

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK GERİLİM KABLOLARINDA DİELEKTRİK KAYIP PARAMETRELERİNİN
FARKLI İŞLETME KOŞULLARINDA DENEYSEL VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
İNCELENMESİ**

CELAL FADIL KUMRU

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. CELAL KOCATEPE**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK GERİLİM KABLOLARINDA DİELEKTRİK KAYIP PARAMETRELERİNİN
FARKLI İŞLETME KOŞULLARINDA DENEYSEL VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
İNCELENMESİ

Celal Fadıl KUMRU tarafından hazırlanan tez çalışması 13.01.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Celal KOCATEPE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Celal KOCATEPE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan ÜNDİL
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2012-04-02-DOP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Enerji kavramı günümüz dünyasında oldukça önemli bir yere sahiptir. Özellikle teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler tüm dünyada hızlı bir şekilde artmakta ve enerjiye olan ihtiyaç da insan yaşamının vazgeçilmez bir parçası haline gelmektedir. İhtiyaç duyulan enerji talebinin karşılanabilmesinin yanı sıra bunu sağlayabilecek altyapının da yeterli ve süreklilik sağlayabilecek nitelikte olması gerekmektedir. Bu açıdan bakıldığında, son kullanıcı ile direkt bağlantılı olan dağıtım sisteminin ve bu sisteme ait güç ekipmanlarının (transformatör, kablo, kesici, vb.) süreklilik sağlaması, güvenilir bir şekilde çalıştırılabilmesi ve anlık olarak izlenebilmesi gerekmektedir. Özellikle dağıtım ağında kullanılan yeraltı kablolarının, üretilen enerji ile kullanıcı arasındaki bağlantıyı sağlayan yegâne ekipman olmaları nedeniyle, kalite performanslarının araştırılması ve incelenmesi önem arz etmektedir. Bu açıdan, bu tez çalışmasında dağıtım sisteminde kullanılan bir orta gerilim yeraltı kablosunun farklı işletme koşullarındaki davranışları deneysel olarak incelenmiş ve daha farklı durumlardaki kalite performansının tahmin edilebilmesi/öngörülebilmesi için ölçüm verileri kullanılarak bir yapay sinir ağı uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendiren ve bana her adımda destek olan sayın danışman hocam Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye, kıymetli görüşleri ile bana yol gösteren hocam Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, değerli yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN ve Yrd. Doç. Dr. Muharrem MERCİMEK'e, dostluk ve sonsuz destekleri için Arş. Gör. Dr. Ali Rifat BOYNUEĞRİ, Arş. Gör. Ahmet Yiğit ARABUL, Arş. Gör. Erdem AKBOY ve Arş. Gör. Eyüp TASLAK'a, deneysel çalışmalarına yaptıkları katkılardan dolayı Demirer Kablo firmasına, desteklerini esirgemeyen ekip arkadaşlarıma ve beni bugünlere getiren, sevgiyle büyüten ve her zaman yanımda olan canım aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, her zaman bana çalışmalarımda destek olan, motivasyonumun azaldığı anlarda bana teşvikleri ile yol gösteren eşime sonsuz minnettarlığımı belirtmek isterim.

Son olarak, 2012-04-02-DOP01 numaralı proje kapsamında desteklerinden ötürü Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Ocak, 2016

Celal Fadıl KUMRU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Tezin Literatüre Katkıları ve Kapsamı.....	6
BÖLÜM 2	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	9
2.1 Ölçüm Düzenegi	9
2.2 Test Numunesi	10
2.3 Test Numunesinin Hazırlanması	13
2.4 Test Düzeneginin Hazırlanması	18
2.5 Ölçümlerin Gerçekleştirilmesi.....	25
BÖLÜM 3	
ÖLÇÜMLERİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ	27
3.1 Gerilime Bağlı Değişimler.....	28
3.1.1 Dielektrik Kaybın Gerilime Bağlı Değişimi.....	30
3.1.2 Bağıl Dielektrik Katsayısının/Paralel Eşdeğer Kapasitenin Gerilime Bağlı Değişimi.....	34

3.1.3	Dielektrik Kayıp Faktörünün Gerilime Bağlı Değişimi	37
3.1.4	Dielektrik Kayıp İndisinin Gerilime Bağlı Değişimi	39
3.2	Sıcaklığa Bağlı Değişimler	41
3.2.1	Dielektrik Kaybın Sıcaklığa Bağlı Değişimi	41
3.2.2	Bağıl Dielektrik Katsayısının/Paralel Eşdeğer Kapasitenin Sıcaklığa Bağlı Değişimi	43
3.2.3	Dielektrik Kayıp Faktörünün Sıcaklığa Bağlı Değişimi	44
3.2.4	Dielektrik Kayıp İndisinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi	46
3.3	Frekansa Bağlı Değişimler	47
3.3.1	Dielektrik Kaybın Frekansa Bağlı Değişimi	47
3.3.2	Bağıl Dielektrik Katsayısının/Paralel Eşdeğer Kapasitenin Frekansa Bağlı Değişimi	50
3.3.3	Dielektrik Kayıp Faktörünün Frekansa Bağlı Değişimi	51
3.3.4	Dielektrik Kayıp İndisinin Frekansa Bağlı Değişimi	52

BÖLÜM 4

YAPAY SİNİR AĞI UYGULAMASI	54
4.1 Yapay Sinir Ağlarına Giriş	54
4.1.1 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri	56
4.1.2 Yapay Sinir Hücresi Yapısı	57
4.1.3 Aktivasyon Fonksiyonları	59
4.1.3.1 Basamak (Threshold) Aktivasyon Fonksiyonu	59
4.1.3.2 Doğrusal (Piecewise-Linear) Aktivasyon Fonksiyonu	60
4.1.3.3 Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu	61
4.2 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı	63
4.2.1 Yapay Sinir Ağlarının Yapılarına Göre Sınıflandırılması	66
4.2.2 Yapay Sinir Ağlarının Öğrenme Algoritmalarına Göre Sınıflandırılması	67
4.3 Levenberg – Marquardt Öğrenme Algoritması	68
4.3.1 Dik İniş Algoritması (Steepest Descent Algorithm)	70
4.3.2 Newton Yöntemi	71
4.3.3 Gauss-Newton Algoritması	72
4.3.4 Levenberg-Marquardt Algoritması	74
4.3.5 Algoritmaların Özellikleri	75
4.4 Levenberg-Marquardt Algoritması ile Yapay Sinir Ağı'nın Eğitilmesi	76
4.5 YSA Kullanılarak Kablo Parametrelerinin Belirlenmesi	79
4.5.1 YSA-1 Uygulaması	80
4.5.1.1 Dielektrik Kayıp (p_k) Eğitimi	84
4.5.1.2 Paralel Eşdeğer Kapasite (C_p) Eğitimi	91
4.5.1.3 Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$) Eğitimi	97
4.5.2 YSA-2 Uygulaması	103
4.5.2.1 Dielektrik Kayıp (p_k) Eğitimi	105
4.5.2.2 Paralel Eşdeğer Kapasite (C_p) Eğitimi	112
4.5.2.3 Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$) Eğitimi	118
4.6 YSA Sonuçlarının Değerlendirilmesi	124

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR	134
EK-A.....	138
CPC-100 CİHAZININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	138
ÖZGEÇMİŞ	141

SİMGE LİSTESİ

C_p	Paralel eşdeğer kapasite
C_s	Seri eşdeğer kapasite
C_0	Geometrik kapasite
R_p	Paralel eşdeğer direnç
R_s	Seri eşdeğer direnç
p_k	Dielektrik kayıp
p_R	Dielektrik malzeme iletim kayıpları
p_P	Dielektrik malzeme polarizasyon kayıpları
p_i	Dielektrik malzeme iyonizasyon kayıpları
$\tan \delta_{\text{paralel}}$	Paralel devre dielektrik kayıp faktörü
$\tan \delta_{\text{seri}}$	Seri devre dielektrik kayıp faktörü
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_r	Bağıl dielektrik katsayısı
$\epsilon_{r\text{-hava}}$	Havanın bağıl dielektrik katsayısı
$\epsilon_r \cdot \tan \delta$	Dielektrik kayıp indisi
T	Sıcaklık
U	Gerilim
f	Frekans
l	Kablo uzunluğu
U_0	Kablo faz-toprak gerilimi
E	Elektrik alan şiddeti
P	YSA giriş elemanı sayısı
M	YSA çıkış elemanı sayısı
N	YSA ağırlık sayısı
e	YSA eğitim hatası
g	Gradyan
w	Ağırlık
H	Hessian matrisi
J	Jacobian matrisi
I	Birim matris
μ	Marquardt katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

EPR	Ethylene propylene rubber (Ethilen propilen kauçuk)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
LMA	Levenberg-Marquardt Algoritması
OG	Orta Gerilim
PE	Polyethylene (Polietilen)
SF ₆	Sulfur Hexafluoride (Kükürt hekzaflorür)
XLPE	Cross-Linked Polyethylene (Çapraz bağlı polietilen)
YSA	Yapay Sinir Ağı
YSH	Yapay Sinir Hücresi
YG	Yüksek Gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Test numunesi olarak kullanılan 12/20 kV, 1x150 mm ² Al/25 mm ² Cu, XLPE OG kablosu..... 10
Şekil 2.2	OG kablosunun örgülü iletkeni..... 11
Şekil 2.3	OG kablosu soyma ölçüleri..... 14
Şekil 2.4	Ölçümde kullanılan kablo numunesinin test için hazırlanmış durumu... 14
Şekil 2.5	Kablo numunesinin test için hazırlanma aşamaları. 15
Şekil 2.6	Kablo numunesine pabuç montajının yapılması 16
Şekil 2.7	Kablo numunesinin ucunda ve ortasındaki termokupl bağlantıları..... 17
Şekil 2.8	Kablonun 40°C'e ısıtılırken kablo ortasından alınan sıcaklık değerinin zamanla değişimi..... 17
Şekil 2.9	Ölçüm düzeneği bağlantı şeması..... 20
Şekil 2.10	Kablo pabuçlarının transformatör barasına dik şekilde bağlanması..... 21
Şekil 2.11	Tan δ ölçüm cihazı 22
Şekil 2.12	Tan δ ölçüm cihazının (CPC-100) UST-A ölçüm modu..... 23
Şekil 2.13	Bir güç transformatörünün içerisinde bulunan kapasitelerin gösterimi. 23
Şekil 2.14	Tan delta ölçüm cihazının (CPC-100) GST ölçüm modu 24
Şekil 3.1	Yüksek gerilim kablosunun boyutları ve dielektrik malzeme üzerindeki elektrik alan dağılımı 29
Şekil 3.2	Dielektrik kaybın (P_k) farklı siper sıcaklıklarında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)..... 30
Şekil 3.3	Dielektrik kaybın (P_k) sabit siper sıcaklığında (50 °C) gerilime bağlı değişiminin (ölçüm ve hesaplama değerlerinin) karşılaştırılması ($f = 50$ Hz)..... 32
Şekil 3.4	Dielektrik kaybın (P_k) farklı frekanslarda gerilime bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$) 33
Şekil 3.5	Paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağıl dielektrik katsayısının (ϵ_r) 30°C siper sıcaklığında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)..... 34
Şekil 3.6	Kısmi boşalmaya ait a) Malzeme yapısı, b) Elektriksel eşdeğer devre, c) Zamana bağlı gerilim değişimi..... 36
Şekil 3.7	Dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) 30°C siper sıcaklığında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz) 37
Şekil 3.8	Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$) farklı siper sıcaklıklarında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz) 39

Şekil 3.9	Dielektrik kaybın (P_k) farklı gerilimlerde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz).....	41
Şekil 3.10	Dielektrik kaybın (P_k) farklı frekanslarda siper sıcaklığına bağlı değişimi ($U = 12$ kV).....	42
Şekil 3.11	Paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağlı dielektrik katsayısının (ϵ_r) 12 kV gerilimde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz).....	43
Şekil 3.12	Dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) 12 kV gerilimde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz).....	44
Şekil 3.13	Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$) farklı gerilimlerde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz).....	46
Şekil 3.14	Dielektrik kaybın (P_k) farklı gerilimlerde frekansa bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$).....	47
Şekil 3.15	Dielektrik kaybın (P_k) farklı siper sıcaklıklarında frekansa bağlı değişimi ($U = 12$ kV).....	49
Şekil 3.16	Paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağlı dielektrik katsayısının (ϵ_r) 12 kV gerilimde frekansa bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$).....	50
Şekil 3.17	Dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) 12 kV gerilimde frekansa bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$).....	51
Şekil 3.18	Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$) farklı gerilimlerde frekansa bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$).....	52
Şekil 3.19	Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$) farklı siper sıcaklıklarında frekansa bağlı değişimi ($U = 12$ kV).....	53
Şekil 4.1	Yapay sinir hücresinin yapısı	55
Şekil 4.2	Non-lineer yapay sinir hücresi modeli	58
Şekil 4.3	Basamak aktivasyon fonksiyonu	60
Şekil 4.4	Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu	60
Şekil 4.5	Lojistik sigmoid aktivasyon fonksiyonu	61
Şekil 4.6	Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu	62
Şekil 4.7	Çok katmanlı bir yapay sinir ağının yapısı	63
Şekil 4.8	Tek katmanlı bir yapay sinir ağının yapısı.....	65
Şekil 4.9	Geri beslemeli yapay sinir ağı.....	66
Şekil 4.10	Geri beslemeli yapay sinir ağı modeli	67
Şekil 4.11	Hata minimizasyonun kartezyen koordinat sisteminde gösterilişi	70
Şekil 4.12	Levenberg-Marquardt eğitim algoritması blok diyagramı	78
Şekil 4.13	OG kablusunun dielektrik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi.....	80
Şekil 4.14	YSA-1 uygulamasına ait katmanların gösterimi	84
Şekil 4.15	YSA-1 ağının eğitimi boyunca ortalama karesel hata değerinin değişimi.....	85
Şekil 4.16	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) gerilime bağlı değişimi (YSA-1, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$).....	86
Şekil 4.17	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) frekansa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)	88
Şekil 4.18	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz).....	90
Şekil 4.19	Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) gerilime bağlı değişimi (YSA-1, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$)	92

Şekil 4.20	Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) frekansa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$) 94
Şekil 4.21	Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz) 96
Şekil 4.22	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) gerilime bağlı değişimi (YSA-1, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 98
Şekil 4.23	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) frekansa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$) 100
Şekil 4.24	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz) 101
Şekil 4.25	YSA-2 uygulamasına ait katmanların gösterimi 105
Şekil 4.26	YSA-2 ağının eğitimi boyunca ortalama karesel hata değerinin değişimi 106
Şekil 4.27	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) gerilime bağlı değişimi (YSA-2, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 107
Şekil 4.28	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) frekansa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$) 109
Şekil 4.29	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz) 111
Şekil 4.30	Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) gerilime bağlı değişimi (YSA-2, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 113
Şekil 4.31	Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) frekansa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$) 115
Şekil 4.32	Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz) 117
Şekil 4.33	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) gerilime bağlı değişimi (YSA-2, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 119
Şekil 4.34	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) frekansa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$) 121
Şekil 4.35	Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz) 123

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Kablo numunesinin teknik özellikleri 13
Çizelge 2.2	Isı izolasyon malzemesi (Elastomerik kauçuk köpük) teknik özellikleri .. 18
Çizelge 2.3	Gerçekleştirilen ölçümlere ait özellikler ve ölçülen parametreler..... 26
Çizelge 2.4	Ölçüm işlemleri süresince kaydedilen laboratuvar şartları..... 26
Çizelge 3.1	Gerilime bağlı incelenen değişimler 29
Çizelge 3.2	12 kV gerilim 50 Hz frekansta $\tan\delta$, ϵ_r ve dielektrik kayıp indisinin 30 °C deki değerlere göre bağlı değişimleri..... 47
Çizelge 4.1	Farklı YSA öğrenme algoritmalarının özellikleri 75
Çizelge 4.2	YSA eğitimlerinde kullanılan parametreler ve baz değerleri 81
Çizelge 4.3	YSA-1 eğitiminde kullanılan ölçüm parametreleri 83
Çizelge 4.4	YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağlı hata ($f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 87
Çizelge 4.5	YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)..... 89
Çizelge 4.6	YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)..... 90
Çizelge 4.7	YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağlı hata ($f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 93
Çizelge 4.8	YSA-1 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)..... 95
Çizelge 4.9	YSA-1 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz) 96
Çizelge 4.10	YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağlı hata ($f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 99
Çizelge 4.11	YSA-1 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$) 100
Çizelge 4.12	YSA-1 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz) 102
Çizelge 4.13	YSA-2 eğitiminde kullanılan ölçüm parametreleri 104
Çizelge 4.14	YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağlı hata ($f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$) 108
Çizelge 4.15	YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)..... 110
Çizelge 4.16	YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağlı hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)..... 111

Çizelge 4.17	YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($f = 50 \text{ Hz}$, $T = 30^\circ\text{C}$)	114
Çizelge 4.18	YSA-2 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12 \text{ kV}$, $T = 50^\circ\text{C}$)	116
Çizelge 4.19	YSA-2 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$)	118
Çizelge 4.20	YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata ($f = 50 \text{ Hz}$, $T = 30^\circ\text{C}$)	120
Çizelge 4.21	YSA-2 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12 \text{ kV}$, $T = 50^\circ\text{C}$)	122
Çizelge 4.22	YSA-2 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$)	123
Çizelge 4.23	YSA-1 eğitimi sonucunda elde edilen maksimum ve minimum hata oranları	125
Çizelge 4.24	YSA-2 eğitimi sonucunda elde edilen maksimum ve minimum hata oranları	125
Çizelge 4.25	Ölçüm ve tahmin sonuçlarının kıyaslanması	126

YÜKSEK GERİLİM KABLolarINDA DİELEKTRİK KAYIP PARAMETRELERİNİN FARKLI İŞLETME KOŞULLARINDA DENEYSEL ve YAPAY SİNİR AĞLARI İLE İNCELENMESİ

Celal Fadıl KUMRU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Bilindiği üzere yüksek gerilim ile enerji iletimi, havai hatlar ve yeraltı kabloları ile sağlanmaktadır. Havai hatlar ise günümüzde özellikle iletim sistemlerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda yerleşim merkezlerinin genişlemesiyle birlikte, yüksek gerilimli havai hatlar insan yaşam alanlarının bulunduğu bölgelere daha da yaklaşmıştır. Havai hatların yaşam alanları içerisinde kullanılması güvenlik, görüntü ve tesis etme açısından uygun değildir. Bu sebeple özellikle dağıtım hatları için yüksek gerilim yeraltı kabloları kullanılmaktadır.

Yüksek gerilim yeraltı kablolarının dağıtım sistemlerinde kullanılması beraberinde birçok avantaj getirmektedir. Daha güvenilir bir sistem olmaları, görüntü kirliliği oluşturmamaları, sualtı enerji iletimi, elverişsiz hava koşulları (yoğun rüzgâr, yağmur ve kar olan bölgeler), elektromanyetik girişim (EMI) ve stratejik amaçlar için tercih edilebilmektedirler. Bu avantajların yanı sıra yüksek gerilim yeraltı kablolarının kurulum maliyetleri havai hatlara kıyasla oldukça yüksektir ve herhangi bir arıza anında müdahale etmek de zordur. Bu sebeplerden dolayı kabloların elektriksel kalite parametrelerinin doğru analiz edilmesi gerekmektedir. Yüksek gerilim yeraltı kablolarının üretici firma tarafından verilen elektriksel değerleri genellikle nominal işletme şartları için kullanılmaktadır. Ancak değişken işletme şartlarında, kablo parametreleri de değişmekte olup, sistemin çalışmasında aksamalara neden

olabilmektedir. Bu nedenle, kabloda meydana gelen dielektrik kayıplar, kısmi boşalmalar, elektriksel parametreler, arıza durumu, maliyet ve enerji sürekliliğinin sağlanması gibi konuların incelenmesi önem arz etmektedir. Böylelikle, işletme süresi boyunca sistem üzerinde meydana gelecek olaylar hakkında fikir edinilmesi sağlanmaktadır.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, dağıtım sistemlerinde kullanılan yüksek gerilim yeraltı kablolarının farklı işletme koşullarındaki (değişken gerilim, frekans ve sıcaklık) elektriksel parametrelerinin (kapasite, bağıl dielektrik katsayısı, dielektrik kayıp, tan delta, dielektrik kayıp indisi) deneysel olarak ölçülmesi amaçlanmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre daha farklı işletme koşullarında yeraltı kablosunun elektriksel parametrelerinin yapay sinir ağı uygulaması ile tahmin edilmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek gerilim, yüksek gerilim kabloları, dielektrik malzeme, dielektrik kayıp, dielektrik kayıp faktörü, kapasite, yapay sinir ağı

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DIELECTRIC LOSS PARAMETERS OF
HIGH VOLTAGE CABLES IN VARIOUS OPERATIONAL CONDITIONS USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

Celal Fadıl KUMRU

Department of Electrical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

The rapid increase in the transmission voltage level in recent years is a result of an increasing demand for electrical energy. This demand has grown more due to the establishment of big power stations in areas far from the industrial centers and the need for carrying electricity to the centers over far distances. As a result of these, the need for an efficient use of present transmission systems arose. Especially, in parallel to increasing load demand in transmission and distribution systems, the amount of current to be carried by the line also increase. Therefore, there becomes an increase in the active power loss which happens in the cable. In order to reduce this loss as much as possible, transmission voltage level should be increased. In other words, the transmission and the distribution should be made with high voltage. What is more, it is known that the establishment and the operation costs decrease when the voltage level is increased.

As it is known, the energy transmission with high voltage is made using aerial lines and underground cables. The aerial lines are used widely especially in transmission systems today. However, the enlargements of built-up areas have brought about the integration of the high voltage to the living areas. The use of aerial lines is not suitable in town centers in terms of security, visual aesthetics and construction in some cases. Therefore, high voltage underground cables are used for distribution lines in particular.

The use of high voltage underground cables in distribution systems has its own advantages. The reasons for their preference are that they are safer and do not present visual pollution. What is more, they are preferred due to underwater energy transmission, unsuitable weather conditions (in windy, rainy and snowy areas), electromagnetic interference and strategic purposes. Despite these advantages, the cost of high voltage underground cables is high and it is difficult to intervene in case of a fault. Because of these reasons, it is necessary to analyze the electrical quality parameters of the cables accurately. The electrical values of the high voltage underground cables given by the production company are generally used for nominal operation conditions. But, in changing operation conditions, the cable parameters also change and therefore this causes faults in the operation of the system. Therefore, the dielectric losses in the cable, partial discharge, electrical parameters, fault condition, cost and the continuity of the energy are important subjects to be analyzed. By doing so, one can have an idea about the events that may take place on the system during the operation.

In the thesis, it is aimed to measure the electrical parameters (capacity, relative permittivity, dielectric loss, tan delta, dielectric loss index) of high voltage underground cables used in distribution system at different operation conditions (changing voltage, frequency and temperature) experimentally. According to the measurement results obtained, it is aimed to estimate electrical parameters of underground cables for further system conditions using artificial neural network application.

Keywords: High voltage, high voltage cables, dielectric material, dielectric loss, dielectric loss factor, capacitance, artificial neural network.

1.1 Literatür Özeti

Günümüz dünyasında, enerji ve enerjinin sürekliliği kavramları oldukça önemli bir yere sahip olup dünya çapında enerjiye olan ihtiyaç da gün geçtikçe artmaktadır [1], [2]. Bu nedenle, ihtiyaç duyulan enerjinin sağlanması ve güvenli bir biçimde son kullanıcıya ulaştırılabilmesi için tüm dünyada yeni enerji kaynakları arayışına girilmiştir. Bu arayışın sonucunda, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil tabanlı yakıtlarla enerji üreten santrallere alternatif oluşturabilecek yenilenebilir enerji kaynakları gündeme gelmiştir. Alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar ise gün geçtikçe hız kazanmış ve günümüzde bu alanda ciddi yatırımlar gerçekleştirilmiştir [3], [4].

Hızlı bir biçimde artan enerji talebini karşılayabilmek için son yıllarda yeni yatırımlar ve çalışmalar gerçekleştirilmektedir [3]. Ancak, artan enerji talebi probleminin çözülmesi beraberinde enerjinin doğru, güvenilir ve verimli bir şekilde iletilmesi, dağıtılması ve tüketiciye ulaştırılması problemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Taşınan enerjinin boyutlarının artması ve alternatif enerji kaynaklarının şebekeye bağlanması nedeniyle, iletim ve dağıtım şebekeleri daha karmaşık bir yapıya bürünmüştür. Bununla birlikte, güç sistemi içerisinde kullanılan ekipmanların da farklı ve daha zorlayıcı işletme şartlarına maruz kalacakları bir gerçektir. Bu karmaşık enerji ağının doğru ve güvenilir bir şekilde yönetilebilmesi, enerji sürekliliği bakımından oldukça önem arz eden bir konudur [5], [6]. Bu sürekliliğin ve güvenilirliğin sağlanması için üzerinde durulması gereken konulardan biri, güç sistemi içerisinde bulunan ekipmanların doğru seçilmesi,

zorlu işletme şartları altındaki davranışlarının incelenebilmesi ve kalite performanslarının anlık olarak izlenebilmesidir [7], [5], [8].

Güç sistemi içerisindeki orta gerilim ağı ve bu kısımda kullanılan yüksek gerilim ekipmanları, üzerinde çalışılması gereken önemli bir alandır. Bunun nedeni ise, orta gerilim kısmının günümüzde yerleşim yerleriyle iç içe olması ve bu kısımda elektriksel arızalarla çok sık karşılaşılmasıdır [9], [10]. Enerji sürekliliğinin orta gerilim dağıtım ağında güvenli bir şekilde sağlanabilmesi için sistem içerisindeki ekipmanların da düzgün bir şekilde işletilebilmesi gerekmektedir [11], [12]. Yeni tesis edilen sistemlerde, kullanılan tüm yüksek gerilim ekipmanları standartlar çerçevesinde belirli testlerden geçmek zorundadır. Böylelikle sistemin belirli sınırlar içerisinde çalışabilmesi sağlanabilmektedir. Ancak tüm sistemler içerisinde olduğu gibi dağıtım sistemlerinde de ekipmanların yaşlanması söz konusudur [13]. Bu nedenle, yaşlanan ekipmanların birçoğunun belirli periyotlarla test/kontrol edilmesi gerekmektedir. Güç sistemi içerisinde kullanılan bir ekipmanın elektriksel ömrüne ekstradan birkaç yıl eklenebilmesi, güç sistem endüstrisine ciddi bir ekonomik kazanç sağlayacaktır [7].

Orta gerilim dağıtım sistemi içerisinde kullanılan bileşenler arasında, enerji iletimini sağlayan eleman olan güç kabloları önemli bir yere sahiptir. Bunun nedenleri arasında enerjiyi taşıyan temel eleman olmaları, yatırımlarının pahalı olması ve arızalanmaları durumunda hem dağıtım hem de tüketici tarafında ciddi ekonomik kayıplara sebebiyet vermesi gösterilebilir [8]. Bu nedenle OG kablolarının işletmede kaldıkları süre boyunca güvenilir bir biçimde işletilmesi gerekmektedir. Bir OG kablosunun ömrünü tamamlaması ya da kablo üzerinde arıza meydana gelmesi genellikle kablo yalıtım malzemesindeki yıpranma, bozulma ve yaşlanmadan kaynaklanmaktadır [14], [15], [16]. OG kablolarının yaşlanmasına neden olan başlıca etmenler; kimyasal bozulma, su ağaçlanması (water tree), elektriksel ve ısıl zorlanmadır [15], [17], [18]. Belirtilen bozucu ve kablo dielektriğini yıpratıcı etmenlerin ise analiz edilmesi gerekmektedir. Bunun için günümüzde, işletmede bulunan OG kablolarının durum/performans/kalite analizlerini gerçekleştirebilmek için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır [19]. Ancak, işletmede bulunan kabloların analizlerinin yanı sıra, yukarıdaki etmenlerin kablo üzerindeki etkisinin daha iyi analiz edilebilmesi ve bozucu etmenlerin etkisinin anlaşılabilmesi için

yaşlanmamış ya da yeni üretilmiş kablolar üzerinde de ölçüm ve analizlerin yapılması önem arz etmektedir.

Güç sistemi içerisinde bulunan bir OG kablosu, işletmede kaldığı süre boyunca nominal işletme şartlarında çalışmasını sürdürememektedir. Sistem içerisinde sürekli ve sık olarak değişim gösteren yük akımı nedeniyle kablonun işletme sıcaklığı da değişim göstermektedir. Bilindiği üzere OG kablolarının, kurulum ve işletim maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle nominal akım değerinde çalıştırılmaktadırlar. Günün puant saatlerinde ise öngörülemeyen aşırı yük talepleri kablonun nominal akımından fazla akım taşımaya ve bu da kablo sıcaklığının nominal değerin üzerine çıkmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, yük talebinin az olduğu ve kablonun nominal akımının altında akım taşıdığı durumlar da meydana gelebilmektedir [18].

OG kablolarının farklı sıcaklıklarda çalışmalarının yanı sıra maruz kaldığı gerilim değeri de farklılık gösterebilmektedir. Yük talebinin az olduğu zamanlarda kablonun gerilimi nominal işletme gerilim değerinin üzerine çıkabilmekte olup benzer biçimde aşırı yük talebinin olduğu peryotlarda ise bu değerin altında düşebilmektedir. Bununla birlikte, şebeke geriliminde gerilim harmoniklerinin bulunması durumunda, kablo dielektriği sinüzoidal olmayan bir gerilime ve temel frekans bileşeninden farklı frekansa sahip gerilim harmoniklerine maruz kalmaktadır [20].

Kabloların farklı işletme şartları altındaki dielektrik kalite parametrelerinin ölçülmesi için literatürde pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir [21], [22], [23]. Bunlar arasında, yaygın olarak tercih edilen ölçme parametresi ise dielektrik kayıp faktörüdür ($\tan \delta$) [24], [25]. Bir OG kablosunun dielektrik kayıp faktörü, farklı ölçme metotları kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu ölçme yöntemlerinden birisi, çok düşük ölçme frekansları (very low frequency) kullanarak -yaklaşık 0.001Hz – 1Hz aralığında- ölçümlerin gerçekleştirilmesidir [26], [27], [17], [28]. Ancak bu yöntemle gerçekleştirilen ölçümler, ölçme periyodunun uzun olması nedeniyle vakit almaktadır. Ayrıca ölçme frekansının düşük mertebelerde olması, dielektrik malzeme içerisindeki polarizasyon kayıplarını da arttırmaktadır. Bir diğer ölçme yöntemi ise dielektrik spektrum yöntemidir. Bu yöntemde dielektrik malzemenin kHz veya MHz mertebesinde frekanslarda ve düşük gerilimlerde dielektrik kayıp faktörü ölçülmektedir

[29], [30]. Malzeme kalitesi hakkında bilgi veren bu yöntemde ise gerilimin düşük olması nedeniyle, yüksek gerilimin dielektrik malzeme üzerinde yaptığı etkiler gözlemlenememektedir. Ayrıca ölçme frekansının şebeke frekansından yüksek olması, polarizasyon kayıplarının azalmasına neden olmaktadır. Dielektrik kayıp faktörü ölçme yöntemlerinden biri de şebeke frekansında ve yüksek gerilim uygulanarak ölçümlerin gerçekleştirilmesidir [31], [32]. IEC 60502-2 numaralı standarda göre (Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)), Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)), belirtilen nominal gerilim değerlerine sahip OG kabloları için yapılacak tan delta ölçümlerinde, ölçme geriliminin en az 2 kV olması istenmektedir. Bu ölçme yöntemi ile kablonun işletme gerilimi ve frekansında ölçümlerin gerçekleştirilmesi "Schering Köprüsü" yöntemiyle sağlanmaktadır.

Bahsedilen ölçme yöntemleri, literatürde pek çok çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmalar içerisinde, kablo dielektrik malzeme kalitesinin sabit frekans ve sıcaklık altında gerilime bağlı değişimleri incelenmiştir. Bu incelemelerde kullanılan gerilim seviyeleri genellikle kablo nominal gerilim değerlerinin tam katları şeklindedir [32]. Şebekede mevcut olan gerilim harmoniklerinin genlikleri ise oldukça farklı ve küsurlu olabilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda incelenen bir diğer nokta ise kablo sıcaklığının dielektrik malzeme üzerindeki etkisinin incelenmesidir [10]. Çalışmalarda genellikle, dielektrik kayıp faktörünün düşük sıcaklık değerlerinden nominal işletme sıcaklığına kadarki davranışları incelenmiştir. Sıcaklık artışları genel itibarıyla 30°C'den 90 - 110°C'e kadar 10°C'lik artışlarla gerçekleştirilmiş olup bu sıcaklıklarda dielektrik malzeme parametreleri ölçülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Bilindiği üzere kablolar, elektrik enerjisinin taşınmasında en önemli elemanlardan biridir. Kablolar elektrik enerji sistemleri içerisinde, hem enerji iletiminde hem dağıtımında yer almaktadır. Öncelikle alçak gerilim seviyesinde, kullanıcılara elektrik enerjisinin ulaştırılmasında yararlanıldığı gibi orta gerilim seviyesinde enerji dağıtımında da sıkça kullanılmaktadır.

Kabloların enerji sürekliliğinin ve verimliliğinin sağlanmasındaki önemi bilinen bir gerçektir. Enerjinin kesintisiz ve kayıp değerlerinin uygun bir değerde taşınması, kabloların belirli şartları ve özellikleri yerine getirmesi ile mümkündür. Bu ise kablolarla ait kalite parametrelerinin sağlanması gerekliliğini karşımıza çıkarmaktadır.

Kabloların kalitesini belirleyen parametrelerin bilinmesi ve yapılacak testlerde bunlara ait değerlerin irdelenmesi gerekmektedir. Böylece, kablo kalite parametrelerinin kablolarla karşılaşılacak problemlerle ilgili bilgi vermesi söz konusu olmaktadır.

Bu çalışmada dielektrik kayıp, paralel eşdeğer kapasite/bağıl dielektrik katsayısı, dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik kayıp indisi gibi kablo kalitesini belirten parametrelerin, çeşitli gerilim, frekans ve sıcaklık gibi işletme durumları için değişimi deneysel olarak irdelenmiştir.

Bu çalışmada, 12/20kV nominal gerilimli bir OG kablosunun, değişken işletme koşullarındaki (gerilim, frekans, sıcaklık) dielektrik kayıp, paralel eşdeğer kapasite/bağıl dielektrik katsayısı, dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik kayıp indisi parametreleri laboratuvarla deneysel olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları incelenerek, OG kablosunun dielektrik malzemesinin gerilim, frekans ve sıcaklık değişimlerine karşı gösterdiği davranışları analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen ölçümlerle, OG ve YG kablolarında ana yalıtım malzemesi olarak günümüzde yaygın olarak kullanılan çapraz bağlı polietilen (XLPE) dielektrik malzemesinin farklı işletme koşulları altındaki davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Elde edilen ölçüm sonuçları, bir yapay sinir ağı (YSA) uygulamasında kullanılmış ve belirtilen ölçüm aralığında dielektrik malzemeye ait parametrelerin ölçümü

gerçekleştirilmeyen ara değerleri için tahmin edilmesi sağlanmıştır. YSA ile yapılan parametre belirleme işlemi ölçüm zorluklarının azaltılmasına katkı sağlamıştır. Böylece, zaman ve emek gerektiren yüksek gerilimde yapılacak ölçüm işlemlerinin sayısının azaltılması sağlanmıştır.

1.3 Tezin Literatüre Katkıları ve Kapsamı

Bu çalışmada bir orta gerilim kablosuna ait dielektrik kayıp, paralel eşdeğer kapasite/bağıl dielektrik katsayısı, dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik kayıp indisi parametrelerinin, çeşitli gerilim, frekans ve sıcaklık gibi işletme durumları için laboratuvar ortamında ölçümü gerçekleştirilerek bu parametrelerin orijinal olarak YSA ile belirlenmesi hedeflenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmanın farklı aılardan literatüre ve ilgili sektöre yeni katkıları bulunmaktadır. Bu katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- Yüksek gerilim kablolarının kalite parametrelerinin ölçümleri genellikle standartlarda belirtilen minimum 2 kV' luk gerilim seviyesinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada kablo nominal gerilimlerinde de ölçümler gerçekleştirilerek, dielektrik malzeme üzerinde gerçekte maruz kaldıkları işletme geriliminin (yüksek gerilimin) etkilerinin de ortaya konması sağlanmıştır.
- Kablo kalite durumunu ortaya koyan parametrelerden biri olan dielektrik kayıp faktörü, uygulamalarda genellikle tek bir frekans ve tek bir gerilim seviyesi için ölçülmektedir. Bu çalışmada, farklı frekans ve farklı gerilim değerlerinde yapılan ölçümlerle, şebeke geriliminde var olan harmonik gerilimlerin kablo dielektrik malzemesi üzerindeki etkileri de belirlenmiştir.
- Kablo kalite parametrelerinin ölçümleri literatürde ve ilgili standartlarda genellikle nominal işletme sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, daha düşük sıcaklıklarda da ölçümler gerçekleştirilmiş ve böylelikle dielektrik malzemenin yaşlanma durumunun kablonun yüklenmesine bağlı olarak değişimi ortaya konulmuştur.

- Çalışmada gerçekleştirilen yüksek gerilim ölçümlerinin oldukça emek gerektirmesi ve uzun süre alması nedeniyle, daha az ölçüm verisi kullanılarak ara değerlerin elde edilmesi için orijinal olarak YSA kullanımı gerçekleştirilmiştir.
- Belirli bir süre işletmede kalan ve zorlu işletme şartları nedeniyle yaşanan kabloların dielektrik kalite parametreleri, yeni üretildikleri durumdakilerden farklı olacaktır. Bu iki durumundaki kalite parametrelerinin kıyaslanması ve değişimlerin incelenmesi, OG kablosunun ömrü hakkında bilgi edinebilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, yeni üretilmiş bir OG kablosunun dielektrik parametreleri ölçümlerle elde edilmiştir. Alınan ölçüm verilerinin oldukça fazla olması nedeniyle ölçüm süreleri de uzamaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen YSA uygulaması sayesinde, daha az ölçüm alınarak yeni bir OG kablosunun kalite parametreleri belirlenebilmektedir. Aynı zamanda, kabloların kıyaslanabilmesi için ihtiyaç duyulan ölçme süresi de daha kısa olmaktadır.
- Yüksek gerilim kablolarında kullanılan anlık izleme sistemleri için kablo parametreleri üzerindeki değişimin incelenmesi sağlanmıştır.

Kapsam olarak ölçüm ve YSA analizi çalışmaları içeren tez çalışmasının geri kalan kısımlarının düzeni şu şekildedir:

Tez çalışması 5 bölümden meydana gelmiş olup tezin 1.bölümünde literatür özeti, tezin amacı ve tezin literatüre katkıları ve kapsamına yer verilmiştir.

Bölüm 2’de ise ilk olarak çalışmada kullanılan OG kablo numunesinin teknik özelliklerine yer verilmiştir. Ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için kablo numunesinin hazırlanma yöntemi ve süreci anlatılmıştır. Sonrasında, test düzeneğinden ve bu düzenek içerisinde kullanılan ölçüm cihazları ile bu cihazların ölçüm özelliklerinden bahsedilmiştir. Bu bölüm kapsamında ayrıca test düzeneğinin ölçüm için hazırlanması ve ölçümlerin gerçekleştirilme yöntemleri/detayları verilmiştir.

Bölüm 3’te, gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesine yer verilmiştir. Bu bölüm üç alt başlıktan oluşmakta olup, incelenen tüm parametrelerin sırasıyla gerilime, sıcaklığa ve frekansa bağlı değişimleri incelenmiştir. Ölçümler sonucunda gerilim, frekans ve sıcaklığa bağlı dielektrik malzeme kalite parametrelerinin (dielektrik kayıp, dielektrik kayıp faktörü, paralel eşdeğer kapasite/bağıl dielektrik katsayısı, dielektrik

kayıp indisi) değişimleri/davranışları verilmiş olup farklı işletme koşulları için irdelenmiştir.

Bölüm 4’de, YSA hakkında genel ve teorik bilgiler verilmiş olup gerçekleştirilen uygulama incelenmiştir. İlk olarak YSA’nın genel özellikleri hakkında bilgi verilip sonrasında ise, yapay sinir hücresinin (YSH) yapısından bahsedilmiş ve bu yapı içerisinde bulunan aktivasyon fonksiyonları denklemleriyle birlikte sunulmuştur. Ayrıca, YSA uygulamalarında kullanılan ağ yapıları ve YSA’nın öğrenme algoritmalarına göre sınıflandırılması anlatılmıştır.

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan Levenberg-Marquardt algoritmasına ait denklemler ve öğrenme algoritması verilmiştir. YSA ile ilgili teorik bilgilerin verilmesinin ardından gerçekleştirilen YSA uygulamaları ve uygulamaya ait sonuçlar sunulmuştur.

Çalışmada iki farklı YSA uygulaması gerçekleştirilmiş olup bu uygulamaların sonucunda elde edilen ara değer tahminleri gerçek ölçüm verileri ile kıyaslanmıştır. Son olarak ise, her iki YSA uygulaması sonuçlarının genel olarak değerlendirilmeleri gerçekleştirilmiştir.

Son olarak Bölüm 5’de ise, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar verilmiş olup çalışmanın öneminden ve ileride gerçekleştirilebilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan kablo numunesi, kablo numunesinin hazırlanması, test düzeneği ve ölçüm şartlarından bahsedilmiştir.

2.1 Ölçüm Düzeneği

Bu tez çalışmasında, önce bir OG kablosunun dielektrik parametrelerine ait ölçümler gerçekleştirilmiş ve sonrasında ölçüm değerleri ile YSA'nın eğitilmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan YSA uygulamaları ile ölçüm değerleri dışındaki değerlerin elde edilmesi hedeflenmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde, dielektrik malzeme üzerindeki ölçümlerin gerçekleştirildiği test düzeneğinin detaylı bir biçimde verilmiştir. Kullanılan test numunesi, test numunesinin ölçüm için hazırlanma aşamaları, test düzeneğinin bağlantı şeması, ölçme işleminde kullanılan cihaz ve elemanların özellikleri, ölçme yöntemi, ölçme işleminin gerçekleştirildiği aralıklar vb. detaylar sunulmuştur. Ayrıca, gerçekleştirilen ölçme işlemi ile ilgili olan standartların tez çalışması ile ilgili olan bölümlerine yer verilerek böylelikle yapılan çalışmanın ve kullanılan ölçme yöntemlerinin güncel standartlar ile de karşılaştırılabilir olması amaçlanmıştır.

Gerçekleştirilen ölçümlerle, test numunesinin dielektrik katmanına ait özelliklerin farklı işletme şartlarındaki davranışlarının belirlenmesi hedeflenmiş ve bunun için kablonun yalıtım tabakasına, farklı genlikte ve farklı frekanslarda alternatif gerilim uygulanarak yalıtımın dielektrik parametreleri ölçülmüştür. Alınan bu ölçüm parametreleri, dielektrik malzemenin farklı sıcaklık değerleri için gerçekleştirilmiştir. Bunun için, kablo

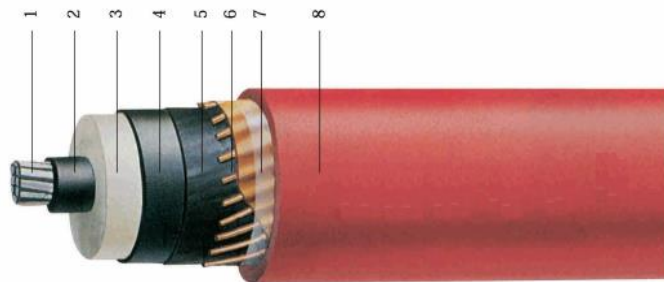
iletkenlerinden bir transformatör yardımıyla akım geçirilerek kablounun ısınması sağlanmıştır.

2.2 Test Numunesi

Orta gerilim (OG) kablolarının dielektrik malzeme parametrelerinin farklı işletme koşullarındaki davranışlarının belirlenmesi için test numunesi olarak 12/20 kV, 1x150/25 mm², çapraz bağlı polietilen (XLPE) izoleli, tek damarlı ve alüminyum iletkenli, bakır siperli bir OG kablosu seçilmiştir (Şekil 2.1). Bilindiği üzere, OG ve YG kablolarının gerilim seviyesi bakımından pek çok farklı türü mevcuttur. Oldukça geniş olan bu aralıkta 12/20 kV'luk OG kablosunun seçilme nedenlerinden biri, kabloya gerilim uygulayacak cihazın gerilim üst sınır değerinin 12 kV olmasıdır. 12/20 kV'luk OG kablosunun tercih edilmesinin diğer nedeni ise, dielektrik parametrelerin ölçülmesi işleminde, nominal gerilim ($U_0 = 12$ kV) altında da ölçüm gerçekleştirebilmesi ve bu parametrelerin nominal gerilim altındaki davranışlarının incelenebilmesidir.

Kablo numunesinin iletken malzemesi ise alüminyum olarak belirlenmiştir. Tercih edilme sebepleri arasında, alüminyum iletkenli OG kablolarının bakır iletkenlilere göre ekonomik olarak daha uygun olması ve OG dağıtım sistemlerinde alüminyum kablo kullanılmasının gündemde olmasıdır.

OG kablosunun test aşamasında iletkeninden akım geçirilerek ısıtılması sağlanmıştır. Bu işlem için kullanılan transformatörün, kabloyu nominal işletme sıcaklığına getirebilmesi için belirli bir güçte olması ve gerekli olan akımı sağlayabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, transformatörün sınırlarını aşmayacak mertebede kablo kesiti (150 mm²) seçilmiştir.

