

Elektriksel Kısmi Boşalma Darbesinin Benzetimi ve Dalgacık Analizi ile Gürültüden Süzülmesi

Özkan Altay¹

Özcan Kalenderli²

^{1,2}Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

¹e-posta: ozaltay@tai.com.tr

²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

Özetçe

Kısmi boşalma (KB) ölçümleri, elektriksel yalıtım malzemelerindeki hataların zamanında fark edilmesini sağlar. Yüksek gerilim aygıtları üzerinde yapılan KB ölçümleri genellikle ortam ve ölçüm devresi kaynaklı gürültüye maruz kalır ve bu etkiler ölçüm sonuçlarının sağlıklı değerlendirilmesine engel olur. Bu çalışmada, son yıllarda geniş bir kullanım alanı bulan dalgacık analizinin kısmi boşalma verilerinden gürültü süzmek amacıyla kullanımı sunulmuştur. Gürültü içerisine gömülü KB işaretlerinin gürültüden en etkin şekilde ayıklanabilmesi için KB işaretlerini ve çeşitli gürültü kaynaklarının oluşturduğu etkiyi matematiksel olarak ifade eden bu benzetim verileri üzerinde dalgacık analizi uygulamaları yapılmış ve yöntemin kullanılabilirliği irdelenmiştir. Sonuçlar, KB işareti büyüklüklerinin (oluşum zamanı, genlik, kaynağı vb.) yüksek düzeyde gürültü içine gömülü verilerde dahi yeterli derecede etkin bir şekilde belirlenebileceğini göstermektedir.

1. Giriş

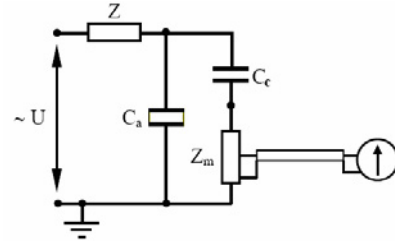
İki elektrot arasında bulunan bir yalıtkanın yalnızca bir bölümünde olan ve elektrotları köprülemeyen yerel elektriksel boşalmalara kısmi boşalma (KB) veya korona adı verilir. Kısmi boşalmaların ölçülmesinde boşalmalar sırasında enerji dönüşümü sonucu ortaya çıkan etkilerden yararlanılır. Bu etkiler, akım darbeleri, dielektrik kayıpları ve elektromagnetik dalga yayılması gibi elektriksel etkiler ile ısı, ışık, ses ve kimyasal bozulmalar gibi elektriksel olmayan etkilerdir. Ölçmelerde bu etkilerden en çok elektriksel KB darbelerinden yararlanılır. Kısmi boşalma ölçmelerinin amacı, KB'ların varlığını belirleme, ölçme, yerini belirleme ve sonuçları değerlendirmedir [1].

Ölçümlerle elde edilen KB işaretleri genellikle dış ortam veya ölçme devresi kaynaklı gürültüye maruz kalmakta ve kimi zaman KB işaretlerinin gerekli parametrelerini sağlıklı bir şekilde bu verilerden saptamak kolay olmamaktadır. Bu tür gürültülerin ana işaretten ayırt edilip ayıklanması işlemi için literatürde dalgacık analizinin kullanıldığı örnekler mevcuttur [2-5]. Bu çalışmalar, bazı adımlarda çeşitli varsayımlar yapılarak geliştirilmiş, genelleme yapılması her zaman mümkün olmayan çözümlerden üretilmiştir. Bu çalışmalarda üzerinde çalışılan işaretlerdeki işaret gürültü oranları, sunduğumuz bu çalışmadaki kadar yüksek seviyede değildir. Bu çalışmada yapay olarak benzetimle üretilmiş ve işaret gürültü oranları farklı gürültüler içine gömülmüş kısmi boşalma işaretlerinin, gürültünün dalgacık analizi ile etkin bir şekilde ana KB darbe işaretlerinden süzülmesi ve yeniden KB darbe işaretinin elde edilmesi için yapılan çalışmalar sunulmuştur. Amaç, dalgacık analizinin KB ölçmelerinde gürültüyü süzmedeki başarımını sınamak ve kullanmaktır.

