

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAŞLANDIRILMIŞ ORTA GERİLİM KABLolarının TEST ÇALIŞMALARI
VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Kaan ALEV

TEMMUZ - 2025

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAŞLANDIRILMIŞ ORTA GERİLİM KABLOLARININ TEST ÇALIŞMALARI
VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Kaan ALEV

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN

Temmuz - 2025

“YAŞLANDIRILMIŞ ORTA GERİLİM KABLOLARININ TEST ÇALIŞMALARI VE ANALİZİ” adlı tez çalışması **Muhammed Kaan ALEV** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN
Kırklareli Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Hasan TİRYAKİ
Kırklareli Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 02/07/2025

.....
Doç. Dr. H. Hale KARAYER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed Kaan ALEV
02/07/2025

ÖZET

YAŞLANDIRILMIŞ ORTA GERİLİM KABLOLARININ TEST ÇALIŞMALARI VE ANALİZİ

Muhammed Kaan ALEV

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN

Temmuz 2025, 74 sayfa

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında kullanılan orta gerilim (OG) kabloları, uluslararası standartlar ve özel kriterler doğrultusunda üretilmektedir. Kablolar performans ve güvenilirlik açısından, laboratuvar ortamında çeşitli elektriksel ve mekanik testlere tabi tutularak analiz edilmektedir. Bu tez çalışmasında, Türkiye’de yaygın bir şekilde kullanılan ve TSE K 204 kriterine uygun olarak üretilen 1x400/35 mm² kesitli NA2XS_Y tipi 20,3/35(42) kV’luk OG kablosu üzerinde hem mekanik hem de elektriksel testler gerçekleştirilmiştir.

İncelenen 20,3/35(42) kV’luk OG kablosu TSE K 204 kriterine uygun olarak, her bir çevrimin 8 saat olduğu 20 ısıtma çevrimi ile yaşlandırılmıştır. Ayrıca, standartta belirtilen ısıtma çevrimiyle yaşlandırma prosedürüne ek olarak kabloya ikinci kez 20 çevrimlik bir ısıtma çevrimi daha uygulanmıştır. Isıtma çevrimleri öncesinde ve sonrasında kısmi deşarj ve tanδ ölçüm testleri gerçekleştirilmiştir. Direnç ölçümü ve kıvılcım deneyi uygulanan kabloya ayrıca, mekanik testler olarak büzülme, soğukta darbe, yüksek sıcakta basınç, soğukta uzama, yaşlandırma öncesi ve sonrası çekme-kopma testleri yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları, kablo izolasyonunun çevrimler boyunca nasıl bir değişim gösterdiği ve standart dışı bir bozulma bulunup bulunmadığı açısından detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Isıtma çevrimi deneyinin simülasyon modeli, indüksiyonla ısıtmanın çoklu fiziksel analiz olarak ele alınmasıyla sonucu elemanlar yöntemine (SEY) dayalı bir olarak geliştirilmiştir olup, buradan elde edilen sonuçlar laboratuvar testlerinden ulaşılan sıcaklık ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak gerçekleştirilen mekanik ve elektriksel testler, 1x400/35mm² NA2XS_Y 20,3/35(42) kV tipi bir OG kablonun TSE K 204 kriterine uygunluğunun, kalitesinin ve dayanıklılığının belirlenmesine katkı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıtma çevrimi, ısıl yaşlandırma, orta gerilim kablosu.

ABSTRACT

TEST STUDIES AND ANALYSIS AGED MEDIUM VOLTAGE CABLES

Muhammed Kaan ALEV

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Baris KUCUKAYDIN

July 2025, 74 pages

Medium Voltage (MV) cables, vital for electrical energy transmission and distribution, are manufactured to meet international standards and specific criteria. To assure performance and reliability, these cables undergo various electrical and mechanical tests in a laboratory for thorough analysis. This thesis focused on a 1x400/35 mm² NA2XSY type 20.3/35(42) kV MV cable, widely used in Türkiye and produced according to the TSE K 204 criteria. Both mechanical and electrical tests were performed on this cable.

The investigated 20.3/35(42) kV MV cable was aged per the TSE K 204 criteria, undergoing 20 heating cycles, each lasting 8 hours. Furthermore, in addition to the heating cycle aging procedure specified in the standard, a second heating cycle of 20 cycles was applied to the cable. Before and after these cycles, partial discharge and $\tan\delta$ measurements were conducted. Furthermore resistance measurement and spark testing, the cable underwent several mechanical evaluations: shrinkage, cold impact, pressure at high temperatures, elongation at low temperature, and tensile strength before and after aging. The measurement results were thoroughly analyzed to observe insulation behavior over cycles and identify any non-standard degradation. The simulation model of the heating cycle experiment was developed based on the finite element method (FEM), considering induction heating as a multiphysics problem, and results were compared with temperature data obtained from laboratory tests.

In conclusion, the comprehensive mechanical and electrical tests performed on the 1x400/35mm² NA2XSY 20.3/35(42) kV MV cable were instrumental in determining its conformity to TSE K 204 criteria, quality, and durability.

Anahtar Kelimeler: Heating cycle, thermal aging, medium voltage cable.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, birlikte çalışmaktan büyük onur ve gurur duyduğum kıymetli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN'a, bu zorlu yolculukta bana kattıkları ve yönlendirmeleri için en derin şükranlarımı sunarım.

Teze katkıları bulunan Anabilim Dalı Başkanımız Doç. Dr. Hasan TİRYAKI'ye katkıları için teşekkür ederim.

Tez sürecimde uzmanlıklarıyla tezimin bilimsel derinliğine katkı sağlayan, fikirleri ve rehberlikleriyle bana ilham veren değerli yöneticilerim Recep PEKER'e ve Taner YAZGAN'a gönülden teşekkür ederim.

Tez kapsamında gerçekleştirilen mekanik testlerde büyük emekleri olan Hüseyin BAŞAK'a, elektriksel testler ve ısıtma çevrimi deneylerindeki katkılarıyla sürece değer katan Hüseyin BATAK başta olmak üzere bu süreç boyunca yanımda olan tüm kıymetli çalışma arkadaşlarıma ve VATAN KABLO ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Bu süreçte bana olan inancı ile moralimi ve motivasyonumu yüksek tutmada bana güç olan arkadaşlarım, Arif Can ÇEVİK'e ve Berkan SOFU'ya yürekten teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu yolculukta da en büyük destekçilerim olan, bu günlere gelebilmemde büyük emekleri olan, yeri geldiğinde benimle çalışan, varlıklarıyla bana güç veren, sevgileriyle yolumu aydınlatan canım annem Şenay ALEV'e ve canım babam Mitat ALEV'e sonsuz sevgi, saygı ve minnetlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Literatür Özeti.....	1
1.2. Tezin Amacı	6
1.3. Orijinal Katkı.....	6
2.ORTA GERİLİM KABLOLARINI YAŞLANDIRMA YÖNTEMLERİ	9
2.1. Yaşlandırmanın Amacı	9
2.2. Yaşlandırma Yöntemleri.....	11
2.2.1. Yüksek gerilimle elektriksel yaşlandırma.....	11
2.2.2. Ultraviyole (UV) uygulamasıyla yaşlandırma	12
2.2.3. Isıl yaşlandırma.....	13
2.2.4. Isıtma çevrimiyle yaşlandırma	15
3.ORTA GERİLİM KABLOLARINA UYGULANAN TESTLER.....	17
3.1. Mekanik Testler.....	17
3.2. Elektriksel Testler.....	21
3.3. Diğer Testler	25
4.DENEYSEL KABLO YAŞLANDIRMA ÇALIŞMALARI VE ÖLÇÜMLER.....	27
4.1. Yaşlandırma Testlerinin Uygulandığı Orta Gerilim Kablosu.....	27
4.2. Yaşlandırma Uygulama Devresinin Hazırlanması ve Gerçekleştirilmesi	32
4.3. Mekanik Test Sonuçları.....	38
4.4. Elektriksel Test Sonuçları.....	45
4.4.1. Kıvılcım deneyi.....	46
4.4.2. Direnç ölçümü deneyi	47
4.4.3. Kısmi boşalma ölçüm deneyi.....	48

4.4.4. Tanδ ölçüm deneyi.....	52
5. ISITMA ÇEVİRİMİ SİSTEMİNİN ÇOKLU FİZİKSEL SİMÜLASYON MODELİ	55
5.1. Simülasyon Modeli Tanıtımı	55
5.2. Çoklu Fiziksel Analiz Simülasyonu	59
5.3. Simülasyon Sonuçları ve Analizi	62
6.SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	74



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 4.1. Yaşlandırma testi uygulanan kablonun detaylı rumuzu	28
Çizelge 4.2. Kablo boyutsal analiz sonuçları	31
Çizelge 4.3. Çekme-kopma, yaşlandırma ve komple yaşlandırma test sonuçları	43
Çizelge 4.4. Kısmi boşalma deneyi sonuçları.....	52
Çizelge 4.5. Tan δ deneyinde uygulanan gerilim ile kapasite ve tan δ ölçüm değerleri .	54
Çizelge 5.1. Simülasyon modelinde kullanılan malzemelerin özellikleri	55



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1. Yaşlandırma süreci sonucunda malzeme bozulma mekanizması.....	10
Şekil 2.2. XLPE numune; a) Yaşlandırma öncesi, b) Yaşlandırma sonrası	14
Şekil 2.3. Isıtma çevrimi için bir döngü gösterimi	16
Şekil 3.1. TS EN 60811-501’de yer alan halter tipi numune	19
Şekil 3.2. Sıcakta çekme deneyi için numune işaretleme.....	20
Şekil 3.3. Tan δ fazör diyagramı gösterimi	24
Şekil 4.1. NA2XSİ tipi kablo dizaynı	28
Şekil 4.2. a) Profil projektör, b) Kalınlık ölçme komparatörü, c) Mikrometre kullanılarak yapılan örnek ölçümler	31
Şekil 4.3. a) Katman gösterimi, b) Katmanlarına ayrılmış kablo örneği.....	32
Şekil 4.4. İndüksiyon bobini içerisinde geçirilen kablo numunesi.....	34
Şekil 4.5. Test numunesinin pabuç bağlantısı	34
Şekil 4.6. a) Açılan kablo iletken, b) İletkene termokupl yerleştirilmesi.....	35
Şekil 4.7. Isıtma çevrimi devresi	36
Şekil 4.8. Isıtma çevrimi test düzeni bağlantı şeması.....	36
Şekil 4.9. 1. set ısıtma çevrimi sıcaklık takibi sonuçları	37
Şekil 4.10. 2. set ısıtma çevrimi sıcaklık takibi sonuçları	38
Şekil 4.11. Büzülme deneyi için etüve yerleştirilen numune	39
Şekil 4.12. a) Soğukta darbe deneyi düzeneği, b) Deney sonucu kılıf iç yüzeyi	39
Şekil 4.13. a) Sıcakta basınç deneyi düzeneği, b) Deney sonucu elde edilen çentik	40
Şekil 4.14. a) Kılıf numunesi, b) İzole halter numunesi.....	41
Şekil 4.15. Soğukta uzama deneyi.....	41
Şekil 4.16. a) Sıcakta çekme deneyi düzeneği, b) Test ölçümü	42
Şekil 4.17. a) Kılıf numunesinin cihaz yerleştirilmesi, b) Test sonrası kılıf, c) XLPE numunesinin cihaz yerleştirilmesi, d) Test sonrası XLPE.....	44
Şekil 4.18. Bükme deneyi.....	45
Şekil 4.19. Kılıf kıvrılcım deneyi	46
Şekil 4.20. a) Komple kabloda direnç ölçümü, b) İletken halinde direnç ölçümü	47
Şekil 4.21. a) Konsantrik ekran direnç ölçüm, b) Ölçülen direnç değeri	48
Şekil 4.22. Kısmi boşalma devresi	50
Şekil 4.23. Kısmi boşalma deney devresi gösterimi.....	51

Şekil 4.24. Pabuç takılmış kablo numunesi.....	52
Şekil 4.25. Tanδ deneyi için numunenin bağlantısı.....	53
Şekil 4.26. Tan delta ölçüm devresi şeması	54
Şekil 5.1. İndüksiyonla ısıtma simülasyon modeli geometrisi	58
Şekil 5.2. Geliştirilen 2 boyutlu modelin 3 boyutlu hali	58
Şekil 5.3. Modelde tanımlanan sınır koşulları.....	59
Şekil 5.4. İndüksiyonla ısıtma çoklu fiziksel analiz simülasyon modeli.....	60
Şekil 5.5. İndüksiyon bobinine uygulanan gerilimin değişimi (V(t)).....	61
Şekil 5.6. Ortam sıcaklığının değişimi (Tamb(t)).....	61
Şekil 5.7. Yüzey yayınlılık katsayısının değişimi ($\epsilon(t)$)	62
Şekil 5.8. Kablo iletkeninin elektriksel iletkenliğinin zamana bağlı değişimi	63
Şekil 5.9. Kablo iletkeninde oluşan güç kaybının zamana bağlı değişimi	64
Şekil 5.10. Isıtma çevrimlerinde kablo iletkeninde oluşan akım değişimlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Mavi: Deneysel, Kırmızı: Simülasyon) , a) 1. çevrim, b) 2. çevrim, c) 3. çevrim, d) 4. çevrim, e) 5. çevrim	64
Şekil 5.11. Isıtma çevrimlerindeki iletken sıcaklığı değişimlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Mavi: Deneysel, Kırmızı: Simülasyon) , a) 1. çevrim, b) 2. çevrim, c) 3. çevrim, d) 4. çevrim, e) 5. çevrim	65
Şekil 5.12. Kablo iletkeninde oluşan manyetik akı yoğunluğunun maksimum değerinin zamana bağlı değişimi	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Vektör potansiyeli (Wb/m)
α_{20}	Isı katsayısı 20°C’de (1/°C)
B	Manyetik akı yoğunluğu (T)
$C_{\%}$	Sıcakta basınç deneyi çentik oranı (%)
c_p	Isıl kapasite (J/kg.K)
d	İzolasyon çapı (mm)
δ	Sıcakta basınç deneyi öncesi numunenin kalınlığı (mm)
δ_1	Sıcakta basınç deneyi sonrası numunenin kalınlığı (mm)
D	Elektrik akısı yoğunluğunu (C/m ²)
Δ_t	Sıcaklık farkı (°C)
e	Kablo çapı (mm)
E	Elektrik alan büyüklüğü (kV/mm)
$\varepsilon(t)$	Yüzey yayınlılık katsayısının değişimi
F	Sıcakta basınç deneyi için kuvvet (N)
H	Manyetik alanı (A/m)
I	Hat akımı (A)
I_C	Kapasitif akım
I_R	Rezistif akım
J	Akım yoğunluğu (A/m ²)
J_e	Harici akım yoğunluğu (A/m ²)
k	Isıl iletkenliği (W/m.K)
l	İletken uzunluğu (m)
M	Sıcakta basınç deneyi için derinlik (mm)
n	Sıcakta basınç deneyi için kat sayısı

N	Halter numune genişliğinin en ince yeri (mm)
P	Aktif güç (watt)
σ_{Al}	Alüminyum iletken iletkenliği (MS/m)
Q	Ek ısı kaynağı (W/m ³)
Q_{ted}	Isıl esnek sönümlleme
q	İletim yoluyla gerçekleşen ısı akısını(W/m ²)
R_{20}	20°C sıcaklıktaki direnç (ohm)
R_{AC}	AC direnci (Ω)
R_{DC}	DC direnci (ohm)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ρ_i	İletkenin özdirenci ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}.$)
s	Kesit alanı (mm ²)
σ	Elektriksel iletkenlik (S/m)
φ_{Al}	Alüminyum iletken direnci (Ω/km)
T	Sıcaklık (K)
T_{amb}(t)	Ortam sıcaklığının değişimi (°C)
u	Öteleme hareketinin hız vektörü (m/s)
U	Anma gerilimi (kV)
U_o	Nominal gerilim (kV)
U_m	Maksimum gerilim (kV)
v	Hız (m/s)
V(t)	Bobinine uygulanan gerilim (V)
w	Alüminyum iletken birim ağırlığı (g/m)
x	Alüminyum yoğunluğu (g/cm ³)
Y	Sıcakta çekme deneyi için ağırlık (g)
Z	Halter numune kalınlığının en ince yeri (mm)
ω	Açısal frekans (rad/s)

Kısaltmalar

Açıklamalar

AAC	Tam alüminyum iletken
AC	Alternatif akım
ACSR	Çelik özlü alüminyum iletken
AG	Alçak gerilim
CPR	İnşaat ürünleri yönetmeliği

CV	Sürekli vulkanizasyon
DC	Doğru akım
EPR	Etilen propilen kauçuk
FS	Dikey alev yayılımı (Flame spread)
OG	Orta gerilim (Medium voltage)
PE	Polietilen
PVC	Polivinil klorür
THR	Toplam ısı salınımı (Total Heat Release)
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
UV	Ultraviyole
XLPE	Çapraz bağlı polietilen
YG	Yüksek gerilim

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, Türkiye'de yaygın olarak kullanılan ve TSE K 204 kriterine uygun şekilde üretilen 1x400/35mm² kesitli NA2XSY tipi 20,3/35(42) kV'luk orta gerilim kablosu üzerinde çeşitli elektriksel ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Kablo, her biri 8 saat süren iki ayrı 20 ısıtma çevrimiyle yaşlandırılmış olup, yaşlandırma öncesinde direnç ve kıvılcım testleri, çevrimlerin hem öncesinde hem sonrasında ise kısmi deşarj ve tanδ testleri uygulanmıştır. Ayrıca büzülme, soğukta darbe, yüksek sıcaklıkta basınç, soğukta uzama ve yaşlandırma öncesi ile sonrası çekme-kopma gibi mekanik testlerle kablonun performansı değerlendirilmiştir. Oluşturulan çoklu fiziksel analiz simülasyon modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel ölçüm verileri karşılaştırılarak ulaşılan sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Elektrik enerjisinin güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde iletimi ile dağıtımı, modern toplumların altyapısında önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda kullanılan güç kabloları, yalnızca enerji dağıtımını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda sistem güvenilirliği, çevresel etkilerin azaltılması ve uzun vadeli ekonomik verimlilik açısından da kritik bir öneme sahiptir. Özellikle artan enerji talepleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve şehirleşmenin yoğunlaşması, güç kablolarının tasarımında ve performansında daha yüksek standartlara duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır [1]. Ortaya çıkan bu gereksinim farklı amaçlara hizmet eden kablo tiplerine yol açmakla kalmayıp, çeşitli uluslararası standartlarda ve kriterlerde üretilen güç kablolarının üretilmesine sebep olmuştur.

Elektrik enerji sistemlerinde kullanılan kablolar genel olarak gerilim seviyelerine göre üç ana gruba ayrılmaktadır. Alçak gerilim (AG) kabloları, düşük gerilimli (1kV ve altı) elektrik sistemlerinde, özellikle binalar, sanayi tesisleri ve kısa mesafeli enerji dağıtım hatlarında güvenli ve verimli enerji transferi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Enerji taleplerindeki artış ve mesafelerin uzaması, alçak gerilim sistemlerinin kapasite sınırlarını zorlamış ve bu durum daha yüksek gerilim seviyelerine olan ihtiyacı beraberinde getirmiştir [2]. Haberleşme için kullanılan veri kabloları, alçak gerilim

sistemlerinde kullanılmakta olup, özellikle binalar arası bağlantılarda ve iç mekan uygulamalarında yüksek hızlı ve güvenilir veri transferi sağlamaktadır [3]. Bu ihtiyaç doğrultusunda ortaya çıkan orta gerilim (OG) kabloları, 1 kV ile 36 kV aralığındaki gerilim düzeylerinde çalışarak, özellikle şehir şebekeleri, endüstriyel alanlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu gibi uygulamalarda daha yüksek güç taşıma kapasitesi ve artan sistem güvenilirliği sunmaktadır [4]. Gerilim seviyesine göre sınıflandırılan kablolar içerisinde en yüksek gerilim seviyesine sahip olan yüksek gerilim (YG) kabloları ise, 36 kV üstü gerilim seviyelerinde uzun mesafeli enerji iletimi sağlamak amacıyla geliştirilmiş olup, özellikle iletim sistemlerinde ve büyük ölçekli enerji projelerinde yer almaktadır [5,6]. YG ve OG kabloları hem yer altı sistemleri hem de havai hatlarla yapılan enerji iletim ve dağıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Havai hatlar, düşük maliyetli kurulumları ve bakım kolaylıkları sayesinde uzun yıllardır yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Bu hatlarda, iletken olarak genellikle ACSR (Çelik Özlü Alüminyum İletken) ve AAC (Tam Alüminyum İletken) gibi çeşitli iletken tipleri kullanılmaktadır. Ancak, havai hatlar dış etkenlere açık olmaları nedeniyle, fırtına, buzlanma, yangın ve trafik kazaları gibi çevresel faktörlerden kolaylıkla etkilenmekte olup, bu da sistem arızalarına ve enerji kesintilerine neden olabilmektedir. Yer altı kabloları ise, doğrudan çevresel etkilerden korunarak, hava koşullarından bağımsız şekilde daha güvenilir bir enerji dağıtımı gerçekleştirmektedir. Yer altı kablolarının elektromanyetik alan yayılımı, havai hatlara göre daha sınırlı olup, çevresel etkilerin azaltılması ve görsel kirliliğin önlenmesi açısından da avantaj sağlamaktadır. Öte yandan, yer altı kablolarında meydana gelen arızaların tespiti ve onarımı, havai hatlara kıyasla daha karmaşık ve maliyetli olabilmektedir. Genel olarak, enerji dağıtım sistemlerinde havai hatlar düşük maliyet ve kolay erişim sağlarken, yer altı kabloları ise güvenlik, çevresel uyum ve uzun vadeli dayanım açısından önemli avantajlar sunmaktadır [7,8].

Güç kablolarının performansı büyük ölçüde çalışma sıcaklığına bağlıdır ve kablo yalıtım malzemelerinin termal dayanımı, uzun süreli işletim açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Özellikle yer altı kablolarında, dış ortam sıcaklığı, toprak sıcaklığı ve toprak ile kablo katmanlarının termal direnci, kablonun taşıyabileceği akım kapasitesini doğrudan etkileyerek, termal sınırların aşılması durumunda izolasyon yaşlanmasını ve arıza riskini artırmaktadır [9]. Bu hususlar göz önünde bulundurularak kabloların izolasyon ve dış kılıf malzemesi seçilmelidir. Dış

kılıf malzemesi olarak günümüzde geniş bir kullanım alanına sahip olan PVC (Polivinil Klorür) esaslı kablolar, uygun maliyetleri, kolay işlenebilirlikleri ve yanmaya karşı gösterdikleri direnç sayesinde birçok alçak ve orta gerilim uygulamasında tercih edilmektedir [10]. PE (Polietilen) esaslı kablolar ise, düşük dielektrik kayıpları, yüksek kimyasal dayanım ve üstün nem bariyer özellikleri ile özellikle yer altı kablo sistemlerinde kullanılmaktadır. PE malzemeler yüksek sıcaklıkta daha kararlı bir performans sergilemelerine rağmen, belirli sıcaklıkların üzerinde pirolitik bozunmaya uğrayarak mekanik dayanımlarında düşüş görülebilir [11]. Orta ve yüksek gerilim kablolarında ise, izolasyon malzemesi olarak XLPE (Çapraz Bağlı Polietilen) ve EPR (Etilen Propilen Kauçuk) esaslı çözümler tercih edilmektedir. XLPE izolasyon, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük dielektrik kaybı ve uzun ömürlü elektriksel performans gibi özellikleri ile tercih edilirken; EPR izolasyonlar ise yüksek esneklik, darbe dayanımı ve nem direnci gibi mekanik üstünlükler sunmaktadır. Ancak, XLPE malzemeler EPR'ye kıyasla yüksek gerilime karşı daha fazla dayanım sağlamakta olup, uzun süreli termal kararlılık avantajı sayesinde öne çıkmaktadır [12].

Güç kablolarında aşırı ısınmadan kaynaklı oluşan sorunları, özellikle yüksek gerilim altında çalışan güç sistemlerinde performans ve güvenliği tehdit eden önemli bir problemdir. Yer altı güç kablolarında iletken üzerinden geçen akımın oluşturduğu Joule kaybı, çevredeki toprağın kurumasına neden olur; bu da toprağın ısı iletkenliğini düşürerek kablonun etrafında sıcak noktaların oluşmasına ve kablonun daha da ısınmasına yol açar. Bu durum ise kablonun taşıyabileceği akım kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır [13]. Öte yandan, orta gerilim güç modüllerinde sıcaklık değişimlerine bağlı olarak, farklı malzemelerin genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk nedeniyle bakır katmanların diğer yüzeylerden ayrılması (delaminasyon) gibi yapısal arızalar da ortaya çıkmaktadır. Takahashi ve arkadaşları, bu delaminasyonların özellikle bakır desenlerin kenarlarında biriken yoğun termomekanik gerilmelerle ilişkili olduğunu göstermiş ve yapılan üç boyutlu termal stres simülasyonları sayesinde bu zayıf noktalar önceden tahmin edilebilmiştir [14]. Ayrıca, XLPE izolasyonlu kablolarda yük döngüleri sırasında iletkenin sıcaklığı ve yalıtım katmanındaki sıcaklık gradyanı kontrol altına alınmadığında yalıtım malzemesi zarar görebilir. Bu nedenle, yük akımının optimize edilmesi için geliştirilen stratejiler sayesinde sıcaklık parametreleri sınır değerler içinde tutulmakta ve böylece test süreci hem daha güvenli hem de verimli hale getirilmektedir [15].