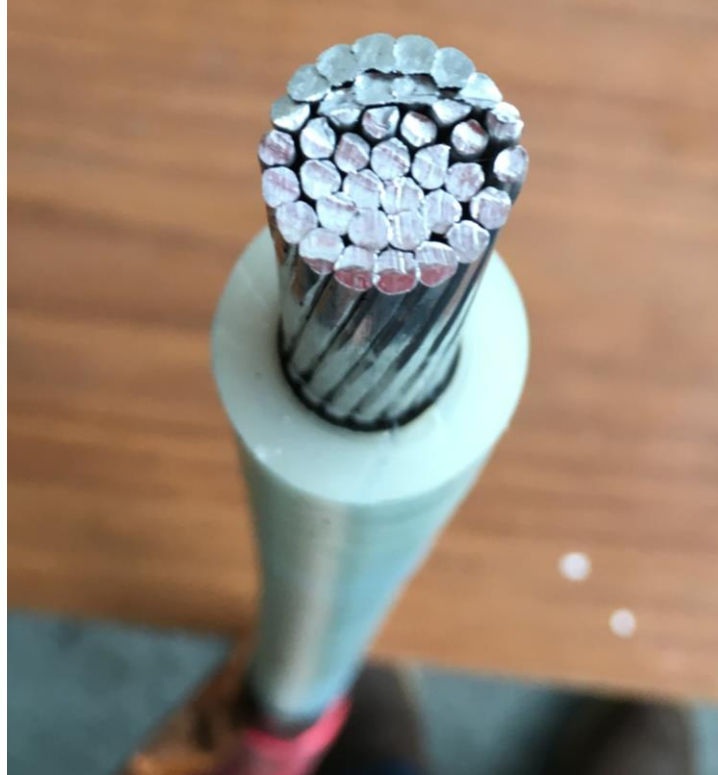


Şekil 2.1 Test numunesi olarak kullanılan 12/20 kV, 1x150 mm² Al/25 mm² Cu, XLPE OG kablosu

Testlerde kullanılan OG kablosu toplamda sekiz katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar sırasıyla şöyledir,

- 1) Alüminyum iletken
- 2) İç yarı iletken tabaka
- 3) XLPE izolasyon
- 4) Dış yarı iletken tabaka
- 5) Yarı iletken bant
- 6) Bakır ekran
- 7) Ayırma bandı
- 8) PVC dış kılıf

Bilindiği gibi, en içteki iletken kısım, kablo akımının taşındığı bölüm olup kesitine bağlı olarak kablonun akım taşıma kapasitesini belirlemektedir. Kablolarda elastikiyeti sağlamak ve deri etkisini (skin effect) azaltmak için iletkenler genellikle örgülü olarak üretilmektedir. Ancak örgülü iletken yapısında, iletkenin dış kısmı düzgün dairesel geometride olmamaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 OG kablosunun örgülü iletkeni

Bu nedenle, iletken yüzeyi ile yalıtkan tabaka arasında boşluklar meydana gelmektedir. Kabloya gerilim uygulandığı takdirde, iletkenin süreksiz/pürüzlü yüzeye sahip olmasından dolayı bu kısımda meydana gelen elektrik alan şiddeti değeri de, iletkenin dairesel olması durumuna göre daha yüksek olmaktadır. Oluşan yüksek elektrik alan, XLPE malzemeye göre daha düşük delinme dayanımı olan hava boşlukları içerisinde kısmi boşalmaların olmasına ve izolasyonun zaman içerisinde tahrip olmasına neden olmaktadır. Bunu engellemek için, XLPE'den daha elastik olan bir yarı iletken malzeme ile hava boşlukları doldurulmaktadır. Aynı zamanda, iletken yüzeyine daha dairesel bir form verilerek elektrik alanın da düzenlenmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle, iletken kısmın üzerinde ise bir yarı iletken katman bulunmaktadır.

Yarı iletkenden sonra ise kablonun ana yalıtkanı bulunmaktadır. Bu tabakanın görevi, yüksek potansiyele sahip kablo iletkeni ile dış ortam arasında elektriksel yalıtımın sağlanmasıdır. Test numunesi olarak belirlenen kablonun yalıtım malzemesi XLPE olup, izolasyon yağı, yağlı kâğıt, PE (polyethylene), EPR (etilen propilen kauçuk), silikon ve SF₆ (sülfür hexafluoride) izolasyon malzemeleri de yalıtım amaçlı olarak kablolarda kullanılmaktadır.

Bir sonraki katman ise dış yarı iletken katman olup, iç yarı iletken ile aynı görevi üstlenmektedir. İzolasyon ortamından topraklanmış kablo siperine elektrik alan bakımından düzgün bir geçiş yapılmasını sağlamaktadır. Bu katman üzerindeki yarı iletken bant ise bakır ekranın yalıtım malzemesine (XLPE) net bir şekilde temas etmesini sağlamaktadır.

Yarı iletken bandın üzerinde bulunan topraklanmış bakır ekranın görevi, oluşan yüksek elektrik alanı kablo içerisinde sınırlamak, alanı düzgün dağıtmak, arıza akımlarının dönüşü için belirli bir yol belirlemek ve yapıldığı malzemenin özelliklerine bağlı olarak manyetik ekranlama sağlamaktır. Bu katmanın üzerinde bulunan ayırma bandı ise kablo bütünlüğü sağlamaktadır.

En dış kısımda olan dış kılıf katmanı ise, işletme süresi boyunca kabloyu fiziksel ve kimyasal etkilere karşı korumaktadır.

Çalışmada kullanılan kablo numunesine ait teknik özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Kablo numunesinin teknik özellikleri

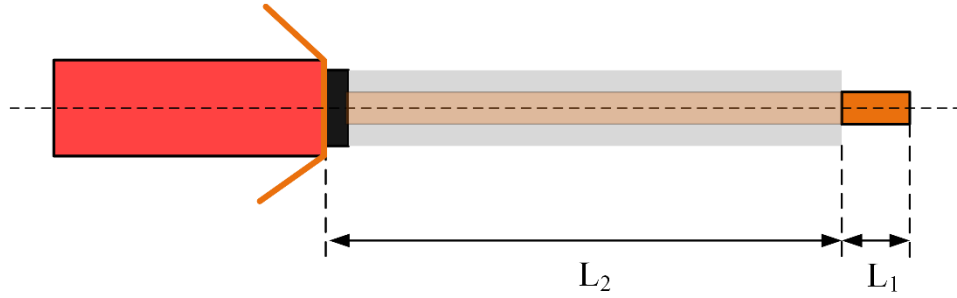
Parametreler	Değer
VDE Kodu	NA2XSY
Nominal gerilim [kV]	12 / 20
Nominal iletken kesiti (Al) [mm ²]	150
Nominal siper kesiti (Cu) [mm ²]	25
İletken çapı [mm]	6,18
DC direnç@20°C [ohm/km]	0,206
Endüktans (Yan yana döşeme) [mH/km]	0,63
Kapasite [µF/km]	0,25
Akım taşıma kapasitesi (Yan yana döşeme) [A]	353
Kablo uzunluğu [m]	11
Toplam dış çap [mm]	38
İzin verilen işletme sıcaklığı [°C]	90
İzin verilen kısa devre sıcaklığı (max. 5 saniye) [°C]	250
Kablo durumu	Yeni

2.3 Test Numunesinin Hazırlanması

Test numunesi üzerinde ısıtma işleminin gerçekleştirilmesi, iletken den akım geçirilerek sağlanmıştır. Bunun için, kablo iletkeninin her iki ucu bir transformatörün sekonder çıkış uçlarına bağlanmıştır. Ancak bağlantı işleminden önce, kablo numunesinin bağlantıya hazır bir duruma getirilmesi gerekmektedir. Bunun nedeni ise, yüksek gerilimin test düzeneğinden herhangi bir noktaya atlama gerçekleştirmemesi ve ölçüm hatasını arttıran parametrelerin olabildiğince azaltılarak sağlıklı bir ölçmenin gerçekleştirilebilmesidir. Aşağıda test numunesinin hazırlanma aşamalarına yer verilmiştir.

- I. Kablo numunesinin transformatör baralarına rahat bir şekilde bağlanabilmesi için öncelikle belirli bir mesafede uçlarından soyulması gerekmektedir. Bu mesafe, iletken ucuna kablo pabucunun rahat bir biçimde bağlanabileceği ve aynı zamanda gerilim uygulanan iletken kısım ile toprak potansiyelinde bulunan bakır siper

arasında atlama gerçekleşmeyecek mertebede olmalıdır. Şekil 2.3’de test kablosunun soyma mesafeleri verilmiştir.



Şekil 2.3 OG kablosu soyma ölçüleri

L_1 mesafesinin değerinin, kablo pabucunun iletkene geçebileceği kadar olması yeterlidir. Bu mesafe, kullanılan kablonun kesitine ve kablo pabucuna bağlı olarak değişebilmektedir. L_2 mesafesinin ise 36 kV’a kadar olan OG kablolarında yaklaşık 30 cm olması istenmektedir. Bu çalışmada kullanılan kablo numunesinin hazırlanmış hali Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4 Ölçümde kullanılan kablo numunesinin test için hazırlanmış durumu

- II. Soyma işlemine başlarken öncelikle belirtilen mesafeler işaretlenir ve ilk olarak kablonun dış kılıfı soyulur. Daha sonra kablo siperi açılan noktaya kadar sıyrılarak toparlanır. Ardından XLPE üzerindeki dış yarı iletken katman dış kılıfın açıldığı yere kadar temizlenir. Bu aşamada, yarı iletken tabakanın olabildiğince homojen/eşit bir şekilde soyulmasına dikkat edilmelidir. XLPE tabaka kalınlığının azalması, yalıtkanın dayanabileceği maksimum elektrik alan şiddeti değerinin de düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca soyma işlemi sonunda, XLPE tabaka üzerinde hiçbir şekilde yarı

iletken malzeme kalmamasına ve çentik oluşturulmamasına dikkat edilmelidir. Aksi halde, iletken kablo siperine doğru yüzeysel deşarj olayları gerçekleşebilir. Kablo katmanlarının soyulması işlemi oldukça hassasiyet gerektiren bir işlem olması nedeniyle, bu çalışmada Gbz Manheim marka GB-PM20 özel OG kablo soyma aparatı kullanılmıştır. Soyma aparatı kullanarak gerçekleştirilen işlemler Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5 Kablo numunesinin test için hazırlanma aşamaları

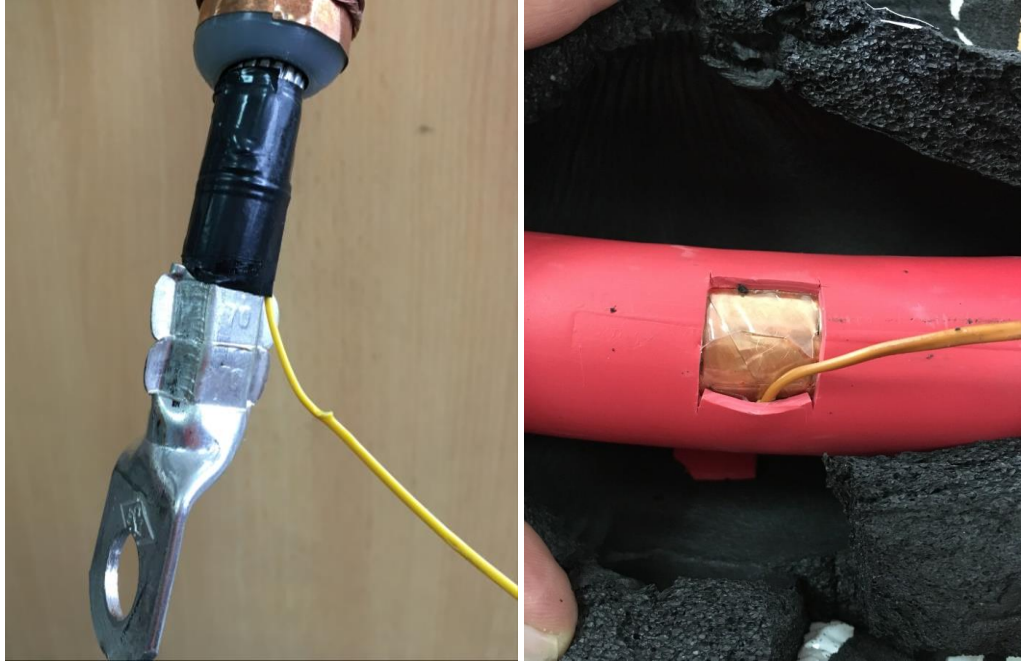
- III. Kablo numunesi Şekil 2.5’deki duruma getirildikten sonra, kablo ucundan kablo pabucunun bağlanabileceği kadar mesafede XLPE soyulur. Ardından, XLPE tabakanın keskin olan köşeleri düzeltilir ve kablo pabucu iletkene sıkılır (Şekil 2.6).



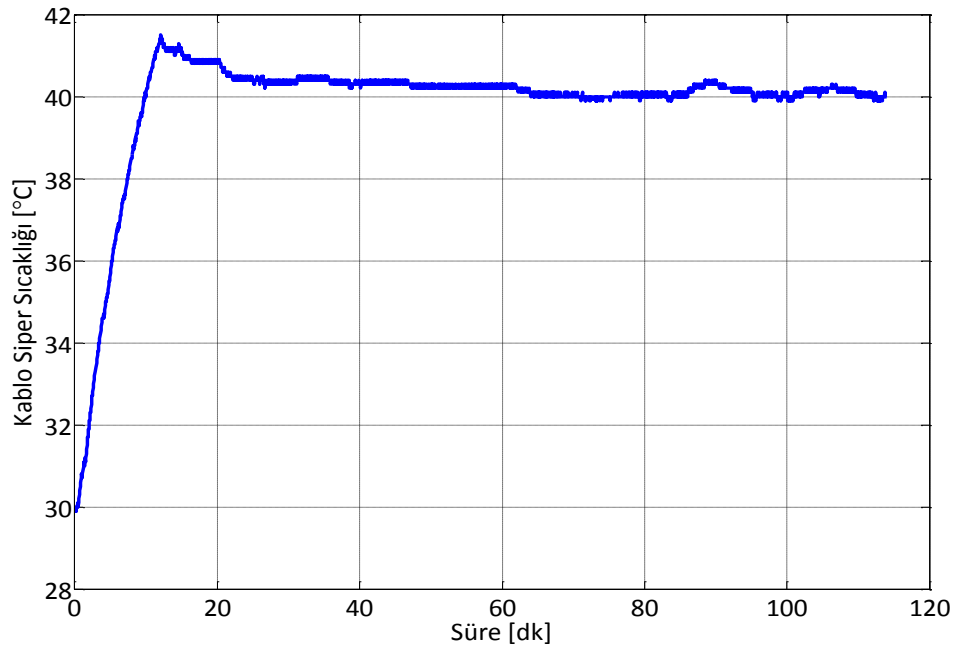
Şekil 2.6 Kablo numunesine pabuç montajının yapılması

- IV.** Soyma işleminin tamamlanmasının ardından, kablo sıcaklıklarının ölçülebilmesi için termokuplların yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kablo üzerinde iki noktada sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Birincisi, bağlantı noktasındaki kablo iletken sıcaklığı, ikincisi ise kablonun ortasındaki siper sıcaklığıdır (Şekil 2.7). Kablonun ısıtma işleminde referans alınacak sıcaklık değeri, kablonun ortasından ölçülen siper sıcaklığıdır. Bunun nedeni, kablonun orta noktasının bağlantı noktalarındaki temas dirençlerinden kaynaklanan sıcaklık artışlarından en az etkilenen bölge olmasıdır. Kablonun bağlantı noktasındaki iletken sıcaklığının ölçülme amacı ise, bağlantı temas direncinden kaynaklanabilecek aşırı ısınmaların

izlenebilmesi ve gerekli önlemlerin alınabilmesidir. Kablonun 40°C'e ısıtılırken ortasından alınan sıcaklık değerin zamanla değişimi Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.7 Kablo numunesinin ucunda ve ortasındaki termokupl bağlantıları



Şekil 2.8 Kablonun 40°C'e ısıtılırken kablo ortasından alınan sıcaklık değerin zamanla değişimi

- V. Kablo numunelerinin transformatöre bağlanmasından önce tüm kabloya ısı izolasyon malzemesi giydirilmiştir. Bunun amacı, kablo iletkeninde akıma bağlı kayıplar nedeniyle meydana gelen ısıнын, kablo dışına atılmasının zorlaştırılmasıdır. Böylelikle, kablo numunesinin istenilen sıcaklık seviyesine ulaşma süresi azaltılmış olmakta ve ölçme işlemi daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmekte ve ısı korunabilmektedir. Kullanılan ısı izolasyon malzemesine ait özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Isı izolasyon malzemesi (Elastomerik kauçuk köpük) teknik özellikleri

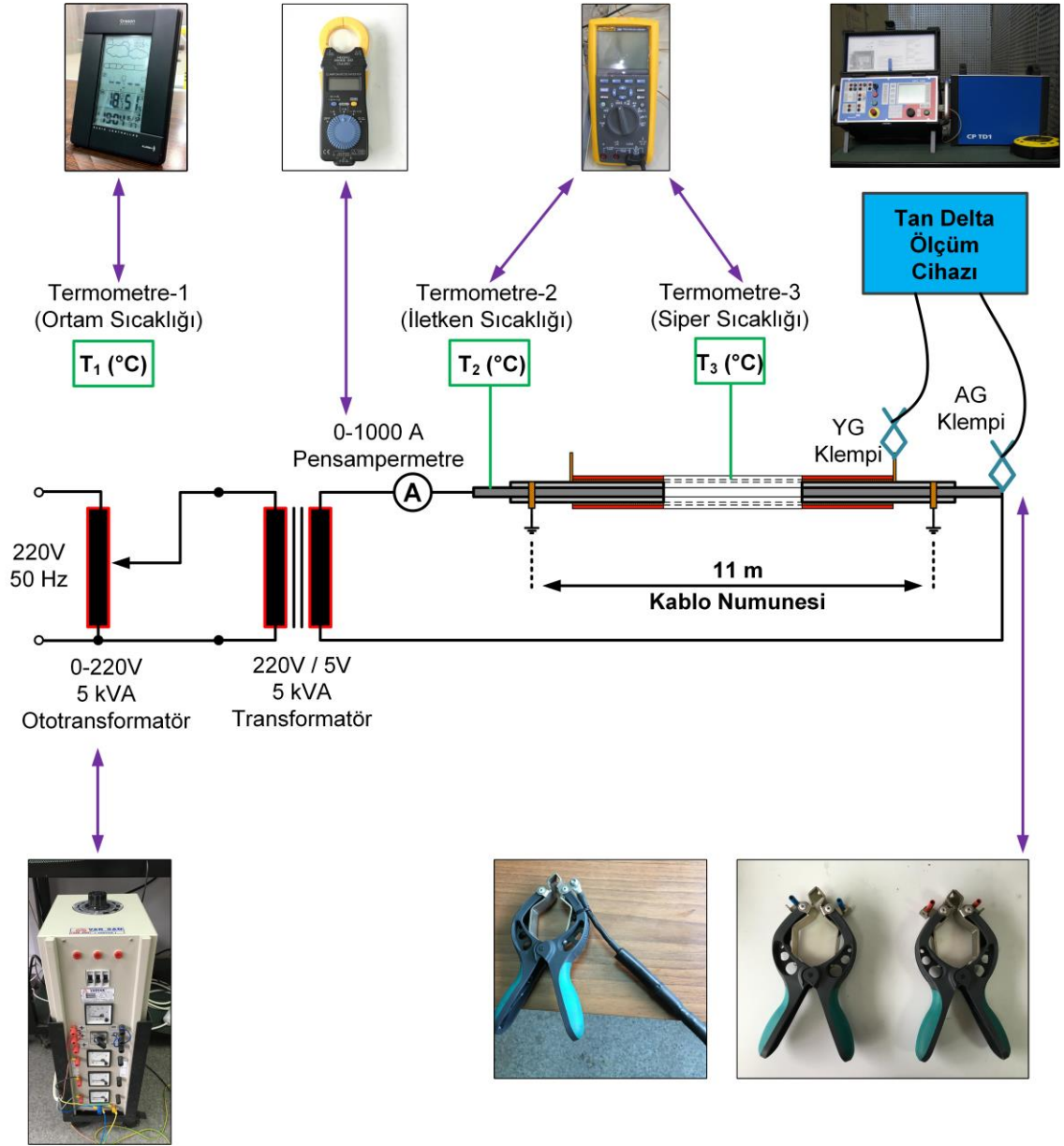
Parametre	Değer	Birim
Isı İletkenlik Katsayısı (λ)	0,039 (25°C)	W/m.K
	0,040 (50°C)	
	0,041 (75°C)	
Boru İç Çapı (D_i)	39	mm
Boru Dış Çapı (D_d)	77	mm
Uzunluk (l)	2000	mm

2.4 Test Düzenekinin Hazırlanması

Tez çalışmasında kullanılan kablo numunesinin, farklı frekans, gerilim ve sıcaklıktaki dielektrik parametrelerinin ölçülmesi için Şekil 2.9’da verilen test düzeneği kurulmuştur. Bu düzenekte kullanılan elemanlar şöyledir:

- Oto transformatör: Üç fazlı, 3x220V/3x(0-220V) nominal gerilim ve 3x5 kVA gücündedir.
- Transformatör: Tek fazlı, 220V/5V nominal gerilim ve 5 kVA gücündedir.
- Tan δ Ölçüm Cihazı: 0-12 kV arası gerilim ve 15 – 400 Hz arası frekanslarda dielektrik parametre ölçümünü gerçekleştirebilmektedir.
- Pens ampermetre: 0 – 1000A arasında AC/DC akım ölçümlerini $\pm$ %1,5 hassasiyetle ölçebilmektedir.

- Termometre-1: -5°C - 50°C arasında $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle ortam sıcaklığı ölçümünü ve %25 - %95 arasında ± 1 hassasiyetle bağıl nem ölçümünü gerçekleştirebilmektedir.
- Termometre 2,3: Termometrelerde kullanılan K tipi termokupl, $\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ hassasiyette olup -40°C ile 260°C aralığındaki sıcaklıkları ölçebilmektedir. Multimetreler ise sıcaklık ölçümlerinde, $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ hassasiyet ve $\pm 1\%+1^{\circ}\text{C}$ doğruluğa sahiptir
- Kablo: 12/20 kV nominal gerilimli, $1 \times 150 \text{ mm}^2$ Al/ 25 mm^2 Cu, çapraz bağlı polietilen (XLPE) izoleli, tek damarlı, alüminyum iletkenli, bakır siperli ve 11,7 m uzunluğunda bir OG kablosudur.



Şekil 2.9 Ölçüm düzeneği bağlantı şeması

Kablo numunesinin ölçüm için hazırlanmasının ardından, transformatörün sekonder kısmına olan bağlantının sağlanabilmesi için kablo iletkeninin uçlarına kablo pabucu bağlanmıştır. Ardından kablo iletkenleri transformatörün sekonder baralarına monte edilmiştir. Bağlantı işleminde, geçiş dirençlerinin minimum olması bakımından kablo pabuçlarının transformatör barasına dik bir şekilde bağlanması sağlanmıştır (Şekil 2.10). Böylece, temas yüzeyini olabildiğince arttırarak bu noktada meydana gelmesi muhtemel aşırı ısınmaların önüne geçilmiştir.



Şekil 2.10 Kablo pabuçlarının transformatör barasına dik şekilde bağlanması

Kablo iletkeninden akım geçirmek için primer gerilimi 220 V, sekonder gerilimi 5 V ve nominal gücü 5 kVA olan transformatör kullanılmıştır. Kablo numunesinin iki soyulmamış noktası arasındaki uzunluğu 11,7 m'dir. Her iki ucundan da 30 cm'lik kısım soyulmuş olup, iki iletken ucu arasındaki toplam mesafe 12,3 m'dir. Kablo iletkeninin toplam elektriksel direnç değeri,

$$R_{toplam} = R' \cdot l = 0,206 \cdot 12,3 \cdot 10^{-3} = 2,534 \text{ m}\Omega \quad (2.1)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada, R' kablonun birim uzunluğuna ait direncini ve l ise kablo uzunluğunu göstermektedir. Kablo numunesinin transformatörün sekonder kısmına bağlanması ve transformatörün nominal gerilimde (220V/5V) çalıştırılması durumunda, iletken üzerinden akabilecek maksimum akım değeri,

$$I_{\max} = \frac{V_2}{R_{toplam}} = \frac{5}{2,534 \cdot 10^{-3}} \cong 1973 \text{ A} \quad (2.2)$$

olarak hesaplanmıştır. V_2 , transformatörün sekonder gerilimidir. Hesaplanan maksimum akım değeri, iletkenin nominal akım taşıma kapasitesi değerinden (353 A)

oldukça fazla olup, kabloyu maksimum işletme sıcaklığına kadar ısıtabilecek mertebededir.

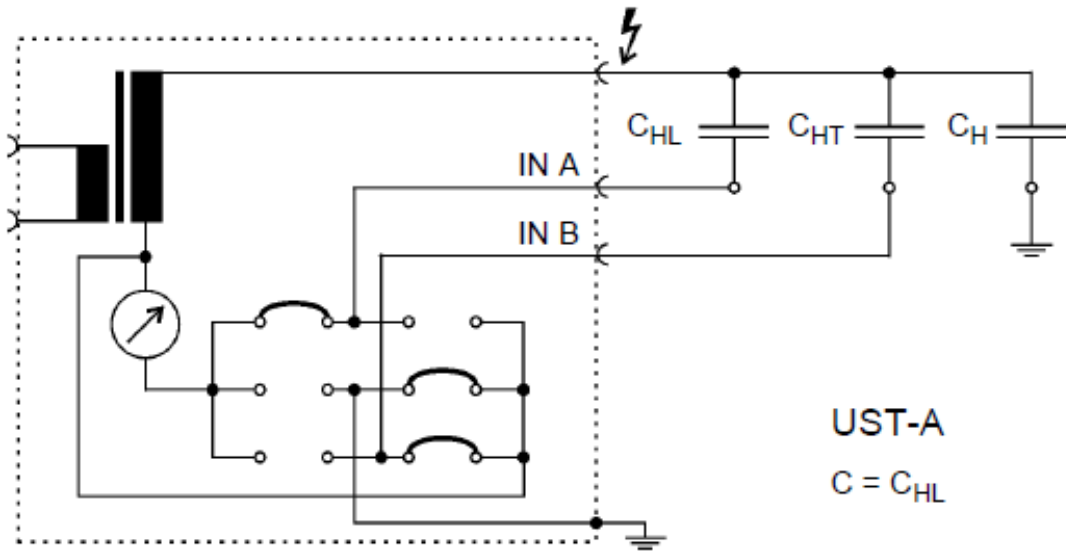
Transformatörün giriş gerilimi, 220V/0-220V, 5 kVA nominal değerlere sahip bir oto transformatör ile kontrol edilmiştir. Varyak yardımıyla transformatörün primer gerilimi (V_1) ayarlanmakta ve transformatörün dönüştürme oranına bağlı olarak sekonder gerilimin (V_2) genliği kontrol edilmektedir. Böylelikle, kablo uçlarındaki V_2 gerilimin kontrol edilmesiyle iletken üzerinden akan akımın değeri de kontrol edilebilmektedir. Kablo üzerinden akan akımın değeri ise 0 – 1000 A arasında akım ölçebilen bir pens ampermetre yardımıyla ölçülmektedir.

İletkenden geçirilen akım nedeniyle ısınan kablonun sıcaklığı, kablo bağlantı noktasındaki iletken içerisinden (T_2 sıcaklığı) ve kablo orta noktasındaki siper yüzeyinden (T_3 sıcaklığı) olmak üzere iki noktadan ölçülmektedir. Kablo üzerinde sıcaklık ölçme işlemi için iki adet Fluke 289/FVF marka multimetre ve K tipi termokupl kullanılmıştır (Termometre-2 ve Termometre-3). Termokupl, $\pm 1,1^\circ\text{C}$ hassasiyette olup -40°C ile 260°C aralığındaki sıcaklıkları ölçebilmektedir. Multimetreler ise, $\pm 0,1^\circ\text{C}$ hassasiyet ve $\pm 1\%+1^\circ\text{C}$ doğruluğa sahiptir. T_1 ile gösterilen sıcaklık ise, laboratuvar ortam sıcaklığıdır ve Termometre-1 ile ölçülmektedir. Ortam sıcaklığıyla birlikte, tüm ölçümlerde laboratuvar ortamının bağıl nem ve basınç değerleri de ölçülmüştür.

Kablo yalıtım malzemesinin dielektrik parametrelerinin ölçülmesi için ise $\tan \delta$ ölçüm aleti kullanılmıştır (Şekil 2.11).

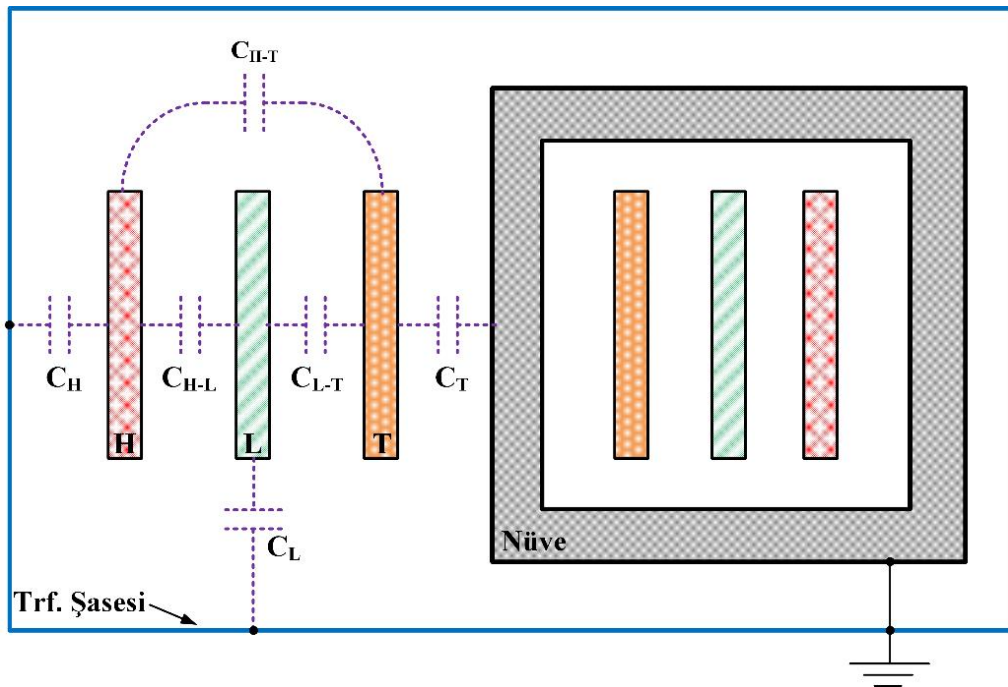


Şekil 2.11 Tan δ ölçüm cihazı



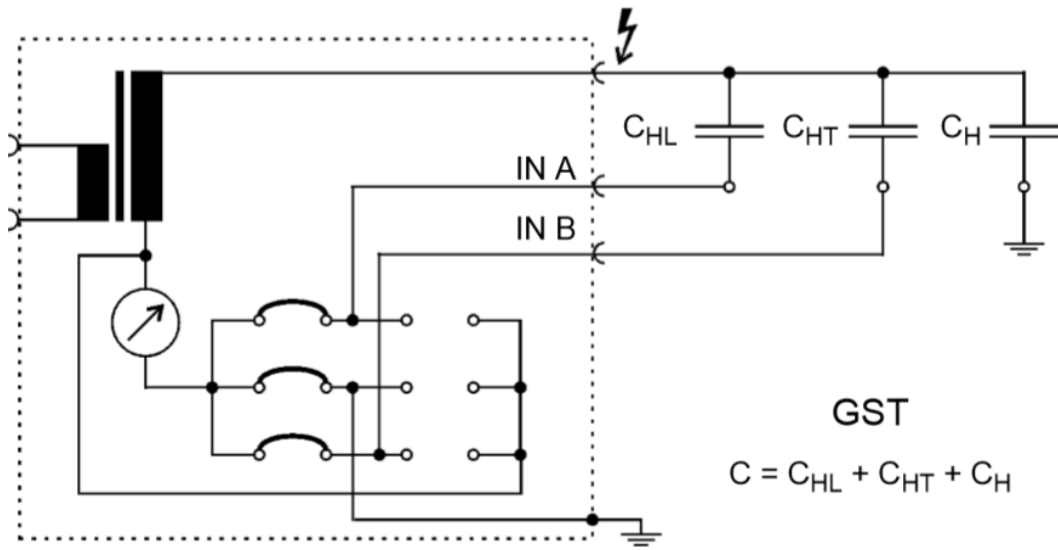
Şekil 2.12 Tan δ ölçüm cihazının (CPC-100) UST-A ölçüm modu

Şekil 2.12’de verilen devre şemasında CPC-100 cihazının ölçme yöntemi gösterilmiştir. Cihaz, ikisi ölçme probundan ve biri de toprak dönüşünden olmak üzere aynı ekipman üzerinde toplamda üç farklı kapasitenin ya da eşdeğer devrenin ölçümünü gerçekleştirebilmektedir. Aşağıda, üç fazlı bir güç transformatörünün iç yapısında bulunan kapasiteler gösterilmiştir. (Şekil 2.13). H yüksek gerilim sargısını, L alçak gerilim sargısını ve T ise tersiyer sargıyı göstermektedir.



Şekil 2.13 Bir güç transformatörünün içerisinde bulunan kapasitelerin gösterimi

Şekil 2.13’den görüldüğü üzere, bir güç transformatörü içerisinde sargılar arası ve sargı-toprak (nüve) arası olmak üzere iki temel kapasite bulunmaktadır. CPC-100 cihaz problemlerinin bağlanması durumunda, cihaz ölçme yöntemi ayarlanarak istenilen kapasite/kapasitelerin değerleri ölçülebilmektedir. Bu işlem, cihazın içerisindeki bağlantının farklı kombinasyonlarda değiştirilmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.13’de verilen güç transformatörünün yüksek gerilim sargısına (H) cihazın yüksek gerilim probu, alçak gerilim sargısına (L) IN-A ölçüm probu ve tersiyer sargıya (T) ise IN-B ölçüm probunun bağlandığı ve cihazın GST modunda çalışması durumunda ölçülen kapasite değeri Şekil 2.14’de verilmiştir.



Şekil 2.14 Tan delta ölçüm cihazının (CPC-100) GST ölçüm modu

Bu çalışmadaki ölçümler ise UST-A bağlantı şeması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.9’da görüldüğü üzere, cihazın yüksek gerilim probu kablo siperine ve IN-A probu ise kablo iletkenine bağlanmıştır. Ölçümler sırasında, yüksek gerilim uygulanan siper tarafından ölçüm alınan iletken kısma doğru dielektrik malzeme üzerinden kaçak yüzey akımları akmaktadır. Bunun nedeni, dielektrik malzeme yüzeyinin belirli bir yüzey direncinin bulunmasıdır. Bu yüzey akımlarının alınan ölçümleri bozmaması ya da ölçüm hatasını arttırmaması için dielektrik malzemenin yüzeyine her iki uçta bakır şerit sarılmıştır. Bu bakır şeritler bir kablo yardımıyla aynı potansiyele getirilip cihazın IN-B probuna bağlanmıştır. Böylelikle, IN-A probu yalnızca siper-iletken arasında akan akımı okuması sağlanmış olup, yüzey akımları istenilen ölçümden yalıtılmıştır.

Normal çalışma koşullarında, kablo iletkeni yüksek potansiyele sahip olup siper topraklanmaktadır. Bu çalışmada ise yüksek gerilim kablo siperine uygulanmıştır. Belirtilen şartlarda kablo iletkenine yüksek gerilim uygulanması durumunda, transformatör sargılarının delinmesi oldukça muhtemel olduğu için bu ölçme yöntemi tercih edilmiştir. Her iki durumda iletken-siper arasındaki eşdeğer devre ölçüldüğü için ölçüm sonuçları da aynı olacaktır.

2.5 Ölçümlerin Gerçekleştirilmesi

Ölçüm düzeneğinin kurulmasının ardından, kablo yalıtkanının dielektrik parametrelerinin ölçülmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçme işlemi için kablo iletkeninden akım geçirilerek istenilen sıcaklık mertebesine çıkılmıştır. Ulaşılan sıcaklıkta, oto transformatör ile kablo akımını sürekli olarak kontrol ederek, ortalama üç saat boyunca aynı sıcaklıkta beklenmiştir. Kablonun istenilen sıcaklık seviyesine ulaşmasının ardından ($\pm 1^\circ\text{C}$) dielektrik parametrelerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada ölçülen dielektrik parametreler aşağıda belirtilmiştir.

- Dielektrik kayıp (p_k)
- Dielektrik kayıp faktörü ($\tan \delta$)
- Paralel eşdeğer kapasite (C_p)

Bu parametrelerin yanı sıra, bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r) ve dielektrik kayıp indisi ($\epsilon_r \cdot \tan \delta$) değerleri de sırasıyla,

$$\epsilon_r = \frac{C_p}{C_0} \quad (2.3)$$

$$\text{Dielektrik Kayıp İndisi} = \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (2.4)$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanmıştır. Burada C_0 kablonun geometrik kapasitesini ifade etmektedir. Geometrik kapasite, kablo ana yalıtkanı yerinde yalıtım malzemesi olarak hava olması durumundaki kapasiteyi belirtmektedir. Gerilim, frekans ve sıcaklık ölçümleri, Çizelge 2.3’de belirtilen aralıklarda ve adımlarda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.3 Gerçekleştirilen ölçümlere ait özellikler ve ölçülen parametreler

Değişken Parametre	Değişim (Ölçme) Aralığı	Ölçme Adımı	Ölçülen Parametre
Gerilim	0 – 12 kV	0,5 kV	Dielektrik kayıp
Frekans	0 – 400 Hz	25 Hz	Dielektrik kayıp faktörü
Sıcaklık	30 - 80°C	10 °C	Paralel eşdeğer kapasite

Kablonun nominal işletme sıcaklığı 90°C'dir. Bu sıcaklıkta, transformatör barasının aşırı ısınmasına engel olmak için ve sağlıklı ölçüm sonuçları elde edebilmek için sıcaklık üst limiti 80°C olarak alınmıştır. Kablonun nominal işletme sıcaklığına (90°C) çıkarılabilmesi için, sekonder kesiti daha büyük olan bir transformatör kullanılması gerekmektedir.

Ölçümlerde frekans değeri ve sıcaklık sabit tutulup gerilim arttırılmış ve her bir gerilim değeri için dielektrik kayıp, dielektrik kayıp faktörü, paralel eşdeğer kapasite ölçüm değeri alınmıştır. Tek bir frekans değeri için, tüm gerilim seviyelerinde ölçümlerin gerçekleştirilmesinin ardından bir sonraki frekans adımındaki ölçümler gerçekleştirilmiştir. O sıcaklık için tüm frekans ve gerilim ölçümlerinin tamamlanmasından sonra ise bir sonraki sıcaklığa geçilerek ölçümlere devam edilmiştir. Ölçüm sonuçlarının daha hassas alınabilmesi için her bir ölçme işlemi beş kez tekrarlanmış ve bunların ortalaması alınmıştır. Ölçüm işlemleri boyunca kaydedilen laboratuvar şartları Çizelge 2.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.4 Ölçüm işlemleri süresince kaydedilen laboratuvar şartları

Sıcaklık	Bağıl Nem	Basınç
25 ± 1°C	%35 - 40	756 – 758 mmHg

ÖLÇÜMLERİN ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın bu bölümünde, kablo üzerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değişimlere ve bu değişimlere ait değerlendirmelere yer verilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, dielektrik malzemenin gerilim, sıcaklık ve frekans cevaplarının elde edilmesi ve böylelikle farklı işletme şartlarına maruz kalması durumundaki davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Dielektrik malzeme üzerinde gerilim, sıcaklık ve frekansa bağlı birçok farklı parametrenin ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar içerisinde, dielektrik malzemenin elektriksel yalıtım performansı/durumu hakkında fikir verebilecek ve işletme sürekliliği bakımından önem arz eden parametreler incelenmiştir. Bu bağlamda dielektrik malzeme üzerinde,

- Dielektrik kayıp (p_k),
- Dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$),
- Bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) / paralel eşdeğer kapasite (C_p)
- Dielektrik kayıp indisi ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$)

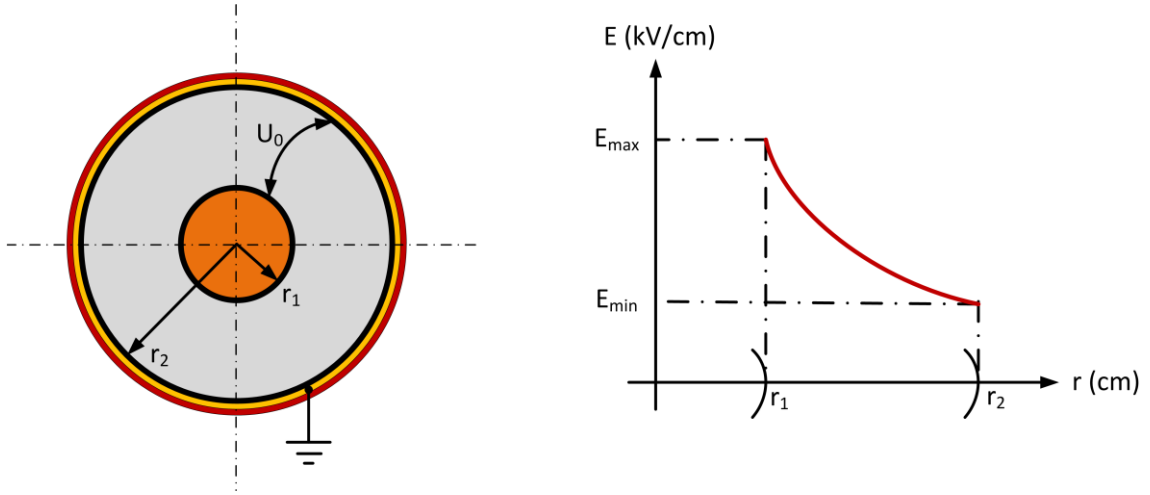
parametrelerinin gerilime, sıcaklığa ve frekansa bağlı değişimleri ölçülmüş ve ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. Dielektrik kayıp (p_k), dielektrik malzeme içerisinde ısıya dönüşen kayıp gücü ifade etmektedir. Bu parametrenin incelenmesi, yüksek gerilim kablusunun yalıtım ömrü bakımından önem arz etmektedir. Dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$) ise dielektrik malzemenin elektriksel yalıtım kalitesi hakkında fikir vermektedir. İşletme içerisinde yüksek gerilim kablolarına ait bir diğer önemli parametre ise kablo kapasitesidir (C_p). Bağıl dielektrik sabitinin (ϵ_r) incelenmesi ile yüksek gerilim kablосуna

ait kapasitenin ve dolayısıyla reaktif gücün incelenebilmesi mümkündür. Dielektrik kayıp indisi ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$), yüksek gerilim kablusunun yalıtkan tabakasında meydana gelen toplam kayıp güç hakkında fikir vermesi nedeniyle hesaplanarak incelenecek parametreler arasına dâhil edilmiştir. Değerlendirme aşamasında, dielektrik malzeme üzerinde meydana gelen değişimlerin daha net bir şekilde incelenebilmesi için ölçüm verileri gerilime, sıcaklığa ve frekansa bağlı olarak sınıflandırılmıştır.

3.1 Gerilime Bağlı Değişimler

Dielektrik malzemeler, tüm diğer malzemeler gibi belirli bir özdirenç değerine sahiptir. Belli bir potansiyel farka sahip elektrotlar arasına bir dielektrik malzeme yerleştirildiğinde üzerinden bir akım akmaktadır. Bu akımın genliği, dielektrik malzemelerin özdirenç değerlerinin yüksek olmaları nedeniyle oldukça düşüktür ancak uygulanan gerilimin mertebesinin yüksek olduğu durumlarda akım genliği de önemli ölçüde artmakta ve beraberinde dielektrik kayıplara neden olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek gerilim kablolarında elektriksel yalıtım amaçlı kullanılan dielektrik malzeme, kablonun nominal işletme gerilimi (U_0) nedeniyle elektrik alana maruz kalmaktadır (Şekil 3.1). Meydana gelen elektrik alanın genliğine (3.1) bağlı olarak malzeme içerisinde polarizasyon ve kısmi boşalma olayları gerçekleşebilmektedir. Buna bağlı olarak ise dielektrik malzeme içerisinde ek kayıplar oluşmakta ve malzemenin kapasitesi değişim gösterebilmektedir. Ayrıca, işletme geriliminde meydana gelen gerilim dalgalanmaları ($\pm\%10$), gerilim dalgasının temel bileşenine (50 Hz) ek olarak harmonik gerilimlerin bulunması durumunda gerilimin genliği artmakta ve efektif değeri de artış gösterebilmektedir. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında, dielektrik malzemenin farklı parametreleri için gerilime bağlı değişimleri/davranışları incelenmiştir.

$$E(r) = \frac{U_0}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} [\text{kV/cm}] \quad \{r_1 \leq r \leq r_2\} \quad (3.1)$$



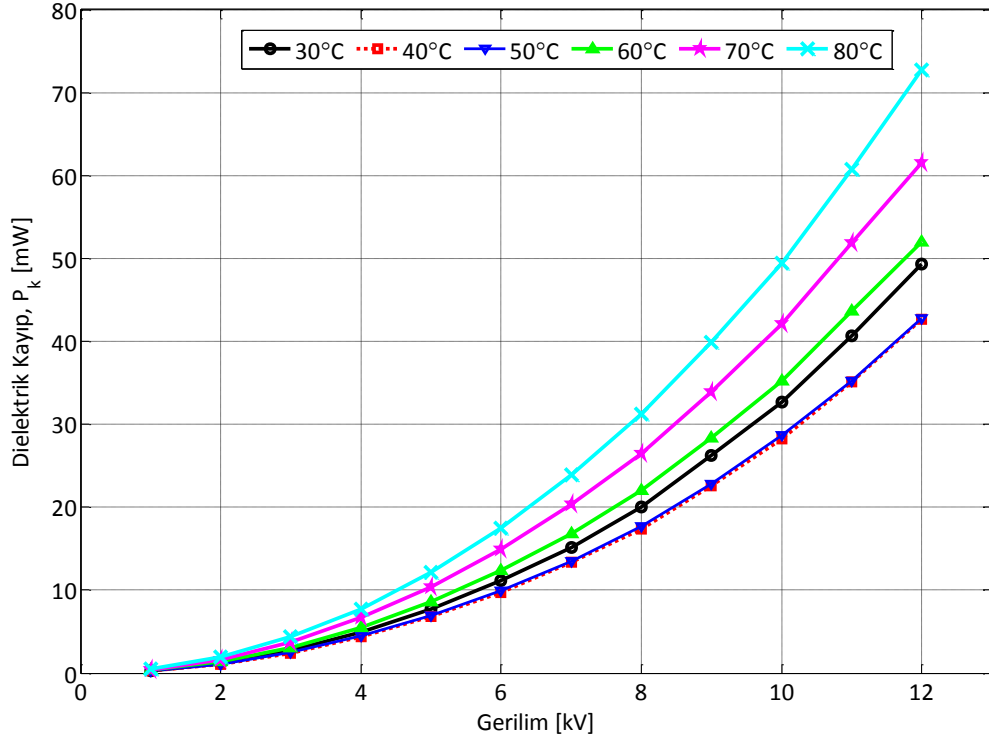
Şekil 3.1 Yüksek gerilim kablosunun boyutları ve dielektrik malzeme üzerindeki elektrik alan dağılımı

Çizelge 3.1’de gerilime bağlı değişimlerde incelenen parametreler ve bu parametrelerin hangi aralıklarda incelendiği belirtilmiştir. Ölçüm verilerinin oldukça fazla olması nedeniyle incelenen aralıklar sınırlandırılmış ve özellikle benzer davranış gösteren aralıklarda, incelenen değişimin daha net değerlendirilebilmesi için sadece tek bir durumdaki değişim eğrisi verilmiştir.