2. Kısmi Boşalma Ölçme Devresi ve Darbe Şekli

2.1. KB Ölçme Devresi

Deney cisminin bir ucunun doğrudan topraklandığı ve ölçü empedansının, kuplaj kondansatörünün altına bağlandığı tipik bir kısmi boşalma ölçme devresi Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'deki devrede, C_a deney cismini (KB kaynağını), C_c kuplaj kondansatörünü, Z_m ölçü empedansını veya dört uçlusunu, Z de devreyi yüksek akım ve rezonanstan koruma amaçlı bir öndirenci göstermektedir. Deney cisminin kapasitesinin küçük ve topraktan yalıtılabilir olduğu durumlarda ölçme empedansı ya da dört uçlusunun deney cismi ile seri bağlandığı devreler de kullanılmaktadır.



Şekil 1: Tipik KB darbe ölçme devresi.

2.2. KB Darbe Şekli

Şekil 1'de gösterilen Z_m ölçü empedansı, paralel RC devresi ya da paralel RLC devresi şeklinde bir empedans olabilir. Z_m 'nin paralel RC devresi şeklinde olması ve ölçme devresine gelen kısmi boşalma geriliminin ΔU birim kabul edilmesi durumunda Z_m üzerinden elde edilecek $V_{RC}(t)$ gerilim:

$$V_{RC}(t) = \frac{C_a / C_c}{C_t} \Delta U * e^{-t/\tau} \quad (1)$$

olur. Bu denklemde, C_a deney cismi kapasitesi, C_c kuplaj kondansatörünün kapasitesi ve C ölçü empedansının kapasitesi olmak üzere

$$C_t = C + C_a / C_c \quad (2)$$

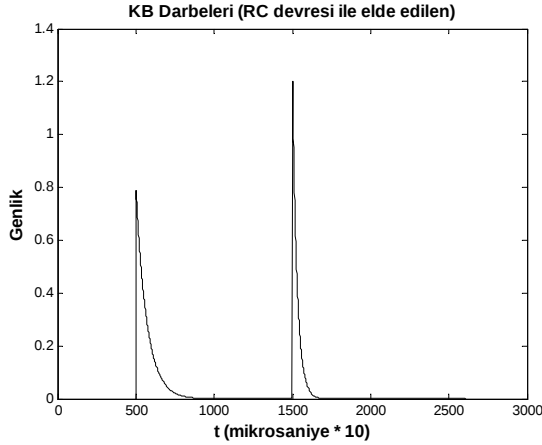
$$t_d = RC_t \quad (3)$$

büyüklüklerini belirtmektedir.

Kısmi boşalma darbesinin, zaman ekseninde $t = t_0$ anında oluştuğu kabul edilirse ve devre elemanlarının değerleri yanı sıra oluşan KB darbesinin genliği tarafından belirlenen ölçülen gerilimin genliği, A sabiti ile gösterilirse (1) denklemi (4) denkleminde verilen KB darbesine ilişkin ifadeye dönüşür.

$$\begin{cases} x(t) = Ae^{-\frac{t-t_0}{\tau}} & t \geq t_0 \\ x(t) = 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (4)$$

Şekil 2’de, RC devresi şeklindeki ölçme empedansından elde edilen, gerçek KB darbesine benzeyen iki adet darbe dalga şekli verilmiştir. Burada $t = 50 \mu s$ ve $t = 150 \mu s$ anlarında iki ayrı KB işaretinin oluştuğu göz önüne alınmıştır. Bu darbelerden birincisinin genliği, 0,8 birim kadar, ikinci darbenin genliği ise 1,2 birim olarak kabul edilmiştir. Devre elemanlarına bağlı olan zaman sabitleri farklı seçilmiş ve örnekleme frekansı olarak 10 MHz alınmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: RC ölçü empedansı için benzetimle elde edilen iki farklı genlikli kısmi boşalma darbesi.

