

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN YAŞLANMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE ÇEŞİTLİ KOŞULLAR
ALTINDA YÜKLENEBİLİRLİK ANALİZİ**

YUSUF ÇİLLİYÜZ

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN YAŞLANMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE ÇEŞİTLİ KOŞULLAR
ALTINDA YÜKLENEBİLİRLİK ANALİZİ

Yusuf ÇİLLİYÜZ

Prof. Dr. Faruk ARAS
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Güneş YILMAZ
Jüri Üyesi, Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. F. Semra ÖZTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Ayşe ERGÜN AMAÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. M. Caner AKÜNER
Jüri Üyesi, Marmara Üniversitesi


.....
.....
.....
.....
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 18.09.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son zamanlarda çevrenin öneminin giderek artması, her alanda olduğu gibi elektrik güç sistemlerini de yakından etkilemiştir. Bu etkilenenlerden biri de enerji sistemlerindeki en temel ve önemli donanımlardan olan güç transformatörleridir. Güç transformatörleri, santrallerde üretilen elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında verimli bir şekilde aynı güç ve frekansta taşınması için kullanılan en önemli elemanlardır. Güç transformatörlerinde katı ve sıvı yalıtkanlar kullanılmaktadır. Soğutma ve yalıtım amacıyla kullanılan sıvı yalıtkanlar farklı zamanlarda ihtiyaca yönelik değişiklik göstermiştir. Uzun yıllar soğutma sıvısı olarak mineral yağlar kullanılmıştır. Ancak mineral yağların yerini sentetik ve doğal ester yağlar almaya başlamıştır. Günümüzde ise çevreci olarak tanımlanan bitkisel yağların yani doğal ester yağların yalıtım ve soğutma sıvısı olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan güç transformatörlerinin yaşlanma davranışının incelenmesi ve yüklenebilirlik analizi çalışmaları, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi (BAP) tarafından 2010/37 sayılı araştırma projesi ile desteklenmiştir. Uygulama aşamasında AREVA T&D transformatör firması ile yaşlandırma ve farklı cins yağların analizlerine ilişkin ortak çalışma yapılmış olup sarf ve donanım malzemeleri olan ısıl yaşlandırma fırını, kâğıt yalıtkan malzemesi, doğal ester yağ ve mineral yağlar ilgili firma tarafından karşılanmıştır. Yapmış olduğum tez çalışmasında vermiş oldukları destek için Kocaeli Üniversitesi'ne ve AREVA T&D transformatör firmasına teşekkür ederim.

Lisans eğitimimde üzerimde emeği geçen Acıbadem Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. K. R. İrfan GÜNEY'e, bana her konuda yardımcı olan Elektrik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. F. Semra ÖZTÜRK'e, akademik alanda çalışmam için beni teşvik eden Sayın Ferhan YÜKSEL'e teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince araştırmalarımda bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek aldığım, maddi – manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Faruk ARAS'a, yaptığı her türlü yardım ve katkılarından dolayı tez izleme jürisinde bulunan Uludağ Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a ve Sayın Doç. Dr. Ayşe ERGÜN AMAÇ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, birlikte yapmış olduğumuz çalışmalardan dolayı arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Yunus BİÇEN'e de teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi eğitim hayatım boyunca da her türlü desteği sağlayan, maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan ve sürekli moral veren sevgili anne ve babama, özellikle üzerimde çok büyük emeği geçen sevgili ablama teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Temmuz – 2014

Yusuf ÇİLLİYÜZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ	6
2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN TEMEL ESASLARI.....	11
2.1. Temel Yapısı ve Çalışması	11
2.2. Soğutma Ortamına Göre Transformator Tipleri	14
2.2.1. Hava ile soğutma.....	16
2.2.2. Yağ ile soğutma	17
2.3. Transformator ve Çevre Sıcaklığının Ölçülmesi	17
2.4. Transformatorlerde Sıcaklık Artışı	18
2.5. Isıl Faktörlerden Kaynaklanan Arızalar.....	24
2.6. Isı Transferi.....	25
2.6.1. Radyasyon (Işınım)	25
2.6.2. Konveksiyon (Taşınım).....	25
2.6.3. İletim	26
2.7. Transformatorlerde Kullanılan Yalıtkan Malzemeler.....	27
2.7.1. Yağlar	27
2.7.2. Kâğıt	29
2.7.3. Güç transformatorlerinde yapılan deney ve testler.....	30
2.7.3.1. Yalıtım yağı deneyleri.....	30
2.7.3.2. Transformator Testleri.....	33
3. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN ISIL MODELLENMESİ VE YÜKLENEBİLİRLİK ANALİZİ.....	37
3.1. Transformatorün Isıl Modelleri.....	37
3.1.1. Elektriksel – ısıl benzetim modeli	38
3.1.1.1. Doğrusal olmayan ısıl direnç.....	39
3.1.1.2. Yağın üst seviye ısıl modeli	40
3.1.1.3. Transformatordeki sıcak noktanın ısıl modeli.....	40
3.1.1.4. Transformator Sargısı ve yağın alt seviye ısıl modeli.....	41
3.2. Yüklenebilirlik Analizi ve Ömür Kaybı	45
3.2.1. Analiz sonuçları.....	50
4. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN YAŞLANMA DAVRANIŞI.....	55
4.1. Yaşlanma Analizleri ve Beklenen Ömür Süresi	56
5. DENEYSEL UYGULAMA ve SONUÇLARIN ANALİZİ	63
5.1. Numunelerin Hazırlanması	63
5.2. Deneyin Yapılışı ve Elde Edilen Sonuçlar.....	68

