

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DALGACIK ANALİZİ İLE YÜKSEK GERİLİM AYGITLARINDAN
ALINAN İŞARETLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Özkan ALTAY**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

KASIM 2010

**DALGACIK ANALİZİ İLE YÜKSEK GERİLİM AYGITLARINDAN
ALINAN İŞARETLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Özkan ALTAY
(504032003)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Eylül 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Kasım 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN (İTÜ)
Prof. Dr. Osman Nuri UÇAN (İAÜ)
Prof. Dr. Mukden UĞUR (İÜ)
Doç. Dr. Emine AYAZ (İTÜ)**

KASIM 2010

ÖNSÖZ

Öncelikle bu tezin gerçekleşmesinde hiçbir zaman desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Özcan Kalenderli'ye teşekkürü bir borç bilirim. İş yaşantımdaki yoğunluğa rağmen verdiği destekle motivasyonumu kaybetmememi sağlamış, karşılaştığım zorlukları aşmam için her zaman yardımcı olmuştur. Göstermiş olduğu sabır ve tez çalışmalarındaki büyük katkısı için kendisine minnettarım.

Tez çalışmalarım nedeniyle kimi zaman kendisine zaman ayıramadığım sevgili eşime vermiş olduğu destek ve göstermiş olduğu anlayış için teşekkür ederim. Ayrıca bu günlere gelmemde büyük emek sarfeden değerli ailemin tüm bireylerine teşekkürler.

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bilgisayar destekli kısmi boşalma ölçüm sistemini kullanıma sunan Dr. Ahmet Merve'e ve laboratuvar çalışanlarına ve TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü (UEKAE)'nde empedans ölçümlerindeki yardımları için Dr. Aysam Akses'e teşekkür ederim.

Eylül 2010

Özkan Altay
(Elektrik Yük. Müh.)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Araştırmanın İçeriği.....	2
1.1.1 Durum izleme ve arıza saptama	2
1.1.2 Yüksek gerilim ve akım deneyleri.....	2
1.2 Yüksek Gerilim Tekniği Uygulamalarında Genlik, Zaman Ve Frekans Belirlenmesine Yönelik Çalışmalardan Örnekler	3
1.2.1 Örnek 1: Kısmi boşalma ölçmeleri ve yerinin saptanması	3
1.2.2 Örnek 2: Darbe gerilimi deneyleri.....	5
1.2.3 Örnek 3: Darbe akımı deneyleri.....	5
1.3 Gürültü Kaynakları ve Karakteristikleri	6
1.4 Çalışmanın Hedefleri ve Sağladığı Katkı	7
1.5 Tez Bölümlerinin İçeriği.....	8
2. TEZ KONUSU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
2.1 Giriş	11
2.2 Çalışmaların Değerlendirilmesi	11
2.3 Bölümün Sonuçları.....	17
3. İŞARET ANALİZ ARAÇLARININ GELİŞİMİ VE DALGACIK ANALİZİ	19
3.1 Fourier Dönüşümü.....	20
3.2 Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) (Short Term Fourier Transform)..	23
3.3 Dalgacık Analizi.....	27
3.3.1 Dalgacık nedir?	30
3.3.2 Dalgacık fonksiyonu	31
3.3.3 Ölçek (scale) ve öteleme (translation) parametreleri.....	33
3.3.4 Sürekli dalgacık dönüşümü (SDD).....	35
3.3.5 Dalgacık dönüşümünün matematiksel ifadesi.....	39
3.3.6 Ayrık dalgacık dönüşümü - Çoklu çözünürlük analizi.....	44
3.3.7 Çoklu çözünürlük analizinin matematiksel tanımı	46
3.3.8 Dalgacıklar ile işaret analizi.....	52
3.3.9 Diğer analiz yöntemleri	53
3.3.10 Paket dalgacık dönüşümü (PDD)	54
3.3.11 Durağan dalgacık dönüşümü (DDD).....	54

3.3.12 Ayrık dalgacık dönüşümü, paket dalgacık dönüşümü ve durağan dalgacık dönüşümlerinin karşılaştırılması	55
3.3.13 Çalışmalarda Ayrık Dalgacık Dönüşümü’nün tercih edilmesinin nedenleri	57
3.4 Dalgacık Analizi ile Gürültüden Arındırma	59
3.5 Bölümün Sonuçları	62
4. YÜKSEK DARBE GERİLİMİ ÖLÇÜMLERİ VE DALGACIK ANALİZİ İLE VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	63
4.1 Giriş	63
4.2 Darbe İşaretine Dalgacık Analizi Uygulamadan Önce Belirlenmesi Gereken Büyüklükler	64
4.2.1 Ana dalgacığın seçimi	64
4.2.1.1 Ana dalgacıkların genel özellikleri	65
4.2.1.2 Ana dalgacık ile işaret arası benzerlik	66
4.2.1.3 Enerji değeri	67
4.2.2 Deneyle elde edilen darbe gerilimi örneği için ana dalgacığın seçimi.....	68
4.3 Maksimum Ayrıklaştırma Seviyesinin Belirlenmesi	72
4.4 Örnek Darbe Gerilimi Verisi Üzerinde Ana Dalgacık Olarak “Coif1” Seçilmesiyle Elde Edilen Sonuçlar	74
4.5 Ana Dalgacık ve Ayrıştırma Seviyesi Seçiminin Gerçek Darbe Verisi Üzerinden Yapılması	78
4.6 Bölümün Sonuçları	83
5. KISMİ BOŞALMA DENEYLERİ	85
5.1 TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı’nda Yapılan Deneyler.....	85
5.1.1 Kullanılan elektrotlar.....	85
5.1.2 Deney devresi	88
5.1.3 Ortam koşulları	90
5.1.4 Yapılan ölçümler.....	90
5.1.4.1 T3 iletkeni (4 mm çaplı) için kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin bulunması	92
5.1.5 Sivri uç yarım küre elektrot sistemi	98
5.2 Bölümün Sonuçları	106
6. ELEKTRİKSEL KISMİ BOŞALMA DARBE BENZETİMİ VE DALGACIK ANALİZİ İLE GÜRÜLTÜ SÜZME	109
6.1 Kısmi Boşalmaların Sınıflandırılması.....	109
6.1.1 İç kısmi boşalmalar	109
6.1.2 Yüzeysel boşalmalar	110
6.1.3 Korona boşalması.....	110
6.1.4 Elektriksel ağaçlanma	111
6.2 Kısmi Boşalma Eşdeğer Devresi	111
6.3 Dolaysız Ölçme Yöntemleri (Deney Cismine Paralel veya Seri Ölçü Empedansı Bağlayarak Ölçme)	113
6.4 Üstel Dalga (RC Tipi Devre) Darbe Şekli	116
6.5 Sönümlü Salınlı Üstel Dalga (RLC Tipi Devre) Darbe Şekli	117
6.6 Kısmi Boşalma Ölçümlerindeki Bilinen Gürültü Çeşitleri ve Gürültü Benzetimi	118
6.6.1 İşaret gürültü oranı (SNR)	119
6.6.2 Ortalama karesel hata (MSE).....	119
6.7 KB Darbeleri Üzerine Gürültü Bindirilmiş Örnekler ve Bunların Dalgacık Analizi ile Gürültüden Arındırılması	120

6.8 RC Tipi KB Darbelerinde Gürültü Süzme.....	122
6.8.1 RLC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB darbeleri.....	128
6.9 En Uygun Eşikleme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	136
6.10 En Uygun Eşikleme Kuralı ve Fonksiyonunun Seçilmesi.....	140
6.11 Bölümün Sonuçları.....	149
7. KISMİ BOŞALMA ÖLÇÜMÜ VE ÇOKLU ÇÖZÜNÜRLÜK ANALİZİ	
İLE GÜRÜLTÜ SÜZME.....	151
7.1 Kısmi Boşalma Ölçme Devresi.....	151
7.2 Elektriksel Aygıtlardan Elde Edilen Gerçek KB Verileri Üzerinde Çalışmak İçin Yapılan Altyapı Çalışmaları	155
7.3 Kısmi Boşalma Ölçümleri	157
7.3.1 Üç düzlem katmandan oluşan pleksiglas deney örneği	157
7.3.1.1 Gürültülü KB darbe işaretlerinin çoklu çözünürlük analizi ile gürültüden arındırılması	161
7.3.2 Sivri uç-düzlem elektrot düzeni	162
7.3.3 Sivri uç-pürüzlü düzlem elektrot düzeni.....	168
7.3.4 Pleksiglas katmanlı ve farklı boyutlarda hava boşluklu deney örnekleri	171
7.3.5 Eşeksenli (koaksiyel) elektrot düzeni	175
7.3.6 36 kV Geçit izolatörü	178
7.3.7 1 kV' luk kablo.....	181
7.4 Bölümün Sonuçları.....	183
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	185
KAYNAKLAR.....	189
ÖZGEÇMİŞ.....	197

KISALTMALAR

ADD	: Ayrık dalgacık dönüşümü
AM	: Amplitude modulation (genlik modülasyonu)
cA	: Yaklaşım katsayısı
cD	: Detay katsayısı
Coif	: Coiflet dalgacığı
ÇÇDA	: Çoklu çözünürlük dalgacık analizi
DDD	: Durağan dalgacık dönüşümü
DFT	: Ayrık Fourier dönüşümü
DWT	: Discrete wavelet transform (ayrık dalgacık dönüşümü)
Db	: Daubechies
FM	: Frequency modulation (frekans modülasyonu)
FFT	: Fast Fourier Transform (hızlı Fourier dönüşümü)
HF	: Yüksek geçiren ayrıştırma süzgeci
HFCT	: Yüksek frekans akım trafosu
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
KB	: Kısmi boşalma
KZFD	: Kısa zamanlı Fourier dönüşümü
LDIC	: Lemke Diagnostics GmbH
LDT	: Seviyeye bağlı eşikleme
LF	: Alçak geçiren ayrıştırma süzgeci
ME	: Genlik hatası
MRA	: Multi-resolution analysis (çoklu çözünürlük analizi)
MSE	: Ortalama karesel hata
PDD	: Paket dalgacık dönüşümü (wavelet packet transformation)
RC	: Paralel direnç (R) ve kapasiteden (C) oluşan ölçü empedansı
RLC	: Paralel direnç (R), endüktans (L) ve kapasiteden (C) oluşan ölçü empedansı
SDD	: Sürekli dalgacık dönüşümü
SNR	: İşaret gürültü oranı
SURE	: Stein's unbiased risk estimate
Sym	: Symlet dalgacığı
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UEKAE	: Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü
UHF	: Ultra high frequency (çok yüksek frekans)
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
VDE	: Verband Der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (Elektroteknik, Elektronik ve Bilişim Teknolojileri Birliği)
YG	: Yüksek gerilim

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Dalgacık ailelerinin temel özellikleri.	66
Çizelge 4.2 : Aday dalgacıklar ve bunlara karşı düşen korelasyonlar.....	72
Çizelge 4.3 : Seviye-7 ayrıştırma için alt bant frekans aralıkları.	73
Çizelge 4.4 : Aday dalgacıklar ve bunlara karşı düşen korelasyon katsayıları.....	81
Çizelge 4.5 : Aday dalgacıklara göre hesaplanan enerji değerleri (EA7).	82
Çizelge 5.1 : Yüksek gerilim deney trafosu özellikleri.	89
Çizelge 5.2 : Ön bobin (empedans) özellikleri.	89
Çizelge 5.3 : Gerilim bölücü özellikleri.	90
Çizelge 5.4 : Kuplaj kondansatörü özellikleri.....	90
Çizelge 5.5 : 4 mm bakır iletken, 2 periyoda ait KB ölçüm ve hesaplama değerleri.	94
Çizelge 5.6 : Yapılan ölçümlerden elde edilen genel değerlendirme.....	106
Çizelge 6.1 : RC tipi ölçüm devresi darbe benzetiminin özellikleri.	120
Çizelge 6.2 : Aday ana dalgacıklar ile elde edilen sonuçlar.	124
Çizelge 6.3 : RLC tipi ölçüm devresi için darbe benzetiminin özellikleri.	128
Çizelge 6.4 : Aday ana dalgacıklar ile elde edilen sonuçlar.	132
Çizelge 6.5 : En başarılı dört ana dalgacık için toplu sonuçlar.....	132
Çizelge 6.6 : KB işaretlerinden gürültü süzme için en uygun parametreler.....	149
Çizelge 7.1 : 6 seviye ayrıştırma için alt bant frekansları.....	161
Çizelge 7.2 : Pleksiglaslar için gerilim altında elde edilen diğer sonuçlar.....	175

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Bir kabloda kısmi boşalmanın ölçülmesi ve yerinin bulunması.....	4
Şekil 1.2 : Gürültülü KB işareti örneği.....	4
Şekil 1.3 : Cephe kesik darbe gerilimi örneği.	5
Şekil 1.4 : Darbe akımı örneği.	6
Şekil 1.5 : Temel gürültü ve girişim kaynakları [6].	7
Şekil 3.1 : 5 Hz, 10 Hz ve 20 Hz'lik üç ayrı işaret ve Fourier dönüşümü.....	23
Şekil 3.2 : Farklı zamanlarda oluşan 5 Hz, 10 Hz ve 20 Hz lik üç ayrı işaret.	23
Şekil 3.3 : Kısa zaman Fourier analizi.....	24
Şekil 3.4 : Hamming penceresi.	25
Şekil 3.5 : Pencere genişliği $R = 30$ birim olarak seçilmesi sonucu KZFD.	26
Şekil 3.6 : Pencere genişliği $R = 100$ birim olarak seçilmesi sonucu KZFD.	26
Şekil 3.7 : Dalgacık analizinde ölçek-zaman alanı.	28
Şekil 3.8 : Dönüşümleri zaman-frekans çözünürlüğü bakımından karşılaştırma.	29
Şekil 3.9 : Daubechies dalgacık ailesinden a) Db3 ve b) Db9.....	30
Şekil 3.10 : Sinüsoidal dalganın bir kısmı ve sonlu uzunluktaki dalgacık.	31
Şekil 3.11 : Ana işareti oluşturan ötelenmiş ve ölçeklenmiş dalgacıklar.	31
Şekil 3.12 : Haar ölçek fonksiyonu.	32
Şekil 3.13 : Örnek dalgacık şekilleri [42].	33
Şekil 3.14 : Ölçek a parametresinin 1, $1/2$ ve $1/4$ olarak seçimi.....	34
Şekil 3.15 : Ana işaret, ölçeklenmiş ve ötelenmiş dalgacıklar [42].	36
Şekil 3.16 : Şekil 3.13'te verilen örnek SDD sonuçları [42].	37
Şekil 3.17 : Sinüsoidal bir dalga üzerinde küçük bir süreksizlik.	38
Şekil 3.18 : Şekil 3.17'de verilen dalganın Db4 ana dalgacığı ile SDD'si.....	39
Şekil 3.19 : Meksika şapkası dalgacık fonksiyonu.	41
Şekil 3.20 : Meksika şapkası dalgacık fonksiyonu $b = 0$ ve $a = 0.5, 0.8, 1.1$	41
Şekil 3.21 : Meksika şapkası dalgacık fonksiyonu $b = 1$ ve $a = 0.5, 0.8, 1.1$	42
Şekil 3.22 : 10 iterasyonda elde edilen db2 dalgacık fonksiyonları.....	42
Şekil 3.23 : Coif 1 ana dalgacığına ait ölçek ve dalgacık fonksiyonları.	43
Şekil 3.24 : Db5 ana dalgacığına ait ölçek ve dalgacık fonksiyonları.	43
Şekil 3.25 : $c_0(n)$ ana işaretinin iki ölçeğe ayrıştırılması.	46
Şekil 3.26 : Dalgacıklar için frekans spektrumları (ψ_1 en küçük ölçek).	49
Şekil 3.27 : İki seviyeli olarak işaretin ayrıştırılması ve birleştirilmesi.	49
Şekil 3.28 : Aşağı örnekleme (downsampling) [55].	50
Şekil 3.29 : Üç seviyeli dönüşüm, detay ve yaklaşım frekans bantları.	50
Şekil 3.30 : 512 nokta $x(n)$ işareti 3 seviyeli ADD.	52
Şekil 3.31 : Sinüsoidal işaret bindirilmiş darbe örneği.	52
Şekil 3.32 : Şekil 3.31'de verilen işaretin tek seviyeli ayrıştırılması.	53
Şekil 3.33 : İki seviyeli paket dalgacık dönüşümünde alt bantlar [25].	54
Şekil 3.34 : Ayrık dalgacık dönüşümü.	55
Şekil 3.35 : Paket dalgacık dönüşümü.....	55
Şekil 3.36 : Durağan dalgacık dönüşümü.....	56

Şekil 3.37 : a) A darbesi ve b) A darbesinin ötelenmiş hali olan B darbesi.	58
Şekil 3.38 : Dalgacık analizi ile gürültü temizleme.	60
Şekil 3.39 : Gürültü içeren sinüsoidal bir işaretin ayrıştırılması [56].	60
Şekil 4.1 : Darbe gerilimi üretme, ölçme, veri toplama kısımları ile deney düzeni. .	63
Şekil 4.2 : Deneyden elde edilen orijinal darbe gerilimi dalga şekli.	69
Şekil 4.3 : En uygun dalgacığı belirlemek için ana dalgaya benzer olacak şekilde oluşturulan normalize darbe gerilimi.	69
Şekil 4.4 : Darbe ile a) Db2, b) Db6, c) Sym4 dalgacıklarının karşılaştırılması.	71
Şekil 4.5 : S işaretinin n seviyeli ayrıştırılması.	72
Şekil 4.6 : Oluşturulan darbe verisi ile Coif1 dalgacık verisinin karşılaştırılması. ...	74
Şekil 4.7 : Orijinal darbe ve yaklaşımlar.	75
Şekil 4.8 : Orijinal darbe ve detaylar.	76
Şekil 4.9 : Orijinal darbe ve gürültüden süzölmüş darbe.	77
Şekil 4.10 : Süzme işlemi sonucu elde edilen gürültü bileşeni.	77
Şekil 4.11 : Gürültü bileşenine ait frekans spektrumu ve düşük frekans aralığının detay gösterilimi.	78
Şekil 4.12 : Ana veriyi kaybetmemek için sadece çok yüksek frekansları süzölmüş ve orijinal darbelerin karşılaştırılması.	79
Şekil 4.13 : Darbe gerilimi verisi ile a) Db3, b) Sym4, c) Coif1 ana dalgacıklarına ait verilerin karşılaştırılması.	80
Şekil 4.14 : Benzetim ve orijinal darbe fonksiyonları kullanılarak hesaplanmış korelasyon katsayıları.	81
Şekil 4.15 : Sym5 ile gürültüden arındırılmış darbe ve orijinal darbe şekilleri.	83
Şekil 5.1 : Deneylerde kullanılan elektrot türleri.	86
Şekil 5.2 : Sivri uçlu elektrotlar.	86
Şekil 5.3 : Düzlem elektrot.	86
Şekil 5.4 : Eş eksenli (koaksiyel) elektrot düzeni ve iç iletkenler.	87
Şekil 5.5 : İç iletkenlerin şekilleri ve boyutları.	87
Şekil 5.6 : LDS-6 (LDIC) Kısmi boşalma ölçüm sisteminin bilgisayar arayüzü.	88
Şekil 5.7 : Deney devresi.	89
Şekil 5.8 : LDIC KB kalibratörü.	90
Şekil 5.9 : PC osiloskop.	91
Şekil 5.10 : Gerilime göre kısmi boşalma değişimi (T3 iletken).	93
Şekil 5.11 : 4 mm çaplı iletken için 21,5 kV'da KB etkileri (sadece ilk periyot için).	95
Şekil 5.12 : 4 mm çaplı iletken için 21,5 kV gerilim altında KB değerlerinin pC cinsinden yük değerleri (sadece ilk periyot için).	95
Şekil 5.13 : PCScope cihazından alınan örnek bir gerilim dalga şekli.	96
Şekil 5.14 : T3 iletkeni için 21,5 kV'da KB'ların faz açısıyla değişimi (t = 10 s). ...	96
Şekil 5.15 : T3 iletkeni 21,5 kV'da KB değerlerinin zamana göre değişimi (t = 10 s).	97
Şekil 5.16 : T3 iletkeni 21,5 kV'da KB değerlerinin gerilimle değişimi (t = 10 s)...	97
Şekil 5.17 : T3 iletkeni için 21,5 kV'da KB değişimi (t = 10 s).	98
Şekil 5.18 : Standart sivri uç-yarım küre elektrot düzeni.	99
Şekil 5.19 : Standart sivri uç-yarım küre elektrot düzeninin ölçüleri.	99
Şekil 5.20 : Gerilime göre KB değişimi, sivri uç-küre (KB baş. gerilimi:3,4 kV)..	100
Şekil 5.21 : Sivri uç-küre için KB değerlerinin faz açısına göre değişimi.	101
Şekil 5.22 : Sivri uç-küre için KB değerlerinin değişimi, H: Darbe sayısı.	101
Şekil 5.23 : Sivri uç-küre düzeni için KB değerlerinin değişimi (t = 10 s).	102
Şekil 5.24 : Kapalı deney kabı ve elektrot düzeni.	102

Şekil 5.25 : Kapalı kap içinde sivri uç-sivri uç elektrot düzeni.	103
Şekil 5.26 : Sivri uç-sivri uç elektrot düzeni için KB değerlerinin faz açısına ve gerilimin uygulanma süresine göre değişimi ($t = 30$ s).	103
Şekil 5.27 : Kapalı kap içine yerleştirilmiş sivri uç-düzlem elektrot düzeni.	104
Şekil 5.28 : Sivri uç-düzlem elektrot düzeni için KB değerlerinin faz açısına ve gerilimin uygulanma süresine göre değişimi ($t = 30$ s).	104
Şekil 5.29 : 36 kV'luk bir epoksi reçine mesnet izolatörü için KB ölçüm düzeneği.	105
Şekil 5.30 : Mesnet izolatörü için 21 kV ve 10 s'de yük değişimi ve ortalaması.	105
Şekil 5.31 : Mesnet izolatörü için 21 kV gerilim altında 10 s sürede KB işaretleri.	106
Şekil 6.1 : Yalıtkan içerisinde oluşan iç kısmi boşalmalar.	110
Şekil 6.2 : Yalıtkan üzerinde yüzeysel boşalmalar.	110
Şekil 6.3 : Bir sivri uçlu elektrotta korona boşalması.	111
Şekil 6.4 : Elektriksel ağaçlanma.	111
Şekil 6.5 : Gerilim altındaki yalıtkana ait eşdeğer devre [1].	112
Şekil 6.6 : Yalıtkan içerisinde tekrarlayan boşalmalar [1].	112
Şekil 6.7 : Kısmi boşalma darbe ölçme devreleri	114
Şekil 6.8 : Ölçü dört uçlu empedansı; a) Paralel RC ve b) Paralel RLC devreleri.	114
Şekil 6.9 : RC tipi ölçü empedansı ile elde edilen darbe [1].	116
Şekil 6.10 : RC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB darbeleri.	116
Şekil 6.11 : RLC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB darbeleri.	117
Şekil 6.12 : Sinyal #1 (SNR = 5 dB).	121
Şekil 6.13 : Sinyal #2 (SNR = 0 dB).	121
Şekil 6.14 : Sinyal #3 (SNR = -5 dB).	122
Şekil 6.15 : Ayırıştırma seviyesine göre yaklaşım katsayıları için enerji seviyeleri.	123
Şekil 6.16 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #1.	125
Şekil 6.17 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #2.	125
Şekil 6.18 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3	126
Şekil 6.19 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #1 ile orijinal KB işaretleri.	127
Şekil 6.20 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3 ile orijinal KB işaretleri.	127
Şekil 6.21 : Sinyal #1 (SNR = 5 dB).	129
Şekil 6.22 : Sinyal #2 (SNR = 0 dB).	129
Şekil 6.23 : Sinyal #3 (SNR = - 5 dB).	130
Şekil 6.24 : Sinyal #4 (SNR = - 10 dB).	130
Şekil 6.25 : Sinyal #5 (SNR = - 15 dB).	131
Şekil 6.26 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #1 (SNR = 5 dB).	133
Şekil 6.27 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #2 (SNR = 0 dB).	133
Şekil 6.28 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3 (SNR = -5 dB).	134
Şekil 6.29 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #4 (SNR = -10 dB).	134
Şekil 6.30 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #5 (SNR = -15 dB).	135
Şekil 6.31 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3 ile orijinal KB işaretleri.	135
Şekil 6.32 : KB darbeleri (orijinal, SNR = 5 , 0, -5 dB gürültülü).	137
Şekil 6.33 : Eşikleme fonksiyonlarının $\lambda = 0.3$ için sonuçları.	141
Şekil 6.34 : Beş farklı eşikleme kuralı ile elde edilen MSE değerleri.	142
Şekil 6.35 : Beş farklı eşikleme kuralı ile elde edilen SNR değerleri.	142
Şekil 6.36 : Altı farklı eşikleme fonksiyonu kullanılarak elde edilen MSE değerleri.	143
Şekil 6.37 : Altı farklı eşikleme fonksiyonu kullanılarak elde edilen ME değerleri.	143
Şekil 6.38 : Altı farklı eşikleme fonksiyonu kullanılarak SNR değerleri.	144

Şekil 6.39 :	Şekil 6.32’de verilen işaret için beş seviyedeki dalgacık katsayıları. ...	145
Şekil 6.40 :	Şekil 6.39’daki dalgacık katsayılarının eşiklenmiş hali.	146
Şekil 6.41 :	a) Orijinal veri (SNR= -5dB), b) belirlenen yöntemle elde edilen gürültüden süzölmüş ve orijinal darbelerin gösterimi.	147
Şekil 6.42 :	Dalgacık analizi ile işaretlerden güröltü temizleme akış diyagramı. ...	148
Şekil 7.1 :	KB darbe ölçme devresi.....	151
Şekil 7.2 :	Alternatif gerilim için deney düzeneği.	152
Şekil 7.3 :	50 Hz, 5 kVA, 0,220/100 kV yüksek gerilim deney transformatörü.	152
Şekil 7.4 :	R = 50 k Ω , 125 W ön direnç.	153
Şekil 7.5 :	Kapasitif gerilim bölücünün kondansatörleri.....	153
Şekil 7.6 :	Kumanda masası, dijital voltmetreler ve osiloskop.	154
Şekil 7.7 :	Deney düzeneğinden bir görüntü.	154
Şekil 7.8 :	100 ohm’luk dört uçlu.	155
Şekil 7.9 :	HP 4194A Empedans Analizörü ve ölçüm düzeneği.	156
Şekil 7.10 :	Ölçü empedansı değeriinin frekansla değışimi.	156
Şekil 7.11 :	Empedans ve faz açısı değeriilerinin frekansa bağlı değışimi.	157
Şekil 7.12 :	Pleksiglas katmanlar ve kullanılan düzlem elektrotlardan birisi.....	157
Şekil 7.13 :	Deney düzeneği.	158
Şekil 7.14 :	Düzlem elektrotlar arasına yerleştirilmiş pleksiglas tabakalar.	158
Şekil 7.15 :	Deneyde ölçölen gerilim değışimi (güröltölü KB işaretleri).	159
Şekil 7.16 :	Şekil 7.5’teki verinin 115 μ s ve 325 μ s zaman aralığı.	160
Şekil 7.17 :	Şekil 7.5’teki güröltölü KB işaretlerinin frekans-genlik değışimi.	160
Şekil 7.18 :	Şekil 7.15’teki güröltölü KB darbelerinin güröltüden süzölmüş hali...	162
Şekil 7.19 :	Sivri uç-düzlem elektrot düzeni.	163
Şekil 7.20 :	14 mm açıklık, 2.5 kV gerilimde elde edilen işaret.....	163
Şekil 7.21 :	Şekil 7.20’deki işaretin güröltüden süzölmüş hali.	164
Şekil 7.22 :	Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri (a = 14 mm, U = 5 kV).	165
Şekil 7.23 :	Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri (a = 14 mm, U = 8 kV).	165
Şekil 7.24 :	Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri (a = 10 mm, U = 5 kV).	166
Şekil 7.25 :	Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri (a = 10 mm, U = 6,5 kV).	166
Şekil 7.26 :	Sivri uç-düzlem elektrot düzeni KB işaretleri (a = 10 mm, U = 6,6 kV).....	167
Şekil 7.27 :	Sivri uç-düzlem elektrot düzeni KB işaretleri (a = 6 mm, U = 3 kV)..	167
Şekil 7.28 :	Sivri uç-düzlem elektrot düzeni KB işaretleri (a = 6 mm, U = 5,5 kV).....	168
Şekil 7.29 :	Sivri uç-pürözlü düzlem elektrot düzeni.....	168
Şekil 7.30 :	2 mm pürüz, açıklık 5 mm, gerilim 3 kV.	169
Şekil 7.31 :	2 mm pürüz, açıklık 10 mm, gerilim 4 kV.....	169
Şekil 7.32 :	5 mm pürüz, açıklık 5 mm, gerilim 4,8 kV.....	170
Şekil 7.33 :	5 mm pürüz, açıklık 10 mm, gerilim 5 kV.....	170
Şekil 7.34 :	Pleksiglas katmanlar ve kullanılan düzlem elektrotlar.	171
Şekil 7.35 :	d = 1 mm, delikli katman ortada, gerilim 6,5 kV.....	172
Şekil 7.36 :	d = 1 mm, delikli katman ortada, gerilim 7 kV.....	172
Şekil 7.37 :	d = 1 mm, delikli katman üstte, gerilim 6,5 kV.	173
Şekil 7.38 :	d = 1 mm, delikli katman üstte, gerilim 7 kV.	173
Şekil 7.39 :	d = 1 mm, delikli katman altta, gerilim 6,5 kV.....	174
Şekil 7.40 :	d = 1 mm, delikli katman altta, gerilim 7 kV.....	174
Şekil 7.41 :	Eşeksenli elektrot düzeni.	175
Şekil 7.42 :	T1 iletkeni farklı gerilimlerde güröltüden arındırılmış KB işaretleri...	176
Şekil 7.43 :	T2 iletkeni için 12 kV’da güröltüden arındırılmış KB işaretleri.....	177

Şekil 7.44 :	T3 iletkeni için 19 ve 20 kV'ta gürültüden arındırılmış KB işaretleri..	177
Şekil 7.45 :	T4 iletkeni 16, 18,5 ve 21 kV gerilim değerlerinde KB işaretleri.	178
Şekil 7.46 :	36 kV'luk geçit izolatöründe KB ölçüm düzeneği.	179
Şekil 7.47 :	Temiz ve kirli 36 kV'luk geçit izolatöründe KB işaretleri.	180
Şekil 7.48 :	Islak ve tel yerleştirilmiş 36 kV'luk geçit izolatörü.	180
Şekil 7.49 :	Şekil 7.48'deki düzenek, 35 kV, gürültü süzölmüş KB'lar.	181
Şekil 7.50 :	1 kV'luk, 35 mm ² kesitli kablo KB ölçüm düzeni.....	181
Şekil 7.51 :	Kabloda 9 kV gerilim altında elde edilen KB işaretleri.....	182
Şekil 7.52 :	Kabloda KB işaretlerinin detay gösterimi.	182
Şekil 7.53 :	Şekil 7.52'de verilen detay KB işareti.	183

SEMBOL LİSTESİ

a	: Ölçekleme parametresi
A	: Yaklaşım bileşeni
A_0	: Ana işaret genliği
A_1, A_2	: Seviye 1 ve 2 için yaklaşım bileşenleri
A_d	: Gürültüden arındırılmış işaretin genliği
b	: Öteleme parametresi
c	: Taşıyıcı dalganın genliği
$c_1(n)$	: Orijinal işaretin yaklaşım versiyonu
cA_1	: Yaklaşım katsayıları
C_a	: Deney cismi kapasitesi
C_c	: Kuplaj kondansatörü kapasitesi
cD_1	: Detay katsayıları
C_k	: Kuplaj kondansatörü
C_t	: Toplam kapasite
d	: Açıklık
$d_1(n)$	: Orijinal işaretin dalgacık dönüşümü formundaki detay gösterilimi
D_1, D_2	: Seviye 1 ve 2 için detay bileşenleri
Db	: Daubechies dalgacığı
ΔV	: Gerilim değişimi
E	: Sinyal enerjisi
EA	: Alt bant enerjisi
$E(a)$	: a ölçeğindeki enerji
$e(n)$	: Gürültü bileşeni
$\psi(x)$	: Dalgacık fonksiyonu
f	: Frekans
f_0	: Rezonans frekansı
f_m	: Modüle eden işaretin frekansı
$f(n)$	: Gürültülü işaret
f_i	: Taşıyıcı dalganın frekansı
$\emptyset$	: Çap
$\phi(t)$	: Ana fonksiyon
γ	: Korelasyon katsayısı
$g(n)$	: Yüksek geçiren süzgeç katsayısı
g	: Alçak geçiren ayrıştırma süzgeci
g'	: Alçak geçiren birleştirme süzgeci
$h(n)$	: Alçak geçiren süzgeç katsayısı
h	: Yüksek geçiren ayrıştırma süzgeci
h'	: Yüksek geçiren birleştirme süzgeci
$H(n)$	: Darbe sayısı
λ	: Eşik değer
λ_j	: j. seviyeye ait eşik değer
$L^2(R)$	: Sonlu enerjili işaretler için vektör uzayı
$I_{\max}$	: Maksimum ayırıştırma seviyesi

m	: Modüle eden işaretin genliği
n	: İşaret uzunluğu
n_j	: j. seviyedeki dalgacık katsayısı sayısı
n_w	: Dalgacığa bağlı olan ayırıklaştırma filtresinin uzunluğu
N	: Örnekleme frekansı
P_m ve Q_m	: $L^2(R)$ 'den V_m ve W_m uzaylarına izdüşüm operatörleri
$P_m f$	: V_m uzayında f 'nin alçak geçiren kısmı
$\psi_{m,n}$	: Ayırıklaştırılmış dalgacık fonksiyonu
q	: Yük miktarı
$Q_m f$	: V_m uzayında f 'nin yüksek geçiren kısmı
R	: Spektrogramda pencere genişliği
$s(n)$	: Gürültüsüz işaret
S	: Ana işaret
s	: Orijinal işaret
σ	: Standart sapma
t	: Zaman
τ	: Zaman sabiti
T1, T2,..., T4	: Tel (iletken) kodları
U	: Gerilim
U^+	: Delinme gerilimi
V^+	: Boşalma sönme gerilimi
V_i	: Boşalma başlangıç gerilimi
V_m	: Lineer vektör uzayı
w_j	: j. seviyedeki dalgacık katsayıları
ω	: Açısal frekans
$\omega(t)$	: Pencere fonksiyonu
$W_x(a,b)$	: Dalgacık katsayıları
$W(a,i)$	: a ölçeğindeki dalgacık katsayıları
W_s	: Ana işaret enerjisi
W_n	: Gürültü enerjisi
X, Y	: Veri kümeleri
Z	: Tam sayılar kümesi
Z_m	: Ölçü empedansı

DALGACIK ANALİZİ İLE YÜKSEK GERİLİM AYGITLARINDAN ALINAN İŞARETLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Yüksek gerilim (YG) tekniği alanında yalıtkan malzemelerin elektrik alanı altında davranışlarının, delinme dayanımının belirlenmesi, yaşlanmalarının incelenmesi, kaçak akımların izlenmesi, kısmi boşalmanın ölçülmesi vb. çalışmalar yüksek gerilim aygıtları üzerinde işletmede ya da laboratuvar ortamında yapılan çalışmaların büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Zamanla hızlı değişen darbe gerilim ve akım deneyleri de bu çalışmalar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bunların dışında sürekli olarak yüksek gerilim aygıtları üzerinde durum izleme ve karar verme süreçleri de son yıllarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Bütün bu belirtilen uygulamalar sırasında elde edilen verilerin zaman domeninde değerlendirilmesi ile doğru sonuca her zaman ulaşmak mümkün olmayıp bazen özel veri işleme ve değerlendirme tekniklerinin kullanılmasının gerektiği bilinmektedir. Ayrıca YG aygıtlarının denenmesinde, işletilmesinde ortaya çıkan işaretler üzerine pekçok etken (ortam koşulları, malzeme özellikleri, gerilim-akım karakteristikleri vb.) etki etmektedir. Dolayısıyla bu işaretlerin anlaşılması ve değerlendirilmesi zor ve önemli bir işlemdir. Bu işlemi kolaylaştıracak her türlü çalışma önemli bir kazanımdır.

Deney ve ölçüm düzeneği ile elde edilen veriler çoğu zaman ölçme düzeneği ya da dış etkenlere dayanan belli bir miktarda gürültü içerebilmektedir. Kimi zaman bu gürültü düzeyi, ana işareti maskeleyebilecek kadar yüksek olabilmektedir. Bu durumda gürültünün mümkün mertebe bastırılması ve ana veriden ayrıştırılması gerekmektedir. Bu tez çalışması, özetlenen söz konusu alanlara ek olarak YG deney ve ölçümlerinden elde edilen işaretlere ilişkin işaret/gürültü oranının iyileştirilmesi çalışmalarına da katkıda bulunmayı hedeflemiştir.

Bu çalışmada son yıllarda geniş uygulama alanı bulan bir işaret analiz aracı olan dalgacık analizinin, yüksek gerilim üretim, ölçme ve deneyleri sırasında elde edilen veriler üzerinde, bu verilerin daha kolay değerlendirilmesi amacıyla kullanılmasına yönelik yeni yöntem ve uygulama alanlarının geliştirilmesi sağlanmıştır. Analiz esnasında gerekli olan en uygun ana dalgacığın, ayrıştırma seviyesinin, eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonların üzerinde çalışılan işarete göre nasıl seçilmesi gerektiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre şekillendirilen işareti değerlendirme ve gürültüden arındırma süreçleri deneyle elde edilen farklı türden veri kümelerine uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Bunun yanı sıra yüksek gerilim aygıtları üzerinde yapılan durum izleme, gerilim ve akım ölçümleri sırasında zaman bölgesinde elde edilen ölçüm verilerinden doğru olarak genlik, zaman, frekans büyüklüklerinin belirlenmesi ve sonuçların doğru yorumlanmasını sağlanmıştır. Zaman-frekans analizinde etkin bir araç olan dalgacık analizinin yukarıda belirtilen amaçlara yönelik etkinliği ortaya koyulmuştur.

Diğer taraftan kısmi boşalmaların ölçülmesi ve özellikle de işletme altında sürekli izlenmesi esnasında büyük bir sorun oluşturan ölçme sistemine bağlı ya da dış kaynaklı gürültü bileşenlerinin elde edilen veriden uzaklaştırılmasında dalgacık analizi tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca geliştirilen ölçü dört uçlusu ile yüksek gerilim aygıtlarından kısmi boşalma verilerini elde etmeye yönelik ölçüm düzeneklerinin geliştirilmesine katkıda bulunulmuştur.

EVALUATION OF SIGNALS ACQUIRED FROM HIGH-VOLTAGE DEVICES BY WAVELET ANALYSIS

SUMMARY

Studies conducted on high-voltage devices on-line or in laboratory such as evaluation of behavior of insulating material under electric field, determining breakdown strength, investigating ageing phenomena, monitoring leakage currents and measuring partial discharges are large part of studies in high-voltage (HV) technique area. Also fast changing surge voltage and current experiments occupy an important place among them. In addition to these, condition monitoring and decision-making processes have also found wide application in recent years. It is known that during the all mentioned applications it is not always possible to reach the correct outcome with time domain evaluation and sometimes necessary to use special data processing and evaluation techniques. Moreover, there are factors (environmental conditions, material properties, voltage-current characteristics) that may effect the signals emerge during testing or being under operation for high voltage equipment. Therefore, understanding and evaluation of those signals are an important process. All work that facilitates this process is a significant achievement.

Data acquired by experiment and measurements may contain a certain amount of noise that relies on measurement set-up or external factors. Sometimes the noise level may be high enough to mask the main signal. In this case, noise component should be suppressed as possible and separated from the main data. This study also aims to contribute to signal to noise ratio improvement studies on data obtained from high voltage tests and measurements as well as the areas outlined in the previous paragraph.

In this study, a new method and application areas were developed for wavelet analysis, which is a signal analysis tool found wide range of application areas in recent years, on data obtained from high voltage generation, measurement and test in order to ease to evaluate them. It was determined how to select the most suitable mother wavelet, decomposition level, thresholding rule and thresholding function according to data worked on, which are necessary for analysis. Noise removal procedure formed by gathered results was applied to different data sets and successful results were obtained.

Additionally it was provided to define right amplitude, time and frequency from time domain signal obtained during condition monitoring or voltage & current measurements and correct evaluation of data was enabled. In addition, effectiveness of the wavelet analysis, which is an effective time-frequency analysis, for the above given purposes was revealed.

On the other hand, a wavelet-based method was developed for removal of noise components, which create a major problem and rely on measurement set-up or external factors, from obtained data during measurement of partial discharges and especially during on-line monitoring. Beside these, it was contributed to the development of measurement apparatus aimed at collecting partial discharge data from high voltage equipment by developing a measuring impedance.

1. GİRİŞ

Yüksek gerilim (YG) tekniği alanında çalışmaların önemli bir kısmı yalıtkan malzemelerin elektrik alanı altında davranışlarının, delinme dayanımının belirlenmesi, yaşlanmalarının incelenmesi, kaçak akımların izlenmesi, kısmi boşalmanın ölçülmesi vb. gibi yüksek gerilim aygıtları üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarından oluşmaktadır. Bunun yanı sıra zamanla hızlı değişen darbe gerilim ve akım deneyleri de bu çalışmalar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bunların dışında sürekli olarak yüksek gerilim aygıtları üzerinde durum izleme ve karar verme süreçleri de son yıllarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Bütün bu belirtilen denemeler ve uygulamalar sırasında elde edilen verilerin zaman domeninde değerlendirilmesi ile doğru sonuca her zaman ulaşmak mümkün olmayıp özel veri işleme ve değerlendirme tekniklerinin kullanılmasını gerektirdiği bilinmektedir. Ayrıca YG aygıtlarının denenmesinde, işletilmesinde ortaya çıkan işaretler üzerine pek çok etken (ortam koşulları, malzeme özellikleri, gerilim-akım karakteristikleri vb.) etki etmektedir. Dolayısıyla bu işaretlerin anlaşılması ve değerlendirilmesi zor ve önemli bir işlemdir. Bu işlemi kolaylaştıracak her türlü çalışma önemli bir kazanımdır.

Deney ve ölçüm düzeneği ile elde edilen veriler çoğu zaman ölçme düzeneği ya da dış etkenlere dayanan belli bir miktarda gürültü içerebilmektedir [1]. Kimi zaman bu gürültü düzeyi, ana işareti maskeleyebilecek kadar yüksek olabilmektedir. Bu durumda gürültünün mümkün mertebe bastırılması ve ana veriden ayrıştırılması gerekmektedir. Bu tez çalışması, bir önceki paragrafta özetlenen söz konusu alanlar dışında YG deney ve ölçümlerinden elde edilen işaretlere ilişkin işaret/gürültü oranının iyileştirilmesi çalışmalarına da katkıda bulunmayı hedeflemiştir.

Yüksek gerilim tekniği alanında yapılan çalışmalar sırasında yukarıda belirtilen deney ve uygulama alanlarında elde edilen verilerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için Fourier Analizi gibi yaygın birkaç işaret analiz yönteminin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada ise son yıllarda geniş uygulama alanı bulan bir işaret analiz aracı olan dalgacık analizinin, yüksek gerilim üretim, ölçme ve deneyleri sırasında elde edilen veriler üzerinde, bu verilerin daha kolay

değerlendirilmesi amacıyla kullanılmasına yönelik yeni yöntem ve uygulama alanlarının geliştirilmesi sağlanmıştır.

1.1 Araştırmanın İçeriği

Bu çalışmanın temel amacı yüksek gerilim aygıtları üzerinde yapılan;

- Arıza saptama,
- Durum izleme,
- Gerilim ve akım deneyleri

sırasında zaman bölgesinde elde edilen ölçüm verilerinden doğru olarak genlik, zaman, frekans büyüklüklerinin belirlenmesini ve sonuçların doğru yorumlanmasını sağlamak ve bir sonraki adım olarak otomatik karar verme mekanizmalarının geliştirilmesine katkı yapmaktır. Araştırmanın uygulama alanları ve verilerin elde edildiği çalışmalara örnekler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1.1.1 Durum izleme ve arıza saptama

- Yalıtkanlarda kısmi boşalmanın, ağaçlanmanın, yüzeysel iz oluşumunun dolayısıyla yaşlanmanın izlenmesi ve arızaların önceden saptanması,
- Korona ölçümü, kaçak akımların ölçümü.

1.1.2 Yüksek gerilim ve akım deneyleri

- YG işletme aygıtlarının, alternatif, doğru, yıldırım ve açma kapama darbe gerilim ve akımları ile dayanma, atlama deneyleri.

Yukarıda belirtilen deney ve ölçümler sırasında elde edilen veriler çoğu zaman çeşitli gürültü ve bozucu etkileri içermektedir. Verilerinin içerdiği gürültünün temel kaynakları:

Yüksek frekanslı gürültü: Radyo frekanslı haberleşme sistemlerinin çalışması, harmonikler,

Darbe şeklinde gürültü: Genellikle anahtarlamalı aygıtlarının çalışması ve yıldırım,

Rasgele (dağılmış) gürültü: Çok nedenli, ölçme devresindeki elemanlar tarafından üretilen gürültüler gibi iç ve dış etkenler,

olarak sınıflandırılabilir. Bu gürültülerin olabildiğince süzülerek ana işaretten ayrılması gerekmektedir.

1.2 Yüksek Gerilim Tekniği Uygulamalarında Genlik, Zaman Ve Frekans Belirlenmesine Yönelik Çalışmalardan Örnekler

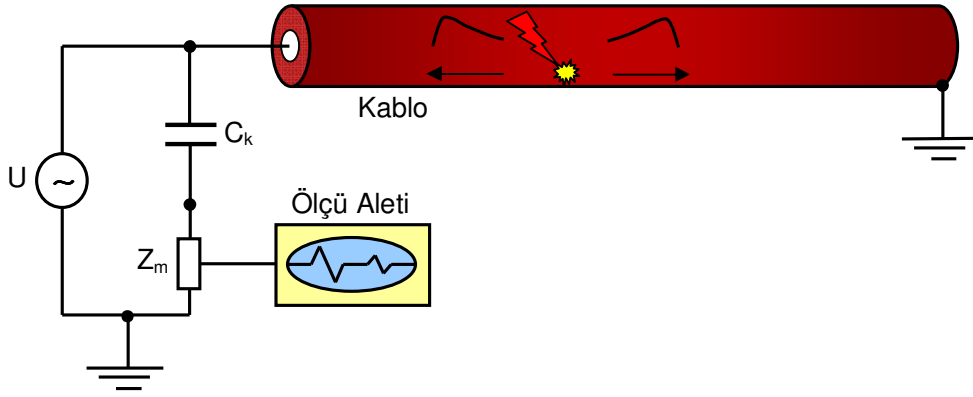
1.2.1 Örnek 1: Kısmi boşalma ölçmeleri ve yerinin saptanması

Yüksek gerilim çalışma alanları arasında kısmi boşalma ölçümleri, darbe gerilim ve akım deneyleri, devre elemanları açma kapama deneyleri sırasında elde edilen işaretler hızlı değişim gösteren işaretler olup bu işaretlerin frekans bileşenleri son derece önemli olabilmektedir. Örnek olarak kısmi boşalma belirleme sistemleri işaret aktarım, işaretin saklanması ve bilgisayar tabanlı işaret işleme tekniklerini gerekli kılar [1].

Elektiriksel kısmi boşalma işaretleri yüksek frekanslı dalga şekillerinden oluşmaktadır. Bu nedenle kısmi boşalma işaretlerini sayısallaştırarak ölçmek için, yüksek örnekleme frekanslarına gereksinim duyulur. Yüksek frekanslarda yapılan örnekleme işlemi gürültü miktarının artmasına neden olur. Artan gürültü nedeniyle kısmi boşalma işaretlerinin sayısallaştırılan işaret içinden ayrılması güçleşecektir.

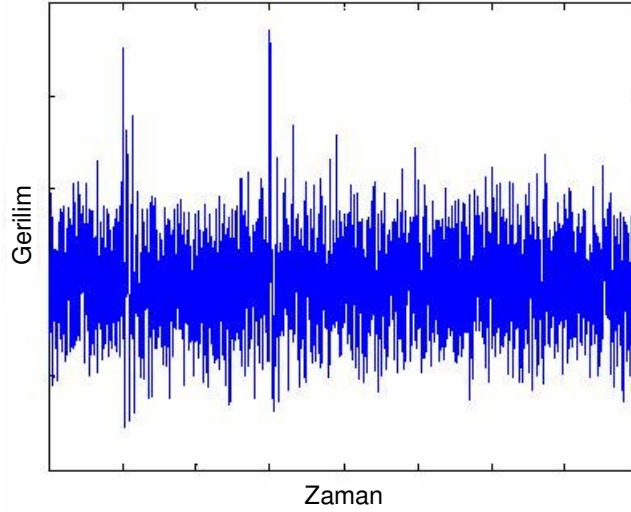
İdeal olarak kısmi boşalmayı tanımlayan darbelerin genliği, faz dağılımı ve zamanla değişimlerinin belirlenmesi ile kısmi boşalmalar sınıflandırılabilir ve yalıtkan için yaşanmanın türü ve derecesi tahmin edilebilir. Ölçüm sırasında elde edilen bu işaretlerde kısmi boşalmanın oluşum anları, türü, ölçüm sistemindeki gürültü vb. ilgili çok miktarda bilgi saklıdır. Bu bilgilerin eldeki veriden doğru olarak çıkartılabilmesi için bu alanda araştırmacılar çok çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Buradaki ana sorun işaretler deneyler veya durum izleme esnasında elde edildikten sonra sadece zaman domeninde incelenip gerekli bilginin elde edilemez oluşundan kaynaklanmaktadır.

Diğer yandan kısmi boşalmanın bir yalıtkan (örneğin bir kablo yalıtkanı) içinde olduğu yerin doğru olarak saptanmasında, çok güvenilir deney verilerine ve kısmi boşalma kaynaklı işaretin farklı kaynaklardan kaynaklanan gürültüler içerisinden ve kablounun her iki yanından yansıyan darbeler içinden özenle çıkartılmasına gerek vardır [2-4]. Şekil 1.1’de bir kablo üzerinde kısmi boşalmanın meydana geldiği yerin bulunmasına ilişkin örnek bir ölçüm devresinin basit gösterimi verilmektedir.



Şekil 1.1 : Bir kabloda kısmi boşalmanın ölçülmesi ve yerinin bulunması.

Daha önce söz edilen gürültü kaynaklarından dolayı çoğu zaman ölçüm sonuçlarında yüksek seviyede gürültü bulunabilir. Her ne kadar donanımsal olarak gürültü süzme gerçekleştirilmiş olsa da işaret içerisinde bir miktar gürültü kalabilir. Önemli olan elde edilmesi gereken anlamlı işaretin bu gürültüden uygun bir yöntemle olabildiğince ana işarete zarar vermeden çıkarılmasıdır. Şekil 1.2’de yüksek miktarda gürültü içerisinde gömülmüş olan kısmi boşalma darbeleri gösterilmektedir.



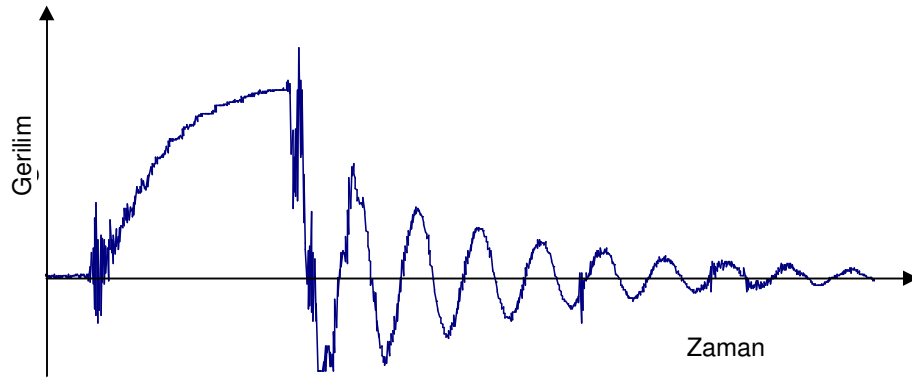
Şekil 1.2 : Gürültülü KB işareti örneği.

Şekil 1.2 incelendiğinde kısmi boşalma darbelerinin hemen hemen gürültü işaretleri ile örtüldüğü yani ayırt edilmez halde olduğu görülmektedir. Böyle bir dalga şekli içinden kısmi boşalma işaretlerini ayırt edebilmek oldukça zordur. Bu nedenle gürültü miktarı olabildiğince azaltıldıktan, yani işaret gürültü oranı iyileştirildikten sonra elde edilecek dalga şekillerinden, elektriksel kısmi boşalma işaretlerini ayıklamanın daha sağlıklı ve kolay olacağı açıktır.

Literatüre bakıldığında sayısal işaretlerde her ne kadar gürültü miktarı azaltılmaya çalışılsa da tam olarak oluşumlarına engel olmak mümkün değildir [5]. Bu nedenle de örneklenen işaretlerdeki gürültünün ayrıştırılmasına ve elektriksel kısmi boşalmaların ayıklanabilmesine olanak sağlayan bir yönteme gereksinim olduğu görülmüştür. Bu bağlamda analiz için kullanılacak yöntemin frekans analizi yapabilme yeteneğine sahip olması gerektiği açıktır. Çünkü gürültü ve kısmi boşalma işaretlerinin frekans spektrumu belirlendiğinde, her ikisini birbirinden ayırt etmek kolaylaşacaktır. Gerçekte sadece frekans spektrumunu bilmek yeterli olmaz. Örneğin kısmi boşalmanın yerinin bulunmasında işaret içerisinde farklı zamanlarda oluşan kısmi boşalma darbelerinin ne zaman oluştuklarının doğru belirlenmesi çok önemlidir. Bu gereksinim, işaretin zaman-frekans domeninde gösterilmesini gerektirir.

1.2.2 Örnek 2: Darbe gerilimi deneyleri

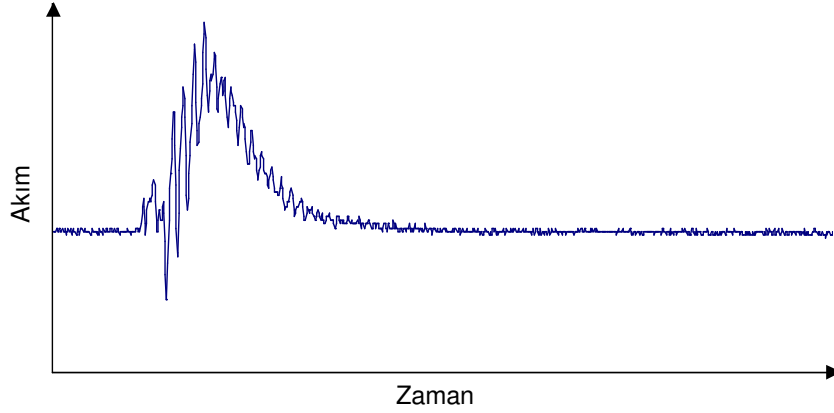
Şekil 1.3 İTÜ (Maslak) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda elde edilen bir cephede kesik darbe gerilimi örneği gösterilmektedir. Zaman domeninde verilen işaretten de görülebileceği üzere işaret üzerinde gürültü ve farklı frekanslarda belirli anlam ifade edebilecek diğer işaretlerin de olabileceği görülebilmektedir. Bozucu işaret olarak tanımlanabilecek bu tür işaretlerin varlığı darbe parametrelerinin tespitini güçleştirmektedir. Belirtilen nedenlerle bu işaretin zaman-frekans domeninde değerlendirilmesinin büyük önemi olacağı düşünülmektedir.



Şekil 1.3 : Cephede kesik darbe gerilimi örneği.

1.2.3 Örnek 3: Darbe akımı deneyleri

Şekil 1.4 laboratuvar ortamında elde edilen bir darbe akımı örneğini göstermektedir. İşaret üzerinde gürültü ve farklı frekanslarda belirli anlam ifade edebilecek diğer işaretlerin de olabileceği görülebilmektedir.

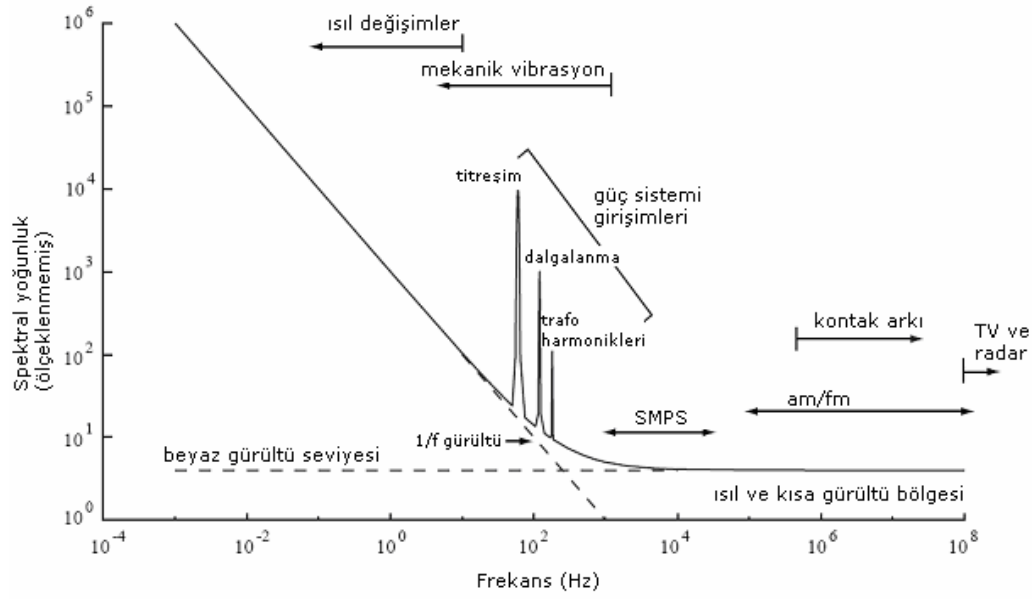


Şekil 1.4 : Darbe akımı örneği.

1.3 Gürültü Kaynakları ve Karakteristikleri

Genel anlamda gürültü belli frekansta girişim olarak tanımlanabilir. Örnek olarak 50 Hz'lik enerji iletim ve dağıtım hatları, yüksek frekanslı radyo vericileri, bir optik düzenekte dağılmış lazer ışığı vb. gürültüye neden olan etkenlerden sadece birkaçıdır. Beyaz gürültü adı verilen gürültü ise geniş frekans aralığında düzenli dağılmış bir gürültüdür. Birçok kaynaktan ortaya çıkabilmesine rağmen düzenli olarak gözükabilir ya da ısıtılmalardan kaynaklanabilir. “Flicker” ya da $1/f$ gürültü adı verilen gürültü ise frekans azaldıkça artan bir gürültü tipidir. Örnek olarak aynı değere sahip bütün elektrik dirençleri aynı değerde beyaz gürültü ortaya koymalarına rağmen ek olarak “flicker” katkısı direncin yapıldığı malzemeye bağlıdır. Şekil 1.5'te tipik gürültü kaynakları ve bunların frekans spektrumları özetlenmektedir.

Ölçümleri etkileyen gürültünün tipi ve ölçüm gereksinimleri bu etkiyi azaltmak için bir yol göstermektedir. Öncelikle eğer mümkünse ana işaretin şiddeti artırılmalıdır. İkinci olarak yüksek frekans etkisini azaltmak amacıyla ölçüm devresini dış kaynaklı girişim etkilerinden korumak için önlemler alınması gerekir. Ancak ölçümlere bağlı olarak belirtilen bu yöntemlerin uygulanması kimi zaman mümkün olmazken uygulanmalarında dahi elde edilen veriler değerlendirme yapmaya yetecek düzeyde olamadığı için filtreleme yapmak kaçınılmaz olur.



Şekil 1.5 : Temel gürültü ve girişim kaynakları [6].

1.4 Çalışmanın Hedefleri ve Sağladığı Katkı

Araştırmanın içeriği kısmında belirtilenlerin ışığında bu çalışmanın ana hedefleri şöyle özetlenebilir:

- Yüksek gerilim aygıtları üzerinde yapılan durum izleme, gerilim ve akım deneyleri sırasında zaman bölgesinde elde edilen ölçüm verilerinden doğru olarak genlik, zaman, frekans büyüklüklerinin belirlenmesi ve sonuçların doğru yorumlanmasını sağlamak,
- Zaman-frekans analizinde etkin bir araç olan dalgacık analizinin a)'da verilen amaca yönelik kullanımda etkinliğini ortaya koymak,
- Kısmi boşalma verilerinin ölçülmesi ve özellikle de işletme altında sürekli izlenmesi esnasında büyük bir sorun oluşturan ölçme sistemine bağlı ya da dış kaynaklı gürültü bileşenlerinin elde edilen veriden uzaklaştırılmasında dalgacık analizi tabanlı bir yöntem geliştirmek,
- Yüksek gerilim ölçme tekniklerini kullanarak yüksek gerilim aygıtlarından veri elde etmeye yönelik ölçüm düzeneklerinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.

1.5 Tez Bölümlerinin İçeriği

Bu çalışmada sunulan bölümlerin içeriği aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Bölüm 2: Tez içeriği kapsamındaki ilgili konular özelinde daha önceden yapılan çalışmalar verilmiştir.

Bölüm 3: İlk olarak yüksek gerilim aygıtlarından elde edilecek verilerin zaman-frekans analizinde kullanılabilecek işaret analiz araçlarının gelişimi incelenmiş, bu kapsamda Fourier Analizi ve Kısa Süreli Fourier Analizi ile Dalgacık Analizinin karşılaştırılması yapılmıştır. Dalgacık Analizinin ne olduğu, bu çalışma kapsamında nasıl kullanılabileceği detaylı olarak anlatılmış ve dalgacık dönüşümünün matematiksel ifadeleri verilmiştir. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD), Ayrık Dalgacık Dönüşümü-Çoklu Çözünürlük Analizi (ADD-ÇÇA), Durağan Dalgacık Dönüşümü (DDD), Paket Dalgacık Dönüşümü (PDD) gibi dalgacık analizinde kullanılan yöntemlerin kıyaslaması yapılarak çalışmalarımız için en uygun yöntemin belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca dalgacık analizi ile deney veya ölçüm yoluyla elde edilen verilerden gürültünün ayrıştırılması işlemine ait adımlar bu bölümde tanımlanmıştır.

Bölüm 4: Bu bölümde laboratuvar ortamında elde edilen darbe gerilimlerinin dalgacık analizi ile gürültüden arındırılması ve işaret içerisinde gizlenen bozucu etkilerin kaynaklarının neler olduğunu belirlenmesi verilmiştir. Ana işarete göre optimum dalgacığın, ayrıştırma seviyesinin belirlenmesi çalışmalarını kapsamaktadır. Bölüm sonunda gürültüden arındırılan darbe ile orijinal verinin kıyaslaması yapılmıştır.

Bölüm 5: Kısmi boşalma verilerinin elde edilmesine yönelik temel elektrot düzenekleri ile TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bilgisayar destekli kısmi boşalma ölçüm sistemi ile yapılan bir dizi deney, bu deneylere ait sonuç ve değerlendirmeleri kapsamaktadır.

Bölüm 6: Elektriksel kısmi boşalma darbe benzetimi ve bu benzetim işaretlerine genliği bilinen derecede gürültü ekleyerek elde edilen çeşitli işaretler üzerinde dalgacık analizi ile gürültü süzme çalışmaları yaparak en uygun ana dalgacık, ayrıştırma seviyesi, eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonunun belirlenmesi sağlanmıştır. Belirlenen bu parametreler kullanılarak dalgacık analizi ile gürültü ayrıştırması yapılmış ve yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

Bölüm 7: Bölüm 6'daki çalışmalara dayanan bulgular ışığında laboratuvar ortamında çeşitli yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen gerçek kısmi boşalma verileri üzerinde belirlenen yöntemin etkinliğinin sınanması çalışmaları yapılmıştır.

Bölüm 8: Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. TEZ KONUSU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş

Son yıllarda dalgacık analizinden özellikle işaret işleme alanında oldukça fazla yararlanıldığı görülmektedir. Genel anlamda bakıldığında dalgacık analizinin uygulama alanları alt band frekans analizi, gürültü temizleme, veri sıkıştırma, veriden öz nitelik çıkartma vb. dir. Yüksek gerilim tekniği alanında da izleme ölçümleri ya da deneyler sırasında oldukça çeşitli kaynaklardan (yüksek gerilim aygıtlarından) veri elde edilmekte ve uygulamaya bağlı olarak zaman zaman bu verilerin içerisinde kolayca açıklanamayacak etkiler (örnek olarak farklı frekans bileşenli işaretler verilebilir) ya da verinin sağlıklı değerlendirilmesini engelleyen yüksek derecede gürültü olabilmektedir. Bu gibi durumlar işaretin zaman-frekans analizinin yapılmasını gerektir. Literatürde dalgacık analizi ile pek çok uygulama bulunmaktadır. Tez kapsamındaki çalışma alanı ile ilgili olanlar aşağıda sınıflandırılarak özetlenmiştir.

2.2 Çalışmaların Değerlendirilmesi

Dalgacık analizi ve yapay sinir ağları kullanılarak güç sistemleri arızaları sınıflandırılmıştır [7]. Çalışmada basit güç sistemi arızaları ele alınarak benzetim yöntemi ile her bir arıza durumundaki dalgacık detay katsayıları hesap edilmiş ve bu veriler yapay sinir ağları için girdi olarak kullanılmıştır. Yine bir başka çalışmada [8] dalgacık analizi ve yapay sinir ağları 61 MVA, 11,5/230 kV'luk tek fazlı bir transformatörde arıza bulunması amacıyla kullanılmıştır. Güç kalitesini bozucu etkilerin sınıflandırılmasında dalgacık dönüşümü ve yapay sinir ağının birleşiminin kullanılması çalışma [9]'da verilmektedir. Bu çalışmada 6 adet bozucu etki benzetimle incelenmiştir ve tatminkar sonuçlar elde edilmiştir. [10] ikinci nesil dalgacık analizinin kullanımı ile enerji iletim hattı üzerinde oluşan arıza yerinin saptanmasına ilişkin bir çalışmadır. Belirtilen araştırmada benzetimle 400 kV'luk 128 km'lik bir hattaki arıza hat başı ve hat sonundaki akım işaretlerine dalgacık analizi uygulayarak ve bir kısım detay katsayıların geçici akım bileşenlerini temsil

ettiği kabul edilerek arıza yerinin saptanmasına çalışılmıştır. Çalışma [11]'de güç transformatörlerindeki iç arıza ile mıknatıslanma akımını fark akım ile ayırt etmeye yönelik dalgacık analizi ve yapay sinir ağları uygulaması verilmiştir. Yapılan benzetim sonucunda bu geçici olayların ayırt edilmesi %99 oranında başarıyla sağlanmıştır. Yıldırım darbelerinin enerji iletim hattı üzerine düştüğü noktanın PSCAD/EMTDC ile benzetimi yapılarak dalgacık analizi kullanımı ile darbenin hat üzerinde başlangıç noktasının tespit edilmesine ilişkin çalışma [12]'de açıklanmaktadır. Sonuçlar çalışmanın yeterli doğrulukta hat üzerindeki darbe başlangıç noktasını tespit edebildiğini göstermektedir. [13]'de laboratuvar ortamında elde edilen gürültülü tam ve de kesik darbe gelimlerinin dalgacık analizi ile gürültüden temizlenmesi verilmiştir. Çalışmada darbe parametrelerinin (genlik, zaman, vb. büyüklüklerin) gürültünün mümkün mertebe süzülmesi sonucunda daha doğru ve kolay belirlenebildiği görülmektedir.

Güç sistemi hata işaretlerinin gürültüden temizlenmesinde çoklu-dalgacık analizin kullanımı [14]'de verilmiştir. Bu çalışmada en iyi çoklu-dalgacık paketinin seçim ölçütü verilmiştir (en başarılı olarak SA4 olarak belirlenmiştir) ve bu seçilen paket ile gürültüden arındırma çalışmaları yapılmıştır. [15] numaralı çalışmada güç sistemlerinde harmonik bozunumun doğru ölçülmesi amacıyla kullanılacak dalgacık analizi için en uygun dalgacık ailesinin ve en uygun ana dalgacığın seçimine çalışılmıştır. Sonuçlara 'dmey' ailesinde hata seviyesi yüksek çıkmış ve uygulama için kullanılamayacağına karar verilmiştir. Düşük bozunum seviyesinde 'db' ailesi başarılı olurken doğruluk yüksek dereceli db'lerde artmıştır. Öte yandan yüksek seviyede bozunumlu durumlarda 'coif' ailesi ve düşük dereceli coif'ler daha başarılı olmuştur. Belirtilen bu çalışmalar sürekli hal için yapılmış olup zamanla değişen harmonikli işaretler incelenmemiştir.

Dalgacık analizinin elektrik sürücü uygulamalarında ölçülen işaretlerdeki (özellikle de akım işaretlerindeki) gürültünün süzülmesi için kullanımı [16]'da açıklanmaktadır. Çalışma sonuçları dalgacık analizinin ölçülen işaretlerdeki yüksek frekanslı bileşenleri ayırt etmede etkili olduğunu göstermiştir. [17]'de geçici koşullar altında çalışan asenkron motorda kalkış anında çekilen akım kullanılarak kırılmış rotor barı tanısı için dalgacık analizinde kullanılacak en uygun dalgacığın belirlenebilmesi incelenmiştir. Sonuçlar analizin başarısı için yüksek dereceli dalgacıkların (örnek en az 8. derece) kullanılmasının gerekliliğini göstermiştir.

Dalgacık analizinin sinüsoidal girişim yapmış bir işarette, işaretin sinüsoidal bileşenlerden ve beyaz gürültüden arındırılmasında kullanımı [18]'de verilmiştir. Benzetimle elde edilen sonuçlar göstermiştirki; eğer işaret gürültü oranı çok düşük değilse yöntem başarılı bir şekilde ana işareti ayırt edebilmiştir. Bu çalışmada ana dalgacığın seçimi konusunda bir bilgi verilmemiştir.

[19] numaralı çalışmada deney düzeneği ile yüksek doğru gerilim altında sivri uçlu bir elektrot ile elde edilen korona boşalma akımı üzerinde dalgacık analizi ve Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü uygulaması yapılmıştır. Sonuçta korona boşalmalarının tipik elektriksel özellikleri irdelenmiştir. İşarete ait ana enerji bileşenlerinin 500 MHz ile 600 MHz arasında olduğu vurgulanmıştır. Yüksek yoğunluklu polietilen izolatörde yüzeysel boşalmayı hızlandıran kirlenici ile alternatif gerilim altında kaçak akımların oluşturulması ve ölçülen bu kaçak akımların dalgacık analizi ile başarılı bir şekilde işlenmesi [20]'de verilmiştir. Sonuçta yüzeyde iz oluşumu sırasında kaçak akımın normal sinüs akımından ayrılık göstermesi saptanabilmiştir. [21]'de polimer kaplı izolatörlerde yüksek gerilim altında ölçülen kaçak akımdan yola çıkarak izolatörün maruz kaldığı bozunum şeklini sınıflandırmada 6 seviyeli ayırıştırma ile dalgacık analizinden yararlanılmıştır. Çalışmada çoklu çözünürlük analizi için Daubechies 4 ana dalgacığı kullanılmıştır.

Çoklu çözünürlük dalgacık analizi ile kesik darbe gerilimi verisi içine gizlenmiş ve istenmeyen yüksek frekanslı bozucu etkilerin analizi [22]'de verilmiştir. İlgili çalışmada yapılan alt bant analizi yüksek frekans bileşenlerin etki zamanları belirlenebilmiş ve nedenleri hakkında yorum getirilebilmiştir.

Yeraltı güç kablolarında kullanılan kılıf kaynaklı arızaların tanısında dalgacık analizinin kullanımı [23]'de verilmiştir. Yapılan benzetimde önce hata akımını oluşturacak kılıf arıza modeli oluşturulmuştur. Ardından bu modelle enerji sisteminin modeli AMP programı yardımıyla hata akımı oluşturacak şekilde benzetimi yapılmış elde edilen hata akımlarına dalgacık analizi uygulanarak istenilen öznelilikler çıkartılmıştır. Ardından yapay sinir ağlarından yararlanarak hata sınıflandırması yapılmıştır.

Literatürde göze çarpan diğer bir çalışma alanı ise kısmi boşalmalar hakkında yapılan çalışmalardır. [24] numaralı çalışmada yeraltı yüksek gerilim güç kablosunda kablo ekinde meydana gelen KB verileri üzerinde dalgacık analizi uygulaması yapılmış ve

ayrık dalgacık dönüşümünün KB işaretlerinin işlenmesinde sürekli dalgacık dönüşümüne olan üstünlüğü gösterilmiştir. Ayrık dalgacık dönüşümü ile elde edilen veriler yapay sinir ağlarına girdi olarak sağlanarak KB işaretlerinin izlenmesini sağlayabilecek bir yöntem geliştirilmiştir. Ancak burada dikkati çeken hususlar olarak şunlar sıralanabilir: öncelikle yazarlar sürekli dalgacık analizi için ana dalgacığı rastgele seçmişlerdir (Gabor dalgacığı), bu dalgacığın neden uygun görüldüğü konusunda bir bilgi yoktur. İkincisi, akustik olarak ölçülen KB işaretinde bir gürültünün var olduğu belirtilmekte ancak gürültünün nasıl elde edildiği konusunda bir bilgi bulunmamaktadır.

[25] numaralı çalışmada sıvı yalıtkan içerisinde farklı elektrot düzenleriyle elde edilen ve akustik emisyon yöntemiyle ölçülen KB işaretlerinin Morlet ana dalgacığı ile sürekli dalgacık dönüşümüne tabi tutularak işaret içindeki bileşenlerin zaman-frekans düzleminde gösterimi yapılmıştır. Ayrıca, üretilen bu KB işaretlerinden bazıları için ayrık dalgacık dönüşümü ve istatistiksel yöntemler kullanılarak işaret bileşenleri ayırt edilmeye çalışılmıştır.

