



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KARŞILAŞTIRMALI İZ OLUŞUMU İNDEKSİ YÖNTEMİ İLE SİLİKON
YALITKANLARIN ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Yekta AYDIN

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Aysel ERSOY**

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Ağustos, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Yekta AYDIN tarafından, **Doç. Dr. Aysel ERSOY** danışmanlığında hazırlanan "**KARŞILAŞTIRMALI İZ OLUŞUMU İNDEKSİ YÖNTEMİ İLE SİLİKON YALITKANLARIN ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **20/08/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Aysel ERSOY		☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim		☐
	Dalı		Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Rana ORTAÇ KABAOĞLU		☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim		☐
	Dalı		Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Mesut ÇEVİK		☒
	Altınbaş Üniversitesi		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim		☐
	Dalı		Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Yekta AYDIN

(İmza)

BÜTÇE DESTEKLERİ

KARŞILAŞTIRMALI İZ OLUŞUMU İNDEKSİ YÖNTEMİ İLE SİLİKON YALITKANLARIN ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında ve tamamlanmasında desteğini esirgemeyen birçok kişi ve kuruma teşekkürlerimi sunmak isterim. Öncelikle, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Aysel ERSOY'a, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaştığı, yol gösterici eleştirileri ve sürekli desteği için içten teşekkürlerimi sunarım. Onun rehberliği olmasaydı bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı. Ayrıca, tezi hazırlamamda yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Fatih ATALAR'a, değerli katkıları ve desteği için teşekkür ederim. Onun yardımları bu çalışmanın kalitesini artırmıştır.

Hayatım boyunca yanımda olan ve bana her türlü desteği sağlayan aileme, özellikle ablam Zelal AYDIN ve yüksek lisans eğitimim ve tez hazırlama sürecinde yanımda bulunan kız arkadaşım Iryna TAMBORSKA'ya, sabırları ve sevgileri için teşekkür etmek istiyorum. Annem ve babama da minnettarlığımı belirtmek isterim; onların varlığı, bu süreci daha anlamlı ve katlanabilir kıldı. Son olarak, tezimi yazarken birlikte çalıştığım, fikir alışverişinde bulunduğum ve bana ilham veren tüm arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma teşekkür ederim. Tezimin tüm okuyuculara faydalı olmasını diler, bu çalışmanın ortaya çıkmasında emeği geçen herkese tekrar teşekkür ederim.

Ağustos 2024

Yekta AYDIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. SİLİKON YALITKANLAR	3
2.1.1. Silikonun Temel Özellikleri	4
2.1.2. Silikon Yalıtkanların Tarihçesi	5
2.1.3. Elektronik Endüstrisinde Kullanımı	5
2.1.4. Otomotiv Sektöründe Kullanımı	6
2.1.5. Silikon Yalıtkanlar Kullanılarak Yapılan Akademik Çalışmalar	7
3. YÖNTEM	11
3.1. Karşılaştırmalı Yüzeysel İz Oluşumu İndeksi Deney Yöntemi (Comparative Tracking Index, CTI)	11
3.1.1. Deney Prosedürü	12
3.2. Wavelet Transformu	15
4. BULGULAR	17
4.1. 600V 30 Saniye Uygulanan Numune	17
4.2. 600V 20 Saniye Uygulanan Numune	22
4.3. 600V 10 Saniye Uygulanan Numune	27
4.4. 500V 30 Saniye Uygulanan Numune	32
4.5. 500V 20 Saniye Uygulanan Numune	35

4.6. 500V 10 Saniye Uygulanan Numune	38
4.7. Harmonik Akım Analizleri	42
5. TARTIŞMA.....	45
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR.....	50
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFAS.....	54
ETİK KURUL İZİN YAZISI	55
KURUM İZNİ YAZILARI.....	56
ÖZGEÇMİŞ	57



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1. IEC 60112 kapsamındaki elektriksel deney devresi.....	12
Şekil 3.2. Kurulan deney düzeneğinin blok şeması.....	13
Şekil 3.3. Deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeninden bir fotoğraf	13
Şekil 4.1. 600 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali	17
Şekil 4.2. 600 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali	18
Şekil 4.3. 600 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin kısa devre başlayan kaçak akım sinyali	18
Şekil 4.4. 600 V 30 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 4. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	19
Şekil 4.5. 600 V 30 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 26. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	20
Şekil 4.6. 600 V 30 sn için yüzeyde kısa devre oluşumunun başladığı 44. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	21
Şekil 4.7. 600 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali	22
Şekil 4.8. 600 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali	23
Şekil 4.9. 600 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin kısa devre başlayan kaçak akım sinyali	23
Şekil 4.10. 600 V 20 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 5. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	24
Şekil 4.11. 600 V 20 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 12. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	25
Şekil 4.12. 600 V 20 sn için yüzeyde kısa devre oluşumunun başladığı 46. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	26
Şekil 4.13. 600 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali ..	27
Şekil 4.14. 600 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali	27
Şekil 4.15. 600 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin kısa devre başlayan kaçak akım sinyali	28
Şekil 4.16. 600 V 10 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 5. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	29

Şekil 4.17. 600 V 10 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 12. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	30
Şekil 4.18. 600 V 10 sn için yüzeyde kısa devre oluşumunun başladığı 46. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	31
Şekil 4.19. 500 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali ..	32
Şekil 4.20. 500 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali	32
Şekil 4.21. 500 V 30 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 5. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	33
Şekil 4.22. 500 V 30 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 12. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	34
Şekil 4.23. 500 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali ..	35
Şekil 4.24. 500 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali	35
Şekil 4.25. 500 V 20 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 10. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	36
Şekil 4.26. 500 V 20 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 24. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	37
Şekil 4.27. 500 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali ..	38
Şekil 4.28. 500 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali	39
Şekil 4.29. 500 V 10 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 10. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	40
Şekil 4.30. 500 V 10 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 24. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri	41
Şekil 4.31. Harmonik Akım Değerleri Oranları (V=600 V)	42
Şekil 4.32. Harmonik Akım Değerleri Oranları (V=500 V)	43
Şekil 4.33. Total Harmonik Distorsiyonlar	44

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
ρ	: Özdirenç
φ	: $u(i)$, zaman serisi
τ	: Gecikme zamanı
Ψ	: $u(i+\tau)$, zaman serisinin gecikmiş hali
$p_{\varphi,\Psi}(\tau)$	: Bileşik olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu
p_{φ}	: p_{u_i} , zaman serisinin olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu
p_{Ψ}	: $p_{u_{i+\tau}}$, zaman serisinin gecikmiş halinin olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu
σ	: Standart sapma
σ_1	: Birinci zaman serisinin standart sapması
σ_n	: n. zaman serisinin standart sapması
n	: Zaman serisi sayısı
ε	: Önceden tanımlanan bir eşik değeri
$\ \cdot \ $	: Maksimum, Öklid ya da Manhattan normu
kV	: kiloVolt
eV	: Elektronvolt
kHz	: kiloHertz
$x(i)$	: Zaman serisi
$X_{(i)}$	: Gömme vektör
m	: Gömme boyutu
N	: Zaman serisinden oluşturulan $X_{(i)}$ vektörlerinin sayısı
$I(x)$	: Ortak bilgi fonksiyonu

$P(l)$: Diyagonal çizgilerin uzunluklarının frekans dağılımı

l : Diyagonal çizgilerin uzunluğu

M : Zaman serisinden oluşturulan $X_{(i)}$ vektörlerinin sayısı

$H(x)$: Birim basamak fonksiyonu (Heaviside fonksiyonu)

Kısaltmalar Açıklama

AC : Alternatif Akım

ASTM : Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)

CTI : Karşılaştırmalı Yüzeysel İz Oluşumu İndeksi (Comparative tracking index)

DC : Doğru Akım

DET : Belirlenim oranı (Determinizm)

FFT : Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)

GFRP : Cam fiber ile desteklenmiş plastik (Glass fiber reinforced polymer)

HVDC : Yüksek Gerilim Doğru Akım

IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)

ÖZET

[YÜKSEK LİSANS TEZİ]

[KARŞILAŞTIRMALI İZ OLUŞUMU İNDEKSİ YÖNTEMİ İLE SİLİKON YALITKANLARIN ELEKTRİKSEL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ]

[Yekta AYDIN]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

[Danışman : Doç. Dr. Aysel ERSOY]

Bu çalışma, yüksek gerilimli kablolar için kullanılan silikon yalıtkanlarda karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devre davranışlarının incelenmesine odaklanmaktadır. Silikon malzemeler, elektrik yalıtımında yaygın olarak tercih edilmesinin yanı sıra, yüksek gerilim uygulamalarında termal ve mekanik stabilite sağlamasıyla bilinmektedir. Ancak, operasyonel koşullarda karşılaşılabileceği karbonlaşma ve iz oluşumu, malzemenin uzun vadeli performansını olumsuz yönde etkileyebilir.

Bu çalışmanın temel amacı, Wavelet Transform-based Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform (WTMSST) yönteminin elektrik yalıtım malzemelerindeki uygulanabilirliğini göstermektir. Bu yöntem, geçici sinyallerin zaman-frekans karakteristiklerini grup gecikmesini temel alarak analiz edebilme yeteneği sunar ve bu sayede malzemelerin harmonik bileşenlerini hassas bir şekilde karakterize edebilir.

Deneylerde, IEC ve ASTM standartlarına uygun olarak silikon yalıtkanların yüzeysel iz oluşumu test edilmiştir. Deneyler, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda özel olarak kurulan deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde, 500 ve 600 volt gerilim seviyelerinde, 10, 20 ve 30 saniye sürelerle su damlatılarak oluşan karbonlaşma izleri ve kısa devre görülen damlaların harmonik analizi yapılmıştır.

Deneyler sırasında elde edilen veriler, MATLAB yazılımı kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Özellikle, karbonlaşma izleri ve kısa devre görülen damlalar üzerinden 0.2 saniyelik kesitler alınarak zaman-frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. WTMSST yöntemi, bu analizlerde kullanılarak malzemelerin zaman içindeki performans değişiklikleri incelenmiş ve harmonik distorsiyonların detaylı analizi sağlanmıştır.

Elde edilen bulgular, farklı gerilim seviyeleri ve su damlatma süreleri altında WTMSST yönteminin etkinliğini ve uygulanabilirliğini göstererek, elektrik yalıtım malzemelerinin performansının değerlendirilmesinde yeni bir yöntem sunmaktadır. Bu analizler, endüstriyel uygulamalarda kullanılan silikon yalıtkanların geliştirilmesi ve güvenilirliğinin artırılması için önemli bir adımı temsil etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, WTMSST yönteminin silikon yalıtkanların pratik uygulamalarda nasıl kullanılabileceğini ve elektrik yalıtım malzemelerinin geliştirilmesinde nasıl bir araç olarak hizmet edebileceğini anlamaktır. Sonuç olarak, bu araştırma, elektrik iletiminde kullanılan malzemelerin mühendislik uygulamalarında güvenilirliğini artırmak ve endüstriye katkı sağlamak amacıyla önemli bir bilimsel katkı sunmaktadır. |

Ağustos 2024 , [72] sayfa.

Anahtar kelimeler: | Silikon yalıtkanlar, Yüzeysel iz oluşumu, Elektrik yalıtımı, WTMSST analizi, Harmonik analiz |

ABSTRACT

[M.Sc. THESIS]

**[INVESTIGATION OF ELECTRICAL BEHAVIOR OF SILICONE INSULATORS BY
COMPARATIVE TRACKING INDEX METHOD]**

[Yekta AYDIN]

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering, Master's Program with Thesis

[Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aysel ERSOY]

[This study focuses on the evaluation of carbonization, tracking, and short-circuit behaviors in silicone insulators used in high-voltage cables. Silicone materials are widely chosen for their electrical insulation properties and thermal stability in high-voltage applications. However, under operational conditions, carbonization and tracking may negatively impact the long-term performance of these materials.

The primary objective of this study is to demonstrate the applicability of the Wavelet Transform-based Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform (WTMSST) method in analyzing the behavior of electrical insulation materials. The experiments were conducted following IEC and ASTM standards at the Istanbul University-Cerrahpaşa High Voltage Laboratory. Carbonization tracks and short-circuit occurrences resulting from water droplets applied for durations of 10, 20, and 30 seconds at 500 and 600 voltages were analyzed using the WTMSST method.

The MATLAB software was used for detailed analysis, specifically extracting 0.2-second segments of carbonization tracks and short-circuit events. The WTMSST method, which bases its analysis on group delay in the time-frequency domain of transient signals, provides a precise characterization of harmonic components. The results offer a detailed analysis of harmonic distortions under different voltage and water application conditions, contributing to a better understanding of silicone insulation materials' performance.

The aim of this research is to explore how the WTMSST method can be applied practically to enhance the reliability and performance of silicone insulation materials in engineering applications. Consequently, this study represents a significant scientific contribution to the field of electrical insulation materials. |

August 2024, [72] pages.

Keywords: [Silicone Insulators, Surface Tracking, Electrical Insulation, WTMSST Analysis, Harmonic Analysis]

1. GİRİŞ

Elektrik endüstrinde yüksek gerilim yalıtım malzemelerinin rolü büyüktür. Doğru izolasyon sağlandığında enerji akışını sekteye uğratacak hatta tamamen kesecek elektriksel deşarj olaylarının önüne geçilebilmektedir. Yüksek, orta ve alçak gerilim iletimi ve dağıtımında gerek havai hatlarda gerek yer altı kablolarında katı dielektrik malzemeler sayesinde dış ortama karşı izole bir alan sağlanmış olur. Özellikle kablolarda kullanılan katı yalıtkanların dielektrik performanslarının yüksek olması gerekmektedir. Aksi takdirde, yüzeyde ya da iç kısımda meydana gelecek düşük enerjili deşarjlar yüksek enerjili arklara dönüşüp yalıtkanın tamamen delinmesine sebebiyet verecektir. Burada en önemli noktalardan birisi tasarıma ve elektriksel özelliklere en uygun katı izolasyon ortamının seçilmesidir.

Bu tez çalışması, yüksek gerilim kabloları için kullanılan silikon yalıtkan malzemelerde meydana gelen karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devre davranışlarını araştırmaktadır. Silikon yalıtkanlar, elektrik yalıtımında yaygın olarak kullanılmalarının yanı sıra, yüksek gerilim uygulamalarında termal ve mekanik stabilite sağlamalarıyla bilinirler. Ancak, bu malzemeler operasyonel koşullarda, özellikle yüksek voltaj ve çeşitli çevresel stres faktörleri altında zamanla degradasyona uğrayabilir. Bu degradasyon süreçleri, yalıtkanın performansını ve dolayısıyla tüm iletim sisteminin güvenilirliğini tehlikeye atabilir.

Tezin temel amaçlarından biri, silikon yalıtkanlarda yüzey iz oluşumu ve karbonlaşma süreçlerini, çeşitli laboratuvar koşulları altında sistematik olarak incelemek ve analiz etmektir. Bu amaçla IEC ve ASTM standartlarına uygun olarak, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda yüzeysel deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. 500 ve 600 volt gerilim seviyelerinde, farklı süreler için su damlatma yöntemiyle karbonlaşma izleri ve kısa devre durumları oluşturulmuştur. Ayrıca, WTMSST (Wavelet Transform-based Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform) yöntemi kullanılarak, bu malzemeler üzerinde oluşan elektriksel bozulmaların zamanla nasıl evrildiğini detaylı bir şekilde karakterize etmeyi hedeflemektedir. WTMSST, geçici sinyallerin zaman-frekans karakteristiklerini daha net bir şekilde ortaya çıkarmak için kullanılan ileri düzey bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, geleneksel Wavelet Transform'un bir uzantısı olup, sinyallerdeki anlık frekans bilgisini daha doğru bir şekilde tahmin ederek ve bu bilgileri daha keskin bir zaman-frekans çözünürlüğüne

sıkıştırarak sinyalin spektral bileşenlerini daha açık bir şekilde gösterir. Elde edilen veriler, MATLAB yazılımı kullanılarak detaylı bir şekilde işlenmiş ve 0.2 saniyelik kesitler üzerinde WTMSST yöntemi kullanılarak zaman-frekans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu giriş bölümü, tezin ilerleyen kısımlarında daha detaylı ele alınacak olan metodolojileri, deney düzeneklerini ve beklentileri özetlemektedir. Araştırmanın sonucunda elde edilecek bilgiler, silikon yalıtkanların daha etkin kullanımı ve mühendislik uygulamalarında güvenilirliklerinin artırılması konusunda önemli katkılarda bulunmayı hedeflemektedir.



2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. SİLİKON YALITKANLAR

Silikon yalıtkanlar, elektrik ve elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahip olan dielektrik malzemelerdir. Bu malzemelerin enerji bant aralığı, iletim bandı ile valans bandı arasında 4 eV'den geniştir ve elektriği iletmeme özelliği gösterirler [1-3]. Katı silikon yalıtkan malzemeler, özellikle elektrik enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu malzemeler, sıvı ve gaz yalıtkanlara göre daha yüksek delinme dayanımına sahiptirler. İyi bir katı silikon yalıtkan malzemede düşük dielektrik kayıp, yüksek mekanik dayanım, gaz ve nem içermemesi, ısı ve kimyasal etkilere dayanıklılık gibi özellikler aranır. Silikon yalıtkanlar genellikle silikon atomları ve oksijen atomlarının zincir şeklinde birleşimiyle oluşur ve bu yapıları sayesinde esneklik, korozyon direnci ve uzun ömürlü performans gibi avantajlar sunarlar.

Polisiloksan veya polisilikon oksit olarak da bilinen, silikon ve oksijen atomlarının siloksane bağları (-Si-O-Si-) ile birbirine bağlandığı büyük moleküler yapılar sergiler. Bu yapılar, organik gruplarla modifiye edilerek çeşitli mekanik ve kimyasal özellikler kazanabilir [4]. Genel formülü genellikle $(R_2SiO)_n$ şeklinde ifade edilir, burada R metil veya fenil grupları olabilir ve n, polimerin uzunluğunu belirtir [5].

Geniş enerji bandı aralığı sayesinde (genellikle 4 eV'den fazla) ile yalıtkan olarak mükemmel performans sergiler. Bu malzemeler, çok düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek dielektrik dayanımına sahiptir. Ayrıca, -50°C ile 300°C arasındaki geniş bir sıcaklık aralığında stabil olup, aşırı sıcaklık koşullarında bile mekanik özelliklerini korur.

Silikon izolatörler, su, oksijen, ozon ve çoğu çözücü gibi çevresel faktörlere karşı yüksek direnç gösterir. Bu malzemeler, UV ışığına maruz kaldıklarında bozulmaz, böylece açık havada kullanım için idealdir. Kimyasal olarak inert olduklarından dolayı, asitler ve bazlar dahil olmak üzere birçok agresif kimyasala karşı dayanıklıdır.

Silikon yalıtkanlar elektrik ve elektronik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır. Yüksek gerilim kabloları, trafo ve kapasitörler, elektrik motorları gibi yüksek enerji gerektiren uygulamalarda silikon bazlı yalıtkanlar tercih edilir. Otomotiv sektöründe motor yalıtım parçaları, sensörler ve sızdırmazlık elemanları olarak; havacılık sektöründe ise yüksek sıcaklık ve elektrik yalıtımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Ayrıca, tıbbi cihazlar, gıda işleme

ekipmanları ve ev aletleri gibi çeşitli alanlarda da silikon yalıtkan malzemeler vazgeçilmezdir [6-7]. Mükemmel dielektrik ve termal özellikleri sayesinde, yüksek gerilim uygulamalarında kısa devre ve arıza gibi riskleri minimize eder. Bu malzemeler aynı zamanda yüksek frekanslı elektrik uygulamalarında da kullanılır, çünkü düşük dielektrik kaybı ve yüksek frekans tepkisi onları bu uygulamalar için ideal kılar.

Elektrik yalıtımı alanında, silikon yalıtkan malzemelerin geniş bir kullanım yelpazesi bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalardan elektrikli cihazlara, yüksek gerilim iletim hatlarına kadar birçok alanda kullanılan bu malzemeler, stabilite, yüksek sıcaklık dayanımı ve çeşitli kimyasal ortamlara karşı direnç gibi özellikleriyle öne çıkarlar. Bu tez çalışması, silikon yalıtkanların dielektrik performansının değerlendirilmesine yönelik yapılan deneylerle, elektrik yalıtımı ve güvenliği açısından önemli bir katkı sunmuştur.

Silikon yalıtkanlar, modern mühendisliğin temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu malzemeler, elektriksel, termal ve mekanik özellikleri sayesinde birçok endüstride vazgeçilmez hale gelmiştir. Özellikle elektronik, otomotiv, inşaat ve enerji sektörlerinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu yazıda, silikon yalıtkanların temel özellikleri, tarihçesi ve çeşitli endüstrilerdeki uygulamaları kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır.

2.1.1. Silikonun Temel Özellikleri

Silikon, organik ve inorganik bileşiklerin bir karışımı olarak, polimer yapısına sahip bir malzemedir. Genellikle, metil grupları ve oksijen atomları ile bağlanmış silikon atomlarından oluşur. Bu yapı, silikon yalıtkanlara benzersiz özellikler kazandırır.

- **Elektriksel Yalıtkanlık:** Silikon yalıtkanlar, mükemmel bir elektriksel yalıtkanlık sağlar. Yüksek dielektrik dayanımı ve düşük elektriksel iletkenliği sayesinde, elektronik cihazlarda ve kablolama sistemlerinde güvenle kullanılır. Özellikle yüksek voltajlı uygulamalarda silikon yalıtkanlar, kısa devre ve elektrik kaçaklarını önlemede kritik bir rol oynar [8].

- **Termal Dayanıklılık:** Silikon yalıtkanlar, geniş bir sıcaklık aralığında (genellikle -50°C ile 200°C arasında) kararlı kalır. Bu özellik, onları hem düşük hem de yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal kılar. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan bileşenlerin yalıtımında silikon kullanımı, termal genleşme ve daralmalardan kaynaklanan mekanik strese karşı dayanıklılığı artırır [9].

- **Kimyasal Direnç:** Silikon yalıtkanlar, birçok kimyasal maddeye karşı dirençlidir. Asitler, bazlar ve solventler gibi agresif maddelere karşı dayanıklıdır, bu da onları zorlu çevre koşullarında kullanıma uygun hale getirir. Kimyasal tesislerde ve laboratuvar ekipmanlarında silikon yalıtkanlar, korozyif maddelere maruz kalma riskini minimize eder.

- **Esneklik ve Mekanik Dayanıklılık:** Silikon yalıtkanlar, yüksek esneklik ve mekanik dayanıklılık sunar. Bu özellikler, titreşim ve darbelere karşı direnç sağlarken, uzun süreli kullanımda yapısal bütünlüğü korur. Özellikle hareketli parçaların yalıtımında silikonun esnek yapısı büyük avantaj sağlar [10].

2.1.2. Silikon Yalıtkanların Tarihçesi

Silikon yalıtkanların tarihçesi, 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır. İlk olarak 1824 yılında İsveçli kimyager Jöns Jacob Berzelius tarafından keşfedilen silikon elementi, uzun bir süre laboratuvar merak konusu olarak kaldı. Ancak, 20. yüzyılın ortalarına doğru, silikonun polimer yapılarının keşfi ve geliştirilmesiyle endüstriyel kullanım alanları hızla genişlemeye başladı [11].

- 1930'lar: Kimyagerler, silikon polimerlerin ticari olarak üretilebileceğini fark etmeye başladılar. Bu dönemde, ilk silikon bazlı yağlar ve kauçuklar geliştirildi. General Electric ve Dow Corning gibi firmalar, silikon teknolojisinin öncüsü oldular [12].

- 1940'lar: İkinci Dünya Savaşı sırasında, silikon yalıtkanlar askeri uygulamalarda kullanılmaya başlandı. Silikonun yüksek sıcaklıklara ve zor koşullara dayanıklılığı, savaş ekipmanlarında güvenilir bir yalıtım malzemesi olarak benimsenmesini sağladı [13].

