



# Uygun maliyetli seyrekliğe duyarlı akustik geri besleme giderici

## Cost-effective sparsity aware acoustic feedback canceller

Yusuf Eren<sup>1,\*</sup> , Engin Cemal Mengüç<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup> Kayseri Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

### Öz

Akustik geri besleme giderici (acoustic feedback canceller, AFC) sistemlerinde karşılaşılan önemli sorunlardan biri AF yolunun seyrek bir doğaya sahip olmasıdır. Bu durum AFC sistemlerinin yakınsama oranını ve kararlı durum hatasını kötüleştirir. Öte yandan konuşma/müzik gibi büyük ölçekli kaynak sinyalleri ve yüksek filtre derecelerinin kullanılması AFC sistemlerinin hesaplama maliyetini artırmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada, uygun maliyetli  $l_0$ -norm-çevrim içi sansürleme (online censoring, OC)-en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) ( $l_0$ -OC-LMS) tabanlı AFC sistemi ( $l_0$ -OC-AFC) önerilmiştir. Tüm veriler yerine yalnızca bilgilendirici verileri işleyerek AF yolunun seyrek sorununu ortadan kaldırır. Böylece önerilen AFC sistemi, performansından ödün vermeden hesap yükünün azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu, OC stratejisi ve seyrekliğe teşvik eden  $l_0$  ceza normunun birleştirilmesiyle elde edilir. Önerilen  $l_0$ -OC-AFC sistemi, kulak arkası işitme cihazından ölçülen gerçek dünyadaki uzun seyrek AF yolları üzerinde yanlış ayarlama (misalignment, MIS) ve eklenmiş sabit kazanç (added stable gain, ASG) açısından kapsamlı bir şekilde test edilmiştir. Benzetim sonuçları önerilen  $l_0$ -OC-AFC sisteminin etkinliğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Akustik geri besleme giderici, Çevrim içi sansürleme stratejisi, En küçük kare algoritması, Adaptif filtre, Seyreklik

### 1 Giriş

İşitme cihazları; yapısında mikrofon, güçlendirici ve hoparlör bulunan ve bireylerin duyma yetisini iyileştirmeyi amaçlayan biyomedikal bir cihazdır ve mikrofon aracılığıyla ortamdaki ses sinyallerini algılar ve ardından bunları güçlendirerek hoparlör vasıtasıyla kullanıcıya ulaştırır. Giyilebilir işitme cihazlarının boyutlarının küçük olması nedeniyle mikrofon ve hoparlör üniteleri birbirine oldukça yakın konumlanmaktadır. Bu durum, güçlendirilmiş sinyalin mikrofon tarafından yeniden yakalanma olasılığını önemli oranda artırmaktadır. İstenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkan güçlendirilmiş sinyalin mikrofon tarafından yeniden yakalanması olayı akustik geri besleme (acoustic feedback, AF) olarak adlandırılmaktadır. Kulakta uğultuya sebebiyet

### Abstract

One of the important problems encountered in acoustic feedback canceller (AFC) systems is the AF path has a sparse nature. This situation deteriorates the convergence rate and steady-state error of AFC systems. On the other hand, large-scale source signals such as speech/music and using high filter orders increase the computational cost of AFC systems. To this end, in this study, a cost-effective  $l_0$ -norm-online censoring (OC)-least mean square (LMS) ( $l_0$ -OC-LMS) based AFC system ( $l_0$ -OC-AFC) is proposed, which solves the sparse problem of the AF path by processing only informative data instead of all the data. Thus, the proposed AFC system significantly contributes to reducing the computational complexity without sacrificing its performance. This is achieved by combining the OC strategy and the  $l_0$  penalty norm promoting sparsity. The proposed  $l_0$ -OC-AFC system is comprehensively tested in terms of the misalignment (MIS) and the added stable gain (ASG) on real-world long sparse AF paths measured from a behind-the-ear hearing aid. Simulation results reveal the effectiveness of the proposed  $l_0$ -OC-AFC system.

**Keywords:** Acoustic feedback canceller, Online censoring strategy, Least mean square algorithm, Adaptive filter, Sparsity

veren AF aynı zamanda giyilebilir işitme cihazını kararsızlığa sürükleyerek cihazın gereğinden fazla güç harcamasına neden olmaktadır [1, 2].

Literatürde AF giderici olarak adaptif filtre tabanlı yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır [3]. Adaptif filtre tabanlı AFC sistemlerinde temel amaç, AF yolunun kestirimini yapmak ve ardından kestirilmiş AF yolunu mikrofon sinyalinden çıkararak AF etkisinin giderildiği temiz sinyali elde etmektir [3]. Adaptif filtre tabanlı klasik bir AFC'nin blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de;  $s(n)$ ,  $f(n)$ ,  $d(n)$ ,  $y(n)$ ,  $e(n) = d(n) - y(n)$  ve  $x(n)$  sırasıyla kaynak ses sinyalini, AF sinyalini, mikrofon çıkış sinyalini, kestirilmiş AF sinyalini, hata sinyalini ve adaptif filtre giriş sinyalini/hoparlör sinyalini temsil eder. Şekil 1'de

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yusuferen@erciyes.edu.tr (Y. Eren)

Geliş / Received: 21.07.2024 Kabul / Accepted: 19.09.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024

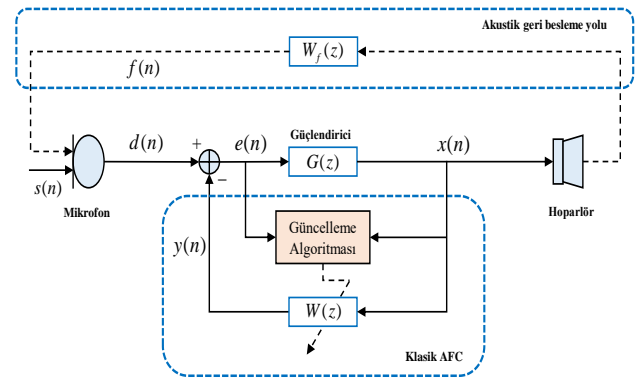
doi: 10.28948/ngumuh.1519986

gösterildiği üzere AF sinyali mikrofonu AF yolu olarak adlandırılan yol üzerinden döner ve  $W_f(z)$  AF yolunun transfer fonksiyonunu gösterir. Buna ek olarak,  $G(z)$  güçlendirici transfer fonksiyonunu ve  $W(z)$  adaptif sonlu dürtü cevaplı (finite impulse response, FIR) filtrenin transfer fonksiyonunu ifade eder. Şekilden de görüldüğü üzere adaptif FIR filtre ağırlık vektörü  $\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{M-1}(n)]^T$  bir güncelleme algoritması tarafından adaptif olarak güncellenir. Literatürde güncelleme algoritması olarak basit hesap yükü ve gürbüz çalışabilirliği açısından en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) algoritmasının ve farklı versiyonlarının kullanımı ön plana çıkmaktadır [1-14].