Laboratuvar ortamında üç farklı KB kaynağı oluşturarak yapılan KB deneyleri ve bu deneylerde elde edilen verilerin dalgacık analizi ile istatistiksel yöntemlerle işlenerek boşalma çeşitlerine göre öznel belirlenme çalışması [26]'da verilmiştir.

[27] sahada generatörden ve gaz yalıtımlı sistemden elde edilen gürültü içeren KB verilerinin paket dalgacık dönüşümü ile gürültüden süzülmesini içermektedir. Çalışmada en iyi ağacın seçilmesi, paket dalgacık dönüşümü için ayrıştırma seviyesinin seçimi, gürültü eşik değerinin verilere bağlı olarak seçimi gibi gürültüden süzme işlemine etki edebilecek parametreler incelenmiş ve yöntemin yeterli seviyede akustik yoldan generatör ve gaz yalıtımlı sistemden elde edilen KB işaretlerini ayırt edebildiğini göstermiştir. Uyguladıkları yöntemin ayrık dalgacık dönüşümüne ve entropi tabanlı paket dalgacık dönüşümüne göre daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Ancak bu çalışmada sadece beyaz gürültü üzerine yoğunlaşmış, diğer gürültü kaynaklarının oluşturabileceği etkinin düşünülmediği görülmüştür.

Gaz yalıtımlı sistemleri temsil eden bir deney düzeneği üzerinde 3 farklı KB oluşturacak parçacık kullanarak KB varlığını belirlemek üzere yüksek frekans rezonans işareti ölçümleri yapılmış ve elde edilen veriler paket dalgacık dönüşümü ve yapay sinir ağları ile sınıflandırılmıştır [28]. Çalışmada farklı dalgacıkların, farklı

seviyedeki gürültünün ve KB kaynağı ile alıcı arasındaki uzunluğun farklı olması durumları için çalışmalar tekrarlanmıştır. Sonuçların özellikle işletme altında sürekli ölçüm yapan düzenekler için yararlı olduğu görülmüştür.

Açık alanlarda gürültüye maruz ortamlarda yapılan KB ölçümlerindeki gürültüyü ayırt edebilmek adına darbe şeklini analiz eden bir çalışma [29]'da verilmiştir. Bu çalışmada laboratuvar ortamında yapılan deneylerde KB kaynağı olarak epoksi katı yalıtkan içerisinde boşluk ve gürültü kaynağı olarak bir sivri uçlu elektrot kullanılmıştır. Ölçüm devresinde ise deney cismine seri bağlı 50 ohm'luk bir direnç ile beraber yüksek frekanslı akım trafosu (HFCT) kullanılmıştır. Öncelikle deneyler sadece direnç ile yapıp sonra sadece yüksek frekanslı akım trafosu ile yapılarak tekrarlanmıştır. Böylece ilk önce katı yalıtkanın oluşturduğu KB işaret yapısı ve ardından da korona kaynaklı gürültü işaretinin yapısı ve bunların frekans karakteristikleri ortaya koyulmuştur. Ardından yapılan darbe analizi, ölçümlerde yüksek frekanslı akım trafosu kullanılmasının gürültü ile KB işaretlerinin ayırt edilmesini kolaylaştırdığını ortaya koymuştur.

[30] güç transformatörleri içerisinde oluşan KB varlığının belirlenmesi amacıyla yapılan KB ölçümlerinden ve seviye-bağımlı dalgacık seçim yönteminin ölçümlerde elde verilere uygulanarak gürültünün ayıklanması işleminden söz etmektedir. Ölçümler transformatör geçit izolatörleri ile topraklama noktaları arasına yerleştirilen çift sensör yardımıyla yapılmıştır. Bu sensörlerin devreye farklı bağlantıları ile elde edilen sonuç şudur: transformatör içerisinden gelen KB işareti iki sensörde farklı polaritede görülürken dış kaynaklı gürültü aynı polariteyi oluşturmaktadır. Böylece beyaz gürültü, geliştirilen seviye-bağımlı dalgacık seçim yöntemini kullanarak oluşturulan dalgacık analizi, geçit izolatörüne bağlı iletkenlerde oluşan KB işaretleri ise darbe-sıralı analiz (pulse sequence analysis) ile ayırt edilebilmiştir.

Benzetim yöntemi ile oluşturulan KB işaretleri üzerine rastgele ve sinüsoidal gürültü eklenmesiyle elde edilen veriye dalgacık analizi uygulanması ve KB işaretlerini gürültüden ayırmayı açıklayan bir çalışma [31]'de verilmiştir. Bu çalışmada boşalma darbesinin bir bant geçiren filtreden geçirilmiş haline (ölçüm devresinin etkisini temsilen) rastgele gürültü ve 8 farklı frekansta sinüsoidal gürültü eklenerek gürültülü KB işareti elde edilmiştir. Ardından Daubechies 30 ana dalgacığı kullanılarak 10 seviyeli ayrıştırma yapılmıştır. Ancak çalışmada Daubechies 30 ana dalgacığının kullanılmasının nedeni tam olarak açıklanmamıştır. Ayrıca ayrıştırma seviyesinin

etkisinden ve ayırıştırmadan sonraki geri birleştirmede neden sadece 4. seviyedeki yaklaşım katsayılarının alınarak diğerlerinin hesaba katılmadığı söz edilmemiştir. Elde edilen sonuçların başarılı olduğu belirtilerek bir sonraki çalışmada gerçek saha ölçümlerinde elde edilen KB verilerine bu yöntemin uygulanacağı belirtilmiştir.

[32] UHF yöntemiyle güç transformatörleri üzerinde ölçülen kısmi boşalma işaretlerinin gürültüden arındırılmasında eşik değeri belirlenmesi ile ilgili temel bir çalışmadır. Çalışmada ayrık dalgacık dönüşümü ve yumuşak & sert eşikleme yöntemleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca 4 farklı eşikleme yönteminin başarısı ölçüm yoluyla elde edilen veriler üzerinde kıyaslanmıştır. Sonuçlar küçük işaret gürültü oranlarında katı eşiklemenin yumuşak eşiklemeye göre daha iyi sonuç verdiğini, yüksek işaret gürültü oranında katı ve yumuşak eşiklemenin her ikisinin de başarılı olduğunu, yumuşak eşikleme ile SURE ve Heuristic SURE eşikleme yöntemlerinin daha uyumlu olduğunu, evrensel eşiklemenin darbenin sensöre geliş süresini (dolayısıyla KB kaynağının yerinin bulunması) belirlemeye uygun olmadığı, Db09 ana dalgacığı ile Minimax ya da Heuristic SURE eşikleme yöntemlerinin (sert ya da yumuşak) kullanımının KB ana işaretlerini en verimli şekilde gürültüden ayırt edebildiğini göstermiştir.

[33]'te sahada yapılan kısmi boşalma ölçümlerinde kullanılmak üzere yeni bir eşikleme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, KB kaynağı deney düzeneğine bağlı değilken sadece ortamdaki gürültüyü kaydetmek ve sonrasında bu gürültü verisine dalgacık analizi uygulayarak her bir ayırıştırma seviyesi için gürültüyü temsil eden dalgacık katsayılarının en yüksek değerde olanını o seviye için eşik değeri olarak kabul etmeye dayanmaktadır. Bunun yanı sıra ana dalgacık olarak Db30 ve maksimum ayırıştırma seviyesi için seviye 5 kullanılmıştır. Çalışmalar önce benzetimi yapılan KB darbeleri üzerinde yapılmış, sonra da saha ölçümlerinden elde edilen veriler üzerinde tekrarlanmıştır. Yapılan bu çalışma daha önceki çalışmalardan bazı örneklerle kıyaslanmış ve yöntemin genetik algoritma ve yapay sinir ağları ile birlikte başarılı bir şekilde işleyeceğine değinilmiştir.

[34]'de benzetim yöntemi ile gürültü içerisine gömülü kısmi boşalma işaretlerinin çoklu çözünürlük analizi ile gürültüden ayırt edilmesi verilmiştir. Burada 5 seviyeli ayırıştırma ve de Daubechies 10 kullanılmıştır. Ancak bu seçimler konusunda bilgi verilmemiş olup sonuçlar KB işaretinin şekline göre farklılık göstermiştir. Bu da yöntemin yeterince etkin olmadığını ortaya koymaktadır.

[35]'te eş eksenli silindrsel elektrot sisteminde (gaz yalıtımlı sistemleri temsilen) kısmi boşalma işaretlerinin beyaz gürültüden arındırılması amacıyla dalgacık analizinin kullanımını açıklayan temel seviyede bir çalışmadır. Benzetimi yapılan KB işaretinine beyaz gürültü eklenmiş hali için Haar dalgacığı kullanılırken laboratuvar ortamında eş eksenli silindrsel elektrot sistemi içerisindeki ana elektrot üzerine yerleştirilmiş bir parçacık ile elde edilen verinin ayrıştırılmasında ana dalgacık olarak Db2 kullanılmasının nedeni verilmemiştir. Ayrıca sonuçlara bakıldığında gürültüden arındırma aşamaları için bir akış belirlenmiş, yöntemin parametrelerin değiştirilmesi durumunda buna nasıl cevap vereceğı irdelenmemiştir. Hatta işaretlerdeki işaret gürültü oranları dahi belirli değildir. Bu bakımdan çalışmanın sağlıklı değerlendirilmesi mümkün olmamıştır.

[36]'da eş eksenli silindrsel elektrot sisteminde (gaz yalıtımlı sistemleri temsilen) UHF algılayıcı kullanarak kısmi boşalmanın korona boşalmasında ayırt edilmesinde paket dalgacık dönüşümünden ve yapay sinir ağlarından yararlanılması anlatılmıştır. Çalışma, korona ile karışık KB işaretlerinden KB işaretlerini süzmede başarılı sonuçlar vermiştir.

[37] numaralı çalışmada dalgacık analizi ile çeşitli işaretlerden gürültü süzülmesinde kullanılan eşikleme yöntemi üzerinde yumuşak ve sert eşiklemelinin birleşiminden oluşturulan yeni bir eşikleme yöntemi önerilmiştir. Benzetimle yumuşak ve sert eşiklemeden daha iyi sonuç verdiği ortaya konmuştur. Ancak yapılan çalışma daha çok beyaz gürültü için etkilidir.

2.3 Bölümün Sonuçları

Sonuç olarak tezin başında belirtilen çalışmanın hedefleri alanlarında tam olarak elde edilmiş net bir sonuç bulunmamaktadır. Dalgacık analizinin YG aygıtlarından elde edilen işaretlerin analizinde birkaç konu dışında kullanılmadığı ve yapılan çalışmalarda genellikle deneme yanılma yöntemine bağlı kalındığı için belirli bir metodolojinin oluşturulamamış olduğu görülmüştür.

3. İŞARET ANALİZ ARAÇLARININ GELİŞİMİ VE DALGACIK ANALİZİ

Çoğu işaretler zaman domeninde gösterilir ve zaman domeninde bir işaretin çizilmesi zaman-genlik gösterimi ile ifade edilir. Bu gösterim genellikle işaret işlemede iyi bir gösterim olmamaktadır. İşaretlerin yapılarına bağlı olmakla birlikte çoğu kez ayırt edilebilir önemli bilgiler frekans bileşenlerinde gizli tutulurlar.

Fourier, 19. yüzyılda herhangi bir periyodik fonksiyonun sonsuz sayıdaki kompleks üstel fonksiyonların toplamı şeklinde ifade edilebileceğini söylemiştir. Fourier temelli dönüşüm teknikleri daha sonraki yıllarda Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) ve Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritmalarının geliştirilmesiyle bilgisayarlarda veri işleme için önemli bir adım olmuştur.

Denis Gabor 1946 yılında Gabor Dönüşümü olarak bilinen Fourier temelli analiz yöntemini sunmuştur. Bu yöntem de pencereleme yöntemini kullanarak işaretin küçük bir parçası zaman tanım aralığında ele alınmış, işaret zaman ve frekansın fonksiyonu olarak iki boyutta ifade edilmiştir. Böylece durağan olmayan işaretlerin işlenmesi daha sağlıklı hale gelmiştir. Gabor dönüşümü, bugünkü Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) yönteminin temeli olarak görülmektedir [38].

Fourier temelli analiz yaklaşımlarının özellikle zaman ve/veya frekans çözünürlüğü sorunu bu alanda çalışanları daha farklı yöntemlere yöneltmiştir. Bu şekilde Fourier serisi yaklaşımıyla başlayan işaret frekans analizi kavramı günümüze değin ölçek analizi kavramına ve bununla sıkı sıkıya bağlı olan dalgacık analizine kadar gelişerek uzanmıştır.

Ölçek analizi, basitçe bir $f(x)$ fonksiyonunun ölçeği değişen matematiksel yapılar oluşturarak analiz edilmesidir. Önce basit bir temel fonksiyon tasarlanır, sonra bir miktar ötelenir ve ölçeği değiştirilir. Bu yapı herhangi bir fonksiyonun yaklaşımında kullanılır ve aynı işlemler tekrar edilir, böylelikle yeni yaklaşımlar aynı basit yapısal temel fonksiyondan türetilerek elde edilir. Bu ölçek analizi dizisi, işaretin farklı ölçeğe sahip ortalama dalgalanmalarını ölçtüğünden gürültüye de en az duyarlıdır. Konuyla ilgili ilk çalışma A. Haar (1909) tarafından sunulmuştur. 1930'larda

fonksiyonların değişken ölçekli temel fonksiyonlar kullanılarak gösterilmesi ile ilgili bağımsız çalışmalar yapılmıştır. Değişken ölçekli temel fonksiyonlar kavramı kısaca dalgacık analizini tanımlar.

1960-1980 yıllarında matematikçiler Guido Weiss ve Ronald R. Coifman “atoms” adı verilen bir fonksiyon uzayının en küçük elemanı üzerinde çalışmışlardır. Amaç sıradan bir fonksiyon için bu atomların bulunması ve bu atomlar kullanılarak fonksiyon uzayının tüm elemanlarını tekrar meydana getirecek birleştirme kuralını bulmaktır. 1980’lerde fizikçiler Morlet ve Grossman dalgacıklara quantum fiziğinde geniş yer vermişlerdir. Alex Grossman ve Jean Morlet bu fonksiyon yapı blokları için ilk defa “Wavelet” yani “Dalgacık” adını önermişlerdir ve o zamana kadar Littlewood-Paley teorisi olarak belirtilen teori Dalgacık (Wavelet) Teorisi olarak adlandırılır olmuştur. 1985’ de Stephane Mallat dalgacıkları bu alanda yeni bir sıçrama tahtası oluşturan sayısal işaret işleme çalışmalarında kullanmış ve Quadrature Mirror Filtre, piramit algoritmaları ve normal-dikey (Orthonormal) dalgacık temeller ve daha birçokları arasındaki ilişkileri keşfetmiştir [39].

Y. Meyer ilk önemli dalgacığı kurmuştur. Bu Haar dalgacığının tersine, sürekli türevi alınabilir özellikteydi fakat kapalı ve sınırlı değillerdi. Birkaç yıl sonra Ingrid Daubechies Mallat’ın çalışmaları ışığında normal-dikey temel dalgacık fonksiyonlarını inşa etti ki, bunlar belki en seçkin ve günümüzdeki dalgacık uygulamalarına köşe taşı oluşturacak olanlardır.

Frekans domeninde işaretin gösteriminin önemine ve konuda tarihsel gelişime değindikten sonra frekans dönüşümlerinin başlıcaları olarak Fourier Dönüşümü, Hilbert Dönüşümü, Kısa Zaman Fourier Dönüşümü, Wigner Dağılımları, Radon Dönüşümü ve günümüzde en popüler olanı ise Dalgacık Dönüşümü olduğunu vurgulamakta yarar vardır [38].

3.1 Fourier Dönüşümü

Veri çözümleme yaklaşımlarının temel amacı uygun bir dönüşüm yöntemi uyguladıktan sonra işareten istenen bilgiyi elde etmektir. Fourier analizi bir işareti zaman-genlik domeninden frekans-genlik domenine dönüştürmeye yarayan ve özellikle zaman içerisinde değişim göstermeyen (durağan) işaretlerin frekans bileşenlerini belirlemede etkili bir yöntemdir.

Fransız matematikçi J. Fourier'in periyodik bir fonksiyonu, periyodik üstel karmaşık fonksiyonların sonsuz toplamı şeklinde ifade etmesiyle Fourier dönüşümünün temelleri atılmıştır. J. Fourier'in bu ifadesi ilk olarak periyodik olmayan fonksiyonlar için ve daha sonra periyodik veya periyodik olmayan ayrık zamanlı işaretler için de genelleştirilmiştir.

1965 yılında hızlı Fourier dönüşümü adı altında geliştirilen algoritma sayesinde Fourier dönüşümü çok kullanışlı bir yöntem olarak yerini almıştır. Aşağıda zaman domeninde $x(t)$ işaretinin frekans döneminde $x(\omega)$ Fourier dönüşümü ile elde edilmesi eşitlik (3.1) ile ve ters Fourier dönüşümü ile tekrar zaman domenine geçiş yapılması eşitlik (3.2) ile gösterilmektedir.

$$x(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

Fourier dönüşümü işaretin içinde varolan frekans bileşenlerini bize verir. Fakat bu tip bir dönüşüm frekansların hangi zaman aralığında var olduğunu gösteremez. Bu bilgiler işaret şayet durağan ise gerekli değildir. Çünkü durağan işaretlerde zamana göre frekans değişmez. Eğer işaretin zamana göre frekansı değişiyorsa bunlara durağan olmayan işaretler denir. Fourier dönüşümünü durağan olmayan işaretlerde ne tür bir spektral bileşen olduğunu öğrenmek için kullanılabilir, fakat nerede oluştuğunu söyleyemez. Yani Fourier analizinde, frekans alanına geçildiğinde zaman alanı kaybolur.

Durağan işaretlerde Fourier analizi iyi bir yöntem olmaktadır, fakat örnek olarak kısmi boşalma işaretleri gibi işaretler durağan olmayıp sürekli değişim gösterir. Bu işaretlerde kısa süreli ortaya çıkan dik darbeler boşalmanın tanısı açısından önemli bilgiler taşır. Diğer bir örnek olarak ise darbe gerilim uygulamalarında değişik zamanlarda değişik frekanslarda işaretler ortaya çıkabilir. Bu gibi durumlarda frekans bileşenlerinin hangi zaman aralığında meydana geldiğinin önemi büyüktür ve Fourier dönüşümü sonuçları frekans bileşenlerinin yerel zaman, başlangıç veya bitiş bilgileri hakkında kesin veriler sağlamaz, çünkü bu bilgi Fourier spektrumu boyunca yayılmıştır, yani Fourier dönüşümü ancak genel bir bakış sağlar.

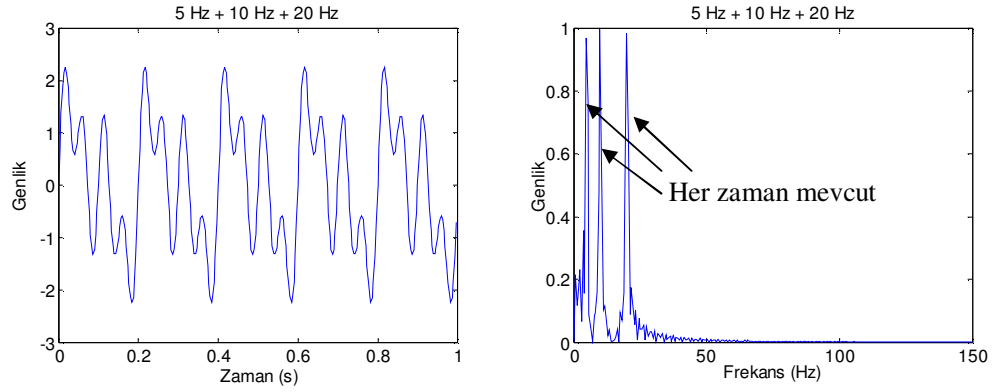
Durağan olmayan işaretlerin frekans analizinde Fourier dönüşümünün farklı frekans bileşenlerinin oluşum zamanlarını belirlemede yetersiz kalışını göstermek üzere bir örnek yapılmış ve Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.1’de 5 Hz, 10 Hz ve de 20 Hz’lik üç işaretin durağan olarak (tüm zamanda var olarak) toplamından oluşan ve matematiksel ifadesi (3.3)’de verilen işaretin frekans analizi, Şekil 3.2’de ise bu üç işaretin belli zamanlarda oluşumları sonucu ortaya çıkan işaretin frekans analizi gösterilmektedir.

$$x(t) = \sin(2\pi 5t) + \sin(2\pi 10t) + \sin(2\pi 20t) \quad (3.3)$$

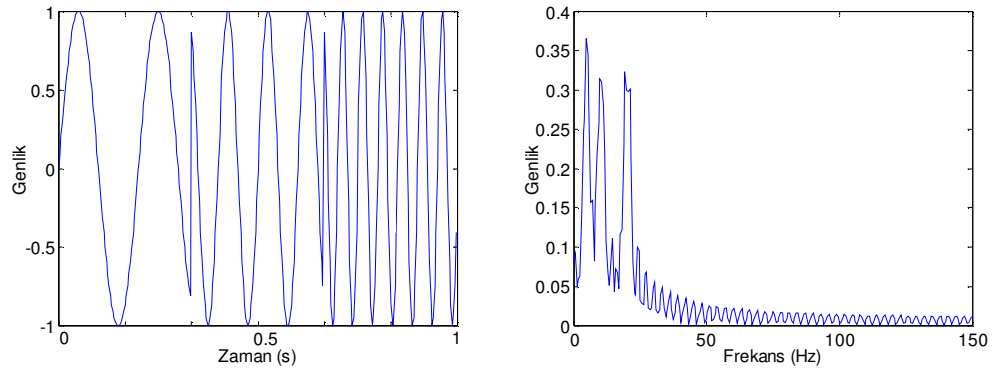
Şekil 3.1’deki frekans analizi sonucu 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz’lik işaretler açıkça görülmektedir ve Fourier analizi ana işaretin frekans bileşenlerini belirlemekte oldukça başarılıdır, çünkü bu üç farklı frekans tüm zamanlarda ana işaret içinde mevcuttur.

Şekil 3.2’de ise 5 Hz, 10 Hz ve 20 Hz’lik üç ayrı işaret farklı zamanlarda oluşarak ana işareti oluşturduğu gösterilmektedir. Bu durumda frekans analizi gerçekleştirildiğinde sonucun Şekil 3.1’e benzerliği göze çarpmaktadır. Fakat Şekil 3.2’de frekans-genlik domeninde gösterilen dalga şekli ana frekans bileşenleri arasında gürültüye benzeyen bazı titreşimler içermektedir. Bunun nedeni ana frekans bileşenleri arasındaki ani değişimlerdir. Bu titreşimleri özel bazı filtreleme yöntemleri ile yok etmek mümkündür. Söz konusu titreşimler yok edildiğinde Şekil 3.1 ve 3.2’de verilen frekans dağılımı birbiri ile tamamen benzer olacaktır.

Şekil 3.1 ve 3.2’de verilen her iki durum birbirinden tamamen farklı iki dalga şeklini ifade etmesine karşın Fourier dönüşümleri hemen hemen birbirinin aynıdır. Buradan da anlaşıldığı gibi Fourier dönüşümü incelenen işaret içindeki frekans bileşenlerini verir, bu frekans bileşenlerinin zamanın hangi anında meydana geldiğini vermez. Bu nedenle bir işaret içindeki farklı frekans bileşenlerinin ne zaman oluştuğunu görebilmek için Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) geliştirilmiştir [40].



Şekil 3.1 : 5 Hz, 10 Hz ve 20 Hz’lik üç ayrı işaret ve Fourier dönüşümü.



Şekil 3.2 : Farklı zamanlarda oluşan 5 Hz, 10 Hz ve 20 Hz lik üç ayrı işaret.

Yukarıda verilen örnekten de açıkça görülebileceği üzere durağan olmayan işaretlerde farklı frekans bileşenleri farklı zamanlarda oluşabilirler ve Fourier dönüşümü ile farklı frekanstaki işaretlerin ne zaman oluştuklarını elde edemeyiz. Fourier dönüşümü frekans bileşenlerini doğru olarak bildirmesine rağmen bunların oluşum zamanlarını belirlemede yetersiz kalır.

3.2 Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) (Short Term Fourier Transform)

Kısa zamanlı Fourier dönüşümünün Fourier dönüşümünden farkı işareti daha küçük zaman aralıklarında incelemesidir. Gabor 1946 yılında Fourier analizinin zamanlama eksikliğini gidermek için, işareti zaman alanında küçük bölümler (pencereleme) halinde analiz edilebileceği fikrini ortaya atmış ve başarıyla uygulamıştır.

KZFD’de ana yöntem incelenen işaretin küçük kısımlara bölünmesi ve işaretin bu kısımlarda durağan olduğunun kabul edilmesidir. Bu amaçla ω gibi bir pencere

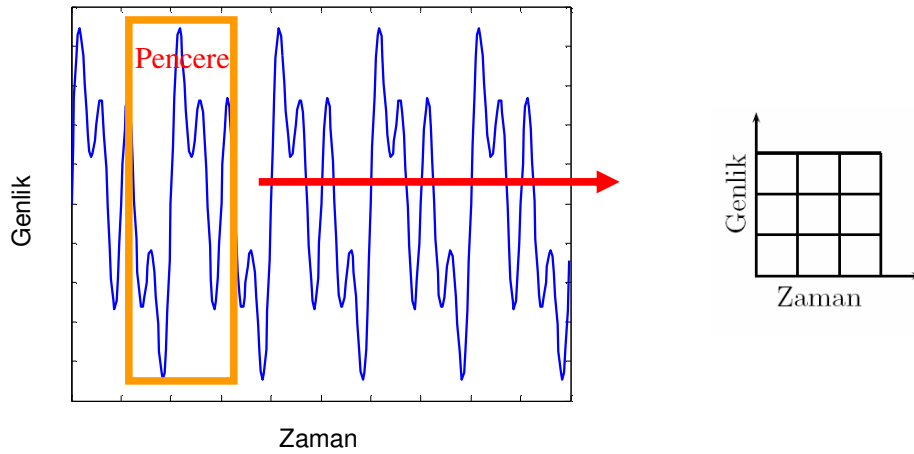
fonksiyonu seçilir. Pencerenin genişliği işaretin durağan kabul edilen kısmına eşit olmalıdır.

Pencere fonksiyonu ilk olarak işaretin başlangıç noktasına konumlandırılır. Yani pencere fonksiyonu $t = 0$ anından başlamalıdır. Eğer pencere fonksiyonunun genişliğini T kabul edersek $t = 0$ anında pencere fonksiyonu ilk $T/2$ birim zaman ile örtüşecektir. Daha sonra pencere fonksiyonu işaret ile çarpılır. Bu işlem ile uygun pencere aralığı sayesinde işaretin sadece ilk $T/2$ saniyelik kısmı seçilmiş olur. Bu çarpım farklı bir işaret gibi kabul edilerek Fourier dönüşümü yapılır. Elde edilen sonuç işaretin ilk $T/2$ saniyelik bölümünün Fourier dönüşümüdür. İkinci adımda pencere $t'' = t_1$ kadar kaydırılarak pencerenin yeni konumu için Fourier dönüşümü yapılır. Bu işlemler işaretin son kısmına kadar devam ettirilir. Eşitlik (3.4) Kısa Zamanlı Fourier Dönüşüm ifadesini vermektedir.

$$X_{\omega}(t''f) = \int \left(x(t) \omega(t-t'') \right) e^{-2j\pi ft} dt \quad (3.4)$$

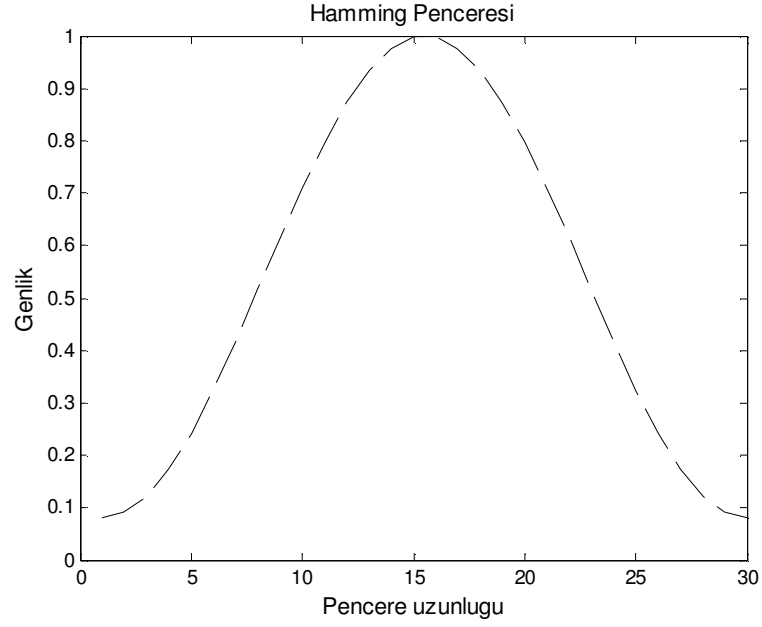
burada $\omega(t)$ pencere fonksiyonu ve de $x(t)$ ana işarettir.

Şekil 3.3 KZFD’de sabit genişlikteki pencere yönteminin kullanılmasıyla işarete genlik ve zaman değişimi incelenirken çözünürlüğün sabit olduğunu göstermektedir.



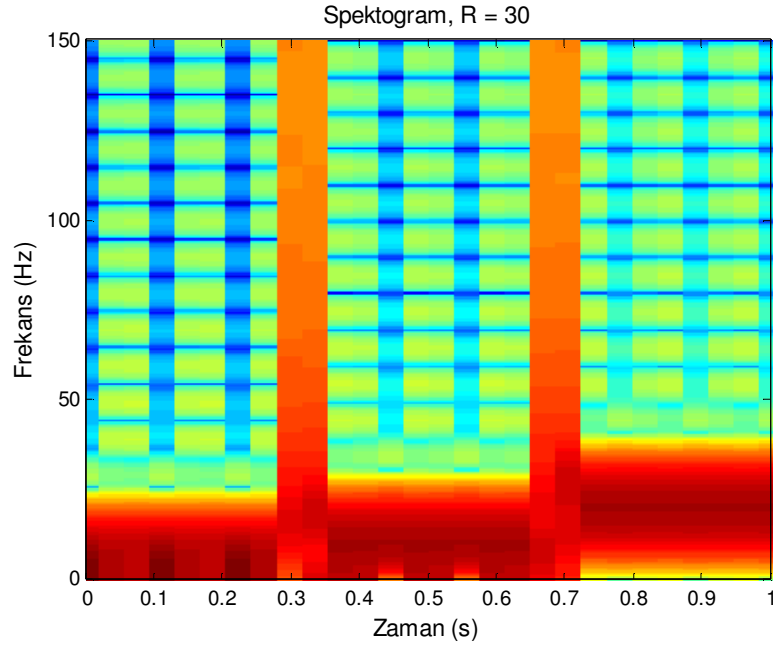
Şekil 3.3 : Kısa zaman Fourier analizi.

Pencere fonksiyonuna örnek olarak çok kullanılan bir pencere fonksiyonu olan Hamming penceresi, pencere uzunluğu 30 birim için Şekil 3.4’te verilmiştir.

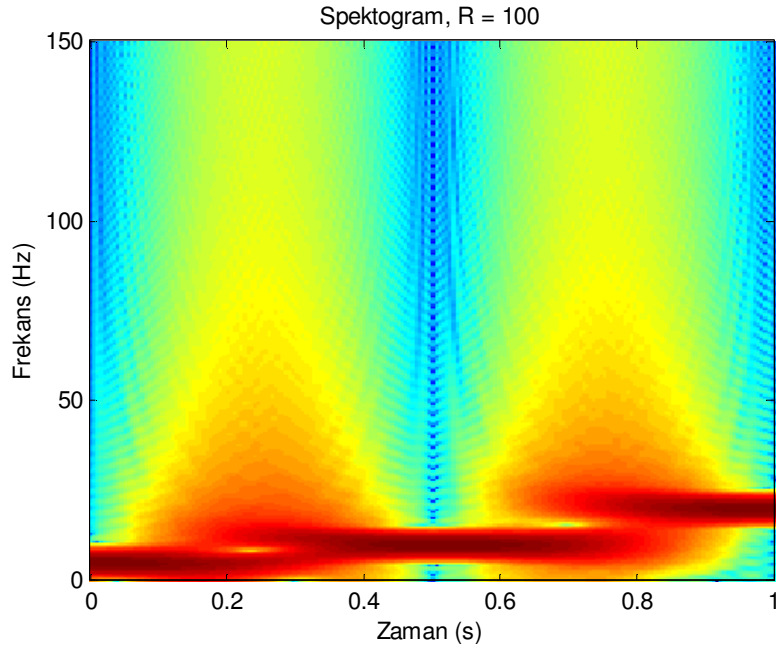


Şekil 3.4 : Hamming penceresi.

Şekil 3.5'te Şekil 3.2'de verilen farklı zamanlarda farklı frekans bileşenlerini içeren işarete ait KZFD sonucunda frekans, zaman ve genlik domeninde gösterilimi spektogram olarak verilmiştir. Şekil 3.5'te gösterilen spektogramda (öteleme ve ölçeklemeye bağlı enerji yoğunluğunu gösterir) kullanılan pencere genişliği $R = 30$ olarak alınmıştır. Renklendirmede genliğin büyüklüğünü belirtmek adına en küçük değer koyu mavi ile başlar, çıyan, yeşil, sarı, kırmızı ve koyu kırmızı şeklinde devam ederek en yüksek değere ulaşır. Şekil 3.6'da ise verilen spektogramda pencere genişliği artırılmıştır ($R = 100$). Buradan da görüldüğü gibi pencere genişliği arttıkça frekans eksenindeki çözünürlük kalitesi artmakta fakat zaman eksenindeki çözünürlük kalitesi düşmektedir. Bu durum tersi için de geçerlidir. Eğer KZDF'de kullanılan pencere genişliği azaltılırsa bu kez daha kaliteli bir zaman çözünürlüğü elde edilirken frekans çözünürlüğünden ödün verilmek zorunda kalınacaktır.



Şekil 3.5 : Pencere genişliği $R = 30$ birim olarak seçilmesi sonucu KZFD.



Şekil 3.6 : Pencere genişliği $R = 100$ birim olarak seçilmesi sonucu KZFD.

Elektriksel kısmi boşalmalar açısından bakıldığında kısmi boşalmalar gibi yüksek frekansa sahip olan ve durağanlığı bozan işaretlerin zamanın hangi anında meydana geldiğini görebilmek için pencere boyutu oldukça küçültülmek zorunda kalınacaktır. Özellikle kısmi boşalmaların kaynağını belirlemek için yapılan çalışmalarda kısmi

boşalmaların başlangıç anları ve ölçme noktasına varma anları önemli rol oynar. Bu anların belirlenmesi için pencere genişliği çok fazla küçültülmek zorunda kalınır. Bu durumda da frekans çözünürlüğü düştüğünden kısmi boşalmaların frekansını belirlemek güçleşir.

Yukarıda anlatılanlar dikkate alındığında Fourier dönüşümünün yüksek frekanslı geçici işaretlerin analizini yapmak için tam anlamıyla verimli bir yöntem olmadığı söylenebilir. Bu nedenle zaman-frekans analizini daha verimli yapabilen farklı bir dönüşüm yöntemi kullanmakta yarar görülmüştür. Yapılan kaynak taraması sonucunda, son yıllarda kullanımı oldukça yaygınlaşan Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform) yönteminin YG aygıtlarından alınan farklı frekans bilgilerini içeren işaretlerin analizinde ve gürültü ayıklama işlemlerinde daha verimli olabileceği kanısına varılmıştır.

Genel anlamda bakıldığında dalgacık analizi Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) ile yakından ilgilidir. Dalgacık analizi, KZFD'nin bir alternatifi olarak çözünürlük probleminin üstesinden gelmek için ortaya çıkmıştır. KZFD'de zaman-frekans alanında elde edilen bilgiler sınırlı bir duyarlılıkta elde edilebilmektedir. Bu duyarlılık pencerenin büyüklüğüne bağlıdır. Çoğu işaretler daha duyarlı yaklaşıma gereksinim duyar ve bu pencerenin büyüklüğünün sürekli değişmesi gerekmektedir. Yukarıda da belirtildiği üzere KZFD'de zaman penceresi bütün frekanslarda değişmeyen büyüklüktedir. Eğer bu pencere dar tutulursa frekans çözünürlüğü düşük, geniş tutulursa zaman çözünürlüğü düşük olacaktır.

Dalgacık analizi ise KZFD ile karşılaştırıldığında bir ileriki yöntem olup pencereleme tekniği büyüklüğü değiştirilebilir. Dalgacıklar durağan veya durağan olmayan işaretlerin zaman-ölçek analizi için olanak sağlar ve dönüşüm tüm işaret frekans-zaman bilgisini korur. Bu sebeplerden dolayı durağan olmayan gerçek işaretlerin dalgacık temelli yöntemlerle işlenmesi geleneksel yöntemlerden daha iyi sonuçlar sağlarlar.

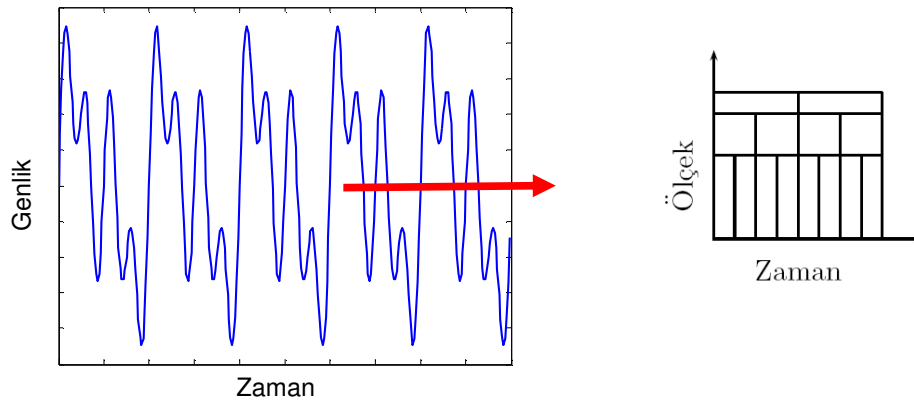
3.3 Dalgacık Analizi

Dalgacık dönüşümü, bir işaretin zaman-frekans analizi için kullanılan bir dönüşüm türüdür. Özellikle sismik verilerin incelenmesi sırasında yaşanan problemler “Sürekli Dalgacık Dönüşümü”nün gelişmesine olanak sağlamıştır. Daha sonraları ise dalgacık

analizinin çok çeşitli işaret tiplerine uygulanabilir olduğu görülmüştür [45-49]. Yapılan çalışmalarda işaretlerde süreksizlik tanısında (kalp grafiklerinin yorumlanması örnek verilebilir) ve işaretten gürültü temizlemede dalgacık dönüşümünden önemli ölçüde yararlanılmıştır [50].

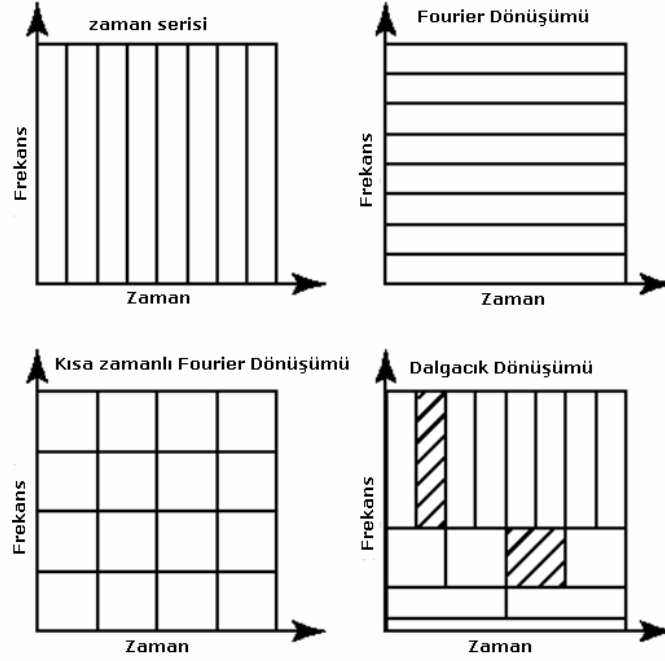
Adından da anlaşıldığı gibi dalgacık dönüşümü dalgacıklar yardımı ile yapılmaktadır. Kısa zamanlı Fourier dönüşümüne (KZFD) benzer olarak dalgacık dönüşümünde pencere görevini ana dalgacık denilen bir fonksiyon üstlenir, fakat bu ana dalgacık dönüşüm işlemi süresince hem ölçeklenir hem de ötelenir. Ölçekleme dalganın genişletilip daraltılmasına, öteleme ise zaman ekseninde dalganın kaydırılmasına karşılık gelir [41].

KZFD'de dönüşüm boyunca sabit kalan pencere fonksiyonunun genişliği dalgacık dönüşümünde sürekli değiştiğinden, hem zaman hem de frekans domeninin çözünürlüğü artmaktadır, bu da dalgacık dönüşümünü Fourier dönüşümünden daha üstün kılmaktadır. Dalgacık analizi; kısa zamanlı Fourier analizinin aksine zaman-frekans alanını değil, zaman-ölçek alanını kullanır. Şekil 3.7 dalgacık analizi sonucunda işarete ölçek ve zaman değişimini göstermektedir.



Şekil 3.7 : Dalgacık analizinde ölçek-zaman alanı.

Diğer taraftan Şekil 3.8'de Fourier, kısa zamanlı Fourier ve dalgacık dönüşümlerinin zaman-frekans domeninde çözünürlükleri göstermektedir. Kısaca özetlemek gerekirse Fourier dönüşümü bize frekans bilgisini verir ama bu frekansların ne zaman oluştuğunu belirtemez. Kısa Zamanlı Fourier dönüşümünde zaman-frekans çözünürlüğü sabittir yani KZFD'de zaman penceresi bütün frekanslarda değişmeyen büyüklüktedir. Dalgacık dönüşümünde bu çözünürlük ayarlanabilmektedir.

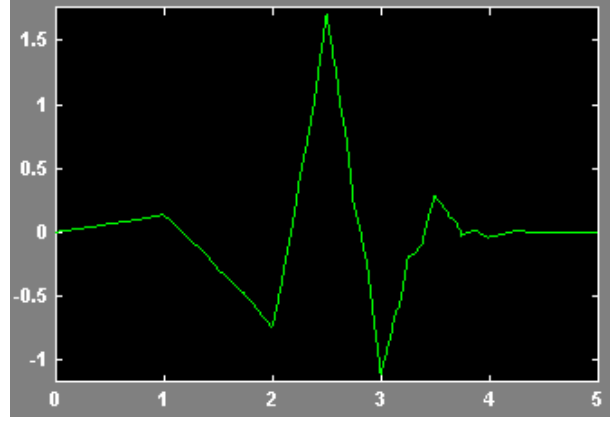


Şekil 3.8 : Dönüşümleri zaman-frekans çözünürlüğü bakımından karşılaştırma.

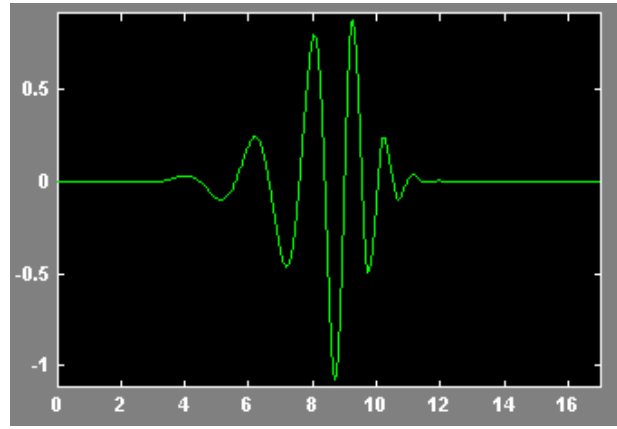
Veri sıkıştırma uygulamaları dalgacıkların diğer bir uygulama alanıdır. Örnek olarak günümüzdeki biçimi ile resim sıkıştırmada uluslararası standart olan JPEG 2000 bir dalgacık uygulamasıdır. Ayrıca gürültü süzme uygulamalarında ise önemli miktarda dalgacık dönüşümünden yararlanıldığı literatürden görülebilmektedir [51-53].

Bir dalgacık sınırlı yapıda olup ortalama değeri sıfır olan bir fonksiyondur. Sinüsoidal dalga, sınırı olmayan düzgün bir dalga olup dalgacık ise düzensiz yapıya sahip ve asimetriktir. Dalgacık analizinin altında yatan temel düşünce işareti ölçeğe göre analiz etmektir ve Fourier temelli analizde olduğu gibi sinüs temel fonksiyonları değil de dalgacık fonksiyonları kullanıldığından keskin süreksizlikleri içeren veriler için çok uygundur.

Dalgacık dönüşümleri ile analiz sonuçları teorik olarak sonsuz sayıda kümeden oluşur. Bazı temel dalgacık fonksiyonları “ayrimsal” (fractal) yapıya sahiptirler. Şekil 3.9’da iki örneği verilen Daubechies dalgacık ailesi bunlara iyi bir örnektir.



a) Db3

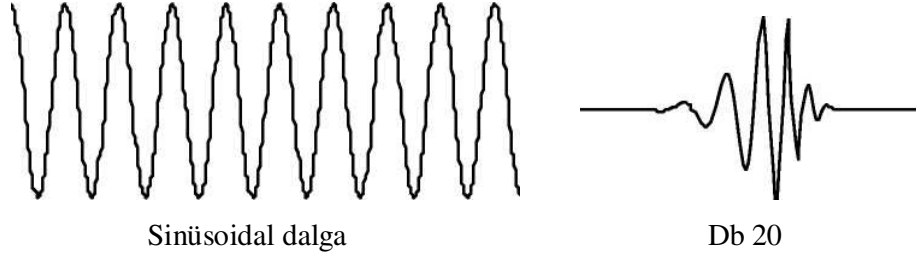


b) Db9

Şekil 3.9 : Daubechies dalgacık ailesinden a) Db3 ve b) Db9.

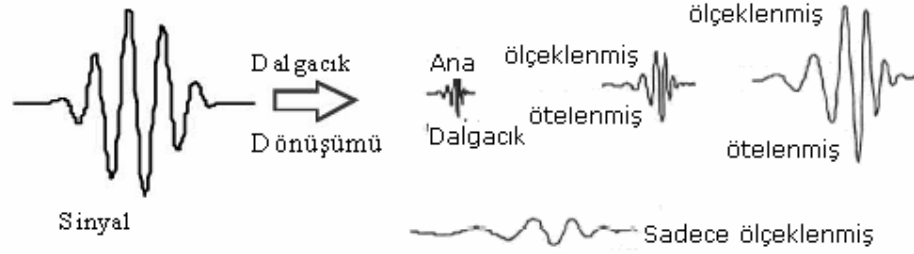
3.3.1 Dalgacık nedir?

Şimdiki kullanımıyla ‘dalgacık’ sözü ilk kez Alfred Haar’ın (1909) doktora tezinin ekler kısmında kullanılmıştır. Belirli bir süreye sahip olan ve bu süre içerisindeki ortalama değeri sifıra eşit olan dalga şekline dalgacık adı verilmektedir. Genel anlamda sinüsoidal bir dalga şeklinin tersine, dalgacıkların bir başlangıç ve bitiş noktaları vardır. Şekil 3.10’da bir sinüsoidal dalga ile dalgacığın farkı gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Sinüsoidal dalganın bir kısmı ve sonlu uzunluktaki dalgacık.

Dalgacık dönüşümünün matematiksel ifadesi ilerdeki kısımlarda ayrıntılı açıklanacaktır. Dalgacık analizindeki temel felsefe ana işaretin seçilen dalgacığın ötelenmesi ve ölçeklenmesi ile elde edilen birçok dalganın toplamından elde edilmesi işlemine dayanır. Esasında Fourier dönüşümüne bu noktada benzerdir ama dalgacık dönüşümünde farklı frekanslardaki sinüs dalgaları yerine ötelenmiş ve ölçeklenmiş dalgacıklar mevcuttur [44]. Şekil 3.11 ana işareti oluşturan ötelenmiş ve ölçeklenmiş dalgacıkları göstermektedir.



Şekil 3.11 : Ana işareti oluşturan ötelenmiş ve ölçeklenmiş dalgacıklar.

Dalgacık dönüşümünde sıkça adı geçen temel parametreler dalgacık fonksiyonu, ölçek, öteleme ve dalgacık katsayısıdır. Aşağıda bu parametreler ayrı ayrı ele alınarak her biri açıklanmaya çalışılacaktır.

3.3.2 Dalgacık fonksiyonu

Dalgacık dönüşümünün en önemli parametresi dalgacıktır. Fourier dönüşümündeki pencere fonksiyonunun görevini, dalgacık dönüşümünde ana dalgacık fonksiyonları yerine getirir. Bir fonksiyonun dalgacık olabilmesi, süresinin sınırlı ve ortalama değerinin sıfır olması koşullarına bağlıdır. Bu nedenle dalgacık fonksiyonu genlik ekseninin pozitif ve negatif yönlerinde salınım yapmalı ve bu salınım, zaman ekseninde ilerledikçe genlik ekseninde sıfıra oturarak sona ermelidir. Sinüs ve kosinüs gibi normal bir dalga fonksiyonu ise genlik ekseninde salınım yapar ve

sonsuz süreye sahiptir, yani $\pm\infty$ arasında sürekli salınım yapar. Bu nedenle de dalga ve dalgacık farklı kavramlardır.

Farklı özellik ve kullanım amaçlarına sahip birçok ana dalgacık mevcuttur. Dalgacık terimi, küçük dalga anlamında dalgacık olarak ifade edilir. Buradaki küçüklük belirli uzunlukta pencere fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Buradaki ana kelimesi ise bir ana fonksiyondan dönüşüm tekniği ile türetilip değişik alanları desteklemek için oluşturulan fonksiyonlardır. Diğer bir ifade ile ana dalgacık bir prototiptir.

Dalgacık nitelik yönünden ele alınacak olursa aşağıdaki iki koşulu sağlayan bir gerçek değerli $\psi(x)$ fonksiyonu olması gerekir.

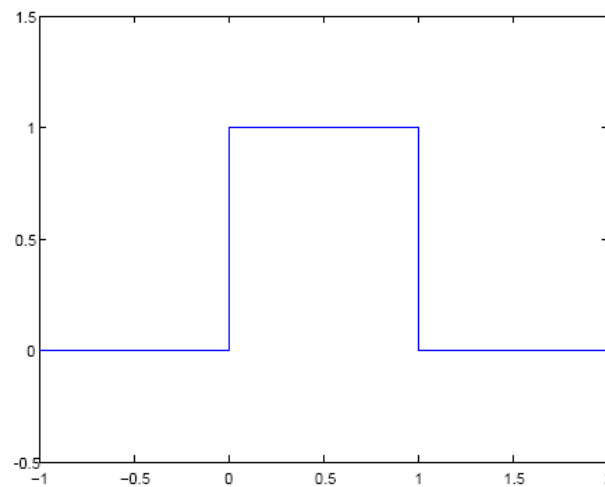
$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (3.5)$$

Bir diğeri ise;

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(x) dx = 1 \quad (3.6)$$

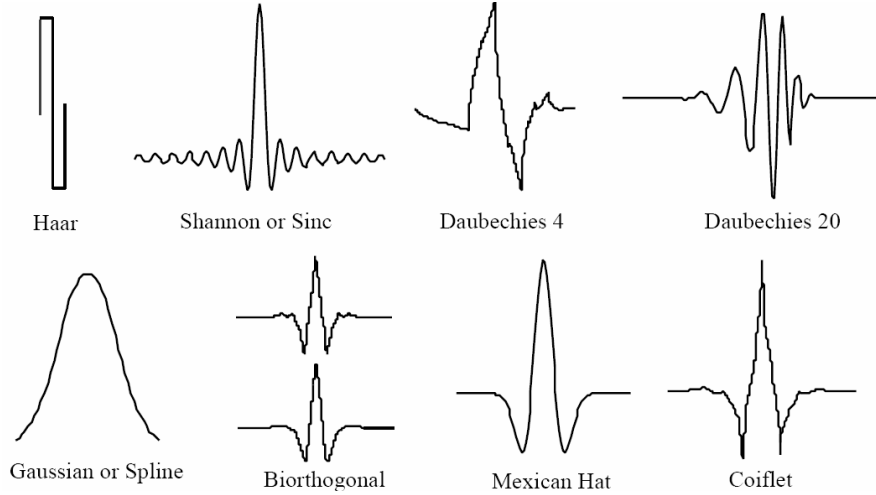
dir. Bu eşitlikleri sağlayan her $\psi(x)$ fonksiyonu dalgacık olarak adlandırılabilir. En çok bilinen dalgacık, Haar dalgacıdır. Haar dalgacığının dalgacık fonksiyonunun matematiksel ifadesi (3.7) ve ölçek fonksiyonun gösterilimi Şekil 3.12’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \psi(x) &= 1 & 0 \leq x < 1/2 \\ \psi(x) &= -1 & 1/2 \leq x < 1 \\ \psi(x) &= 0 & x \notin [0, 1] \end{aligned} \quad (3.7)$$



Şekil 3.12 : Haar ölçek fonksiyonu.

Dalgacık dönüşümünde kullanılan bazı ana dalgacık fonksiyonları Şekil 3.13'te verilmiştir. Şekil 3.13'ten de görüldüğü gibi ana dalgacıklar genlik ekseninde salınım yaparak sıfıra oturmaktadır.



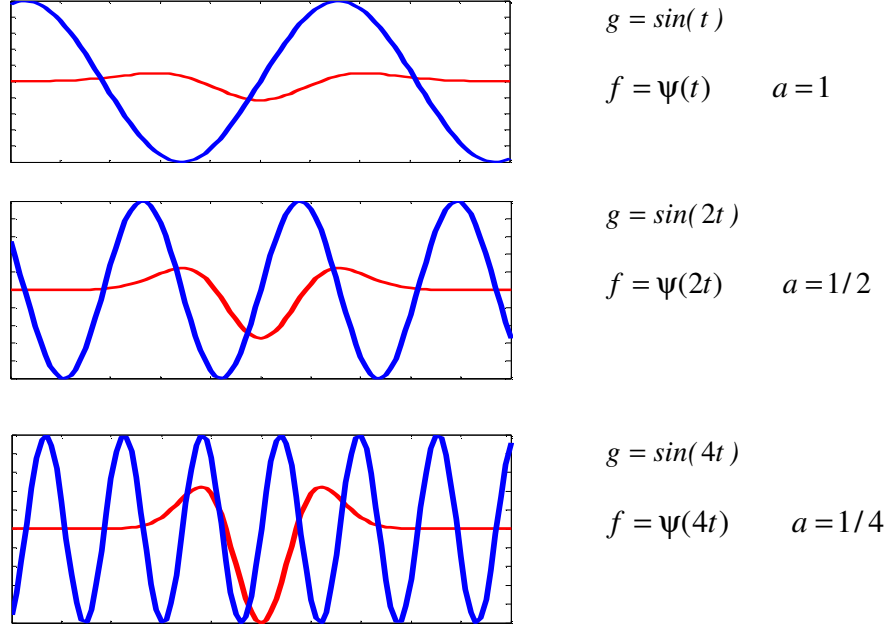
Şekil 3.13 : Örnek dalgacık şekilleri [42].

3.3.3 Ölçek (scale) ve öteleme (translation) parametreleri

Fourier dönüşümündeki pencere fonksiyonu tüm dönüşüm işlemi boyunca sabit kalmaktadır. Bu nedenle zaman-frekans analizi yapılırken pencere fonksiyonunun genişliği, zaman ya da frekans çözünürlüğüne etkimektedir. Eğer pencere genişliği küçük seçilirse işaret içindeki hızlı değişim yapan geçici kısımların meydana gelme anları daha rahat kestirilir; fakat frekanslarını kestirmek güçleşir. Benzer olarak daha geniş bir pencere ile dönüşüm yapılırsa bu sefer de işaret içindeki hızlı değişim yapan geçici kısımların frekansı daha net görülürken meydana gelme anlarını kestirmek güçleşir. Dalgacık dönüşümünde pencere fonksiyonu görevini gören ana dalgacık fonksiyonuna ait ölçekleme ve dönüşüm parametreleri tüm dönüşüm işlemi boyunca değişebildiğinden hem zaman hem de frekans çözünürlüğü daha kaliteli olarak elde edilir.

Dalgacık dönüşümünde ölçek parametresi ' a ' ile gösterilir ve frekans ile ilişkilidir. Büyük ölçekler düşük frekanslara, küçük ölçekler de yüksek frekanslara karşılık düşerler. Dalgacık dönüşümü ile işaret analizi yapıldığında kullanılan ölçek küçük değerlerde ise bu durumda üzerinde çalışılan işarete bulunan yüksek frekanslı bileşenler daha rahat ayırt edilebilirler. Bunun tersine ise ölçek büyük tutulduğunda düşük frekanslı işaretler daha kolay ayırt edilebilecektir.

Bu parametreler Şekil 3.14’de bir örnek üzerinde dalgacığa nasıl etki ettiği açıklanmaya çalışılmıştır. İlgili şekilde bir dalgacık üzerinde ölçeklemeyi belirleyen ‘ a ’ parametresinin 1, 1/2 ve 1/4 olarak seçimi durumunda dalgacık fonksiyonu gösterilmiştir. Aynı zamanda sinüsoidal bir işarette frekansın artırılması ile dalgacıkta ölçek azaltılmasının benzer olduğu da gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.14 : Ölçek a parametresinin 1, 1/2 ve 1/4 olarak seçimi.

Öteleme parametresi, Fourier dönüşümündeki pencerenin kaydırılması işlemi gibi düşünülebilir. KZFD’de işaretin seçilen pencere genişliği içinde kalan kısmının durağan olduğu kabul edilip işaretin sadece bu kısmına Fourier dönüşümü uygulanmaktadır. Daha sonra pencere, genişliği bozulmadan k süresi kadar kaydırılıp bu kısım için Fourier dönüşümü uygulanarak işaretin sonuna kadar aynı süreç tekrar edilmektedir. Dalgacık dönüşümünde pencere görevini gören ana dalgacık fonksiyonu uygulamaya bağlı olarak seçildikten sonra işaretin başlangıç noktasına konumlandırılır. İşaretin ana dalgacık fonksiyonu tarafından kaplanan kısmı için dalgacık dönüşümü yapılır. Daha sonra ana dalgacık fonksiyonu kaydırılarak işaretin diğer kısımları için dalgacık dönüşümü uygulanır. Bu işlemler işaret sonuna kadar tekrarlanır. Özetle, ölçekleme parametresi ana dalgacığı genişletip sıkıştırarak şeklini değiştirirken, öteleme parametresi zaman ekseninde kaydırarak konumunu değiştirir. Ölçekleme ve öteleme sırasında ana dalgacık enerjisi korunur. Bir ana dalgacığın

başlangıçtaki enerjisi, ölçeklenmeye ve ötelenmeye tabi tutulmasının ardından aynı kalır.

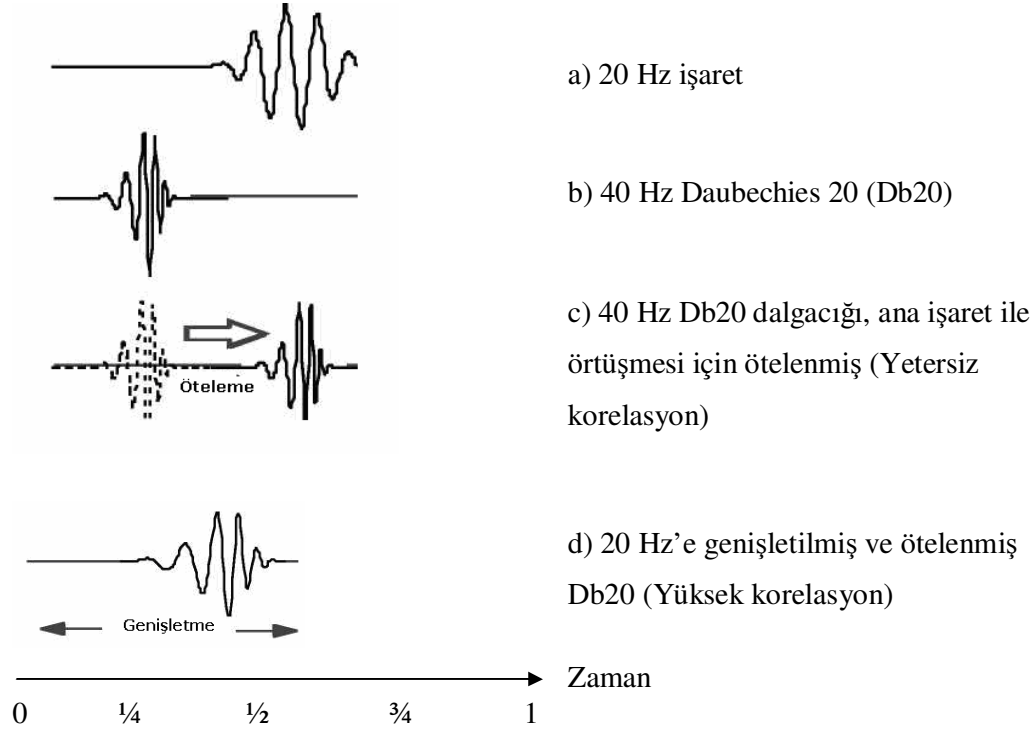
3.3.4 Sürekli dalgacık dönüşümü (SDD)

Bu bölümde dalgacık dönüşümünün matematiksel ifadesini vermeden önce temel anlamda dönüşümün nasıl gerçekleştirildiği ve dönüşüm sonucunun ne ifade ettiği açıklanacaktır. Esasında yukarıda özetlenen öteleme ve ölçekleme sürekli dalgacık dönüşümünün bir parçasıdır. Sürekli dalgacık dönüşümünde incelenecek olan $x(t)$ işareti için öncelikle uygun bir ana dalgacık seçilir. Ana dalgacık seçimi, uygulamaya bağlı olup her ana dalgacık aynı amaca hizmet etmez. Literatüre bakıldığında farklı amaçlar için farklı dalgacık türlerinin diğerlerinden daha fazla başarılı olduğu görülmüştür. Örnek darbe gerilimi ve kısmi boşalma işaretleri gibi hızlı değişim gösteren işaretlerin dalgacık analizinde hangi dalgacık ailesinin daha başarılı olduğunu kestirmek adına bu tez kapsamında yapılan çalışmalar ilerleyen bölümlerde verilecektir. Seçilen ana dalgacık, dönüşüm işleminde kullanılacak pencerelerin temelidir yani ana dalgacık tüm dönüşüm işlemi boyunca ölçeklenip (genişletme ya da sıkıştırma) ötelenerek farklı konum ve biçimde pencereler elde edilir. Ana dalgacık seçiminden sonra dönüşüm katsayılarının hesaplanması işlemine (genelde $a = 1$ ölçeği ile) başlanır. Sürekli dalgacık dönüşümü gerçekte 1'den büyük tüm ölçek değerleri için hesaplanır, fakat işarete bağlı olarak bu işleme genellikle gereksinim duyulmaz. Uygulamada karşılaşılan işaretler genelde sınırlı bant genişliğine sahip olduğundan, dönüşüm işlemi de sınırlı ölçek aralığında yapılır.

Analiz esnasında ana dalgacık fonksiyonu, ilk önce $a = 1$ ölçeği için işaretin başlangıcına konumlandırılır ve ana dalgacık fonksiyonu bu işaret ile çarpılarak $\pm \infty$ aralığında olmak kaydı ile integrali alınır. Sinyal enerjisinin her ölçekte sabit kalabilmesi amacıyla elde edilen integral çıktısı $|a|^{-1/2}$ terimi ile çarpılır. Böylece $t = 0$ anında ve $a = 1$ ölçeğindeki ilk dalgacık katsayısı elde edilmiş olur. Bu işlemin ardından dalgacık b öteleme parametresi ile $t = b$ anına kadar zaman ekseninde kaydırılır. Yeniden hesaplama yapılarak $t = b$ anına karşılık gelen $a = 1$ ölçeğindeki ikinci dalgacık katsayısı elde edilir. Bu duruma işaretin sonuna ulaşana dek devam edilir. Tüm bu elde edilen değerler bize $a = 1$ ölçeğine ait dalgacık katsayıları elde edilmiş olur. Daha sonra a ölçek değeri arttırılarak yapılar tekrarlanır. Ölçek artırma işlemine istenilen seviyeye kadar devam edilebilir. Burada dikkat edilmesi

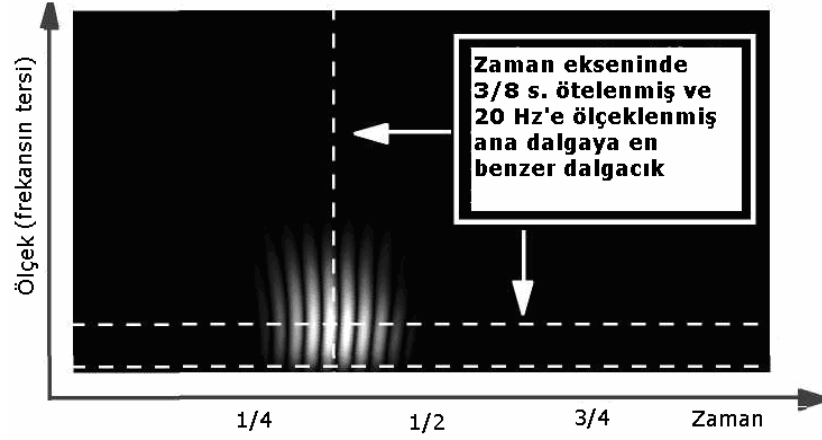
gereken nokta küçük ölçek değerlerinde yüksek frekanslı bileşenlerin, büyük ölçek değerlerinde de küçük frekanslı bileşenlerin incelenebildiğidir [42].

Şekil 3.15’de 20 Hz frekanslı bir işaretin Db20 ana dalgacığı ile sürekli dalgacık dönüşümünün hesaplanmasına ilişkin adımlardan birkaçı gösterilmektedir.



Şekil 3.15 : Ana işaret, ölçeklenmiş ve ötelenmiş dalgacıklar [42].

İyi bir korelasyon katsayısı (dalgacık katsayısı), dalgacığın ana dalgaya benzemesi için ne kadar ötelendiği, genişletildiği ve ana işarettaki frekans bileşenleri hakkında önemli bilgiler verir. Dalgacık, işaretin başlangıcından başlanarak her seferinde bir adım ötelenir ve her adımda korelasyon katsayısı hesaplanır. Ana dalganın sonuna gelindiğinde yeniden başa dönülerek bu sefer dalga bir miktar genişletilir ve her adımda dalgacık ötelenerek ana dalga ile olan ilişkisi hesaplanır. Böylece çok sayıda korelasyon sayısı elde edilir. Bu korelasyon sayıları dalgacığın ana dalgayla ne kadar örtüştüğünü yani benzediğini ortaya koyar. Üç boyutlu bir grafikte zaman (öteleme), ölçek (skala) ve her noktada hesaplanan korelasyon sayıları gösterilmek istenirse Şekil 3.15’de verilen örnek için Şekil 3.16’da verilen grafik elde edilir.

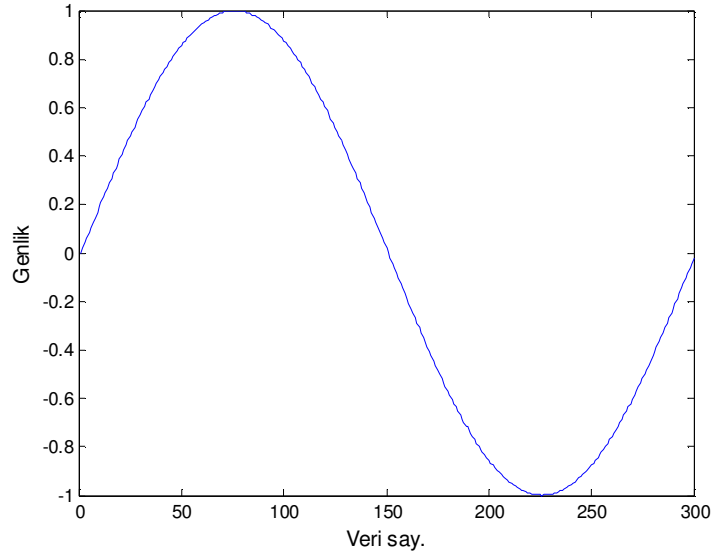


Şekil 3.16 : Şekil 3.13'te verilen örnek SDD sonuçları [42].

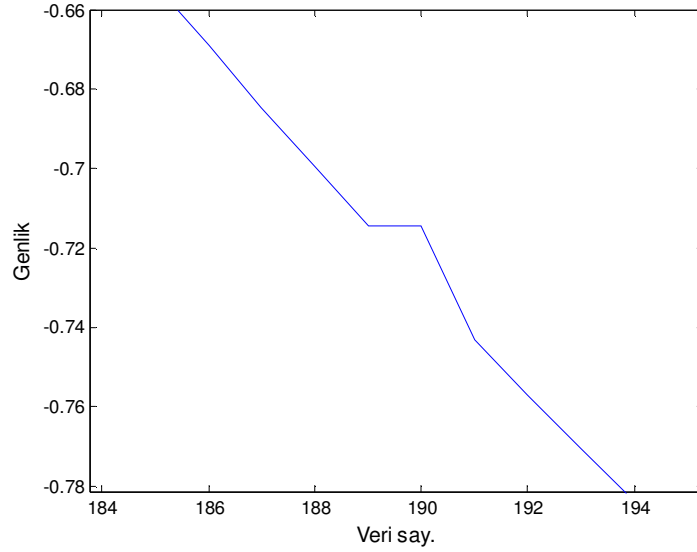
Şekil 3.16'da zaman-ölçek domeninde dalgacık katsayılarının büyüklüğü gösterilmektedir. Siyah en küçük katsayıya beyaz ise en büyük katsayıya karşılık gelmektedir. Bu şekilden görüleceği üzere zaman ekseninde $t = 3/8$ anında simetrik bir yapı vardır ve bu an en büyük dalgacık katsayısını vermektedir. Ölçek kısmına bakıldığında ise dalga bir miktar ölçeklendiği için en yüksek dalgacık katsayıları elde edilmiştir. Buradan çıkarılacak sonuç ana dalgacığın $t = 3/8$ ötelenmiş ve 20 Hz ölçeklenmiş hali ana işarete en çok benzemektedir. Yani ana işaret 20 Hz'e sahiptir ve zaman ekseninde $t = 3/8$ 'de görülmektedir.

Gözle fark edilemeyecek kadar küçük süreksizliği olan işaretlerle gerçek hayatta sürekli karşılaşılır. Süreksiz sinüsoidal bir işareti ele alacak olursak, işaretin Fourier dönüşümünde sadece işaretin frekansı belirlenirken, dalgacık dönüşümü ile süreksizlik civarındaki değişimi de gerçek zamanlı olarak gözlemleyebiliriz. Süreksizlik gösteren ve keskin sıçramalar içeren işaretlerin analizinde dalgacık dönüşümünün Fourier dönüşümüne göre avantajları vardır. Dalgacık analizi, başka analiz yöntemlerinin yakalayamadığı eğilimleri, bozulma noktalarını, yüksek dereceli türevlerde süreksizlikleri ve benzerlikleri çıkarmada başarılıdır.

Aşağıda dalga üzerinde gözle görülemeyecek küçük süreksizliklerin dalgacık analizi ile tanısına ilişkin bir örnek verilecektir. Şekil 3.17.a)'da 300 noktadan oluşturulan bir sinüs dalgası verilmiştir. 190. noktada bu dalgaya bir süreksizlik eklenmiştir. Yakın bakış Şekil 3.17.b)'de gösterilmektedir. Bilinen FFT dönüşümü yardımıyla işarettaki frekans bileşenleri hesaplanırsa, düşük frekanslı bileşenin olduğu ortaya çıkacak olmasına rağmen dalga üzerinde oluşturulan süreksizlik konusunda bir bilgi vermeyecektir.



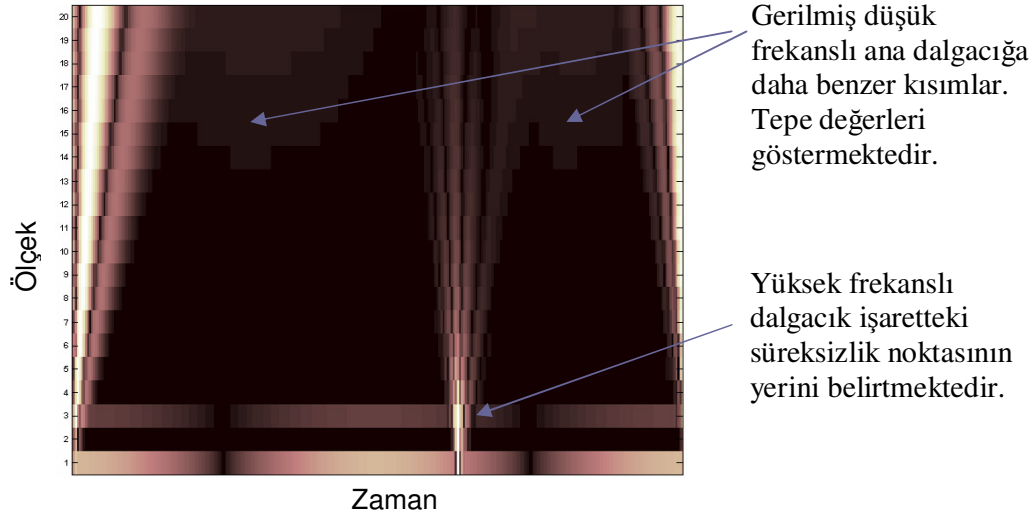
a) Sinüzoidal dalga üzerinde küçük süreksizlik.



b) Dalgaya yakından bakış.

Şekil 3.17 : Sinüzoidal bir dalga üzerinde küçük bir süreksizlik.