- 1950'ler: Savaş sonrası dönemde, silikon yalıtkanların ticari kullanımı hızla arttı. Elektronik ve otomotiv endüstrileri, silikonun üstün yalıtım özelliklerinden faydalanmaya başladı. Bu dönemde, silikon bazlı kaplamalar ve dolgu malzemeleri yaygınlaştı [14].

- 1970'ler ve Sonrası: Mikroelektronik devrimi ile birlikte, silikon yalıtkanlar elektronik bileşenlerin üretiminde kritik bir rol oynamaya başladı. Yarı iletken endüstrisinde silikon yalıtkanların kullanımı, modern elektronik cihazların temelini oluşturdu [15].

2.1.3. Elektronik Endüstrisinde Kullanımı

Elektronik endüstrisi, silikon yalıtkanların en yaygın kullanıldığı alanlardan biridir. Bu malzemeler, mikroçiplerin üretiminden devre kartlarının kaplanmasına kadar birçok uygulamada kullanılır [16,17]. Silikon yalıtkanların elektronik cihazlardaki başlıca avantajları şunlardır:

- **Yüksek Saflık ve Homojenlik:** Mikroçip üretiminde kullanılan silikon yalıtkanlar, yüksek saflık derecesine sahiptir. Bu, cihazların performansını artırır ve arıza olasılığını azaltır. Özellikle yarı iletken endüstrisinde, silikonun saf ve homojen yapısı, yüksek kaliteli çiplerin üretimini mümkün kılar.

- **Isı Yönetimi:** Elektronik cihazlar çalışırken ısı üretir. Silikon yalıtkanlar, bu ısının verimli bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olarak, cihazların aşırı ısınmasını önler. Isı dağıtıcı silikon pedler ve kaplamalar, elektronik bileşenlerin soğutulmasında etkin bir rol oynar.

- **Koruma ve Güvenilirlik:** Silikon kaplamalar, devre kartlarını nem, toz ve kir gibi çevresel etkenlerden korur. Bu koruma, elektronik cihazların güvenilirliğini artırır ve ömrünü uzatır. Ayrıca, silikon yalıtkanların ultraviyole ışınlarına karşı dirençli olması, açık hava uygulamalarında da avantaj sağlar.

- **Esneklik ve Hafiflik:** Elektronik cihazlarda kullanılan silikon yalıtkanlar, hafif ve esnek yapıdadır. Bu özellikler, cihazların daha kompakt ve taşınabilir olmasını sağlar. Esnek devre kartları ve kablolarda silikonun kullanımı, cihazların tasarım esnekliğini artırır.

2.1.4. Otomotiv Sektöründe Kullanımı

Otomotiv endüstrisi, silikon yalıtkanların sunduğu avantajlardan büyük ölçüde faydalanmaktadır. Motor parçalarından kablolama sistemlerine kadar birçok bileşen, silikon yalıtkanlar ile üretilir [18-20].

- **Motor Yalıtımı:** Silikon yalıtkanlar, motor parçalarının yalıtımında kullanılarak, ısıya ve kimyasallara karşı koruma sağlar. Bu, motorun daha uzun ömürlü olmasına ve daha verimli çalışmasına yardımcı olur. Silikon kaplamalar, motorun iç parçalarını yağ ve yakıt gibi maddelerin zararlarından korur.

- **Kablolama Sistemleri:** Otomobillerdeki elektriksel sistemlerin yalıtımında da silikon yalıtkanlar kullanılır. Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklara ve mekanik strese karşı dirençlidir. Özellikle motor bölmesinde ve tekerlek bölgelerinde bulunan kablolarda silikon yalıtkanlar, dayanıklılığı artırır.

- **Sızdırmazlık Elemanları:** Silikon yalıtkanlar, otomobillerde sızdırmazlık elemanları olarak da kullanılır. Kapı ve pencere fitilleri, yağ contaları ve diğer sızdırmazlık elemanları, silikonun esnek ve dayanıklı yapısı sayesinde uzun süreli koruma sağlar.

- **Sensör ve Elektronik Modüller:** Modern araçlarda kullanılan çeşitli sensörler ve elektronik modüller, silikon yalıtkanlar ile korunur. Bu yalıtkanlar, hassas elektronik bileşenleri titreşim, nem ve toz gibi çevresel faktörlerden korur.

2.1.5. Silikon Yalıtkanlar Kullanılarak Yapılan Akademik Çalışmalar

Silikon yalıtkanlar, elektronik, otomotiv, inşaat ve enerji sektörleri gibi çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu malzemeler yüksek gerilim ve çeşitli çevresel koşullar altında karbonlaşma ve iz oluşumu gibi zorluklarla karşılaşabilir. Bu süreçler, yalıtkanın dielektrik gücünü azaltabilir ve cihazların arızalanmasına yol açabilir. Bu tez çalışması, WTMSST yöntemi kullanılarak, silikon yalıtkanların bu zorlukların üstesinden gelme potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Silikon yalıtkanların yüksek gerilim uygulamalarında karşılaştıkları en büyük zorluklardan biri karbonlaşma ve iz oluşumudur. Bu durum, özellikle yüksek elektrik alan ve çevresel stres faktörleri altında zamanla bozulmaya sebep olabilir. Silikon yalıtkanların yüzeyinde oluşan karbonlaşma, malzemenin elektriksel özelliklerini bozarak yalıtkanlığını azaltır. Bu durum, özellikle yüksek gerilim uygulamalarında kısa devre riskini artırabilir. Silikon yalıtkanların yüzey bozulmalarını incelemek için uzun yıllardır uzmanlar ve araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmaktadır.

Chongqing Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, silikon kauçuk yalıtkanların asidik ortamlardaki performansı incelenmiş ve asit yağmurlarının silikon kauçuk yalıtkanların yaşlanma sürecini hızlandırdığı ve korozyon direncini azalttığı gösterilmiştir. Bu çalışma, asidik ortamlarda silikon yalıtkanların dayanıklılığını artırmak için farklı formülasyonların kullanılması gerektiğini önermektedir. Silikon kauçuk yalıtkanlar, asidik ortamlarda hızla yaşlanır ve korozyona uğrar. Farklı formülasyonlar ve dolgu maddeleri kullanılarak bu etkilerin azaltılabileceği gösterilmiştir [21].

Pakistan'da yapılan başka bir çalışmada, yüksek gerilim kompozit yalıtkanların performansı üzerine geniş bir literatür taraması sunulmuştur. Bu çalışmada, silikon kauçuk, etilen propilen dien monomer (EPDM) ve epoksi reçineler gibi polimerik malzemelerin termal iletkenlik, dielektrik dayanım ve mekanik dayanım gibi özelliklerini iyileştirmek için mikro ve nano dolgu maddelerinin etkileri tartışılmıştır. Mikro ve nano dolgu maddelerinin yalıtkan performansını önemli ölçüde artırdığı ve bu maddelerin termal iletkenlik, dielektrik dayanım ve mekanik dayanım gibi özellikleri iyileştirdiği bulunmuştur [22]

Hızlandırılmış yaşlanma testleri, silikon kauçuk yalıtkanların uzun süreli dayanıklılığını ve performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu testler, yüksek sıcaklık, UV ışığı ve diğer çevresel stres faktörleri altında yalıtkanların elektriksel kalitesini analiz etmektedir. Hızlandırılmış yaşlanma testleri, yalıtkanların elektriksel kalitesini ve dayanıklılığını değerlendirmek için etkili bir yöntem olup, yalıtkan malzemelerin performansını optimize etmek için kullanılabilir [23].

Konstantin O. Papailiou ve Frank Schmuck tarafından yazılan "Silikon Kompozit Yalıtkanlar" kitabında, silikon kauçuk gövdeye sahip kompozit yalıtkanların malzeme seçimi ve üretim süreçleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmaktadır. Silikon kauçuk yalıtkanların tasarımı ve üretimi sırasında dikkate alınması gereken faktörler incelenmiş ve yalıtkanların performansını ve dayanıklılığını artırmak için öneriler sunulmuştur [24]

Yüksek sıcaklıkta vulkanize edilmiş silikon kauçuk (HTV-SR) kompozitlerin AC gerilimi altında yaşlanma performansını anlamak amacıyla yapılan bir çalışmada, dış ortamda kontaminasyon ve kuruma bandı arkı nedeniyle yüzeyde iz oluşumu ve erozyon yaşayan HTV-SR bazlı kompozitlerin yaşlanma performansı incelenmiştir. Silika ve alümina trihidroksit (ATH) dolgu maddeleriyle zenginleştirilmiş numuneler, çoklu stres odasında 5000 saat boyunca yaşlandırılmış ve ardından iz oluşumu testine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, dolgu maddelerinin iz oluşumu direncini artırdığını göstermiştir [25].

2021 yılında yayınlanan başka bir akademik çalışmada, dış ortamda kullanılan silikon kauçuk yalıtkanların iz ve erozyon direncini değerlendirmek için yaygın bir yöntem olan eğimli düzlem testi yapılmıştır. Bu test, yalıtkan malzemelerin yüzeyinde meydana gelen kaçak akım ve yüzey bozulmalarını analiz ederek, malzemenin elektriksel performansını değerlendirmiştir. ATH dolgusu ile zenginleştirilmiş silikon kauçuk numuneler, iz ve erozyon direncinde iyileşme göstermiştir. Eğik düzlem testi, yalıtkan performansını değerlendirmek için etkili bir yöntemdir [26].

Eğimli düzlem testinin yayınladığı aynı çalışmada, ayrıca dış ortamda kullanılan silikon kauçuk (SiR) yalıtkanların iz ve erozyon direncini artırmak için mikron boyutunda inorganik dolgu maddelerinin eklenmesi incelenmiştir. Yüksek voltajlı doğru akım (HVDC) iletim hatlarında kullanılan bu yalıtkanların iz ve erozyon direncini artırmak için daha uzun sürünme mesafeleri tasarlanmıştır. Sonuçlar, dolgu maddelerinin iz oluşumunu ve erozyon direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir [27].

2018 yılında Malezya yapılan Intelligent Manufacturing & Mechatronics konferansında yayınlanan konferans dökümanında, silikon kauçuk yalıtkanların iz ve erozyon direncini iyileştirmek için mikron boyutunda inorganik dolgu maddelerinin eklenmesi incelenmiştir. Çalışmada, ASTM D2303 standardına göre eğik düzlem testi kullanılarak farklı dolgu maddesi içerikleriyle hazırlanan numunelerin performansı değerlendirilmiştir. Özellikle alümina trihidroksit (ATH) dolgusu ile zenginleştirilmiş silikon kauçuk numunelerinin iz ve erozyon direncinin arttığı bulunmuştur. Eğik düzlem testi, silikon kauçuk yalıtkanların yüzey bozulmalarını ve kaçak akımlarını değerlendirmek için etkili bir yöntem olup, test sonuçları yalıtkan performansının optimize edilmesine yardımcı olmaktadır [28].

Liu ve ekibi tarafından Chongqing Üniversitesi'nde silikon kauçuk yalıtkanların kaçak akımlarının analizinde wavelet transformu kullanılmıştır. Bu çalışmada, farklı kirlilik koşullarında HTV silikon kauçuk levhaların kaçak akım performansı incelenmiştir. Sonuçlar, sıcaklık, nem ve kirlilik seviyelerinin kaçak akım büyüklüğünü artırdığını göstermiştir. Discrete Wavelet Transform (DWT) tekniği, kaçak akımın frekans bileşenlerini analiz etmek için kullanılmıştır. Kaçak akımın büyüklüğü, sıcaklık, nem ve kirlilik seviyelerine bağlı olarak artmaktadır. DWT tekniği kullanılarak kaçak akımın frekans bileşenleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler, yalıtkan yüzeyindeki bozulmaları ve elektriksel stres faktörlerinin etkilerini daha iyi anlamayı sağlamıştır [29].

Loganathan ve Chandrasekar tarafından yapılan bir çalışmada, mikro ve nano boyutlu alümina dolgu maddeleri ile doldurulmuş silikon kauçuk yalıtkanların iz ve erozyon direnci analiz edilmiştir. Çalışmada, wavelet transformu kullanılarak elde edilen veriler ile silikon kauçuk yalıtkanların yüzey koşulları değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, malzemenin elektriksel stres altındaki davranışlarını daha iyi anlamak için kritik bilgiler sağlamıştır. Mikro ve nano boyutlu dolgu maddeleri ile zenginleştirilen silikon kauçuk numuneleri, iz ve erozyon direncinde önemli iyileşmeler göstermiştir. Wavelet transformu kullanılarak elde edilen veriler, malzemenin yüzey koşullarını detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Bu yaklaşım, yalıtkanın elektriksel stres altındaki davranışlarını daha iyi anlamak için kritik bilgiler sağlamıştır [30].

Bir başka çalışmada, Singh ve ekibi tarafından Hindistan Teknoloji Enstitüsü'nde (IIT) silikon kauçuk yalıtkanların yüzey kaçak akımlarının dalgacık transformu kullanılarak analiz edilmesi üzerine odaklanılmıştır. Çalışma, silikon yalıtkanların kirlilik ve çevresel stres faktörleri altındaki performansını değerlendirmek için wavelet transformunun kullanımını incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, dalgacık transformunun yalıtkanların durumunu izlemek ve performanslarını değerlendirmek için etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Wavelet transformu,

yalıtkan yüzeyindeki kaçak akımların frekans bileşenlerini analiz ederek yüzey bozulmalarını tespit etmekte etkili olmuştur. Elde edilen sonuçlar, dalgacık transformunun yalıtkanların durumunu izlemek ve performanslarını değerlendirmek için etkili bir araç olduğunu göstermektedir [31].

Sarathi ve arkadaşları tarafından yapılan bir araştırmada, silikon kauçuk yalıtkanların yüzey koşulları dalgacık transformu ve yapay sinir ağları kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışma, dalgacık transformunun yalıtkan yüzeyindeki elektriksel bozulmaları ve kirlilik etkilerini analiz etmek için nasıl kullanılabileceğini göstermiştir. Dalgacık transformu, yalıtkan yüzeyindeki bozulmaların detaylı analizini sağlayarak elektriksel performans değerlendirmelerinde önemli bilgiler sunmuştur. Yapay sinir ağları ile birlikte kullanılan dalgacık transformu, yalıtkanların yüzey koşullarını ve elektriksel stres altındaki davranışlarını daha iyi anlamayı sağlamıştır [32].

Literatürde geniş bir şekilde incelenen silikon yalıtkanların dielektrik performansının analiz edilmesi doğru bir elektriksel yalıtım için elzemdir. Özellikle yüzeyde başlayan küçük deformasyonlar, tam bir elektriksel köprüden öncesi ilk aşamadır. Bu tez çalışmasında güçlendirilmiş silikon yalıtkanın yüzey deşarjı CTI yöntemi ile deneysel olarak test edilmiştir. Deneyler esnasında CTI uygulama standartının belirlediği 30 sn peryotlu kirlletici damla maruziyetinin yanı sıra 20 sn ve 10 sn peryotlu damla uygulaması da yapılmıştır. CTI indeksinden ziyade yüzeyden geçen kaçak akımlar karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devreye sebep olan damlalar özelinde detaylıca incelenmiştir. Kaçak akımların elektriksel deşarjlar için yeterli bilgileri içermemesinden dolayı bu akım dalga formlarına WTMSST yöntemi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen yöntem sayesinde farklı frekans bantlarındaki elektriksel İz Oluşumların yoğunlukları ve dağılımı incelenmiştir.

3. YÖNTEM

Elektriksel yalıtım malzemeleri, kullanım ömürleri boyunca çeşitli çevresel ve operasyonel stres faktörlerine maruz kalır. Bu stres faktörleri, özellikle dış ortamda veya yoğun kirlilik bulunan koşullarda kullanıldıklarında daha belirgin hale gelir. Yalıtım malzemelerinin dielektrik özellikleri bu stres faktörlerinden olumsuz etkilenebilir, bu da uzun vadede yalıtım malzemelerinin bozulmasına ve elektriksel ekipmanların zarar görmesine yol açabilir. Bu tür bozulma süreçleri genellikle zaman alıcıdır ve bu nedenle bazı uluslararası kuruluşlar ve komiteler, yalıtım malzemelerinin kalitesini değerlendirmek için hızlandırılmış deney yöntemleri geliştirmiştir. Bu yöntemler sayesinde, yalıtım malzemelerinin kalitesi, ömrü ve performansı hakkında değerli bilgiler elde edilebilir. Yalıtım malzemelerinin elektriksel iz oluşumu direncini değerlendirmek amacıyla laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çeşitli deney yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler, farklı stres koşulları altında yalıtım malzemelerinin performansını ölçer ve karşılaştırmalı değerlendirmeler yapar. Yaygın olarak kullanılan deneysel metotlar IEC 60112, ASTM D3638, ASTM D5288 standartlarına göre yapılmaktadır [33-35]. Bu tez çalışmasında IEC 60112 standardı kapsamında CTI deney yöntemi kullanılarak silikon malzemenin yüzey durumu değerlendirilmiştir.

3.1. Karşılaştırmalı Yüzeysel İz Oluşumu İndeksi Deney Yöntemi (Comparative Tracking Index, CTI)

CTI testi, yalıtkan malzemelerin yüzeyinde oluşan elektriksel izlere karşı dirençlerini ölçer. Bu testte, numunenin yüzeyine belirli bir iletkenlikte sıvı bir kirlilik damlatılır ve belirli bir gerilim uygulanarak iz oluşumu gözlemlenir. Elektriksel yalıtım malzemeleri, çalışma ömürleri boyunca çeşitli çevresel ve operasyonel stres faktörlerine maruz kalırlar. Özellikle dış ortamda veya ağır kirli koşullar altında bulunan yalıtım malzemeleri ciddi streslere maruz kalmakta ve bu durum dielektrik özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Uzun vadede bu stresler, yalıtım malzemelerinin bozulmasına ve elektriksel ekipmanların zarar görmesine neden olabilir. Bu tür bozulma süreçlerini hızlandırılmış deney yöntemleri ile değerlendirmek, yalıtım malzemelerinin performansı ve kalitesi hakkında önemli bilgiler sağlar.

CTI testi, yalıtım malzemelerinin yüzeyinde elektriksel iz oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmeyi amaçlar. Bu test, özellikle nemli ve kirli ortamlarda kullanılan yalıtım malzemelerinin yüzey bozulmasına karşı dayanıklılığını belirlemek için kritik öneme sahiptir. Test sonuçları, yalıtım malzemesinin kalitesi ve uzun vadeli performansı hakkında değerli bilgiler sunar. Bu tezde, kablo eklerinde kullanılan silikon bazlı yalıtkan malzemelerin iz

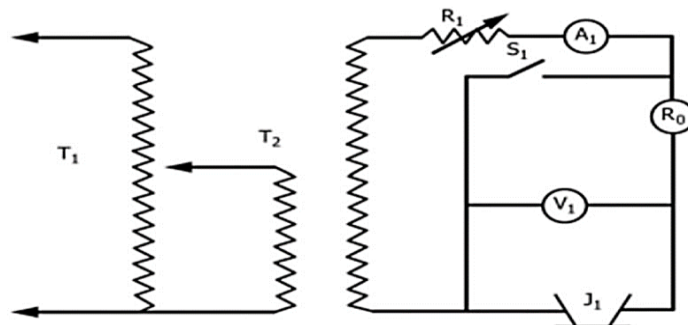
oluşumu ve erozyon direncini değerlendirmek için Karşılaştırmalı Yüzeysel İz Oluşumu İndeksi Deney Yöntemi (CTI) kullanılmıştır. CTI testi, yalıtkan malzemelerin yüzeyine belirli bir iletkenlikte sıvı kirlilik damlatılarak ve belirli bir gerilim uygulanarak gerçekleştirilir. Genel olarak test prosedürü aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

- **Numune Hazırlığı:** Test için kullanılacak yalıtkan malzeme numuneleri, belirli boyutlarda kesilir ve temizlenir.
- **Kirlilik Uygulaması:** Numune yüzeyine belirli bir iletkenlikte sıvı bir kirlilik damlatılır.
- **Gerilim Uygulaması:** Numune yüzeyine belirli bir alternatif akım (AC) gerilimi uygulanır.
- **İzleme ve Değerlendirme:** Numune yüzeyinde meydana gelen iz oluşumu ve erozyon gözlemlenir ve kaydedilir. Test süresince yüzeyde meydana gelen elektriksel İz Oluşumlar ve yüzey bozulmaları izlenir.
- **Sonuçların Analizi:** Numunenin yüzeyinde iz oluşumu gerçekleşip gerçekleşmediği değerlendirilir. İz oluşumu gözlemlenmezse, numune daha yüksek gerilim seviyelerinde tekrar test edilir.

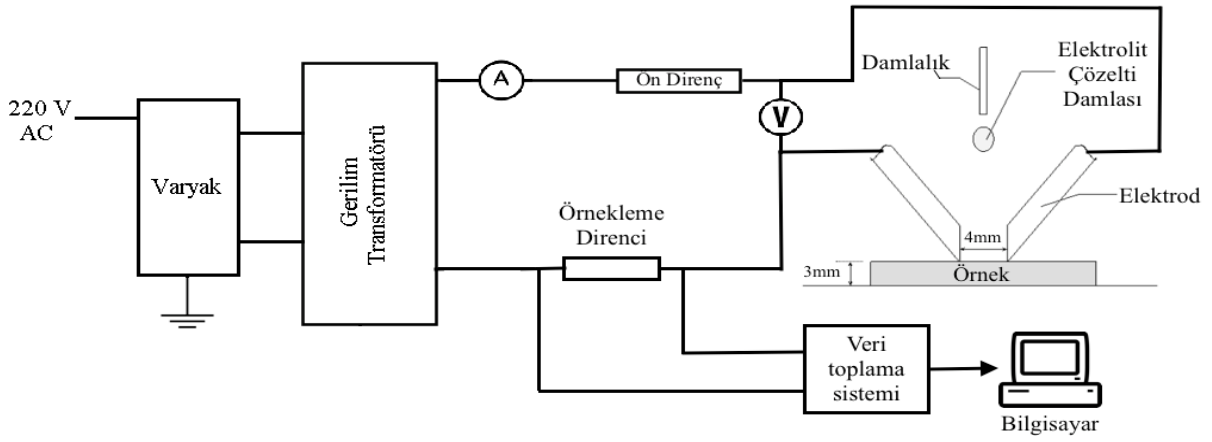
Bu prosedürler ve yöntemler, elektrik-elektronik endüstrisinde kullanılan yalıtım malzemelerinin farklı servis şartları altında göstereceği performansı değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, yalıtkan malzemelerin kalitesini ve uzun vadeli performansını optimize etmek için değerli bilgiler sunmaktadır.

