

Dairesel Akustik Vektör Sensör Dizinleri için Kipsel Hüzme Oluşturucu

Modal Beamforming for Circular Acoustic Vector Sensor Arrays

Berke GÜR
Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Bahçeşehir Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
berke.gur@eng.bau.edu.tr

Özetçe —Bu bildiride, dairesel akustik vektör algılayıcı dizinler için geliştirilen kipsel hüzme oluşturucular incelenmiştir. Bilimsel yazımda yer alan basınç ve 2-boyutlu (2B) parçacık hızı ölçümlerine dayalı hüzme oluşturuculara alternatif olarak sadece bir yöndeki parçacık hızı ölçümlerini kullanan bir kipsel hüzme oluşturucu geliştirilmiştir. Kipsel hüzme oluşturucular yönsellik başarımları bakımından incelenmiş ve geliştirilen yöntemin basınç algılayıcı dizinlere göre özellikle beyaz gürültü kazanımı yönünden daha yüksek başarıma sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, söz konusu yöntem 2B vektör algılayıcı dizinlere benzer bir yönsellik başarımlarını çok daha az algılayıcı kullanarak yakalayabilmektedir.

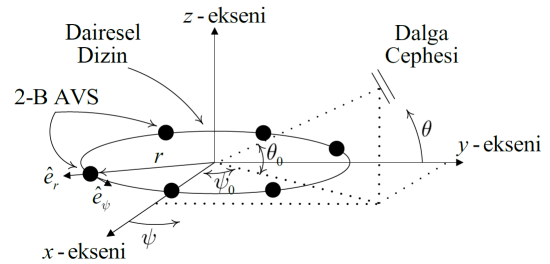
Anahtar Kelimeler—akustik vektör algılayıcı, dairesel dizin, kipsel hüzme oluşturucu.

Abstract—In this paper, modal beamformers for circular vector sensor arrays are investigated. As an alternative to existing methods for pressure and 2-dimensional (2D) particle velocity sensor arrays, a modal beamformer for circular arrays of 1D acoustic vector sensors is presented. Directivity performance of these modal beamformers are analyzed and the proposed method is shown to perform better compared to pressure arrays due to improved white noise gain. Furthermore, it is also shown that the proposed method can achieve a directivity performance similar to that of the 2D vector sensor array using only half the number of sensors.

Keywords—acoustic vector sensor, circular array, modal beamforming.

I. GİRİŞ

Akustik vektör algılayıcılar, mikrofon veya hidrofona benzer ölçebildiği skaler bir değişken olan basınca ek olarak akustik alandaki çok küçük boyutlu kütleli ivme [1] veya parçacık hızını [2] ölçebilen yeni nesil algılayıcılardır. Parçacık hızının vektörel (yönel) bir alan değişkeni olması sebebiyle vektör algılayıcılar kullanılarak akustik alan hakkında daha fazla bilgi toplamak mümkündür. Bu sebeple vektör algılayıcı dizinler, yönsel olmayan basınç algılayıcılardan oluşan geleneksel pasif dizinlere kıyasla daha seçici dinleme, yüksek doğrulukta hedef ve kriteriz tespiti ve işaret-gürültü oranında iyileşme gibi bazı avantajlar sağlamaktadır. Bu bildiriye 1B parçacık hızı



Şekil 1: M adet 2-B vektör sensörden oluşan dairesel dizin ve bu dizine gelen düzlemsel ses dalgası.

algılayıcılarından oluşan küçük dairesel dizinlere uygun bir kipsel hüzme oluşturucu tanıtılmaktadır.

II. DAİRESEL VEKTÖR ALGILAYICI DİZİNLERİ

Bu bölümde, öncelikle dairesel bir vektör algılayıcı dizinde ölçülen akustik işaretler, ardından da geliştirilen kipsel hüzme oluşturucu ve bu hüzme oluşturucunun karşılaştırıldığı alternatif kipsel hüzme oluşturucular açıklanmaktadır.