Şekil 3.18’de ise Db4 ana dalgacığı kullanılarak Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile farklı ölçekler için hesaplanan dalgacık katsayıları gösterilmektedir. 2. ölçekte belirtilen sonuca bakıldığında zaman 190 birim iken bu noktadaki değişimi ilgili analiz rahatlıkla belirlemiştir. Ölçek arttığında ise (frekansın azalmasına karşılık gelmekte, genişletilmiş ana dalgacık) örnek olarak ölçek 20 iken 300 noktalık ana sinüs dalgasını söz konusu süreksizlikten daha iyi belirlemektedir.



Şekil 3.18 : Şekil 3.17’de verilen dalganın Db4 ana dalgacığı ile SDD’si.

3.3.5 Dalgacık dönüşümünün matematiksel ifadesi

Fourier analizi sayesinde bir işaretin, sinüsoidal birçok frekanstan oluştuğunu biliyoruz. Dalgacık ise bir işaretin, orijinal dalgacığın kaydırılmış ve ölçeklendirilmiş biçiminden oluşturulur. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) bütün zaman aralığı boyunca dalgacık fonksiyonu $\psi(t)$ ’nin ölçeklenmiş ve kaydırılmış şekliyle işaretin çarpımından oluşur. SDD’nin sonucunda birçok dalgacık katsayısı elde edilir bunlar ölçek ve konum fonksiyonlarıdır.

$L^2(R)$ sonlu enerjili işaretler için bir vektör uzayını göstermek üzere, $x(t)$, $L^2(R)$ uzayında tanımlanan bir işaret olmak üzere sonlu enerjili işaretler için eşitlik (3.8)’de verilen bağıntı geçerlidir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (3.8)$$

Bu koşul altında belirli $x(t)$ işaretinin sürekli dalgacık dönüşümü aşağıdaki eşitlik (3.9)’da verilmiştir.

$$CWT_{\psi} x(a, b) = W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3.9)$$

Burada $\psi_{a,b}(t)$ fonksiyonu ise normalize edilmiş olarak eşitlik (3.10)’da verilmiştir.

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.10)$$

Burada $\psi(t)$ baz fonksiyonu ya da ana dalgacığı, (*) sembolü kompleks eşleniği ve a, b parametreleri ise $a, b \in R, a \neq 0$ 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.

$\Psi_{a,b}(t)$ transfer fonksiyonunda öteleme terimi KZFD’de olduğu gibi pencerenin yerini belirler ve işaret boyunca pencereyi kaydırır. Bu terim transfer alanında zaman bilgilerini içerir. Bu dönüşümde frekans bilgisine sahip değiliz, fakat ölçek parametresi 1/frekans olduğu için bu parametreden yararlanılır. Burada yüksek ölçek işaretin daha az detaylı görünüşünü ve düşük ölçek ise detaylı görünüşü oluşturur. Ölçek bir matematiksel işlem olup işareti hem açar hem de sıkıştırır. Yüksek ölçekler işareti açar, düşük ölçekler ise işareti sıkıştırırlar.

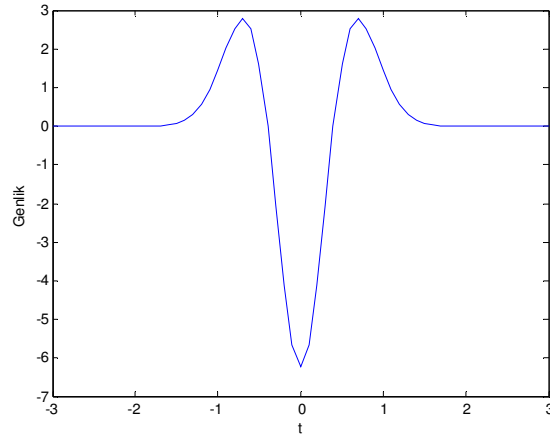
Ters dönüşüm ile zaman domenine geçilmek istenildiğinde eşitlik (3.11) uygulanır.

$$x(t) = \frac{1}{c_\Psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(a,b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da.db}{a^2} \quad (3.11)$$

Bir fonksiyonun ana dalgacık olabilmesi için sağlaması gereken koşul eşitlik (3.12)’de verilmiştir. Bu kabul edilebilirlik koşuludur:

$$c_\Psi \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (3.12)$$

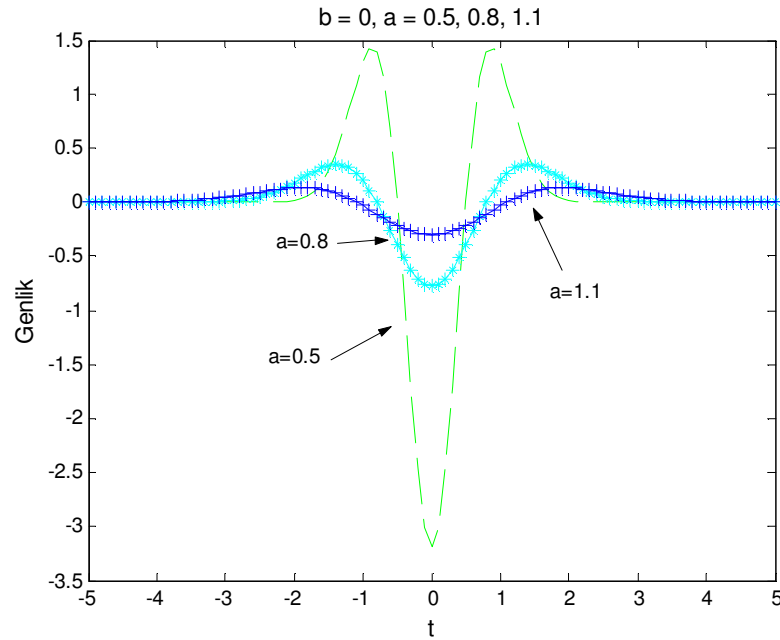
Ana dalgacık örneği olarak Meksika Şapkası (Mexican Hat) dalgacık fonksiyonu Şekil 3.19’da verilmiştir.



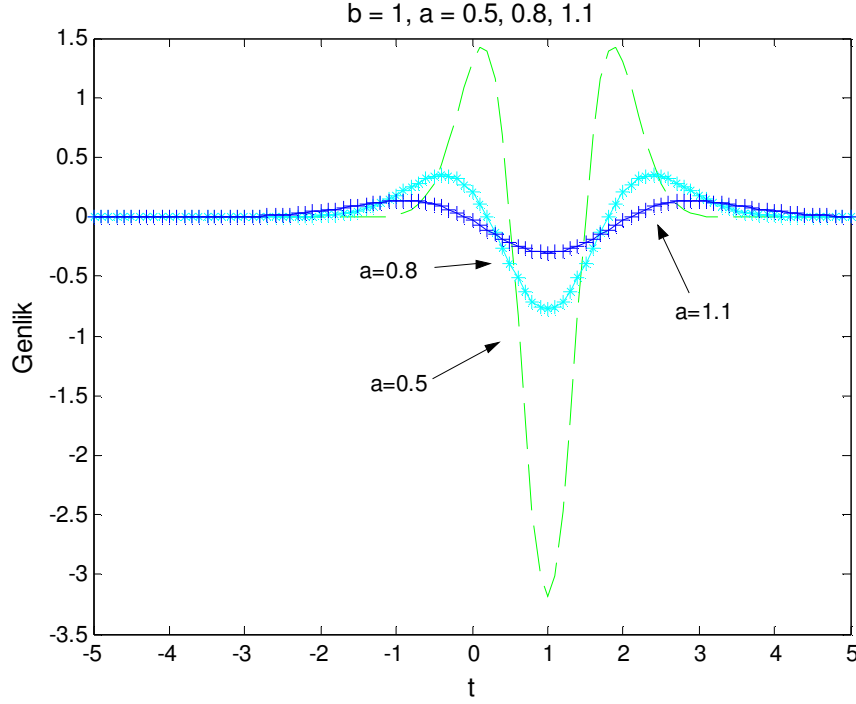
$$\psi(t, \tau, a) = \frac{\left[\left(\frac{t-\tau}{a} \right)^2 - 1 \right] e^{-0.5 \left(\frac{t-\tau}{a} \right)^2}}{\sqrt{2\pi} a^3}$$

Şekil 3.19 : Meksika şapkası dalgacık fonksiyonu.

Meksika şapkası dalgacığı için farklı değerlerdeki ölçekleme ve öteleme parametrelerine göre çizdirilmiş sonuçları Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.

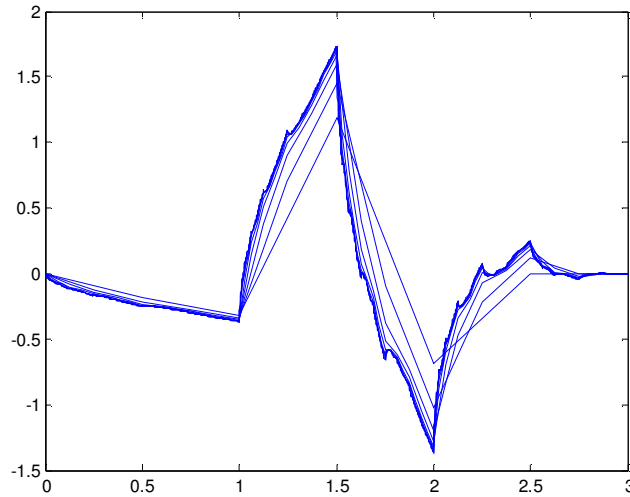


Şekil 3.20 : Meksika şapkası dalgacık fonksiyonu $b = 0$ ve $a = 0.5, 0.8, 1.1$.



Şekil 3.21 : Meksika şapkası dalgacık fonksiyonu $b = 1$ ve $a = 0.5, 0.8, 1.1$.

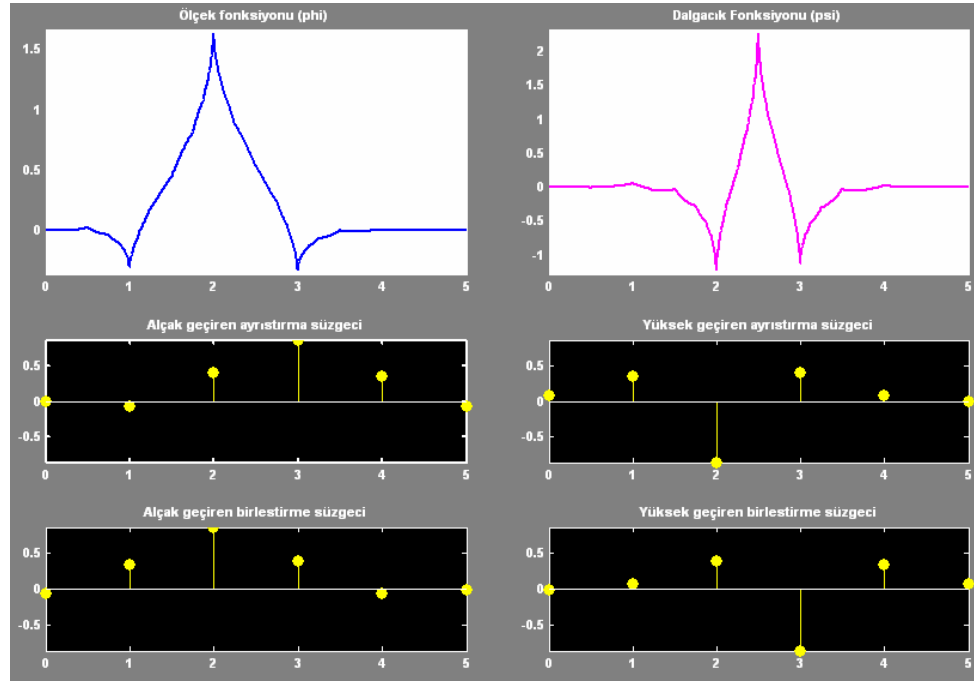
İterasyon ile dalgacık fonksiyonlarının uzun verilerle temsil edilmesi sağlanabilir. Buna bir örnek olarak Şekil 3.22’de 10 adet iterasyonla elde edilen db2 dalgacık fonksiyonlarını gösterilmektedir.



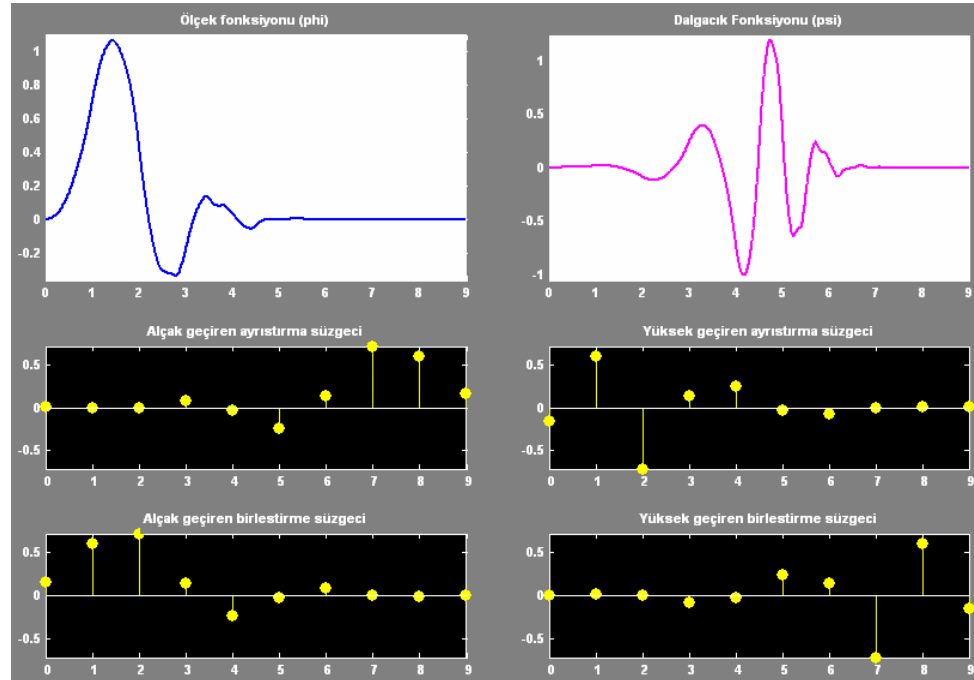
Şekil 3.22 : 10 iterasyonda elde edilen db2 dalgacık fonksiyonları.

Her bir dalgacık için ölçek ve dalgacık fonksiyonlarından söz edilebilir. Şekil 3.23’de Coif 1 ana dalgacığna ait ölçek ve dalgacık fonksiyonları ile ilgili ayrıklaştırma ve

birleştirme filtreleri verilmiştir. Şekil 3.24’de db ailesinden db5’e ait ölçek ve dalgacık fonksiyonları ile ilgili ayırıştırma ve birleştirme süzgeçleri verilmiştir.



Şekil 3.23 : Coif 1 ana dalgacığına ait ölçek ve dalgacık fonksiyonları.



Şekil 3.24 : Db5 ana dalgacığına ait ölçek ve dalgacık fonksiyonları.

3.3.6 Ayırık dalgacık dönüşümü - Çoklu çözünürlük analizi

Ayırık dalgacık dönüşümüne olan gereksinim sürekli dalgacık dönüşümü bir işarete uygulandığında işaretle ilgili olarak elde edilen dalgacık katsayılarının, işareti incelemek ve tekrar ters dalgacık dönüşümü ile geri elde etmek için gerekenden çok fazla olması nedeniyle oluşmuştur. Sürekli dalgacık dönüşümünün uygulanması hem fazla zaman almakta, hem de gereksiz çok fazla veri üretilerek bilgisayar belleğinde çok fazla yer kapladığından sıkıntı yaratmaktadır. Bunun için de ayırık dalgacık dönüşümü geliştirilmiştir.

Ayırık dalgacık dönüşümü bir işaretin incelenmesi ve tekrar geri birleştirilmesi için gerekli bilgiyi sağlayabildiğinden çalışmalarda başarıyla uygulanabilmektedir. 1976 yılında Croiser, Esteban, ve Galand'ın ayırık zamanlı işaretleri parçalamak (ayrıştırmak) için geliştirdikleri yöntem, bu yöntemin temelini oluşturmaktadır. Bu yöntemin bir benzeri de Crochiere, Weber, ve Flanagan tarafından geliştirilmiştir. Alt bant kodlama (subband coding) olarak bilinen bu yöntem aslında ses işaretlerini kodlamak için geliştirilmiştir.

1983 yılında Burt tarafından geliştirilen piramit şeklinde kodlama (pyramidal coding) yöntemi alt bant kodlama yöntemi ile çok benzerdir. 1985'de Stephane Mallat dalgacıkları bu alanda yeni bir sıçrama tahtası oluşturan sayısal işaret işleme çalışmalarında kullanmış ve Quadrature Mirror Filtre, piramit algoritmaları ve normal-dikey (Orthonormal) dalgacık temelleri ve daha birçokları arasındaki ilişkileri keşfetmiştir. Söz konusu yöntem çoklu çözünürlük analizi (multi-resolution analysis) olarak da bilinmektedir.

Ayırık dalgacık dönüşümü, a_1 ölçeğinde N_1 örnekleme frekansı ile örneklenen bir işaretin, a_2 ölçeğinde N_2 örnekleme frekansı ile örneklenebileceği temeline dayanır. a_1 ölçeğinin f_1 frekansına, a_2 ölçeğinin de f_2 frekansına karşılık geldiğini ve $a_1 < a_2$ ($f_1 > f_2$) olduğunu düşünürsek N_1 ve N_2 arasındaki ilişki

$$N_2 = \frac{a_1}{a_2} N_1 \text{ ya da } N_2 = \frac{f_2}{f_1} N_1 \quad (3.13)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadeden de görülebileceği gibi küçük frekanslarda örnekleme frekansının daha düşük seçilebileceği söylenebilir. Fakat burada Nyquist örnekleme teoremine bağlı kalınmalıdır.

Ayrık dalgacık dönüşümünde ölçekleme parametresi genellikle diydik logaritmik olarak artırılır. Yani ölçekleme parametresi $a = 2^m$ şeklinde (2, 4, 6, 8, 16, 32, ...) seçilir. Buna bağlı olarak öteleme parametresi $b = n.2^m$ şeklinde seçilir. Bu durumda ayrık dalgacık dönüşümü uygulanan bir işareten elde edilen dalgacık katsayıları indirgenmiş olduğundan hem fazla hesaplama yapılmamış hem de zamandan kazanılmış olur.

Sürekli genişleme ve öteleme parametreleri yerine,

$$a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m \quad (3.14)$$

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, Z tam sayılar kümesinin elemanlarını oluşturur. Bu durumda ayrıklaştırılmış ana dalgacık eşitlik (3.15)'de verilmiştir.

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (3.15)$$

Buradan hareketle ayrık parametrelili dalgacık dönüşümü eşitlik (3.16)'da tanımlanmıştır.

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (3.16)$$

a_0, b_0 'ın uygun seçimiyle ana dalgacık ailesi $L^2(R)$ 'nin ortonormal bazını oluşturur. a_0 ve b_0 'ın uygun seçimleri $a_0 = 2$ 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 ayırtırmayı sağlayan ve *çoklu çözünürlük dalgacık analizi (ÇÇDA)* denilen algoritmanın kullanılabilmesidir. $c_0(n)$, fiziksel bir ölçme cihazından kaydedilen bir ayrık zaman işareti olsun. Bu işaret, yaklaşım ve detay gösterimi denilen iki ayrı frekans aralığına ayrıştırılabilir. Bu anlamda çok çözünürlü işaret ayrıştırma tekniği kullanılarak seviye (ölçek) 1'de ayrıştırılmış işaretler $c_1(n)$ ve $d_1(n)$ olur. Bu durumda $c_1(n)$, orijinal işaretin yaklaşım versiyonunu ve $d_1(n)$ 'de, işaretin dalgacık dönüşümü formundaki detay gösterilimini oluşturur. Bunlar sırasıyla eşitlik (3.17) ve (3.18)'de verilmiştir.

$$c_1(n) = \sum_k h(k-2n)c_0(k) \quad (3.17)$$

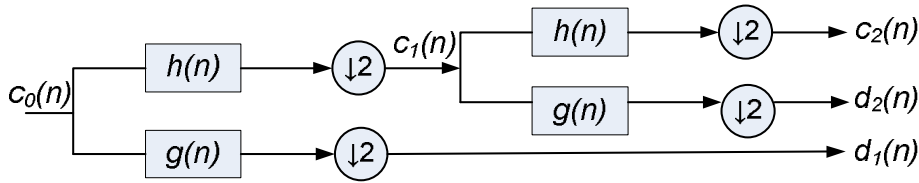
$$d_1(n) = \sum_k g(k-2n)c_0(k) \quad (3.18)$$

Burada $h(n)$ ve $g(n)$, $c_0(n)$ 'i, $c_1(n)$ ve $d_1(n)$ 'e ayırtıran birleşik süzgeç katsayılarıdır. Bir sonraki ölçek ayırtırılmasında ise, yine $c_1(n)$ işareti temel alınır. Bu durumda ölçek 2'deki ayırtırılmış işarete ilişkin yaklaşım ve detay katsayıları ise:

$$c_2(n) = \sum_k h(k-2n)c_1(k) \quad (3.19)$$

$$d_2(n) = \sum_k g(k-2n)c_1(k) \quad (3.20)$$

olarak bulunur. Böylece daha yüksek seviyelerdeki ölçek ayırtırmaları da benzer yolla sürdürülebilir. Çok çözünürlü işaret ayırtırma tekniğinin iki ölçeğe göre gerçekleştirilmesi Şekil 3.25'de gösterilmiştir [39].



Şekil 3.25 : $c_0(n)$ ana işaretinin iki ölçeğe ayırtırılması.

3.3.7 Çoklu çözünürlük analizinin matematiksel tanımı

Çoklu çözünürlük analizinde fonksiyon $f \in L^2(R)$ olmak üzere her biri farklı çözünürlükte olan yaklaşımları ile ifade edilebilir. Fonksiyonun bu yaklaşımları ölçekleme fonksiyonu olarak isimlendirilen ve alçak geçiren süzgeç özelliğinde olan bir $\phi(t)$ ana fonksiyonunun konvolüsyon alınarak elde edilir. Çoklu çözünürlük analizi iç içe girmiş $\{V_m: m \in \mathbb{Z}\}$ lineer vektör uzaylarını içerir ve bunlar aşağıda verilen özellikleri sağlarlar [43]:

$$(a) \dots V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \dots \quad (3.21)$$

$$(b) \bigcap_{m \in \mathbb{Z}} V_m = \{0\} \text{ ve } \bigcup_{m \in \mathbb{Z}} V_m = L^2(R) \quad (3.22)$$

$$(c) \text{ Her } f \in L^2(R) \text{ için } f(x) \in V_m \Leftrightarrow f(2x) \in V_{m-1} \quad (3.23)$$

(d) $\forall m \in Z$ olmak üzere $\phi(t) \in V_0$ fonksiyonu vardır, öyleki

$$\{\phi_{\min}(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}t - n)\} \quad (3.24)$$

kümesi V_m 'nin ortonormal bir bazıdır, kısacası

$$\int \phi_{mn}(t) \phi_{m'n'}(t) dt = \delta_{n-n'}, \quad (3.25)$$

olur. V_{m-1} içinde V_m 'nin ortogonal tümleyeni W_m olsun.

$$V_{m-1} = V_m \oplus W_m, \quad V_m \perp W_m \quad (3.26)$$

Ayrıca mümkün olan sonsuz sayıdaki W_m uzaylarının direk toplamı $L^2(R)$ 'yi versin:

$$\dots \oplus W_j \oplus W_{j-1} \dots \oplus W_0 \dots \oplus W_{-j+1} \oplus W_{-j+2} \dots = L^2(R) \quad (3.27)$$

P_m ve Q_m , $L^2(R)$ 'den V_m ve W_m uzaylarına izdüşüm operatörleri olsun. b) özelliğinden dolayı her $f \in L^2(R)$ için $\lim_{m \rightarrow -\infty} P_m f = f$ olur. a) özelliğinden dolayı m azalırken $P_m f, f$ nin daha iyi yaklaşımlarını verir.

Her f fonksiyonunun $P_{m-1}f$ yaklaşımı, V_{m-1} uzayına fonksiyonun izdüşümü alınarak bulunur. (3.26) eşitliğinden f fonksiyonunun $(m - 1)$ 'deki yaklaşımı; f nin V_m ve W_m üzerine izdüşümlerinin toplamı olarak yazılırsa

$$P_{m-1}f = P_m f + Q_m f \quad (3.28)$$

elde edilir. $P_m f$, V_m uzayında f nin alçak geçiren kısmıdır ve $Q_m f$ yüksek frekans detayı ya da farktır. (3.28) eşitliğinden $Q_m f \in W_m$ olmak üzere $Q_m f = P_{m-1}f - P_m f$ dir ve $Q_m f$, V_m 'den V_{m-1} 'e giden bilgidir. $\{\phi(t - n)\} \in V_0$ ve $\{\phi(2t - n)\} \in V_{01}$ olup V_0 uzayını $\{\phi(t - n)\}$ ortonormal kümesi ve V_{-1} uzayını da $\{\phi(t - n)\}$ ortonormal kümesi tanımlar. Bu durumda $\psi(t) \in W_0$ gibi bir fonksiyon vardır ve bu fonksiyonun $\{\psi(t - n)\}$ ile gösterilen ötelenmiş biçimleri W_0 uzayını oluşturur. $\psi(t)$ fonksiyonu çok ölçekli analiz ile birleştirilen dalgacık fonksiyonudur. iii) özelliğinden dolayı W_m uzayı $\{\psi(2^{-m}t - n)\}$ 'lerden oluşur. (3.27) denklemi W_m uzaylarının birbirleriyle ortogonal olduğunu ve bunların direk toplamı $L^2(R)$ 'yi verdiğini gösterir. Her m için $\{\psi_{mn}(t); n \in Z\}$ kümesi W_m 'nin ortonormal bazı olduğu için $\psi_{mn}(t); m, n \in Z$ 'de

$L^2(R)$ 'nin ortonormal dalgacık bazıdır. $\{\psi_{mn}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n)\}$ kümesi çok ölçekli analiz ile ilişkilendirilen dalgacık bazıdır ve dalgacıklar

$$\int \psi_{mn}(t) \psi_{m'n'}(t) dt = \delta_{m-m'} \cdot \delta_{n-n'} \quad (3.29)$$

bağıntısını sağlar.

$$V_{i-1} = W_i \oplus V_i = W_i \oplus W_{i+1} \oplus W_{i+2} \dots \quad (3.30)$$

olduğu için f 'nin $(m - 1)$ çözünürlüğündeki yaklaşım olan $P_{m-1}f$, farklı ölçeklerdeki detayların toplamı olarak ifade edilir. Çoklu çözünürlük analizinin a) özelliğinin sonucu olarak ölçekleme fonksiyonu

$$\phi(t) = 2 \sum_n h_0(n) \phi(2t - n) \quad (3.31)$$

biçiminde ifade edilirse dalgacık fonksiyonu da

$$\psi(t) = 2 \sum_n h_1(n) \phi(2t - n) \quad (3.32)$$

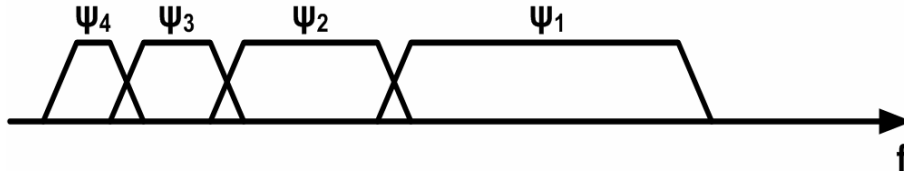
olur. Burada $\{h_0(n)\}$ ara ölçek bazları katsayıları olup iki kanallı süzgeç kümesinde alçak geçiren süzgecin impuls yanıtına, $\{h_1(n)\}$ 'de yüksek geçiren süzgecin impuls yanıtına karşı düşer.

Belirtildiği üzere ayrık dalgacık dönüşümü ile bir işaret kendisini oluşturan frekans bantlarına ayrılabilir. Söz konusu frekans bantlarını belirten yaklaşım ve detay katsayıları birleştirilerek gerçek işaret tekrar elde edilebilmektedir.

İşaretten gürültü temizleme amacıyla ayrık dalgacık yöntemi ile ana işaret alt frekans bantlarına ayrılır ve gürültüyü oluşturan yüksek frekans bileşeni eşikleme yöntemiyle ayrıştırılarak tekrar birleştirmeye sokulmaz. Böylece yeniden oluşturulan işaret içinde istenmeyen yüksek frekans bileşenleri eşiklenerek ayrıştırılmış olur [54].

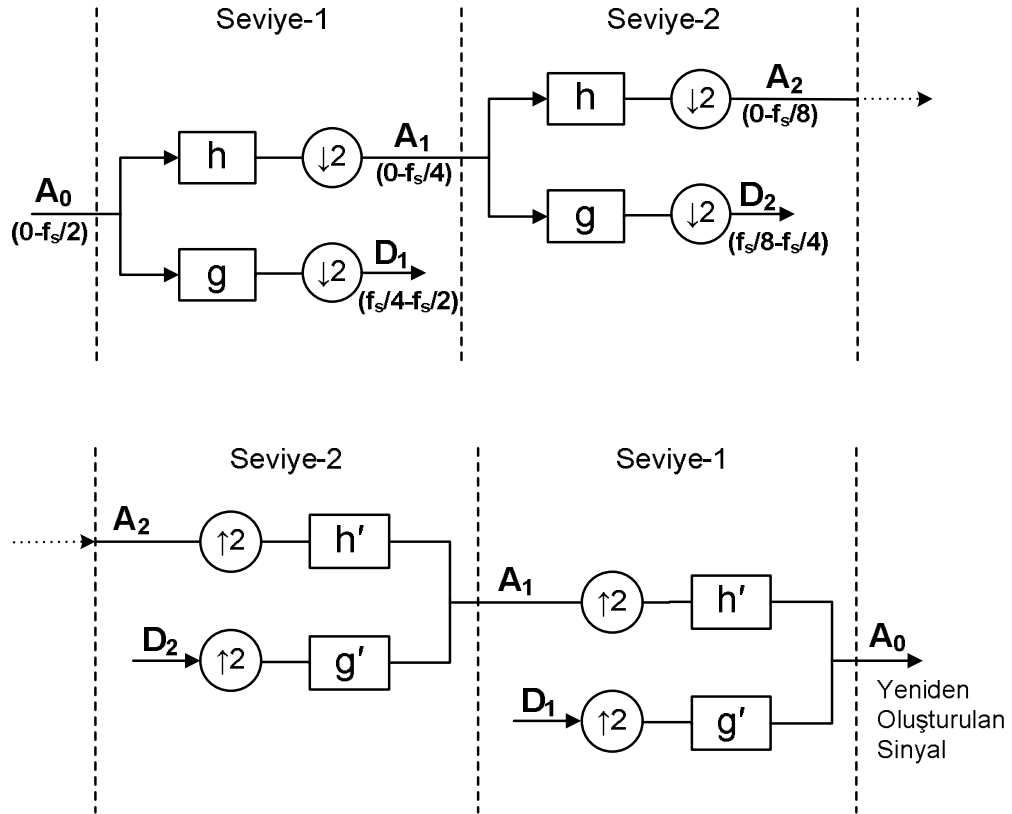
Fourier teorisinden bilindiği gibi, zaman boyutunda sıkıştırma, frekans boyutunda yayılmaya ve yukarı doğru kaymaya denk düşer, bunun tersi de söylenebilir. Yani $\psi(t/a)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü ve $\psi(a\omega)$ ve $\psi(at)$ fonksiyonun Fourier dönüşümü $\psi(\omega/a)$ 'dır. Bir dalgacığın değişen ölçekler için frekans bantları aşağıdaki

Şekil 3.26'da temsil edilmektedir. Her bir dalgacık bant geçiren filtre olarak alınırsa bunun ölçeklenmiş serisi de bant geçiren filtre serisi oluşturacaktır.



Şekil 3.26 : Dalgacıklar için frekans spektrumları (ψ_1 en küçük ölçek).

Şekil 3.27 A_0 ana işaretinin iki seviyeli olarak ayrıştırılmasını ve yeniden birleştirilmesini göstermektedir. Burada A_1 ve A_2 sırasıyla seviye 1 ve 2 için yaklaşım katsayılarını, D_1 ve D_2 de detay katsayılarını, f_s örnekleme frekansını belirtir.



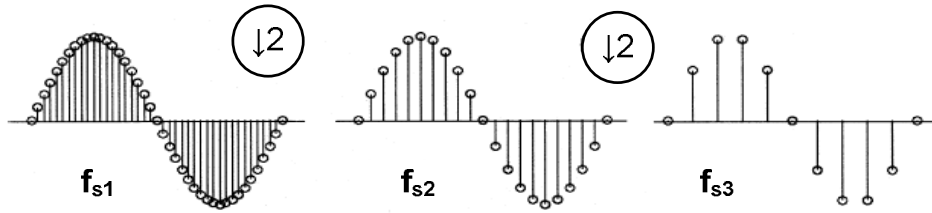
Şekil 3.27 : İki seviyeli olarak işaretin ayrıştırılması ve birleştirilmesi.

Şekil 3.27'deki h , h' , g , g' simgeleri şunları ifade etmektedir.

- h : Yüksek geçiren ayrıştırma süzgeci
- h' : Yüksek geçiren birleştirme süzgeci

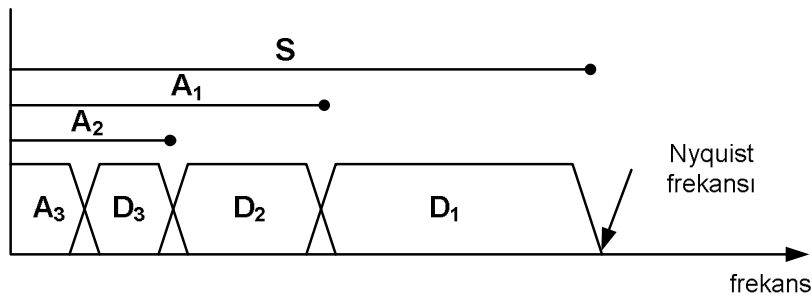
- g : Alçak geçiren ayırıştırma süzgeci
- g' : Alçak geçiren birleştirme süzgeci

Çoklu çözünürlük analizinde öncelikle işaret yüksek ve alçak geçiren ayırıştırma süzgeçlerinden geçirilirler. Süzgeçleme işleminden sonra aşağı örnekleme (downsampling) ile işareti oluşturan ayırık veri sayıları yarıya indirgenir (Şekil 3.28). Bu belirtilen kısım ayırıştırma kısmıdır ve böylece yaklaşım katsayıları (cA_1) ve detay katsayıları (cD_1) elde edilmiş olur. Birleştirme işleminde ise işaretler önce yukarı örnekleme (upsampling) ile veri sayıları iki katına çıkar (temelde bu işlem dalgacık katsayıları arasına “0” eklenmesidir). Daha sonra detay ve yaklaşımlar yüksek geçiren ve alçak geçiren birleştirme süzgeçlerinden geçerek işaretin D_1 detay bileşeni ve A_1 yaklaşım bileşeni elde edilir. A_1 ve D_1 'in toplamı yeniden oluşturulan ana işareti verir.



Şekil 3.28 : Aşağı örnekleme (downsampling) [55].

Ayırıştırmanın seviyesi artırıldığında ise yukarıdaki işlem benzer şekilde devam eder. Ancak diğer seviyelerde her defasında yaklaşım kısmı ayırıştırılarak devam eder. Şekil 3.29'da ise üç seviyeli ayırık dalgacık dönüşümünde alt frekans bantları gösterilmektedir.

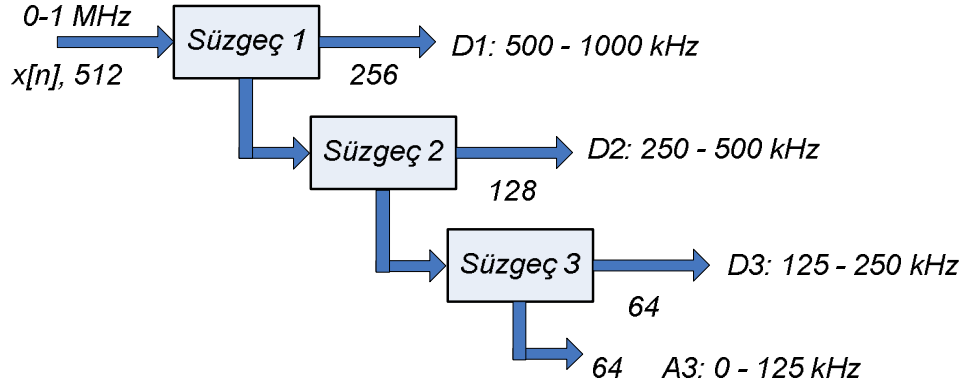


Şekil 3.29 : Üç seviyeli dönüşüm, detay ve yaklaşım frekans bantları.

Üç seviyeli ayrık dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen dalgacık katsayılarını kullanarak Şekil 3.29'dan kolayca görülebileceği gibi ana işaret $S = A_3 + D_1 + D_2 + D_3$ eşitliği ile elde edilebilir.

Ayrık dalgacık dönüşümünde alt bantların daha iyi anlaşılabilmesi için basit bir örnek verilecektir. Diyelim ki elimizde 512 noktadan oluşmuş ayrık bir işaret bulunsun. Bu işaret bir osiloskopla belirli bir sürede kaydedilmiş bir işaret olabilir. Nyquist örnekleme teoremine göre örneklenmiş bir işaret içindeki en yüksek frekanslı bileşen örnekleme frekansının yarısı kadarki bir frekansa sahip olacaktır. Örnekleme esnasında 2 MHz örnekleme frekansına sahip bir osiloskop kullanıldığı düşünülürse gerçek işaret 0-1 MHz arasında bir frekans bandına sahip olacaktır. Söz konusu gerçek işaret Şekil 26'da "süzgeç" olarak ifade edilen alçak ve yüksek geçiren süzgeçlerden geçirilir. Böylece işaretin alçak ve yüksek frekans içerikleri elde edilmiş olunur. Dalgacık dönüşümüyle elde edilen katsayılarından, alçak frekanslı bileşenlerin oluşturduğuna "yaklaşımlar ya da yaklaşım katsayıları", yüksek frekanslı bileşenlerin oluşturduğuna ise "detay ya da detay katsayıları" denir. İşaretin 0-1 MHz frekans bandına sahip olduğu düşünülürse yüksek geçiren filtreden elde edilen 1. seviyedeki detayların frekans bandı 500-1000 kHz arasında olurken, alçak geçiren filtreden elde edilen yaklaşım katsayılarının frekans bandı ise 0-500 kHz arasında olacaktır. İşaret, kendini oluşturan iki frekans bandına bölündükten sonra, aşağı örnekleme (downsampling) ile her iki frekans bandındaki örnek sayısı yarıya düşürülür. Çünkü başlangıç seviyesindeki örnek sayısı ($n = 512$) ile her iki frekans bandı da temsil edilebilmektedir. İlgili detaylar aşağıda verilen Şekil 3.30'da gösterilmektedir.

D_1 ile gösterilen birinci detayların frekans bandı 500-1000 kHz olurken, temsil edildiği veri sayısı $512/2 = 256$ olur. İlerleyen aşamalarda 1. seviyedeki yaklaşımlara süreç tekrar uygulanır. Bu sürecin 1. seviyedeki yaklaşımlara uygulanmasının nedeni işaretin alçak frekans bileşenleri içinde önemli bilgileri saklamasıdır. Yukarıda anlatılan süreçler istenilen seviyeye kadar devam ettirilir. Ayrık dalgacık dönüşümünün kaç seviye uygulanacağı işaretin örnekleme frekansına ve toplam örnek sayısına göre değişir. Uygulanan seviye sayısı gereğinden çok fazla olursa, son seviyelerdeki içerikler artık işareti temsil etmekten uzaklaşabilir.



Şekil 3.30 : 512 nokta $x(n)$ işareti 3 seviyeli ADD.

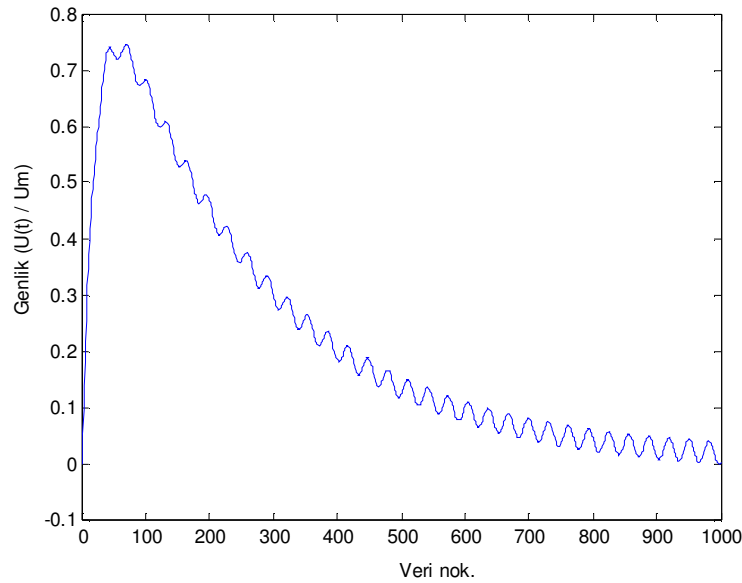
3.3.8 Dalgacıklar ile işaret analizi

Bu kısımda önceki kısımlarda açıklanan dalgacık analizi ile işaret ayrıştırma ve yeniden birleştirme işlemlerine ait bir örnek verilmektedir.

Örnek $f(t)$ fonksiyonu, darbe gerilimini andıran, çift eksponansiyelden oluşan ve üzerine küçük genlikli sinüzoidal dalga bindirilmiş ve eşitlik (3.33) ile ifade edilen bir fonksiyondur.

$$f(t) = [\exp(-0,02t) - \exp(-0,25t)] + 0,02 \sin t \quad (3.33)$$

İlgili fonksiyonun şekli Şekil 3.31’de verilmiştir.

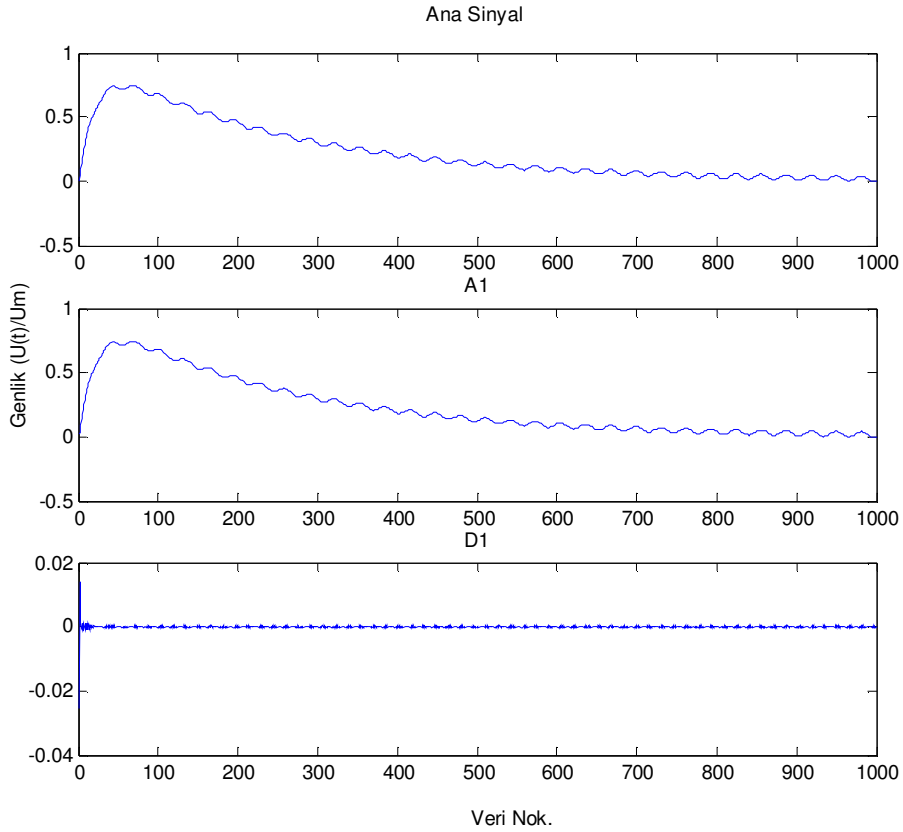


Şekil 3.31 : Sinüzoidal işaret bindirilmiş darbe örneği.

Şekil 3.31’de verilen darbe gerilimi için tek seviyeli ayrık dalgacık dönüşümünün db2 ana dalgacığı kullanılarak elde edilen yaklaşım (A_1) ve detay (D_1) bileşenleri Şekil 3.32’de verilmiştir. Ardından ters dalgacık dönüşümü uygulanarak ana işaret yeniden elde edilmiş ve dönüşüm hatası eşitlik (3.34)’e göre $4.1293e^{-014}$ olarak belirlenmiştir.

$$\text{Hata} = \max(|S-R|) \quad (3.34)$$

Eşitlik (3.34)’de belirtilen S, dönüşüm öncesindeki ana işareti, R ise ters dalgacık dönüşümü uyguladıktan sonra elde edilen işareti göstermektedir. Hata olarak elde edilen bu değerin oldukça küçük olması yöntemin başarısını göstermektedir.



Şekil 3.32 : Şekil 3.31’de verilen işaretin tek seviyeli ayrıştırılması.

3.3.9 Diğer analiz yöntemleri

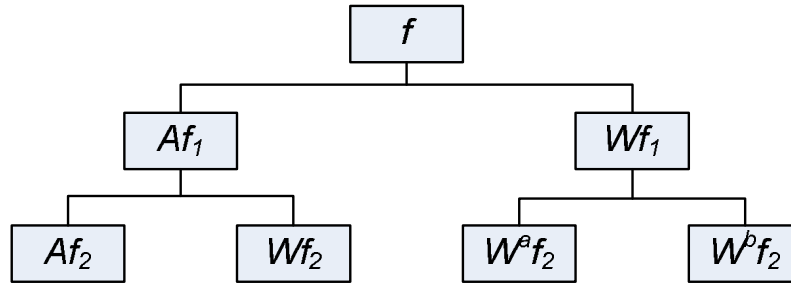
Dalgacık analizinin yanı sıra aşağıda belirtilen alanlarda da ilgili yöntemlerin tez kapsamındaki işaretlerin analizinde uygun olup olmadığını belirlemek adına araştırmalar yapılmıştır. Bu yöntemler şöyle sıralanabilir:

- Çoklu dalgacık (multiwavelet) teknikleri
- Paket Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Packet Transformation) uygulamaları
- Bağımsız Bileşen Analizi (Independent Component Analysis)
- Kör Kaynak Ayırımı (Blind Source Separation)

Yapılan araştırma sonucunda yüksek gerilim aygıtlarından alınan işaretlerin değerlendirilmesinde klasik dalgacık dönüşümünün yanı sıra paket dalgacık dönüşümünün (Wavelet Packet Transformation) de kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bağımsız bileşen analizi ve kör kaynak ayırımının yüksek gerilim deney ve ölçümleri sırasında kaydedilen işaretlerin yorumlanmasında etkin olmadığı görülmüştür. Bu sonuca literatürde bu yöntemlerin kullanıldıkları alanların taranması, yöntemlerin uygulamada başarılı oldukları işaret türlerini göz önünde bulundurarak ve denemeler yapılarak varılmıştır.

3.3.10 Paket dalgacık dönüşümü (PDD)

Kimi uygulamalarda ayrık dalgacık dönüşümü ile elde edilen detay bileşenlerinin de ayrıştırılması yararlı olabilir. Böylece alt bant sayısı artırılabilir ve detay frekans bileşenleri daha iyi analiz edilebilmektedir. Paket dalgacık dönüşümünün son yıllarda literatürde örnekleri daha sık görülmeye başlanmıştır. Şekil 3.33’de f sinyalinin iki seviyeli paket dalgacık dönüşümünde alt bantlar gösterilmektedir.



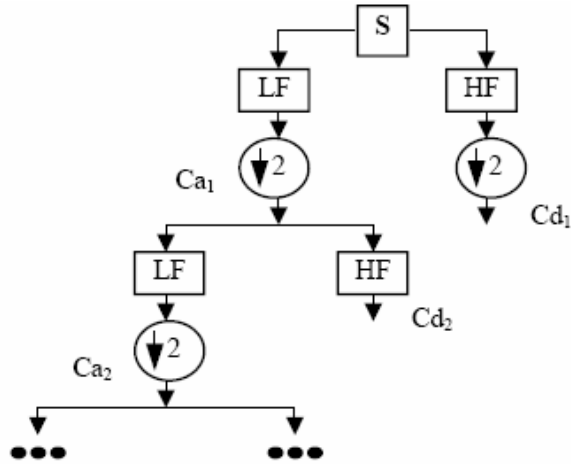
Şekil 3.33 : İki seviyeli paket dalgacık dönüşümünde alt bantlar [25].

3.3.11 Durağan dalgacık dönüşümü (DDD)

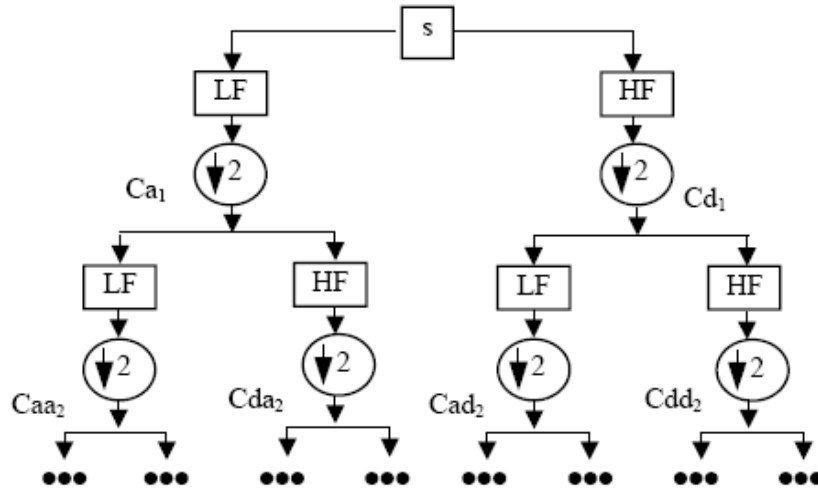
Durağan dalgacık dönüşümü temel anlamda ayrık dalgacık dönüşümü ile aynıdır, ancak tek fark durağan dalgacık dönüşümünde işaretin alt bantlara ayrılmasında aşağı örnekleme yapılmaz. Aynı şekilde birleştirme esnasında ise yukarı örnekleme yapılmaz. Sonuçta veri kümeleri her bir ayrıştırmada artarak çoğalma gösterir.

3.3.12 Ayrık dalgacık dönüşümü, paket dalgacık dönüşümü ve durağan dalgacık dönüşümlerinin karşılaştırılması

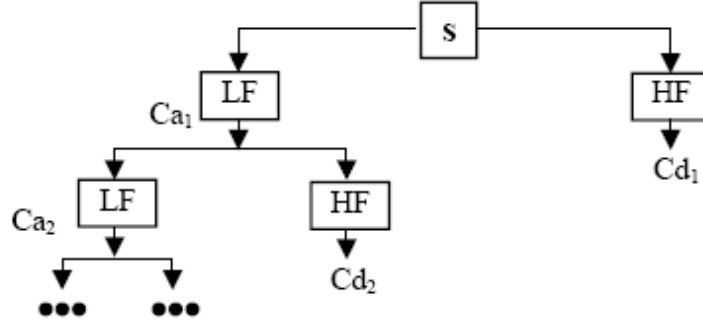
Aşağıda ayrık dalgacık dönüşümü, paket dalgacık dönüşümü, durağan dalgacık dönüşümü şematik olarak sırasıyla Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da gösterilmektedir (S: orijinal işaret, LF: alçak geçiren ayrıştırma süzgeci, HF: yüksek geçiren ayrıştırma süzgeci, Ca: yaklaşım katsayıları, Cd: detay katsayıları).



Şekil 3.34 : Ayrık dalgacık dönüşümü.



Şekil 3.35 : Paket dalgacık dönüşümü.



Şekil 3.36 : Durağan dalgacık dönüşümü.

Ayrık dalgacık dönüşümünde öncelikle işaret yüksek ve alçak geçiren ayrıştırma süzgeçlerinden geçirilirler. Süzgeçleme işleminden sonra aşağı örnekleme (downsampling) ile işareti oluşturan ayrık veri sayıları yarıya indirgenir (Şekil 3.34). Bu belirtilen kısım ayrıştırma kısmıdır ve böylece yaklaşım katsayıları (cA_1) ve detay katsayıları (cD_1) elde edilmiş olur. Birleştirme işleminde ise işaretler önce yukarı örnekleme (upsampling) ile veri sayıları iki katına çıkar (temelde bu işlem dalgacık katsayıları arasına ‘0’ sayısının eklenmesidir). Daha sonra detay ve yaklaşımlar yüksek geçiren ve alçak geçiren birleştirme süzgeçlerinden geçerek işaretin D_1 detay bileşeni ve A_1 yaklaşım bileşeni elde edilir. A_1 ve D_1 ’in toplamı yeniden oluşturulan ana işareti verir.

Ayrık, paket ve durağan dalgacık dönüşümü birbirleriyle kıyaslanırsa şu sonuçlar elde edilebilir.

- Ayrık dalgacık dönüşümü ve paket dalgacık dönüşümü her seviye ayrıklaştırmada aşağı örnekleme ($M = 2$) (down sampling) işlemi yapıldığından üzerinde çalışılan veri sayısı her seviyede sabit kalmaktadır (detay ve yaklaşımların toplamı).
- Paket dalgacık dönüşümü ise ayrık dalgacık dönüşümünde olduğu gibi sadece yaklaşımları ayrıştırmak yerine hem yaklaşımları hem de detayları ayrıklaştırarak yeniden oluşturulan işaretin ana işareti daha doğru bir şekilde temsil etmesi sağlanır. Ancak işlem süresinin uzaması en büyük dezavantajdır.
- Zamanla değişmezlik “time invariance” özelliği sadece durağan dalgacık dönüşümünde mevcuttur. Bu da ayrıklaştırılan işaretten ana işaretin geri elde edilmesinde doğruluğu artırmaktadır. Durağan

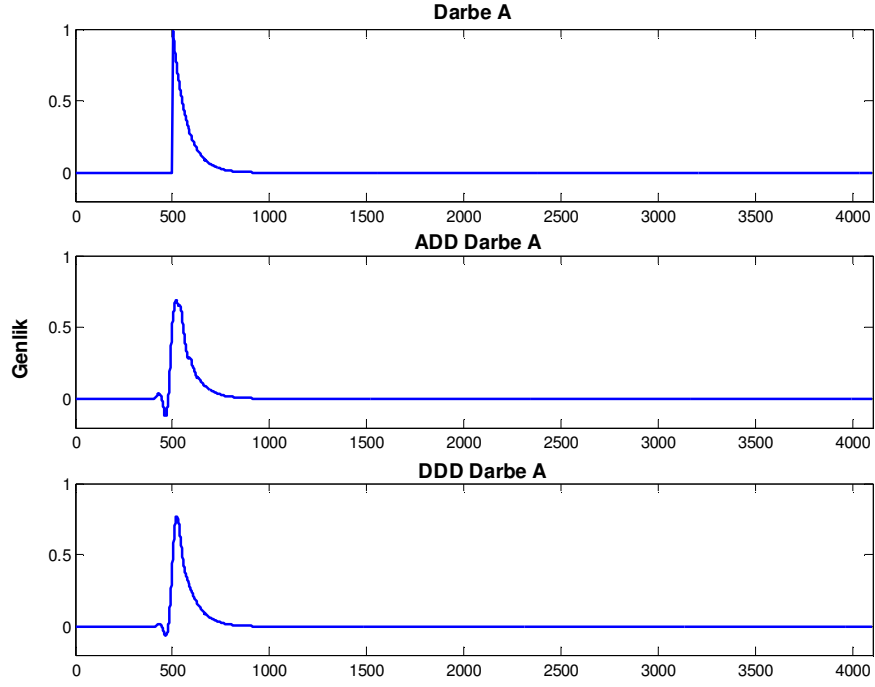
dalgacık dönüşümünde işlem süresinin uzaması özellikle gürültü temizleme işlemlerinde tercih edilmemesine neden olmaktadır.

Şekil 3.37’de darbe gerilimi şeklindeki A işareti ve zaman ekseninde A işaretinin ötelenmiş hali olan B işaretine Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) ve Durağan Dalgacık Dönüşümü (DDD) uygulanmasının sonuçları gösterilmiştir. İlgili işlem sırasında her iki işarete de 5 seviye ayırıştırma uygulanmış (db5 ile) ve sadece yaklaşım katsayıları kullanılarak işaret tekrar elde edilmiştir. Buradan görüleceği üzere ADD ile tekrar elde edilen işaret giriş işareti ile kıyaslandığında bir parça bozulmaya uğramış olduğu açıktır. DDD de ise işaret şekli iyi bir şekilde tekrar elde edilebilmiştir ve ötelenme ile değişime uğramamıştır. Kısacası Şekil 3.37 (genlik-veri noktaları değişimi, 5 seviye ayırıştırma ve sadece yaklaşımlar ile tekrar birleştirme, db5) Durağan Dalgacık Dönüşümü’nün zamanla değişmezlik özelliğini ortaya koymaktadır.

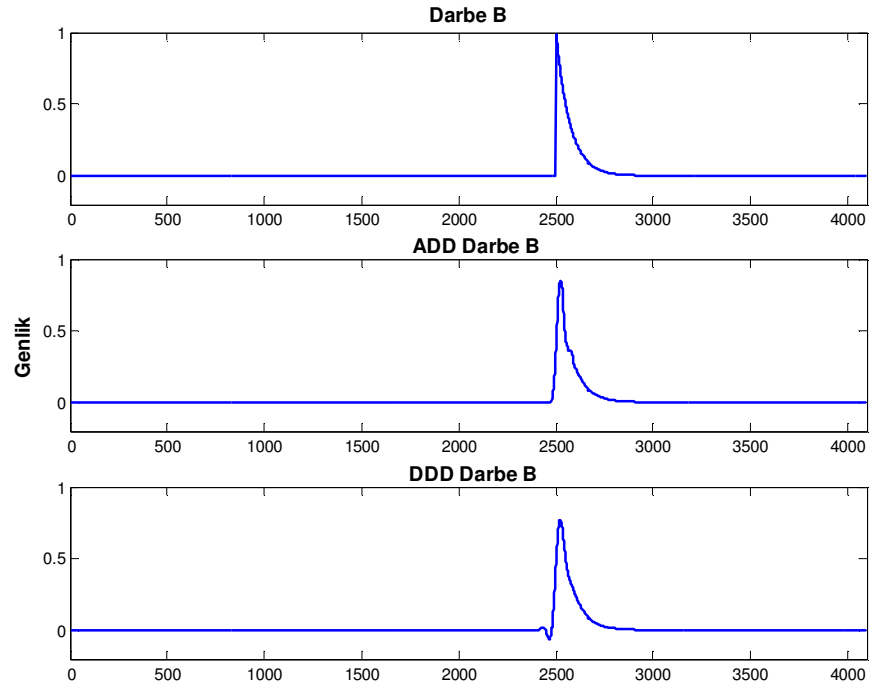
3.3.13 Çalışmalarda Ayrık Dalgacık Dönüşümü’nün tercih edilmesinin nedenleri

Tez kapsamında yapılan dalgacık analizi çalışmalarında ayrık, paket ve durağan dalgacık dönüşümlerinden ayrık dalgacık dönüşümünün tercih edilmesinin ana nedenleri şöyle sıralanabilir:

1. Ayrık dalgacık dönüşümünde ayırtırmada her alt banda ait veri sayısı sabit kalmaktadır. Bu da ayırtırma işlemi ile elde edilen veri sayısı, durağan dalgacık dönüşümüyle elde edilen veri sayısının her bantta ve toplamda yarısına eşit olduğu gibi (durağan dalgacık dönüşümünde aşağı örnekleme yapılmadığı için) işlemlerde kolaylık sağlamakta ve işlem süresi kısalmaktadır.
2. Paket dalgacık dönüşümü hem yaklaşım hem de detayları ayırttığı için işlem süresi ve her alt bantta veri sayısı artmaktadır.
3. Özellikle işletmede gerilim altında sürekli durum izleme durumunda veri sayısı oldukça fazla olup işareti analiz etme hızı yüksek olmalıdır. Bu da bizi ayrık dalgacık dönüşümüne yönlendirmektedir.



a)



b)

Şekil 3.37 : a) A darbesi ve b) A darbesinin ötelenmiş hali olan B darbesi.

3.4 Dalgacık Analizi ile Gürültüden Arındırma

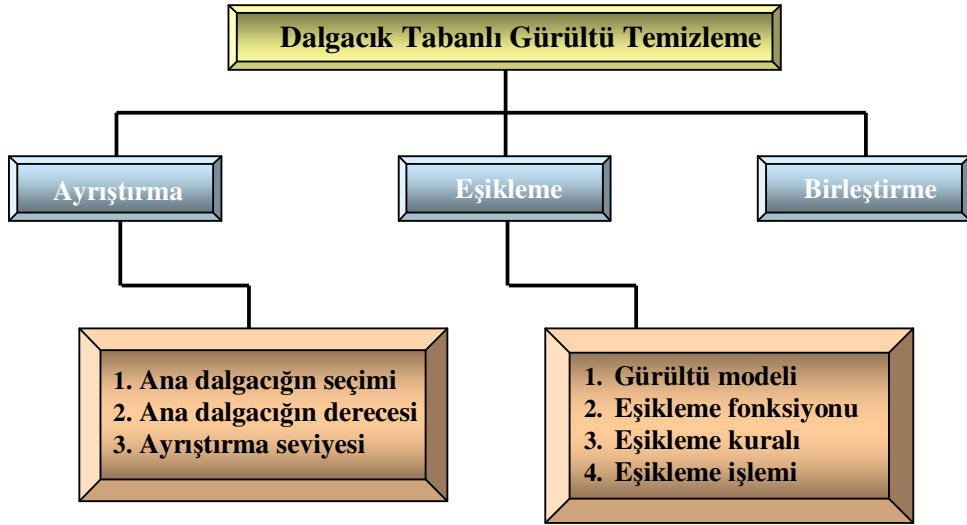
Dalgacık analizi tabanlı gürültü temizleme bir lineer olmayan yöntem olup temel felsefesi ana işarete ait enerjinin dalgacık dönüşümü ile elde edilen büyük dalgacık katsayılarında bulunmasına dayanmaktadır. Bu anlamda dönüşüm ile elde edilen dalgacık katsayılarından ana işareti temsil edenler yeniden birleştirme için tutulurken gürültüyü temsil edenler yeniden birleştirmeye katılmaz ya da eşiklenerek atılır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar göstermiştir ki örnek olarak beyaz gürültüde ayrıştırma seviyesi arttıkça detayların genlik ve varyans değerleri azalırken ana işaret için bu değerler ayrıştırma seviyesinden bağımsızdır. Bunun yanı sıra genellikle ayrıştırma sonrasında ana işareti temsil eden katsayılar genellikle büyük değerde iken gürültü kısmına ait olanlar ana işarete ait olanlarla kıyaslandığında oldukça küçük kaldığı görülmüştür. Bu da dalgacık analizin gürültü ayrıştırma için kullanılmasında büyük kolaylık sağlamaktadır.

Dalgacık analizinin diğer bir özelliği ise lineerliğidir. İki işaretin lineer kombinasyonunun dalgacık katsayıları bu iki işaretin dalgacık katsayılarının lineer kombinasyonuna eşittir ve yaklaşım ve detay katsayılarının her ikisi için de geçerlidir.

Dalgacık dönüşümü ile işaretlerin gürültüden arındırma işlemi genel anlamda üç ana adımda gerçekleştirilir, bunlar sırasıyla şöyle verilebilir,

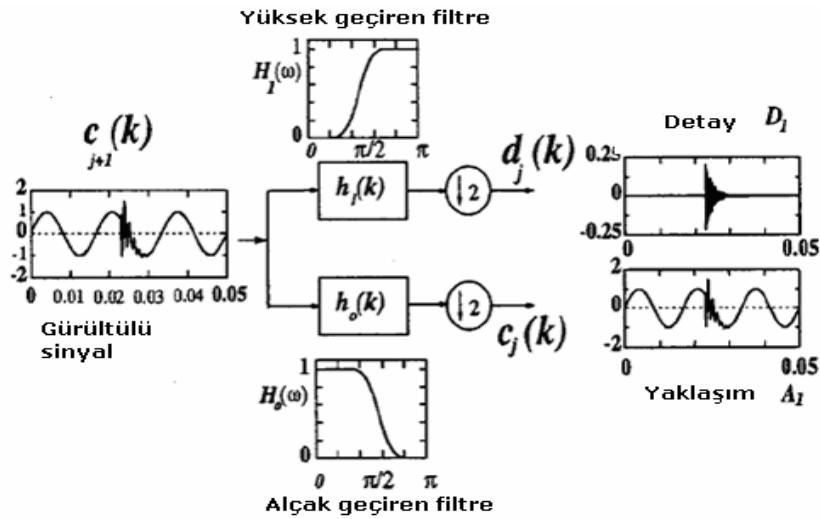
- 1) Dalgacık temel fonksiyonu ile işaret ayrıştırma: Dalgacık detay ve yaklaşım sabitlerinin bulunması.
- 2) Her ayrıştırma derecesi için gürültü eşiğinin seçimi ve detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi.
- 3) İşaretin son güncellenmiş detay sabitleri kullanılarak yeniden oluşturulması yani Ters Dalgacık Dönüşümünün uygulanması.

Yukarıda verilen adımlar Şekil 3.38’de gösterilmektedir.



Şekil 3.38 : Dalgacık analizi ile gürültü temizleme.

İlk adımda işaret dalgacık domenine transfer edilir ve her seviyede yaklaşım ve detay katsayıları ile temsil edilir. Bu aşamada üç adet belirlenmesi gereken parametre mevcuttur. Bunlar ana dalgacığın tipi, ana dalgacığın derecesi ve ayrıştırma seviyesidir. Bu parametreler belirlendiğinde dalgacık analizi gerçekleştirilebilir, ancak bu parametrelerin seçimi sonucu oldukça fazla etkilediğinden seçim esnasında dikkatli olunması gerekmektedir. Dalgacığın ve ayrıştırma derinliğinin seçimi kesinlikle işaret özelliklerine bağlıdır. Bu durumda yumuşak (smooth) dalgacıklar işaretin daha yumuşak yaklaşımını oluşturur tersi ise yani kısa dalgacıklar sıçramaları daha iyi izler. Şekil 3.39’da gürültü içeren bir işaretin 1 seviyeli olarak detay ve yaklaşım bileşenlerine ayrıştırılması gösterilmektedir.



Şekil 3.39 : Gürültü içeren sinüsoidal bir işaretin ayrıştırılması [56].

İkinci adımda işaret içindeki gürültünün karakteristiği konusunda bilgili olunması yöntemin başarısına olumlu katkı sağlar. Ardından eşik değeri belirleme yöntemi ve detay katsayıları için belirlenen bu eşik değerin hangi eşikleme fonksiyonuna göre uygulanacağını belirlemek önemlidir. Detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi işlemi belirlenen bir aralık için bu aralığa dahil olan detay yani dalgacık sabitlerinin sıfırlanması ya da onların kırılması ile gerçekleştirilir. Diğer bir ifadeyle dalgacık sabitlerinin eşiklenmesi işlemi gürültü veya benzer şekilde değerlendirilebilecek önemsiz detay dalgacık sabitlerinin uzaklaştırılması esasına dayanır. Son aşamada ters dalgacık dönüşümü uygulanarak zaman domeninde gürültüden belli bir oranda ayıklanmış ana işaret elde edilir.

Çalışma kapsamında yapılan bu gürültüden temizleme işleminin başarısını sınamak adına işaret gürültü oranı ya da ortalama karesel hata değerleri kullanılmıştır. İşaret gürültü oranı (3.21) denkleminde verilmektedir. Burada W_s ana işarete ait işaret enerjisini, W_n gürültüye ait işaret enerjisini ifade etmektedir. Bir işareti gürültüden temizlemenin amacı, bu işarete ait işaret gürültü oranını artırmaktır.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{W_s}{W_n} \right) \quad (3.21)$$

Uygulamada işarete ait gürültü değeri bilinmemektedir. Bu nedenle gürültüden arındırma çalışmaları sırasında değiştirilen farklı etkenlerin etkinliğinin sınanması amacıyla her benzetim işareti gürültüden temizlendikten sonra ortalama karesel hata (MSE) bulunmuştur. Beklenti, bu hatanın mümkün mertebe küçük olmasıdır. (3.22) denkleminde S başlangıçtaki ana işareti, R gürültülü işaretten gürültü arındırma işlemi yapıldıktan sonra yeniden elde edilen işareti ifade etmektedir.

Analiz sonucunda elde edilen işaretteki genlik bozulmasını değerlendirmek için eşitlik (3.23)'de verilen genlik hatası ME (Magnitude Error) kullanılmıştır. Burada A_o ana işaretin genliğini, A_d ise gürültüden arındırılmış işarete ait genliği göstermektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S(i) - R(i))^2 \quad (3.21)$$

$$ME(\%) = \frac{A_o - A_d}{A_o} * 100 \quad (3.23)$$

3.5 Bölümün Sonuçları

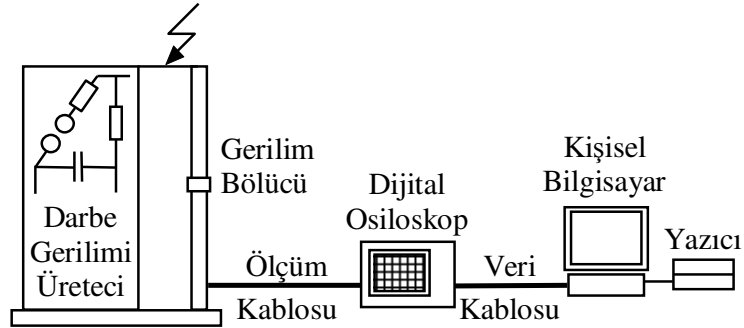
Bu bölümde öncelikle yaygın olarak kullanılan sinyal analiz araçlarının genel değerlendirilmeleri yapılarak avantaj ve dezavantajları ortaya koyulmuş ve dalgacık analizinin Fourier Dönüşümü ve Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'ne göre üstünlükleri belirlenerek tez kapsamındaki amacımıza daha uygun olduğu görülmüştür. Ardından dalgacık analizinin özellikleri verilerek Sürekli Dalgacık Dönüşümü, Ayırık Dalgacık Dönüşümü-Çoklu Çözünürlük Analizi, Durağan Dalgacık Dönüşüm'leri detaylı olarak incelenmiştir. Tezdeki amacımıza yönelik çalışmalar için Ayırık Dalgacık Dönüşümünün kullanılmasının daha yararlı olacağı belirlenmiştir.

Dalgacık dönüşümü ile işaretlerin gürültüden arındırma işlemi genel anlamda üç ana adımda gerçekleştirilir bunlar sırasıyla dalgacık temel fonksiyonu ile işaret ayrıştırma, her ayrıştırma derecesi için gürültü eşiğinin seçimi ve detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi, işaretin son güncellenmiş detay sabitleri kullanılarak yeniden oluşturulması yani Ters Dalgacık Dönüşümünün uygulanmasıdır. Tezde belirtilen çalışma alanları kapsamında bu adımların uygulanmasında seçilebilecek oldukça fazla değişken bulunmaktadır. Yüksek gerilim aygıtlarından alınan işaretleri değerlendiren ve sayıları az olan literatürdeki çalışmalarda kimi zaman bu seçimlerin detayı verilmiş kimi zaman ise seçimlerin deneme yanılmaya göre yapıldığı belirtilmiştir. Bu nedenle dalgacık analizinin sinyal değerlendirmede ya da gürültü temizlemede kullanılmasında belli bir metodolojiye tabi olmasının daha doğru sonucu elde etmek için gerekli olduğu görülmüştür. Bu çalışmada yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen işaretlerin doğru ve etkin bir şekilde değerlendirilmesi için yapılan dalgacık analizinde yukarıda belirtilen adımlardaki söz konusu parametrelerin belirlenmesi izleyen bölümlerde verilmiştir.

4. YÜKSEK DARBE GERİLİMİ ÖLÇÜMLERİ VE DALGACIK ANALİZİ İLE VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Bu bölümde, laboratuvar ortamında elde edilen gürültülü darbe gerilim verilerine tez kapsamında yapılan dalgacık analizi uygulamaları verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan örnek darbe gerilimleri 3600 kV, 180 kJ, 18 katlı bir Marx tipi darbe gerilim üretici tarafından üretilmiştir. Üretilen darbe gerilimleri bir kapasitif darbe gerilim bölücüsü üzerinden örnekleme frekansı 100 MHz olan bir dijital osiloskoba aktarılmakta ve osiloskoptaki dalga şekli verisi de bir bilgisayara kaydedilmektedir. Sözü edilen deney düzeninin şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu düzenle elde edilen darbe gerilimlerinin gürültülü oluşundan dolayı darbe gerilimlerinin genlik ve zaman büyüklüklerinin belirlenmesinde güçlük yaşanmaktadır.



Şekil 4.1 : Darbe gerilimi üretme, ölçme, veri toplama kısımları ile deney düzeni.

Ölçümler sırasında toplanan veride kaçınılmaz olarak bulunan gürültüler temel olarak üç tiptir:

- Yüksek frekanslı sinüsoidal gürültüler (genellikle radyo frekanslı haberleşme sistemlerinden kaynaklanan gürültülerdir),
- Darbe şeklindeki gürültüler (genellikle çevredeki anahtarlanmalı elemanlardan kaynaklanan gürültülerdir),

- Rastgele gürültüler (çeşitli kaynaklara bağlı olabilir, direnç, diyot, transistör gibi elektronik bileşenler tarafından oluşturulan ısı gürültüleri ve ölçme devresindeki ateşleme ve atlama düzenleri gibi aygıtlardan gelen gürültüler).