3.1.1. Deney Prosedürü

Bu tez kapsamında, kablo eklerinde kullanılan silikon bazlı yalıtkan malzemesinin yüzeyde iz oluşumu performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan Karşılaştırmalı Yüzeysel İz Oluşumu İndeksi (CTI) deney yöntemi tercih edilmiştir. Karşılaştırmalı yüzeysel İz Oluşumu indeksi deney yöntemi için IEC 60112 standardının belirlemiş olduğu deney düzeneği devresine ait elektrik devre şeması Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

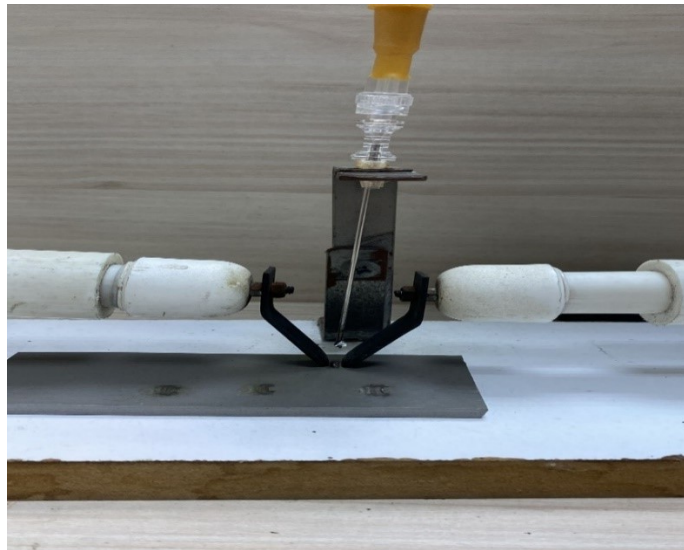


Şekil 3.1. IEC 60112 kapsamındaki elektriksel deney devresi



Şekil 3.2. Kurulan deney düzeneğinin blok şeması

CTI deney yönteminde kullanılan elektrotlar, belirli boyut ve şekil standartlarına uygun olarak hazırlanır. Elektrotlar, eni $5 \pm 0,1$ mm ve kalınlığı $2 \pm 0,1$ mm olacak şekilde dikdörtgen kesite sahiptir. Elektrotların uzunluğu minimum 12 mm olup bakırdan yapılmıştır. her testten önce yüzeyleri zımparalanarak istenilen geometrik şekillerini korumaları sağlanır. Bu, sonuçların doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artırmak için gereklidir. Elektrotlar, deney numunesinin üzerine 100 g'lık basınç uygulayacak şekilde dikey olarak yerleştirilmiştir. Elektrotlar arasındaki $4 \pm 0,1$ mm açıklık bulunmaktadır. Bu mesafe, kayma ölçeri (slip gauges) kullanılarak hassas bir şekilde ölçülür. Elektrotlar numune üzerinde simetrik olarak $60 \pm 5^\circ$ açıyla yerleştirilmiştir. Bu açı, elektrotlar arasındaki potansiyel farkın yüzeyde düzgün bir şekilde dağılımını sağlar. Üniversitemiz laboratuvarında kurulan deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeninin bir fotoğrafı Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Bakırdan yapılmış bu elektrotlar, simetrik olarak 30° açıyla bükülerek elektrotlar arasındaki açının yaklaşık 60° olması sağlanmıştır.



Şekil 3.3. Deney düzeneğinde kullanılan elektrot düzeninden bir fotoğraf

Deney sırasında kullanılacak gerilim kaynağı, numune yüzeyine 500 ve 600 Voltluk AC gerilimleri uygulayacak şekilde ayarlanmıştır. Numune yüzeyine belirli bir iletkenlikte sıvı bir kirlilik (genellikle amonyum klorür çözeltisi) damlatılır. Elektrotlar arasına belirli aralıklarla (10 20 ve 30 saniye) elektrolit damlaları bırakılır. Bu, yüzeyde elektriksel iz oluşumunu tetikler. Elektrotlar yerleştirildikten sonra, numune yüzeyine belirli bir AC gerilim uygulanır. Bu gerilim, yüzeyde elektriksel stres oluşturarak iz oluşumunu başlatır. Gerilim uygulanırken, numune yüzeyindeki elektriksel olaylar izlenir ve kaydedilir. Deney sırasında numune yüzeyinde meydana gelen iz oluşumu ve erozyon gözlemlenir ve kaydedilir. Test süresince yüzeyde meydana gelen elektriksel İz Oluşumlar, kaçak akım ve yüzey bozulmaları izlenir. İz oluşumu gözlemlenmezse, numune daha yüksek gerilim seviyelerinde tekrar test edilir. İz oluşumu gözlemlendiğinde, bu gerilim değeri numunenin CTI değeri olarak kaydedilir.

Deney sırasında numunelere 500 V ve 600V değerindeki gerilimler uygulanmıştır. Gerilim seviyesini ayarlamak için 220 V AC monofaze besleme gerilimi ile çalışan bir varyak kullanılmıştır. Bu varyak, 0 ile 250 V arasında çıkış gerilimi verecek şekilde ayarlanmıştır ve 1 kVA gücündedir. Deney düzeneğinde, 1 kVA gücünde tek fazlı bir transformatör kullanılmıştır. Bu transformatör, 220/1000 V dönüştürme oranına sahiptir ve varyak çıkışından aldığı gerilimi yaklaşık 4.55 katına yükseltir.

Standarta göre, kısa devre akımının 1 ± 0.1 A olması gerekmektedir. Bu şartı sağlamak için değişken dirence sahip bir ön direnç paketi oluşturulmuştur. Direnç paketinin değeri, numuneye uygulanan gerilime göre ayarlanarak kısa devre akımının istenilen sınırlarda kalması sağlanmıştır. Güç kaynağının çıkış gerilimini ölçmek için 0-600V aralığını maksimum %0.5 hata oranıyla ölçebilen bir voltmetre kullanılmıştır. Ayrıca, transformatör çıkışındaki gerilim seviyesi %0.1 hata oranıyla ölçüm yapan bir enerji analizörü ile izlenmiş ve her 2 saniyede bir analizörün bellek kartına kayıt edilmiştir. Enerji analizörünün pens probu ile deney devresinden geçen akım ve kısaçaklı problemler ile transformatör çıkışındaki gerilim seviyesi ölçülmüştür.

Deney sırasında numune yüzeylerinden kaçak akım verileri 48,000 örnek/saniye ile ölçülmüş ve bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Bu yüksek örnekleme hızı, kaçak akım verilerinin detaylı analizine olanak sağlamıştır. Çalışmada farklı gerilim ve zaman aralıkları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 600 V ve 500 V gerilim streslerine maruz bırakılmıştır. Her iki gerilim seviyesi için de 10 saniye, 20 saniye ve 30 saniye aralıklarla deiyonize su çözeltisi damlatılmıştır.

3.2. Wavelet Transformu

Dalgacık dönüşümü (Wavelet Transform), sinyallerin zaman-frekans alanında detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlayan önemli bir matematiksel işlemdir. Temel olarak, sinyalin hem zaman hem de frekans düzlemlerinde lokal özelliklerini belirlemek için kullanılır. Dalgacık dönüşümü, sinyalin farklı zaman dilimlerindeki frekans bileşenlerini ölçmek için dalgacık fonksiyonlarını kullanır. Bu fonksiyonlar, sinyalin zaman-frekans düzleminde çözünürlüğünü artırabilen ve sinyalin yerel davranışlarını daha hassas bir şekilde tanımlayabilen özel matematiksel yapılar olarak tanımlanabilir.

Dalgacık dönüşümü yöntemi, özellikle sürekli zamanlı (continuous wavelet transform, CWT) formülü denklem 1’de verilmiştir [36,37].

$$CWTx(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi * \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

Burada, $x(t)$ bir sinyal, $\psi(t)$ bir dalgacık fonksiyonu, a ölçek parametresi ve b konum parametresidir.

$\psi * \left(\frac{t-b}{a} \right)$, dalgacık fonksiyonunun zaman ve ölçek parametrelerine göre ölçeklenmiş ve konumlanmış halidir. CWT, sinyalin sürekli zamanlı frekans bileşenlerini analiz eder ve sinyalin zaman-frekans düzlemindeki dağılımını belirler.

Wavelet Transform-based Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform (WTMSST), dalgacık dönüşümünün geliştirilmiş bir versiyonudur ve özellikle transiyonel sinyallerin karmaşık frekans varyasyonlarını doğru bir şekilde tanımlamak için kullanılır [38]. WTMSST, sinyalin zaman-frekans düzlemindeki odaklanmasını artırarak daha konsantre bir zaman-frekans temsilini elde etmeyi amaçlar. WTMSST, dalgacık fonksiyonlarını farklı ölçekler ve konumlarda uygulayarak sinyalin zaman içindeki frekans değişimlerini daha hassas bir şekilde analiz edebilir. Denklem 2’de WTMSST’nin matematiksel ifadesi verilmiştir [39].

$$WTMSST_x(a, b) = \sum_t x(t) \psi * \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

Burada, $x(t)$ bir sinyal, $\psi(t)$ bir dalgacık fonksiyonu, a ölçek parametresi ve b konum parametresidir. WTMSST, dalgacık fonksiyonunu ölçek ve konum parametreleriyle ayarlayarak sinyalin zaman-frekans düzlemindeki dağılımını inceleyerek transiyonel sinyallerin karmaşık frekans bileşenlerini doğru bir şekilde tanımlayabilir. Bu özellikleri sayesinde, WTMSST

özellikle sinyal işleme, biyomedikal mühendisliği, ses işleme ve görüntü analizi gibi alanlarda kullanılan karmaşık veri yapılarının analizinde önemli bir araç olarak kabul edilir.

Wavelet Transform-based Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform (WTMSST), sinyallerin zaman-frekans karakteristiklerini analiz etmek için kullanılan gelişmiş bir yöntemdir. Bu teknik, dalgalık dönüşümüne dayanarak, sinyallerdeki anlık frekans ve zaman bilgilerini yeniden atayarak ve sıkıştırarak daha detaylı bir analiz yapılmasını sağlar [40]. Özellikle silikon yalıtkanlarda karşılaşılan iz oluşumu ve karbonlaşma gibi süreçlerin analizinde kullanılarak, malzemelerin elektriksel stres altındaki davranışlarını daha iyi anlamak için kritik bir rol oynar. WTMSST, geçici sinyallerin karmaşık frekans varyasyonlarını daha doğru bir şekilde tanımlayabilmek için idealdir ve bu yöntem sayesinde sinyallerin zaman-frekans düzlemindeki odaklanmasını artırarak daha konsantre bir zaman-frekans temsili sağlar.

4. BULGULAR

600 V ve 500 V gerilim streslerine maruz bırakılan numunemizi 10 sn, 20 sn ve 30 sn aralıklarla bir damlatılan deiyonize ortamı modelleyen çözeltimizin sebep olduğu elektriksel İz Oluşumların harmonik akımları, ark oluşumu başladığından itibaren 200 ms boyunca oluşan kaçak akımları, tüm sinyal boyunca oluşan akımlar incelenmiştir . Bu incelemelerimizde iki farklı gerilim seviyesi için karbonlaşmanın başladığı, yüzeyde iz oluşumun başladığı ve kısa devrenin başladığı damla olarak üç farklı grupta incelenmiştir.

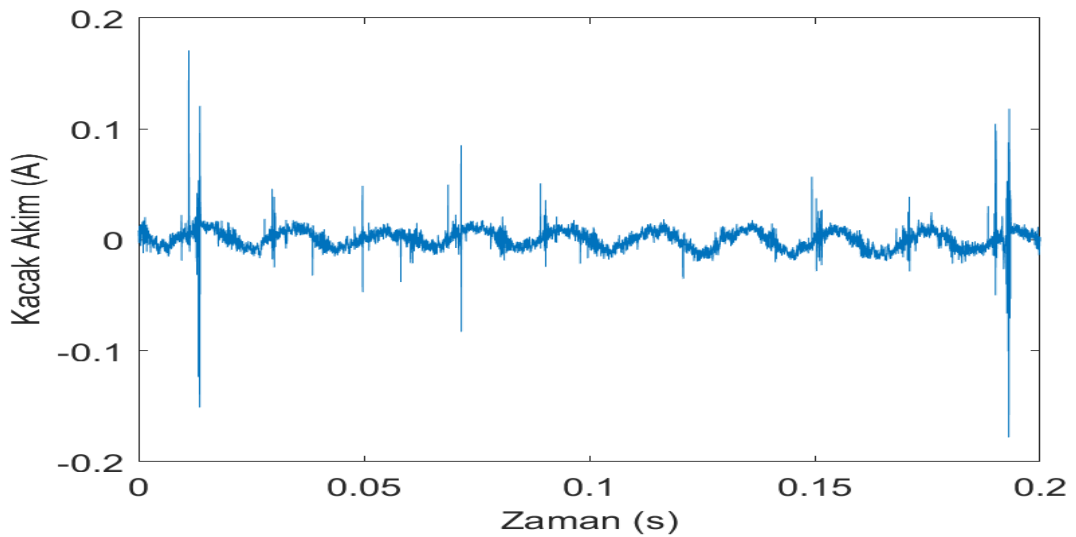
Bu deneylerde yalnızca 600 V 30 sn aralıklarla damlatılan damla deneyinde, 600 V 20 sn aralıklarla damlatılan damla deneyinde ve 600 V 10 sn aralıklarla damlatılan damla deneyinde kısa devrenin olduğu damla verileri gözlenmiştir.

4.1. 600V 30 Saniye Uygulanan Numune

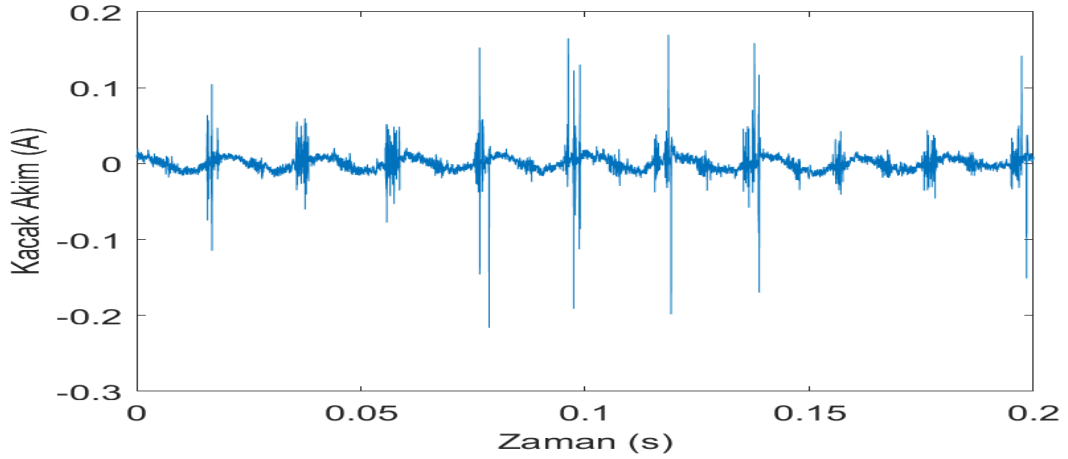
Numunemize 600 V gerilim stresi uygulanmıştır ve kirli ortamı modelleyen çözeltimiz 30 saniye aralıklarla numunemizin üzerine damlatılmıştır. Deney sonucunda;

- Karbonlaşma : 4. damlada
- Yüzeyde iz oluşumu : 26. damlada
- Kısa devre oluşumu : 44. damlada gözlemlenmiştir.

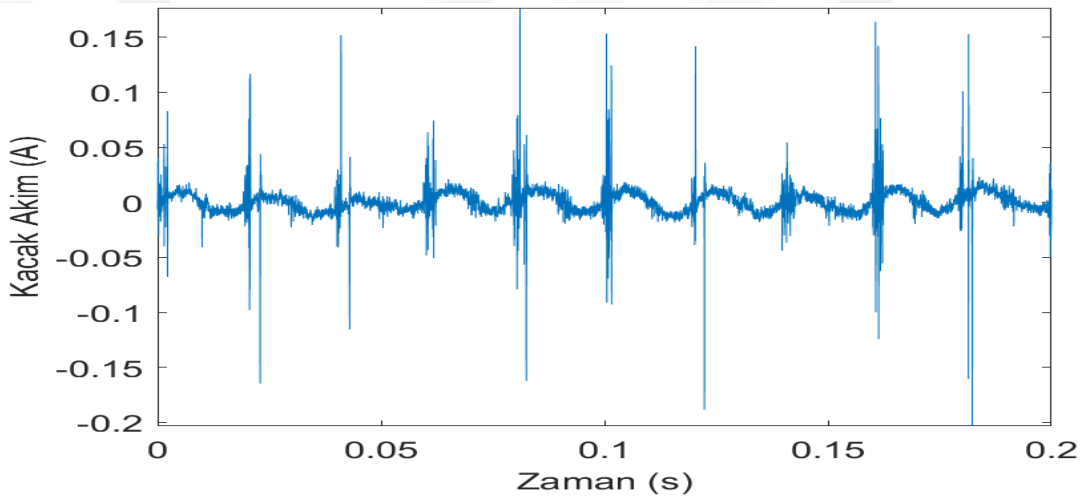
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 de 600 V 30 saniye aralıklı damla deneyinin karbonlaşma iz ve kısa devre görülen damlaların 0.2 saniyelik kesiti verilmiştir.



Şekil 4.1. 600 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali



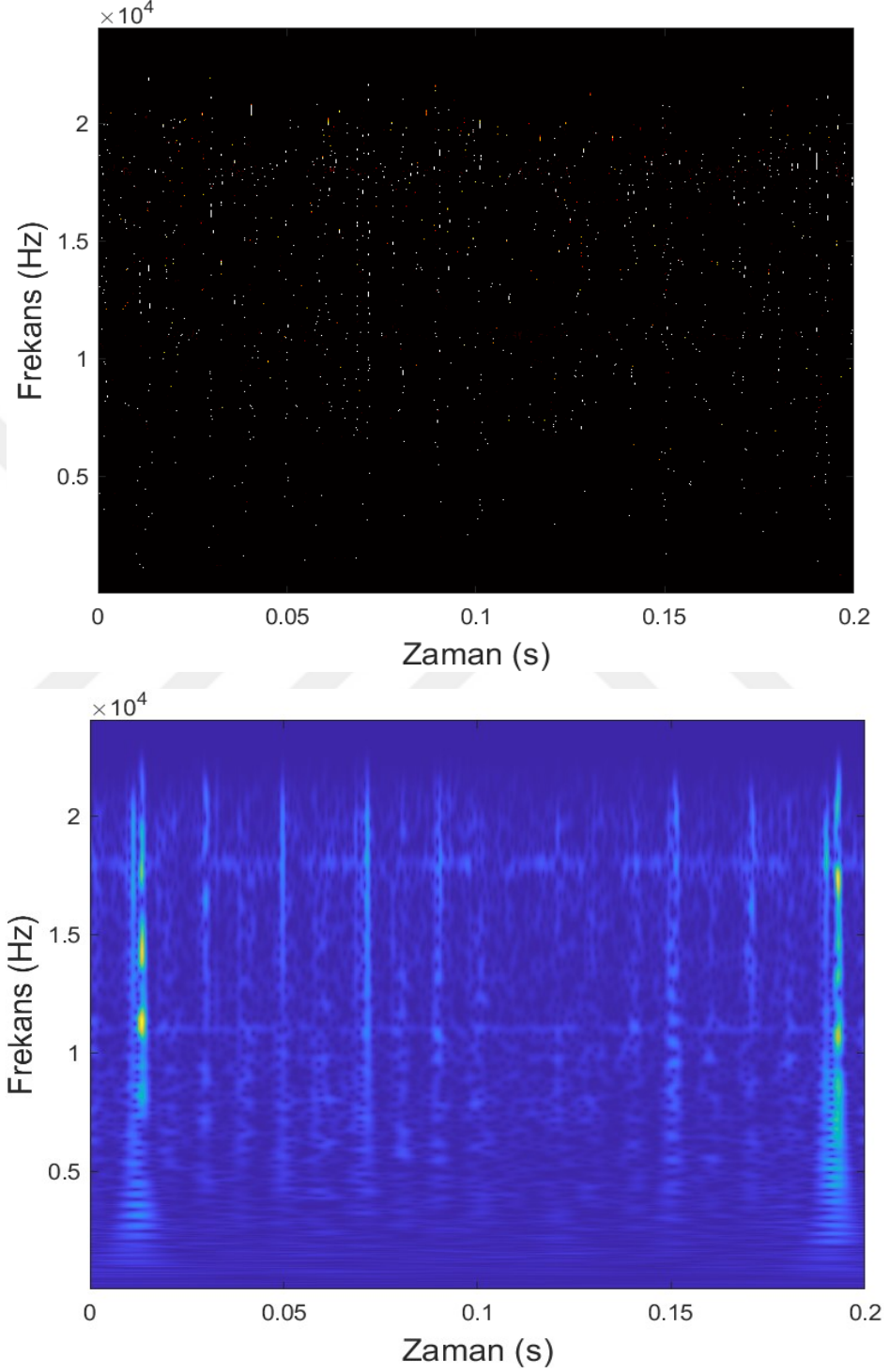
Şekil 4.2. 600 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali



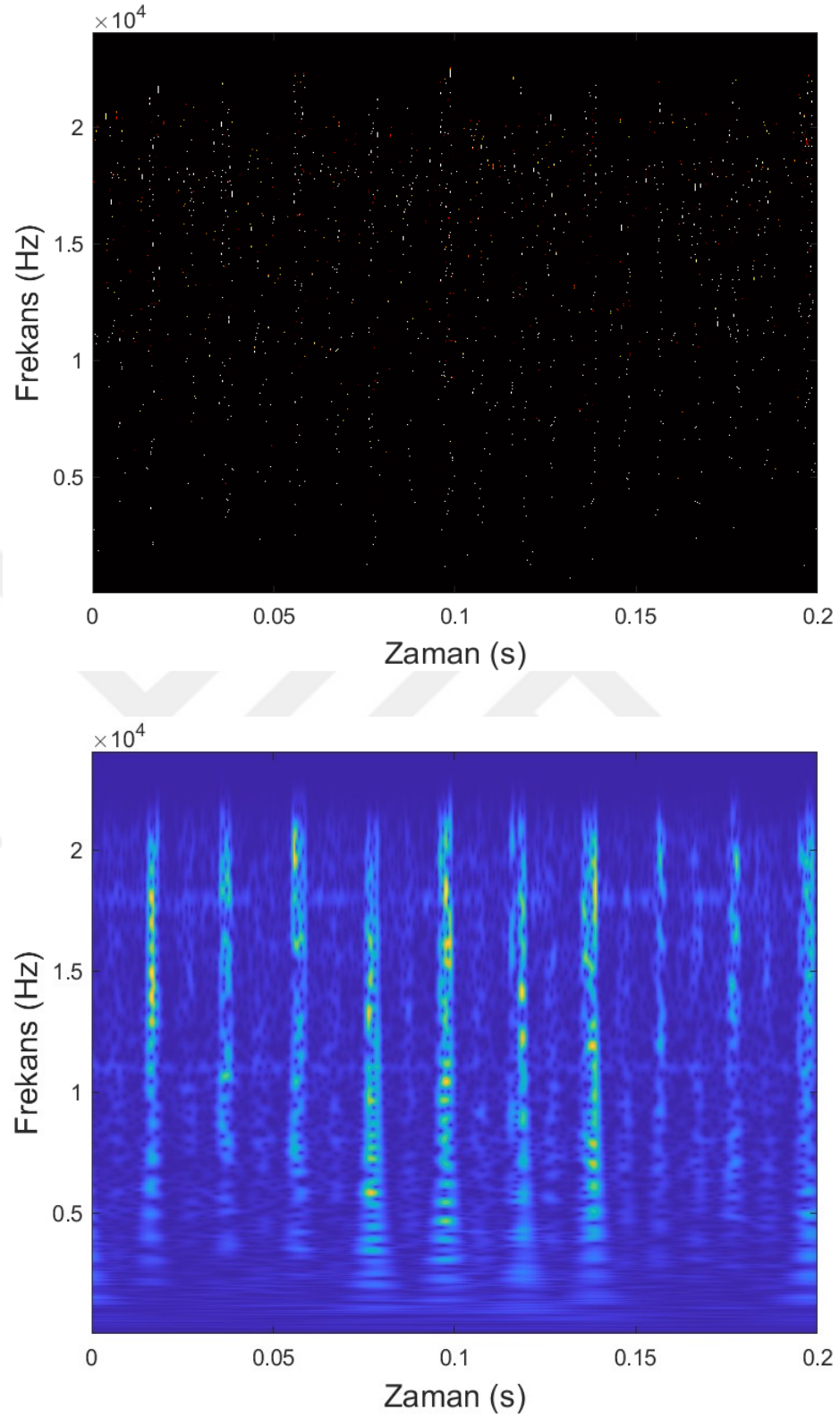
Şekil 4.3. 600 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin kısa devre başlayan kaçak akım sinyali

