

## KIRPILMIŞ SES İŞARETLERİNİN YENİLENMESİ

Mehmet Erdal ÖZBEK \*

Alınma: 10.04.2021; düzeltme: 02.09.2021; kabul: 13.11.2021

**Öz:** Ses işaretlerinde oluşan bozulmaların ortadan kaldırılması için yenileme işlemi yapılmaktadır. Bu bozulmalardan birisi olan kırılmış ses işaretlerinin yenileme işleminde, işaretin bozulmamış bölgesindeki işaret parçası aracılığı ile işaretin bozulmaya uğramış bölgesinin özgün durumuna geri getirilmesi amaçlanmaktadır. İşaretin normal olarak verildiği ya da kayıt edildiği zaman ortamından farklı bir ortama dönüştürülmesi ve bu sayede temsil edilmesi için gerekli örnek sayısının azalması seyrek gösterim sayesinde mümkün olmaktadır. Bu çalışmada işaretin ayrık Fourier dönüşümü katsayılarının oluşturduğu seyrek gösterime dayanan bir yenileme yöntemi sunulmaktadır. Önerilen yöntemin başarımının değerlendirilmesi için farklı konuşma ve müzik işaretlerinden oluşan örnekler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Önerilen yöntemin işaretin daha yüksek oranda kırılması durumunda karşılaştırılan diğer yöntemlere göre daha iyi işaret gürültü oranı başarımı elde ettiği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ses yenileme, Kırılma, Seyrek gösterim, Eniyileme

### Restoration of Clipped Audio Signals

**Abstract:** Restoration process is performed to remove degradations formed on the audio signals. In the restoration of clipped audio signals, which is one of these degradations, the degraded section is aimed to be restored to its original by the part of the undegraded section of the signal. The transformation of the signal from as normally given or recorded in the time domain to a different domain and thus reducing the number of samples required to be represented might be possible due to sparse representation. In this study, a restoration method is presented that relies on sparse representation of the discrete Fourier transform coefficients of the signal. In order to evaluate the performance of the proposed method, experiments were performed on various speech and music signal examples. It has been shown that the proposed method achieves better signal to noise ratio performance compared to the other methods in cases of higher clipping ratios.

**Keywords:** Audio restoration, Clipping, Sparse representation, Optimization

\* İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Balatçık Mah. No: 33/2, 35620, Çiğli, İzmir.

İletişim Yazarı: Mehmet Erdal Özbek (merdal.ozbek@ikcu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Yenileme işlemi (restorasyon), zaman ya da insan etkisi yüzünden bozulmaya uğramış, parçaları kaybolmuş yapı, eser, ya da nesnelerin üzerindeki bozucu etkilerin ortadan kaldırılıp, olabildiğince ilk ve özgün durumuna geri getirilmesi işlemidir. Sözkonusu eser ses olduğunda, seslerin kaydedilmesi ve yeniden elde edilmesinde, doğal olarak sesin kayıt edildiği materyalin kendisinden, kayıt sırasındaki işlemlerden, ya da bu aşamalarda gerçekleşen ve genel olarak gürültü adı altında toplanan diğer bütün bileşenlerden etkilenmektedir. Varolan diğer yenileme işlemlerinde olduğu gibi ses işaretlerinde de yenileme işlemi, bozulmaların ortadan kaldırılması veya sesin kayıp bölümlerinin uygun ses parçacıkları ile doldurularak ses işaretinin eski haline geri dönüştürülmesi olarak gerçekleştirilmektedir. Doğal olarak bu yöntemler, ses işaretinde oluşan bozulmalara göre değişiklik göstermektedir. Literatürde bozulmalar kabaca yerel ya da genel olarak ikiye ayrıştırılmaktadır (Godsill ve Rayner, 1998). Genel tipteki bozulmalarda, bozulma işlemi işaretin tümünü etkilerken, yerel bozulmalar işaretin sadece belirli bir kısmı üzerinde görülmektedir. Örneğin, ses işaretinin kayıt, iletim, ya da yayını sırasında istenmeyen gürültülerin, tıslama (hiss) ve tıklama (click) gibi kayıt sistemlerinin yarattığı kaçınılmaz etkiler bulunmaktadır. Bunun yanında, işaretle bu şekilde istenmeden elde edilmiş ve kaydedilmiş yabancı işaretlerin kayıttan silinmesi ve sonrasında ortaya çıkan boşlukların uygun şekilde doldurulması gibi sonradan yapılan işlemler de, yenileme aşamasında farklı yaklaşımların kullanılmasını gerektirmektedir (Godsill ve Rayner, 1998) (Orcalli, 2001). Yenileme amacıyla yapılan temel işlemlerden biri, işaretin elimizde bulunan bozulmamış bölümünün kullanılarak, bozulmuş ya da kaybolmuş işaret bölgelerinin tahmini ve uygun şekilde yenilemesini amaçlamaktadır. Bu amaçla kullanılan uyarlı aradeğerleme (adaptive interpolation) etkin yenileme yöntemlerinden birisidir (Janssen ve diğ., 1986).

