

Doğrusal Vektör Algılayıcı Dizilimler için Partikül Hızı Gradyanına Dayalı Akustik Mod Hüzme Oluşturucu

Particle Velocity Gradient Based Acoustic Mode Beamforming for Linear Vector Sensor Arrays

M. Berke Gür
Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Bahçeşehir Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
{berke.gur}@bahcesehir.edu.tr

Özetçe—Bu bildiri akustik basınç ve partikül hareketi ölçen algılayıcılardan oluşan dizilimler için geliştirilen yeni bir sinyal işleme ve hüzme oluşturma yöntemi sunulmaktadır. Bu yöntem, sonlu fark metodu ile elde edilen uzaysal gradyanları kullanarak, alanın akustik modlarının çıkartılması ve işlenmesine dayalıdır. Sayısal benzetimler, geliştirilen yöntemin yönsellik bakımından konvansiyonel hüzme oluşturuçulara eşdeğer performansı en az yüzde 80 daha kısa dizilimler ile elde edebileceğini göstermektedir. Boyutsal avantajlarının yanı sıra, sunulan yöntem geniş bantta çalışma ve sol-sağ ayrımı gibi ek performans avantajları da sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler—akustik vektör sensör; dizilim sinyal işleme; hüzme oluşturma.

Abstract—In this paper, a new method for processing signals measured using a linear array of sensors capable of measuring both the acoustic pressure and the particle motion is described. The method relies on extracting the acoustic modes of the propagating wavefield using the spatial gradients of the field variables. Numerical simulations reveal that the proposed broadband beamformer achieves a directivity factor comparable to conventional beamformers with an aperture that is at least 80 percent shorter while providing all the advantages of particle velocity measuring sensors such as left-right discrimination.

Keywords—acoustic vector sensor; array processing; beamforming.

I. GİRİŞ

Uzayda bir noktadaki akustik alan, hem skaler akustik basınç, hem de vektörel akustik partikül hareketi değişkenleri ile tam olarak tanımlanabilir. Partikül hareketi, yönsellik içeren bir değişken olması sebebi ile akustik alan hakkında basınca göre daha fazla bilgi içermektedir ve akustik yer değiştirme, hız veya ivme cinsinden ifade edilebilir. Akustik basınç ölçümü mikrofon veya hidrofondan yapılmaktadır. Basıncın ölçümü daha kolay olması sebebi ile, akustik uygulamalar geleneksel olarak sadece basınç ölçümleri üzerine kurulmuştur. Son yıllarda, özellikle 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.

Tek bir AVS ile kardioid şeklinde hüzme paternleri oluşturabilmektedir. Bu hali ile tek bir AVS'in yönselliği, sadece basınç ölçen ve yönselliği olmayan mikrofon veya hidrofondan göre 2 kat daha fazladır. Yine tek bir AVS ile süper-kardioid hüzme paterni de oluşturulabilmektedir. Süper-kardioidler yönselliği, basınç algılayıcılarına göre 4 kat daha fazladır. Bu yönsellik avantajlarından dolayı, akustik alanın yönselliğinin kestirimini içeren doğrusal dizilim uygulamalarında, AVS dizilimleri mikrofon/hidrofon dizilimlerine göre performans ve/veya boyutsal avantajlar sağlamaktadır.

Doğrusal AVS dizilimlerinde en temel yaklaşım, konvansiyonel geciktir-ve-topla yöntemi ile çalışan dizilimlerindeki basınç algılayıcılarının AVS'ler ile değiştirilmesidir. Bu yapıdaki dizilimlere uygulanan doğrusal sinyal işleme yöntemleri, konvansiyonel dizilimlere göre en az 3 kat daha iyi yönselliğe sahiptir [1]. Doğrusal olmayan yöntemler ile yönsellikteki iyileşme daha da artmaktadır [2]. Ancak bu yöntemlerin uygulandığı AVS dizilimleri konvansiyonel dizilimlere göre boyutsal bir avantaj sunmamaktadır.

Sunulan bildiri doğrusal AVS'ler için geliştirilen yeni bir dizilim sinyal işleme yöntemi açıklanmaktadır. Bu yöntem, geleneksel yöntemlerin aksine, AVS'lerde ölçülen sinyallerin birbirlerinden çıkarılması ile elde edilen uzaysal gradyanları kullanarak, akustik alanın yönselliği yüksek akustik modlarının çıkartılması ve işlenmesine dayalıdır. Geliştirilen bu yöntem, boyutsal avantajlarının yanı sıra, geniş bantta çalışabilme, sol-sağ ayrımı yapabilme gibi basınç algılayıcılarından oluşan konvansiyonel dizilimlerde olmayan ek özelliklere sahiptir. Boyutsal ve performans avantajlarından dolayı bu yöntemin işleme cihazları, mobil telekonferans

sistemleri ve sualtı insansız araçları için kısa çekili dizilimler gibi pek çok uygulama alanı bulması öngörülmektedir.