3. Kısmi Boşalma Ölçümlerindeki Bilinen Gürültü Çeşitleri ve Gürültü Benzetimi

3.1. KB İşaretleri Gürültü Kaynakları

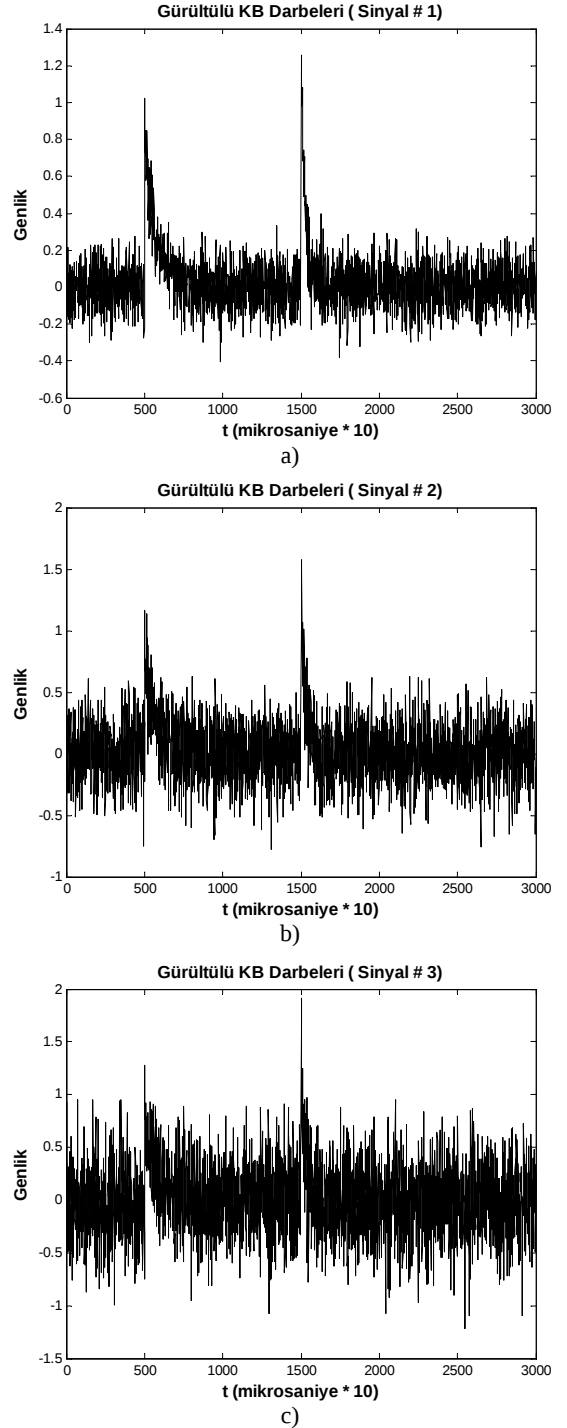
KB ölçümlerinde karşılaşılan dış ve ölçüm devresi kaynaklı ana gürültü kaynakları şöyle özetlenebilir:

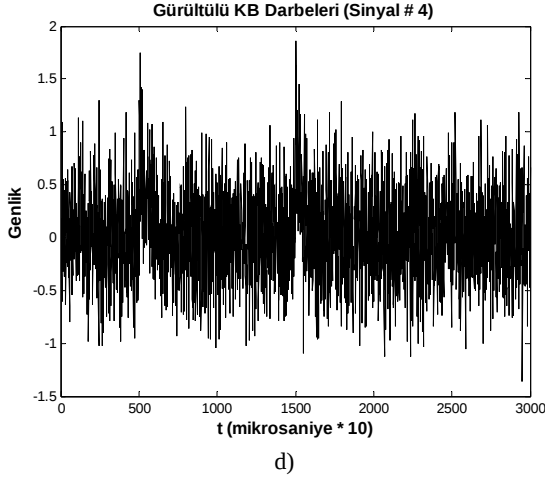
- Haberleşme ve radyo sistemlerinden gelen sürekli sinüsoidal gürültüler.
- Ölçüm devresi içinde oluşturulan elektriksel gürültü ve kontaklar arası atlamalar, periyodik darbe akımları (tristör gibi) gürültüleri gibi stokastik (beyaz) gürültüler.
- Yıldırım, periyodik ve stokastik darbe şekilli olan anahtarlama elemanları veya metal kontaklar arasında ark oluşumu vb. kaynaklı gürültüler.

KB ölçümlerinin genellikle çok yüksek olmayan MHz frekanslarında örneklendiği düşünüldüğünde, boşalma verilerine frekans modülasyonlu (FM) ve mobil haberleşme frekanslarının çok az etkisi olduğu ancak genlik modülasyonlu (AM) frekanslarının etkili olabileceği değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra AM radyo yayınları için kullanılan frekans aralığının çoğunlukla orta dalga 530-1700 kHz olması nedeniyle bu aralıkta rasgele seçilen bir seri halindeki AM sinyaller gürültü simülasyonu için kullanılmıştır. Stokastik gürültü (beyaz gürültü) ise rastlantısal fakat ortalaması sıfıra eşittir ve değişken standart sapma ile belirlenmiştir.