Kaçak akım genlik değerleri her üç damlanın da birbirlerine yakın ve maksimum 0.2 A olarak ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan silikon kauçuk malzeme güçlendirilmiş yapısından dolayı kirletici damlaların yüzeyle teması sonrasında hızlıca toparlanma davranışı göstermiştir. Klasik polimer ve polyester malzemelerde yüzey her geçen süre daha yüksek kaçak akım geçirebilmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında laboratuvarında deneysel olarak test edilen silikon yalıtkanın çok doğru bir seçim olduğu ortaya çıkmaktadır. Malzeme yüzeyinin karbonlaşmasının ardından oluşan izler sadece yüzeyde çok küçük deformasyonlar oluşturmuştur. Kısa devre anında bile benzer miktarda akım akması malzemenin dirençli olduğunu göstermektedir. CTI deneyi kapsamında yapılacak iz indeksi ölçümü bu durumda malzemenin direncine ilişkin çok net bilgi vermemektedir. Şekil 4.3'ten görüleceği üzere akan akım miktarı her ne kadar sabit bir davranış gösterse de malzeme yüzeyinde çok daha fazla sayıda elektriksel atlamalar (pikler) gözlenmiştir. Kısa devre durumunda genliği yüksek yaklaşık 10 adet pik görülmüştür. Bu durumun daha detaylı analizi için bu tez çalışmasında ortaya konan

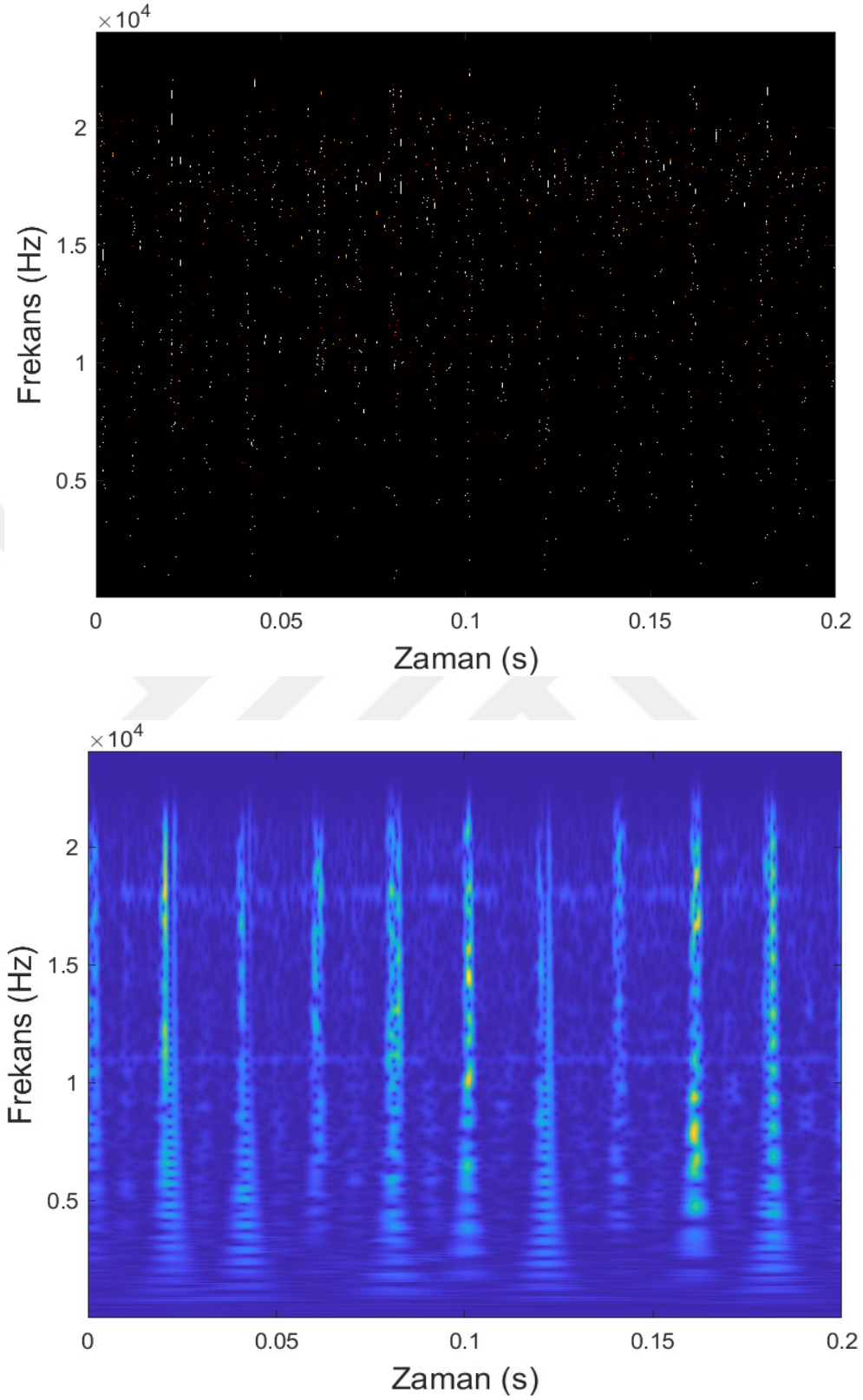
“elektriksel deşarjlar için ters dönüşüm” yöntemini uygulamak gerekmektedir. Aşağıdaki grafiklerde 600 v 30 saniye aralıklı damla WTMSST_Z transformu kullanılarak zaman frekans durumlarının grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.4. 600 V 30 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 4. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri



Şekil 4.5. 600 V 30 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 26. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri



Şekil 4.6. 600 V 30 sn için yüzeyde kısa devre oluşumunun başladığı 44. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri

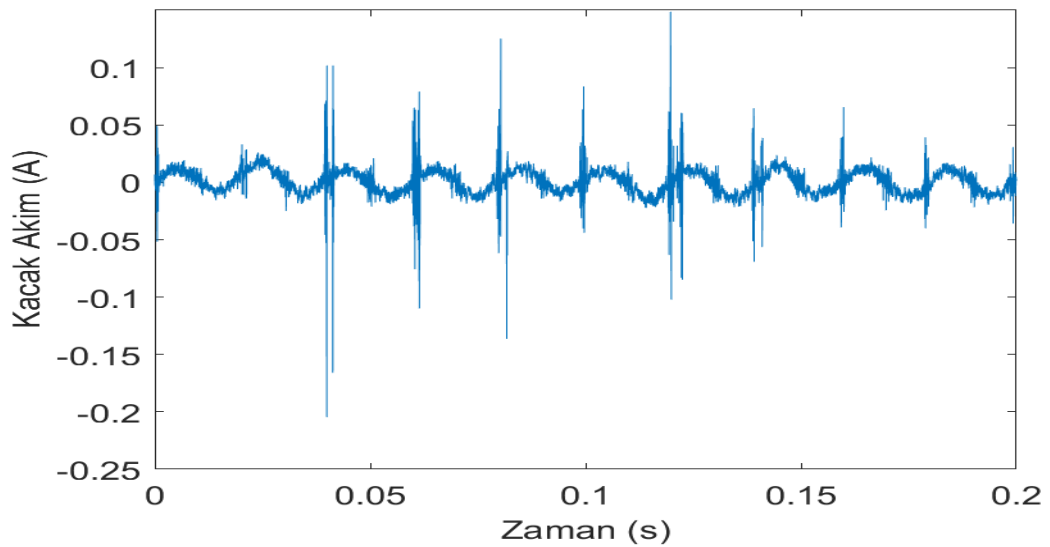
Uygulanan yöntem incelendiğinde, karbonlaşma esnasında 1-1.5 kHz arasında ciddi deşarjlar ölçülmüştür. İz oluşumu ve kısa devre anlarında ise 2 kHz civarında şekillerde sarı renkli geçişlerle gösterilen ciddi deşarjlar gözlenmektedir. Ayrıca 0.5-1 kHz arasında elektriksel deşarjların iz oluşumunu ve kısa devreyi başlatan damlalarda görülmesi aslında malzeme içerisinde elektriksel bozulmanın başladığını göstermektedir. Yüksek frekanslı kısmi deşarjlar yavaş yavaş tam elektriksel delinmenin gerçekleştiği alçak frekanslarda ciddi deşarjlara dönüşmüştür. WTMSST_Z transformu sayesinde malzeme dielektrik performansı hakkında daha net bilgiler elde edilmiştir.

4.2. 600V 20 Saniye Uygulanan Numune

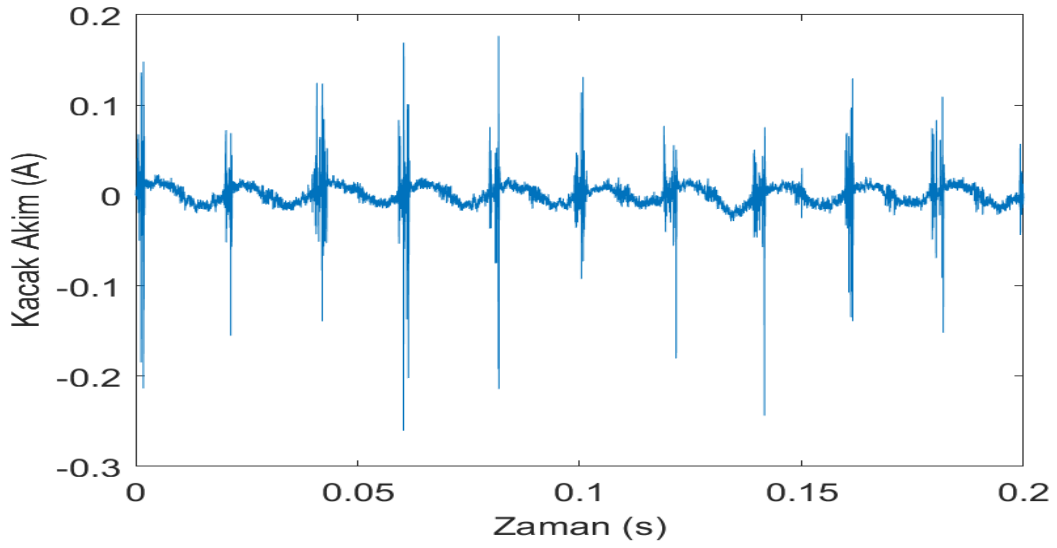
Numunemize 600 V gerilim stresi uygulanmıştır ve kirli ortamı modelleyen çözeltimiz 20 saniye aralıklarla numunemizin üzerine damlatılmıştır. Deney sonucunda;

- Karbonlaşma : 5. Damlada
- Yüzeyde iz oluşumu : 12. damlada
- Kısa devre oluşumu : 46. damlada gözlemlenmiştir.

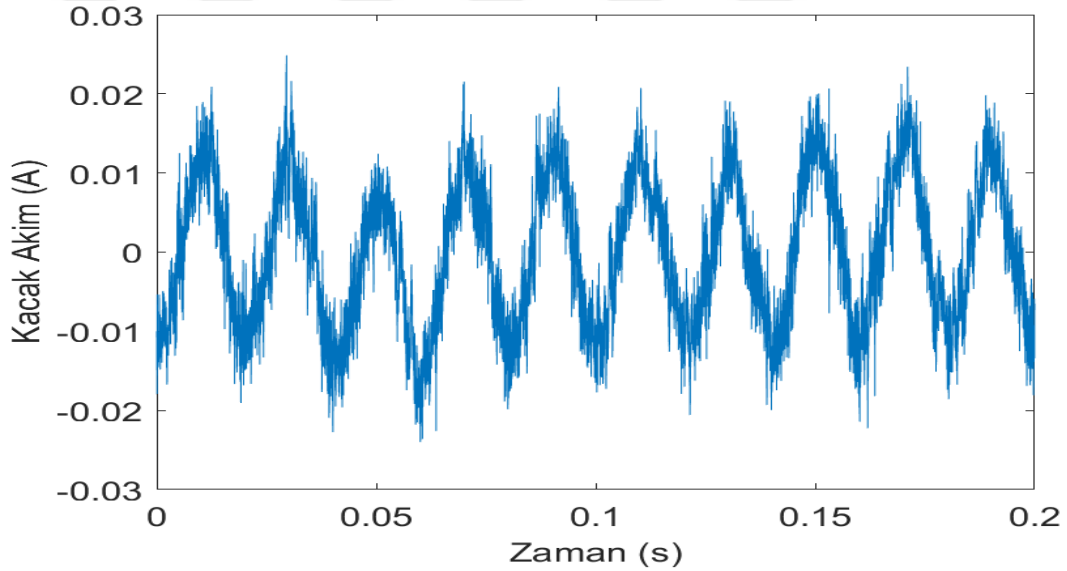
Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da 600 V 20 saniye aralıklı damla deneyinin karbonlaşma iz ve kısa devre görülen damlaların 0.2 saniyelik kesiti verilmiştir.



Şekil 4.7. 600 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali



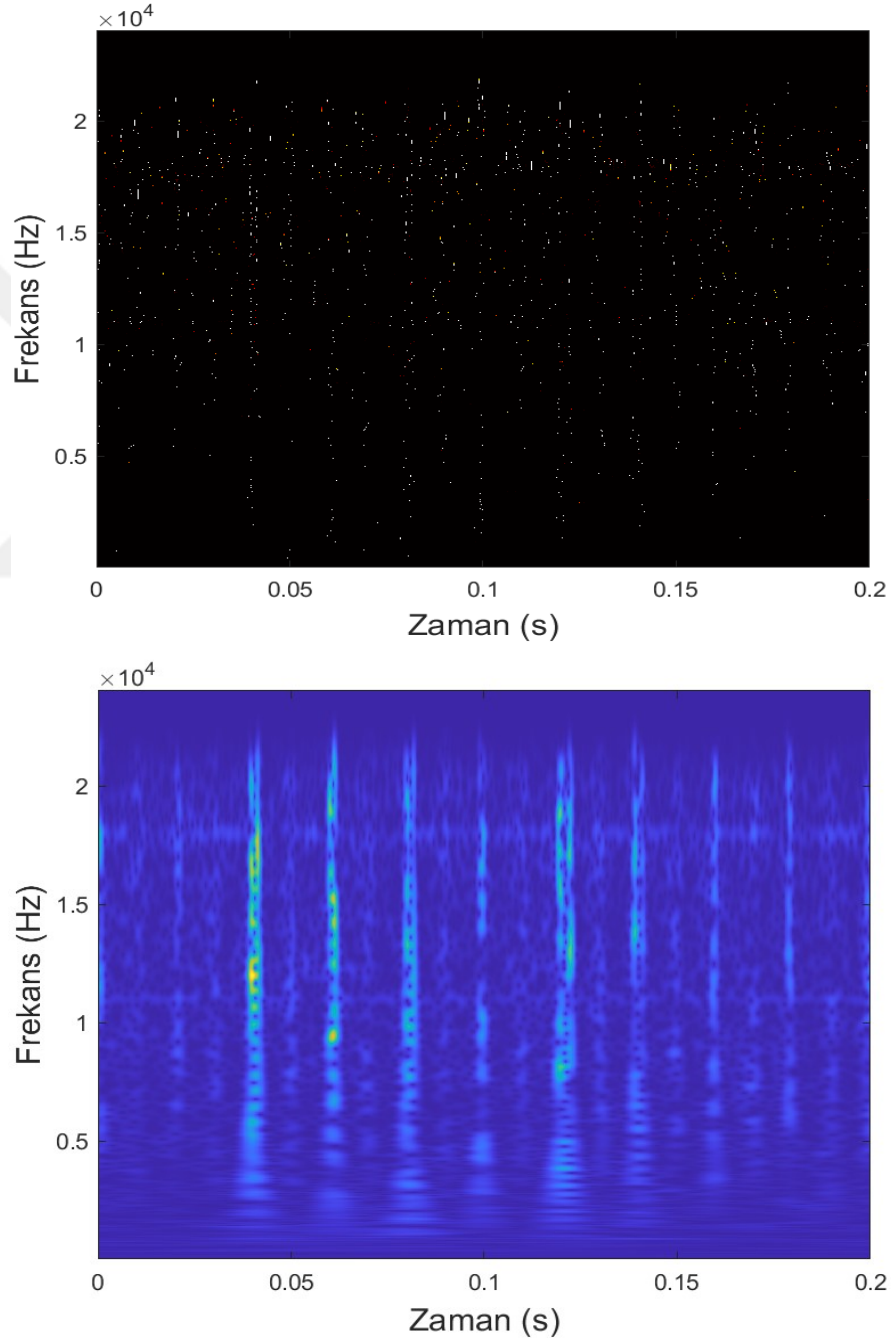
Şekil 4.8. 600 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali



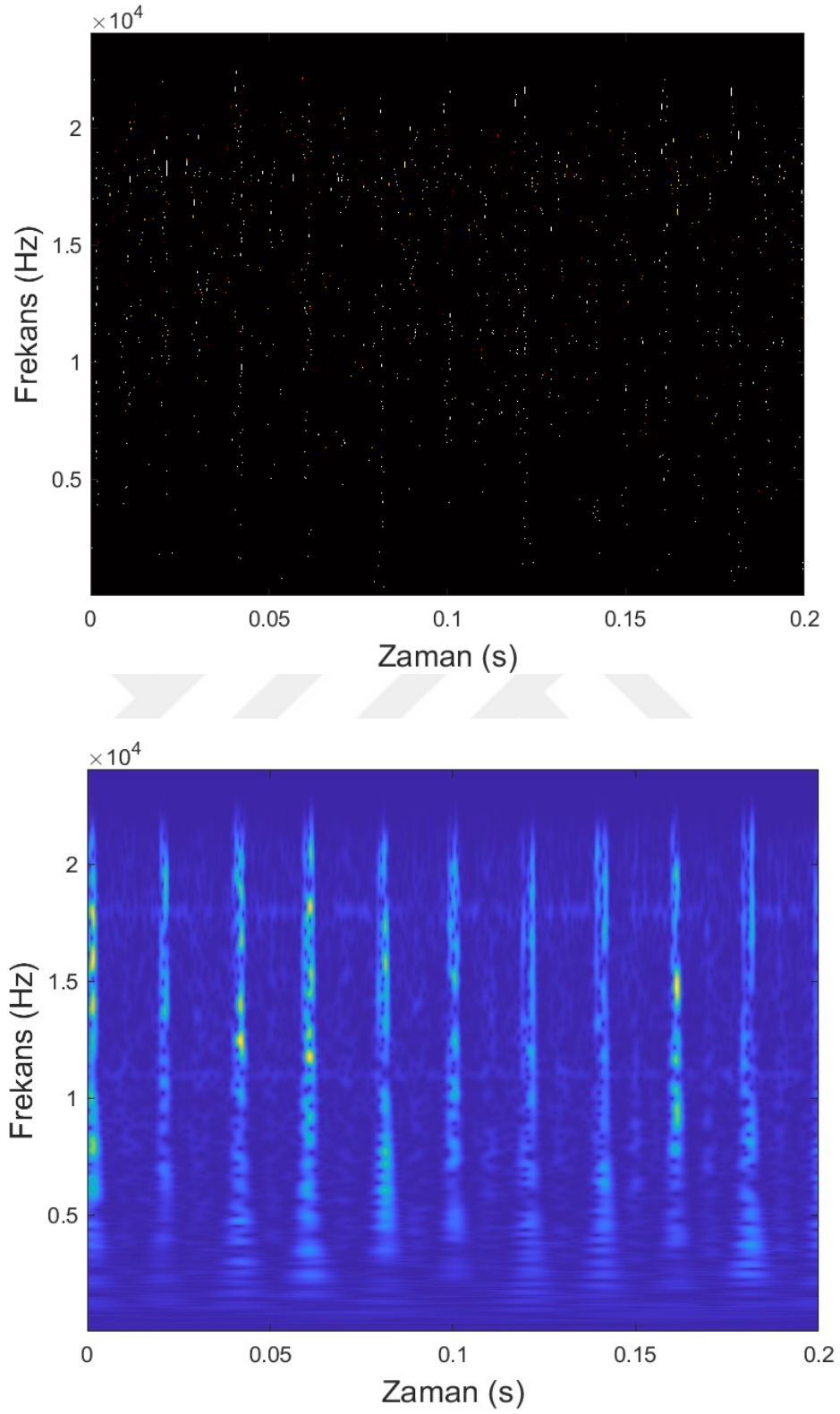
Şekil 4.9. 600 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin kısa devre başlayan kaçak akım sinyali

Kirletici sıvının 20 saniyede bir damla olacak şekilde yüzeye maruziyetinin sağlandığı durumda özellikle kısa devrenin başladığı 46. Damlaya ait kaçak akım değerlerinin çok daha düşük çıktığı görülmektedir. 30 sn periyotlu damlada maksimum 0.2 A görülen değer 20 sn periyotlu damlada maksimum 0.03 A civarlarında ölçülmüştür. Ayrıca iz oluşumu 30 sn periyotta 26. Damlada, 20 sn periyotta 12. Damlada gözlenmiştir. Bu durumda numune yüzeyinde daha sık meydana gelen kirletici ortam nedeniyle oluşmuştur. Kısa devre anında nispeten daha stabil dalga formu mevcuttur. Aşağıdaki grafiklerde 600 v 20 saniye aralıklı damla deneyinin ark oluşumundan itibaren 0.2 saniye boyunca oluşan kaçak akım değerleri yüzeyde karbonlaşmaya başladığı damla yüzeyde iz oluşmaya başladığı damla ve kısa devre oluşumundan sonraki damlalara göre WTMSST_Z transformu kullanılarak zaman frekans durumlarının grafikleri verilmiştir. Kısa

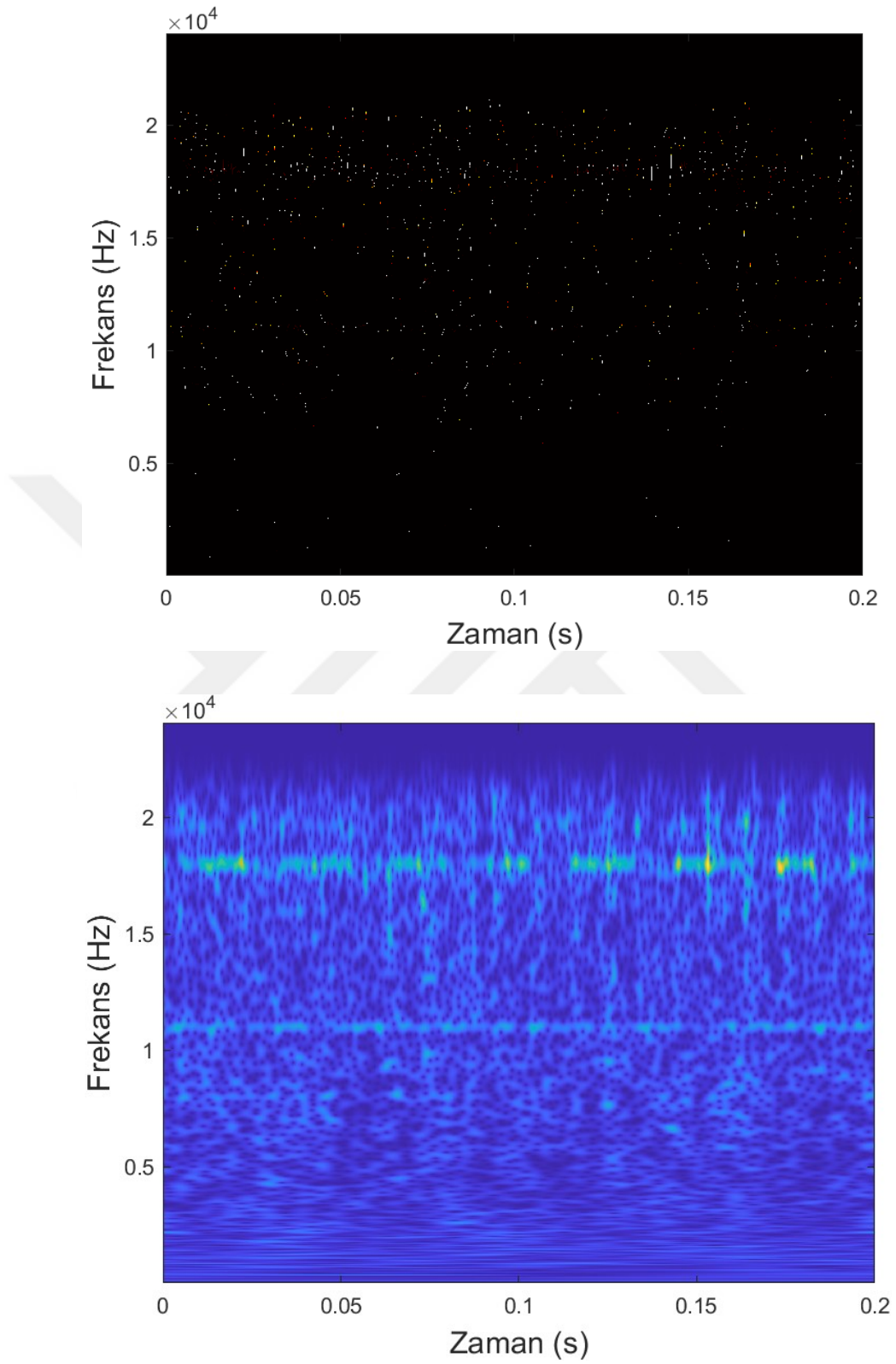
devre anında daha düşük seviyeli deşarjlar gözlenmesine rağmen elektriksel deşarjlar neredeyse tüm frekans bandına yayılmıştır. Özellikle 1.1 kHz ve 1.8 kHz seviyelerinde zamanın her anında kendini sürdüren elektriksel İz Oluşumlar görülmektedir. Elbette ki kısa devre durumu malzeme yapısını bozan en ciddi elektriksel İz Oluşumların meydana geldiği anlardan biridir. Ancak bu durum kaçak akım sinyalinden saptanamamış ve uygulanan yöntem sayesinde ortaya konmuştur. Böylece malzeme yüzeyinin durumu için dana net bir analiz yapılmıştır.