Ses işaretlerinde yaygın olarak ortaya çıkan bozulma ve dolayısıyla yenileme işlemlerinden biri, genliği kırılmış işaretlerin yenilenmesi işlemidir (Abel ve Smith, 1991). Kırılma işlemi, işaretin zaman ortamında yerel bir bozulma oluştursa da frekans ortamında da genel bir bozulma yaratmakta ve işaretin doğuşkan (harmonik) frekanslarını doğrusal olmayan şekilde bozmakta ya da öncesinde bulunmayan yenilerini eklemektedir. Kırılmanın olmaması için sesteki dinamik aralığın sıkıştırılmasına yol açan ses yüksekliği savaşı da ses ve özellikle müzik endüstrisinde önemli bir tartışma konusudur (Deruty ve Tardieu, 2014).

Ses işaretlerinde kırılmanın yarattığı bozulmaların ortadan kaldırılması için Abel ve Smith, (1991) ve Janssen ve diğ., (1986) çalışmalarını izleyen birçok yöntem önerilmiştir. Bu çalışmalardan seyrek (sparse) gösterime dayanan Adler ve diğ., (2012) çalışması sonrasında insan kulağı algılamasına ve sıkıştırılmış algılama (compressed sensing) kuramına dayanan Defraene ve diğ. (2013) çalışmasında da problem seyrek işaret geri elde edilmesi olarak ifade edilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda kırılmış işaretler için yapılan Kitić ve diğ., (2015) çalışması Mokry ve diğ., (2019) tarafından genel ses yenileme çalışmaları da eklenerek farklı kriterler üzerinden elde edilen başarımlar gösterilmiştir. Örneğin Ozerov ve diğ. (2016) çalışmasında çok kanallı işaretler için negatif olmayan matris ayrışımı kullanılarak, kırılmanın ayrı ayrı tek kanala uygulanmasından ortalama olarak daha başarılı sonuç veren bir yöntem önerilmiştir. Daha sonra Mokry ve Rajmic, (2020), seyrek gösterimleri tekrar ele almış, Tauböck ve diğ., (2021) zaman-frekans ortamında seyrek model uygulayan sözlük öğrenmesine dayalı bir yaklaşım verilmiştir. Závıška ve diğ., (2021) ve Gaultier ve diğ., (2021) çalışmaları, ses işaretlerindeki aradeğerleme, seyreklik, sıkıştırılmış algılama gibi ses işaretlerinde kırılmanın yarattığı bozulmaların azaltılması ya da ortadan kaldırılması üzerinde o zamana kadar yapılmış çalışmaları incelemiştir. Özellikle Závıška ve diğ., (2021) çalışmasında literatürdeki çalışmalar, model ortamları, kabuller ve seçilen parametreler, eniyileme kriterleri ve algoritmaları cinsinden karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada seyrek işaret geri elde edilmesinde sözlük kullanımını içeren Adler ve diğ., (2012) çalışması temel alınmıştır. Zaman ortamındaki ses işaretlerinin kırılması sonrasında oluşan değişimler gösterilerek, işaretledeki bozulmanın ortadan kaldırılması ve işaretin kırılmış

parçasının tahmin edilerek işaretin iyileşmesinin sağlanması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla işarettaki bozulma olmayan bölgenin belirlenerek, bozulmuş bölgenin alabileceği değerler ayrık Fourier dönüşümü katsayılarının seyrek gösterim yaklaşımı ile birlikte kullanılmasıyla tahmin edilmektedir.

Çalışmada sırasıyla kırılma işaretinin tanımı ve seyrek gösterim ile gösterilmesi ile ilgili gerekli yapı sunulacaktır. Sonrasında önerilen yöntem ve izlenen adımlar açıklanarak, elde edilen bulgular sıralanacaktır. Son bölümde ise bulgular sonucundaki değerlendirmeler yapılacaktır.