II. AKUSTİK MOD DOĞRUSAL DİZİLİM TEORİSİ

A. Akustik Basınç ve Partikül Hızı Alanları

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 partikül hızı (v) alan değişkenleri,

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

olarak ifade edilebilmektedir (zaman değişkenini içeren $\exp(j\omega t)$ terimi ihmal edilmiştir). Bu denklemde $j = \sqrt{-1}$, P ve V basınç ve partikül hızı genliğini, ψ akustik dalganın geliş (azimut) açısını, k dalga numarasını ifade etmektedir.

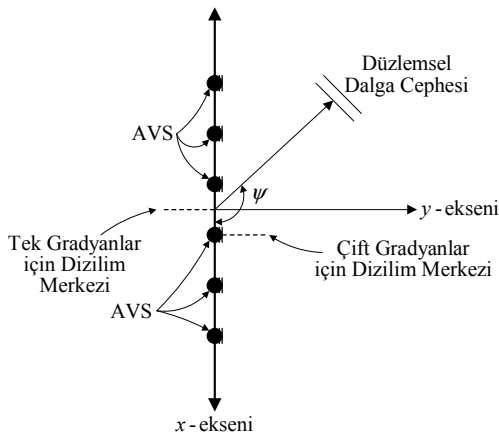
Denklem (1)'de verilen akustik partikül hızı alan değişkenlerinin x -ekseni boyunca n . dereceden uzaysal gradyanları,

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

olarak türetilir. Bu uzaysal gradyanların, dizilimin merkezi olarak kabul edilen $x = 0$ noktasındaki değerleri

$$\begin{aligned} \frac{\partial^n v_x}{\partial x^n} v_x(0) &= V (jk)^n (\cos \psi)^{n+1}, \\ \frac{\partial^n v_y}{\partial x^n} v_y(0) &= V (jk)^n \sin \psi (\cos \psi)^n \end{aligned} \quad (3)$$

şeklinde hesaplanır.



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

B. Uzaysal Gradyanların Sonlu Fark Yöntemi ile Kestirimi

Denklem (2)'de verilen ve akustik partikül hızı gradyanlarının dizilimin merkezindeki değerlerini, dizilim üzerindeki AVS'lerde yapılan ölçümlerden kestirimi için,

$$g_n[v(\xi)] = \frac{\delta_n[v(\xi)]}{d^n} \quad (4)$$

sonlu fark operatörü kullanılmaktadır. Bu denklemde $v(\xi)$ akustik partikül hızı değişkeninin $x = \xi$ koordinatındaki değerini, d ölçüm yapılan AVS'ler arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. $\delta_n(\cdot)$ operatörü ise,

$$\delta_n[v(\xi)] = \sum_{l=0}^n (-1)^{n-l} \binom{n}{l} v(\xi + (l - n/2)d) \quad (5)$$

denklemleri ile tanımlanmaktadır. Denklem (5)'te yer alan iki terimli (binom) katsayıları,

$$\binom{n}{l} = \frac{n!}{l!(n-l)!} \quad (6)$$

eşitliği ile elde edilmektedir.

AVS'ler arasındaki mesafenin dalgaboyuna göre çok daha az olduğu durumlarda (bir başka ifade ile, $kd \ll 1$ eşitsizliğinin sağlandığı durumlarda), 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.

C. Akustik Modların Hesaplanması

Denklem (2)'de tanımlanan akustik partikül hızı alan gradyanları, dizilim boyunca belli noktalara yerleştirilen AVS'lerden elde edilen hız ölçümleri ve $g_n(\cdot)$ operatörü ile kestirilebilmektedir. Denklem (3)'ten görülebileceği üzere, partikül hızının x - ve y -ekseni doğrultusundaki n . dereceden alan gradyanları, sırası ile $(\cos \psi_i)^{n+1}$ ve $\sin \psi_i (\cos \psi_i)^n$ terimlerini içermektedir. Chebyshev polinomlarının özelliklerinden faydalanılarak, x -ekseni doğrultusundaki uzaysal gradyanlar,