Şekil 4.10. 600 V 20 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 5. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri



Şekil 4.11. 600 V 20 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 12. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri



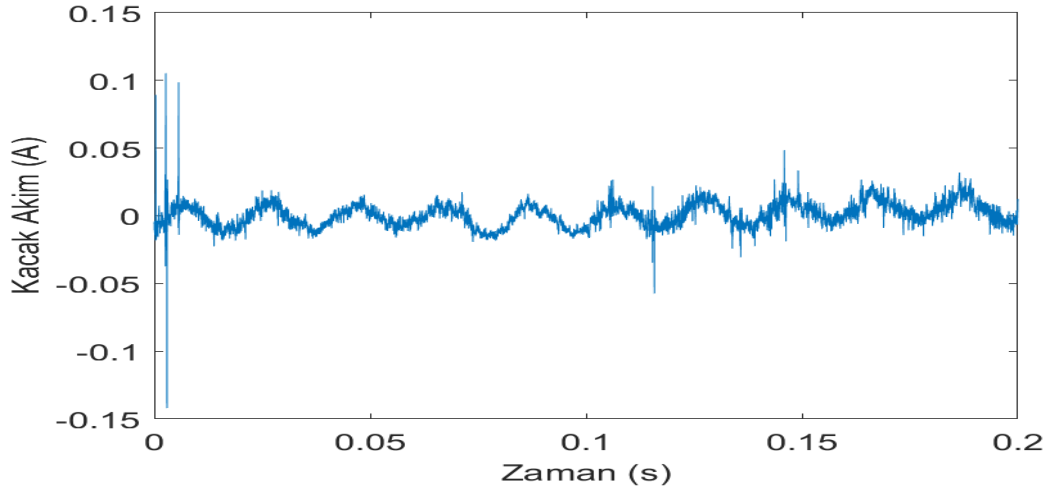
Şekil 4.12. 600 V 20 sn için yüzeyde kısa devre oluşumunun başladığı 46. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri

4.3. 600V 10 Saniye Uygulanan Numune

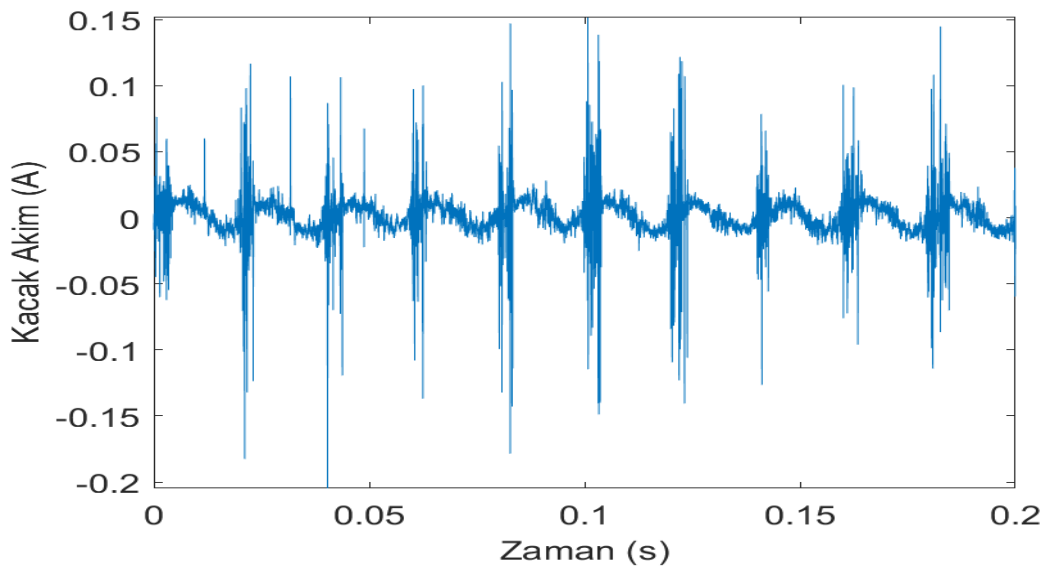
Numunemize 600 V gerilim stresi uygulanmıştır ve kirli ortamı modelleyen çözeltimiz 10 saniye aralıklarla numunemizin üzerine damlatılmıştır. Deney sonucunda;

- Karbonlaşma : 8. damlada
- Yüzeyde iz oluşumu : 16. damlada
- Kısa devre oluşumu : 45. damlada gözlemlenmiştir.

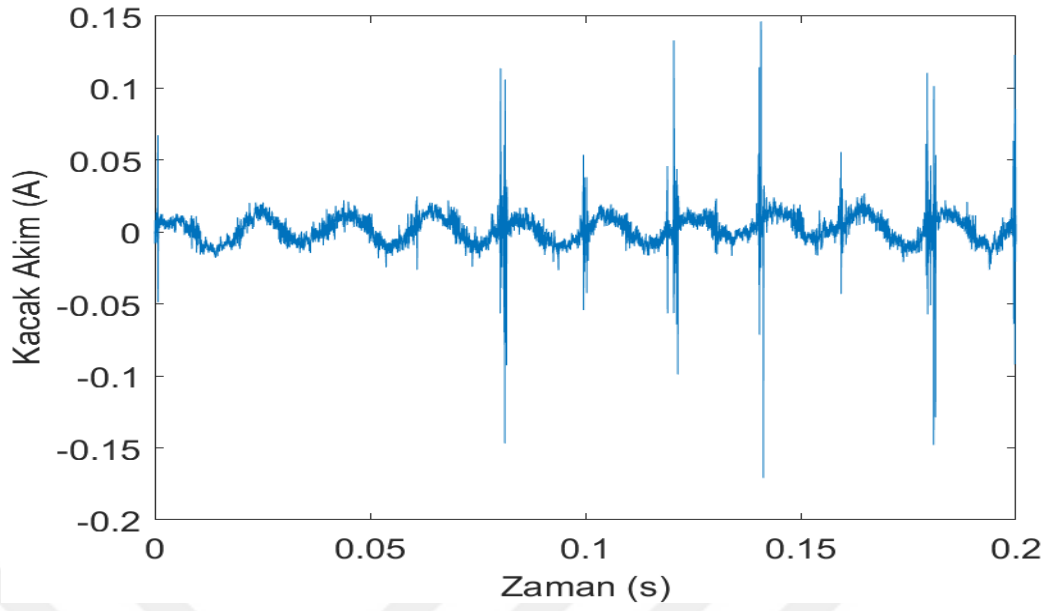
Şekil 4.13 Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 de 600 V 10 saniye aralıklı damla deneyinin karbonlaşma iz ve kısa devre görülen damlaların 0.2 saniyelik kesiti verilmiştir.



Şekil 4.13. 600 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali

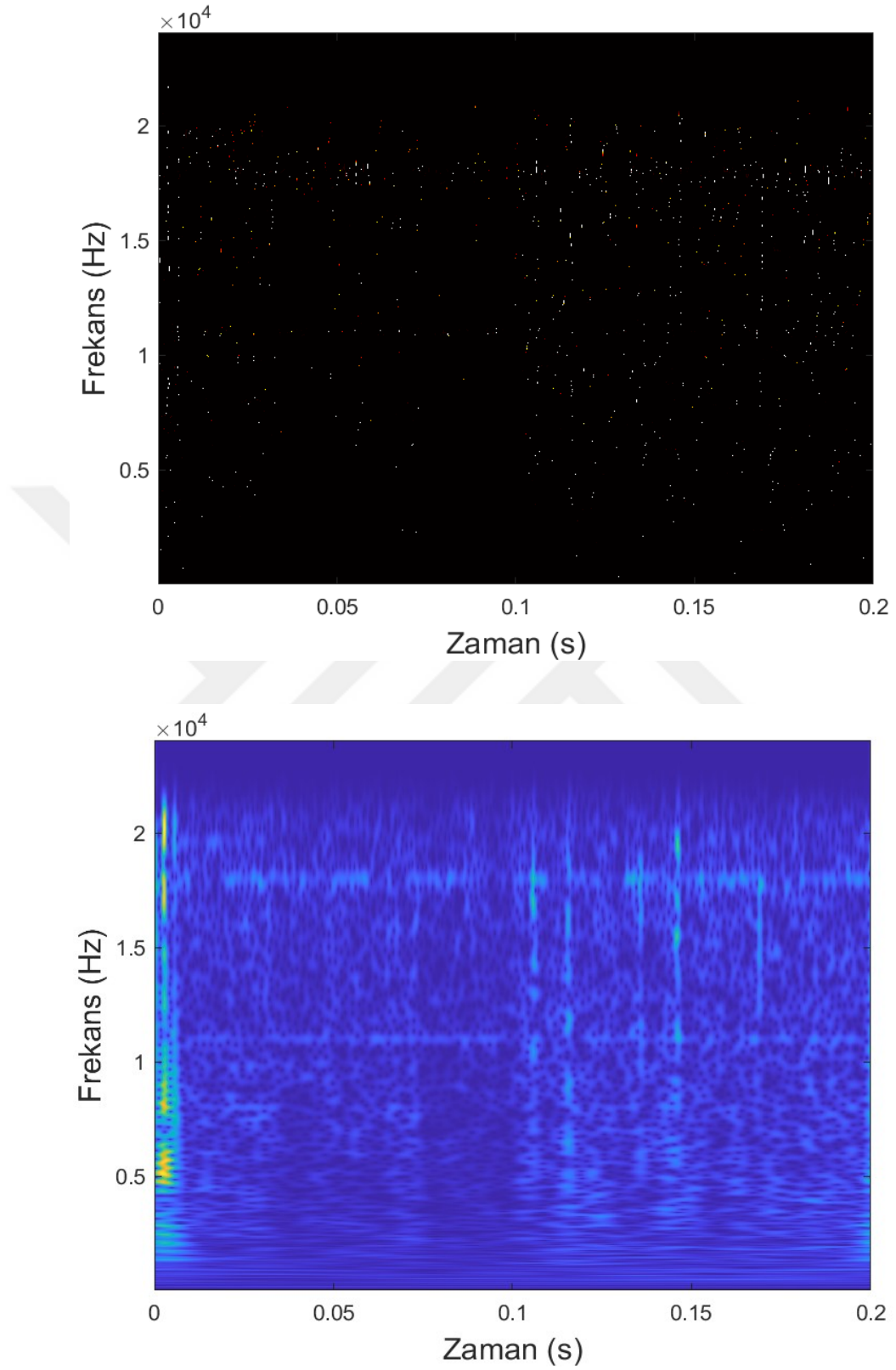


Şekil 4.14. 600 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali

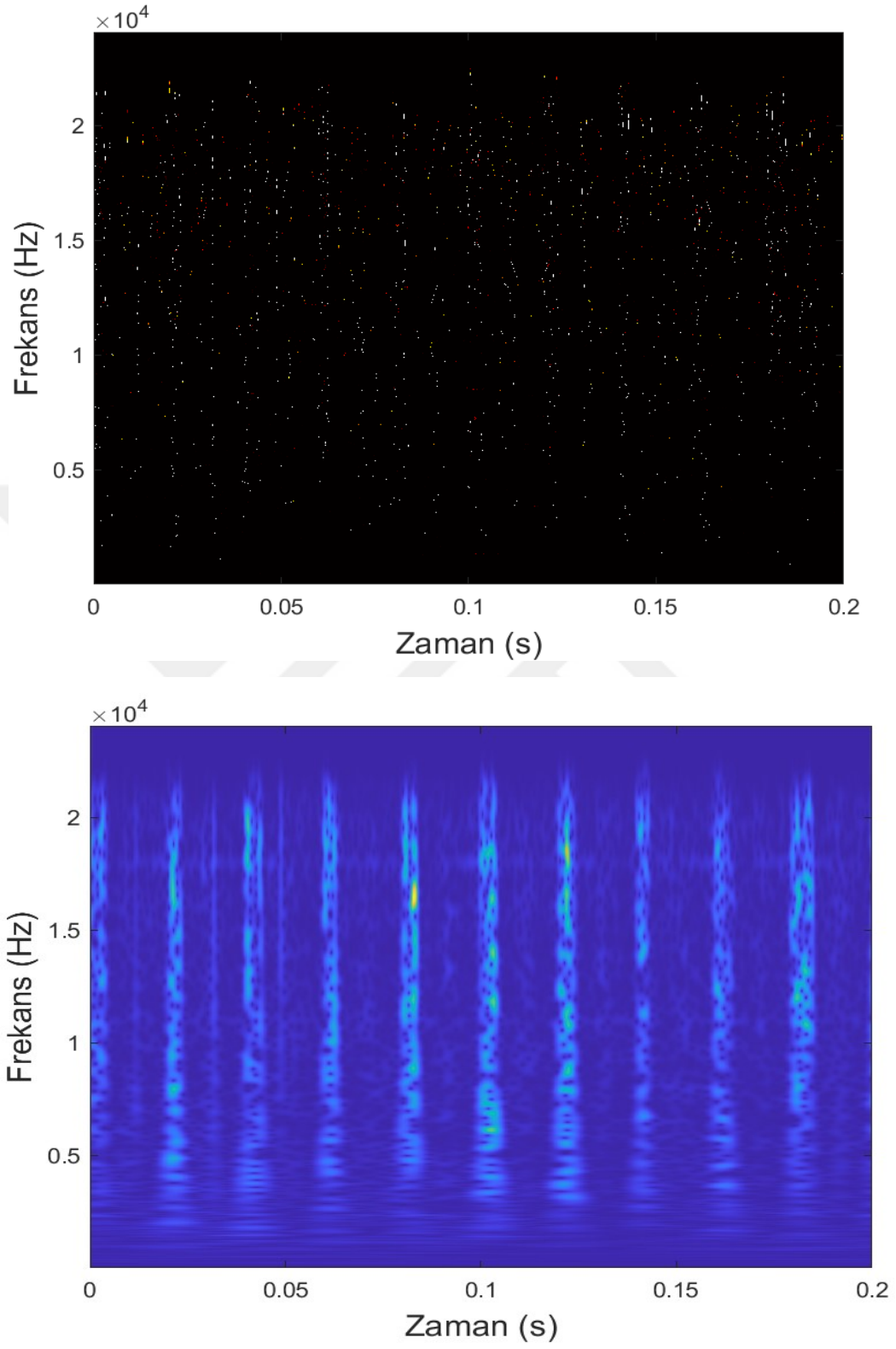


Şekil 4.15. 600 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin kısa devre başlayan kaçak akım sinyali

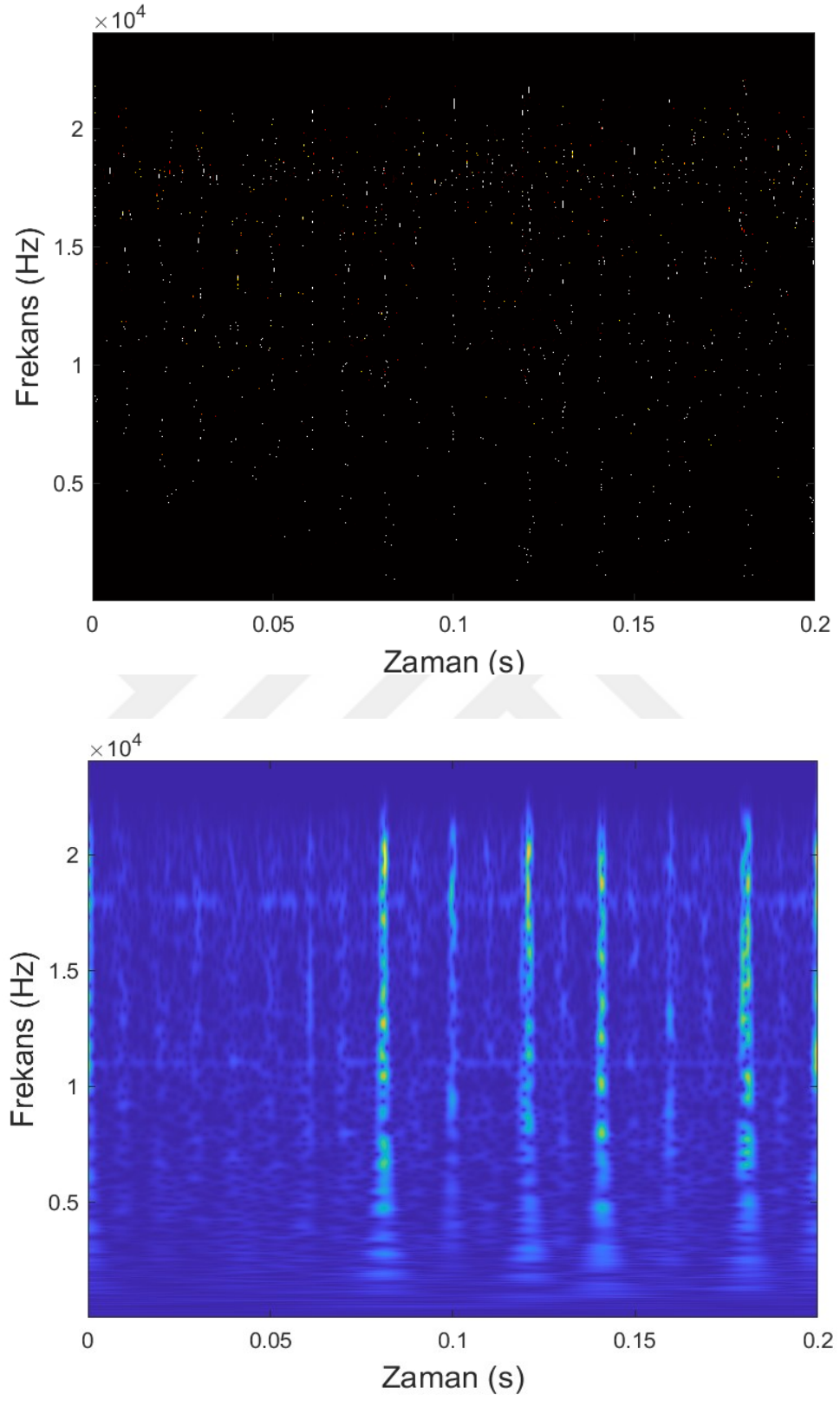
Kirlletici sıvının silikon yüzeye en sık uygulandığı 10 sn periyotlu durumda karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devrenin başladığı damla önceki durumlara benzerdir. Kaçak akım sinyalleri incelendiğinde ise iz oluşumu durumunda çok geniş ve sık piklerin olduğu gözlenmektedir (Şekil 4.14). Elektriksel deşarjları gösteren 11 adet daha geniş genlikte pik kaçak akım dalga formunda görülmektedir. Buna rağmen kısa devre anında malzeme yüzeyi mevcut duruma daha fazla direnç göstermeye çalışmış ve 5 adet yüksek genlikli pik gözlenmiştir. Bu farklı durumu analiz edebilmek için CTI indeksi yeterli gelmemektedir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında uygulanan WTMSST_Z dönüşümü ile analiz daha net sonuçlar verecektir. 10 sn periyotlu damla uygulaması durumundaki 0.2 saniye boyunca oluşan kaçak akım değerleri yüzeyde karbonlaşmaya başladığı damla yüzeyde iz oluşmaya başladığı damla ve kısa devre oluşumundan sonraki damlalara göre WTMSST_Z dönüşümleri sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir. Buna göre karbonlaşma anında daha önce görülmeyen 500 Hz frekans civarında sarı renkle gösterilen yüksek genlikli elektriksel İz Oluşumlar görülmüştür. Ayrıca iz oluşumu belirli zamanlarda boylamsal deşarjlar görülmüştür. Normalde kaçak akım sinyallerine göre iz oluşumu daha bozucu sinyaller içermektedir. Ancak WTMSST_Z transformu grafiklerinde 10 sn periyotlu durumda kısa devre anında daha net elektriksel İz Oluşumlar sarı renklerle görülmektedir. Özellikle 2 kHz civarında görülen bu deşarjların varlığı uygulanan yöntemle daha net bir şekilde ortaya konmuştur. Aksi takdirde sadece CTI indeksi ya da kaçak akım dalga formuyla yapılacak bir dielektrik yüzey direnci analiz yetersiz kalacaktır.



Şekil 4.16. 600 V 10 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 5. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri



Şekil 4.17. 600 V 10 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 12. Damlanın Ters Wawelet Transform Gösterimleri



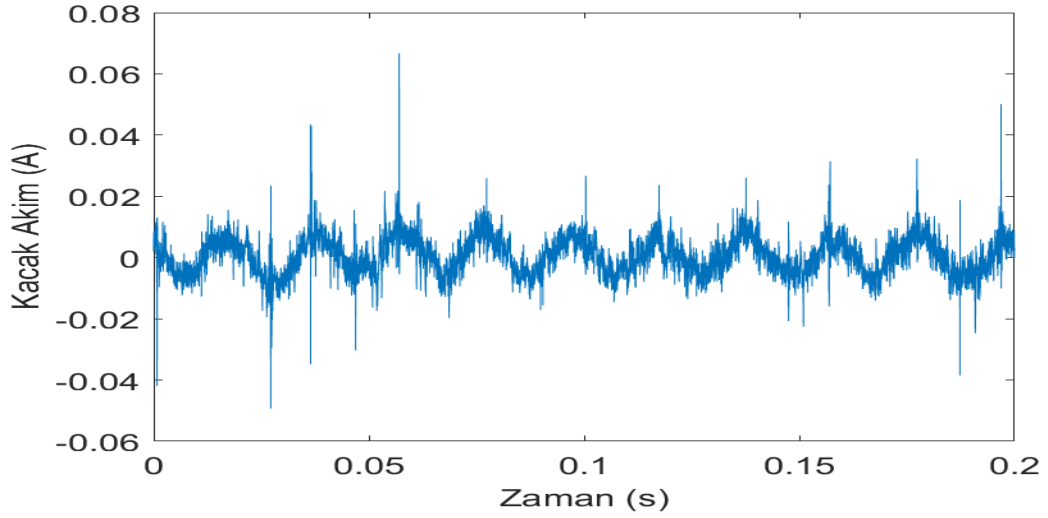
Şekil 4.18. 600 V 10 sn için yüzeyde kısa devre oluşumunun başladığı 46. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri

4.4. 500V 30 Saniye Uygulanan Numune

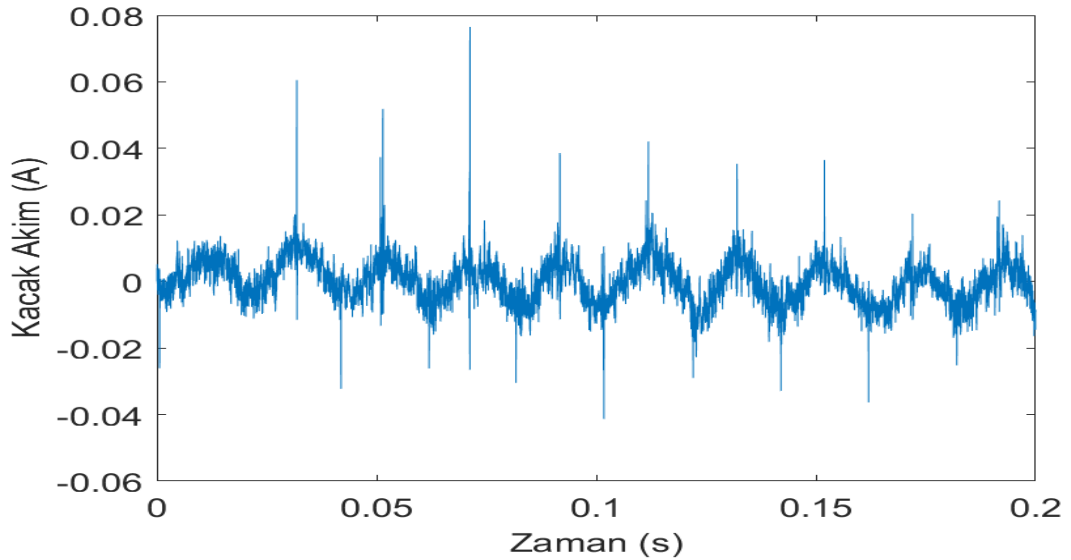
Numunemize 500 V gerilim stresi uygulanmıştır ve kirli ortamı modelleyen çözeltimiz 30 saniye aralıklarla numunemizin üzerine damlatılmıştır. Deney sonucunda;

- Karbonlaşma: 7. Damlada
- Yüzeyde iz oluşumu: 33. Damlada

Şekil 4.19 Şekil 4.20’de 500 V 30 saniye aralıklı damla deneyinin karbonlaşma ve iz görülen damlaların 0.2 saniyelik kesiti verilmiştir.