Kablo üretimi ve saha uygulamaları, yalnızca malzeme seçimi ve tasarım parametreleri ile sınırlı kalmayıp, ulusal ve uluslararası standartlar tarafından belirlenen teknik kriterlere de bağlıdır. Endüstriyel uygulamalarda, özellikle sahada uzun süreli güvenilirlik ve uyum sağlamak için, kablo ürünlerinin mekanik, termal ve elektriksel performanslarını belirleyen standartlara tam uyum zorunluluğu bulunmaktadır [16]. Buna ek olarak, özellikle zorlu çevre koşullarına (örneğin; deniz altı, açık deniz platformları) yönelik uygulamalarda, sahaya özel teknik şartnameler geliştirilmekte ve bunlar kablo tasarımında standartlardan daha sıkı gereklilikler getirebilmektedir [17]. Sadece proje bazlı şartnameler değil, aynı zamanda ülkeye veya bölgeye göre özel kriterler ve prosedürler de uygulanabilmektedir. Bu noktada, yalnızca kullanılacak malzemenin özel olması yeterli olmayıp, aynı malzemenin farklı koşullarda teste tabi tutulması veya ilave test süreçlerine maruz bırakılması da söz konusu olabilmektedir.

Güç kabloları için gerçekleştirilen testler; rutin testler, numune testleri ve tip testleri olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Rutin testler, üretilen her bir kablo partisinde imalat hatalarını tespit etmek ve seri üretimde sürekli kalite kontrolünü sağlamak amacıyla düzenli olarak uygulanan testlerdir. Numune testleri ise, üretim sırasında belirli aralıklarla seçilen kablo örnekleri üzerinde yapılan ve tipik ürün özelliklerinin sürekliliğini doğrulamayı hedefleyen ara kalite kontrol testleridir. Tip testleri, ise yeni geliştirilen bir kablo tasarımının veya malzeme kombinasyonunun performansını doğrulamak amacıyla bir defaya mahsus gerçekleştirilen kapsamlı testlerdir [18].

Güç kablolarına uygulanan tip testler, kablonun kullanım ortamında göstereceği performans hakkında bir ön bilgi vermektedir. Bu testler, mekanik testler ve elektriksel testler olmak üzere iki başlıkta incelemektedir. Kablo yalıtım malzemelerinin mekanik dayanımını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen en temel test çekme ve kopma testidir. Kablonun servis ömrü boyunca karşılaşılabileceği gerilme kuvvetlerine karşı göstereceği mekanik direncin belirlenmesi amacıyla yapılan bu test, ısıtma ve soğutma sonrasında oluşan bozulmayı da gözler önüne sermektedir [19]. Soğuk hava koşullarına karşı kablo dayanımını görmek için yapılan düşük sıcaklıkta darbe ve bükülme testleri ise, yalıtım malzemesinin gevrekleşme davranışını ve mekanik bütünlüğünü koruyabilme yeteneğini değerlendirmek için uygulanmaktadır [20].

Kabloları yapılan elektriksel testlerde, en temel hususlardan biri olan iletkenlik performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen direnç ölçümlerinde, iletken

sabit bir akım uygulanmakta ve gerilim düşümü ölçülerek birim uzunluk başına düşen elektriksel direnç hesaplanmaktadır [21]. Kablo izolasyonunun genel durumunun değerlendirilmesi ve üretim hatalarının tespitine yönelik olarak gerçekleştirilen kısmi boşalma testlerinde, iletken yüksek gerilim uygulanmakta ve meydana gelen boşalma aktiviteleri ölçülerek değerlendirme yapılmaktadır [22]. Tanδ testinde ise kablonun izolasyon sisteminde oluşan dielektrik kayıpların belirlenmesi için gerekli olan verileri elde edilerek, aynı zamanda malzeme durumunun ve yaşlanma seviyesinin değerlendirilmesi için kullanılır [23]. Ayrıca, kablo izolasyonunun elektriksel dayanımını değerlendirmek için uygulanan gerilim testlerinde, kablo belirli sıcaklıklarda sabit gerilime maruz bırakılarak dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimi gözlemlenir [24].

Güç kablolarının kalite değerlendirmesi için genellikle kullanılan standartlar IEC 60502-2 ve IEC 60840'tır. Bu standartlarda yer alan ısıtma çevrimi deneyi, kablonun yük altında uzun süreli çalışma sonrası performansının ve yalıtım dayanıklılığının incelenmesine imkan sağlayan bir süreçten oluşmaktadır [25]. IEC 60502-2 standardına ve TSE K 204 kriterine uygun olarak, ısıtma çevrimi deneyi her biri 8 saat olmak üzere toplamda 20 çevrimden oluşmaktadır. Fakat bu deneylerde bir kıyaslama ortamı oluşturmak ve elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla farklı ısıtma çevrimi süreçleri gerçekleştirilebilir [26]. Pélissou ve arkadaşları, bu amaçla 8 saatlik ısıtma ve 16 saatlik soğutma sürelerinden oluşan ısıtma çevrimi testlerini sekiz farklı senaryoda uygulanmıştır [27].

Isıtma çevrimi deneyi tek başına sadece kablo numunesinin yüzeyinde gözle görülebilir bir kusur varsa fark edilmesini sağlayacaktır. Isıtma çevrimi sonrasında tanδ ve kısmi boşalma deneyleri, izolasyondaki yaşlanmanın veya bozulmanın incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir. Tanδ ölçümleri, yalıtımdaki yaşlanma ve termal bozulmayı gösteren güç kayıplarını ortaya koyar [28]. Kısmi boşalma testleri ise izolasyon kusurlarını tespit etmekle birlikte, özellikle çevrim içi kısmi boşalmaların izlenmesi ile izolasyon bozulmalarının çevrim dışı testlerden daha erken saptanmasını sağlayabilmektedir [29].

Isıtma çevrimi deneyi ortalama sıcaklığın yüksek olduğu yaz aylarında yaşanabilecek kablolarda aşırı ısınmadan kaynaklı sorunları ön görmek adına kullanılabilir. Artan sıcaklık ile beraber OG kablolarının yalıtım bozulmasını gözlemlemek adına farklı

kablolar ısıtma çevrimi deneyleri gerçekleştirmiş olan Borghetto ve arkadaşları, hem malzeme seçiminin sıcaklık üzerindeki etkisini hem de soğuma evrelerinde kısmi boşalma değerinin iç boşluk kaynaklı yalıtım kusurlarıyla ilişkili olduğunu açığa çıkarmıştır [30,31].

Isıtma çevrimi deneyini simüle etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi tabanlı birçok program kullanılabilmektedir. Uzun süreli ısıtma çevrimlerinin sonuçlarının simülasyon ortamında yaratılabilmesi sağlanabilir [32]. Aynı zamanda, farklı yalıtım malzemeleri içeren kablolar bu sayede kıyaslanabilir. Hamdan, dört farklı malzeme üzerinde gerçekleştirdiği ısıtma çevrimini detaylı bir şekilde incelemiş ve termal çevrim koşulları altında arayüz güvenilirliğini değerlendiren gelişmiş bir analiz sunmaktadır [33]. Ayrıca karmaşık sistemlerin temel bir çözümünü sunan Yanpeng ve arkadaşları, 12 katmanlı modelini 6 katmanla sadeleştirerek, %0,13 hata oranına sahip bir simülasyon gerçekleştirmiştir. Isıtma çevrimlerinin yalıtım içi sıcaklık gradyanına etkisi incelenmiş olup, bu analiz karmaşık kablo yapıları için hızlı ve doğru termal analiz imkânı sunmuştur [34].

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, TSE K 204 kriterlerine uygun olarak üretilmiş olan 1x400/35 mm² kesitli NA2XSYP tipi 20,3/35(42) kV'luk orta gerilim kablosunun uzun süreli ısı performansını analiz etmektir. Bu kapsamda, standartlara uygun şekilde uygulanan ısıtma çevrimi yaşlandırma testinin yanı sıra, aynı kablo numunesine ilave bir ısıtma çevrim seti daha uygulanarak yaşlandırmanın etkileri derinlemesine incelenmiştir. Yaşlandırma çevrimleri öncesinde kabloya çeşitli mekanik testler (çekme-kopma, büzülme, soğukta darbe vb.) uygulanmış, yaşlandırma çevrimlerinin öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen elektriksel testler (kısmi boşalma, tan δ , kıvılcım, direnç ölçümü) ile kablo izolasyonundaki değişimler izlenmiştir. Ayrıca, ısıtma çevrimi simülasyon modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın amacı, kablo izolasyon sisteminin uzun vadeli güvenilirliğini değerlendirmek, ilave yaşlandırmanın etkilerini ortaya koymak ve sayısal modelleme ile deneysel sonuçlar arasında bir korelasyon kurmaktır.

1.3. Orijinal Katkı

Bu tez çalışması, literatürde sıklıkla uygulanan tek setlik ısıtma çevrimi yaşlandırma testlerinin ötesine geçerek, aynı kablo numunesine art arda iki set ısıtma çevrimi

uygulanmasıyla özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Her bir yaşlandırma seti öncesinde ve sonrasında ayrı ayrı gerçekleştirilen $\tan\delta$ ve kısmi boşalma testleri ile kablo izolasyonunun bozulma düzeyi izlenmiştir. Ayrıca, laboratuvar ortamında elde edilen sıcaklık verileri ile SEY simülasyonları yapılan çoklu fiziksel modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, simülasyonların gerçek ortam koşullarını ne derece yansıttığı analiz edilmiştir. Bu kapsamda, çalışmanın özgün katkısı, hem yaşlandırma süreçlerinin kablo performansı üzerindeki kümülatif etkilerinin değerlendirilmesi hem de deneysel ve sayısal yöntemlerin bütünleştirilmesiyle kapsamlı bir inceleme sunulmasıdır.



2. ORTA GERİLİM KABLOLARINI YAŞLANDIRMA YÖNTEMLERİ

Elektrik güç sistemlerinde kullanılan kablolar, uzun yıllar boyunca çeşitli çevresel ve işletme kaynaklı streslere maruz kalmakta ve bu durum, yalıtım malzemelerinde zamanla fiziksel, kimyasal ve elektriksel bozulmalara neden olmaktadır. OG kabloların güvenilirliğini ve hizmet ömrünü belirleyebilmek için, bu bozulmaların malzeme üzerindeki etkilerinin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında yapılan yaşlandırma testleri, gerçek servis koşullarını hızlandırılmış yöntemlerle taklit ederek kabloların performansını değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu bölümde, yaşlandırma testlerinin temel amaçları ve uygulama prensipleri ele alınmıştır.

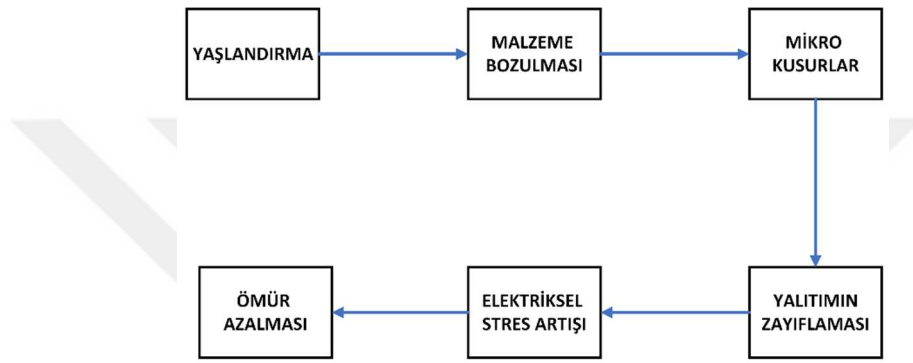
2.1. Yaşlandırmanın Amacı

Yaşlandırma testlerinin temel amacı, malzemedeki normal işletme koşullarında yıllar içerisinde gerçekleşebilecek bozulma süreçlerini, hızlandırılmış koşullar altında kısa sürede meydana gelmesini sağlayarak kablonun ömrünü tahmin etmek ve bu yaşlandırma koşullarında oluşabilecek sorunları gözlemlemektir. Bu yaklaşımla, normal şartlarda yıllarca sürececek bozulmalar hızlandırılmış testler aracılığıyla günler veya haftalar içinde elde edilebilmektedir.

Yaşlandırma testleri, yalnızca kabloların belirli çevresel ve elektriksel koşullara dayanıklılığını değerlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda endüstriyel açıdan çok yönlü faydalar da sunar. Bu testler, kablo yalıtım sistemlerinin uzun vadeli performansının analiz edilmesi ve kalite güvencesinin sağlanması açısından kritik bir role sahiptir. Özellikle farklı yalıtım malzemeleri ve formülasyonlarının dayanım düzeylerinin karşılaştırılması için bir zemin oluşturur. Örneğin, XLPE yalıtımlı iki farklı kablonun farklı sıcaklıklarda ve farklı ısıtma çevrim sayılarında yaşlandırmaya tabi tutulması, bu malzemelerin beklenen ömürleri açısından karşılaştırılmasına olanak tanır. Elde edilen test sonuçları, kabloların kullanım ömrü boyunca güvenli bir şekilde işletilebilme durumunu değerlendirmeyi, ilgili standartlara uygunluğunu doğrulamayı ve yeni ürün geliştirme süreçlerine girdi oluşturmaya sağlamaktadır. Buna ek olarak, yaşlandırma

testleri olası arıza nedenlerinin belirlenmesine ve kapsamlı bir kalite kontrol sürecinin yürütülmesine de yardımcı olur.

Yaşlandırma sürecinin kablo üzerindeki etkilerini daha somut biçimde ifade edebilmek adına Şekil 2.1’de, yalıtkan malzemenin bozulma mekanizmasının ilerleyişi bir akış diyagramı ile gösterilmiştir. Bu görsel, yaşlandırma süreciyle başlayan, ardından malzeme üzerinde oluşan mikro bozulmalara ve nihayetinde elektriksel stresin artışıyla birlikte kablonun ömrünün kışalmasına kadar uzanan bir bozulma zincirini betimlemektedir.



Şekil 2.1. Yaşlandırma süreci sonucunda malzeme bozulma mekanizması

Yaşlandırma sürecinin kablo yalıtım malzemeleri üzerindeki etkileri yalnızca bir parametreye bağlı değildir; aksine, termal, mekanik, kimyasal ve elektriksel etkenlerin zamanla birikimli etkisi sonucu ortaya çıkan çok katmanlı bir bozulma süreci söz konusudur. Bu nedenle, yaşlandırma testleri yalnızca belirli bir özelliğin değişimi yerine farklı parametrelerin değişimlerinin birbirini tetikleyerek malzeme bütünlüğünü nasıl etkilediğini anlamayı amaçlar. Özellikle ısıtma çevrimi gibi tekrarlanan termal stresler, mikro ölçekte yapısal gevşemelere ve çatlak oluşumlarına zemin hazırlayarak, zamanla elektriksel özelliklerde geriye dönüşü olmayan kayıplara yol açabilir. Bu tür kapsamlı değerlendirmeler sayesinde, kabloların gerçek servis koşullarındaki davranışlarına daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu kapsamda kullanılan yaşlandırma testleri, malzeme davranışını farklı stres koşulları altında değerlendirmek üzere çeşitlendirilmiştir. Termal yaşlandırma testinde, malzeme belirli bir süre yüksek sıcaklık ortamında tutularak ısıtmanın neden olduğu bozulma süreçleri hızlandırılır. Elektriksel yaşlandırmada ise yalıtım malzemesine yüksek gerilim uygulanarak elektriksel stresin malzeme üzerindeki uzun vadeli etkileri

incelenir. UV (Ultraviyole) yaşlandırma testinde, malzeme yoğun ultraviyole ışığa maruz bırakılarak güneş ışığı kaynaklı fotooksidatif bozulmanın oluşması sağlanır.

Yaşlandırma testlerinin çeşitliliği, gerçek servis koşullarını laboratuvarında daha gerçekçi bir şekilde temsil etme olanağı tanır. Elde edilen veriler kabloların uzun dönem davranışını güvenilir biçimde yansıtır ve ömür tahminlerinin doğruluğunu artırır. Nihai olarak, bu bulgulara dayanarak daha güvenilir ve dayanıklı kablo sistemleri tasarlanabilmektedir. Böylece enerji dağıtımında uzun vadeli güvenlik ve verimlilik sağlanabilmektedir.

2.2. Yaşlandırma Yöntemleri

Yaşlandırma testleri, güç kablolarının gerçek işletme koşullarına en yakın sonuçları elde etmek amacıyla farklı yöntemlerle uygulanmaktadır. Bu testler, farklı yaşlandırma tipleri aracılığıyla belirli stres faktörlerini öne çıkararak, malzeme davranışını çeşitli açılardan değerlendirmeye olanak tanır. Her bir yaşlandırma yöntemi, belirli bir parametrenin veya birkaç durumun etkisini izlemeye olanak tanırken, aynı zamanda malzeme üzerinde oluşturduğu bozucu etkilerin nasıl başladığını ve zamanla nasıl ilerlediğini detaylı şekilde analiz etmeye yardımcı olur. Böylece hem tekil streslerin hem de çoklu stres koşullarının oluşturduğu birleşik etkilerin, yalıtım malzemelerinin performansı üzerindeki rolü daha kapsamlı bir biçimde ortaya konulabilir. Aşağıda OG kabloları başta olmak üzere güç kabloları için gerçekleştirilen yaşlandırma yöntemleri teknik ve uygulama yönleriyle açıklanmıştır.

2.2.1. Yüksek gerilimle elektriksel yaşlandırma

Elektriksel yaşlandırmada, kablonun yalıtım sistemine sürekli veya tekrarlı yüksek gerilim uygulanarak zamanla oluşabilecek dielektrik bozulmaların gözlemlenmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntem, özellikle orta ve yüksek gerilim seviyesindeki güç kabloları için kritik öneme sahiptir; zira uzun süreli elektriksel stres, yalıtım malzemesinin dielektrik dayanımını zayıflatarak kısmi boşalma, elektriksel ağaçlanma gibi arızalara neden olabilmektedir. Bu yaşlandırma sürecinde; $\tan\delta$, kısmi boşalma değeri, darbe gerilimi ve kısmi boşalma başlangıç gerilimi gibi parametrelerdeki değişimler izlenmektedir. Özellikle kısmi boşalma, yalıtım içindeki zayıf noktaları hedef alır ve uzun vadede kablonun delinmesine kadar ilerleyebilir [35].

HD 620 ve IEEE 1407 gibi elektriksel yaşlandırma testi içeren standartlarda belirtilen gerilim değerleri doğrultusunda, test süresince standarda uygun seviyede bir gerilim verilmektedir. Bu gerilim düzeyi sabit bir sıcaklık altında uzun süre boyunca sürdürülür. Test süresi, yalıtımın dayanımına göre saatler veya günler sürebilir. Süreç boyunca yalıtımın iç yapısında oluşabilecek bozulmalar takip edilir. Eğer bu süreçte kablonun yalıtımı bozulursa (örneğin delinme oluşursa), bu durumda kablonun testten geçemediği ve standardın ön gördüğü test gerilim seviyelerine dayanamadığı anlaşılmaktadır.

Bir diğer elektriksel yaşlandırma deneyi ise darbe gerilimi ile yaşlandırmadır. Elektriksel izolasyon sistemlerinin özellikle yıldırım darbesi gibi yüksek gerilim darbelerine maruz kaldığında göstereceği davranışı laboratuvar ortamında gerçekleştirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yaşlandırma türünde, kablo numunelerine test standardının uygun gördüğü süre boyunca tekrarlı olarak yüksek genlikli darbe gerilimleri uygulanır. Genellikle 1,2/50 μ s zaman karakteristiğine sahip yıldırım darbe gerilimleri tercih edilir. Bu darbe formu, yıldırımın izolasyon üzerinde oluşturduğu kısa süreli ve yüksek enerjili elektriksel zorlanmaları temsil eder. Uygulanan bu yüksek gerilim darbeleri, kablonun izolasyon yapısında kısmi elektriksel stres bölgeleri oluşturarak, elektriksel ağaçlanma, mikroskobik çatlaklar ve kısmi boşalma gibi bozulmaların daha kısa sürede gelişmesine neden olur [36].

Testin sonucunda, malzemenin dielektrik kayıpları, deşarj seviyeleri ve genel bozulma eğilimleri analiz edilerek kablonun servis ömrü hakkında öngörülerde bulunulabilir. Elektriksel yaşlandırma, sahadaki gerçek koşulları doğrudan meydana getirebilmesi bakımından, tanılayıcı bakım stratejileri ve kalite güvence uygulamaları için bilgiler teşkil etmektedir.

2.2.2. Ultraviyole (UV) uygulamasıyla yaşlandırma

UV yaşlandırma testi, uzun süreli güneş ışığına maruz kalan kabloların UV ışıınımı etkisiyle karşılaştıkları yapısal ve fiziksel değişimleri değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu test yöntemi, özellikle dış ortamlarda kullanılan kabloların çevresel dayanımının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TS EN 50618 standardına göre üretilen fotovoltaik (solar) kablolar ile TS EN 50620 standardına uygun olarak imal edilen elektrikli araç şarj kabloları, bu test kapsama giren başlıca kablo ürün gruplarıdır.

UV yaşlandırma testleri, uygun test kabinlerinde gerçekleştirilmelidir. Yaşlandırma testi sayesinde, bu kabloların dış kılıf malzemelerinin ışınım etkisiyle zaman içerisinde gösterdiği performans kayıpları, çatlama, sertleşme veya renk değişimi gibi olumsuzluklar belirlenerek, ürünlerin uzun vadeli dayanımı hakkında bilgi edinilmektedir. UV ışınları polimer zincirlerinde bağ kopmalarına, fotooksidatif bozunmalara ve karbonil gibi oksijenli grupların oluşumuna neden olur. Uzun süreli UV maruziyeti sonucunda yüzey çatlamaları ve dielektrik özelliklerde kayıplar meydana gelebilir. Bu tür testler, özellikle dış ortama açık enerji kablolarının malzeme seçimi ve UV stabilizasyon katkılarının etkinliğini belirlemek için önemlidir [37].

2.2.3. Isıl yaşlandırma

Isıl yaşlandırma testi, güç kabloları üzerinde gerçekleştirilen temel yaşlandırma prosedürlerinden biridir. Bu test, yalnızca ısıya maruz bırakılan bir kablonun zaman içerisindeki elektriksel ve mekanik performans değişimini değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Numuneler, belirli sıcaklıklarda ve srelerde yaşlandırılarak test edilir.

Bu yaşlandırma testinin temel amacı; kablonun ısıl etkilere karşı fiziksel dayanımını belirlemek ve bu etkiler sonucunda kimyasal ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri analiz etmektir. Yaşlandırma işlemi, kablonun tamamı üzerinde veya yalnızca kılıf ve izolasyon malzemesi üzerinde gerçekleştirilebilir.

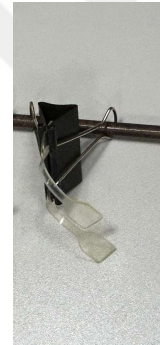
TS EN 60811-501 standardında belirtildiği üzere, kablo ve izolasyon çapına göre uygun olacak şekilde halter veya tp biçimli numune kullanılmalıdır. Yaşlandırma testi, TS EN 60811-401 standardına göre, numunelerin doğal veya zorlanmış hava akımı sağlayan bir hava etüvünde yaşlandırılması esasına dayanır. Bu etüv ortamında hava, numunelerin yüzeyine temas edecek şekilde alttan girerek etvn st kısmından dışarı çıkmalıdır. Testin gerçekleştirildiği etüv içerisinde bir istisna haricinde fan bulundurulmamalıdır. Kauçuk malzemelerin testlerinde fan kullanılabilir ancak teyit amaçlı veya hatalı test sonucu şüphesi durumunda fansız bir ortam tercih edilmelidir. Etüv içerisinde yer alan numunelerin hacmi, etüv hacminin %2'sinden fazlasını kaplamamalıdır. Yerleştirilen numuneler birbiriyle temas etmemeli, olabildiğince etvn merkezinde birbirlerine yakın konumlandırılarak asılmalıdır.

Termal yaşlanma süreci boyunca, polimer yapıda zincir kesilmeleri, çapraz bağlarda zayıflama, kristallik artışı ve renk değişimleri gözlemlenir. Özellikle XLPE izolasyon malzemesinin yaşlandırılma testinde uygulanan sıcaklık değeri arttıkça fiziksel bozulma hızlanır. Bu da sıcaklık artışının doğrudan ömür üzerinde ne ölçüde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Farklı malzemelerle yapılan analizler, termal olarak stabil polimerlerin daha uzun ömürlü olduğunu göstermiştir [38].

Yaşlandırma sonrasında elde edilen çekme dayanımı ve kopmada uzama değerleri, yaşlandırılmamış numunelerle karşılaştırılarak yüzdesel değişim hesaplanmalıdır. Yaşlandırma öncesi ve sonrası için çekme kopma testleri arka arkaya yapılmalıdır. Ulaşılan sonuçlar, standartta belirtilen limitlere uygun olmalıdır. Ayrıca, numuneler yaşlandırma testinden sonra, ortam sıcaklığında ve doğrudan güneş ışığından korunmuş bir şekilde muhafaza edilmeleri önem arz etmektedir. Bu muhafaza işlemi için sıklıkla desikatör kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de yaşlandırma öncesi ve sonrası OG kablосunda yer alan XLPE izolasyon malzemesinin görünümünün değişimi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.2. XLPE numune; a) Yaşlandırma öncesi, b) Yaşlandırma sonrası

Termal dayanım testi ise daha kapsamlı bir ömür tahmin yöntemidir. TS IEC 60216 standardına dayalı bu testte, malzeme farklı sıcaklıklarda yaşlandırılır ve bu sıcaklıklarda testin sona erdiği ana kadar geçen süreler belirlenir. Standart gereği en az üç adet sıcaklık belirlenmelidir. Bu sıcaklıklar arasında en fazla 25 °K sıcaklık farkı bulunmalıdır. Her sıcaklık için bir bitiş noktası vardır. Bu nokta, kablo çeşitlerine göre değişiklik göstermekte olup, genellikle uzama değerinin %50’si olan nokta seçilir. Testler tamamlandıktan sonra süreler tayin edildikten sonra, Arrhenius grafiği kullanılarak ömür tahmini gerçekleştirilir. Solar kablolar başta olmak üzere XLPE izoleli kablolar da

sıklıkla uygulanan bu testte istenen sıcaklık değeri kablonun servis ömrü ya da 20000 saatlik çalışma ömründe dayanabileceği °C cinsinden sıcaklık değeri tayin edilebilir. Bu sıcaklık değeri sıcaklık indeksi olarak da adlandırılır [39].