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

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

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} v_x(0) = V(jk)^n \cdot \begin{cases} C_1 \cdot \cos[(n-2l+1)\psi], n \text{ çift} \\ C_2 \cdot \cos[(n-2l+1)\psi] + C_3, n \text{ tek} \end{cases} \quad (7)$$

$$C_1 = \frac{2}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{n/2} \binom{n+1}{l}, \quad C_2 = \frac{2}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{(n-1)/2} \binom{n+1}{l},$$

$$C_3 = \frac{1}{2^{n+1}} \binom{n+1}{(n+1)/2}$$

y-ekseni doğrultusundaki uzaysal gradyanlar ise

$$\frac{\partial^n}{\partial x^n} v_y(0) = V(jk)^n \cdot \begin{cases} D_1 \cdot \sin[(n-2l+1)\psi], n \text{ çift} \\ D_2 \cdot \sin[(n-2l+1)\psi], n \text{ tek} \end{cases} \quad (8)$$

$$D_1 = \frac{1}{2^n} \sum_{l=0}^{n/2} \left(\frac{n!(n-2l+1)}{l!(n-l+1)!} \right),$$

$$D_2 = \frac{1}{2^n} \sum_{l=0}^{(n-1)/2} \left(\frac{n!(n-2l+1)}{l!(n-l+1)!} \right)$$

ifadelerine indirgenebilir. Denklem (7)'de yer alan $\cos[(n-2l+1)\psi]$ terimleri akustik alanın cosinüs modları, denklem (8)'deki $\sin[(n-2l+1)\psi]$ terimleri ise sinüs modlarıdır. Bu modların, n gradyan derecesi ile artan yüksek yönsellik özellikleri bulunmaktadır.

D. Partikül Hızı Gradyanları ile Dizilim Sinyal İşleme

Tablo 1'den de görülebileceği üzere, tek ve çift gradyanların kestiriminden kullanılması gereken AVS'lerin konumları örtüşmemektedir. Bu durumdan, N . dereceye kadar gradyan kestiriminde $d/2$ aralıklarla yerleştirilmiş $2N+1$ AVS'e ihtiyaç duyulmaktadır. 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). Akustik alanın düzensel dalgalardan oluştuğu durumlarda, çift gradyanlar için kaydırılmış olan dizilim merkezi, sinyal işleme aşamasında uygulanacak bir zamanda geciktirme/ilerletme işlemi düzeltilebilir [3]. 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 ,

$$\mathbf{A}_x \cdot \mathbf{w}_x = \mathbf{b}_x, \quad \mathbf{A}_y \cdot \mathbf{w}_y = \mathbf{b}_y \quad (9)$$

eşitliklerinden en küçük kareler yöntemi ile elde edilir. Denklem (9)'da \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 (7) ve (8)'den hesaplanmaktadır. Ayrıca, denklem (9)'da yer alan \mathbf{b}_x ve \mathbf{b}_y vektörleri,

$$\mathbf{b}_x = [\cos \psi_s \quad \cos 2\psi_s \quad \cdots \quad \cos[(N+1)\psi_s]]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{b}_y = [\sin \psi_s \quad \sin 2\psi_s \quad \cdots \quad \sin[(N+1)\psi_s]]^T$$

şeklinde tanımlanmaktadır ve dizilimin yönlendirilmesi istenen istikametin azimut açısı (ψ_s) bilgisini içerir. Denklem (7)'de görüleceği üzere, x -ekseni doğrultusundaki uzaysal gradyanlar $\cos[(n-2l+1)\psi]$ ile ifade edilen akustik cosinüs modlarının yanı sıra C_3 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,