Çizelge 3.1 Gerilime bağlı incelenen değişimler

İncelenen Parametreler	Gerilime Bağlı Değişim
Dielektrik Kayıp (p_k)	<u>$f = 50$ Hz için</u> $T = 30^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}$
Dielektrik Kayıp İndis ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$)	<u>$T = 50^\circ\text{C}$ için</u> $f = 50$ Hz, 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz
Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan\delta$)	$f = 50$ Hz ve $T = 30^\circ\text{C}$
Bağıl dielektrik sabit (ϵ_r)/ paralel eşdeğer kapasite (C_p)	

3.1.1 Dielektrik Kaybın Gerilime Bağlı Değişimi



Şekil 3.2 Dielektrik kaybın (P_k) farklı siper sıcaklıklarında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

Şekil 3.2’de 50 Hz sabit frekansta farklı siper sıcaklıklarına (30, 40, 50, 60, 70, 80°C) ait gerilim artışına (1 – 12 kV) bağlı dielektrik kayıp ölçüm sonuçları verilmiştir. Tüm sıcaklıklara genel olarak bakıldığında, gerilim artışıyla birlikte akımın da artmasından dolayı, dielektrik kayıpların karesel olarak arttığı görülmektedir. 12 kV nominal U_0 geriliminde en düşük dielektrik kayıp değeri 42,64 mW ile 40°C sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Aynı gerilim seviyesinde meydana gelen en büyük dielektrik kayıp değeri ise 80°C sıcaklıkta 72,75 mW’dır. Bilindiği üzere, dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen kayıp paralel eşdeğer devre için,

$$p_k = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad (3.2)$$

ile hesaplanabilmektedir. Bu formülde, frekansın ve sıcaklığın sabit olması durumunda kayıp üzerinde etkili olacak tek parametrenin gerilim (U) olduğu görülmektedir. Ayrıca formül içerisindeki “ $\tan \delta$ ” çarpanının da gerilimle değişmediği düşünülürse (3.3, 3.4),

$$\tan \delta_{paralel} = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} \quad (3.3)$$

$$\tan \delta_{seri} = \omega \cdot R_s \cdot C_s \quad (3.4)$$

dielektrik kayıp değerin artan gerilimle karesel orantılı olarak artması beklenmektedir (3.5). Burada,

$\tan \delta_{paralel}$: Paralel eşdeğer devrenin dielektrik kayıp faktörü

$\tan \delta_{seri}$: Seri eşdeğer devrenin dielektrik kayıp faktörü

ω : Açısal frekans [rad/s]

R_p : Paralel eşdeğer direnç [Ω]

R_s : Seri eşdeğer direnç [Ω]

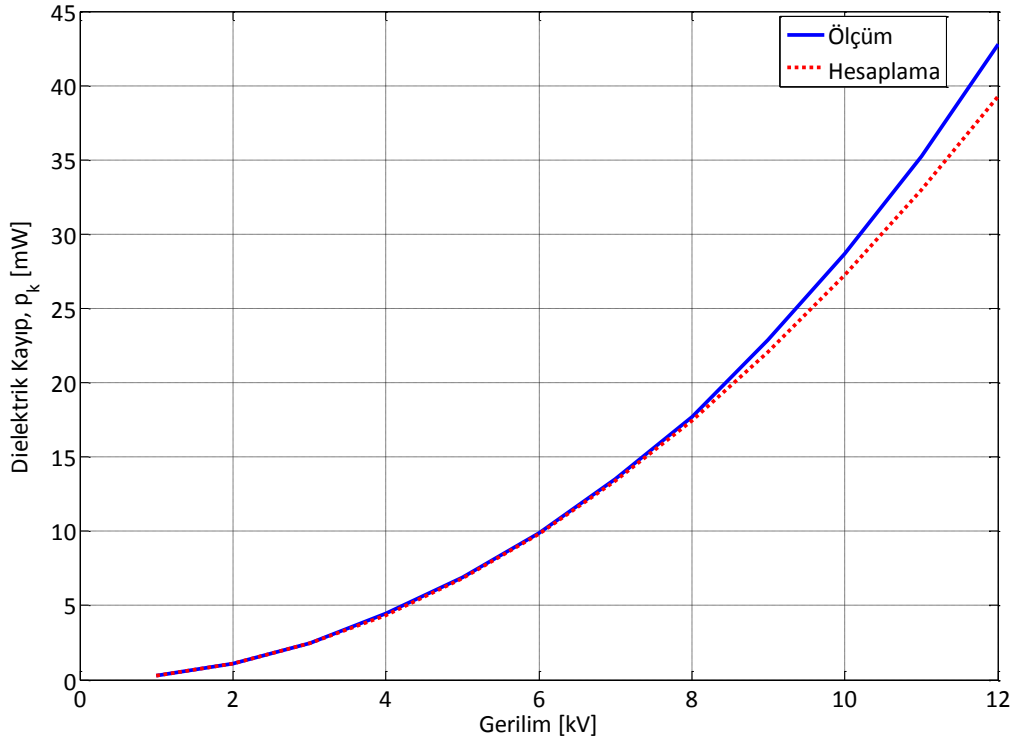
C_p : Paralel eşdeğer kapasite [F]

C_s : Seri eşdeğer kapasite [F]

olarak ifade edilmektedir.

$$p_k = \frac{U^2}{R_p} \quad (3.5)$$

Ölçümlerle elde edilen dielektrik kayıp değerleri ile yukarıda belirtildiği şekilde hesaplamadan elde edilen teorik sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma frekansın 50 Hz ve siper sıcaklığının 50°C değeri için gerilim artışına bağlı dielektrik kayıp değerlerinin değişimi olarak Şekil 3.3'te verilmiştir.



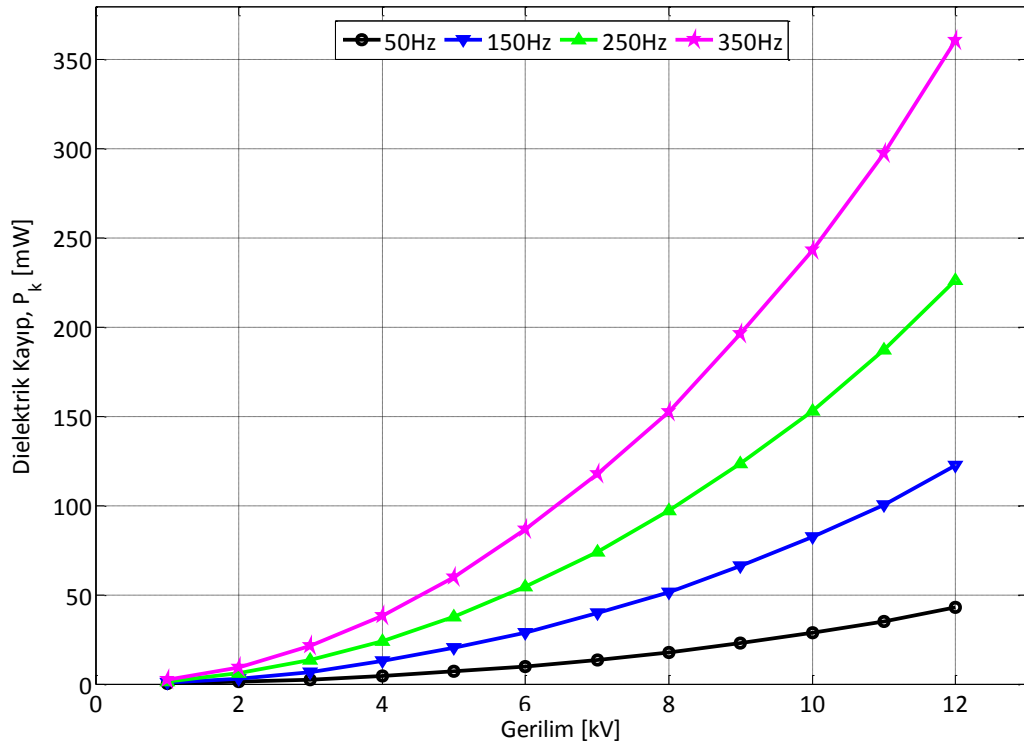
Şekil 3.3 Dielektrik kaybın (P_k) sabit siper sıcaklığında (50 °C) gerilime bağlı değişiminin (ölçüm ve hesaplama değerlerinin) karşılaştırılması ($f = 50$ Hz)

Dielektrik kayıp için ölçüm ile elde edilen değerlerin hesaplama ile elde edilen sonuçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ölçüm ve hesaplama ile elde edilen dielektrik kayıp değerleri arasında 6 kV'luk gerilime kadar yaklaşık % 1'lik bir fark bulunmaktadır. Bu fark 6 kV'dan sonra artış göstermekte ve 12 kV'ta % 9 mertebelerine kadar ulaşmaktadır. İki veri arasındaki bu fark özellikle 6 kV'dan sonra daha da hızlı bir şekilde artmaktadır. İki değer arasındaki farkın özellikle 8 kV'tan sonra hızlı bir şekilde artmasının nedeni, dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen iletim kayıplarının yanı sıra yarı iletken tabakalarda meydana gelen kayıplar ve dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen kutuplaşma (polarizasyon) kayıplarıdır. Dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen polarizasyon (P) genel olarak,

$$P = (\epsilon_r - 1) \cdot \frac{E}{4 \cdot \pi} \quad (3.6)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir [33]. Bu denklemden de görüldüğü üzere, dielektrik malzemede meydana gelen kutuplaşma, elektrik alan (E) parametresine bağlıdır. Gerilim artışı sonucu dielektrik katman üzerindeki elektrik alan şiddetinin artması ile

dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen polarizasyon kayıpları da artışa neden olmaktadır.

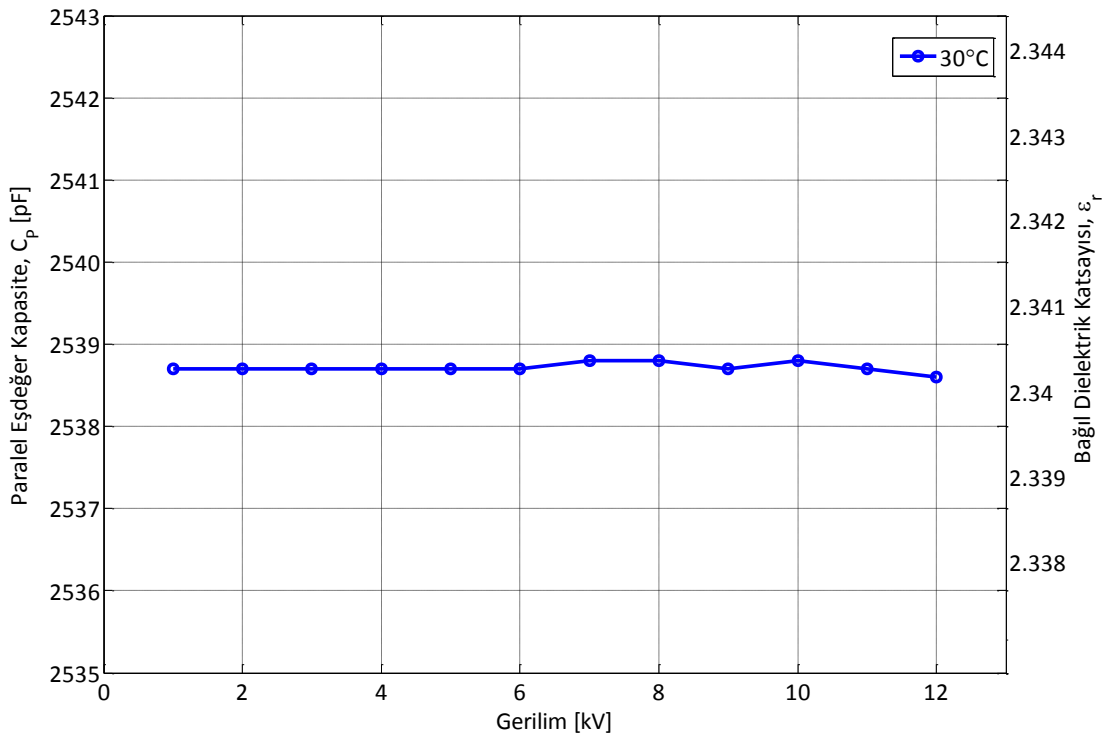


Şekil 3.4 Dielektrik kaybın (P_k) farklı frekanslarda gerilime bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$)

Kablo siper sıcaklığı 50°C de sabitken farklı frekanslar için dielektrik kaybın gerilime bağlı değişimi Şekil 3.4’de verilmiştir. Farklı frekans değeri olarak ise 3., 5. ve 7. harmonik frekans gerilimleri incelenmiştir. Burada, her bir frekans değeri için gerilim artışıyla birlikte dielektrik kaybının da arttığı görülmektedir. Kabloda, U_0 (12 kV) gerilimde meydana gelen dielektrik kayıp değerlerine bakıldığında, 50 Hz de 42,77 mW, 150 Hz de 122,53 mW, 250 Hz de 226,13 mW ve 350 Hz de 360,92 mW kayıp meydana geldiği gözlemlenmiştir. Frekans 3 katına çıkarıldığında (150 Hz) dielektrik kayıp 50 Hz deki değerin 2,86 katına, frekans 5 katına çıkarıldığında (250 Hz) dielektrik kayıp 5,29 katına ve frekans 7 katına (350 Hz) çıkarıldığında ise dielektrik kaybın 8,44 katına çıktığı gözlemlenmiştir. Dielektrik kayıp faktörüne ($\tan\delta$) ait seri eşdeğer devreye göre, frekansın artmasıyla birlikte dielektrik kaybın da artması beklenmektedir. Ancak ölçüm sonucu elde edilen dielektrik kayıp değerlerine göre bu artış lineer (aynı oranda) değildir. 150 Hz frekans ve U_0 (12 kV) gerilimde yapılan ölçümde dielektrik kaybın frekans artışına göre daha az oranda olmasına karşın, 250 Hz ve 350 Hz ölçümlerde bu

artış seri eşdeğer devreye göre beklenenden (frekans oranlarından) daha fazladır. Bu değerlendirmelere göre dielektrik malzemenin frekans artışına/değişimine gösterdiği cevabın, seri ve paralel eşdeğer devre modelleri ile uyumlu olmadığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda, gerilim harmoniklerinin dielektrik malzeme üzerinde ek kayıplara neden olduğu görülmektedir.

3.1.2 Bağıl Dielektrik Katsayısının/Paralel Eşdeğer Kapasitenin Gerilime Bağlı Değişimi



Şekil 3.5 Paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağıl dielektrik katsayısının (ϵ_r) 30°C siper sıcaklığında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

Sabit frekans (50 Hz) ve sabit siper sıcaklığında (30°C) yapılan ölçümler sonucu, paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağıl dielektrik katsayısının (ϵ_r) gerilime bağlı değişimi Şekil 3.5’de verilmiştir. Paralel eşdeğer kapasite ile bağıl dielektrik katsayısı arasında,

$$\epsilon_r = \frac{C_p}{C_0} = \frac{C_p \cdot \ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r-hava} \cdot l} \quad (3.7)$$

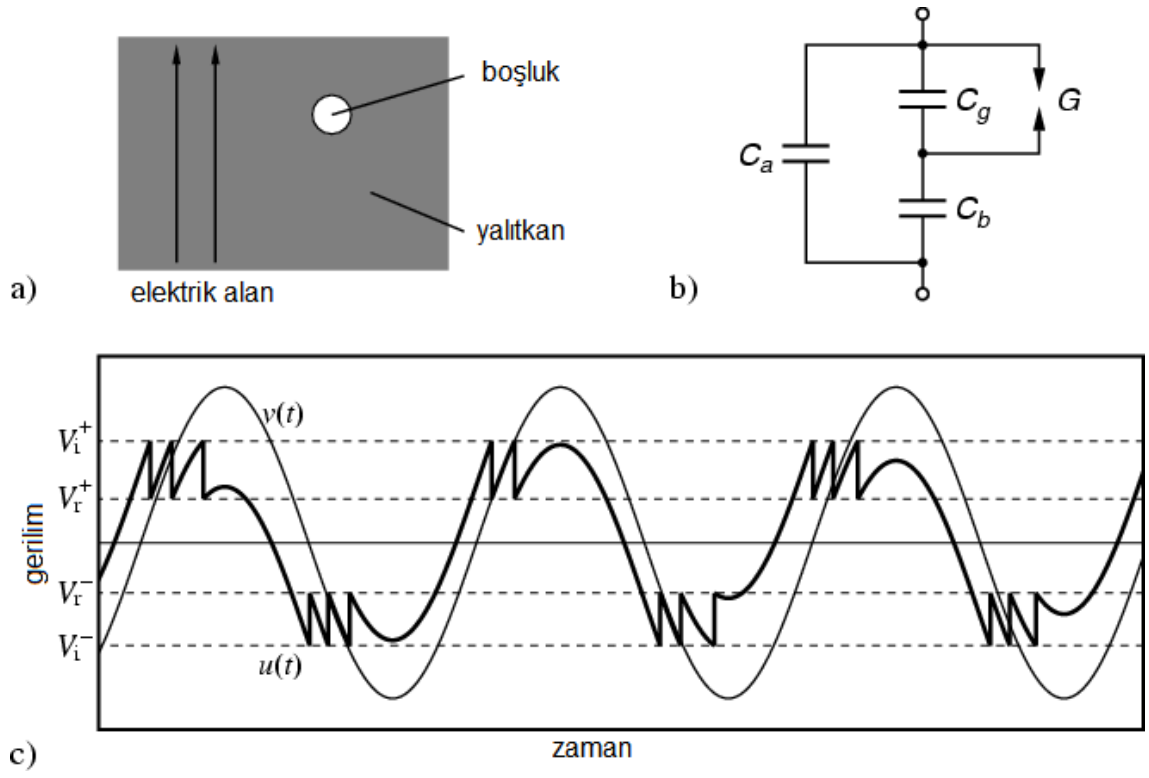
bağıntısı nedeniyle sabit bir oran bulunmasından dolayı her iki büyüklüğe de aynı grafik üzerinde yer verilmiştir. Burada C_0 geometrik kapasite, C_p ölçüm ile elde edilen

kapasite, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ve ϵ_{r-hava} ise havanın bağıl dielektrik katsayısıdır. Ölçümü yapılan kablo için geometrik kapasite değeri (C_0),

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r-hava} \cdot l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 11}{\ln\left(\frac{13,22}{7,52}\right)} = 1084,7 \text{ pF}$$

olarak hesaplanmıştır.

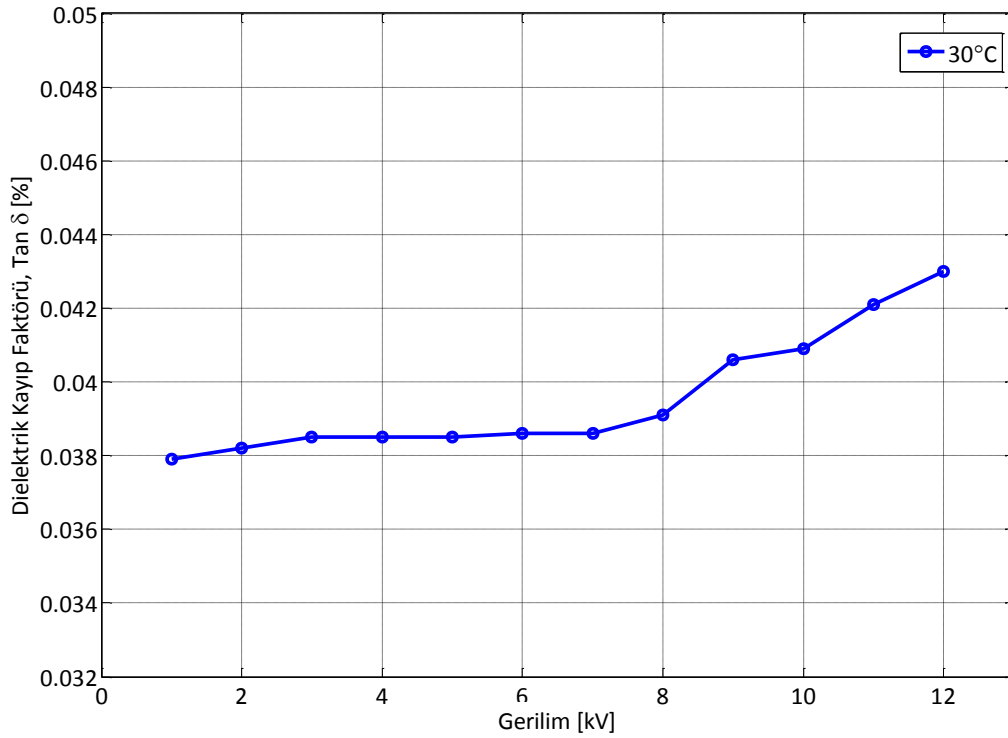
Uygulanan geriliminin artışı ile birlikte yaklaşık 6 kV'a kadar paralel eşdeğer kapasite (C_p) değeri 2538,7 pF değerinde sabit kalmaktadır. Gerilim arttırılmaya devam edildiğinde ise 12 kV gerilime kadar meydana gelen maksimum artış %0,04 civarındadır. Bu artış oranının da oldukça küçük olması nedeniyle, kablo kapasitesinin veya dielektrik malzemeye ait bağıl dielektrik katsayısının gerilime bağlı olarak değişmediği söylenebilir. Burada, bağıl dielektrik katsayısında veya kablo kapasitesinde gerilime bağlı değişim olmamasının nedeni, ölçmede kullanılan kablonun yeni olmasıdır. Ancak, ölçümlerin yaşlanmış bir kablo üzerinde yapılması durumunda kablo kapasitesinde ve bağıl dielektrik sabitinde gerilime bağlı olarak da değişimler gözlemlenebilmektedir. Bunun nedeni, dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen kısmi deşarj olaylarının yaşlanmış bir kablo üzerinde daha fazla etkin olmasıdır. Bilindiği üzere, dielektrik malzeme içerisinde bulunan hava boşluklarının (Şekil 3.6-a) tamamı birer kapasite gibi davranmaktadırlar (Şekil 3.6-b). Gerilim artışıyla birlikte bu boşluklar içerisindeki elektrik alan değeri havanın delinme dayanımı aşabilmekte ve deşarj akımları artmaktadır (Şekil 3.6-c). Bu durumda, kapasiteler deşarj olmakta ve dielektrik malzemenin ölçülen eşdeğer kapasitesi değişim göstermektedir.



Şekil 3.6 Kısmi boşalmaya ait a) Malzeme yapısı, b) Elektriksel eşdeğer devre, c) Zamana bağlı gerilim değişimi

Şekil 3.6-b'de, C_g dielektrik malzeme içerisindeki boşluğun, C_b boşluğa seri olan dielektrik malzemenin ve C_a ise tüm dielektrik malzemenin kapasitesini belirtmektedir. Şekil 3.6-c'de malzeme uçlarındaki gerilim $v(t)$ ve hava boşluğundaki gerilim ise $u(t)$ olarak gösterilmektedir.

3.1.3 Dielektrik Kayıp Faktörünün Gerilime Bağlı Değişimi



Şekil 3.7 Dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) 30°C siper sıcaklığında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

Şekil 3.7’de, sabit frekans (50 Hz) ve sıcaklıkta (30°C) gerilim artışına (1-12kV) bağlı olarak ölçülen dielektrik kayıp faktör ($\tan\delta$) değerleri verilmiştir. $\tan\delta$ değeri 1 kV’dan 7 kV’a kadar yaklaşık %0,039 olarak ölçülmüştür. Ölçme geriliminin 8 kV’dan 12 kV’a arttırılması durumunda ise $\tan\delta$ değeri artış göstermektedir. 12 kV gerilimde ölçülen $\tan\delta$ değeri %0,043’dür. Gerilimin 7 kV’dan 12 kV’a arttırmakla birlikte $\tan\delta$ değerinde %11,4’lük artış gerçekleşmiştir. Seri ve paralel eşdeğer devrelere ait dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$) eşitliklerine bakıldığında (3.3, 3.4), $\tan\delta$ değerinin ölçme geriliminden bağımsız olduğu görülmekte ve dolayısıyla gerilime bağlı bir artış beklenmemesine neden olmaktadır. Ancak formül içerisindeki paralel eşdeğer direnç (R_p) ve paralel eşdeğer kapasite (C_p) parametreleri gerilime bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu nedenle gerilime bağlı artış görülmektedir.

Tan δ büyüklüğünün bir diğer ifade şekli de,

$$\tan \delta = \frac{\sum p_k}{\sum Q_c} \quad (3.8)$$

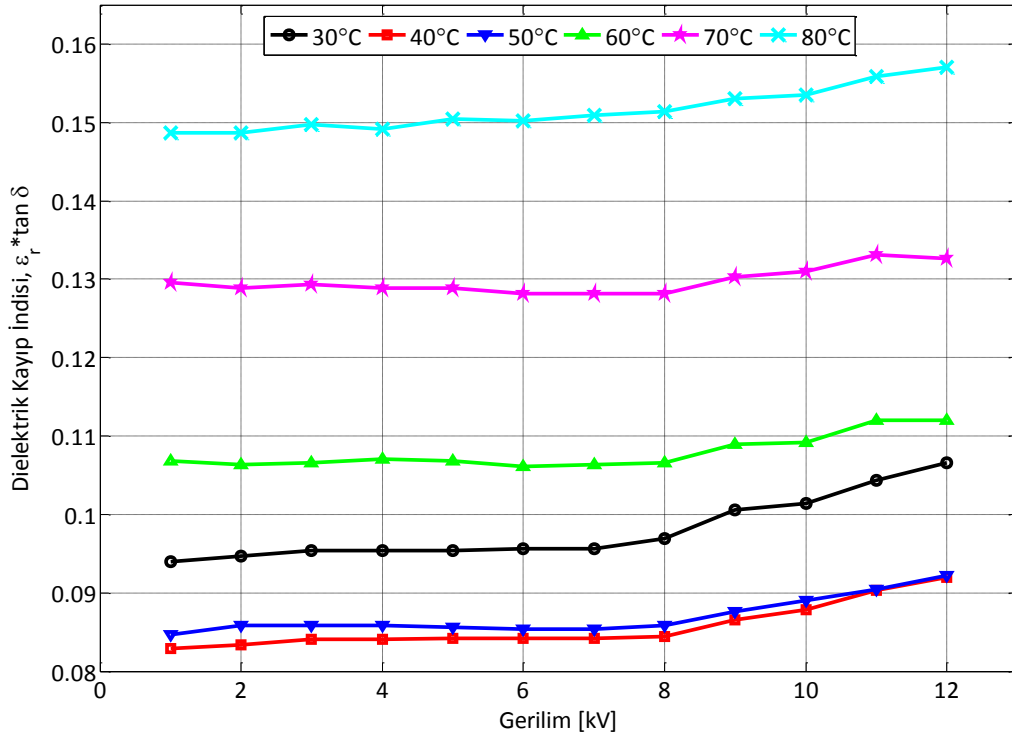
olarak verilmektedir [33]. Burada $\tan \delta$ büyüklüğü, dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen toplam aktif kaybın, dielektrik malzemenin toplam reaktif gücüne (Q_c) oranı olarak ifade edilmiştir. Bu ifade dikkate alındığında, belirli bir gerilim seviyesinden sonra $\tan \delta$ değerinin artmasının nedeni, dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen iletim kayıplarına ek olarak polarizasyon kayıplarının oluşması olarak belirtilebilir. Bu durum şöyle açıklanabilir:

Dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen toplam aktif kayıp,

$$p_k = p_R + p_P + p_i \quad (3.9)$$

ile ifade edilmektedir. Burada p_R iletim kaybı, p_P kutuplanma (polarizasyon) ve p_i kısmi boşalmaların yol açtığı iyonlaşma kaybını göstermektedir [34]. Düşük gerilim mertebelerinde dielektrik malzeme içerisinde oluşan elektrik alan değeri ve buna bağlı olarak oluşan kutuplanma ve iyonlaşma kayıpları oldukça küçüktür. Bu nedenle dielektrik kayıp faktörü ($\tan \delta$) değerinin 7 kV'a kadar baskın olmadığı ve çok az değiştiği görülmektedir ancak 7 kV'tan sonra kutuplanma ve iyonlaşma kayıplarındaki artışın toplam kaybı dolayısıyla $\tan \delta$ değerini artırdığı anlaşılmaktadır.

3.1.4 Dielektrik Kayıp İndisinin Gerilime Bağlı Değişimi



Şekil 3.8 Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan \delta$) farklı siper sıcaklıklarında gerilime bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

Dielektrik malzemeler için önemli parametrelerden biri de kayıp indisi olup kayıp indisinin gerilime bağlı değişimi incelenmiştir. Dielektrik kayıp indisi, bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r) ile dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) çarpımı olarak ifade edilmektedir. Bu parametrelerden her birinin gerilime bağlı değişimleri önemli olmakla birlikte, çarpımlarının gerilime bağlı değişimi de önemlidir. Bunun nedeni, dielektrik kayıpları etkileyen değişkenin bu iki parametrenin çarpımı olmasıdır. Dielektrik kaybı veren,

$$p_k = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad (3.10)$$

formülünde kapasite (C) parametresi yerine

$$C = C_0 \cdot \epsilon_r \quad (3.11)$$

ifadesi konulacak olursa,

$$p_k = \omega \cdot C_0 \cdot U^2 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (3.12)$$

denklemleri elde edilir. Burada, sabit frekans için sabit değeri veren $k=\omega \cdot C_0 \cdot U^2$ katsayısı ile dielektrik kaybı,

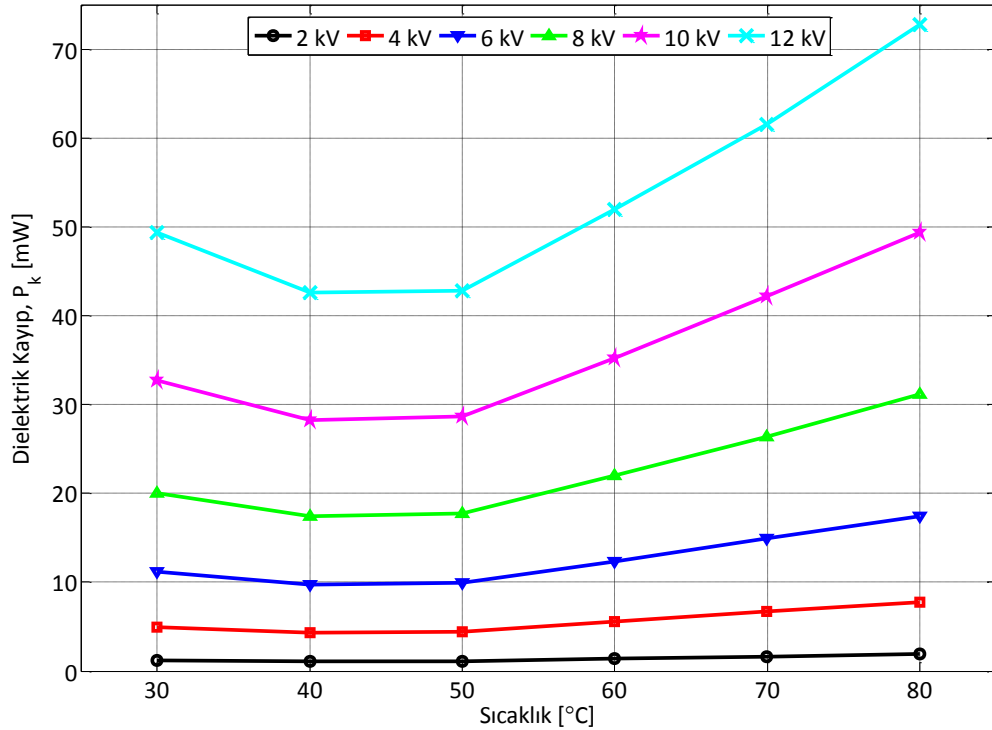
$$p_k = k \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \quad (3.13)$$

olarak ifade edilir.

Şekil 3.8’de dielektrik kayıp indisinin, farklı siper sıcaklıklarında gerilime bağlı değişimi verilmiştir. Burada da Şekil 3.7’dekine benzer olarak, yaklaşık 8 kV’a kadar dielektrik kayıp indisinin tüm sıcaklıklarda sabit kaldığı, gerilimin 8 kV’tan 12 kV’a kadar değerlerinde ise artış olduğu gözlemlenmiştir. Bağlı dielektrik katsayısı (ϵ_r) değerinin 1 kV’tan 12 kV’a kadar değişmediği düşünülürse (Şekil 3.5), dielektrik kayıp indisinin sabit frekans ve sıcaklıkta gerilime bağlı olarak $\tan \delta$ ’nın değişmesi nedeniyle değiştiği söylenebilir.

3.2 Sıcaklığa Bağlı Değişimler

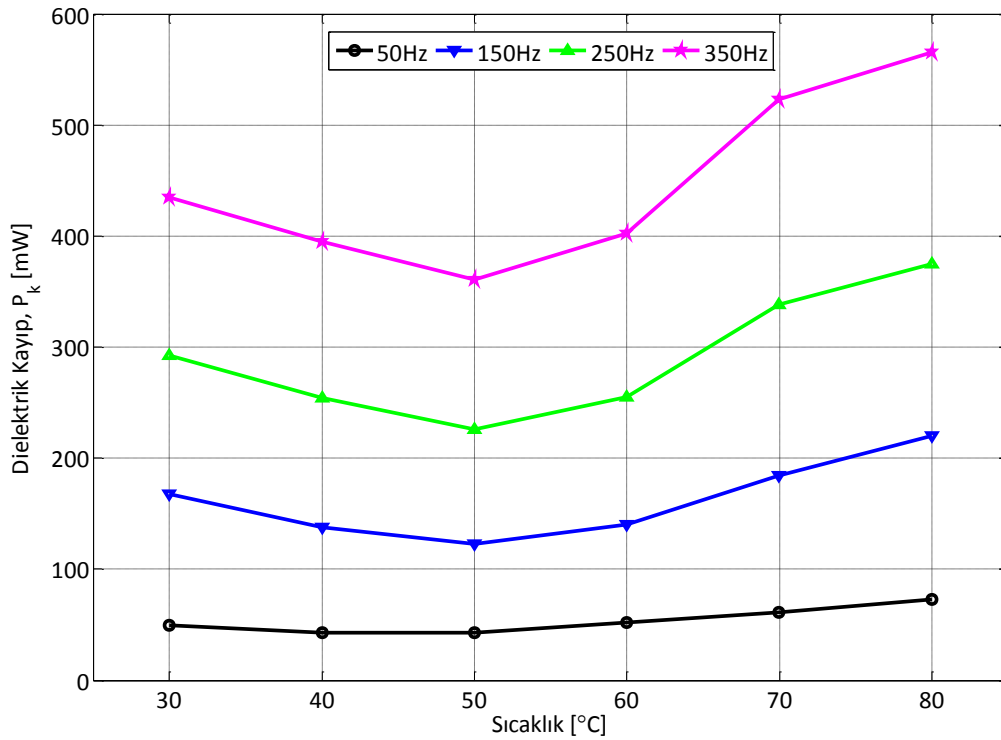
3.2.1 Dielektrik Kaybın Sıcaklığa Bağlı Değişimi



Şekil 3.9 Dielektrik kaybın (P_k) farklı gerilimlerde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

Dielektrik kaybın 50 Hz sabit frekansta ve farklı gerilimlerde sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.9’da verilmiştir. Elde edilen değerlerden, dielektrik kaybın sıcaklıkla tek yönlü değişmediği ve bu değişimin doğrusal olmadığı gözlemlenmiştir. Siper sıcaklık değeri 30°C den 50°C e kadar arttırıldığında, tüm gerilim seviyelerinde dielektrik kayıp değeri düşmektedir. Siper sıcaklığının 50°C den sonraki artışlarında ise dielektrik kayıp artış göstermektedir. Gerilim ve sıcaklığa bağlı artışın nedeni elektrik alan ve ısı enerji değeridir. Her dielektrik malzeme oda sıcaklığında belirli bir moleküler ısıl enerjiye sahiptir. Bu ısıl enerji, dielektrik malzemeye ait moleküllerin belirli bir mertebede ısıl hareket yapmasına neden olur. Malzemenin sıcaklığı arttıkça, moleküllerin ısıl enerjisi artmakta ve böylelikle serbest ısıl hareketin genliği de artmaktadır. Dielektrik malzemeye gerilim uygulandığında meydana gelen elektrik alan şiddeti, moleküllerin hareketindeki değişimi, düşük sıcaklıklarda polarizasyon nedeniyle düzgün ve sıralı durdukları duruma göre daha da artırmaktadır. Uygulanan gerilimin genliği ve

dolayısıyla dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen elektrik alan şiddetinin değeri arttıkça Şekil 3.9'dan da görüldüğü üzere dielektrik kayıpların genliğinin artmasına neden olmaktadır. Sonuç itibarıyla, dielektrik malzemenin sıcaklığının artması ile birlikte bağıl dielektrik katsayısı/kapasitesi düşmekte ve iletken-siper arasında bulunan dielektrik malzemenin ve yarı iletken tabakaların öz direnç değerleri ise artmaktadır. Bunun sonucunda, malzemenin eşdeğer empedans değeri ve dolayısıyla kayba neden olan akım değeri de değişmektedir. Bu değişim ise kayıpların belirli bir sıcaklığa kadar düşmesine ve daha sonra artmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.10 Dielektrik kaybın (P_k) farklı frekanslarda siper sıcaklığına bağlı değişimi ($U = 12$ kV)

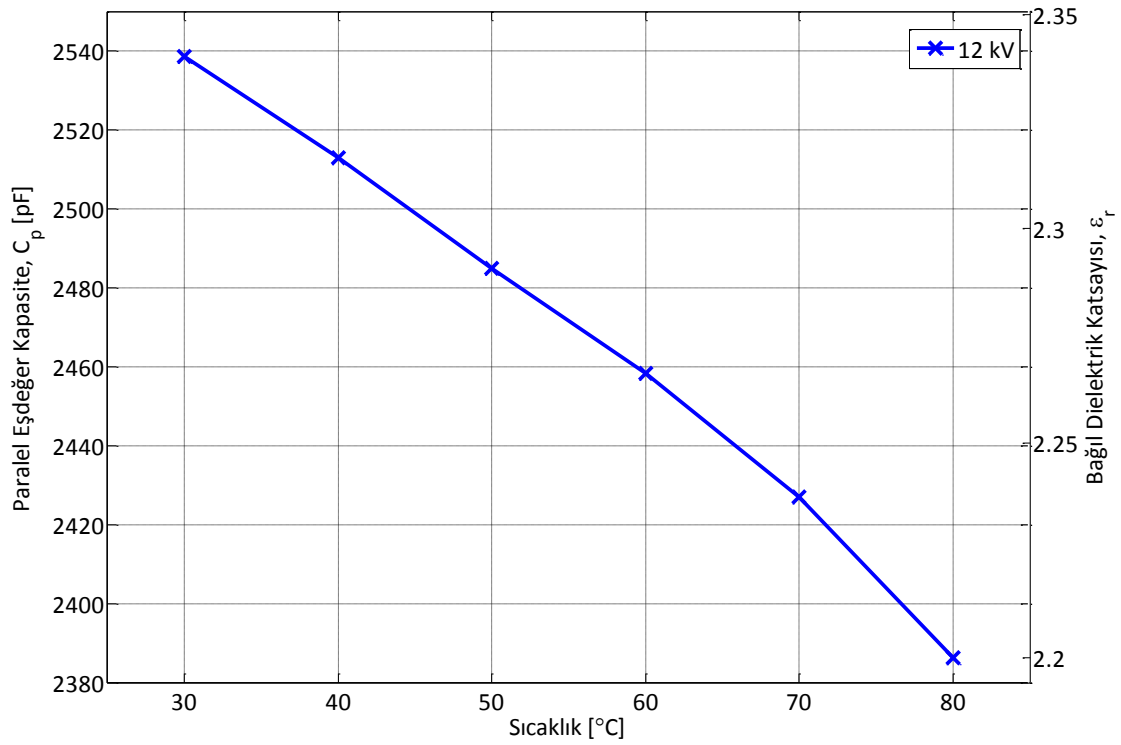
Dielektrik kaybın farklı frekanslarda (50 Hz, 150 Hz, 250 Hz ve 350 Hz) ve sabit U_0 (12 kV) gerilimde siper sıcaklığına bağlı değişimi Şekil 3.10'da verilmiştir. Elde edilen değişimler incelendiğinde dielektrik kaybın, siper sıcaklığının 30°C'den 50°C'e kadar artırılmasıyla birlikte düşüş gösterdiği ve daha sonra siper sıcaklığının 80°C'e kadar artırılmasıyla arttığı görülmektedir. Tüm frekans değerleri için en düşük dielektrik kayıp, siper sıcaklığının 50°C olduğu durumda meydana gelmiştir. Siper sıcaklığının

artmasıyla birlikte iletken-siper arasında meydana gelen kayıpların sürekli bir değişim göstermediği görülmektedir. Bunun nedeni olarak,

$$p_k = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad (3.10)$$

denklemindeki $\tan \delta$ parametresinin değişimi gösterilebilir. Şekil 3.12’den görüleceği üzere, dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) sıcaklığa bağlı değişimi de benzer karakteristik göstermektedir.

3.2.2 Bağlı Dielektrik Katsayısının/Paralel Eşdeğer Kapasitenin Sıcaklığa Bağlı Değişimi



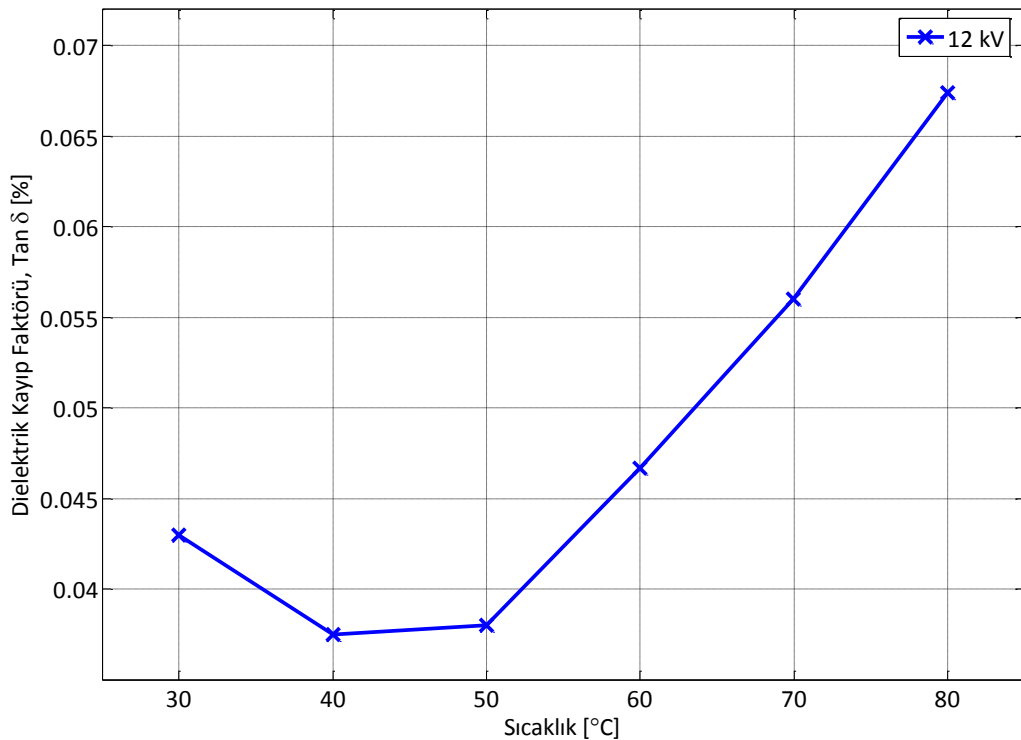
Şekil 3.11 Paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağlı dielektrik katsayısının (ϵ_r) 12 kV gerilimde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

Şekil 3.11’den görüleceği üzere bağlı dielektrik katsayısı (buna bağlı olarak paralel eşdeğer kapasite değeri) kablo siper sıcaklığının artması ile azalmaktadır. Bağlı dielektrik katsayısı 30°C de yaklaşık 2,34 değerindeyken sıcaklık arttıkça düşmektedir. 80°C sıcaklıkta ise bu değer 2,2 değerine kadar düşmektedir. Bu nedenle, artan sıcaklık ile birlikte Şekil 3.11’den de görüldüğü üzere malzemenin kapasite değerinin de azaldığı söylenebilir. 30°C sıcaklıkta 2540 pF kapasiteye sahip olan kablonun sıcaklığı

80°C e çıkarıldığında kapasite değeri %6,1 azalarak 2385 pF'a düşmüştür. Bu nedenle, artan kablo sıcaklığı ile birlikte kablonun kapasitif reaktif gücü de azalmış olacaktır. Kapasite değerindeki azalma şöyle açıklanabilir:

Dielektrik malzemeye ait moleküller belirli bir dipole sahiptir ve elektrik alana maruz kaldıkları zaman alan boyunca hareket etmeye başlarlar. Ancak, elektrik alanın olmadığı durumda da dielektrik malzemeye ait moleküller, sahip oldukları ısı enerjiden dolayı serbest hareket gerçekleştirirler. Bu nedenle elektrik alana maruz kaldıkları durumda, dipoller tam olarak alan ile aynı hizaya gelmezler ve az da olsa serbest hareketlerine devam ederler. Sıcaklık arttırıldıkça alan içerisinde bulunan moleküllerin serbest hareket genlikleri de artar ve böylelikle malzemeye ait bağıl dielektrik katsayısı da azalmış olur.