2.2.4. Isıtma çevrimiyle yaşlandırma

Isıtma çevrimi, OG kablolarında kullanılan yalıtım sistemlerinin termal genleşme ve daralma etkilerine karşı yapısal bütünlüğünü ve elektriksel özelliklerini değerlendirmek amacıyla uygulanan önemli bir testtir. Bu test, temel olarak sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığını ve davranışını değerlendirmek amacıyla yapılır. Aynı zamanda, test numunesini düzenli periyotlarla ısıtıp soğutarak yapısal dayanımı, belirli sıcaklıklardaki elektrik iletiminin devamlılığı ve kablo başlıkları, ek yerleri ve bağlantı noktaları gibi ısı zorlanmalarına maruz kalan kritik bölgelerin davranışını analiz etmek için gerçekleştirilir. Test süresince uygulanacak olan akım kabloya bir güç kaynağı üzerinden direkt olarak bağlantı kurularak verilmemektedir. İndüksiyon bobinleri aracılığıyla indüksiyonla ısıtma prensibiyle yüklenen kablo, üzerinde oluşan sıcaklığı daha homojen hale getirir ve numune boyunca maksimum iletken sıcaklığının her noktada birbirine çok daha yakın olmasını sağlar. Ayrıca, kabloya direkt olarak gerilim uygulamak için bir sistem kurulursa, gerilim düzeyi ve güç ihtiyacı dikkate alındığında daha maliyetli bir sisteme ihtiyaç duyulacağı için indüksiyon bobini kullanılmaktadır. Deneyin amacı, kabloların servis koşullarındaki termal yüklemelere ne derece dayanıklı olduğunun laboratuvar ortamında oluşturulan test düzeniyle incelenip, uzun vadeli güvenilirlikleri hakkında öngörü sağlamaktır.

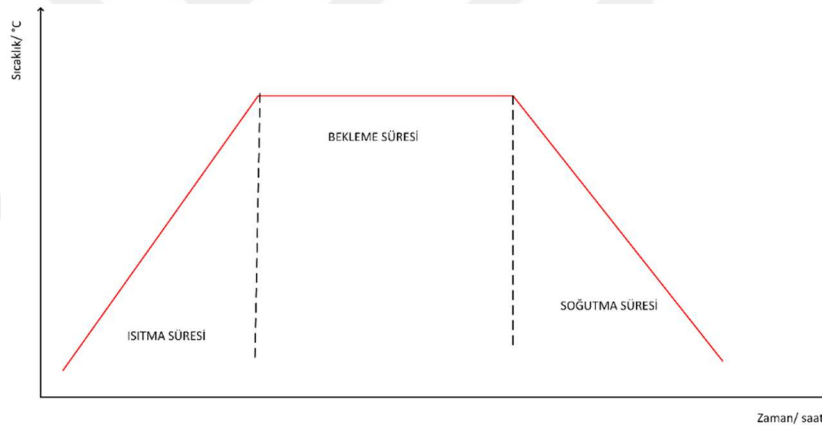
Bu test yöntemi, TS IEC 60502-2 standardında ve TSE K 204 kriterinde açıkça tanımlanmıştır ve tip testleri kapsamında değerlendirilir. Bu yöntem için oluşturulan deney sisteminde, güç kablosunda işletme sıcaklığının belirli bir seviyede aşılmasını sağlayacak akım taşıma kapasitesinin üzerinde bir akım değerinin oluşması sağlanmalıdır. Üç damarlı OG kablolarında akım her damardan geçecek şekilde ayarlanmalıdır. İlgili standarda göre uygulanan akım ile iletkenin sıcaklığı normal şartlarda en yüksek çalışma sıcaklığının yaklaşık 5-10 °C üzerine çıkarılır. Örneğin, XLPE yalıtkanlı bir OG kablosu için bu sıcaklık 95-100 °C aralığında seçilmelidir. Çünkü bu tür kablolar için normal şartlarda en yüksek çalışma sıcaklığı 90 °C olmakla birlikte, kısa devre anında dayanabileceği maksimum sıcaklık ise 250 °C olarak belirtilmiştir.

Test numunesi, doğal zemin üzerine serilmiş halde, çevrimsel olarak belirli ısıtma ve soğutma fazlarına maruz bırakılır. Her bir çevrim, üç temel aşamadan oluşur:

1. Isıtma Süresi: İletken sıcaklığı hedeflenen seviyeye kadar yükseltilir. En az 2 saat sürmelidir.
2. Bekleme Süresi: İstenilen sıcaklık seviyesinde bekletilen süredir.
3. Soğutma Süresi: Numune, doğal ortam koşullarında en az 3 saat süreyle soğumaya bırakılır.

Her çevrim yaklaşık 8 saatlik bir süreci kapsar ve bu çevrim toplamda 20 kez tekrarlanır. Bu süreler ve çevrim sayıları standart tarafından belirlenmiştir.

Şekil 2.3'te gösterilen bu çevrim üç ana fazdan oluşur: Isıtma süresi, bekleme süresi (maksimum sıcaklıkta sabit tutma) ve soğuma süresi.



Şekil 2.3. Isıtma çevrimi için bir döngü gösterimi

Test sırasında kablonun gerek mekanik stabilitesi gerekse dielektrik bütünlüğü sürekli izlenir. Isıtma çevrimleri boyunca herhangi bir arızalanma, deformasyon ya da kılıf ve yalıtım katmanlarında çatlama tespit edilmemelidir. Aksi takdirde, bu durum kablonun testten geçemediğini gösterir.

Bu deneyin başarıyla tamamlanması, kablonun öngörülen servis süresi boyunca karşılaşılabilecek termal streslere karşı yeterli yapısal bütünlük ve güvenilirlik sunduğunun bir göstergesidir. Bu nedenle, termal çevrim testi, özellikle şehir şebekelerinde, sanayi tesislerinde ve yer altı dağıtım sistemlerinde kullanılan OG kablolarının kalifikasyonu için vazgeçilmez bir araçtır.

3. ORTA GERİLİM KABLolarINA UYGULANAN TESTLER

OG kabloları enerji dağıtım şebekeleri başta olmak üzere, enerji üretim tesisleri, sanayi tesisleri, demir yolları, denizaltı ve yer altı enerji iletim hatları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kablolar, ürün kalitesini ve performansını değerlendirmek amacıyla IEC, EN, ISO, UL, VDE ve NF gibi uluslararası test standartlarına uygun olarak çeşitli testlerle incelenmektedir.

OG kablolarının fiziksel dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan mekanik testler; çekme, bükülme ve darbe gibi dış etkenlere karşı gösterilen mekanik direnci ölçmeye yöneliktir. Bu testler, kablonun kurulum, taşıma ve işletme süreçlerinde karşılaşılabileceği mekanik zorlanmalara karşı dayanıklılığını değerlendirmeye olanak tanır.

Kablonun elektriksel iletkenliğinin ve yalıtımının güvenli ve verimli bir şekilde sağlanıp sağlanmadığını belirlemek üzere ise çeşitli elektriksel testler uygulanmaktadır. Bu testler arasında iletkenlik (direnç) ölçümleri, dielektrik dayanım testi, kısmi boşalma ölçümleri ve $\tan\delta$ testleri yer almaktadır. Bu deneyler, kablonun izolasyon performansı ve işletme güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

OG kablolarının çevresel ve kimyasal etkilere karşı uzun süreli dayanımı değerlendirmek amacıyla farklı yaşlandırma testleri de uygulanmaktadır. Özellikle alev yayılımına karşı dayanım (yanmazlık) testleri, en yaygın kullanılan çevresel testlerdendir. Bununla birlikte, UV ışınımına dayanım, yağ dayanımı, kimyasal etkenlere karşı direnç ve radyasyon dayanımı gibi testler; kablonun zorlu çevre koşulları altındaki performansını ve hizmet ömrünü öngörmeye yönelik önemli veriler sağlamaktadır.

3.1. Mekanik Testler

Hava durumu ve mevsimsel koşullar, OG kablolarının performansı üzerinde doğrudan etkili olan çevresel faktörler arasında yer almaktadır. Bu kablolar, Afrika gibi yüksek sıcaklıkların yaşandığı coğrafyalarda ve Rusya gibi aşırı soğuk iklimlerde kullanılabilir. Bu nedenle kabloların farklı iklim koşullarına karşı dayanıklılık

göstermesi ve çevresel değişkenlere uyum sağlayabilmesi, sistemin genel güvenilirliğini ve performans ömrünü artırmak açısından kritik bir gerekliliktir [40].

Kablolar, üretimden başlayan, taşıma, kurulum ve kullanma aşamalarında devam eden çeşitli mekanik etkilere maruz kalmaktadır. Bu süreçler boyunca kabloların fiziksel darbelere, çekme kuvvetlerine ve bükülmelere dayanıklı olması beklenmektedir. Ancak, çevresel faktörler ve mekanik kuvvetler zamanla yalıtımda veya dış kılıfta bozulmalara neden olabilmektedir [41]. Bu tür bozulmalar, kablonun mekanik dayanımını zayıflatarak çatlak oluşumu, yüzey kırılmaları, renk değişimleri ve esneklik kaybı gibi fiziksel deformasyonlara yol açmaktadır.

Mekanik bozulmaları değerlendirmek ve bahsi geçen durumlar altında kaldığında kablonun hasar görüp görmeyeceğine dair kestirimde bulunmak adına bir dizi mekanik test uygulanmaktadır. TS IEC 60811-500 serisi başta olmak üzere ASTM D638, ATSM D882 ve ISO 527-1 gibi birçok uluslararası standart bu mekanik testleri içermektedir. Bu tez çalışmasında, TS IEC 60811-500 serisi baz alınarak ilgili mekanik testler yapılmış ve ulaşılan sonuçlar analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen testler ve ele alınan koşullar aşağıda detaylı bir biçimde aktarılmaktadır.

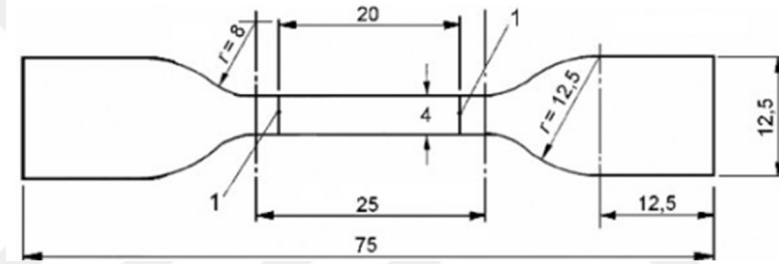
Büzülme deneyi; kablo izolasyonunun yüksek sıcaklıkta ısı kararlılık ve boyutsal stabilitesini ölçmek amacıyla yapılmaktadır. Deney öncesinde, numune dış kılıfından ayrılarak, sadece izolasyon kısmı bırakılmaktadır. TS EN 60811-502 standardına uygun olarak gerçekleştirilen testte numune boyunun 300mm olması gerekmektedir. Numune boyutları kablo çeşitliliğine göre değişmektedir. Her iki uçtan 2-5 mm boşluk kalacak şekilde 200 ± 5 mm bir uzunluk işaretlenmelidir. Daha sonra, etüvde ilgili standardın belirtmiş olduğu sıcaklıkta ve sürede numune bekletilmelidir. Etüvden çıkartılan numunede çizili olan işaretler arasındaki mesafe tekrardan ölçülmeli ve ilk ölçüm ile arasındaki değişim oranı %4'ten daha az olması durumunda test başarılı kabul edilmelidir.

Büzülme deneyinde olduğu gibi kablonun düşük sıcaklarda dayanımını gösteren bir diğer test ise soğukta darbe testidir. Bu test TS EN 60811-506 standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. Uzunluğu en az 150 mm olan kablo numunesi uygun test aparatına yerleştirilir. (-15 ± 3) °C sıcaklıkta 16 saat boyunca numune bekletilmelidir. Daha sonrasında 100 mm yükseklikten, dış çapa uygun olan ağırlıktaki çekiç

numunenin üzerine bırakılır. Test sonucunda kılıf yüzeyinde herhangi bir çatlama veya deformasyon yaşanmaması gerekmektedir.

Yüksek sıcaklıkta basınç testi için TS EN 60811-508 standardı uygulanmaktadır. Standarda uygun olarak ayarlanan numune ve ağırlıklar, istenen süre ve sıcaklıkta etüv içerisinde bırakılır. Test sonunda numunenin yüzeyinde oluşan çentik ölçülür. Azami çentik oranı %50'dir.

Soğukta uzama testi, sıcak çekme, çekme-kopma, yaşlandırma ve komple kablo yaşlandırma testlerinde; halter (papyon) veya tüp biçimli numuneler kullanılmalıdır. Kullanılacak numune şekli, kablonun yapısına ve izolasyonun çapına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu tez kapsamında, TS EN 60811-501 standardında tanımlanan ve Şekil 3.1'de gösterilen halter tipindeki numune tercih edilmiştir.

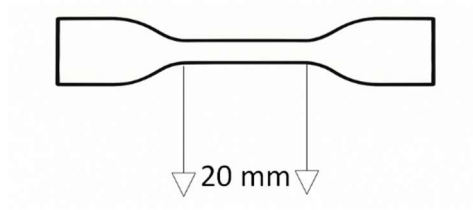


Şekil 3.1. TS EN 60811-501'de yer alan halter tipi numune

Soğukta uzama testi, TS EN 60811-505 standardına uygun olarak (-15 ± 2) °C sıcaklıkta gerçekleştirilmelidir. Kılıfın 2 mm ve üzeri olması durumunda, kılıf numunesinden tıraşlama (inceltme) işlemi sonrasında halter numune çıkartılmalıdır. Test cihazı aparatına yerleştirilen papyon numuneler istenilen sıcaklıkta ve sürede bekletildikten sonra deney gerçekleştirilmektedir. En az üç geçerli sonuç elde edilmelidir. Elde edilen her uzama değerinin %20'den fazla olması testin başarı kriteridir.

TS EN 60811-507 standardına uygun olarak sıcakta çekme (Hot Set) deneyi gerçekleştirilir. Bu test için kalınlığı 0,8 mm ile 2 mm arasında olan halter tipinde numuneler hazırlanmalıdır. Numunenin orta merkezinde Şekil 3.2'de görüldüğü üzere 20 mm'lik bir işaretleme yapılır. Test numunesi, uygun sıcaklık ve belirlenmiş yük altında etüve yerleştirilir. 10 dakika boyunca yük altında etüvde duran numunenin uzama oranı %175'i geçmemelidir. Yük kesildikten sonra 5 dakika daha sıcaklığa

maruz kalan numune oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıcı uzaması ölçülür ve uzama oranı $\pm\%15$ 'i aşmamalıdır.



Şekil 3.2. Sıcakta çekme deneyi için numune işaretleme

Çekme-kopma testi TS EN 60811-501 standardına göre gerçekleştirilmelidir. Hazırlanan halter numunelerin standardın istediği uzama ve mukavemet değerlerini karşılaması gerekmektedir. TS EN 60811-401 standardında yer alan yaşlandırma testi için hazırlanan halter numuneler istenilen sıcaklıkta ve süre boyunca ısıya maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığında beklemeye alınır. Oda sıcaklığına gelen numunelere çekme-kopma testi uygulanarak ilk değerleri ile kıyaslanmalıdır. Yine aynı standartta yer alan komple kablo yaşlandırması için bir parça tam halde olan kablo numunesi etüve atılır. İstenen sıcaklıkta ve sürede etüvde kalan numune, yaşlandırma işlemi bittikten sonra oda sıcaklığında bekletilir. Oda sıcaklığına gelen yaşlandırılmış kablo numunesi kılıfı ve izolesi ayrılarak uygun tipte numune hazırlanır. Hazırlanan numunelere çekme-kopma testi uygulanır ve ilk değerler ile kıyaslanır. Kıyaslama sonucu kablonun standardında yer alan mukavemet, uzama ve değişim değerlerini karşıladığı takdirde test başarılı kabul edilir.

Bükme deneyi ise diğer mekanik testlerden daha farklıdır. Bükme testi aynı numuneye uygulanan sıralı testlerin başlangıcıdır. Bükme testi uygulanan numuneye sonrasında, kısmi boşalma, $\tan\delta$, ısıtma çevrimi ve yıldırım darbe gerilimi deneyleri uygulanır. Standartta belirtilen uygun çaptaki silindir etrafında bükme işlemi gerçekleştirilir. Silindir çapını hesaplamak için TS IEC 60502-2 standardı ve TSE K 204 kriteri kullanılır. Eğer kablo, kurşun kılıf veya boylamasına uygulanmış üst üste bindirilmiş bir metal levha içeriyorsa;

$$25(d + e) \pm \%5 \quad (3.1)$$

$$20(d + e) \pm \%5 \quad (3.2)$$

diğer kablolar için ise;

$$20(d + e) \pm \%5 \quad (3.3)$$

$$15(d + e) \pm \%5 \quad (3.4)$$

denklemleri kullanılır. Burada e (mm) kablo çapını ve d (mm) izolasyon çapını ifade eder. Eş. 3.1 ve Eş. 3.3 tek damarlı kablolar için Eş. 3.2 ve Eş. 3.4 ise üç damarlı kablolar için uygulanır.

Bu doğrultuda gerçekleştirilen mekanik testler, kabloların fiziksel dayanımını kanıtlar nitelik taşıırken güvenli ve kesintisiz bir enerji dağıtımını sağlamak için elektriksel testler ile birlikte değerlendirilmelidir.

3.2. Elektriksel Testler

Üretilen bir OG kablonun sadece mekanik testlerde başarılı olması tek başına bir anlam ifade etmemektedir. Aynı kablonun, güvenilirlik, güvenlik ve uzun ömür açısından, elektriksel testlerle de belli başlı kriterleri sağlaması gerekmektedir. Üretim hattında başlayan elektriksel testler kurulum sonrası yapılan kabul testlerine kadar uzanabilen kritik bir değerlendirme sürecidir. Yaşlandırma işlemi gören kabloların sonrasında elektriksel testlere tabi tutulması nemli ortam, ısı stres, mekanik zorlanma gibi zorlu şartlar altında işletilebilecek olan kablonun güvenilirliğini ve performans kriterlerine göre kalitesini ölçme adına önemlidir.

İzolasyonda meydana gelebilecek erken aşama bozulmalarını tespit etmek için tanδ ve kısmı boşalma testleri önemli analiz yöntemlerindendir [42]. Bu testler, elektriksel ağaçlanma, su ağaçlanması ve termal-mekanik gerilmeler nedeniyle oluşabilecek izolasyon kusurlarını öngörüp, potansiyel sorunların önüne geçmeye yardımcı olabilir [43]. IEEE 400 serisi, TS IEC 60502-2 ve TS EN 60228 gibi uluslararası standartlar, uygulanacak olan elektriksel testler hakkında kabul kriterleri vermesinin yanı sıra, testin yapılması gereken genel şartları da içermektedir.

Kablonun yalıtım sürekliliğini değerlendirmek amacıyla yüksek gerilimin kullanıldığı kıvılcım testi, üretim hatlarında gerçekleştirilir. Üretim sürecindeki izole, büküm, örme ve kılıf gibi aşamalarda yarı mamulün altında iletken bir tabaka varsa (iletken, konsantrik ekran, alüminyum bant vb.) kıvılcım testi yapılmalıdır [44]. Test sırasında, üretim hattında ilerleyen kablo yüzeyinde yüksek gerilim uygulanırken, bir alt

tabakadaki iletken topraklanmış konumda tutulmalıdır. Eğer yalıtımda herhangi bir kusur bulunursa, alt tabakadaki iletken ile kıvılcım test cihazı içerisinde bulunan iletken boncuklar alt tabakadaki iletken ile temas eder ve test cihazı uyarı konumuna geçer [45]. TS EN 62230 standardına uygun olarak gerçekleştirilen bu testte uygulanacak olan gerilim seviyesi standarda uygun olarak belirlenmelidir.

Elektriksel testlerin en temeli ve belki de en önemli olanlarından biri direnç testidir. Kablonun gösterdiği direnç, iletim ve dağıtım hatlarında güç kaybına ve gerilim düşümüne sebep olmaktadır. AC (alternatif akım) ve DC (doğru akım) olarak iki farklı direnç değeri ölçülebilmektedir. İletkenin DC direnci Eş. 3.5 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{DC} = \rho_i \frac{l}{s} \quad (3.5)$$

Burada, ρ_i ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) iletkenin öz direncini, l (m) iletken uzunluğunu ve s (mm^2) iletkenin kesit alanını tanımlar.

AC direnç hesabı için iki denklem bulunmaktadır. İlki güç ve akım değerinin ölçülmesi ile elde edilebilecek iken diğeri ise kablo iletkeninin maruz kaldığı sıcaklığa bağlı olarak değişen R_{AC} direncidir. Bu değerler sırasıyla Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{AC} = \frac{P}{I^2} \quad (3.6)$$

$$R_{AC} = R_{20}[1 + \alpha_{20} \cdot \Delta_t] \quad (3.7)$$

P (Watt) aktif gücü, I (A) hat akımını, R_{20} (Ω) 20 °C'deki direnci, α_{20} ($1/^\circ\text{C}$) ısı katsayısını ve Δ_t ($^\circ\text{C}$) ölçüm sıcaklığı ile 20°C arasındaki farkı belirtir.

AC gerilim altında, deri etkisi frekansla doğru orantılı olarak artar. Frekans arttıkça, iletkenin içinden geçmekte olan akım yoğunluğu merkezden dışa doğru kayar ve iletkenin yüzeyinde yoğunlaşır. Deri etkisi olarak adlandırılan bu durum, elektriksel olarak kullanılan iletken kesitinin azalmasına ve bunun sonucu olarak da direncin artmasına sebep olmaktadır. Kullanılacak olan iletkenin çok telli (bükülü veya esnek iletken) olması deri etkisini azaltmaktadır. Ayrıca, paralel ve yakın yerleştirilen kablolarda, iletkenlerin manyetik alanlarının birbirini etkilemesi sonucu yakınlık etkisi de oluşmaktadır.

TS EN 60228 standardına göre üretilen iletken ve konsantrik ekranın, dirençleri ölçülmeli ve standart gerekliliğini karşılamalıdır. İletken direnci, kablonun iletkeni üzerinden geçen akıma karşı gösterdiği direnci vermektedir [46]. Konsantrik ekran, kablo damarlarını hem mekanik hasardan hem de harici elektromanyetik parazitten korumaya yarar. Ayrıca arıza durumlarında kısa devre akımını güvenli şekilde toprağa iletme, gerilim dengesini sağlamak ve koruma topraklamasını yapmak gibi özellikleri de vardır. Konsantrik ekran direncinin ölçülmesi, ekran bütünlüğü ve etkinliği değerlendirmek adına bilgi verir.

Kablolar için önemli olan hususlardan birisi de kısmi boşalmadır. İzolasyon malzemesinde bulunan mikroskobik ölçekteki kusurlar nedeniyle ortaya çıkan, tam boşalmaya dönüşmeyen bölgesel boşalmalar, kısmi boşalma olarak adlandırılır. Hava boşlukları, çatlaklar, nem veya yabancı maddeler vb. kusurlar, kablo uygulanan gerilim altında iken lokal olarak yoğunlaşan yüksek genlikli elektrik alan oluşturur. Gerçekleşen bu boşalmalar izolasyonun tümünü devreye sokmadan yalnızca belli bir bölgesinde gerçekleşir. Bunlar izolasyon içerisinde genel dayanımı etkilemeden önce, malzeme içerisinde zamanla kısmi hasarlara yol açar [47]. Ayrıca, üretim esnasında ekstrüder makinesi sıcaklığının düşük olması, erimeyen veya yabancı hammadde içermesi ile ani soğumadan kaynaklı izolasyonda dallanma meydana gelmesi de kısmi boşalmaya neden olmaktadır.

Kısmi boşalma, yüksek gerilim altında ortaya çıkarak, hava boşluğu içindeki gazın iyonizasyonuna sebep olur ve bu durum kısa ve yüksek frekanslı sinyaller ile ölçülebilir. Ölçümde elde edilen değerler, boşalma sırasında serbest kalan elektrik yükünü temsil eder ve yaygın olarak görünür yük olarak adlandırılır.

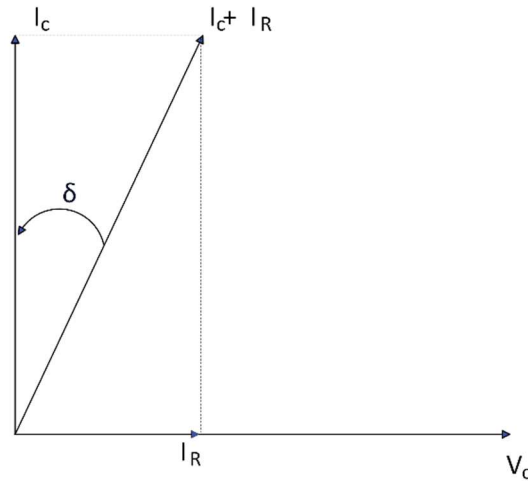
Kısmi boşalma ölçümleri, izolasyon malzemesinde zamanla meydana gelen mikroskobik hasarların erken evrede tespit edilmesine olanak tanır. Bu erken uyarı, sistem operatörlerinin potansiyel arıza risklerini öngörebilmesini ve gerekli önleyici bakım faaliyetlerini zamanında gerçekleştirebilmesini sağlar. Hem laboratuvar ortamında hem de saha koşullarında uygulanan kısmi boşalma testleri, kablo sistemlerinin güvenilirliğinin sağlanması, kablo ömrünün kısılmasının önlenmesi ve ani arızaların önüne geçilebilmesi açısından son derece kritik bir öneme sahiptir.