AF yolu seyrek bir doğaya sahiptir, diğer bir deyişle AF yolu ağırlıkları çoğunlukla sıfırdır veya sıfıra yakındır [3], [4]. Seyreklik, yakınsama hızını ve AFC başarımını olumsuz etkileyen önemli bir sorundur [15]. Klasik adaptif algoritmalar bu durumla baş edemez ve süreç sonunda yakınsama hızının düşük olması kaçınılmazdır [15]. Bu sebeple ağırlık güncelleme işleminde, başarılı bir AFC tasarımı için AF yolunun seyrekliğini dikkate alan algoritmaların kullanımı gereklidir [15]. Bu bağlamda algoritmaların yakınsama hızının iyileştirilmesi ve başarımın artırılması için maliyet fonksiyonlarının yeniden düzenlenmesi gerekir. Bu gereklilik, maliyet fonksiyonuna, algoritmanın seyrekliğe duyarlı olmasına izin veren ceza normu/fonksiyonu adı verilen bir terimin eklenmesiyle giderilir [15]. Bu tekniğe sıfır çekme (zero attraction, ZA) yani sıfıra yakın katsayıların sıfıra doğru getirilmesi veya çekilmesi de denir [3, 4, 15]. AF giderimi aslında bir seyrek sistem tanımlama problemi olarak gözükmektedir. Seyrek sistem tanımlama problemlerinde LMS algoritması, uygulama kolaylığı nedeniyle seyrekliğe duyarlı prosedürlerle birlikte yoğunlukla kullanılmaktadır [15, 16]. Literatürde en sık karşılaşılan LMS tabanlı seyrekliğe duyarlı algoritmalar;  $l_0$ -norm tabanlı LMS ( $l_0$ -LMS) [16],  $l_1$ -norm tabanlı ZA-LMS [15],  $l_1$ -norm tabanlı yeniden ağırlıklandırılmış ZA (reweighted ZA, RZA) [15] algoritmaları olarak dikkat çekmektedir. Literatürde, seyrekliği dikkate alan AFC sistemlerinin, algılanan ses sinyal kalitesinde iyileştirmelerde bulunduğu ve yakınsama başarımını önemli ölçüde geliştirdiği belirtilmiştir [3]. Ayrıca, literatürde orantısız (proportional) öğrenme tabanlı seyrekliğe duyarlı algoritmalar geliştirilerek AFC sisteminin başarımı iyileştirilmiştir [3, 4, 17]. Fakat bu tip orantılı yaklaşımlarda hesaplama karmaşıklığının yüksek olması bu yöntemlerin kullanılabilirliğini düşürmektedir [3]. Bu sebeple orantılı tip algoritmalara göre daha düşük hesaplama maliyeti oluşturmasının yanı sıra kararlı-durum başarımında önemli iyileştirmeler sunması nedeniyle ZA tabanlı yöntemler ön plana çıkmıştır [3]. Bu kapsamda son zamanlarda yapılan bir çalışmada [4],  $l_1$ -normu kullanan iki ayrı ZA ve RZA tabanlı normalize edilmiş LMS (normalized LMS, NLMS) algoritmaları, tahmin hatası yöntemi (prediction error method, PEM) tabanlı dekorelasyon filtresi ile birlikte prob gürültüsü kullanan bir AFC sistemine eklenmiş ve AFC sistemi seyrekliğe duyarlı hale getirilerek

başarım artırılmıştır [4]. AF yolu ağırlıklarının seyrek dağılımını dikkate alan [3]'teki çalışmada,  $l_0$ -norm tabanlı NLMS algoritmasının yanı sıra polinomal ve Versoria yaklaşımlarını kullanan iki ayrı ZA tabanlı NLMS algoritması önerilmiş ve bu yöntemlerin hesaplama yükünü düşürmeye odaklanılmıştır. Literatürde  $l_0$ - ve  $l_1$ -norm tabanlı yöntemlerinin yanı sıra farklı ceza normları da kullanılmaktadır. Örneğin [18]'de, AFC sistemini seyrekliğe duyarlı hale getirmek için  $l_p$ -normunu kullanan LMS tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Burada önerilen yöntemin yakınsama hızını artırdığı vurgulanırken diğer orantılı LMS ve NLMS tabanlı algoritmalara göre daha iyi sonuçların elde edildiği belirtilmiştir [18]. Bunun haricinde, değişken adım boyutuna sahip bir AFC sisteminin sunulduğu [19]'da yazarlar, sistemin seyrekliğe teşvik edildiği takdirde başarımını arttırdığını belirtmiştir.

AFC sistemlerinde konuşma/müzik gibi büyük-ölçekli kaynak sinyallerinin ve yüksek filtre derecelerinin sistemi hesaplama yükü açısından olumsuz etkileyeceği aşikardır. Özellikle giyilebilir işitme cihazlarının AF giderimi gibi prosedürlerini bir çip üzerinden gerçek-zamanlı olarak gerçekleştirdiği düşünüldüğünde, bu durum istenilmeyen bir işlem maliyet çıkarmaktadır. Son yıllarda, AFC sistemleri gibi birçok gerçek-zamanlı uygulamalarda, depolama gereksinimlerini ve işlem maliyetini önemli ölçüde azaltma gibi konularda önemli faydalar sağlayan çevrim içi sansürleme (online censoring, OC) stratejisinin [20] kullanımı ağırlık kazanmıştır [20-29]. OC stratejisi, bir sansürleme kuralı aracılığıyla mevcut verileri anlık olarak bilgilendirici veya bilgilendirici olmayan şekilde kategorize edebilmektedir [20]. Adaptif bir filtre yapısına entegre edildiğinde, veriler çevrim içi olarak bilgilendirici şekilde etiketlendiyse, adaptif algoritma bu verileri ağırlık vektörünü güncelleme aşamasında kullanır, aksi durumda ise bilgilendirici olmayan olarak etiketlenen veriler herhangi bir işlemde kullanılmadan sansürlenir. Böylelikle, başarımı koruyarak veri işleme maliyetinde önemli ölçüde azaltma yapılabilmektedir. Bu açıdan OC stratejisi, birçok mühendislik uygulamasında kendisine yer edinmiştir. Örneğin [24]'te klasik AFC sistemlerinin hesap yükünü azaltmak amacıyla OC-LMS tabanlı bir AFC sistemi önerilmiştir. Burada, OC stratejisini işlem maliyetini azaltmasının yanı sıra başarımı da gözle görülür derecede artırmıştır.



Şekil 1. Klasik AFC sistemi

Buna ek olarak, [25] ve [26]'da araştırmacılar, klasik AFC sistemlerinin muzdarip olduğu yanlılık problemini daha düşük maliyetle ortadan kaldırmak için önerdikleri sistemlere OC stratejisini entegre etmişlerdir. [24-26]'da yer alan çalışmalarda hesap maliyeti ve sistem başarımı açısından önemli katkılar yapılmasına rağmen AFC sistemlerinin yakınsama başarımını olumsuz etkileyen seyreklik problemi üzerinde durulmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada, AF yolunun seyrekliğinin yol açtığı kötü yakınsama başarımına uygun maliyetli bir çözüm sunmak amacıyla  $l_0$ -norm tekniği ile OC stratejisinin birlikte kullanıldığı  $l_0$ -norm-OC-LMS ( $l_0$ -OC-LMS) tabanlı AFC sistemi ( $l_0$ -OC-AFC) önerilmiştir. Önerilen sistemin başarımı kulak arkası tipi işitme cihazından ölçülmüş, iki farklı uzun seyrek AF yolları üzerinde test edilmiştir. Önerilen sistem ayrıca, literatürdeki klasik LMS tabanlı AFC sistemi (AFC), OC-LMS tabanlı AFC sistemi (OC-AFC) ve  $l_0$ -norm-LMS ( $l_0$ -LMS) tabanlı AFC ( $l_0$ -AFC) sistemleri ile yanlış ayarlama (misalignment, MIS) ve eklenmiş sabit kazanç (added stable gain, ASG) başarımları üzerinden karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda,  $l_0$ -OC-AFC sisteminin diğer sistemlerden genel olarak daha iyi başarımlar sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak,  $l_0$ -OC-AFC sistemi, OC stratejisinin ve seyrekliğe duyarlı ceza normlarının uyumlu ve etkin bir şekilde çalışabileceğini ortaya koymuştur.