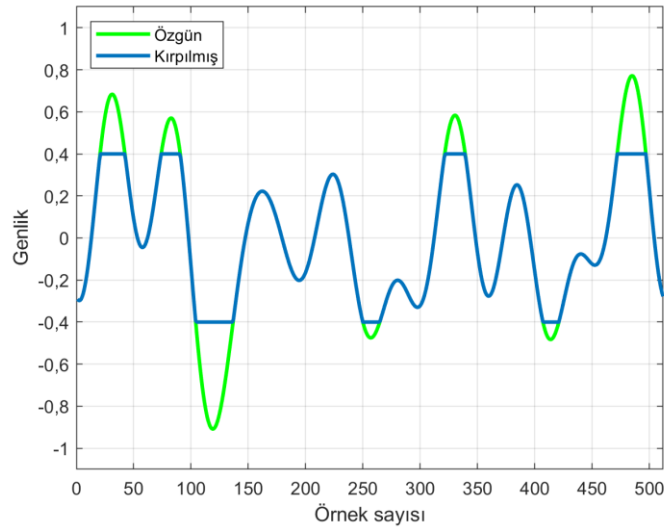
## 2. KAPSAM ve YÖNTEM

### 2.1. Kırılma

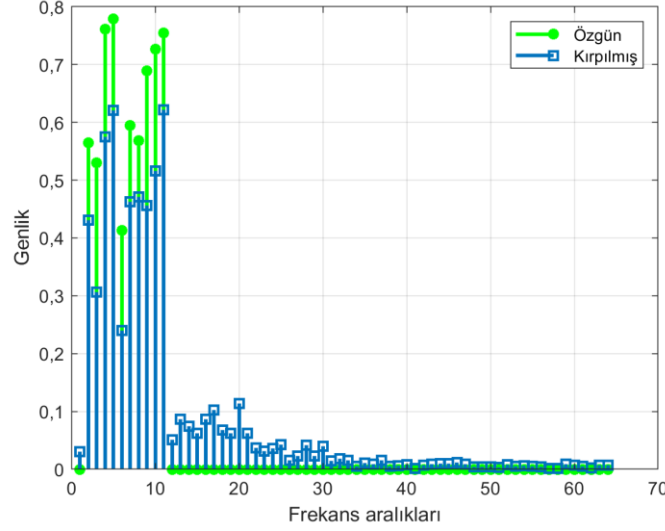
Zamanla değişen bir  $s(t)$  işaretinin genliği sınırlandırıldığında elde edilen kırılmış işaret,

$$s_c(t) = \begin{cases} L & s(t) \geq L \\ s(t) & |s(t)| < L \\ -L & s(t) \leq -L \end{cases} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $L$  kırılma genlik düzeyidir ve kolaylık olması amacıyla bakışimli (simetrik) olarak seçilmiştir. Bu işareti  $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^N$  şeklinde verilen bir vektör olarak tanımlarsak,  $I = \{1,2,3, \dots, N\}$  ve  $I = I^g \cup I^b$  olmak üzere iki ayrı indis kümesi  $\{I^g, I^b\}$  tanımlanabilir. Bu durumda gözlenen vektör  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^N$ , işaretin bilinen, özgün  $\mathbf{s}(I^g)$  ve bozulmuş yani kırılma seviyesindeki değerleri aldığı  $\mathbf{s}(I^b)$  bölümlerinin birleşimi şeklinde olacaktır. Bu durumu açıklamak için Şekil 1(a)'da bir işaret örneği, işaretin genliği bakışimli olarak kırılmış durumu ile birlikte gösterilmektedir. Özgün işaretin genliği 0,4 seviyesinde kırılarak, daha yüksek ve daha düşük genlik seviyelerindeki işaret değerleri sırasıyla +0,4 ve -0,4 değerlerinde sabitlenmektedir. Bu durum Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi işaretin ayrık Fourier dönüşümü ile frekans ortamına dönüşümü yapıldığında, işaretin harmonik frekans sayısının artmasına yol açmaktadır.



a.



b.

Şekil 1:

- a. Örnek işaret ve genliği 0,4 seviyesinde bakışumlu olarak kırılmış durumu  
 b. Aynı işaretlerin ayrık Fourier katsayıları

Diğer taraftan, seyreklik gösterimi sayesinde işaretler belirli bir tabanda açıldıklarında, daha az sayıda sıfırdan farklı değere sahip katsayı kullanılarak gösterilebilmektedir (Donoho, 2006) (Candes, 2006). Bu gösterim sayesinde işaret, önceden belirlenmiş bir sözlükten elde edilen küçük işaret parçacıklarının uygun şekilde birleştirilmiş hali olarak elde edilebilmektedir. Örneğin  $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^N$  ile verilen bir işaret,  $N < M$  olmak üzere  $\Phi \in \mathbb{R}^{N \times M}$  ile verilen fazlalık içeren bir sözlükten alınan işaretlerle gösterilebilir. Bu durumda bilinmeyen bir  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^M$  vektörüne karşılık gelen gözlenen işaret  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^N$  olacak şekilde,  $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}$  ile bulunurken en seyrek vektör,