TS IEC 60885-3 standardına göre yapılan kısmi boşalma testlerinde, kablonun izolasyon dayanımı ve mevcut kusurların durumu belirli bir test prosedürü çerçevesinde

titizlikle incelenir. Teste başlanırken, kabloya nominal gerilimin iki katı ($2*U_0$) büyüklüğünde bir gerilim uygulanır ve bu yüksek gerilim yaklaşık 10 saniye boyunca sabit tutulur. Bu aşama, izolasyonun yüksek gerilim altındaki genel davranışını ve olası boşalma eğilimlerini ortaya çıkarmak için kritik bir öneme sahiptir. Ardından, uygulanan gerilim kademeli olarak azaltılarak yaklaşık $1,73*U_0$ seviyesine indirilir. Bu 1,73 katsayısı, yaklaşık olarak $\sqrt{3}$ değerine denk gelmekte olup, faz-nötr geriliminin hat gerilimine dönüştürülmesinde kullanılır. Bu dönüşüm, test sonuçlarının saha koşullarına daha uygun şekilde yorumlanmasını sağlar.

TS IEC 60502-2 standardına ve TSE K 204 kriterine göre kısmi boşalma testi hem tip test hem de rutin test olarak yer almaktadır. Hassasiyet seviyesi olarak tip testte 5 pC ve üstü, rutin testlerde ise 10 pC ve üstü istenmektedir.

$\tan\delta$, kablo izolasyonundaki dielektrik kayıpları temsil eden ve izolasyonun genel durumunu değerlendirmede kullanılan bir parametredir. İdeal bir kondansatör için akım ile gerilim arasındaki faz farkı 90° olur. Ancak, izolasyon içerisindeki kayıplar (rezistif bileşenin varlığı) bu faz farkını azaltır. $\tan\delta$, bu durumda ortaya çıkan faz kaymasının ölçülmesiyle, rezistif akımın kapasitif akıma oranı olarak tanımlanır; yani $\tan\delta=I_R/I_C$ şeklinde ifade edilir. $\tan\delta$ 'nın hesaplanabilmesi için kullanılan fazör diyagramı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. $\tan \delta$ fazör diyagramı gösterimi

TS IEC 60502-2 standardına ve TSE K 204 kriterine uygun olarak $\tan\delta$ testi için, komple kablo numunesi uygun yaşlandırma yöntemi kullanılarak yaşlandırılır.

Yaşlandırma sürecinde tercih edilmesi gereken sıcaklık değeri, kablonun en yüksek çalışma sıcaklığını 5-10 °C üzerinde olmalıdır. Ölçüm sırasında uygulanan alternatif gerilim en az 2 kV olmalıdır. Elde edilecek $\tan\delta$ değeri TS IEC 60502-2 için $40 \cdot 10^{-4}$ 'ten TSE K 204 için ise $80 \cdot 10^{-4}$ 'ten büyük olmamalıdır.

3.3. Diğer Testler

Kablolarla yapılan bazı testler elektriksel veya mekanik test sınıfına girmemektedir. Isıtma çevrimi buna verilebilecek en önemli örneklerden biridir. Yaşlandırma yöntemi olan ısıtma çevrimi deneyine ek olarak ısı yaşlandırma da örnek verilebilir. Elektriksel ve mekanik test sınıfına girmeyen bir diğer test ise, kablonun yanma performansının belirlendiği CPR (Construction Products Regulation- İnşaat Ürünleri Yönetmeliği) testidir. Bina içinde kalıcı olarak kullanılacak kabloların yangına karşı davranışını değerlendirmek amacıyla TS EN 50399 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Bu testte, kablolar dikey olarak monte edilmiş merdiven üzerine yerleştirilir ve özel bir test odasında, sabit parametrelerde (Örneğin; 20.5 kW $\pm$ %5 güçte) çalışan propan-hava yakıtı kullanılarak alevle temas ettirilir. Testin temel amacı, kablonun dikey alev yayılımı (Flame Spread-FS), toplam ısı salınımı (Total Heat Release-THR) ve duman üretimi gibi parametreleri ölçerek, kablonun yangına dayanıklılığını belirlemek ve uygun CPR sınıfına yerleştirmektir [48].

4. DENEYSEL KABLO YAŞLANDIRMA ÇALIŞMALARI VE ÖLÇÜMLER

Bu bölümde, test numunesi olarak seçilen kablonun performansının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılan yaşlandırma ve dayanım testleri ele alınmıştır. İlk olarak, numunenin yapısal ve boyutsal özellikleri detaylı biçimde tanıtılmış; malzeme tipi, iletken yapısı, izolasyon kalınlığı ve ekran düzeni gibi kritik parametreler verilmiştir. Ardından, yapay olarak hızlandırılmış yaşlandırma koşullarını sağlayan deney düzeneği tasarlanmış ve sistemin çalışma prensibi şematik olarak açıklanmıştır.

Kablonun servis koşullarına dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla hem elektriksel hem de mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin uygulanış yöntemleri, deney parametreleri ve ölçüm kriterleri detaylandırılarak sunulmuş; elde edilen bulgular üzerinden kablonun performansında meydana gelen değişimler analiz edilmiştir.

4.1. Yaşlandırma Testlerinin Uygulandığı Orta Gerilim Kablosu

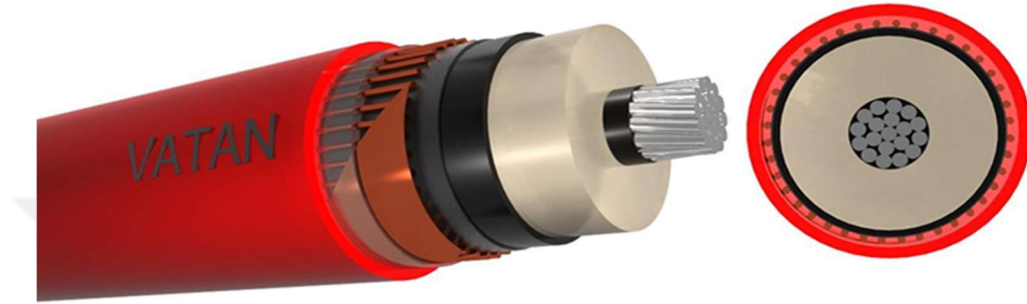
Yaşlandırma testi uygulanan OG kablosu, 1x400/35 mm² kesitli, ve NA2XSY tipi olup, 20,3/35 (42) kV'luk gerilim düzeyine sahiptir. Bu kablonun gerilim değerleri sırasıyla şöyledir:

- Nominal Gerilim (U_0): 20,3 kV (Faz-nötr arası nominal gerilim).
- Anma Gerilimi (U): 35 kV (Fazlar arası sürekli işletme gerilimi).
- Maksimum Gerilim (U_m): 42 kV (Maksimum gerilim seviyesi).

IEC 60502-2 standardının kapsamı, 3,6/6 (7,2) kV ile 18/30 (36) kV arasındaki OG kablolarıdır. Ancak testleri gerçekleştirilen 1x400/35 mm² NA2XSY 20,3/35 (42) kV'luk OG yer altı kablosu, belirtilen aralığın üzerinde olduğundan TS IEC 60502-2 standardının kapsamı dışındadır. Ayrıca, TS IEC 60840 standardında da ilgili kablonun gerilim seviyesini karşılayacak bir değer bulunmamaktadır. Bunlarla birlikte TSE K, Türkiye'nin yerel şartları, iklim koşulları ve üretim özellikleri gibi özel gereksinimleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuş kriterlerdir. TSE K 204 kriteri, 20,3/35 (42) kV olan kabloları özeldir ve test edilen OG kablosu TSE K 204 kriterine uygun olarak üretilmektedir. Kablonun rumuzu Çizelge 4.1'de detaylı olarak verilmiştir. Test kablosunun katman gösterimi ve çizimi Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Yaşlandırma testi uygulanan kablonun detaylı rumuzu

Kısaltma	Açıklama
N	VDE standartlarına göre normlandırılmış kablo
A	Alüminyum iletken
2X	XLPE izole
S	Bireysel konsantrik ekran
Y	PVC kılıf



Şekil 4.1. NA2XSYP tipi kablo dizaynı

Kablonun beyan dayanımını belirleyen temel unsurlar; iletken kesiti ve kullanılan XLPE kalınlığıdır. TS EN 60228 standardına göre, 400 mm² kesit alanına sahip yuvarlak sıkıştırılmış alüminyum iletkenin en az 53 telden meydana gelmesi gerekmektedir. Bu gereklilik üretilen iletkenin belli bir ölçüde esnekliğini sağlamak ve direnç değerinin istenilen seviyede olabilmesi için vardır. İncelenen kablo iletkeni, bu koşulu sağlayarak 61 adet telden oluşmuş olup, her bir telin çapı 2,88 mm'dir. Teller 9,5 mm H11 alüminyum filmaşın çekilerek elde edilmiştir. Teller üzerinde büküm işlemi öncesinde elektriksel direnç ile mukavemet testleri uygulanmış ve TS EN 60228 standardına uygun olduğu saptanmıştır. İletkenin tel dizilimi içten dışa doğru 1, 6, 12, 18 ve 24 şeklinde sıralanmıştır. Böylelikle dört tabakadan oluşan alüminyum iletken, 400 mm² kesit alanına sahip olmaktadır.

TS EN 60228 standardına göre, 400 mm² kesit alanına sahip yuvarlak sıkıştırılmış alüminyum iletken çapının minimum 22,3 mm, maksimum ise 24,6 mm değerleri arasında bulunması zorunludur. Bu tez çalışmasında, çap ölçümleri sonucunda incelenen kablonun minimum çap değeri 23,00 mm ve ortalama çap değeri ise 23,11 mm olarak belirlenmiştir.

TS IEC 60502-2 standardına göre nominal gerilimi 3,6 kV olan kablolarda kullanılan XLPE yalıtkan kalınlıkları kesitlere göre farklılık göstermektedir. Standart değerler şu şekildedir: 10-185 mm² kesit aralığı için 2,5 mm kalınlık önerilirken, 240 mm² kesit için 2,6 mm, 30 mm² için 2,8 mm, 400 mm² için 3,0 mm ve 500-1600 mm² kesit aralığı için ise 3,2 mm'dir. İletken kesiti büyüdükçe XLPE yalıtkan kalınlığında da bir artış görülmekte olup, nedeni izolasyonun daha yüksek elektriksel streslere karşı dayanıklılık göstermesini sağlamaktır. Anma gerilimi 6 kV olan kablolarda ise 16-1600 mm² kesitte sabit olarak 3,4 mm kalınlık talep edilirken, anma gerilimi 12 kV olan kablolarda 35-1600 mm² kesit aralığında 5,5 mm XLPE kalınlığı gereklidir.

TSE K 204 kriterine göre üretilmiş olan incelenen OG kablosu, kriter gereği 50-1600 mm² iletken kesiti ve 9,00 mm nominal XLPE kalınlığına sahip olmalıdır. Ayrıca kullanılan XLPE katmanının kalınlığı, herhangi bir yerde nominal değerin %90'ının altına 0,1 mm'den daha fazla düşmemelidir. Yani kalınlık en az 8,00 mm olmalıdır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerlere göre, kalınlığın en az olduğu nokta 9,05 mm ölçülürken ortalama kalınlık ise 9,31 mm'dir. Bu da üretilen kablonun koşullara uygun olduğunu göstermektedir.

Konsantrik ekran için bakır tel ve bakır bant kullanılmaktadır. 35 mm² kesitli ekran için TS EN 60228 standardına göre direnç testi yapılmalıdır. 35 mm² kesitli ekranı sağlamak adına toplam 42 adet 1,04 mm çapa sahip bakır telden meydana gelmektedir. Tellerin üzerinde 0,1 mm x 10 mm (kalınlık x genişlik) bakır bant yer almaktadır. Bu bant tutucu bant olarak adlandırılır ve bakır tellerin bütünlüğünü korumaktadır. Konsantrik ekranın altında yarıiletken bant yer alır. Elektrik alan yönetimini optimize etmek ve ekran sisteminin elektriksel olarak düzgün çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu yarı iletken bant, XLPE izolasyonun dış yüzeyine sarılarak, ekran telleri ile izolasyon katmanı arasında elektriksel olarak kontrollü bir temas sağlar. Temel işlevi, ekran tellerinin farklı noktalarda izolasyona temas ederek oluşturabileceği noktasal elektriksel stresleri önlemek ve bu tellerin tüm çevresel alanda homojen potansiyel dağılımı ile çalışmasına yardımcı olmaktır.

Konsantrik ekran üstünde polyester bant yer alır. Bu bant, dış kılıf ekstrüzyonu sırasında ekran tellerinin yapısal bütünlüğünü korumakta, kılıf malzemesinin tellerin arasına nüfuz ederek deformasyona veya temas kaynaklı mikroskobik delinmelere neden olmasını engellemektedir. Aynı zamanda polyester bant, kılıf altındaki

katmanlara karşı ek bir mekanik koruma sağlar. Özellikle PVC gibi diğer hammaddelere nazaran daha yumuşak dış kılıf malzemeleri ile ekran telleri arasında doğrudan temas olması, uzun vadede hem mekanik bozulmalara hem de ekran yapısında gevşemeye sebep olabilir. Polyester bant bu etkileri sınırlayarak, hem üretim sırasında kablo geometrisinin korunmasına hem de kullanım ömrü boyunca ekran sisteminin stabil kalmasına katkı sunar.

Standartta yer almasa da kablo malzemeleri için önemli olan parametrelerden biri de yoğunluktur. Havada ve alkol içerisinde tartılan küçük numuneler sayesinde elde edilen yoğunluk bilgisi, kabloda kullanılan XLPE yalıtkan ve kılıf malzemesinin toplam ağırlığa etkisi hususunda önemli bir role sahiptir. Yoğunluğun azalması, kablonun daha esnek ve hafif olmasını sağlar, ancak su ve nem geçirgenlikleri daha yüksek olabilir ve bu durum özellikle izolasyon katmanında uzun vadeli elektriksel bozulmalara yol açabilir. Ayrıca, düşük yoğunluk genellikle daha yüksek yalıtım direnci sağlasa da, termal dayanım açısından zayıflık gösterebilir. Yoğunluğu yüksek olan malzemeler genellikle daha sert ve mekanik zorlamalara karşı daha dayanıklıdır; bu da özellikle dış ortam koşullarında kullanılan kablolar için avantaj sağlar. Ancak, yüksek yoğunluk aynı zamanda malzemenin esnekliğini azaltarak bükülme ve darbe anında çatlama riskini artırabilir. Bu nedenle, yoğunluk seçimi yapılırken hem elektriksel hem de mekanik gereksinimler birlikte değerlendirilmelidir.

İncelenen OG kablosu boyutsal olarak TS EN 60811-201 standardına uygun olarak test edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde kullanılan cihazların tümü MITUTOYO markasına aittir. İletken ve ekranın, tel kalınlıklarını ölçmek için MDC-25SX modeli kullanılırken, iletken boyutunu ölçmek için CD-15APX modelinden faydalanılmıştır. Tabaka kalınlıkları ve et kalınlığı gibi ölçümler için PJ-A3000 profil projektörden, polyester bant gibi ince katmanların kalınlık ölçümü için ABSOLUTE kalınlık ölçme komparatöründen yararlanılmıştır. Kablonun boyutsal ölçümleri sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de ayrıntılı bir şekilde verilmiş olup, Şekil 4.2’de kullanılan cihaz ve ölçüm sonuçları örnekleri gösterilmiştir.



(a)



(b)



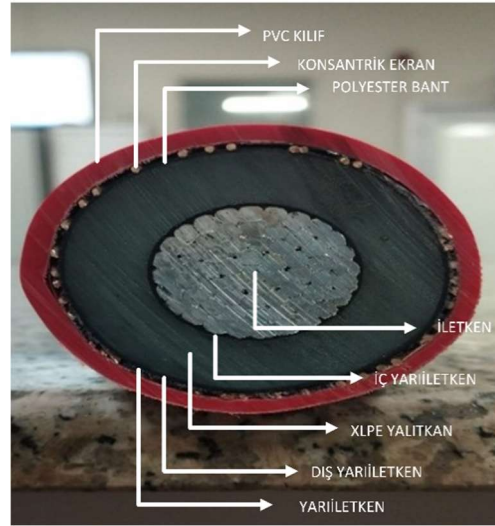
(c)

Şekil 4.2. a) Profil projektör, b) Kalınlık ölçme komparatörü, c) Mikrometre kullanılarak yapılan örnek ölçümler

Çizelge 4.2. Kablo boyutsal analiz sonuçları

Ölçüm	Kriter	Test Sonucu
İletken tel sayısı (adet)	Min: 53	61
İletken tel çapı (mm)	Nom: 2,88	2,881
İletken çapı (mm)	Min: 22,3/Max:24,6	Min: 23,00/Ort:23,11
Bakır tel sayısı (adet)	42	42
Bakır tel çapı (mm)	1,04	1,02
Bakır bant kalınlığı (mm)	0,1	0,103
Bakır bant genişliği (mm)	10	10
Polyester bant kalınlığı (mm)	0,05	0,054
Polyester bant genişliği (mm)	85	85
Yarı iletken kalınlığı (mm)	0,20	0,25
Yarı iletken genişliği (mm)	85	85
Dış yarı iletken kalınlığı (mm)	0,5	Min:0,46/Ort:0,503
XLPE kalınlığı (mm)	9,00	Min:9,05/Ort:9,31
İç yarı iletken kalınlığı (mm)	0,5	Min:0,54/Ort:0,61
XLPE yoğunluğu (g/cm ³)	0,93	0,915
Kılıf yoğunluğu (g/cm ³)	1,567	1,535
İzole çapı (mm)	43,20	Min:43,05/Ort:43,32
Dış kılıf et payı (mm)	2,60	Min:2,51/Ort:2,76
Kablo çapı (mm)	51,20	Min:50,18/Ort:51,18

Montaj ve uygulama açısından kritik öneme sahip diğer parametreler; kablonun minimum serim sıcaklığının -5 °C ve minimum bükülme yarıçapının ise 768 mm olması olarak belirlenmiştir. Bahsi geçen kablonun katmanlarının gösterimi ve katmanlarına ayrılmış hali Şekil 4.3’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.3. a) Katman gösterimi, b) Katmanlarına ayrılmış kablo örneği

4.2. Yaşlandırma Uygulama Devresinin Hazırlanması ve Gerçekleştirilmesi

TS IEC 60502-2 standardı ve TSE K 204 kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilecek ısıtma çevrimi deneyi öncesinde, deney düzeneğinin hazırlanması gerekmektedir. Deney sırasında iletken sıcaklığının kontrol edilmesi amacıyla, kablo numunesi bazı noktalarda iletkene kadar açılmalı ve termokupllar yerleştirilmelidir. Ancak, numuneye açma işlemi uygulandıktan sonra, kısmi boşalma veya tanδ gibi elektriksel testlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Çünkü bu durum testin doğruluğunu ve güvenilirliğini bozar. Açılmış bölgelerde oluşan keskin kenarlar ve düzensiz yüzeyler, elektrik alanın doğal dağılımını değiştirerek yapay deşarjlara sebep olur; bu da gerçek olmayan kısmi deşarj sinyallerinin oluşmasına ve hatalı yorumlamalara yol açar. Tanδ testiyle ise yalıtımın genel dielektrik karakteristiği ölçüldüğü için homojen bir yalıtım yapısı gerektirir; iletkene kadar açılmış bir numunede bu yapı bozulduğu için ölçülen

değerler gerçeği yansıtmaz. Ayrıca bu tür fiziksel hasarlar, kaçak akımları artırarak test sonuçlarını çarpıtır. Bu nedenle, ısıtma çevrimi deneyinde kullanılmak üzere ek bir test numunesi hazırlanmıştır.

İlk test numunesi, daha önce kısmi boşalma testi ve bükme testine tabi tutulan test numunesidir. İkinci numune ise "şahit numune" olarak adlandırılmakta olup, test numunesi ile aynı boyuttadır. Şahit numune, yalnızca izlem takibi amacıyla kullanılmakta ve test numunesi ile beraber yaşlandırma testine tabi tutulmaktadır. Test numunesi, Bölüm 4.4'te açıklandığı üzere SP-34 tip pabucu takılı bir formda bekletilirken, şahit numune ise izolasyon katmanını uzunca açılmadan, yalnızca pabucun gireceği kadar bir açıklık bırakılarak pabuca takılmıştır.

Her iki numune, farklı indüksiyon bobinlerinden geçirilerek, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Kullanılan indüksiyon bobini, 3000 A'e kadar akım üretebilmektedir. Bu akım kablo üzerinde oluşması sağlanan akımdır. Oluşan bu yüksek seviyeli akım kablonun ısınmasına sebep olur. İndüksiyon bobinlerinin hemen yanında amper metre konumlandırılmıştır. Bu sayede, kablo üzerinde akan akım değeri izlenebilir. Böylelikle, sistem üzerindeki akımlar anlık olarak ölçülmektedir. İndüksiyon bobininin kullanılmasının sebebi, kablonun gerçek işletme koşullarına daha yakın şartların ancak böyle bir uygulamayla oluşturulabilmesidir.

Eğer kabloyu aynı sıcaklık değerlerine getirmek için güç kaynağı kullanılarak ampasite üzerinde bir akım geçirilmeye çalışılırsa, kablonun nominal çalışma geriliminin üzerinde bir gerilim uygulanmalıdır. Böyle bir gerilim seviyesini laboratuvar ortamında elde etmek, ciddi bir güç ihtiyacı doğuracağı ve maliyetli olacağı için indüksiyon bobini kullanılmıştır. İndüksiyonla ısıtmayla ise bobinler üzerinden sadece kablo iletkeninde akım indüklemeye prensibiyle ısınma sağlanmakta ve gerilimden bağımsız bir işlem yapılmaktadır. Kullanılan her indüksiyon bobinin kendine ait bir trafo bağlantısı vardır. İki trafoda ayrı ayrı kontrol kabinine bağlanır.

Pabuçları takılı olan her iki numunenin uçları ise Şekil 4.5'te gösterildiği gibi vida ve somun yardımıyla sabitlenmiştir. Bu işlem hem test hem de şahit numuneye uygulanmıştır.



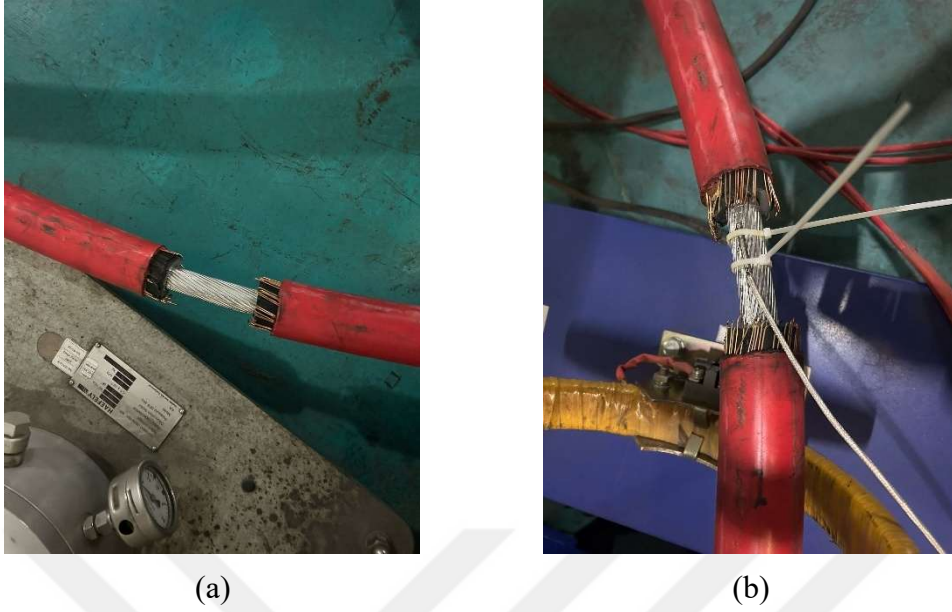
Şekil 4.4. İndüksiyon bobini içerisinde geçirilen kablo numunesi



Şekil 4.5. Test numunesinin pabuç bağlantısı

Şahit numune, sıcaklık takibini sağlamak amacıyla 4 metre aralıklarla iletkenine kadar açılmıştır. Bu açılma işleminde katmanların zarar görmemesine özen gösterilmelidir. Açılan bölgelere PT-100 termokuplları sabitlenmiştir. Yerleştirilen termokuplların bağlantı uçlarına yakın olmamasına özen gösterilmiştir. Bağlantı noktaları yapıları gereği ısınmanın daha fazla olacağı noktalardır. Bu ısınma, test sürecinde iletken sıcaklığını olduğundan fazla görülmesine neden olacaktır. İletkene yerleştirilen termokupllar sabitlendikten sonra ısı kaybını en aza indirmek için kesim sırasında çıkan kablo dış kılıf katmanı kullanılarak kapatılmıştır. Açılan kısımlarda konsantrik ekran ile iletken birbirinden özenle uzaklaştırılmıştır. Birbirlerine temas etmesi halinde iletken ve konsantrik ekran arasında bir devre oluşacak ve ısınmayı arttıracaktır. Bu şahit numuneye takılan pabuçlarda da geçerlidir. Pabuç ile konsantrik ekran birbirlerine temas etmemelidir. Ayrıca hem şahit numune hem de test numunesinin kılıfı üzerine birer adet termokupl sabitlenmiştir.