3.2.3 Dielektrik Kayıp Faktörünün Sıcaklığa Bağlı Değişimi

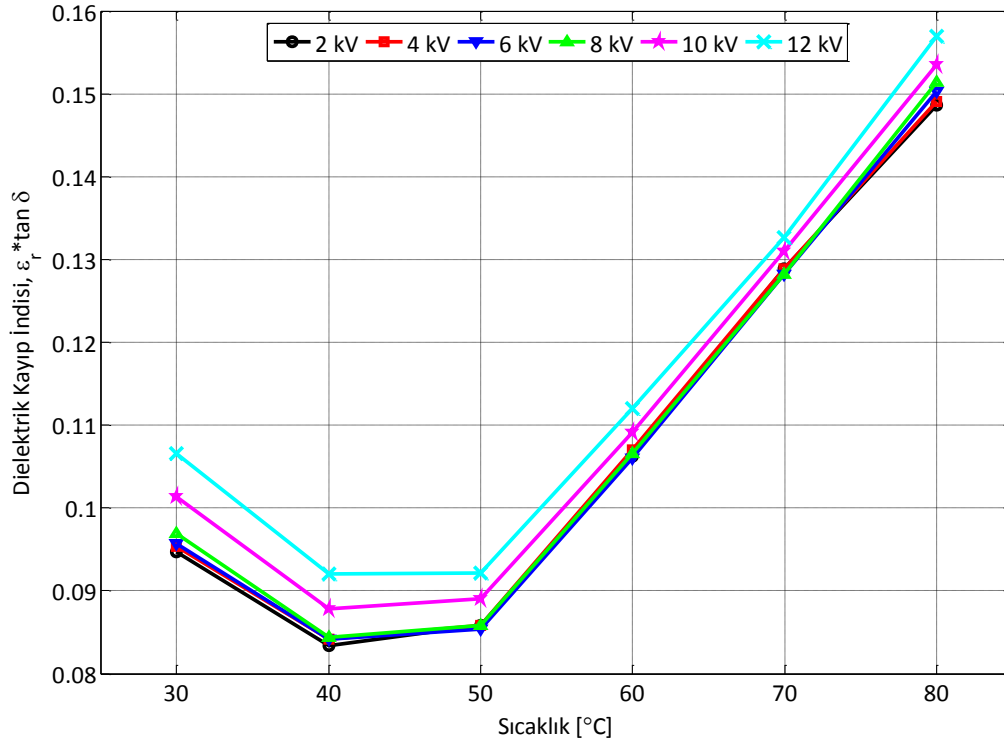


Şekil 3.12 Dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) 12 kV gerilimde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

Şekil 3.12’de frekans 50 Hz ve ölçme gerilimi 12 kV için siper sıcaklığına bağlı dielektrik kayıp faktörü değişimi verilmiştir. Burada, kablo siper sıcaklığının arttırılmasıyla birlikte

dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) değişimi görülmektedir. Bu değişim farklı frekanslar ve gerilimler altında da oldukça yakın davranış/değişim sergilediklerinden ve grafiğin daha açık bir şekilde görülebilmesi nedeniyle tek durum için çizdirilmiştir. $\tan\delta$ değerinin 30°C de % 0,043 değerinde olduğu görülmekte olup artan sıcaklık ile birlikte yaklaşık 40°C’de % 0,035 değerine kadar düşmektedir. Siper sıcaklığının 40°C ile 50°C arasında iken $\tan\delta$ değerinin az değişmesi sabit kaldığı söylenebilir, 50°C den sonraki sıcaklık değerleri için ise kablo yalıtkanına ait dielektrik kayıp faktörünün değeri hızlı bir şekilde artmaktadır. Daha önce belirtildiği üzere (3.8) ($\tan\delta$ ’nın dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen aktif kayıpların, malzemenin kapasitesinden dolayı sahip olduğu kapasitif reaktif güce oranı olarak tanımlanması nedeniyle), dielektrik kayıp içerisinde meydana gelen aktif güç kayıplarının da sıcaklıkla birlikte benzer değişim gösterdiğini söyleyebilir. Buradan, yalıtkan tabaka sıcaklığının değişiminin, aktif güç kaybı üzerinde reaktif güce göre daha etkili ve baskın olduğu ortaya çıkmaktadır. Kayıp güç ile dielektrik kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı değişimlerindeki şekil benzerliği de bu nedenden kaynaklanmaktadır.

3.2.4 Dielektrik Kayıp İndisinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi



Şekil 3.13 Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan \delta$) farklı gerilimlerde siper sıcaklığına bağlı değişimi ($f = 50$ Hz)

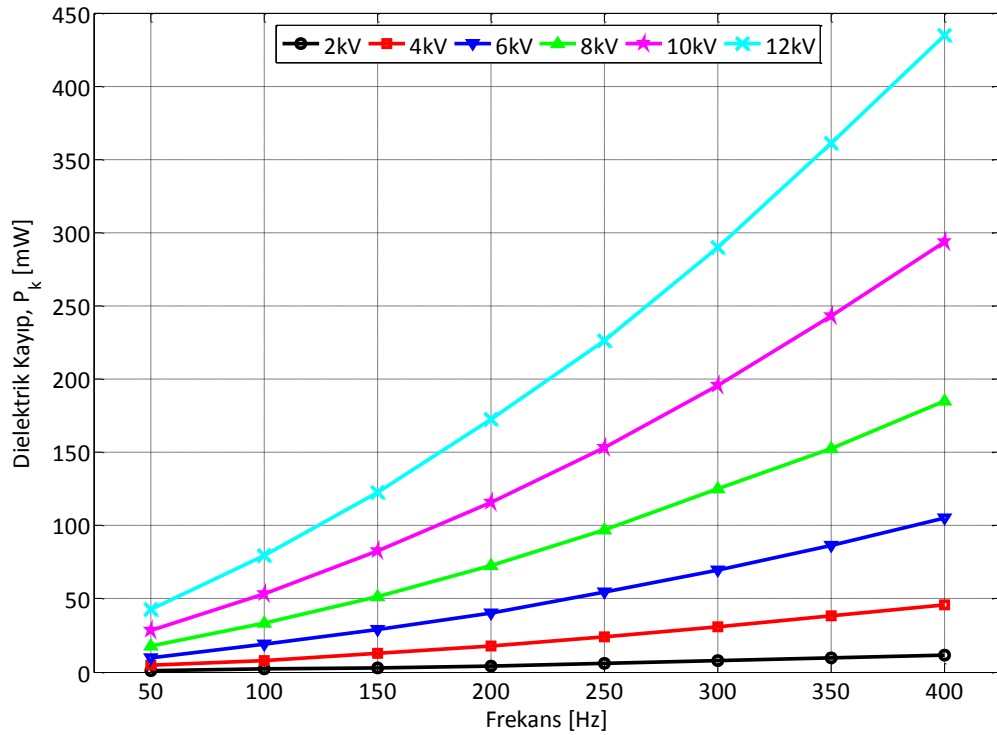
Bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r) ile dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) çarpımının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.13’de verilmiştir. Daha önceki ölçümlerden (Şekil 3.11, 3.12) 30°C ile 40°C arasında hem bağıl dielektrik katsayısının hem $\tan \delta$ değerinin düştüğü bilinmektedir. Bu nedenle, 30°C ile 40°C arasında bu aralıkta bu iki parametrenin çarpımı da azalma göstermektedir. 40°C ile 50°C arasında $\tan \delta$ değerinin sabit kaldığı ancak siper sıcaklığının 50°C sonra ise sürekli olarak arttığı bilinmektedir. Buna karşın, bağıl dielektrik kayıp katsayısının 30°C den 80°C e kadar azaldığı bilinmektedir. Şekil 3.13’e bakıldığında, dielektrik kayıp indisindeki değişimin $\tan \delta$ ile benzer olduğu görülmektedir. Bu durum, $\tan \delta$ parametresinin sıcaklığa bağlı değişim yüzdesinin, bağıl dielektrik katsayısınıninkine göre daha baskın olduğunu göstermektedir. 30°C ve 80°C sıcaklık aralığında $\tan \delta$ ile bağıl dielektrik katsayısındaki değişim yüzdeleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 12 kV gerilim 50 Hz frekansta $\tan\delta$, ϵ_r ve dielektrik kayıp indisinin 30 °C deki değerlere göre bağlı değişimleri

Siper Sıcaklığı [°C]	$\tan\delta / \tan\delta_{30^\circ\text{C}}$	$\epsilon_r / \epsilon_{r-30^\circ\text{C}}$	$\epsilon_r \cdot \tan\delta / \epsilon_{r-30^\circ\text{C}} \cdot \tan\delta_{30^\circ\text{C}}$
30	1	1	1
40	0,8721	0,9899	0,8633
50	0,8837	0,9788	0,8650
60	1,0860	0,9684	1,0517
70	1,3023	0,9560	1,2451
80	1,5674	0,9400	1,4733

3.3 Frekansa Bağlı Değişimler

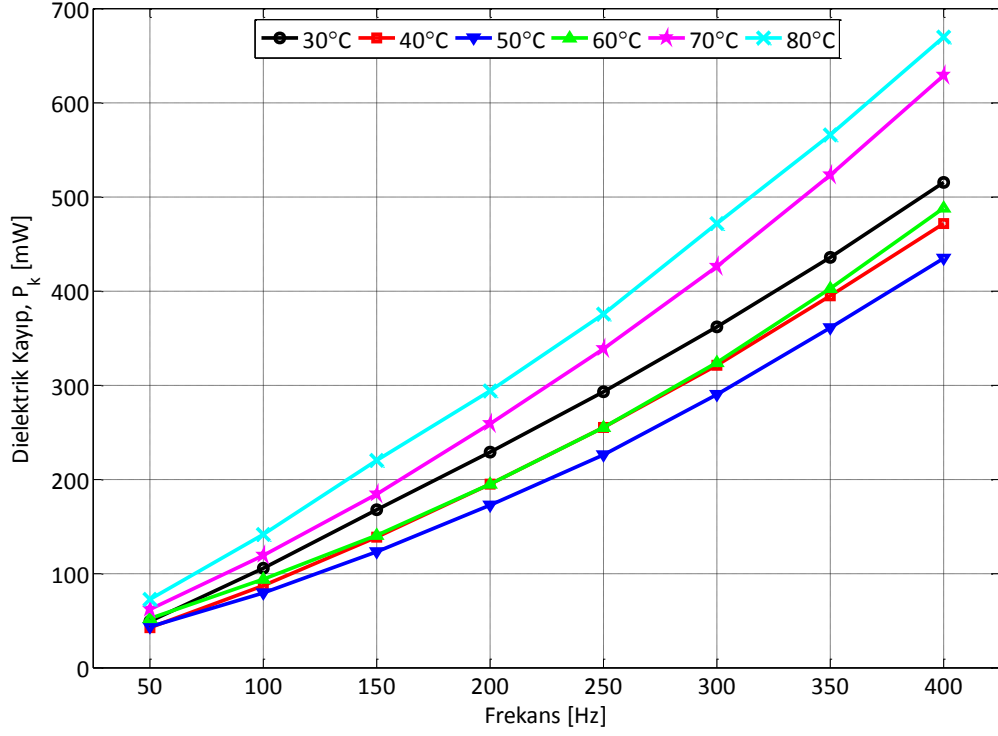
3.3.1 Dielektrik Kaybın Frekansa Bağlı Değişimi



Şekil 3.14 Dielektrik kaybın (P_k) farklı gerilimlerde frekansa bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$)

Dielektrik kaybın, 50°C sabit sıcaklık ve farklı gerilim değerlerindeki ölçümler için frekansa bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 3.15’de verilmiştir. Bir önceki incelemede açıklandığı üzere, uygulanan gerilimin frekansı arttırıldıkça dielektrik kayıp artmaktadır. Burada, sabit frekanstaki gerilim artışından (kaynaklanan karesel artıştan) farklı olarak frekansın artması ile dielektrik malzeme üzerindeki kayıpların artışı görülmektedir. Frekansa artışına bağlı olarak doğrusala yakın biçimde artan dielektrik kayıplardaki artışın iki nedeni vardır:

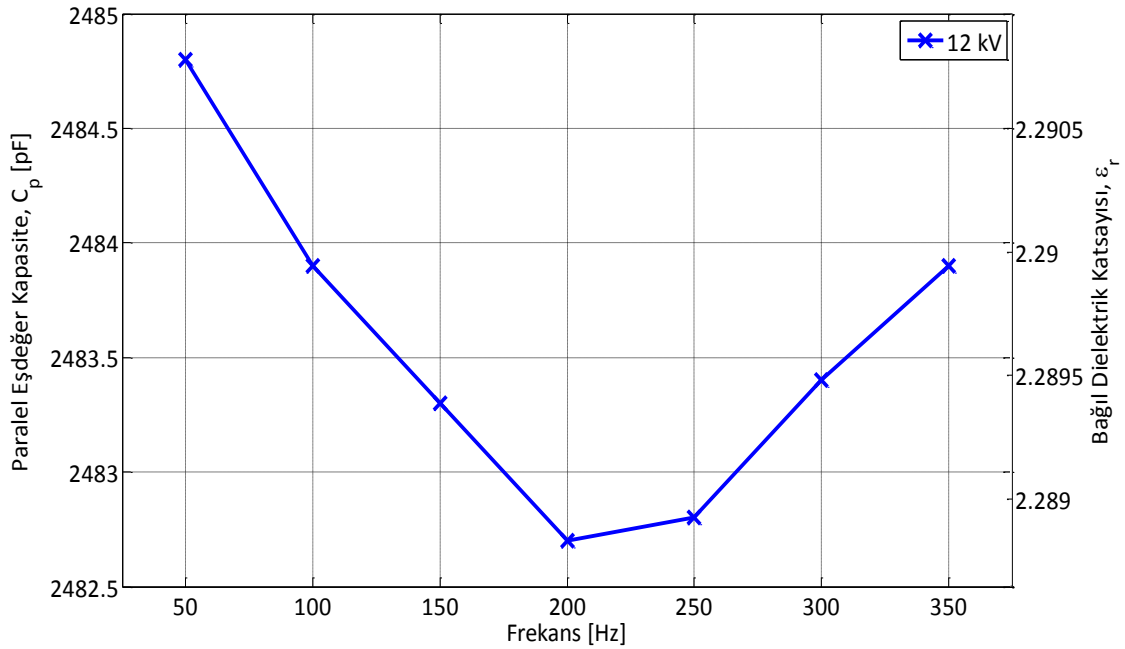
- Artan frekansla birlikte, dielektrik malzemenin kapasitif reaktans değeri düşmekte ve buna bağlı olarak, dielektrik malzemenin eşdeğer empedansı azalmaktadır. Bu nedenle, gerilim sabitken frekans arttırıldığında malzeme üzerinden daha fazla akım geçmekte ve meydana gelen dielektrik kayıp değeri de artmaktadır.
- Sabit gerilimde frekansın artmasıyla birlikte, dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen polarizasyon kayıpları da artış göstermektedir. (Frekans arttırıldıkça, atomik ve moleküler bazda elektrik alan nedeniyle meydana gelen titreşim hareketleri de artış göstermektedir ancak frekansın arttırılmasında baskın olan kayıp, ilettime bağlı kayıplardır.



Şekil 3.15 Dielektrik kaybın (P_k) farklı siper sıcaklıklarında frekansa bağlı değişimi ($U = 12$ kV)

Şekil 3.16’da farklı siper sıcaklıklarında ölçülen dielektrik kaybın frekansa bağlı değişimi görülmektedir. Bu değişime göre, frekansın 50 Hz den 400 Hz’e kadar arttırılması ile dielektrik kayıplarda artış meydana gelmektedir. Farklı sıcaklık seviyelerinde yapılan ölçümde 30°C’den 50°C’ye kadar dielektrik kayıpların frekansla arttığı ancak sıcaklıkların birbirine (örneğin 40°C’deki kaybın 30’dekine) göre azalma olduğu görülmekle birlikte, 50 °C’den sonraki sıcaklıklarda ise arttığı gözlemlenmiştir. Frekansın artmasıyla birlikte kayıptaki artışın nedeni, iletken - siper üzerinde geçen akımın artması ve buna bağlı olarak bu iki katman arasında bulunan yalıtıkanda ve iç-dış yarı iletken ekranda meydana gelen iletim kayıplarının da artışı ve ek olarak, tüm bu tabakalar içerisinde frekansa bağlı polarizasyon kayıplarının da meydana gelmesidir.

3.3.2 Bağıl Dielektrik Katsayısının/Paralel Eşdeğer Kapasitenin Frekansa Bağlı Değişimi

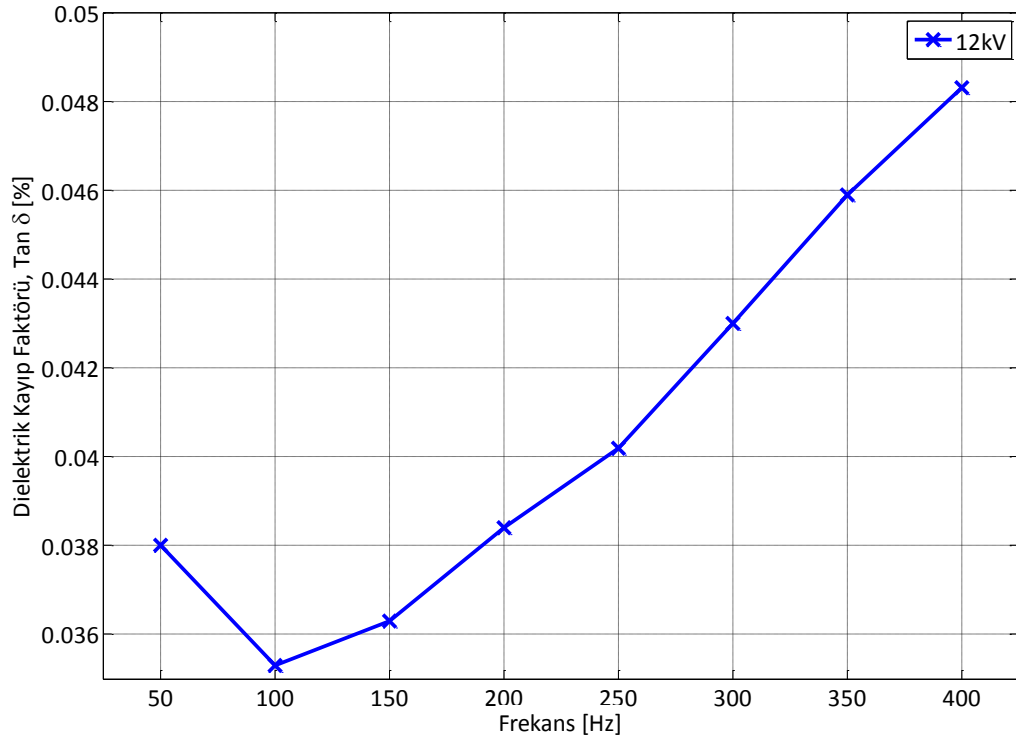


Şekil 3.16 Paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağıl dielektrik katsayısının (ϵ_r) 12 kV gerilimde frekansa bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$)

Bir önceki ölçümlerden elde edilen kayıp faktörünün belirli frekanslarda azalması ve sonrasında artmasını irdellemek için paralel eşdeğer kapasitenin (bağıl dielektrik katsayısının) frekans ile değişimi ölçülmüştür. Şekil 3.17’de paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) ve bağıl dielektrik katsayısının (ϵ_r) U_0 geriliminde (12 kV) ve 50°C siper sıcaklığında frekansa bağlı değişimi verilmiştir. 50 Hz de yapılan ölçümde malzemenin kapasite değeri 2484,8 pF olarak ölçülmüştür. Frekansın arttırılmasıyla kablo kapasitesinde 200 Hz frekansa kadar düşüş meydana gelmektedir. 200 Hz frekansta ölçülen kablo kapasitesi değeri 2482,7 pF değerindedir. Frekansın 50 Hz den 200 Hz’e kadar arttırılmasıyla kablo kapasitesinde % 0,9’luk bir azalma meydana gelmiştir. Frekans 200 Hz’den 350 Hz’e kadar arttırıldığında ise kablo kapasitesi yaklaşık olarak % 0,05 artmaktadır. Belirli bir frekans değerinde (200 Hz) meydana gelen bu değişimin nedeni, dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen polarizasyon hareketlerinin frekans cevaplarının farklı olmasıdır. Sıcaklık ve frekansta meydana gelen değişimler, dielektrik malzemenin bağıl dielektrik katsayısını benzer şekilde değiştirmektedirler. Bu değişim, sıcaklık değişiminde daha baskınken frekans değişiminde daha zayıftır. Frekans

bandının daha yüksek tutulduğu durumlarda, bu benzerlik daha net bir şekilde görülebilmektedir. İncelenen frekans aralığında (50Hz-350Hz) meydana gelen bağıl değişimlere bakıldığında, uygulanan gerilimin frekansındaki değişimin eşdeğer kapasite (C_p) ve bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r) üzerindeki etkisinin zayıf olduğu söylenebilir.

3.3.3 Dielektrik Kayıp Faktörünün Frekansa Bağlı Değişimi

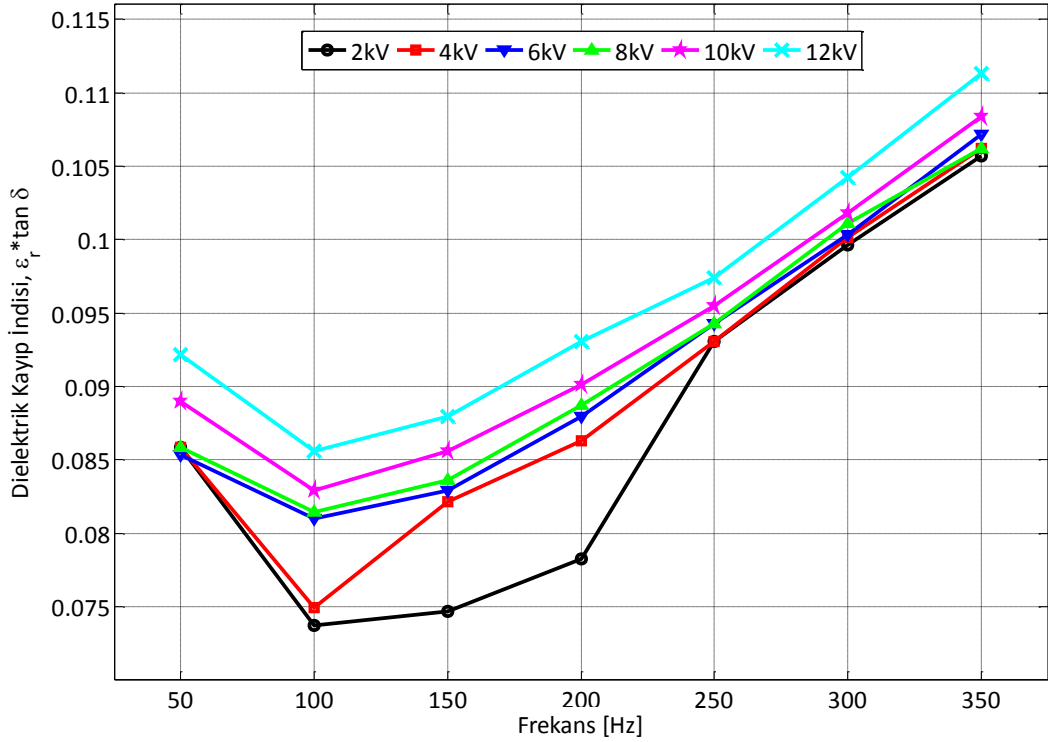


Şekil 3.17 Dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) 12 kV gerilimde frekansa bağılı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$)

Dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) frekansa bağılı değişimi Şekil 3.18’de verilmiştir. 12 kV gerilim ve 50°C siper sıcaklığında yapılan ölçümler sonucunda, frekansın 50 Hz’den 100 Hz’e arttırılmasıyla dielektrik kayıp faktörünün %0,038 den %0,035 değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. 100 Hz den sonraki frekanslarda ise $\tan\delta$ değerinin 400 Hz e kadar doğrusala yakın bir şekilde arttığı görülmektedir. Değişim grafiğine genel olarak bakıldığında, $\tan\delta$ parametresinin frekans artışıyla birlikte doğrusal değişmediği belirlenmiştir. Literatürde $\tan\delta$ ’a ait iki adet (paralel ve seri) eşdeğer devre modeli verilmiştir. Paralel devreye göre frekans artışıyla birlikte $\tan\delta$ artmakta, seri devreye göre ise azalmaktadır. Burada, $\tan\delta$ değerinde belirli bir frekansa kadar meydana gelen azalma ve daha sonrasında meydana gelen artış eşdeğer devrenin (frekans değeriyle

farklı değerlere karşılık olan) daha farklı bir yapıda olduğunun göstergesidir. Bu değişimi ortaya koyabilmek için paralel eşdeğer kapasitenin (bağıl dielektrik katsayısının) değişiminin irdelenmesi gerekmektedir.

3.3.4 Dielektrik Kayıp İndisinin Frekansa Bağlı Değişimi

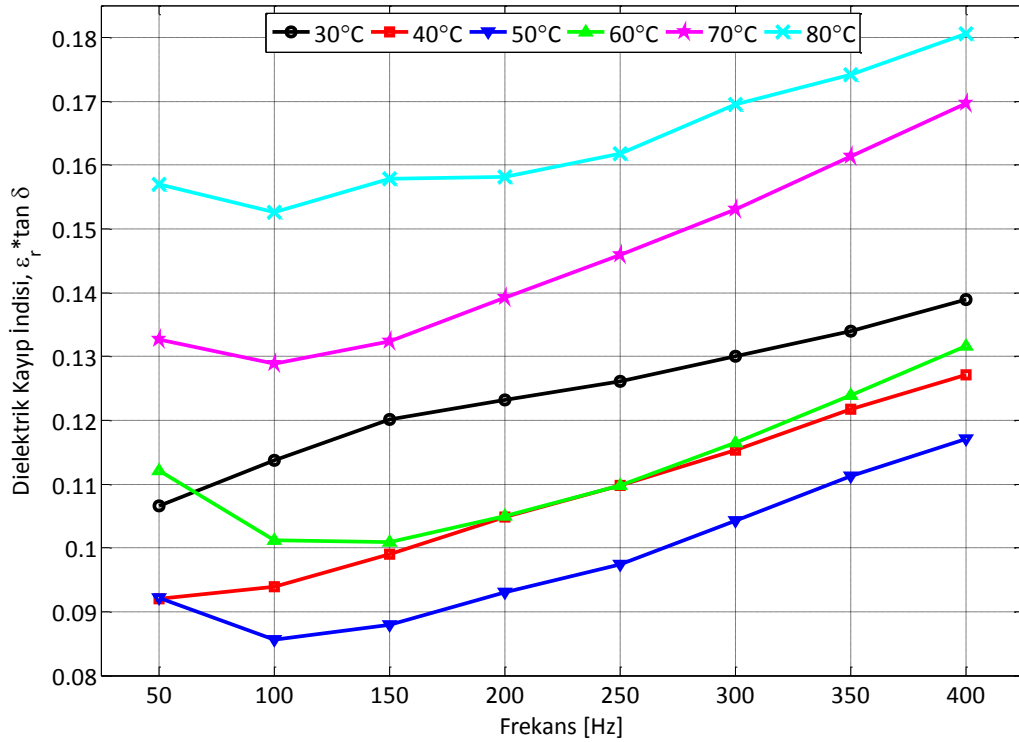


Şekil 3.18 Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan \delta$) farklı gerilimlerde frekansa bağlı değişimi ($T = 50^\circ\text{C}$)

Frekans değişimi ile birlikte dielektrik kayıp indisinde meydana gelen değişimler Şekil 3.19’da siper sıcaklığı 50°C ve farklı gerilim seviyeleri (2, 4, 6, 8, 10, 12 kV) için verilmiştir. Yapılan ölçümde, gerilim seviyesinin artmasıyla birlikte dielektrik kayıp indisinde de artış olduğu görülmektedir. İncelenen gerilim seviyeleri arasında, 2 kV için 50 Hz - 250 Hz frekans aralığında elde edilen ölçüm sonuçlarının diğerlerinden farklılık göstermesinin nedeni, düşük frekans ve düşük gerilim seviyesinden dolayı dielektrik malzeme üzerinden akan akımın da düşük olması ve bu nedenle ölçüm hassasiyetinin diğerlerine göre düşük kalmasıdır.

Verilen gerilim seviyelerinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen dielektrik kayıp indisinin, 50 Hz frekanstan 100 Hz frekansa kadar azaldığı ve ardından 350 Hz’e kadar

artış sergilediği görülmektedir. Şekil 3.18'deki $\tan\delta$ 'nın frekansa bağlı değişimi ve Şekil 3.17'de ϵ_r 'nin frekansa bağlı değişimi incelendiğinde, bu ölçümde elde edilen kayıp indisi değişiminin $\tan\delta$ değişimine benzerliği nedeniyle, dielektrik kayıp indisi üzerinde etkin olan parametrenin $\tan\delta$ olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.19 Dielektrik kayıp indisinin ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$) farklı siper sıcaklıklarında frekansa bağlı değişimi ($U = 12$ kV)

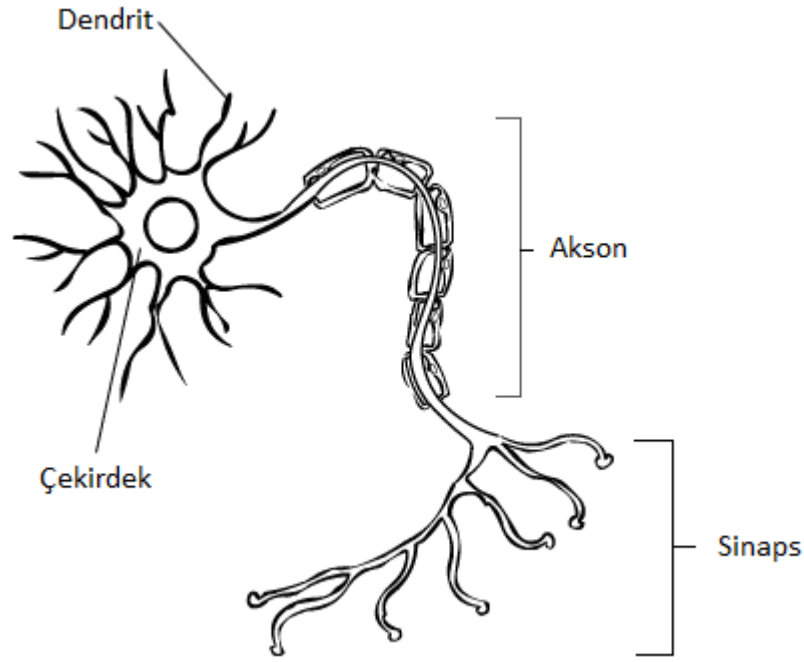
Dielektrik kayıp indisinin U_0 (12 kV) gerilimde ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$) farklı siper sıcaklıkları için frekansa bağlı (50-400 Hz) değişimi Şekil 3.20'de verilmiştir. Tüm sıcaklık değerlerine bakıldığında, 100 Hz frekansta ölçülen değerlerin 50 Hz frekanstakilere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Yalnızca 30°C siper sıcaklığında yapılan ölçümlerde 100 Hz'de ölçülen dielektrik kayıp indisi değerinin 50 Hz'deki değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, en düşük frekans (50 Hz) ve en düşük sıcaklıktaki (30°C) ölçüm hassasiyetinin düşük olmasıdır. Frekansın 100 Hz'den 400 Hz'e arttırılması ile dielektrik kayıp indisi değerinde doğrusal bir artış gözlemlenmektedir. Daha önce Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de verilen $\tan\delta$ ve ϵ_r değişimlerine bakıldığında dielektrik kayıp indisinde ($\epsilon_r \cdot \tan\delta$) etkin olan parametrenin dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$) olduğu görülmektedir.

YAPAY SİNİR AĞI UYGULAMASI

4.1 Yapay Sinir Ağlarına Giriş

Yapay sinir ağları (YSA), fiziksel problemlerin insan beyninin çalışma sistemine yakın bir yöntem ile çözümlenmesi hedefiyle ortaya çıkan matematiksel bir yöntemdir. YSA ile ilgili ilk araştırma çalışmaları, 20. yy'ın ilk yarısında, insan beyninde gerçekleştirilen hesaplama ya da problem çözüm yöntemlerinin dijital bilgisayarların kullandığı alışlagelmiş yöntemlerden farklı olduğunun fark edilmesi sonucu başlamıştır [35]. İlk yapay sinir ağı modeli 1943 yılında, nöroloji uzmanı doktor Warren McCulloch ile matematikçi Walter Pitts tarafından, bir elektrik devresi kurularak gerçekleştirilmiştir [36]. Günümüzde ise bilgisayarlar ve geliştirilen yazılımlar sayesinde pek çok farklı problemin çözümünde, fizik, matematik, elektrik ve bilgisayar mühendisliği alanlarında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Özellikle bilişim alanında verilerin hızlı bir şekilde tanımlanması, algılanması ve sınıflandırılması için YSA kullanılmakta olup farklı mühendislik alanlarında da önemli ölçüde tercih edilmektedir. Bunun nedeni ise, teorik yöntemler ile çözülmesi zor olan problemler ve modellemeler için etkin bir çözüm alternatifi oluşturmastır.

YSA, biyolojik sinir ağlarının bir modellemesi olduğu için, öncelikle biyolojik sinir sisteminin yapısının incelenmesi gerekir. Biyolojik sinir sisteminin temel yapı taşı olan nöronların yapısı dört ana bölümden oluşmaktadır:



Şekil 4.1 Yapay sinir hücresinin yapısı

Dendrit: Dendritler, sinir hücresinin ucunda bulunan ve ağaç kökü görünümüne sahip bir yapıya sahip olup görevleri bağlı olduğu diğer nöronlardan veya duyu organlarından gelen sinyalleri çekirdeğe iletmektir.

Çekirdek: Dendrit tarafından gelen sinyalleri bir araya toplayan ve aksona ileten bölümdür.

Akson: Nöronlar arasındaki bağlantıyı sağlayan ve dendritten gelen sinyallerin iletilmesini sağlayan bölümdür.

Sinaps: Aksonlar tarafından getirilen çıkış işaretini diğer nöronlara ileten bölümdür.

Şekil 4.1’de gösterilen sinir hücresi yapısında bir bilginin aktarımı şu şekilde olmaktadır. Dendritlere ulaşan bilgilerin toplanmasının ardından bu bilgi aksonlar yardımıyla sinir hücresinin sonundaki sinapslara ya da bir sonraki sinir hücresine iletilir. Sinir darbeleri aksonlar üzerinden geçerken yapısındaki kimyasalların uyarılmasına ve sinapslara boşalmasına neden olur. Bu sinyal, dendritler tarafından toplanarak çekirdeğe iletilir. Nöronun dendritlerine gelen sinyaller birbirlerine entegre olarak ya da toplanmak suretiyle çekirdeğe iletilmektedir. Çekirdek ise alınan sinyalin belirli bir eşik değeri üzerinde olup olmadığını kontrol eder. Eğer gelen sinyal eşik değerinin üzerinde ise bir sonraki sinir hücresine iletilir. Bu durum, sinir hücresinin uyarıldığı anlamına

gelmektedir. Sinyalin, eşik değerinin altında olması durumunda ise bilgi daha ileri taşınmaz ve bu durumda sinir hücresi pasif bırakılmış olur. Sinir hücreleri arasındaki bağlantı yapılarının birbirleri ile uyumlu olması nedeniyle belirtilen bağlantılar çok daha büyük ve karmaşık yapıda olabilmektedir [37].

YSA da sinir hücresinin çalışma şekline benzeyen bir yapının oluşturulması amaçlanmıştır. Ancak insan beynindeki sinir hücrelerinin çok daha karmaşık ve büyük bir yapıda olması ve günümüzdeki teknolojik imkânların bu ölçekte bir sistemi modellemede yetersiz kalmaları nedeniyle, YSA modellenirken pek çok basitleştirmeler yapılmıştır [35], [38].

4.1.1 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

YSA, kullanılan ağ modelleri çok sayıda ve farklı karakteristik özelliklere sahip olmalarına rağmen temelde bazı ortak özelliklere sahiptirler [35]. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- YSA'ların tümü pek çok tekil hücreden meydana gelmektedir ve bu hücreler eş zamanlı olarak çalışıp karmaşık fonksiyonları yerine getirmektedir.
- Çalışma süresince hücrelerden birinin işlevini yitirmesi durumunda ağ çalışmasına devam edebilmektedir.
- Ağ yapısı içerisinde non-lineer işlem birimleri bulunması nedeniyle non-lineer problemlerin çözümünü gerçekleştirebilmektedir.
- YSA'nda bilgilerin tamamı, geleneksel programlamadan farklı olarak (veri tabanları ve dosyalar) ağ içerisinde saklanır. Bu nedenle, dağıtık bir belleğe sahiptirler. Hücrelerin bağlantı ve ağırlık mertebeleri ağın bilgisini göstermektedir.
- Öğrenme sürecinde örnek verilere ihtiyaç duyarlar. Ağın eğitilebilmesi için eğitim veri kümesinin ve bu verilere karşılık gelen çıktıların ağa tanıtılması gerekmektedir. Ağın başarılı bir şekilde çalışabilmesi için örneklerin kümesinin doğru bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir.
- Eğitilen ağ, tanıtılan eğitim veri kümesinin dışındaki girdiler için de sonuç üretebilir. Ağa tanıtılan eğitim veri kümesi için gerçekleştirilen genellemeler ya da fonksiyonlar, yeni veri kümeleri için de kullanılabilir.
- Algılama, örüntü ilişkilendirme ve sınıflandırma yapabilme kabiliyetine sahiptirler.

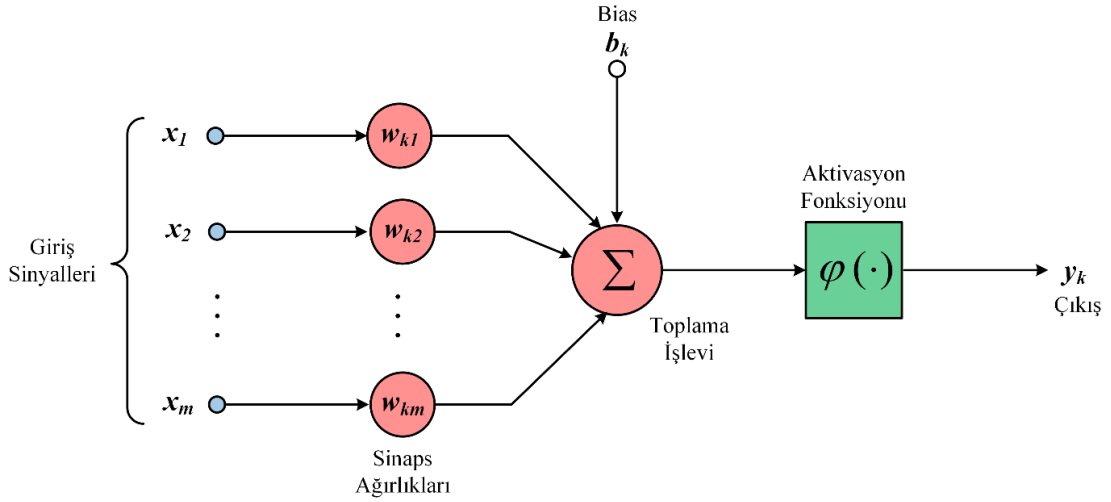
- Ağa eksik bilgiler içeren örüntüler verildiğinde, eksik bilgileri tamamlayabilirler.
- Eksik ya da yetersiz veri ile çalışabilirler. Geleneksel sistemlerin aksine, eğitildikten sonra veriler eksik bilgi içerseler bile YSA çıktı üretebilir, bu durumda ağın performansında meydana gelecek olan kayıp, eksik verinin önem derecesine bağlıdır.

Yukarıda belirtilen özelliklerin yanı sıra YSA, diğer geleneksel sistemlere göre birtakım dezavantajlara sahiptir. Bunları şöyle sıralayabiliriz:

- YSA'nın en önemli özelliklerinden biri olan paralel işlem yapabilme yetenekleri sebebiyle, paralel işlem yapabilen bir işlemciye ya da donanıma bağımlıdır.
- Çözümlenecek problem için gerekli olan uygun ağ yapısının belirlenmesi için belirli bir kural yoktur. Çözüm için en uygun ağ yapısı, deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmektedir.
- Ağ yapısının seçilmesinin ardından ağa ait parametrelerin (öğrenme katsayısı, hücre/katman sayısı, vb.) belirlenmesinde de belirli bir kural yoktur. Benzer ya da farklı problemlerin çözümü için seçilen parametreler de farklılık gösterebilir.
- YSA sayısal bilgiler ile çalışan alt birimler içerdikleri için öğrenilecek problemin ağa tanıtılabilmesi için eğitim veri kümesinin de sayısal değerlere çevrilmesi gerekmektedir.
- Eğitim işleminin ne zaman sonlandırılacağına ilişkin belirli bir kural yoktur. Genel olarak, ağ çıktıları belirli bir hata değerinin altına indiğinde eğitim işlemi sonlandırılmaktadır. Optimum eğitim süresinin belirlenebilmesi için günümüzde araştırma çalışmaları yapılmaktadır.
- YSA'nın en önemli dezavantajı, bir problem için üretilen çözümün nasıl ve neden olduğuna ilişkin bir cevabının olmamasıdır. Ağın davranışlarının açıklanamaması, ağa olan güveni azaltıcı bir unsur olarak görülmektedir.

4.1.2 Yapay Sinir Hücresi Yapısı

Bir yapay sinir hücresi (nöron), yapay sinir ağı içerisinde bilgi işlemi gerçekleştiren en temel yapıdır [39]. Şekil 4.2'de yapay sinir ağlarının tasarımında kullanılan bir nöron modeli verilmiştir.



Şekil 4.2 Non-lineer yapay sinir hücresi modeli

Yapay sinir hücresinin üç temel bileşeninden bahsedilebilir.

- I. Sinaps ve Bağlantılar: Şekil 4.2’de verilen yapay sinir hücresi, her birinin kendi ağırlığının olduğu sinapslar ve bağlantılardan oluşmaktadır. Burada x_j parametreleri giriş sinyallerini, w_j parametreleri ise sinaps ağırlıklarını belirtmektedir. Beyin sinir hücrelerinin aksine, yapay sinir hücrelerinin sinaps ağırlıkları pozitif değerler alabildiği gibi negatif değerler de alabilmektedir.
- II. Toplama Operatörü: Kendi ağırlıkları ile çarpılan giriş sinyallerini toplayan bir toplama operatörü bulunmaktadır. Bu operatör, doğrusal birleşim (linear combiner) görevini görmektedir.
- III. Aktivasyon Fonksiyonu: Aktivasyon (uyarma) fonksiyonu (activation function) yapay sinir hücresi çıkışının genliğini sınırlandırmaktadır. Bu fonksiyonun bir diğer tanımı da sıkıştırma fonksiyonudur (squashing function). Çıkış sinyalinin genliğini, izin verilen maksimum ya da minimum bir sonlu değerle sınırlandırmaktadır.

Şekil 4.2’de verilen YSH modelinde ayrıca dışardan uygulanan ve b_k ile belirtilen bir “bias” değeri bulunmaktadır. Bias değerinin görevi aktivasyon fonksiyonun net giriş değerini pozitif ve negatif olmasına bağlı olarak düşürmek yada yükseltmektir. Şekil 4.2’de verilen k nöronu aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmaktadır:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j \quad (4.1)$$

ve

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (4.2)$$

Burada, $x_1, x_2, \dots, x_m$ "k" nöronunun giriş sinyallerini, $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ ise sinaps ağırlıklarını göstermektedir. u_k , giriş sinyallerine göre üretilen toplama fonksiyonun çıkış değeri olup b_k değeri bias olarak adlandırılmaktadır. $\varphi(\cdot)$, aktivasyon fonksiyonunu y_k ise YSH'nin çıkış sinyalini belirtmektedir [36].

$$v_k = u_k + b_k \quad (4.3)$$

4.1.3 Aktivasyon Fonksiyonları

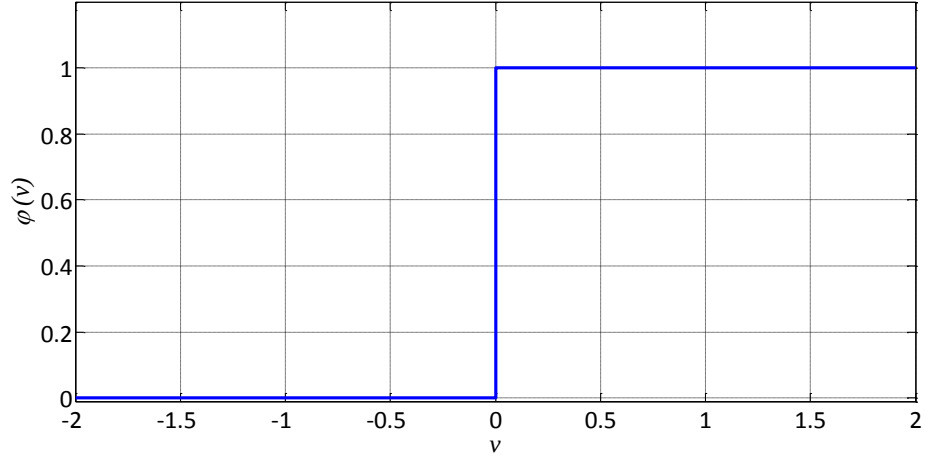
Aktivasyon fonksiyonlarının görevi, toplama operatörünün çıkışında üretilen sinyali (v_k) belirli bir biçimde işleyerek bu sinyale karşılık gelen çıktıyı (y_k) üretmektir. Aynı zamanda, bu sinyalin belirlenen alt ve üst sınır değerleri aşması durumunda da sınırlandırma yapmaktadır. Aktivasyon fonksiyonlarının normalleştirilmiş çıkış aralıkları genellikle $[0, 1]$ ve $[-1, 1]$ olmaktadır.

Literatürde üç temel aktivasyon fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar;

- Basamak aktivasyon fonksiyonu,
- Lineer aktivasyon fonksiyonu,
- Sigmoid aktivasyon fonksiyonudur.

4.1.3.1 Basamak (Threshold) Aktivasyon Fonksiyonu

Basamak aktivasyon fonksiyonuna ait değişim Şekil 4.3'de verilmiştir. Mühendislik literatüründe iyonosfer fonksiyonu (heaviside function) olarak da tanımlanan bu fonksiyon, giriş sinyalinin eşik değerinin altında olması durumunda sıfır, üzerinde olması durumunda ise bir olacak şekilde davranmaktadır.



Şekil 4.3 Basamak aktivasyon fonksiyonu

Bir k adlı YSH'e ait basamak aktivasyon fonksiyonunun matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

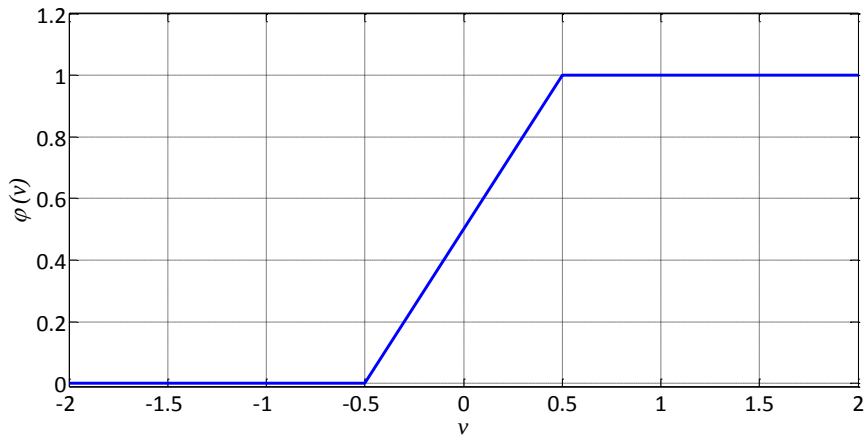
$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j + b_k \quad (4.4)$$

$$v_k \geq 0 \quad \text{ise} \quad \varphi(v_k) = 1 \quad (4.5)$$

$$v_k \leq 0 \quad \text{ise} \quad \varphi(v_k) = 0 \quad (4.6)$$

4.1.3.2 Doğrusal (Piecewise-Linear) Aktivasyon Fonksiyonu

Doğrusal aktivasyon fonksiyonu, Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi aktivasyon fonksiyonunun giriş ve çıkışı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.