## 2 Önerilen $l_0$ -OC-LMS algoritması tabanlı AFC sistemi

Bu bölümde, seyrek akustik geri besleme yolunun uygun maliyetli kestirimi için  $l_0$ -OC-LMS algoritması tabanlı AFC sisteminin tasarımı detaylı olarak sunulacaktır. Bu kapsamda, ilk olarak  $l_0$ -OC-LMS algoritması türetilen ve ardından AFC sistemine nasıl adapte edildiği sunulacaktır.

Seyreklik probleminin üstesinden gelmek için önerilen  $l_0$ -OC-LMS algoritmasının tasarımında, klasik seyrekliğe duyarlı maliyet fonksiyonu  $J_{l_0}(n) = |e(n)|^2 + \gamma \|\mathbf{w}(n)\|_0$  'nun yerine aşağıdaki maliyet fonksiyonu kullanılmaktadır:

$$J_{l_0}(n)^{(\tau)} := \begin{cases} \frac{1}{2}(e^2(n) - \tau^2 \sigma_v^2) + \gamma \|\mathbf{w}(n)\|_0, & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (1)$$

burada  $\|\cdot\|_0$  ifadesi  $l_0$ -normunu,  $\gamma > 0$  bir sonraki ceza unsuru ile kestirim hatası arasındaki korelasyon derecesini ayarlamak için kullanılan parametreyi,  $\mathbf{w}(n)$  ise ağırlık vektörünü temsil etmektedir. Aslında burada  $l_0$ -norm, ağırlık vektörü  $\mathbf{w}(n)$  'nin içerdiği sıfırdan farklı katsayıların sayısını ölçer [16]. Denklem (1)'de,  $\|\mathbf{w}(n)\|_0$  ifadesi maliyet fonksiyonu  $J_{l_0}(n)^{(\tau)}$  'nin ağırlık vektörü  $\mathbf{w}(n)$  'ye göre minimizasyonu zorlaştırır. Bu yüzden, literatürde  $l_0$ -norm

genellikle aşağıda verilen sürekli fonksiyonla yaklaşık olarak hesaplanır [16]:

$$\|\mathbf{w}(n)\|_0 \approx \sum_{i=0}^{M-1} (1 - e^{-\theta |w_i(n)|}), \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

burada  $\theta$  pozitif bir sabiti temsil eder.

Denklem (2)'deki yaklaşım Denklem (1)'de yerine konularak, seyrekliğe duyarlı maliyet fonksiyonu  $J_{l_0}(n)^{(\tau)}$  aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$J_{l_0}(n)^{(\tau)} := \begin{cases} \frac{1}{2}(e^2(n) - \tau^2 \sigma_v^2) + \gamma \sum_{i=0}^{M-1} (1 - e^{-\theta |w_i(n)|}), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v. \end{cases} \quad (3)$$

Ardından, [20, 21, 24-26]'daki çalışmalarda olduğu gibi, yeni maliyet fonksiyonu  $J_{l_0}(n)^{(\tau)}$ , ağırlık vektörü  $\mathbf{w}(n)$  'ye göre minimize edilerek önerilen  $l_0$ -OC-LMS algoritmasının güncelleme kuralı aşağıdaki gibi elde edilir:

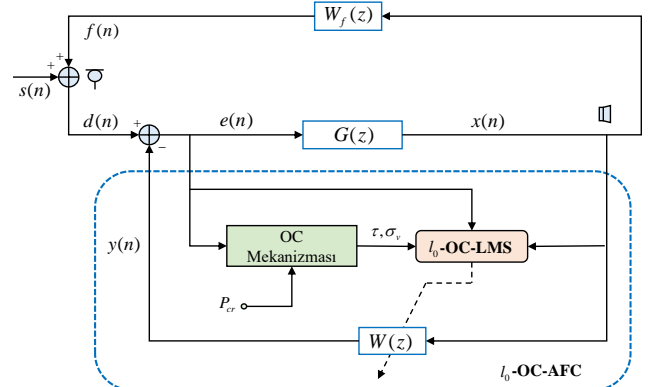
$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \kappa \theta \text{sgn}(\mathbf{w}(n)) e^{-\theta |\mathbf{w}(n)|}, & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (4)$$

burada  $\kappa = \mu \gamma$  'dır ve  $\text{sgn}(\cdot)$  ifadesi aşağıdaki gibi işaret fonksiyonunu temsil eder:

$$\text{sgn}(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{|\lambda|}, & \text{eğer } \lambda \neq 0 \\ 0, & \text{aksi durumda.} \end{cases} \quad (5)$$

Denklem (4)'te yer alan güncelleme kuralının son terimindeki üstel terim, önerilen algoritmada yüksek hesaplama karmaşıklığına neden olur. Bu nedenle üstel fonksiyon birinci-dereceden Taylor serisi kullanılarak aşağıdaki gibi basite indirgenir [16]:

$$e^{-\theta |\mathbf{w}(n)|} \approx \begin{cases} 1 - \theta |\mathbf{w}(n)|, & \text{eğer } \mathbf{w}(n) \leq \frac{1}{\theta} \\ 0, & \text{aksi durumda.} \end{cases} \quad (6)$$



Şekil 2. Önerilen  $l_0$ -OC-AFC sisteminin blok şeması

Üstel terim her zaman pozitif olduğundan, Denklem (6)'daki yaklaşım her zaman pozitiftir. Bu yaklaşım dikkate alınarak, Denklem (4)'te önerilen  $l_0$ -OC-LMS algoritmasının güncelleme kuralı şu hale gelir [16]:

$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \kappa \theta \operatorname{sgn}(\mathbf{w}(n)) f_\theta(\mathbf{w}(n)), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (7)$$

burada

$$f_\theta(\mathbf{w}(n)) \approx \begin{cases} \theta^2 \mathbf{w}(n) + \theta, & \text{eğer } -\frac{1}{\theta} \leq \mathbf{w}(n) < 0 \\ \theta^2 \mathbf{w}(n) - \theta, & \text{eğer } 0 < \mathbf{w}(n) \leq \frac{1}{\theta} \\ 0, & \text{aksi durumda.} \end{cases} \quad (8)$$

Ayrıca Denklem (7)'deki güncelleme kuralı aşağıda sunulan alternatif form ile daha basit bir şekilde gösterilebilir [30]:

$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \mathbf{f}_0(n), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e(n)| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (9)$$

ve

$$\mathbf{f}_0(n) = \kappa \theta \operatorname{sgn}(\mathbf{w}(n)) .* (1 - \theta |\mathbf{w}(n)|) \quad (10)$$

burada .\* eleman-eleman çarpımını temsil eder. Ayrıca, Denklem (9)'da yer alan  $\tau$  ve  $\sigma_v$  nicelikleri sırasıyla sansürleme eşik seviyesini ve ölçüm gürültüsünün standart

sapmasını temsil eder ve sırasıyla Denklem (11) ve Denklem (12) yardımıyla hesaplanır [20, 21].

$$\tau \approx Q^{-1} \left( \frac{1 - P_{cr}}{2} \right) \quad (11)$$

burada  $Q^{-1}$  ve  $P_{cr} = \frac{K-p}{K}$  sırasıyla tamamlayıcı kümülatif dağılım fonksiyonunun tersini ve ortalama sansürleme oranını temsil ederken,  $K$  ve  $p$  sırasıyla toplam veri sayısını ve bilgilendirici veri sayısını temsil eder.

$$\sigma_v^2(n) = \beta \sigma_v^2(n-1) + (1-\beta) |e(n)|^2 \quad (12)$$

burada  $\beta \in (0,1)$  unutm faktörünü temsil etmektedir.

