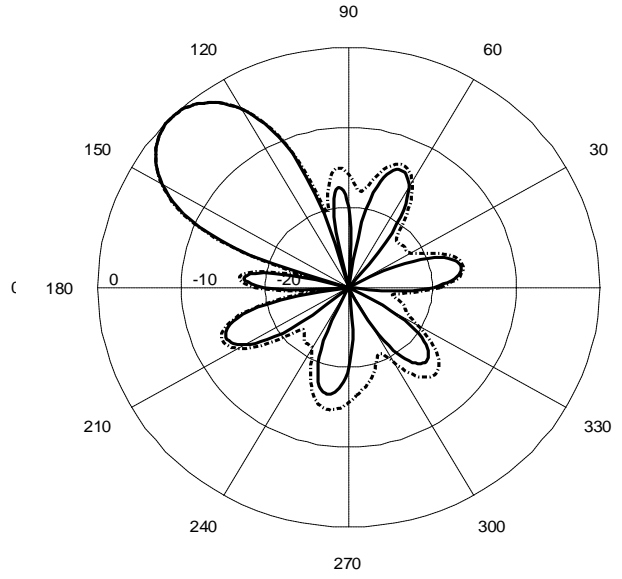
$$DK = \frac{\int_0^{2\pi} d\psi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\psi, \theta) \cos \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\psi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\psi, \theta) F(\psi, \theta) \cos \theta d\theta}, \quad (13)$$

denklemleri ile elde hesaplanır. Bu denklemde  $\theta$  dizinin yer aldığı yatay düzlemde yukarı yönde pozitif olarak ölçülen yükseklik açısı,  $F$  ise gürültü alanının şiddet yönsellik fonksiyonudur. İki boyutlu eş-yönsellikte gürültü alanları için gürültü alanı şiddet yönsellik fonksiyonu  $F(\psi, \theta) = \delta(\theta)$  olarak ifade edilir. Bu gürültü alanlarında dizin kazanımı

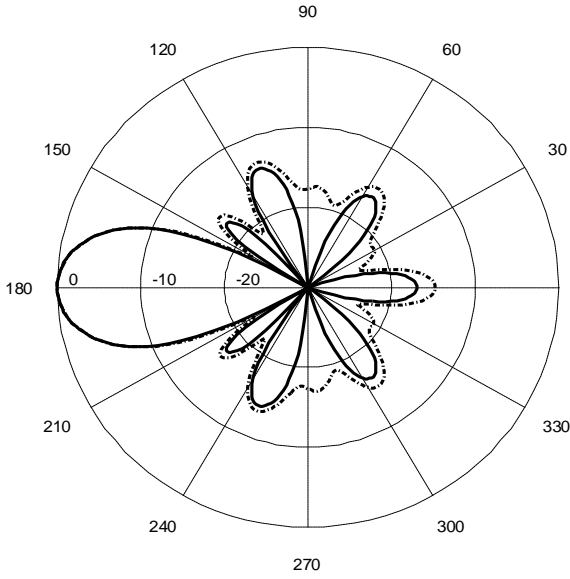
$$DK_{2D} = \frac{2\pi(M+1)^2}{\int_0^{2\pi} \left[ \sum_{n=0}^M \cos(n\psi) \right]^2 d\psi} = \frac{2(M+1)^2}{M+2} \quad (14)$$



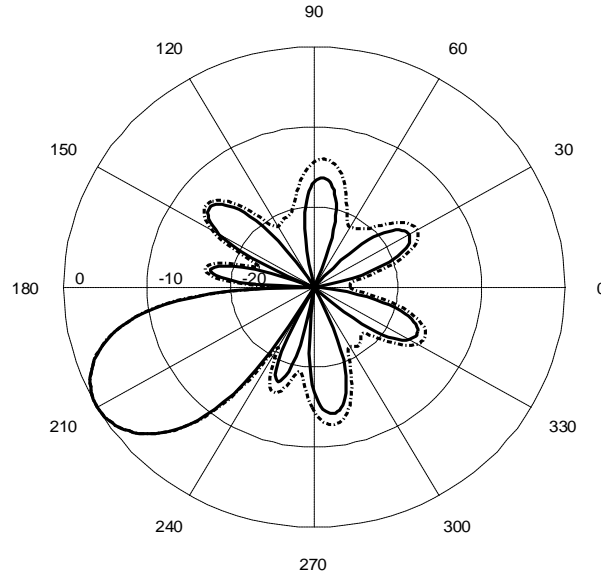
(a)