Şahit numuneye yerleştirilen termokuplların bağlantısı Şekil 4.6’da gösterildiği gibidir.



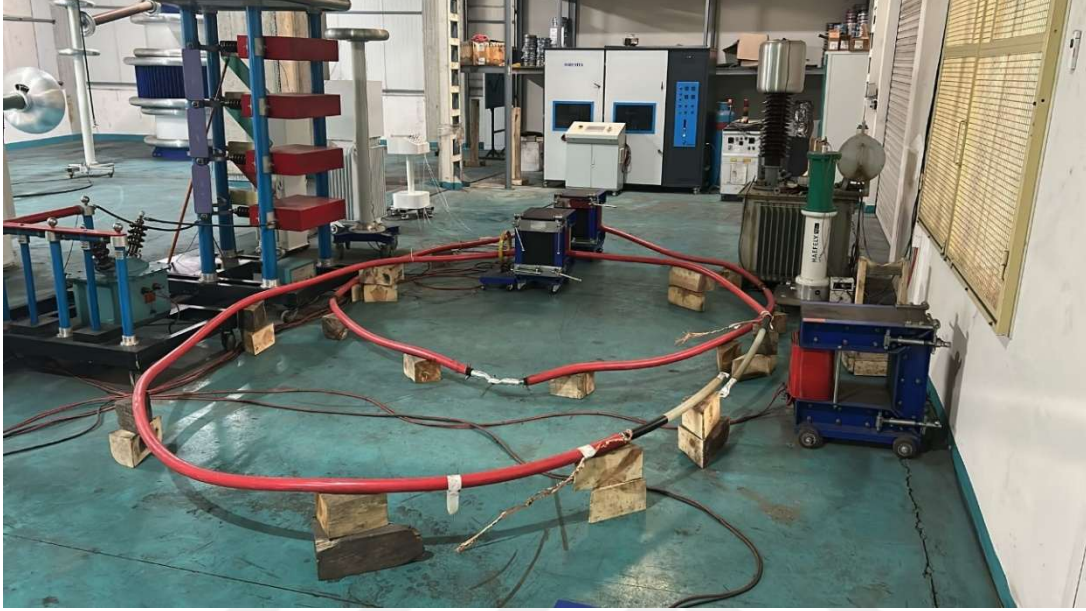
Şekil 4.6. a) Açılan kablo iletkeni, b) İletkene termokupl yerleştirilmesi

İletken üzerinde eşit uzaklıklarda bulunan termokupllar, numune boyunca iletken sıcaklığını ölçmektedir. Böylelikle, iletkenin numune boyunca yakın sıcaklıkta seyrettiği doğrulanmış olmaktadır. İletkenin sadece bir bölgesinin ısınıp diğer bölgelerinin ısınmaması, numunenin uygun olmadığına veya test devresinin hatalı hazırlandığına işaret etmektedir.

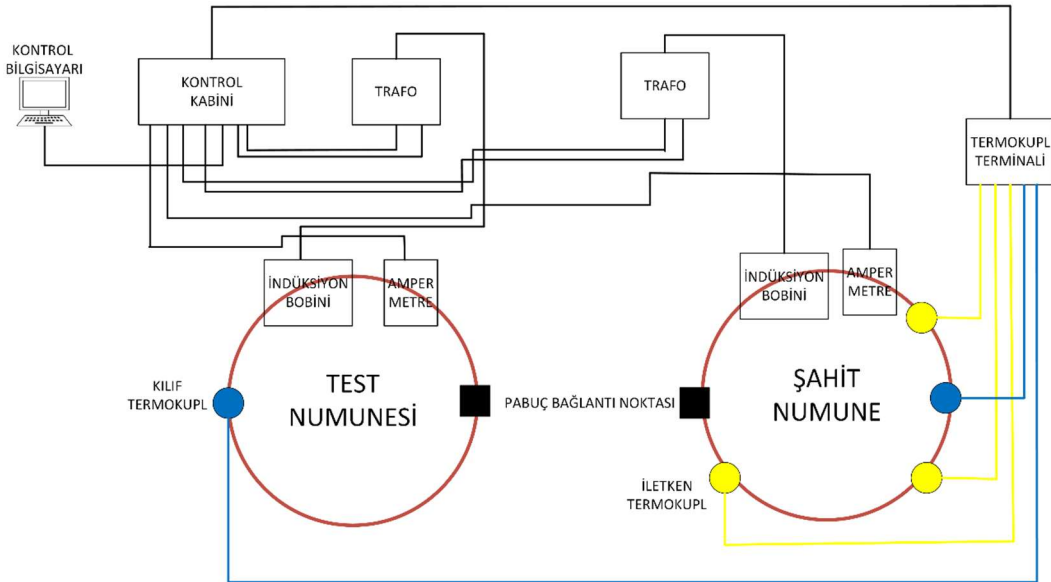
Kılıf üzerinde bulunan termokupllar, her iki numunenin iletken sıcaklıklarının özdeş olup olmadığını takip etmek için kullanılır. Eğer şahit numunenin kılıf sıcaklığı ile test numunesinin kılıf sıcaklığı birbirine yakın ise, iletken sıcaklıklarının da yakın olduğu varsayılır. Farklılık olması durumunda ise uygulanan akım değerleri ve test bağlantısının doğruluğu teyit edilmelidir. İletkene ve kılıfa bağlı olan her termokupl ısı takip bağlantı terminaline bağlıdır. Takip etme seviyesine göre kılıflara bağlanan termokupl sayıları özdeş sayılarda artırılarak elde edilecek değerlerin hassasiyeti artırılabilir.

Isıtma çevrimi deneyi için hazırlanan devre Şekil 4.7’de ve test düzeni bağlantı şeması Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8’de kırmızı içi boş halka kablo numunelerini, içi dolu sarı halka iletkene yerleştirilen termokuplları, içi dolu mavi halka kılıfa yerleştirilen termokuplları ve içi dolu siyah dikdörtgenler ise numune bağlantı noktalarını temsil

etmektedir. Siyah çizgiler deney düzeneği arasındaki bağlantıyı ifade ederken, kırmızı kesikli çizgiler ise toprak bağlantısını göstermektedir. Standart gereği numunelerin yere serilmesi gerekmektedir. Numune ile yer arasına tahta parçalar yerleştirilmiştir. Bu parçalar numunenin yere temas etmesini engelleyerek ısı kaybının önüne geçer.



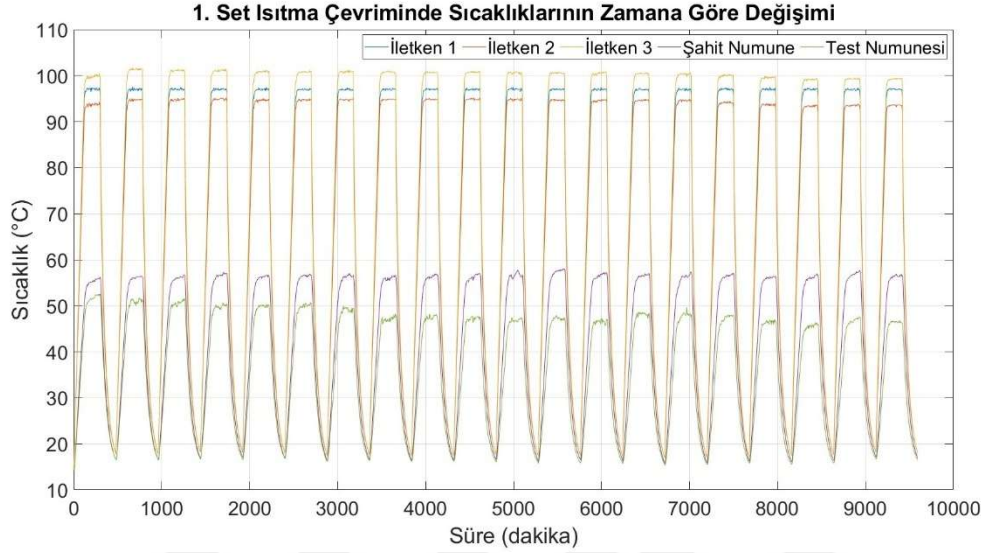
Şekil 4.7. Isıtma çevrimi devresi



Şekil 4.8. Isıtma çevrimi test düzeni bağlantı şeması

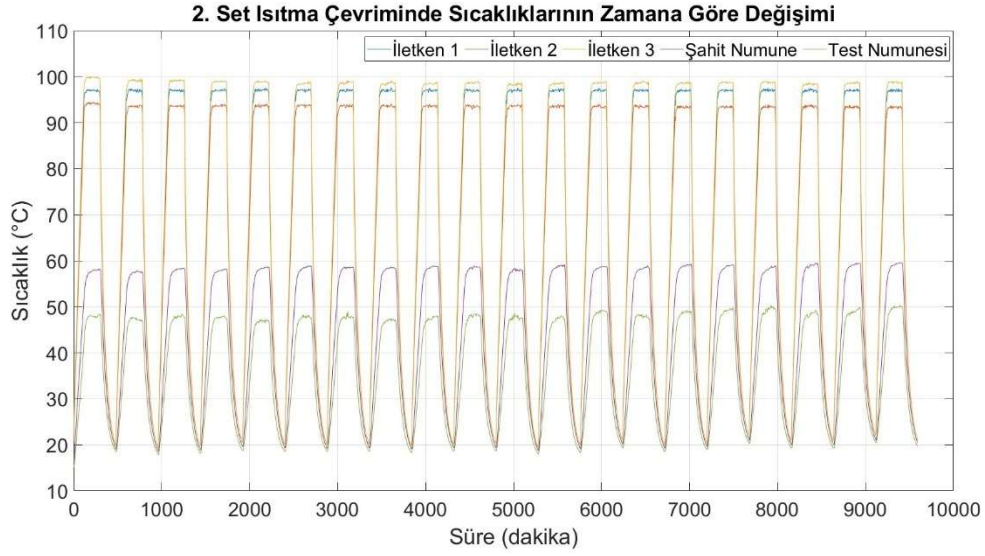
Isıtma çevrimi deneyi standart gereği Bölüm 2.1’de bahsedildiği gibi yapılmıştır. Bu deney, her biri 8 saat süren ve toplamda 20 ısıl çevrimden oluşan ilk test olmakla

beraber IEC 60502-2 standardına ve TSE K 204 kriterine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test süresi boyunca, iletkenin farklı noktalarından ve kılıf üzerinden alınan sıcaklık değerleri Şekil 4.9’da gösterildiği gibidir. Birinci çevrim seti sonucunda kabloda gerçekleşen kusurların analizi amacıyla tanδ ve kısmi deşarj testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9. 1. set ısıtma çevrimi sıcaklık takibi sonuçları

Normal şartlar altında, bu deney kısmi boşalma ve tanδ değerleri standarda uygunsa sonlandırılmalıdır. Fakat kablonun normal test sürecinin aşılması ve ısıtmaya devam edilmesi durumunda nasıl bir sonuç elde edileceğini izlemek adına, yaşlandırmaya maruz bırakılmış test numunesine ve şahit numuneye bir set daha ısıtma çevrimi testi uygulanmıştır. Yapılan bu ikinci set, ilk set ile birebir aynı özelliklere sahiptir. Her bir çevrimi 8 saat süren 20 çevrimlik ısıtma çevrimi testi uygulanmış ve ikinci set tamamlanmıştır. Elde edilen kılıf ve iletken sıcaklık değerleri Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Standartta ısıtma çevrimi süresince ısıtma periyodunun en az 2 saat, soğutma periyodunun en az 3 saat sürmesi şartı yer almaktadır. Gerçekleştirilen her ısıtma çevriminde, ısıtma süresi 2 saat olarak ayarlanmıştır. Ardından, 3 saat boyunca iletken uygun sıcaklıkta bekletilmiş ve sonrasında 3 saatlik soğutma fazına geçilmiştir. Böylelikle 1 çevrim 8 saat sürmüştür. Her bir set 20 çevrim ve toplam 160 saat olmak üzere, iki set ısıtma çevrimi uygulandığından dolayı kablo toplamda 320 saat ısıtma çevrimi deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.10. 2. set ısıtma çevrimi sıcaklık takibi sonuçları

4.3. Mekanik Test Sonuçları

Bölüm 3.1’de bahsedilen mekanik testler ilgili standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Test süreci ve elde edilen değerler aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

Büzülme deneyi, dış yarı iletken malzemesine kadar soyulan yaklaşık 300 mm uzunluğundaki numune iki ucundan da yaklaşık 50 mm iletken kadar açılmıştır. Numune 200 mm aralıklı iki çizgi ile işaretlenmiştir. 130 °C’de 1 saat boyunca etüvde bekleyen numune Şekil 4.11’de görüldüğü gibidir. Etüvden çıkartıldığında iki çizgi arasındaki mesafe 197 mm olarak ölçülmüştür. Değişim oranı %1,5 olarak hesaplanmıştır. TS EN 60811-502 standardına uygun olarak gerçekleştirilen testte değişim oranı %4’ten az olması gerekmektedir. Bu şartlar altında kablo büzülme deneyinde başarılı olmuştur.



Şekil 4.11. Büzülme deneyi için etüve yerleştirilen numune

Soğukta darbe testi, 150 mm uzunluğunda komple kablo numunesi hazırlanmıştır. Kablo çapına uygun olarak TS EN 60811506 standardında belirttiği üzere, 1250 g ağırlığında olan çekiç ile birlikte test aparatına yerleştirilmiştir. 16 saat boyunca -15°C ' de bekleme işlemi ardından, 100 mm yükseklikte bulunan çekiç Şekil 4.12'de görüldüğü üzere serbest bırakılmıştır. Kılıfın iç ve dış yüzeyinde herhangi bir çatlak veya deformasyon gözlemlenmemiştir. Soğukta bükme ve darbe testlerinde, Operon DFC300CE kullanılarak soğukta şartlandırma gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.12. a) Soğukta darbe deneyi düzeneği, b) Deney sonucu kılıf iç yüzeyi

Sıcakta basınç testi, yaklaşık 150×200 mm boyutlarında bir kılıf numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testte kullanılacak ağırlık, numunenin çapı ve kalınlığına bağlı olarak Eş. 4.1 ile hesaplanmıştır. Hesaplanan ağırlık, test aparatına takılarak numune üzerine gerekli basıncın uygulanması sağlanmıştır.

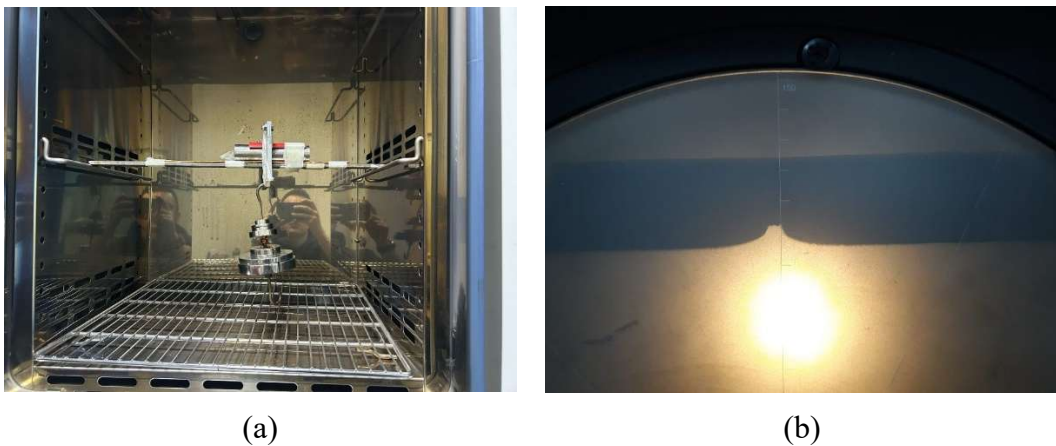
$$F = n\sqrt{2 \cdot e \cdot \delta - \delta^2} \quad (4.1)$$

Burada, δ (mm) sıcakta basınç deneyi öncesi numune kalınlığını, n standartta yer alan ve kablo çapı 15 mm'den düşükse 0,6, 15 mm'den yüksek ise 0,7 olarak kullanılan bir sabit sayıyı, F sıcakta basınç deneyi için kullanılacak olan kütlenin N biriminden kuvvetini belirtir.

11,58 N olarak belirlenen kuvvet, 1180,9 gram olarak hesaplanıp test aparatına takılmış ve numune, 80 ± 2 °C sıcaklıktaki etüvde, Şekil 4.13'te gösterildiği şekilde, 6 saat boyunca bekletilmiştir. 2,75 mm kalınlığa sahip olan numunenin test sonrası kalınlığı 2,85 mm, çentik derinliği ise 0,70 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak, Eş. 4.2 kullanılarak çentik oranı %21,81 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, %50'lik sınır değerin altında kaldığı için numune testten başarıyla geçmiştir.

$$C_{\%} = \frac{M \cdot (\delta_1 - \delta)}{\delta} * 100 \quad (4.2)$$

Burada, δ_1 (mm) sıcakta basınç deneyi sonrası numune kalınlığını, M (mm) sıcakta basınç deneyi sonucunda elde edilen derinliği, $C_{\%}$ (%) çentik oranını tanımlamaktadır.



Şekil 4.13. a) Sıcakta basınç deneyi düzeneği, b) Deney sonucu elde edilen çentik

Soğukta uzama, sıcakta çekme, çekme-kopma, yaşlandırma ve komple kablolar üzerindeki testlerde kullanılan izolasyon ve kılıf numuneleri, Şekil 4.14'te gösterildiği gibi halter tipindedir.



(a)



(b)

Şekil 4.14. a) Kılıf numunesi, b) İzole halter numunesi

Soğukta uzama deneyi için kılıf numunesi tıraşlandıktan sonra uygun kalınlığa getirilmiştir. Elde edilen papyon numuneler, -15 °C sıcaklıkta test aparatında 3 saat bekletilmiştir. Test için Marestek M_tst_coldx2_02 cihazı kullanılmıştır. Cihaz içerisinde bekletilen numuneler sonrasında, çekme-kopma testine tabi tutulmuş olup, elde edilen uzama değerleri sırasıyla %59, %60, %62 ve %64 olarak ölçülmüştür. Elde edilen uzama değerleri %20'nin üzerinde olması testi başarılı kılmıştır. Şekil 4.15'te numunenin test sonundaki görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4.15. Soğukta uzama deneyi

Kalınlığı minimum 1,06 mm ve genişliği minimum 4,10 mm olan halter tipindeki numune için, sıcak çekme deneyi kapsamında takılacak olan ağırlık, Eş. 4.3 kullanılarak 88,16 g olarak hesaplanmıştır.

$$Y = Z \cdot N \cdot 20,43 \quad (4.3)$$

Burada, Z (mm) halter numunenin minimum kalınlığını, N (mm) minimum halter genişliğini tanımlar.

Numune merkezinden 20 mm işaretlenerek 200 °C’de etüve atılmıştır. Etüv olarak camlı Binder ED115 kullanılırken, işaretler arası mesafeyi ölçmek için ise Iimag 405.00009.001 lazeri kullanılmıştır. 10 dakika sonunda işaretler arası mesafe 35,11 mm gelmiştir ve değişim oranı da %75,5 olarak hesaplanmıştır. Etüv içerisine yerleştirilen ve ölçümü yapılan numune Şekil 4.16’da yer almaktadır. Ağırlık kesildikten sonra 5 dakika daha etüvde duran numune çıkartılıp oda sıcaklığında bir süre bekletildikten sonra iki çizgi arası mesafe 18 mm olarak kaydedilmiştir. Kalıcı değişim oranı -%1 olarak hesaplanmıştır. TS EN 60811-507 standardına göre uzama değerleri en yüksek, yük altındaki uzama için %175, kalıcı uzama için $\pm\%15$ iken yapılan testler sonucunda bu değerler sırasıyla %75,5 ve -%1 hesaplanarak test başarılı olmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.16. a) Sıcakta çekme deneyi düzeneği, b) Test ölçümü

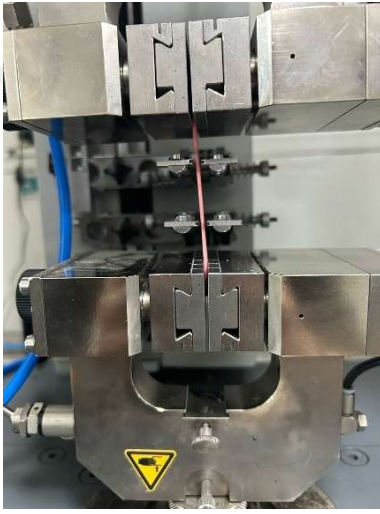
Çekme-kopma testi için hazırlanan numuneler de izolasyon mukavemetinin minimum 12,5 N/mm² ve uzama değerinin ise minimum %200 olması gerekmektedir. 135 °C’de 168 saat yaşlandırmaya maruz kalan numunede mukavemet ve uzama değerlerinin değişimi $\pm\%30$ ’u geçmemelidir. Komple kablo yaşlandırma testi için 100 °C’de 168 saat yaşlandırdıktan sonra mukavemet ve uzama değerlerinin değişimi $\pm\%30$ ’u aşmamalıdır. Bu kriterleri sağlayan testler başarılı olarak kabul edilmiştir.

Kılıf numuneleri için gerçekleştirilecek çekme kopma testinde mukavemetin minimum 12,5 N/mm², uzama değerinin ise minimum %150 olması gerekmektedir. 100 °C’de 168 saat yaşlandırmaya maruz kalan numunede mukavemet ve uzama değerlerinin değişimi $\pm\%25$ ’i geçmemesi gerekirken, mukavemet değeri 12,5 N/mm², uzama değeri ise %150’den fazla olmalıdır. Komple kablo yaşlandırma testi için ise 100 °C’de 168 saat yaşlandırdıktan sonra yaşlandırma testinde olduğu gibi aynı değerleri karşılaması gerekmektedir. Yapılan testlerin kriterleri ve sonuçları Çizelge 4.3’te detaylı olarak verilmiştir. Her test için 5 adet numune kullanılmıştır. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen test sonuçlarının ortanca değerleri nihai sonuç olarak alınmıştır.

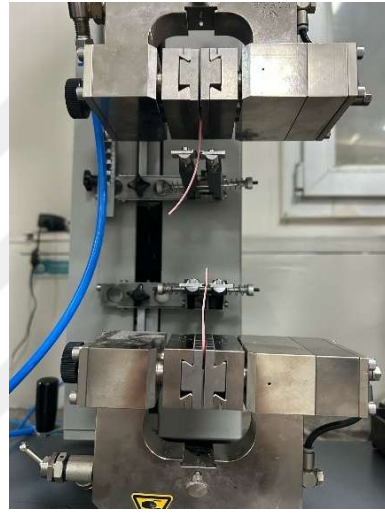
Çizelge 4.3. Çekme-kopma, yaşlandırma ve komple yaşlandırma test sonuçları

Test numunesi Gerçekleştirilen test	Kılıf		İzole	
	Sonuç	İstenen	Sonuç	İstenen
Mukavemet (N/mm ²)	16	12,5	17	12,5
Uzama (%)	244	150	426	200
Yaşlandırma sonrası mukavemet (N/mm ²)	16	12,5	-	-
Yaşlandırma sonrası uzama (%)	225	150	-	-
Yaşlandırma sonrası mukavemet değişimi (%)	0	± 25	-11,77	± 30
Yaşlandırma sonrası uzama değişimi (%)	-8,44	± 25	3,42	± 30
Komple kabloda yaşlandırma sonrası mukavemet (N/mm ²)	16	12,5	-	-
Komple kabloda yaşlandırma sonrası uzama (%)	49	150	-	-
Komple kabloda yaşlandırma sonrası mukavemet değişimi (%)	0	± 25	-11,77	± 30
Komple kabloda yaşlandırma sonrası uzama değişimi (%)	2,05	± 25	3,83	± 30

Yaşlandırma işlemlerinden sonra etüvlerden çıkartılan numuneler doğrudan güneş ışınından korunarak 16 saat boyunca desikatör içerisine yerleştirilmiştir. Desikatör içerisinde yer alan silika jeller sayesinde, sıcak olan numune çıkarıldığında havadan nem çekmesi engellenmiş olur. Çekme-kopma testleri için Zwick Z010 model cihaz kullanılmıştır. Sıcak çekme deneyi haricinde diğer testlerde kullanılan etüv Memmert UN 55 modelidir. Gerçekleştirilmiş olan çekme kopma testleri Şekil 4.17’de görüldüğü gibidir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.17. a) Kılıf numunesinin cihaz yerleştirmesi, b) Test sonrası kılıf, c) XLPE numunesinin cihaz yerleştirmesi, d) Test sonrası XLPE

Bükme testi bu tez için gerçekleştirilen son mekanik testtir. Bükme testi sonrasında aynı numune üzerinde kısmi boşalma testi gerçekleştirilecek olup, bir sonraki aşamada ise tan delta ve ısıtma çevrimi deneylerine tabi tutulmuştur. İletken çapı ve kablo çapının toplamının yirmi katı olan 1486 mm çapa sahip bir mandrel etrafında 3 çevrim uygulanmıştır. Numuneye bir sonraki test olan kısmi boşalma testi için hazırlanmış bir şekilde bükme deneyi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda kablonun yüzeyinde hiçbir çatlama meydana gelmemiş ve test başarılı olmuştur. Gerçekleştirilen bükme deneyi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Bükme deneyi

4.4. Elektriksel Test Sonuçları

Elektriksel test olarak bu bölümde kıvılcım, direnç, kısmi boşalma ve $\tan\delta$ deneyleri yapılmıştır. Her deney kendi standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kısmi boşalma ve $\tan\delta$ deneyleri ısıtma çevrimi deneyi ile bağlantılı olarak yapılmıştır. Isıtma çevrimi öncesi ile 1. set ve 2. set ısıtma çevrimleri sonrasında gerçekleştirilen kısmi boşalma ve $\tan\delta$ testleri sayesinde, uygulanan yaşlandırmanın kablo numunesi üzerindeki elektriksel etkisi izlenmiştir.