Şekil 4.4 Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu

Doğrusal aktivasyon fonksiyonu,

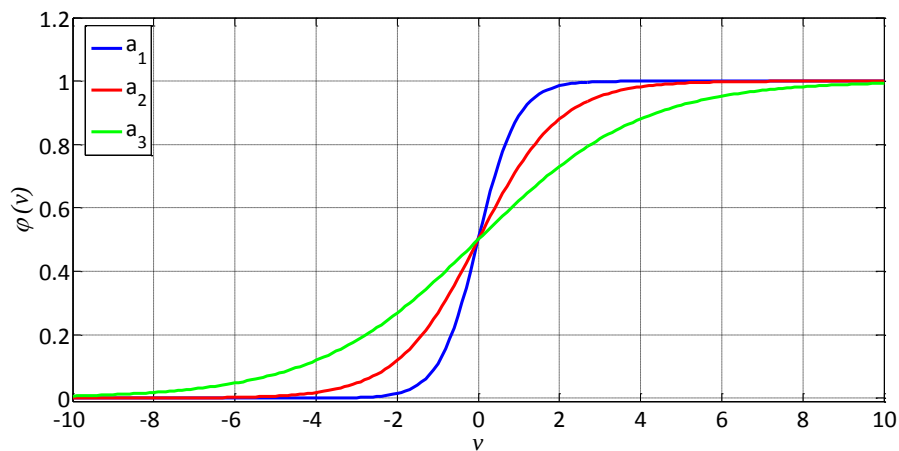
$$\left. \begin{array}{ll} v_k \geq +\frac{1}{2} & \text{ise } \varphi(v)=1 \\ +\frac{1}{2} > v_k > -\frac{1}{2} & \text{ise } \varphi(v)=v \\ v_k \leq -\frac{1}{2} & \text{ise } \varphi(v)=1 \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Aktivasyon fonksiyon modeli, genellikle basit ya da doğrusal problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Ayrıca, istenildiği durumlarda bu aktivasyon fonksiyonu aşağıda belirtilen iki farklı formda da kullanılabilir.

- Doğrusal aktivasyon fonksiyonunun doyuma giren bölgelerinin kaldırılması yada doğrusal olan bölgenin genişletilmesiyle fonksiyon tamamen doğrusal duruma getirilebilir.
- Doğrusal aktivasyon fonksiyonunun doğrusal olan bölgeye ait yükseltme katsayısı sonsuza yakın büyüklükte arttırılırsa, fonksiyon basamak fonksiyonu şekline dönüştürülebilmektedir [37].

4.1.3.3 Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

Şekil 4.5’de verilen grafik, lojistik sigmoid aktivasyon fonksiyonu olarak bilinmektedir. “S” şekline benzeyen aktivasyon fonksiyonu, YSA’nın tasarımında en yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonudur. Kesin artan bir fonksiyon olmaları nedeniyle doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlar arasında iyi bir denge kurabilmektedir.



Şekil 4.5 Lojistik sigmoid aktivasyon fonksiyonu

Lojistik sigmoid aktivasyon fonksiyonu, Eşitlik 5.8’de verilen denklem ile ifade edilmektedir.

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot v}} \quad (4.8)$$

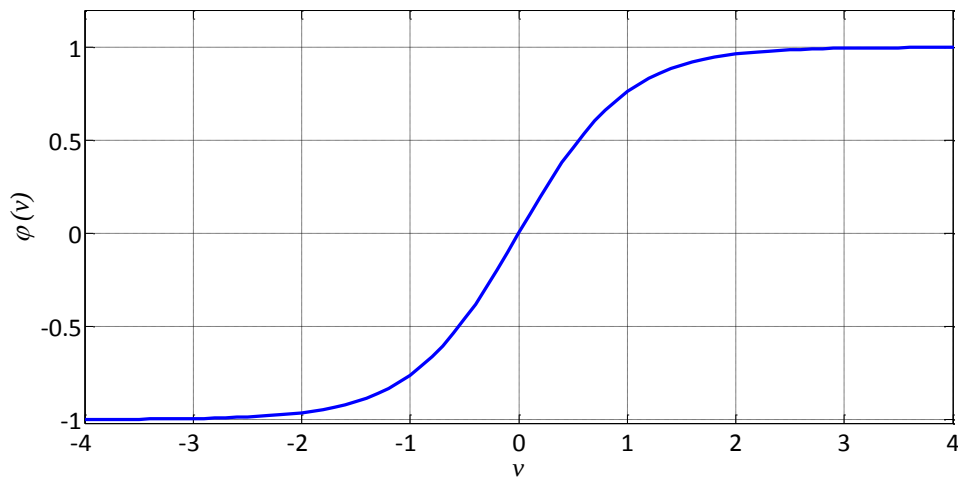
Burada a, sigmoid fonksiyonun doğrusal bölgesinin eğimini kontrol eden parametredir. a parametresinin değiştirilmesiyle farklı eğimlerde sigmoid fonksiyonlar elde edilebilmektedir. Şekil 4.5’de $a_3 < a_2 < a_1$ için değişim görülmektedir.

Sigmoid aktivasyon fonksiyonunun davranışı, eğim parametresinin (a) küçülmesiyle lineer aktivasyon fonksiyonuna, büyümesiyle ise basamak fonksiyonuna dönüşmektedir.

Eşitlik (4.4) ve eşitlik (4.7)’de verilen aktivasyon fonksiyonları $[0,1]$ aralığında değişmektedir. Bazı durumlarda ise bu aralığın $[-1,1]$ arasında olması istenir. Bu nedenle, Eşitlik (4.4)’de basamak aktivasyon fonksiyonu,

$$\left. \begin{array}{l} v_k > 0 \text{ ise } \varphi(v_k) = 1 \\ v_k = 0 \text{ ise } \varphi(v_k) = 0 \\ v_k < 0 \text{ ise } \varphi(v_k) = -1 \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

şeklinde “işaret fonksiyonu” olarak ifade edilebilir. Benzer şekilde bir sigmoid aktivasyon fonksiyonunun sınırları da $[-1,1]$ aralığında olacak şekilde uyarlandığında, hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu elde edilmektedir (Şekil 4.6).



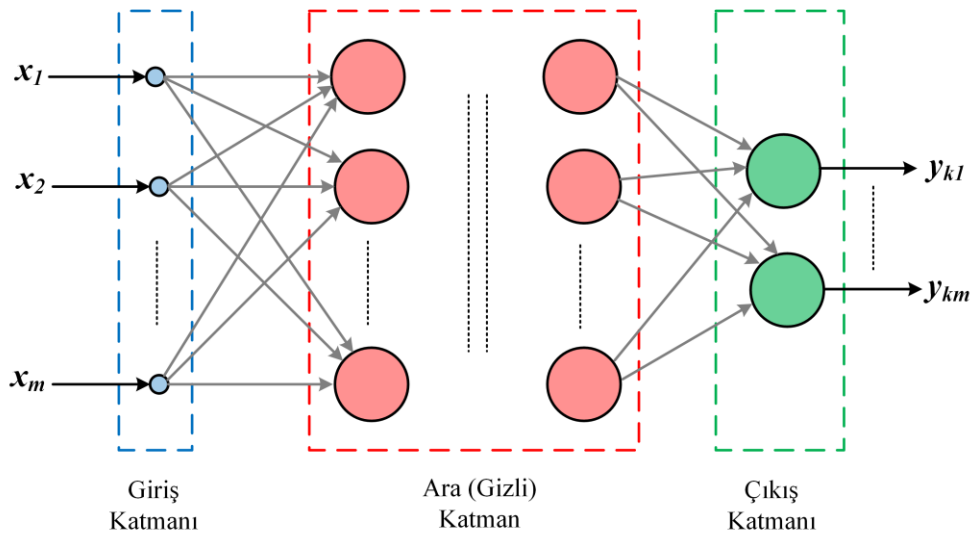
Şekil 4.6 Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu

Aktivasyon fonksiyonunun belirlenmesinde, seçilen fonksiyonun türevinin alınabilmesi ve non-lineer olması önemlidir. Türevi alınabilecek bir aktivasyon fonksiyonunun seçilmesi, YSA içerisinde gerçekleştirilen dönüşüm (mapping) işlemlerinin analitik olarak kontrol edilebilmesini kolaylaştırmaktadır. Gradyan azalma yöntemine göre öğrenmenin gerçekleştirildiği algoritmalarda, ağ aktivitesinin ağ sinaps ağırlıklarına göre gradyanları hesaplanmaktadır. Doğrusal ve basamak aktivasyon fonksiyonları bu özellikleri taşımadıkları için genellikle non-lineer problemlerin çözümünde tercih edilmemektedir. Lojistik sigmoid ve hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonları ise hem non-lineerlik hem de türevi alınabilirlik özelliklerine sahip oldukları için daha çok tercih edilmektedirler. Bu iki aktivasyon fonksiyonu arasında yapılacak tercih ise tamamen kullanıcıya ait olup keyfidir. Aynı zamanda, bu iki aktivasyon fonksiyonu arasında doğrusal dönüşüm yapılabildiği için iki fonksiyonun da sağladığı sonuçlar benzer olacaktır. Sonuç olarak, non-lineer aktivasyon fonksiyonları, doğrusal aktivasyon fonksiyonlarına göre karmaşık problemlerin çözümünde daha başarılı olmaktadır [40].

4.2 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı

Yapay sinir ağları yapısı üç katmandan oluşmaktadır (Şekil 4.7). Bunlar;

- Giriş katmanı
- Ara (Gizli) katman
- Çıkış katmanı



Şekil 4.7 Çok katmanlı bir yapay sinir ağının yapısı

YSA'na dış ortamdan gelen bilgilerin bulunduğu katman giriş katmanıdır. Bu katmana gelen bilgiler genellikle herhangi bir işleme uğramadan alt katmanlara iletilirler. Ancak giriş katmanındaki eleman sayısının problem veri sayısına göre ayarlanması, daha düzgün sonuçlar alınmasını sağlamaktadır.

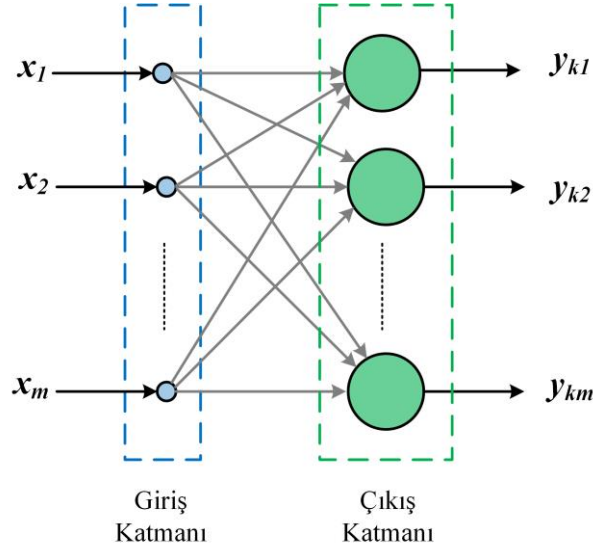
Giriş katmanından sonra gelen katman ise ara (gizli) katman (hidden layer) olarak adlandırılmaktadır. Giriş katmanından gelen bilgiler bu katmana ulaşır. Ara katman sayısı kullanıcıya ve çözülecek problemin karmaşıklığına bağlı olarak değişebilir. Ara katmanlarda yapay sinir nöronları bulunmaktadır ve bu nöronların sayısı giriş ve çıkış sayısından bağımsızdır. Birden fazla ara katman bulunan ağlarda da katmanlar içerisindeki YSH sayıları birbirinden farklı olabilmektedir. Ara katman ve katmanlar içerisindeki YSH'lerinin sayısının arttırılması hesaplamanın zorlaşmasına ve daha uzun süre almasına neden olmaktadır. Ancak bu durum, daha karmaşık problemlerin daha yüksek doğrulukta çözülebilmesine olanak sağlamaktadır.

Ara katmanlardan gelen bilgilerin işlendiği ve ağın YSA'nın çıktılarını üreten katman ise çıkış katmanıdır. Geri beslemeli yöntemi kullanılan ağlarda ise, çıktılar giriş katmanına geri gönderilerek YSA'nın ağırlık değerlerini yenilemesi ve böylelikle hata oranının en aza indirilmesi sağlanmaktadır [42].

Ayrıca YSA katman bakımından,

- Tek katmanlı yapay sinir ağları (Single Layer Neural networks)
- Çok katmanlı yapay sinir ağları (Multilayer Neural Networks)

olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek katmanlı ve çok katmanlı YSA'larının yapısı sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Tek katmanlı YSA'da ara (gizli) katman bulunmaz. Ağ yalnızca giriş ve çıkış katmanından oluşmaktadır. Çok katlı YSA ise en az bir adet gizli katman bulunmaktadır. Bazı problemlerin çözümünün karmaşık olması nedeniyle tek katmanlı YSA'ları yerine çok katmanlı YSA tercih edilmektedir.



Şekil 4.8 Tek katmanlı bir yapay sinir ağının yapısı

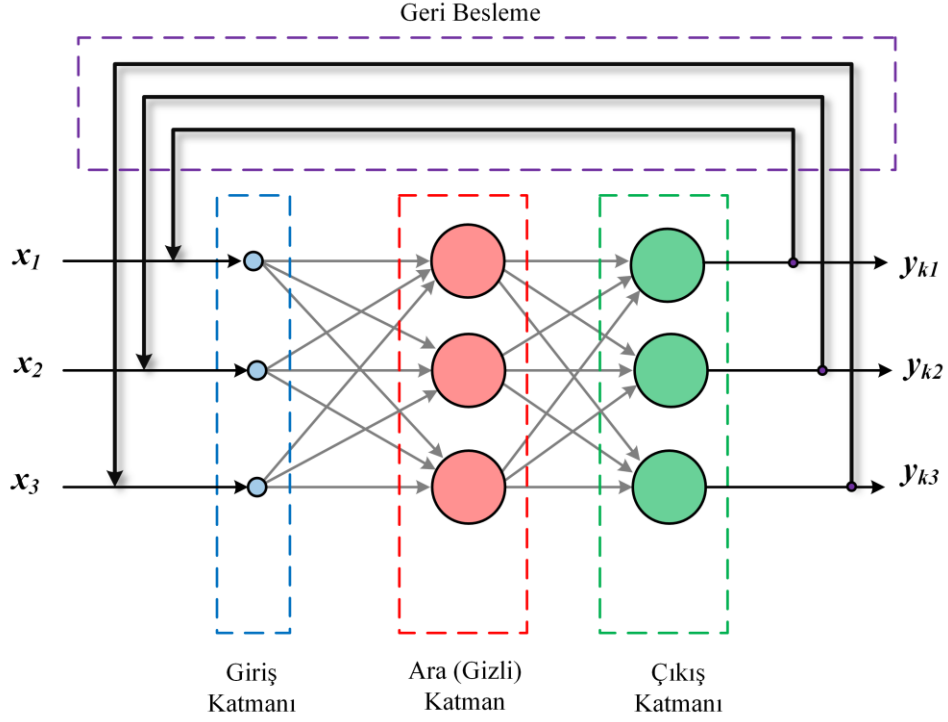
Çok katmanlı YSA'nın kullanıldığı durumlarda, optimum katman sayısının kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenecek optimum katman sayısının değeri, farklı yapıdaki problemler için de değişkenlik göstermektedir. Tek bir ara katman ve optimum sayıda nöron kullanılarak lineer olmayan problemlerin çözümü mümkün olmaktadır. Buna karşılık, birtakım problemlerin çözümünde ise iki adet saklı katman kullanılması daha doğru sonuçlar verebilmektedir. Optimum ara katman ve bu katmanlarda kullanılacak nöron sayılarının belirlenebileceği bir yöntem henüz geliştirilmemiştir. Bu nedenle, YSA'ındaki ara katman ve nöron sayıları deneme-yanılma yöntemi kullanılarak bulunmaktadır [37].

Ara katmanda bulunan düğümlerin sayısının gereğinden az ya da çok olmamasına dikkat edilmelidir. Düğüm sayısının gereğinden daha az seçilmesi durumunda, YSA öğrenme işlemini tamamıyla gerçekleştiremeyebilir. Düğüm sayısının oldukça yüksek seçilmesi durumunda ise YSA eğitim verilerini ezberler. Ayrıca bu durum, ağın eğitilme süresini de oldukça arttırmaktadır. Bu şekilde gerçekleştirilen bir uygulama sonucunda, YSA'ı giriş ve çıkışlar arasında bir bağıntı/ilişki kurmaz ve sadece ezberleme yapmış olur. Dolayısıyla, ağ sadece eğitim kümesi girişlerine doğru cevaplar verebilir. Ağa eğitim kümesi dışında bir giriş yapıldığında ise ağın verdiği cevabın hata oranı yüksek ya da tamamen anlamsız bir cevap olabilmektedir [36].

4.2.1 Yapay Sinir Ağlarının Yapılarına Göre Sınıflandırılması

Temel olarak iki tip yapay sinir ağı bulunmaktadır. Bunlar;

- İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları (Feedforward Neural Networks)
- Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks) (Şekil 4.9)



Şekil 4.9 Geri beslemeli yapay sinir ağı

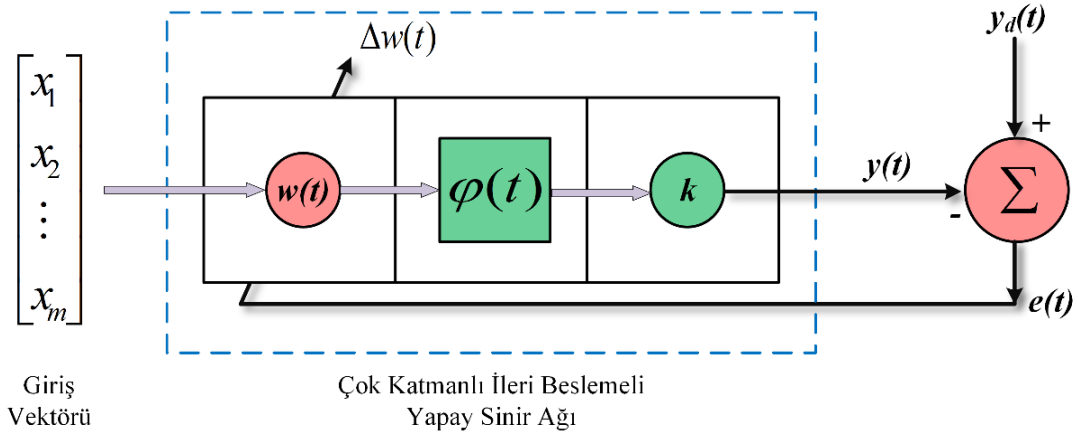
Şekil 4.9’da, geri besleme bölümünün olmadığı durumdaki ağ ileri beslemeli yapay sinir ağı olarak adlandırılmaktadır. İleri beslemeli YSA’nda, işaretler giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek yönlü olarak iletilmektedir. Geri beslemeli ağda ise herhangi bir nöronun çıktısı kendine ve diğer nöronlara girdi olarak gönderilmektedir. Bu yapısı ile geri beslemeli YSA, doğrusal olmayan dinamik bir davranış sergilemektedir. Her iki ağ yapısı da tek katmanlı ve çok katmanlı olarak tasarlanabilir. Geri beslemeli YSA genel olarak optimizasyon problemlerinin çözümünde tercih edilmektedir. İleri beslemeli YSA ise istatistiksel öngörme, sinyal/işaret işleme ve fiziksel büyüklükleri algılama alanlarında kullanılmaktadır.

4.2.2 Yapay Sinir Ağlarının Öğrenme Algoritmalarına Göre Sınıflandırılması

YSA öğrenme algoritmalarına göre üçe ayrılmaktadır. Bunlar;

- Eğitici Öğrenme (Supervised Learning)
- Eğitici Öğrenme (Unsupervised Learning)
- Takviyeli Öğrenme (Reinforcement Learning)

olarak bilinmektedir. Bu üç farklı öğrenme yöntemi aslında, YSA'nda kullanılan hata metodunu belirtmektedir. Eğitici öğrenme yönteminde, giriş bilgileriyle birlikte bu girişlere karşılık gelen çıktılar YSA'na birlikte sunulmaktadır. Ağın eğitimi sonucunda elde edilen çıktılar, dış kaynaklı bir sinyal (öğretmen) tarafından referans çıktılarla karşılaştırılır. Ağ çıktısı ile referans değerler arasında fark olması durumunda ise bir hata sinyali üretilir. Bu hata sinyaline bağlı olarak ağ içerisindeki sinaps ağırlıkları yeniden düzenlenir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Geri beslemeli yapay sinir ağı modeli

$$w(t+1) = w_i(t) + \Delta w_i(t) \quad (4.10)$$

$$\Delta w_i(t) = \eta_i \cdot x_i(t) \cdot [y_d(t) - y(t)] \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.10) ve (4.11)'de hata tabanlı öğrenme algoritmalarına ait denklemler verilmiştir. Burada sinaps ağırlıkları w ve giriş değerleri x ile gösterilmiştir. $w_i(t)$, $x_i(t)$, girişine karşılık gelen sinaps ağırlık değeridir. $\Delta w_i(t)$ parametresi ise belirli bir zaman aralığında, $w_i(t)$ bağlantı ağırlığında meydana gelen değişimi göstermektedir. η ise öğrenme katsayısıdır. Eğitim verisinin ağın eğitim süresi boyunca ağdan her geçişi

öğrenme devri (epoch) olarak tanımlanmaktadır. Eğitim süreci ise ağı istenilen hedefe ya da hata değerine ulaşması halinde sona erer.

Eğitici-siz öğrenme algoritması, kendi yerel bilgi ve iç kontrol mekanizmalarına dayanan öz denetimli organizasyon ilkelerini içerirler. Bu öğrenme yönteminde, girdilere karşılık gelen herhangi bir çıktı değeri bulunmamaktadır. Yöntemin kullanılma amacı, birbirine benzeyen girdilerin belirli aralıklarda gruplamak ya da sınıflandırmaktır. Bu öğrenme yöntemi genellikle sınıflandırma, tanımlama ve olasılık yoğunluk işlevleri ile ilgili problemlerin çözümlerinde tercih edilmektedir [35].

Takviyeli öğrenme algoritması, eğitici öğrenme algoritmasının özel bir formu olarak tanımlanabilir. Algoritmada, her bir çıkış değeri ayrı ayrı değerlendirmez ancak eğitim sonucunda ağı performansı “iyi” ya da “kötü” olarak değerlendirilir. Bu öğrenme algoritması genellikle kontrol sistemlerinin uygulamalarında tercih edilmektedir.

4.3 Levenberg – Marquardt Öğrenme Algoritması

Levenberg-Marquardt Algoritması (LMA), bir non-lineer fonksiyonun minimizasyonu problemine çözüm getiren sayısal bir yöntemdir. Bu algoritma, 1944 yılında Kenneth Levenberg ve Donald Marquardt tarafından geliştirilmiştir [43], [44]. Problem çözümünü hızlı ve kararlı bir yaklaşımla gerçekleştirebilmesinden dolayı, YSA alanındaki küçük ve orta ölçekli problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır [40].

LMA, Dik İniş (Steepest Descent) ve Gauss-Newton algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşmaktadır. Gauss-Newton algoritmasının hızlı olma karakteristiğini ve Dik İniş algoritmasının ise kararlılık yönünü etkin bir biçimde kullanmaktadır. Hata yüzeyinin karesel ya da ikinci mertebeden daha karmaşık olduğu durumlarda dahi Gauss-Newton algoritmasına göre daha kararlı bir davranış sergilemektedir. LMA Gauss-Newton algoritmasına göre çözüme kısmen de olsa daha yavaş ulaşmasına rağmen, Dik İniş algoritmasından daha hızlıdır. Problem çözümü gerçekleştirilirken LMA, hata eğrisinin durumuna/karmaşıklığına bağlı olarak Dik İniş ve Gauss-Newton algoritmaları arasında geçiş yapmaktadır. Bu nedenle, her iki algoritmanın da avantajlarından yararlanıp, problem çözümünün daha hızlı olmasını sağlayabilmektedir [40].

LMA'nın matematiksel modeli dört ana başlık altında incelenecektir. Bunlar,

- Dik İniş Algoritması (Steepest Descent),
- Newton Yöntemi,
- Gauss-Newton Algoritması,
- Levenberg-Marquardt Algoritması'dır.

Matematiksel modelde kullanılan indislerin tanımı aşağıda belirtilmiştir.

p : Giriş elemanı indisi (1'den P'ye kadar)

P : Giriş elemanı sayısı

m : Çıkış elemanı indisi (1'den M'e kadar)

M : Çıkış elemanı sayısı

i ve j : Ağırlık indisi (1'den N'e kadar)

N : Ağırlık sayısı

k : İterasyon indisi

Eğitim sürecinin değerlendirilmesi için, ortalama hata karesi (Sum square error) (4.12) eşitliğinde tanımlanmıştır.

$$E(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M e_{p,m}^2 \quad (4.12)$$

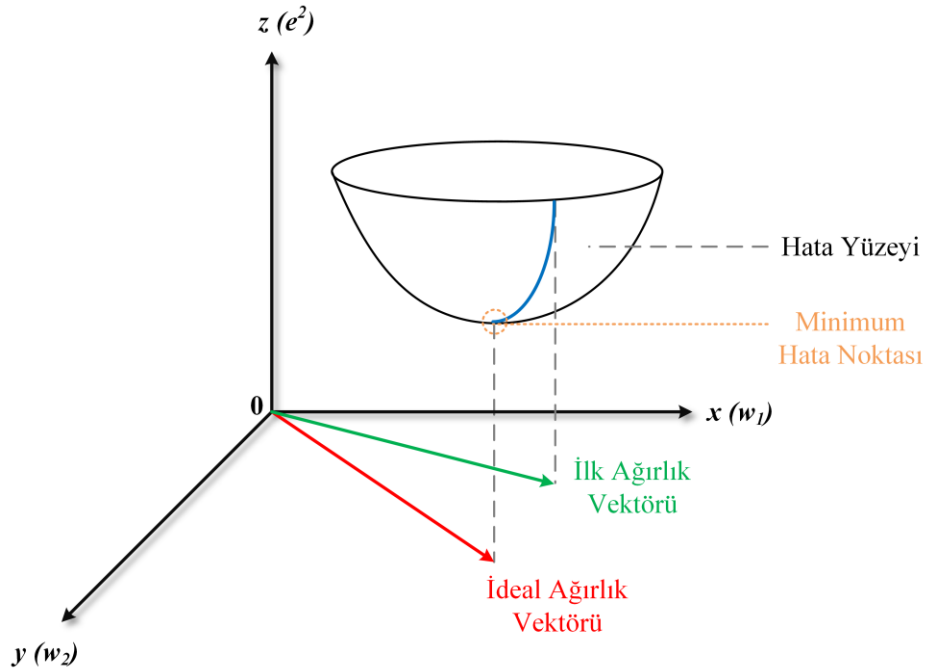
Burada $\mathbf{x}$ giriş vektörünü, $\mathbf{w}$ ağırlık vektörünü ve $e_{p,m}$ ise p girişine karşılık m çıkışındaki eğitim hatasını belirtmektedir (4.13).

$$\mathbf{e}_{p,m} = \mathbf{d}_{p,m} - \mathbf{o}_{p,m} \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.13)'de belirtilen $\mathbf{d}$, istenen çıkış vektörünü ve $\mathbf{o}$ ise gerçek çıkış vektörünü ifade etmektedir.

Hatanın minimize edilme işlemi, geometrik olarak da ifade edilebilmektedir. Kartezyen bir koordinat sisteminde, tüm ağırlıklara (x ve y eksen) karşılık gelen hataların karelerinin toplamı (z) çizildiğinde küresel bir yüzey elde edilir (Şekil 4.11). Bu kürenin

en alt noktası ise hataların karelerinin toplamının en küçük olduğu yerdir. Eğitim süreci boyunca bu kürenin en alt noktasının bulunması amaçlanmaktadır [37].



Şekil 4.11 Hata minimizasyonunun kartezyen koordinat sisteminde gösterilişi

4.3.1 Dik İniş Algoritması (Steepest Descent Algorithm)

Dik İniş algoritması, Hatanın Geriye Yayılımı Algoritması (Error Backpropagation) olarak da bilinmektedir. Bu algoritma, iterasyondaki ağırlıkların değerleri ile ilgilenmek yerine yüzey hatasının eğimini hesaplamaktadır. Ardından bu ağırlıklar, hatanın minimum olduğu noktaya yani kürenin alt kısmına doğru yönelecek şekilde artımsal olarak değiştirilir (Şekil 4.11). Bu işlem, Gradyan Azalması (Gradient Descent) yöntemi olarak bilinmektedir [45], [46].

Gradyan (g) genel olarak, toplam hata fonksiyonunun birinci mertebeden türevinin alınmasıyla hesaplanmaktadır (4.14).

$$\mathbf{g} = \frac{\partial E(\mathbf{x}, \mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} = \left[\frac{\partial E}{\partial w_1} \quad \frac{\partial E}{\partial w_2} \quad \dots \quad \frac{\partial E}{\partial w_N} \right]^T \quad (4.14)$$

Eşitlik (4.14)'e göre dik iniş algoritmasının, ağırlıkları yenileme yöntemi,

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \alpha \mathbf{g}_k \quad (4.15)$$

eşitliğindeki gibi olmaktadır. Burada α öğrenme sabiti veya iterasyon adım genişliğidir.

4.3.2 Newton Yöntemi

Newton yöntemi, tüm gradyan değerlerini ($g_1, g_2, \dots, g_N$) ağırlıkların fonksiyonu biçiminde tanımlamaktadır. Ayrıca bu ağırlıkların tümü doğrusal olarak birbirlerinden bağımsızdır.

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= f_1(w_1, w_2, \dots, w_N) \\ g_2 &= f_2(w_1, w_2, \dots, w_N) \\ &\dots \\ g_N &= f_N(w_1, w_2, \dots, w_N) \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Eşitlik (4.16)'da verilen ağırlıklardaki, $f_1, f_2, \dots, f_N$ parametreleri, ağırlıklar ve bu ağırlıklara ait gradyan bileşenleri arasındaki non-lineer ilişkiyi tanımlayan fonksiyonlardır. Her bir g_i elemanın Taylor serisine açılıp, birinci derece türevleri alınırsa;

$$\begin{aligned} g_1 &\approx g_{1,0} + \frac{\partial g_1}{\partial w_1} \cdot \Delta w_1 + \frac{\partial g_1}{\partial w_2} \cdot \Delta w_2 + \dots + \frac{\partial g_1}{\partial w_N} \cdot \Delta w_N \\ g_2 &\approx g_{2,0} + \frac{\partial g_2}{\partial w_1} \cdot \Delta w_1 + \frac{\partial g_2}{\partial w_2} \cdot \Delta w_2 + \dots + \frac{\partial g_2}{\partial w_N} \cdot \Delta w_N \\ &\dots \\ g_N &\approx g_{N,0} + \frac{\partial g_N}{\partial w_1} \cdot \Delta w_1 + \frac{\partial g_N}{\partial w_2} \cdot \Delta w_2 + \dots + \frac{\partial g_N}{\partial w_N} \cdot \Delta w_N \end{aligned} \quad (4.17)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitliği (4.17), hata fonksiyonuna bağlı olarak yazmak için gradyan değerlerinin birinci mertebeden türevlerinin yerine (4.14) eşitliğindeki karşılığı yazılır. Böylelikle hata fonksiyonunun ikinci mertebeden türevlerini içeren denklem takımı elde edilir. Toplam hata fonksiyonunun (E) minimum değerinin bulunması için tüm gradyan vektörlerinin sıfıra eşit olması gerekir. Denklem takımındaki eşitliklerin sol taraflarındaki gradyan değerlerinin sıfır yapılması ile,

$$\begin{bmatrix} -g_1 \\ -g_2 \\ \dots \\ -g_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial E}{\partial w_1} \\ -\frac{\partial E}{\partial w_2} \\ \dots \\ -\frac{\partial E}{\partial w_N} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_N} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_N \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_N \partial w_2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_N^2} \end{bmatrix}}_H \times \begin{bmatrix} \Delta w_1 \\ \Delta w_2 \\ \dots \\ \Delta w_N \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

olarak ifade edilen denklem takımı elde edilir.

Burada H ile gösterilen kare matris, çok değişkenli bir fonksiyonun ikinci dereceden kısmi türevlerini içeren “Hessian Matrisi” olarak bilinmektedir. (4.18) denklem takımının genel çözümü,

$$\Delta \mathbf{w} = -\mathbf{H}^{-1} \mathbf{g} \quad (4.19)$$

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \mathbf{H}^{-1} \mathbf{g}_k \quad (4.20)$$

eşitlikleri ile ifade edilmektedir.

4.3.3 Gauss-Newton Algoritması

Çözüm yöntemi olarak Newton yöntemi kullanıldığında, her yeni ağılık yenilenmesinde Hessian matrisinin hesaplanması gerekmektedir. Hessian matrisinin ikinci mertebeden türevler içermesi nedeniyle, hesaplama yapmak ya da ağırlıkları güncellemek oldukça karmaşık bir işlem hacmi gerektirmektedir. Bu nedenle, hesaplama işleminin daha basit hale getirmek için “Jacobian Matrisi” tanımlanmıştır (4.21). Jacobian matrisi, çok değişkenli bir fonksiyonun birinci mertebeden kısmi türevlerini içeren bir matristir. Jacobian matrisi yaklaşımının kullanılmasıyla, hata fonksiyonun birinci mertebeden kısmi türevlerinin alınması sağlanarak işlem hacminin küçültülmesi hedeflenmektedir.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{1,M}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_N} \\ \frac{\partial e_{p,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{p,2}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{p,2}}{\partial w_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_{p,M}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{p,M}}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_{p,M}}{\partial w_N} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

(4.14) eşitliği (4.12) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$g_i = \frac{\partial E}{\partial w_i} = \frac{\partial \left(\sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M e_{p,m}^2 \right)}{\partial w_i} = \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_i} e_{p,m} \right) \quad (4.22)$$

elde edilir. Böylelikle, Jacobian matrisi ($\mathbf{J}$) ile gradyan vektörü ($\mathbf{g}$) arasındaki ilişki,

$$\mathbf{g} = \mathbf{J} \mathbf{e} \quad (4.23)$$

olarak tanımlanabilmektedir. Hessian matrisi içerisindeki terimler $h_{i,j}$ olarak ifade edilirse, her bir terim,

$$h_{i,j} = \frac{\partial^2 E}{\partial w_i \partial w_j} = \frac{\partial^2 \left(\sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M e_{p,m}^2 \right)}{\partial w_i \partial w_j} = \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M \frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_i} \frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_j} + S_{i,j} \quad (4.24)$$

olarak verilen eşitlikle hesaplanabilir.

Newton yönteminin temel kabulüne göre, $S_{i,j}$ elemanı sıfıra yakındır ve ihmal edilebilir [TM94]. Böylelikle, Hessian matrisi yaklaşık olarak,

$$\mathbf{H} \approx \mathbf{J}^T \mathbf{J} \quad (4.24)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sonuç olarak, Gauss-Newton algoritmasının ağırlıkları yenileme kuralı,

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \left(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k \right)^{-1} \mathbf{J}_k \mathbf{e}_k \quad (4.25)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

Gauss-Newton algoritmasının Newton yönteminden daha üstün olmasının nedeni, Jacobian matrisinin kullanılmasıyla, ikinci mertebeden türevlerin yerine birinci mertebeden türevlerin daha kolay bir biçimde hesaplanabilecek olmasıdır. Buna rağmen Gauss-Newton algoritması, karmaşık problemlerdeki hatanın optimize edilmesi konusunda kararlı değildir. Matematiksel ifadeyle, $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ ifadesinin tersi alınamamaktadır [40].

4.3.4 Levenberg-Marquardt Algoritması

Levenberg-Marquardt algoritmasında, yaklaşık Hessian matrisi'nin $(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$ tersinin alınabilmesi için,

$$\mathbf{H} \approx \mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I} \quad (4.26)$$

ile ifade edilen yeni bir yaklaşım getirilmiştir.

Burada μ terimi, daima pozitif ve oldukça küçük bir değer olup Marquardt ya da birleşim katsayısını ifade etmektedir. $\mathbf{I}$ ise birim matristir. Bu iki katsayının yaklaşık Hessian matrisine eklenmesiyle, matrisin ana diyagonalı üzerindeki parametrelerin değerleri sıfırdan büyük olmakta ve matrisin tersi alınabilmektedir. Levenberg-Marquardt algoritmasına ait ağırlık yenileme kuralı,

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \left(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \mu \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{J}_k \mathbf{e}_k \quad (4.27)$$

eşitliğinde verilmiştir.

Levenberg-Marquardt algoritması eğitim süresi boyunca, Gauss-Newton ve dik iniş algoritmaları arasında geçiş yapmaktadır. Marquardt parametresinin (μ) çok küçük veya sıfıra yakın olduğu durumlarda Gauss-Newton algoritması, çok büyük olduğu durumlarda ise Dik İniş algoritması kullanılmaktadır. Gauss-Newton algoritması,

minimum hatanın olduğu bölgede Dik İniş algoritmasına göre daha karardır ve daha hızlı bir işlem performansı sergilemektedir [47].

4.3.5 Algoritmaların Özellikleri

Farklı öğrenme algoritmalarına ait özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Farklı YSA öğrenme algoritmalarının özellikleri

Algoritmalar	Ağırlık Yenileme Yöntemi	Çözüm Yaklaşımı	Hesaplama Yöntemi
Dik İniş Algoritması	$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \alpha \mathbf{g}_k$	Karalı-yavaş	Gradyan
Newton Algoritması	$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - \mathbf{H}^{-1} \mathbf{g}_k$	Karasız-hızlı	Gradyan ve Hessian
Gauss-Newton Algoritması	$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - (\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k)^{-1} \mathbf{J}_k \mathbf{e}_k$	Karasız-hızlı	Jacobian
Levenberg-Marquardt Algoritması	$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k - (\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}_k \mathbf{e}_k$	Kararlı-hızlı	Jacobian

Dik iniş algoritması, basit problemlerin çözümü için uygun bir yöntem olmasına karşılık daha karmaşık problemlerin çözümünde ise oldukça basit bir yöntem olarak kalmaktadır. Minimum hatanın bulunduğu çözüm bölgesine yaklaşıldıkça, gradyan vektörünün tüm bileşenleri küçük değerler almakta olup güncellenen ağırlıklar da çok az değişmektedir. Bu nedenle, eğitimin minimum hata değerine ulaşma süresi artmaktadır. Newton ve Gauss-Newton algoritmalarında, ağırlıkların güncellenmesi için ikinci dereceden türev almak gerekmektedir. Karesel (ikinci dereceden) bir hata yüzeyine sahip problemlerin çözümü, bu iki yöntem ile oldukça hızlı gerçekleştirilebilmesine rağmen bu duruma uygun olmayan problemlerin çözümünde iki yöntem de kararsız kalmaktadır. LMA dik iniş ve Gauss-Newton öğrenme algoritmalarının iyi yönlerini barındırmaktadır. Bu yöntem, Gauss-Newton algoritmasının hızını ve dik iniş metodunun kararlılığını bir arada kullanabilmektedir. LMA’nın kullandığı temel yöntem, öncelikli olarak dik iniş algoritmasını kullanması ve

hata yüzeyinin karesel olduğu durumlarda ise Gauss-Newton yöntemine geçiş yapılabilir [40].

4.4 Levenberg-Marquardt Algoritması ile Yapay Sinir Ağının Eğitilmesi

YSA öğrenme sürecinin başlangıcı, dış ortamdan bilgilerin alınması ile başlamaktadır. Bu bilgiler bir fonksiyondan geçirildikten sonra ağa ait çıkış değerleri üretilmektedir. Elde edilen çıktılar, gerçek değerler ile kontrol edilerek ağın hata oranı tespit edilerek hata oranının istenen seviyenin üzerinde olması durumunda, farklı öğrenme algoritmaları kullanarak bu hata oranının azaltılması ya da ağdan elde edilen çıktının gerçek değere yakınlştırılması sağlanmaktadır. Bu çalışma peryodu süresince ağ içerisinde bulunan ağırlıklar yenilenmektedir. Ağırlıkların her bir çevrimde yenilenmesiyle hedefe ulaşmaya ya da olabildiğince yakınlşmaya çalışılmaktadır. İstenen hata oranının sağlanması durumunda ise eğitim işlemi sona erdirilerek, en son belirlenen ağırlıklar ağda saklanmaktadır.

YSA içerisindeki ağırlıkların, istenilen sonuca ya da performansa ulaşınca kadar yenilenme sürecine “öğrenme” adı verilir. Öğrenme sürecinin tamamlanmasının ardından, ağa önceden tanıtılmayan veriler giriş olarak verilir ve elde edilen çıktılar incelenir. Ağın karakteristiğı, yeni verilen örnekler için de doğru performans sergiliyorsa YSA’nın ideal bir şekilde eğitildiğı söylenebilir [37]. Genel olarak bir YSA’nın eğitiminin gerçekleştirilmesi için izlenmesi gereken adımlar aşağıda sıralanmıştır:

- I. Eğitim Verilerinin Toplanması:** Ağın eğitilebilmesi için bir veri kümesine ihtiyaç vardır. Eğitimde kullanılan bu kümeye genellikle ağın “eğitim seti” denir. Eğitimin gerçekleştirilmesinden sonra ise ağ performansının ölçülmesi için gerekli olan veri kümesi ise “test seti” olarak adlandırılmaktadır.
- II. Ağ Yapısının Belirlenmesi:** Çözümlenecek probleme bağılı olarak ağın hangi yapıda olacağına karar verilmelidir. Ağın giriş, çıkış ve ara katman sayıları ile katmanlarda kullanılacak eleman sayıları belirlenmelidir.

- III. **Ağ Parametrelerinin Belirlenmesi:** Ağın öğrenme katsayısı, YSH'inde kullanılacak aktivasyon fonksiyonları ve momentum katsayıları bu aşamada belirlenir.
- IV. **Başlangıç Ağırlık Değerlerinin Belirlenmesi:** YSH'nin birbirine bağlayan ağırlıkları (w) belirlenir. Bu değerler başlangıçta genellikle ağ tarafından rastgele atanmakta, eğitim süresi boyunca ise daha uygun değerler belirlenmektedir.
- V. **Eğitim Setinin Ağa Tanıtılması:** Ağın öğrenme işlemine başlamadan önceki son adımdır. Bu aşamada elde bulunan eğitim seti, belirli bir düzene göre ağa tanıtılmaktadır.
- VI. **Hesaplamaların Gerçekleştirilmesi:** Ağa verilen giriş değerlerine bağlı olarak ağın ilk çıktıları hesaplanır. Bu çıktılar, gerçek değerler ile karşılaştırılarak ağın ürettiği hata oranları belirlenir.
- VII. **Ağırlıkların Yenilenmesi:** Belirlenen hata oranına bağlı olarak bir hata sinyali üretilir. Üretilen hata sinyali, ağ girişine gönderilerek ağırlıkların güncellenmesi sağlanır, bu işlem, istenilen hata oranına ulaşana kadar devam eder.
- VIII. **Eğitimin Tamamlanması:** Ağdan elde edilen çıktılarına ait hata oranlarının, istenilen düzeyde olması durumunda eğitim işlemi tamamlanır.

Bu tez çalışmasında, YSA'nın eğitimi için Levenberg-Marquardt öğrenme algoritması kullanılmış olup, algoritma eğitime ait blok diyagramı Şekil 4.12'de verilmiştir.

- V. Ağırlıkların yenilenmesi sonucunda hata kareleri toplamı azalmış ise, bu ağırlıklar geçerli ağırlıklar olarak kabul edilir. Sonrasında ise Marquardt katsayısı 10'a veya IV. adımda belirlenen aynı değere bölünür.
- VI. Hesaplanan hata kareleri toplamı değeri, istenilen değer ulaşıncaya kadar yeni ağırlıklarla II. adıma dönülür.

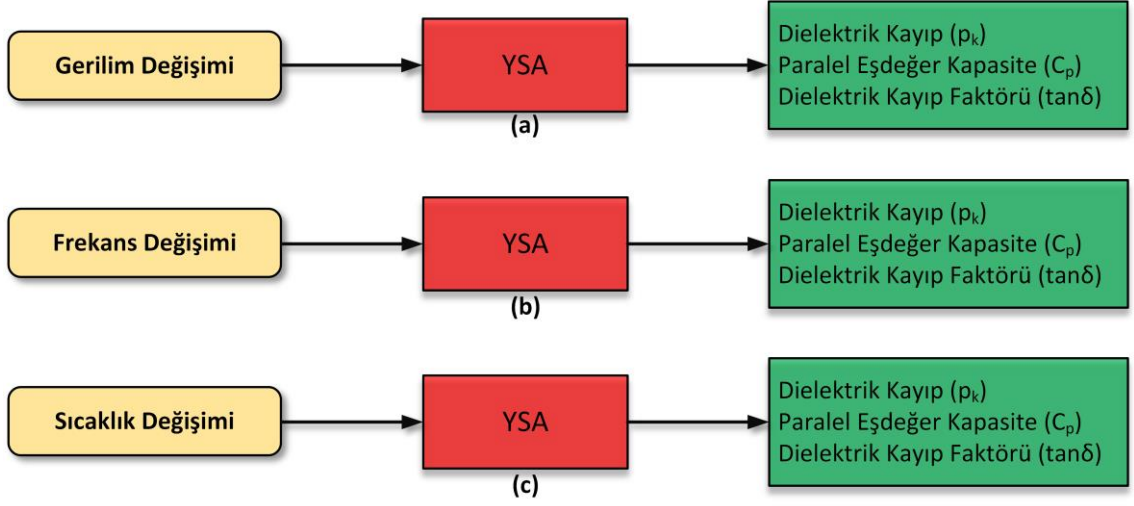
YSA'ların eğitilmesi sürecinde bazen istenilen hata oranına ulaşmak mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda, ağ yapısının tekrar düzenlenmesi gerekebilir. Ağ topolojisinde, başlangıç değerlerinde veya ağ parametrelerinde değişiklik yapılabilir. Bunlara ek olarak, eğitim setinin ağa gösteriliş yönteminin değiştirilmesi ya da eğitim setindeki örnek veri sayısının arttırılması/azaltılması gerekebilir.

Ağın öğrenme performansını izlemenin en doğru yolu ağın hata grafiğini incelemektir. Her iterasyon sonucunda elde edilen hata oranı grafik olarak çizildiğinde, bu oranın düştüğü gözlemlenebilir. Belirli bir iterasyon değerine kadar azalan bu hata değeri, bir noktadan sonra sabit kalır. Bu durumda, ağın öğrenmesinin tamamlandığı veya hatanın daha fazla azalmayacağı görülür. Hatanın sabitlendiği iterasyondaki hata oranının istenilen seviyede olmaması ağın yerel bir çözüme takıldığı anlamına gelmektedir [48].