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_0 \quad (\text{kısıtı } \mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}) \quad (2)$$

matematiksel ifadesinin sonucu olarak elde edilir. Burada  $\|\mathbf{x}\|_0$ ,  $\mathbf{x}$  vektörünün sıfır olmayan değerlerinin sayısını göstermekte ve genellikle  $L^0$  norm olarak adlandırılmaktadır. Ancak gerekli belitleri (aksiyomları) sağlamadığı için gerçekte bir norm değildir.

Bilindiği üzere Denklem (2)'de verilen problem NP-zor olduğundan tam sonucun elde edilmesi işlemsel olarak olurlu (feasible) olmamaktadır (Davis ve diğ., 1997). Bu nedenle yaklaşık ama işlemsel olarak izlenebilir yöntemler olan taban arayışı (Basis Pursuit, BP) (Chen ve diğ., 1998), ya da dik eşleştirme arayışı (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) (Mallat ve Zhang, 1993) gibi çözümler bulunmaktadır. Bu şekilde dışbükey eniyileme (convex optimization) yaklaşımları ile doğrusal programlama yöntemleri birlikte kullanılmaktadır. Burada taban arayışı yöntemi,

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_1 \quad (\text{kısıtı } \mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}) \quad (3)$$

kullanılarak Denklem (2) ile verilen problemi tanım olarak  $\|\mathbf{x}\|_1 = \sum_i |x_i|$  ile verilen  $L^1$  normuna çevirerek yaklaşık çözüm önerirken, dik eşleştirme arayışı ise,

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_0 \quad (\text{kısıtı } \|\mathbf{y} - \Phi \mathbf{x}\|_2^2 < \epsilon) \quad (4)$$

çözümü ile kısıtı, seçilen belirli bir hata eşik değeri  $\epsilon$  üzerinden  $L^2$  normuna gevşeterek bulan açgözlü (greedy) bir algoritmadır. Bunun yanında,

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{W}\mathbf{x}\|_1 \quad (\text{kısıtı } \mathbf{y} = \Phi\mathbf{x}) \quad (5)$$

ile verilen dışbükeyliği koruyan yeniden ağırlıklandırılmış  $L^1$  normunun kullanıldığı çözümler de bulunmaktadır (Weinstein ve Wakin, 2011). Burada  $\mathbf{W}$ ,  $w = (w_1, w_2, \dots, w_M)^T$  pozitif ağırlıkların köşegen değerlerinde olduğu, diğer elemanların ise sıfır olduğu köşegen bir matristir. Bir sonraki ağırlıklandırma aşamasında işaretin genliği ile ters orantılı olarak seçilecek ağırlık değerleri sayesinde, büyük katsayıların küçük katsayılara göre daha fazla cezalandırılacağı daha etkin bir seyrek işaret elde edilebilmektedir.

$$w^{(i+1)} = \frac{1}{|x^{(i)}| + a} \quad (6)$$

Burada, ağırlık değerinin sonsuz olmaması için de bir pozitif değerli katsayı ( $a > 0$ ), cezalandırma değeri olarak kullanılmaktadır (Needell, 2009).

## 2.2. Önerilen Yöntem

Diğer yandan, bilindiği ve Şekil 1’de de örnek bir işaret üzerinden gösterildiği gibi ayrık Fourier dönüşümü (AFD) ile işaretin seyrek gösterimi kolayca elde edilebilmektedir. Bu çalışmada da Fourier dönüşümünün sağladığı frekans ortamı seyrekliğine dayanılarak, yeniden ağırlıklandırılmış  $L^1$  normunun çözümlerinin elde edilmesi ve bu çözümler kullanılarak kırılmış işaretin yerinin bilindiği varsayımı ile işaret yenilemesi önerilmektedir. Bunun için işareti,

$$s = \sum_{k \in I^a} s(k) + \sum_{k \in I^b} \alpha(k) \quad (7)$$

şeklinde, bilinen bölüm ve kırılmış bölüm olarak ikiye ayırdıktan sonra kırılmış bölüm genlik değerlerini tahmin edilecek  $\alpha$  katsayıları olarak belirlenebilir. Daha sonra Denklem (5) yeniden ele alınarak,

$$\min_{\mathbf{f}} \|\mathbf{W}\mathbf{f}\|_1 \quad (\text{kısıtı } \alpha > 0) \quad (8)$$