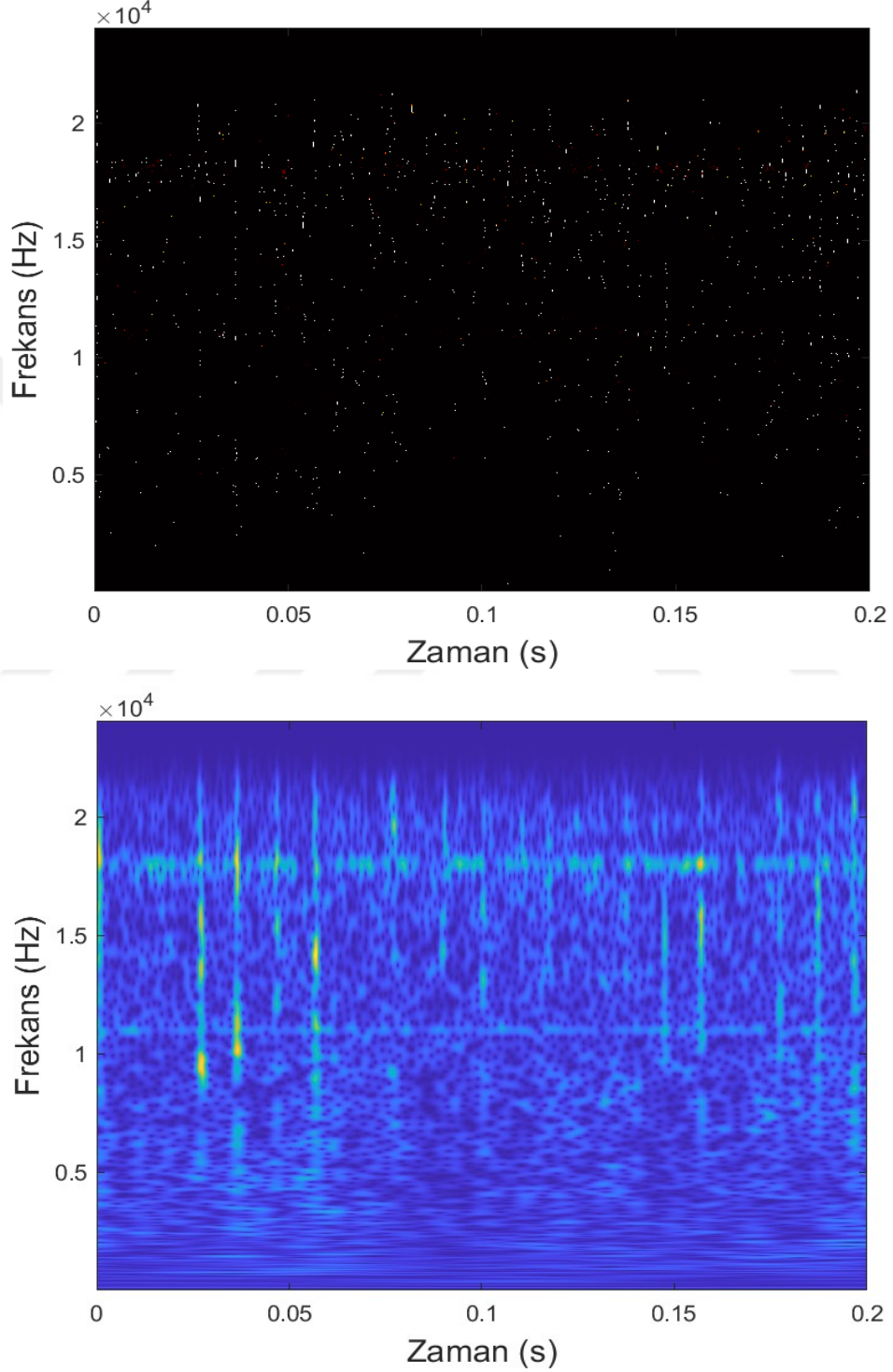
Şekil 4.19. 500 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali



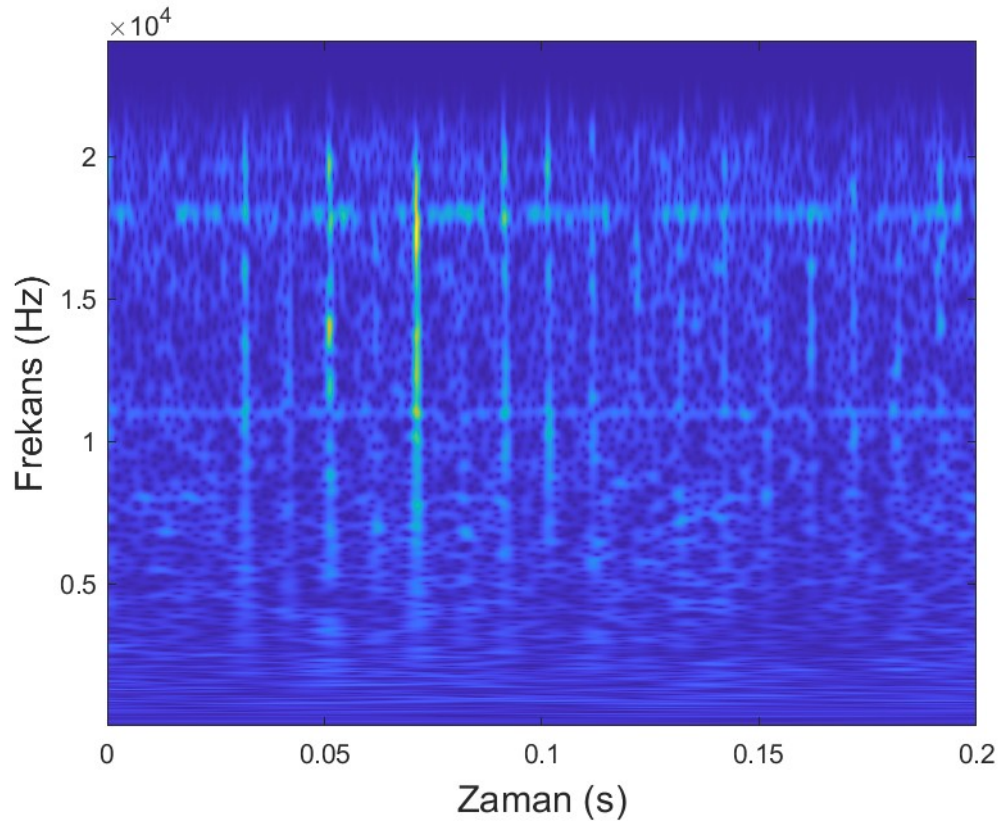
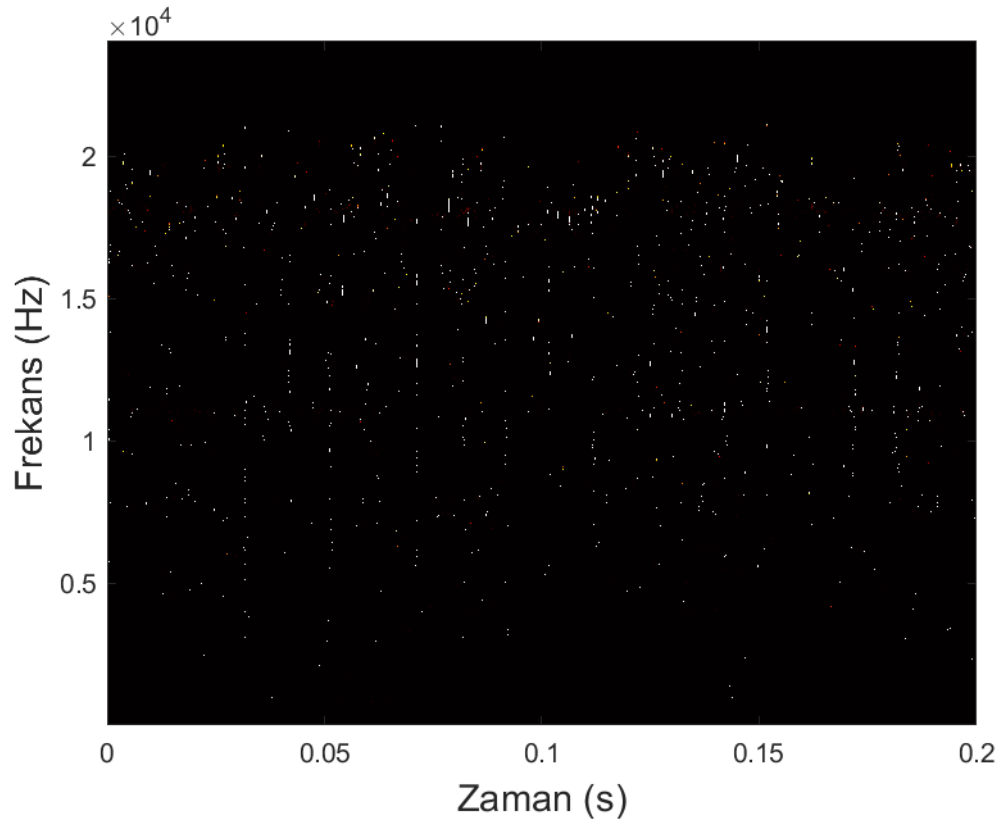
Şekil 4.20. 500 V 30 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali

Gerilim seviyesinin 100 V değerinde düşmesiyle birlikte yüzeyden 600 V’a göre daha düşük kaçak akımların geçtiği gözlenmektedir. 500 V uygulanan durumda maksimum 0.08 A civarlarında kaçak akımlar ölçülmüştür. Gerilim seviyesi daha düşük ve malzeme yüzeyi çok

dayanıklı olduğundan dolayı 30 sn peryotlu kirletici sıvı maruziyeti durumunda kısa devre gözlenmemiştir. 30 sn peryotlu damla uygulaması durumundaki 0.2 saniye boyunca oluşan kaçak akım değerleri yüzeyde karbonlaşmaya başladığı damla yüzeyde ve iz oluşmaya başladığı damlalara göre WTMSST_Z dönüşümleri sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.21. 500 V 30 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 5. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri



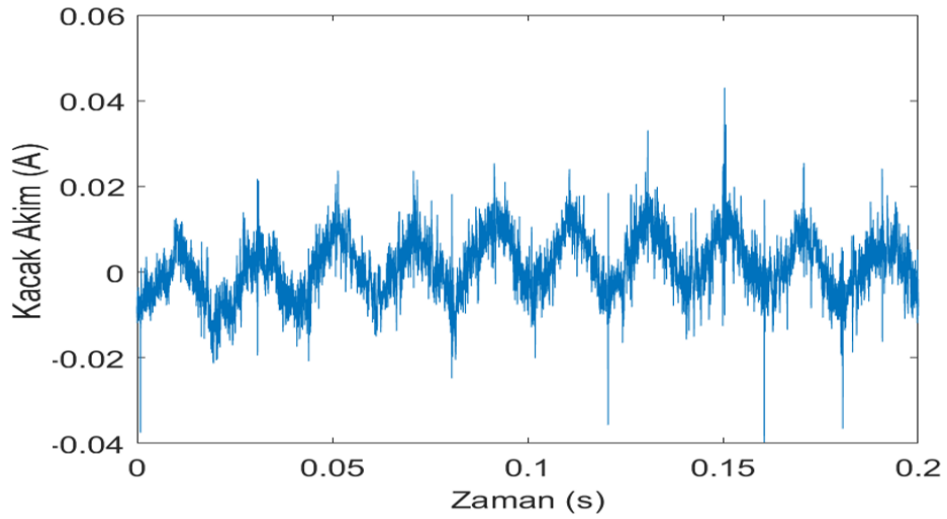
Şekil 4.22. 500 V 30 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 12. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri

4.5. 500V 20 Saniye Uygulanan Numune

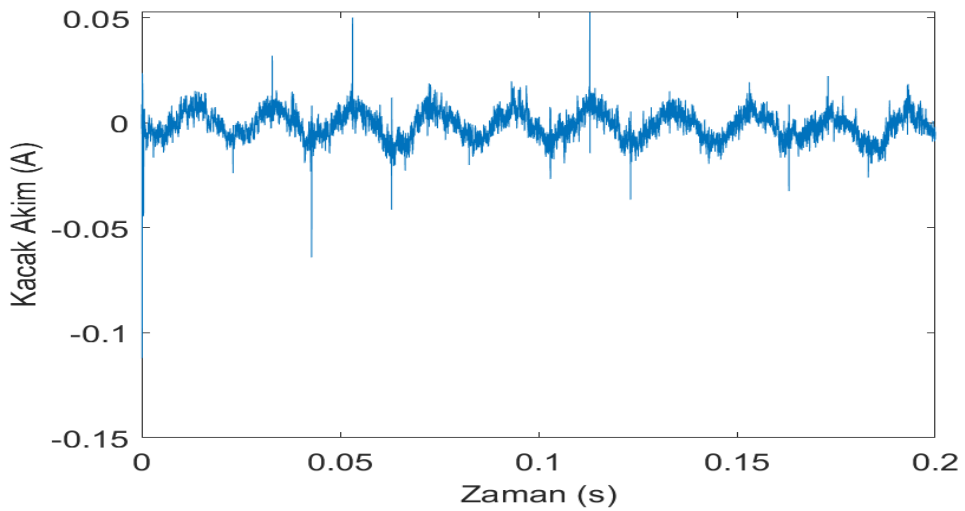
Numunemize 500 V gerilim stresi uygulanmıştır ve kirli ortamı modelleyen çözeltimiz 20 saniye aralıklarla numunemizin üzerine damlatılmıştır. Deney sonucunda;

- Karbonlaşma : 10. damlada
- Yüzeyde iz oluşumu : 24. damlada

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de 500 V 20 saniye aralıklı damla deneyinin karbonlaşma ve iz görülen damlaların 0.2 saniyelik kesiti verilmiştir.



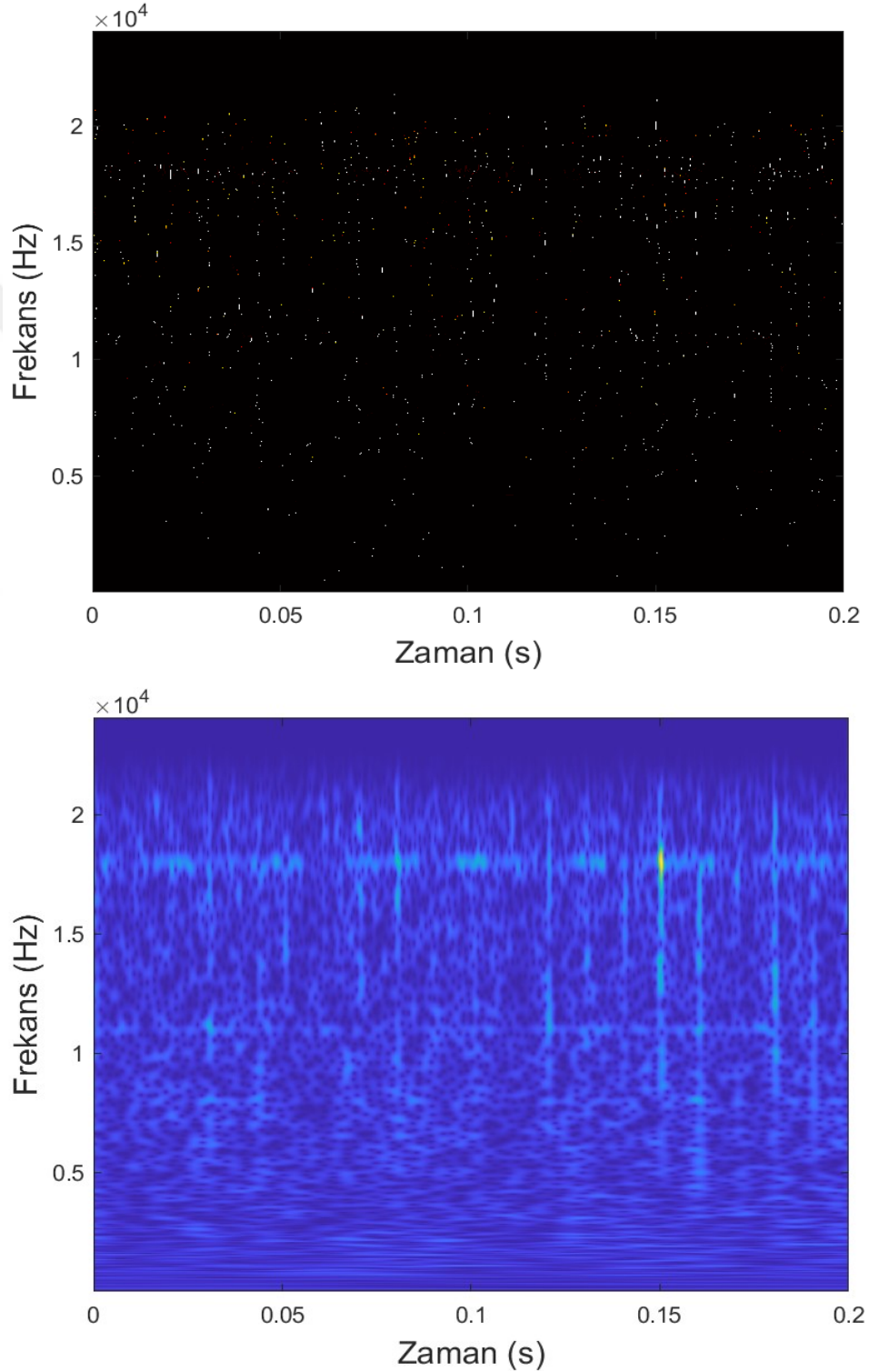
Şekil 4.23. 500 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali



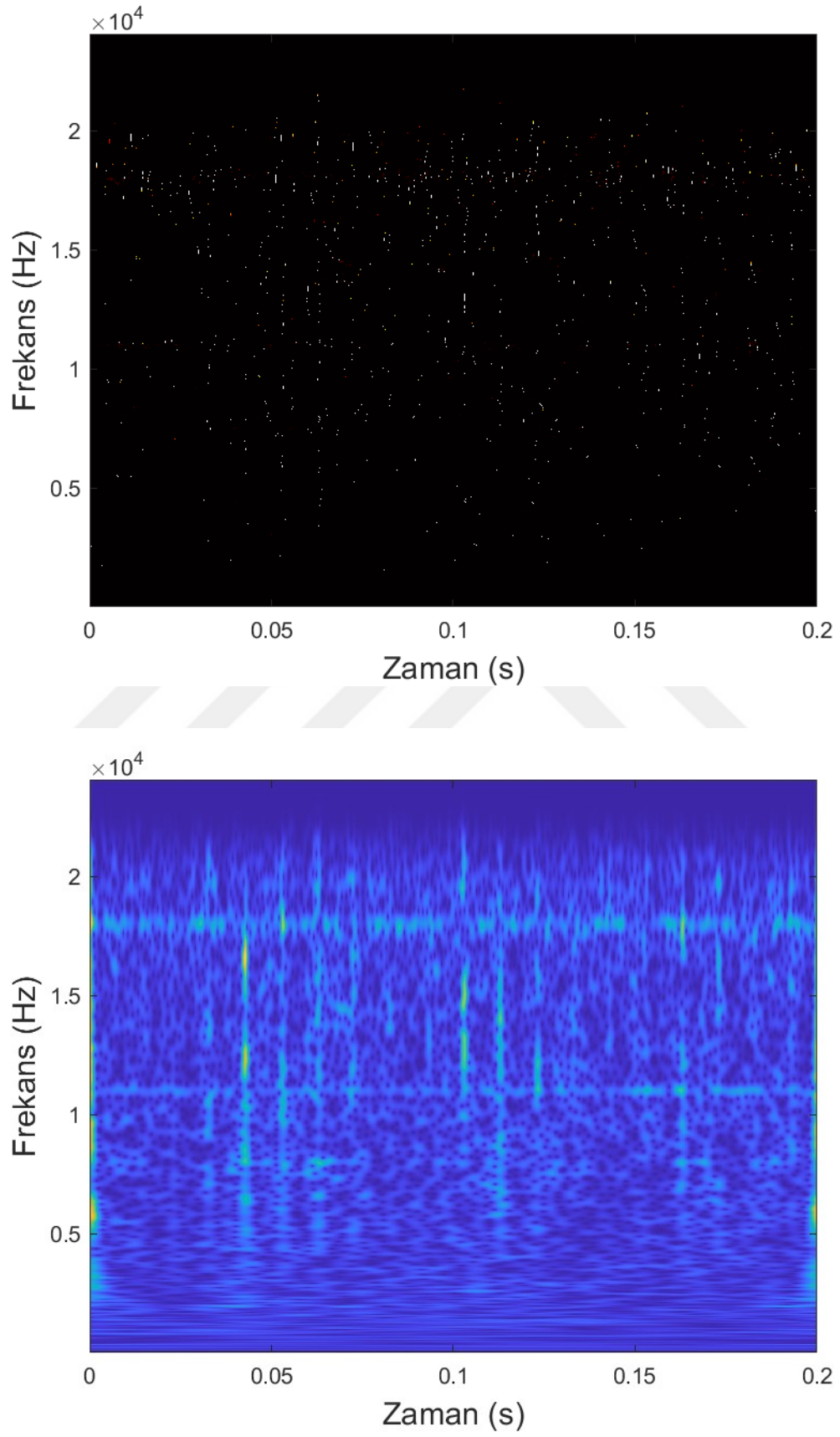
Şekil 4.24. 500 V 20 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali

500 V gerilim seviyesinde yapılan deneylerde karbonlaşma anında kaçak akım sinyalinin dalga formu daha bozuk gözlenmiştir. Bu durum iz oluşumu anında değişmiştir. 30 sn peryotlu damla uygulamasında 0.8 A'ler seviyesine kadar çıkan kaçak akımlar 20 sn peryotlu kirletici sıvı

uygulamasında maksimum 0.5 A olarak ölçülmüştür. 20 sn'de bir damla maruziyeti durumunda iz oluşumu esnasında daha az pikler gözlenmiştir. Ancak iyonizasyonu hızlandıracak şekilde negatif alternansta yaklaşık 0.07 A'lık büyük bir pik bulunmaktadır. 20 sn periyotlu damla uygulaması durumundaki WTMSST_Z dönüşümleri sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.25. 500 V 20 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 10. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri



Şekil 4.26. 500 V 20 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 24. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri

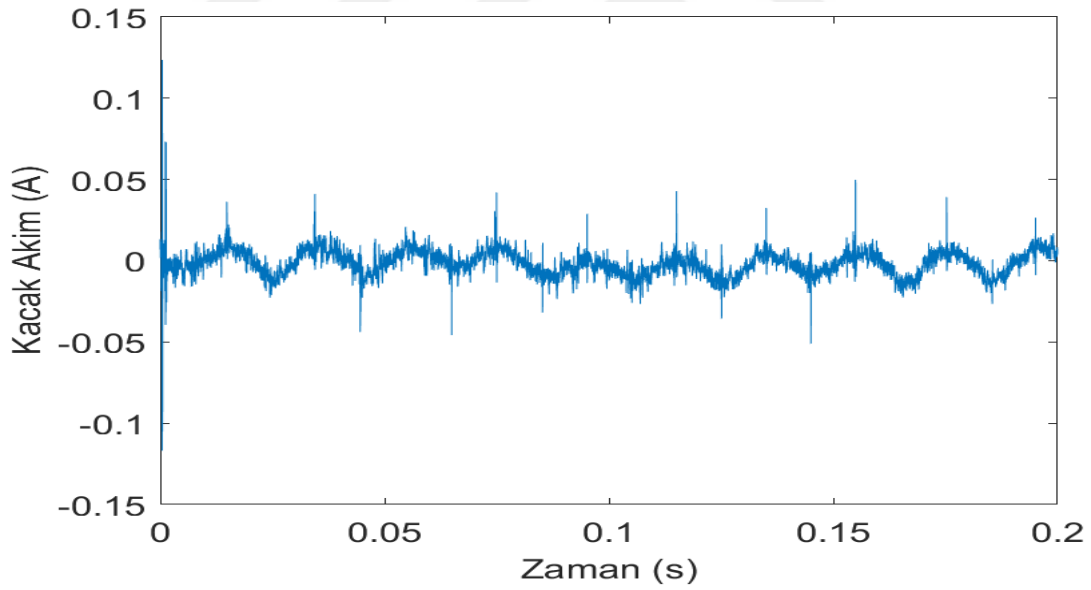
20 sn periyotlu kirletici sıvı uygulamasında gerek karbonlaşma gerek iz oluşumu durumundaki WTMSST_Z desenlerinde daha az ve seyrek bir yayılım gözlenmektedir. Bu durum aslında daha az elektriksel deşarjların olduğunu göstermektedir. Ayrıca ciddi deşarjları gösteren sarı renkli kısımlar bu durumda yalnızca 1 kHz ve 2 kHz frekanslarına yakın yerlerde ölçülmüştür. 30 sn periyotlu uygulamada 500 V'da daha geniş spektruma sahip ciddi elektriksel İz Oluşumlar ölçülmüştür.