4.5 YSA Kullanılarak Kablo Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, bir OG kablosunun çeşitli parametrelerinin ortaya konmasında YSA kullanımı gerçekleştirilmiştir. Gerilim, frekans ve sıcaklık değişimlerine karşın OG kablosundaki dielektrik kayıp, paralel eşdeğer kapasite ve dielektrik kayıp faktörü değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

OG kablosunda ölçülen değerlerin dışındaki gerilim, frekans ve sıcaklıklar için kablo parametrelerinin doğru bir biçimde tahmin edilebilmesi YSA ile mümkün olmaktadır. Bu kapsamda çalışma içeriğinde YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları gerçekleştirilerek kablo parametrelerinin hata değerleri ile elde edilmesi ortaya konmuştur.



Şekil 4.13 OG kablosunun dielektrik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi

a) Gerilim değişken b) Frekans değişken c) Sıcaklık değişken

Öncelikle ölçüm sayısının imkânlar dâhilinde daha fazla olduğu verilerle bir analiz yapılarak YSA-1 uygulamasında tahmin işlemi gerçekleştirilmiş ve daha sonra kısıtlı ölçümlerin olabileceği durumlara karşılık gelen daha az veri ile analiz yapılarak YSA-2 uygulaması gerçekleştirilmiştir.

4.5.1 YSA-1 Uygulaması

YSA-1 uygulamasında ölçüm verilerinin tamamı kullanılarak eğitim gerçekleştirilmiştir. Eğitim için 24 adet gerilim verisi (0,5kV'dan - 12kV'a kadar gerilim değerleri, 0,5kV'luk artışlarla), 16 adet frekans verisi (50Hz'den – 400Hz'e kadar frekans değerleri, 25Hz'lik artışlarla) ve 6 adet sıcaklık verisine (30°C'den - 80°C'ye kadar sıcaklık değerleri, 10°C'lik artışlarla) karşılık gelen ölçüm sonuçları kullanılmıştır (Çizelge 4.3). Bu bölümde eğitim için MATLAB paket programında kod yazılarak bir ileri beslemeli yapay sinir ağı oluşturulmuştur. Tahmin edilmek istenen her bir parametre için ayrı bir eğitim gerçekleştirilmiştir. Tüm YSA eğitimlerinde pek çok YSA eğitiminde yaygın olarak kullanılan "Levenberg-Marquardt" eğitim algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, özellikle lineer olmayan fonksiyonların eğitime uygun olması ve hızlı bir şekilde eğitilebilmesi nedeniyle tercih edilmiştir.

YSA-1 eğitiminde, dielektrik kayıp (p_k), paralel eşdeğer kapasite (C_p) ve dielektrik kayıp faktörü ($\tan \delta$) parametrelerinin tahmini için ölçülen gerilim, frekans ve sıcaklık

değerlerinin tümü eğitimde kullanılmıştır. Ölçüm verilerinin tamamının eğitimde kullanılmasının nedeni, YSA uygulamasının ölçülen parametre değişimlerine adapte olup olamayacağı ve ara değer tahmini yapabilme kabiliyetinin incelenmesidir. Bu nedenle, tüm ölçüm verileri kullanılarak YSA eğitimi için pek çok YSA uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle tek bir YSA ağı oluşturulmuş ve eğitim verilerinin çıktısı olarak da yukarıda belirtilen üç parametre belirlenmiştir. Bu parametrelerin frekans, gerilim ve sıcaklık değişimlerine farklı davranış göstermeleri ve YSA eğitiminin oldukça vakit alması nedeniyle her bir parametre için üç farklı YSA oluşturulmuştur. Böylelikle eğitimlerdeki hata oranının minimuma indirilmesi ve ağı hızlı bir şekilde eğitilebilmesi sağlanmıştır. Her bir parametre için YSA içerisindeki gizli katman sayıları, öğrenme oranı ve transfer fonksiyonlar değiştirilerek optimum YSA yapıları elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen YSA uygulamalarında kullanılan eğitim datalarının tümü, eğitim hızının artırılması, kullanılan transfer fonksiyonları (sigmoid fonksiyonlar) ile uyum içinde olabilmesi ve aşırı eğri uydurmadan kaçınmak için per-unit (pu) olarak hesaplanmıştır. Daha sonra uygulama sonucu elde edilen çıktılar, baz değerler ile çarpılarak gerçek parametre değerleri elde edilmiştir. Hesaplama da kullanılan baz değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu değerler, her bir parametrenin ölçümler sonucunda elde edilen maksimum değeridir.

Çizelge 4.2 YSA eğitimlerinde kullanılan parametreler ve baz değerleri

Parametre	Baz Değer
Gerilim (U)	12 kV
Frekans (f)	400 Hz
Sıcaklık (T)	80 °C
Dielektrik Kayıp (p_k)	669,57 mW
Paralel Eşdeğer Kapasite (C_p)	2538,8 pF
Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$)	0,0785 (%)

Gerçekleştirilen YSA analizleri sonucunda elde edilen tahmin verilerinin oldukça fazla olması nedeniyle, bu bölümde analiz sonuçlarının sadece bir kısmına yer verilmiştir. Tahmin eğrilerinin bir önceki bölümde verilen parametre değişimleri ile bütünlük göstermesi ve kıyaslama yapılabilmesi için benzer durumdaki değişim eğrileri tercih edilmiştir. Bunlar;

- Sabit frekans ($f=50$ Hz) ve sabit sıcaklıkta ($T=30^{\circ}\text{C}$) gerilime bağlı değişim
- Sabit gerilim ($U=12$ kV) ve sabit sıcaklıkta ($T=30^{\circ}\text{C}$) frekansa bağlı değişim
- Sabit gerilim ($U=12$ kV) ve sabit frekansta ($f=50$ Hz) sıcaklığa bağlı değişim

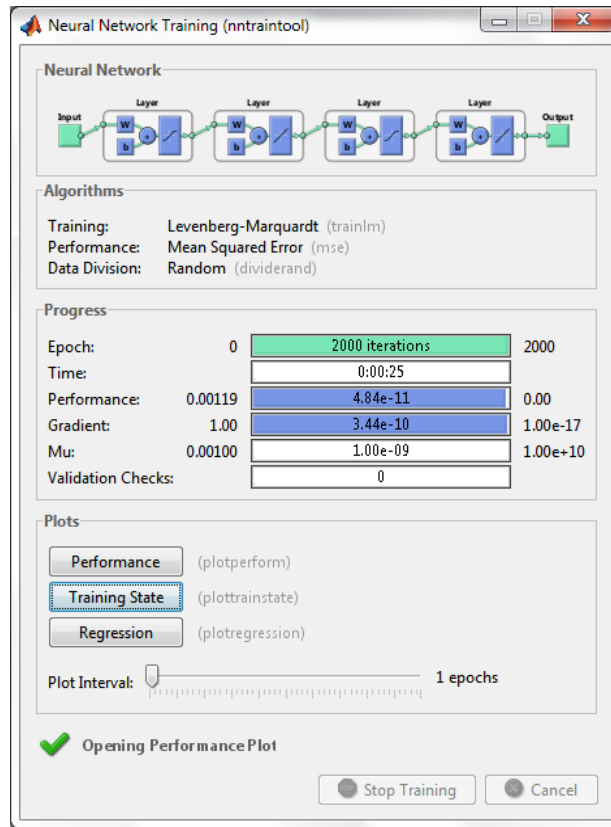
olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3 YSA-1 eğitiminde kullanılan ölçüm parametreleri

Elde Edilen Parametreler	Değişken U				Değişken f				Değişken T			
	Başlangıç Değeri	Bitiş Değeri	Artış Değeri	Toplam Veri Sayısı	Başlangıç Değeri	Bitiş Değeri	Artış Değeri	Toplam Veri Sayısı	Başlangıç Değeri	Bitiş Değeri	Artış Değeri	Toplam Veri Sayısı
Dielektrik Kayıp												
Paralel Eşdeğer Kapasite	0,5 kV	12 kV	0,5 kV	24	50 Hz	400 Hz	25 Hz	16	30°C	80°C	10°C	6
Dielektrik Kayıp Faktörü												

4.5.1.1 Dielektrik Kayıp (p_k) Eğitimi

Bu bölümde, ölçüm verilerinin tamamından faydalanılarak eğitilen yapay sinir ağı, dielektrik kayıp (p_k) parametresinin ara değerlerinin tahmin edilebilmesi için eğitilmiştir. Dielektrik kayıp eğitim için "Levenberg-Marquardt" algoritması kullanılmış ve 2000 iterasyon gerçekleştirilmiştir. YSA'ı üç giriş katmanı, altı gizli katman ve bir çıkış katmanından meydana gelmektedir. Bu YSA uygulamasına ait detayların yer aldığı ara yüz Şekil 4.14'de verilmiştir.

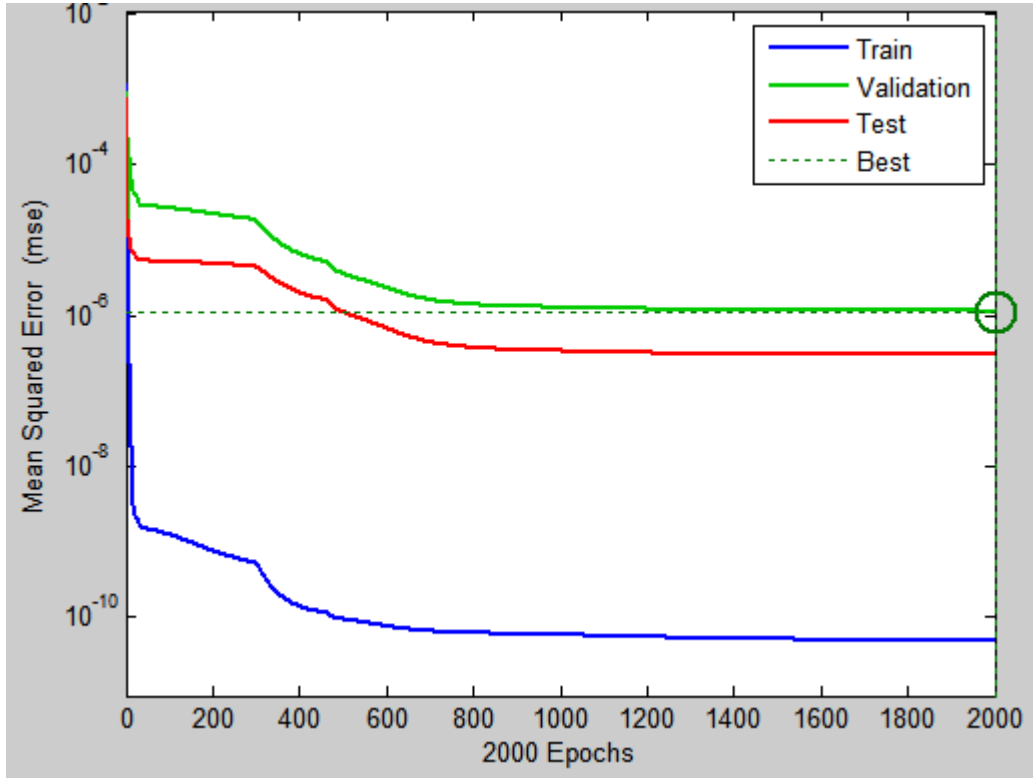


Şekil 4.14 YSA-1 uygulamasına ait katmanların gösterimi

Gizli katmanlar içerisinde giriş katmanından çıkış katmanına doğru tanjant sigmoid ve lineer transfer fonksiyonları kullanılmıştır. YSA-1 ağının eğitimi sonucunda en iyi ağ performansı (karesel ortalama hata) $1,1349 \cdot 10^{-6}$ olarak elde edilmiştir. Eğitim boyunca eğitim ve test datalarının karesel ortalama hata değerlerinin değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Eğitim ve test dataları arasındaki karesel ortalama hata oranlarının en düşük olduğu durum 2000. iterasyonda gerçekleşmiştir.

YSA uygulaması ile bir OG kablosunun gerilim sıcaklık ve frekansa bağlı dielektrik kaybına ait analizler ortaya konmuştur. Böylece ölçümlerle elde edilen değerlerle YSA eğitimi gerçekleştirilmiş ve ölçüm dışındaki gerilim, sıcaklık ve frekans değerleri için OG kablosunun dielektrik kaybının belirlenmesi mümkün olmaktadır.

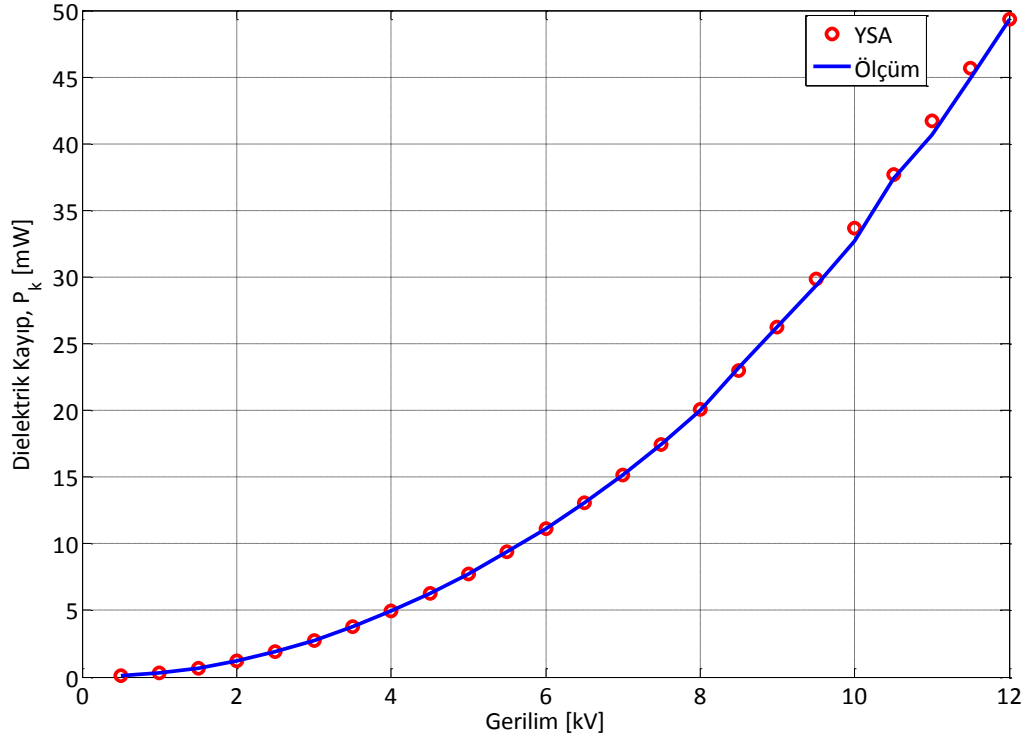
Dielektrik kayıp eğitimi, özellikleri verilen OG kablosunun gerilime, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimi için yapılmıştır.



Şekil 4.15 YSA-1 ağıının eğitimi boyunca ortalama karesel hata değerinin değişimi

Gerilime Bağlı Dielektrik Kayıp Eğitimi

Dielektrik kaybın çıktı olarak elde edilmesi için YSA ile eğitim işlemi yapılmış ve sonuçlar üzerinde hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16'da, $f=50$ Hz ve $T=30^{\circ}\text{C}$ 'de YSA analizi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen dielektrik kayıp (p_k) parametresinin gerilime bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.16 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) gerilime bağlı değişimi (YSA-1, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$)

Şekil 4.16’da, YSA analizi sonucu tahmin edilen dielektrik kayıp (p_k) değerlerinin ölçüm ile elde edilen verilere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Dielektrik kayıp değerinin (p_k) gerilime bağlı olarak değişiminin tek yönlü ve üstel olarak artan bir fonksiyon şeklinde olması nedeniyle, eğitilen YSA’nın bu davranışa kolay adapte olabildiği görülmektedir. Sonuç verilerinin sayısal biçimde de değerlendirilebilmesi için eğri üzerinde verilen tahmin verilerine ait bağıl hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Bağıl hata oranı (H) yüzde olarak;

$$\%H = \frac{\varphi_{\delta} - \varphi_t}{\varphi_{\delta}} \cdot 100 \quad (4.28)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Burada φ_{δ} , ölçülen parametre, φ_t ise tahmin edilen parametreyi göstermektedir. Bu bölümde, bağıl hata değeri hesaplanan parametre ise dielektrik kayıp (p_k)’dır.

Şekil 4.16’da verilen tahmin sonuçlarına ait bağıl hata oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağıl hata
(f = 50 Hz, T = 30°C)

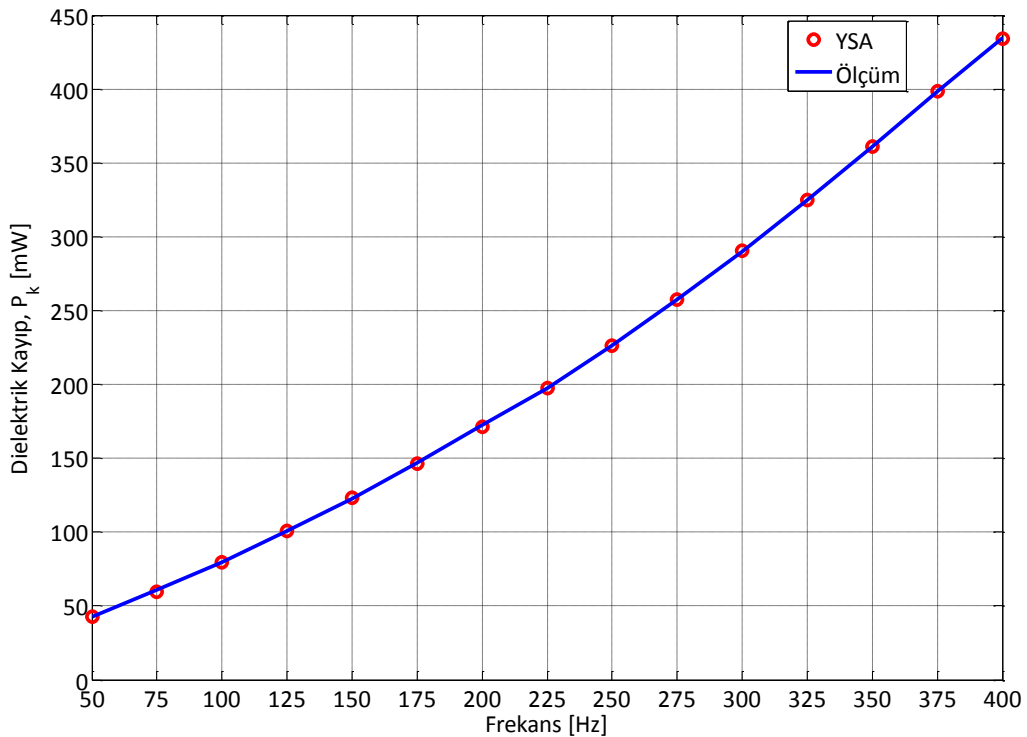
Gerilim (U) [kV]	Ölçülen Dielektrik Kayıp ($p_{k\ddot{o}}$) [mW]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp (p_{kt}) [mW]	Bağıl Hata (H) [%]
0,5	0,08	0,079	1,2966
1	0,30	0,302	0,6914
1,5	0,67	0,669	0,1264
2	1,21	1,205	0,4473
2,5	1,91	1,909	0,0701
3	2,76	2,772	0,4446
3,5	3,78	3,783	0,0856
4	4,94	4,941	0,0125
4,5	6,27	6,260	0,1584
5	7,73	7,741	0,1470
5,5	9,37	9,368	0,0208
6	11,14	11,135	0,0409
6,5	13,05	13,048	0,0154
7	15,13	15,135	0,0328
7,5	17,46	17,457	0,0162
8	19,98	20,062	0,4115
8,5	23,23	22,983	1,0632
9	26,25	26,250	0,0007
9,5	29,35	29,840	1,6679
10	32,68	33,683	3,0688
10,5	37,39	37,699	0,8262
11	40,65	41,747	2,6982
11,5	44,90	45,672	1,7202
12	49,36	49,360	0,0000

Çizelge 4.4'den görüldüğü üzere, tahmin sonuçlarına ait bağıl hata oranları genel olarak oldukça küçüktür. Eğitim sonucunda elde edilen maksimum bağıl hata 10 kV gerilim için % 3,0688 ve minimum hata 12 kV gerilim için % 0,0000 olmuştur. Özellikle düşük gerilim seviyelerinde elde edilen bağıl hata oranlarının küçük olması, gerçekleştirilen uygulamanın doğruluğu açısından önem arz etmektedir. Şebekedeki gerilim harmoniklerinin de dielektrik kayıp üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Harmoniklerin genliklerinin nominal gerilime oranı oldukça küçük mertebededir. Bu nedenle, istendiğinde gerilim harmoniklerinin dielektrik kayıplar üzerindeki etkisinin hassas bir

şekilde incelenebilmesi, gerçekleştirilen YSA-1 tahmin sonuçları ile mümkün olmaktadır.

Frekansa Bağlı Dielektrik Kayıp Eğitimi

YSA-1 analizi sonucu farklı frekanslar için tahmin edilen dielektrik kaybın, 12kV nominal gerilim ve $T=50^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta frekansa bağlı değişimi, ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.17’de verilmiştir. Genellikle, tahmin edilen dielektrik kayıp değerlerinin tümünün ölçüm değerleri ile örtüştüğü görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, farklı frekanslar için tahmin edilen dielektrik kayıp (p_k) değerlerine ait bağıl hata oranları Çizelge 4.5’de verilmiştir. Minimum bağıl hata 325 Hz için % 0,004 ve maksimum bağıl hata ise 75 Hz için %1,306 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma ile istendiğinde, farklı frekanslardaki dielektrik kayıp değerlerinin hassas olarak tahmin edilebilmesi, şebekede bulunan gerilim harmoniklerinin dielektrik kayıp üzerinde meydana getirdiği ek kayıpların incelenebilmesi ve değerlendirilebilmesine imkân vermektedir.



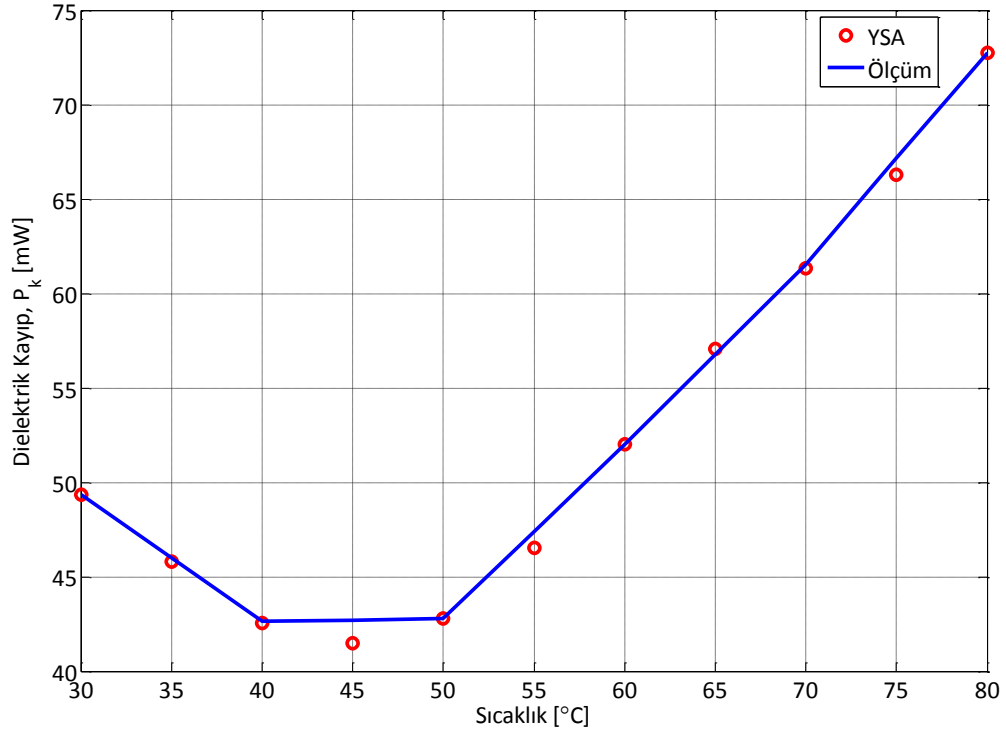
Şekil 4.17 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) frekansa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12 \text{ kV}$, $T = 50^{\circ}\text{C}$)

Çizelge 4.5 YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağıl hata
(U = 12 kV, T = 50°C)

Frekans (f) [Hz]	Ölçülen Dielektrik Kayıp ($p_{k\phi}$) [mW]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp (p_{kt}) [mW]	Bağıl Hata (H) [%]
50	42,77	42,788	0,042
75	60,64	59,848	1,306
100	79,37	79,350	0,025
125	100,58	100,622	0,041
150	122,53	123,085	0,453
175	146,76	146,540	0,150
200	172,37	171,224	0,665
225	197,75	197,645	0,053
250	226,13	226,285	0,069
275	257,42	257,297	0,048
300	290,03	290,357	0,113
325	324,92	324,908	0,004
350	360,92	360,876	0,012
375	398,72	398,685	0,009
400	434,46	434,396	0,015

Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Kayıp Eğitimi

YSA-1 analizi sonucu farklı sıcaklıklar için tahmin edilen dielektrik kaybın, 12kV nominal gerilim ve $f=50$ Hz frekansta sıcaklığa bağlı değişimi ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.18’de verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp değerlerinin genel olarak, ölçüm sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Farklı sıcaklıklar için tahmin edilen dielektrik kayıp (p_k) değerlerine ait bağıl hata oranları Çizelge 4.6’da belirtilmiştir. Sonuç olarak, minimum bağıl hata 80°C için % 0,0000 ve maksimum bağıl hata ise 45°C için % 2,8880 olarak hesaplanmıştır. İşletmedeki bir yüksek gerilim kablosunun yüklenme durumuna bağlı olarak sıcaklığı da değişmektedir. Bu çalışmada, gerçekleştirilen analiz ile, farklı sıcaklıklar için elde edilen dielektrik kayıp değerleri, bir yüksek gerilim kablosunda yüklenmeye bağlı olarak meydana gelen kayıp enerjinin doğru olarak hesaplanabilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 4.18 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Çizelge 4.6 YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Sıcaklık (T) [°C]	Ölçülen Dielektrik Kayıp ($p_{k\phi}$) [mW]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp (p_{kt}) [mW]	Bağıl Hata (H) [%]
30	49,36	49,355	0,010
35	46,00	45,823	0,386
40	42,64	42,547	0,219
45	42,71	41,471	2,888
50	42,77	42,770	0,001
55	47,39	46,548	1,766
60	52,00	52,003	0,005
65	56,77	57,045	0,494
70	61,53	61,348	0,295
75	67,14	66,277	1,285
80	72,75	72,750	0,000

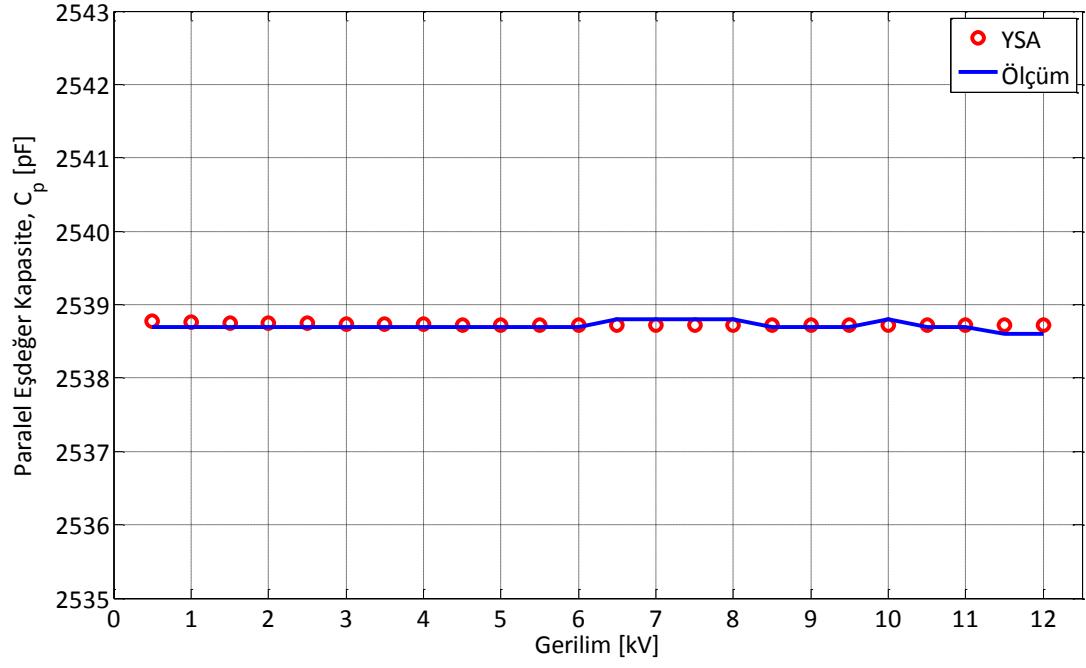
4.5.1.2 Paralel Eşdeğer Kapasite (C_p) Eğitimi

YSA uygulaması ile bir OG kablosunun gerilim sıcaklık ve frekansa bağlı paralel eşdeğer kapasitesine ait analizler ortaya konmuştur. Böylece ölçümlerle elde edilen değerlerle YSA eğitimi gerçekleştirilmiş ve ölçüm dışındaki gerilim, sıcaklık ve frekans değerleri için OG kablosunun paralel eşdeğer kapasitesinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Paralel eşdeğer kapasite eğitimi, özellikleri verilen OG kablosunun gerilime, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimi için yapılmıştır.

Gerilime Bağlı Paralel Eşdeğer Kapasite Eğitimi

$f=50$ Hz ve $T=30^\circ\text{C}$ 'de YSA eğitimi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen paralel eşdeğer kapasite (C_p) parametresinin gerilime bağlı değişimi Şekil 4.19'da verilmiştir. Tahmin sonuçlarının, genel itibarıyla ölçüm verilerine yakın olduğu şekil üzerinden görülebilmektedir. Belirtilen şartlarda ($f=50$ Hz, $T=30^\circ\text{C}$) paralel eşdeğer kapasite değerinin pek az değişmesi nedeniyle, YSA eğitimi sonuçları da ölçülen değerlere yakın olarak tahmin edilebilmiştir. Tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite sonuçlarına ait bağıl hata değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.7'de verilmiştir. Elde edilen bağıl hata sonuçlarına göre, minimum bağıl hata değeri % 0,0010 ve maksimum bağıl hata değeri % 0,0050'dir. Bu analiz ile kablo kapasitesinde farklı işletme şartlarına bağlı olarak meydana gelen değişimin doğru olarak tahmin edilebilmesi, kapasitif reaktif gücün incelenebilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 4.19 Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) gerilime bağlı değişimi (YSA-1, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$)

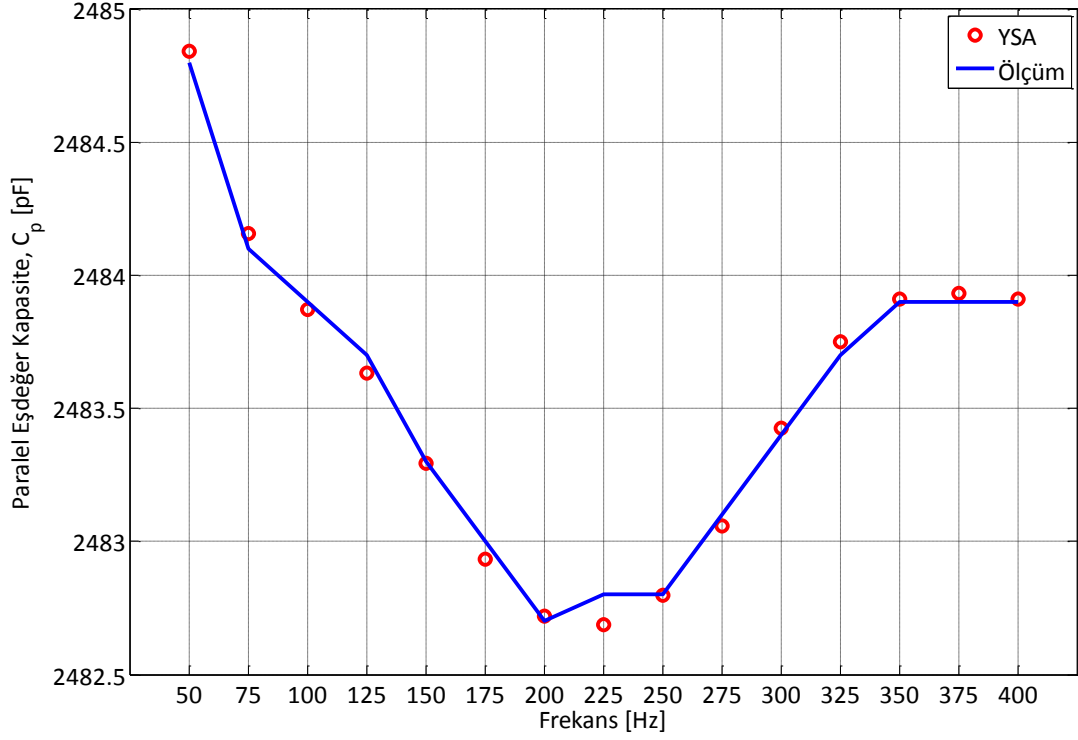
Çizelge 4.7 YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($f = 50 \text{ Hz}$, $T = 30^\circ\text{C}$)

Gerilim (U) [kV]	Ölçülen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Tahmin Edilen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Bağıl Hata (H) [%]
0,5	2538,70	2538,771	0,003
1	2538,70	2538,762	0,002
1,5	2538,70	2538,754	0,002
2	2538,70	2538,747	0,002
2,5	2538,70	2538,741	0,002
3	2538,70	2538,736	0,001
3,5	2538,70	2538,732	0,001
4	2538,70	2538,729	0,001
4,5	2538,70	2538,726	0,001
5	2538,70	2538,724	0,001
5,5	2538,70	2538,722	0,001
6	2538,70	2538,721	0,001
6,5	2538,80	2538,719	0,003
7	2538,80	2538,719	0,003
7,5	2538,80	2538,718	0,003
8	2538,80	2538,718	0,003
8,5	2538,70	2538,718	0,001
9	2538,70	2538,718	0,001
9,5	2538,70	2538,718	0,001
10	2538,80	2538,718	0,003
10,5	2538,70	2538,719	0,001
11	2538,70	2538,719	0,001
11,5	2538,60	2538,720	0,005
12	2538,60	2538,721	0,005

Frekansa Bağlı Paralel Eşdeğer Kapasite Eğitimi

Tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite parametresinin, 12kV nominal gerilim ve $T=50^\circ\text{C}$ sıcaklıkta frekansa bağlı değişimi ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.20’de verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp değerlerinin tümünün genel olarak ölçüm değerleri ile örtüştüğü görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, farklı frekanslar için tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite değerlerine ait bağıl hata oranları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Minimum bağıl hata 350 Hz için % 0,0000 ve maksimum bağıl hata ise 225 Hz için % 0,0040 olarak hesaplanmıştır. Bu analiz ile farklı frekanslardaki paralel

eşdeğer kapasite değerlerinin hassas olarak tahmin edilebilmesi, şebekede bulunan gerilim harmoniklerinin kablo kapasitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi mümkün olmaktadır.



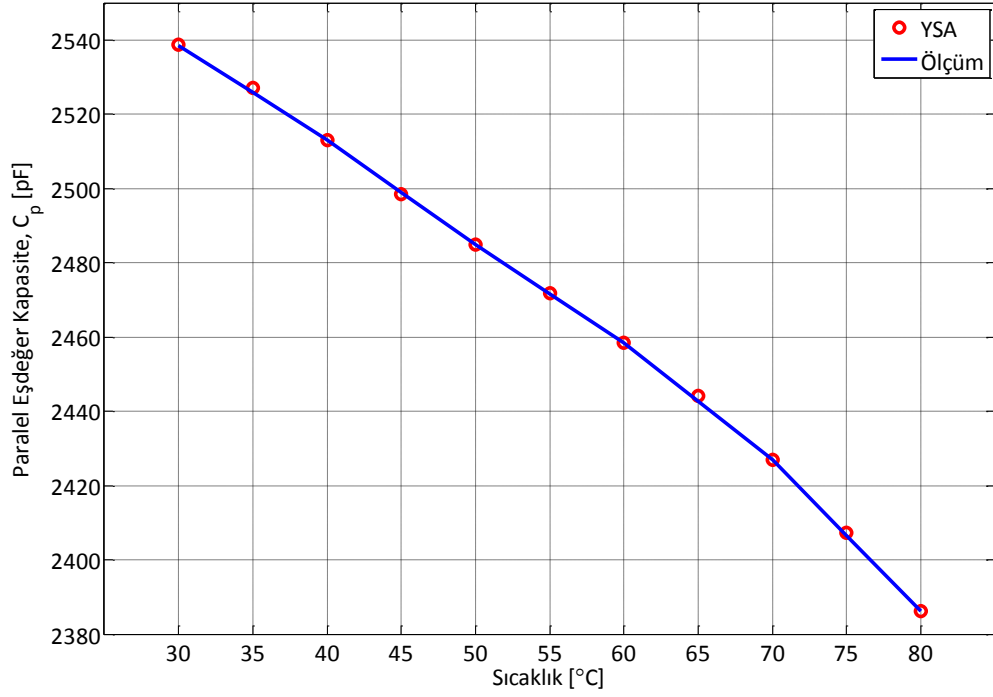
Şekil 4.20 Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) frekansa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)

Çizelge 4.8 YSA-1 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12 \text{ kV}$, $T = 50^\circ\text{C}$)

Frekans (f) [Hz]	Ölçülen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Tahmin Edilen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Bağıl Hata (H) [%]
50	2484,80	2484,840	0,002
75	2484,10	2484,158	0,002
100	2483,90	2483,871	0,001
125	2483,70	2483,633	0,003
150	2483,30	2483,292	0,000
175	2483,00	2482,932	0,003
200	2482,70	2482,720	0,001
225	2482,80	2482,688	0,004
250	2482,80	2482,798	0,000
275	2483,10	2483,059	0,002
300	2483,40	2483,426	0,001
325	2483,70	2483,750	0,002
350	2483,90	2483,910	0,000
375	2483,90	2483,931	0,001
400	2483,90	2483,910	0,000

Sıcaklığa Bağlı Paralel Eşdeğer Kapasite Eğitimi

YSA eğitimi sonucunda $f=50 \text{ Hz}$ ve $U=12 \text{ kV}$ 'da tahmin edilen ve ölçülen paralel eşdeğer kapasite (C_p) parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.21'de verilmiştir. Elde tahmin sonuçlarının, genel itibariyle ölçüm verilerine yakın olduğu şekil üzerinden görülebilmektedir. Tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite sonuçlarına ait bağıl hata değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.9'da verilmiştir. Elde edilen bağıl hata sonuçlarına göre, minimum bağıl hata değeri 50°C 'de % 0,0016 ve maksimum bağıl hata değeri 35°C 'de % 0,0479'dur. Kablo sıcaklığına bağlı olarak kablonun kapasite değeri ve dolayısıyla kapasitif reaktif gücü de değişim göstermektedir. Özellikle uzun mesafeler boyunca tesis edilen yüksek gerilim kablolarının farklı sıcaklıklardaki kapasite değerlerinin doğru tahmin edilebilmesi, sistemin reaktif gücü hakkında daha detaylı bir analiz yapma imkânı sağlayacaktır.



Şekil 4.21 Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Çizelge 4.9 YSA-1 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Sıcaklık (T) [°C]	Ölçülen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Tahmin Edilen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Bağıl Hata (H) [%]
30	2538,60	2538,721	0,0047
35	2525,80	2527,011	0,0479
40	2513,00	2513,098	0,0039
45	2498,90	2498,545	0,0142
50	2484,80	2484,840	0,0016
55	2471,60	2471,761	0,0065
60	2458,40	2458,481	0,0033
65	2442,70	2444,083	0,0566
70	2427,00	2427,045	0,0019
75	2406,60	2407,267	0,0277
80	2386,20	2386,300	0,0042

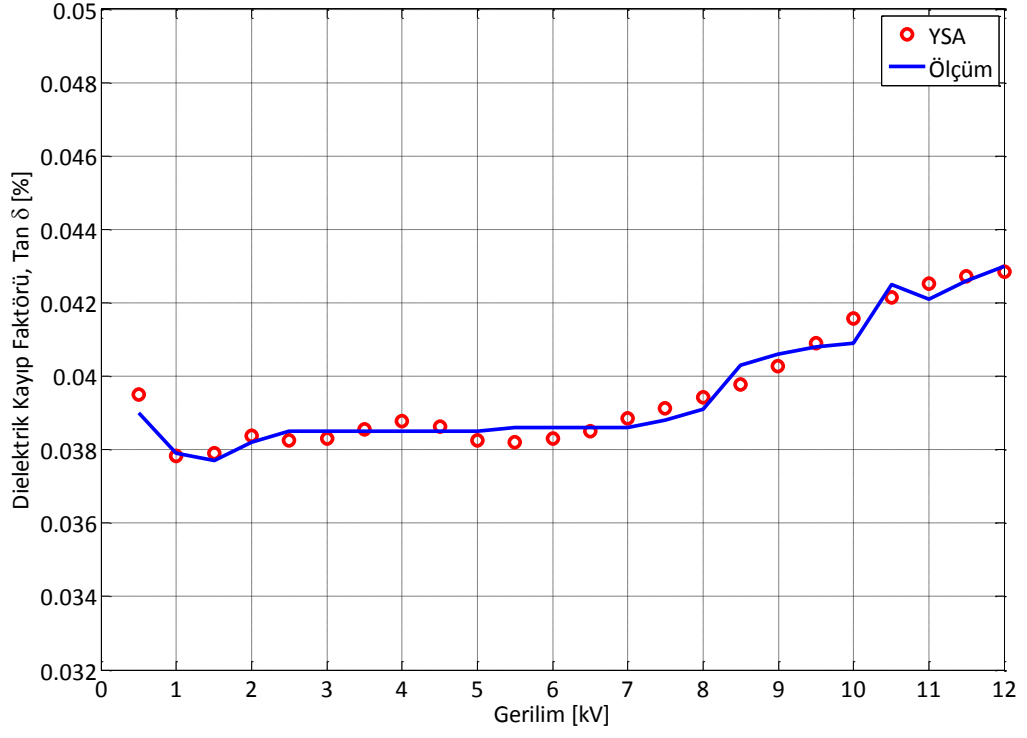
4.5.1.3 Dielektrik Kayıp Faktörü (Tan δ) Eğitimi

YSA uygulaması ile bir OG kablosunun gerilim sıcaklık ve frekansa bağlı dielektrik kayıp faktörüne ait analizler ortaya konmuştur. Böylece ölçümlerle elde edilen değerlerle YSA eğitimi gerçekleştirilmiş ve ölçüm dışındaki gerilim, sıcaklık ve frekans değerleri için OG kablosunun dielektrik kayıp faktörünün belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Dielektrik kayıp faktörü eğitimi, özellikleri verilen OG kablosunun gerilime, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimi için yapılmıştır.

Gerilime Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Eğitimi

Gerçekleştirilen YSA-1 analizi sonucunda tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün gerilime bağlı değişimi, $f=50$ Hz ve $T=30^{\circ}\text{C}$ için ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.22’de verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerlerinin genel olarak ölçüm sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir. Tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerleri için bağıl hata oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.10’da verilmiştir. Bağıl hata sonuçları içerisinde minimum hata 3,5 kV’da % 0,1134 ve maksimum hata ise 10 kV’da % 1,6416 olarak elde edilmiştir. Dielektrik kayıp faktörü parametresi ($\tan \delta$), kablo dielektrik malzeme kalitesi hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu bölümde yapılan tahmin çalışmaları, yeni üretilmiş bir yüksek gerilim kablosu için gerçekleştirilmiştir. Ancak kablo, işletmede kaldığı süre boyunca yaşlanmaya maruz kalacaktır ve dielektrik malzemenin farklı gerilimlerdeki davranışı da değişecektir. Bu analizle, bir yüksek gerilim kablosuna ait $\tan \delta$ parametresinin farklı gerilim seviyeleri için tahmin edilebilmesi, istenildiğinde yaşlanmış bir kablo üzerinde de dielektrik malzeme davranışının incelenebilmesine ve yeni üretilmiş bir kablo ile kıyaslanabilmesine imkân sağlamaktadır.



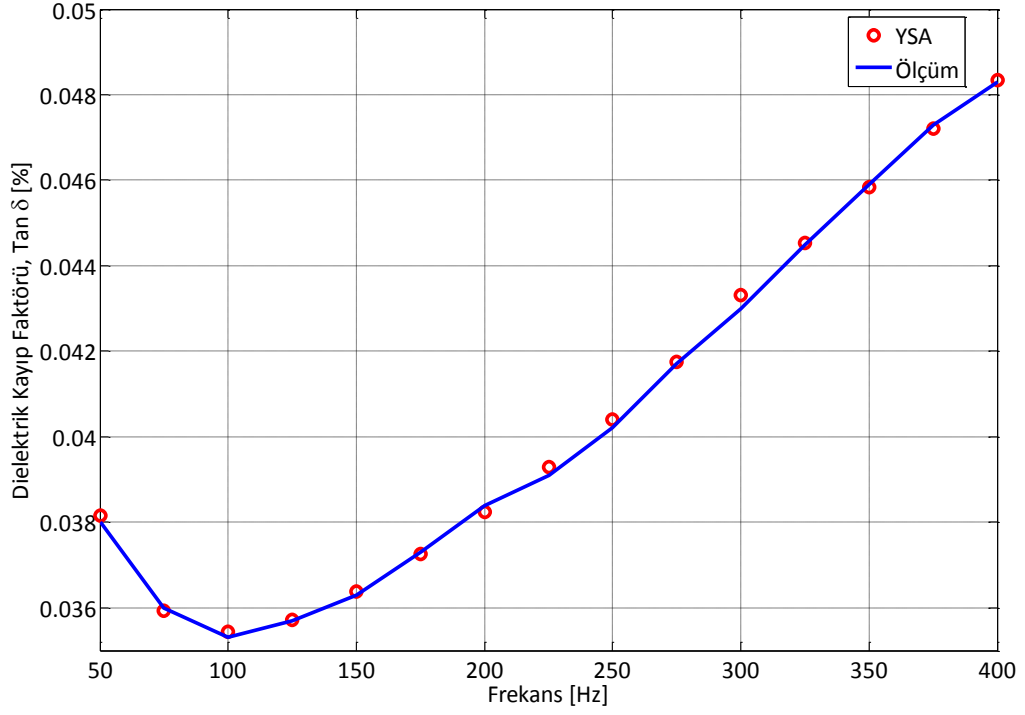
Şekil 4.22 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) gerilime bağlı değişimi (YSA-1, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$)

Çizelge 4.10 YSA-1 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata ($f = 50 \text{ Hz}$, $T = 30^\circ\text{C}$)

Gerilim (U) [kV]	Ölçülen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_0$) [%]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_t$) [%]	Bağıl Hata (H) [%]
0,5	0,0390	0,0395	1,3185
1	0,0379	0,0378	0,2034
1,5	0,0377	0,0379	0,5162
2	0,0382	0,0384	0,4707
2,5	0,0385	0,0382	0,6617
3	0,0385	0,0383	0,5361
3,5	0,0385	0,0385	0,1134
4	0,0385	0,0388	0,7021
4,5	0,0385	0,0386	0,3580
5	0,0385	0,0382	0,6577
5,5	0,0386	0,0382	1,0251
6	0,0386	0,0383	0,7782
6,5	0,0386	0,0385	0,2236
7	0,0386	0,0388	0,6269
7,5	0,0388	0,0391	0,8739
8	0,0391	0,0394	0,8176
8,5	0,0403	0,0398	1,2795
9	0,0406	0,0403	0,7676
9,5	0,0408	0,0409	0,2736
10	0,0409	0,0416	1,6416
10,5	0,0425	0,0421	0,8277
11	0,0421	0,0425	1,0226
11,5	0,0426	0,0427	0,2824
12	0,0430	0,0429	0,3486

Frekansa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Eğitimi

YSA-1 analizi sonucu farklı frekans değerleri için tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün, 12kV nominal gerilim ve $T=50^\circ\text{C}$ sıcaklıkta frekansa bağlı değişimi ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.23’de verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerlerinin genel olarak, ölçüm sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir. Farklı frekanslar için tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerlerine ait bağıl hata oranları Çizelge 4.11’de belirtilmiştir. Sonuç itibarıyla, minimum bağıl hata 175 Hz’de % 0,1110 ve maksimum bağıl hata ise 300 Hz’de % 0,7415 olarak hesaplanmıştır.