5.2.1. Elektriksel ve ısıl stres altında yaşlanma.....	68
5.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM – Scanning Electron Microscope) yapısal görüntü analizleri.....	78
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	85
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	93
ÖZGEÇMİŞ	94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Bir fazlı transformatör	11
Şekil 2.2.	Bir transformatörün akım – gerilim ilişkileri	12
Şekil 2.3.	Bir transformatörün T – eşdeğer devresi	13
Şekil 2.4.	Bir güç transformatörünün kesit görüntüsü	13
Şekil 2.5.	Transformatör sargısının kısadevre ve hata meydana geldikten sonraki soğutma anındaki sıcaklık artışı ve zaman eğrisi	19
Şekil 2.6.	Esterifikasyon ve hidroliz reaksiyonu	28
Şekil 2.7.	Yağ asitlerinin parçalanması	29
Şekil 2.8.	Kâğıt yalıtkanın kimyasal formülü	30
Şekil 3.1.	Bir transformatörde basitleştirilmiş sıcaklık dağılımı	37
Şekil 3.2.	Basit ısı – elektriksel devre modeli	39
Şekil 3.3.	Yağın üst seviye ısı modelini	40
Şekil 3.4.	Sıcak noktanın ısı modelini	41
Şekil 3.5.	Transformatördeki yağın üst seviyesinin genel ısı modelini	41
Şekil 3.6.	Transformatör sargısı ve yağın alt seviyesinin genel ısı devre modeli	42
Şekil 3.7.	Yağın üst seviyesinin karmaşık ısı devre modelini	43
Şekil 3.8.	Yağın üst seviye ısı devre modelinin tekrar düzenlenmiş hali	44
Şekil 3.9.	Yağın üst seviyesinin dönüştürülmüş ısı devre modelini	45
Şekil 3.10.	Isıl kapasite devresi	45
Şekil 3.11.	En sıcak nokta değerinin ısı modelini	48
Şekil 3.12.	Önerilen ısı modeli ve yaşlanma hesaplama aşamaları	50
Şekil 3.13.	Yük değişimi	51
Şekil 3.14.	Mineral yağın sıcaklığa cevabı	51
Şekil 3.15.	Doğal ester yağ ile mineral yağ arasındaki sıcak nokta değerlerinin farkı	52
Şekil 3.16.	Mineral ve doğal ester yağ için hızlı yaşlanma faktörünün değişimi	53
Şekil 3.17.	Mineral yağ ve doğal ester yağın zamana bağlı ortalama bağlı yaşlanma oranı değişimi	53
Şekil 3.18.	Mineral yağ ve doğal ester yağlı transformatörler için ömür kaybı değişimi	54
Şekil 5.1.	Kullanılan yağ ve kâğıt numuneler	64
Şekil 5.2.	Yaşlanma hücresi	64
Şekil 5.3.	Kontrol panelinin ön görünüşü	65
Şekil 5.4.	50kV’luk yaşlanma hücre sisteminin kumanda paneli	65
Şekil 5.5.	50kV’luk Yaşlanma hücresi	66
Şekil 5.6.	Kâğıt numunelerin ısı yaşlanma amaçlı hazırlanması	67
Şekil 5.7.	20°C, 100°C ve 140°C mineral yağ ortamında kâğıdın yaşlanması	69
Şekil 5.8.	20°C, 100°C ve 140°C doğal ester yağ ortamında kâğıdın yaşlanması	70
Şekil 5.9.	2000 saat süresince 100°C ve 140°C’de yaşlanmış numuneler	72
Şekil 5.10.	2000 saat süresince 100°C ve 140°C’de yaşlanmış kâğıt numuneler	73
Şekil 5.11.	2000 saat süresince 100°C ve 140°C’de yaşlanmış kâğıt numuneler	73

Şekil 5.12. FTIR 100°C' de mineral yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune	75
Şekil 5.13. FTIR 100°C' de doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune	75
Şekil 5.14. FTIR 140°C' de mineral yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune	76
Şekil 5.15. FTIR 140°C' de doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune	76
Şekil 5.16. 100°C' de 2000 saat mineral yağda yaşlanmış kâğıt numune	78
Şekil 5.17. 100°C' de 2000 saat doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numune.....	78
Şekil 5.18. 140°C' de 2000 saat mineral yağda yaşlanmış kâğıt numune.....	79
Şekil 5.19. 140°C' de 2000 saat doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numune.....	79
Şekil 5.20. 140°C' de 3000 saat mineral yağda yaşlanmış kâğıt numune.....	80
Şekil 5.21. 140°C' de 3000 saat doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numune.....	80
Şekil 5.22. 120°C' de ısı zorlanma ve 20kV/mm elektrik zorlanma altında 384 saat sonucunda delinmiş kâğıt numune	81
Şekil 5.23. 120°C' de ısı zorlanma ve 20kV/mm elektrikselleştirme altında 384 saat sonucunda delinmiş kâğıt numune	81

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Elektriksel ısı benzetim	39
Tablo 3.2. Sıcaklık hesaplamasında kullanılan üstel katsayılar	48
Tablo 3.3. 250 MVA Güç transformatörünün parametreleri	49
Tablo 3.4. Güncellenmiş yaşlanma katsayısı	50
Tablo 5.1. Mineral yağdaki yaşlanma ömür süreleri.....	68
Tablo 5.2. Doğal ester yağdaki yaşlanma ömür süreleri.....	69
Tablo 5.3. IEC 60422 standardına göre 2000 saat süresince 100°C sıcaklıkta içerisinde kâğıt tutulmuş yağların analiz sonuçları.....	71
Tablo 5.4. IEC 60422 standardına göre 2000 saat süresince 140°C sıcaklıkta içerisinde kâğıt tutulmuş yağların analiz sonuçları.....	71