Darbe geriliminin karakteristik büyüklüklerinin doğru olarak belirlenebilmesi için, dalga şekli üzerindeki gürültünün mümkün mertebe giderilerek işaret / gürültü oranının yükseltilmesi gerekir.

Gürültüyü temizleme, genel olarak işaret ile gürültü spektrumlarının çakışmadığını varsayan filtreleme yöntemine dayanır. Eğer bu iki spektrum arasında çakışma olursa bu durumda gürültü temizleme işlemi sırasında ana işaretin bir kısmı kaybedilebilir [57]. Bu sorunu aşmanın bir yöntemi gürültüyü, sadece frekans spektrumuna göre değil, genliklerini ve oluşum zamanlarını da göz önüne alarak süzmektir. Bu yöntemle göre gürültü içeren işaret, dalgacık dönüşümü sayesinde dalgacık katsayılarına dönüştürülür, belli bir eşik değerinin altındaki dalgacık katsayıları sıfıra eşitlenir ve kalan katsayılar orijinal işareti tekrar oluşturmak üzere ters dalgacık dönüşümü uygulanır. Böylelikle işaret içerisinde gürültüyü temsil eden kısımlar maksimum seviyede ayıklanmaya çalışılır.

4.2 Darbe İşaretine Dalgacık Analizi Uygulamadan Önce Belirlenmesi Gereken Büyüklükler

4.2.1 Ana dalgacığın seçimi

Dalgacık analizi yardımıyla ölçüm sistemiyle elde edilen veriden gürültüyü ayıklama ve gerekli bilgiyi çıkartma işlemi sırasında en önemli adımlarından biri, analizde kullanılacak en uygun ana dalgacığın geniş bir ana dalgacık ailesi içinden seçimidir. Çünkü geçmişte yapılan çalışmalar [58, 59] seçilen ana dalgacığın sonuçlara etkili olduğunu göstermektedir. Literatürdeki çalışmaların incelenmesinden görülmüştür ki; seçimler genellikle araştırmacıların deneyimine ve işaretin şekline göre olmaktadır. Kısmi boşalma işaretlerinin gürültüden arındırılması için uygun dalgacık seçimi [34]'de verilmeye çalışılmıştır. Analiz için kullanılacak ana dalgacığın seçimi, üzerinde çalışılan ana işarete bağlı olarak değişim gösterir. Çünkü ana dalgacık, üzerinde çalışılan işarete ne kadar benzerse sonuçta elde edilen dalgacık katsayıları o derece yüksek değere sahiptir, yani işareti daha iyi temsil etmektedir. Bu bakımdan seçim işlemi için çıkış noktası öncelikle gürültüden arındırılmış işaretin (sonunda elde edilmeye çalışılan) nasıl değişim gösterdiğini belirlemektir.

Darbe geriliminin karakteristik büyüklüklerinin doğru olarak belirlenebilmesi için, dalga şekli üzerindeki gürültünün giderilmesi gerekir. Buradan hareketle öncelikli olarak laboratuvar ortamında elde edilen darbe gerilimlerinin gürültüden arındırmak için çoklu çözünürlük analizinde kullanmak üzere uygun ana dalgacığın seçimi için çalışmalar yapılmıştır.

4.2.1.1 Ana dalgacıkların genel özellikleri

Ana dalgacıkları ayırt eden temel özellikler ortogonallik, simetri, kompakt destek (kapalı ve sınırlı) olarak sıralanabilir.

Ortogonalite

Dalgacığın kendisi ile iç çarpımı sıfıra eşittir, aynı zamanda ana dalgacık ile ötelenmiş ve ölçeklenmiş dalgacığın iç çarpımı da sıfıra eşittir. Bu özelliğe sahip dalgacıkların üstün özelliklerinden biri, bu dalgacıkların çoklu çözünürlük analizinde işareti birbirleriyle örtüşmeyen alt frekans bantlarına ayrıştırabilmesidir. Bunun yanı sıra ayrık dalgacık ve paket dalgacık dönüşümündeki hesaplamalarda etkin olarak kullanılabilmeleri diğer bir üstünlükleridir.

Simetri

Simetrik olma özelliği ana dalgacığın doğrusal faz süzgeci olarak görev yapmasını sağlar. Bu özellik gürültüden arındırma işleminde önemlidir, çünkü bu özelliğin olmayışı faz bozunumuna neden olabilir.

Kompakt destek

Bu özellik ana dalgacığın sadece belirli bir sürede sıfırdan farklı olduğunu belirtir. Bu da dalgacık dönüşümünün etkin bir şekilde işaret içerisindeki yerel özellikleri ortaya koymasında önemlidir.

Çizelge 4.1, yaygın olarak kullanılan bazı dalgacık ailelerinin yukarıda verilen temel özellikler kapsamında sınıflandırılmasını vermektedir.

Çizelge 4.1 : Dalgacık ailelerinin temel özellikleri.

Dalgacık Ailesi	Ortogonallik	Simetri	Kompakt Destek
Haar	Ortogonal	Simetrik	Var
Daubechies	Ortogonal	Asimetrik	Var
Coiflet	Ortogonal	Simetriğe yakın	Var
Symlet	Ortogonal	Simetriğe yakın	Var
Biorthogonal	Biortogonal (çift dikken)	Simetrik	Var
Reverse Biorthogonal	Biortogonal (çift dikken)	Simetrik	Var
Meyer	Ortogonal	Simetrik	Yok
Meksika Şapkası	Yok	Simetrik	Yok

Bu özellikleri iyi anlamak, ana dalgacığın belirlenmesinde kullanılacak en uygun aday dalgacığın seçimi açısından önemlidir. Yukarıda belirtilen tüm dalgacık ailelerine ait dalgacıklar dalgacık dönüşümünde kullanılabilir. Ancak darbe gerilim işaretlerinin değerlendirilmesinde gürültülü işaretten darbe parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayacak optimum dalgacığın belirlenmesi sağlıklı sonuç elde edilmesi açısından önemlidir. Bir önceki bölümde de söz edildiği üzere dalgacık analizi genel anlamda incelenen işaret ile ana dalgacığın ötelenmiş ve ölçeklenmiş versiyonlarının benzerliğini ölçmektedir. Bu bakımdan uygun bir dalgacık ana işarete benzemelidir. Ancak, sadece ana dalgacık ile işarete bakarak gözle bir seçim yapmak doğru bir seçim olmayabilir. Bunun yerine benzerliği sayısal olarak ortaya koyacak bir yöntem gereksinim olduğu düşünülmüştür.

Yapılan araştırmalar sonucunda bu benzerliği belirlemek adına bu tez çalışmasında iki yöntem önerilmiştir. Bunlardan birincisi ana dalgacık ile işaret arasındaki benzerlik, diğeri ise ana dalgacık ile ayrıştırılan işarete ait dalgacık katsayılarının alt bant enerjisidir.

4.2.1.2 Ana dalgacık ile işaret arası benzerlik

Temel yaklaşım, gürültülü veriden sonuçta beklenen ana veriyi elde etmek olduğu için öncelik beklenen dalga şekli ile analiz için kullanılacak aday dalgacığın birbirine olan benzerliğini hesaplamaktır. Korelasyon katsayısı $\gamma(X, Y)$ iki dalga şekli arasında benzerliği ortaya koyabilir.

(4.1)'de X ve Y veri kümeleri arasındaki korelasyonu $\gamma(X, Y)$ belirleyen bağıntı verilmiştir. Korelasyonu hesaplamak için iki veri kümesinin veri sayıları eşit olmalıdır ve (4.1)'de veri sayısı n ile gösterilmiştir.

$$\gamma(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \text{ort}(x))(y_i - \text{ort}(y))}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \text{ort}(x))^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \text{ort}(y))^2 \right]^{1/2}} \quad (4.1)$$

Korelasyon katsayısının değeri (4.2)'de verilmiştir.

$$0 \leq |\gamma(X,Y)| \leq 1 \quad (4.2)$$

Eşitlik (4.2)'den de görülebileceği üzere korelasyon katsayısının değeri 0 ile 1 arasında değişirken, yüksek korelasyon katsayısı yüksek benzerliği temsil etmektedir. Ana dalgacık ile ana işaret arasında elde edilen korelasyon katsayısı ne kadar yüksekse her iki veri arasındaki benzerlik de o denli yüksek olacaktır. Bu bakımdan seçilen ana dalgacığın korelasyon katsayısını en büyük yapması gerekir.

4.2.1.3 Enerji değeri

Dalgacık analizinde herhangi bir ölçekte elde edilen dalgacık katsayılarının genlik olarak büyük olması demek kullanılan ana dalgacığın ilgili ölçekte (dolayısıyla belirli bir frekans aralığında) işaret içerisinden daha iyi bilgi çıkartıyor olması demektir. Yani bir alt bantta dalgacık katsayılarının toplam enerjisinden kullanılan ana dalgacığın başarısını ortaya çıkarmak için yararlanılabileceği düşünülmüştür. Doğru sına için, enerji değeri hesaplanacak alt bant, ilgilenilen işaretin frekans aralığını kapsamalıdır.

Bir $x(t)$ işaretinin enerjisi (4.3) eşitliği ile hesaplanır.

$$E = \int |x(t)|^2 dt \quad (4.3)$$

Ayrık $x(i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) değerleri bilinen bir işaretin enerjisi ise (4.4) eşitliğindeki gibi hesaplanabilir.

$$E = \sum_{i=1}^N |x(i)|^2 \quad (4.4)$$

Dalgacık dönüşümü sonrasında elde edilen dalgacık katsayıları kullanılarak enerji hesaplanmak istenirse (4.5) eşitliği kullanılabilir.

$$E = \iint |W(a,t)|^2 da dt \quad (4.5)$$

Ayrık durumda ise enerji hesabı için (4.6) eşitliği geçerlidir.

$$E = \sum_a \sum_i |W(a,i)|^2 \quad (4.6)$$

Herbir a ölçek değeri için enerji, (4.7) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$E(a) = \int |W(a,t)|^2 dt \quad (4.7)$$

(4.7)'nin ayrık haldeki işaret için geçerli olanı (4.8)'de belirtilmiştir.

$$E(a) = \sum_{i=1}^N |W(a,i)|^2 \quad (4.8)$$

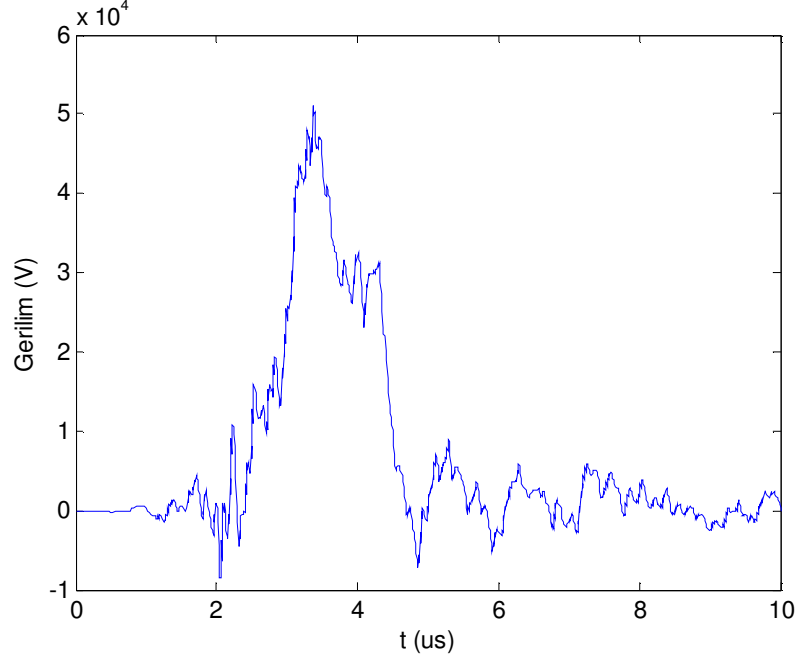
Burada N dalgacık katsayılarının sayısı; $W(a,i)$ ise ilgili a ölçeğindeki dalgacık katsayılarıdır. Bu bağlamda ana işaretten en yüksek değerde enerjinin çıkarılmasını sağlayan, kısacası enerji değerini maksimum yapan ana dalgacık, analiz için en uygun dalgacıktır.

Yukarıdaki ifadeler özetlenirse seçilen ana dalgacık ilgili alt banda ait (üzerinde çalışılan ya da aranan işaret bileşenin gömülü olduğu) dalgacık katsayıları için maksimum enerjiyi sağlamalıdır. Sonuç olarak birçok aday dalgacık içerisinde darbe gerilimi analizinde kullanılacak ana dalgacığın (4.1)'de verilen korelasyon katsayısını ve/veya (4.8)'de verilen enerji ifadesini maksimum yapması beklenir.

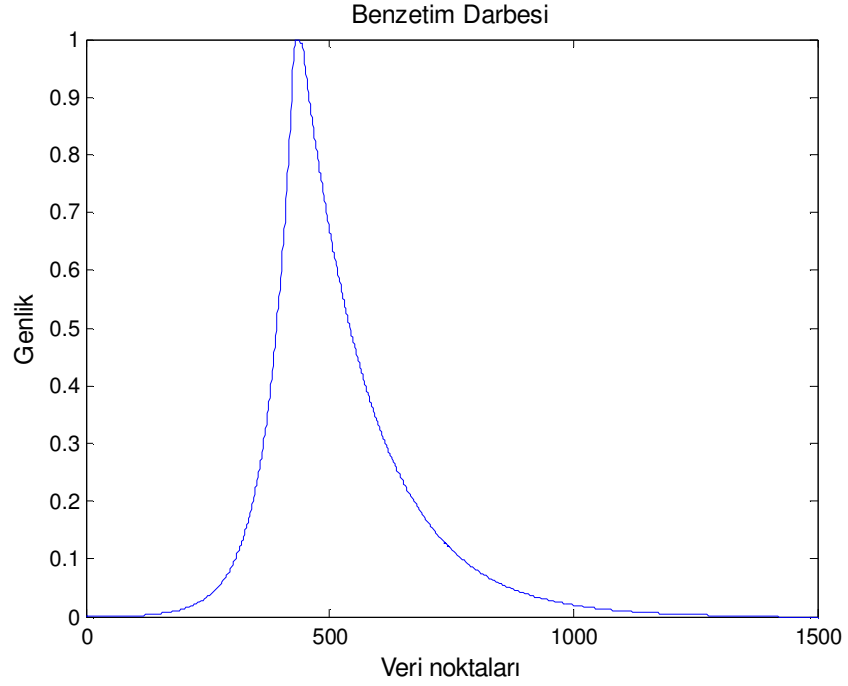
4.2.2 Deneyle elde edilen darbe gerilimi örneği için ana dalgacığın seçimi

Şekil 4.2 laboratuvar ortamında elde edilen bir darbe gerilimini göstermektedir. Bu orijinal deney verisinden görülebileceği üzere darbe gerilimi sebebi bilinmeyen yüksek frekanslı gürültü bileşenleri içermektedir. Orijinal deney verisi çeşitli frekanslara sahip bileşenler içerdiğinden aday dalgacık ile orijinal deney verisi arasında korelasyon katsayısını hesaplamak yerine ilk adım, gürültüden arındırma işlemi ile ana darbe geriliminin şeklini belirlemektir. Buna göre en uygun dalgacığı belirlemek amacıyla yapılacak çalışmada kullanılmak üzere oluşturulan ve temiz darbe gerilimini benzeten çift üstel veri, Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

Ölçümler sırasında kullanılan osiloskobun örnekleme frekansı 100 MHz'dir. Bu da 100 MS/s örnekleme hızı anlamına gelmektedir. Böylece osiloskopta her bir dalga için 1000 veri noktası (örnek) alındığı göz önünde bulundurulursa elde edilen verinin toplam süresi 10 μ s'dir.



Şekil 4.2 : Deneyden elde edilen orijinal darbe gerilimi dalga şekli.



Şekil 4.3 : En uygun dalgacığı belirlemek için ana dalgaya benzer olacak şekilde oluşturulan normalize darbe gerilimi.

Optimum dalgacığı belirlemek için birçok aday dalgacık mevcuttur. Belirtildiğı üzere çoklu çözünürlük analizinizde ana işaretin dalgacığa benzerliğı sonucun doğruluğı için önemlidir. Ana dalgacığı belirlemek üzere (4.1)'de verilen korelasyon katsayının

hesabı Şekil 4.3’de verilen ana dalgaya benzer olacak şekilde oluşturulan normalize darbe gerilimi kullanılarak yapılacaktır.

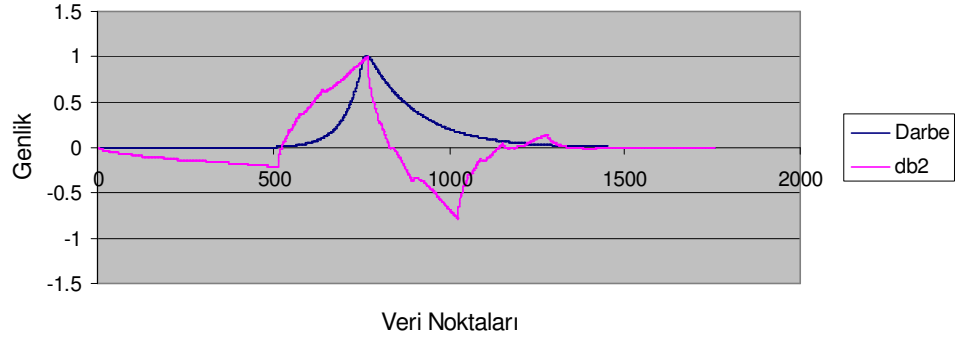
Üzerinde çalışılan darbe gerilimi verisi için X temiz (gürültüden arındırılmış) darbeyi temsil edecek şekilde oluşturulan darbe verisini ve Y de aday dalgacığa ait veri kümesini temsil etmektedir.

Optimum dalgacığın seçimi için aşağıda verilen adımlar oluşturulmuş ve belirlenen yöntemin uygulanması esnasında izlenmiştir:

- a) Analiz için aday dalgacığın seçimi.
- b) Analiz edilen veriden bir miktar uzun olacak şekilde dalgacık fonksiyonlarının uygun veri sayısında oluşturulması. Bu iterasyonla sağlanmaktadır.
- c) Dalgacık verisinin maksimum değeri 1 olacak şekilde normalize edilmesi. Oluşturulan darbe verisinin maksimum değeri zaten 1 olduğu için burada herhangi bir normalize işlemi gerekmemektedir.
- d) Seçilen dalgacığın ve darbe gerilim verisinin tepe noktalarının üst üste çakıştırılması.
- e) Her iki verinin veri noktaları sayısının eşitlenmesi. Bu darbe verisinin başına ya da sonuna yeterli miktarda 0 eklenerek yapılır.
- f) Darbe gerilimi ile aday dalgacık arasında korelasyon katsayısının hesaplanması.

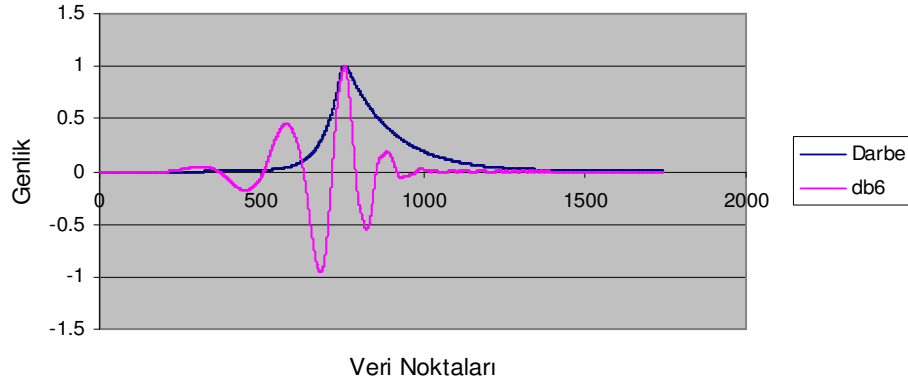
Yukarıda verilen adımlar izlenerek her bir aday dalgacık ile benzetim darbe gerilimi verisi arasında korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 4.4’de ise örnek olarak seçilen Db2, Sym4 ve Coif1 dalgacıkları için korelasyon katsayısı hesabında verilen adımların izlenmesiyle elde edilen karşılaştırma eğrileri gösterilmektedir. Bu örneklerden Şekil 4.4 c)’ye bakıldığında ana dalgacık ile temel işaret arasındaki yüksek oranda benzerlik göze çarpmaktadır. İçlerinde en az benzerlik Şekil 4.4 b)’de görülmektedir.

Oluşturulan darbe gerilimi ve Db2 dalgacı



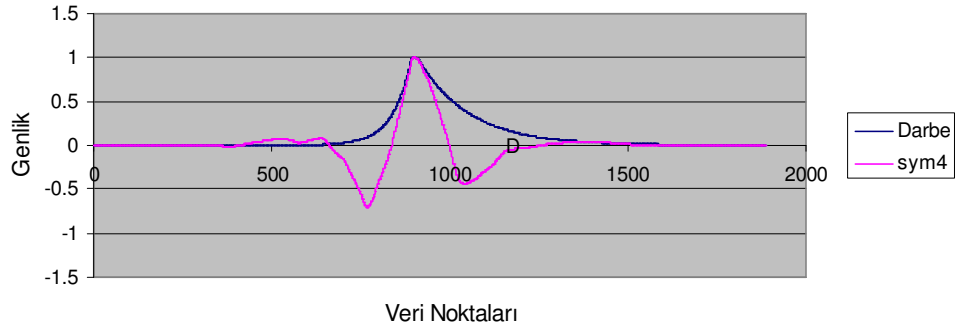
a)

Oluşturulan darbe gerilimi ve Db6 dalgacı



b)

Oluşturulan darbe gerilimi ve Sym4 dalgacı



c)

Şekil 4.4 : Darbe ile a) Db2, b) Db6, c) Sym4 dalgacıklarının karşılaştırılması.

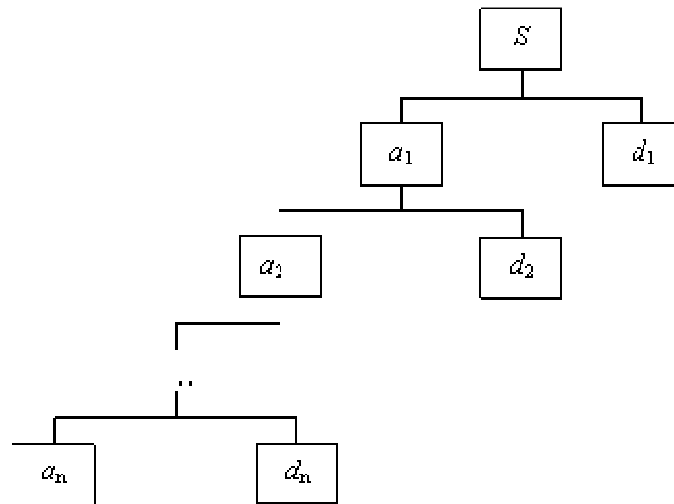
Tüm aday dalgacıklar için bulunan korelasyon katsayıları toplu olarak Çizelge 4.2’de verilmektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde analiz için en uygun aday dalgacıkların coif1, sym4, db3 olduğu görülmektedir. Coif 1 dalgacı en yüksek korelasyonu sağlamıştır. Çizelge 4.1’de verilen dalgacıklara ait temel özellikler hatırlanacak olursa coif1’in işaretten gürültü süzme işlemi için oldukça uygun olduğu da açıktır.

Çizelge 4.2 : Aday dalgacıklar ve bunlara karşı düşen korelasyonlar.

Dalgacık	Korelasyon Katsayısı	Dalgacık	Korelasyon Katsayısı
db2	0.378	sym2	0.448
db3	0.506	sym3	0.285
db4	0.482	sym4	0.532
db5	0.211	sym5	0.414
db6	0.176	sym6	0.257
db7	0.145	sym7	0.157
db8	0.121	sym8	0.240
db9	0.101	coif1	0.763
db10	0.160	coif2	0.489
db20	0.001	coif3	0.245

4.3 Maksimum Ayırıklaştırma Seviyesinin Belirlenmesi

S işaretine ait n-seviyeli frekans ayırıklaştırması şematik olarak Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Düşük frekanslı alt-bant ‘yaklaşım a_i ’ ve yüksek frekanslı alt-bant ‘detay d_i ’ olarak adlandırılır. Böylece işaret tekrardan $S = a_n + d_1 + d_2 + \dots + d_n$ olarak n. seviyede birleştirilebilir.



Şekil 4.5 : S işaretinin n seviyeli ayrıştırılması.

Örnek darbe verisinin alındığı osiloskobun örnekleme frekansının 100 MHz olduğu göz önüne alındığında veriye ait 7 seviyeli bir ayrıştırma için alt bant frekans aralıkları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Seviye-7 ayrıştırma için alt bant frekans aralıkları.

Yaklaşımlar	Alt Bantlar (MHz)	Detaylar	Alt Bantlar (MHz)
a_1	0-25	d_1	25-50
a_2	0-12.5	d_2	12.5-25
a_3	0-6.25	d_3	6.25-12.5
a_4	0-3.125	d_4	3.125-6.25
a_5	0-1.5625	d_5	1.5625-3.125
a_6	0-0.78125	d_6	0.78125-1.5625
a_7	0-0.390625	d_7	0.390625-0.78125

Çoklu çözünürlük analizinde maksimum ayrıklaştırma seviyesinin belirlenmesinde en önemli ölçüt, analizi yapılan işaret içerisinde aranan frekans aralıklarını belirlemektir. Erişilmek istenilen frekans bandına alt bant olarak ayrıştırma ile belli bir seviyede ulaşılmış ise daha ileri ayrıştırma yapmanın bir yararı yoktur. Çizelge 4.3 göz önüne alındığında aranan işaret örnek olarak 5 MHz civarında ise bu durumda detay d_4 3.125-6.25 MHz aralığını kapsayacağı için 4 seviyeli bir ayrıştırma yeterli olacaktır. Buna ek olarak “Matlab Wavelet Toolbox” kullanıldığında en yüksek ayrıştırma seviyesinde verinin uzunluğu, kullanılan dalgacık filtresinin uzunluğundan küçük olmamalıdır. Bu nedenle maksimum ayrıklaştırma seviyesi ayrıklaştırma fitresinin uzunluğuna yani ana dalgacığa bağlıdır. Böylece maksimum ayrıklaştırma seviyesini elimizdeki işaretin uzunluğu ve seçilen dalgacık belirler [44] . İlgili ifade (4.9)’da verilmiştir.

$$l_{\max} = \text{fix}(\log_2(n/n_w) - 1) \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte n işaret uzunluğu (veri noktası sayısı), n_w ise seçilen dalgacığa bağlı olan ayrıklaştırma filtresinin uzunluğudur.

Daha önce Şekil 4.2’de örnek olarak verilen darbe verisi 1000 veri noktasından oluşmaktadır. Diğer bir kabul olarak db3’ün ana dalgacık olarak ayrıklaştırma işlemi için kullanıldığı varsayıldığında (ayrıklaştırma filtre uzunluğu db3 için 6 olmakta) maksimum ayrıklaştırma seviyesi ($l_{\max}$) (4.10)’da verilmiştir.

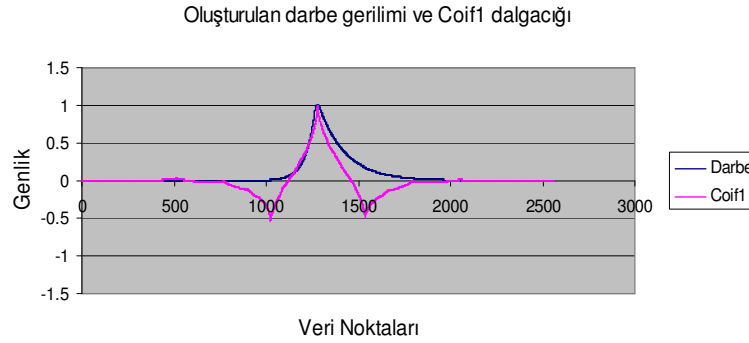
$$l_{\max} = \text{fix}(\log_2(1000/6) - 1) = 7 \quad (4.10)$$

Ayrıştırma seviyesinin yüksek olması gereken durumlarda örnekleme frekansının da yüksek olması, ya da eldeki işarete ait veri noktalarının sayısının artırılması gerekir. Aksi halde, yani en yüksek ayrıştırma seviyesinde verinin uzunluğu, kullanılan dalgacık filtresinin uzunluğundan küçük olduğu durumlarda yanlış sonuç elde edilir.

4.4 Örnek Darbe Gerilimi Verisi Üzerinde Ana Dalgacık Olarak “Coif1”

Seçilmesiyle Elde Edilen Sonuçlar

Çizelge 4.2’de belirtildiği üzere en yüksek korelasyon katsayısı coif1 ana dalgacığı kullanıldığında elde edilmiştir. Şekil 4.6’da coif1 ana dalgacığı için darbe verisi ve ana dalgacık arasında korelasyon katsayısı hesabı için verilen adımların izlenmesiyle elde edilen karşılaştırma verileri gösterilmektedir.

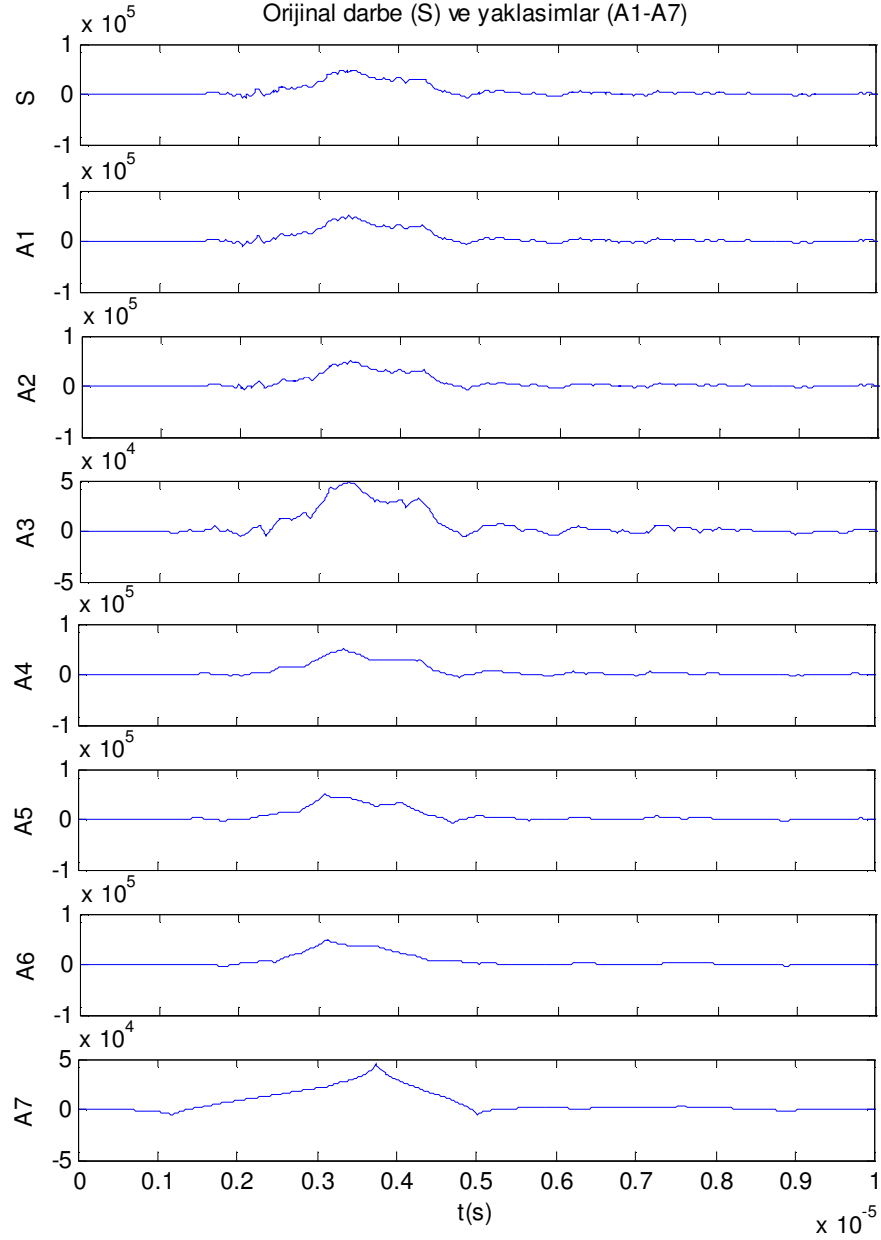


Şekil 4.6 : Oluşturulan darbe verisi ile Coif1 dalgacık verisinin karşılaştırılması.

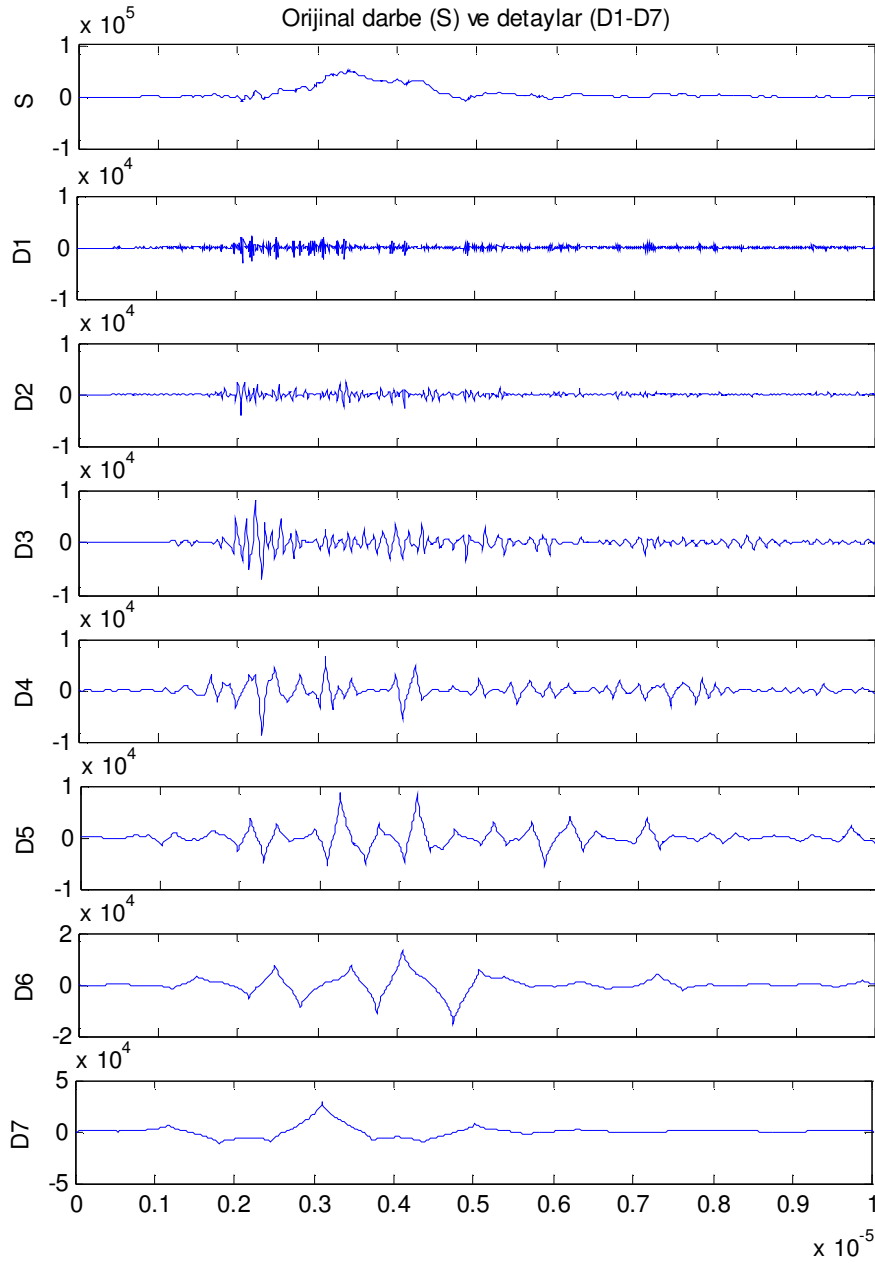
İşaretten gürültü temizleme amacıyla ayrık dalgacık dönüşümü yöntemi ile ana işaret alt frekans bantlarına ayrılır ve gürültüyü oluşturan yüksek frekans bileşeni eşikleme yöntemiyle ayrıştırılarak tekrar birleştirmeye sokulmaz. Böylece yeniden oluşturulan işaret içinde istenmeyen yüksek frekans bileşenleri eşiklenerek ayıklanmış olur. Uygulamalar sırasında MATLAB paket programı kullanılmıştır.

Şekil 4.7’de Şekil 4.2’de verilen deneyden elde edilen darbe verisinin dalgacık analizinde 7 seviyeli olarak coif1 ana dalgacığının kullanılması ile yapılan ayrıştırma işleminde 7 seviyeye kadar her seviyedeki yaklaşım bileşenlerini (A1-A7) ve orijinal darbe geriliminin karşılaştırılması görülmektedir. Diğer taraftan Şekil 4.8’de ise orijinal işaret ile detay bileşenlerin (D1-D7) karşılaştırılması verilmiştir. Buradaki eşikleme işlemi sırasında bu detay frekans bantlarına karşı gelen işaretlerin gürültü olduğu varsayımıyla tüm detay katsayıları sıfır olarak alınmıştır. Kısacası işareti

tekrardan oluşturmak için yeniden birleştirme işlemi sırasında bu detay katsayıları hesaba katılmamıştır. Böylelikle yeniden birleştirmede, aranan işareti temsil eden 0-0.390625 MHz aralığındaki verileri içeren cA7 (7. seviyedeki dalgacık katsayıları) kullanılarak aranan ana işareti elde etmemiz sağlanacaktır.

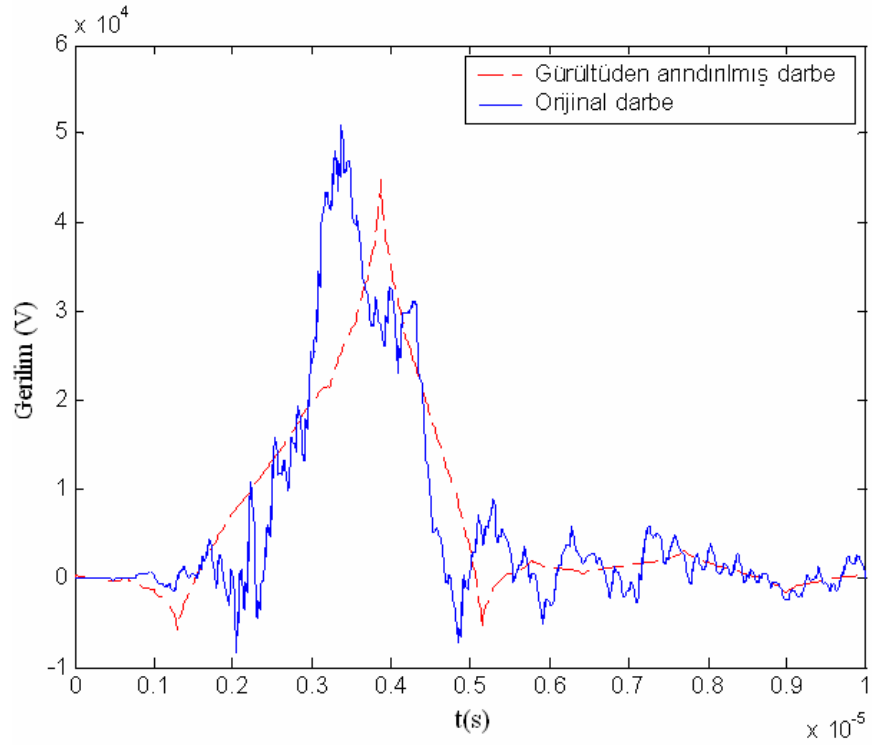


Şekil 4.7 : Orijinal darbe ve yaklaşımlar.

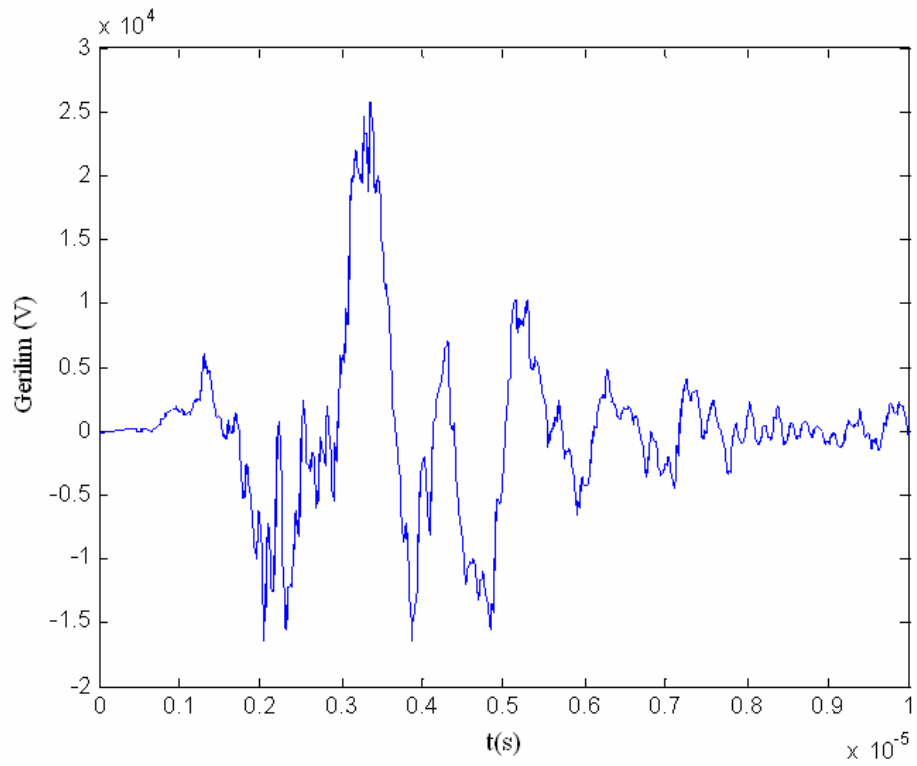


Şekil 4.8 : Orijinal darbe ve detaylar.

Şekil 4.9, adımları daha önceden belirlenen yöntemin uygulanması sonucunda gürültüden arındırılmış darbe gerilimi ile orijinal darbenin karşılaştırılmasını göstermektedir. Buradan görüleceği üzere artık darbe parametreleri (genlik, cephe süresi, oluşum anı) daha rahat tespit edilebilir. Şekil 4.10'da ise gürültü olarak işaretten uzaklaştırılan kısım gösterilmektedir.

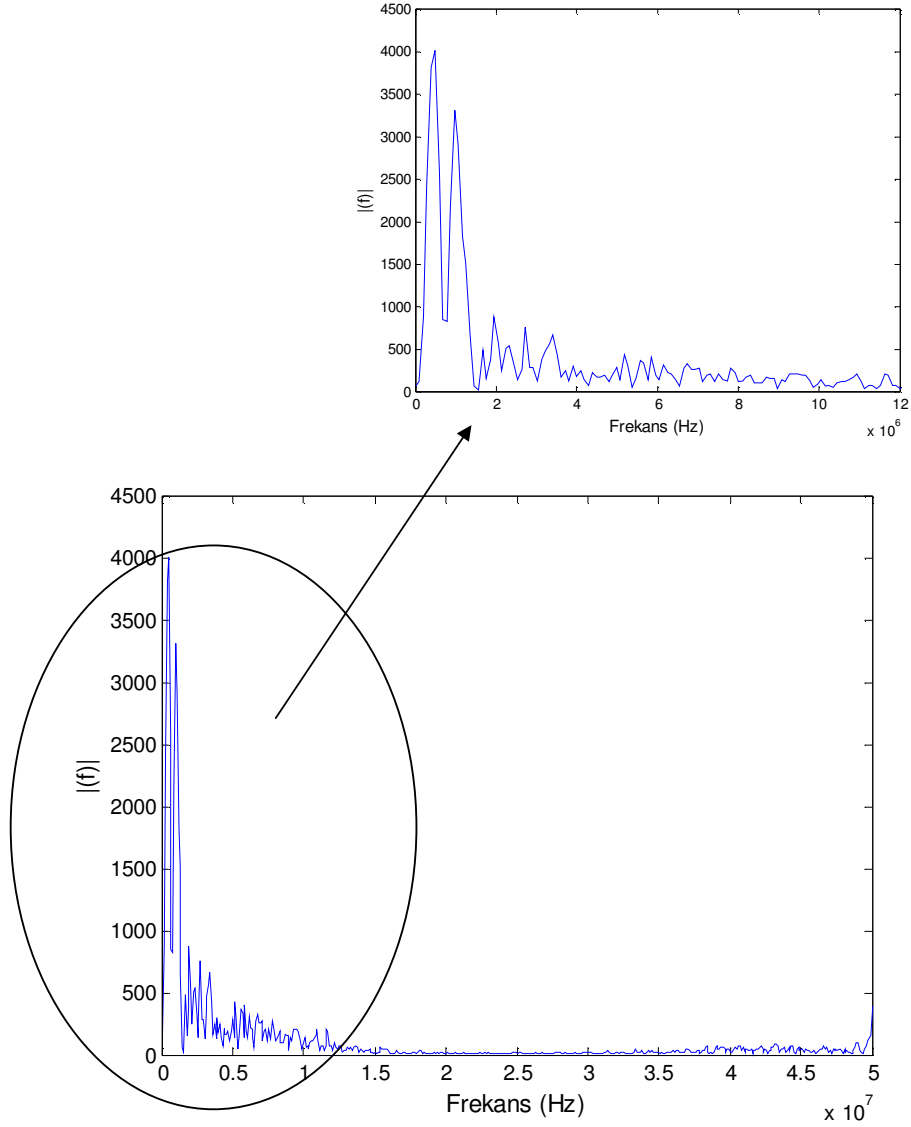


Şekil 4.9 : Orjinal darbe ve gürültüden süzölmüş darbe.



Şekil 4.10 : Süzme işlemi sonucu elde edilen gürültü bileşeni.

Şekil 4.10'da verilen gürültü bileşenin frekans analizi Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11 : Gürültü bileşenine ait frekans spektrumu ve düşük frekans aralığının detay gösterilimi.

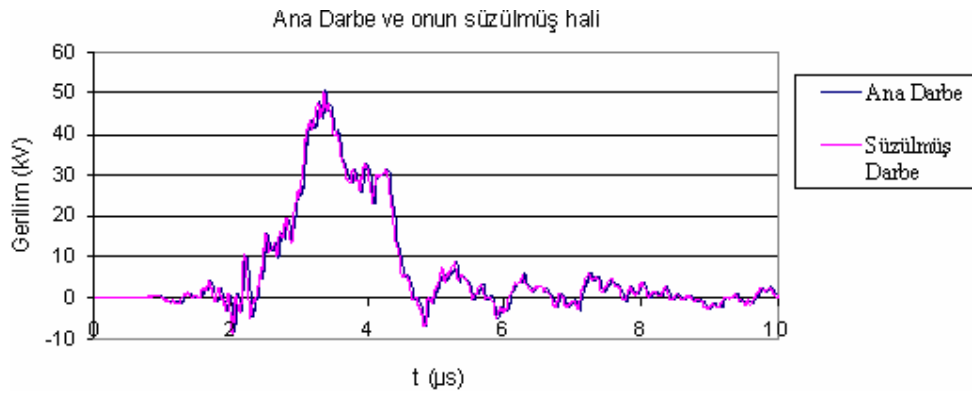
Şekil 4.11’de verilen detay pencereden görülmektedir ki süzülen gürültü içindeki iki temel bileşen yaklaşık 0,5 MHz ve 1,2 MHz civarındadır.

4.5 Ana Dalgacık ve Ayırıştırma Seviyesi Seçiminin Gerçek Darbe Verisi Üzerinden Yapılması

Bir önceki bölümde, deneysel olarak elde edilen orijinal darbe geriliminin benzetimini yapan matematiksel bir fonksiyonla oluşturulan veri kümesi kullanılarak orijinal darbe gerilim verisini gürültüden ayıklanması amacıyla Ayrık Dalgacık

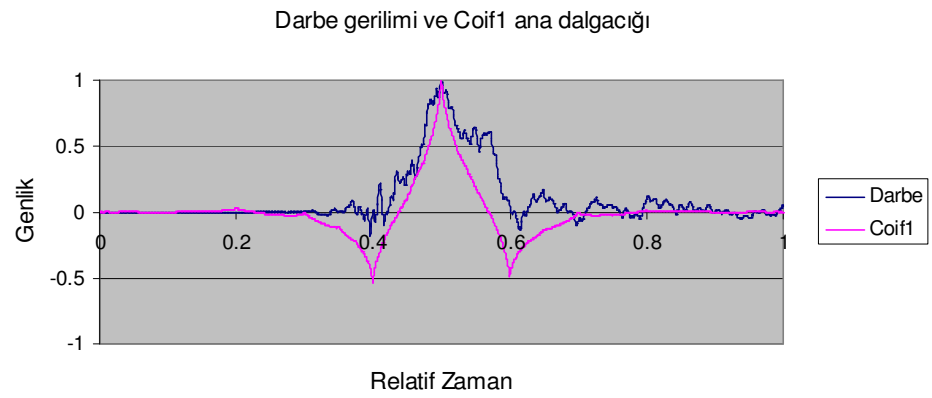
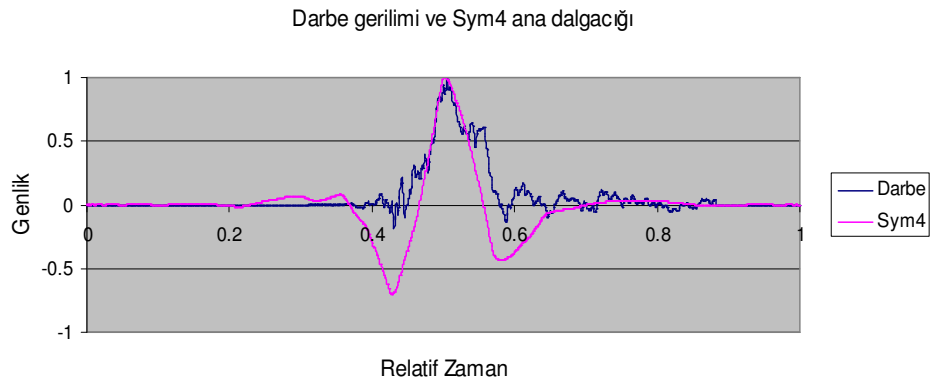
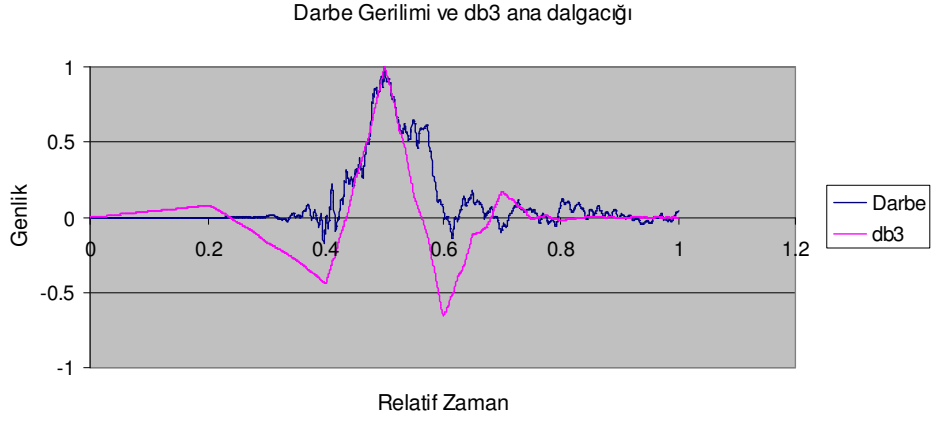
Dönüşümü uygulanması sırasında gereken optimum dalgacık seçimi yapılmıştı. Bu bölümde ise optimum dalgacık seçimi esnasında matematiksel darbe fonksiyonu kullanmak yerine orijinal, gürültü içeren deney sonucu elde edilmiş darbe verisi kullanılarak çalışmalar tekrarlanmıştır.

İlk adım, deney sonucu elde edilen orijinal darbe geriliminin (Şekil 4.2) içerdiği çok yüksek frekansları bileşenleri bir alçak geçiren süzgeç yardımıyla süzmektir. Bu amaçla ana verideki yüksek frekanslı bileşenleri kaybetmemek adına deney sonucu elde edilen orijinal darbe verisi alçak geçiren bir süzgeçten geçirilmiş ve sonuç Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Ana veriyi kaybetmemek için sadece çok yüksek frekansları süzölmüş ve orijinal darbelerin karşılaştırılması.

Bir önceki kısımda verilen ana dalgacığı belirlemek için yapılan korelasyon hesabı orijinal darbe gerilim verisi kullanılarak tekrarlanmıştır. Optimum dalgacığın seçimi için bir önceki kısımda verilen adımlar izlenerek her bir aday dalgacık ile deney sonucu elde edilen darbe gerilimi verisi arasında korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 4.13’de ise örnek olarak Db3, Sym4 ve Coif1 dalgacıkları için korelasyon katsayısı hesabında verilen adımların izlenmesiyle elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Bulunan korelasyon katsayıları, toplu olarak Çizelge 4.4’de verilmiştir.

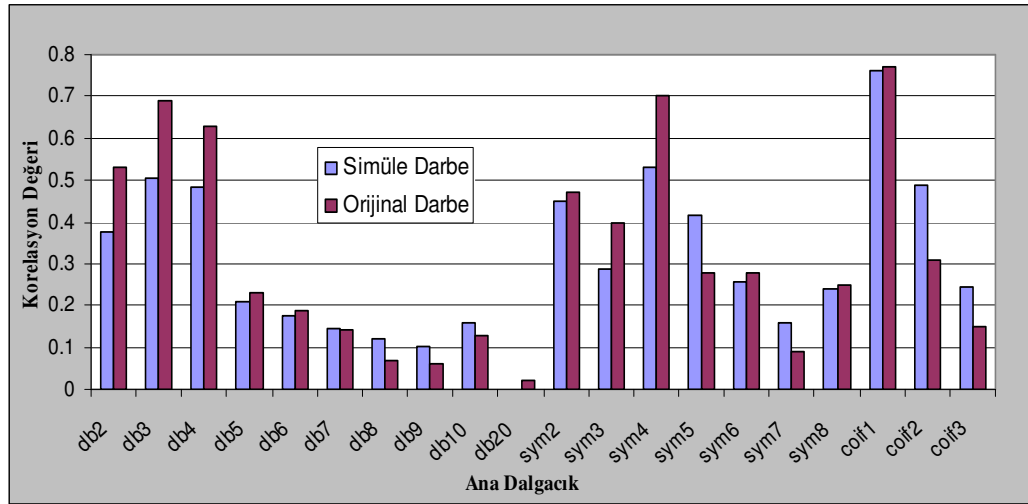


Şekil 4.13 : Darbe gerilimi verisi ile a) Db3, b) Sym4, c) Coif1 ana dalgacılarına ait verilerin karşılaştırılması.

Çizelge 4.4 : Aday dalgacıklar ve bunlara karşı düşen korelasyon katsayıları.

Dalgacık	Korelasyon Kat.	Dalgacık	Korelasyon Kat.
db2	0.53	sym2	0.47
db3	0.69	sym3	0.40
db4	0.63	sym4	0.70
db5	0.23	sym5	0.28
db6	0.19	sym6	0.28
db7	0.14	sym7	0.09
db8	0.07	sym8	0.25
db9	0.06	coif1	0.77
db10	0.13	coif2	0.31
db20	0.02	coif3	0.15

Çizelge 4.4 irdelendiğinde analiz için en uygun aday dalgacıkların coif1, sym4, db3 olduğu görülmektedir. Bu da bir önceki kısımda darbe benzetim yöntemiyle elde edilen sonuçları doğrulamaktadır. Her iki yöntemle de elde edilen sonuçlarda Coif 1 dalgacığı en yüksek korelasyonu sağlamıştır. Bu nedenle bir önceki kısımda verilen gürültüden arındırma işlemi ana dalgacık değişmediği için aynı sonuçları verecektir ve işlemler bu bölümde tekrarlanmayacaktır. Benzetimi yapılan darbe ya da orijinal darbe verilerini kullanarak elde edilen korelasyon katsayılarının karşılaştırılması Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : Benzetim ve orijinal darbe fonksiyonları kullanılarak hesaplanmış korelasyon katsayıları.

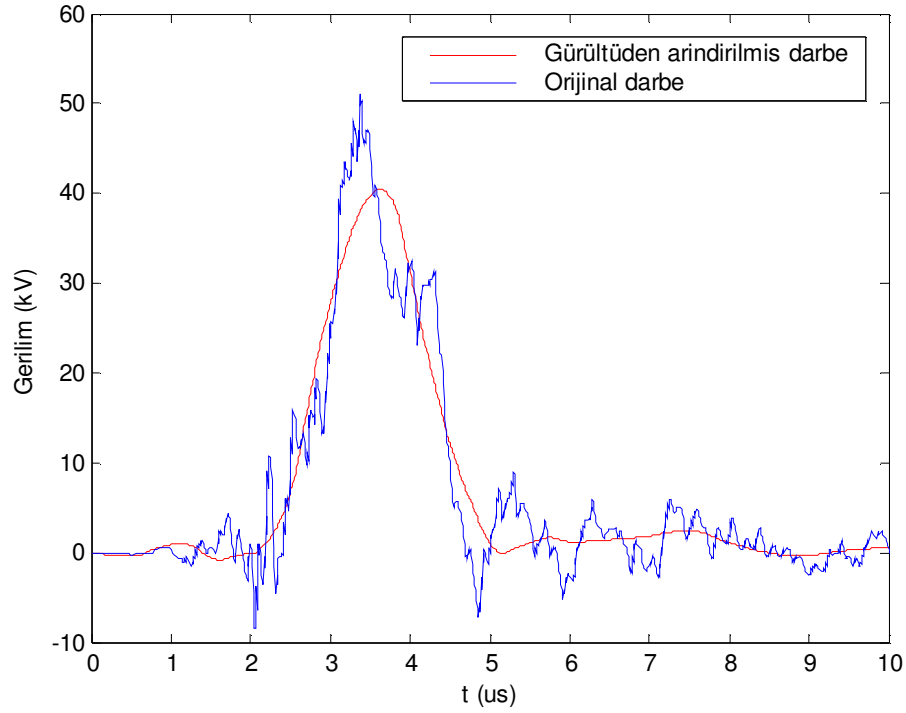
Hatırlanacağı üzere 4.2.1.3 kısmında dalgacık katsayılarından elde edilen enerjinin izlenmesi ile ana dalgacık seçimi açıklanmıştı. Şimdi de dalgacık katsayılarına ait enerji değerleri hesaplanarak optimum dalgacık seçimi yapılacaktır. Eşitlik (4.8) kullanılarak işarete ait ilgili alt bant enerjisi (EA7) deney sırasında elde edilen gürültülü darbe geriliminin aday ana dalgacık ile Ayrık Dalgacık Dönüşümü sonucu elde edilmiş ve sonuçlar toplu olarak Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Aday dalgacıklara göre hesaplanan enerji değerleri (EA7).

Ana Dalgacık	Enerji (EA7)	Ana Dalgacık	Enerji (EA7)
db2	65.44	sym3	60.92
db3	60.92	sym4	59.58
db4	58.92	sym5	68.76
db5	65.78	sym6	61.89
db6	68.45	sym7	62.03
db7	63.04	sym8	63.32
db8	61.46	coif1	68.88
db9	66.64	coif2	61.56
db10	68.40	coif3	62.85
db20	63.18	coif4	62.62
sym2	65.44	coif5	63.02

Çizelge 4.5 incelendiğinde coif1 ana dalgacığının en yüksek değeri sağladığı ve ona en yakın değerin Sym5 ana dalgacığı tarafından sağlandığı görülmektedir. Coif1 ile ayrıştırma elde edilen sonuç Şekil 4.9’da verilmiştir.

Sym5 ana dalgacığının dalgacık katsayılarının enerjisi bakımından Coif1’e en yakın sonucu vermesi üzerine Şekil 4.2’de verilen deneyden elde edilen gürültülü darbe gerilimine çoklu çözünürlük analizi uygulanarak elde edilen gürültüden süzölmüş darbe işareti Şekil 4.15’de verilmiştir. Burada ana dalgacık olarak sym5, ayrıştırma seviyesi 7 olarak kullanılmış ve işaret sadece EA7 yaklaşım katsayıları ile geri birleştirilmiştir.



Şekil 4.15 : Sym5 ile gürültüden arındırılmış darbe ve orijinal darbe şekilleri.

Şekil 4.9 ile Şekil 4.15 kıyaslandığında ana dalgacık seçiminin sonuca ne denli etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Sonuç olarak her ne kadar sym5 ana dalgacığı coif1 ana dalgacığına yakın enerji değeri sağlasa da korelasyon katsayısının daha ayırt edici olduğu görülmüştür.

4.6 Bölümün Sonuçları

Bu bölümde yapılanlar ana başlıklarla özetlenirse:

- Laboratuvar ortamında deney devresi ile gürültüye maruz kalan darbe gerilimi elde edilmiş,
- Gürültü süzme işlemi için temel adımlar tanımlanmış,
- Darbe gerilim verisi için Ayırık Dalgacık Dönüşümü’nde kullanılacak darbe verisi içerisindeki ana veri ve gürültü bileşenlerini ayırt etmede en uygun ana dalgacık, korelasyon katsayısına ve dalgacık katsayılarına ait enerji değerlerine bakılarak tayin edilmiş,
- Ayırık Dalgacık Dönüşümü’nde en uygun ayrıştırma seviyesi belirlenmiş,

- Belirlenen bu parametreler kullanılarak deney sonucu elde edilen darbe gerilim işareti gürültüden ana işaret belirginleşecek şekilde süzölmüştür.

5. KISMİ BOŞALMA DENEYLERİ

Laboratuar ortamında gerçek yüksek gerilim (YG) aygıtları üzerinden kaydedilen ve ana işaretleri oluşturan kaynakları bilinen işaretlerin karakteristik özelliklerinden yararlanılarak ana işaretin dalgacık analizi ile belirlenmesine yönelik çalışma alanlarından bir tanesi de yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen kısmi boşalma (KB) işaretleri üzerinde yapılan çalışmalardır. Bu kapsamda TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bir dizi KB deneyi yapılmıştır. Bu bölümde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

5.1 TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda Yapılan Deneyler

Dalgacık analizinin KB verileri üzerinde kullanımının etkinliğini artırmak adına ilk olarak temel elektrot şekillerinde yüksek gerilim altında elektrotlarda kısmi boşalmalar oluşturacak şekilde ölçümler yapılmış ve elde edilen veriler depolanmıştır. Buradaki temel amaç elektrot tiplerinin kısmi boşalma davranışlarını belirlemek ve dalgacık analizinin KB işaretlerini gürültüden (dış kaynaklı, ölçüm sistemi kaynaklı) etkin bir şekilde ayırabilme yeteneğini geliştirmeye katkı sağlamaktır.

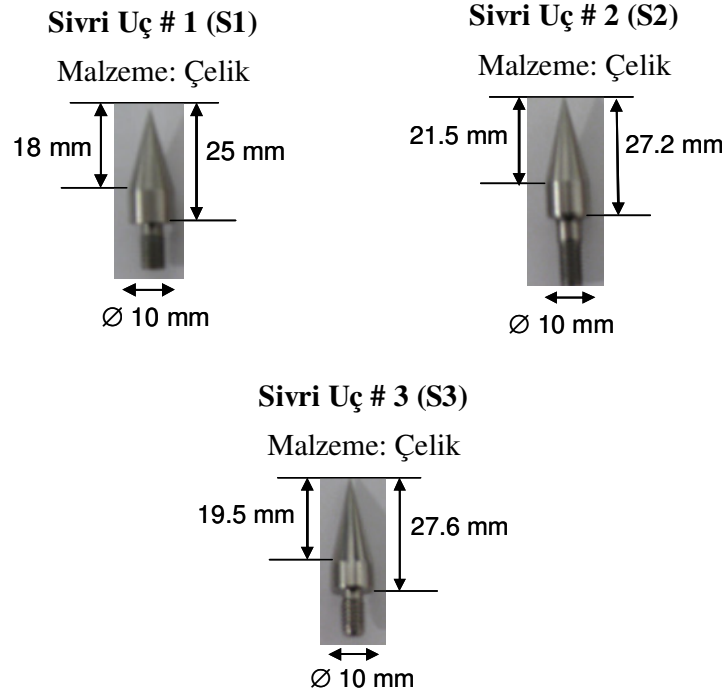
Belirtilen amaca yönelik olarak TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bulunan yeni nesil bilgisayar destekli kısmi boşalma ölçüm sisteminden yararlanılarak temel elektrot sistemlerinde alternatif gerilimde bir dizi kısmi boşalma ölçümleri yapılmıştır. Ardından yapılan bu ölçümler yorumlanarak işaretlerin sınıflandırma çalışmaları için bir temel oluşturması sağlanmıştır.

5.1.1 Kullanılan elektrotlar

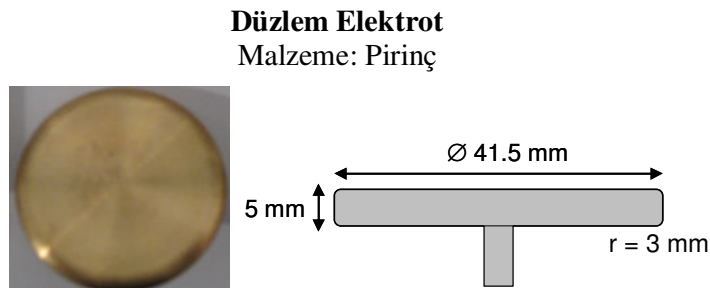
Şekil 5.1'de deneyler sırasında kullanılan genel elektrot türleri, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de de sırasıyla sivri uç ve düzlem elektrotların boyutları gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Deneylerde kullanılan elektrot türleri.



Şekil 5.2 : Sivri uçlu elektrotlar.



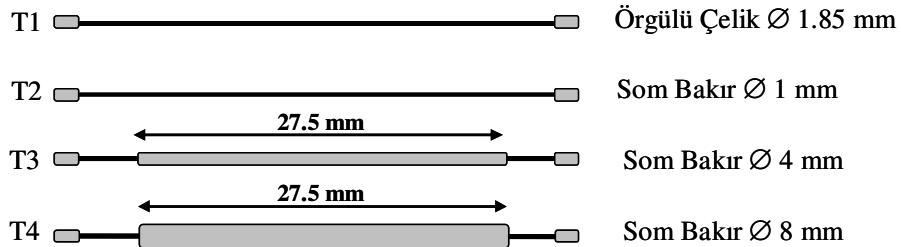
Şekil 5.3 : Düzlem elektrot.

Şekil 5.2 ve 5.3'teki elektrotlar dışında eş eksenli (koaksiyel) elektrot düzeninde kullanılmak üzere çelik ve bakır tel elektrotlardan da yararlanılmıştır. Şekil 5.4, eş eksenli elektrot düzenini ve iç elektrotlarını göstermektedir. Eş eksenli elektrot düzeninde silindir şeklindeki dış elektrot topraklanmakta ve içine ise farklı çaplarda ve yapılar (içi dolu ve örgülü) tel elektrotlar yerleştirilerek bu elektrotlara gerilim uygulanabilmektedir. Bu iç ve dış elektrotlar, deney silindirinin üstündeki ve altındaki pleksiglas malzemeden kapaklarla birbirinden yalıtılmış durumdadır. Bu düzenek, yeterli gerilim seviyesinde gerilim uygulanan tel iletkende kısmi boşalma oluşturarak iyi bir KB üretici olarak görev yapabilmektedir. Şekil 5.5'de ise kullanılan çelik ve bakır iç iletkenlerin boyutları verilmektedir.

Eş eksenli elektrot düzeni Çelik ve bakır iç iletkenler



Şekil 5.4 : Eş eksenli (koaksiyel) elektrot düzeni ve iç iletkenler.



Şekil 5.5 : İç iletkenlerin şekilleri ve boyutları.

5.1.2 Deney devresi

Ölçümler sırasında Lemke Diagnostics GmbH (LDIC) firması tarafından üretilmiş olan LDS-6 Kısmi Boşalma Ölçüm sistemi kullanıldı. Bu sistem, IEC 60270 ve VDE 0434 standartlarına göre ölçüm yapmaya uygun üretilmiş bir kısmi boşalma ölçüm sistemidir. Ölçüm sisteminin bilgisayar arayüzü Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

Sistemin başlıca özellikleri şunlardır [60]:

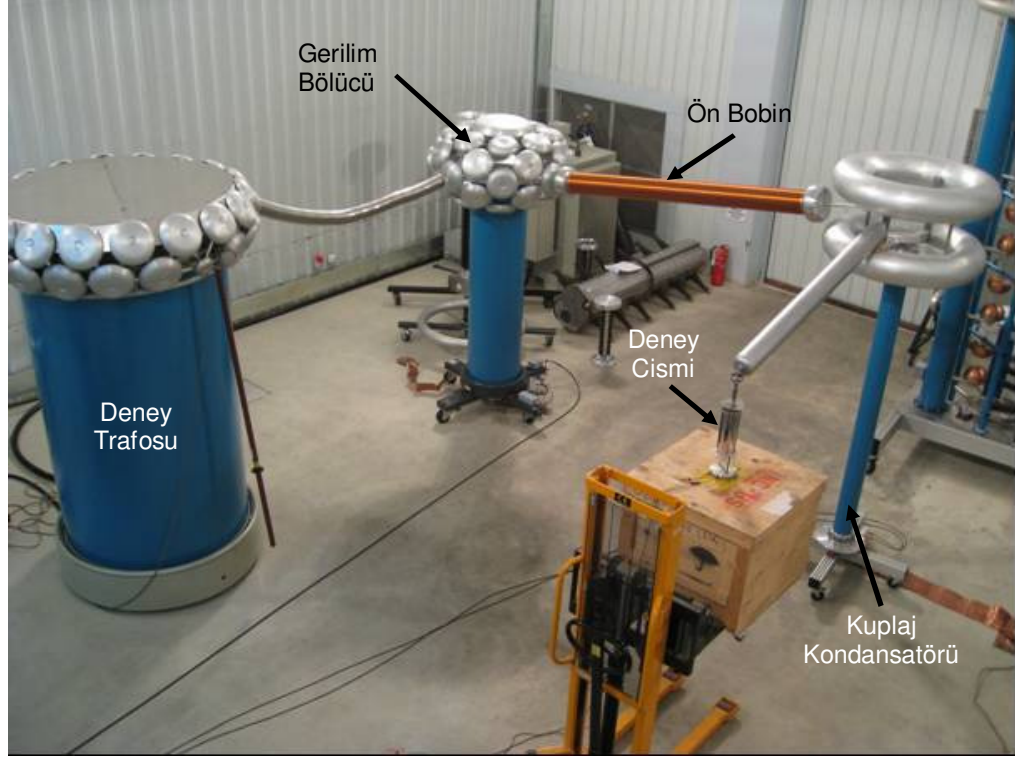
Duyarlılık: 1 picoCoulomb (pC)'dan 100,000 pC'a kadar.

Üst frekans: 20 MHz



Şekil 5.6 : LDS-6 (LDIC) Kısmi boşalma ölçüm sisteminin bilgisayar arayüzü.

Farklı gerilimler altında kısmi boşalma değerleri ölçülecek deney cisimleri Şekil 5.7'de verilen deney düzeneğine yerleştirilerek alternatif gerilim altında, genellikle gerilim, yaklaşık 2 kV/s hızla artırılarak kısmi boşalmanın başlangıç gerilimi saptandı. Ardından belirli bir gerilim uygulanarak oluşan kısmi boşalma işaretleri ileriki değerlendirmeler için kaydedildi.



Şekil 5.7 : Deney devresi.

Deney devresindeki aytıtlara ait özellikler Çizelge 5.1, Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Yüksek gerilim deney trafosu özellikleri.

Marka: High Volt
Model: PEIOI 200/400
Anma Gücü: 200 kVA
Çıkış Gerilimi: 400 kV, 50 Hz
Giriş Gerilimi: 500 V, 50 Hz
Genişlik: 1490 mm
Yükseklik: 3000 mm
Ağırlık: 5500 kg

Çizelge 5.2 : Ön bobin (empedans) özellikleri.

Marka: High Volt
Model: LS 1/400
Anma Gerilimi: 400 kV
Anma Akımı: 1 A
Anma Endüktansı: 50 mH
Frekans: 50 Hz

Çizelge 5.3 : Gerilim bölücü özellikleri.

Marka: High Volt
Model: MCP 400
Ölçüm Aralığı: 1 kV-400 kV AC 50 Hz
YG Kapasitesi, C1: 103.319 pF
AG Kapasitesi, C2: 16.004 pF
Yalıtım Gazı: SF6
Genişlik: 1250 mm
Yükseklik: 2580 mm
Ağırlık: 325 kg

Çizelge 5.4 : Kuplaj kondansatörü özellikleri.

Marka: High Volt
Model: WMCF 1.25/400 TE
Ölçüm Aralığı: 1 kV-400 kV AC 50 Hz
Anma Gerilimi: 400 kV
Kapasitesi: 1 nF

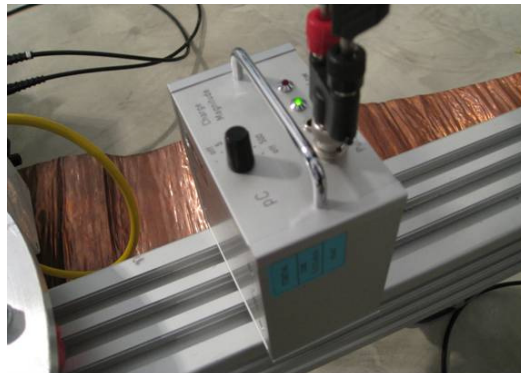
5.1.3 Ortam koşulları

Deneyler sırasındaki laboratuvar ortam (hava) koşulları aşağıda verilmiştir.

Sıcaklık: 22°C, Bağıl nem: %32, Basınç: 995 mbar.