4.4.1. Kıvılcım deneyi

Kablo üretim sürecinin ilk aşaması olan filmaşınler, tel çekme işlemi gerçekleştirildikten sonra büküm aşamasına geçer. Alüminyum tellerin büküm işleminin tamamlanmasının ardından, elde edilen iletken CV (Sürekli Vulkanizasyon) hattına alınır. Bu aşamada alüminyum iletken, sırasıyla iç yarı iletken tabaka, ana izolasyon ve dış yarı iletken tabaka ile kaplanarak temel damar yapısı oluşturulur.

CV hattının sonunda yer alan kıvılcım test cihazı aracılığıyla, üretim süresince yalıtım tabakasının sürekliliği kontrol edilmektedir. Bu cihaz, yüksek gerilim altında kablonun yüzey izolasyonunun bütünlüğünü denetleyip, yüzeyde herhangi bir yalıtım kusuru (delik, çatlak vb.) tespit ettiğinde uyarı vermektedir. Uyarının tespit edilebilmesi için kıvılcım test cihazı içerisindeki boncukların alt tabakadaki iletken malzeme ile temas etmesi gerekmektedir. Test süresi boyunca cihazın alarm vermemesi, yalıtım katmanlarının sürekliliğinin sağlandığını ve izolasyon yapısında herhangi bir sıkıntı olmadığını ortaya koymuştur.

İzolasyon uygulamasının ardından, üretimin bir sonraki aşaması olan konsantrik ekranlama ve son proses olan dış kılıf uygulamasına geçilir. Dış kılıf çekimi sırasında, uluslararası standartlarda öngörülen uygun test gerilim seviyelerinde kıvılcım testi gerçekleştirilir. Uygulanan testler neticesinde, test cihazının herhangi bir alarm üretmemesi, ekranlama ve kılıf tabakasının da yalıtım bütünlüğü açısından hatasız bir şekilde uygulandığını göstermiştir. Üretim anında gerçekleştirilmiş olan bu test Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Kılıf kıvılcım deneyi

4.4.2. Direnç ölçümü deneyi

Direnç ölçümü iletkenin tellerinden başlamaktadır. Nominal çapı 2,88 mm olan alüminyum teller için en düşük iletkenliğin 36 MS/m olması gerekmektedir. Alüminyum tel yoğunluğu 2,72 g/cm³ alınırken, iletken direnci 4,198 Ω/km ve telin bir metredeki ağırlığı 17,62 g/m olarak ölçülmüştür. Elde edilen değerler doğrultusunda, Eş. 4.4'e göre bir telin iletkenliği 36,77 MS/m olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{Al} = \frac{x}{w \cdot \varphi_{Al}} \cdot 1000 \quad (4.4)$$

Burada, x (g/cm³) alüminyum yoğunluğunu, w (g/m) alüminyum iletken birim ağırlığını φ_{Al} (Ω/km) alüminyum iletken direncini ve σ_{Al} (MS/m) alüminyum tel iletkenliğini ifade eder.

İletken direncini ölçmek için MEGER MGR10 test cihazı kullanılmıştır. Elde edilen direnç değeri 0,0772 Ω/km'dir. TS EN 60228 standardına göre 400 mm² kesitli bir alüminyum iletkenin en yüksek direnç değeri 0,0778 Ω/km olmalıdır.

Direnç ölçümü sonucunda elde edilen değer standartta belirtilen üst limit değerinin altında olduğu görülmüştür. Direnç değeri ölçümü, hem üretim öncesinde iletken halinde iken hem de makaraya sarılı olan kabloun tamamı için gerçekleştirilmiştir. Kabloun tamamında ölçüm yapılırken konsantrik ekran direnç ölçümüyle aynı cihaz kullanılmıştır. Şekil 4.20'de ilgili direnç ölçüm görselleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.20. a) Komple kabloda direnç ölçümü, b) İletken halinde direnç ölçümü

Konsantrik ekranın direnç değerini elde edebilmek için kabloun tamamen üretilmesi ve komple makarada direnç ölçülmesi gerekmektedir. İletken direncinin ölçümü gibi

kablonun diğer tabakalarından bağımsız bir düzende ölçüm yapılamamaktadır. Çünkü konsantrik ekran ileten gibi yekpare bir katman değildir. Resistomat RM2304 bu ölçüm için uygun olan cihazdır. Kablonun sıcaklığı, metresi ve istenen en yüksek direnç değeri cihaza girildikten sonra ölçüm başlamaktadır. Yapılan ölçüm sonucunda $0,4773 \Omega/\text{km}$ değeri elde edilmiştir. Kablonun konsantrik ekran direnci, standartta tayin edilmiş olan en yüksek $0,524 \Omega/\text{km}$ 'lik direnç değerini karşılamıştır. Ölçüm bağlantısı ve cihaz üzerinde okunan değer Şekil 4.21'de gösterilmektedir.

Kablonun tamamı üzerinde yapılan iletken direnci ölçüm testi sonucunda ise $0,0769 \Omega/\text{km}$ değeri elde edilmiştir. İletken halinde iken ölçülen direnç değeri ile arasında bir fark mevcuttur. Makaraya sarılmış kabloda, kablonun tamamı boyunca elektrik akımı geçer ve direnç ölçümü sağlanmış olur. İletken halinde ölçümde ise sadece bir metre uzunluğundaki bir numuneden ölçüm sağlanır. Bu fark elde edilen iki sonucun birbirine yakın ama farklı değerler olmasına neden olmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 4.21. a) Konsantrik ekran direnç ölçümü, b) Ölçülen direnç değeri

Yapılan direnç ölçümleri sonucunda hem iletken hem de konsantrik ekranın direnç değerinin standartta belirtilen değerden biraz düşük olduğu gözlemlenmiştir. Direnç değerinin standartta yer alan maksimum değerden çok düşük olması durumunda iletkenlik çok fazla artacaktır.

4.4.3. Kısmi boşalma ölçüm deneyi

Bükme testi uygulanan numune test sonucu olumlu olduğu için bir sonraki aşama olan kısmi boşalma testine tabi tutulur. İlk aşama, test için kablonun uygun şekilde açılmasıdır. Testi gerçekleştirmek için komple kablo veya uygun uzunlukta bir numune kullanılabilir. Pabuç girecek şekilde iletkene kadar açılan numune, sonrasında bir

metreye yakın uzunlukta kılıftan ayrılır. Kılıfın soyulmasının sebebi konsantrik ekranı topraklama görevi görmesi adına kullanmaktır.

Açılan uçlar ayrı iki fanus içerisine yerleştirilir. Fanusların içerisinde özel yağ bulunmaktadır. Genellikle kullanılan yağ trafo soğutma yağıdır. Fanus ve içerisindeki yağ test sırasında herhangi bir parazitin oluşumunu önlemek amacıyla kullanılır. Bunun yerine ısı büzüşmeli başlık veya izolasyon boyası da kullanılabilir. İzolasyon boyası sürüldüğü zaman dış yarı iletkeni kaplar. Bu kaplama sayesinde parazitler engellenmiş olur. İzolasyon boyası pratik olmasından kaynaklı sıklıkla tercih edilir. 90 kV'a kadar kaplama görevini devam ettirebilen bu boya 15 dk boyunca işlevini sürdürmektedir. Fanuslardan bir tanesi güç sistemine bağlanırken, bir diğeri terminasyon sonudur. Kablonun konsantrik ekranı aynı zamanda fanusun toprağına bağlanır.

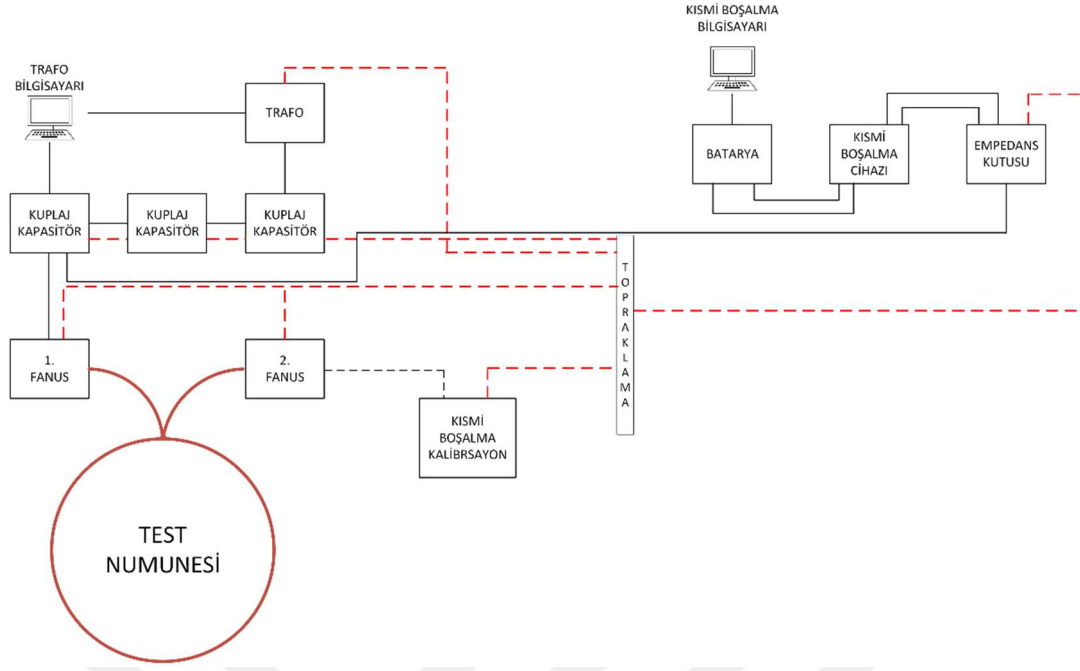
Fanusun bağlantısı, birbirine seri bağlı üç kuplaj kapasitörüne yapılmıştır. Bağlantıdaki ilk kapasitör kısmi deşarj sistemine de bağlıdır ve üzerinden gerilim okunan kondansatör görevini üstlenir. Diğer iki kapasitör yük görevi görmektedir. Kısmi boşalma testleri, çevresel elektromanyetik parazitlerden etkilenmeye oldukça açıktır. Bu nedenle, test sisteminin tamamı Faraday kafesi içerisine kurulmuştur. Faraday kafesi, dış ortamdan gelebilecek yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaları engelleyerek ölçüm sırasında oluşabilecek parazitleri önlemekte ve böylece daha hassas, doğru ve güvenilir veri elde edilmesini sağlamaktadır. İzolasyon boyası ile gerçekleştirilen kısmi boşalma deneyi Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Kısmi boşalma devresi

Kısmi boşalma sistemi, topraklamada oluşan harmonikler aracılığıyla ölçüm yapmaktadır. Bu nedenle, trafodan beslenen sistemin enerji kalitesinin yüksek olması, yani beslemenin distorsiyonun düşük olması gerekmektedir. Besleme sisteminde meydana gelen harmonikler ölçüm sonucunu etkilemekte ve kısmi boşalma değerlerinin yanlış saptanmasına sebep olmaktadır. Test öncesinde ikinci fanusa kısmi boşalma kalibrasyon cihazı takılmıştır. 1 pC'tan 5 pC'a kadar her değer için kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Test sırasında ortalama değer ve en yüksek değer olarak iki adet kısmi boşalma değeri elde edilir. Burada elde edilen en yüksek değer test sonucu olarak kullanılmaktadır. Kullanılan sistemin detaylı gösterimi Şekil 4.23'te verilmiştir. Çizim üzerinde kesikli kırmızı çizgiler topraklama hattını, siyah çizgiler ise bağlantı hattını göstermektedir. Siyah kesikli çizgi sadece test öncesi kullanılan kısmi boşalma kalibrasyon cihazını ifade etmektedir.

Fanus kullanılarak yapılan deney gösteriminde eğer izolasyon boyası kullanılmış olsaydı, test numunesinin bağlandığı fanusun çıkışlarında, siyah çizgi iletken, kırmızı ve kesikli siyah çizgiler ise konsantrik ekrana direkt bağlantılı olacaktı.



Şekil 4.23. Kısmi boşalma deney devresi gösterimi

Kablo anma gerilimi olan U_0 değerinin iki katı bir gerilim seviyesinin uygulanması gerekmektedir. 20,3 kV olan kablo için bu değer 40,6 kV'tur. Kademeli olarak artış sağlanmış ve istenen gerilim değerine ulaşıldığında 10 saniye boyunca bu seviyede bekletilmiştir. Daha sonrasında 35,12 kV seviyesine kademeli olarak düşürülmüştür. Bu değer anma geriliminin 1,73 katıdır. Test sonucunun başarılı olması için ölçülen yük değerinin 5pC'un altında olması gerekmektedir.

Kısmi boşalma değerleri ısıtma çevrimi uygulanmadan önce oda sıcaklığında, kablo ısıtma çevriminde sadece 90 °C sıcaklığa ulaşıldıktan sonra, ilk ısıtma çevrimi ve ikinci ısıtma çevrimi tamamlandıktan sonra ölçülmüştür. 1. set sonrasında yük değeri artsa bile asıl artış 2. set sonrasında gerçekleşmiştir. Bu durum yaşlandırmanın etkisini göstermektedir. Fakat hiçbir ölçüm değeri standardın belirtmiş olduğu 5 pC değerinden yüksek değildir. Tüm testlerin sonucu başarılıdır. Elde edilen her değer Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kısmi boşalma deneyi sonuçları

Koşullar	Sonuç (pC)
Oda sıcaklığı	1,27
90 °C ısıtma	1,33
1. Set Isıtma çevirimi	1,68
2. Set Isıtma çevrimi	3,01

4.4.4. Tanδ ölçüm deneyi

Tan δ testi, yalıtım sisteminin elektriksel özelliklerinin değerlendirilmesiyle dielektrik kayıplar hakkında dolaylı bilgi sağlamaktadır. Bu sayede, yalıtım sisteminin genel durumu hakkında fikir elde edilmesine imkan tanır. İlk olarak, oda sıcaklığında kısmi deşarj testi uygulanan kablo sonrasında tanδ testi için hazırlanır. Bir sonraki aşama ısıtma çevrimi deneyi olacağı için bu aşamada kablo pabuçlanmıştır. Kullanılan pabuçlar iletken ile aynı maddeden olmalıdır. Bakır iletken kullanıldığında bakır pabuçlar, alüminyum iletken kullanıldığında ise alüminyum pabuçlar kullanılmalıdır. Farklı maddeler arasında galvanik korozyon oluşabilir ve bu da bağlantının bozulmasına yol açabilir. Ayrıca, farklı ısıl genleşmeler temasın gevşemesine ve elektriksel kayıplara neden olabilir. Bu sebeple, alüminyum iletkenine sahip kablo numunesine uygun olacak şekilde SP-34 tipi alüminyum pabuç takılmıştır. Pabuçlama işlemi numunenin her iki ucuna da yapılmıştır. Kullanılan pabuç Şekil 4.24'te görüldüğü üzere baş kısmından içeri doğru üç kere sıkılarak sabitlenmiş ve konsantrik ekran izolasyon üzerinden ayrılmıştır.



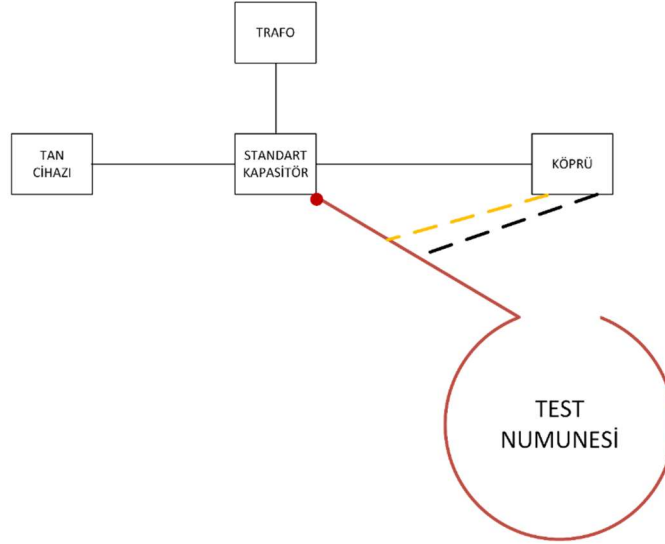
Şekil 4.24. Pabuç takılmış kablo numunesi

Tanδ ölçümü için kablonun hazırlanmasında son aşama ise bakır bant yerleştirilmesidir. Dış yarı iletkene kadar açılmış olan kablo numunesi üzerinden pabuçtan 15-20 cm ilerisine falçata yardımıyla halka şeklinde boşluk açılır. Açılan boşluk çok ince ve derin olmamalıdır. Boşluğun sağ ve sol taraflarına 5 cm uzunluk boyunca bakır bantla sarılıdır. Bakır bantlardan pabuca yakın olanı, artı (+), uzak olanı eksi (-) olacak şekilde tanδ köprü cihazına bağlanır. Pabuçlu uç direkt olarak kapasitöre bağlanır. Bu deney bağlantısı Şekil 4.25'te paylaşılmıştır.



Şekil 4.25. Tanδ deneyi için numunenin bağlantısı

Kapasitöre bağlanan kablo ölçüm için hazırdır. Kapasitör trafo ve tanδ cihazına bağlıdır. Aynı zamanda kablo izolasyonundan bağlantı kurulan köprü cihazı direkt olarak kapasitöre bağlanmıştır. Tanδ cihazı uygulanan gerilimi, kapasite değerini ve tanδ değerini ölçmektedir. Elde edilen bağlantı şeması Şekil 4.26'da verilmiştir. Devre şemasında test numunesinin pabuçla kapasitöre bağlandığı yer kırmızı noktayla, izolasyondan bakır bant ile yapılan ve köprü bağlantısı olan artı (+) uç kesikli sarı, eksi (-) uç kesikli siyah ile gösterilmiştir. Siyah çizgi bağlantıyı, kırmızı çizgi ise test numunesini temsil etmektedir.



Şekil 4.26. Tan delta ölçüm devresi şeması

Tan δ değeri ısıtma çevrimi öncesi, birinci ısıtma çevrimi ve ikinci ısıtma çevrimi sonrasında, oda sıcaklığında ve 90°C’de toplam altı kere ölçülmüştür. Ölçümlerde elde edilen tan δ değeri, kapasite değeri ve uygulanan gerilim değerleri Çizelge 4.5’te verilmiştir. Ölçüm sonuçları hem TS IEC 60502-2 standardına hem de TSE K 204 kriterine göre uygundur.

Çizelge 4.5. Tan δ deneyinde uygulanan gerilim ile kapasite ve tan δ ölçüm değerleri

Koşul	Tan δ	Kapasite (nF)	Uygulanan gerilim (kV)
Oda sıcaklığında	0,00025	2,54859	2,27
90°	0,00055	2,38154	2,25
1. set sonunda			
Oda sıcaklığında	0,00030	2,50317	2,27
90°	0,00078	2,38573	2,23
2. set sonunda			
Oda sıcaklığında	0,00038	2,53660	2,55
90°	0,00136	2,39487	2,25

5. ISITMA ÇEVİRİMİ SİSTEMİNİN ÇOKLU FİZİKSEL SİMÜLASYON MODELİ

Bu bölümde, gerçekleştirilen ısıtma çevrimi uygulama sisteminin çoklu fiziksel analizinin yapıldığı bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan simülasyon, elektriksel ve ısı parametrelerin birlikte ele alındığı analizlerin zamana bağlı olarak yapıldığı, frekansa bağlı geçici durum analizlerine uygun bir modeldir. Ulaşılan simülasyon sonuçları deneysel sonuçlar ile mukayese edilmiş olup, detaylıca değerlendirmesi yapılmıştır.

5.1. Simülasyon Modeli Tanıtımı

Güç kablolarının ısıtma çevrimi ile hızlı biçimde yaşlandırıldığı uygulama sistemi, indüksiyonla ısıtma prensibiyle kablodan akım geçirilmesine dayanmaktadır. Bu nedenle oluşturulan simülasyon modeli, ısı transferi ve manyetik alan fiziklerinin birlikte ele alındığı bir indüksiyonla ısıtma çoklu fiziksel analizi olarak tasarlanmıştır. Isı transferi altında malzemelerin ısıl iletkenlik, ısıl kapasite ve yoğunluk gibi özellikleri tanımlanırken, manyetik alanlar altında ise manyetik geçirgenlik değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların yanı sıra, bağıl dielektrik katsayısı ve sistemde sıcaklığa bağlı lineer olarak değişen bir direnç modeli oluşturulduğundan dolayı ayrıca referans direnç, direnç sıcaklık katsayısı ve referans sıcaklık büyüklükleri kullanılmaktadır. Çizelge 5.1’de modelde kullanılan malzemeler ve bahsi geçen özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Simülasyon modelinde kullanılan malzemelerin özellikleri

Özellik Malzeme	Isıl İletkenlik (W/m.K)	Isıl Kapasite (J/kg.K)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özdirenç (Ω.m)	Sıcaklık Katsayısı (1/K)	Manyetik Geçirgenlik
Alüminyum	230	900	2710	$7,72 \cdot 10^{-5}$	0,0041613	1,00002
Yarıiletken	0,6	400	1150	10^{15}	10^{-15}	1,00001
XLPE	0,286	2170	925	10^{15}	10^{-15}	1
Bakır	401	385	8960	10^{15}	10^{-15}	1
PVC	0,2	900	1380	10^{15}	10^{-15}	1
Hava	0,03	1020	1	10^{15}	10^{-15}	1,0006
Tavlanmış Demir	-					5000

Isıtma çevrimi deney sisteminde indüksiyon bobinleri aracılığıyla kablonun alüminyum iletkeninden akım geçmesi sağlandığı ve iletken direnci ile üzerinden geçen akımın

neden olduğu Joule kayıplarıyla kablo ısındığından dolayı, simülasyonda sadece alüminyumun ölçülen gerçek direnç değeri ve dirençle ilgili özellikleri tam değeriyle verilirken, diğer malzemeler için çok yüksek ve sabit bir direnç büyüklüğü belirlenmiştir. Buna uygun olarak, sistemin geneli için oluşturulan sıcaklığa bağlı lineer değişen direnç modelinde diğer malzemelerin sıcaklıkla dirençlerinin değişiminin takibine gerek bulunmadığından, sıcaklık katsayısı olarak ise sıfıra yakın oldukça küçük bir değer (10-15) belirtilmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için literatürdeki çalışmalardan ve yapılmış ölçümlerden faydalanılmıştır.

Çoklu fiziksel analiz simülasyonunda ısı transferi ile sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için Eş. 5.1 ve Eş. 5.2 kullanılmaktadır.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (5.1)$$

$$q = -k \nabla T \quad (5.2)$$

Burada, ρ (kg/m³) yoğunluğu, c_p (J/kg.K) ısı kapasiteyi, T (K) sıcaklığı, u (m/s) öteleme hareketinin hız vektörünü, q (W/m²) iletim yoluyla gerçekleşen ısı akısını, k (W/m.K) ısı iletkenliği, Q (W/m³) ek ısı kaynağı ve Q_{ted} ise ısı esnek sönümlemeyi ifade etmektedir.

Manyetik alan dağılımının frekansa bağlı geçici durum analizlerinde elde edilebilmesi için Eş. 5.3, Eş. 5.4, Eş. 5.5 ve Eş. 5.6 kullanılmaktadır.

$$\nabla \times H = J \quad (5.3)$$

$$B = \nabla \times A \quad (5.4)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + \sigma v \times B + J_e \quad (5.5)$$

$$E = -j\omega A \quad (5.6)$$

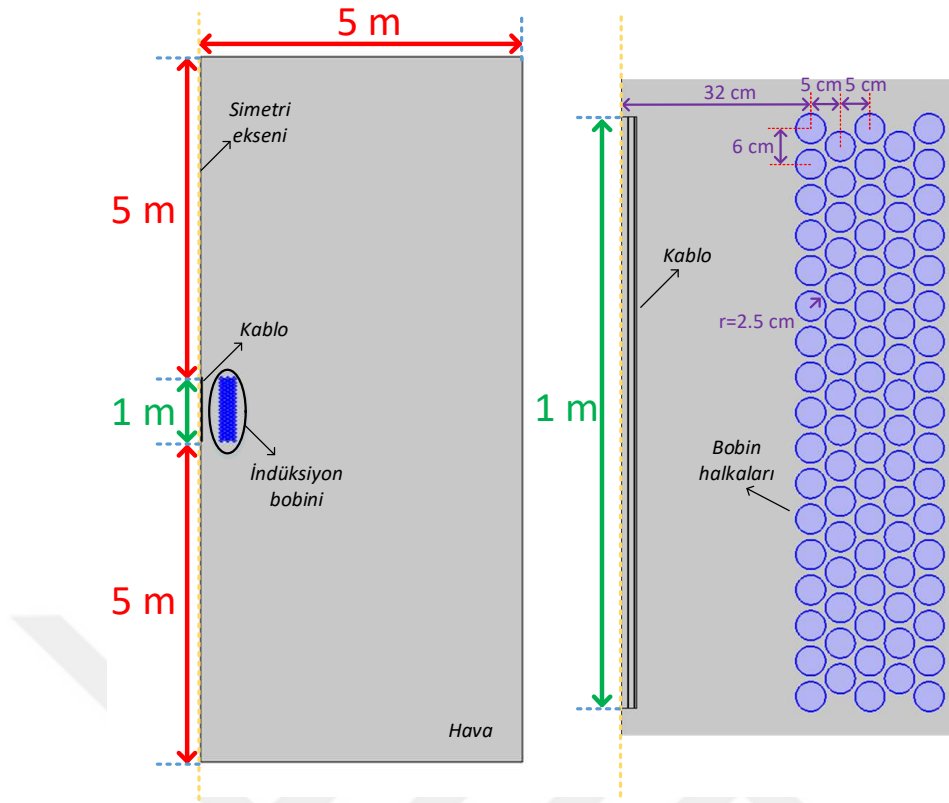
Burada, H (A/m) manyetik alanı, J (A/m²) akım yoğunluğunu, B (T) manyetik akı yoğunluğunu, A (Wb/m) vektör potansiyelini, σ (S/m) elektriksel iletkenliği, E (kV/mm) elektrik alan büyüklüğünü, D (C/m²) elektrik akısı yoğunluğunu, v (m/s) hızı, J_e (A/m²) harici akım yoğunluğunu ve ω (rad/s) açısal frekansı ifade etmektedir.