Son olarak, Şekil 2 ve Tablo 1'den görüldüğü üzere, önerilen  $l_0$ -OC-LMS algoritması AFC sistemine başarılı bir şekilde entegre edilerek,  $l_0$ -OC-LMS tabanlı AFC sistemi ( $l_0$ -OC-AFC) tasarlanmıştır. Sonuç olarak, OC mekanizmasının  $l_0$ -norm tabanlı maliyet fonksiyonun içerisinde yerleştirilmesiyle,  $l_0$ -OC-AFC sistemi sadece bilgilendirici verileri kullanarak hem seyreklik probleminin üstesinden gelme hem de AFC sistemlerinde maliyeti önemli ölçüde azaltma yeteneğine sahiptir.

### 3 Benzetim sonuçları ve tartışma

Bu bölümde önerilen  $l_0$ -OC-AFC sisteminin başarımı, literatürde yer alan klasik AFC [31],  $l_0$ -AFC [3] ve OC-AFC [24] sistemleri ile karşılaştırılarak detaylı olarak analiz edilmiştir. Burada  $l_0$ -OC-AFC ve OC-AFC sistemleri için  $P_{cr} = \%30$ ,  $\%50$  ve  $\%70$  gibi farklı sansürleme oranlarında seçilerek bilgilendirici olmayan veriler

**Tablo 1.**  $l_0$ -OC-AFC sisteminin sözde kodu

---

*Parametreler:*  $\mu, M, G, \Delta, 0 < \beta < 1, \theta$  ve  $\gamma$

*Başlangıç Koşulları:*  $\mathbf{w} = \mathbf{0}, \tau = Q^{-1} \left( \frac{1 - P_{cr}}{2} \right), P_{cr} = \frac{K-p}{K}, \sigma_v(0) = 0$  ve  $\mathbf{f}_0 = \mathbf{0}$

*Veri:*  $\{s(n)\}_{n=1}^L$

*Döngü:*  $n = 1, 2, \dots, L$

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n)$$

$$f(n) = \mathbf{w}_f^T(n) \mathbf{x}(n)$$

$$d(n) = s(n) + f(n)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) = s(n) + \mathbf{w}_f^T(n) \mathbf{x}(n) - \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n)$$

$$x(n) = G(z)e(n) = Ge(n - \Delta)$$

$$\sigma_v^2(n) = \beta \sigma_v^2(n-1) + (1-\beta) |e(n)|^2$$

$$\mathbf{f}_0(n) = \kappa \theta \operatorname{sgn}(\mathbf{w}(n)) .* (1 - \theta |\mathbf{w}(n)|)$$

$$\mathbf{w}(n+1) := \begin{cases} \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}(n)e(n) - \mathbf{f}_0(n), & \text{eğer } |e(n)| \geq \tau \sigma_v \\ \mathbf{w}(n), & \text{aksi durumda} \end{cases}$$


---

bitiş



sansürlerken, klasik AFC ve  $l_0$ -AFC sistemleri verilerin tamamını kullanmıştır. İlgili sistemlere ait başarımlar, literatürde yaygın kullanılan MIS ve ASG açısından frekans düzleminde değerlendirilmiştir. Bilindiği üzere **Denklem (13)**'te yer alan MIS (dB) ifadesi bir AFC sisteminin geri besleme yolunu ne kadar doğru kestirdiğini ölçerken, **Denklem (14)**'te yer alan ASG ifadesi cihazın çalışma süresi boyunca tasarruf ettiği güç miktarını ölçer [3, 4, 24].

$$\text{MIS (dB)} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{k=0}^{M_f} |W_f(e^{j\omega_k}) - W(e^{j\omega_k})|^2}{\sum_{k=0}^{M_f} |W_f(e^{j\omega_k})|^2} \right] \quad (13)$$

$$\text{ASG (dB)} = 20 \log_{10} \left[ \min_{\omega} \frac{1}{|W_f(e^{j\omega_k}) - W(e^{j\omega_k})|} \right] - 20 \log_{10} \left[ \min_{\omega} \frac{1}{|W_f(e^{j\omega_k})|} \right]. \quad (14)$$

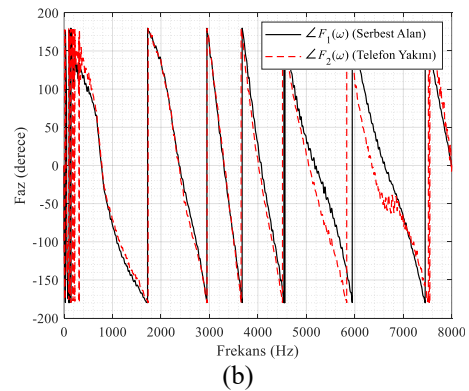
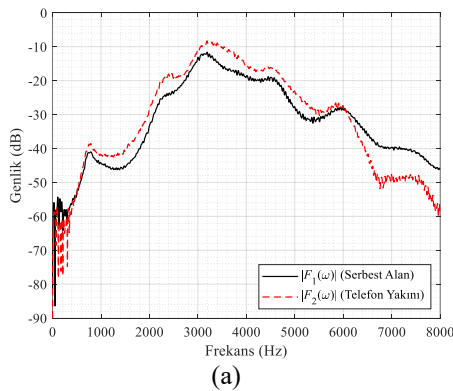
Yukarıdaki denklemlerde  $\omega$  ifadesi açısal frekans sembolize ederken,  $M_f$  ifadesi frekans örneklerinin sayısını gösterir.

Benzetim çalışmaları, kulak arkası (behind the ear, BTE) tipi bir işitme cihazından ölçülen iki adet gerçek-dünya uzun seyrek AF yolu üzerinde gerçekleştirilmiştir [32]. Bunlar sırasıyla, serbest alan AF yolu  $F_1(\omega)$  ve telefonun cihaza yaklaştırıldığı AF  $F_2(\omega)$  yoludur.  $F_1(\omega)$  mikrofon ile hoparlör arasında herhangi bir engel olmadığında ölçülen AF yoluken,  $F_2(\omega)$  ise telefonun kulağa yakın olduğunda ölçülen AF yoludur [32]. İlgili AF yolları ilk olarak 16 kHz örnekleme frekansıyla yeniden örneklenmiştir ve ardından ilk 500 ağırlık katsayısı benzetimlerde kullanılmıştır. Bu AF yollarına ait genlik ve faz cevapları **Şekil 3**'te sunulmuştur. Kaynak sinyali olarak ise 16 kHz'de örneklenmiş konuşma ve müzik sinyalleri kullanılmıştır [10, 33]. Başarılı bir AFC tasarımı için, güçlendirici yapısı içerisinde yeterli düzeyde bir gecikme sağlanmalıdır [34]. Bu doğrultuda çalışmada kullanılan AF yollarının uzun olması nedeniyle gecikme miktarı oldukça yüksek ayarlanmış ve güçlendirici transfer