A. Dairesel Dizinin Boyunca Akustik Alan

Şekil 1’de gösterildiği gibi merkezinde Kartezyen koordinat sistemi yer alan M adet 2B vektör algılayıcıdan oluşan bir dairesel dizin varsayılmıştır. Dizinin ıraksak 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 $[r_m = r, \psi_m = 2\pi m/M, \theta_m = 0]$ küresel koordinatlarında yer alan bir akustik vektör algılayıcısının basınç kanalının ölçümü

$$p_m = \mathcal{P} \exp[ikr \cos \theta_0 \cos(\psi_m - \psi_0)] \quad (1)$$

olarak gerçekleşir. Denklem (1)’de $i = \sqrt{-1}$ karmaşık sayısını, \mathcal{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

$$p_m = \mathcal{P} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(kr \cos \theta_0) \cos[n(\psi_m - \psi_0)]. \quad (2)$$

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

$$v_{r,m} = -\mathcal{V} \cos \theta_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^{n+1} J'_n(kr \cos \theta_0) \cos[n(\psi_m - \psi_0)] \quad (3a)$$

$$v_{\psi,m} = \frac{\mathcal{V}}{kr} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^{n+1} n J_n(kr \cos \theta_0) \sin[n(\psi_m - \psi_0)] \quad (3b)$$

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

B. Basınç Algılayıcı Dizinler için Kipsel Hüzme Oluşturucu

Bu bölümde, basınç algılayıcılardan oluşan açık dairesel dizinlerde uygulanabilecek kipsel hüzme oluşturucu, Franklin'in [3] türetimleri doğrultusunda açıklanmıştır. 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 (2)'de verilen basınç ölçümlerine uygulanması ile pozitif uzaysal indeksler olan $l = 0, 1, \dots, L$ için

$$P(l) \approx \mathcal{P} i^l J_l(kr \cos \theta_0) M \exp(-il\psi_0) \quad (5)$$

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, dizinlerin tek sayıda algılayıcı ile tasarlanması daha uygun olacaktır. Denklem (5)'in türetimine yer darlığından dolayı yer verilmemiştir. Ancak bu türetimdeki yaklaşık eşitliğin geçerli olması için $kr \leq 1$ koşulunun sağlanması gerekmektedir. Bu koşul, herhangi bir r yarıçapına sahip dairesel dizin kullanılarak işlenebilecek akustik dalgaların üst frekans limitini $f \leq c/(2\pi r)$ olarak belirlemektedir.

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

$$\text{Re}[a_p(l)P(l)] = \mathcal{P} \frac{J_l(kr \cos \theta_0)}{J_l(kr)} \cos(l\psi_0) \quad (6a)$$

$$\text{Im}[a_p(l)P(l)] = -\mathcal{P} \frac{J_l(kr \cos \theta_0)}{J_l(kr)} \sin(l\psi_0) \quad (6b)$$

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

$$\mathbf{w}_R = [\tilde{w}_0, \tilde{w}_1 \cos \psi_s, \dots, \tilde{w}_L \cos(L\psi_s)] \quad (7a)$$

$$\mathbf{w}_I = [0, -\tilde{w}_1 \sin \psi_s, \dots, -\tilde{w}_L \sin(L\psi_s)] \quad (7b)$$

süzgeçleri uygulanarak ana hüzmenin ψ_s yanca yönüne yönlendirilmesi sağlanır. Denklem (7)'de 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.

C. 2B Parçacık Hızı Dizinleri için Kipsel Hüzme Oluşturucu

Zou ve Nehorai [4] tarafından 2B akustik parçacık hızı algılayıcılarından oluşan dairesel dizinler için bir kipsel hüzme oluşturucu geliştirilmiştir. Söz konusu bu hüzme oluşturucu, bir sonraki bölümde açıklanan ve bu bildirin ana konusu olan 1B parçacık hızı algılayıcı dizinler için geliştirilen kipsel hüzme oluşturucuya oldukça benzer olması sebebi ile bu bölümde açıklanmıştır. Ancak, burada yansıma ve saçınımların ihmal edilerek türetimlerin kolaylaştırılması için, Zou ve Nehorai'nin aksine açık dairesel bir dizin yapısı varsayılmıştır.