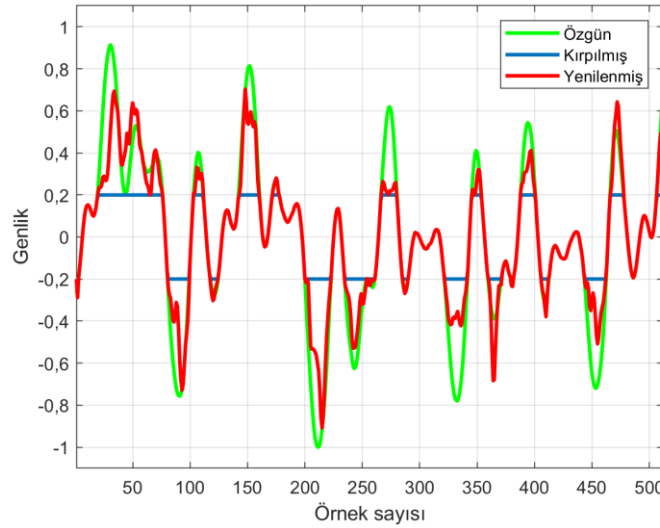
işaretin ayrık Fourier dönüşümü uygulandıktan sonra elde edilen katsayı vektörü  $\mathbf{f}$  olmak üzere, bilinmeyen  $\alpha$  katsayıları ve böylece işaretin kırılma uygulanmış bölgesinin genlik değerleri bulunmuştur. Bu işlemi işareti uygun boyutta ( $N = 512$ ) seçilen pencerelerdeki işaretler için aynı sayıdaki ayrık Fourier dönüşümü uzunluğunu uygularken, bilinmeyen ağırlık ve  $\alpha$  katsayı değerleri, başlangıçta birim değer alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu değerler ile başlatılan yinelemeli yeniden ağırlıklandırma işlemi önceden belirlenmiş en fazla iterasyon sayısı ya da yenileme hatasının en küçüklendiği bir eşik değerine ulaşıncaya kadar devam ettirilmiştir. Sonuçta ayrık Fourier katsayılarının eniyileme sonucunda bulunan en uygun değerlerinden elde edilen  $\alpha$  katsayı değerleri, işaretin kırılmış bölgesindeki genlik değerlerini vermektedir. Önerilen yöntemin işleyişini özetleyen ve gerçekleştirilmesi için kullanılan algoritma sözde-kodu Tablo 1’de sunulmaktadır.

**Tablo 1. Önerilen yöntemin algoritma sözde-kodu**

<p><b>giriş:</b> <math>s_c, I^b, i_{\max}, \alpha, \epsilon</math></p> <p><b>başlat:</b> <math>i = 1, W_k^{(1)} = 1, k = 1, \dots, N, \alpha(k \in I^b) = 1</math></p> <p><b>tekrarla</b></p> $s = s_c + \sum_{k \in I^b} \alpha(k)$ $f = AFD\{s\}$ $f^{(i)} = \arg \min \ W^{(i)} f\ _1, \alpha > 0 \text{ kısıtı ile}$ $W_k^{(i+1)} = \frac{1}{ f_k^{(i)}  + \alpha}, k = 1, \dots, N$ $i = i + 1$ <p><b>olana kadar</b> <math>i_{\max}</math> veya <math>\ f^{(i)} - f^{(i-1)}\ _2 &lt; \epsilon</math></p> <p><b>çıkış:</b> <math>\alpha(k \in I^b)</math></p>
--

### 3. BULGULAR

Önerilen yöntem karşılaştırma amacıyla Adler ve diğ. (2012)'de verilen 8 kHz'de örneklenmiş konuşma, 16 kHz'de örneklenmiş konuşma ve müzik işaret örnekleri üzerinde yapay olarak gerçekleştirilen farklı kırılma oranları kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla örnek ses ve konuşma işaretleri genliklerinin en büyük mutlak değerine göre birleştirilmiş ve 0,2'den 0,9'a kadar 0,1'lik birim adımlarla bakışimli kırılma seviyeleri oluşturulmuştur. Örnek bir ses işaretinin özgün hali, 0,2 seviyesinde kırılmış ve yenileme sonucunda elde edilmiş zaman ortamındaki görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir.