3 boyutlu modellerin çözüm sürelerinin çok uzun olması, yüksek performanslı bilgisayarlara ihtiyaç duyulması ve 2 boyutlu da istenilen modellerin oluşturulabilmesi

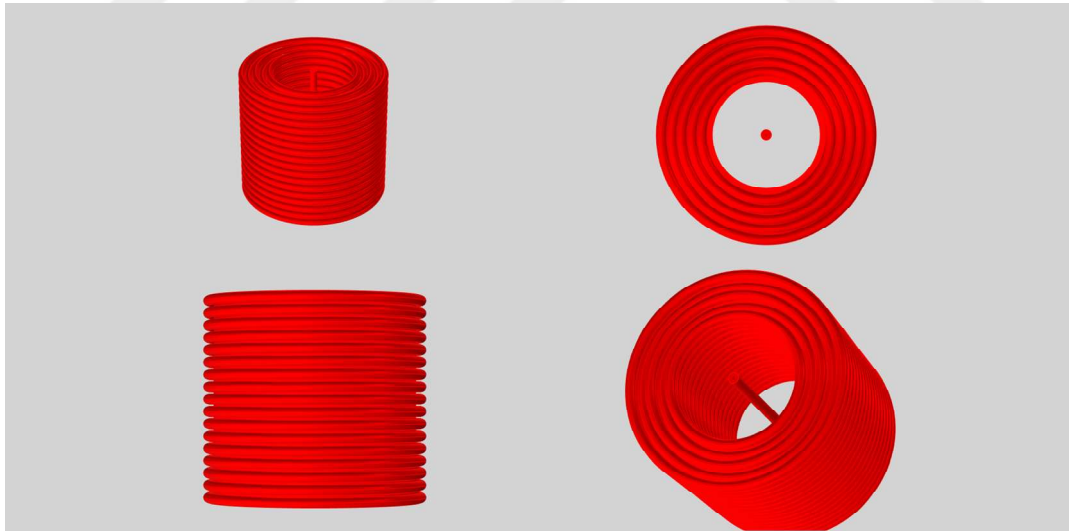
nedeniyle, geliştirilen model 2 boyutlu ve eksenel simetriye sahip olarak tasarlanmıştır. Eksenel simetri özelliği, kablonun silindirik bir yapıya sahip olması ve ısıtmanın indüksiyon bobini aracılığı ile sağlanmasından dolayı rahatlıkla uygulanabilmektedir. Şekil 5.1’den de görüldüğü üzere, kablonun merkezinden geçen y eksenel simetri eksenel olarak alınmıştır. Kablonun uzunluğu 1 metre belirlenmiştir. Eksenel olarak +y, -y ve +x yönlerinde kablonun bitiminden itibaren geometri 5 metre genişletilmiş ve bu hacimde gerçek ortamdaki gibi hava olduğu kabul edilmiştir. Kablo boyutlarına göre bulunduğu hacmin daha büyük modellenmesi, incelenen sıcaklık dağılımında gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Sadece kablo ve indüksiyon bobinini kapsayan dar bir ortamda, oluşan ısı kısıtlı bir dağılım gösterecek ve bulunduğu küçük hacimde sıcaklığın daha yüksek seviyelere çıkmasına neden olacaktır.

Geliştirilen simülasyon modelinde indüksiyon bobini tasarımı, kabloda oluşacak akımın büyüklüğünü, akımın zamana bağlı değişimini, iletkendeki kayıp gücü ve dolayısıyla sıcaklık dağılımını etkilemesi bakımından oldukça önemlidir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, bobin halkalarının toplam sayısının, halkaların kabloya olan mesafesinin, halkaların yarıçapının ve halkaların birbirleri arasındaki uzaklığın indüksiyonla sağlanan ısıtma çevrimini etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin farklı değerleri ile simülasyonlar yinelenmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılan indüksiyon bobininin gösterdiği karakteristiği sağlayan dizayna ulaşılmıştır. İndüksiyon bobini, dikey olarak 5 sıra bobin halkasından oluşmakta olup, Şekil 5.1’de de gösterildiği üzere halkaların merkezleri arasında yatay olarak 5 cm ve dikey olarak ise 6 cm’lik mesafeler bulunmaktadır. Her bir sıra, sırasıyla 17 ve 16 halkadan oluşmakta ve indüksiyon bobininde toplamda 83 halka bulunmaktadır. İlk bobin halkası sırasının merkezi ile kablo merkezi arasında 32 cm’lik bir açıklık vardır. Tüm bobin halkalarının yarıçapları eşit olup 2,5 cm değerine sahiptir.

Şekil 5.1’de görülen model geometrisinin simetri eksenel olan y eksenel etrafında 360° döndürülmesi neticesinde, Şekil 5.2’de gösterilen modelin 3 boyutlu hali ortaya çıkmaktadır. Bu gösterimde merkezde incelenen güç kablosu yer almakta olup, onu çevreleyen indüksiyon bobini farklı açılardan açıkça görülmektedir. Merkezinde kablo ve indüksiyon bobininin bulunduğu $(\pi \cdot 5^2) \cdot 5 = 125\pi \text{ m}^3$ hacminde dış ortamın hava olduğu bir fiziksel yapı oluşmaktadır.



Şekil 5.1.İndüksiyonla ısıtma simülasyon modeli geometrisi



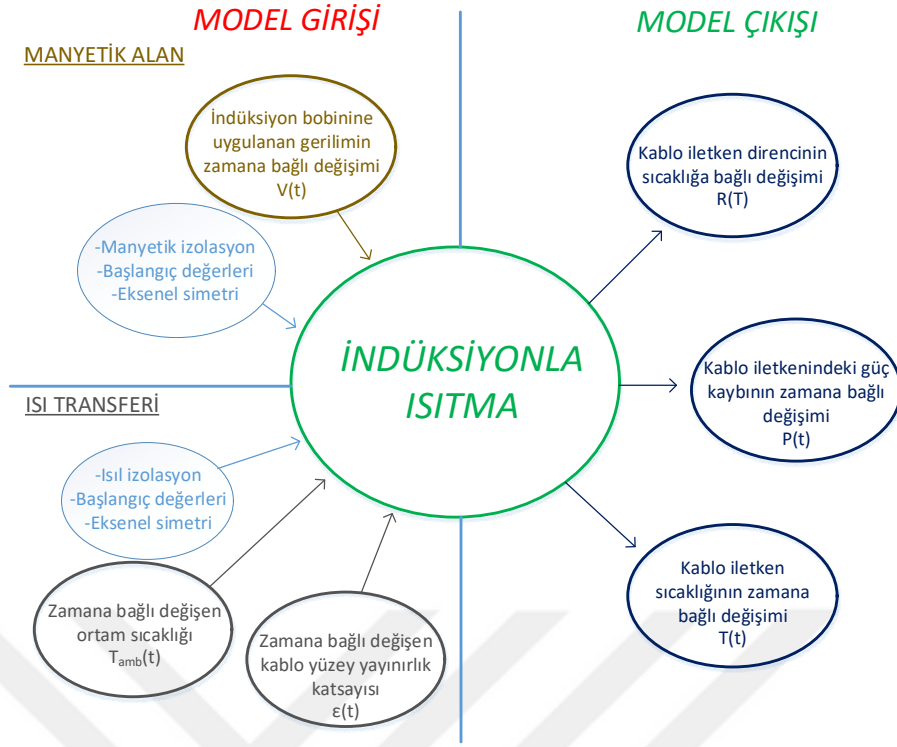
Şekil 5.2. Geliştirilen 2 boyutlu modelin 3 boyutlu hali

Fiziksel modellerin sonlu elemanlar yöntemine göre çözümü yapılmaktadır. Bundan dolayı, sınır koşullarının tipi ve değer olarak büyüklüklerinin doğru tanımlanması, gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Geliştirilen çoklu fiziksel

Şekil 5.3. Modelde tanımlanan sınır koşulları

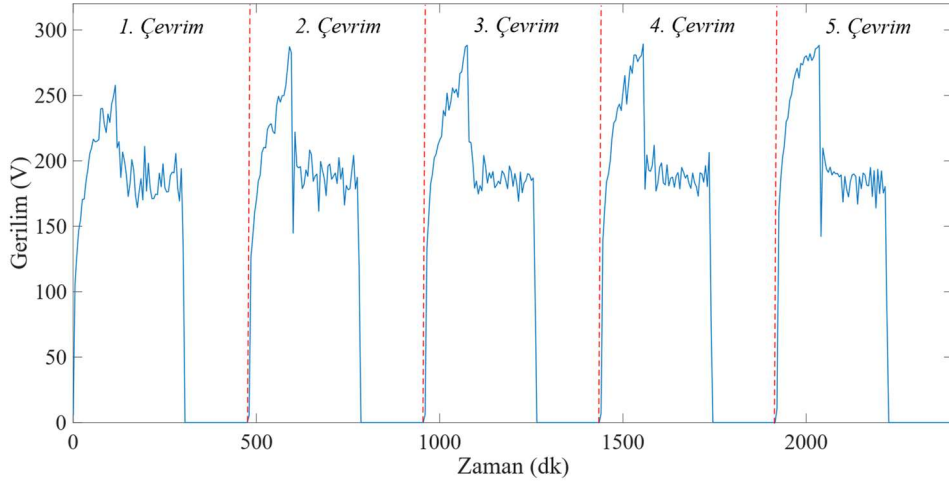
5.2. Çoklu Fiziksel Analiz Simülasyonu

Manyetik alanlar ve ısı transferinin birlikte çoklu fiziksel analiz olarak ele alındığı indüksiyonla ısıtma simülasyonu için model girişinde sağlanan veriler ile çıkışından elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'te verilmektedir. Model girişinde her iki alt fizik için sağlanan veriler ve girilen sınır koşulları ayrı ayrı sunulmuştur. Oluşturulan simülasyon frekansa bağlı olarak geçici durum analizi yapmaya imkan vermektedir. Zamana bağlı olarak tanımlanan parametreler olduğu için dinamik bir simülasyon modeli oluşturulmuştur.



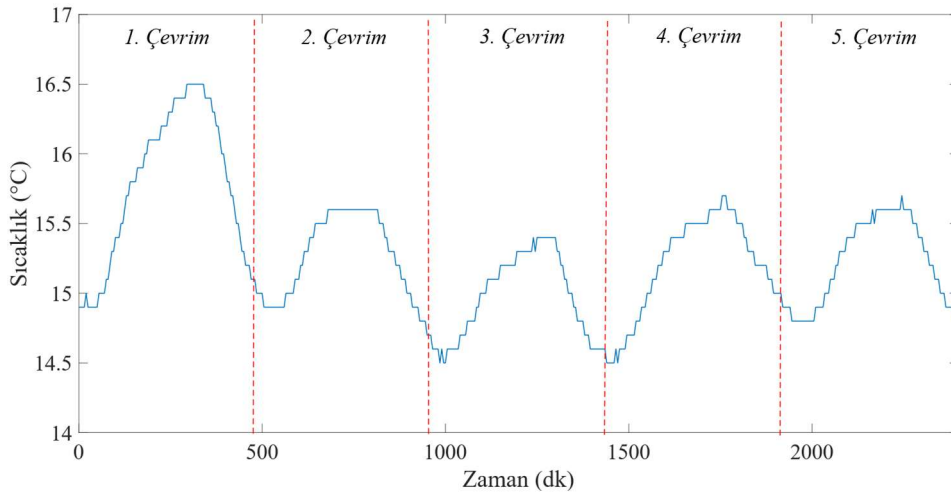
Şekil 5.4. İndüksiyonla ısıtma çoklu fiziksel analiz simülasyon modeli

Simülasyon modeline giriş verisi olarak manyetik alanlar fiziği altında tanımlanan indüksiyon bobinine uygulanan gerilim olan $V(t)$, 50 Hz frekanslı ve 5 dakikada bir yapılan ölçümler ile elde edilmiş olup, Şekil 5.5'te değişimi gösterilmektedir. Uygulanan gerilimin değişimi bobindeki akım yoğunluğunu değiştirmekte ve böylece kablodan geçen akımın büyüklüğü kontrol edilmektedir. Bu kontrolde esas alınan parametre kablo iletken sıcaklığının 90 °C'ye ulaştırılabilmesi ve sonrasında belirlenen sıcaklığın üzerinde tutulabilmesidir. Tüm çevrimlerde iletken sıcaklığı 90 °C'ye çıkana kadar gerilim giderek yükseltilmektedir. Isıtma fazından bekleme fazına geçildikten sonra ise daha düşük bir gerilim uygulanarak, sıcaklığın dengede tutulması sağlanmaktadır. Toplamda 5 saat süren ısıtma ve beklemenin ardından, gerilim uygulaması kesilerek indüksiyonla ısıtma işlemi neticelendirilmekte ve 3 saatlik soğutma fazında iletken sıcaklığının düşmesi beklenmektedir.



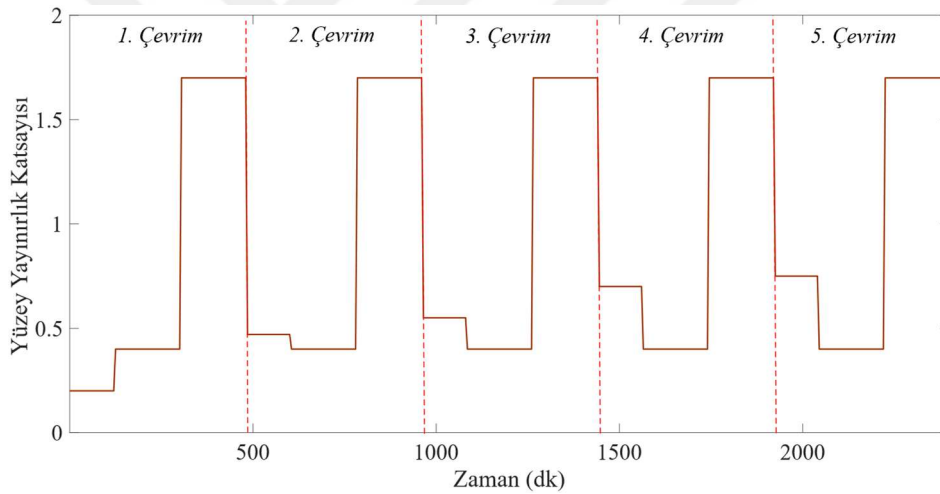
Şekil 5.5. İndüksiyon bobinine uygulanan gerilimin değişimi (V(t))

Isıtma çevrimi ile kablunun yaşlandırılması işleminde ortam şartları da bir parametre olarak dikkate alınmalıdır. Şekil 5.6'da ısıtma çevrimi uygulandığı sırada ortam sıcaklığı için alınan ölçüm verileri paylaşılmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışma esnasında, ortam sıcaklığını dengelemek için herhangi bir harici uygulama yapılmamıştır. Bu nedenle, ortam sıcaklığının değişimi tamamen doğal olarak gerçekleşmektedir. Güç kablosu ve deney düzeneğinden 3 metre uzaklıkta sıcaklık ölçümü yapılmıştır. İncelenen 5 çevrim süresince en yüksek sıcaklık ve en düşük sıcaklık arasındaki farkın yaklaşık olarak 2 °C olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Ortam sıcaklığının değişimi ($T_{amb}(t)$)

Güç kablosunun iletkeninden geçen akımla birlikte oluşan ısı, kablonun tüm katmanlarından geçerek en son kablonun dış kılıfı üzerinden dış ortama yayılmaktadır. Kablo ile ortam arasındaki bu ısı transferinde, ısıtma çevrimleri ile her bir ısıtma çevriminin üç fazı arasında farklı davranışlar görüldüğü sonucuna varılmıştır. Bundan dolayı, kablo dış kılıfı üzerine yüzeyden ortama radyasyon olarak isimlendirilen sınır koşulu tanımlanırken, farklı ısıtma çevrimleri ve onların her bir fazı için farklı yüzey yayınlılık katsayıları ($\epsilon(t)$) girilmiştir. İncelenen 5 çevrim için yüzey yayınlılık katsayılarının zamana bağlı değişimi Şekil 5.7’de paylaşılmıştır. Buna göre, yayınlılık katsayısı en yüksek değerini soğutma fazında alırken, ısıtma fazındaki değerinin çevrimler ilerledikçe giderek yükseldiği görülmektedir. Üç çevrim fazı arasında en kararlı ısı yayılımının bekleme fazında gerçekleştiği açıkça ortadadır. İlerleyen çevrimlerde yayınlılık katsayısının ısıtma fazındaki değerinin soğutma fazındaki değere yaklaşma eğiliminde olduğu belirtilmelidir.

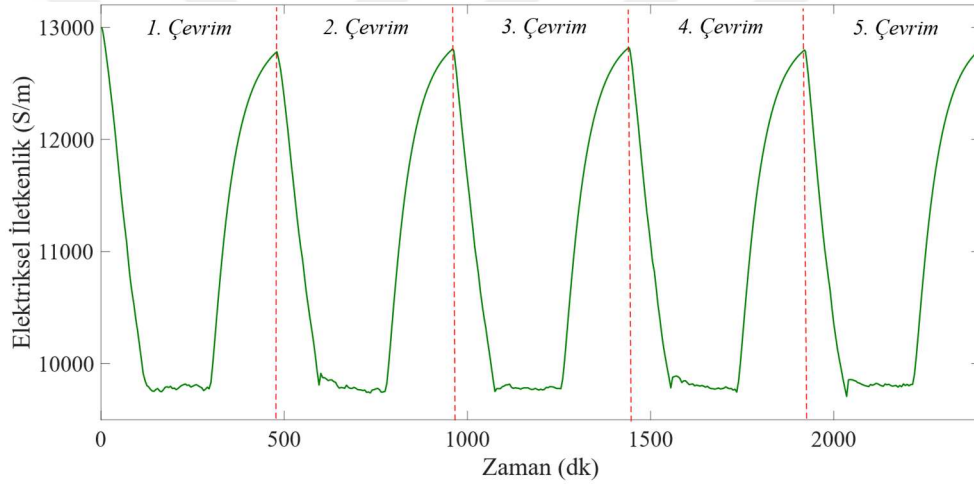


Şekil 5.7. Yüzey yayınlılık katsayısının değişimi ($\epsilon(t)$)

5.3. Simülasyon Sonuçları ve Analizi

Çoklu fiziksel analiz kapsamına giren indüksiyonla ısıtma simülasyonu, deneyleri yapılan güç kablosuna ısıtma çevrimi uygulamasının ilk 5 çevrimi için gerçekleştirilmiştir. Her bir ısıtma çevrimi gerçekte 2 saatlik ısıtma, 3 saatlik bekleme ve 3 saatlik ise soğuma olmak üzere 8 saatlik bir süreyi kapsadığından, 5 çevrim için toplamda 40 saatlik süren bir deneyin simülasyonu analiz edilmiştir. Ulaşılan elektriksel, ısı ve manyetik parametrelere ait sonuçlara göre indüksiyon bobininin de dahil olduğu indüksiyonla ısıtma sistemi tasarımının başarılı olduğu görülmüştür.

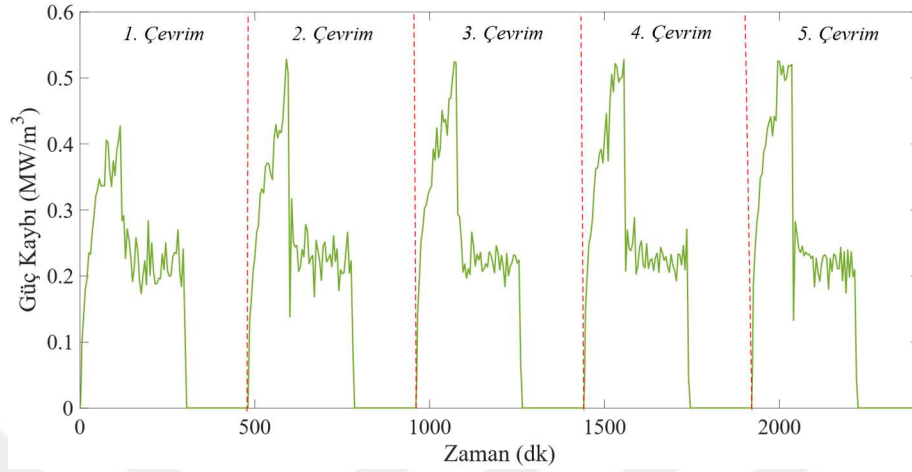
Güç kablosunun alüminyum iletkeni için lineer olarak değişen direnç modeli kullanılmıştır. Buna göre, iletken direnç ölçümü 15 °C’de yapılmış ve direnç büyüklüğü bu sıcaklıkta $7,72 \cdot 10^{-5} \Omega/m$ ölçülmüş olup, simülasyonda da bu büyüklük referans direnç olarak alınmıştır. Şekil 5.8’de kablo iletkeninin elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa ve zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. İletkenliğin en yüksek olduğu an en düşük sıcaklığın görüldüğü $t=0$ ’dır. İletken sıcaklığının geçen akımla birlikte yükselmesiyle elektriksel iletkenliği azalmaktadır. Çevrimlerin ısıtma fazında iletkenlik giderek azalarak, sıcaklığın 90 °C’nin üzerinde ulaştığı en yüksek noktada minimum değerini almaktadır. Bekleme süresi boyunca iletken sıcaklığında büyük bir değişim olmadığı için iletkenlik yaklaşık olarak aynı düzeyde kalır. Soğuma fazında ise kablodan akım geçmediği için sıcaklık düşmeye başlar ve bu sayede elektriksel iletkenlik de yine yükselmeye başlamaktadır.



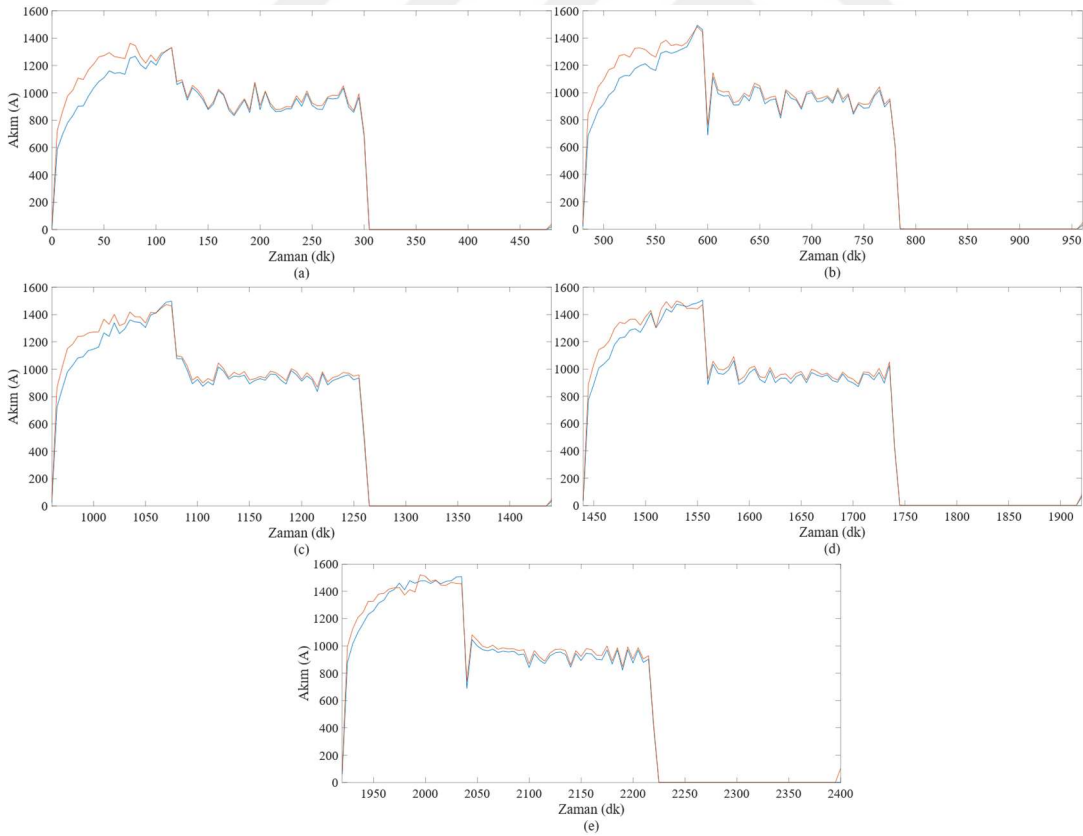
Şekil 5.8. Kablo iletkeninin elektriksel iletkenliğinin zamana bağlı değişimi

İndüksiyonla ısıtılan güç kablosundan geçen akımın büyüklüğünün tespit edilebilmesi için iletken üzerinde oluşan hacimsel güç kaybı kullanılmıştır. İletkende oluşan güç kaybının zamana bağlı değişimi 5 çevrim için Şekil 5.9’da gösterilmektedir. Akım değerinin belirlenebilmesi için anlık olarak gerçekleşen hacimsel güç kaybı, kablo iletkeninin hacmiyle çarpılarak 1 metrelik kabloda meydana gelen anlık Joule kaybı büyüklüğü hesaplanmıştır. Sonrasında $I^2.R$ eşitliği kullanılarak kayıp güç değerinden anlık akım büyüklüğü elde edilmiştir. Akımın hesaplanmasında direnç değerine, Şekil 5.8’de verilen elektriksel iletkenlik değerinin tersi alınarak ulaşılmış olup, akımın belirlendiği ilgili an için kullanılmıştır. Dolayısıyla, dinamik olarak modellenen

simülasyonda zamana bağlı olarak değişen direnç ve hacimsel güç kaybı kullanılarak akım tayini yapılmıştır. Bu işlem neticesinde elde edilen akım değişimi 5 çevrim için deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 5.10’da sunulmuştur.