Denklem (3a)'de verilen radyal parçacık hızı ölçümlerine

$$X(l) = \sum_{m=0}^{M-1} x_m \cos(2\pi ml/M) \quad (9)$$

olarak tanımlanan ayrık kosinüs dönüşümünün uygulanması ile $l = 0, 1, \dots, L$ için $V_r(l) = D_l M \cos(l\psi_0)$ şeklinde akustik alanın kosinüs kiplerini içeren dönüşüm katsayıları elde edilir. Bu denklemdeki katsayılar $D_l = -\mathcal{V}i^{l+1} \cos \theta_0 J_l'(kr \cos \theta_0)$ olarak yazılabilir. Benzer şekilde (3b)'de verilen çevresel yöndeki parçacık hızı ölçümlerine ayrık kosinüs dönüşümünün uygulanması ile $l = 0, 1, \dots, L$ için $V_\psi(l) = -E_l M \sin(l\psi_0)$ ve $E_l = \mathcal{V}i^{l+1} l \cos \theta_0 J_l'(kr \cos \theta_0)/(kr)$ denklemleri ile tanımlanan sinüs kipleri elde edilir. Radyal ve çevresel kip katsayılarına sırası ile $a_r(l) = -[i^{l+1} J_l'(kr)M]^{-1}$ ve $a_\psi(l)/i = -[(i^{l+1}/kr)J_l(kr)M]^{-1}$ dengeleme katsayılarının uygulanmasından ardından kosinüs ve sinüs kiplerinin toplanarak ana hüzmeyi yönlendirilmesi için (7)'de tanımlanan süzgeçler kullanılır. Dizin düzleminde gelen bir dalga için elde edilen dizin tepkisi basınç algılayıcı dizinler için (8)'de verilen tepkiye eşit bulunur.

D. 1B Parçacık Hızı Dizinleri 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, Zou'nun aksine dizinin sadece radyal yönde ölçüm yapabilen 1B parçacık hızı algılayıcılarından oluştuğu kabul edilir. Bu algılayıcılarda yapılan ölçümler (3a)'da verilmiştir. Radyal doğrultudaki parçacık hızı ölçümlerine (4)'te verilen uzaysal Fourier dönüşümünün uygulanması ile

$$V_r(l) \approx -\mathcal{V}i^{l+1} \cos \theta_0 J_l'(kr \cos \theta_0) M \exp(-il\psi_0), \quad (10)$$

olarak açılabilen $l = 0, 1, \dots, L$ dereceli Fourier katsayıları elde edilir. Bu Fourier katsayılarının $a_r(l) = -[i^{l+1} J_l'(kr)M]^{-1}$ katsayıları ile dengelenerek

$$\text{Re}[a_r(l)V(l)] = \mathcal{V} \cos \theta_0 \frac{J_l'(kr \cos \theta_0)}{J_l'(kr)} \cos(l\psi_0) \quad (11a)$$

$$\text{Im}[a_r(l)V(l)] = -\mathcal{V} \cos \theta_0 \frac{J_l'(kr \cos \theta_0)}{J_l'(kr)} \sin(l\psi_0) \quad (11b)$$

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

Bir düzlemde gelen bir akustik dalgaya basınç, 2B parçacık hızı ve 1B (radyal) 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.

III. 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 ve beyaz gürültü kazanımıdır. Bu bölümde, kipsel hüzme oluşturucular için her iki etken de ayrı ayrı incelenmiştir.

A. Yönsellik Çarpanı

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

$$YÇ = \frac{\int_0^{2\pi} d\psi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\psi, \theta) \cos \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\psi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\psi, \theta) F(\psi, \theta) \cos \theta d\theta} \quad (12)$$

oranı ile hesaplanmaktadır. Denklem (12)'te $F(\psi, \theta)$ gürültü alanının yönsel yeğinliğini, $B(\psi, \theta) = |R(\psi, \theta)|^2$ ise dizinin yönsel tepki gücünü göstermektedir. 2B ve 3B eş-yönlü gürültü alanları için yönsel yeğinlik, sırasıyla $F_{2B}(\psi, \theta) = \delta(\theta)$ ve $F_{3B}(\psi, \theta) = 1$ 'dir. Bir önceki bölümde türetilen her üç kipsel hüzme oluşturucunun da dizin tepkileri [(8)'de verilmiştir] ve dolayısı ile de yönsel tepki güçleri aynıdır. Bu durumda, her üç hüzme oluşturucu için de tek bir YÇ hesabı yapılması yeterlidir. Denklem (8)'de verilen dizin tepkisi ve $F(\psi, \theta)$ olarak ifade edilen gürültü yönsel yeğinlik değerlerinin (12)'ye yerleştirilmesi ile 2B ve 3B gürültü alanlarındaki kipsel hüzme oluşturucuların YÇ'leri elde edilir.