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Ayarlanabilir parametre, Alan
A_c	: İletken kesidi, (mm^2)
A_p	: İletken üzerindeki yalıtkanın kesidini, (mm^2)
K	: Kesit oranı
J	: Kısadevre akım yoğunluğu
σ_{75}	: 75°C 'de bakır iletken malzemenin elektriksel olarak öz iletkenliği
θ_w	: Kısadevre oluşumunda sargının ortalama sıcaklığı, ($^\circ\text{K}$)
l	: İletkenin uzunluğu, (m)
e_{75}	: 75°C 'de yüzdelik olarak ifade edilen bakır kayıpları, (%)
$\Delta\theta$: θ_w 'ye göre kısadevre sıcaklık artışı, ($^\circ\text{K}$)
q	: Birim zamanda birim yüzeyden taşınan ısı miktarı, (W/m^2)
H	: Isı taşınım katsayısı, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
W_{conv}	: Yüzey alanı için metre başına taşınım yoluyla geçen toplam ısı enerjisi, (W/m)
q_x	: x yönünde birim zamanda birim yüzeyden transfer edilen ısı enerjisi, (W/m^2)
ρ	: Malzemenin ısı öz direnci, ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$)
λ	: Malzemenin ısı iletim katsayısı, ($\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}$)
E	: Sürecin aktivasyon enerjisi, (Joule)
k	: Boltzman sabiti
T	: Sıcaklık, ($^\circ\text{K}$)
U^o	: Aktivasyon enerjisi, (Joule)
τ_o	: Malzemenin molekülerinin ters titreşim frekansı
χ	: Yapısal parametre
N_p	: Primer (birincil) siper sayısı
N_s	: Sekonder (ikincil) siper sayısı
X	: Endüktif Reaktans, ($\Omega - \text{ohm}$)
$\Delta\theta_{oil}$: Yağ sıcaklık değişimini, ($^\circ\text{K}$)
θ_t	: En yüksek yağ sıcaklığı (kapak altı), ($^\circ\text{C}$)
$\Delta\theta_t$: En yüksek yağ sıcaklık değişimi, ($^\circ\text{K}$)
θ_a	: Ortam sıcaklığı, ($^\circ\text{C}$)
θ_s	: Ortalama sargı sıcaklığı, ($^\circ\text{C}$)
$\Delta\theta_s$: Ortalama sargı ısınması, ($^\circ\text{K}$)
θ_{sg}	: Soğutucuya giriş sıcaklığı, ($^\circ\text{C}$)
$\theta_{sç}$: Soğutucudan çıkış sıcaklığı, ($^\circ\text{C}$)
θ_{smax}	: En yüksek sargı sıcaklığı, ($^\circ\text{C}$)
θ_y	: Ortalama yağ sıcaklığı, ($^\circ\text{C}$)
$\Delta\theta_{sy}$: Sargı ve yağ arasındaki sıcaklık farkı, ($^\circ\text{K}$)
$\Delta\theta_y$: Ortalama yağ ısınması, ($^\circ\text{K}$)
θ_{hs}	: Hot – spot sıcaklığı (Sıcak nokta değeri), ($^\circ\text{C}$)
q	: Kayıpların oluşturduğu ısı, (W)

q_{tot}	: Toplam kayıplar tarafından oluşan ısı, (W)
q_{fe}	: Demir kayıplarının oluşturduğu ısı, (W)
q_{wdn}	: Sargıdaki kayıpların oluşturduğu ısı, (W)
q_l	: Yükteki kayıpların oluşturduğu ısı, (W)
C_{th-oil}	: Transformator yağının eşdeğer ısı kapasitansı, (Wh/ °C, J/°C)
C_{th-wdn}	: Sargının ısı kapasitansı, (Wh/ °C, J/°C)
q_{boil}	: Yağın alt seviyesinde oluşan ısı, (W)
q_{bwdn}	: Sargının alt seviyesindeki en sıcak bölgenin oluşturduğu ısı, (W)
$R_{th-oil-air}$: Yağın alt seviyesi ile hava arasındaki doğrusal olmayan ısı direnç, (mK/W)
$R_{th-wdn-boil}$: Sargı ve yağın alt seviyeleri arasındaki ısı direnç, (mK/W)
θ_{oil}	: Yağ üst seviye sıcaklığı, (°C)
$R_{th-hs-oil}$: Yağ ile sargı arasındaki doğrusal olmayan ısı direnç, (mK/W)

Kısaltmalar

AG	: Alçak Gerilim
AN	: Doğal Hava Soğutmalı
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
FR3	: Çevreci Doğal Ester Transformator Yağı
FRA	: Frequency Response Analysis (Frekans Tepki Analizi)
FTIR	: Fourier Transform InfraRed Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre)
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı)
OFAF	: Oil Forced and Air Forced (Zorlamalı Yağ ve Zorlamalı Hava Soğutmalı)
OFAN	: Oil Forced and Air Natural (Zorlamalı Yağ ve Doğal Hava Soğutmalı)
OFWF	: Oil Forced and Water Forced (Zorlamalı Yağ ve Zorlamalı Su Soğutmalı)
ON	: Oil Natural (Doğal Yağ Soğutmalı)
ONAF	: Oil Natural and Air Forced (Doğal Yağ ve Zorlamalı Hava Soğutmalı)
ONAN	: Oil Natural and Air Natural (Doğal Yağ ve Hava Soğutmalı)
PCB	: Polychlorinated Biphenyls
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
YG	: Yüksek Gerilim

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN YAŞLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE ÇEŞİTLİ KOŞULLAR ALTINDA YÜKLENEBİLİRLİK ANALİZİ

ÖZET

Güç transformatörleri, elektrik enerji iletim ve dağıtım sisteminin en önemli ve pahalı elemanlarından birisidir. Bu yüzden, tahmini ömründen azalma olmaksızın uzun yıllar işletilmesi beklenmektedir. Transformatörlerde işletim sırasında yüklenme kabiliyetini ve ısıl durumunu belirleyen en kritik parametre en yüksek sargı sıcaklığıdır. Çünkü bu sıcaklık yaşlanma sürecini hızlandıran en etkin parametrelerden birisidir. Diğer yandan, transformatörlerde kâğıt yalıtkanın yaşlanma sürecine doğrudan etki eden, mineral ve doğal ester gibi farklı yağlar kullanılmaktadır.

Bu tezde, iki ana konu incelenmektedir; ilki güç transformatörlerin ısıl – elektriksel benzetimine dayanan yüklenbilirlik analizi, diğeri ise kâğıt yalıtkanın, mineral yağ ve doğal ester yağ içerisinde çeşitli etkiler altındaki yaşlanmasıdır. Deneysel çalışmalarda ısıl ve elektriksel etkiler altındaki yaşlanma, hem doğal ester yağ hem de mineral yağ ile aynı ortamda karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, kâğıt yalıtkanın yaşlanmasında sıcaklığın en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Ayrıca, SEM ve FTIR gibi diğeri testler de göstermektedir ki yaşlanma doğal ester yağda mineral yağa göre daha yavaş seyretmektedir. Yani bozulma doğal ester yağ içerisinde daha yavaş gerçekleşmektedir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Ester ve Mineral Yağ, Güç Transformatörü, Isıl Model, Yaşlanma, Yüklenbilirlik.