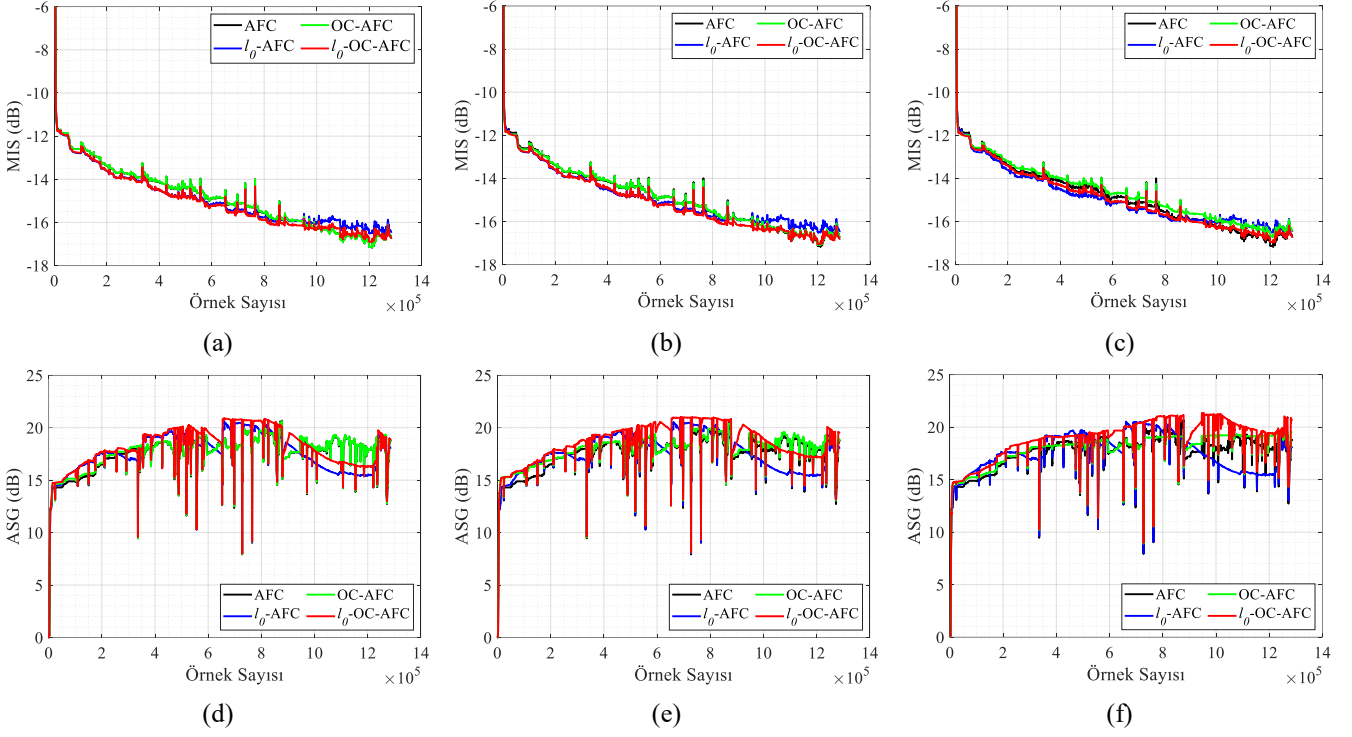
fonksiyonu  $G(z) = 20z^{-498}$  olarak tercih edilmiştir. Son olarak ise en iyi sonuçları elde etmek için sistemlerin parametreleri deneysel olarak  $M = 500$ ,  $M_f = 512$ ,  $\mu = 0.000003$ ,  $\beta = 0.9$  ve  $\gamma = 0.001$  olacak şekilde ayarlanmıştır.

**Şekil 4** ve **5**'te  $F_1(\omega)$  için kaynak sinyalinin konuşma ve müzik sinyali olduğu durumlardaki MIS ve ASG başarımları sırasıyla sunulmuştur. **Şekil 6** ve **7**'de ise  $F_2(\omega)$  için kaynak sinyalinin konuşma ve müzik sinyali olduğu durumlardaki MIS ve ASG başarımları sırasıyla verilmiştir. Başarım grafikleri incelendiğinde, her iki kaynak sinyal için de önerilen  $l_0$ -OC-AFC ve klasik  $l_0$ -AFC sistemlerinin, kendilerinin seyrekliğe duyarsız versiyonlarına göre genelde daha iyi MIS (dB) ve ASG (dB) değerleri ürettiği görülmektedir. Bununla birlikte, **Şekil 4** ve **5**'ten görülebileceği üzere,  $F_1(\omega)$  için hem konuşma hem de müzik sinyalleri altında tüm  $P_{cr}$  değerleri için, önerilen  $l_0$ -OC-AFC sistemi diğer sistemlere göre daha düşük MIS (dB) ve daha yüksek ASG (dB) sonuçları üretmiştir. Burada ayrıca önerilen  $l_0$ -OC-AFC sisteminin MIS ve ASG başarımlarının  $P_{cr}$  artışıyla birlikte gözle görülür şekilde artması dikkat çekmektedir. Benzer şekilde **Şekil 6** ve **7**'de,  $F_2(\omega)$  için her iki kaynak sinyali altında önerilen  $l_0$ -OC-AFC sistemi diğer sistemlere göre daha düşük MIS (dB) ve daha yüksek ASG (dB) değerleri üreterek üstün başarımını korumuştur.

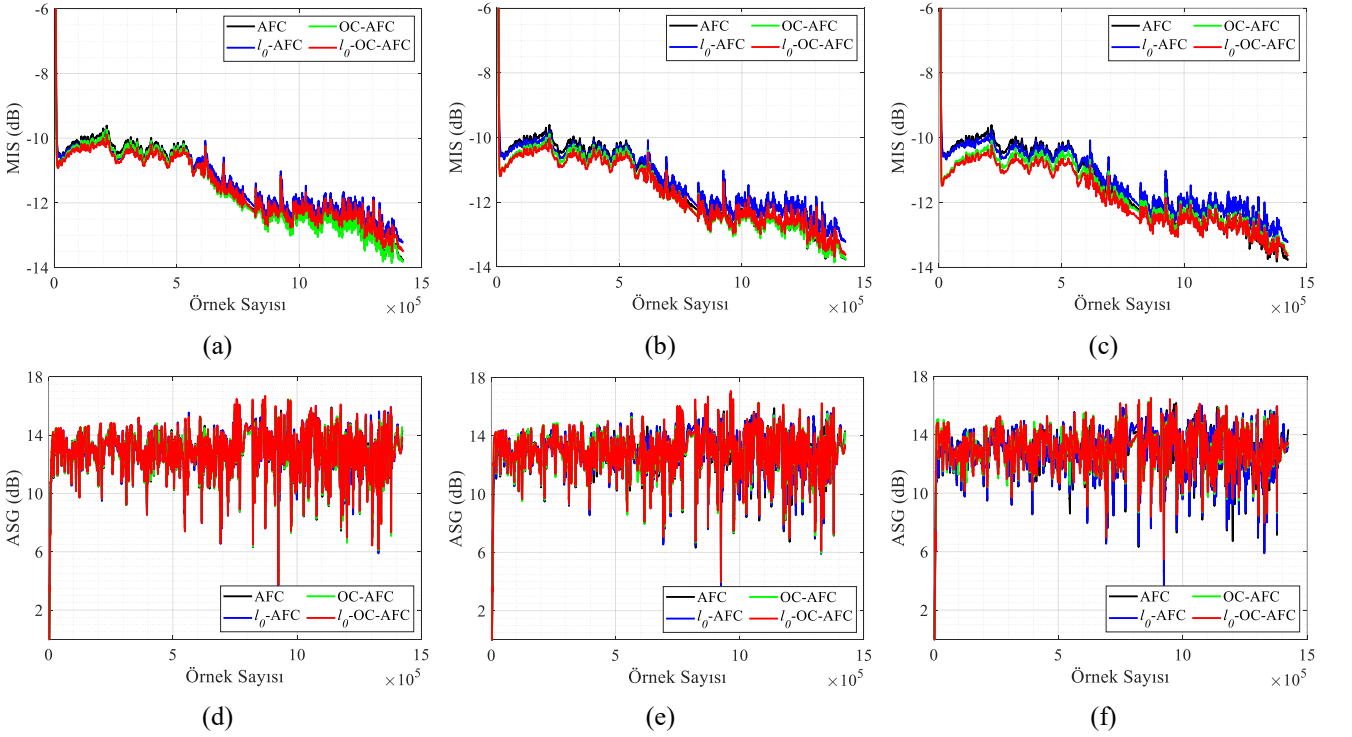
Grafiksel sonuçlara ek olarak, önerilen sistemin etkinliğini daha açığa çıkarmak amacıyla sistemlerin kestirilmiş sansürleme oranı  $\hat{P}_{cr}$ , ortalama MIS ve ASG değerleri **Tablo 2**'de özetlenmiştir. **Tablo 2**'den elde edilen ilk çıkarım;  $\hat{P}_{cr}$ 'lerin, gerçek sansürleme oranları  $P_{cr}$ 'lere oldukça yakın olmasıdır. Bu durum OC mekanizmasının önerilen  $l_0$ -OC-AFC sisteminde yüksek doğrulukta çalıştığının önemli bir göstergesidir. Ayrıca **Tablo 2**'de  $F_1(\omega)$  ve  $F_2(\omega)$  için ortalama MIS (dB) ve ASG (dB) verileri dikkate alındığında,  $l_0$ -OC-AFC sisteminin genel olarak tüm  $P_{cr}$ 'lerde diğer sistemlere yakın veya daha iyi başarım gösterdiği gözlemlenmiştir.