4.6. 500V 10 Saniye Uygulanan Numune

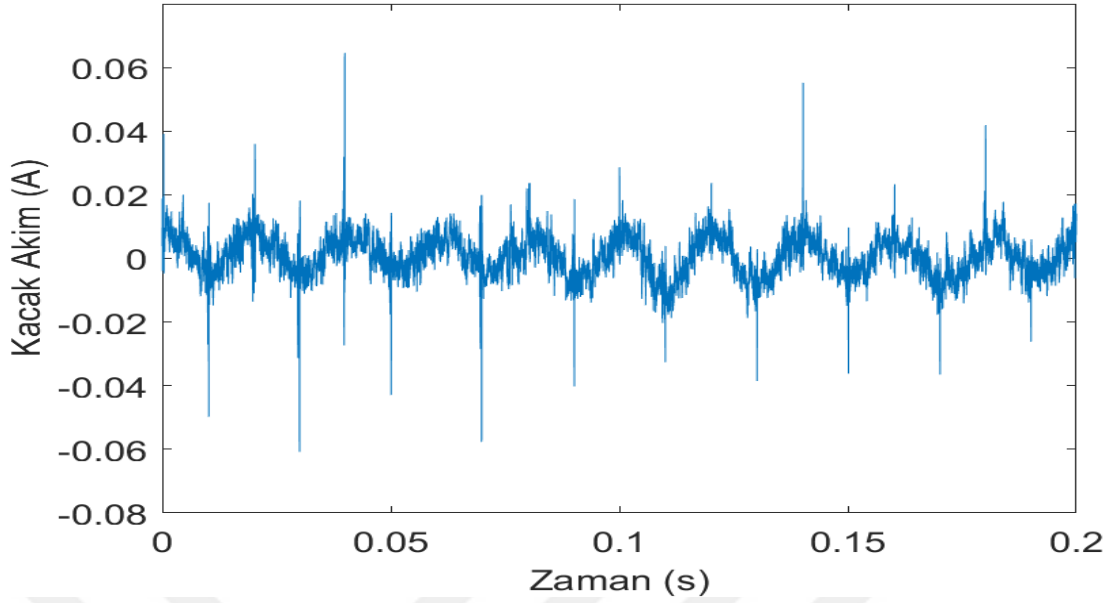
Numunemize 500 V gerilim stresi uygulanmıştır ve kirli ortamı modelleyen çözeltimiz 10 saniye aralıklarla numunemizin üzerine damlatılmıştır. Deney sonucunda;

- Karbonlaşma : 13. damlada
- Yüzeyde iz oluşumu : 30. damlada

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de 500 V 10 saniye aralıklı damla deneyinin karbonlaşma ve iz görülen damlaların 0.2 saniyelik kesiti verilmiştir.

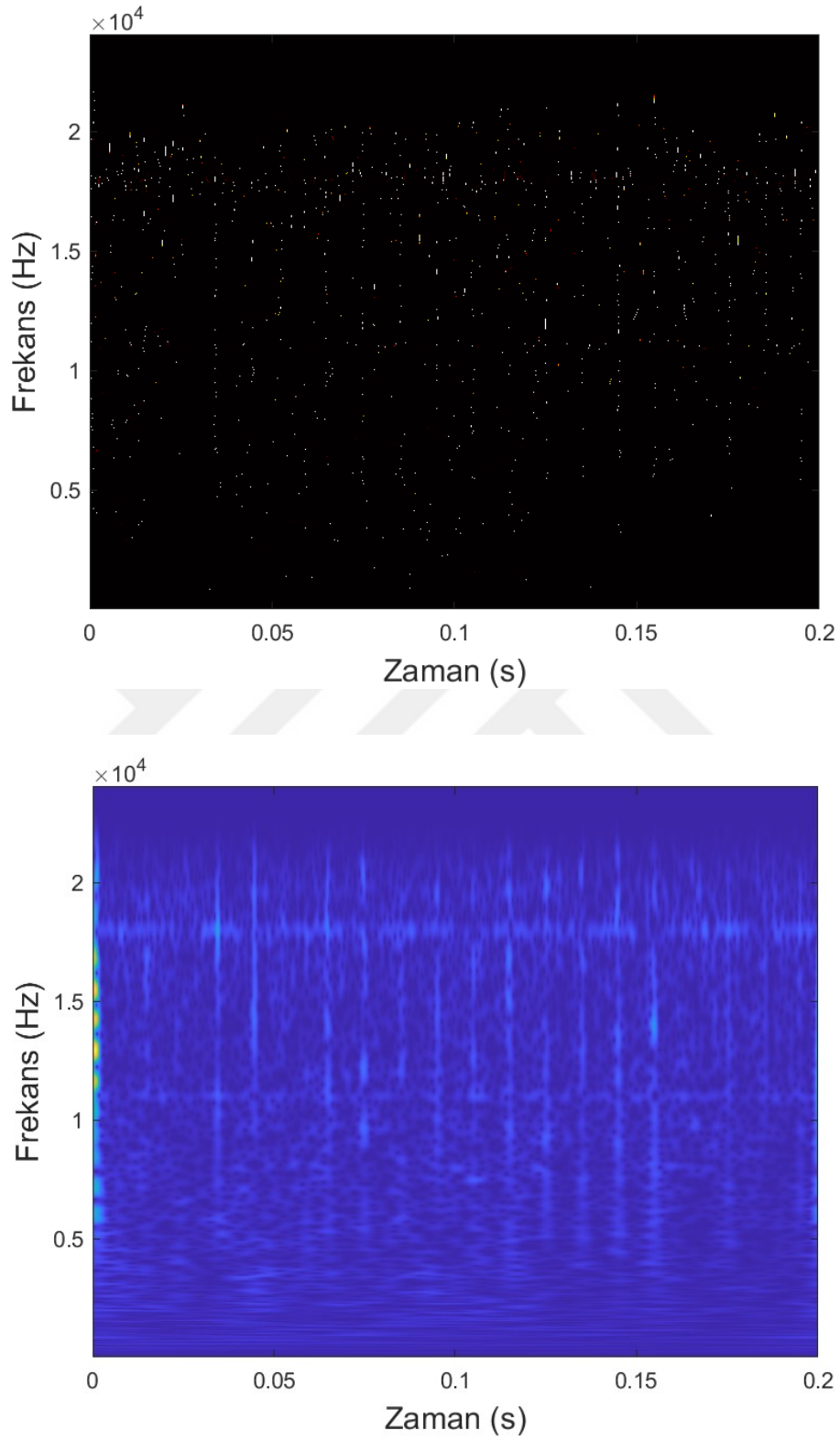


Şekil 4.27. 500 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin karbonlaşma başlayan kaçak akım sinyali

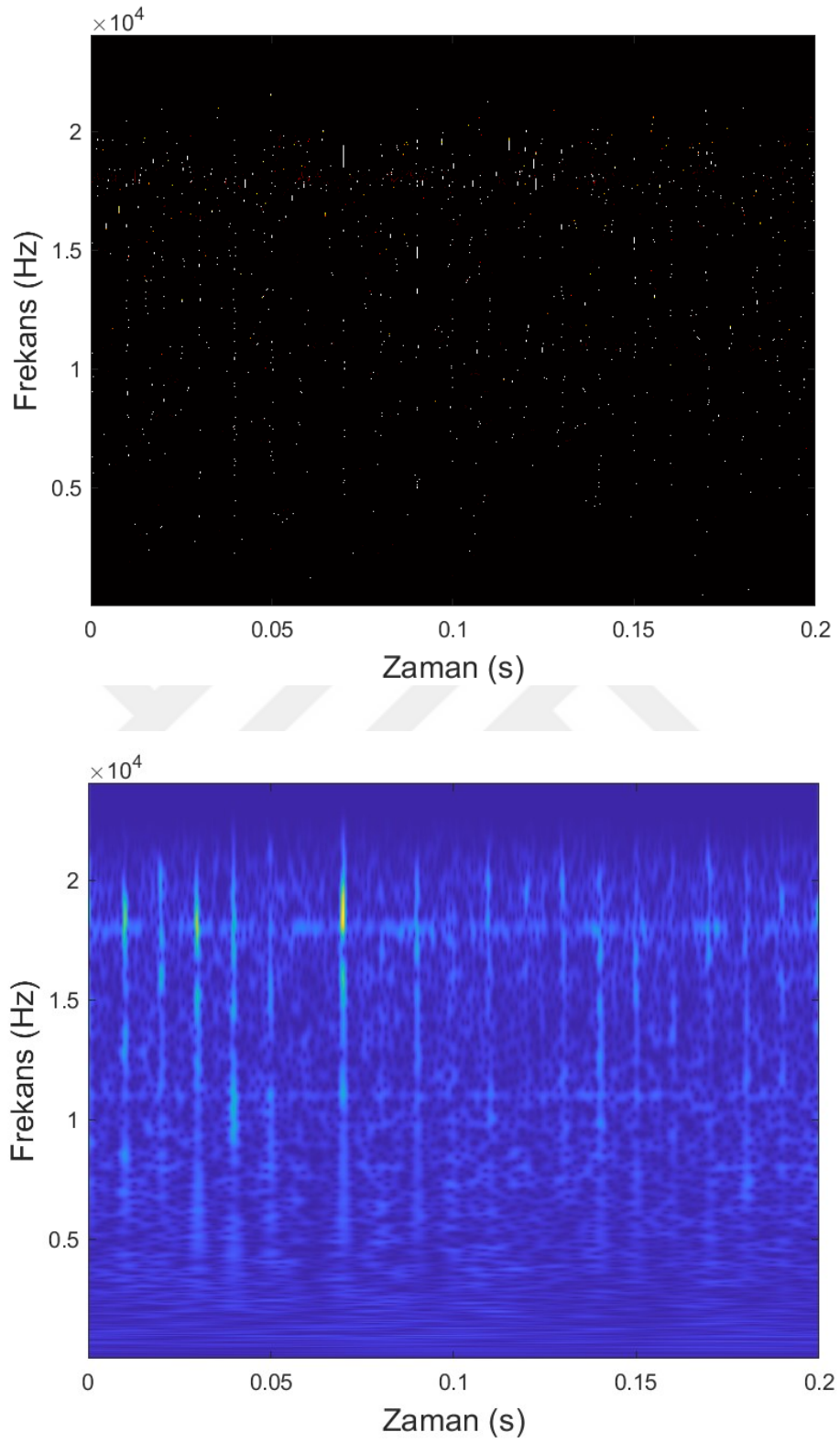


Şekil 4.28. 500 V 10 sn aralıklı yapılan deneyin iz başlayan kaçak akım sinyali

Silikon yalıtkanın yüzeyinin kirletici sıvıya daha sık maruz kaldığı 10 sn peryotlu durumda kaçak akım değerleri ciddi şekilde yükselmiştir. Özellikle karbonlaşma anında negatif alternansta 0.1 A'lere varan kaçak akımlar ölçülmüştür. 500 V gerilim stresi altında iz oluşumunun başladığı damlaya ait kaçak akım sinyalinde 30 sn peryotlu uygulama esnasında yaklaşık 9 adet, 20 sn peryotlu uygulamada yaklaşık 5 adet pik görülürken 10 sn peryotlu uygulamada ise yaklaşık 11 adet pik gözlenmiştir. Bu durum malzeme yüzeyinin dielektrik dayanımının ciddi şekilde etkilendiğini göstermektedir. Deşarjların detaylı analizi için 10 sn peryotlu uygulamaya ait Şekil 4.29 ve 4.30'da verilen WTMSST_Z dönüşümleri incelenmelidir. Karbonlaşma anında genelde zayıf deşarjlar mevcuttan sarı renkli bölgeler ilk deşarj anında 1.2 kHz-2.2 kHz frekans aralığında gerçekleşmiştir. Kaçak akım sinyalinde negatif kısımda ölçülen yüksek değer bu duruma sebep olsa da ilerleyen zamanda malzeme yüzeyi toparlanmış ve daha dirençli bir davranış göstermiştir. İz oluşumunun başladığı damlada 1.8 kHz- 2 kHz dar bant aralığında ciddi deşarjlar gözlenmiştir. 10 sn peryotlu uygulamada iz oluşumu esnasında daha fazla pik görülmesine rağmen 500 V gerilim stresi altında 30 sn ve 20 sn peryotlu damla uygulamasında WTMSST_Z analizine göre sarı bölgeli kısımların sayısı daha fazladır. Böylece kombine bir değerlendirme ile malzemenin yüzeyinin sık damla uygulamasında toparlanma hızının yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 4.29. 500 V 10 sn için yüzeyde karbonlaşma oluşumunun başladığı 10. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri



Şekil 4.30. 500 V 10 sn için yüzeyde iz oluşumunun başladığı 24. Damlanın Ters Wavelet Transform Gösterimleri

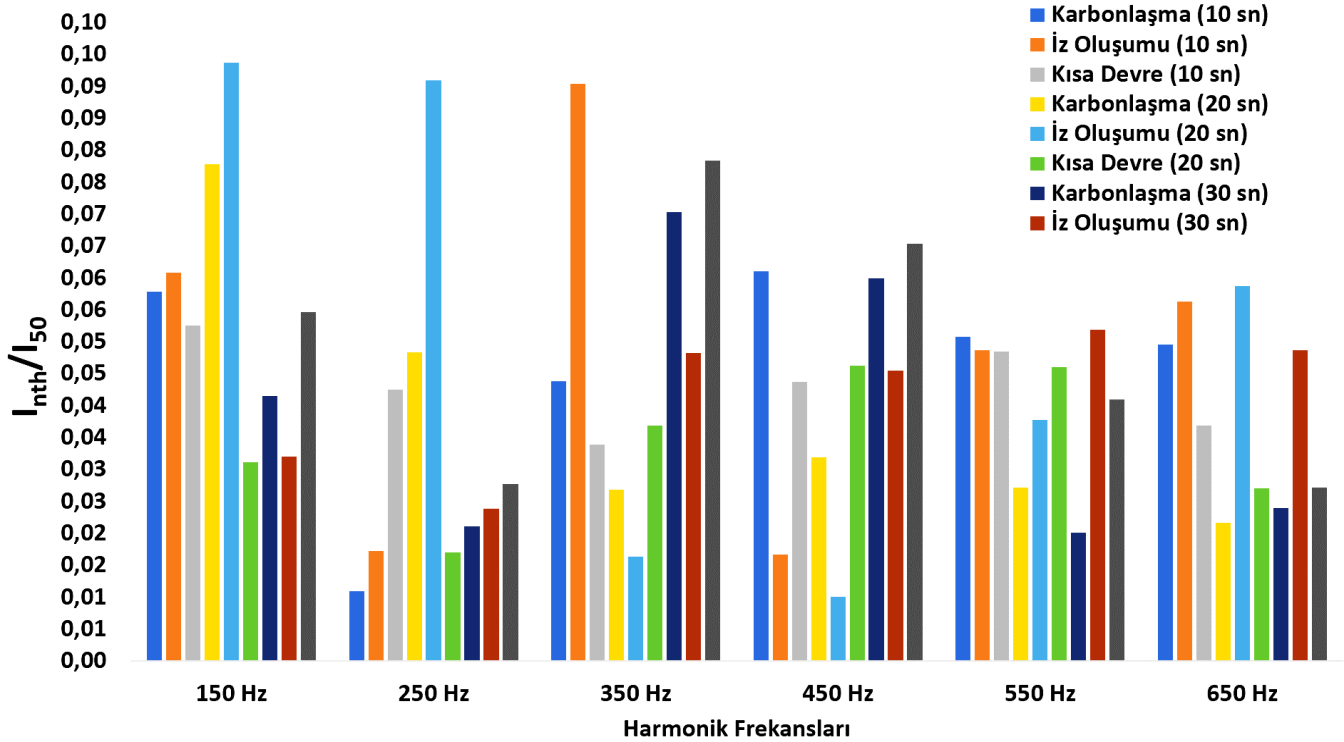
4.7. Harmonik Akım Analizleri

Deneyler esnasında gerçek zamanlı alınan kaçak akım sinyallerinden karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devreye neden olan kirletici sıvı damlalarının elektriksel deşarj karakteristikleri WTMSST_Z dönüşümlerinden elde edilen grafiklerle detaylıca ortaya konmuştur. Akan akımın içerisindeki harmonik distorsiyonların bulunmasıyla birlikte daha net sonuçlar ortaya konacaktır. Bu nedenle bu tez kapsamında elde edilen kaçak akım sinyallerine denklem 3 ve 4'te gösterilen Fast Fourier Transform (FFT) ve Total Harmonik Distorsiyon (THD) uygulanmıştır.

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-iwx} dx \quad (3)$$

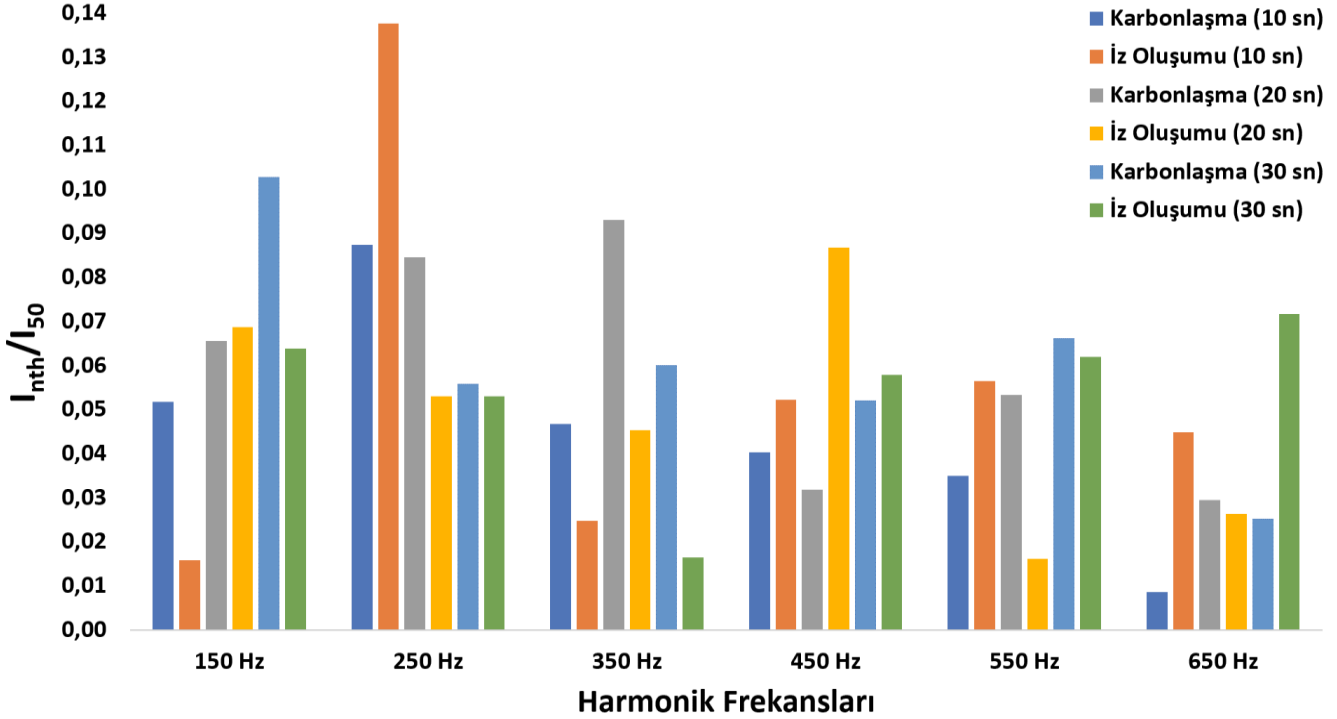
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n_rms}^2}}{V_{fund_rms}} \quad (4)$$

Denklem Y'de V_{n_rms} n. harmoniğin rms gerilimini, V_{fund_rms} ise temel frekanstaki rms gerilimini göstermektedir. Buna göre Şekil 4.31'de 600 V gerilim altında yapılan deneylerde karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devreye neden olan damlalara ait harmoniklerin temel frekanstaki bileşene göre oranını gösteren histogram grafiği verilmiştir.