THE LOADABILITY ANALYSIS AND INVESTIGATION OF AGING OF POWER TRANSFORMERS UNDER VARIOUS CONDITIONS

ABSTRACT

Power transformer is one of the most important and expensive components of power transmission and distribution systems. Therefore, it is expected to the transformer operates for many years without losing of its life expectancy. The hot – spot temperature of transformer’s winding is the critical parameter, to define thermal conditions and loading capability of the power transformer beyond its nameplate rating. Because, the aging process of the transformer accelerates due to the hot–spot temperature. Besides, the different insulating oils, such as mineral and natural ester, are widely used in power transformers and they also affect the aging characteristic of the insulating paper.

In this thesis, two main subjects are investigated. First is the loadability analysis of power transformer based on thermal – electrical analogy, second is the aging of insulation paper in mineral and natural ester oils under different stresses. The aging effects of the new – generation insulating oils (natural ester in particular) on the paper material have been compared to mineral oils under the same operating temperatures and electrical stresses in the experimental studies. The results show that the temperature plays dominant role on aging of the paper material which is used as a main insulator in the transformers. And also, the other tests, SEM and FTIR etc., show that the natural ester oil has significant advantages in accordance with the mineral oil to slow down of the aging of insulation. The experimental studies of the thesis proves that deformation of the insulating paper in natural ester is lower.

Keywords: Natural Ester and Mineral Oil, Power Transformer, Thermal Model, Aging, Loadability.

GİRİŞ

Elektrik enerjisi en fazla kullanılan ve ihtiyaç duyulan enerji türlerinden biridir. Elektrik enerjisinin kalitesi ve sürekliliği tüketiciler açısından çok önemlidir. Elektrik enerjisinin kesintisi özellikle işletmeler açısından yüksek maliyete neden olmakta ve elektrik dağıtım şirketlerini sıkıntıya sokmaktadır. Bu bağlamda elektrik enerjisinin kalitesi ve sürekliliği çok daha büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle elektrik dağıtımını ve iletiminde kullanılan ekipmanlarda meydana gelebilecek arızaların önceden tespit edilmesi ve sorunun kısa sürede çözülmesi çok önemlidir. Ayrıca bu ekipmanlar, sürekli gözlem altında tutularak meydana gelen arıza en kısa sürede giderilmelidir.

Enerji sistemlerinin temel görevi, enerjiyi en ekonomik şekilde, kabul edilebilir bir güvenilirlik ve kalite seviyesinde müşteriye sunmaktır. Sistemi oluşturan elemanların durumu ve çevre koşulları sistemin düzenli çalışmasını doğrudan etkiler. Bu yüzden enerji üretim, iletim ve dağıtım sistemini verimli şekilde işletmek ve zamansız elektrik kesintisinin önüne geçebilmek için düzenli bir koruyucu bakıma ihtiyaç vardır.

Günümüzde çevrenin öneminin giderek artması, her alanda olduğu gibi elektrik güç sistemlerini de yakından etkilemiştir. Bu etkilenenlerden biri de enerji sistemlerindeki en temel ve önemli donanımlardan olan güç transformatörleridir. Güç transformatörleri, santrallerde üretilen elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında verimli bir şekilde aynı güç ve frekansta taşınması için kullanılan en önemli elemanlardır. Bu enerji iletim ve dağıtımını, akım ve gerilim değerlerinin genlikleri istenilen değerlere ayarlanabilmektedir. Enerji verimliliğini arttırmak için iletim hatlarında yüksek gerilime, dağıtım hatlarında ise düşük gerilime dönüştürülürler.

Transformatörlerin hareketli parçaları yoktur ve bu nedenle diğer elektrik makinelerine göre daha yüksek verime sahiptir. Aynı zamanda güç transformatörleri, enerji kuruluşları için ciddi ve pahalı sistemlerdir. Yapısal olarak büyük olmaları, üretim ve tesis edilme durumundaki zorluklar, bunlarla birlikte yaşanabilecek arıza

durumlarındaki onarım ve bakım masrafları düşünülduğünde tesis ve işletim maliyetinin çok yüksek olduğu söylenebilir. Bu nedenle güç transformatörlerinin güvenli işletilmesi ve beklenen kullanım ömrünü doldurabilmesi için bakımları periyodik olarak yapılması önemlidir. Bu makinelerin boyutlarını küçültmek, uzun süre arıza yapmadan işletilebilmesi, hem fiziksel hem de kimyasal olarak zararlı etkilerini en aza indirmek için araştırma – geliştirme (Ar – Ge) çalışmaları devam etmektedir.

Güç transformatörleri genellikle 5MVA – 1000MVA aralığında ve giriş yani primer gerilimi 800kV değerine kadar üretilmektedir. Bu transformatörler, güç değerlerine göre;

- Küçük güçlü: 500kVA – 7500kVA,
- Orta güçlü: 7500kVA – 100MVA
- Büyük güçlü: 100MVA ve üstü olarak sıralanabilir [1].

Güç transformatörleri için önemli bir diğer unsur kullanılan katı ve sıvı yalıtkanlardır. Soğutma ve yalıtım amacıyla kullanılan sıvı yalıtkanlar farklı zamanlarda ihtiyaca yönelik değişiklik göstermiştir. Uzun yıllar soğutma sıvısı olarak mineral yağlar kullanılmıştır ancak günümüzde yerini sentetik ve doğal esterler almaya başlamıştır. Bu geçiş aşamasında kısa bir süre Polychlorinated Biphenyls (PCB) olarak adlandırılan, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olan halojenli sıvılardır. İnsan ve çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan bu sıvıların kullanımı yasaklanmıştır. Ancak daha önceden kullanılmaya başlanmış ve işletilebilirliği sürmekte olan PCB'li transformatörlerin bakımı, yüksek güvenlik önlemleri alınarak gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda ise çevreci olarak tanımlanan bitkisel yağların yani doğal ester yağların yalıtım sıvısı olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Böylece bu yalıtım yağları ile transformatörlerin yüksek sıcaklıklarda yüklenebilirliğini arttırmaya olanak sağlanır. Güç transformatörlerinin belli aralıklarla bakım ve kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Uzun süre kullanılan transformatörlerin çok daha kısa aralıklarla bakım ve kontrolleri yapılmalıdır. Dolayısıyla transformatör arızalarının önceden veya başlangıç aşamasında belirlenmesi;

- Enerji kesintisinin önlenmesi,
- Büyük hasarların önlenmesi,

- Arızanın ilerlemesinin önlenmesi,
- Ekonomik kayıpların azaltılması,
- Tamirat süresinin kısaltılması açısından oldukça önemlidir [2].