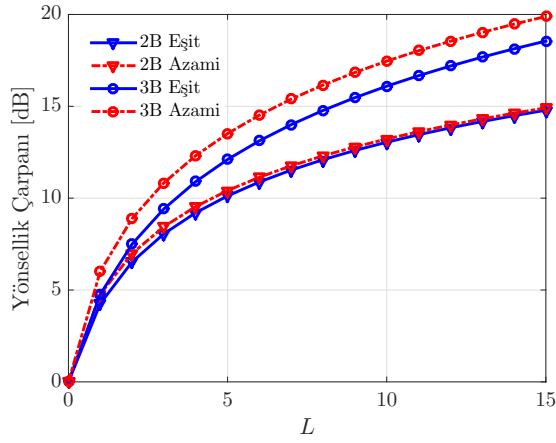
Dikkate alınması gereken bir diğer önemli etken de kiplerin alacağı ve \tilde{w}_l katsayıları ile temsil edilen ağırlıklardır. En temel yaklaşımda, her kip için eşit ağırlık (örneğin, $\tilde{w}_l = 1$) varsayılabilir. 2B gürültü alanı için eşit kip ağırlıkları kullanılması durumunda (12) sadeleşerek $YÇ_{2B} = 2(L+1)^2/(L+2)$ halini alır. 3B gürültü alanı için ise bu tarz bir sadeleşme mümkün olmamakta ve YÇ değeri sayısal olarak hesaplanmaktadır. Eşit kip katsayıları temel bir yaklaşım olmakla birlikte, olabilecek en iyi YÇ'yi vermemektedir. Buna alternatif olarak, mümkün olan azami YÇ değerini sağlayan kip ağırlıkları tercih edilebilir. Azami YÇ'yi veren bu kip ağırlıkları, YÇ için kip ağırlıkları cinsinden çok değişkenli en iyileme problemi olarak çözümlenebilir. Bunun sonucunda, 2B gürültü alanı için azami YÇ'yi veren kip ağırlıkları

$$\tilde{w}_{2B, \text{opt}}(l) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } l = 0, \\ 2 & \text{diğer kipler,} \end{cases} \quad (13)$$

olarak hesaplanır. Bu durumda $YÇ_{2D, \text{opt}} = 1 + 2L$ olarak gerçekleşir. 3B gürültü alanı için ise bu ağırlıklar

$$\tilde{w}_{3B, \text{opt}}(l) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } l = 0, \\ \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(3/2+l)}{\Gamma(l+1)} & \text{diğer kipler,} \end{cases} \quad (14)$$

olarak gerçekleşir [3]. Denklem (14)'da $\Gamma(\cdot)$ gama işlevini ifade etmektedir. 3B gürültü alanı için azami yönsellik



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

$$Y\mathcal{C}_{3B,opt} = 1 + \sum_{l=1}^L \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(3/2 + l)}{\Gamma(l + 1)} \quad (15)$$

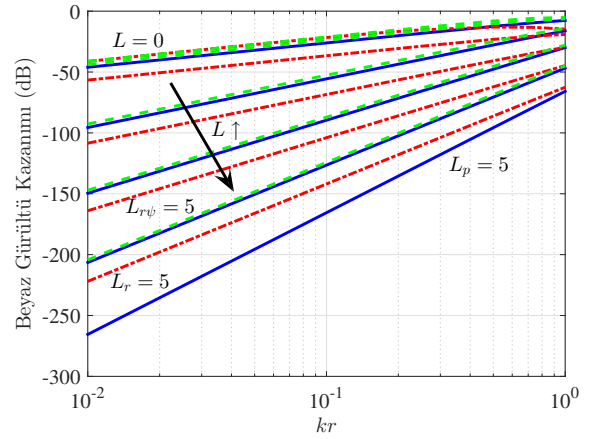
değerine ulaşır. Elde edilen YÇ değerlerinin kip derecesine (L) göre değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi 2B eş-yönlü gürültü alanı için kayda değer bir iyileşme görülmemekle birlikte, 3B gürültü alanlarında uygun kip ağırlıkları kullanılarak YÇ ortalama 1,5 dB kadar iyileştirilebilmektedir.