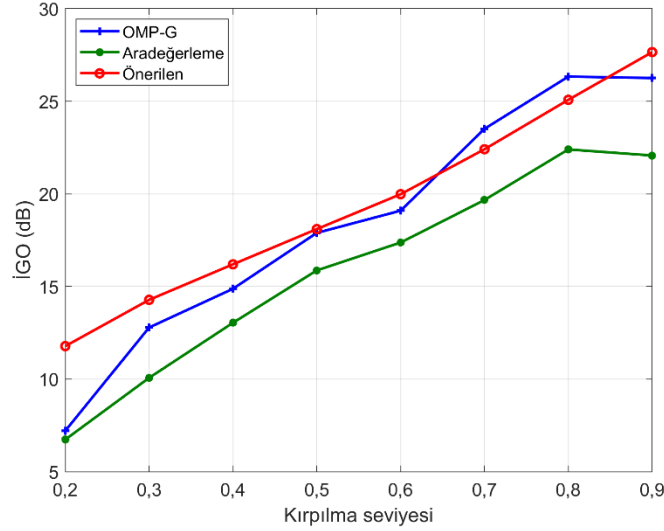
**Şekil 2:**

*Örnek bir ses işaretinin özgün, kırılmış ve yenileme yapılmış durumları*

Gözleneceği üzere, yenileme yapılmış işaret kırılmış işarete göre özgün işarete daha fazla benzemektedir. Yenileme algoritmalarının başarımı özgün işaret  $\mathbf{s}$  ve beklenen işaret  $\hat{\mathbf{s}}$  kullanılarak elde edilen işaret gürültü oranı (İGO)

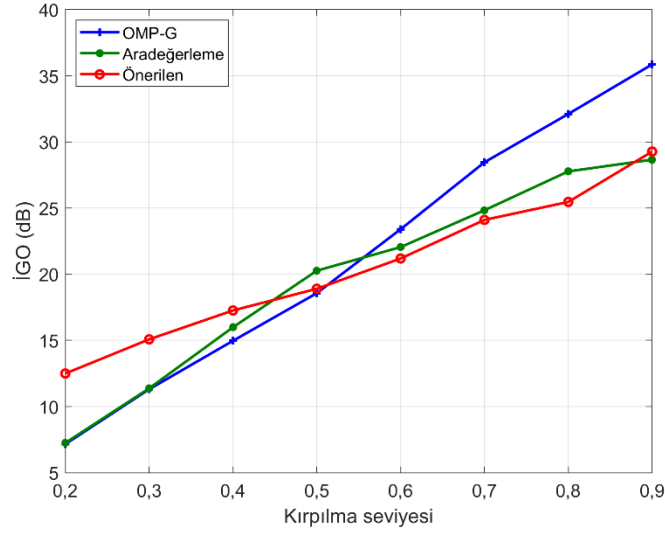
$$\text{İGO}(\mathbf{s}, \hat{\mathbf{s}}) = 10 \log \frac{\|\mathbf{s}(I^b)\|_2^2}{\|\mathbf{s}(I^b) - \hat{\mathbf{s}}(I^b)\|_2^2} \quad (9)$$

kullanılarak desibel (dB) cinsinden hesaplanmıştır. Daha sonra belirtilen kırılma seviyeleri için farklı ses işaret örnek kümeleri üzerinden ortalama İGO değeri bulunmuştur. Sonuçlar hem Janssen ve diğ. (1986) çalışmasındaki aradeğerleme yöntemi, hem de Adler ve diğ. (2012) çalışmasında önerilen OMP-G olarak adlandırdığımız Gabor temel işlevini kullanan dik eşleştirme arayışı yöntemi ile karşılaştırılarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3, Şekil 4, ve Şekil 5'te sırasıyla 8 kHz örnekleme frekansına sahip konuşma örnekleri, 16 kHz örnekleme frekansına sahip konuşma örnekleri ve 16 kHz örnekleme frekansına sahip müzik örnekleri için gösterilmektedir.

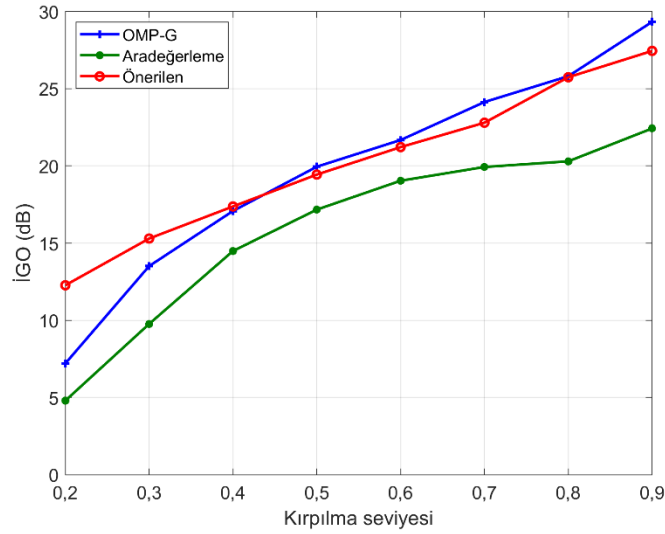


**Şekil 3:**

*8 kHz örnekleme frekansına sahip konuşma örnekleri için farklı kırılma seviyelerinde ortalama İGO karşılaştırması*