(b)



(c)



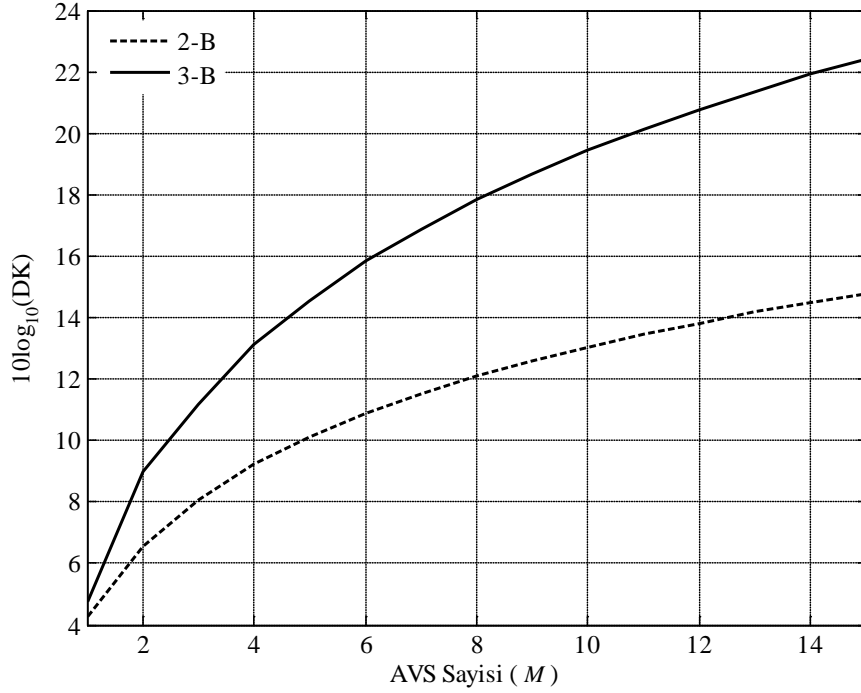
(d)

**Şekil 3.** Altı AVS'den oluşan kısa dizilimin değişik yönlendirme açılarındaki teorik (-) ve sayısal benzetimler (-.) ile elde edilen hüzmeye örüntüsü.

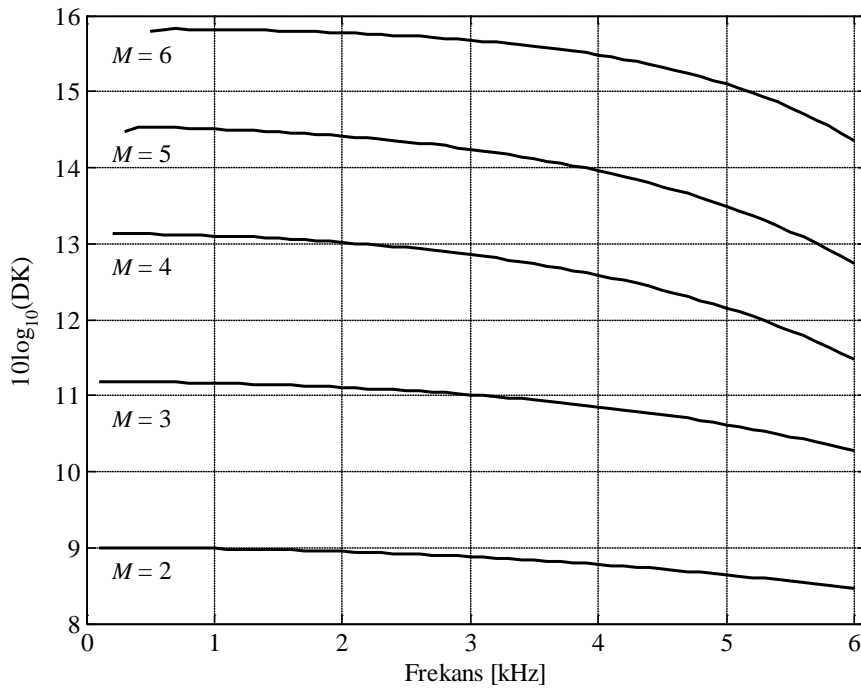
eşitliğine indirgenir. Üç boyutlu eş-yönsellikte gürültü alanları için  $F(\psi, \theta) = 1$  olur. Önerilen yöntem için denklem (13)'te verilen integralin (2-B gürültü alanlarında olduğu gibi) 3-B gürültü alanları için denklemsel sonucu bulunamamıştır; ancak bu integralin sayısal çözümleri yapılmıştır. 2-B ve 3-B eş-yönsellikteki gürültü alanları için elde edilen dizin kazanımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'te verilen yönsellik değerleri, AVS'ler arası mesafenin dalga boyuna kıyasla çok küçük olduğu varsayımı ile çıkarılmıştır. Belli bir algılayıcı arası mesafe