İletim ve dağıtım sistemlerinin en önemli parçası olan transformatörlerin gerek yapım gerekse bakım maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle işletme koşullarında beklenen ömründen kayıp olmaksızın güvenli şekilde işletilmesini sağlamak günümüzde oldukça önemlidir. Bu nedenle beklenmeyen işletim durumlarında (aşırı yüklenme) ve çevre koşulları altında transformatörün ömrü kısılabılır. Bilindiği gibi transformatörlerde yaşlanmayı hızlandıran en önemli etken işletim sıcaklığıdır. Bu parametre aynı zamanda transformatörün yüklenebilirliğini de belirleyen en önemli parametredir. IEC 60076'ya göre, ortam sıcaklığı 20°C de çalışan bir transformatörün izin verilebilir maksimum işletme sıcaklığı 98°C'dir [3]. IEEE'ye göre bu ortam sıcaklığı 30°C olarak kabul edildiğinde izin verilebilir maksimum işletme sıcaklığı 110°C'ye tekabül etmektedir [4]. Ortam sıcaklığına ve transformatörün yüklenmesine bağlı olarak değişen işletim sıcaklığı, transformatör yalıtkanının ömrünü doğrudan etkilemesi nedeniyle %100'lük yük faktörü altında ortalama ömrü 20 yıl civarında olmaktadır. Daha düşük yük faktörleriyle (%100'ün altında) işletilen transformatörlerde beklenen ömür daha da yüksek olabilmektedir (30–40 yıl).

Güç transformatörlerinin işletme ömürleri 20 ila 30 yıl, dağıtım transformatörlerinin ise 30 ila 40 yıl arasındadır. Eğer bu transformatörlerin bakımları düzenli ve standartlara uygun olarak yapılırsa güç transformatörlerinin ömrü 40 yılın üzerine, dağıtım transformatörlerinin ise 60 yıla kadar çıkabilmektedir. Ancak Montsinger'e göre izin verilebilir maksimum işletme sıcaklığı referans olarak alındığında bu sıcaklığı geçen her 6°C'de bağıl ömür yarıya inmektedir. Montsinger bu verileri 80°C ile 140°C arasında elde etmiştir [5]. Bu nedenle bu işletme sıcaklıkları arasında transformatörün yaşlanma mekanizması ortaya konulmuş, daha önce yapılmış olan modelleri incelenerek ve farklı bir yaşlanma modeli önerilmiştir. Bu amaç, hem transformatör üreticileri hem de kullanıcıları açısından önem arz etmektedir.

Transformatörler dış ortamdan oldukça fazla etkilenmektedir. Örneğin çevresel faktörler, doğal afetlerden oldukça etkilenmektedirler. Bu nedenle transformatör

merkezi kurulurken sağlam zeminli yerlere uygun bir şekilde inşa edilmelidir. Transformatörlerin kalitesini, verimini, güvenliğini ve işletme ömrünü belirleyen etkenler;

- Tasarım,
- Montaj ve işçilik,
- Yalıtım yağı, tahta ve kâğıt gibi katı yalıtkanların kalitesi,
- İletken malzemelerin kalitesi,
- Transformatörün iç ve dış aksamında kullanılan parçaların kalitesi,
- İşletme şekli ve çevre koşullarının etkisi,
- İşletme boyunca yapılan kontrol ve bakımlar,
- Doğal afetler olarak görülmektedir [6].

Çevresel faktörler olarak sıcaklık, nem, basınç transformatörlerin ömürlerine büyük etkendir. Özellikle çeşitli nedenlerden dolayı ya da dış etken sıcaklıkları ile transformatör ısınmaktadır ve daha kısa sürede yaşlanmaktadır. Transformatörler yaşlandıkça yapımında kullanılan malzemeler yıpranır, yalıtımın zayıflamasına ve arızaların oluşmasına neden olur. Transformatörlerin en az düzeyde zarar görmesini ve beklenen ömrü süresince işletilmesini sağlamak için soğutma ve yalıtım amacıyla yaygın olarak kullanılan madeni yağların yerine, doğada büyük oranda çözülebilen daha çevreci yağlar kullanılmaya başlanmıştır. Transformatörde kullanılacak olan yağların özellikleri işletim ve çevresel koşulların dikkate alınması ile seçilmektedir.

Transformatörlerde yüklenme etkisiyle oluşan yüksek sıcaklık artışları, kullanılan yağlar ile bir yandan soğutulurken diğer yandan bu yağlar sargılar arasında yalıtım görevi görür. Ana yalıtkan malzeme olarak kullanılan yalıtkan kâğıt, oluşan yüksek elektrik ve ısıl streslere maruz kalır. Sargılar arasında yalıtım görevi olan bu malzemenin ömrü doğrudan transformatörün ömrüyle ilişkilidir. Bu nedenle yalıtkan kâğıdın yaşlanma davranışı önemlidir.

Bu tezde, transformatörlerde katı yalıtkan olarak kullanılan kâğıdın (kraft paper), yine sıvı yalıtkan olarak kullanılan mineral yağ ve doğal ester (FR3) yağ içinde ayrı ayrı yaşlanma davranışları incelenmekte ve ömürleri model oluşturularak tespit ve analiz edilmektedir. Bu amaçla, yalıtkan malzeme elektriksel ve ısıl zorlanmalar altında yaşlandırılmış ve ömür zamanları test edilmiştir. Bunun yanında ısıl etkileri

ortaya çıkarmak amacıyla, yalıtkan malzeme mineral ve doğal yağ içerisinde özel fırınlarda 1000, 2000, 3000 saat boyunca yaşlandırılmış, kimyasal ve fiziksel karakteristikleri incelenerek, elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Bu amaçla güç transformatörlerinin yaşlanma davranışının incelenmesi ve çeşitli koşullar altında yüklenebilirlik analizi için gerekli olan yağ ve selüloz bazlı kâğıdın yaşlandırılması ve analizlerinin yapılması amacıyla hücre tasarlanmış olup bu hücre içerisinde transformatörlerde yalıtkan olarak kullanılan kâğıt yalıtkan malzemenin (Kraft paper) ısı ve elektriksel etkiler altında yaşlanmasını içeren mineral ve doğal ester yağlarda deney, test ve analizler yapılmıştır.