**Şekil 4:**  
*16 kHz örnekleme frekansına sahip konuşma örnekleri için farklı kırılma seviyelerinde ortalama İGO karşılaştırması*



**Şekil 5:**  
*16 kHz örnekleme frekansına sahip müzik örnekleri için farklı kırılma seviyelerinde ortalama İGO karşılaştırması*

Farklı örnek gruplarının değerlendirilmesini gösteren her üç şekilde de, kırılma seviyesinin düşük olduğu yani kırılmanın fazla olduğu durumlarda önerilen yöntemin daha yüksek İGO değerlerine sahip olduğu bulunmuştur. Kırılmanın daha az ve beklenen seviyelerde olduğu durumlarda da, önerilen yöntemin karşılaştırılan diğer iki yöntemle benzer başarımlar elde ettiği görülmektedir.



#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, seyreklik yaklaşımında ayrık zaman Fourier katsayılarının yeniden ağırlıklandırılmış  $L^1$  normu ile birlikte uygulandığı kırılmış ses işaretleri yenilemesi gerçekleştirilmiştir. İşaretin kırılmamış bölümünden elde edilen frekans ortamı bilgisi kullanılarak, kırılmış bölümünü oluşturan genlik değerleri bulunmuştur. Gerçek işarete ne kadar yakın bir işaretin bulunabildiği, temel alınan çalışmadakine uyumlu olması amacıyla işaret gürültü oranı aracılığı ile değerlendirilmiştir. Önerilen yöntem ile oluşturulan seyrek yaklaşımın her üç durumda ele alınan farklı ses örnekleri için de diğer yöntemlere göre, özellikle kırılmanın yüksek olduğu durumlarda daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

Bunun yanında, beklenildiği gibi bütün yöntemlerdeki işaret gürültü oranına dayalı başarımın işaretin kırılma seviyesi arttıkça arttığı gözlenmektedir. Bu durumun farklı örnekleme frekanslarında hazırlanmış örnekler için de benzer sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Önerilen yöntemin seyreklik ortamı olarak ayrık Fourier dönüşümüne dayanmasından dolayı, kırılmanın daha az olduğu durumlarda işaretin frekans bölmelerinin genlik değerleri daha az değişeceğinden, başarımın kırılmanın daha çok olduğu durumlara karşılaştırıldığında görece düşük olabileceğine neden olduğu düşünülmektedir. Yine de yenileme sonucunda elde edilen başarımın diğer yöntemler seviyesinde olduğu da verilen sonuçlardan görülmektedir. Burada yeniden ağırlıklandırılma yönteminin uygun katsayıların bulunmasında etkili olduğu ve kullanılmasının başarımı arttırdığı gözlenmiştir. Yeniden ağırlıklandırma için özel bir cezalandırma değeri belirlenmemiş olsa da, gelecekte uygun bir katsayı belirlenerek yineleme işleminin daha da etkin kullanılması olası görünmektedir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar Mehmet Erdal ÖZBEK, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadır.

#### YAZAR KATKISI

Yazar Mehmet Erdal ÖZBEK, çalışmanın tüm süreçlerinde katkıda bulunmuştur ve çalışmanın her yönünden sorumludur.

#### KAYNAKLAR

1. Abel, J. S. and Smith, J. O. (1991) Restoring a clipped signal, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Toronto, 1745-1748. doi: [10.1109/ICASSP.1991.150655](https://doi.org/10.1109/ICASSP.1991.150655)
2. Adler, A., Emiya, V., Jafari, M. G., Elad, M., Gribonval, R. and Plumbley, M. D. (2012) Audio inpainting, *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20(3), 922-932. doi: [10.1109/TASL.2011.2168211](https://doi.org/10.1109/TASL.2011.2168211)
3. Candes, E. J. (2006) Compressive sampling, *International Congress of Mathematicians*, Madrid, 1433-1452. doi: [10.4171/022-3/69](https://doi.org/10.4171/022-3/69)
4. Chen, S., Donoho, D. and Saunders, M. (1998) Atomic decomposition by basis pursuit, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 20(1), 33-61. doi: [10.1137/S1064827596304010](https://doi.org/10.1137/S1064827596304010)
5. Davis, G., Mallat, S. and Avellaneda, M. (1997) Adaptive greedy approximations, *Journal of Constructive Approximation*, 13, 57-98. doi: [10.1007/BF02678430](https://doi.org/10.1007/BF02678430)
6. Defraene, B., Mansour, N., De Hertogh, S., van Waterschoot, T., Diehl, M. and Moonen, M. (2013) Declipping of audio signals using perceptual compressed sensing, *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 21(12), 2627-2637. doi: [10.1109/TASL.2013.2281570](https://doi.org/10.1109/TASL.2013.2281570)