B. Beyaz Gürültü Kazanımı

Bir önceki bölümde incelenen ortam gürültüsü haricinde dizin başarımını etkileyen bir başka gürültü tipi de uzaysal olarak ilintisiz olan beyaz gürültüdür. Bu tip gürültüye örnek olarak algılayıcılar çevresindeki yerel akışkan hareketleri, elektronik veya ısıl gürültüler gösterilebilir. Kipsel hüzme oluşturmalar ilintili ortam gürültüsüne karşı dirençli olmakla birlikte, başarımları beyaz elektronik gürültüsüne oldukça duyarlıdır. Bu sebeple kipsel dizinlerin beyaz gürültü başarımlarını değerlendirmek gerekmektedir. Dizinin beyaz gürültü altında sağladığı işaret-gürültü oranındaki iyileşme

$$BGK = 1/(\bar{\mathbf{w}}^H \cdot \bar{\mathbf{w}}) \quad (16)$$

denklemleri ile ifade edilen beyaz gürültü kazanımı (BGK) ile sayısal olarak değerlendirilir. Denklem (16)’da $\bar{\mathbf{w}}$ algılayıcıdan elde edilen ölçümlere uygulanan yekûn (Fourier dönüşümü, dengeleme ve yönlendirme dahil) işlem, $(\cdot)^H$ ise Hermit (devril-eşlenik) işlemidir. Farklı kr ve L için BGK değerleri sayısal olarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar (14)’te verilen en uygun kip ağırlıkları için Şekil 3’te gösterilmiştir. Her üç dizin tipi için de artan azami kip derecesi L ile birlikte (beklenildiği üzere) BGK düşmektedir. 2B ve 1B parçacık hızı algılayıcı dizinlerin YÇ başarımları basınç kipsel hüzme oluşturmalar ile eşdeğer olmakla birlikte, bu dizinlerin BGK başarımları basınç dizinlerine göre 40 dB’e varan oranlarda iyidir. Ancak 2B ve 1B parçacık hızı algılayıcı dizinleri arasındaki BGK farkı ise ihmal edilecek kadar düşüktür.



Şekil 3: Basınç (düz, mavi), 2B (yeşil, kesik) ve 1B (radyal) parçacık hızı (kırmızı, noktali-kesik) kipsel hüzme oluşturmalarının BGK’sının kr değerlerine göre değişimi.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bilimsel yazımda yer alan basınç ve 2B parçacık hızı algılayıcılarından oluşan iki farklı dairesel dizine alternatif olarak önerilen ve 1B parçacık hızı algılayıcılarından oluşan dizinler için geliştirilen bir kipsel hüzme oluşturmaları açıklanmaktadır. Önerilen yöntemde, 1B parçacık hızı algılayıcılarından elde edilen ölçümlerin uzaysal Fourier dönüşümü alınarak akustik alanın yüksek yönselliği 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 her üç hüzme oluşturmalarının da eşdeğer yönsellik özelliklerinin olduğu gösterilmiştir. Buna karşın, parçacık hızı dizinlerinin ilintisiz elektronik gürültüsü için başarımları basınç dizinlerine göre önemli oranda iyidir. Önerilen 1B parçacık hızı algılayıcılarından oluşan dizin ise kendisinden iki misli daha fazla algılayıcı kullanan 2B dizine kıyasla gerek ortam gürültüsü gerekse de beyaz gürültü altında eşdeğer bir başarıma sahip olduğu gösterilmiştir. 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.

KAYNAKLAR

- [1] M. T. Silvia, R. T. Richards, "A theoretical and experimental investigation of low-frequency acoustic vector sensors", in *Proc. MTS/IEEE OCEANS '02 Conf.*, Apr. 2002, pp. 1886-1897.
- [2] F. Jacobsen, H. E. de Bree, "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] J. B. Franklin, "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, Oct. 1997.
- [4] N. Zou, A. Nehorai, "Circular acoustic vector-sensor array for mode beamforming", *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 8, pp. 3041-3052, Aug. 2009.