Bu sistemde verilerin alınması için algılayıcılar, PLC ve buna bağlı dokunmatik panel, ayrıca kontrol ünitesi ve yapılan işlemlerdeki değişikliklerin sağlanması için de bir adet bilgisayar kullanılmıştır.

Transformatör bölümlerinin sıcaklık değişimleri, yüklenme eğrileri, yağın ısı kapasitesi ve direnç ile beraber yoğunluk, viskozite, basınç ve nem değişimleri, yağdaki çözünmüş gaz oranları gibi birçok veri işlenerek analiz edilmiştir. Sistemden alınan bu verilerin ilişkilendirilmesi ve IEC – IEEE standartları temelinde oluşturulan modeller ile birlikte arıza gelişiminin önlenmesine dönük teşhisler ve analizlerin yapılması gerçekleştirilmiştir.

Güç transformatörleri için yüklenebilirlik analizini gerçekleştirmede farklı yükler altındaki sıcaklık değerlerinin bilinmesi önemlidir. Aynı zamanda doğrulukları yüksek modellerin oluşturulması, transformatörlerin işletilmesinde ve yüklenebilirlik analizlerinin bilgisayar ortamında yapılması için gereklidir. Bununla birlikte, modelleme sayesinde sistemden çekilen anlık yüklere göre sıcaklık değerleri tespit edilebileceğinden uzun vadede ömür tahminlerini gerçekleştirmek de mümkün olabilecektir. Ancak gerçeğe yakın bir model oluşturulması için modeldeki parametrelerin deney ile tespiti de göz önüne alınması gereken önemli bir unsurdur. Böylece farklı katmanların sıcaklıklarının daha doğru olarak belirlenmesi mümkün olabilecektir. Bu durum, özellikle serviste olan transformatörlerin güvenli işletimi için önemli bir katkı sağlayacaktır.

1. LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ

İlk transformatörler 1831'de Faraday'ın, doğru akım ile anahtarlama yaparak üzerinden değişken bir akım geçen iletken bir telin çevresinde manyetik bir alanın oluşması prensibine dayanmaktadır. 1836'da G. J. Poge bu sistemi aynı şekilde ototransformatörü ile tekrar etmiştir. 1844'te Abraham Ganz, Macaristan – Budapeşte'de nüve fabrikası kurmuştur. 1884'te 1400VA,40Hz,120V/72V değerlerinde Dery, Bothy ve Zipersnoviski ilk kapalı nüveli transformatörü ürettiler. 1890'da ilk kez 3 fazlı transformatörü Delivo Dobrowisky icat etti. 1890'da Brown Fabrikası tarafından ilk yağ soğutmalı ve yalıtımlı transformatör üretildi. Yağ yalıtımlı transformatörün yapılması büyük güçlü transformatörlerin yapılmasına olanak sağlamıştır. 1895'te Niyagara'da bir şirket, bir fırında kullanılmak üzere 750kVA gücündeki ilk transformatörü üretti. Bundan beş yıl sonra 2000kVA gücünde 50 kV gerilimde çalışabilen transformatörler yaygın olarak kullanılmıştır. 1900'lerin başında İngiliz malzeme bilimcisi Robert A.Hadfield, silikonlu demir kullanımı için çalışmalar yaptı. Amerikalı Metalürjist Norman P.Goss'un 1930'larda ısı altında ve çekerek yapılan silikonlu demir tabakaların çekme yapılan doğrultuda dikkati çeken manyetik özellikleri olduğunu ortaya çıkartmıştır. 1932'li yıllarda yalıtım ve soğutma amaçlı olarak klorlu hidrokarbon sıvılar kullanılmıştır. Değişik ülkelerde, içeriği aynı olan bu malzeme Almanya'da klofen, Fransa'da piralen, Amerika'da ise askarel veya piranol olarak bilinmektedir. Günümüzde yüksek sıcaklığa dayanıklı sıvı yalıtkanlar üzerine çalışmalar devam etmektedir [7].

Transformatörlerin sargıları arasındaki yalıtkanların yaşlanmaya başladığı en sıcak nokta değeri 98°C olup bu sıcaklıktan sonraki sıcaklıklarda Montsinger'e göre bu sıcaklık işletme sıcaklığı olarak referans alındığında artan 6°C'lik sıcaklıklarda yaşlanma iki kat artmaktadır [5].

Perkins ve arkadaşları güç transformatörlerinde ömür kayıplarını hesaplarken sıcaklık verilerinin yanı sıra çözünmüş gaz analizi, elektriksel ve fiziksel özellikleri de kullanmış olup değişkenlerin her birine farklı ağırlık veren bir algoritma

geliştirmişlerdir [8]. Thomas ve Shukla, kimyasal yöntemler kullanarak, transformatör kâğıdının polimerizasyon derecesinin farklı sıcaklıklardaki işletim süresinin değişiminden faydalanılarak yaşlanma durumlarını incelenmiştir [9]. Wilson ve Lapworth, transformatörde kullanılan kâğıdın polimerizasyon derecesinin, sargıların orta kısmından üst kesimlere doğru gidildikçe azaldığı gösterilmiştir [10]. Bolhuis ve arkadaşları; sıcaklık, kademe değiştirici, dielektrik özellikler, çözünmüş gaz analizi ve kısmi deşarjlar ile bir izleme sistemi geliştirmişlerdir [11]. Kovacevic ve Dominelli, bir güç transformatörünün ideal ömrü boyunca kullanılması amaçlı yeni bir sistem geliştirmişlerdir. İşletimde olan transformatörün yağ çevrimini ince fiber zarlardan geçirmek suretiyle, yağ içerisindeki parçacıkları, çözünmüş gaz ve suyu ayırtırmaya çalışmışlar, sonuçları değerlendirmişlerdir ve almış oldukları sonuçlar itibariyle olumlu katkılar sağlamıştır [12]. Reddy ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise transformatör buşinglerindeki yağlı kâğıtların dielektrik özelliklerinin değişimi sayesinde ömür tahminleri yapılmıştır [13]. Güncel çalışmalarda yaşlanma analizleri ve ömür tahminleri yapılırken önem derecesine göre etki eden tüm unsurların bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir [14, 15].