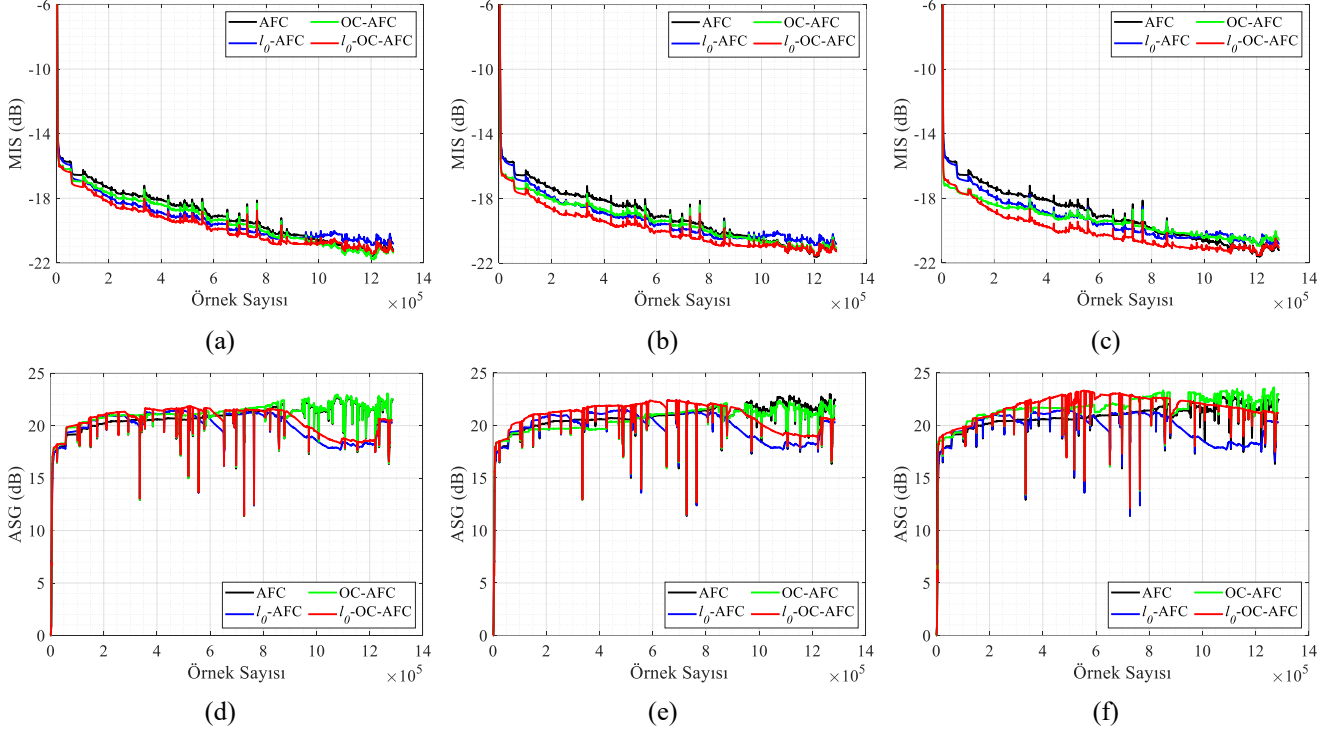
Şekil 3. AF yollarının (a) genlik cevapları, (b) faz cevapları



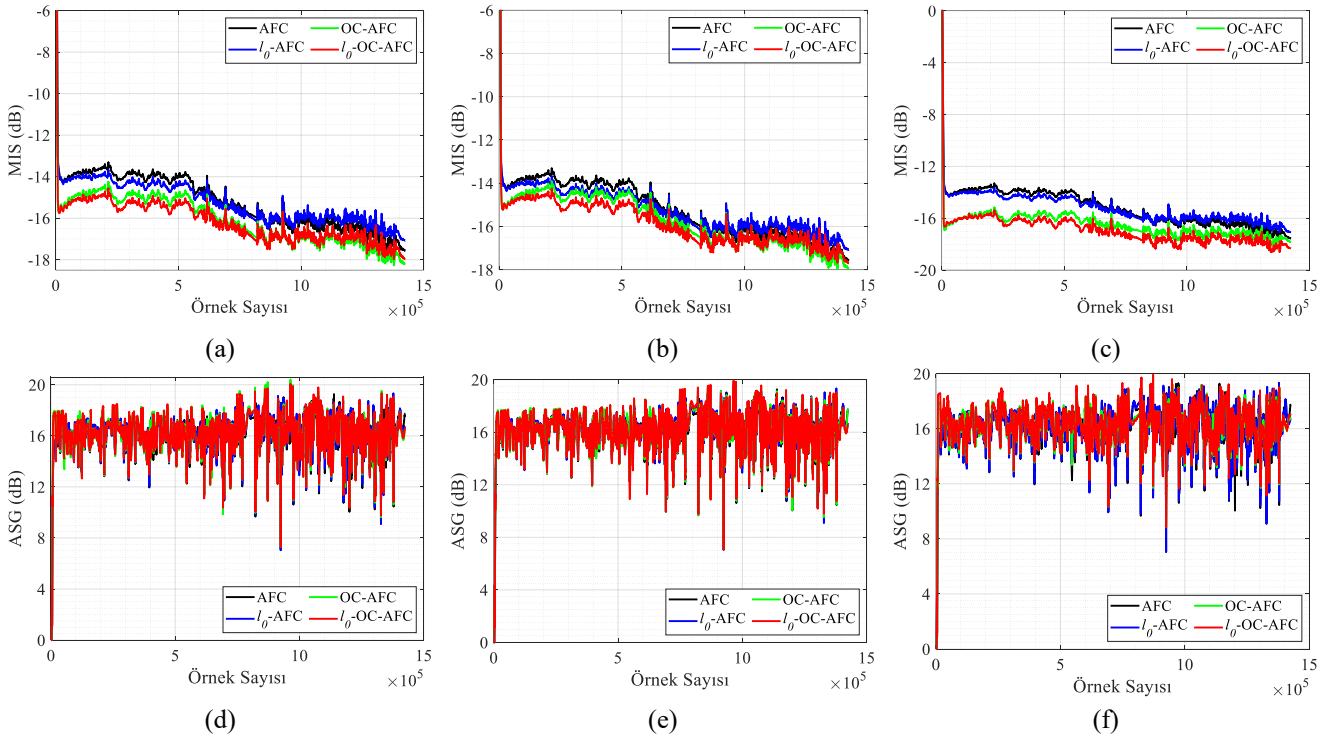
Şekil 4. Konuşma sinyali altında  $F_1(\omega)$  için sistemlerin (a)  $P_{cr} = \%30$  için MIS başarımı, (b)  $P_{cr} = \%50$  için MIS başarımı, (c)  $P_{cr} = \%70$  için MIS başarımı (d)  $P_{cr} = \%30$  için ASG başarımı, (e)  $P_{cr} = \%50$  için ASG başarımı, (f)  $P_{cr} = \%70$  için ASG başarımı