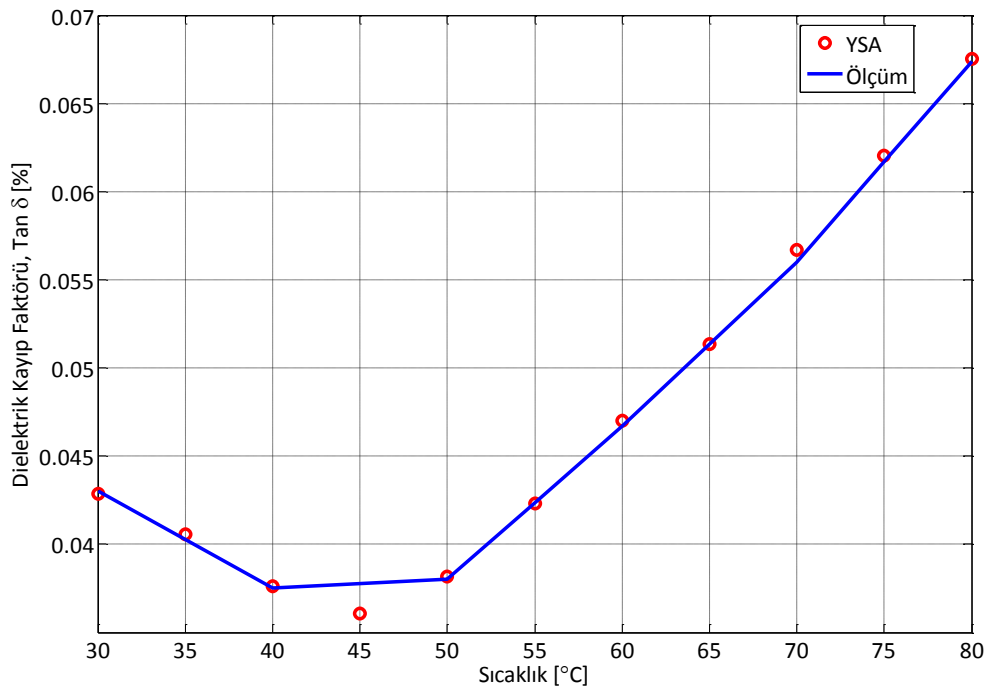
Şekil 4.23 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) frekansa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)

Çizelge 4.11 YSA-1 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)

Frekans (f) [Hz]	Ölçülen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_o$) [%]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_t$) [%]	Bağıl Hata (H) [%]
50	0,0380	0,0381	0,3849
75	0,0360	0,0359	0,2096
100	0,0353	0,0354	0,3879
125	0,0357	0,0357	0,0582
150	0,0363	0,0364	0,2330
175	0,0373	0,0373	0,1110
200	0,0384	0,0382	0,4205
225	0,0391	0,0393	0,4834
250	0,0402	0,0404	0,4814
275	0,0417	0,0418	0,1199
300	0,0430	0,0433	0,7415
325	0,0445	0,0445	0,0894
350	0,0459	0,0458	0,1320
375	0,0473	0,0472	0,1992
400	0,0483	0,0483	0,0790

Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Eğitimi

Şekil 4.24’de, dielektrik kayıp faktörünün YSA-1 analizi sonucu elde edilen tahmin değerleri ölçüm sonuçları ile birlikte verilmiştir ($U=12$ kV, $f=50$ Hz). Elde edilen tahmin sonuçları genel olarak ölçüm verileri ile uyumludur. Bu eğitim sonucunda elde edilen minimum bağıl hata 65°C ’de % 0,0012 ve maksimum bağıl hata ise 45°C ’de % 4,4885 olarak hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklar için hesaplanan bağıl hata değerleri Çizelge 4.12’de belirtilmiştir. 45°C ’de elde edilen bağıl hata değeri, diğer hata oranlarından biraz yüksek olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni, eğitimde kullanılan transfer fonksiyonlarının (tanjant sigmoid, log sigmoid) karakteristik özelliklerine göre eğri uydurulmasıdır. Şekil 4.24’deki ölçüm sonuçlarının sıcaklığa bağlı değişimine bakıldığında, artan sıcaklıkla birlikte dielektrik kayıp faktöründe meydana gelen değişimin, minimum noktası 45°C ’de bulunan ikinci mertebeden bir fonksiyona benzediği görülmektedir. 45°C ’de ölçüm gerçekleştirilmediği için, bu noktadaki referans (ölçülen) dielektrik kayıp faktörü değeri 40°C ve 50°C ’de ölçülen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır. 45°C ’de bir ölçüm gerçekleştirilmesi durumunda, bağıl hata oranının daha düşük bir değer alacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.24 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-1, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Çizelge 4.12 YSA-1 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata (U = 12 kV, f = 50 Hz)

Sıcaklık (T) [°C]	Ölçülen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_o$) [%]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_t$) [%]	Bağıl Hata (H) [%]
30	0,0430	0,0429	0,3486
35	0,0403	0,0406	0,7626
40	0,0375	0,0376	0,3253
45	0,0378	0,0361	4,4885
50	0,0380	0,0381	0,3849
55	0,0424	0,0423	0,1177
60	0,0467	0,0470	0,6763
65	0,0514	0,0513	0,0012
70	0,0560	0,0567	1,2573
75	0,0617	0,0620	0,5583
80	0,0674	0,0675	0,2214

4.5.2 YSA-2 Uygulaması

Bu uygulama, YSA-1 uygulaması ile aynı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak YSA-2 uygulamasında kullanılan eğitim verilerinin sayısı, tüm eğitim verilerinin %25'i kadardır. Eğitim için 12 adet gerilim verisi (1kV'dan - 12kV'a kadar gerilim değeri, 1kV'luk artışlarla), 8 adet frekans verisi (50Hz'den – 400Hz'e kadar frekans değeri, 50Hz'lik artışlarla) ve 6 adet sıcaklık verisine (30°C'den - 80°C'e kadar sıcaklık değeri, 10°C'lik artışlarla) karşılık gelen ölçüm sonuçları kullanılmıştır (Çizelge 4.13). Böylelikle daha az eğitim verisi kullanarak ya da daha az ölçüm gerçekleştirerek tahmin sonuçlarındaki hatanın nasıl etkilendiğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. YSA-2'de kullanılan eğitim algoritması ile baz değerler (Çizelge 4.2) ve sunulan değişim eğrileri bir önceki YSA uygulaması ile aynıdır.

Çizelge 4.13 YSA-2 eğitiminde kullanılan ölçüm parametreleri

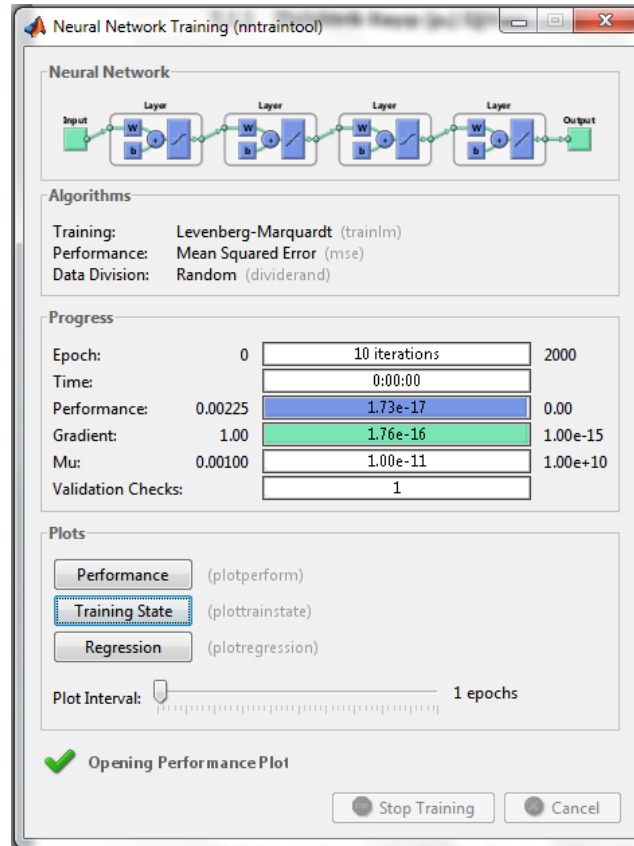
Elde Edilen Parametreler	Değişken U				Değişken f				Değişken T			
	Başlangıç Değeri	Bitiş Değeri	Artış Değeri	Toplam Veri Sayısı	Başlangıç Değeri	Bitiş Değeri	Artış Değeri	Toplam Veri Sayısı	Başlangıç Değeri	Bitiş Değeri	Artış Değeri	Toplam Veri Sayısı
Dielektrik Kayıp	1 kV	12 kV	1 kV	12	50 Hz	400 Hz	50 Hz	8	30°C	80°C	10°C	6
Paralel Eşdeğer Kapasite												
Dielektrik Kayıp Faktörü												

4.5.2.1 Dielektrik Kayıp (p_k) Eğitimi

YSA uygulaması ile bir OG kablosunun gerilim sıcaklık ve frekansa bağlı dielektrik kaybına ait analizler ortaya konmuştur. Böylece ölçümlerle elde edilen değerlerle YSA eğitimi gerçekleştirilmiş ve ölçüm dışındaki gerilim, sıcaklık ve frekans değerleri için OG kablosunun dielektrik kaybının belirlenmesi mümkün olmaktadır.

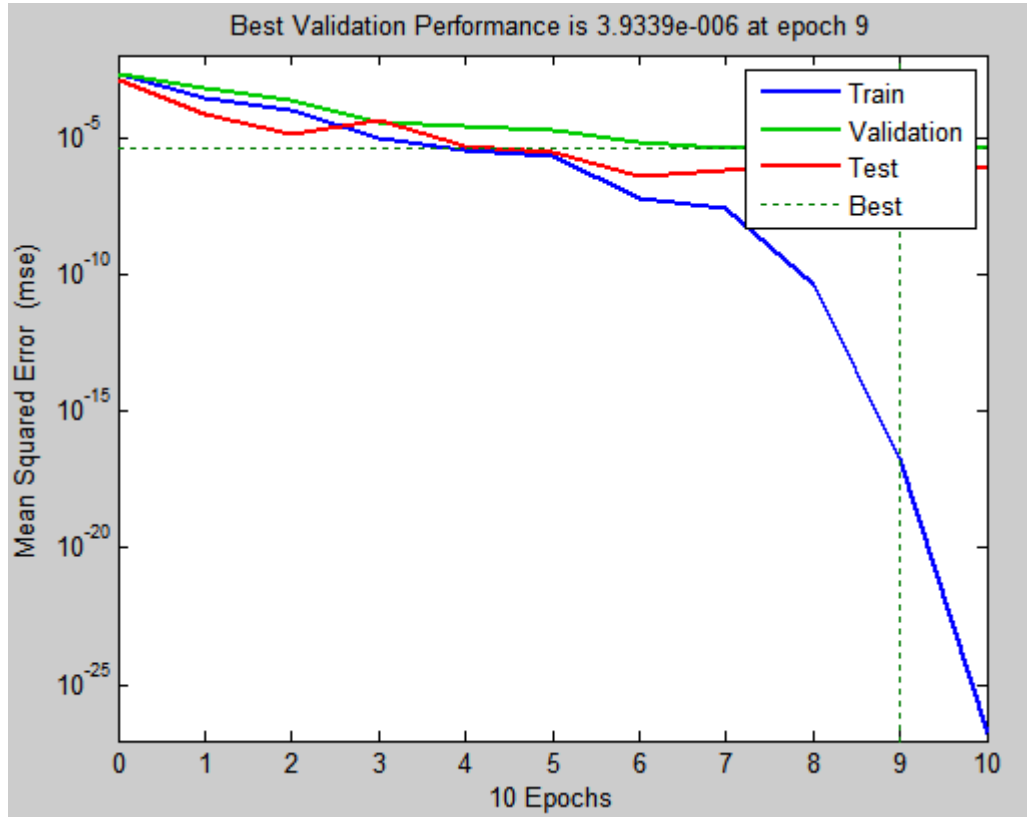
Dielektrik kayıp eğitimi, özellikleri verilen OG kablosunun gerilime, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimi için yapılmıştır.

Bu bölümde, ölçüm verilerinin %25'inden faydalanılarak, dielektrik kayıp (p_k) parametresinin ara değerlerinin tahmin edilebilmesi için eğitim yapılmıştır. Dielektrik kayıp eğitimi için "Levenberg-Marquardt" algoritması kullanılmış ve 10 iterasyon gerçekleştirilmiştir. YSA on iki giriş katmanı, on iki gizli katman ve bir çıkış katmanından meydana gelmektedir. Bu YSA uygulamasına ait detayların yer aldığı ara yüz Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25 YSA-2 uygulamasına ait katmanların gösterimi

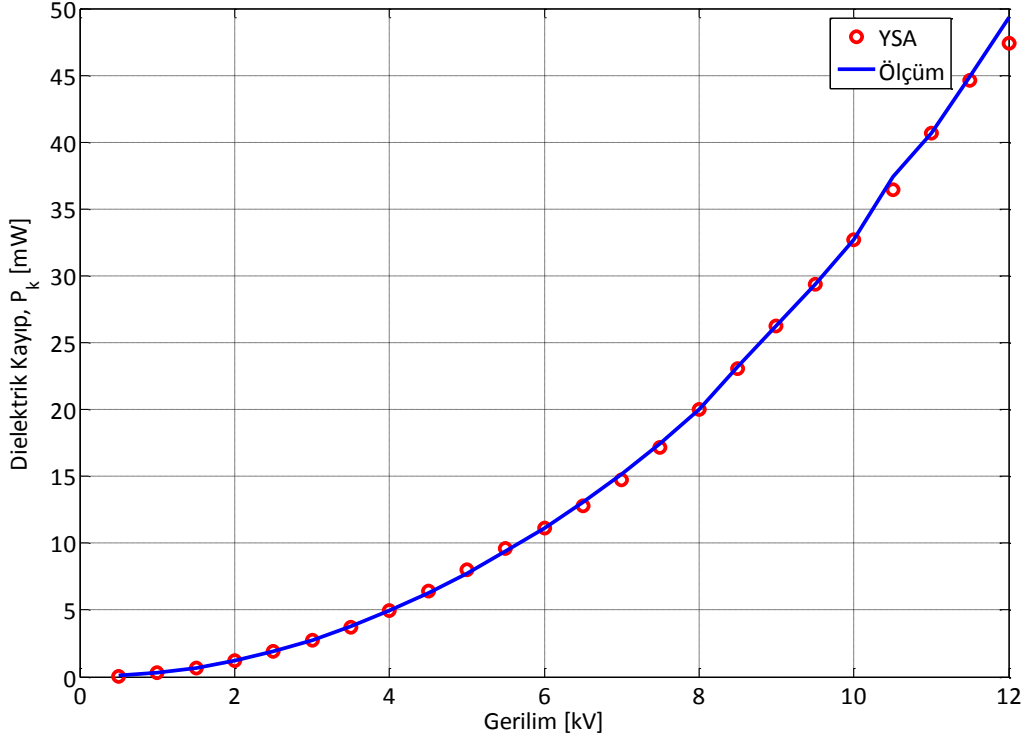
Gizli katmanlar içerisinde giriş katmanından çıkış katmanına doğru tanjant sigmoid ve lineer transfer fonksiyonları kullanılmıştır. YSA-2 ağının eğitimi sonucunda en iyi ağ performansı (kareseel ortalama hata) $1,73 \cdot 10^{-17}$ olarak elde edilmiştir. Eğitim boyunca eğitim ve test datalarının kareseel ortalama hata değeriinin değışimi Şekil 4.26’da verilmiştir. Eğitim ve test dataları arasındaki kareseel ortalama hata oranlarının en düşük olduğu durum 9. iterasyonda gerçekleşmiştir.



Şekil 4.26 YSA-2 ağının eğitimi boyunca ortalama kareseel hata değeriinin değışimi

Gerilime Bağlı Dielektrik Kayıp Eğitimi

Dielektrik kaybın çıktı olarak elde edilmesi için YSA ile eğitim işlemi yapılmış ve sonuçlar üzerinde hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.27’de, $f=50$ Hz ve $T=30^{\circ}\text{C}$ ’de YSA-2 analizi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen dielektrik kayıp (p_k) parametresinin gerilime bağlı değışimi verilmiştir.



Şekil 4.27 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) gerilime bağlı değişimi (YSA-2, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$)

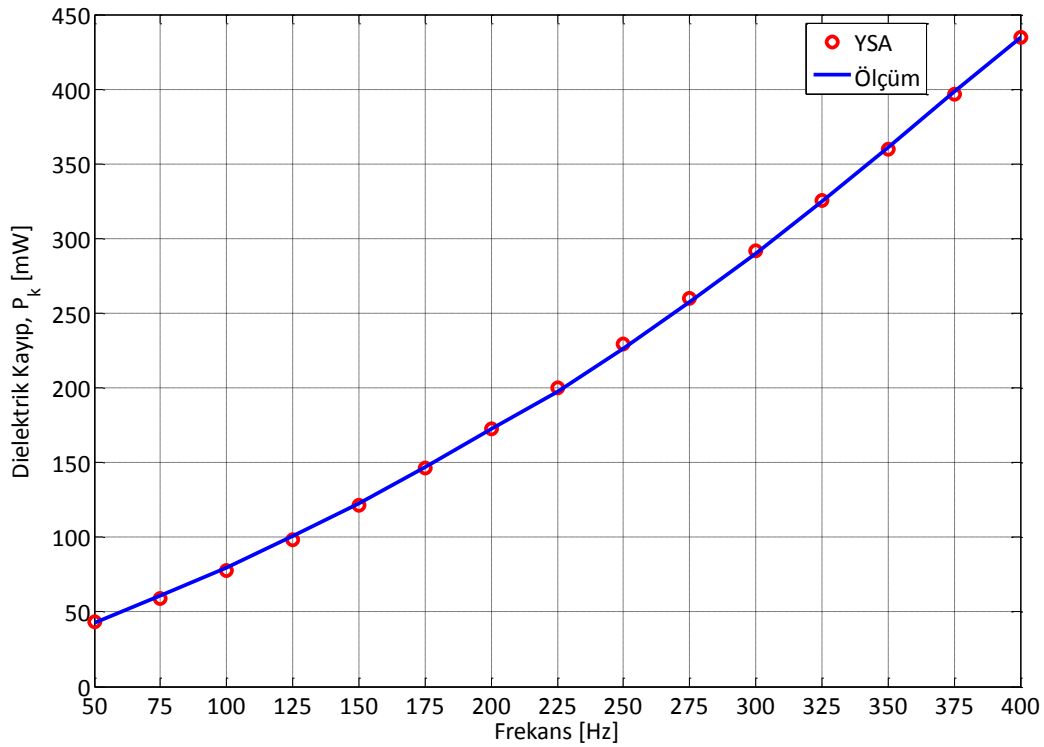
Çizelge 4.14'den görüldüğü üzere, tahmin sonuçlarına ait bağıl hata oranları genel olarak oldukça küçüktür. Bu eğitim sonucunda elde edilen maksimum bağıl hata 0,5 kV gerilimde % 19,7830 ve minimum bağıl hata 11 kV gerilimde % 0,0000 olmuştur. 0,5 kV gerilimdeki dielektrik kayıp değerine ait bağıl hata diğer gerilim seviyelerine göre yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni, 0,5 kV gerilimde ölçülen dielektrik kayıp değerinin eğitim datası içerisinde yer almamasıdır. Burada, eğitim veri kümesinin dışında olan, diğer bir deyişle YSA'na öğretilmeyen bir verinin tahmini gerçekleştirilmiştir. YSA içerisindeki katsayılar/ağırlıklar eğitime giren verilere göre oluşturulduğu için, eğitimin dışında kalan bu değerdeki (0,5 kV) bağıl hata oranı da diğer tahmin sonuçlarına kıyasla yüksek olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, 0,5 kV gerilimde hesaplanan bağıl hata oranının yüksek olmasına karşılık, bu gerilim seviyesi için tahmin edilen dielektrik kayıp değeri 0,0642 mW'dır. Burada, ölçüm değeri (0,08 mW) ile tahmin edilen değer (0,0642 mW) arasında 0,0158 mW'lık oldukça küçük bir fark bulunmaktadır. Bağıl hata oranının bu gerilim seviyesinde yüksek bir değer olarak elde edilmesinin bir diğer nedeni de ölçüm değerinin oldukça küçük olmasıdır.

Çizelge 4.14 YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağıl hata ($f = 50 \text{ Hz}$, $T = 30^\circ\text{C}$)

Gerilim (U) [kV]	Ölçülen Dielektrik Kayıp ($p_{k\ddot{o}}$) [mW]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp (p_{kt}) [mW]	Bağıl Hata (H) [%]
0,5	0,08	0,064	19,7830
1	0,30	0,291	2,9162
1,5	0,67	0,661	1,4004
2	1,21	1,210	0,0016
2,5	1,91	1,926	0,8348
3	2,76	2,760	0,0011
3,5	3,78	3,726	1,4215
4	4,94	4,940	0,0005
4,5	6,27	6,433	2,5983
5	7,73	8,037	3,9705
5,5	9,37	9,597	2,4204
6	11,14	11,140	0,0002
6,5	13,05	12,807	1,8591
7	15,13	14,768	2,3913
7,5	17,46	17,158	1,7273
8	19,98	19,980	0,0001
8,5	23,23	23,077	0,6577
9	26,25	26,250	0,0001
9,5	29,35	29,399	0,1655
10	32,68	32,680	0,0001
10,5	37,39	36,430	2,5665
11	40,65	40,650	0,0000
11,5	44,90	44,592	0,6859
12	49,36	47,431	3,9089

Frekansa Bağlı Dielektrik Kayıp Eğitimi

YSA-2 analizi sonucu farklı frekanslar için tahmin edilen dielektrik kaybın, 12kV nominal gerilim ve $T=50^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta frekansa bağlı değişimi, ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.28’de verilmiştir. Genellikle, tahmin edilen dielektrik kayıp değerlerinin tümünün ölçüm değerleri ile örtüştüğü görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, farklı frekanslar için tahmin edilen dielektrik kayıp (p_k) değerlerine ait bağıl hata oranları Çizelge 4.15’de verilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçlarına göre, minimum bağıl hata 325 Hz’de % 0,0964 ve maksimum bağıl hata ise 100 Hz’de % 2,4135 olarak hesaplanmıştır.



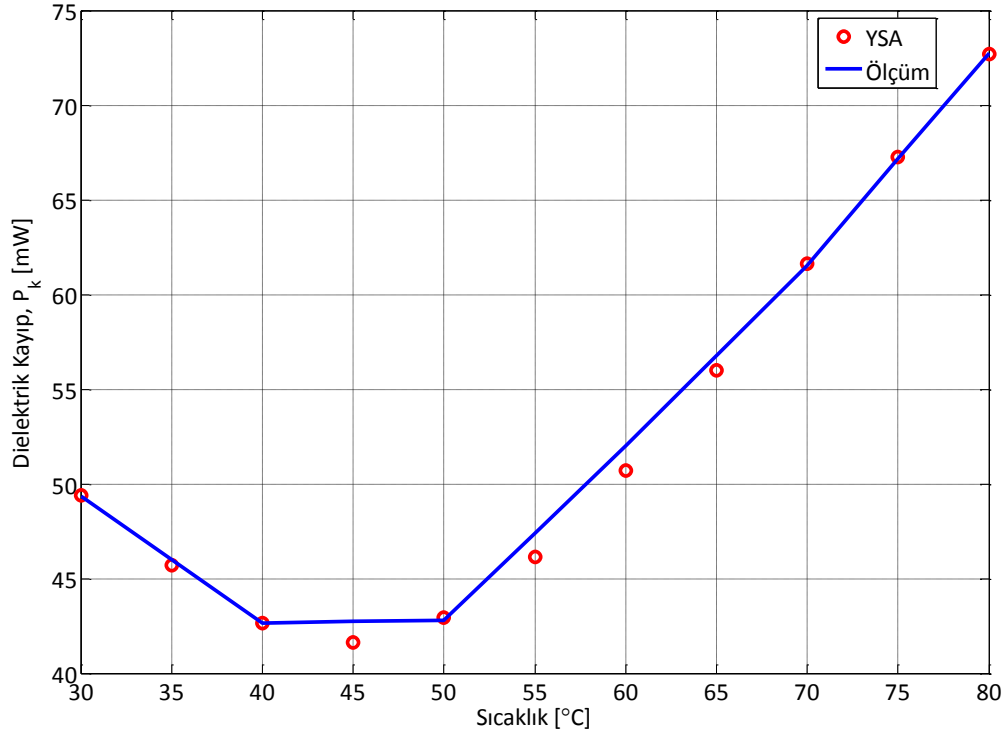
Şekil 4.28 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) frekansa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12 \text{ kV}$, $T = 50^{\circ}\text{C}$)

Çizelge 4.15 YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12 \text{ kV}$, $T = 50^\circ\text{C}$)

Frekans (f) [Hz]	Ölçülen Dielektrik Kayıp ($p_{k\phi}$) [mW]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp (p_{kt}) [mW]	Bağıl Hata (H) [%]
50	42,77	43,181	0,9600
75	60,64	59,176	2,4135
100	79,37	77,709	2,0930
125	100,58	98,540	2,0285
150	122,53	121,416	0,9095
175	146,76	146,103	0,4480
200	172,37	172,409	0,0225
225	197,75	200,196	1,2368
250	226,13	229,380	1,4374
275	257,42	259,932	0,9758
300	290,03	291,865	0,6328
325	324,92	325,233	0,0964
350	360,92	360,120	0,2215
375	398,72	396,635	0,5230
400	434,46	434,902	0,1017

Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Kayıp Eğitimi

YSA-2 analizi sonucu farklı sıcaklıklar için tahmin edilen dielektrik kaybın, 12kV nominal gerilim ve $f=50 \text{ Hz}$ frekansta sıcaklığa bağlı değişimi ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.29'da verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp değerlerinin genel olarak, ölçüm sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Farklı sıcaklıklar için tahmin edilen dielektrik kayıp (p_k) değerlerine ait bağıl hata oranları Çizelge 4.16'da belirtilmiştir. Sonuç olarak, minimum bağıl hata 30°C 'de % 0,0253 ve maksimum bağıl hata ise 55°C 'de % 2,5951 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.29 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kaybın (p_k) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Çizelge 4.16 YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Sıcaklık (T) [°C]	Ölçülen Dielektrik Kayıp (p_{k0}) [mW]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp (p_{kt}) [mW]	Bağıl Hata (H) [%]
30	49,36	49,372	0,0253
35	46,00	45,702	0,6479
40	42,64	42,662	0,0524
45	42,71	41,625	2,5301
50	42,77	42,927	0,3673
55	47,39	46,155	2,5951
60	52,00	50,701	2,4983
65	56,77	56,006	1,3375
70	61,53	61,627	0,1572
75	67,14	67,255	0,1713
80	72,75	72,714	0,0490

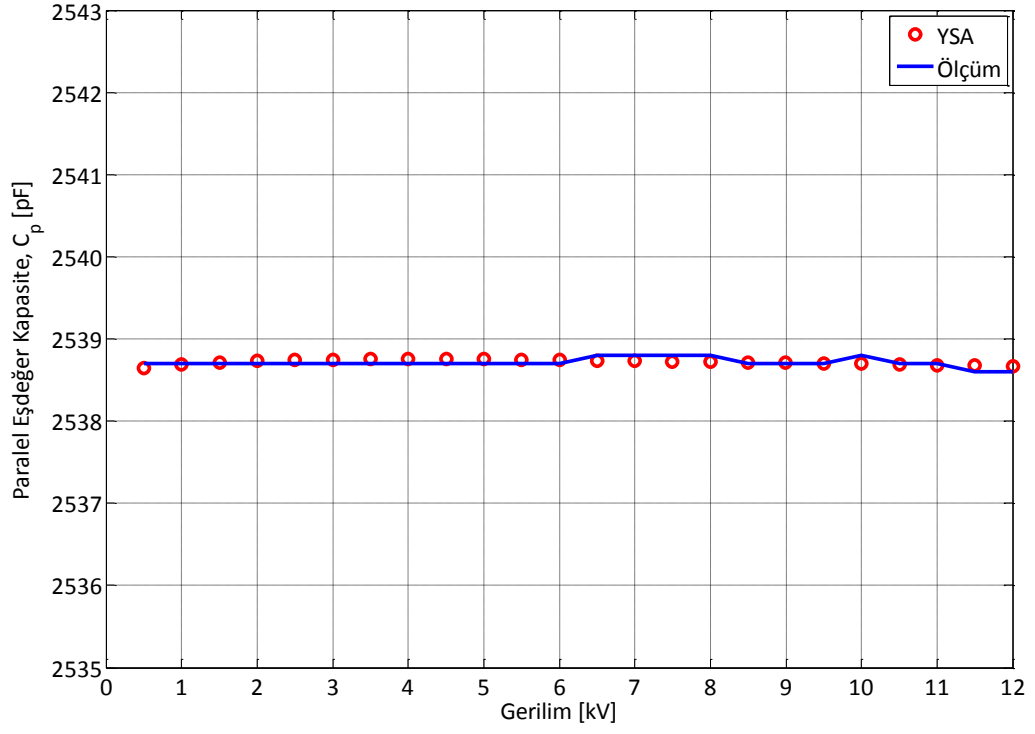
4.5.2.2 Paralel Eşdeğer Kapasite (C_p) Eğitimi

YSA uygulaması ile bir OG kablosunun gerilim sıcaklık ve frekansa bağlı paralel eşdeğer kapasitesine ait analizler ortaya konmuştur. Böylece ölçümlerle elde edilen değerlerle YSA eğitimi gerçekleştirilmiş ve ölçüm dışındaki gerilim, sıcaklık ve frekans değerleri için OG kablosunun paralel eşdeğer kapasitesinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Paralel eşdeğer kapasite eğitimi, özellikleri verilen OG kablosunun gerilime, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimi için yapılmıştır.

Gerilime Bağlı Paralel Eşdeğer Kapasite Eğitimi

$f=50$ Hz ve $T=30^{\circ}\text{C}$ 'de YSA eğitimi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen paralel eşdeğer kapasite (C_p) parametresinin gerilime bağlı değişimi Şekil 4.30'da verilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçlarının, genel itibarıyla ölçüm verilerine yakın olduğu şekil üzerinden görülebilmektedir. Belirtilen şartlarda ($f=50$ Hz, $T=30^{\circ}\text{C}$) paralel eşdeğer kapasite değerinin pek az değişmesi nedeniyle, YSA eğitimi sonuçları da ölçülen değerlere yakın olarak tahmin edilebilmiştir. Tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite sonuçlarına ait bağıl hata değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.17'de verilmiştir. Elde edilen bağıl hata sonuçlarına göre, minimum bağıl hata değeri 9,5 kV'da % 0,0001 ve maksimum bağıl hata değeri 10 kV'da % 0,0041'dir



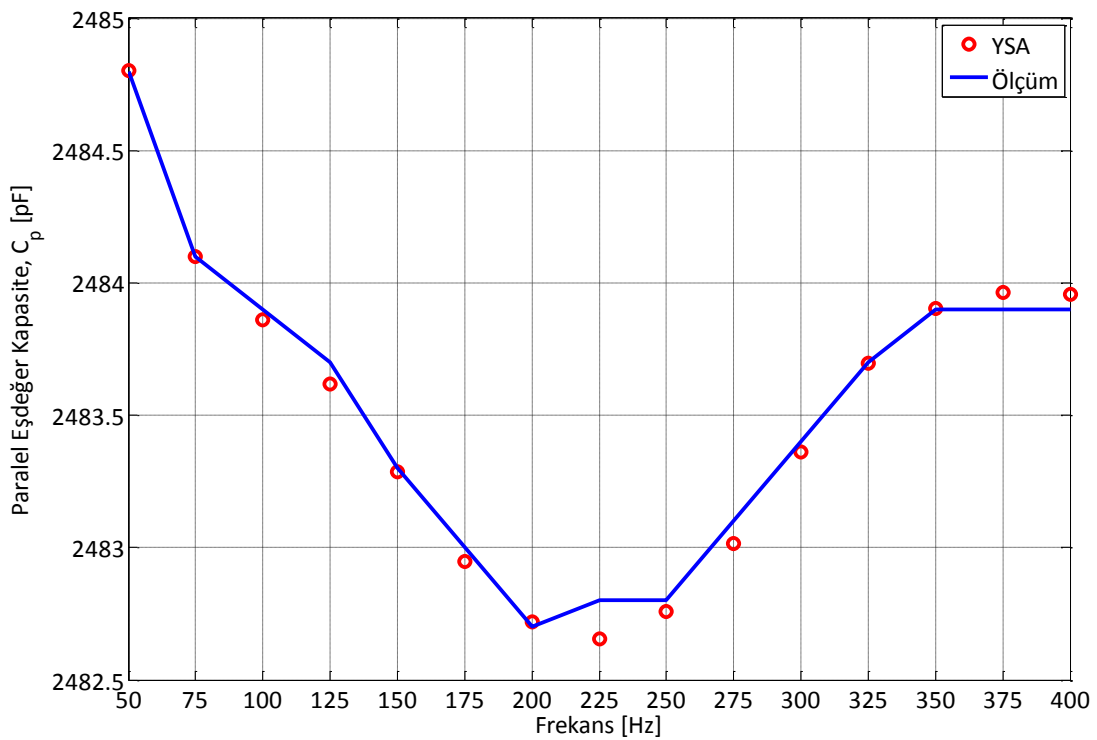
Şekil 4.30 Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) gerilime bağlı değişimi (YSA-2, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$)

Çizelge 4.17 YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($f = 50 \text{ Hz}$, $T = 30^\circ\text{C}$)

Gerilim (U) [kV]	Ölçülen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Tahmin Edilen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Bağıl Hata (H) [%]
0,5	2538,70	2538,645	0,0022
1	2538,70	2538,684	0,0006
1,5	2538,70	2538,712	0,0005
2	2538,70	2538,730	0,0012
2,5	2538,70	2538,742	0,0017
3	2538,70	2538,749	0,0019
3,5	2538,70	2538,753	0,0021
4	2538,70	2538,754	0,0021
4,5	2538,70	2538,753	0,0021
5	2538,70	2538,751	0,0020
5,5	2538,70	2538,747	0,0019
6	2538,70	2538,743	0,0017
6,5	2538,80	2538,738	0,0024
7	2538,80	2538,733	0,0027
7,5	2538,80	2538,727	0,0029
8	2538,80	2538,721	0,0031
8,5	2538,70	2538,715	0,0006
9	2538,70	2538,708	0,0003
9,5	2538,70	2538,702	0,0001
10	2538,80	2538,695	0,0041
10,5	2538,70	2538,688	0,0005
11	2538,70	2538,681	0,0007
11,5	2538,60	2538,674	0,0029
12	2538,60	2538,667	0,0027

Frekansa Bağlı Paralel Eşdeğer Kapasite Eğitimi

Tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite parametresinin, 12kV nominal gerilim ve $T=50^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta frekansa bağlı değişimi ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.31’de verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp değerlerinin tümünün genel olarak ölçüm değerleri ile örtüştüğü görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, farklı frekanslar için tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite değerlerine ait bağıl hata oranları Çizelge 4.18’de verilmiştir. Minimum bağıl hata 75 Hz’de % 0,0001 ve maksimum bağıl hata ise 225 Hz’de % 0,0059 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.31 Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) frekansa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12 \text{ kV}$, $T = 50^{\circ}\text{C}$)

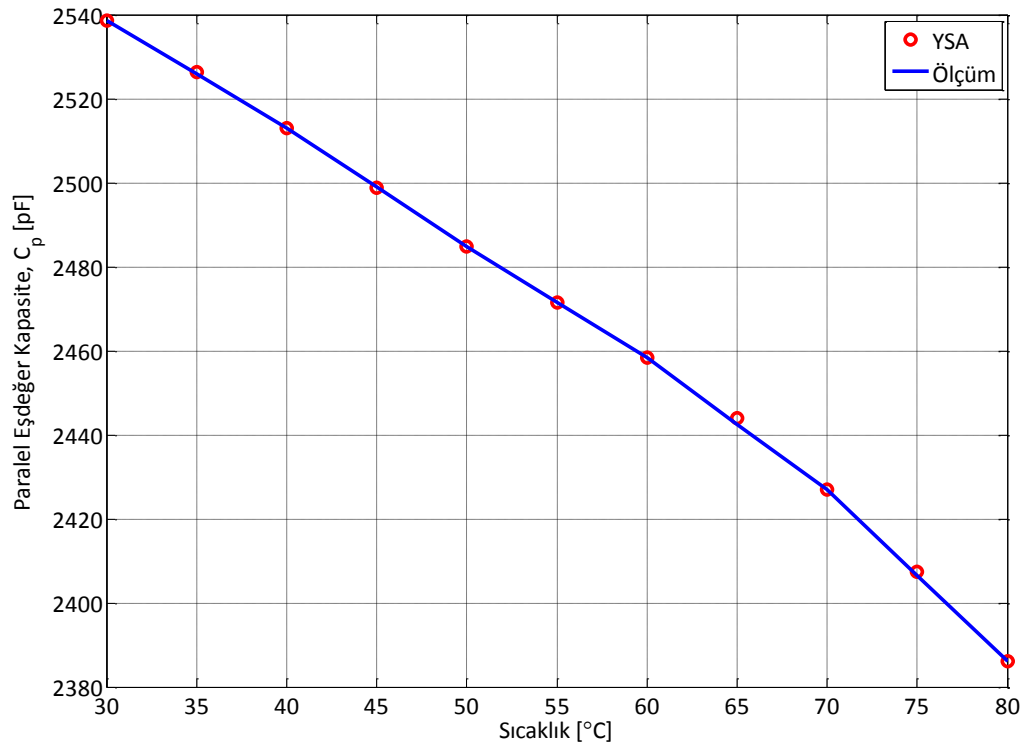
Çizelge 4.18 YSA-2 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata (U = 12 kV, T = 50°C)

Frekans (f) [Hz]	Ölçülen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Tahmin Edilen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Bağıl Hata (H) [%]
50	2484,80	2484,802	0,0001
75	2484,10	2484,099	0,0000
100	2483,90	2483,860	0,0016
125	2483,70	2483,618	0,0033
150	2483,30	2483,285	0,0006
175	2483,00	2482,949	0,0021
200	2482,70	2482,720	0,0008
225	2482,80	2482,655	0,0059
250	2482,80	2482,760	0,0016
275	2483,10	2483,015	0,0034
300	2483,40	2483,363	0,0015
325	2483,70	2483,696	0,0001
350	2483,90	2483,904	0,0002
375	2483,90	2483,963	0,0025
400	2483,90	2483,957	0,0023

Sıcaklığa Bağlı Paralel Eşdeğer Kapasite Eğitimi

YSA eğitimi sonucunda $f=50$ Hz ve $U=12$ kV’da tahmin edilen ve ölçülen paralel eşdeğer kapasite (C_p) parametresinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.32’de verilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçlarının, genel itibariyle ölçüm verilerine yakın olduğu şekil üzerinden görülebilmektedir. Tahmin edilen paralel eşdeğer kapasite sonuçlarına ait bağıl hata değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.19’da verilmiştir. Elde edilen bağıl hata

sonuçlarına göre, minimum bağıl hata değeri 55°C’de % 0,0001 ve maksimum bağıl hata değeri 65°C’de % 0,0506’dur.



Şekil 4.32 Ölçülen ve tahmin edilen paralel eşdeğer kapasitenin (C_p) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Çizelge 4.19 YSA-2 analizi sonucu hesaplanan paralel eşdeğer kapasite tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$)

Sıcaklık (T) [°C]	Ölçülen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Tahmin Edilen Paralel Eşdeğer Kapasite (C_{pt}) [pF]	Bağıl Hata (H) [%]
30	2538,60	2538,667	0,0027
35	2525,80	2526,374	0,0227
40	2513,00	2513,047	0,0019
45	2498,90	2498,813	0,0035
50	2484,80	2484,802	0,0001
55	2471,60	2471,603	0,0001
60	2458,40	2458,436	0,0015
65	2442,70	2443,937	0,0506
70	2427,00	2427,032	0,0013
75	2406,60	2407,473	0,0363
80	2386,20	2386,147	0,0022

4.5.2.3 Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$) Eğitimi

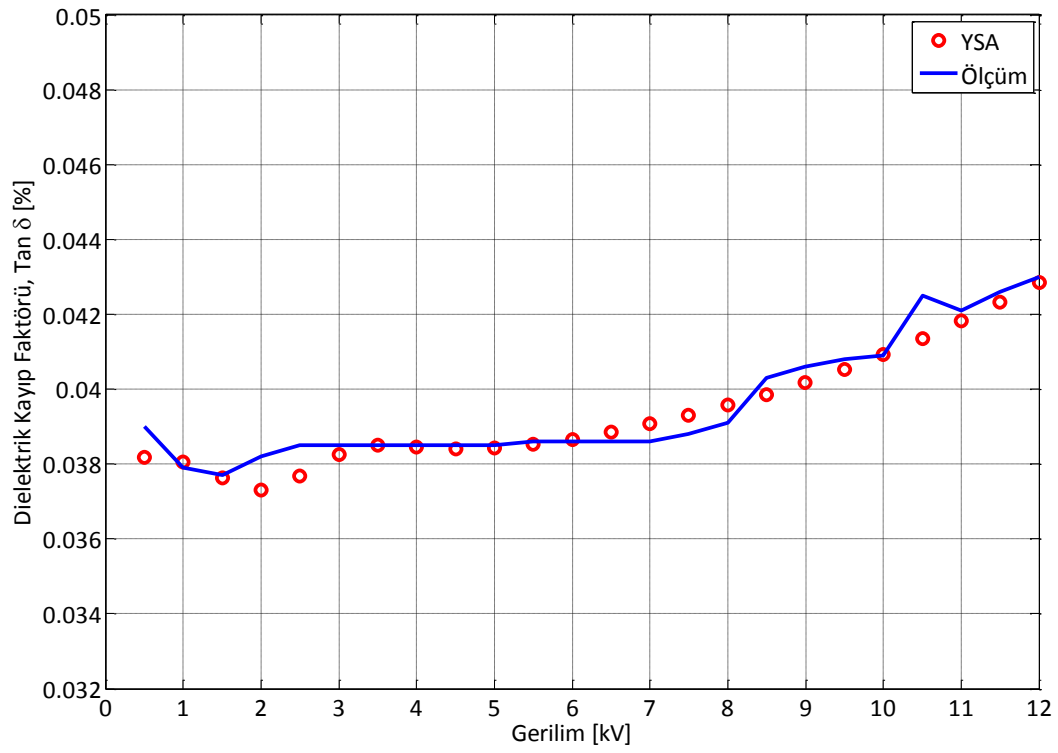
YSA uygulaması ile bir OG kablosunun gerilim sıcaklık ve frekansa bağlı dielektrik kayıp faktörüne ait analizler ortaya konmuştur. Böylece ölçümlerle elde edilen değerlerle YSA eğitimi gerçekleştirilmiş ve ölçüm dışındaki gerilim, sıcaklık ve frekans değerleri için OG kablosunun dielektrik kayıp faktörünün belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Dielektrik kayıp faktörü eğitimi, özellikleri verilen OG kablosunun gerilime, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimi için yapılmıştır.