Glenn Swift ve arkadaşları, aşırı yüklenme durumunda hesaplamaya bağlı olarak sıcak nokta değerlerini belirlemek için transformatör koruma rölesi tasarlamışlardır ve hızlı bir şekilde tepki verdiğini görmüşlerdir. Bu makalede bazı ilkeler ve kavram yanılgıları tanımlanmıştır [16]. Yine Glenn Swift ve arkadaşları, güç transformatörlerinin ısı akış denklemlerini temsil eden basit bir eşdeğer devre oluşturmuşlardır. Kayıplardan kaynaklanan akım kaynağı ile ısı girişi, doğrusal olmayan direnç ile hava ve yağlı soğutma benzetilmiştir. Ortam sıcaklığı sistem için değişken bir giriş olup ideal bir gerilim kaynağına benzetilmiştir. Bu benzetim işlemini, işletme altındaki 250MVA'lık bir güç transformatöründe deneysel olarak kanıtlamışlardır. Bir güç transformatörünün ısı eşdeğer devre modeli ısı transfer teorisine bağlı kalarak benzetim gerçekleştirilmiştir ve bu benzetim ile büyük güçlü transformatörlerin yağın üst seviye sıcaklıkları diferansiyel denklemlerle hesaplanmıştır. Aynı zamanda bu ısı model ile eşdeğer devrenin sıcak nokta değeri için de kullanılabilceği belirtilmiştir. Böylelikle, işletme altındaki bir transformatörün devre dışı bırakılmaksızın bu ısı model ile yağın üst seviye

sıcaklığı, sıcak nokta değeri ve yağ sıcaklık artışının gözlemlenebileceği ortaya konmuştur [17].

Muhammed Arshad ve arkadaşları, nem ve furanik bileşikler gibi çözüm için gerekli olan veriler kullanılarak güç transformatörünün ömür tahminini, bulanık mantık tabanlı sistemle gerçekleştirmişlerdir [18].

Zoran Radakovič ve Ana Popovič 2003 yılında yapmış oldukları çalışmada zorlamalı yağ ve su (OFWF) sirkülasyonlu transformatörlerde, yağın üst seviye sıcaklık değerinin hesaplanması için ısı bir model kurmuşlardır. Bu model ile transformatörlerin yüklenme durumunu kestirmek için kurulmuştur. Böylece kullanılan transformatörlerin bakımlarının ve yeni bir transformatörün nasıl tasarlanacağını model aracılığıyla öngörmüştür [19].

Ahmed Al – Nadabi ve Hisham Al – Riyami, güç transformatörlerinde sıcak noktayı ve transformatörlerin ısı davranışını tahmin etmek için bir model kurmuşlardır. Yağın üst seviye ve sıcak nokta değerlerinin model eşitlikleri, Euler Yöntemi kullanılarak sayısal çözüm ile gerçekleştirilmiştir ve iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [20].

M. Savaghebi ve arkadaşları 2008 yılında, sinusoidal olmayan yük akımlı bir ısı model kurmuşlardır. Transformatörlerin dinamik ve sürekli durumdaki yüklenebilirlikleri gözlemlenmiştir. Önerilen sonuçlar ile klasik yöntemler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, transformatörün yüklenebilirliği klasik yöntem kullanılarak yapılan hesaplama limitlerinin dışında gösterilmiştir [21].

César Rosas ve arkadaşları, ısı tüpleri ile yağlı güç transformatörlerinin soğutma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Bu metotta, incelenen ısı transferi noktasından yağın kritik bölge tahminine kadar teorik olarak analiz edilmiştir ve deneysel çalışma ile de teorik tahmin doğrulanmış olup yağın kritik bölgelerine yerleştirilen ısı borularının etkisi belirtilmiştir [22].

Dejan Susa ve arkadaşları, doğal yağ ve hava soğutmalı bir dağıtım transformatörü üzerinde kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Sıcak nokta değeri ve yağın üst seviye sıcaklık eğiminin transformatörün yapısına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Yapılan

bu çalışmanın sonunda sonuçlar, değişken yük altındaki termokupul ölçümleri ve testler ile doğrulanmıştır. Sıcak nokta değeri ve yağın üst seviye sıcaklık cevapları, IEEE'nin yüklenme kılavuzu olan EK–G ile tahmin edip ölçülen değerleri karşılaştırmışlardır [23]. Yine Dejan Susa ve arkadaşları, normal işletme ısısında çalışan bir güç transformatöründen aldıkları verilere bağlı olarak geçici durum süresince daha doğru bir sıcaklık hesaplaması yapabilmek için sıcak nokta değeri ve yağın üst seviye sıcaklığı için ısıl model oluşturmuşlardır. Yağın viskozite değişimi ve sıcaklıkla değişen kayıplar da hesaba katılmış olup bu yeni ısıl model, yük akışı değişen farklı tip soğutmalı transformatörlerde de kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir. Çünkü yapmış oldukları IEEE Yüklenme Kılavuzundaki EK–G ile karşılaştırdıklarında olumlu sonuçlar elde etmişlerdir [24].

Dejan Susa ve Matti Lehtonen, ısı transferi teorisine, bir güç transformatörünün farklı bölgelerindeki doğrusal olmayan ısıl direncin tanımlanmasına, ısıl – elektriksel benzetime ve birleştirilmiş kapasite metoduna bağlı olarak yeni bir sıcaklık hesaplamasını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında, yağ viskozite değişimi ve sıcaklıkla değişen kayıplar da bir önceki çalışmada olduğu gibi hesaba katılmıştır. Transformatördeki zaman sabiti, yağdaki viskozite değişiminden dolayı ısıl modelde hesaplanmıştır. Bu değerler bir güç transformatöründe ısıl teste tabi tutularak deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında doğruluğu onaylanmıştır [25].