için frekans arttıkça bu varsayım geçersiz hale gelmeye ve dizinin yönsellik değerleri bozulmaya başlamaktadır. Bu durum, dizin kazanımının frekansa göre değişimini gösteren Şekil 5'te açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu şekilden de görüleceği üzere, özellikle düşük frekanslarda dizinin yönselliği frekansla çok fazla değişmemektedir.



**Şekil 4.** 2-B ve 3-B eş-yönsellikteki gürültü alanlarında dizin kazanımının (DK) dizindeki AVS sayısına göre değişimi.



**Şekil 5.** Değişik sayıda AVS'ten oluşan dizinlerin dizin kazanımlarının frekansa bağlı değişimi.

## SONUÇ

Bu bildiriye, akustik basıncı ve partikül hızını aynı anda ölçebilen AVS'lerden oluşan doğrusal dizinler için geliştirilen yeni bir hüzme oluşturma yöntemi sunulmaktadır. Sunulan bu yöntemin temelinde, ölçülen partikül hızı işaretlerinin, birbirlerinden çıkarılmasını içeren sonlu fark yöntemi ile uzaysal gradyanların kestirimi yer almaktadır. Bu gradyanlardan elde edilen ve yüksek yönselliğe sahip olan akustik modlarının çıkarmalı olarak işlenmesi ile yönselliği yüksek, istenen istikamete yönlendirilebilen dizin hüzme örüntüleri elde edilebilmektedir. Geliştirilen yöntemi kullanan AVS dizilimleri, eşit miktarda basınç algılayıcıdan oluşan konvansiyonel dizinlere eşdeğer yönsellik performansını %70-%85 daha kısa dizin boyları ile sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, dizinin AVS'lerden oluşması sebebi ile iskele-sancak ayrımı sağlanmakta, değişik frekanslarda ve yönlendirme açılarında hüzme yapısını korumakta, uzaysal ilintili gürültüye karşı düşük hassasiyet göstermektedir. Akustik mod hüzme oluşturucusunun ilk uygulama alanı olarak işitme cihazları ve sualtı insansız araçlarından çekilmek için tasarlanan kısa çekili dizilimler olması öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Gur, M. B. Doğrusal Vektör Algılayıcı Dizilimler için Partikül Hızı Gradyanına Dayalı Akustik Mod Hüzme Oluşturucu, 21. SIU Konf., pp. 1-4, 2013.
- [2] Olson, H. Gradient Microphones, J. Acoust. Soc. Am., 17(3), pp. 192-198, 1946.
- [3] Elko, G. W. Microphone Array Systems for Hands Free Telecommunications," Speech Commun., 20, pp. 229-240, 1996.
- [4] Elko, G. W. Differential Microphone Arrays, Audio Signal Processing for Next-Generation Multimedia Communication Systems, editör Y. Huang ve J. Benesty, Kluwer, New York, pp. 11-65, 2004.
- [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. 44 pp, 1997.
- [6] Cray, B. A. and Nuttall, A. H. Directivity Factors for Linear Arrays of Velocity Sensors, J. Acoust. Soc. Am., 110(1), pp. 324-331, 2001.
- [7] Smith, K. B. and van Leijen, A. V. Steering vector sensor array elements with linear cardioids and nonlinear hippoids, J. Acoust. Soc. Am., 122(1), pp. 370-377, 2007.