3.2. Gürültülü KB İşaretleri

Öncelikle farklı taşıyıcı dalga frekanslarında AM frekanslı gürültünün genliği, stokastik gürültünün genlik ve standart sapması değiştirilerek farklı gürültü seviyelerinde sinyaller oluşturularak bunlar ana işaret üzerine bindirilmiştir. Ardından dalgacık analizi ile bu gürültülerin süzülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gürültüden temizlemede ana amaç orijinal kısmi boşalma sinyaline mümkün mertebe zarar vermeden gürültüyü en etkin biçimde ölçülen sinyalden ayırmaktır. Bu kapsamda analizde kullanılmak üzere farklı seviyede gürültüye sahip dört farklı veri oluşturulmuştur (Şekil 3).





Şekil 3: Şekil 2’de verilen kısmi boşalma darbelerinin üzerine farklı seviyelerde (işaret gürültü oranlarında (SNR)) gürültü bindirilmiş örnekler:

- a) SNR = 3,12 dB, b) SNR = -11,55 dB,
c) SNR = -19,27 dB, d) SNR = -28,58 dB

4. Dalgacık Analizi

Tanım olarak bir dalgacık, ortalama değeri sıfır olan ve zamanla sınırlı bir dalga şeklindedir. Zaman ekseninde kaydırma ve ölçekleme parametrelerinin değişimi dalgacık dönüşümünün temelini oluşturmaktadır. Sürekli dalgacık dönüşümünde tümüyle ölçeklenebilir bir pencere işaret boyunca kaydırılır ve her konum için spektrum hesaplanır. Bu işlem her yeni tur için biraz daha kısa veya uzun pencereyle birçok kez tekrarlanır. Sonunda, işaretin zaman-frekans gösterimi, hepsi de farklı çözünürlüklü olan işaretler olacaktır.

Karesel integrale edilebilir bir $x(t)$ fonksiyonunun bir $\psi(t)$ dalgacığına göre sürekli dalgacık dönüşümü aşağıdaki gibi tanımlanır [6, 7].

$$CWT_{\psi} x(a, b) = W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (5)$$

$\psi_{a,b}(t)$ fonksiyonu ise normalize edilmiş olarak eşitlik (6)’da verilmiştir.

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (6)$$

Burada $\psi(t)$ baz fonksiyonu ya da ana dalgacığı, (*) sembolü kompleks eşleniği ve a, b parametreleri ise $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$ olmak üzere sırasıyla ölçekleme ve öteleme parametrelerini gösterir. $W_x(a, b)$ terimi dalgacık dönüşümü ile elde edilen dalgacık katsayılarını ifade eder. Dalgacık katsayısı aynı zamanda işaretin incelenen kısmı ile ölçeklenmiş ve ötelenmiş ana dalgacık arasındaki benzerlik boyutunu temsil eder.

Sürekli dalgacık dönüşümünde elde edilen dalgacık dönüşümü katsayıları gereksiz terimler içermektedir ve hesaplama zamanını arttırmaktadır. Ayrık dalgacık dönüşümü, yeterli bilgiyi sağlamakla birlikte hesaplama zamanında da önemli bir azalma getirmektedir. Ölçek ve pozisyon belli bir basamağa göre seçilerek, örneğin ölçek ve pozisyonları ikinin katları olarak seçilmesi analizin daha verimli ve doğru sonuçlar vermesini sağlamaktadır.

Bu işlemi yapmanın diğer bir yoluysa süzme tekniklerinin kullanılmasıdır. İşaret bu tip analizde birbirine seri bağlı yüksek geçiren süzgeç (filtre) ve alçak geçiren süzgeçlerden geçirilmektedir. Böylece işarete varolan yüksek ve alçak frekans bileşenleri ayrı analiz edilmektedir. Çok çözünürlüklü dalgacık analiziyle işaretin ayrıştırılması Şekil 4’de sadece bir seviyeli ayrıştırma ve geri birleştirme işlemi için verilmektedir. Sürekli genişleme ve öteleme parametreleri yerine,

$$a = a_0^m, \quad b = nb_0 a_0^m \quad (7)$$

şeklindeki ayrık parametreleri tanımlamak mümkündür. Burada a_0, b_0 sabit sayılar olup, $a_0 > 1, b_0 > 0$ koşullarını sağlar. Ayrıca m, n sayıları da, $\mathbb{Z}$ tamsayılar kümesinin elemanlarını oluşturur. Bu durumda ayrıklaştırılmış ana dalgacık eşitlik (8)’de verilmiştir.