5.1.4 Yapılan ölçümler

Yapılacak kısmi boşalma ölçümlerin doğruluğunu sağlamak amacıyla ilk olarak LDC-5 modelinde LDIC firmasına ait kısmi boşalma kalibratörü (Şekil 5.8) kullanılarak ölçüm sistemi 5 pC'da doğru kısmi boşalma ölçümü yapabilecek şekilde kalibre edilmiştir.

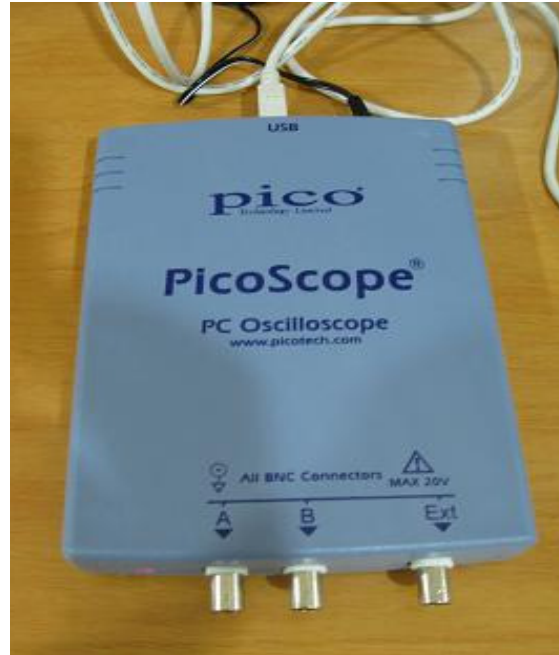


Şekil 5.8 : LDIC KB kalibratörü.

Ölçümlere iç iletkeni örgülü çelik tel olan eş eksenli silindrsel elektrot düzeni (T1, Şekil 5.5) ile başlanmıştır. Deneylerde dış silindir elektrot topraklanmış, örgülü çelik tel elektroda yüksek gerilim uygulanmıştır. Gerilim yaklaşık 2 kV/s hızla artırılarak örgülü çelik tel için belirtilen düzeneğe kısmi boşalma başlangıç gerilimi 12 kV olarak saptanmıştır. Daha sonra gerilim yaklaşık aynı hızla azaltılarak boşalmanın sönme geriliminin 8,5 kV olduğu görülmüştür.

Boşalma değerleri i_{xd} ve I_{xd} uzantılı dosyalar olarak kaydedilmiştir. Başlangıçta yapılan kayıtlar genelde 20 ila 30 saniye arasındaki zaman dilimlerinde yapılmasına rağmen, bu durumda elde edilen verinin depolanmasında ve özellikle işlenmesinde sorun yaratacağı için ölçümler için genellikle 10 saniyelik bir süre uygun görülmüştür. 50 Hz’de bir periyodun 20 ms olduğu dikkate alındığında yaklaşık 500 periyodluk süre içinde oluşan tüm KB’lar kaydedilebilmiştir.

Ölçümler sırasında uygulanan gerilimin dalga şeklini görebilmek adına Picoscope marka bir PC osiloskobu kullanılmıştır. Uygulanan gerilim, çevirme oranı 1/1111 olan bir gerilim bölücü üzerinden PC osiloskobuna verilmiştir. Şekil 5.9 kullanılan PC osiloskobu göstermektedir.



Şekil 5.9 : PC osiloskop.

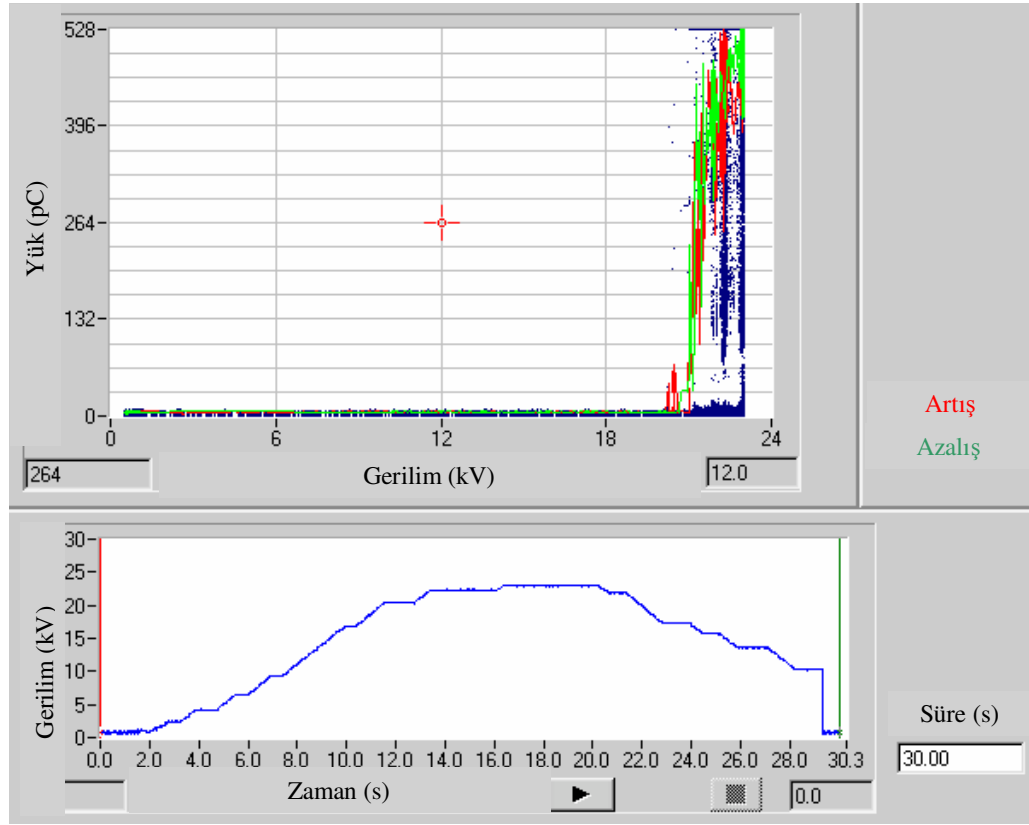
LDIC yazılımı deney düzeneğinden ve dış kaynaklardan gelebilecek gürültüyü ayıklamak üzere kullanıcıya ölçüm için eşik değeri seçim olanağı sunmaktadır. Seçilen bu değerin altındaki kısmi boşalma değerleri elenmektedir ve bu değer sisteme pC olarak girilmektedir. Sisteme elle (manuel olarak) girilen bu değerin esas amacı dış etkenlerden ve ölçüm devresinden gelen işaretlerin ayıklanmasını sağlamaktır. Ancak yapılan bir dizi deneylerden elde edilen deneyime dayanılarak söylenebilirki; ölçümler sırasında eşik değerin girilmesi sırasında oldukça dikkatli olunması gerekmektedir. Çünkü eşik değerin seçimi sonuçları etkilemekte olup seçilecek değer için bir kıstas bulunmamaktadır. Bu nedenle eşik değerin yüksek tutulması kimi küçük değerdeki boşalma işaretlerinin de kaybedilmesi anlamına gelmektedir.

Örgülü iletkenin kullanıldığı deney düzeneği için bu eşik değeri 33 pC olarak seçildiğinde kısmi boşalma başlangıç değeri 12 kV olarak bulunmuş iken, eşik değeri 4 pC'a çekildiğinde bu değer 11,95 kV olarak elde edilmiştir. Bu sonuç bir önceki paragrafta belirtilen eşik değerin seçilmesindeki önemi vurgulamaktadır.

Ölçümler daha önce belirtilen dört iç elektrot için tekrarlanmıştır. Ancak bu bölümde sadece 4 mm çaplı T3 iletkeni için elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

5.1.4.1 T3 iletkeni (4 mm çaplı) için kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin bulunması

Şekil 5.7'deki deney düzeneği kurularak T3 iletkeni eş eksenli elektrot düzenine yerleştirilmiş ve iletkene gerilim verilerek 30 saniyelik süre içerisinde gerilim 0 kV'tan 23 kV değerine kadar kademeli olarak artırılıp tekrardan azaltılmıştır. Bu süre içerisinde ilk kayda değer KB işareti 21,5 kV'ta görülmüştür. Aynı değere ölçümler sonucunda elde edilmiş olan veri kümesi incelenerek de ulaşılabilmektedir. KB sönme gerilimi ise yaklaşık 21 kV'tur. Şekil 5.10'da uygulanan gerilime göre kısmi boşalma değişimi (yük değişimi) pC cinsinden görülmektedir.



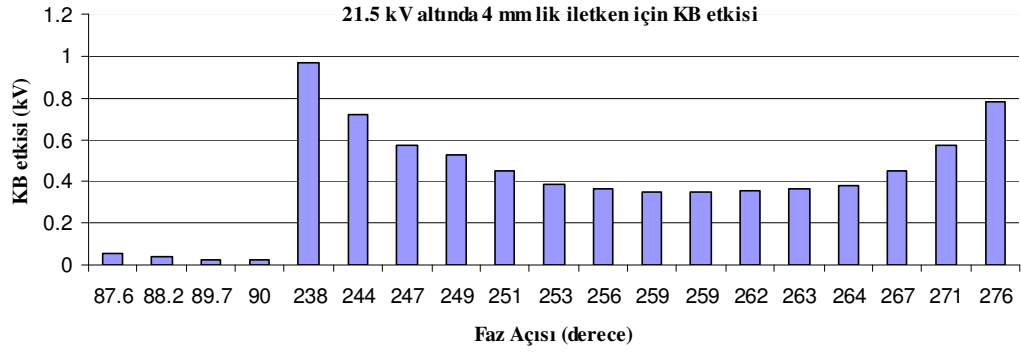
Şekil 5.10 : Gerilime göre kısmi boşalma değişimi (T3 iletken).

Çizelge 5.5’de 2 periyotluk süre için 21,5 kV gerilim altında T3 iletkeninde oluşan KB’lar verilmektedir. Bu çizelgeden görüleceği üzere elde edilen kısmi boşalma yük değerleri pC cinsinden oldukça yüksek değerlerdir.

Çizelge 5.5 : 4 mm bakır iletken, 2 periyoda ait KB ölçüm ve hesaplama değerleri.

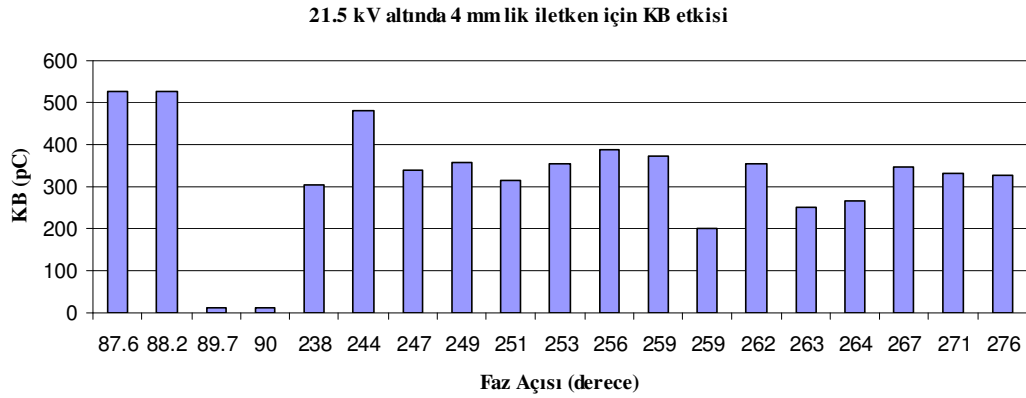
Periyot	Faz (derece)	Yük q (pC)	Toplam Gerilim V (kV)	Ana Dalga Gerilimi (kV)	KB etkisi (kV)
1	87.6	527.12	30.43	30.37892	0.051079
1	88.2	527.12	30.43	30.39059	0.039412
1	89.7	12.38	30.43	30.40517	0.024825
1	90	12.38	30.43	30.40559	0.024408
1	238.4	303.27	-24.93	-25.8973	0.967261
1	244.3	481.73	-26.68	-27.3978	0.71778
1	247.2	339.38	-27.46	-28.0298	0.569794
1	249	358.98	-27.86	-28.3861	0.526065
1	251	315.65	-28.3	-28.7491	0.449052
1	253.4	354.85	-28.75	-29.1384	0.388365
1	256.1	388.89	-29.15	-29.5152	0.365209
1	258.5	371.36	-29.45	-29.7952	0.34519
1	259.3	201.15	-29.53	-29.8769	0.346923
1	261.7	352.79	-29.73	-30.0871	0.357117
1	262.8	250.67	-29.8	-30.1658	0.365834
1	264.2	264.08	-29.87	-30.2499	0.379937
1	267.3	344.54	-29.92	-30.3718	0.451838
1	270.8	332.16	-29.83	-30.4026	0.572628
1	275.8	325.97	-29.47	-30.2499	0.779937
2	81.8	527.12	30.2	30.09473	0.105268
2	82.3	527.12	30.24	30.13143	0.10857
2	84	13.41	30.33	30.23903	0.090973
2	84.2	10.32	30.34	30.24994	0.090063
2	239.9	283.68	-25.43	-26.3054	0.875441
2	244.4	338.35	-26.72	-27.4208	0.700751
2	246.5	316.68	-27.28	-27.8838	0.603754
2	250	374.45	-28.08	-28.5719	0.49191
2	252.3	360.01	-28.55	-28.9662	0.416236
2	254.5	351.76	-28.93	-29.2998	0.369754
2	256.5	349.69	-29.21	-29.5655	0.355483
2	258.9	356.92	-29.5	-29.8368	0.336784
2	262.3	395.08	-29.77	-30.1314	0.36143
2	265.5	378.58	-29.9	-30.3119	0.411861
2	267.8	329.06	-29.92	-30.3832	0.46318
2	272	337.32	-29.78	-30.3871	0.607069
2	275.2	310.5	-29.52	-30.2805	0.760454

Şekil 5.11, KB'lerin oluşturmuş olduğu gerilim darbelerini göstermektedir. Bu değerler ölçümler sırasında elde edilen toplam gerilim değerinden uygulanan sinüsoidal gerilimin çıkarılması ile elde edilmiştir.



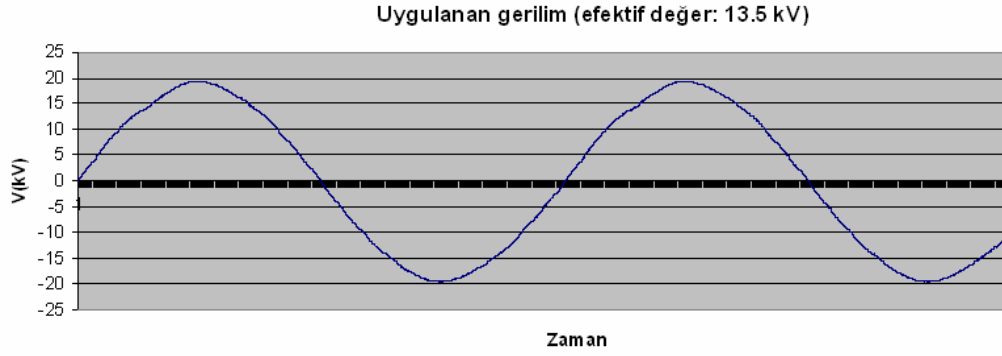
Şekil 5.11 : 4 mm çaplı iletken için 21,5 kV’da KB etkileri (sadece ilk periyot için).

Şekil 5.11’de verilen sonuçlar irdelendiğinde 4 mm çaplı iletken üzerinde yapılan ölçümlerde kısmi boşalma işaretlerinin özellikle gerilimin negatif yarı dalgasında etkili olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 5.12’de iletken (T3) 21,5 kV uygulandığında oluşan KB darbelerinin gerilimin faz açısına göre pC olarak yük değerlerini göstermektedir.



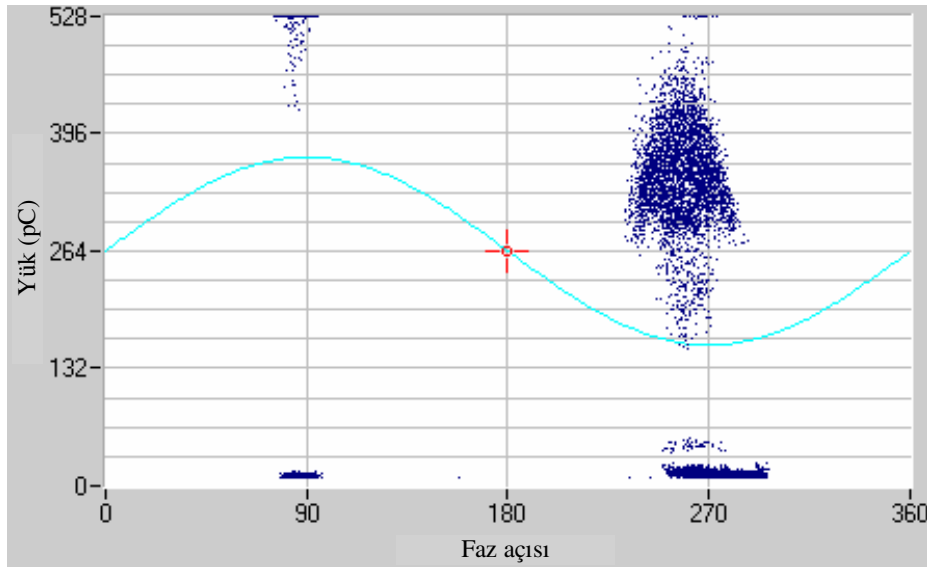
Şekil 5.12 : 4 mm çaplı iletken için 21,5 kV gerilim altında KB değerlerinin pC cinsinden yük değerleri (sadece ilk periyot için).

Şekil 5.11 ve 5.12 irdelendiğinde ana beklenti bu iki grafiğin birbirine daha benzer olmasıydı. Çünkü Şekil 5.11 KB işaretlerinin uygulanan gerilim üzerine yaptığı etkiyi gösterirken Şekil 5.12 bu kısmi boşalma etkilerinin pC cinsinden değerini göstermektedir. Bu temel farkın deneyler sırasında uygulanan gerilimin dalga şeklinin kısmi boşalma ölçümünü yapan LDIC sistemi yerine PCscope ve ayrı bir gerilim ölçme düzeninden alınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Örnek olarak 13,5 kV değerinin PC osiloskop cihazı ile elde edilen gerilimin dalga şekli, Şekil 5.13’te verilmiştir.



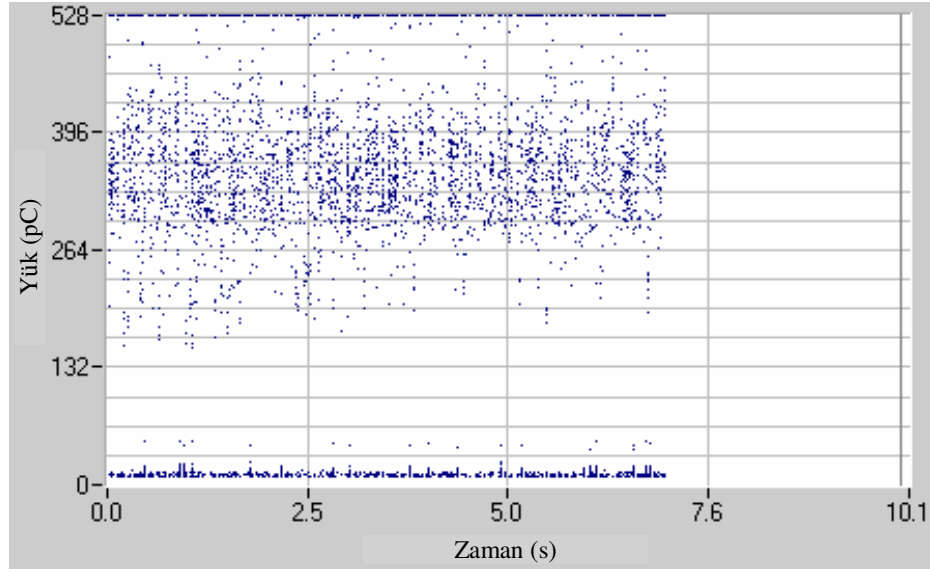
Şekil 5.13 : PCScope cihazından alınan örnek bir gerilim dalga şekli.

Şekil 5.14 T3 iletkeni için 21,5 kV gerilim değeri altında KB işaretlerinin gerilimin faz açısına göre değişimlerini vermektedir. Doğal olarak boşalmalar gerilimin tepe değerleri ya da bunlara değer olarak yakın noktalarda toplanmışlardır. Ancak negatif tepe değerde oluşan darbe sayısının pozitif tepe değerde oluşan darbe sayısı ile kıyaslandığında negatif değerin üstünlüğü göze çarpmaktadır.



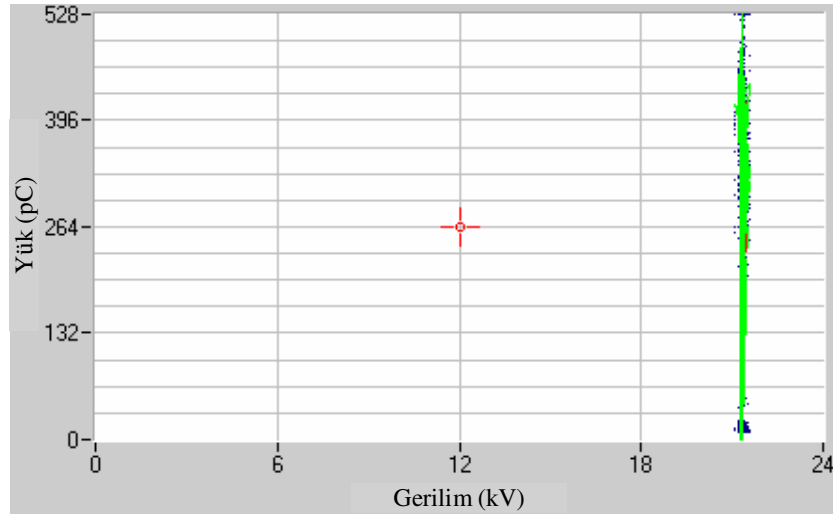
Şekil 5.14 : T3 iletkeni için 21,5 kV’da KB’ların faz açısıyla değişimi ($t = 10$ s).

Şekil 5.15 ise 10 saniyelik süre içinde 21,5 kV da oluşan tüm KB’ların zamana göre dağılımını göstermektedir. KB’ların zamana göre hemen hemen düzgün bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



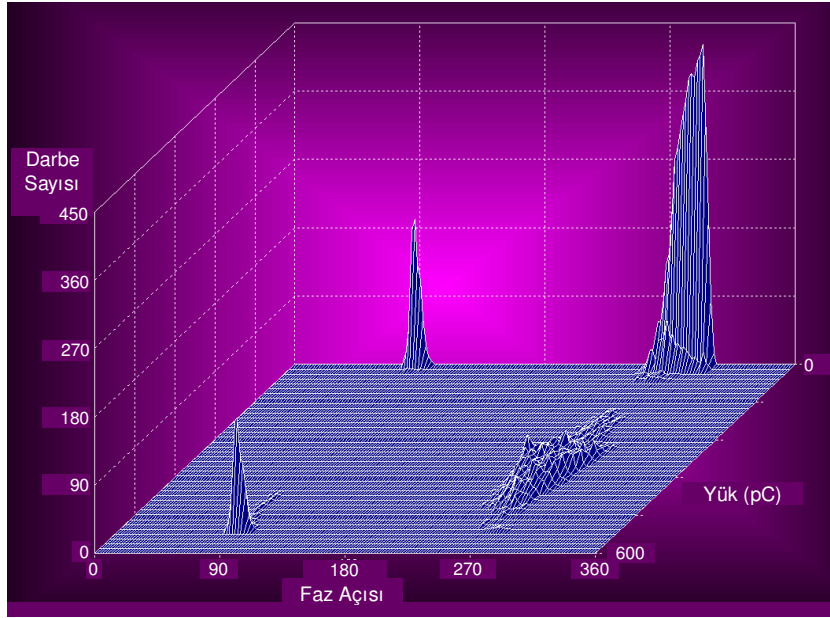
Şekil 5.15 : T3 iletkeni 21,5 kV’da KB değerlerinin zamana göre değişimi ($t = 10$ s).

Şekil 5.16’da T3 iletkeni için 21,5 kV gerilim altında KB’ların dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 5.16 : T3 iletkeni 21,5 kV’da KB değerlerinin gerilimle değişimi ($t = 10$ s).

Şekil 5.17, T3 iletkeni için 21,5 kV gerilim altında yük, faz açısı ve darbe sayısının toplu gösterilimini vermektedir.



Şekil 5.17 : T3 iletkeni için 21,5 kV’da KB değişimi ($t = 10$ s).

Şekil 5.14 ve Şekil 5.17’den görüldüğü üzere KB’lerin tamamı faz açısının 90° ve 270° olduğu bölgelerde toplanmıştır. Özellikle 270 derecede KB’lerin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur, negatif yarı dalganın maksimum değerinde ve bu değerin çevresinde kısmi boşalmalar yoğunlaşmıştır.

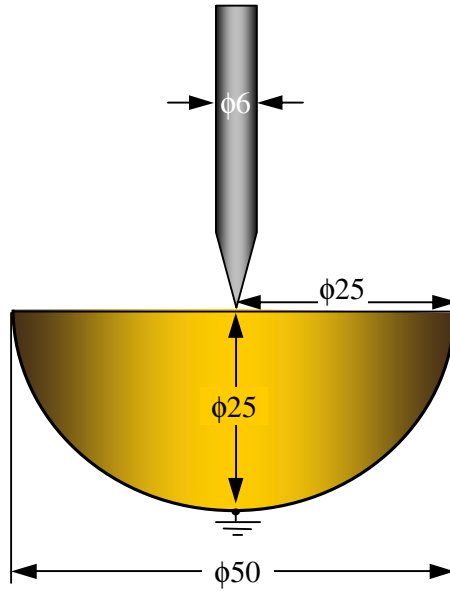
5.1.5 Sivri uç yarım küre elektrot sistemi

Eş eksenli elektrot düzeni kullanılarak yapılan KB ölçümlerinin ardından ölçümlere standart sivri uç-yarım küre elektrot düzeni kullanılarak devam edilmiştir. Şekil 5.18, Şekil 5.7’deki deney düzeneğinde kullanılan, elektrotları pirinçten imal edilmiş standart sivri uç-yarım küre elektrot deney düzeneğini göstermektedir.



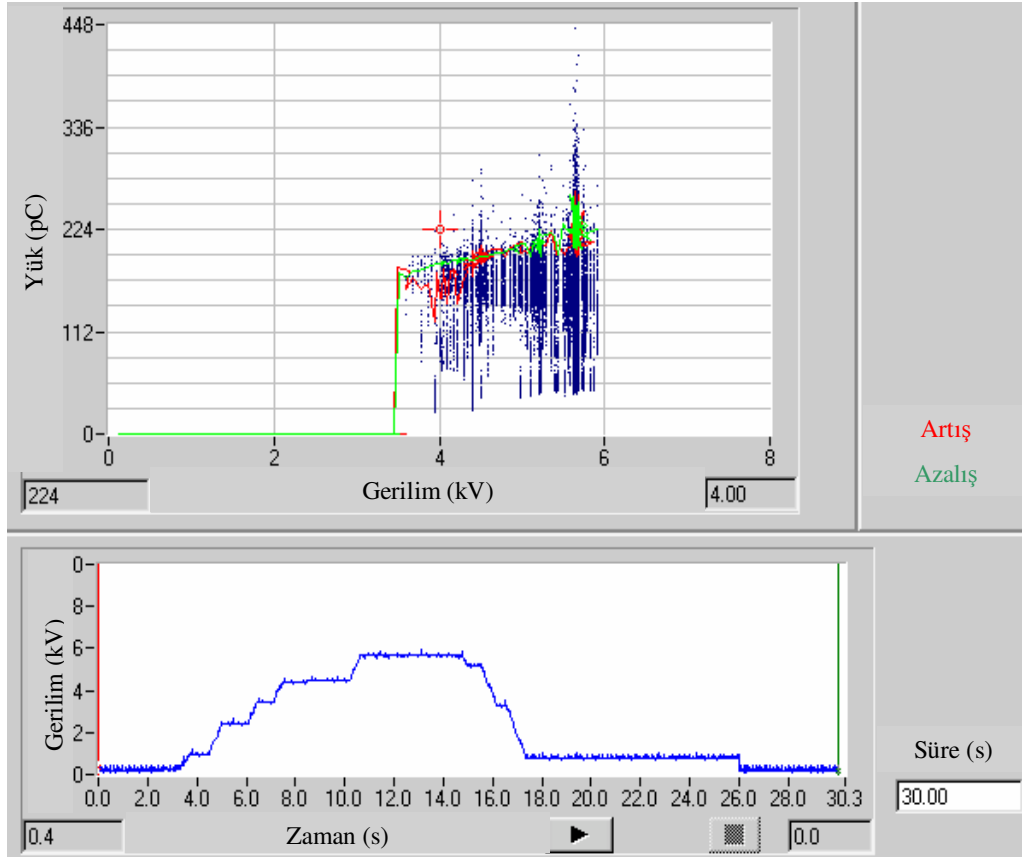
Şekil 5.18 : Standart sivri uç-yarım küre elektrot düzeni.

Şekil 5.19’da bu elektrot düzenine ait boyutlar verilmiştir.



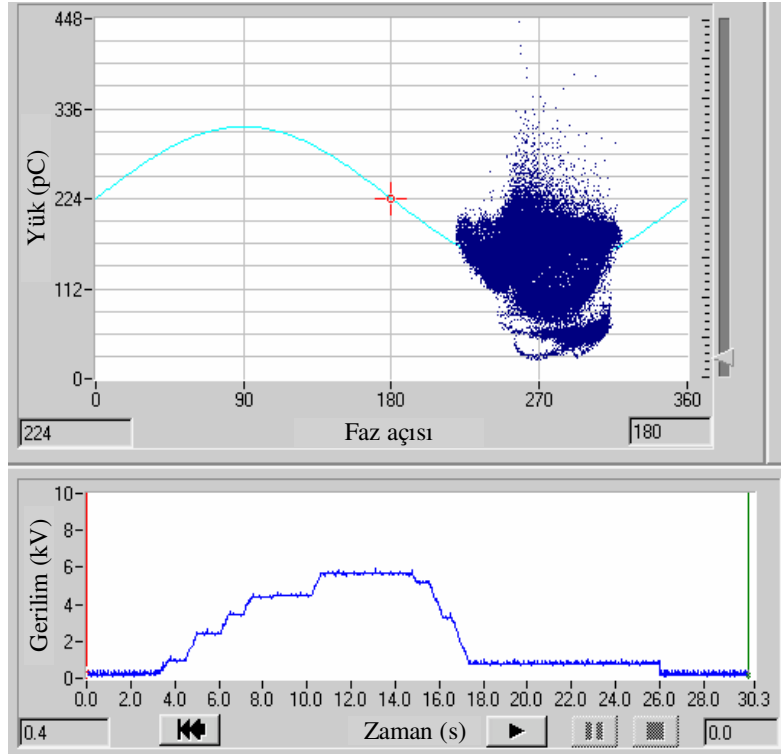
Şekil 5.19 : Standart sivri uç-yarım küre elektrot düzeninin ölçüleri.

Gerilim sivri uçlu elektroda uygulanırken küre elektrot topraklanmıştır. 30 saniyelik süre içerisinde gerilim 0 kV’tan 6 kV değerine kadar kademeli olarak artırılıp tekrardan azaltılmıştır. Bu süre içerisinde ilk kayda değer KB değeri 3,4 kV değerinde görülmüştür. Aynı değere ölçümler sonucunda elde edilmiş olan veri kümesi incelenerek de ulaşılabilmektedir. Şekil 5.20 bu gerilime göre kısmi boşalma değişimini göstermektedir.

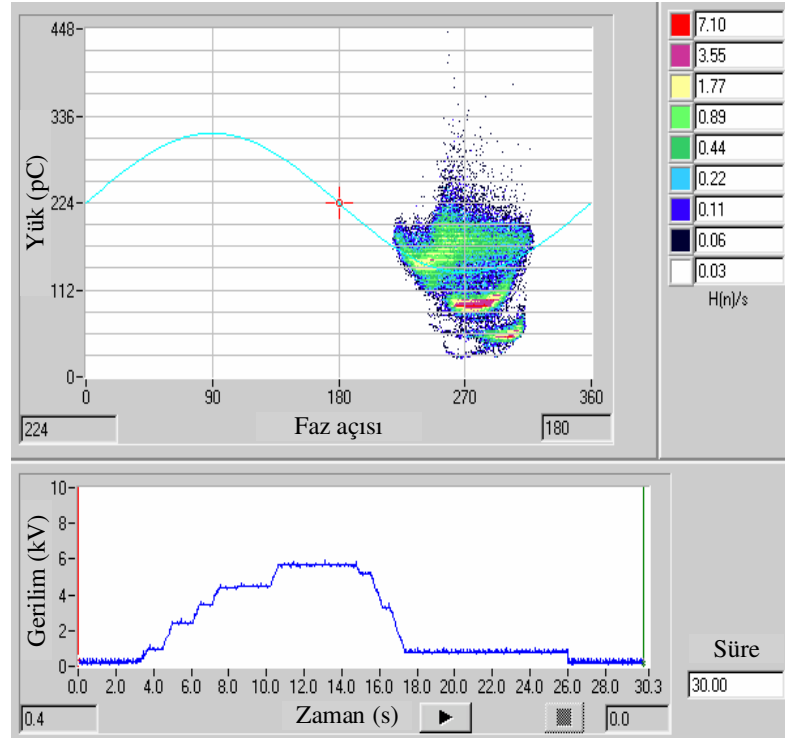


Şekil 5.20 : Gerilime göre KB değişimi, sivri uç-küre (KB baş. gerilimi: 3,4 kV).

Şekil 5.21 sivri uç-küre eletrot düzeninde 30 saniye süre içinde değişen gerilim altında KB işaretlerinin gerilimin faz açısına göre değişimini vermektedir. Boşalmalar negatif yarı dalganın tepe değeri çevresinde toplanmışlardır. Oluşan KB'ların sıklıkları ise Şekil 5.22'de gösterilmektedir.

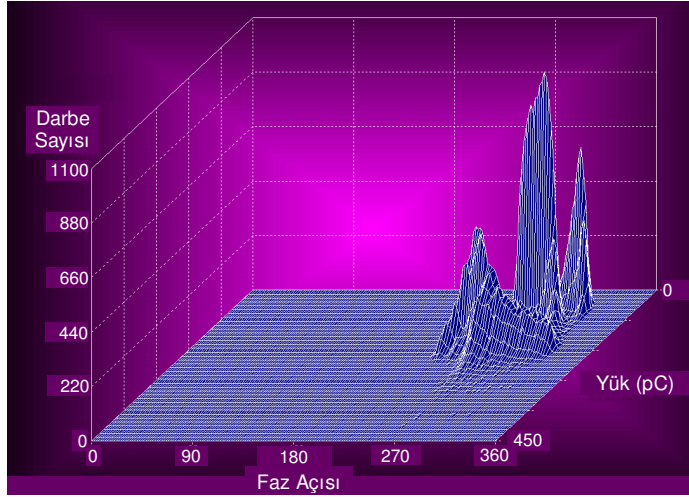


Şekil 5.21 : Sivri uç-küre için KB değerlerinin faz açısına göre değişimi.



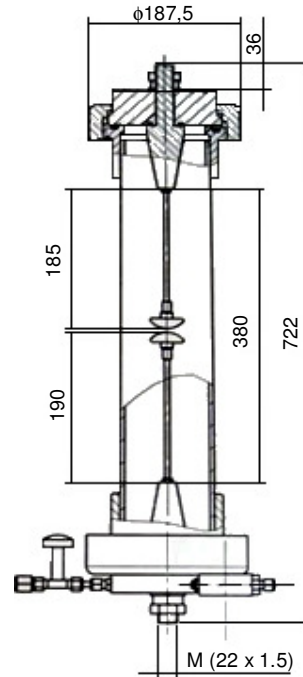
Şekil 5.22 : Sivri uç-küre için KB değerlerinin değişimi, H: Darbe sayısı.

Şekil 5.22’de sivri uç-küre elektrot düzeni için gerilimin 30 saniyelik değişimi altında (gerilim değişimi Şekil 5.20) KB yük, faz açısı ve darbe sayısı gösterilmiştir.



Şekil 5.23 : Sivri uç-küre düzeni için KB değerlerinin değişimi ($t = 10$ s).

Sonuçlar incelenirse özellikle Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de görüldüğü üzere KB’lar 270° faz açısı civarında görülmektedir. Bu noktadan sonra diğer deneyler, Şekil 5.24’te verilen kapalı bir kap içine yerleştirilmiş farklı elektrotlarla, atmosferik hava koşullarında yapılmıştır.

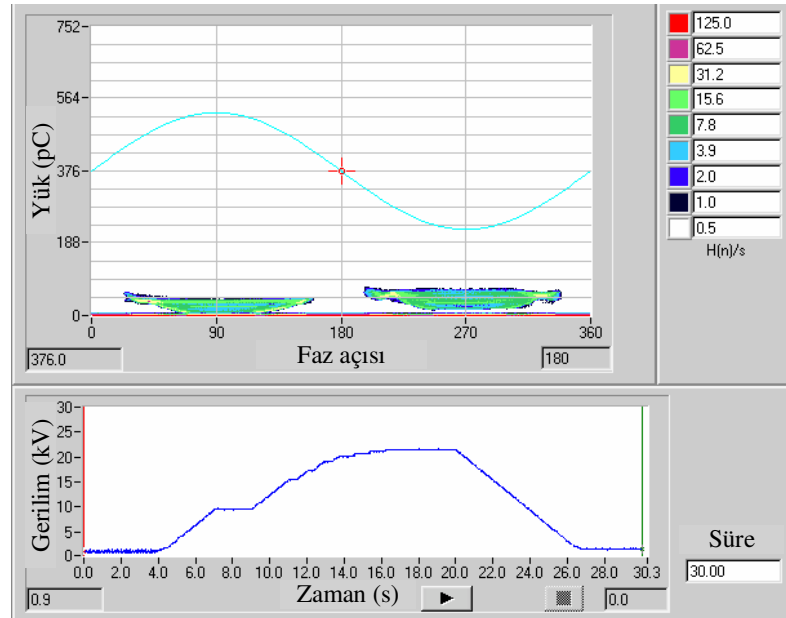


Şekil 5.24 : Kapalı deney kabı ve elektrot düzeni.

Şekil 5.24'deki kapalı deney kabı içine elektrot açıklığı 5 cm olan, 1 cm çaplı, 30° tepe açılı, karşılıklı sivri uç-sivri uç elektrotlar yerleştirilerek (Şekil 5.25) KB ölçümleri yapılmıştır. 21 kV'a kadar değişim gösteren gerilim altında elde edilen KB işaretlerinin faz açısı dağılımı Şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5.25 : Kapalı kap içinde sivri uç-sivri uç elektrot düzeni.

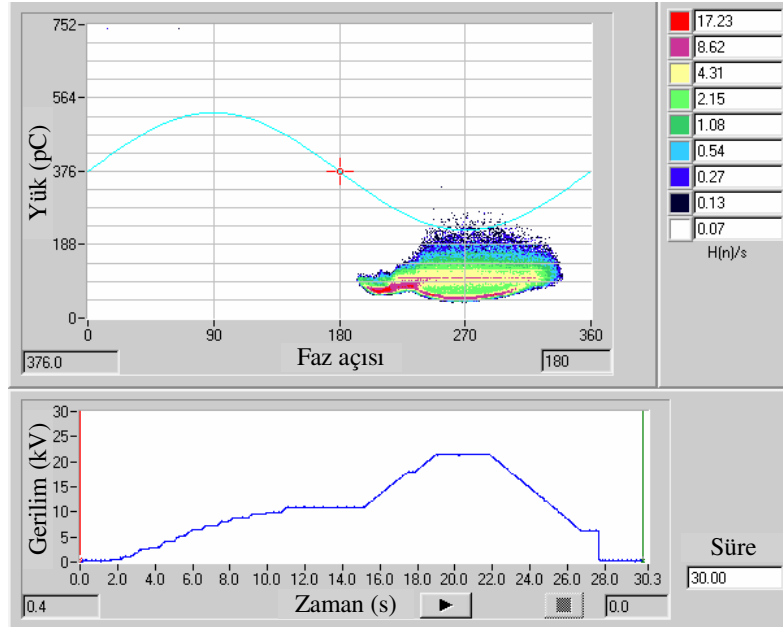


Şekil 5.26 : Sivri uç-sivri uç elektrot düzeni için KB değerlerinin faz açısına ve gerilimin uygulanma süresine göre değişimi ($t = 30$ s).

Kapalı deney kabı içine elektrot açıklığı 5 cm olan, 1 cm çaplı, 30° tepe açılı, karşılıklı sivri uç-düzlem elektrotlar yerleştirilerek (Şekil 5.27) KB ölçümleri yapılmıştır. 21 kV'a kadar değişim gösteren gerilim altında elde edilen KB işaretlerinin faz açısı dağılımı Şekil 5.28'de verilmiştir.



Şekil 5.27 : Kapalı kap içine yerleştirilmiş sivri uç-düzlem elektrot düzeni.



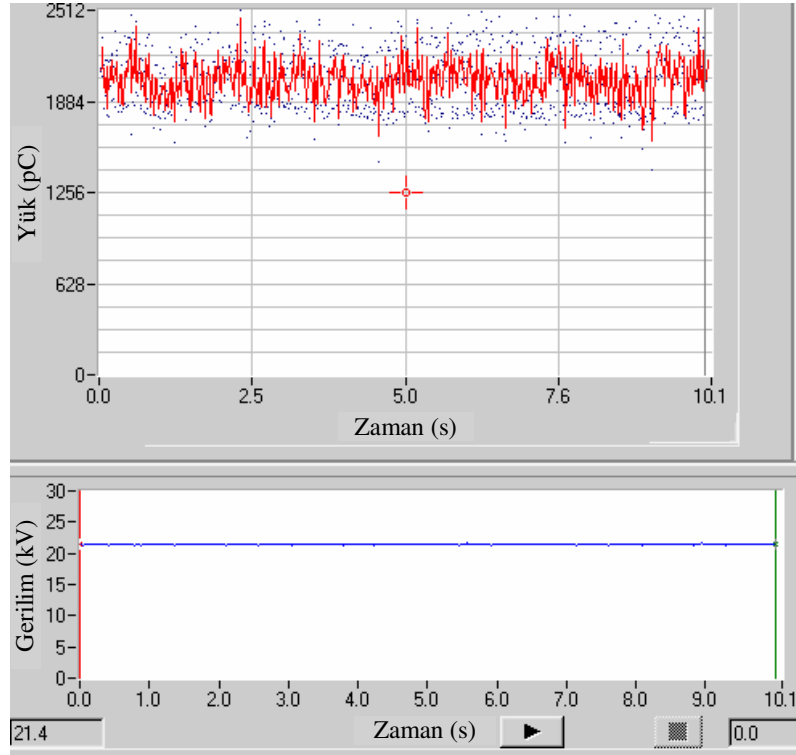
Şekil 5.28 : Sivri uç-düzlem elektrot düzeni için KB değerlerinin faz açısına ve gerilimin uygulanma süresine göre değişimi (t = 30 s).

36 kV'luk bir epoksi reçine mesnet izolatorü KB ölçümleri için iyi bir deney cismi olacağı düşünülmüş ve 21 kV'luk bir gerilim (işletme gerilimi) altında KB işareti üretmesi sağlanmıştır. Deney düzeneği Şekil 5.29'da verilmiştir.

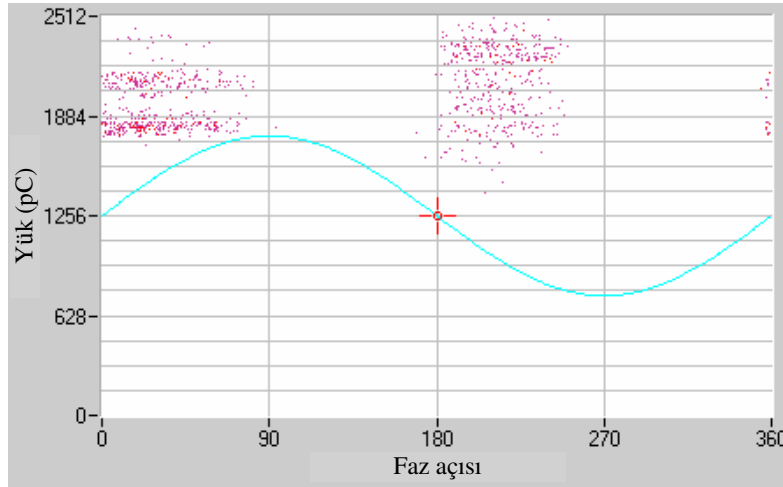


Şekil 5.29 : 36 kV'luk bir epoksi reçine mesnet izolatorü için KB ölçüm düzeneği.

Mesnet izolatorü için elde edilen deney sonuçları Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5.30 : Mesnet izolatorü için 21 kV ve 10 s'de yük değişimi ve ortalaması.



Şekil 5.31 : Mesnet izolatörü için 21 kV gerilim altında 10 s sürede KB işaretleri.

5.2 Bölümün Sonuçları

YG aygıtları üzerinden kaydedilen ve ana işareti oluşturan işaretlerin karakteristik özelliklerinin bilinmesi, ana işaretin dalgacık analizi yardımıyla ayırt edilmesine olumlu katkı sağlar. Bu nedenle yapılan çalışmada temel elektrot sistemlerine ait KB verilerinin karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır.

Çizelge 5.6, elde edilen ölçümlere dayanarak farklı elektrot düzenlerinde yüksek gerilim elektrodu olarak seçilen elektroda düzeneğin KB başlangıç geriliminin üzerinde bir gerilim uygulandığında, KB'ların gerilimin faz açısına göre oluşum anlarını ve elde edilen belirgin sonuçları vermektedir.

Çizelge 5.6 : Yapılan ölçümlerden elde edilen genel değerlendirme.

Elektrot Düzeni	KB faz açısı dağılımı	Notlar
Örgülü çelik iletken Ø 1.85 mm (T1)	90° ve 270°	KB'lar çoğunlukla 270° de yoğunlaşmıştır.
Bakır iletken Ø 1 mm (T2)	90° ve 270°	KB'lar çoğunlukla 270° de yoğunlaşmıştır.
Bakır iletken Ø 4 mm (T2)	90° ve 270°	KB'lar çoğunlukla 270° de yoğunlaşmıştır.
Bakır iletken Ø 8 mm (T2)	90° ve 270°	KB'lar çoğunlukla 270° de yoğunlaşmıştır.
Sivri uç-yarım küre	270°	KB'ların tamamı 270° civarındadır.
Sivri uç-sivri uç	90° ve 270°	KB lar 90° ve 270° civarına hemen hemen eşit dağılmışlardır.
Sivri uç-düzlem	270°	KB'ların tamamı 270° civarındadır.

Elde edilen diğ er bir önemli sonuç ise bilgisayar destekli kısmi boşalma ölçüm sistemlerinde (LDIC sisteminde olduğu gibi) deney düzeneğinden ve dış kaynaklı olabilecek gürültüyü ayıklamak üzere kullanıcıya eşik değeri seçim olanağı sunmakta, ancak elle yapılan eşikleme işlemi yanlış sonuçlar doğurabilmektedir. Sisteme pC olarak girilen e ik değerin altındaki kısmi boşalma değerleri elendiği için ve tüm KB değerlerinden bu eşik değer çıkarıldığı için farklı eşik değeri seçimlerinde farklı değerler elde edilmektedir. Bunun yanı sıra e ik değerin yüksek seçilmesinin kimi küçük değerdeki boşalma işaretlerinin de kaybedilmesi anlamına geldiği görülmüştür. Bu yüzden deneyler sırasında elde edilip kaydedilen verilerin üzerinde çalışırken ayrı bir işaret analiz yöntemi (dalga ık analizi) ile değerlendirme yapmanın gerekliliği görülmüştür.

6. ELEKTRİKSEL KİSMİ BOŞALMA DARBE BENZETİMİ VE DALGACIK ANALİZİ İLE GÜRÜLTÜ SÜZME

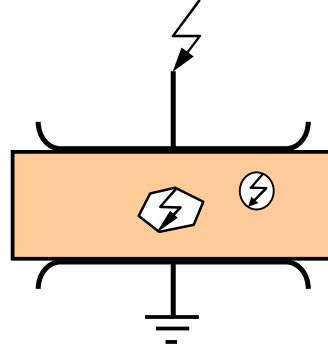
Önceki bölümlerde açıklanan çalışmaların yüksek gerilim tekniği alanında en önemli uygulama alanlarından biri kısmi boşalma (KB) ölçümleridir. İki elektrot arasında bulunan bir yalıtkanın yalnızca bir bölümünde olan ve elektrotları köprülemeyen yerel elektriksel boşalmalara kısmi boşalma veya korona adı verilir. Bu tür boşalmaların genliklerinin genellikle küçük değerlerde olmasına rağmen malzemenin zamanından önce elektriksel yaşlanmasına hatta delinmesine neden olabilir. Bunun sonucunda ise yalıtkanın kullanıldığı elektrik sistemine büyük hasar verebilecek sonuçlar doğurabilir. Bu nedenden ötürü herhangi bir hasar oluşmadan önce bu boşalmaların saptanması ve gerekli önlemlerin alınması önemlidir.

6.1 Kısmi Boşalmaların Sınıflandırılması

Elektriksel kısmi boşalmalar iç kısmi boşalmalar, yüzeysel boşalmalar, korona boşalması, elektriksel ağaçlanma olarak dört ana kısma ayrılabilir. Belirtilen boşalma türlerinin özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

6.1.1 İç kısmi boşalmalar

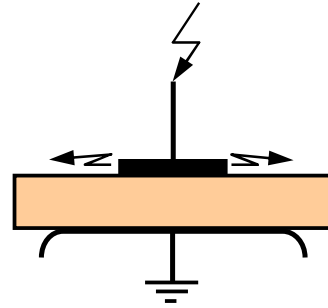
İç kısmi boşalmalar, gerilim uygulanan iki elektrot arasında oluşan ve bu elektrotları kısadevre edecek şekilde bir köprü oluşturmeyen boşalmalardır. Gerilim altındaki yalıtkan içinde delinme dayanımı ve dielektrik katsayısı, çevresindeki yalıtkan malzemelere göre daha düşük kısımlarda öncelikle bu boşalmalar görülür. Böylelikle yalıtkanın bu kısmı gerilim altındaki diğer bölgelere göre daha fazla zorlanarak delinebilir. Her ne kadar yalıtkanın tümünün delinmesi ile sonuçlanmasa bile delinen kısmın iletken hale gelmesiyle yalıtkanın geri kalan kısmı daha fazla zorlanır ve uygulanan gerilim seviyesine bağlı olarak tam delinmeye neden olabilir. Şekil 6.1 yalıtkan içerisinde meydana gelen yerel boşalmaları temsil etmektedir.



Şekil 6.1 : Yalıtkan içerisinde oluşan iç kısmi boşalmalar.

6.1.2 Yüzeysel boşalmalar

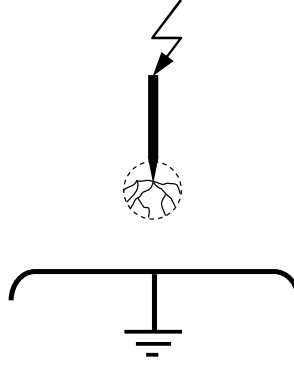
Yüzeysel boşalma veya diğer bir deyişle atlama, bir katı yalıtkan malzeme ile ona komşu olan gaz veya sıvı yalıtkan veya bir sıvı yalıtkan ile gaz yalıtkan arasında oluşan bir boşalma türüdür. Yüzeysel boşalma, yalıtkan malzemelerin sınır yüzeyi boyunca ortaya çıkar. Elektrik alanın yüzeysel (teğetsel) bileşeni, bu sınır yüzeye komşu yalıtkanlardan delinme dayanımı düşük olanın delinme dayanımını aştığında, zayıf olan bu yalıtkan tarafında yüzeysel boşalma başlar ve gerilim yükseldikçe boşalmanın yüzey boyunca ilerlemesi ve genişlenmesi artar. Şekil 6.2, gerilim uygulanan yalıtkan üzerinde gerçekleşen yüzeysel boşalmaları temsil etmektedir.



Şekil 6.2 : Yalıtkan üzerinde yüzeysel boşalmalar.

6.1.3 Korona boşalması

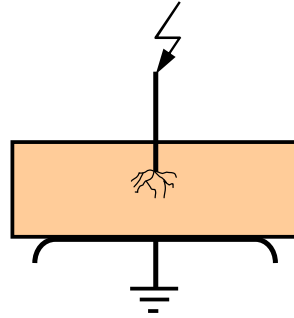
Elektrot açıklığına göre küçük eğrilik yarıçaplı elektrotlarda elektrik alan şiddetinin yüksek olduğu noktalarda, genellikle yüksek gerilim tarafında, keskin kenarlar veya köşeler çevresinde oluşan bir boşalma türüdür ve kendi kendini besler. Gerilim türleri açısından kıyaslanırsa negatif doğru gerilimde pozitif doğru gerilimde olduğundan daha önce oluşur, diğer taraftan alternatif gerilimde gerilimin negatif yarı dalgasında daha sık görülür. Şekil 6.3 sivri uçlu elektrotta korona boşalmasını göstermektedir.



Şekil 6.3 : Bir sivri uçlu elektrotta korona boşalması.

6.1.4 Elektriksel ağaçlanma

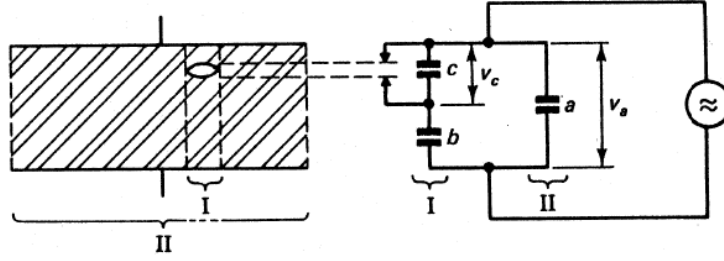
Elektriksel ağaçlanma, yalıtkan içerisindeki elektriksel dayanım bakımından zayıf olan ve gerilimin uygulandığı elektrottan başlar. Boşalmanın başlamasının ardından boşalma ilerleyerek kendine yol bulur ve ağaçlanma adı verilen bu kanallar zamanla yalıtkan içerisinde yayılır. Bu boşalmalar diğer iç kısmi boşalmalara göre, yayılım açısından hızlı bir şekilde gerçekleştiği için çok daha dengesizdir [1]. Şekil 6.4 gerilim altındaki yalıtkan içerisinde gelişen ağaçlanmayı göstermektedir.



Şekil 6.4 : Elektriksel ağaçlanma.

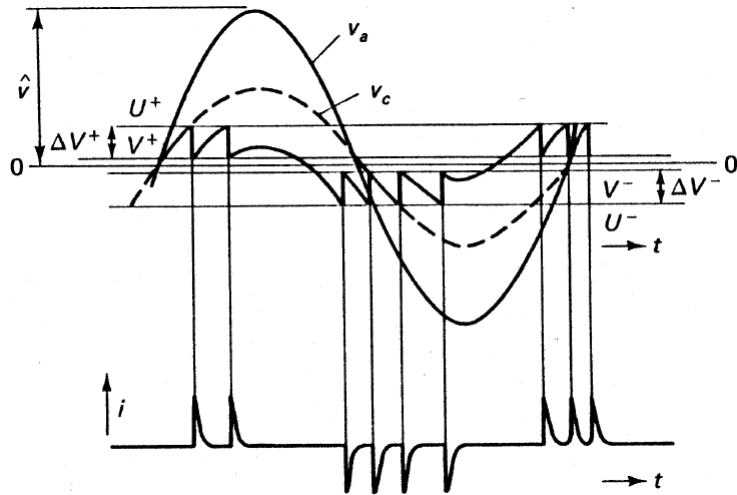
6.2 Kısmi Boşalma Eşdeğer Devresi

Yalıtkan içerisinde alternatif gerilim altında oluşan iç kısmi boşalmaların davranışı a-b-c devresi olarak adlandırılan devre ile açıklanabilir. Şekil 6.5’de gösterildiği üzere yalıtkan içerisindeki boşluk, c kapasitesi ve buna seri sağlam kısmın kapasitesi b ile gösterilir. Bunlara paralel olan yalıtkanın tüm sağlam kısmını temsil eden kapasite ise a ile temsil edilir. Şekil 6.5’de boşalmaya neden olan kısım I ile diğer taraftan sağlam olan kısım II ile gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Gerilim altındaki yalıtkanın eşdeğer devre [1].

Devreden de görülebileceği üzere devreye gerilim uygulandığında tekrarlayan boşalmalar görülebilir. Burada c uygulanan gerilim ile dolar ve boşluğun delinme gerilimi değerini aştığında delinme meydana gelir. Sonrasında yeniden dolarak delinir. Tekrarlayan boşalmalar Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Burada U^+ yalıtkan içerisindeki arızalı bölgenin delinme gerilimini, V^+ ise boşalma sönme gerilimini göstermektedir.



Şekil 6.6 : Yalıtkan içerisinde tekrarlayan boşalmalar [1].

Çoğu zaman olduğu gibi eğer boşalmanın meydana geldiği yalıtkan içindeki boşluk yalıtkanın tümüne oranla küçükse aktarılan yük miktarı (6.1) de verilmektedir (ΔV yalıtkan içindeki boşlukta boşalma ile meydana gelen gerilim değişimidir).

$$q_1 \cong (b + c)\Delta V \quad (6.1)$$

Yalıtkanın uğradığı zarar bu aktarılan q_1 yük miktarı ile ilgilidir. Ancak bu q_1 yük değeri kısmi boşalma ölçü aletleri ile ölçülemez, o nedenle pratik bir boşalma büyüklüğünü gösteren değer olamamaktadır. Bunun görünür yük değişimi hesaplanabilir.

$$q = b.\Delta V \quad (6.2)$$

Bu yük, örnek üzerinde $(b.\Delta V)/(a+b)$ gerilim düşümüne neden olur. Çoğu kısmi boşalma detektörü bu gerilim düşümünü algılar ancak arızalı kısma seri olan kısmın kapasitesini belirlemek olanaksızdır.

Bu konuda boşalma enerjisinin yararlanılabilir ve ilgili ifade (6.3)'de verilmektedir.

$$P \cong \frac{1}{2}c[(U^+)^2 - (V^+)^2] \quad (6.3)$$

Burada U^+ yalıtkan içerisindeki arızalı bölgenin delinme gerilimini, V^+ ise boşalma sönme gerilimini göstermektedir. Boşalma enerjisi ile görünür yük arasındaki ilişkiye bakılırsa (V_i : boşalma başlangıç gerilimi),

$$P \cong \frac{1}{2}c.\Delta V \frac{b}{b+c}V_i \quad (6.4)$$

$$P \cong \frac{1}{2}b.\Delta V.V_i = \frac{1}{2}.q.V_i \quad (6.5)$$

olarak elde edilir.

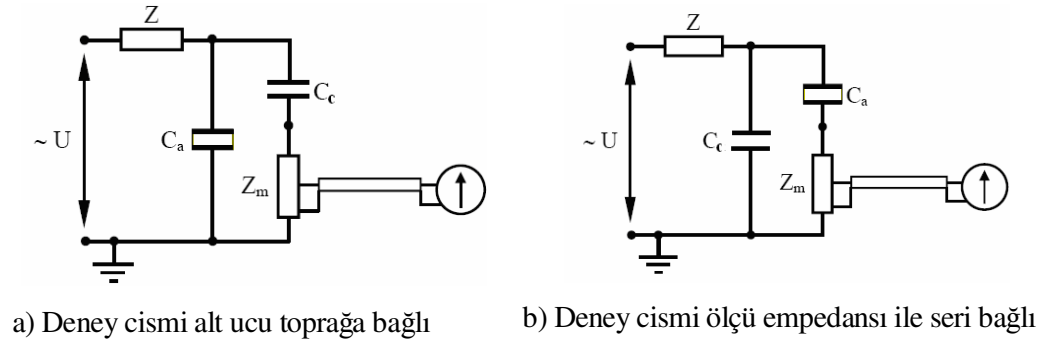
Kısmi boşalmaların ölçülmesinde boşalmalar sırasında enerji dönüşümü sonucu ortaya çıkan etkilerden yararlanılır. Bu etkiler, akım darbeleri, dielektrik kayıpları ve elektromanyetik dalga yayılması gibi elektriksel etkiler ile; ısı, ışık, ses ve kimyasal bozulmalar gibi elektriksel olmayan etkilerdir. Ölçmelerde bu etkilerden en çok kısmi boşalma darbelerinden yararlanılır. Kısmi boşalma ölçmelerinin amacı, kısmi boşalmaların varlığını belirleme, ölçme, yerini belirleme ve sonuçları değerlendirmedir.

6.3 Dolaysız Ölçme Yöntemleri (Deney Cismine Paralel veya Seri Ölçü Empedansı Bağlayarak Ölçme)

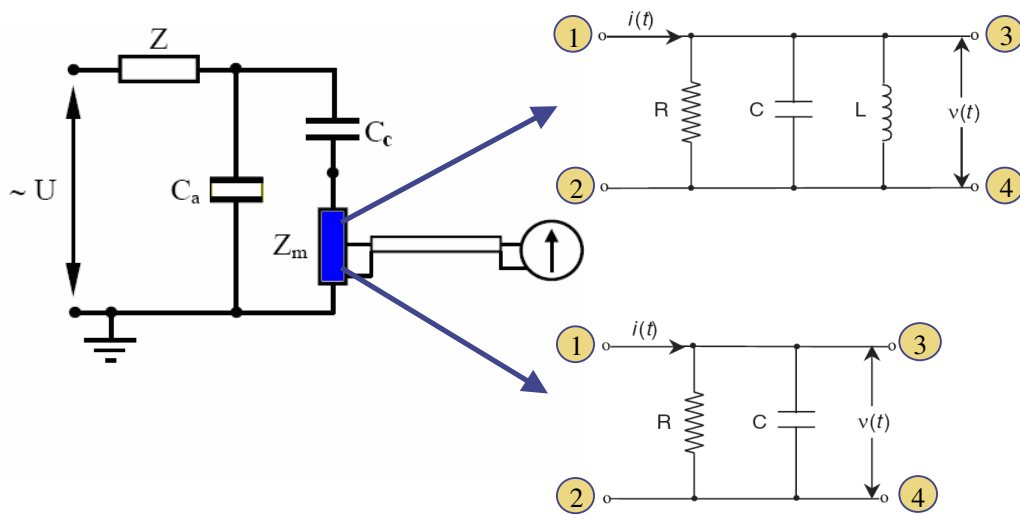
Deney cisminin topraklandığı tipik bir kısmi boşalma darbe ölçüm devresi Şekil 6.7.a'da gösterilmiştir. Deney cisminin kapasitesinin küçük ve topraktan yalıtılabilir olduğu durumlarda ölçme empedansı ya da dört uçlusunun deney cismi ile seri bağlandığı devreler de kullanılabilir (Şekil 6.7.b). Şekil 6.7'de C_a deney cismi, C_c kuplaj kondansatörü; Z_m ölçü empedansı veya dört uchlusu, Z de bir öndirençdir.

Ölçü empedansının deney cismine paralel ya da seri bağlanması ölçüm açısından farklılık oluşturmaz. Bu durum, yüksek gerilim kaynağına ait empedansın büyük değerde olduğu düşünülürse her zaman doğrudur.

Şekil 6.7’de gösterilen Z_m ölçü empedansı, paralel RC devresi ya da paralel RLC devresi olarak yapılabilir. Şekil 6.8’de Z_m ölçü empedansı olarak kullanılabilecek RC ve RLC devreleri gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Kısmi boşalma darbe ölçme devreleri



Şekil 6.8 : Ölçü dört uçlu empedansı; a) Paralel RC ve b) Paralel RLC devreleri.

Ölçme devresine gelen kısmi boşalma geriliminin ΔU birim olduğu düşünülürse;
Toplam kapasite;

$$C_t = C + C_a // C_c \quad (6.6)$$

Zaman sabiti;

$$t_d = RC_t \quad (6.7)$$

$v(t)$ gerilimi RC ve RLC devresi için ;

$$V_{RC}(t) = \frac{C_a // C_c}{C + C_a // C_c} \Delta U * e^{-t/t_d} \quad (6.8)$$

$$V_{RLC}(t) = \frac{C_a // C_c}{C + C_a // C_c} \Delta U * e^{-t/(2t_d)} \cos(\omega t) \quad (6.9)$$

$$\omega = \sqrt{1/LC_t - 1/(4R^2C_t^2)} \quad (6.10)$$

olarak elde edilir. Yukarıdaki ifadelerde darbenin, zaman ekseninde $t = t_0$ anında oluştuğu kabul edilmiştir. Devre elemanlarının yanısıra oluşan kısmi boşalmanın genliği tarafından belirlenen, ölçülen gerilimin genliği A sabiti ile gösterilirse (6.8) ve (6.9) eşitlikleri sırasıyla (6.11) ve (6.12) denklemlerine dönüşür (f_0 : rezonans frekansı).

Üstel fonksiyonlu kısmi boşalma dalgası (paralel RC tipi devreden alınan dalga) için dalga denklemi:

$$\begin{cases} x(t) = Ae^{-\frac{t-t_0}{\tau}} & t \geq t_0 \\ x(t) = 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (6.11)$$

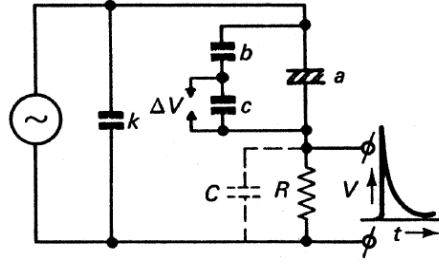
Sönümlü salınımlı üstel fonksiyonlu kısmi boşalma dalgası (paralel RLC tipi devreden alınan dalga) için dalga denklemi:

$$\begin{cases} x(t) = Ae^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \cos(2\pi f_0(t-t_0)) & t \geq t_0 \\ x(t) = 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (6.12)$$

Ölçüm devresi ile gözlenen KB darbesinin şekli, orijinal KB darbesinin şekline, oluştuğu cisim üzerinden ölçüm devresine ilerlerken uğradığı bozulmaya, ölçüm devresinin frekans yanıtına, devrede kullanılan yükselticinin ve osiloskobun frekans bant genişliğine bağlıdır. Bunların dışında çevreden ve ölçüm devresinden kaynaklanan gürültü de etkileyici olur.

6.4 Üstel Dalga (RC Tipi Devre) Darbe Şekli

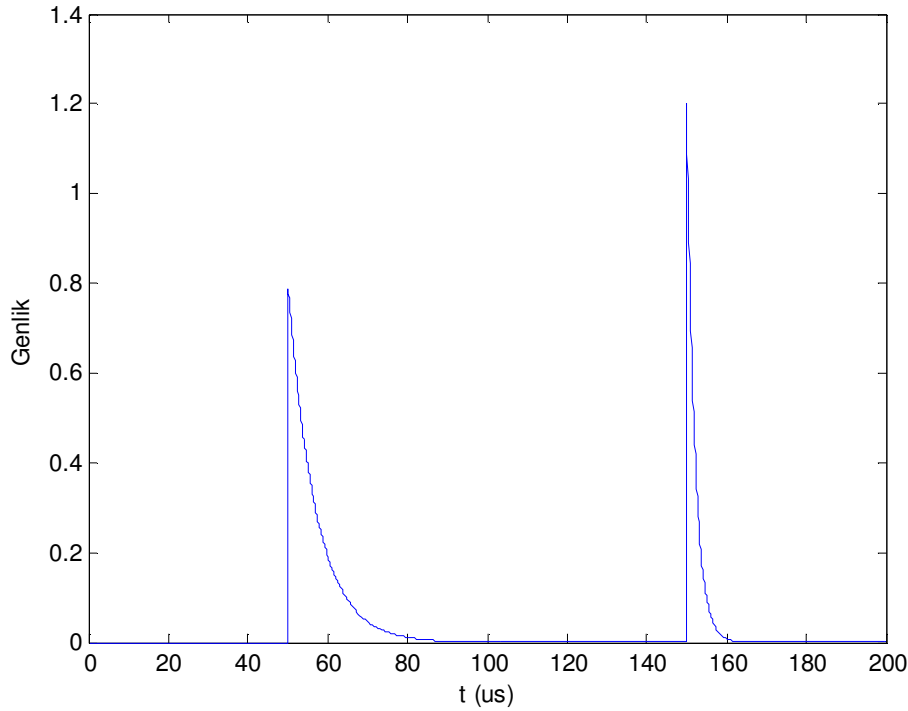
Şekil 6.9’da, RC tipi ölçü empedansı ile elde edilen darbenin temsili ve Şekil 6.10’da ise matematiksel benzetimle elde edilen ve KB darbesini temsil eden iki adet darbe dalga şekli verilmiştir. Burada $t = 50 \mu s$ ve $t = 150 \mu s$ anlarında iki ayrı kısmi boşalma işaretinin oluştuğu göz önüne alınmıştır. Bu darbelerden birincisinin genliği 0,8 birim, diğerinin ise 1,2 birim olarak seçilmiştir. Devre elemanlarına bağlı olan zaman sabitleri ise birinci ve ikinci darbe için sırasıyla $7 \mu s$ ve $3 \mu s$ olarak seçilmiştir (Şekil 6.10).



Şekil 6.9 : RC tipi ölçü empedansı ile elde edilen darbe [1].

Darbeler için kabul edilen parametreler toplu halde aşağıda verilmiştir:

$$t_{o1} = 50 \mu s, t_{o2} = 150 \mu s, A_1 = 0,8, A_2 = 1,2, \tau_1 = 7 \mu s, \tau_2 = 3 \mu s$$



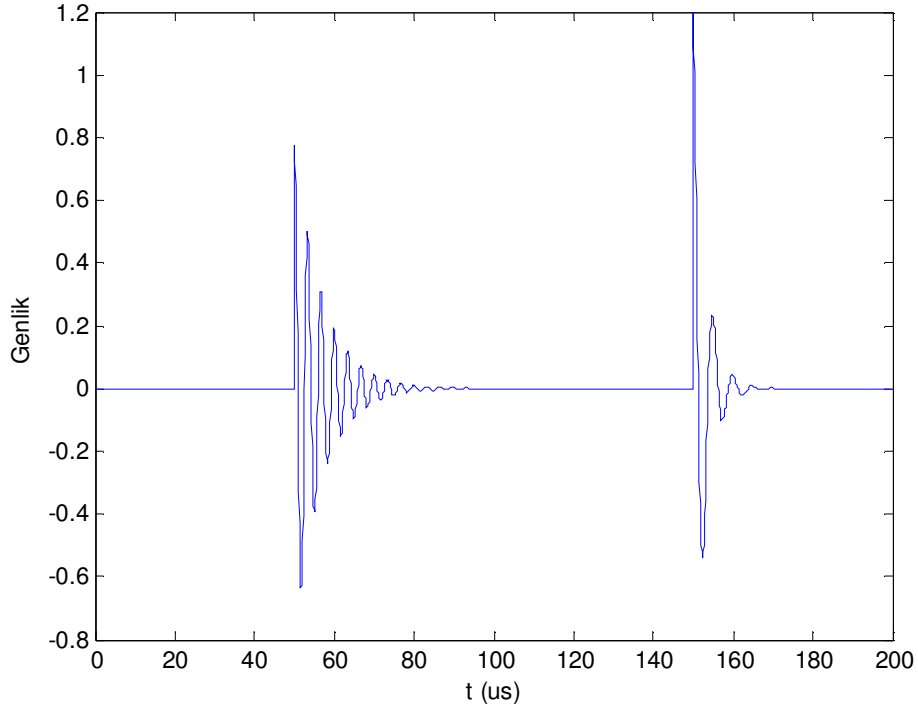
Şekil 6.10 : RC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB darbeleri.

6.5 Sönümlü Salımlı Üstel Dalga (RLC Tipi Devre) Darbe Şekli

RC tipi ölçü devresindeki yaklaşıma benzer olarak RLC tipi ölçü devresinden elde edilen kısmi boşalma darbelerinin benzetimini yapmak için kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir. Burada farklı olarak rezonans frekansları anlamlı değerler olarak birinci darbe için 300 kHz, ikinci darbe için 200 kHz olarak seçilmiştir (Şekil 6.11).

Darbeler için kabul edilen parametreler aşağıda verilmiştir:

$t_{o1} = 50 \mu s$, $t_{o2} = 150 \mu s$, $A_1 = 0,8$, $A_2 = 1,2$, $\tau_1 = 7 \mu s$, $\tau_2 = 3 \mu s$, $f_{o1} = 300 \text{ kHz}$, $f_{o2} = 200 \text{ kHz}$.



Şekil 6.11 : RLC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB darbeleri.

Böylelikle her iki tip (RC ya da RLC) ölçü empedansı kullanılarak yapılacak kısmi boşalma ölçümlerinde temel anlamda yukarıda verilen darbeler şeklinde veriler elde edilecektir. Oluşturulan bu darbeler ayırık dalgacık dönüşümü ile gürültü süzme işlemi sırasında izlenecek adımlarda kullanılacak en doğru parametrelerin belirlenmesinde kullanılacaktır.

6.6 Kısmi Boşalma Ölçümlerindeki Bilinen Gürültü Çeşitleri ve Gürültü Benzetimi

Kısmi boşalma ölçümlerinin maruz kaldığı dış 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.