Gerilime Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Eğitimi

Gerçekleştirilen YSA-2 analizi sonucunda tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün gerilime bağlı değişimi, $f=50 \text{ Hz}$ ve $T=30^\circ\text{C}$ için ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.33’de verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerlerinin genel olarak ölçüm sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir. Tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerleri için bağıl hata oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.20’de verilmiştir. Bağıl hata

sonuçları içerisinde minimum hata 3,5 kV'da % 0,0258 ve maksimum hata ise 10,5 kV'da % 2,6831 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.33 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) gerilime bağlı değişimi (YSA-2, $f = 50$ Hz, $T = 30^\circ\text{C}$)

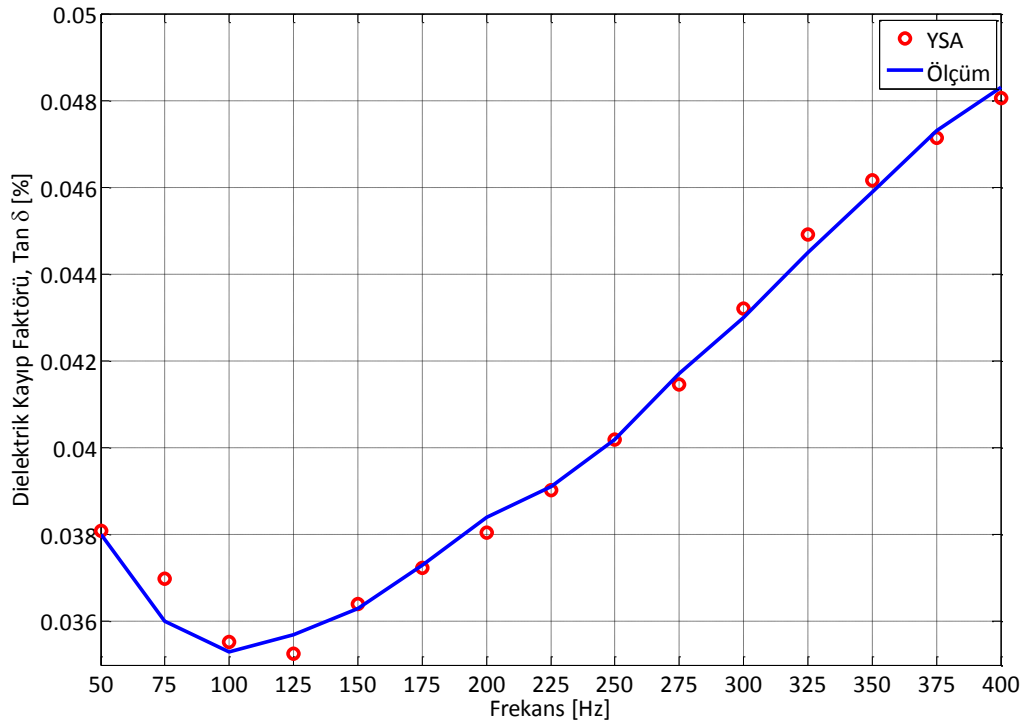
Çizelge 4.20 YSA-2 eğitimi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata ($f = 50 \text{ Hz}$, $T = 30^\circ\text{C}$)

Gerilim (U) [kV]	Ölçülen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_0$) [%]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_t$) [%]	Bağıl Hata (H) [%]
0,5	0,0390	0,0382	2,1234
1	0,0379	0,0381	0,4235
1,5	0,0377	0,0376	0,1976
2	0,0382	0,0373	2,3291
2,5	0,0385	0,0377	2,1034
3	0,0385	0,0383	0,6239
3,5	0,0385	0,0385	0,0258
4	0,0385	0,0385	0,0912
4,5	0,0385	0,0384	0,2496
5	0,0385	0,0384	0,1988
5,5	0,0386	0,0385	0,2158
6	0,0386	0,0387	0,1685
6,5	0,0386	0,0389	0,6569
7	0,0386	0,0391	1,2210
7,5	0,0388	0,0393	1,3219
8	0,0391	0,0396	1,2177
8,5	0,0403	0,0399	1,0847
9	0,0406	0,0402	1,0344
9,5	0,0408	0,0405	0,6541
10	0,0409	0,0409	0,0621
10,5	0,0425	0,0414	2,6831
11	0,0421	0,0418	0,6370
11,5	0,0426	0,0423	0,6251
12	0,0430	0,0429	0,3303

Frekansa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Eğitimi

YSA-2 analizi sonucu farklı frekans değerleri için tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün, 12kV nominal gerilim ve $T=50^\circ\text{C}$ sıcaklıkta frekansa bağlı değişimi ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 4.34’de verilmiştir. Tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerlerinin genel olarak, ölçüm sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir. Farklı frekanslar için tahmin edilen dielektrik kayıp faktörü değerlerine ait bağıl hata oranları

Çizelge 4.21’de belirtilmiştir. Sonuç itibariyle, minimum bağıl hata 400 Hz’de % 0,0713 ve maksimum bağıl hata ise 75 Hz’de % 1,4859 olarak hesaplanmıştır.



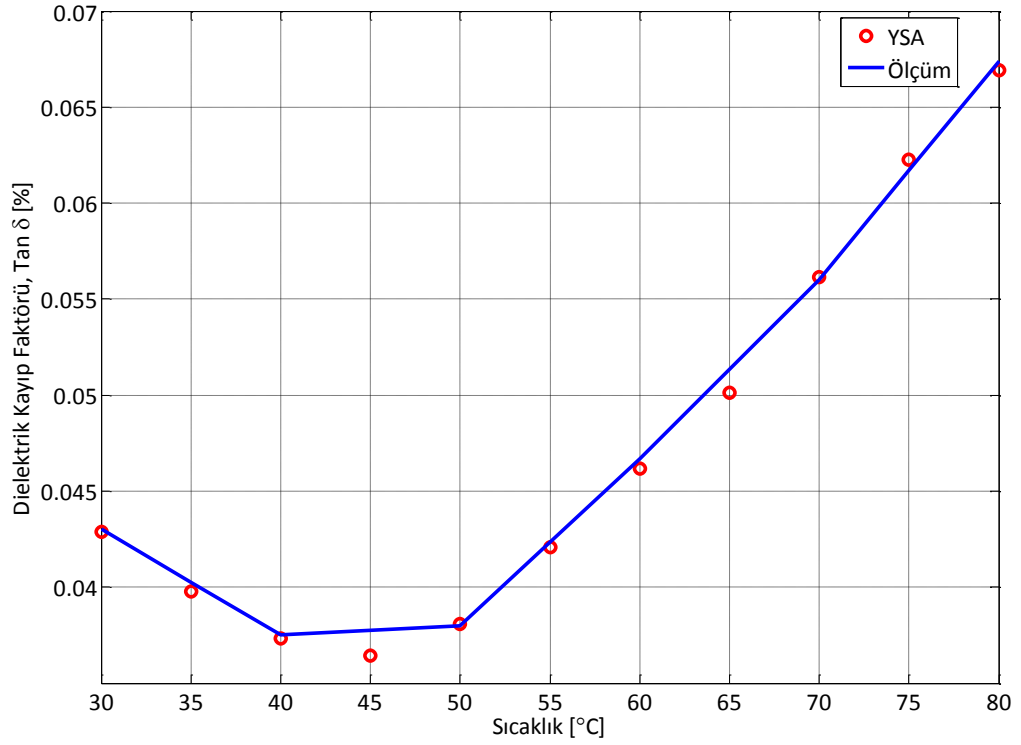
Şekil 4.34 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) frekansa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $T = 50^\circ\text{C}$)

Çizelge 4.21 YSA-2 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata (U = 12 kV, T = 50°C)

Frekans (f) [Hz]	Ölçülen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_o$) [%]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_t$) [%]	Bağıl Hata (H) [%]
50	0,0380	0,0381	0,1951
75	0,0360	0,0365	1,4859
100	0,0353	0,0356	0,8475
125	0,0357	0,0355	0,4715
150	0,0363	0,0362	0,3384
175	0,0373	0,0371	0,4556
200	0,0384	0,0381	0,6749
225	0,0391	0,0392	0,2652
250	0,0402	0,0404	0,4032
275	0,0417	0,0416	0,2068
300	0,0430	0,0429	0,1220
325	0,0445	0,0444	0,3337
350	0,0459	0,0458	0,2889
375	0,0473	0,0471	0,4249
400	0,0483	0,0483	0,0713

Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Eğitimi

Şekil 4.35’de, dielektrik kayıp faktörünün YSA-2 analizi sonucu elde edilen tahmin değerleri ölçüm sonuçları ile birlikte verilmiştir (U=12 kV, f=50 Hz). Elde edilen tahmin sonuçları genel olarak ölçüm verileri ile uyumludur. Bu eğitim sonucunda elde edilen minimum bağıl hata 50°C’de % 0,0195 ve maksimum bağıl hata ise 45°C’de % 3,5438 olarak hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklar için hesaplanan bağıl hata değerleri Çizelge 4.22’de belirtilmiştir.



Şekil 4.35 Ölçülen ve tahmin edilen dielektrik kayıp faktörünün ($\tan \delta$) sıcaklığa bağlı değişimi (YSA-2, $U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Çizelge 4.22 YSA-2 analizi sonucu hesaplanan dielektrik kayıp faktörü tahminlerine ait bağıl hata ($U = 12$ kV, $f = 50$ Hz)

Sıcaklık (T) [°C]	Ölçülen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_o$) [%]	Tahmin Edilen Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta_t$) [%]	Bağıl Hata (H) [%]
30	0,0430	0,0429	0,3303
35	0,0403	0,0398	1,2290
40	0,0375	0,0374	0,3988
45	0,0378	0,0364	3,5438
50	0,0380	0,0381	0,1951
55	0,0424	0,0421	0,6093
60	0,0467	0,0462	1,0888
65	0,0514	0,0501	2,3540
70	0,0560	0,0561	0,2512
75	0,0617	0,0623	0,9143
80	0,0674	0,0669	0,7210

4.6 YSA Sonuçlarının Değerlendirilmesi

YSA-1 uygulamasında ölçüm verilerinin tümü, YSA-2 uygulamasında ise ölçüm verilerinin %25'i eğitim için kullanılmış ve analiz sonucunda elde edilen çıktılar ölçüm verileri ile kıyaslanmıştır. Her iki YSA eğitimi de, dielektrik kayıp (p_k), paralel eşdeğer kapasite (C_p) ve dielektrik kayıp faktörü ($\tan \delta$) parametrelerinin farklı gerilim, frekans ve sıcaklıklardaki değerlerinin tahmin edilebilmesi için gerçekleştirilmiştir.

Uygulama sonucunda elde edilen tahmin verilerinin bağıl hata oranları hesaplanmış ve sonuçların genel olarak ölçüm verileri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Hesaplamalar sonucunda elde edilen maksimum ve minimum bağıl hata oranları Çizelge 4.20 ve 5.21'de belirtilmiştir. Bağıl hata oranlarının genel olarak % 1'in altında olması, tahmin edilen değerlerin ölçüm verilerine oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

Eğitim için daha az verinin kullanıldığı YSA-2 ağının çıktıları, tüm eğitim datalarının kullanıldığı YSA-1 ağının sonuçları ile kıyaslandığında, hesaplanan bağıl hata oranlarının normal olarak YSA-2 ağında biraz daha yüksek elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni, YSA eğitiminde kullanılan eğitim veri sayısının az olmasıdır. YSA-2 ağında daha az eğitim verisi kullanılmasına rağmen elde edilen sonuçlar, YSA-1 ağının sonuçlarına oldukça yakındır.

YSA uygulamalarından da görüldüğü üzere, eğitim verilerinin %25'nin kullanılması durumunda dahi elde edilen YSA sonuçlarının, ölçüm sonuçları ile oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. Bu analizlerden, %25'den daha az eğitim verisi kullanılması durumunda da ölçüm sonuçlarına yakın değerlerin elde edilebilmesinin mümkün olacağı anlamı çıkarılabilir, ancak bunun için, daha detaylı bir YSA tasarımı gerekmektedir. Bu şekilde daha az eğitim verisi kullanarak bir YSA tasarlandığında, eğitim için gerekli olan verilerin ölçülme süresi de oldukça kısalmaktadır.

Yapılan tüm ölçümlerde belirli bir hata bandının olacağı bilinen bir gerçektir. Eğitim sonucunda tahmin edilen değerlerden bazılarının bağıl hata oranları diğerlerine göre yüksek olmuştur. Bunun nedeni, o noktada alınan ölçüm değerlerinin, ölçüm hata bandının sınırında olmasıdır. Bu durum parametrelere (gerilim, frekans ve sıcaklık) bağlı değişim eğrilerinde kısmi bozulmalara/süreksizliğe neden olmaktadır. Ölçüm

verilerinde belirli noktalarda meydana gelen bu hatalar, YSA tahmin eğrileri üzerinde hata oranının kısmen artmasına neden olmaktadır.

Çizelge 4.23 YSA-1 eğitimi sonucunda elde edilen maksimum ve minimum hata oranları

Parametre	Minimum Bağlı Hata [%]			Maksimum Bağlı Hata [%]		
	Değişken			Değişken		
	U	f	T	U	f	T
Dielektrik Kayıp	0,0000	0,0040	0,0000	3,0688	1,3060	2,8880
Paralel Eşdeğer Kapasite	0,0010	0,0000	0,0016	0,0050	0,0040	0,0479
Dielektrik Kayıp Faktörü	0,1134	0,1110	0,0012	1,6416	0,7415	4,4885

Çizelge 4.24 YSA-2 eğitimi sonucunda elde edilen maksimum ve minimum hata oranları

Parametre	Minimum Bağlı Hata [%]			Maksimum Bağlı Hata [%]		
	Değişken			Değişken		
	U	f	T	U	f	T
Dielektrik Kayıp	0,0000	0,0964	0,0253	19,7830	2,4135	2,5951
Paralel Eşdeğer Kapasite	0,0010	0,0001	0,0001	0,0050	0,0059	0,0506
Dielektrik Kayıp Faktörü	0,0258	0,0713	0,0195	2,6831	1,4859	3,5438

Sonuç olarak, ölçüm verilerinin tamamının ve %25'lik kısmının YSA eğitimi için kullanılması durumunda, elde edilen tahmin sonuçlarının ölçüm sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmüştür. Böylelikle, bir OG kablosunun yapılmış ölçümlerindeki değerlerine ilave olarak YSA ağı kullanılarak belirtilen parametreler için istenilen ara değer tahminleri gerçekleştirilebileceği ortaya konmaktadır. Ayrıca, gerçekleştirilen YSA analizleri sonucunda elde edilen bağlı hata oranlarının küçük olması nedeniyle, daha az

eğitim verisi kullanarak ya da daha az ölçüm gereksinimi ile yakın sonuçların elde edilebilmesi de mümkündür (Çizelge 4.25).

Çizelge 4.25 Ölçüm ve tahmin sonuçlarının kıyaslanması

Eğitilen Parametre	Öğretilen Veri	Değişken			Elde Edilen Parametre	Değişken			Alınan Veri
Dielektrik Kayıp	Ölçüm Değerleri	U	f	T	Dielektrik Kayıp	U	f	T	Sürekli
Paralel Eşdeğer Kapasite					Paralel Eşdeğer Kapasite				
Dielektrik Kayıp Faktörü					Dielektrik Kayıp Faktörü				

SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda OG güç sistemleri alanındaki teknolojik gelişmelerin ve bu alandaki yeni uygulama yöntemlerinin artması nedeniyle, enerji kalitesi ve enerji sürekliliği üzerine yapılan çalışmalar da önem kazanmıştır.

Bu çalışmada, OG kablosunun dielektrik kalite parametreleri, gerilim, frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak ölçülmüştür. Her bir parametre için kablonun dielektrik kalite parametreleri incelenmiş ve değişimleri irdelenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları ile YSA uygulaması gerçekleştirilerek ölçüm dışındaki şartlar için kablonun dielektrik kalite parametreleri elde edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışma, özellikle dağıtım sistemi içerisindeki OG kablolarının, yalıtım malzemelerine ait kalite parametrelerinin muhtemel işletme şartları altında ölçülerek enerji sürekliliğinin sağlanmasına, dağıtım sisteminin verimli ve güvenli bir şekilde işletilebilmesine ve sistem içerisindeki arıza durumlarının önceden kestirilebilmesine imkân sağlamaktadır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen ölçüm ve analiz sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

Literatürde, dielektrik malzeme kalite parametrelerinin gerilim, frekans ve sıcaklık değişimlerine karşı sergilediği davranışlar genellikle tek tek incelenmiştir. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak OG kabloların kalite parametrelerinin daha detaylı ve bir bütün olarak incelenmesi ortaya konmuştur.

OG kablo numunesinin dielektrik kalite parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ölçme gerilimi (0,5 – 12 kV), ölçme frekansı (50 – 400 Hz) ve ölçme sıcaklığı (30 - 80°C),

kablonun nominal işletme şartlarında maruz kalabileceği aralıklardadır. Bu aralıklarda elde edilen dielektrik parametre değerleri de kablonun gerçek işletme şartlarındaki davranışlarının belirlenmesi bakımından önem arz etmektedir.

Çalışmada, kullanılan OG kablosuna sabit sıcaklıkta uygulanan ölçme geriliminin 0,5 kV'tan 12 kV'a arttırılmasıyla, dielektrik kayıplarda üstel bir artış olduğu tespit edilmiştir. Meydana gelen bu artışın iletim kayıplarından kaynaklanmasının yanı sıra yaklaşık 8 kV ölçme geriliminden sonra polarizasyon kayıplarının da dielektrik kayıplar üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak aynı aralıkta (0,5 – 12 kV) dielektrik kayıp faktörü parametresinde de artış olduğu belirlenmiştir. Ancak bu artışın, yaklaşık 8 kV'a kadar sabit olduğu (%0,039) ve sonrasında 12 kV'a kadar az bir artış (%0,043) sergilediği tespit edilmiştir. Bu analiz, literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında, ölçmede kullanılan kablonun yeni bir kablo olması nedeniyle dielektrik kayıp faktöründe az oranda bir artış gerçekleştiği belirlenmiştir.

Çalışmada, belirtilen gerilim ölçme aralığında (0 – 12 kV) sabit sıcaklık ve frekans için gerilimin artışının kablo kapasite ve bağıl dielektrik katsayısı değerine herhangi bir etkisinin olmadığı ve sabit kaldığı belirlenmiştir. Güç sistemi içerisindeki OG kablolarında sabit sıcaklık ve frekans altında meydana gelen gerilim dalgalanmalarının kablo kapasitesini etkilemeyeceği ölçümlerle ortaya konmuştur.

OG kablo numunesinin ilgili standardında (IEC-60502) dielektrik kayıp faktörünün ölçülmesi için belirlenen gerilim alt sınır değeri 2 kV'dur. Çalışmada kullanılan ölçme gerilim değerleri, standartta belirtilen gerilim alt sınır değerini de kapsamaktadır. Böylelikle kablonun nominal gerilim (12 kV) değerinde de ölçümlerin gerçekleştirilmesi, nominal işletme şartlarında dielektrik kalite parametrelerinin belirlenmesine ve kabloya 2 kV'un üzerinde gerilim uygulanması durumunda dielektrik malzeme içerisinde gerçekleşen olayların gözlemlenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda, kablolardaki dielektrik kayıp faktörü ölçümleri genellikle yüksek gerilim uygulanarak 50 Hz şebeke frekansında ya da daha düşük gerilimlerde yüksek frekanslarda (kHz-MHz) gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise, şebeke frekansı (50 Hz) ve harmonik frekanslarda (50 – 400 Hz) dielektrik malzeme kalite parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Böylelikle, OG

şebekesindeki gerilim harmoniklerinin farklı genliklerde şebeke geriliminde bulunması durumunda dielektrik parametreler üzerinde etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Temel bileşen ile birlikte bulunan her bir harmonik geriliminin, dielektrik malzeme üzerinde ek kayıplara neden olduğu ve bu nedenle kablo ömrü üzerinde etkisinin olduğu ölçümlerle ortaya konmuştur.

Şebeke bulunan harmonik gerilimlerinin mertebelerinin artmasıyla birlikte, dielektrik malzeme üzerinde meydana gelen kayıpların da arttığı ölçümlerle belirlenmiştir. Yapılan tüm ölçümler içerisinde, gerilim harmonik genliklerinin aynı olduğu durumlarda, dielektrik kayba en çok etki eden harmonik frekansının 400 Hz olduğu tespit edilmiştir.

Dielektrik malzeme içerisinde meydana gelen kayıpların harmonik gerilim bileşenleri nedeniyle artması, kablo dielektriğinin daha hızlı bir şekilde yaşlanmasına ve ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, harmonik gerilim bileşenlerinin kablo dielektriği üzerinde dielektrik kalitesini bozması bakımından olumsuz etkilerinin olduğu ölçümlerle ortaya konmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmada, OG kablo dielektriğinin sabit gerilim (12kV) ve sıcaklık (50°C) altında frekansa bağlı değişimleri (50 – 400 Hz) incelenmiş olup 50 Hz de yapılan ölçümde malzemenin kapasite değeri 2484,8 pF olarak ölçülmüştür. Frekansın arttırılmasıyla kablo kapasitesinde 200 Hz frekansa kadar düşüş meydana gelmektedir. 200 Hz frekansta ölçülen kablo kapasitesi değeri 2482,7 pF değerindedir. Frekansın 50 Hz den 200 Hz'e kadar arttırılmasıyla kablo kapasitesinde % 0,9'luk bir azalma meydana gelmiştir. Frekans 200 Hz'den 350 Hz'e kadar arttırıldığında ise kablo kapasitesi yaklaşık olarak % 0,05 artmaktadır. Kablo kapasitesinde veya bağıl dielektrik katsayısında frekans artışıyla birlikte meydana gelen bu değişimin/kırılmanın nedenleri arasında dielektrik malzemedeki meydana gelen polarizasyon kayıpları ile birlikte iç ve dış yarı iletkenlerde meydana gelen kayıpların olduğu tespit edilmiştir. OG kablosunun maruz kaldığı gerilimin frekans değerinin veya temel bileşenle birlikte bulunan gerilim harmoniklerinin kablo kapasitesini ve dolayısıyla kablo reaktif gücünü etkileyebileceği ölçümlerle ortaya konmuştur.

Farklı gerilim değerlerinde (2, 4, 6, 8, 10 ve 12 kV) ve sabit şebeke frekansında (50 Hz) sıcaklığın arttırılmasıyla birlikte (30 - 80°C) dielektrik kayıpların 30°C 'den 40°C'e kadar azaldığı ve daha sonrasında 80°C'e kadar arttığı ölçümlerle tespit edilmiştir. En düşük dielektrik kayıp değerinin ise 50 Hz frekans, 0,5 kV gerilim ve yaklaşık 40°C'de meydana geldiği belirlenmiştir. İşletme şartları bakımından ilgili ölçüm sonucu değerlendirildiğinde, kablonun dielektrik kayıplar bakımından en uygun çalışma sıcaklığının 40 - 50°C arası olduğu tespit edilmiştir. Kablonun yarı iletken ve dielektrik malzeme özelliklerinin ısı, elektriksel, ve fiziksel olarak iyileştirilmesinin belirtilen sıcaklık aralığındaki dielektrik kayıpların azalmasını sağlayacağı ölçümlerle tespit edilmiştir.

Sabit gerilim (12 kV) ve sabit frekansta (50 Hz) sıcaklığa bağlı olarak gerçekleştirilen ölçümlerde, sıcaklığın 30°C'den 80°C'e arttırılmasıyla, kablo kapasitesi/bağıl dielektrik katsayısında %6,1'lik azalma meydana geldiği ölçümlerle tespit edilmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte azalan kapasite değeri, kablonun reaktif gücünün azalmasına neden olmaktadır. Dağıtım sistemi içerisinde yaygın olarak kullanılan OG kablolarının, farklı yüklenme durumlarında sistem üzerinde sağlayacağı kapasitif reaktif güç değerinin de farklı olacağı ortaya konmuştur.

OG kablolarının işletmede kaldıkları süre boyunca belirli peryotlarla dielektrik malzeme parametreleri ölçülmekte ve analiz edilmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışması, belirli bir süre işletmede kalmış OG kablosunun ölçülen dielektrik kalite parametreleriyle, yeni üretilen bir OG kablosunun parametrelerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. OG kablosunun işletmeye alınmadan önceki ölçülen dielektrik parametreleri ile herhangi bir işletme anındaki dielektrik kalite parametrelerin kıyaslanabilir olması, OG kablosunun dielektrik ömrü ve kapasitesi hakkında detaylı analiz yapılmasına imkân sağladığı ortaya konmuştur.

Gerçekleştirilen ölçümlerin, ileride OG kablosu üzerinde yapılacak ölçümler için referans olması oldukça önemlidir. Ancak çalışmada bahsedildiği üzere, belirtilen gerilim, frekans ve sıcaklık aralıklarında ve belirtilen artışlarla ölçümlerin gerçekleştirilmesi oldukça süre gerektiren bir işlemdir. Daha az sürede parametre belirlenmesi bakımından, çalışmada elde edilen ölçüm verileri kullanılarak bir YSA

eğitimi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen YSA eğitimi sonucunda, daha az ölçüm verisi kullanarak istenilen aralıklardaki dielektrik kalite parametrelerinin belirlenebileceği ortaya konmuştur.

Çalışmada elde edilen dielektrik kalite parametrelerine ait ölçüm sonuçları, belirli gerilim, sıcaklık ve frekans değerleri için ayrıık bir biçimde elde edilmiştir. Gerçekleştirilen YSA uygulamasıyla birlikte, çalışmada belirtilen ölçüm aralıklarındaki tüm gerilim, frekans ve sıcaklık değerlerinde istenilen dielektrik parametrelerinin elde edilebilmesi sağlanmıştır. Böylelikle, elde edilen ölçüm verileri ile geçekleştirilen YSA uygulamasının, dielektrik malzeme parametrelerinin gerilim, frekans ve sıcaklığa bağlı elektriksel parametrelerinin eğitimi için uygun ve kullanışlı bir uygulama olduğu tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasına ait sonuçların, dielektrik parametrelerin on-line olarak izlendiği güç sistemlerinde kullanılması ve OG kablo üzerinden alınan dielektrik ölçüm verileri ile kıyaslanabilmesi bakımından referans oluşturabilecek bir yapıdadır. Ayrıca alışma sonucunda elde edilen sonuçlar yardımıyla, OG kablolarının yüklenmesi ve harmonik gerilimlere maruz kalması durumlarındaki davranışlarının önceden bilinmesi ve işletmedeki yüklenmelerin ve alınacak tedbirlerin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

lm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile gerilime bağlı değişimlerde dielektrik kayıp değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağlı hata değerleri her iki uygulama için % 0,0000 olmuştur.

lm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile gerilime bağlı değişimlerde paralel eşdeğer kapasite değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağlı hata değerleri her iki uygulama için % 0,0010 olmuştur.

lm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile gerilime bağlı değişimlerde dielektrik kayıp faktörü değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağlı hata değerleri sırasıyla % 0,1134 ve % 0,0258 olmuştur.

Ölçüm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile frekansa bağlı değişimlerde dielektrik kayıp değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağıl hata değerleri sırasıyla % 0,040 ve % 0,0964 olmuştur.

Ölçüm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile frekansa bağlı değişimlerde paralel eşdeğer kapasite değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağıl hata değerleri sırasıyla % 0,000 ve % 0,0001 olmuştur.

Ölçüm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile frekansa bağlı değişimlerde dielektrik kayıp faktörü değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağıl hata değerleri sırasıyla % 0,111 ve % 0,0713 olmuştur.

Ölçüm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile sıcaklığa bağlı değişimlerde dielektrik kayıp değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağıl hata değerleri sırasıyla % 0,000 ve % 0,0253 olmuştur.

Ölçüm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile sıcaklığa bağlı değişimlerde paralel eşdeğer kapasite değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağıl hata değerleri sırasıyla % 0,0016 ve % 0,0001 olmuştur.

Ölçüm sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen YSA-1 ve YSA-2 uygulamaları ile sıcaklığa bağlı değişimlerde dielektrik kayıp faktörü değerinin, ölçümü yapılmayan değerleri için tahmini başarılı bir şekilde elde edilmiş ve minimum bağıl hata değerleri sırasıyla % 0,0012 ve % 0,0195 olmuştur.

Çalışma sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak, OG kablolarının işletme şartlarındaki gerilime, frekansa ve sıcaklığa bağlı dinamik dielektrik devre modellerinin gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu modelleme çalışmasının gerçekleştirilmesi, içerisinde OG kablosu barındıran benzetim çalışmalarında daha duyarlı analizlerin gerçekleştirilmesine ve gerçeğe yakın sonuçların elde edilmesine imkân sağlayabilecektir.

Çalışmada test numunesi olarak yeni bir OG kablosu kullanılmıştır. İleri bir çalışma olarak, gerilim ve/veya sıcaklıkla yaşlandırılmış bir OG kablosunun benzer dielektrik parametrelerinin ölçülmesi gerçekleştirilebilir. Böylelikle, OG kablosunun yaşlanma faktörünün dielektrik parametreler üzerindeki etkisinin incelenmesi ve detaylı bir dielektrik modellemenin gerçekleştirilmesi hedeflenebilir.

- [1] Liu, X., Pu, J., Ma, H. ve Wang, Z., (2011). "Research on Dielectric Loss Testing Device for Large-capacity and High-voltage Electrical Equipment", DRPT Conference, 6-9 July 2011, Beijing, China, 649–652.
- [2] Peng, H. D., Dong, M., Ren, M., Miao, J. ve Zhang, Z., (2011). "Insulation Diagnosis for 220 kV Oil-immersed Current Transformer by Frequency Dielectric Spectroscopy", Electrical Insulation Conference, 5-8 June 2011, 69–73.
- [3] O. Kaplan, U. Yavanoglu ve F. Issi, (2012). "Country Study on Renewable Energy Sources in Turkey" International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 11-14 November 2012, Nagasaki, Japan, 1–5.
- [4] S. Rehman, I. M. El-Amin, F. Ahmad, S. M. Shaahid, A. M. Al-Shehri, J. M. Bakhshwain ve A. Shash, (2007). "Feasibility Study of Hybrid Retrofits to an Isolated Off-grid Diesel Power Plant", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11 (4): 635–653.
- [5] Wang, P., Raghuveer, M. R., McDermid, W., ve Bromley, J. C., (2001). "A Digital Technique for The On-line Measurement of Dissipation Factor and Capacitance", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 8 (2): 228–232.
- [6] Zaengl, W. S., (2003). "Dielectric Spectroscopy In Time and Frequency Domain for HV Power Equipment. I. Theoretical Considerations", IEEE Electrical Insulation Magazine, 19 (5): 5–19.
- [7] Werelius, P., Ohlen, M. ve Robalino, D. M., (2012). "Dielectric Frequency Response Measurements and Dissipation Factor Temperature Dependence", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 10-13 June 2012, San Juan, PS, USA, 296–300.
- [8] Chan, J. C., Hartley, M.D. ve Hiivala, L. J., (1993). "Performance Characteristics of XLPE Versus EPR As Insulation For High Voltage Cables", IEEE Electrical Insulation Magazine, 9 (3): 8–12.
- [9] Ponniran A. ve Kamarudin, M. S., (2008). "Study On The Performance of Underground XLPE Cables In Service Based On Tan Delta and Capacitance Measurements", IEEE International Power and Energy Conference, 1-3 December 2008, Johor Bahru, Malaysia, 39–43.
- [10] Lelak, J., Durman, V., Packa, J. ve Olach, O., (2002). "Diagnostics of Medium

Voltage PVC Cables by Dissipation Factor Measurement at Very Low Frequency Changes Of The Cable Parameters”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 7-10 April 2002, Boston, USA, 79–82.

- [11] Peng, D., Yang, D., Wang, C. and Li, M., (2009). “The Influence Of Transformer Oil Aging to Dielectric Dissipation Factor and Its Insulating Lifetime”, Asia-Pacific Power Energy Engineering Conference, 28-31 March, Wuhan, China, 1–4.
- [12] Hampton, R. N., (2008). “Some Of The Considerations For Materials Operating Under High-Voltage Direct-Current Stresses”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (1): 5–13.
- [13] Vahedy, V., (2006). “Polymer Insulated High Voltage Cables”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 22 (3): 13–18.
- [14] Salim, F., (2006). “Effects Of Electric Arc on The Dielectric Properties of Liquid Dielectrics”, IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 26-30 June 2006, Bali, Indonesia, 482–485.
- [15] Malpure B. D. ve Baburao, K., (2008). “Failure Analysis and Diagnostics Of Power Transformer Using Dielectric Dissipation Factor”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 20-24 April 2008, Beijing, China.
- [16] Cookson, A. H., (1990). “Influence Of Electrical Insulation On Design and Performance Of Power Equipment”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 6 (6): 7-10.
- [17] Hvidsten, S., Adeen, L. ve Utveckling, V., (2005), “Condition Assessment Of 12 and 24 kV XLPE Cables Installed During The 80’s . Results From a Joint Norwegian / Swedish Fresearch Project”, 21 (6): 1–11.
- [18] Mazzanti, G., Montanari, G. C., ve Simoni, L., (1997). “Insulation Characterization In Multistress Conditions by Accelerated Life Tests: An Application to XLPE and EPR For High Voltage Cables”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 13 (6): 24–34.
- [19] Boggs, S. ve Kuang, J., (1998). “High Field Effects In Solid Dielectrics”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 14(6): 5–12.
- [20] Bostrom, J. O., Marsden, E., Hampton, R. N., Nilsson, U. ve Lennartsson, H., (2003). “Electrical Stress Enhancement of Contaminants In XLPE Insulation Used For Power Cables”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 19 (4): 6–12.
- [21] Chmura, L., Jin, H., Cichecki, P., Smit, J. J., Gulski, E. ve Vries, F. D., (2012). “Use Of Dissipation Factor For Life Consumption Assessment and Future Life Modeling Of Oil-Filled High-Voltage Power Cables”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 28 (1): 27 –37.
- [22] Oyegoke, B., Hyvonen, P., Aro, M. ve Ning, G., (2003). “Application Of Dielectric Response Measurement On Power Cable Systems”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10 (5): 862–873.
- [23] Zaengl, W. S., (2003). “Applications Of Dielectric Spectroscopy In Time and Frequency Domain For HV Power Equipment”, IEEE Electrical Insulation Magazine, 19(6): 9–22.

- [24] Mahalik, N. P., (1997). "A Digital Meter for Measuring Dissipation Factor", IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 25-30 May 1997, Soth Korea, 1129–1131.
- [25] Gockenbach, E. ve Hauschild, W., (2000). "The Selection Of The Frequency Range For High-Voltage On-Site Testing Of Extruded Insulation Cable Systems", IEEE Electrical Insulation Magazine, 16 (6): 11–16.
- [26] Hernandez-Mejia, J., Perkel, J., Harley, R., Hampton, N. ve Hartlein, R., (2009). "Correlation Between Tan Delta Diagnostic Measurements and Breakdown Performance at VLF For MV XLPE Cables", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16 (1): 162–170.
- [27] Hernandez-Mejia, J., Harley, R., Hampton, N. ve Hartlein, R., (2009). "Characterization Of Ageing For MV Power Cables Using Low Frequency Tan Delta Diagnostic Measurements", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16 (3): 862–870.
- [28] Durman, V. and Lelak, J., (2010). "Influence Of Radiation On The Dielectric Properties Of XLPE Based Insulation Systems", Journal of Electrical Engineering, 61 (4): 229–234.
- [29] Bolivar, P. H., Brucherseifer, M., Rivas, J. G., Gonzalo, R., Ederra, I., Reynolds, A. L., Holker, M. ve De Maagt, P., (2003). "Measurement Of The Dielectric Constant and Loss Tangent Of High Dielectric-Constant Materials at Terahertz Frequencies" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 51 (4): 1062–1066.
- [30] Liu, T., Fothergill, J., Dodd, S. ve Nilsson, U., (2009). "Influence Of Semicon Shields On The Dielectric Loss Of XLPE Cables", IEEE International Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 18-21 October 2009, Virginia Beach, USA, 246–249.
- [31] Song, H., Gao, L., Wang, Y. ve Wu, B., (2007). "Development Of Digital Measuring Instrument For Dielectric Loss Tangent", International Conference on Electronic Measurements and Instruments, 16-18 August 2007, China, 1–106.
- [32] Pascoli, G., Hribernik, W. ve Ujvari, G., (2008). "A Practical Investigation On The Correlation Between Aging and The Dissipation Factor Value Of Mica Insulated Generator Windings", IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 21-24 April 2008, China, 268–271.
- [33] Al-Arainy, A., Qureshi, M. I. ve Malik, N. H., (2005). Fundamentals of High Voltage Engineering, King Saud University, Academic Publishing Press, Saudi Arabia.
- [34] Kalenderli, Ö., Kocatepe, C. ve Arıkan, O., (2005). Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [35] Öztemel, E., (2006). Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayınevi, İstanbul.
- [36] Haykin, S., (2004). A Comprehensive Foundation Neural Networks, Mcmillan, Newyork.

- [37] Oğuz, M., (2015). Yalıtkan Maddelerde Elektriksel Delinme Dayanımının Yapay Sinir Ağları İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [38] Bayındır, R. ve Sesveren, Ö., (2008). “YSA Tabanlı Sistemler İçin Görsel Bir Arayüz Tasarımı”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14 (1): 101–109.
- [39] Gershenson, C., (2003). Artificial Neural Networks for Beginners, InTech.
- [40] Yu, H. ve Wilamowski, B. M., (2011). Levenberg-Marquardt Training in Industrial Electronics Handbook, CRC Press, USA.
- [41] Svozil, D., Kvasnieka, V. ve Pospichal, J., (1997). “Introduction to Multi-Layer Feed-Forward Neural Networks”, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 39 (1): 43–62.
- [42] Belavkin, R. V., (1990). Feed-Forward Neural Networks, 1–12.
- [43] Levenberg, K., (1944). “A Method For The Solution Of Certain Non-Linear Problems In Least Squares”, Quarterly of Applied Mathematics, 2: 164-168.
- [44] Marquardt, D. W., (1963). “An Algorithm For Least-Squares Estimation Of Nonlinear Parameters”, Journal of Society For Industrial and Applied Mathematics, 11 (2): 431–441.
- [45] Werbos, P. J., (1988). “Backpropagation: Past and Future”, International Conference on Neural Networks, 24-27 July 1988, France, 343–353.
- [46] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. ve Williams, R. J., (1988). “Learning Representations By Back-Propagating Errors”, Cognitive Modeling, 5: 3.
- [47] Bolat, S. ve Kalenderli, O., (2003). “Electrode Contour Optimization by Artificial Neural Network with Levenberg-Marquardt Algorithm”, Proceeding of International XII Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Network, İstanbul.
- [48] Dias, F. M., Antunes, A., Vieira, J. ve Mota, A. M., “Implenting The Levenberg-Marquardt Algorithm On-line: A Sliding window Approach With Early Stopping”, IFAC Workshop on Advanced Fuzzy/Neural Control, 16-17 September 2004, Finland.

CPC-100 CİHAZININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Bu cihaz, birçok farklı dielektrik parametreyi çalışma aralığı içerisinde ölçebilmektedir.

Ölçülebilen parametreler arasında,

- Paralel eşdeğer direnç (R_p)
- Paralel eşdeğer kapasite (C_p)
- Seri eşdeğer direnç (R_s)
- Seri endüktans (L_s)
- Dielektrik kayıp (p_k)
- Dielektrik kayıp faktörü ($\tan \delta$)
- Güç faktörü ($\cos \varphi$)
- Eşdeğer empedans (Z)
- Reaktif güç (Q)
- Görünür güç (S)

bulunmaktadır. Belirtilen bu parametreler ölçüm sonrasında, dielektrik malzemenin seri ve paralel eşdeğer modeli referans alınarak hesaplanmaktadır. Cihazın teknik özellikleri aşağıdaki çizelgelerde belirtilmiştir.

Çizelge A.1 CPC-100 cihazının yüksek gerilim çıkışının teknik özellikleri

Bağlantı	U/f	THD	I [mA]	S [VA]	t _{max} [dk.]
Yüksek Gerilim Probu	0 – 12 kV AC	< %2	300	3600	> 2
	15 – 400 Hz		100	1200	> 60

Çizelge A.2 CPC-100 cihazının test frekansının özellikleri

Ölçme Aralığı [Hz]	Çözünürlük [Hz]	Hassasiyet
15 – 400	0,01	Hata < okunan değerin %0,005'i

Çizelge A.3 CPC-100 cihazının ölçme akımının özellikleri

Bağlantı	Ölçme Aralığı [A]	Çözünürlük	Hassasiyet	Ölçme Şartları
IN-A ve IN-B	0 - 5	5 rakam	Hata < okunan değerin %0,3'ü + 100nA	$I_x < 8\text{mA}$
			Hata < okunan değerin %0,5'i	$I_x > 8\text{mA}$

Çizelge A.4 CPC-100 cihazının ölçme geriliminin özellikleri

Ölçme Aralığı	Çözünürlük	Hassasiyet
0 – 12000 V AC	1 V	Hata < okunan değerin %0,3'ü +1V

Çizelge A.5 CPC-100 cihazının kapasite ölçme özellikleri

Ölçme Aralığı	Çözünürlük	Hassasiyet	Ölçme Şartları
1pF - 3μ	6 rakam	Hata < okunan değerin %0,05'i + 0,1pF	$I_x < 8\text{mA}$ $V_{\text{test}}=300\text{V} - 10\text{ kV}$
		Hata < okunan değerin %0,2'i	$I_x > 8\text{mA}$ $V_{\text{test}}=300\text{V} - 10\text{ kV}$

Çizelge A.6 CPC-100 cihazının dielektrik kayıp faktörü ölçme özellikleri

Ölçme Aralığı	Çözünürlük	Hassasiyet	Ölçme Şartları
% 0 – 10 (kapasitif)	5 rakam	Hata < okunan değerin %0,1'i + %0,005	f=45 – 70 Hz I < 8mA V _{test} =300V – 10 kV
% 0 - 10000		Hata < okunan değerin %0,5'i + %0,02	V _{test} =300V – 10 kV

Çizelge A.7 CPC-100 cihazının dielektrik kayıp ölçme özellikleri

Ölçme Aralığı	Çözünürlük	Hassasiyet
0 – 3,6 kW	6 rakam	Hata < okunan değerin %0,5'i + 1 mW
0 – 3,6 kVar		Hata < okunan değerin %0,5'i + 1 mVar
0 – 3,6 kVA	5 rakam	Hata < okunan değerin %0,5'i + 1 mVA

Cihazın toplamda üç adet çıkış probu bulunmaktadır. Bunlar,

- Yüksek gerilim probu (HV)
- Ölçüm probu-1 (IN-A)
- Ölçüm probu-2 (IN-B)

Yüksek gerilim probu, test numunesinin yüksek gerilim uygulanacak kısmına, IN-A ve IN-B problemleri ise dielektrik ölçümlerin alınacağı düşük ya da toprak potansiyelindeki kısımlara bağlanmaktadır. Cihaz problemlerinin bağlantıları gerçekleştirildikten sonra cihaz üzerindeki ölçme yöntemi belirlenmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Celal Fadıl KUMRU
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.04.1985 / Kadıköy
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : cfkumru@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007
Lise	Fen Bilimleri	Habire Yahşi Lisesi (YDA)	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010 - Devam	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Müh.	Araştırma Görevlisi
2007 - 2010	GETA Mühendislik A.Ş.	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Kocatepe, C., **Kumru, C. F.** ve Ozturk, T., (2011). "Analysis of Eccentric Axial High Voltage Underground Cable", International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-4 December 2011, Bursa, 341-344.
2. Kocatepe, C., Arıkan, O., **Kumru, C. F.**, Erduman, A. ve Umurkan, N., (2012). "Electric Field Measurement And Analysis Around A Line Model At Different Voltage Levels", International Conference on High Voltage Engineering and Application, 17-20 September 2012, Shanghai, China, 42-45.
3. Arıkan, O., **Kumru, C. F.** ve Kocatepe, C., (2012). "Measurement of the Dielectric Performance of An Instrument Transformer At Different Voltage and Frequencies", International Conference on High Voltage Engineering and Application, 17-20 September 2012, Shanghai, China, 451-454.
4. Kocatepe, C., Arıkan, O., **Kumru, C. F.** ve Akbulut, A., (2012). "Yüksek Gerilim Kablolarının Farklı Döşeme Koşullarında Isıl Analizi", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım – 1 Aralık 2012, Bursa, 194-198.
5. Kocatepe, C., Arıkan, O., **Kumru, C. F.** ve Orhan, O.D., (2012). "Yüksek Gerilim Kablolarındaki İzolasyon Problemlerinin Elektrik Alan Dağılımına Etkisi", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım – 1 Aralık 2012, Bursa, 189-193.
6. Arabul, A. Y., Sarul, M. H., Boynueğri, A. R. ve **Kumru, C. F.**, (2012). "Evsel Bir Yük Talebinin Karşılmasında Yakıt Pili Kullanılmasına Yönelik Bir Benzetim Çalışması", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım – 1 Aralık 2012, Bursa.
7. Kocatepe, C., Arıkan, O., Taslak, E. ve **Kumru, C. F.**, (2013). "Breakdown Voltage Analysis of Insulating Oils Under Different Conditions", 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 2-4 October 2013, Istanbul, 1-4.
8. Kocatepe, C., Arıkan, O., Taslak, E. ve **Kumru, C. F.**, (2013). "Yüksek Gerilim Tesislerinde Kullanılan Yalıtkan Yağların Delinme Dayanımı Analizi", 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 23-24 Mayıs 2013, Kocaeli, 156-160.
9. Akca, H., Kocatepe, C., Arıkan, O., **Kumru, C.F.** ve Ayaz, R., (2013). "Breakdown Strength Analysis of the Transformer Insulation Oil Due to Different Standards", 18th International Symposium on High Voltage Engineering, 25-30 August, Seoul, South Korea, 1343-1347.
10. **Kumru, C. F.**, Arıkan, O., Kocatepe, C. ve Kalenderli, Ö., (2013). "Investigation of

Effect of Temperature Variation In A High Voltage Cable On Electrical Insulation”, 18th International Symposium on High Voltage Engineering, 25-30 August, Seoul, South Korea, 1104-1109.

11. **Kumru, C. F.**, Arıkan, O. ve Kocatepe, C., (2014). “Analysis of Effects of Electric Field Strength Occurred By Energy Transmission Lines On Human Health”, International Symposium on Sustainable Development, 15-18 May 2014, Sarajevo.
12. Arabul A. Y., Senol, I., **Kumru, C. F.**, Boynuegri, A. R. ve Keskin, F., (2014). “An Experimental Study For Comparing The Effect Of The Magnetic Field On Human Health Around Transformers In Sinusoidal And Non-Sinusoidal Current Conditions”, International Symposium on Sustainable Development (ISSD), 15-18 May 2014, Sarajevo.
13. Kocatepe, C., **Kumru, C. F.** ve Taslak, E., (2014). “Analysis of Magnetic Field Effects of Underground Power Cables on Human Health”, International Symposium on Sustainable Development, 15-18 May 2014, Sarajevo.
14. **Kumru, C. F.**, Kocatepe, C., ve Arıkan, O., (2015). "An Investigation on Electric Field Distribution Around 380 kV Transmission Line for Various Pylon Models", 17th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, 27-28 August 2015, Paris.
15. Taslak, E., Kocatepe, C., Arıkan, O. ve **Kumru, C. F.**, (2015) "Electrical Analysis of Corn Oil as an Alternative to Mineral Oil in Power Transformers", 17th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, 27-28 August 2015, Paris.

Kitap Bölümü

1. Kocatepe, C., Yumurtacı, R., Arıkan, O., Baysal, M., Kekezoğlu, B., Bozkurt, A., **Kumru, C. F.**, Power Quality Issues : Harmonic Effects of Power System Loads: An Experimental Study, Issue:7, 175-200, ISBN 978-953-51-1068-2, Intech, April 2013.

Proje

1. Yüksek Gerilim Kablolarının Kalite Bakımından İncelenmesi, YTÜ Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, Proje No: 2012-04-02-DOP01, Araştırmacı, 2012 – 2015.
2. Küçük Ölçekli Hibrid Rüzgar - Güneş Enerji Sistemlerinde Güvenilirlik Analizi: Davutpaşa Kampüsü Örnek Uygulaması, YTÜ Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, Proje No: 2012-04-02-KAP04, Araştırmacı, 2012 – 2014.
3. Dağıtım Şebekesinde Kullanılan Yeraltı Kablolarının Aşırı Yüklenme Kaynaklı Arıza ve Ömür Kısaldırma Durumlarının İncelenmesi, Sebeplerinin Analizi ve Çözüm Önerilerinin

Sunulması, EPDK Ar-Ge Proje Desteğ, Proje No: BDS.01.15.007, 2015-Devam Ediyor

ÖDÜLLERİ

1. High Voltage Cables, YTÜ Ar-Ge Proje Pazarı, Poster Yarışması, Birincilik Ödülü