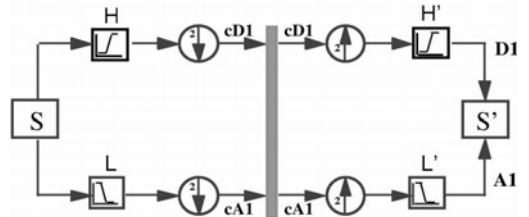
$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (8)$$

Buradan hareketle ayrık parametrelili dalgacık dönüşümü eşitlik (9)’da tanımlanmıştır

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (9)$$

$a_0 = 2$ ve $b_0 = 1$ değerleri için dalgacık dönüşümü, diadik-ortonormal dalgacık dönüşümü adını alır. Bu durumdaki ortonormal bazın önemli özelliklerinden birisi ise a_0 ve b_0 ’ın yukarıdaki gibi seçimiyle, işareti farklı zaman ve frekans çözünürlüklü ölçeklere ayrıştırmayı sağlayan ve çok çözünürlü dalgacık analizi (ÇÇDA) denilen algoritmanın kullanılabilmesidir [8].

Şekil 4, S sinyalin tek seviyeli olarak ayrıştırılmasını ve yeniden birleştirilmesini göstermektedir. Burada cA1 yaklaşım katsayıları, cD1 de detay katsayılarını ifade etmektedir. Belirtilen şekilde H yüksek geçiren, L alçak geçiren ayrıştırma süzgeci iken H’ yüksek geçiren, L’ alçak geçiren birleştirme süzgeçleridir.



Şekil 4: Tek seviyeli olarak sinyalin ayrıştırılması ve yeniden birleştirilmesi.

5. KB Darbeleri Üzerine Gürültü Bindirilmiş Örneklerin Dalgacık Analizi ile Gürültüden Arındırılması

5.1. Gürültüden Arındırma

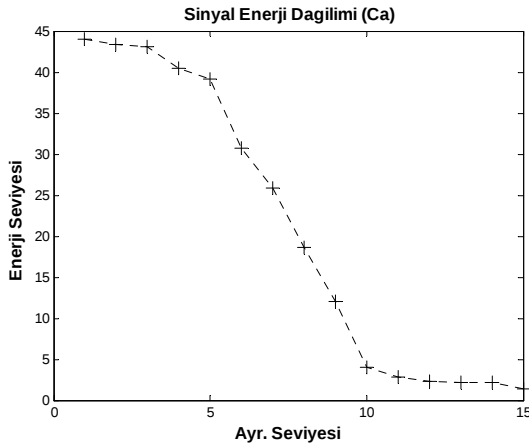
Optimum dalgacığı belirlemek için birçok aday dalgacık mevcuttur. Çoklu çözünürlük analizinde ana işaretin dalgacığına benzerliği sonucun doğruluğu için önemlidir. Bu nedenle tüm dalgacık ailesine ait ana dalgaya benzer olan

dalgacıklar aday dalgacıkları oluşturmaktadır. Çalışmada geniş bir dalgacık ailesinden alınan aday dalgacıklar ile ana işaret arasındaki benzerlik araştırılmıştır. Bu amaçla iki veri arasındaki benzerliği ortaya koyan korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Eşitlik (10)'da X ve Y veri kümeleri arasındaki korelasyonu belirleyen bağıntı verilmiştir. Korelasyonu hesaplamak için iki veri kümesinin veri sayıları eşit olmalıdır ve eşitlikte (n) olarak tanımlanmıştır.

$$\gamma(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \text{ort}(x))(y_i - \text{ort}(y))}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \text{ort}(x))^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \text{ort}(y))^2 \right]^{1/2}} \quad (10)$$

Ana dalgacığın seçimi için her bir aday dalgacık için korelasyon katsayısı hesap edilmiştir ve KB işaretimiz için en yüksek korelasyon değerini Coif2 ana dalgacığı sağlamıştır.