Bilhassa işletmede gerilim altında ve genellikle açık alanlarda yapılan kısmi boşalma ölçümleri yüksek derecede ortam kaynaklı gürültülere maruz kalır [61]. Açık alanda gerilim altında yapılan testlerde gürültü miktarı oldukça fazla olabilir [62]. Yüksek frekans akım trafoları kullanılarak yapılan boşalma ölçümleri de yüksek frekans nedeniyle yoğun gürültüye neden olabilmektedir [63]. Genel olarak AM radyo, FM radyo ve mobil haberleşme sinyallerinin frekans bandı sırasıyla 144-30000 kHz, 88-108 MHz, 890-1880 MHz'dir. Kısmi boşalma ölçümlerinin sıklıkla çok yüksek olmayan MHz frekanslarında örneklediği düşünüldüğünde, boşalma verilerine FM ve mobil haberleşme frekanslarının çok az etkisi olduğu, ancak 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 genlik modülasyonlu (AM) işaretler bu çalışmada gürültü benzetimi için kullanılmıştır. Sinüsoidal gürültüyü temsil eden genlik modülasyonlu işaretlerin benzetimi beş farklı taşıyıcı dalga için (6.13) denklemi ile gösterilebilir [53].

$$e(t) = A \sum_{i=1}^5 (c + m \cdot \sin(2\pi f_m t)) \cdot \sin(2\pi f_i t) \quad (6.13)$$

(6.13) denkleminde c taşıyıcı dalganın genliği, m modüle eden işaretin genliği, f_m modüle eden işaretin frekansı ve f_i taşıyıcı dalganın frekansdır. Benzetimler için seçilen örnek parametre değerleri aşağıda verilmektedir.

$c = 1, m = 0,4, f_m = 1 \text{ kHz}, f_i = 600 \text{ kHz}, 800 \text{ kHz}, 1000 \text{ kHz}, 1200 \text{ kHz}, 1400 \text{ kHz},$

Stokastik gürültü ise rastlantısal fakat ortalaması sifıra eşittir ve değişken standart sapma ile belirlenmiştir. σ standart sapma olmak üzere; stokastik gürültü (R)

$$R = \sigma \cdot \text{randn}(1,2000) \quad (6.14)$$

denklemine göre oluşturulmuştur. Kısmi boşalma darbelerinin ve gürültünün benzetiminde 2000 adet veri noktası kullanılmıştır. Stokastik gürültü için 2000 noktadan oluşan rastgele sayı üretimi MATLAB ile gerçekleştirilmiştir ve belirlenen standart sapmaya ayarlanmıştır.

6.6.1 İşaret gürültü oranı (SNR)

Elde edilen işaretteki gürültü seviyesinin belirlenmesi için her benzetim işaretinde işaret gürültü oranı hesaplanmıştır. (6.15) denkleminde W_s ana işarete (temiz, orijinal işarete) ait işaret enerjisini ifade ederken diğer taraftan W_n gürültüye ait işaret enerjisini ifade etmektedir. Gürültü süzme işleminden sonra işarete ait SNR oranının mümkün mertebe artması arzu edilmektedir.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{W_s}{W_n} \right) \quad (6.15)$$

6.6.2 Ortalama karesel hata (MSE)

Gürültüden arındırma çalışmaları sırasında değişen farklı parametrelerin etkinliğinin sınanması amacıyla her benzetim işareti gürültüden temizlendikten sonra Ortalama Karesel Hata (MSE) bulunmuştur. Beklenti, bu hatanın mümkün mertebe küçük olmasıdır.

(6.16) denkleminde S başlangıçta oluşturulan gürültüsüz ana işareti, R gürültülü işaretten gürültü süzme işlemi gerçekleştirildikten sonra yeniden elde edilen işareti ifade etmektedir. N ise veri sayısını göstermektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S(i) - R(i))^2 \quad (6.16)$$

Analiz sonucunda elde edilen işaretteki genlik bozulmasını değerlendirmek için (6.17)'de verilen genlik hatası (ME) kullanılmıştır. Burada A_0 ana işaretin genliğini, A_d ise gürültüden arındırılmış işarete ait genliği göstermektedir.

$$ME(\%) = \frac{A_o - A_d}{A_o} * 100 \quad (6.17)$$

6.7 KB Darbeleri Üzerine Gürültü Bindirilmiş Örnekler ve Bunların Dalgacık Analizi ile Gürültüden Arındırılması

KB ölçümlerinde genelde RC ya da RLC tipi ölçü dörtüçlü devrelerinin tercih edildiğinden söz edilmişti. Bu bölümde önce RC daha sonra ise RLC tipi ölçüm devresiyle elde edilmiş ve üzerlerine gürültü bindirilmiş kısmi boşalma benzetim verileri üzerinde çalışılmıştır.

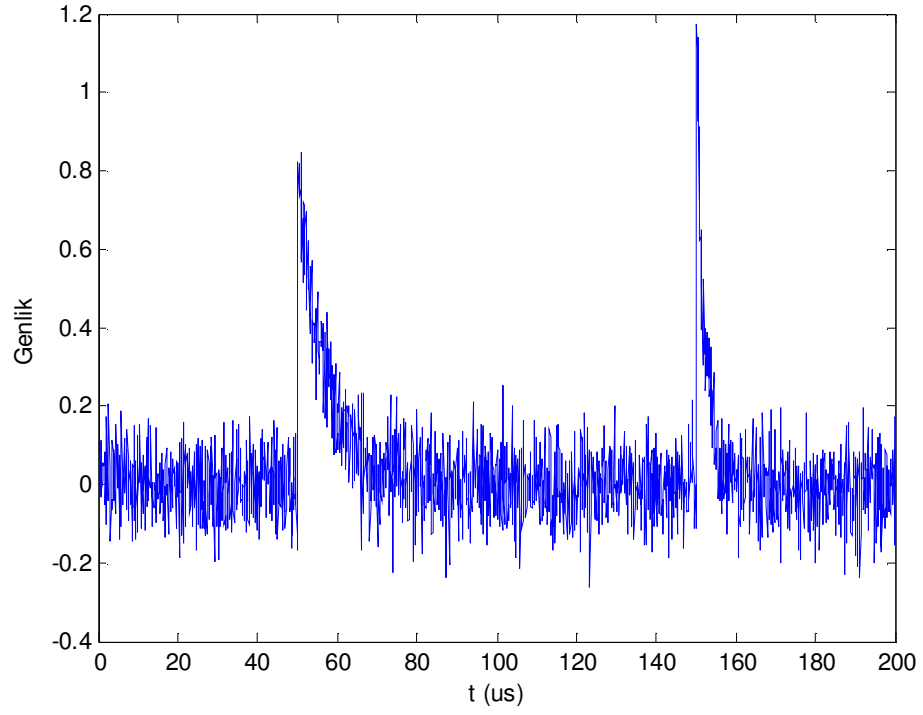
Örnek veriler oluşturulurken AM frekanslı gürültünün genliği ve stokastik (beyaz) gürültünün genlik ve standart sapması değiştirilerek farklı gürültü seviyelerinde işaretler oluşturulmuş, ardından ayırık dalgacık dönüşümü ile bu gürültülerin etkin bir şekilde süzülmesine çalışılmıştır. Gürültüden süzmedeki ana amaç orijinal kısmi boşalma işaretine mümkün mertebe zarar vermeden gürültüyü en etkin biçimde ölçülen işaretten ayırmak, böylelikle darbelerin varlığını ve parametrelerini daha rahat belirleyebilmektir.

RC tipi ölçü empedansı elde edilebilecek darbeler için üç değişik gürültü seviyesinde beyaz gürültü içerecek şekilde benzetim işaretleri oluşturulmuştur. Bunlar sırasıyla aşağıda verilmektedir.

Çizelge 6.1 : RC tipi ölçüm devresi darbe benzetiminin özellikleri.

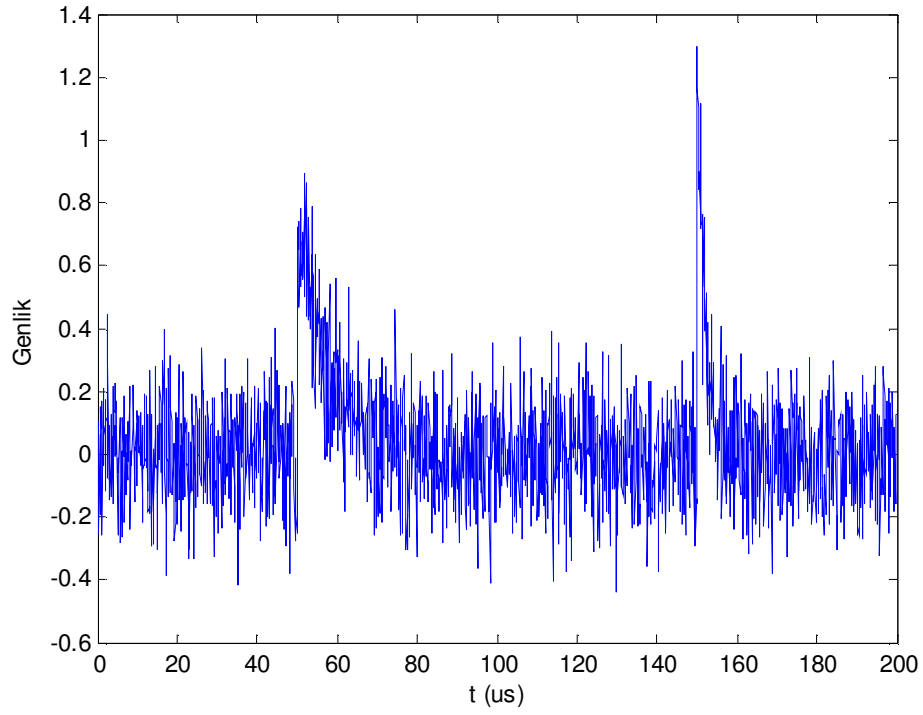
KB İşareti	Ölçüm Devresi Tipi	SNR (dB)	Darbe Sayısı	Darbe Genlikleri
Sinyal#1	RC	5	2	0.8 1.2
Sinyal#2	RC	0	2	0.8 1.2
Sinyal#3	RC	-5	2	0.8 1.2

Şekil 6.12’de parametreleri Çizelge 6.1’de verilen Sinyal #1 gösterilmiştir.



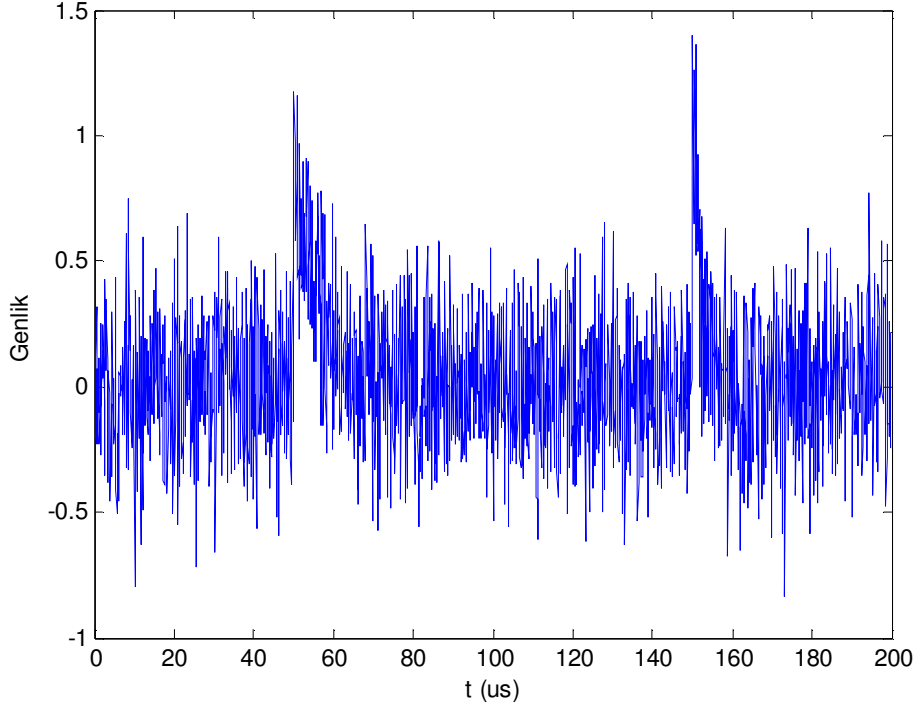
Şekil 6.12 : Sinyal #1 (SNR = 5 dB).

Şekil 6.13’te parametreleri Çizelge 6.1’de verilen Sinyal #2 gösterilmiştir.



Şekil 6.13 : Sinyal #2 (SNR = 0 dB).

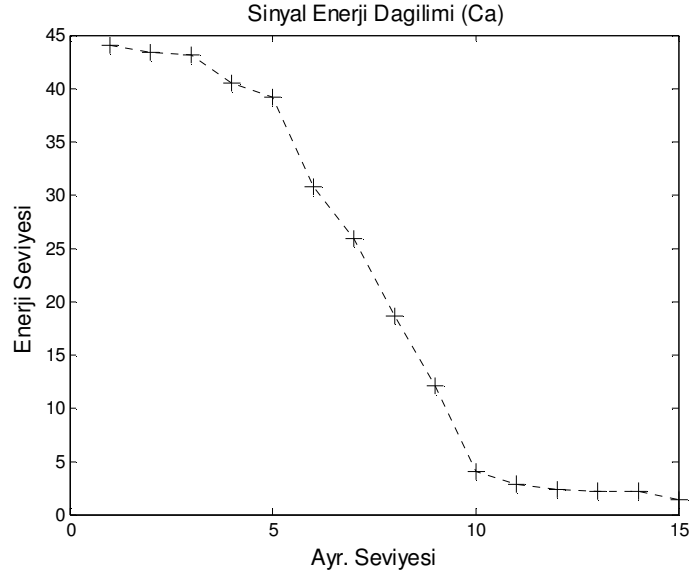
Şekil 6.14’te parametreleri Çizelge 6.1’de verilen Sinyal #3 gösterilmiştir.



Şekil 6.14 : Sinyal #3 (SNR = -5 dB).

6.8 RC Tipi KB Darbelerinde Gürültü Süzme

Oluşturulan gürültülü KB işaretlerinden gürültü süzme işlemleri sırasında Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) kullanılmıştır. Dönüşümün ilk adımı olarak üzerinde çalışılan gürültülü işaret için en uygun değerdeki ayrıştırma seviyesi belirlenmiştir. KB darbesi benzetim verisinin 2000 noktadan oluştuğu ve ilgili dalgacık ayrıştırma filtrelerinin uzunlukları göz önüne alındığında ayrık dalgacık dönüşümü ayrıştırma seviyesinin 5 olarak seçilmesinin anlamlı olacağı düşünülmüş ve yapılan denemeler olumlu sonuç vermiştir. Ayrıca 15 seviye için her seviye ayrıştırmada yaklaşım katsayıları kullanılarak işaret enerji seviyeleri hesaplanmıştır (Şekil 6.15). Bu şekilde de görülebileceği üzere veriyi daha yüksek seviyelere ayrıştırmanın gereksiz olacağına karar verilmiştir.



Şekil 6.15 : Ayrıştırma seviyesine göre yaklaşım katsayıları için enerji seviyeleri.

İkinci önemli parametre, ana dalgacığın seçimidir. Bunun için literatürde farklı örnekler bulunmuş ancak bunlarda genellikle ana dalgacığın seçiminin neye dayandırıldığı izah edilmemiştir. Örnek olarak [64]'de eş eksenli elektrot sisteminde gürültü içerisinde gömülü kısmi boşalma sinyallerini ayırt etmede ana dalgacık olarak neden db2 seçildiği açıklanmamıştır. Başka bir örnekte [65], YG kabloları üzerinde gerilim altında elde edilen KB işaretlerinin değerlendirilmesi Sym4 ana dalgacığının kullanılma nedeni belirsizdir.

Bu kapsamda RC tipi ölçüm devresi kullanılarak elde edilen KB işaretlerinin en etkin biçimde gürültüden süzülmesi amacıyla aday dalgacıklarla ADD gerçekleştirilirken MATLAB paket programı kullanılmış ve sonuçta her bir aday dalgacık için yöntemin başarısını sınamak adına MSE, ME ve SNR değerleri hesap edilmiştir. Analizde seviye tabanlı eşikleme kuralı ve yumuşak eşikleme fonksiyonundan yararlanılmıştır. Buna göre ana işaret olarak SNR = 5 dB olan gürültülü KB işaret verisi (Sinyal #1) kullanılarak farklı dalgacıklarla elde edilen gürültüden arındırma işlemi sonucunda her bir aday dalgacık için MSE, ME ve SNR hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 6.2'de özetlenmiştir. Çizelge 6.2'den de görüleceği üzere en küçük MSE değerini ve en büyük SNR değerini Coif2 ana dalgacığı sağlamıştır. Tez kapsamında hazırlanan [66] sonuçları özetlemektedir.

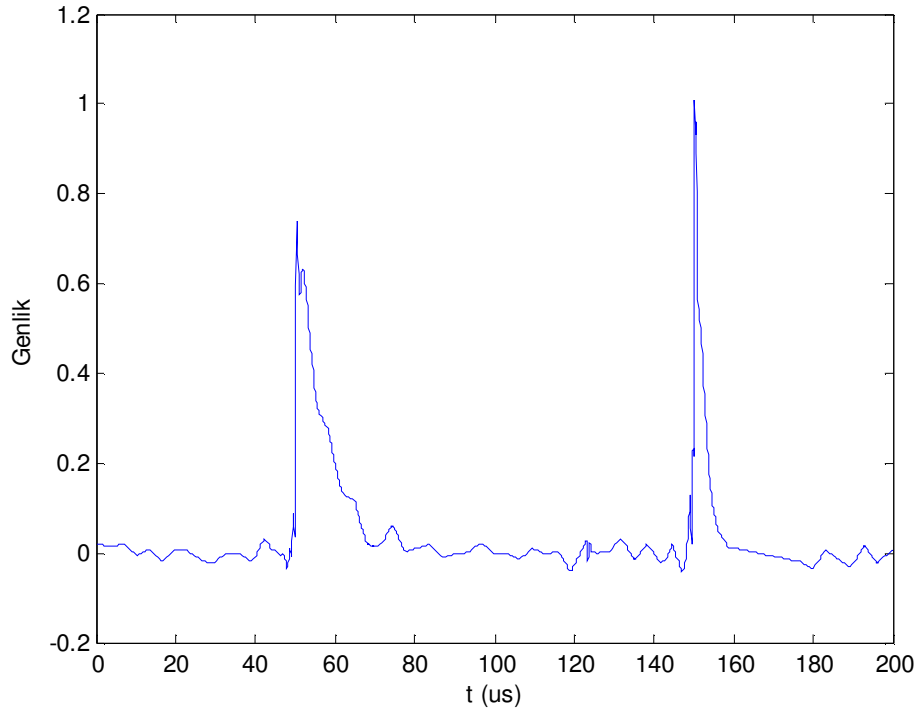
Diğer taraftan genlik hatası kabul edilebilir seviyededir. Genlik hatası için en küçük değeri Db2 ve Sym2 ana dalgacıkları sağlamıştır. Buradan şu sonuç çıkarılabilir; RC

tipi ölçüm devresiyle elde edilen KB verilerinden gürültü süzme işleminde ayrık dalgacık dönüşümü kullanılırken genlik dışındaki darbe parametreleri (oluşum anı, süresi) önemliyse Coif2 ana dalgacı; genliğin belirlenmesi önemliyse Db2 ya da Sym2 ana dalgaları kullanılmalıdır.

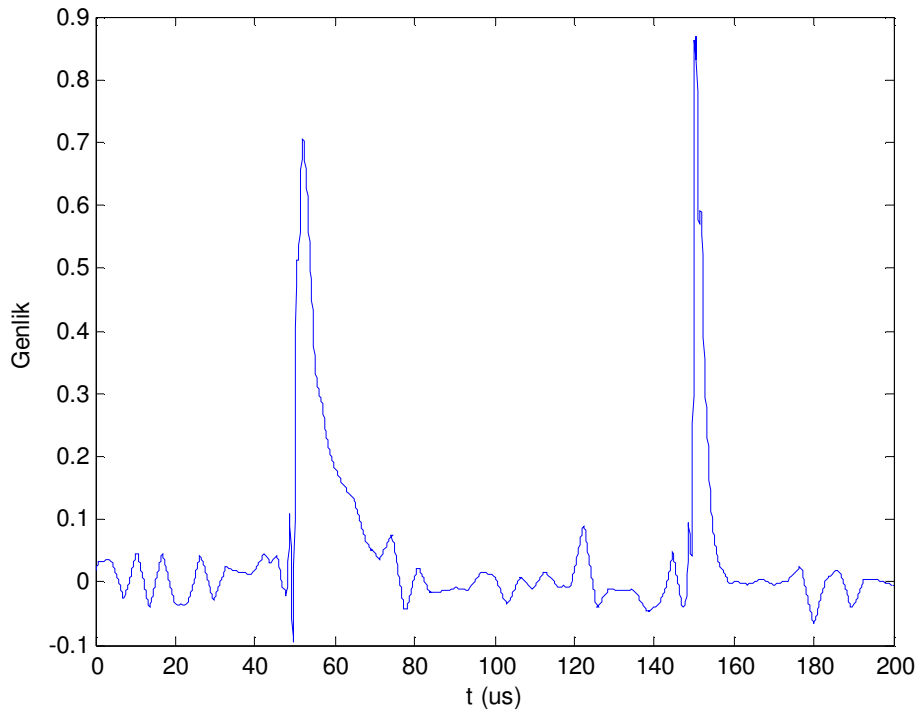
Çizelge 6.2 : Aday ana dalgacıklar ile elde edilen sonuçlar.

Ana Dalgacık	MSE	ME	SNR(dB)
Db2	0,000628	5,43	14,71
Db3	0,000805	24,09	13,63
Db4	0,000696	17,89	14,26
Db5	0,000991	11,06	12,73
Db6	0,000778	22,06	13,78
Db7	0,001	22,02	12,68
Db8	0,000822	11,56	13,54
Db9	0,001	24,38	12,65
Db10	0,001	20,71	12,50
Db20	0,0013	24,84	11,44
Sym2	0,000628	5,43	14,71
Sym3	0,000805	24,09	13,63
Sym4	0,000785	21,96	13,74
Sym5	0,000679	13,76	14,37
Sym6	0,000652	13,45	14,54
Sym7	0,000796	19,43	13,68
Sym8	0,000628	14,51	14,71
Coif1	0,000630	14,50	14,70
Coif2	0,000594	16,01	14,95
Coif3	0,000711	17,79	14,17
Coif4	0,000729	19,17	14,06
Coif5	0,000755	16,13	13,91

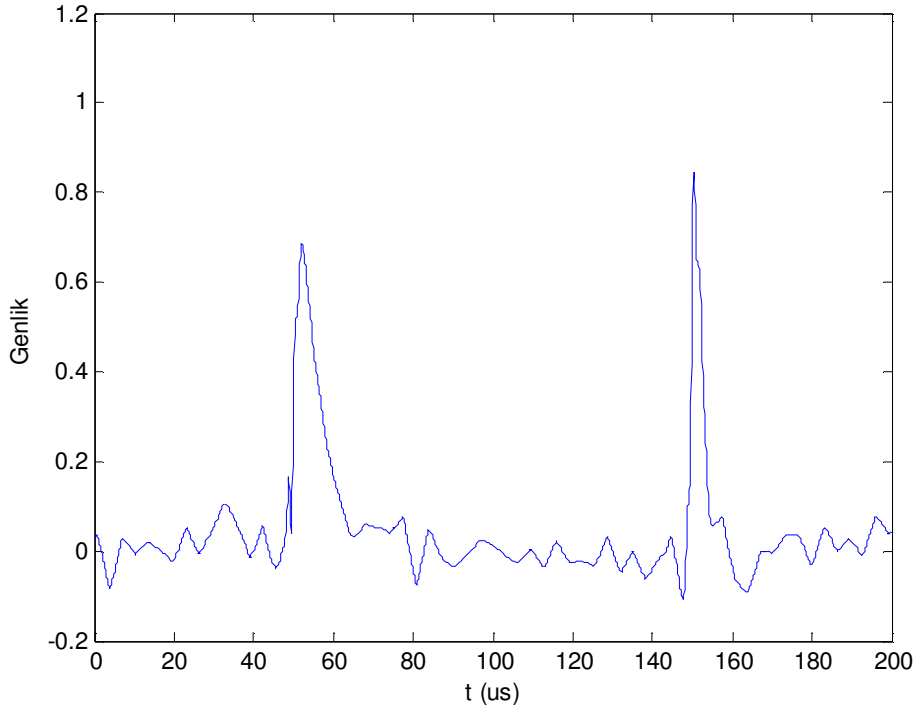
Sinyal #1, Sinyal #2 ve Sinyal #3'ün Ayrık Dalgacık Dönüşümünde Coif2 ana dalgacı kullanılarak gürültüden mümkün mertebe süzölmüş KB darbeleri için elde edilen sonuçlar grafiksel olarak aşağıda sırasıyla Şekil 6.16, 6.17 ve 6.18'de verilmektedir.



Şekil 6.16 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #1.



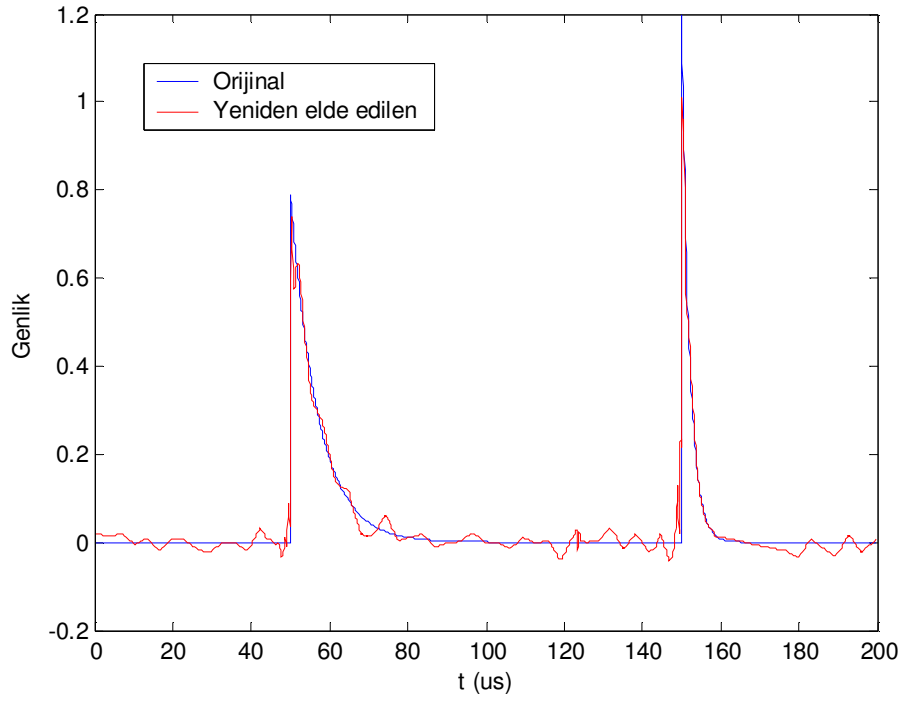
Şekil 6.17 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #2.



Şekil 6.18 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3

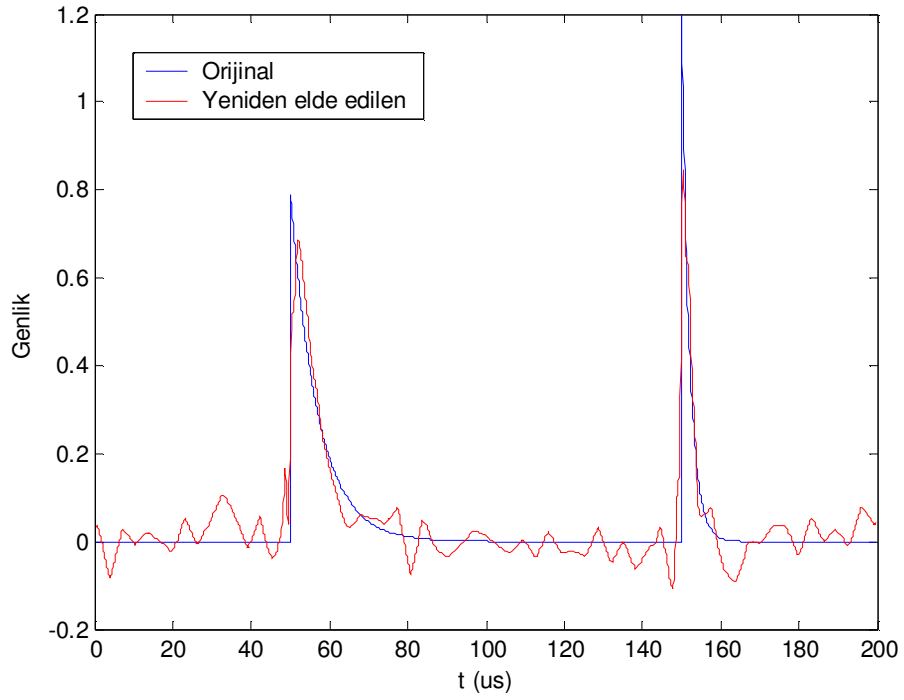
Şekil 6.18'e bakıldığında elde edilen KB verilerinin ana KB verilerinden genlik olarak bir miktar sapma gösterdiği görülmektedir. Burada gözden kaçırılmaması gereken husus Sinyal #3'ün yüksek mertebede ($\text{SNR} = -5 \text{ dB}$) gürültüye maruz kalmış olmasıdır. Bu bakımdan KB boşalma işaretleri bu durumda dahi rahatlıkla gürültüden yeterli seviyede temizlenebilmektedir. Ayrıca çalışmanın bu aşaması göstermiştir ki eşikleme yöntemi için optimum çözümün bulunması sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Tez kapsamında kısmi boşalma işaretlerinden gürültü süzmede eşikleme alanında yapılan çalışmalara ilerleyen kısımlarda değinilecektir.

Yöntemin başarısını görsel olarak sınamak adına Şekil 6.19'da gürültüden mümkün mertebe arındırılmış Sinyal #1 ile orijinal işaretin karşılaştırılması verilmiştir. Buradan görüleceği üzere sonuç oldukça başarılıdır.



Şekil 6.19 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #1 ile orijinal KB işaretleri.

Diğer taraftan daha yüksek seviyede gürültü içeren Sinyal #3 ile orijinal işaretin karşılaştırılması Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.20 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3 ile orijinal KB işaretleri.

Böylelikle RC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB işaretlerinin gürültüden süzülmesinde Ayırık Dalgacık Dönüşümü kullanılırken en iyi sonucu elde etmek adına seçilecek ayırıştırma seviyesi ve ana dalgacık belirlenmiş oldu. Diğer kısımda ise aynı işlemler RLC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB işaretlerinin değerlendirilmesi için tekrar edilecektir.

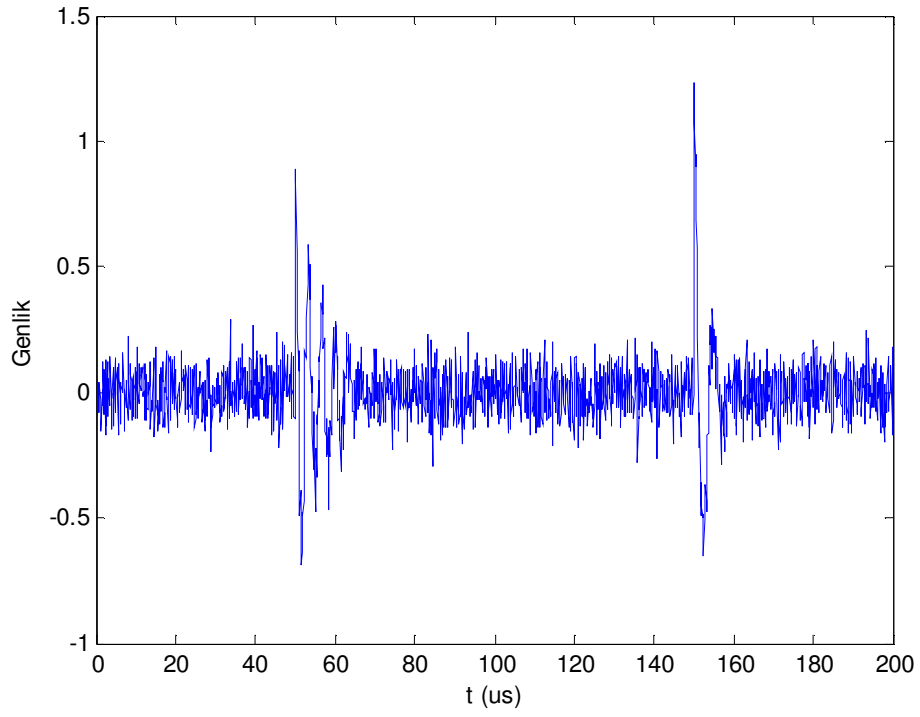
6.8.1 RLC tipi ölçü empedansı ile elde edilen KB darbeleri

Öncelikle farklı taşıyıcı dalga frekanslarında AM frekanslı gürültünün genliği, stokastik gürültünün genlik ve standart sapması değiştirilerek farklı gürültü seviyelerinde işaretler oluşturularak bunlar ana işaret üzerine bindirilmiştir. Ardından dalgacık analizi ile bu gürültülerin süzülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda analizde kullanılmak üzere farklı seviyede gürültüye sahip beş farklı veri oluşturulmuştur (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3 : RLC tipi ölçüm devresi için darbe benzetiminin özellikleri.

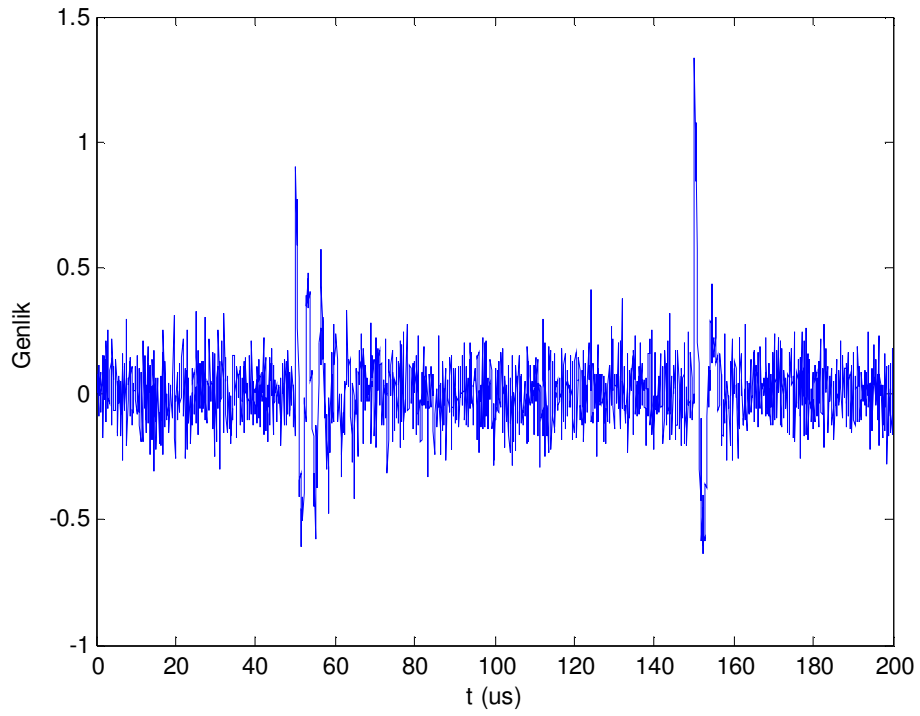
KB İşareti	Ölçüm Devresi Tipi	SNR(dB)	Darbe Sayısı	Darbe Genlikleri
Sinyal #1	RLC	5	2	0.8 1.2
Sinyal #2	RLC	0	2	0.8 1.2
Sinyal #3	RLC	-5	2	0.8 1.2
Sinyal #4	RLC	-10	2	0.8 1.2
Sinyal #5	RLC	-15	2	0.8 1.2

Şekil 6.21’de parametreleri Çizelge 6.3’de verilen Sinyal #1 gösterilmiştir.



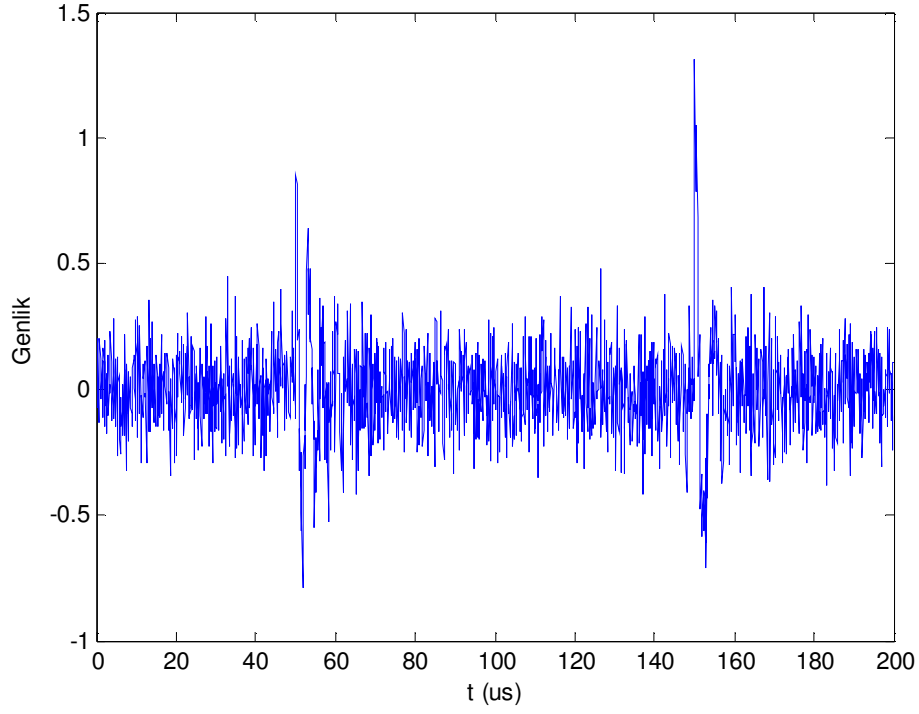
Şekil 6.21 : Sinyal #1 (SNR = 5 dB).

Şekil 6.22’de parametreleri Çizelge 6.3’de verilen Sinyal #2 gösterilmiştir.



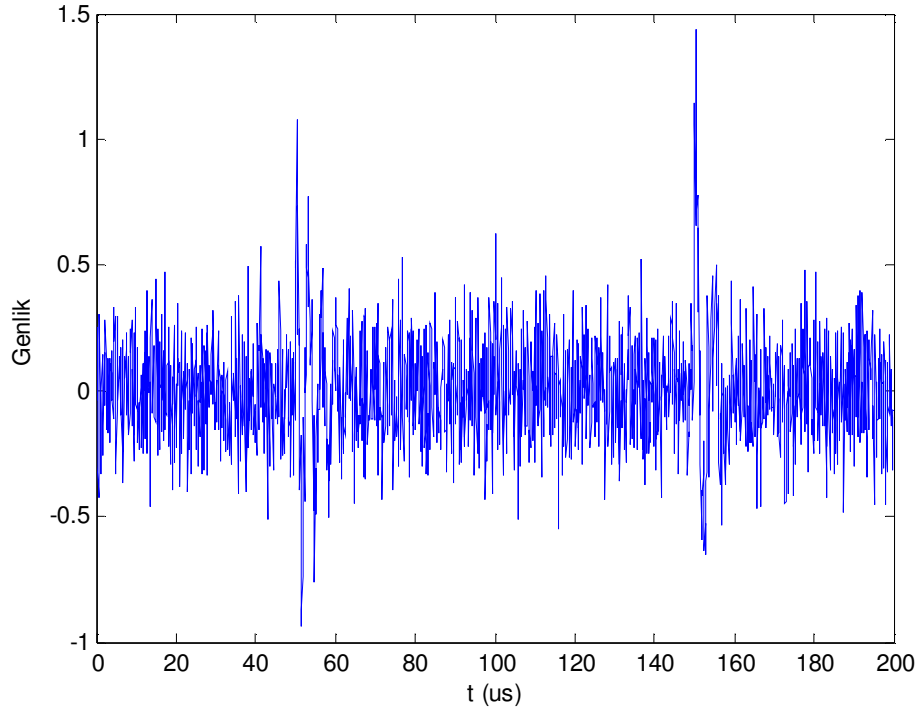
Şekil 6.22 : Sinyal #2 (SNR = 0 dB).

Şekil 6.23'te parametreleri Çizelge 6.3'de verilen Sinyal #3 gösterilmiştir.



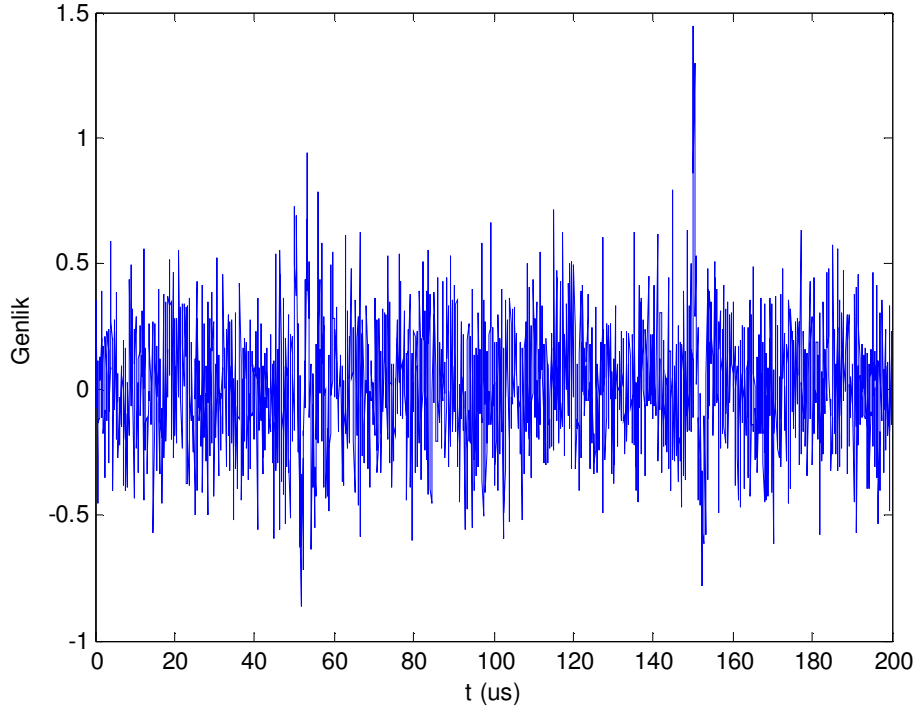
Şekil 6.23 : Sinyal #3 (SNR = - 5 dB).

Şekil 6.24'te parametreleri Çizelge 6.3'de verilen Sinyal #4 gösterilmiştir.



Şekil 6.24 : Sinyal #4 (SNR = - 10 dB).

Şekil 6.25'te parametreleri Çizelge 6.3'de verilen Sinyal #5 gösterilmiştir.



Şekil 6.25 : Sinyal #5 (SNR = - 15 dB).

Ayrıştırma seviyesi RC tipi ölçüm devresinden elde edilen veriler için belirlenmişti ve burada da geçerlidir. Optimum ana dalgacığın farklı olması beklenmektedir, çünkü elde edilen boşalma işaretleri birbirlerinden oldukça farklıdır. Bu kapsamda RLC tipi ölçüm devresi kullanılarak elde edilen KB işaretlerinin en etkin biçimde gürültüden süzülmesi amacıyla aday dalgacıklarla Ayrık Dalgacık Dönüşümü gerçekleştirilmiş ve sonuçta her bir aday dalgacık için yöntemin başarısını sınamak adına MSE, ME ve SNR değerleri hesap edilmiştir. Analizde seviye tabanlı eşikleme kuralı ve yumaşak eşikleme fonksiyonundan yararlanılmıştır. Buna göre ana işaret olarak SNR = 5 dB olan gürültülü KB işaret verisi kullanılarak farklı dalgacıklarla elde edilen gürültüden arındırma işlemi sonucunda her bir aday dalgacık için MSE, ME ve SNR hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 6.4'de özetlenmiştir. Çizelge 6.4'den görüleceği üzere en küçük MSE değerini ve en büyük SNR değerini sırasıyla Sym6, Coif2, Sym8 ve Db6 ana dalgacıkları sağlamaktadır. Diğer taraftan genlik hatası Db2 ve Sym2'de en az iken bunları Coif2, Db5 ve Sym6 ana dalgacıkları izlemektedir. Sonuçlara toplu bakıldığında RLC tipi ölçüm devresi kullanılarak elde edilen KB işaretlerinin gürültüden süzülmesinde kullanılacak optimum ana dalgacığın Sym6 olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.4 : Aday ana dalgacıklar ile elde edilen sonuçlar.

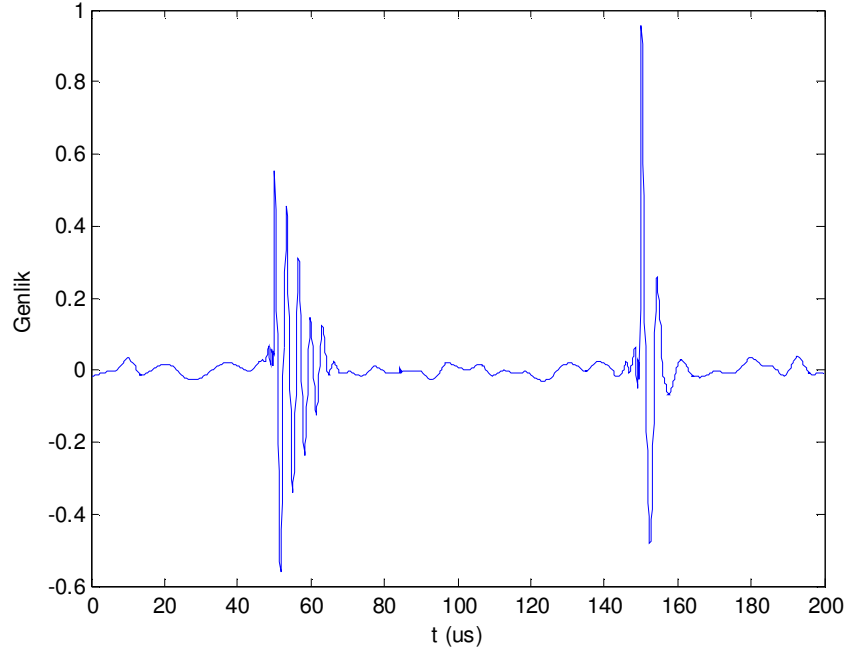
Ana Dalga	MSE	ME	SNR(dB)
Db2	0,0017	11,80	8,26
Db3	0,0015	27,68	8,93
Db4	0,0017	25,53	8,38
Db5	0,0018	17,97	7,99
Db6	0,0013	27,40	9,63
Db7	0,0020	33,58	7,66
Db8	0,0018	25,61	8,04
Db9	0,0016	40,22	8,71
Db10	0,0018	36,01	8,07
Db20	0,0024	41,39	6,78
Sym2	0,0017	11,80	8,26
Sym3	0,0015	27,68	8,93
Sym4	0,0013	27,69	9,59
Sym5	0,0016	28,17	8,49
Sym6	0,0011	20,36	10,36
Sym7	0,0018	23,86	8,09
Sym8	0,0012	23,21	9,77
Coif1	0,0019	25,02	7,93
Coif2	0,0012	17,92	9,86
Coif3	0,0015	21,34	9,00
Coif4	0,0017	20,53	8,43
Coif5	0,0015	28,07	8.82

Gürültü oranı arttıkça Sym6 ana dalgacığının RLC tipi ölçü devresi ile elde KB işaretlerinden gürültü süzmedeki etkinliği araştırma adına bu ana dalgacıklar için 0dB, -5dB ve -10 dB SNR değerine sahip işaretler için MSE, ME ve SNR değerleri hesap edilmiş ve Çizelge 6.5’de verilmiştir.

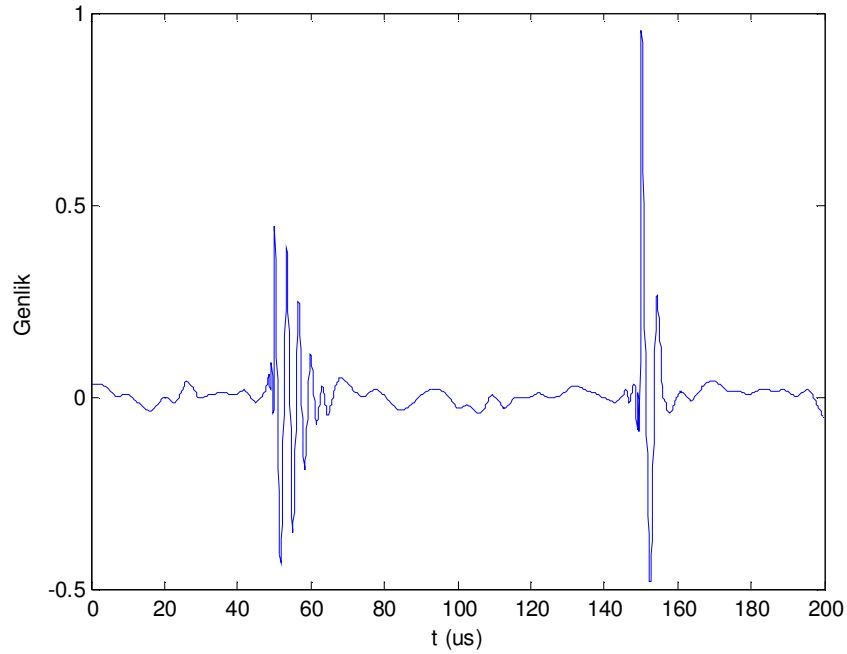
Çizelge 6.5 : En başarılı dört ana dalgacık için toplu sonuçlar.

0 dB			
Ana Dalga	MSE	ME	SNR(dB)
Sym6	0,0017	20,51	8,38
Coif2	0,0017	25,33	8,25
Sym8	0,0018	27,05	7,99
Db6	0,0018	29,85	8,12
-5 dB			
Ana Dalga	MSE	ME	SNR(dB)
Sym6	0,0025	29,45	6,72
Coif2	0,0027	23,35	6,39
Sym8	0,0026	27,77	6,50
Db6	0,0025	36,72	6,70
-10 dB			
Ana Dalga	MSE	ME	SNR(dB)
Sym6	0,0039	48,21	4,74
Coif2	0,0041	43,46	4,56
Sym8	0,0042	45,21	4,43
Db6	0,0041	54,03	4,52

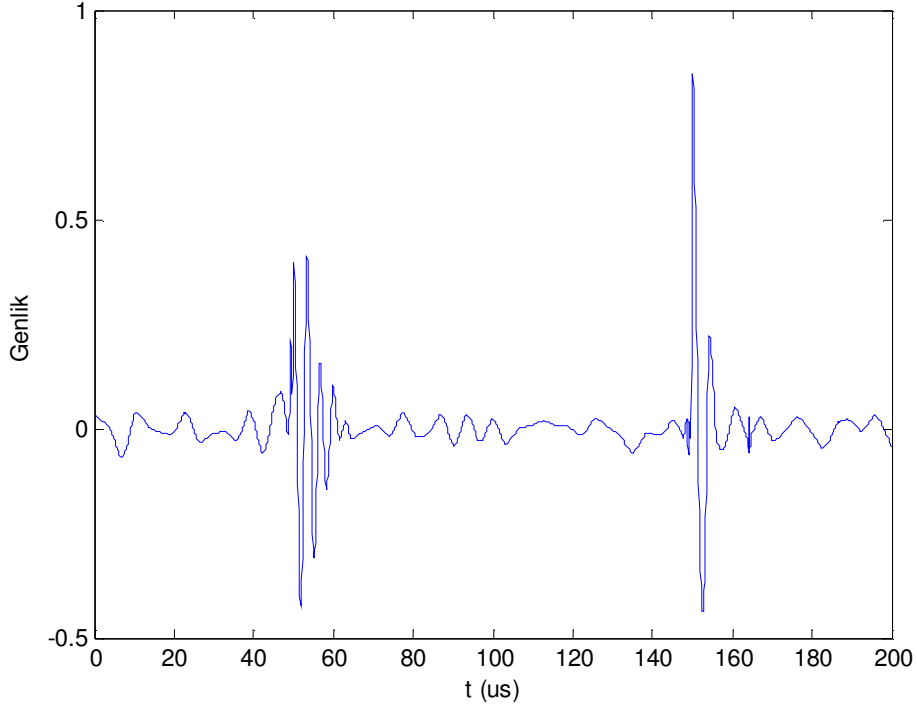
Çizelge 6.5’den görüleceği üzere Sym6 en başarılı ana dalgacıktır. Sinyal #1-#5 üzerinde yapılan Ayırık Dalgacık Dönüşümünde Sym6 ana dalgacığı kullanılarak gürültüden mümkün mertebe süzülmüş KB darbeleri için elde edilen sonuçlar grafiksel olarak aşağıda sırasıyla Şekil 6.26 – 6.30’da verilmektedir.



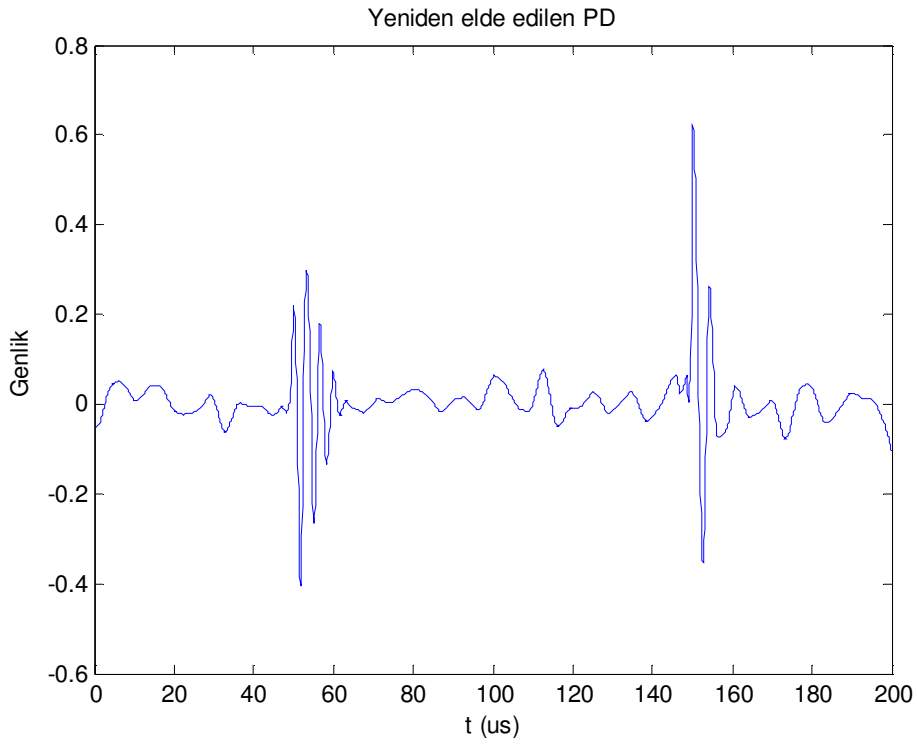
Şekil 6.26 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #1 (SNR = 5 dB).



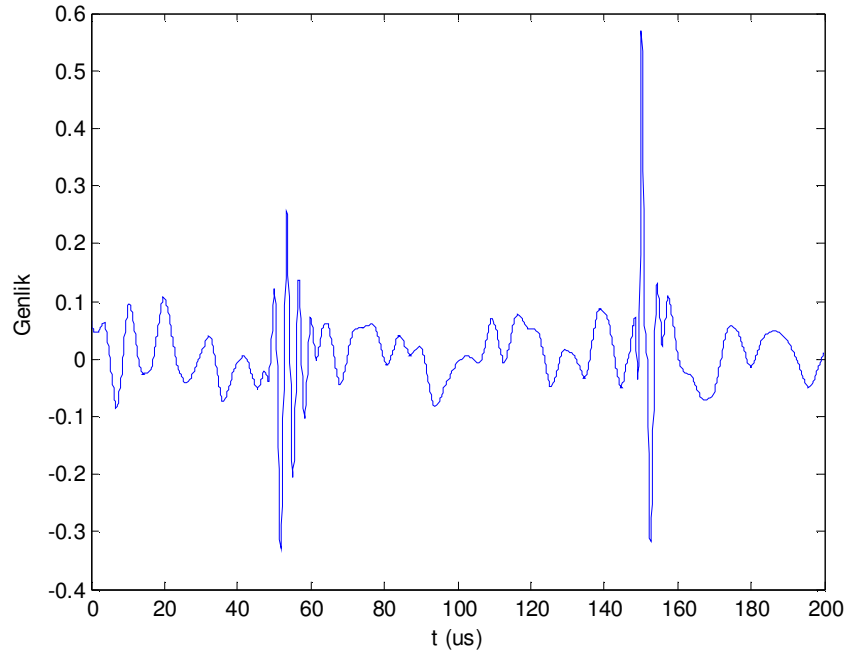
Şekil 6.27 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #2 (SNR = 0 dB).



Şekil 6.28 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3 (SNR = -5 dB).

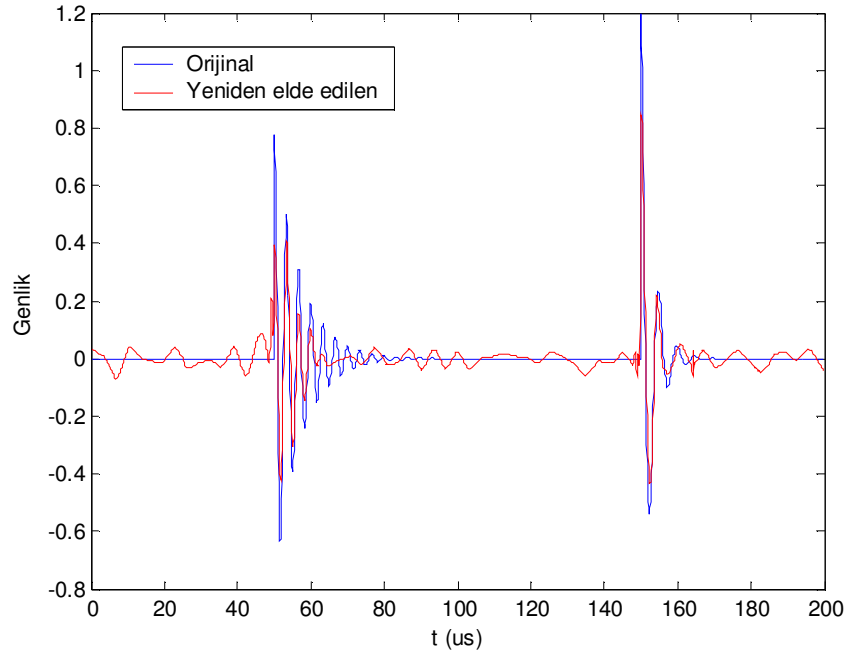


Şekil 6.29 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #4 (SNR = -10 dB).



Şekil 6.30 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #5 (SNR = -15 dB).

Yöntemin başarısını görsel olarak sınamak adına Şekil 6.31’de gürültüden mümkün mertebe arındırılmış Sinyal #3 ile orijinal işaretin karşılaştırılması verilmiştir. Buradan görüleceği üzere sonuç KB darbelerini ayırt etmede ve ilgili darbe parametrelerini belirlemede yeterli seviyede başarılıdır.



Şekil 6.31 : Gürültüden arındırılmış Sinyal #3 ile orijinal KB işaretleri.

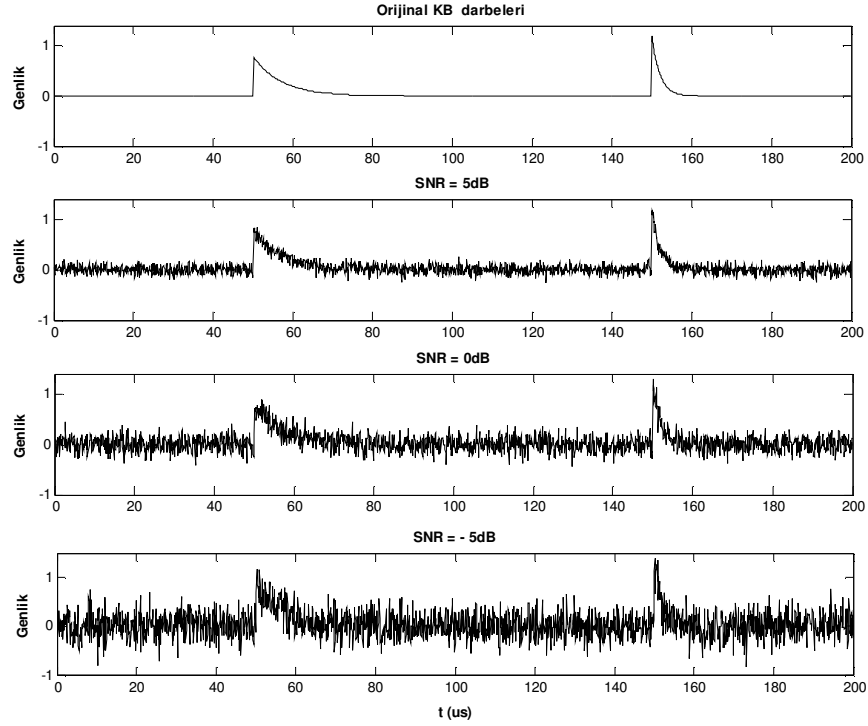
6.9 En Uygun Eşikleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir önceki kısımda verilen sonuçlar göstermektedir ki en başarılı ana dalgacık belirlenebilmiştir. Bir diğer önemli konu ise Ayrık Dalgacık Dönüşümünden sonra birleştirme işlemine geçmeden önce uygulanacak detay katsayıları için eşikleme kuralı ve eşikleme için kullanılacak fonksiyonun seçilmesidir. Bunun önemi bu değerin küçük seçildiğinde sonuçta ana işaretle birlikte bir miktar gürültünün kalabilmesi, yüksek değerde seçilmesi durumunda ise ana sinyalin özelliklerinin de kaybolabileceğidir. Belirtilen bu nedenlerden dolayı KB ölçüm sonuçlarının gürültüden arındırılmasında kullanılacak en iyi sonucu verecek eşikleme kuralı ve de eşikleme fonksiyonunun belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Literatüre bakıldığında bu konuda KB işaretleri için özel bir çalışmaya rastlanmamış, genelde çok yaygın kullanılan sabit eşikleme kuralı ile yumuşak eşikleme fonksiyonu kullanılmış ve deneme yanılma ile sonuca gidilmiştir [67].

Öncelikle yapılan araştırmalar sonucunda dalgacık analizi ile KB işaretlerinin gürültüden arındırılmasında kullanılabilecek olası eşikleme kuralları belirlenmiştir. Ardından yine amaca hizmet edebilecek eşikleme fonksiyonları belirlenerek bunların farklı kombinasyonları KB verilerine uygulanmıştır. Yöntemlerin başarısının sınanmasında MSE, ME ve SNR değerleri hesap edilmiştir. Bu amaçla RC tipi ölçüm empedansı ile elde edilen KB ve bunun üzerine farklı genliklerde gürültü bindirimini temsil eden Şekil 6.32’de gösterilen Gauss dağılımlı beyaz gürültü içeren KB işaretleri analiz sırasında kullanılmıştır.

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere dalgacık tabanlı gürültü süzme üç ana kısımdan oluşur. Bunlardan birincisi işareti alt bantlara ana dalgacık ve seçilen ayrıştırma seviyesine göre ayrıştırma, ikincisi her seviyedeki detay dalgacık katsayılarını uygun eşikleme kuralı ve de eşikleme fonksiyonu ile eşiklemeye tabi tutma, üçüncüsü ise eşikleme sonrası kalan dalgacık katsayılarını (modifiye edilmiş) kullanarak ters dalgacık dönüşümü ile yeniden birleştirmedir.

Ana dalgacığın ve ayrıştırma seviyesinin seçiminin nasıl yapılacağı belirlenmişti. Bu kısımda gürültüden süzme işlemi için en son bilinmeyen olan eşikleme kuralı ve fonksiyonunun seçimi yapılacaktır.



Şekil 6.32 : KB darbeleri (orijinal, SNR = 5 , 0, -5 dB gürültülü)

Dalgacık analizi ile gürültü süzmenin amacı gürültülü bir işaret olan $f(n)$ 'den aranan gürültüsüz $s(n)$ işaretini mümkün mertebe elde etmektir. (6.18)'de ilgili ifade verilmiştir, burada $e(n)$ gürültü bileşenini göstermektedir.

$$f(n) = s(n) + e(n) \quad (6.18)$$

Eşikleme değeri λ ile gösterilir. İşte bu değeri bize sağlayan eşikleme kuralı için farklı alanlardaki gürültü süzme işlemlerinde aşağıda belirtilen beş farklı yöntem göze çarpmaktadır. İlgili yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

Sqtwolog (Üniversal): Evrensel eşikleme yöntemi (sabit eşikleme olarak da adlandırılır) Donoho and Johnstone [68] tarafından sunulan sabit eşikleme yöntemini kullanır. Aşağıda verilen (6.19) ilgili eşitliği göstermektedir ve burada N işaret uzunluğunu, σ ise standart sapmayı göstermektedir. Sabit eşik değer tüm dalgacık katsayıları için (her seviyede) aynıdır. Buradan da görülebileceği gibi bu eşikleme yönteminde işaretin uzunluğuna ve standart sapmasına bağlı olarak dalgacık katsayıları için sabit bir eşik değeri hesaplanır.

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log(N)} \quad (6.19)$$

Rigrsure: Bu yöntem için Stein's Unbiased Risk Estimate (SURE) kullanılır. Eşik değeri hasabı (6.20)'de verilmiştir.

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log(N \log_2 N)} \quad (6.20)$$

Heursure: Eşik değeri yukarıdaki iki yöntemin kullanılmasıyla seçilir. Eğer işarete ait SNR değeri çok düşükse Rigrsure gürültülü sonuç verir. Bu durumda sabit eşikleme kullanılır.

Minimaxi: Bu ölçüt maksimum ortalama karesel hatayı minimize eder [69]. İlgili eşitlik (6.21)'de verilmiştir.

$$\lambda = \begin{cases} \sigma(0.3936 + 0.1829 \log_2 N) & N \geq 32 \\ 0 & N < 32 \end{cases} \quad (6.21)$$

Seviyeye bağlı eşikleme (LDT): [55] universal eşiklemenin ayrıştırma seviyesine bağlı değiştirilmiş bir şeklini önermiştir.

$$\lambda_j = \frac{m_j}{0.6745} \sqrt{2 \log(n_j)} \quad (6.22)$$

(6.22)'de λ_j j. seviyeye ait eşik değeri, m_j j. seviyedeki dalgacık katsayılarının medyan değeri, n_j j. seviyedeki dalgacık katsayısı sayısıdır [55].

Literatürdeki dalgacık analizi ile gürültü süzme çalışmalarının büyük çoğunluğu ya yumuşak ya da katı eşikleme yöntemi kullanmışlardır. Katı eşikleme fonksiyonu süreksizdir. Bu nedenle analizler sırasında osilasyonlar görülebilir. Diğer taraftan yumuşak eşikleme fonksiyonu sürekli fakat türevi süreksizliğe sahiptir. Bu iki eşikleme yönteminin dezavantajlarından kurtulmak adına KB çalışmaları dışındaki genel işaret analiz çalışmaları için son zamanlarda aşağıda açıklanan fonksiyonlar önerilmiştir. Bu çalışmada, belirtilen bu fonksiyonlar dalgacık analizi ile KB işaretlerinin gürültüden arındırılmasında daha başarılı sonuç elde edilip edilemeyeceğini görmek adına eşikleme fonksiyonları olarak denenmişlerdir. Aşağıdaki ifadelerde w_j j. seviyedeki dalgacık katsayılarını göstermektedir.

Katı Eşikleme

$$w_j = \begin{cases} w_j & |w_j| > \lambda \\ 0 & |w_j| \leq \lambda \end{cases} \quad (6.23)$$

Yumuşak eşikleme

$$w_j = \begin{cases} \text{sgn}(w_j)(w_j - \lambda) & |w_j| > \lambda \\ 0 & |w_j| \leq \lambda \end{cases} \quad (6.24)$$

Hiperbolik

$$w_j = \begin{cases} \text{sgn}(w_j)\sqrt{(w_j^2 - \lambda^2)} & |w_j| > \lambda \\ 0 & |w_j| \leq \lambda \end{cases} \quad (6.25)$$

Negatif olmayan Garrote

$$w_j = \begin{cases} (w_j - \frac{\lambda^2}{w_j}) & |w_j| > \lambda \\ 0 & |w_j| \leq \lambda \end{cases} \quad (6.26)$$

Birleşik

Bu fonksiyon [70] tarafından önerilmiştir. Analizde kullandığımız işaret için farklı a ve b parametreleri için en iyi değerler olarak $a = 0.8$, $b = 3$ olarak bulunmuş ve bu değerler kullanılarak eşikleme değerleri hesap edilmiştir.

$$w_j = \begin{cases} \text{sgn}(w_j)(|w_j|^a - b\lambda^a)^{\frac{1}{a}} & |w_j| > \lambda \\ 0 & |w_j| \leq \lambda \end{cases} \quad (6.27)$$

Esnek

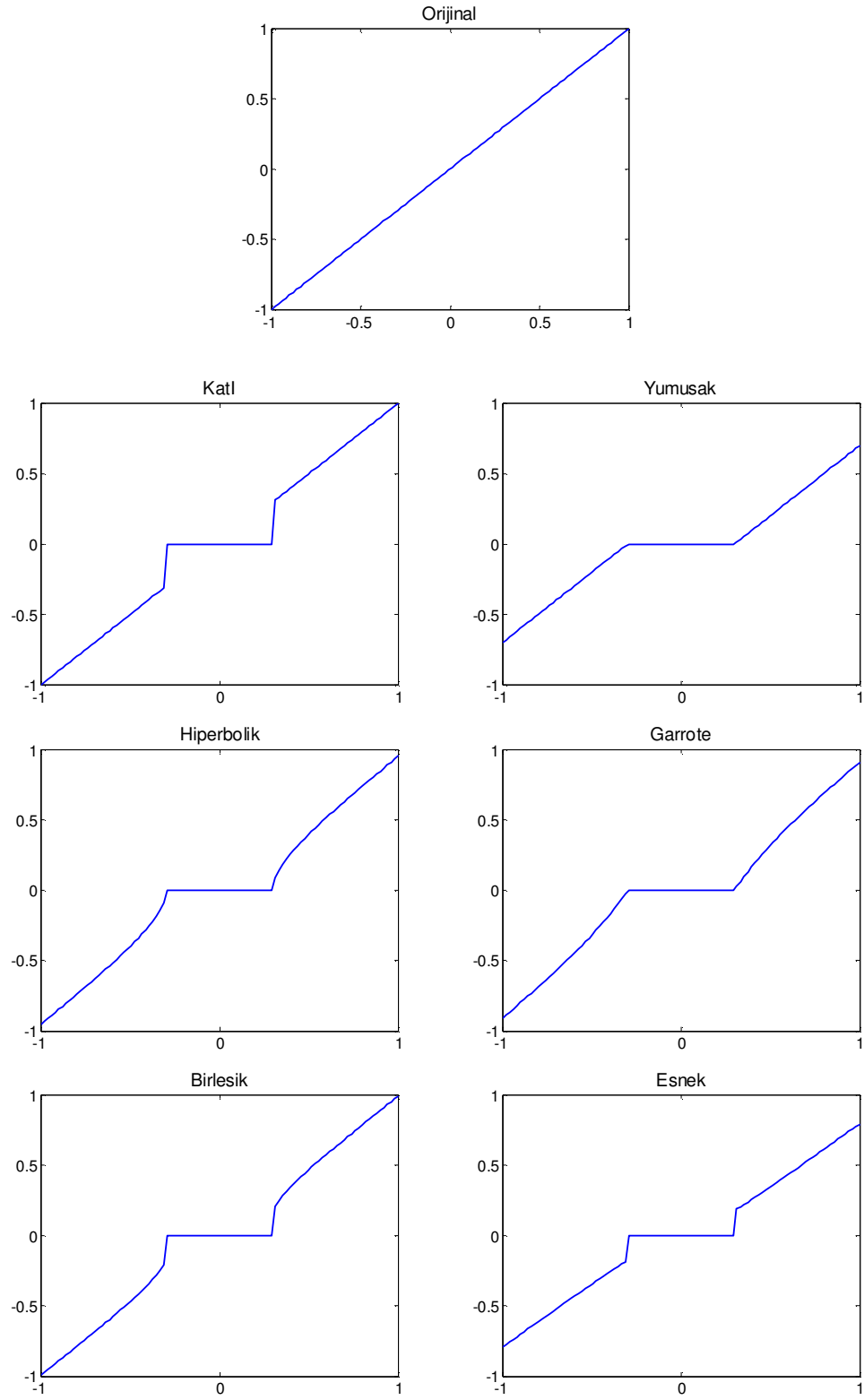
Bu fonksiyon [71] tarafından önerilmiştir. Analizde kullandığımız işaret için $\delta = 0.95$ değeri en iyi sonucu sağlamıştır ve bu değer kullanılarak eşikleme değerleri hesap edilmiştir.

$$w_j = \begin{cases} \text{sgn}(w_j) \left(|w_j| - \delta\lambda + \frac{\sqrt{\delta(1-\delta)}}{e^{|w_j|}} \right) & |w_j| > \lambda \\ 0 & |w_j| \leq \lambda \end{cases} \quad (6.28)$$

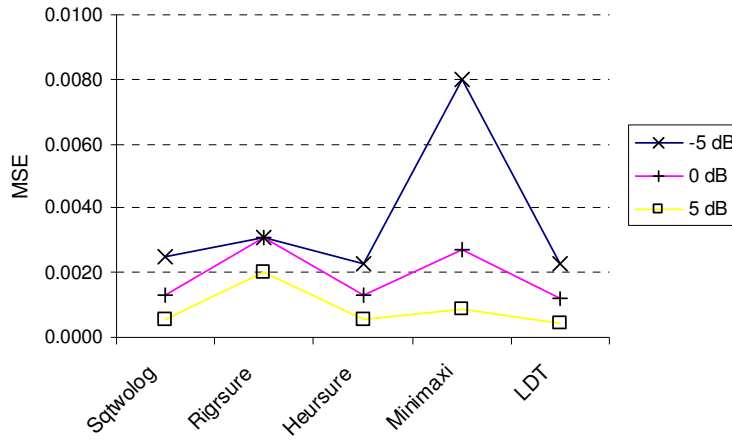
Belirtilen eşikleme fonksiyonlarının farkını ortaya koymak adına Şekil 6.33 bir giriş işaretini ve $\lambda = 0.3$ olarak seçilen eşikleme değeri için giriş işaretinin farklı fonksiyonlarla eşiklenme işlemi sonundaki elde edilen sonuçları göstermektedir.