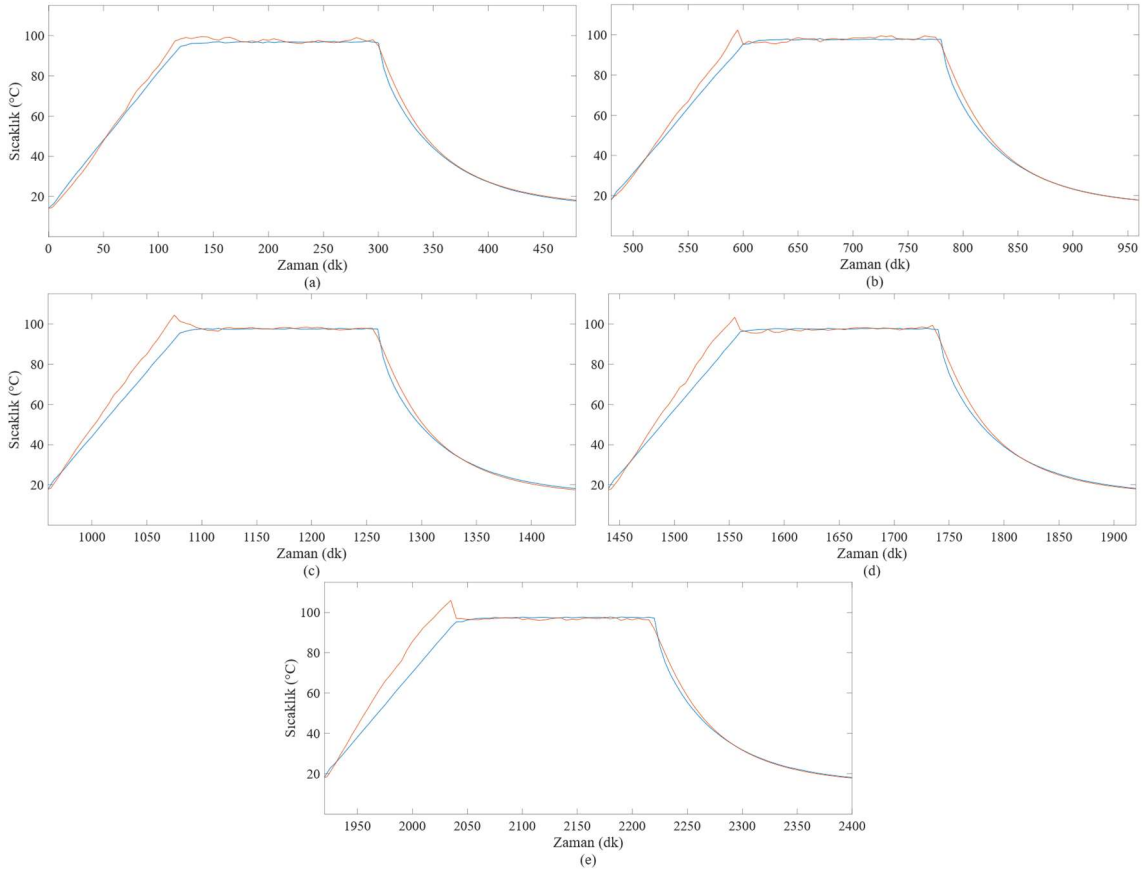


Şekil 5.9. Kablo iletkeninde oluşan güç kaybının zamana bağlı değişimi



Şekil 5.10. Isıtma çevrimlerinde kablo iletkeninde oluşan akım değişimlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Mavi: Deneysel, Kırmızı: Simülasyon) , a) 1. çevrim, b) 2. çevrim, c) 3. çevrim, d) 4. çevrim, e) 5. çevrim

İncelenen 5 ısıtma çevrimi dikkate alındığında, bekleme ve soğutma fazlarında simülasyondan elde edilen akım değişiminin deneysel sonuçlarla oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, ısıtma çevrimi süresince görülen anlık akım değişimleri de birbirine paralellik göstermektedir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki en önemli fark ısıtma fazında gerçekleşmektedir. Bunun en önemli nedeninin, deneylerde iletken direncinin değişim hızının simülasyona göre farklı bir karakteristiğe sahip olmasıdır. Bekleme fazındaki akımların örtüşmesi, referans sıcaklıktaki ölçülen direnç büyüklüğünün ve belirlenen direnç sıcaklık katsayısı değerinin doğruluğunu ortaya koymaktadır. Bu işlem neticesinde elde edilen sıcaklık değişimi 5 çevrim için deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 5.11’de sunulmuştur.

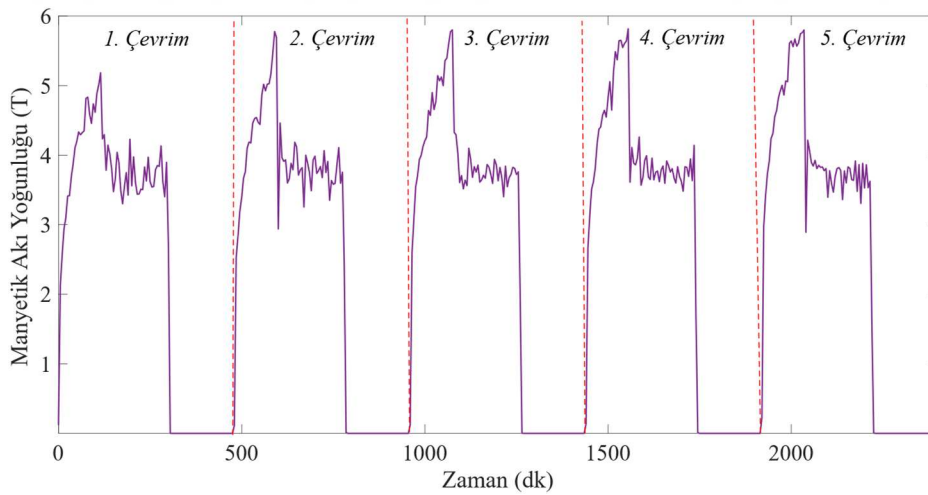


Şekil 5.11. Isıtma çevrimlerindeki iletken sıcaklığı değişimlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Mavi: Deneysel, Kırmızı: Simülasyon), a) 1. çevrim, b) 2. çevrim, c) 3. çevrim, d) 4. çevrim, e) 5. çevrim

Analiz edilen ısıtma çevrimleri için kablo iletken sıcaklığının değişimi elde edilerek, deneysel sıcaklık verileri ile karşılaştırması yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü amacıyla güç kablusunun iletkeninde farklı noktalara yerleştirilmiş 3 adet termokupl kullanıldığından

dolayı, bu mukayese Şekil 4.9’da verilmiş olan 3 farklı deneysel sıcaklık ölçüm verisinin eş zamanlı aritmetik ortalaması alınarak ulaşılan ortalama sıcaklık değerlerine göre yapılmıştır. Buna göre, ısıtma çevrimlerinin bekleme ve soğutma fazlarında simülasyon sonuçları ile deneysel ölçümlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. İlk çevrimde ısıtma fazı için de aynı durum olduğu ortadadır. Ancak, ilerleyen ısıtma çevrimlerinde ısıtma fazında deneysel sıcaklık değişimine göre simülasyondaki sıcaklık değişim hızı daha yüksek olmaktadır. Ancak, ısıtma fazındaki akım değişimleri incelendiğinde ısıtma çevrimleri ilerledikçe deney verileri ile olan uyum artmaktadır. Dolayısıyla, ısıtma fazındaki sıcaklık artış hızının yükselmesi yaşlandırılan kablonun ısı parametrelerinde meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır.

İndüksiyon bobini aracılığı ile kablo iletkeninden istenilen seviyede akımın geçirilebilmesi için belli bir manyetik akı yoğunluğu düzeyine ulaşılması gerekmektedir. Kablodan geçen akım zamana bağlı olarak değişkenlik gösterdiği gibi manyetik akı yoğunluğu da farklı değerler almaktadır. Şekil 5.12’de kablo iletkeninde oluşan manyetik akı yoğunluğunun en yüksek değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Kablo iletkeninde oluşan manyetik akı yoğunluğunun maksimum değerinin zamana bağlı değişimi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, TSE K 204 kriterine uygun olarak üretilmiş 1x400/35 mm² kesitli NA2XSY tipi 20,3/35(42) kV'luk orta gerilim (OG) kablosunun tip testleri yapılarak ulaşılan sonuçlar doğrultusunda mekanik ve elektriksel performansı değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen bulgular, incelenen kablonun hem ulusal hem de uluslararası standartlara uygun olduğunu ortaya koymuştur.

TS EN 60228 standardında belirtilen iletken çapı, et kalınlığı ve dış kılıf çapı gibi yapısal özellikleri incelenmiş ve tüm ölçümlerin standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir.

Mekanik testler kapsamında yapılan deneyler, kablonun farklı sıcaklık koşullarına karşı dayanımını göstermiştir. Soğukta darbe ve soğukta uzama testleri, sırasıyla TS EN 60811-506 ve TS EN 60811-505 standartlarına göre başarıyla tamamlanmıştır. Özellikle %20 minimum uzama gerekliliğine karşın daha yüksek değerler elde edilmiş olup, bu durum kablonun düşük sıcaklıklarda mekanik dayanımını desteklemektedir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen büzülme (TS EN 60811-503), sıcakta basınç (TS EN 60811-508) ve sıcakta çekme (TS EN 60811-507) testlerinde de kablonun sınır değerlerin altında kaldığı ve uygunluk sağladığı belirlenmiştir. Çekme-kopma testleri ise yaşlandırma öncesi ve sonrası olarak hem izolasyon hem de kılıf açısından değerlendirilmiş ve TS EN 60811-501 ile TS EN 60811-401 standartları kapsamında herhangi bir uygunsuzluk gözlemlenmemiştir.

Kablonun mekanik bütünlüğünün değerlendirildiği bükme testinden sonra, izolasyon ve kılıfta herhangi bir kusur gözlemlenmemiş ve elektriksel testlere geçilmiştir. Elektriksel testler kapsamında ilk olarak iletkenin direnç ölçümü yapılmış ve TS EN 60228 standardına uygun olduğu doğrulanmıştır. Ardından, kıvılcım testi gerçekleştirilmiş ve cihazın alarm vermemesi, izolasyon ve kılıf bütünlüğünün korunduğunu göstermiştir. Üretimi tamamlanan kabloda iletken direnci 0,0772 Ω /km, konsantrik ekran direnci ise 0,4773 Ω /km olarak ölçülmüş ve bu değerler kabul edilebilir sınırlar içinde yer almıştır.

TSE K 204 kriterinde ve TS EN 60502-2 standartlarında yer alan hızlı kablo yaşlandırma yöntemlerinden biri olan ısıtma çevrimi deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, deneysel prosedürlere uygun olarak ilk aşamada her bir çevrimin 8 saat süreli olduğu ve toplamda 20 çevrimden oluşan bir set tamamlanmıştır. Isıtma çevrimi öncesinde ve sonrasında yapılan tanδ ve kısmi boşalma testlerinde elde edilen veriler, standardın belirlediği sınır değerlerin altında kalmış olup, böylece kablonun elektriksel bakımdan uygunluğu ortaya konulmuştur.

Aynı kablo numunesi üzerinde, ilkiyle aynı koşullarda olmak üzere ikinci bir ısıtma çevrimi seti daha uygulanmıştır. Bu set de her biri 8 saat süreli 20 çevrimden oluşmuştur. İkinci çevrim seti tamamlandıktan sonra yeniden tanδ ve kısmi boşalma testleri yapılmış; sonuçlar birinci setle benzer şekilde uygun bulunmuştur. Her iki setin ardından gerçekleştirilen testlerde, kablonun ısıtma çevrimlere karşı dielektrik dayanımında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Kablonun yaşlandırıldığı ısıtma çevrimi deneylerinde kullanılan indüksiyonla ısıtma sisteminin, çoklu fiziksel analiz olarak simülasyon modeli oluşturulmuştur. Öncelikle, indüksiyon bobininin tasarımı yapılmış ve genel model geometrisine nihai hali verilmiştir. İletkende oluşan hacimsel güç kaybının değişiminden Joule kaybının değişimine ulaşılmış ve lineer değişen iletken direnci kullanılarak akımın zamana bağlı değişimi elde edilmiştir. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, güç kablosundan geçen akımın zamana bağlı değişiminin uyumlu olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, kablo iletken sıcaklığının değişimi de özellikle bekleme ve soğutma fazlarında oldukça uyumlu olup, ısıtma fazında görülen farkın kablonun ısıtma parametrelerinin değişiminden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Tüm testler değerlendirildiğinde, söz konusu NA2XSY tipi kablonun hem mekanik hem de elektriksel açıdan belirlenen standartları sağladığı, zorlu çevresel koşullarda güvenli ve kararlı bir şekilde çalışabileceği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, kablonun uzun vadeli kullanım açısından güvenilirliğini ve performans istikrarını desteklemektedir.

Bu tez çalışması kapsamında ulaşılan deneysel sonuçlardan yola çıkılarak oluşturulan veri seti sayesinde yapay zeka çalışmalarının yürütülmesi planlanmakta olup, böylelikle yaşlandırma deneylerine ayrılan zaman, iş gücü ve maddi kaynak minimize edilerek yaşlandırma prosedürünün gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Z. Wróbel, R. Ziemia, R. Markowska, R. Mielnik.** (2024). Electromagnetic Impact of Overhead High-Voltage Lines during Power Transmission on Buried Signaling Cables of the Traffic Control Systems in Modernized Railway Lines, *Energies*, 17:(11), 2554.
- [2] **E. L. Codjo, B. B. Zad, J. F. Toubeau, B. François, F. Vallée.** (2021). Machine learning-based classification of electrical low voltage cable degradation, *Energies*, 14:(10), 2852.
- [3] **L. Yseboodt, C. Jones, C. David Tremblay.** (2017). Power over Ethernet-Cable Losses, Ethernet Alliance.
- [4] **M. Wang, S. Zhou, M. Yang, Y. Zhang.** (2019). Calculation of electrothermal coupling power flow for XLPE insulated cable- based distribution systems, *Electrical Power and Energy Systems*. 14:(4), 952.
- [5] **G. Chen, M. Hao, Z. Xu, A. Vaughan, J. Cao, H. Wang.** (2015). Review of high voltage direct current cables, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 1:(2), 9–21.
- [6] **S. Hvidsten, K. M. Bengtsson, E. Olsson, S. B. Hårberg, M. A. Einarsrud.** (2024). Wet Ageing of two High Voltage Cable Designs for Offshore Wind Inter Arrays. In *ICHVE. 2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications*, Berlin, 1-4, Ağustos.
- [7] **V. V. Kharlamov, S. E. Romanov, Y. P. Shkarin, Anton. G. Merkulov.** (2019). Characteristics of PLC Channels over High Voltage Power Cables and Mixed Cable-Overhead High Voltage Power Lines. In *GPECOM. 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference Nevsehir*, 35-40, Haziran.
- [8] **H. Al-Khalidi, I. Member, A. Kalam, I. Member.** (2006). The Impact Of Underground Cables On Power Transmission And Distribution Networks, In *2006 IEEE International Power and Energy Conference*, Putra Jaya, 576-580, Kasım.
- [9] **D. S. Freitas, A. T. Prata.** (2019). Thermal Performance Of Underground Power Cables With Constant And Cyclic Currents In Presence Of Moisture Migration In The Surrounding Soil, *IEEE, Transactions on Power Delivery*, 11:(3), 1159-1170.
- [10] **H. Kumar, S. Kumagai, Y. Saito, T. Yoshioka.** (2024). Latest trends and challenges in PVC and copper recovery technologies for End-of-Life thin cables, *Waste Management*, 174, 400-410.

- [11] **C. Zhou, Z. Cao, G. Wei, K. Wu.** (2023). Research on Pyrolysis Characteristics of PE Outer Sheath of High-Voltage Cables Based on the Principle of Oxygen Consumption, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 18:(1), 679–685.
- [12] **X. Qi, S. Boggs.** (2006). Thermal and mechanical properties of EPR and XLPE cable compounds, *DEIS, feature Article*, 22 :(3), 19-24.
- [13] **S. Ahmad, Z. Rizvi, M. A. Khan, J. Ahmad, F. Wuttke.** (2019). Experimental study of thermal performance of the backfill material around underground power cable under steady and cyclic thermal loading, *Materials Today: Proceedings*, 17:(1), 85-95.
- [14] **M. Takahashi, J. K. Jorgensen, A. B. Jorgensen, S. Munk-Nielsen, C. Uhrenfeldt.** (2023). Heat cycle failure point prediction by 3D thermal stress analysis for medium voltage power module, In *APEC. 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Orlando, 2668–2675.
- [15] **Q. Wang, L. Xiaomei, J. Cao, Y. Liu, J. Han, J. He, J. Huang.** (2024). The Optimized Heating Current Strategy for Temperature Control of HVDC Cables during Load Cycle Tests In *ICEACE. 2024 IEEE 2nd International Conference on Electrical, Automation and Computer Engineering*, Changchun, 148–153, Aralık.
- [16] **G. Shoshani, S. Mitschke, S. Stephan.** (2010). Industrial Fieldbus Technology And Fieldbus Cable Overview-Cable Standards And Electrical Qualifications, *Copyright Material IEEE*, 36-46.
- [17] **J. Duell, J. Dix, G. Callender, T. Henstock, H. Porter.** (2023). Opportunities to Improve Marine Power Cable Ratings with Ocean Bottom Temperature Models, *Energies* 16:(14),5454.
- [18] **S. Wu, W. Zhang, J. Chen, K. Skrzypkowski, K. Zagórski, A. Zagórska.** (2024). Investigation into Effects of Coating on Stress Corrosion of Cable Bolts in Deep Underground Environments, *Materials*, 17,3563.
- [19] **J. W. Ringsberg, L. Dieng, Z. Li, I. Hagman.** (2023). Characterization of the Mechanical Properties of Low Stiffness Marine Power Cables through Tension, Bending, Torsion, and Fatigue Testing, *Journal of Marine Science and Engineering*, 11:(14),1791.
- [20] **L. Zhang, W. Wu, Y. Xu, Y. Zhou.** (2021). Enhancement of Low-Temperature Brittleness of Isotactic Polypropylene Filled with Thermoplastic Elastomer for HVDC Cables. In *EIC. 2021 IEEE Electrical Insulation Conference*, Denver, 301–304, Haziran.
- [21] **Y. A. Antonets, L. A. Shchebeniuk, O. M. Grechko.** (2019). Technological Monitoring Of Electrical Resistance Of Pressed Cable Conductors In Production Conditions, *Electrical Engineering and Electromechanics*, 2019:(4), 48–52.
- [22] **G. Zhu, S. Wang, Y. Zhang, L. Jiang, Q. Li, D. Zhang,** (2024). Partial Discharge Pattern Recognition in High Voltage Transmission Cable Project. In *ICETCI*.

2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information, Changchun, 1170–1173, Mayıs.

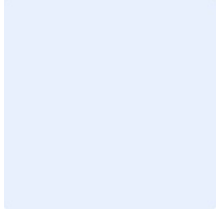
- [23] **A. Mingotti, A. Ghaderi, L. Peretto, R. Tinarelli, F. Lama.** (2018). Test Setup Desing, and Calibration for Tan Delta Measurements on MV Cable Joints. In AMPS, 2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, Bologna, 1-5, Eylül.
- [24] **L. Li, L. Zhong, K. Zhang, J. Gao, M. Xu.** (2018). Temperature dependence of mechanical, electrical properties and crystal structure of polyethylene blends for cable insulation, *Materials* 11:(10),1922.
- [25] **S. Conlan, J. Courtney, T. Looby.** (2015). Accelerated Aging Test on Multiple XLPE MV Cables Simultaneouslt to Induce Water Trees. In UPEC. 50th International Universities Power Engineering Conference, Stoke on Trent, 1-4, Eylül.
- [26] **A. Phayomhom, K. Kveeyarn.** (2013). Heat Cycles Test Set for Power Cable. In 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi, 2668-2675, Mayıs.
- [27] **S. Péliissou, G. Lessard.** (2011). Underground Medium-Voltage Cable Rejuvenationpart I: Laboratory Tests On Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26:(4), 2324–2332.
- [28] **Y. Mecheri, A. Medjdoub, A. Boubakeur, S. Boujemâa.** (2023). Characterization of Laboratory Aged MV XLPE Cables Using Dielectric Losses Factor Measurements. In CISTEM. 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb. Tunis, Kasım.
- [29] **J. Borghetto, G. Pirovano, C. Tornelli, A. Contin.** (2019). Off-Line and Laboratory On-Line PD Tests on Thermally Aged MV Cable Joints, In EIC. Electrical Insulations Conference, Calgary, 418-422, Haziran.
- [30] **J. Borghetto, G. Pirovano, C. Tornelli, A. Contin.** (2018). Test Set-Up and Preliminary Results of PD Measurements Preformed During Thermal Cycles Applied to Different Types of MV Cable Joinnts, In EIC. 2018 IEEE Electrical Insulation Conference, San Antonio, 558-561, Haziran.
- [31] **J. Borghetto, A. Contin, A. Morotti, A. Pengoiani, G. Pirovano, D. Sirtori, C. Tornelli.** (2020). Laboratory Ageing Thermal Cycles of MV Cable Joints: results of different diagnostic techniques, In AEIT. 2020 AEIT International Annual Conference, Catania, 1-6, Eylül.
- [32] **S. Hou, H. Wang, Y. Yu, B. Feng, W. Zhu, Y. Zhang.** (2021). Study on Pressure Variation Characteristics of Cable Accessories Interface under Temperature Cycling. In ICEMPE. 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, Chongqing, 1-4, Nisan.
- [33] **M. A. Hamdan.** (2024). Analysis of interfacial pressure changes of thermally cycled cold shrinkable joints, *Electrical Engineering*, 170, 4567-4581.

- [34] **H. Yanpeng, C. Yun, Y. Lin, Q. Weihao, H. Weiquan, H. Jichao.** (2017). Research on Simplified Equivalent Method of 3D Simulation Model for Temperature Distribution of HVDC Submarine Cables, In ICEMPE. 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment, Xi'an, 102-108, Mayıs.
- [35] **Karhan M.** (2017). Yüksek gerilim dağıtım kablolarındaki su ağacı görüntü işleme teknikleriyle incelenmesi (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] **Uydu C. Ç.** (2021). Alternatif ve darbe yüksek gerilimleri ile yaşlandırılmış orta gerilim yeraltı kablolarının performans analizi (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] **P. Huang, W. Yu, C. Lu, X. He, Y. Zhang, Y. Liu, J. Zhou, Y. Liang.** (2023). Quantitative Evaluation of Thermal Ageing State of Cross-Linked Polyethylene Insulation Based on Polarization and Depolarization Current, *Materials* 15:(5),1272.
- [38] **L. Boukezzi, A. Boubakeur.** (2018). Effect of Thermal Aging on the Electrical Characteristics of XLPE for HV Cables, *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 19:(5), 344–351.
- [39] **R. Korkmaz Tan, K. Önder, F. Yerişenoğlu, R. Mutlu.** (2023). Usage of an Excel Spreadsheet for a Thermal Endurance Test Report, *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6:(2), 91–97.
- [40] **M. O. Alhusin, A. Sahoo, I. Nikolakakos, H. Alhammadi, A. Alsahi, M. Alhammadi.** (2022). Weather and Seasonal Effects on Medium Voltage Underground Cable Joint Failures, In *EEEIC / I&CPS Europe. 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, Prague1-6, Haziran.
- [41] **Z. Ádám Tamus.** (2009). Complex diagnostics of insulating materials in industrial electrostatics, *Journal Electrostat*, 67:(2), 154–157.
- [42] **D. Bolliger.** (2018). Simultaneous Partial Discharge and Tan Delta Measurements: New Technology in Cable Diagnostics, In *T&D. 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Denver, 1-6, Nisan.
- [43] **W. Vahlstrom.** (2009). Strategies for Field Testing Medium Voltage Cables, *DEIS, Feature Article*, 25:(5), 7-17.
- [44] **D. Carroll, B. Carroll, N. Frost.** (2023). Continuous, Inline Testing of Magnet Wire Products: Advantages and Considerations, In *EIC. 2023 IEEE Electrical Insulation Conference*, Quebec City, Haziran.
- [45] **V. V. Red'ko, L. B. Burtseva, L. A. Red'ko.** (2021). Reliability of the spark inspection of cable product insulation, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 47:(10), 672–674.

- [46] **United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC).** (2006). “Medium Voltage Underground Cable White Paper,” Duke Power Company, Exelon Corporation.
- [47] **TECHIMP US Corp,** “Partial Discharge Testing Of Medium Voltage Cables Online Or Offline Article” Techimp Altanoca Group, Georgia.
- [48] **T. Meyer, W. Stoecklein.** (2021). Impact of The Burner Flame Shape On Cable Burn Performance Testing According to En 50399, Communication Cable Networks; 28th ITG Symposium, 129-136.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı	Muhammed Kaan ALEV	
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu	Türkiye Cumhuriyeti	
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi		

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Kırlareli Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2022

Yüksek Lisans	
Üniversite	Kırlareli Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı	Tezli Yüksek Lisans

Makale ve Bildiriler	