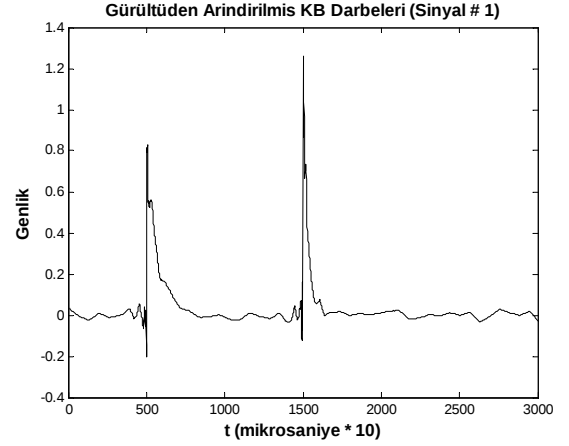
KB darbesi benzetim verisinin 3000 noktadan oluştuğu ve de Coif2 ayrıştırma filtresinin uzunluğunun 12 olduğu göz önüne alınırsa, ayrık dalgacık dönüşümü ayrıştırma seviyesinin 6 olarak seçilmesinin anlamlı olacağı düşünülmüş ve yapılan denemeler olumlu sonuç vermiştir. Ayrıca 15 seviye için her seviye ayrıştırmada yaklaşım katsayıları kullanılarak sinyal enerji seviyeleri hesaplanmıştır (Şekil 5). Buradan da görüleceği üzere enerjinin büyük bir kısmını alt seviyeler oluşturmaktadır ve veriyi daha yüksek seviyelere ayrıştırmanın gereksiz olacağına karar verilmiştir [9].



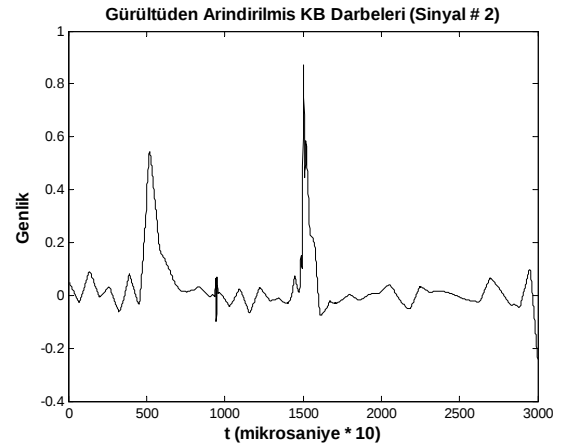
Şekil 5: Ayrıştırma seviyesine göre yaklaşım katsayıları için enerji seviyeleri.

Çoklu çözünürlük analizi ile alt bantlara ayrıştırılan sinyal daha sonra gürültü bileşenlerinin süzülmesi için eşikleme işlemine tabi tutulur [10]. Detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi işlemi belirlenen bir aralık için bu aralığa dahil olan detay katsayılarının sıfırlanması ile gerçekleştirilir. Diğer bir ifadeyle dalgacık sabitlerinin eşiklenmesi işlemi gürültü veya benzer şekilde değerlendirilebilecek önemsiz detay dalgacık sabitlerinin uzaklaştırılması esasına dayanır. Çalışmada detay katsayıları için sabit eşikleme yöntemi kullanılarak elde edilen eşik değerleri kullanılarak gürültülü sinyal katı ve yumuşak olmak eşiklemeye tabi tutulmuştur. Daha önceden verilen dört farklı gürültülü KB benzetim sinyalinin eşikleme işleminden sonra ters dalgacık dönüşümü

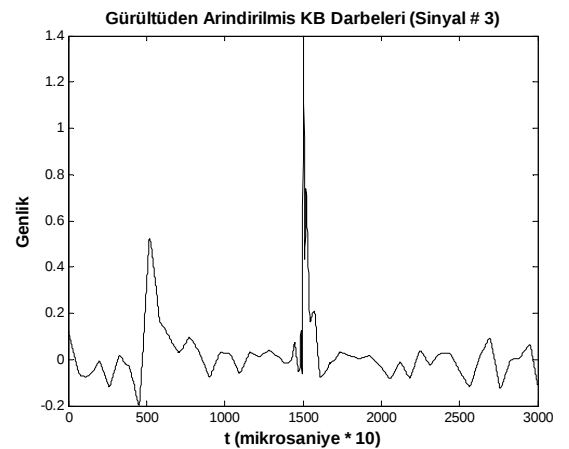
ile tekrardan birleştirilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde elde edilen sonucun KB işaretlerinin varlığını ortaya koyduğu, düşük SNR değerlerinde dahi yeterli derecede sonuç verdiği gözükmemektedir. Sinyal # 4 yüksek seviyede gürültü oranına sahip olmasına rağmen yöntem KB işaretlerini belirgin olarak ortaya çıkarabilmiştir.