6.10 En Uygun Eşikleme Kuralı ve Fonksiyonunun Seçilmesi

İlk olarak beş farklı eşikleme kuralı üç farklı seviyede gürültü içeren KB işaretleri (Şekil 6.32) üzerinde denenmiştir. Öncelikle her bir eşikleme kuralı kullanılarak eşik değerler her alt-bant için bulunmuş ardından yumuşak eşikleme kullanılarak gürültüden mümkün mertebe süzölmüş KB işaretleri elde edilmiştir. Ana işaret işlem başlangıcında zaten bilindiğinden yöntemin başarısı daha önceki kısımlarda açıklanan ve kullanılan MSE, ME ve SNR değerleri hesap edilerek eşikleme kuralları arasında kıyaslama yapılabilmektedir. Aşağıda verilen Şekil 6.34 üç farklı gürültü seviyesinde Şekil 6.32’de verilen KB verilerinin ilgili eşikleme yöntemleri kullanılarak elde edilen MSE değerlerini göstermektedir. Yöntemin başarısı MSE değeri azaldıkça artar.

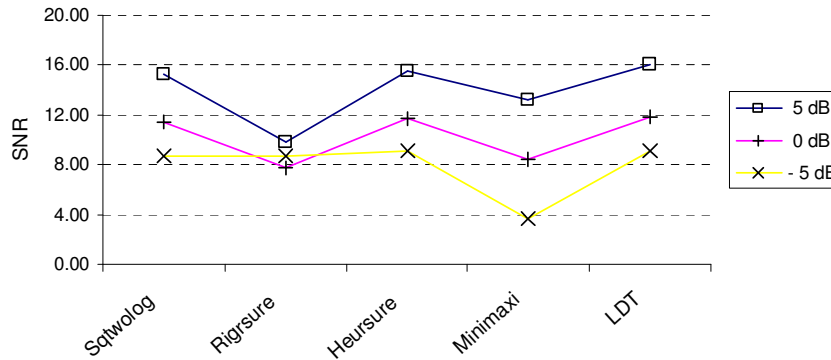


Şekil 6.33 : Eşikleme fonksiyonlarının $\lambda = 0.3$ için sonuçları.



Şekil 6.34 : Beş farklı eşikleme kuralı ile elde edilen MSE değerleri.

Şekil 6.34'den görüleceği üzere en başarılı eşikleme kuralı tüm gürültü seviyelerinde en düşük MSE değerini sağlayan seviyeye bağlı eşikleme (LDT) kuralıdır. Şekil 6.35 ise gürültü süzme işlemi sonucunda farklı eşikleme kuralları için elde edilen SNR değerlerini göstermektedir.

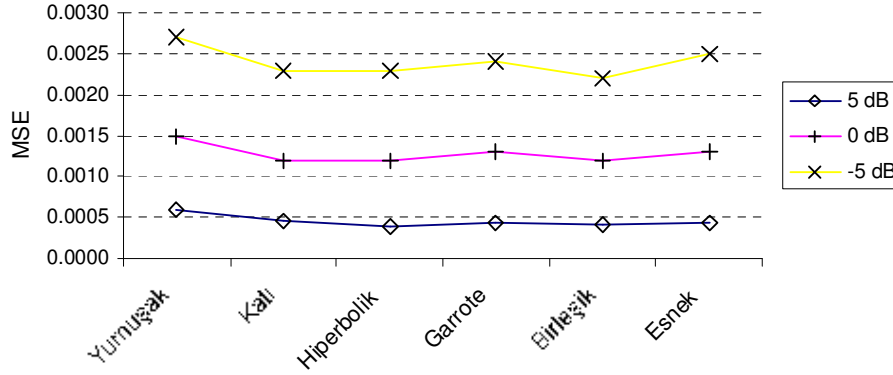


Şekil 6.35 : Beş farklı eşikleme kuralı ile elde edilen SNR değerleri.

Buradan görüldüğü üzere LDT en yüksek SNR değerini sağlarken onu Heursure ve Sqrtwolog eşikleme kuralları izlemektedir. Sonuç olarak Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'den açıkça görülmüştür; eşikleme kuralı olarak seviyeye bağlı eşikleme (LDT) KB işaretlerinin gürültüden arındırılmasında en başarılı eşikleme kuralı olarak belirlenmiştir.

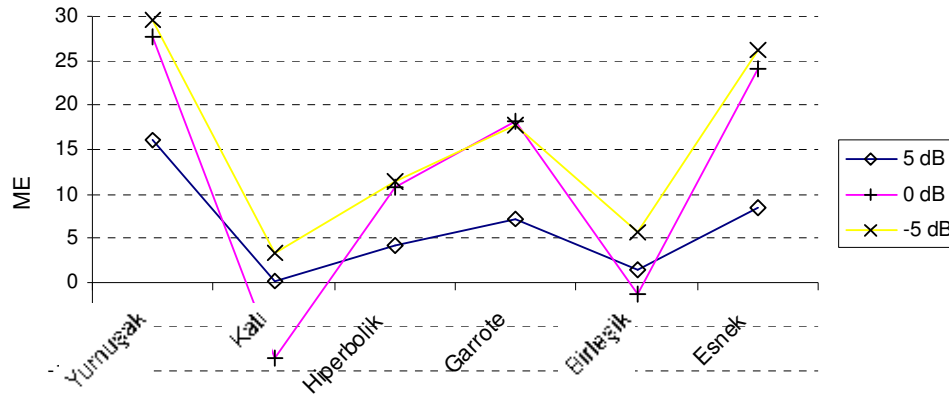
KB işaretlerinin gürültüden süzülmesinde en başarılı eşikleme kuralını LDT yöntemi olarak belirledikten sonra ikinci adım en uygun eşikleme fonksiyonunu belirlemektir. Bu kapsamda önceki kısımda belirtilen aday eşikleme fonksiyonları kullanılarak gürültü süzme işlemi sonrasında elde edilen MSE, ME ve SNR değerleri hesap

edilmiştir. Şekil 6.36 üç farklı gürültü seviyesinde altı farklı eşikleme fonksiyonu kullanılarak gürültü süzme işlemi sonucunda elde edilen MSE değerlerini göstermektedir.



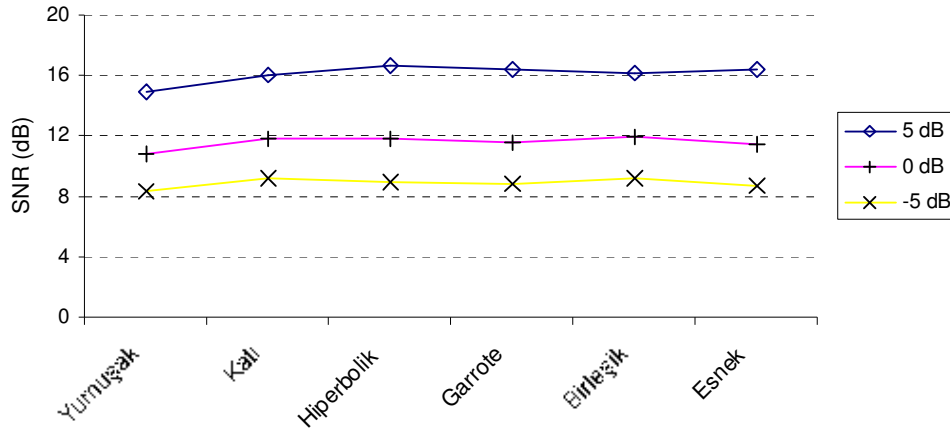
Şekil 6.36 : Altı farklı eşikleme fonksiyonu kullanılarak elde edilen MSE değerleri.

Diğer taraftan aynı eşikleme fonksiyonları kullanılarak genlik hatası (ME) değerleri hesap edilmiş ve Şekil 6.37’de gösterilmiştir. Beklenti genlik hatasının küçük olmasıdır. Genlik hatasının minimum değerde olması istenildiği göz önüne alındığında birleşik ve katı eşikleme fonksiyonlarının diğer eşikleme fonksiyonlarına olan üstünlüğü ortadadır.



Şekil 6.37 : Altı farklı eşikleme fonksiyonu kullanılarak elde edilen ME değerleri.

Şekil 6.38 ise eşikleme fonksiyonlarının kullanımıyla elde edilen SNR değerlerini göstermektedir. SNR değerinin yüksek olması gerekir ve en başarılı eşikleme fonksiyonunun birleşik eşikleme fonksiyonu olduğu görülmektedir.



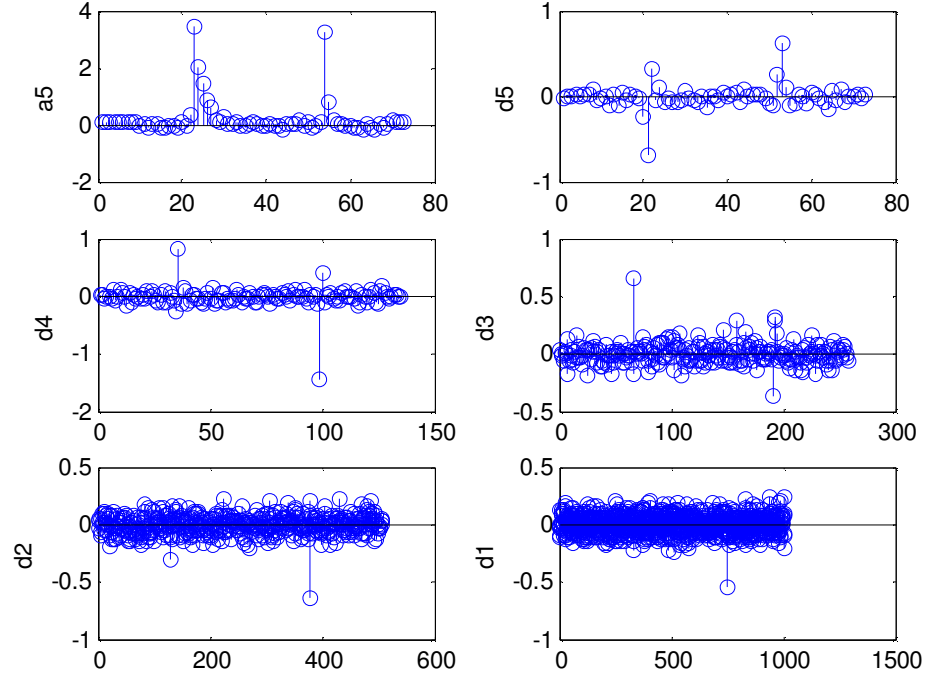
Şekil 6.38 : Altı farklı eşikleme fonksiyonu kullanılarak elde edilen SNR değerleri.

Yukarıdaki eşikleme fonksiyonları için verilen üç ayrı grafikten de görüleceği üzere KB işaretlerinden gürültü süzme işleminde dalgacık analizinin kullanılmasında en etkin eşikleme fonksiyonunun birleşik eşikleme fonksiyonu olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak KB işaretlerinin gürültüden süzülmesi işleminde dalgacık analizi kullanılırken her bir ayrıştırma seviyesinde detay dalgacık sabitlerinin eşik değerlerinin belirlenmesinde en etkili kural, seviyeye bağlı eşikleme (LDT) iken belirlenen bu eşik değeri kullanarak yapılacak eşiklemede yararlanılacak eşikleme fonksiyonunda en başarılı ise birleşik eşikleme olarak ortaya çıkmıştır. Birleşik eşikleme yönteminden sonra gelen ikinci alternatif ise katı eşiklemedir. Zira yaygın olarak kullanılan yumuşak eşikleme yüksek değerde genlik hatasına ve düşük değerde işaret gürültü oranı sağlamaktadır, bunlar da istenmeyen durumlardır.

Gürültü süzme için boşalma öncesi ölçülen ortam gürültüsünden eşik değeri çıkarımı [72]'de bulunarak uygulanmış. Sonuçlar başarılı gözükse de kendi verimiz için denemeler doğru sonucu vermemiştir. Bu nedenle eşikleme kuralı ve fonksiyonunun seçimi büyük önem arz etmektedir. Bu konuda bir diğer örnek ise [73]'de verilmiştir. Ayrıca eşik değerinin doğru seçimi kablolarla arıza bulma için yansıyan dalgaların zamanlarının belirlenmesinde de önemlidir [74] .

Eşiklemenin nasıl yapıldığını açıklamak için bir örnek verilmiştir. Şekil 6.39, Şekil 6.32'de verilen SNR = 5 dB'lik işaret için beş farklı seviyedeki dalgacık katsayılarını (a5 yaklaşım katsayıları ve d1-d5 detay katsayıları) göstermektedir. Katsayılar elde edilirken yapılan ayrıştırmada Coif2 ana dalgacığı kullanılmıştır.

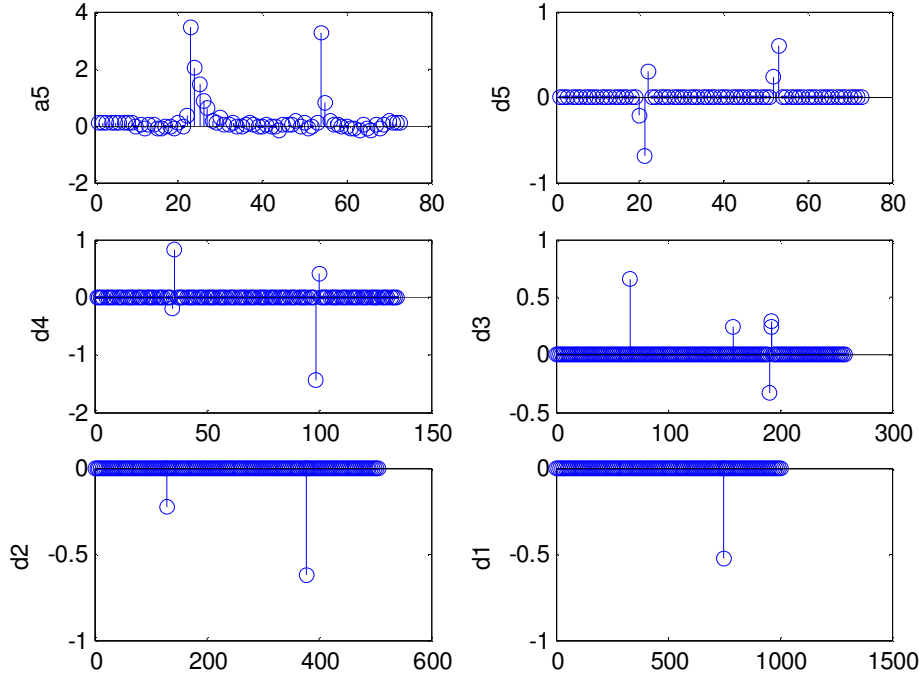


Şekil 6.39 : Şekil 6.32’de verilen işaret için beş seviyedeki dalgacık katsayıları.

Bu aşamadan sonra belirlenmesi gereken her bir alt-bant detay katsayıları için eşikleme değerlerinin (λ_{cd1} , λ_{cd2} , λ_{cd3} , λ_{cd4} ve λ_{cd5}) belirlenmesidir. Seviyeye bağlı eşikleme kuralı (LDT) için (6.22) ifadesi kullanılarak aşağıdaki eşik değerler elde edilmiştir.

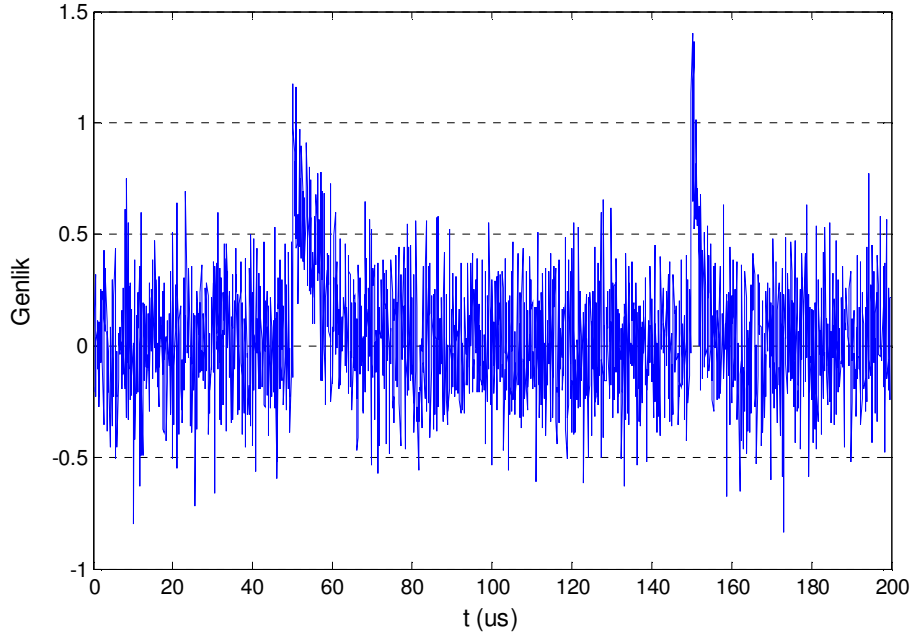
$$\lambda_{cd1} = 0.2962, \lambda_{cd2} = 0.2594, \lambda_{cd3} = 0.2396, \lambda_{cd4} = 0.2254, \lambda_{cd5} = 0.1634$$

Belirtilen bu eşik değerler birleşik eşikleme fonksiyonunu tanımlayan ifade (6.27)’de kullanılarak detay katsayılarının eşiklenmesi gerçekleştirilmiştir. Eşikleme sonrası elde edilen dalgacık katsayıları (d1-d5) Şekil 6.40’da gösterilmektedir. Böylelikle eşikleme işlemi tamamlanmıştır. Artık bu katsayılar kullanılarak ters dalgacık dönüşümü ile gürültüden mümkün mertebe süzölmüş ana işaret elde edilebilir.

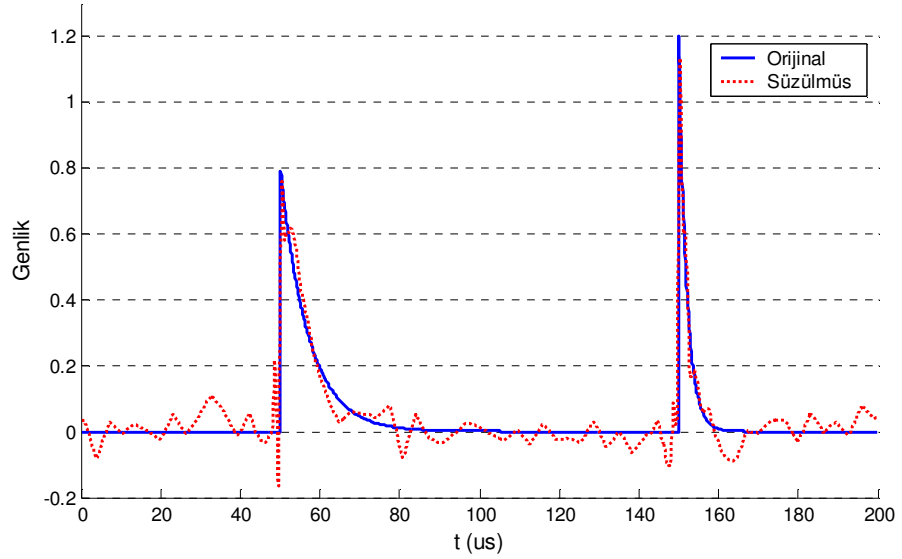


Şekil 6.40 : Şekil 6.39'daki dalgacık katsayılarının eşiklenmiş hali.

Şekil 6.41 SNR = -5 dB gürültü gürültü seviyesine sahip RC devresi ile elde edilen KB işareti için en uygun olarak belirlenen ana dalgacık, eşikleme seviyesi, eşikleme kuralı ve fonksiyonu yardımıyla dalgacık analizi ile gürültüden süzölmüş sonucu orijinal işaret ile karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Buradan göröleceğı üzere SNR = -5 dB gibi yüksek oranda güröltüye maruz KB işaretlelerinde dahi sonuç oldukça başarılıdır.



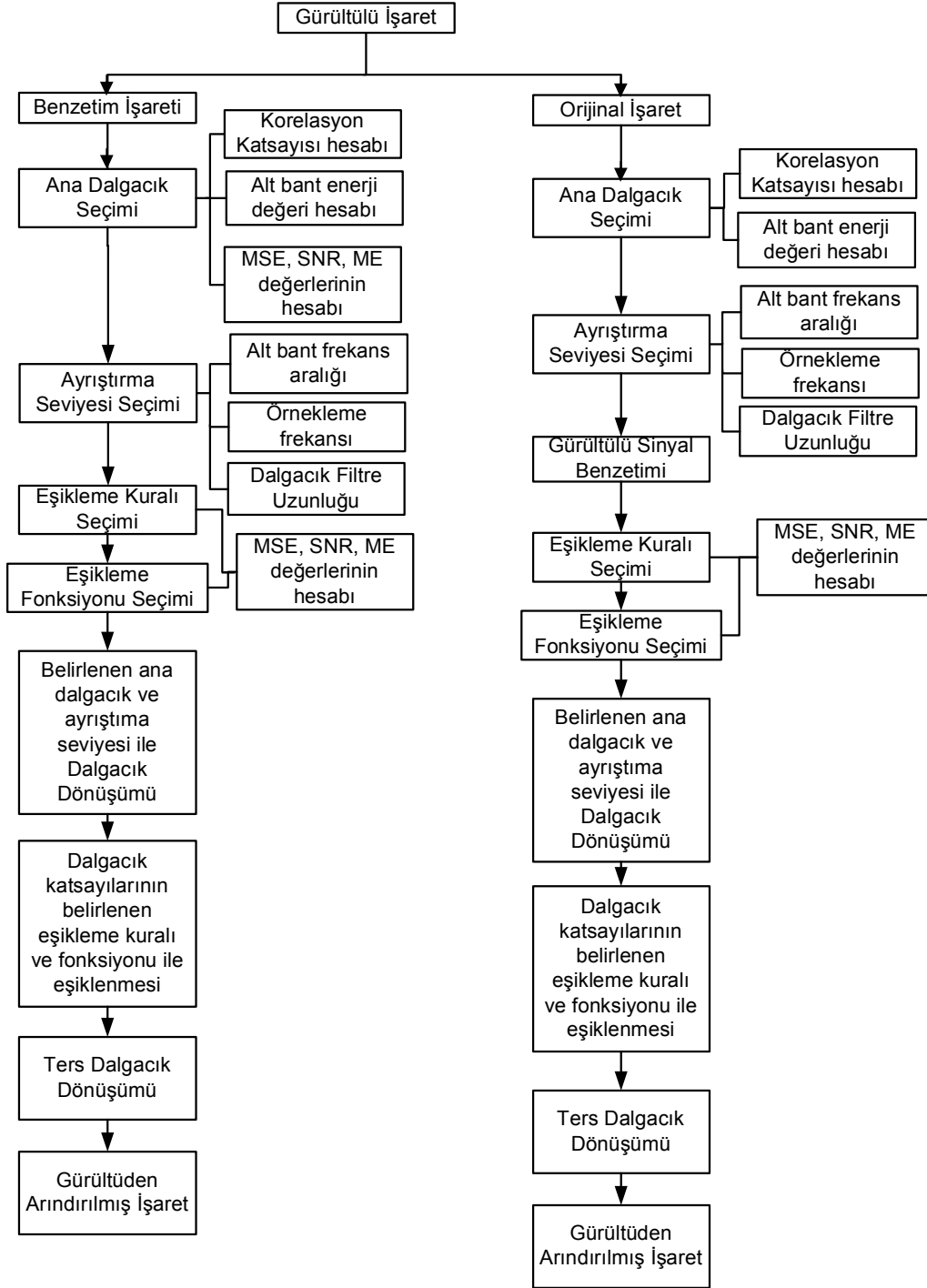
a)



b)

Şekil 6.41 : a) Orijinal veri (SNR= -5dB), b) belirlenen yöntemle elde edilen gürültüden süzülmüş ve orijinal darbelerin gösterimi.

Yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen işaretlerin gürültüden arındırılması amacıyla bu çalışmada belirlenen dalgacık analizi tabanlı yöntemi tanımlayan bir akış diyagramı Şekil 6.42’de verilmiştir.



Şekil 6.42 : Dalgacık analizi ile işaretlerden gürültü temizleme akış diyagramı.

Yukarıdaki akış diyagramından görüleceği üzere gürültüden arındırma işlemi üzerinde çalışılan işaretin benzetim işareti ya da deney, ölçüm gibi yollarla elde edilen orijinal işaret olmasına göre farklılık göstermektedir. Orijinal işarettaki

gürültü miktarı bilinmiyorken benzetim işaretinde biliniyor olması en temel farklılıktır.

6.11 Bölümün Sonuçları

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 benzetim verileri hem RC hem de RLC tipi ölçüm devreleri için oluşturulmuştur. Bu verilere farklı seviyelerde beyaz ve sinüsoidal gürültü eklenerek gerek laboratuvar gerekse işletmede açık alanda yapılan KB ölçümlerinde elde edilen verilere benzer gürültülü KB işaretleri elde edilmiştir. Ardından her iki farklı ölçüm sistemi için KB işaretlerini gürültüden arındırmak adına Ayrık Dalgacık Dönüşümünde kullanılmak üzere en uygun ayırıştırma seviyesi, optimum ana dalgacık, eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonları belirlenmiştir. Çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6’da özetlenmiştir.

Çizelge 6.6 : KB işaretlerinden gürültü süzme için en uygun parametreler.

KB Ölçüm Empedansı	Ayrıştırma Seviyesi	En Uygun Ana Dalgacık	Eşikleme Kuralı	Eşikleme Fonksiyonu
RC	Örnekleme frekansına ve veri sayısına bağlı	Coif2	Seviyeye Bağlı (LDT)	Birleşik
RLC	Örnekleme frekansına ve veri sayısına bağlı	Sym6	Seviyeye Bağlı (LDT)	Birleşik

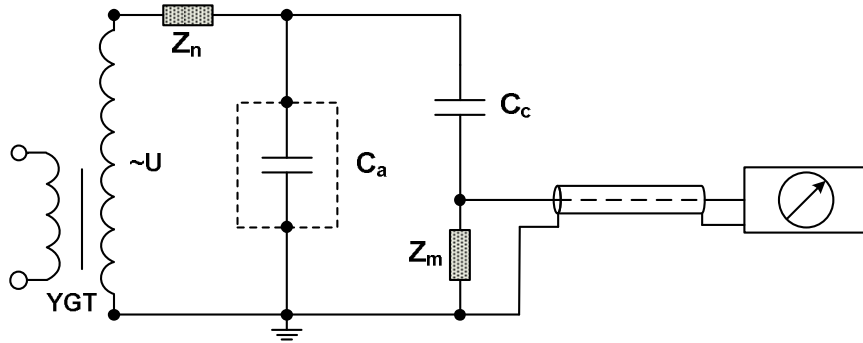
Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki yöntem yüksek seviyede gürültü oranlarında dahi KB işareti büyüklüklerinin varlığını, oluşum zamanını, genliğini belirlemeye olanak sağlamaktadır.

7. KİSMİ BOŞALMA ÖLÇÜMÜ VE ÇOKLU ÇÖZÜNÜRLÜK ANALİZİ İLE GÜRÜLTÜ SÜZME

Dalgacık analizinden yüksek gerilim tekniği alanında sıklıkla yararlanılabilecek çalışma alanlarından biri kısmi boşalma ölçümlerinden elde edilen verileri değerlendirme çalışmalarıdır. Önceki bölümlerde detayları verilen kısmi boşalma işaretlerinden gürültü süzme ve darbe parametrelerini belirleme yöntemlerinin uygulamaları bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla İTÜ (Maslak) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bir dizi kısmi boşalma ölçümleri yapılmış ve sonuçlar geliştirilen yöntemle değerlendirilmiştir.

7.1 Kısmi Boşalma Ölçme Devresi

Deney cisminin bir ucunun doğrudan topraklandığı ve ölçü empedansının kuplaj kondansatörünün altına bağlandığı tipik bir kısmi boşalma ölçme devresi Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : KB darbe ölçme devresi.

Şekil 7.1'deki devrede, YGT yüksek gerilim trafosunu, U uygulanan gerilimi, C_a deney cismini (KB kaynağını), C_c kuplaj kondansatörünü, Z_m ölçü empedansını veya dört uçlusunu, Z_n 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 kullanılabilir.

Kısmi boşalmaların üretilmesinde gerekli olan yüksek gerilimler, İTÜ (Maslak) Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bulunan Messwandler Bau marka yüksek gerilim deney setleri kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 7.2'de alternatif yüksek gerilim üretici ve ölçü devresi gösterilmektedir.



Şekil 7.2 : Alternatif gerilim için deney düzeneği.

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'deki düzende, 50 Hz, 5 kVA, 0,220/100 kV'luk, bir fazlı, yağlı, yalıtkan gövdeli bir yüksek gerilim deney transformatörü kullanılmıştır (Şekil 7.3).



Şekil 7.3 : 50 Hz, 5 kVA, 0,220/100 kV yüksek gerilim deney transformatörü.

Devreye aşırı akımdan ve rezonanstan koruma amacıyla 50 kΩ, 125 W değerinde bir ön direnç (Şekil 7.4) bağlanmıştır. Üretilen yüksek alternatif gerilimin genliği, bir kapasitif gerilim bölücü ($C_1 = 100 \text{ pF}$, 100 kV (Şekil 7.5 a)) üzerinden kumanda masasında bulunan 100 kV'luk analog yüksek gerilim voltmetresi ve dijital yüksek gerilim voltmetreleri yardımıyla Şekil 7.6'da gösterildiği gibi okunmuştur.



Şekil 7.4 : $R = 50 \text{ k}\Omega$, 125 W ön direnç.



a) $C_1 = 100 \text{ pF}$, 100 kV
yüksek gerilim
kondansatörü



b) Alçak gerilim kondansatör kutusu

Şekil 7.5 : Kapasitif gerilim bölücünün kondansatörleri.



Şekil 7.6 : Kumanda masası, dijital voltmetreler ve osiloskop.

Deney cismi olarak yüksek gerilim altından kısmi boşalma üretebilecek düzenekler ve yüksek gerilim aygıtları kullanılmıştır. Örnek bir deney devresi Şekil 7.7’de gösterilmektedir.

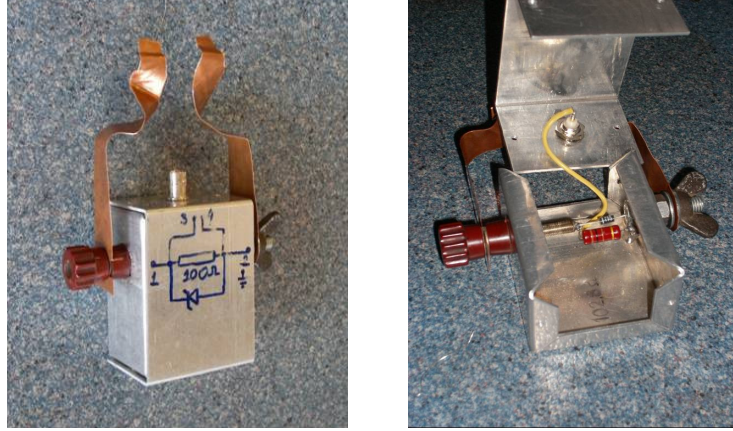


Şekil 7.7 : Deney düzeneğinden bir görüntü.

7.2 Elektriksel Aygıtlardan Elde Edilen Gerçek KB Verileri Üzerinde Çalışmak İçin Yapılan Altyapı Çalışmaları

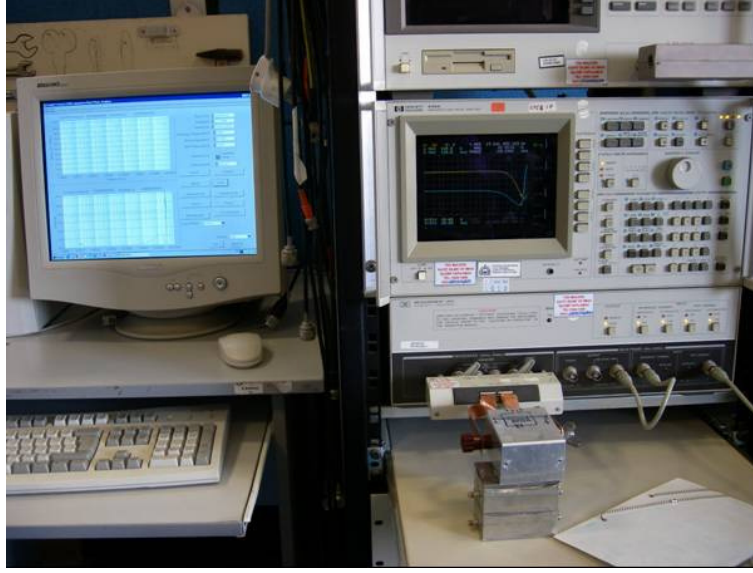
Bir önceki bölümde açıklanan benzetim yöntemi ile elde edilen veriler üzerinde yapılan çalışmalardan kazanılan deneyim ile elektriksel aygıtlardan elde edilmiş gerçek kısmi boşalma verileri üzerinde çalışılması için altyapı çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmaların ana hedefi laboratuvar ortamında sağlıklı veri alabilmek ve ölçme doğruluğunu artırmaktır.

Deney yoluyla elde edilecek işaretler çeşitli frekans bandına sahip işaretleri içereceğinden ölçme devresinin en önemli parçalarından biri olan ölçü dört uçlusunun empedansının geniş bir frekans aralığında frekansla değişiminin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda ölçü dört uçlusu için empedans ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde 100 ohm'luk dört uçlunun kullanılması uygun görülmüştür. Şekil 7.8'de 100 ohm'luk ölçü direnci ve uçlarına aşırı gerilimi sınırlandırmak amacıyla bağlanan 100 V'luk zener diyot görülmektedir.



Şekil 7.8 : 100 ohm'luk dört uçlu.

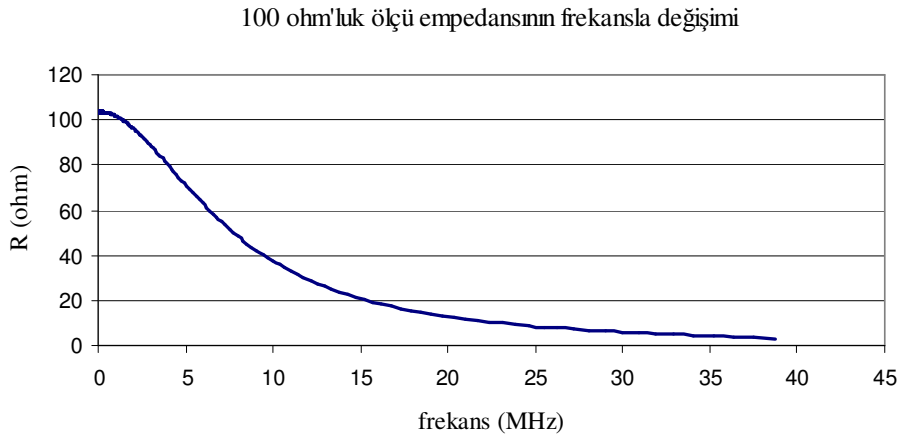
Bu dört uçlunun frekansa bağlı empedans karakteristiğini belirlemek için TÜBİTAK UEKAE (Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü)'nde empedans ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sırasında HP 4194A Empedans Analizörü kullanılmıştır. Ölçme esnasında kaçak endüktif ve kapasitif etkiyi en aza indirmek için dört uçlunun akım uçlarına bakır şerit bara ile bağlantı yapılmıştır. Şekil 7.9'da HP 4194A Empedans Analizörü ve ölçüm düzeneği görülmektedir.



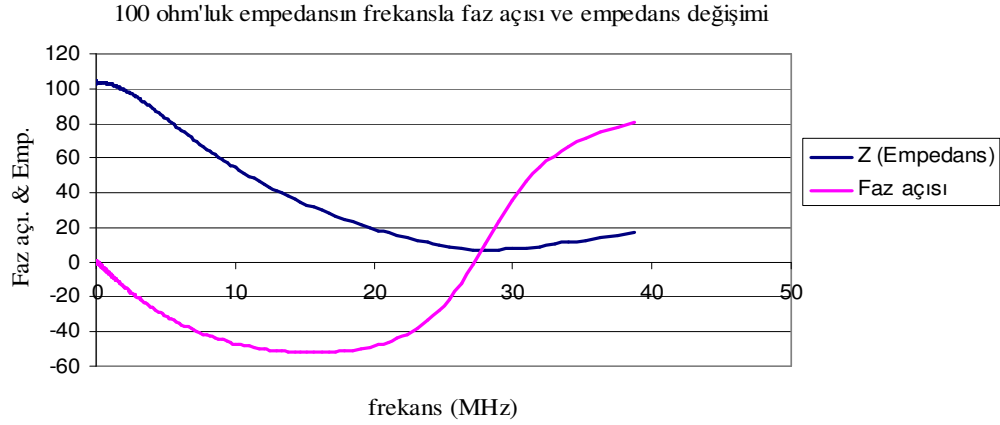
Şekil 7.9 : HP 4194A Empedans Analizörü ve ölçüm düzeneği.

Ölçümler 100 Hz ile 40 MHz aralığında yapılmıştır. Ölçülen değerler endüktif reaktansın, kapasitif reaktansın, direnç ve toplam empedansın 100 Hz ile 40 MHz aralığında 400 farklı frekans değerine karşılık gelen değerleri içermektedir. Şekil 7.10 direnç değerinin frekansa bağlı değişimini gösterirken, Şekil 7.11 empedans ve faz açısı değerlerinin frekansa bağlı değişimini göstermektedir

Ölçümler sırasında kimi zaman empedans değerlerinde sapmalar görülmüştür (sıfıra yakın değerlerde bazı değerler negatif olarak görülmüştür) bunun nedeni bağlantıları katarak yapılan kalibrasyon sonrası cihazın okuduğu değerden bağlantı kayıplarını çıkarmasıdır. Bu değerler sıfır olarak kabul edilmiştir.



Şekil 7.10 : Ölçü empedansı değerinin frekansla değişimi.

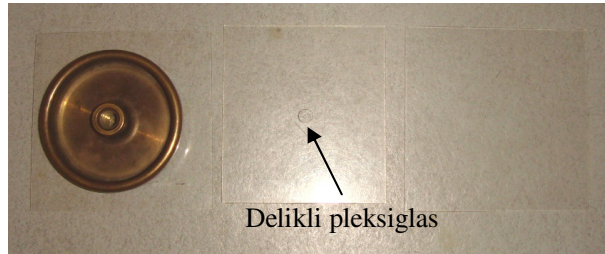


Şekil 7.11 : Empedans ve faz açısı değerlerinin frekansa bağlı değişimi.

7.3 Kısmi Boşalma Ölçümleri

7.3.1 Üç düzlem katmandan oluşan pleksiglas deney örneği

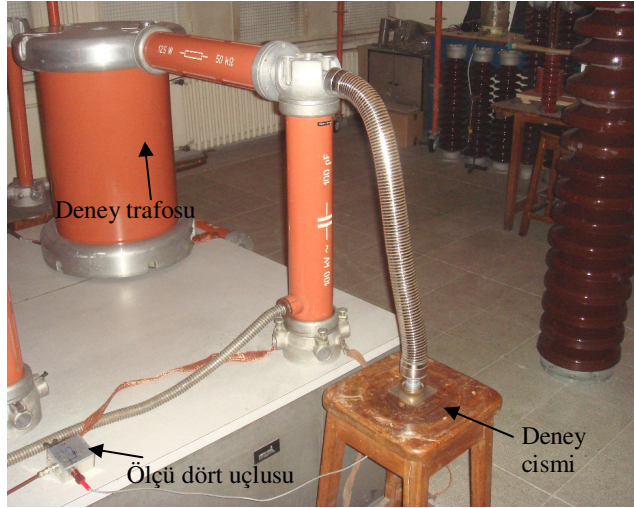
İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bir deney düzeni oluşturularak gerçek KB verileri elde edilmiştir. Deneyler sırasında katı yalıtkanlarda gerilim altında oluşan kısmi boşalmayı benzetmek için her biri 1 mm kalınlığında, 80×80 mm ölçülerinde kare kesitli 3 düzlem katmandan oluşan pleksiglas (metilmetakrilat) yalıtkan deney örneği olarak kullanılmıştır. Şekil 7.12, kullanılan pleksiglas katmanları ve bu üç katmanlı yalıtıkana gerilim uygulanmasını sağlayan düzlem elektrotlardan birini göstermektedir.



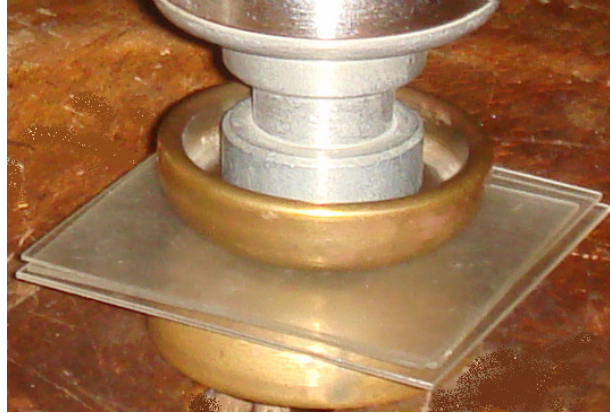
Şekil 7.12 : Pleksiglas katmanlar ve kullanılan düzlem elektrotlardan birisi.

Katmanlardan sadece birinin ortasında 6 mm çapında bir delik bulunmaktadır. Deney esnasında ortasında delik bulunan katman, deliksiz, sağlam katmanların arasına yerleştirilmiştir. Bu şekilde katı yalıtkan içerisinde KB oluşumuna neden olacak 1 mm yüksekliğinde, 6 mm çapında silindrsel bir hava boşluğu oluşturulmuştur. Bu üç katmanlı yalıtkan, düzlem elektrotlar arasına yerleştirilmiş ve üst elektroda yüksek gerilim uygulanırken alt elektrot, ölçme dört uçlusu üzerinden topraklanmıştır.

Deneylerde 100 kV'luk deney transformatörü kullanılmıştır. Şekil 7.3'de deney düzeneği ve ölçüm amaçlı tasarlanan dört uçlu ölçü empedansı görülmektedir. Şekil 4'te ise pleksiglas katmanlar ile üstte yüksek gerilim elektrotu ve altta toprak elektrotu yakından gösterilmektedir.



Şekil 7.13 : Deney düzeneği.



Şekil 7.14 : Düzlem elektrotlar arasına yerleştirilmiş pleksiglas tabakalar.

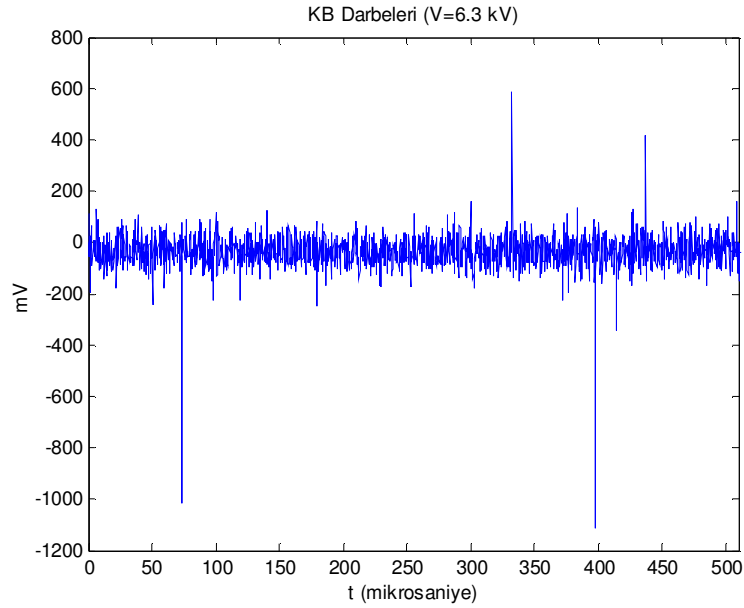
100 ohm'luk bir dirençten ve aşırı gerilimde gerilimi sınırlamak üzere bu direnç uçlarına paralel bağlanan bir zener diyottan oluşan ölçü dört uchlusunun koaksiyel çıkışından alınan gerilim, koaksiyel bir ölçü kablosu ile bir dijital osiloskoba aktarılmıştır. Böylece KB darbe oluşumlarından dolayı akan akım, deney cismine seri bağlı olan bu direnç üzerinde bir gerilim oluşturmakta ve bu gerilim osiloskoptan izlenebilmektedir. Osiloskopta izlenen dalga şekilleri, veri dosyası şeklinde osiloskoptan alınarak veri işleme ve değerlendirme çalışmaları yapabilmek amacıyla bir bilgisayara kaydedilmiştir.

KB ölçümlerinde karşılaşılan dış ve ölçüm devresi kaynaklı ana gürültü kaynakları ölçüm devresi içinde oluşturulan elektriksel gürültü ve kontaklar arası atlamalar, periyodik darbe akımları (tristör gibi) gürültüleri gibi stokastik (beyaz) gürültülerdir. Yıldırım, periyodik ve stokastik darbe şekilli olan anahtarlama elemanları veya metal kontaklar arasında ark oluşumu vb. kaynaklı gürültüler de elde edilecek veriler üzerinde etkili olabilmektedir.

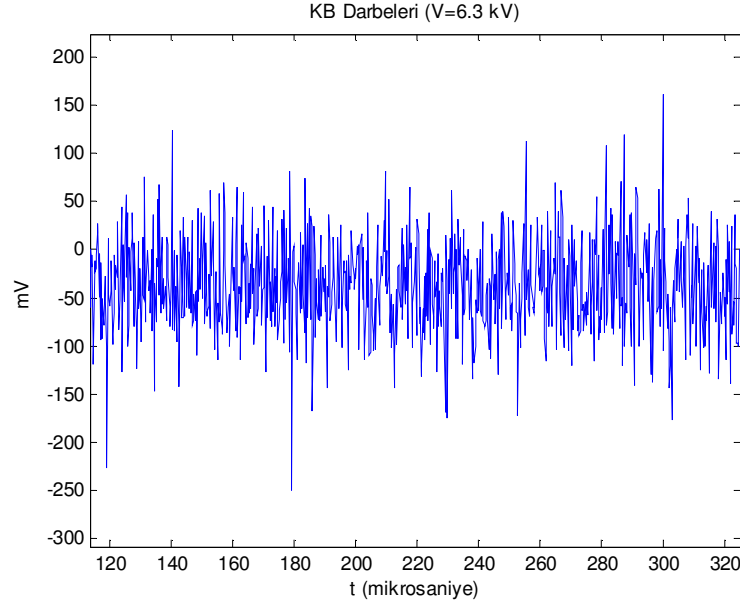
Ölçümler sırasında Şekil 7.13 ve 7.14’de verilen deney düzeneği kullanılarak 6,3 kV gerilimde elde edilen örnek bir veri Şekil 7.15’de gösterilmiştir. Ana işaret osiloskopa girişte 10 kat zayıflatılmıştır. Şekil 7.5, bu 10 kat zayıflatmanın olmadığı ölçü dört uçlusu çıkışındaki ana işareti göstermektedir. Ölçümler sırasında osiloskobun örnekleme frekansı 4 MHz’dir. Ortam koşulları aşağıda verilmiştir.

Sıcaklık: 17,3 °C , Basınç: 764 mmHg, Bağıl nem: % 43,9

Şekil 7.15 incelendiğinde, büyük genlikli pozitif ve negatif KB darbe oluşumları görülebilmektedir, ancak küçük genlikli olup gürültü içerisine gömülmüş olabilecek KB işaretlerinin ayırt edilmesi ya da açıkça gözüken KB işaretlerinin gerçek genliklerini, oluşum zamanlarını doğru saptamak olanaklı gözükmemektedir. Şekil 7.15’te gösterilen verinin daha ayrıntılı görülebilmesi için 115 µs ve 325 µs zaman aralığındaki kısmı Şekil 7.16’da verilmiştir.

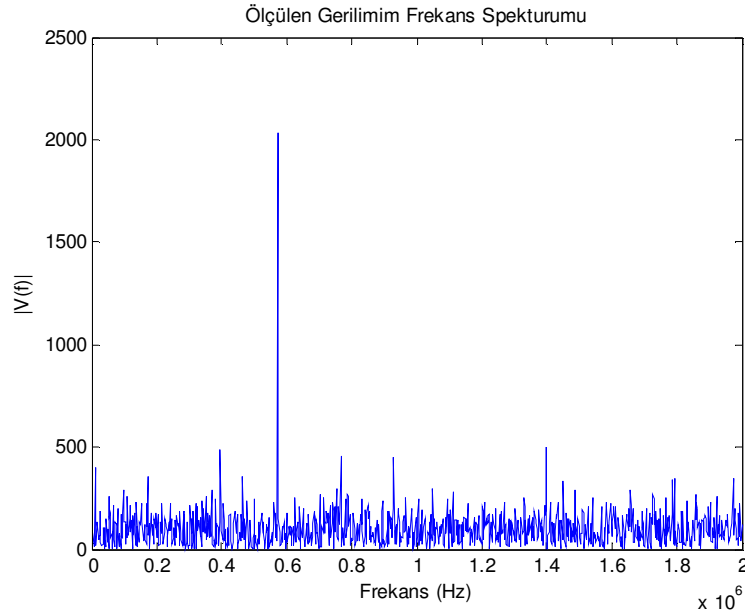


Şekil 7.15 : Deneyde ölçülen gerilim değişimi (gürültülü KB işaretleri).



Şekil 7.16 : Şekil 7.5'teki verinin 115 μ s ve 325 μ s zaman aralığı.

Şekil 7.15'te verilen gerilim değişimi incelendiğinde zaman ekseninde süreklilik gösteren bir tür gürültünün yayıldığı göze çarpmaktadır. Bu tür veriyi gürültüden arındırmak adına ilk akla gelen belli frekans aralığında işareti süzmektir. Bu amaçla verinin Fourier dönüşümü alınmış hali Şekil 7.17'de gösterilmektedir.



Şekil 7.17 : Şekil 7.5'teki gürültülü KB işaretlerinin frekans-genlik değişimi.

Şekil 7.17'den de görüleceği üzere gürültü tüm frekans eksenine yayılmış olan bir beyaz gürültü tipindedir ve belli bir bant aralığında süzgeçleme ile KB işaretlerinin

ayrıt edilmesi mümkün gözükmemektedir. Bu sonuç, KB işaretlerine ait parametreleri daha doğru belirleyebilmek için dalgacık analizi ile zaman-frekans analizi yapılması konusunda önceki bölümlerde geliştirilen yöntemin kullanılmasını gerektirir.

7.3.1.1 Gürültülü KB darbe işaretlerinin çoklu çözünürlük analizi ile gürültüden arındırılması

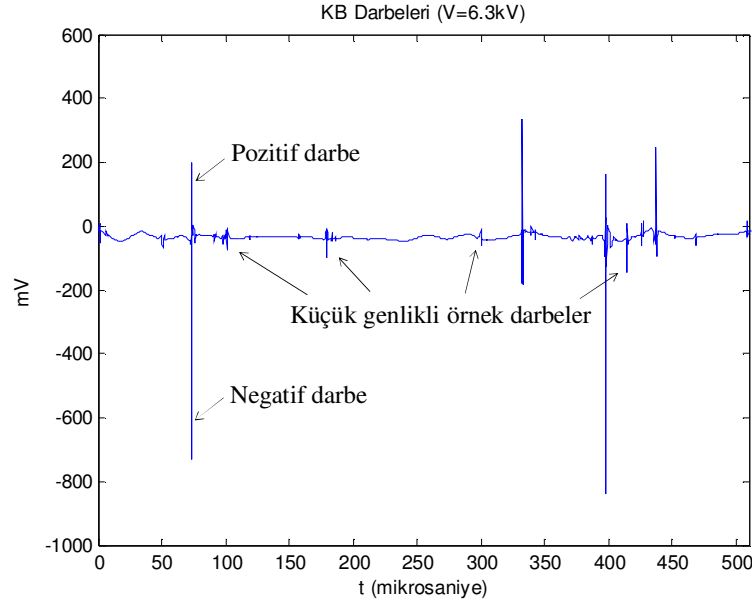
Gürültüden arındırmada ana amaç gerçek kısmi boşalma işaretine mümkün mertebe zarar vermeden gürültüyü en etkin biçimde ölçülen işaretten ayırmaktır. Çoklu çözünürlük analizinde kısmi boşalma işaretleri için (hem RC hem de RLC devresi ile ölçülen) işareti alt bantlara ayırtmada kullanılacak en uygun dalgacığın belirlenmesi, ayırtma seviyesinin seçimi, gürültüden süzme için uygun eşikleme kuralı ve de eşikleme fonksiyonunun seçimi işlemleri için en uygun sonuçlar Bölüm 6'da belirlenmişti. Burada ise söz konusu bölümde elde edilen sonuçlar kullanılarak ölçümlerde elde edilen verilerin analiz sonrası değerlendirilmesi yapılmıştır. Çizelge 7.1 6 seviyeli ayırtma için alt bant frekans aralıklarını göstermektedir.

Çizelge 7.1 : 6 seviye ayırtma için alt bant frekansları.

Yaklaşımlar	Alt Bantlar (kHz)	Detaylar	Alt Bantlar (kHz)
a_1	0-1000	d_1	1000-2000
a_2	0-500	d_2	500-1000
a_3	0-250	d_3	250-500
a_4	0-125	d_4	125-250
a_5	0-62.5	d_5	62.5-125
a_6	0-31.25	d_6	31.25-62.5

Çoklu çözünürlük analizi ile alt bantlara ayırtılan işaret daha sonra gürültü bileşenlerinin süzülmesi için eşikleme işlemine tabi tutulur. Detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi işlemi belirlenen bir aralık için bu aralık içindeki detay katsayılarının sıfırlanması ile gerçekleştirilir. Diğer bir ifadeyle dalgacık sabitlerinin eşiklenmesi işlemi gürültü veya benzer şekilde değerlendirilebilecek önemsiz detay dalgacık sabitlerinin uzaklaştırılması esasına dayanır. Elde edilen sonuç Şekil 7.18'de verilmektedir. Buradan görüleceği üzere yapılan analizin öncesinde (Şekil 7.15) kolayca tespit edilebilen KB darbelerinin yanı sıra gürültü içerisine gömülü daha küçük genlikli darbelerin de varlığını açıkça ortaya koyduğu gözükmemektedir. Örnek olarak, Şekil 7.18'de $t = 73 \mu s$ 'de bir pozitif darbe ardından bir de negatif darbe görülmekteyken, Şekil 7.15'den sadece büyük genlikli negatif darbe ayrıt

edilebilmektedir. Saptanan diğer küçük genlikli darbelere örnekler Şekil 7.18 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 7.18 : Şekil 7.15'teki gürültülü KB darbelerinin gürültüden süzölmüş hali.

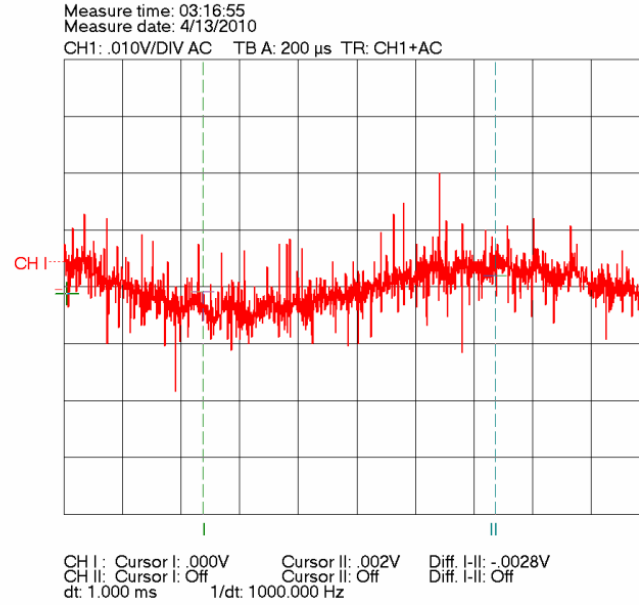
7.3.2 Sivri uç-düzlem elektrot düzeni

Temel elektrot sistemlerinden biri olan sivri uç-düzlem elektrot düzeni kullanılarak kısmi boşalma işaretleri oluşturulmuştur. Sivri uç-düzlem elektrot düzeni kullanılarak açıklık 14 mm, 10 mm ve 6 mm'de ölçümler yapılmıştır. Düzlem elektrot 16 cm çapa sahip olup sivri uç 2 mm çapında ve eğrilik yarıçapı da 2 mm'dir. İlgili elektrot düzeni Şekil 7.19'da verilmiştir.



Şekil 7.19 : Sivri uç-düzlem elektrot düzeni.

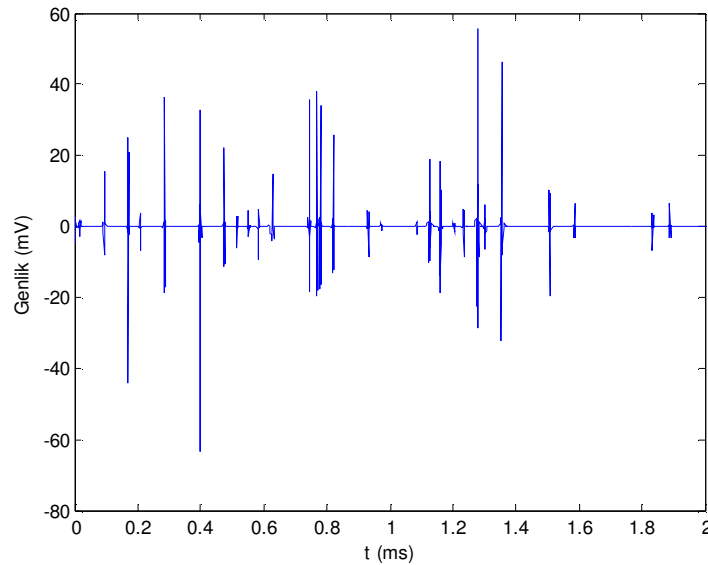
14 mm açıklık için ilk boşalmalar 2,5 kV gerilimde kaydedilmiştir Osiloskoptan elde edilen 10 kat zayıflatılmış veri Şekil 7.20’de gösterilmektedir.



Şekil 7.20 : 14 mm açıklık, 2.5 kV gerilimde elde edilen işaret.

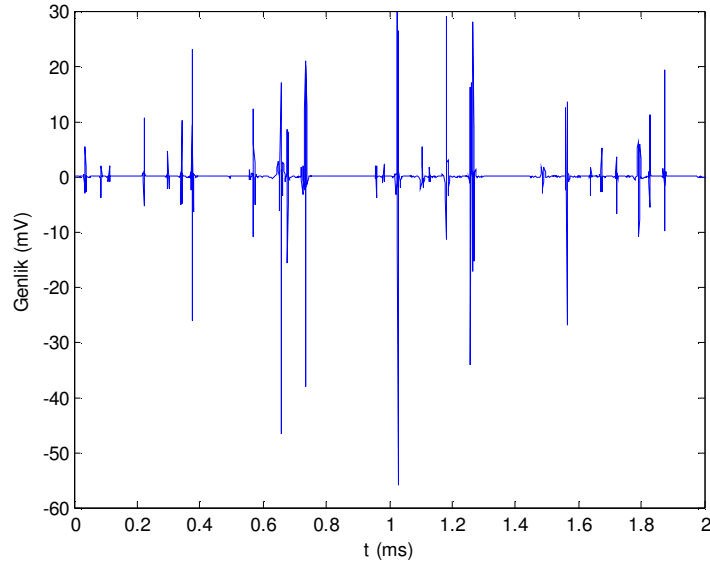
Şekil 7.20 incelendiğinde kısmi boşalma işaretlerini tamamıyla ayırt etmek mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle elde edilen bu işaretten ana kısmi boşalma işaretlerinin elde edilmesi için bir önceki bölümde geliştirilen yöntem uygulanarak gürültü süzme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bir önceki bölümde elde edilen sonuçlara dayanarak çoklu çözünürlük analizi ile gürültü süzme işleminde 5 seviye ayrıştırma, Coif2 ana dalgacığı (RC tipi ölçü empedansı olduğu için), seviyeye bağlı eşikleme kuralı ve birleşik eşikleme fonksiyonu kullanılmıştır. Birleştirme işlemi sırasında cA5 dalgacık katsayıları düşük frekanstaki kısmi boşalma işaretlerinin arayışımız dışındaki işaretleri temsil ettiği için birleştirme işleminde kullanılmamış cD1, cD2, cD3, cD4 ve cD5 dalgacık katsayıları yukarıda belirlenen eşikleme kuralı ve fonksiyonuna göre eşiklenmiştir. Bu kapsamda Şekil 7.20’de verilen ana işaretin belirlenen yöntemle gürültüden arındırılmış hali Şekil 7.21’de verilmektedir. İşaretin osiloskopta 10 kat zayıflatıldığı göz önünde bulundurularak ölçü dört uçlusundan elde edilen gerilim mV olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.21 : Şekil 7.20’deki işaretin gürültüden süzölmüş hali.

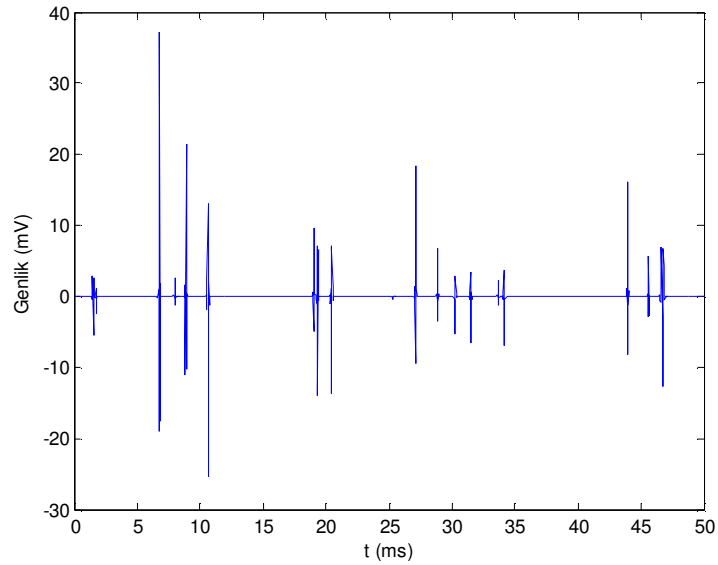
Aynı elektrot düzeni için 5 kV gerilimde elde edilen gürültüden arındırılmış kısmi boşalma işaretleri Şekil 7.22’de verilmiştir.



Şekil 7.22 : Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri ($a = 14$ mm, $U = 5$ kV).

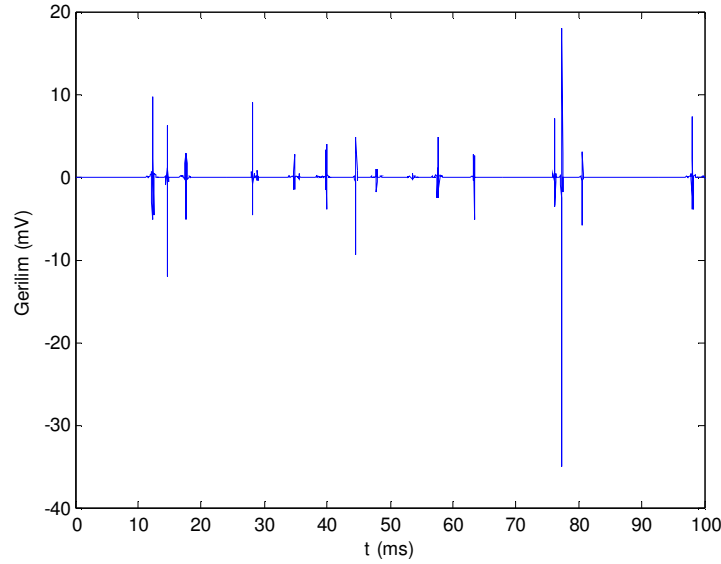
Şekil 7.21 ile 7.22 kıyaslandığında gerilim seviyesinin 2,5 kV'dan 5 kV'a çıkartılması boşalma işaretlerinin sayısında artışa neden olmuştur. Maksimum boşalma genliğinde artış olmaması KB işaretlerin tamamen rastlantısal olmasına (oluşum anlarının belirli olmamasına) bağlıdır. Elde edilen bu veriler 2 ms'lık bir pencereye aittir ve KB oluşumları bu pencerele denk gelmemiş olabilir.

Şekil 7.23 sivri uç-düzlem elektrot düzeninde açıklık 14 mm ve uygulanan gerilim 8 kV iken elde edilen işaretin gürültüden süzölmüş halini göstermektedir.



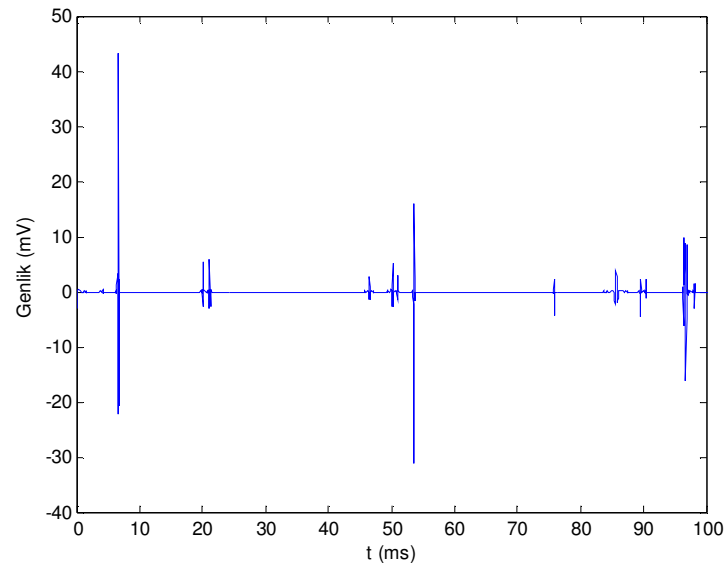
Şekil 7.23 : Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri ($a = 14$ mm, $U = 8$ kV).

Ölçümlere elektrot açıklığı 10 mm'ye indirilerek devam edilmiştir. 5 kV gerilim altında elde edilen KB işaretleri Şekil 7.24'de verilmiştir.



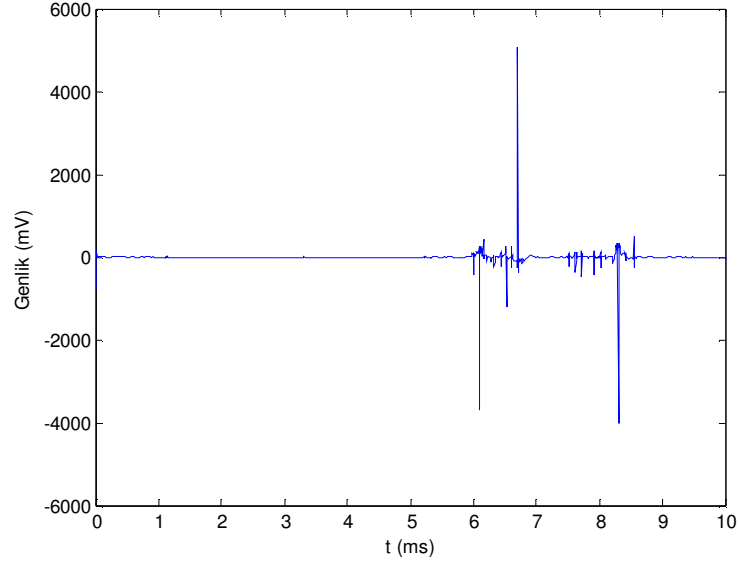
Şekil 7.24 : Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri ($a = 10$ mm, $U = 5$ kV).

Gerilim 6,5 kV'a yükseltildiğinde Şekil 7.25'deki işaretler elde edilmiştir. KB işaretlerinin maksimum değeri 43,38 mV olarak bulunmuştur. Şekil 7.24 ile kıyaslandığında maksimum boşalma genliğinde artış görülmektedir. Boşalma sayısı rastlantısal değiştiği için pencere başına düşen boşalma sayısı değişkenlik göstermektedir.



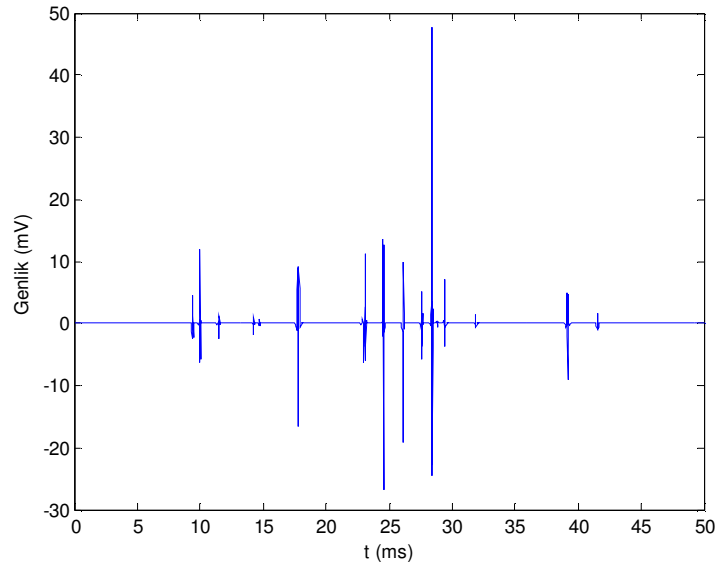
Şekil 7.25 : Sivri uç-düzlem elektrot KB işaretleri ($a = 10$ mm, $U = 6,5$ kV).

Sivri uç-düzlem elektrot düzeni için yine 10 mm açıklıkta ve 6,6 kV gerilim uygulandığında yüksek genlikli boşalmalar saptanmıştır (Şekil 7.26). Bu boşalma değerleri μV mertebesinde olması beklenen KB genliklerinden çok büyüktür.



Şekil 7.26 : Sivri uç-düzlem elektrot düzeni KB işaretleri ($a = 10 \text{ mm}$, $U = 6,6 \text{ kV}$).

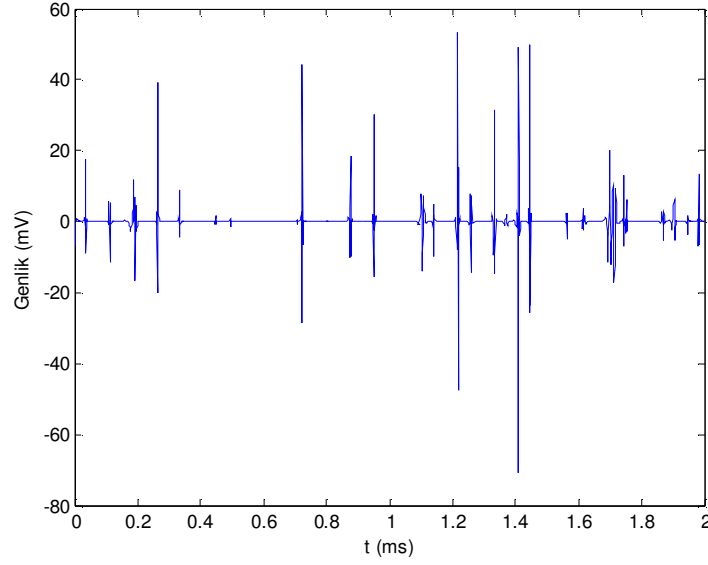
Ölçümlere elektrot açıklığı 6 mm'ye indirilerek devam edilmiştir. 3 kV gerilim altında elde edilen KB işaretleri Şekil 7.27'de verilmiştir.



Şekil 7.27 : Sivri uç-düzlem elektrot düzeni KB işaretleri ($a = 6 \text{ mm}$, $U = 3 \text{ kV}$).

Bu durumda maksimum boşalma genliği 47,8 mV olarak kayıt edilmiştir. Gerilimin aynı elektrot açıklığında 5,5 kV'a çıkarılması durumunda gürültüden arındırılmış KB

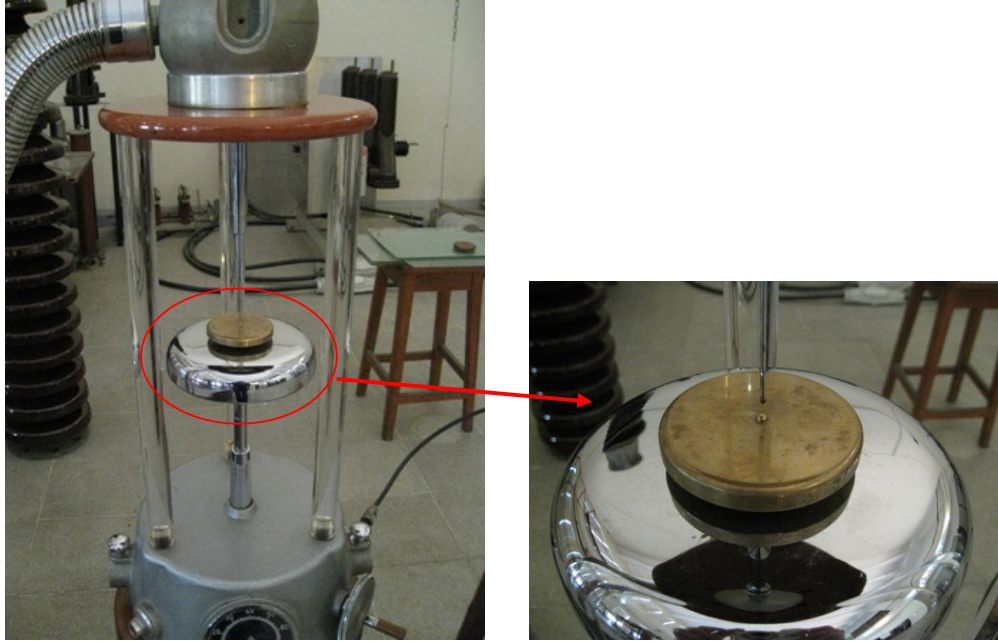
işaretleri olarak şekil 7.28 elde edilmiştir. Aynı elektrot açıklığında gerilimin artırılması ile boşalma sayılarında ve de boşalma genliklerindeki artış şekil 7.28'den görülebilmektedir. Bu durumda da maksimum genlik 70,8 mV olarak kaydedilmiştir.