$$r(\psi_s) = \sum_{n=0}^{N+1} \cos[n(\psi - \psi_s)] \quad (11)$$

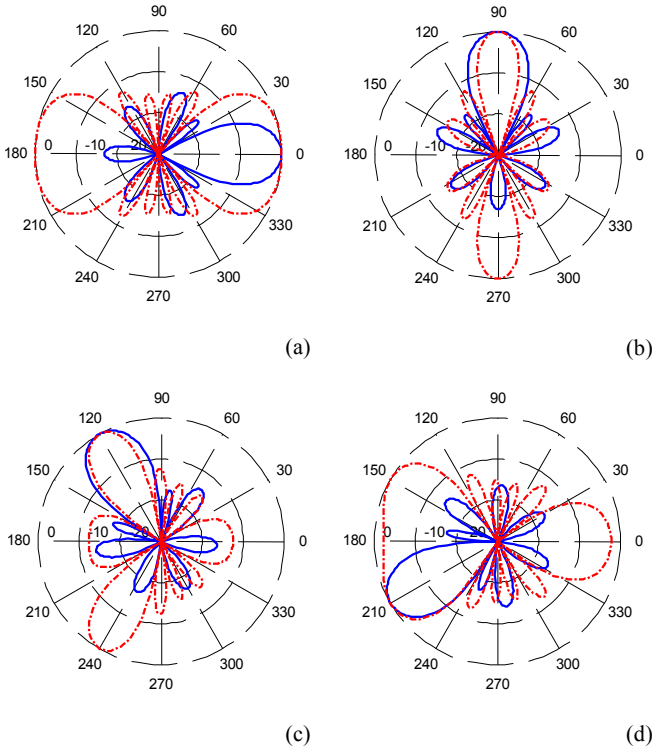
halini alır. Denklem (11)'de partikül hızı genliği $V=1$ olarak kabul edilmiştir ve genliğin değişik değerler alması sonucu değiştirmemektedir. Denklem (11)'de elde edilen dizilim tepkisi en yüksek değerine akustik dalğanın geliş ve dizilimin yönlendirilme azimut açılarının uyuştuğu ($\psi = \psi_s$) durumda ulaşır. Altı adet AVS'ten oluşan bir dizilimin, değişik yönlendirme durumlarında tepkisine göre elde edilen hüzmeye Şekil 2'de gösterilmiştir. Aynı şekil üzerinde 6 adet hidrofondan oluşan konvansiyonel bir çekili dizilimden elde edilen hüzmeye paterni karşılaştırma için verilmiştir. AVS diziliminde algılayıcılar arası mesafenin dalga boyuna oranı (λ/d) 30 iken hidrofondan diziliminde bu oran 2'ye düşmektedir. Bir başka ifade ile, hidrofondan diziliminin boyu AVS diziliminin yaklaşık 15 katıdır. Bunun yanı sıra, AVS diziliminin, hidrofondan dizilimine göre iki önemli özelliği dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki, dizilimin AVS'lerden oluşması sebebi ile sol-sağ (iskele-sancak) belirsizliği oluşmamaktadır. Yine konvansiyonel dizilimlerden farklı olarak dizilim bordadan baş ya da kık tarafına yönlendirildiğinde, hüzmeye paterninde önemli bozulmalar gözlenmemektedir. Son olarak, AVS diziliminde yan hüzmeye bastırımının bir miktar (~ 2 dB) daha iyi olduğu görülmektedir.

E. Yönsellik Fonksiyonu

AVS'ler için geliştirilen dizilimin yönsellik fonksiyonu,

$$D(\psi) = \frac{1}{2(M+1)} + \frac{\sin[(M+1/2)\psi]}{2(M+1)\sin(\psi/2)} \quad (12)$$

olarak hesaplanmaktadır. Denklem (12)'den de anlaşılacağı üzere dizilimin yönselliği çalışma frekansından bağımsızdır ($kd \ll 1$ koşulu sağlanmak şartı ile) ve sadece dizilimdeki AVS sayısına (M) göre değişmektedir. Bu sebepten ötürü dizilim geniş bantlı sinyallerin işlenmesine de uygundur.



Şekil 2. Altı AVS'den (düz, mavi) ve 6 mikrofon/hidrofondan (kesikli, kırmızı) oluşan dizilimlerin değişik yönlendirmelerde hüzmeye paternleri: (a)-baş (0°), b-borda (90°), (c)-120° ve (d) 210°.

III. SAYISAL BENZETİMLER

Bir önceki bölümde teorik analizi sunular AVS diziliminin değişik gürültü ortamlarındaki performansı sayısal benzetimler ile çözümlenmiştir. Bu bölümde, yapılan bu benzetim çalışmalarından sadece bir tanesi ile ilgili detaylar verilmektedir. Benzetimlerde, sualtı uygulamalarına yönelik tasarlanmış, su yüzeyine paralel 10 cm aralıkla yerleştirilmiş 6 AVS'ten oluşan bir dizilim yapısı kullanılmıştır. Akustik alanın 500 Hz'lik zaman-harmonik düzlemsel dalgardan kaynaklandığı, ortam gürültüsünün ise eş-yönlü bir alan olduğu kabul edilmiştir. AVS'ler arası mesafenin konvansiyonel dizilimlere göre daha az olması, dizilim sinyal işlemede sıklıkla yapılan algılayıcılarda ölçülen gürültünün bağımsız olduğu varsayımı gerçekçi olmamaktadır. Sayısal benzetimlerde kullanılmak üzere üç boyutlu ve eş-yönlü sualtı akustik gürültü alanı uzaysal korelasyonlardan [4] otoregresif süreçler olarak sentezlenmiştir. Değişik sinyal-gürültü oranları için elde edilen sayısal benzetim sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere, dizilimin performansı 5 dB'e kadar kabul edilebilir seviyelerdedir ve bu seviyelerde bile yaklaşık 8 dB'lik sol-sağ ayrımı sağlanmaktadır. Değişik dizilim yapıları ve gürültü alanlarında yapılan benzetimler, AVS diziliminin konvansiyonel dizilimlere eşdeğer performansı en az %80 daha kısa dizilim boylarında elde ettiğini göstermektedir.