7. Deruty, E. and Tardieu, D. (2014) About dynamic processing in mainstream music, *Journal of Audio Engineering Society*, 62(1/2), 42-55. doi: [10.17743/jaes.2014.0001](https://doi.org/10.17743/jaes.2014.0001)
8. Donoho, D. (2006) Compressed sensing, *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4), 1289-1306. doi: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582)
9. Gaultier, C., Kitić, S., Gribonval, R. and Bertin, N. (2021) Sparsity-based audio declipping methods: Selected overview, new algorithms, and large-scale evaluation, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 29, 1174-1187. doi: [10.1109/TASLP.2021.3059264](https://doi.org/10.1109/TASLP.2021.3059264)
10. Godsill, S. J. and Rayner, P. J. W. (1998) *Digital Audio Restoration - A Statistical Model-Based Approach*. London: Springer-Verlag. doi: [10.1007/978-1-4471-1561-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1561-8)
11. Janssen, A. J. E. M., Veldhuis, R. N. J. and Vries, L. B. (1986) Adaptive interpolation of discrete-time signals that can be modeled as autoregressive processes, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 34(2), 317-330. doi: [10.1109/TASSP.1986.1164824](https://doi.org/10.1109/TASSP.1986.1164824)
12. Kitić S., Bertin N. and Gribonval R. (2015) Sparsity and cosparsity for audio declipping: A flexible non-convex approach. in: Vincent E., Yeredor A., Koldovský Z., Tichavský P. (eds) *Latent Variable Analysis and Signal Separation. LVA/ICA 2015. Lecture Notes in Computer Science*, 9237, 243-250. doi: [10.1007/978-3-319-22482-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-22482-4_28)
13. Mallat, S. and Zhang, Z. (1993) Matching pursuits with time-frequency dictionaries, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41(12), 3397-3415. doi: [10.1109/78.258082](https://doi.org/10.1109/78.258082)
14. Mokřý, O. and Rajmic, P. (2020) Audio inpainting: Revisited and reweighted, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 28, 2906-2918. doi: [10.1109/TASLP.2020.3030486](https://doi.org/10.1109/TASLP.2020.3030486)
15. Mokřý, O., Závřiška, P., Rajmic, P. and Veselý, V. (2019) Introducing SPAIN (SParse Audio INpainter), *27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, A Coruna, 1-5. doi: [10.23919/EUSIPCO.2019.8902560](https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2019.8902560)
16. Needell, D. (2009) Noisy signal recovery via iterative reweighted L1-minimization, *Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 113-117. doi: [10.1109/ACSSC.2009.5470154](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2009.5470154)
17. Orcalli, A. (2001) On the methodologies of audio restoration, *Journal of New Music Research*, 30(4), 307-322. doi: [10.1076/jnmr.30.4.307.7496](https://doi.org/10.1076/jnmr.30.4.307.7496)
18. Ozerov, A., Bilen, Ç. and Pérez, P. (2016) Multichannel audio declipping, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 659-663. doi: [10.1109/ICASSP.2016.7471757](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7471757)
19. Plumbley, M. D., Blumensath, T., Daudet, L., Gribonval, R. and Davies, M. E. (2010) Sparse representations in audio and music: From coding to source separation, *Proceedings of the IEEE*, 98(6), 995-1005. doi: [10.1109/JPROC.2009.2030345](https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2030345)
20. Tauböck, G., Rajbamshi, S. and Balazs, P. (2021) Dictionary learning for sparse audio inpainting, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 15(1), 104-119. doi: [10.1109/JSTSP.2020.3046422](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2020.3046422)
21. Weinstein, A. J. and Wakin, M. B. (2011) Recovering a clipped signal in sparseland. Eriřim Adresi: <https://arxiv.org/pdf/1110.5063> (Eriřim Tarihi: 02.09.2021).

22. Závřška, P., Rajmic, P., Ozerov, A. and Rencker, L. (2021) A survey and an extensive evaluation of popular audio declipping methods, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 15(1), 5-24. doi: [10.1109/JSTSP.2020.3042071](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2020.3042071)