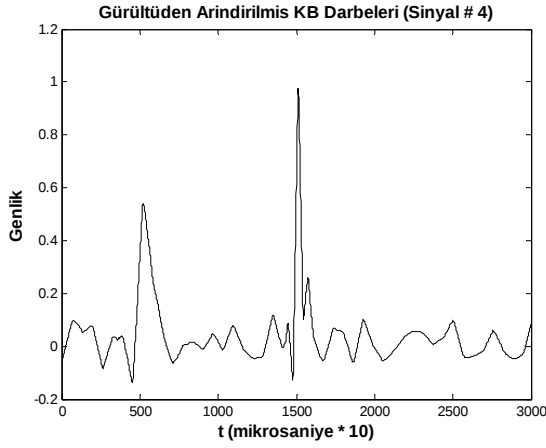
a)



b)



c)



Şekil 6: Şekil 3'te verilen gürültülü KB darbelerini içeren dört farklı veriye belirtilen yöntemin uygulanması sonrasında elde edilen sonuçlar.

5.2. Ortalama Karesel Hata (MSE)

Gürültüden arındırma çalışmaları sonrasında yöntemin etkinliğinin sınanması amacıyla her benzetim sinyali için gürültüden temizlendikten sonra ortalama karesel hata (MSE) değerleri eşitlik (11) kullanılarak bulunmuştur. Bu denklemde S başlangıçta oluşturulan gürültüsüz ana sinyali, R gürültülü sinyalden gürültü arındırma işlemi yapıldıktan sonra yeniden elde edilen sinyali ifade etmektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S(i) - R(i))^2 \quad (11)$$

Beklenti, bu hatanın mümkün mertebe küçük olmasıdır. Dört farkı gürültü seviyesindeki sinyaller için elde edilen MSE değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Ortalama Karesel Hata Değerleri

Sinyal	MSE
Sinyal # 1	0,00044
Sinyal # 2	0,00290
Sinyal # 3	0,00390
Sinyal # 4	0,00440

6. Sonuçlar

Bu çalışmada gürültü içerisine gömülü KB işaretlerinin gürültüden en verimli şekilde ayıklanabilmesi için kısmi boşalma işaretlerini ve çeşitli gürültü kaynaklarının oluşturduğu etkiyi matematiksel olarak ifade eden bu benzetim verileri üzerinde dalgacık analizi uygulamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki; yöntem yüksek seviyede gürültü oranlarında dahi KB işareti büyüklüklerinin (varlığı, oluşum zamanı, genlik vb) yeterli seviyede tespit edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

7. Kaynakça

- [1] Kreuger, F. H., *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, Butterworth & Co., New York, 1989.
- [2] Kyprianou, A. and Georgiou, G. E., "Wavelet Packet Denoising for On-Line Partial Discharge Detection in High Voltage Systems", 13th Mediterranean Conf. on Control and Automation, Limassol, Cyprus, June 27-29, 2005.
- [3] Li, J., et al., "Wavelet based De-noising for PD Online Measurement of Transformers", 2004 IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Indianapolis, ABD, 19-22 Sept. 2004.
- [4] Zhou, X., Zhou, C., and Kemp, I. J., "An Improved Methodology for Application of Wavelet Transform to Partial Discharge Measurement Denoising", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, pp. 586-594, 2005.
- [5] Chang, C. S., et al., "Denoising of Partial Discharge Signals in Wavelet Packets Domain", IEE Prog.-Sci. Meas. Technol., Vol. 152, No. 3, pp. 129 – 140, May 2005.
- [6] Stark, H. G., *Wavelets and Signal Processing- An Application Based Introduction*, Springer, Hollanda, 2005.
- [7] Arı, N., Özen, Ş., Çolak, Ö. H., *Dalgacık Teorisi*, Palme Yayıncılık, Ankara, 2008.
- [8] Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, Londra, 1999.
- [9] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., and Poggi, G., *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB*, The Math Works Inc, 1996.
- [10] Agoris, P. D., Meijer, S., Gulski, E., and Smit, J. J., "Threshold Selection for Wavelet De-noising of Partial Discharge Data", 2004 IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Indianapolis, ABD, 19-22 Sept. 2004.