şekil 7.28 : Sivri uç-düzlem elektrot düzeni KB işaretleri ($a = 6$ mm, $U = 5,5$ kV).

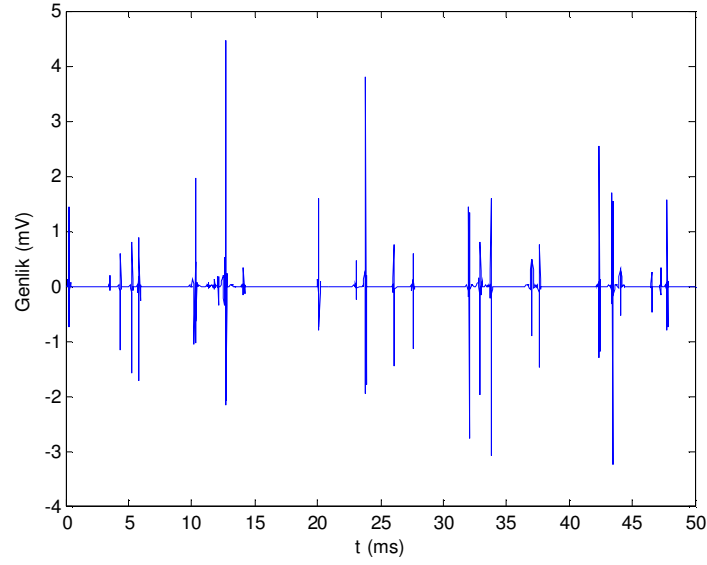
7.3.3 Sivri uç-przli düzlem elektrot düzeni

Elektrot sistemi olarak sivri uç-przli düzlem düzeni kullanılmıştır (şekil 7.29).



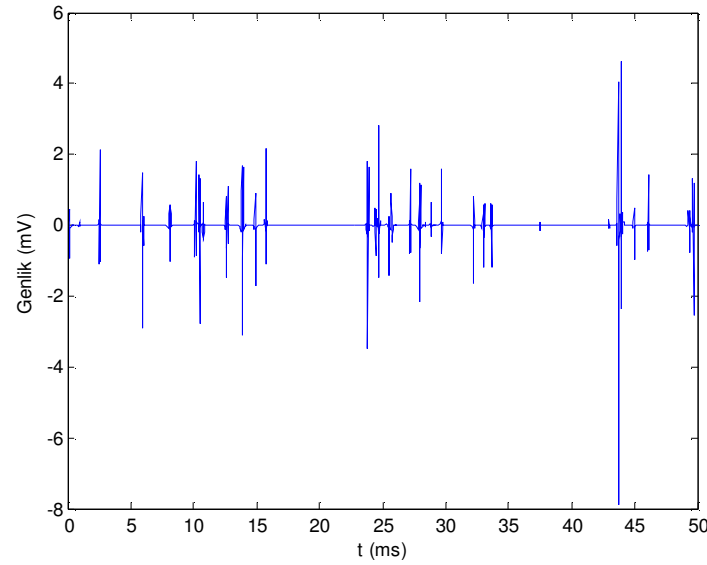
şekil 7.29 : Sivri uç-przli düzlem elektrot düzeni.

Pürüzlü düzlem elektrot olarak biri 2 mm çapında diğeri de 5 mm çapında elektrot merkezinde pürüze sahip olan iki farklı elektrot kullanılmıştır. 2 mm çapında pürüze sahip elektrot sistemine açıklık 5 mm iken 3 kV uygulandığında elde edilen KB işaretleri Şekil 7.30'da verilmiştir. Maksimum genlik 4,5 mV olarak kaydedilmiştir.



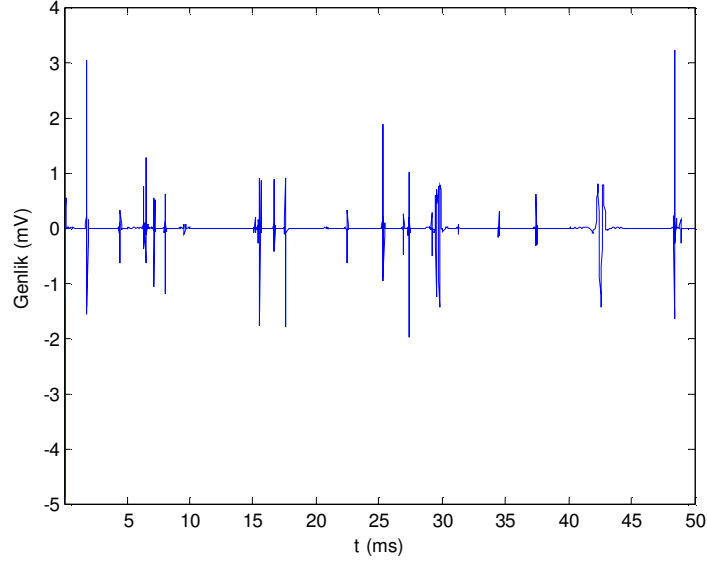
Şekil 7.30 : 2 mm pürüz, açıklık 5 mm, gerilim 3 kV.

Aynı elektrot düzeninde açıklık 10 mm ve uygulanan gerilim 4 kV iken elde edilen KB işaretleri Şekil 7.31'de verilmiştir. Ölçüm esnasında maksimum boşalma genliği 7,9 mV olarak saptanmıştır.



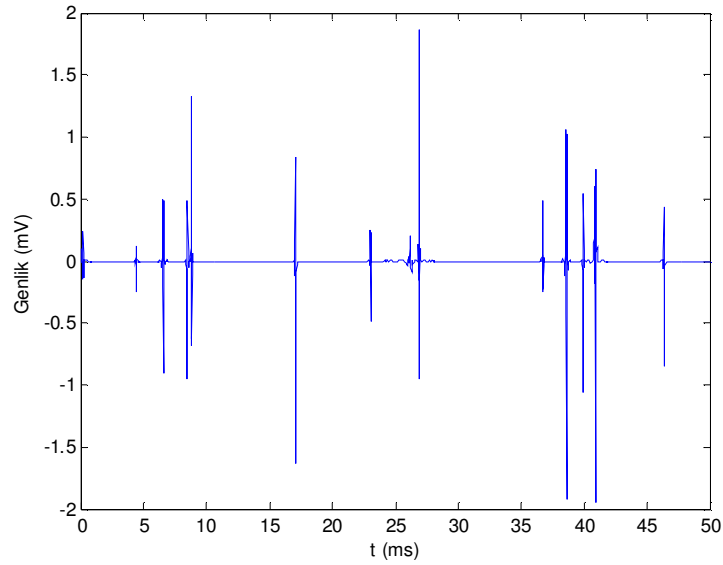
Şekil 7.31 : 2 mm pürüz, açıklık 10 mm, gerilim 4 kV.

5 mm pürüz çapına sahip düzlem elektrot kullanıldığında ise açıklık 5 mm iken 4,8 kV'da elde edilen KB işaretlerinin gürültüden süzölmüş hali Şekil 7.32'de verilmiştir. Boşalmalara ait genlik seviyeleri birkaç mV'lar seviyesindedir.



Şekil 7.32 : 5 mm pürüz, açıklık 5 mm, gerilim 4,8 kV.

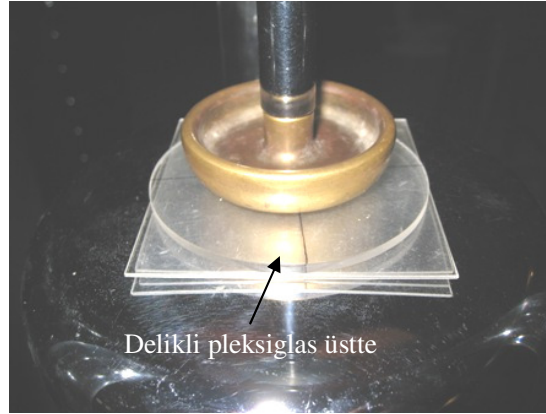
5 mm pürüz çapına sahip düzlem elektrotta açıklık 10 mm iken 5 kV'ta elde edilen KB işaretlerinin gürültüden süzölmüş hali Şekil 7.33'de verilmiştir. Bu durumda maksimum genlik 1,94 mV olarak saptanmıştır.



Şekil 7.33 : 5 mm pürüz, açıklık 10 mm, gerilim 5 kV.

7.3.4 Pleksiglas katmanlı ve farklı boyutlarda hava boşluklu deney örnekleri

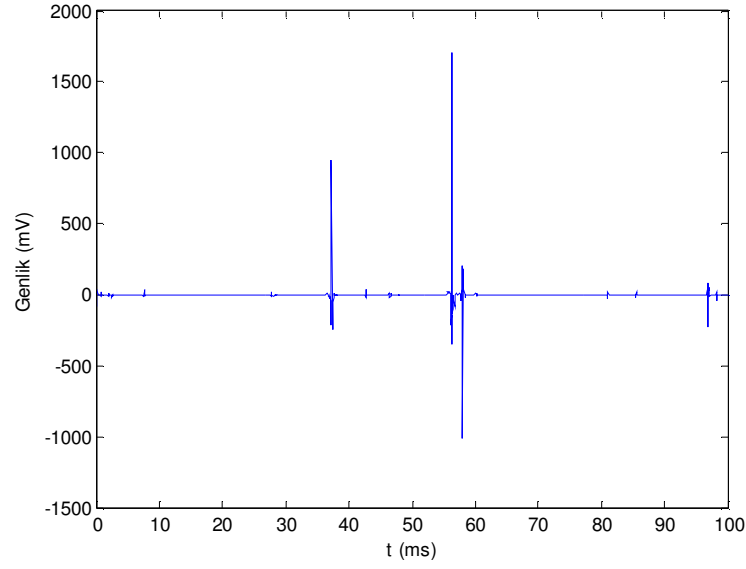
Katı yalıtkanlarda gerilim altında oluşan kısmi boşalmayı benzetmek için her biri 1 mm kalınlığında, 80×80 mm ölçülerinde kare kesitli 2 düzlem katman ve 80 mm çapında 3 mm kalınlığında merkezindeki delik çapı ölçümler esnasında değiştirilen pleksiglas (metilmetakrilat) yalıtkan deney örneği olarak kullanılmıştır. Şekil 7.12, kullanılan pleksiglas katmanları ve kullanılan düzlem elektrotları göstermektedir.



Şekil 7.34 : Pleksiglas katmanlar ve kullanılan düzlem elektrotlar.

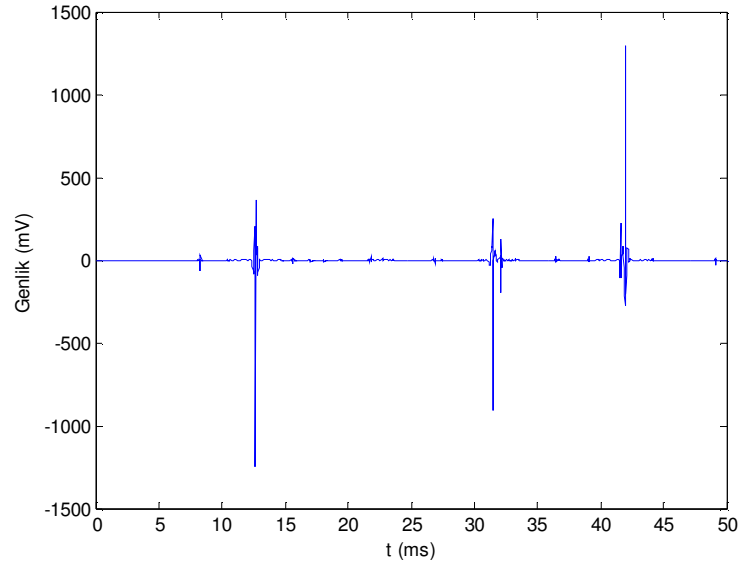
Katmanlardan sadece dairesel olanın merkezinde 1 mm çapında (2 mm ve 2,5 mm çaplarına daha sonradan genişletilmiştir) bir delik bulunmaktadır. Deney esnasında ortasında delik bulunan katman, deliksiz, sağlam katmanların altına, üstüne ya da arasına yerleştirilmiştir. Bu şekilde katı yalıtkan içerisinde KB oluşumuna neden olacak 3 mm yüksekliğinde, farklı çaplarda silindrsel bir hava boşluğu oluşturulmuştur. Üst elektroda yüksek gerilim uygulanırken alt elektrot, ölçme dört uçlusu üzerinden topraklanmıştır.

Ölçümlere ilk olarak $d = 1$ mm delik çapına sahip dairesel pleksiglasın diğer iki pleksiglas arasına yerleştirilmesi ile başlanmıştır. Bu durumda elektrot düzenine gerilim uygulandığında ilk KB'lara 6,5 kV'ta rastlanmıştır. Şekil 7.35 6,5 kV'ta elde edilen verinin analizi sonucunda bulunan KB işaretlerini göstermektedir. Maksimum genlik ise 1710 mV olarak saptanmıştır.



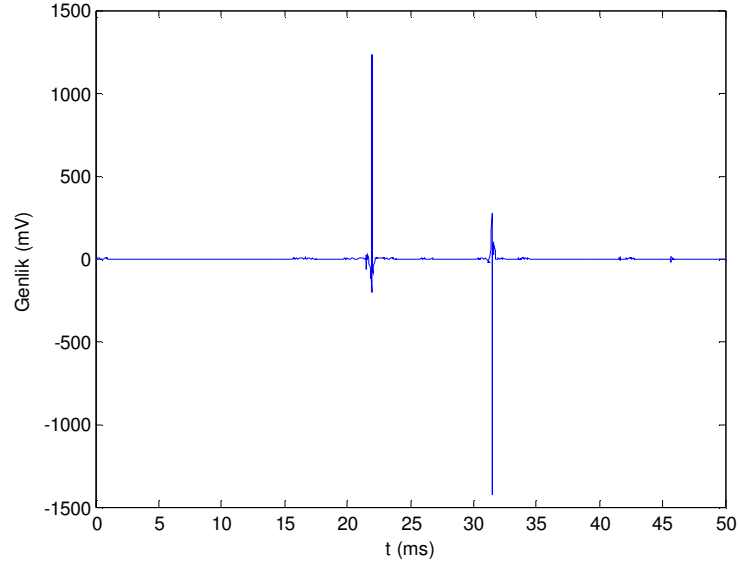
Şekil 7.35 : $d = 1$ mm, delikli katman ortada, gerilim 6,5 kV.

Şekil 7.36 ise aynı düzende gerilimin 7 kV'a yükseltilmesi ile elde edilen KB işaretlerini göstermektedir. Maksimum genlik ise 1291 mV olarak saptanırken oluşan darbe sayısında artış gözlenmiştir.



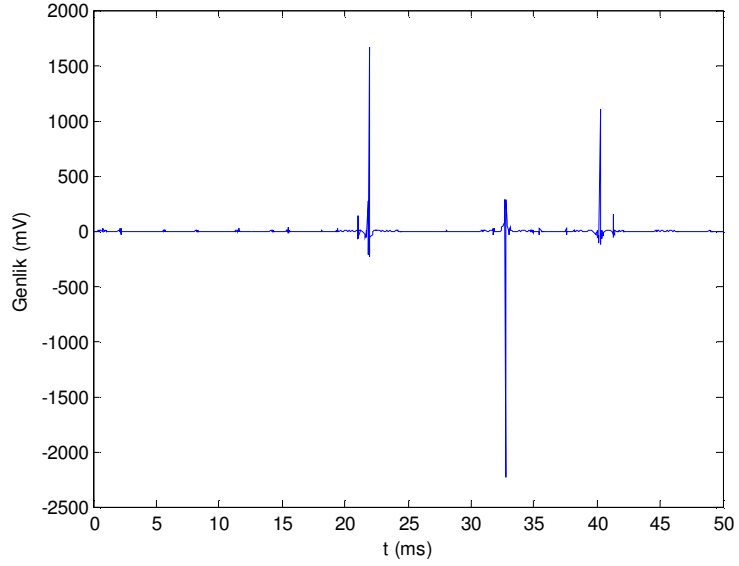
Şekil 7.36 : $d = 1$ mm, delikli katman ortada, gerilim 7 kV.

Delikli katmanın diğer iki katmanın üst tarafına yerleştirilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7.37 ve 7.38'de verilmiştir. 6,5 kV'ta maksimum genlik 1423 mV iken 7 kV'ta 2229 mV olarak kaydedilmiştir.



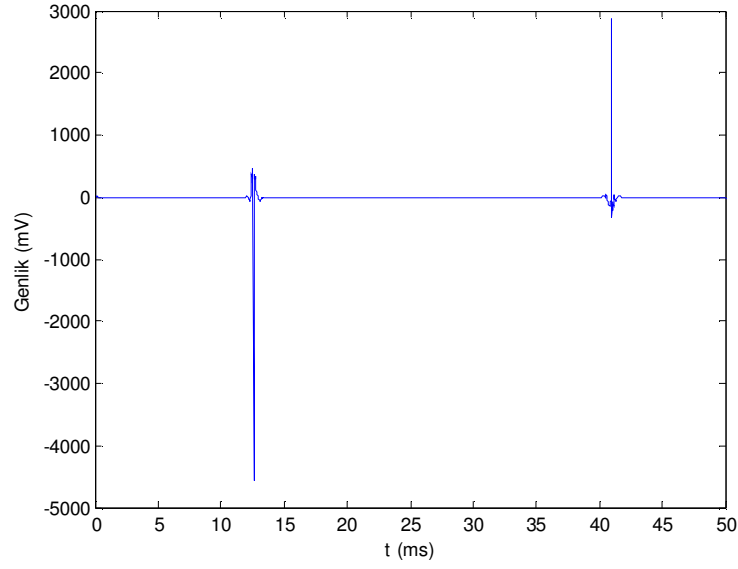
Şekil 7.37 : $d = 1$ mm, delikli katman üstte, gerilim 6,5 kV.

Şekil 7.37 ile Şekil 7.38 kıyaslandığında aynı elektrot düzeninde gerilimin artırılması boşalma sayısında ve genliğinde artışa neden olmuştur.



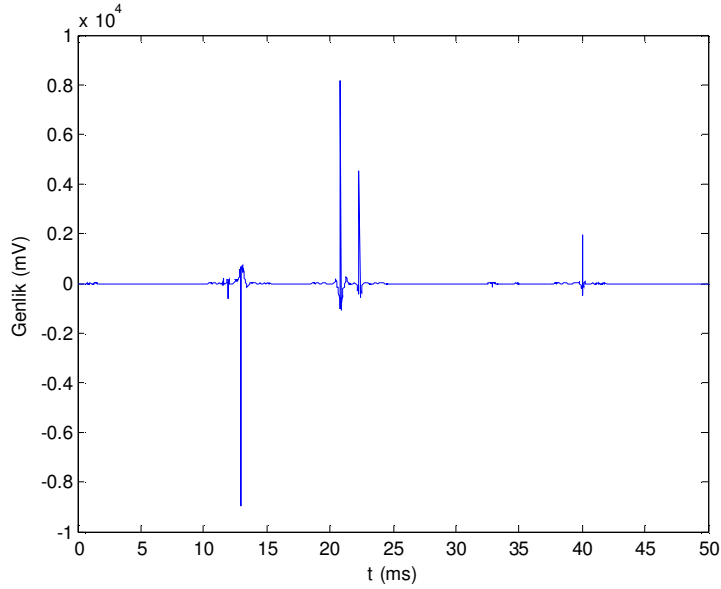
Şekil 7.38 : $d = 1$ mm, delikli katman üstte, gerilim 7 kV.

Delikli katmanın diğer iki katmanın alt tarafına yerleştirilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 7.39 ve 7.40'da verilmiştir. 6,5 kV'da maksimum genlik 4558 mV iken 7 kV'ta 9002 mV olarak kaydedilmiştir.



Şekil 7.39 : $d = 1$ mm, delikli katman altta, gerilim 6,5 kV.

Şekil 7.39 ile Şekil 7.40 kıyaslandığında aynı elektrot düzeninde gerilimin artırılması boşalma sayısında ve genliğinde artışa neden olmuştur.



Şekil 7.40 : $d = 1$ mm, delikli katman altta, gerilim 7 kV.

Ardından deneylere delik çapı önce 2 mm'ye daha sonra da 2,5 mm'ye genişletilerek devam edilmiştir. Elde edilen sonuçlar toplu halde Çizelge 7.1'de verilmektedir.

Çizelge 7.2 : Pleksiglaslar için gerilim altında elde edilen diğer sonuçlar.

Delik çapı d (mm)	Delikli katmanın yeri	Uygulanan gerilim (kV)	Mak. KB işareti genliği (mV)
2 mm	Ortada	6,5	963,6
		7,0	3995,6
	Üstte	6,5	3476,1
		7,0	8423
	Altta	6,5	1131,9
		7,0	2482,3
2,5 mm	Ortada	6,5	167,7
		7,0	142,6
	Üstte	6,5	25,4
		7,0	76,5
	Altta	6,5	113,2
		7,0	263

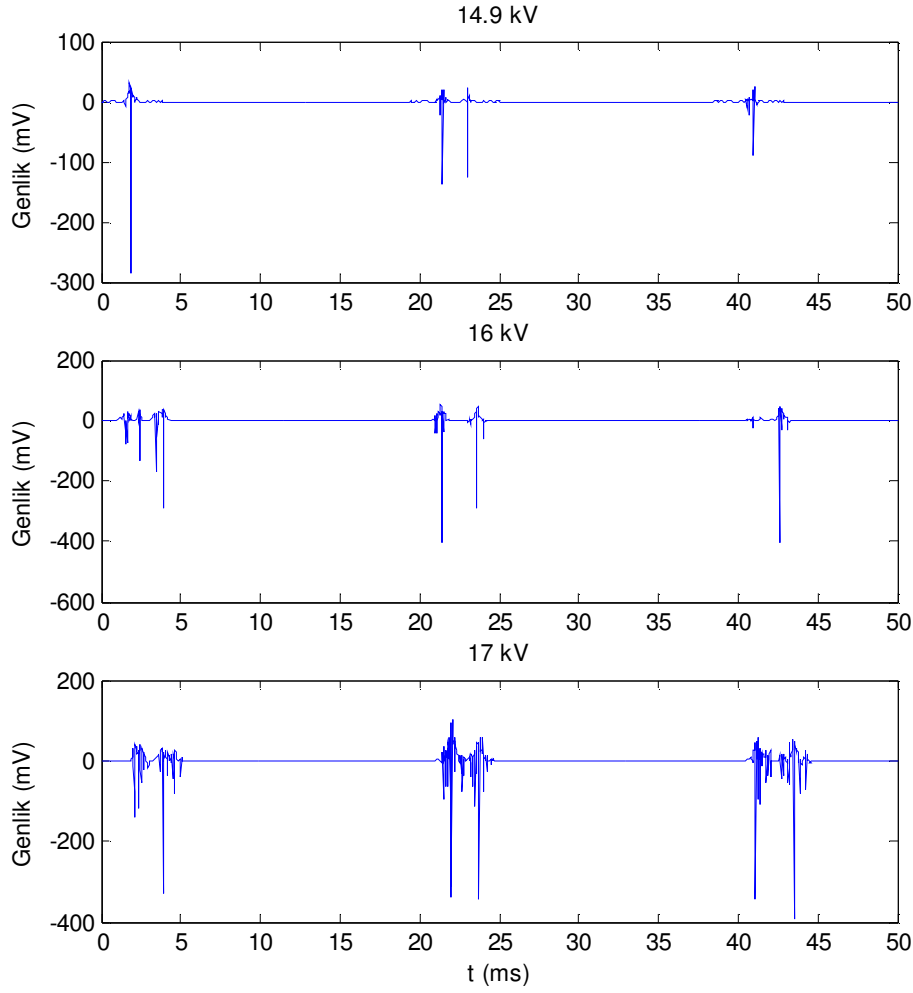
7.3.5 Eşeksenli (koaksiyel) elektrot düzeni

Yüksek gerilim altında korona boşalması meydana getiren Bölüm 5’de boyutları verilen T1 çelik özlü iletkeninin eşeksenli elektrot düzeninde kullanılması Şekil 7.41’de gösterilmektedir.



Şekil 7.41 : Eşeksenli elektrot düzeni.

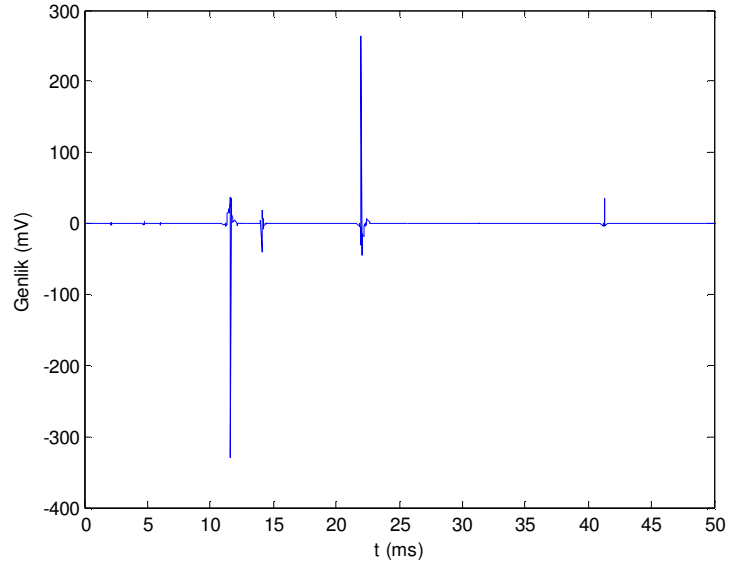
Çelik özlü iletken (T1) için boşalma başlangıç gerilimi 12,2 kV olarak saptandı. Şekil 7.42 aynı elektrot düzenine 14,9 kV, 16 kV ve 17 kV gerilim uygulandığında elde edilen gürültüden arındırılmış boşalma işaretlerini göstermektedir.



Şekil 7.42 : T1 iletkeni farklı gerilimlerde gürültüden arındırılmış KB işaretleri.

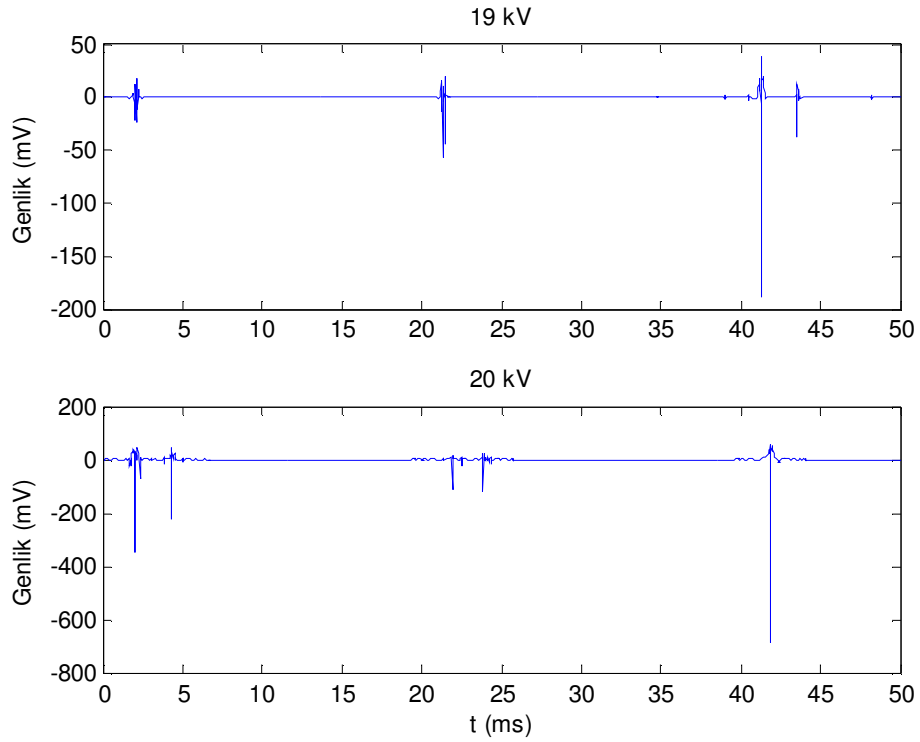
Şekil 7.42’den görüleceği üzere aynı elektrot düzeninde gerilimin artırılması KB işaretlerinin hem sayısında hem de genliklerinde artışa neden olmuştur.

Eşeksenli elektrot düzenine T2 bakır elektrotun yerleştirilmesiyle 12 kV gerilim altında elde edilen KB işaretleri Şekil 7.43’de verilmektedir. Bu düzenekte korona başlangıç gerilimi 11,5 kV olarak saptanmıştır.



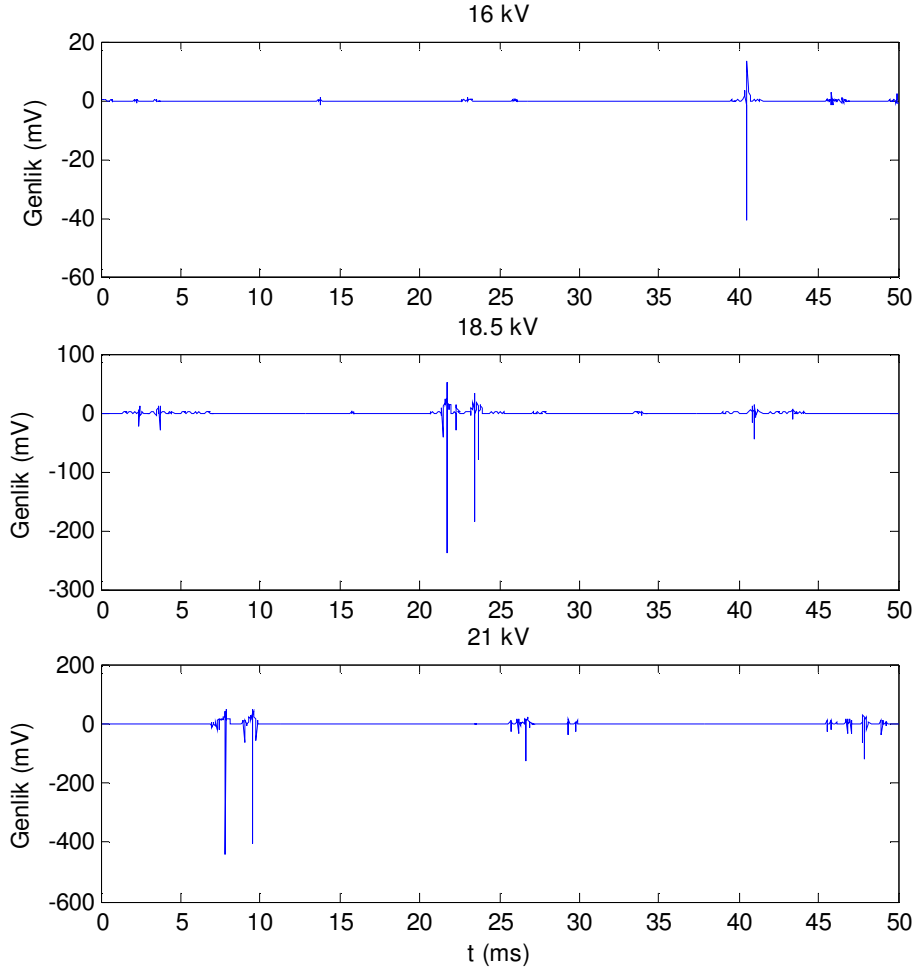
Şekil 7.43 : T2 iletkeni için 12 kV’da gürültüden arındırılmış KB işaretleri.

Koaksiyel elektrot düzenine T3 bakır elektrotun yerleştirilmesiyle 19 ve 20 kV gerilim altında elde edilen KB işaretleri Şekil 7.44’de verilmektedir. Bu düzenekte korona başlangıç gerilimi 16,8 kV olarak saptanmıştır. Aynı elektrot düzeninde gerilimin artırılması KB işaretlerinin hem sayısında hem de genliklerinde artışa neden olmuştur.



Şekil 7.44 : T3 iletkeni için 19 ve 20 kV’ta gürültüden arındırılmış KB işaretleri.

Eşeksenli elektrot düzenine T4 bakır elektrotun yerleştirilmesiyle 16, 18,5 ve 21 kV gerilimlerde elde edilen KB işaretleri Şekil 7.45’de verilmektedir. Bu düzenekte korona başlangıç gerilimi 15,7 kV olarak saptanmıştır. Aynı elektrot düzeninde gerilimin artırılması KB işaretlerinin hem sayısında hem de genliklerinde artışa neden olmuştur.



Şekil 7.45 : T4 iletkeni 16, 18,5 ve 21 kV gerilim değerlerinde KB işaretleri.

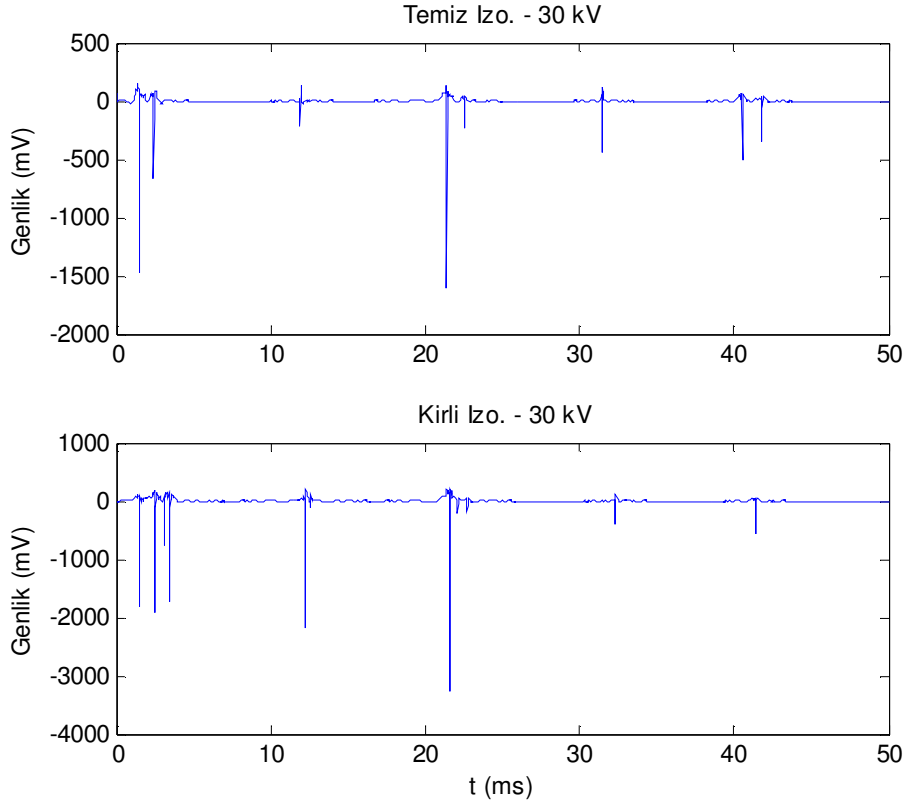
7.3.6 36 kV Geçit izolatörü

Şekil 7.46 da verilen 36 kV’lık, porselen gövdeli, hava iç yalıtımlı, bakır tijli, bina dışından-bina dışına bir geçit izolatörü üzerinde KB ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 7.46 : 36 kV'luk geçit izolatöründe KB ölçüm düzeneği.

Yüzeyi oldukça kirli (tozlu) olan bu 36 kV'luk geçit izolatörü için KB başlangıç gerilimi 27 kV olarak ölçülmüştür. Ardından temizlenen izolatörde yapılan ölçümlerde KB başlangıç geriliminin 28 kV olarak değiştiği görülmüştür. Hem temiz hem de kirli izolatöre 30 kV uygulandığında elde edilen gürültüden arındırılmış KB işaretleri Şekil 7.47'de verilmiştir.

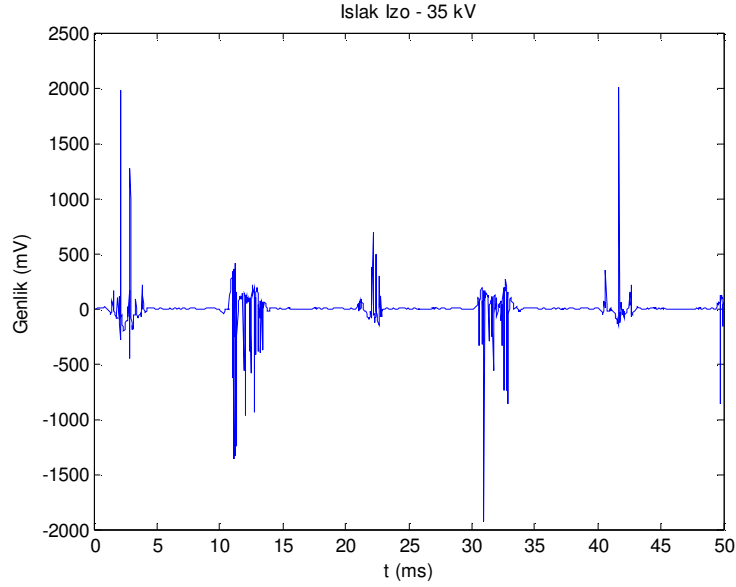


Şekil 7.47 : Temiz ve kirli 36 kV’luk geçit izolatöründe KB işaretleri.

Bu deneylerin ardından geçit izolatörü su ile ıslatılmış ve korona oluşturacak şekilde gövdesine Şekil 7.48’de gösterildiği üzere bir tel parçası eklenmiştir. Bu durumda elde edilen gürültüden temizlenmiş boşalma işaretleri Şekil 7.49’da verilmektedir.



Şekil 7.48 : Islak ve tel yerleştirilmiş 36 kV’luk geçit izolatörü.



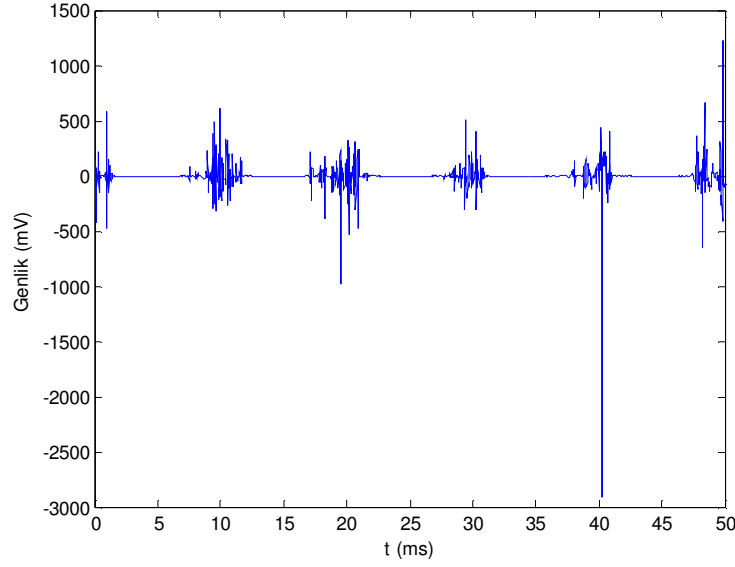
Şekil 7.49 : Şekil 7.48'deki düzenek, 35 kV, gürültü süzölmüş KB'lar.

7.3.7 1 kV'luk kablo

1 kV'luk, 35 mm² kesitli, 4 x 1 damarlı, ekransız, zırhsız ve üzerinde bir kablo eki bulunan kablonun sadece bir damarına uygulanan 9 kV gerilim altında (Şekil 7.50) elde edilen veriden gürültü temizleme işlemi sonunda belirlenen KB işaretleri Şekil 7.51'de verilmiştir.



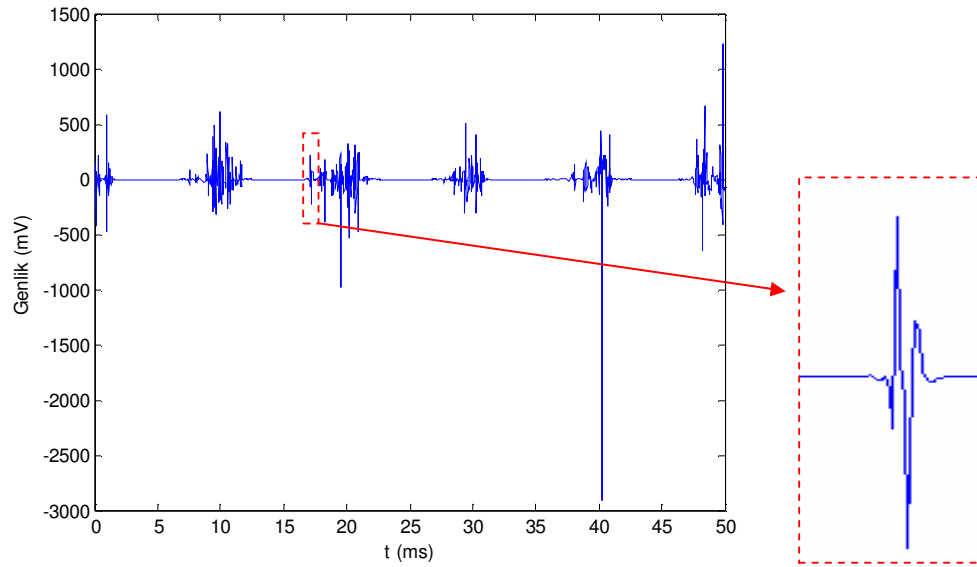
Şekil 7.50 : 1 kV'luk, 35 mm² kesitli kablo KB ölçüm düzeni.



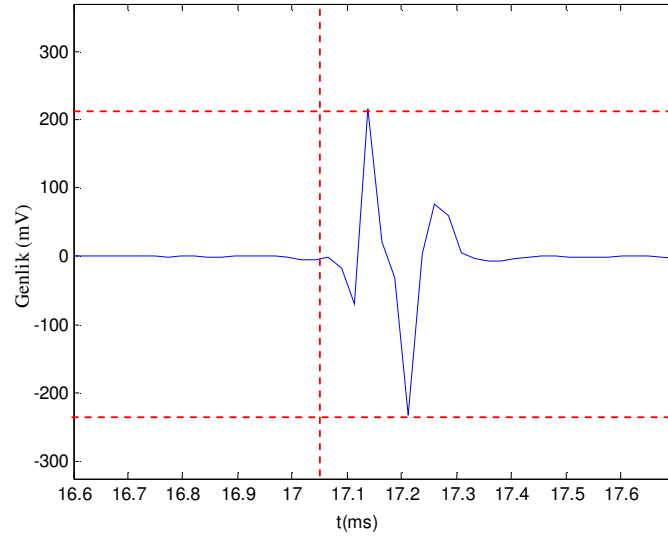
Şekil 7.51 : Kabloda 9 kV gerilim altında elde edilen KB işaretleri.

Şekil 7.51 incelendiğinde zaman içerisinde hemen hemen periyodik yapıda olan boşalma işaretleri görülebilmektedir.

Bu bölüm içerisinde farklı elektrot düzenleri için elde edilen gürültüden süzölmüş tüm KB verilerinde KB işaretlerinin oluşum anları, genlikleri tespit edilebilir duruma gelmiştir. Buna bir örnek olarak Şekil 7.52’de Şekil 7.51’de verilen KB işaretlerinin daha küçük zaman aralığında gösterimi verilmektedir. İlgili kısım Şekil 7.53’de detayları ile birlikte verilmektedir. Buradan da göröleceğı üzere boşalmanın genliğı ve oluşum anı belirlidir.



Şekil 7.52 : Kabloda KB işaretlerinin detay gösterimi.



Şekil 7.53 : Şekil 7.52’de verilen detay KB işareti.

7.4 Bölümün Sonuçları

Bölüm 6’da belirlenip detayları verilen kısmi boşalma işaretlerinden gürültü süzme ve darbe parametrelerini belirleme yöntemlerinin çeşitli yüksek gerilim aygıtlarından ve deney düzeneklerinden elde edilen gerçek veriler üzerine uygulamaları bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla İTÜ (Maslak) Yüksek Gerilim Laboratuvarı’nda bir dizi kısmi boşalma ölçümleri yapılmış ve sonuçlar geliştirilen yöntemle değerlendirilmiştir.

Sonuçlar göstermektedir ki önerilen yöntem yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen boşalma işaretlerinin gürültüden süzülmesinde başlangıçtaki amacımız kapsamında başarılıdır. Önerilen yöntem, kablo, izolatör, transformatör gibi KB ölçme çalışmalarının yapıldığı tüm yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen verilere uygulanabilir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek gerilim (YG) tekniği alanında yüksek gerilim aygıtlarından deney, ölçüm veya sürekli durum izlemede elde edilen işaretlerin zaman domeninde değerlendirilmesi her zaman istenilen bilgilere ulaşılmasını sağlayamayıp özel veri işleme ve değerlendirme tekniklerinin kullanılmasını gerektirebilmektedir. Ayrıca YG aygıtlarının denenmesinde, işletilmesinde ortaya çıkan işaretler üzerine pek çok etken (ortam koşulları, malzeme özellikleri, gerilim-akım karakteristikleri vb.) etki etmektedir. Dolayısıyla bu işaretlerin anlaşılması ve doğru değerlendirilmesi önemli ve kimi zaman zor bir işlem olabilmektedir. Bu tezde bu amaca yönelik katkı sağlamak ana hedef olmuştur.

İlgili bölümlerde verilen örneklerden görülmüştürki elde edilen verilerde kimi zaman analiz yapmadan açıklanamayacak farklı frekans ve genliklerde bileşenler bulunmaktadır. Ayrıca deney ve ölçüm düzeneği ile elde edilen veriler çoğu zaman ölçme düzeneği ya da dış etkenlere dayanan belli bir miktarda gürültü içerebilmektedir. Hatta bazen bu gürültü düzeyi, ana işareti maskeleyebilecek kadar yüksek olabilmektedir. Bu durumda gürültünün mümkün mertebe bastırılması ve ana veriden ayrıştırılması gerekmektedir. Böylece daha yüksek işaret gürültü oranı elde ederek istenilen bilgilere ulaşmak kolaylaşacaktır.

Bu çalışmada son yıllarda geniş uygulama alanı bulan bir işaret analiz aracı olan dalgacık analizinin, yüksek gerilim üretim, ölçme ve deneyleri sırasında elde edilen veriler üzerinde, bu verilerin daha kolay değerlendirilmesi amacıyla kullanılmasına yönelik yeni yöntem ve uygulama alanları geliştirilmiştir.

Çalışmalara yukarıda belirtilen alanlarda yapılan literatür çalışması ile başlanmıştır. Tez içeriğinde belirtilen hedefler kapsamındaki uygulama alanlarında literatürde benimsenmiş dalgacık analizinin uygulanmasına ilişkin net bir prosedür bulunmamakla beraber, çalışmalarda genellikle bazı kabullerin yapılması ve deneme yanılma yöntemine bağlı kalınması nedeniyle belirli bir metodolojinin oluşturulamamış olduğu fark edilmiştir.

Bu noktadan hareketle tez çalışmasında öncelikle yaygın olarak kullanılan işaret analiz araçlarının genel değerlendirilmeleri yapılarak bunların avantaj ve dezavantajları ortaya koyulmuş ve Dalgacık Analizi'nin Fourier Dönüşümü ve Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'ne göre üstünlükleri belirlenerek tez kapsamındaki amacımıza daha uygun olduğu görülmüştür. Ardından dalgacık analizinin detayları verilerek Sürekli Dalgacık Dönüşümü, Ayrık Dalgacık Dönüşümü-Çoklu Çözünürlük Analizi, Durağan Dalgacık Dönüşüm'leri detaylı olarak incelenmiştir.

Dalgacık dönüşümü ile işaretlerin gürültüden arındırma işlemi genel anlamda üç ana adımda gerçekleştirilir. Bunlar sırasıyla dalgacık temel fonksiyonu ile işaret ayrıştırma, her ayrıştırma derecesi için gürültü eşığının seçimi ve detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi, işaretin son güncellenmiş detay sabitleri kullanılarak yeniden oluşturulması yani Ters Dalgacık Dönüşümünün uygulanmasıdır. Tezde belirtilen çalışma alanları kapsamında bu adımların uygulanmasında seçilebilecek oldukça fazla değişken bulunmaktadır. Yüksek gerilim aygıtlarından alınan işaretleri değerlendiren ve sayıları az olan literatürdeki çalışmalarda kimi zaman bu seçimlerin detayı verilmemiş kimi zaman ise sonuçların deneme yanılmaya dayandırıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada analiz esnasında gerekli olan en uygun ana dalgacığın, ayrıştırma seviyesinin, eşikleme kuralı ve de eşikleme fonksiyonların üzerinde çalışılan işarete göre nasıl seçilmesi gerektiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre şekillendirilen bir gürültüden arındırma prosedürü oluşturulmuştur. Edinilen bu sonuçlar laboratuvar ortamında oluşturulan darbe gerilimlerine uygulanarak darbe parametrelerin daha doğru şekilde belirlenmesi saptanmış ve ölçüm içerisinde gizlenen farklı frekanslardaki bileşenler ortaya çıkarılmıştır.

Ardından farklı elektrot sistemleri ve bilgisayar destekli kısmi boşalma ölçüm sistemi kullanılarak çeşitli deneyler yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre kısmi boşalma davranışlarında elektrot sistemine göre farklılıklar ortaya koyularak sınıflandırma yapılmıştır [75]. Bu tür bir sınıflandırma gelecekte yapılabilecek işarete göre boşalmanın türü ve kaynağının belirlenmesi çalışmalarına temel teşkil edebilecektir.

Bilgisayar destekli kısmi boşalma ölçüm sistemi kullanılarak yapılan deneyler sırasında elde edilen önemli bir sonuç ise bu tür sistemlerde çevresel ve ölçüm sisteminden gelen gürültünün ayırt edilmesi için manuel belirlenebilecek bir eşik değeri seçimine olanak sağladığı, ancak bu eşik değerin seçiminin rastgele

yapılmasından dolayı sonuçların birbirinden farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Bu da ham verilerin bir işaret analiz aracı ile değerlendirilerek gürültü bileşenlerinin daha doğru tespit edilmesini, kısacası tezde izlenen yolu desteklemektedir.

Kısmi boşalmaların ölçülmesi ve özellikle de işletme altında sürekli izlenmesi esnasında büyük bir sorun oluşturan ölçme sistemine bağlı ya da dış kaynaklı gürültü bileşenlerinin elde edilen veriden uzaklaştırılmasında dalgacık analizi tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu kapsamda gürültü içerisine gömülü KB işaretlerinin gürültüden en verimli şekilde ayıklanabilmesi için kısmi boşalma işaretlerini ve çeşitli gürültü kaynaklarının oluşturduğu etkiyi matematiksel olarak ifade eden benzetim verileri hem RC hem de RLC tipi ölçüm devreleri için oluşturulmuştur. Bu verilere farklı seviyelerde beyaz ve sinüsoidal gürültü eklenerek gerek laboratuvar gerekse işletmede açık alanda yapılan KB ölçümlerinde elde edilen verilere benzer gürültülü KB işaretleri elde edilmiştir. Ardından her iki farklı ölçüm sistemi için KB işaretlerini gürültüden arındırmak adına Ayrık Dalgacık Dönüşümünde kullanılmak üzere en uygun ayrıştırma seviyesi, optimum ana dalgacık, eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonları belirlenmiştir. Örnek olarak KB işaretlerinin gürültüden arındırılmasında Dalgacık Analizi kullanılırken eğer ölçü empedansı RC tipinde ise Coif2 ana dalgacığı, seviye bağımlı eşikleme ve birleşik eşikleme fonksiyonu en yüksek işaret gürültü oranını sağlamaktadır. Diğer taraftan RLC tipi ölçü devresi kullanılması halinde en iyi işaret gürültü oranını Sym6 ana dalgacığı, seviye bağımlı eşikleme ve birleşik eşikleme fonksiyonunun kullanımı sağlamaktadır.

Belirlenen bu parametreler kullanılarak dalgacık analizi ile gürültü ayrıştırması yapılmış ve yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki yöntem yüksek seviyede gürültü oranlarında dahi KB işareti büyüklüklerinin (varlığı, oluşum zamanı, genlik vb) yeterli seviyede belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Son olarak laboratuvar ortamında çeşitli yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen gerçek kısmi boşalma verileri üzerinde belirlenen yöntemin etkinliğinin sınanması çalışmaları yapılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan bu gürültüden temizleme işleminin başarısını sınamak adına işaret gürültü oranı, ortalama karesel hata ve genlik hatası değerleri kullanılmıştır. Ayrıca yüksek gerilim ölçme tekniklerini kullanarak yüksek gerilim aygıtlarından KB verisi elde etmeye yönelik ölçüm düzeneklerinin geliştirilmesine tasarlanan ölçü empedansı ile katkıda bulunulmuştur.

Ardından deneyle elde edilen farklı türden veri setlerine tez içinde belirtilen analiz yöntemi uygulanarak istenilen çıktılar elde edilebilmiştir.

Böylece önerilen yöntem yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen en küçük gerilim seviyesine sahip işaretler olan KB verilerine ve de en yüksek gerilim değerlerinin elde edildiği darbe gerilim verilerine uygulanarak dalgacık analizinin en uç iki gerilim seviyesinde de kullanılabilir olduğu gösterilmiştir. Bu da bize yüksek gerilim aygıtlarından elde edilen diğer gerilim çeşitlerinde ve de ara değerlerdeki gerilim genliklerinde de dalgacık analizinin kullanılabileceğini göstermektedir.

Sonuçta yüksek gerilim aygıtları üzerinde yapılan durum izleme, gerilim ve akım ölçümleri sırasında zaman bölgesinde elde edilen ölçüm verilerinden genlik, zaman, frekans büyüklüklerinin belirlenebilmesi ve sonuçların daha doğru yorumlanmasını sağlanmıştır. Böylelikle zaman-frekans analizinde etkin bir araç olan dalgacık analizinin yüksek gerilim aygıtlarından alınan işaretlerin değerlendirilmesinde etkinliği işaret türüne ve ölçü düzeneğine bağlı olarak bu tez kapsamında belirlenen seçim ölçütleri ile arttırılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Kreuger, F. H.**, 1989. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, Butterworth & Co., New York.
- [2] **Kyprianou, A.**, 2006. Wavelet Packet Denoising for Online Partial Discharge Detection in Cables and its Application to Experimental Field Results. *Measurement Science and Technology*, No. **17**, pp. 2367 – 2379.
- [3] **Zhang, H.**, 2005. Comparison of Wavelet Transform De-noising Methods For Partial Discharge Detection in Power Cables, *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29.
- [4] **Yuao, J.**, 2005. Research of Anti-interference Technique of PD in High Voltage Oil-filled Cable based on Wavelet. *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29.
- [5] **Satish, L. and Gururaj, B. I.**, 2001. Wavelet analysis for estimation of mean-curve of impulse waveforms superimposed by noise, oscillations and overshoot, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. **16**, No. 1, pp. 116-121.
- [6] **PHYS 331**. Junior Physics Laboratory I “Notes on Noise Reduction” www.ruf.rice.edu/~dodds/Files331/noise_notes.
- [7] **Kashyap, K. H. and Shenoy, U. J.**, 2003. Classification of Power System Faults using Wavelet Transforms and Probabilistic Neural Networks. *Proceedings the 2003 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. **3**, May 25-28. pp. 661-664.
- [8] **Babu, Ch. P., Kalavathi, M S., and Singh, B. P.**, 2006. Use of Wavelet and Neural Network (BPFN) for Transformer Fault Diagnosis. *2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas City, 15-18 October, pp. 93-96.
- [9] **Pradhan, A. K., Routray, A., and Behera, A.**, 2006. Power Quality Disturbance Classification Employing Modular Wavelet Network, *IEEE 2006 Power Enginnering Society General Meeting*, Monteral, Quebec.
- [10] **Jiang, L. and Ji, Z.**, 2005. Fault Location in Power Transmission Lines Using a Second Generation Wavelet Analysis. *2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pasific*. 05 December, Dalian, pp. 1-4.
- [11] **Mao, P. L. and Aggarwal, R. K.**, 2001. A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in power Transformers Using Combined Wavelet Transform and Neural Network, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, October, pp. 116-124.

- [12] **Hamzah, N. and Mohamed, A.,** 2006. A New Method for Locating the Source of Lightning Transients. *International Power and Energy Conference PECon 2006*, Nov. 28-29, Putra Jaya, Malaysia, pp. 267-271.
- [13] **Bolat, S. ve Kalenderli Ö.,** 2007. Dalgacık Dönüşümü ile Yıldırım Darbe Gerilimi Gerilimi Şeklinin Gürültüden Temizlenmesi. *SIU 2007 15. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Bildiri No. 331, Haziran 11-13.
- [14] **Zhigang, L., Dabo, Z., and Dandan, M.,** 2005. De-noising and Compression of Power Fault Signals Based on Best Multiwavelet Packet, *2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pasific*, Dalian, China, pp.1-5.
- [15] **Morsi, W. G. and El-Hawary, M. E.,** 2008. The Most Suitable Mother Wavelet for Steady-State Power System Distorted Waveforms. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE/ CCGEI)*, Mayıs 5-7, Niagara Falls, Canada, pp. 17-22.
- [16] **Giaouris, D. and Finch, J.W.,** 2007. Denosing Using Wavelets on Electric Drive Applications. *Elsevier Electric Power Systems Research*, Vol. **78**, pp. 559-565.
- [17] **Douglas, H. and Pillay, P.,** 2005. The Impact of Wavelet Selection on Transient Motor Current Signature Analysis. *2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*. San Antonio, USA, 15 May, pp. 80-85.
- [18] **Xu, L. and Yan, Y.,** 2004. Wavelet-based Removal of Sinusoidal Interference From a Signal. *Institute of Physics Publishing, Meas. Sci. Technol.* Vol. **15**, pp. 1779 - 1786.
- [19] **Xiaofeng, H., Shangle, L., Ming, W., and Lei, W.,** 2007. Measurement and Analysis of Electromagnetic Fields Radiated by Corona Discharge. *2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Qingdao, 23-26 October, pp. 31-34.
- [20] **Sarathi, R. and Chandrasekar, S.,** 2004. Diagnostic Study of the Surface Condition of the Insulation Structure Using Wavelet Transform and Neural Networks. *Elsevier Electric Power Systems Research*, Vol. **88**, pp. 137-147.
- [21] **Pylarinos, D., Lazarou, S., Marmidis, G., and Pyrgioti, E.,** 2007. Classification of Surface Condition of Polymer Coated Insulators Using Wavelet Transform and Neural Networks. *Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, Beijing, China, Nov. 2-4, pp. 658-663.
- [22] **Önal, E., Kalenderli, Ö., and Şeker, S.,** 2008. Multi-Resolution Wavelet Analysis for Chopped Impulse Voltage Measurements and Feature Extraction. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. **15**, No. 3, pp. 893-900.
- [23] **Wang, X. H. and Song, Y. H.,** 2005. Sheath Fault Detection and Classification Based on Wavelet Analysis. *Euro. Trans. Electr. Power*, Vol. **16**, pp. 327 - 344.

- [24] **Yasuda, Y., Hara, T., Urano, K., and Chen, M.**, 2005. Auto-Detection of Partial Discharges in Power Cables by Discrete Wavelet Transform. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. **152**, No. 1, pp. 24-30.
- [25] **Boczar, T. and Zmarzly, D.**, 2004. Application of Wavelet Analysis to Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. **11**, No. 3, pp. 433-449.
- [26] **Ming, Y. and Birlasekaran, S.**, 2002. Characterization of Partial Discharge Signals Using Wavelet and Statistical Techniques. *Proc. IEEE-ISEI*, Boston, USA, 7-10 April, pp. 9-13.
- [27] **Chang, C. S., Jin, J., Kumar, S., Su, Q., Hoshino, T., Hanai, M., and Kobayashi, N.**, 2005. Denoising of Partial Discharge Signals in Wavelet Packets Domain. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, Vol. **152**, No. 3, pp. 129 – 140.
- [28] **Jin, J., Chang, C. S., Chang, C., Hoshino, T., Hanai, M., and Kobayashi, N.**, 2006. Classification of Partial Discharge Events in Gas-Insulated Substations Using Wavelet Packet Transform and Neural Network Approaches. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, Vol. **153**, No. 2, March, pp. 55-63.
- [29] **Kim, J-T., Kim, N-J., Chang, Y-M., Kim, J-H., and Koo, J-Y.**, 2006. Separation of Partial Discharge Data by Analyzing Pulse Wave Shapes. *8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Bali, June, pp. 365-367.
- [30] **Li, J., Grzybowski, S., Du, L., and Wang, Y.**, 2006. Extraction of Partial Discharges from Noises by Use of Wavelet and Pulse-Sequence Analysis. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas City, USA, 15-18 October, pp. 656-659.
- [31] **Vidya, H. A., Krishnan, V., and Mallikarjunappa, K.**, 2008. A Wavelet Transform Technique for De-noising Partial Discharge Signals. *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Beijing, China.
- [32] **Agoris, P. D., Meijer, S., Galski, E., and Smit, J. J.**, 2004. Threshold Selection for Wavelet De-Noising of Partial Discharge Data. *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, USA, 19-22 September, pp. 62-65.
- [33] **Zhang, Z. and Xiao, D.**, 2008. Noise-based Wavelet Denoising Technique for Partial Discharge Measurement. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Vol. **7**, No. 6, pp. 535 - 546.
- [34] **Ma, X., Zhou, C., and Kemp, J.**, 2000. Investigation Into The Use Of Wavelet Theory For Partial Discharge Pulse Extraction In Electrically Noisy Environments. *8th International Conference on Dielectric Materials, measurements and Applications*, Edinburgh, UK, 17-21 September, pp. 123 - 126.

- [35] **Chang, C. S., Jin, J., Chang, C., Hoshino, T., Hanai, M., and Kobayashi, N.,** 2005. Separation of Corona Using Wavelet Packet Transform and Neural Network for Detection of Partial Discharge in Gas-Insulated Substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. **20**, No. 2, April, pp. 1363 - 1369.
- [36] **Zheng, D., Chen, Y., Chi, X., and Yang, J.,** 2002. Wavelet De-noise on Gas PD Signals of Coaxial Cylinder Electrodes. *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Boston, MA, USA, April 7-10, pp. 449-452.
- [37] **Wen-bo, L., Li-bo, J., and Meng-Xiao, W.,** 2009. Research of Signal Denosing Algorithm Based on Wavelet Threshold. *International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, Wuhan, 23-24 May, pp. 1-4.
- [38] **Batar, H.,** 2005. EEG İşaretlerinin Dalgacık Analiz Yöntemleri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları İle Sınıflandırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [39] **Mallat, S.,** 1999. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, London.
- [40] **Stark, H. G.,** 2005. *Wavelets and Signal Processing- An Application Based Introduction*, Springer, Holland.
- [41] **Arı, N., Özen, Ş. ve Çolak, Ö. H.,** 2008. *Dalgacık Teorisi*, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [42] **Fugal, D. L.,** *Conceptual Wavelets In Digital Signal Processing*, <http://www.conceptualwavelets.com>
- [43] **Ayaz, E.,** 2002. Elektrik Motorlarında Dalgacık Analizi Yaklaşımı ile Rulman Arıza Tanısı ve Yapay Zeka Tabanlı Bir Durum İzleme Sistemi. *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [44] **Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., and Poggi, G.,** 1996. *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB*, The Math Works Inc.
- [45] **Durand, S. and Froment, J.,** 2001. Artifact Free Signal Denoising With Wavelets. *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Salt Lake City, UT, USA, 07-11 May, Vol. **6**, pp. 3685 - 3688.
- [46] **Poornachandra, S.,** 2008. Wavelet-based denoising using subband dependent threshold for ECG signals. *Elsevier Digital Signal Processing*, Vol. **18**, pp. 49-55.
- [47] **Ergen, B., Tatar, Y. ve Gülçür, H. Ö.,** 2005. Kalp Seslerinin Gürültüden Temizlenmesi Üzerine Dalgacık Dönüşümü Karşılaştırılması. *Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı BİYOMUT 2005*, İstanbul, 25-26 Mayıs, pp. 21 - 25.
- [48] **Du, Y., Wang, H., Shi, H., and Liu, H.,** 2009. Wavelet based Soft Threshold Denoising for Vortex Flowmeter. *I2MTC 2009 International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Singapore, 5-7 May, pp. 139 - 143.

- [49] **Yong-xiang, Z., Xiao-xu, Z., Hui-mei, Y., and Wei-gong, Z.**, 2009. Wavelet Packet Threshold Approach to Denoising Piezoelectricity Gyro Signal. *International Conference on Computer Engineering and Technology ICCET 09*, Singapore, 22-24 January, pp. 266 - 269.
- [50] **Taswell, C.**, 1999. The What, How, and Why of Wavelet Shrinkage Denoising. *Technical Report CT-1998-09*, original: 10/13/98, revision: 01/25/99.
- [51] **Kyprianou, A. and Georgiou, G. E.**, 2005. Wavelet Packet Denoising for On-Line Partial Discharge Detection in High Voltage Systems. *13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Limassol, Cyprus, June 27-29.
- [52] **Li, J.**, 2004. Wavelet based De-noising for PD Online Measurement of Transformers. *2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, USA, 19-22 September.
- [53] **Zhou, X., Zhou, C., and Kemp, I. J.**, 2005. An Improved Methodology for Application of Wavelet Transform to Partial Discharge Measurement Denoising. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. **12**, pp. 586-594.
- [54] **Zhongrong, X., Ju, T., and Caixin, S.**, 2007. Application of Complex Wavelet Transform to Suppress White Noise in GIS UHF PD Signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. **22**, No. 3, pp. 1498-1503.
- [55] **Ma, X., Zhou, C., and Kemp, I. J.**, 2002. Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD Detection. *DEIS Future Article*, March/April, Vol. **18**, No. 2, pp. 37-45.
- [56] **Gaouda, A. M.**, 2001. Monitoring HVDC Systems Using Wavelet Multi-Resolution Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. **16**, No. 4, November, pp. 662-670.
- [57] **Zhou, C., Zhou, X., Stewart, B. G., Nesbitt, A., Hepburn, D. M., and Guo, D.**, 2006. Comparisons of Digital Filter, Matched Filter and Wavelet Transform in PD Detection. *International Council on Large Electric Systems*, Paris, France, 27 August - 01 September, pp. 1 - 8.
- [58] **Pandey, S. K., Satish, L.**, 1998. Multiresolution Signal Decomposition: A New Tool For Fault Detection In Power Transformers During Impulse Tests. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. **13**, No. 4, October, pp. 1194 - 1200.
- [59] **Castro, B., Kogan, D., and Geva, A. B.**, 2000. ECG Feature Extraction Using Optimal Mother Wavelet. *The 21st IEEE Convention of the Electrical and Electronic Engineers in Israel*, 11-12 April, pp. 346-350.
- [60] **LDS-6 User's Manual**, Digital Partial Discharge Measuring and Diagnostic System. Version 01/99.
- [61] **Naderi, M. S., Vakilian, M., and Blackburn, T. R.**, 2005. A method for Extracting Partial Discharge Signals in Transformer Winding with Wavelet Analysis. *5th International Conference on Electric Power Systems*, Tenerife, Spain, 16-18 December, pp. 41-45.

- [62] **Ahmed, N. and Srinivas, N.**, 2001. On-line Versus Off-line Partial Discharge Testing In Power Cables. *2001 Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 28 October - 02 November, Vol. **2**, pp. 865-870.
- [63] **Tatizawa, H., Soletto, K. T., and Bacega, W. R.**, 2008. Proposal of a Partial Discharge Detection Method for Laboratory and Field Conditions. *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, USA, 21-24 April, pp. 1-6.
- [64] **Zheng, D., Zhang, C., Sun, X., Liu, H., and Yang, J.**, 2004. Wavelet Transform De-noise of PD Signal on Coaxial Cylinder Electrodes. *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, USA, 19-22 September, pp. 131-134.
- [65] **Zhang, H., Blackburn, T. R., Phung, B. T., and Liu, Z.**, 2004. Application of Signal Processing Techniques to On-Line Partial Discharge Detection in Cables. *International Conference on Power System Technology*, Singapore, 21-24 November, pp. 1780-1785.
- [66] **Altay, Ö. ve Kalenderli, Ö.**, 2009. Elektriksel Kısmi Boşalma Darbesinin Benzetimi ve Dalgacık Analizi ile Gürültüden Süzülmesi. *Elektrik – Elektronik - Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*, Ankara, 23-26 Aralık.
- [67] **Rosas-Orea, M. C. E., Hernandez-Diaz, M., Alarcon-Aquino, V., and Guerrero-Ojeda, G.**, 2005. A Comparative Simulation Study of Wavelet Based Denoising Algorithms. *15th International Conference on Electronics, Communications and Computers*, 28 February - 02 March., pp. 125 - 130.
- [68] **Donoho, D. L.**, 1995. De-noising by Soft-Thresholding. *IEEE Transactions on Information, Theory*, May, Vol. **41**, No. 3, pp. 613-627.
- [69] **Donoho, D. L. and Johnstone, I. M.**, 1998. Minimax Estimation via Wavelet Shrinkage. *Ann. Statist.*, Vol. **26**, No. 3, pp. 879-921.
- [70] **Zhang, Y., Wu, L., and Zhao, J.**, 2008. A New Threshold Method Exploration About Wavelet De-noising, *International Conference on Computer Science and Software Engineering*, pp. 1008-1011.
- [71] **Liu, W., Jiang, L., and Wang, M.**, 2009. Research of Signal Denoising Algorithm Based on Wavelet Threshold. *International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, pp. 1-4, May.
- [72] **Zhang, H., Blackburn, T. R., Phung, B. T. and Sen, D.**, 2007. A Novel Wavelet Transform Technique for On-line Partial Discharge Measurements Part-1: WT De-noising Algorithm. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. **14**, No. 1, pp. 3-14.
- [73] **Agoris, P. D., Meijer, S., Gulski, E., and Smit, J. J.**, 2004. Threshold Selection for Wavelet De-noising of Partial Discharge Data. *2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, USA, 19-22 September.

- [74] **Herold, C., Leibfried, T., Markalous, S., and Quint, I.**, 2007. Algorithms for Automated Arrival Time Estimation of Partial Discharge Signals in Power Cables. *XVth International Symposium on High Voltage Engineering*, Ljubljana, Slovenia, 27-31 August, pp. 1-5.
- [75] **Altay, Ö., Kalenderli, Ö. Merv, A., Dedeoglu, S., and Gülnihar, K.**, 2009. Preliminary Partial Discharge Measurements with a Computer Aided Partial Discharge Detection System. *Eleco 2009 6th Int. Conf. on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Türkiye, 5-8 November, Vol. 1, pp. 345-348.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Özkan ALTAY
Doğum Yeri ve Tarihi: Merzifon, 1977
Adres: Çarşı Mah. Özen Sok. No: 1/14
Yenimahalle-ANKARA
Lisans: İTÜ Elektrik Mühendisliği, 1998.
Yüksek Lisans: Ohio State University (ABD) - Electrical Engineering, 2002.

Yayın Listesi:

Uluslararası Kongre ve Sempozyum Bildirileri

- Ö. Kalenderli; E. Önal; **Ö. Altay**; "Computing the Corona Onset and the Utilization Factor of Rod-Plane Electrode by Using Charge Simulation Method," *Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, pp. 453-456, Cincinnati, USA, 2001.
- D. L. Schweickart; J. C. Horwath; L. C. Walko; **Ö. Altay**; S. A. Sebo; R. Caldecott, "Instrumentation and Procedures for Transient Magnetic Flux Density Measurements on an Aircraft Fuselage-Like Test Setup," *PPC-2003, 2003 Pulsed Power Conference*, Dallas, Texas, USA, 2003.
- R. Caldecott; **Ö. Altay**; S. A. Sebo; D. L. Schweickart; J. C. Horwath ; L. C. Walko; "Processing Test Data Generated by High Surge Current Tests on a Fuselage-Like Test Setup," *PPC-2003, 2003 Pulsed Power Conference*, Dallas, Texas, USA, 2003.
- S. A. Sebo; R. Caldecott; **Ö. Altay**; D. L. Schweickart; J. C. Horwath ; L. C. Walko; "Transient magnetic flux density measurement results on a fuselage-like test setup and investigation of the effects of apertures," *PPC-2003, 2003 Pulsed Power Conference*, Dallas, Texas, USA, 2003.
- R. Caldecott; S. A. Sebo; **Ö. Altay**; D. L. Schweickart; J. C. Horwath; L. C. Walko; "Transient Magnetic Flux Density Measurement Results on a Fuselage-Like Test Setup," *ISH-2003, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft, the Netherlands, August 2003.

- **Ö. Altay**, Ö. Kalenderli, A. Merev, S. Dedeoglu, K. Gülnihar, "Preliminary Partial Discharge Measurements with a Computer aided Partial Discharge Detection System," *Eleco 2009 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Türkiye, Vol. 1, pp. 345-348, 5-8 November 2009.
- **Ö. Altay**, Ö. Kalenderli, "Noise Reduction on Partial Discharge Data with Wavelet Analysis and Appropriate Thresholding," *ICHVE 2010 Int. Conf. On High Voltage Engineering and Application*, New Orleans, USA, 11-14 October 2010.

Ulusal Kongre ve Sempozyum Bildirileri

- **Ö. Altay**, "Uçak Gövdesini Modelleyen Bir Test Düzenegine Uygulanan Yüksek Darbe Akımları Sonucu Oluşan Geçici Magnetik Akı Yoğunluğu Ölçümleri," *Havacılıkta İleri Teknolojiler ve Uygulamaları Sempozyumu (Hitek-2004)*, Hava Harp Okulu, İstanbul, 2004.
- **Ö. Altay**, "Yüksek Darbe Akımı ve Buna Bağlı Oluşan Geçici Magnetik Akı Yoğunluğu Ölçüm Sistemi," *Yüksek Gerilim Ulusal Çalıştayı*, TÜBİTAK-UME, Gebze, Kocaeli, 24-26 Ekim 2007.
- **Ö. Altay**, Ö. Kalenderli, "Elektriksel Kısmi Boşalma Darbesinin Benzetimi ve Dalgacık Analizi ile Gürültüden Süzülmesi," *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği 13. EEBBM Ulusal Kongresi*, Ankara, 23-26 Aralık 2009 (ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi), Ankara, s. 223-227.