**Şekil 5.** Müzik sinyali altında  $F_1(\omega)$  için sistemlerin (a)  $P_{cr} = \%30$  için MIS başarımı, (b)  $P_{cr} = \%50$  için MIS başarımı, (c)  $P_{cr} = \%70$  için MIS başarımı (d)  $P_{cr} = \%30$  için ASG başarımı, (e)  $P_{cr} = \%50$  için ASG başarımı, (f)  $P_{cr} = \%70$  için ASG başarımı



**Şekil 6.** Konuşma sinyali altında  $F_2(\omega)$  için sistemlerin (a)  $P_{cr} = \%30$  için MIS başarımı, (b)  $P_{cr} = \%50$  için MIS başarımı, (c)  $P_{cr} = \%70$  için MIS başarımı (d)  $P_{cr} = \%30$  için ASG başarımı, (e)  $P_{cr} = \%50$  için ASG başarımı, (f)  $P_{cr} = \%70$  için ASG başarımı.



**Şekil 7.** Müzik sinyali altında  $F_2(\omega)$  için sistemlerin (a)  $P_{cr} = \%30$  için MIS başarımı, (b)  $P_{cr} = \%50$  için MIS başarımı, (c)  $P_{cr} = \%70$  için MIS başarımı (d)  $P_{cr} = \%30$  için ASG başarımı, (e)  $P_{cr} = \%50$  için ASG başarımı, (f)  $P_{cr} = \%70$  için ASG başarımı

**Tablo 2.** Kestirilmiş sansürleme oranları, ortalama MIS ve ASG değerleri

Sistem	Kaynak Sinyal	$F_1(\omega)$ - Serbest Alan			$F_2(\omega)$ - Telefon Yakını		
		$\hat{P}_{cr}$ (%)	MIS (dB)	ASG (dB)	$\hat{P}_{cr}$ (%)	MIS (dB)	ASG (dB)
AFC	Konuşma	-	-14.8188	17.5888	-	-18.9942	20.7139
	Müzik	-	-11.4530	12.7913	-	-15.1740	16.0850
$l_0$ -AFC	Konuşma	-	-14.8852	17.5201	-	-19.2366	19.8749
	Müzik	-	-11.2987	12.8337	-	-15.2069	16.1340
OC-AFC ( $P_{cr} = \%30$ )	Konuşma	21.5602	-14.8174	17.6765	21.4917	-19.2465	21.0268
	Müzik	21.8652	-11.5399	12.8129	21.8694	-15.6858	16.1375
OC-AFC ( $P_{cr} = \%50$ )	Konuşma	38.6752	-14.8180	17.8945	38.5980	-19.3356	20.4900
	Müzik	39.5167	-11.6230	12.8075	39.4873	-16.0539	16.1716
OC-AFC ( $P_{cr} = \%70$ )	Konuşma	64.9596	-14.6208	17.9164	64.9294	-19.3298	21.5722
	Müzik	63.8011	-11.6442	12.9832	63.7747	-16.5067	16.2764
$l_0$ -OC-AFC ( $P_{cr} = \%30$ )	Konuşma	21.4707	-15.0071	18.1094	21.4522	-19.5950	20.3638
	Müzik	21.8872	-11.4692	12.8327	21.8628	-15.8389	16.1452
$l_0$ -OC-AFC ( $P_{cr} = \%50$ )	Konuşma	38.5379	-15.0395	18.5565	38.4595	-19.7984	20.8403
	Müzik	39.5350	-11.6330	12.8559	39.5123	-16.1574	16.1774
$l_0$ -OC-AFC ( $P_{cr} = \%70$ )	Konuşma	64.9628	-14.9170	18.9012	64.9215	-19.9719	21.6578
	Müzik	63.7915	-11.7865	13.0051	63.7314	-16.9476	16.2920

Grafiksel sonuçlara benzer şekilde, önerilen sistemin  $P_{cr}$  artışından olumlu yönde etkilendiği **Tablo 2**'den de açıkça görülmektedir. Ayrıca önerilen  $l_0$ -OC-AFC sistemi en iyi başarımlarına  $P_{cr} = \%70$  seçildiğinde ulaşmıştır. Bu da önerilen  $l_0$ -OC-AFC sisteminin, seyrekliğe-duyarlılık ve yalnızca bilgilendirici veri kullanımı gibi yetenekleri sayesinde, verilerin yalnızca %30 'luk kısmını kullanarak diğer sistemlerden daha üstün başarımlar sergilediğini kanıtlamıştır.

#### 4 Sonuç

Bu çalışmada, AF yolunun seyrek doğasını dikkate alan ve yalnızca bilgilendirici verileri işleyen, uygun maliyetli  $l_0$ -OC-AFC sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem, seyrekliği teşvik etmek için  $l_0$  ceza normunu kullanırken OC stratejisiyle uygun maliyet hedefine ulaşmıştır. Önerilen  $l_0$ -OC-AFC sistemi, BTE tipi bir işitme cihazından ölçülen gerçek dünyadaki uzun seyrek AF yolları üzerinde MIS ve ASG açısından test edilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen  $l_0$ -OC-AFC sisteminin seyrekliğe duyarlı olmasından dolayı yakınsama başarımını artırdığını ve eş zamanlı olarak yalnızca bilgilendirici verilerle çalışabilme yeteneği

sayesinde hesaplama yükünü de azalttığını göstermiştir. Ayrıca önerilen sistemin sansürleme oranının artmasıyla doğru orantılı olarak başarımını da artırdığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen  $l_0$ -OC-AFC sistemi, OC stratejisinin ve seyrekliğe duyarlı ceza normlarının uyumlu ve etkin bir şekilde çalışabileceğini ortaya koymuştur. İlerleyen çalışmalarda, OC stratejisinin lineer olmayan adaptif filtrele entegre edilmesiyle AF yolu dürtü cevaplarının ve kaynak sinyallerinin lineer olmayan dinamiklerinin de dikkate alınması mümkün olacaktır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBA-2022-1094 kodlu proje ile kısmen desteklenmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %16

#### Kaynaklar

- [1] R. Vanamadi and A. Kar, Feedback cancellation in digital hearing aids using convex combination of proportionate adaptive algorithms, Applied Acoustics,