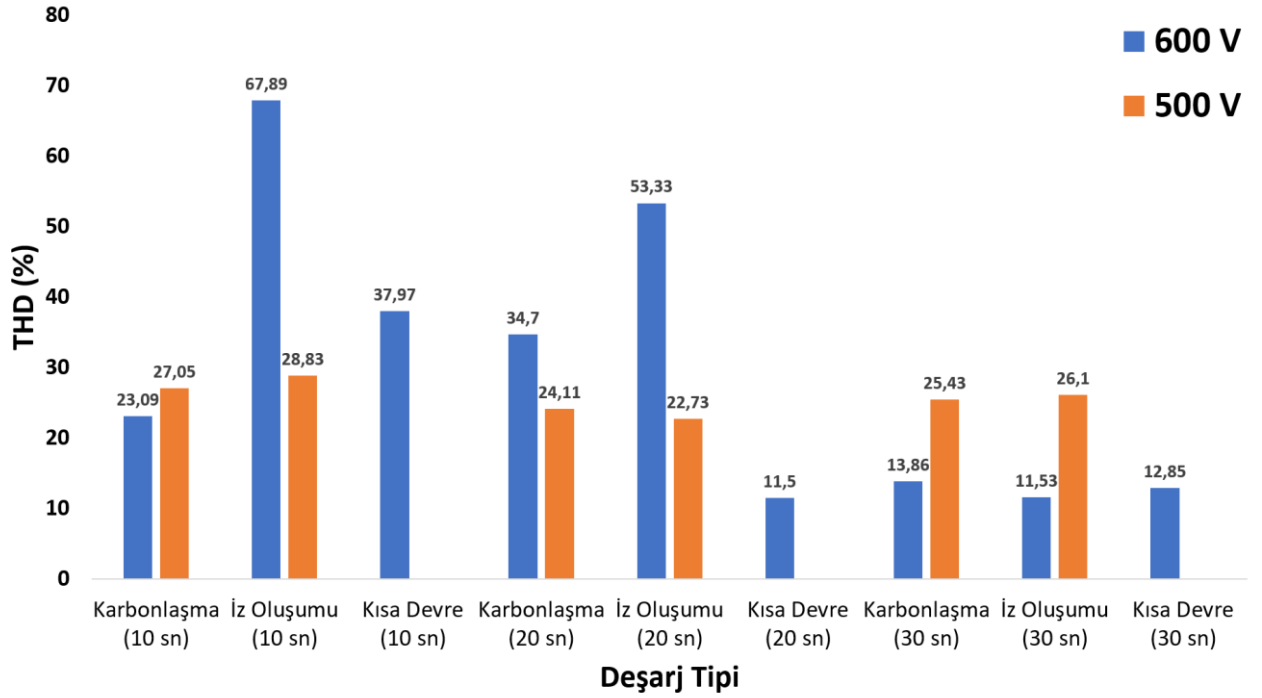
Şekil 4.31. Harmonik Akım Değerleri Oranları (V=600 V)

Şekil 4.31'den görüleceği üzere genel olarak 3. Harmonik değeri baskındır. En yüksek oran 0,0937 oranla 20 sn peryotlu kirletici sıvı uygulamasında iz oluşumunun başladığı damlada ölçülmüştür. 7. Harmonik ise 0,09 oranla 10 sn peryotlu kirletici sıvı uygulamasında iz oluşumunun başladığı damlada görülmüştür. Genel olarak iz oluşumu başlangıcında harmonik akımların temel bileşene oranı çok daha yüksek ölçülmüştür. Şekil 4.32'de 500 V gerilim altındaki harmonik bileşenlerin temel bileşene oranları verilmiştir.



Şekil 4.32. Harmonik Akım Değerleri Oranları (V=500 V)

Gerilim seviyesi düştüğünde 3. Harmonik etkisi azalırken 5. Harmonik en yüksek oranlarda ölçülmüştür. 10 sn peryotlu damla uygulamasında iz oluşumu başlangıcında 0,1376 ile en yüksek oran 5. Harmonik değerinde ölçülmüştür. 3. Harmonik en yüksek oranla 30 sn peryotlu damla uygulamasında karbonlaşma esnasında 0,1028 olarak ölçülmüştür. 600 V'da görülenin aksine 500 V'da karbonlaşma esnasında ortalama oranlar daha yüksek çıkmıştır. Şekil 4.33'de total harmonik distorsiyonlar tüm durumlar için verilmiştir.



Şekil 4.33. Total Harmonik Distorsiyonlar

Şekil 4.33’den görüleceği üzere genel olarak total harmonik distorsiyon 500 V gerilim altında daha düşük ölçülmüştür. Ayrıca bu gerilim değerinde harmonik bozulmalar daha stabil bir davranış göstermektedir. Genelde %22-%28 arasında yani sadece %6’lık dilimde bir hareket söz konusudur. Öte yandan 600 V gerilim altında yaklaşık %68’lere varan çok yüksek bozulmalar ölçülmüştür. 10 sn ve 20 sn peryotlu kirletici sıvı uygulamalarında 600 V gerilim altında iz oluşumu esnasında total harmonik distorsiyon değerleri çok yüksek ölçülmüştür. Uygulama 30 sn peryotlu uygulandığında ise harmonik bozulmaların hem yüzdesi genel olarak 12 civarına düşmüş hem de daha stabil bir bozulma davranışı gözlenmiştir. Kirletici sıvının yüzeye temas sıklığı daha yüksek gerilimlerde akım bileşeninde çok fazla bozucu etkiye neden olmaktadır. CTI standartı kapsamında klasik 30 sn uygulamasında bu durum gözlenmemiştir. Dolayısıyla malzemenin yüzey durumunun tayini de klasik uygulama ile yetersiz kalmaktadır. Bu tez çalışmasında uygulanan 10 sn ve 20 sn peryotlu kirletici sıvı uygulamasıyla birlikte temel bileşenden farklı olarak ortaya çıkan harmonik bozulmaların ne derece etkili olduğu ortaya konmuştur.

5. TARTIŞMA

Yalıtım endüstrisinin hızlıca büyümesiyle beraber mevcut malzemelerin dielektrik açıdan daha güçlü hale getirme çalışmaları artarak devam etmektedir. Yüksek gerilim altında çalışacak katı yalıtkanların uzun ve stresli işletme koşullarına dayanabilmesi için yalıtım performanslarının sürekli takip edilmesi gerekmektedir. Malzeme türü ve içeriği farklı olsa da özellikle yüzey direncine ait özelliklerin takip edilmesiyle kötü çevre koşullarında düzgün bir yalıtım elde edilip edilemeyeceği ortaya konmaktadır. Bunun için laboratuvar ortamlarında birbirlerinden farklı test düzenekleri olsa da temelde amaç yüzey direnci ve dielektrik performansı belirlemektir.

Yüksek gerilim sistemlerinde kullanılan katı izolasyon malzemelerinin tam delinmeye uğramadan önceki yüzey İz Oluşumlarının analiz edilmesiyle doğru bir dielektrik performans ölçümü ortaya konmaktadır. Bunun için çok farklı deney düzenekleri olsa da kötü çevre koşullarını en iyi simüle eden düzenek karşılaştırmalı yüzeysel iz indeksi olarak adlandırılan CTI testidir [41,42]. Bu testle birlikte herhangi bir katı yalıtım malzemesinin dış koşullarda maruz kaldığı çetin çevresel ortam laboratuvar ortamında uygulanabilir hale gelmektedir [43]. Üstün özelliklerinden ve uluslararası yüksek kabul gördüğünden dolayı bu tez çalışmasında CTI deney düzeneği güçlendirilmiş silikon yalıtkanın yüzey direncini analiz etmek için kullanılmıştır.

CTI testinde ortaya konan yüzeysel iz oluşumu indeksi malzeme yapısıyla ilgili bilgi verse de elektriksel deşarjların karakteristiğini ortaya koymada yetersiz kalmaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan bu yöntem kullanılarak elde edilecek verilerin güncel metotlarla değerlendirilmesiyle alakalı çalışmalar çok azdır. İz oluşumu indeksinin ortaya konduğu ve incelendiği birçok çalışmada uygulanan standartın dışına çıkılmamış ve çok dar bir perspektiften yüzey direncine bakılmıştır [44, 45]. Bu tez çalışmasında ise literatürde ve standartta yer alan durumlar haricinde 20 sn ve 10 sn periyotlu kirletici sıvı maruziyeti de incelenmiştir. Ayrıca karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devreyi başlatan damlalara ait kaçak akım sinyalleri 200 ms süre boyunca kaydedilmiş ve incelenmiştir.

IEC 60112 standardı kapsamında yapılacak deneylerin 0-600 V gerilim seviyesi aralığında olması gerekmektedir. Literatürde yer alan çoğu çalışmada 300 V ve 400 V gibi düşük gerilim seviyeleri uygulanmıştır [46]. Ancak bu seviyeler güçlendirilmiş silikon malzemelerin

yüzeyinde dielektrik performansı ölçecek büyüklükte değildir. Bu nedenle tez kapsamında yapılan deneyler 600 V gerilim seviyesiyle başlamıştır. Bu gerilim stresi altında 30 sn, 20 sn ve 10 sn peryotlarla kirletici sıvı damlalar halinde silikon malzeme yüzeyine düşürülmüştür. Bütün proses bittikten sonra 500 V gerilim seviyesinde deneyler aynı şekilde devam etmiştir. Gerilim seviyesinin düşmesiyle birlikte malzeme yüzeyinde kısa devre olayı gözlenmemiştir. Dolayısıyla daha düşük gerilim seviyelerinde deneylere devam etmeye gerek kalmamıştır. Bu deneyler yapılırken 48 kHz örnekleme hızıyla alınan kaçak akım sinyalleri incelendiğinde genelde benzer genliklerde kaçak akım sinyalleri elde edilmiş olsa da dalga formlarında çok önemli farklılıklar vardır. Kısa devre anındaki kaçak akım dalga formunun daha bozuk olması beklenirken 600 V gerilim seviyesi altında iz oluşumu sırasında da çok gürültülü ve deşarj içeren kaçak akım dalga formları ölçülmüştür. Bu durum literatürde yer alan genel kabulün tam olarak analiz edilmediğini göstermektedir. Tez kapsamında her durum için deneyler 5 defa tekrar edilmiştir. Dolayısıyla yapılan ölçümlerin ve elde edilen grafiklerin doğruluğu sağlanmıştır.

600 V gerilim seviyesi altında yapılan deneylerde 20 sn ve 10 sn peryotlu damla uygulamasında kaçak akımlarda bazı noktalarda ciddi artışlar gözlenmiştir. Ayrıca sinyalin dalga formunda artan bozukluklar, elektriksel deşarjların analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Dış çevre koşullarında havanın çok kötü olduğu durumlarda numunenin kötü ortam maruziyeti süresi ve sıklığı artmaktadır. CTI kapsamındaki 30 sn peryotluk kirletici sıvı uygulaması olağanüstü ortam koşullarını oluşturmada yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı bu tez çalışmasında 20 sn ve 10 sn peryotlar seçilerek daha detaylı analizler yapılmıştır. Elde edilen bulgular güçlendirilmiş silikonun yüzeyinde daha ciddi ve bozucu elektriksel İz Oluşumların olduğunu göstermektedir.

Kaçak akım sinyali ile yapılan analizler malzeme yüzeyinin direnci hakkında kısmi bilgi vermenin ötesine geçmemektedir. Bu sinyale ait dalga formunun modern ve güncel metotlarla işlenerek elektriksel deşarjların hangi frekanslarda olduğunu saptanması gerekmektedir. Bu tezde, karbonlaşma, iz oluşumu ve kısa devreye sebep olan damlalara ait kaçak akım sinyallerinin WTMSST_Z dönüşümleri sayesinde deşarjların karakteri ortaya konmuştur. Elektriksel deşarjlar genelde 1.5 kHz- 2 kHz frekans bandında meydana gelse de daha düşük frekanslarda gerek dar gerek geniş bantlı elektriksel İz Oluşumların olduğu gözlenmiştir. 500 V gerilim seviyesinde 10 sn peryotlu damla uygulamasında kaçak akımlarda daha yüksek seviyeler ve bozulmalar beklenmesi gerekmektedir. Ancak WTMSST_Z metodu sayesinde 20

sn ve 30 sn peryotlu damla uygulamalarında özellikle sarı renkle gösterilen daha yoğun elektriksel deşarjlar gözlenmiştir. 600 V gerilim stresi altında neredeyse tüm frekanslarda elektriksel deşarjların varlığı 20 sn peryotlu damla uygulamasındaki kısa devre damlasında görülmüştür. Dolayısıyla, WTMSST_Z grafiklerinde berlirgin desenler ve özellikle sarı renkli kısımların fazla olması malzemenin yüzeyinin direncinin oldukça azaldığını göstermektedir. Bu durum farklı frekans bölgelerinde gerçekleştiyse yavaş yavaş tam bir elektriksel köprü oluşumu olacağı anlamına gelmektedir. Çünkü elektron çığı kritik seviyelere gelmiş ve neredeyse zamanın her anında frekansın her bandında iyonizasyonlar devam etmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada silikon yalıtım malzemelerin performansı karşılaştırmalı yüzeyde iz oluşum test yöntemi ile incelenmiştir. Değerlendirme sırasında karşılaştırmalı yüzeyde iz oluşum test yönteminde standartta belirtilen değerler dışında silikon gibi oldukça güçlü yalıtkan malzemelerin iz oluşum davranışını daha da hızlandırmak amacı ile deneydeki temel yaşlandırıcı olan sıvı damlaların sürelerindeki aralık kısaltılmıştır. Standartta verilen 30 saniye aralıklı sıvı damla uygulamaları 20 saniye ve 10 saniyeye düşürüldüğünde beklenildiği üzere karbonlaşma ve iz oluşumunun gerçekleştiği damla seviyeleri düşmüştür. Fakat silikon kadar güçlü bir yalıtım malzemesi için standartta belirtilen gerilim seviyeleri dışına çıkmadan deneylerin ortaya konması için damlaların süre sıklığının artırılmasının daha uygun olacağını ortaya koymaktadır. Damlaların sıklaştırılması iz oluşum deneylerini temel noktada 500 V ve 600 V gerilim seviyelerinde bozmadığı bu deneysel çalışma ile gösterilmiştir. Bu noktada kullanılan gerilim seviyelerinin bu standartta belirtilen en yüksek 600 V ve bir altı kademe olarak 500 V gerilim değerleri seçilmiştir. Seçilen bu değerlerin yüksekliği nedeni ile damla aralıkları sıklaştırılrsa da elektrotlar arasındaki suyun buharlaşması beklenildiği üzere 1-2 saniye aralığında gerçekleşmiştir. Bu da damla aralıklarının sıklaştırılmasının bu seviyeler için kabul edilebilir kılınmıştır.

Bu çalışma ile deneysel anlamda silikon gibi güçlü yalıtkanların yüzeyde iz oluşum deneylerinde sürelerin kısaltılmasının deneyin genel anlayışını bozmadığı ortaya konmuştur. Ayrıca kullanılan WTMSST_Z dönüşümleri ile görsel olarak da bozulma davranışının grafikler ile ortaya konmasının mümkün olduğu ortaya konmuştur.

İz oluşum deneylerinde güçlü yalıtım malzemeleri test edilmeye çalışıldığı durumlarda kimi zaman beklendiği üzere standart dahilindeki sürelerde bozulmalar gerçekleşmeyebilir bu durumda standartta ilgili zaman aralıkları ya da gerilim seviyelerinin değiştirilmesi uygun olacaktır. Bu çalışma ile ilerleyen dönemde özellikle iz oluşum çalışmalarında çalışan bilim adamları ve mühendisler için standartların revizyonu ya da esneklikleri konusunda yol gösterici olması beklenmektedir. Çalışma ile özellikle orta gerilim üzeri yalıtkan malzemeler için daha olumsuz koşulların oluşturulmasında ihtiyaç duyulan gereklilikler ortaya konmaya çalışılmıştır.

Sonuç olarak, yüzeyde iz oluşumu deneyleri ile yalıtım malzemeleri için uygun güvenlik protokolleri oluşturulur ve uygulanır. Böylece yalnızca belirlenen riskleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kullanıldıkları sahada proaktif bir güvenlik yönetimi sağlanır. WTMSST_Z dönüşümleri de yalıtkanlardaki olası kaçakların sürekli olarak izlenmesi ve bunlara zamanında müdahale edilmesinin sağlanması noktasında uygun bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntem sistemlerin sürekli değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi, gelişen güvenlik standartlarına uyum ve sürdürülebilir iyileştirmeler sağlanması noktasında büyük önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Kokalis, Christos-Christodoulos A., Vassiliki T. Kontargyri, and Ioannis F. Gonos. "A proposal for the evaluation of HTV silicone rubber composite insulators." *Polymers* 13.21 (2021): 3610.
- [2] Kamarudin, Najwa, et al. "Mechanical and electrical properties of silicone rubber based composite for high voltage insulator application." *Int. J. Eng. Technol* 7.25 (2018): 452-457.
- [3] Ullah, Israr, Mohammad Akbar, and Haris Ahmad Khan. "Enhancement of electrical, mechanical and thermal properties of silicone based coating with aluminatrihydrate/silica for ceramic insulators." *Materials Chemistry and Physics* 282 (2022): 125972.
- [4] Schmid, H., and B. Michel. "Siloxane polymers for high-resolution, high-accuracy soft lithography." *Macromolecules* 33.8 (2000): 3042-3049.
- [5] Edelman, Frank T. "Metallasilsesquioxanes—Synthetic and Structural Studies." *Silicon Chemistry: From the Atom to Extended Systems* (2003): 383-394.
- [6] Shit, Subhas C., and Pathik Shah. "A review on silicone rubber." *National academy science letters* 36.4 (2013): 355-365.
- [7] Perry, Robert, et al. "Silicones." *Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants*. CRC Press, 2020. 235-248.
- [8] Chakraborty, Rahul. "Performance of silicone rubber insulators under thermal and electrical stress." *IEEE Transactions on Industry Applications* 53.3 (2017): 2446-2454.
- [9] Ul-Hamid, Anwar, Khaled Y. Soufi, and Ibrahim Al-Hamoudi. "Evaluation of silicone rubber insulators used in high-voltage transmission lines." *Journal of Materials Engineering and Performance* 17 (2008): 280-286.
- [10] Sit, Kaushik, et al. "A review on characteristics and assessment techniques of high voltage silicone rubber insulator." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 29.5 (2022): 1889-1903.

- [11] Pathak, Dixit, et al. "The development of silicone rubber composite insulators in power system." *2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation*. IEEE, 2009.
- [12] Zuidema, Carl, et al. "A short history of rubber cables." *IEEE Electrical Insulation Magazine* 27.4 (2011): 45-50.
- [13] Bass, Shailer Linwood. "Silicones—A new continent in the world of chemistry." *Electrical Engineering* 66.4 (1947): 381-385.
- [14] Polmanteer, Keith E. "Silicone rubber, its development and technological progress." *Rubber chemistry and technology* 61.3 (1988): 470-502.
- [15] Warrick, E. L., et al. "Silicone elastomer developments 1967–1977." *Rubber chemistry and Technology* 52.3 (1979): 437-525.
- [16] Imai, Takahiro, et al. "Potential Applications in Electric Power and Electronics Sectors." *Advanced Nanodielectrics*. Jenny Stanford Publishing, 2017. 19-86.
- [17] Colinge, J-P. *Silicon-on-insulator technology: materials to VLSI: materials to Vlsi*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] Andriot, M., et al. "Silicones in industrial applications." *Inorganic polymers* 61 (2007).
- [19] Okada, Akira. "Automotive and industrial applications of structural ceramics in Japan." *Journal of the European Ceramic Society* 28.5 (2008): 1097-1104.
- [20] Owen, Michael J., and Petar R. Dvornic. "Surface applications of silicones." *Silicone Surface Science* (2012): 355-374.
- [21] Zhang, Zhijin, et al. "Performance characteristics of silicone rubber for use in acidic environments." *Polymers* 15.17 (2023): 3598.
- [22] Saleem, Muhammad Zaheer, and Mohammad Akbar. "Review of the performance of high-voltage composite insulators." *Polymers* 14.3 (2022): 431.
- [23] Zeng, Zhou, et al. "Review of aging evaluation methods for silicone rubber composite insulators." *Polymers* 15.5 (2023): 1141.
- [24] Papailiou, Konstantin, and Frank Schmuck. *Silicone composite insulators*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [25] Ullah, Rahmat, et al. "Understanding variations in the tracking and erosion performance of HTV-SR-based composites due to AC-stressed aging." *Polymers* 13.21 (2021): 3634.
- [26] Kamarudin, Najwa, et al. "Effect of filler loading on tracking and erosion of silicone rubber based composites under dc voltage." *Intelligent Manufacturing &*

- Mechatronics: Proceedings of Symposium, 29 January 2018, Pekan, Pahang, Malaysia.* Springer Singapore, 2018.
- [27] Loganathan, N., and S. Chandrasekar. "Analysis of surface tracking of micro and nano size alumina filled silicone rubber for high voltage AC transmission." *Journal of Electrical Engineering and Technology* 8.2 (2013): 345-353.
- [28] Cherney, E. A., et al. "DC inclined-plane tracking and erosion test of insulating materials." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 22.1 (2015): 211-217.
- [29] Kamarudin, Najwa, et al. "Effect of filler loading on tracking and erosion of silicone rubber based composites under dc voltage." *Intelligent Manufacturing & Mechatronics: Proceedings of Symposium, 29 January 2018, Pekan, Pahang, Malaysia.* Springer Singapore, 2018.
- [30] Weeks, Michael, and Magdy Bayoumi. "Discrete wavelet transform: architectures, design and performance issues." *Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology* 35 (2003): 155-178.
- [31] K. Singh, A., Kumar, R., & Sharma, P. (2020). "Evaluation of Silicone Rubber Insulator Performance Using Wavelet Transform Analysis." **Journal of Electrical Engineering and Technology**, 15(2), 345-352..
- [32] L. Sarathi, R., Rajasekar, S., & Srinivasan, K. (2017). "Surface Condition Analysis of Silicone Rubber Insulators Using Wavelet Transform and Artificial Neural Networks." **IEEE Transactions on Power Delivery**, 32(4), 1508-1515.
- [33] IEC 60112:2003/AMD1:2009 *Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials*, 4th edn
- [34] "ASTM-D3638", *Standard Test Method for Comparative Tracking Index of Electrical Insulating Materials.*, 2022.
- [35] ASTM D5288-14 *Standard Test Method for Determining Tracking Index of Electrical Insulating Materials Using Various Electrode materials (Excluding Platinum)*, (2014)
- [36] Montejo, Luis A., and Luis E. Suarez. "An improved CWT-based algorithm for the generation of spectrum-compatible records." *International Journal of Advanced Structural Engineering* 5 (2013): 1-7.
- [37] Vermehren, V. V., and H lio Magalhães de Oliveira. "Huygens Wave Equations in the Field of 2D-CWT." arXiv preprint arXiv:1503.05820 (2015).

- [38] Dong, Haoran, et al. "An energy-concentrated wavelet transform for time-frequency analysis of transient signal." *Signal Processing* 206 (2023): 108934.
- [39] Hu, Zhifeng, et al. "A Review of Synchro-Transform Method in Mechanical Fault Diagnosis." *International conference on the Efficiency and Performance Engineering Network*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.
- [40] Zhao, Huimin, et al. "A New Fault Diagnosis Approach Using Parameterized Time-Reassigned Multisynchrosqueezing Transform for Rolling Bearings." *IEEE Transactions on Reliability* (2024).
- [41] Stimitz, John S., and Richard V. Wagner. *Two Test Methodologies for Evaluating the Resistance to Electrical Arcing Properties of Polymeric Materials for use in Automotive 42 V Applications*. No. 2004-01-1722. SAE Technical Paper, 2004.
- [42] O'Neal, Chad B., et al. "Advanced materials for high temperature, high performance, wide bandgap power modules." *Journal of Electronic Materials* 45.1 (2016): 245-254.
- [43] Rayl, Martin, and D. C. McCarthy. "Arc Tracking in Organic Insulating Materials and the Comparative Tracking Index." *Journal of Testing and Evaluation* 5.5 (1977): 375-381.
- [44] Riba, Jordi-Roger, Manuel Moreno-Eguilaz, and Santiago Bogarra. "Tracking Resistance in Polymeric Insulation Materials for High-Voltage Electrical Mobility Applications Evaluated by Existing Test Methods: Identified Research Needs." *Polymers* 15.18 (2023): 3717.
- [45] Nazir, M. Tariq, et al. "Electrical tracking, erosion and flammability resistance of high voltage outdoor composite insulation: Research, innovation and future outlook." *Materials Science and Engineering: R: Reports* 156 (2023): 100757.
- [46] Du, B. X. "Discharge energy and dc tracking resistance of organic insulating materials." *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation* 8.6 (2001): 897-901

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Yekta_Aydın_Tez_FINAL.docx

ORJİNALLIK RAPORU

% 12	% 11	% 3	% 6
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	% 6
2	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	% 5
3	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<% 1
4	Haoran Dong, Gang Yu, Tianran Lin, Yueyang Li. "An energy-concentrated wavelet transform for time-frequency analysis of transient signal", Signal Processing, 2023 Yayın	<% 1
5	digilib.unila.ac.id İnternet Kaynağı	<% 1
6	acikerisim.baskent.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
7	dspace.trakya.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<% 1
8	ichgcp.net İnternet Kaynağı	<% 1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Yekta AYDIN
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Yekta AYDIN
(İmza)