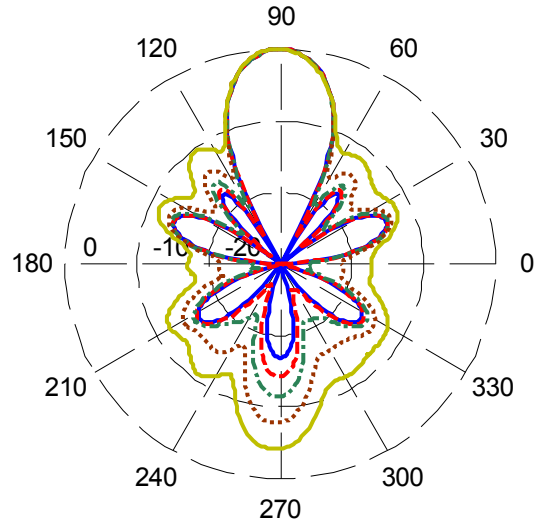
IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bildiriye akustik basıncı ve partikül hızını aynı anda ölçebilen AVS'lerden oluşan doğrusal dizilimler için

geliştirilen yeni bir sinyal işleme ve hüzmeye oluşturma yöntemi sunulmaktadır. Sunulan bu yöntemin temelinde, ölçülen partikül hızı sinyallerinin, birbirlerinden çıkarılmasını içeren sonlu fark yöntemi ile uzaysal gradyanların kestirimi yer almaktadır. Bu gradyanlardan elde edilen ve yüksek yönselliğe sahip olan akustik modların yapıcı bir şekilde işlenmesi ile yönselliği yüksek, istenen istikamete yönlendirilebilen hüzmeye paternleri elde edilebilmektedir. Geliştirilen yöntemi kullanan AVS dizilimleri, eşit miktarda basınç algılayıcıdan oluşan konvansiyonel dizilimlere eşdeğer yönsellik performansını beşte biri kadar veya daha kısa (%80 daha kısa) dizilim boyları ile sağlamaktadır. Şekillere konu olan AVS dizilimi, sadece 50 cm uzunluğundayken konvansiyonel dizilimin uzunluğu 7.5 m'dir. Bunun yanı sıra, sunulan dizilim, AVS'lerden oluşması sebebi ile sol-sağ ayrımı sağlamakta, değişik yönlendirme açılarında hüzmeye yapısını korumakta, gürültüye karşı düşük hassasiyet göstermektedir ve 2 dB daha düşük yan hüzmelere sahiptir. Akustik mod hüzmeye oluşturunun ilk uygulama alanı olarak sualtı insansız araçlarından çekilmek için tasarlanan kısa çekili dizilimler olması öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Cray, B. A. and Nuttall, A. H. "Directivity factors for linear arrays of velocity sensors", *J. Acoust. Soc. Amer.*, 110(1):324-331, 2001.
- [2] Smith, K. B. and van Leijen, A. V. "Steering vector sensor array elements with linear cardioids and nonlinear hippoids", *J. Acoust. Soc. Amer.*, 122(1):370-377, 2007.
- [3] 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.
- [4] D'Spain, G. L., Luby, J. C., Wilson, G. R. and Gramann, R. A. "Vector sensors and vector sensor line arrays: Comments on optimal array gain and detection", *J. Acoust. Soc. Amer.*, 120(1):171-185, 2006.



Şekil 3. Altı AVS'den oluşan ve bordaya yönlendirilen dizilimin değişik sinyal-gürültü oranı seviyelerindeki performansı: düz/mavi-∞, kesikli/kırmızı-15 dB, noktalı kesikli-noktalı/yeşil-10 dB, noktalı/bordo-5 dB, düz/sarı-0 dB.