- 182, 108175, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108175>.
- [2] M. G. Siqueira and A. Alwan, Steady-state analysis of continuous adaptation in acoustic feedback reduction systems for hearing-aids, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 8 (4), 443-453, 2000. <https://doi.org/10.1109/89.848225>.
- [3] S. S. Bhattacharjee, S. Pradhan and N. V. George, Design of a class of zero attraction based sparse adaptive feedback cancellers for assistive listening devices, *Applied Acoustics*, 173, 107683, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107683>.
- [4] S. Pradhan, V. Patel, K. Patel, J. Maheshwari and N. V. George, Acoustic feedback cancellation in digital hearing aids: A sparse adaptive filtering approach, *Applied Acoustics*, 122, 138-145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.02.018>.
- [5] T. van Waterschoot and M. Moonen, Fifty years of acoustic feedback control: State of the art and future challenges, *Proceedings of the IEEE*, 99 (2), 288-327, 2011. <https://doi.org/10.1109/jproc.2010.2090998>.
- [6] J. M. Kates, Feedback cancellation in hearing aids, *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Albuquerque (ICASSP), NM, USA*, 1125-1128, 1990. <https://doi.org/10.1109/icassp.1990.116141>.
- [7] J. Hellgren, Analysis of feedback cancellation in hearing aids with Filtered-X LMS and the direct method of closed loop identification, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 10 (2), 119-131, 2002. <https://doi.org/10.1109/89.985549>.
- [8] G. Rombouts, T. Van Waterschoot, K. Struyve and M. Moonen, Acoustic feedback cancellation for long acoustic paths using a nonstationary source model, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54 (9), 3426-3433, 2006. <https://doi.org/10.1109/tsp.2006.879251>.
- [9] T. van Waterschoot and M. Moonen, Adaptive feedback cancellation for audio applications, *Signal Processing*, 89 (11), 2185-2201, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2009.04.036>.
- [10] L. Thi, T. Tran and S. E. Nordholm, A switched algorithm for adaptive feedback cancellation using pre-filters in hearing aids, *Audiology Research*, 11 (3), 389-409, 2021. <https://doi.org/10.3390/audiolres11030037>.
- [11] L. T. T. Tran, S. E. Nordholm, H. Schepker, H. H. Dam and S. Doclo, Two-microphone hearing aids using prediction error method for adaptive feedback control, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 26 (5), 909-923, 2018. <https://doi.org/10.1109/taslp.2018.2798822>.
- [12] A. Anand, A. Kar and M. N. S. Swamy, Design and analysis of a BLPC vocoder-based adaptive feedback cancellation with probe noise, *Applied Acoustics*, 115, 196-208, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.023>.
- [13] E. C. Mengüç and N. Acir, A novel adaptive filter design using Lyapunov stability theory, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23 (3), 719-728, 2015. <https://doi.org/10.3906/elk-1212-29>.
- [14] E. C. Mengüç and N. Acir, Lyapunov stability theory based adaptive filter algorithm for noisy measurements, *15th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim), Cambridge, UK* 451-454, 2013. <https://doi.org/10.1109/uksim.2013.50>.
- [15] Y. Chen, Y. Gu and A. O. Hero, Sparse LMS for system identification, *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Taipei, Taiwan*, 3125-3128, 2009. <https://doi.org/10.1109/icassp.2009.4960286>.
- [16] Y. Gu, J. Jin and S. Mei,  $\ell_0$  norm constraint LMS algorithm for sparse system identification, *IEEE Signal Processing Letter*, 16 (9), 774-777, 2009. <https://doi.org/10.1109/lsp.2009.2024736>.
- [17] Vasundhara, N. B. Puhana and G. Panda, Zero attracting proportionate normalized subband adaptive filtering technique for feedback cancellation in hearing aids, *Applied Acoustics*, 149, 39-45, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.040>.
- [18] C. H. Lee, B. D. Rao and H. Garudadri, Sparsity promoting LMS for adaptive feedback cancellation, *25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Kos, Greece*, 226-230, 2017. <https://doi.org/10.23919/eusipco.2017.8081202>.
- [19] Vasundhara, G. Panda and N. B. Puhana, A VSS sparseness controlled algorithm for feedback suppression in hearing aids, *International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 151-156, 2016. <https://doi.org/10.1109/isspit.2015.7394318>.
- [20] D. Berberidis, V. Kekatos and G. B. Giannakis, Online censoring for large-scale regressions with application to streaming big data, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64 (15), 3854, 2016. <https://doi.org/10.1109/tsp.2016.2546225>.
- [21] E. C. Mengüç, S. Çınar, M. Xiang and D. P. Mandic, Online censoring based weighted-frequency fourier linear combiner for estimation of pathological hand tremors, *IEEE Signal Processing Letter*, 28, 1460-1464, 2021. <https://doi.org/10.1109/lsp.2021.3097279>.
- [22] A. O. Sarp, E. C. Mengüç, M. Peker and B. Çolak Güvenç, Data-adaptive censoring for short-term wind speed predictors based on MLP, RNN, and SVM, *IEEE Systems Journal*, 16 (3), 3625-3634, 2022. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2022.3150749>.
- [23] B. Çolak Güvenç, Y. Eren and E. C. Mengüç, Novel online censoring based learning algorithm for complex-valued big data streams, *30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Safranbolu, Turkey*, 1-4, 2022. <https://doi.org/10.1109/siu55565.2022.9864761>.
- [24] Y. Eren, B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, Online censoring based acoustic feedback cancellation for wearable hearing aids, *30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Safranbolu, Turkey*, 1-4, 2022. <https://doi.org/10.1109/siu55565.2022.9864685>.

- [25] Y. Eren, B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, An acoustic feedback canceler based on probe noise and informative data for hearing aids, *Signal, Image Video and Processing*, 18, 703-714, 2024. <https://doi.org/10.1007/S11760-023-02786-7>.
- [26] Y. Eren, B. C. Guvenc, and E. C. Menguc, Cost-effective acoustic feedback cancellers for digital hearing aids, *IEEE/ACM Transactions Audio, Speech and Language Processing*, 32, 2367-2377, 2024. <https://doi.org/10.1109/taslp.2024.3389644>.
- [27] Y. Eren, B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, Cost-effective adaptive predictor for large-scale wind signal, 46th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Prague, Czech Republic, 221-224, 2023. <https://doi.org/10.1109/tsp59544.2023.10197765>.
- [28] B. Çolak Güvenç and E. C. Mengüç, A novel family of online censoring based complex-valued least mean kurtosis algorithms, *Signal Processing*, 216, 109302, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109302>.
- [29] E. C. Mengüç, N. Acir and D. P. Mandic, "A class of online censoring based quaternion-valued least mean square algorithms, *IEEE Signal Processing Letter*, 30, 244-248, 2023, <https://doi.org/10.1109/lsp.2023.3255000>.
- [30] Y. Zhang, S. Xiao, D. Huang, D. Sun, L. Liu and H. Cui, 10 -norm penalised shrinkage linear and widely linear LMS algorithms for sparse system identification, *IET Signal Processing*, 11 (1), 86-94, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2015.0218>.
- [31] D. K. Bustamante, T. L. Worrall and M. J. Williamson, Measurement and adaptive suppression of acoustic feedback in hearing aids, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 3, 2017-2020, 1989. <https://doi.org/10.1109/icassp.1989.266855>.
- [32] T. Sankowsky-Rothe, M. Blau, H. Schepker and S. Doclo, Reciprocal measurement of acoustic feedback paths in hearing aids, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138 (4), EL399-EL404, 2015. <https://doi.org/10.1121/1.4933062>.
- [33] P. C. Loizou, *Speech Enhancement: Theory and Practice* (1st. edition), CRC Press, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420015836>.
- [34] C. R. C. Nakagawa, S. Nordholm and W. Y. Yan, New insights into optimal acoustic feedback cancellation, *IEEE Signal Processing Letter*, 20 (9), 869-872, 2013. <https://doi.org/10.1109/LSP.2013.2271318>.