Elmoudi ve arkadaşları, dinamik olarak (sürekli değişen) yüklenen güç transformatörlerinin ısıl modeli üzerine çalışma yapmışlardır. Bu modeli, yağın üst seviye sıcaklığı ile sıcak nokta değerini hesaplamak için kurmuşlardır. Modelde kullanılan parametreler, imalatçıdan elde edilen test verileri olup sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yapılan elektromanyetik bir analiz programı ile karşılaştırılmıştır. Fiber optik problemlerle ölçülen verilere göre IEEE yüklenme denklemleri ile de karşılaştırıldığında model, daha iyi bir şekilde yağın üst seviye sıcaklık ve sıcak nokta değeri tahmini yaptığı görülmektedir [26].

Kurt Preis ve arkadaşları, üç boyutlu karmaşık yapıdaki güç transformatöründeki elektromanyetik alan ile oluşan sıcaklık artışını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Bu sıcaklık ile ısı transfer katsayılarına ve elektriksel iletkenliğe bağlı

olarak ısı ve elektromanyetik denklemler arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermişlerdir [27].

A. Elmoudi, bir transformatörün yağın üst seviye sıcaklığını ve sıcak nokta değerini tahmin etmek için ısı bir model oluşturmuştur. Bu model için harici soğutma sistemi olmayan dağıtım transformatörü temel alınmıştır. Elmoudi, bu dağıtım transformatörüne termokupul ekleyerek 1br ve 2 br' lik değişen yükler altında işletme süresince test etmiştir. Bu modelin parametreleri, doğrusal olmayan en küçük kareler algoritması ve ölçülen veriler kullanılarak belirlenmiştir ve bu model, ölçümlerle karşılaştırdığında genel olarak iyi sonuçlar alınmıştır [28].

Mohd Taufiq Ihsak ve Zhongdong Wang, IEEE' nin yüklenme kılavuzundaki sıcak nokta değerinin Bölüm 7 ve Ek G de verilen iki model ile hesaplandığını göz önünde bulundurarak bu iki metodu karşılaştırmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmada 4 farklı transformatörün (ONAN, ONAF, OFAF ve ODAF tipi) sabit yük altında, günlük yük ile ortam sıcaklığında ve kısa zamanlı aşırı yüklenme koşulları altında sıcak nokta değerlerinin hesaplamalarını karşılaştırmış olup ömür kayıplarını tahmin etmişlerdir [29].

Y. Tamsir ve arkadaşları, gelişme aşamasında olan güç transformatörlerinin durum değerlendirmesini, yapmış oldukları ısı yaklaşımına dayanan deneyler sonucunda gerçekleştirmişlerdir [30].

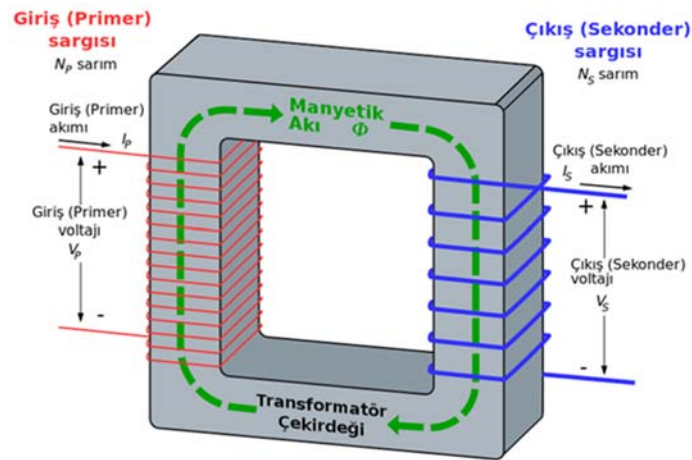
B. Cahyono ve arkadaşları, yük ve sıcaklık için manuel veri toplayıcısı kullanarak ve fider hatalarıyla çözülmüş gaz üreterek geliştirilen ısı istatistik karakteristiklerini gösteren çalışma yapmışlardır [31].

Kourosh Mousavi Takami ve arkadaşları, yağlı güç transformatörlerindeki ısı ve sıcak nokta değerlerinin değişimini ve bu değerlerin tahmin doğruluğunu geliştirmek için FEMLAB ve MATLAB yazılımlarını kullanarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmada IEEE ve IEC' nin de içinde bulunduğu diğer önerilen prosedürlerin sıcaklık tahmininin istenilen kadar iyi bir tahmin olmadığını öne sürmüşlerdir. Aşırı yüklenmeler dışında çeşitli arıza durumlarında kabul edilemeyecek sıcaklık artışlarının sürekli ve düzenli bir şekilde transformatörlerin gözlenmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir [32].

2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN TEMEL ESASLARI

2.1. Temel Yapısı ve Çalışması

Transformatörler elektrik enerjisinin elektromanyetik endüksiyon yolu ile gerilim ve akım değerlerini frekansta değişiklik yapmadan ihtiyaca göre değiştiren elektrik makinesidir. Transformatörler: ince, özel silisli saclardan oluşan kapalı bir manyetik gövde ile bunun üzerine yalıtılmış iletkenlerle sarılan sargılardan oluşur. En basit şekilde iki sargı bulunur. Bu sargılardan birine primer(birincil) diğere ise sekonder(ikincil) adı verilir. Birincil ve ikincil sargıların birbirlerine elektriksel olarak bir bağlantısı yoktur. Transformatörlerin hareket eden parçaları olmadığı için verimi çok yüksek değerlere çıkabilmektedir. Elektrik santralleri kullanılan yakıtın yakın yerlerde tesis edildikleri için çoğu zaman tüketim merkezlerine uzakta bulunur. Bu sebepten elektrik enerjisi, üretildiği yerden uzak bölgelere iletilebilmesi gerekmektedir. Transformatörler gerilimi yükseltmek için kullanıldıkları gibi düşürmek için de kullanılır. Santral çıkışında yükseltici, tüketim merkezlerinde ise düşürücü olarak kullanılır. Düşürücü transformatörlerde birincil sargı ince kesitli ve çok sarımlı, ikincil sargı kalın kesitli ve az sarımlı; yükseltici transformatörlerde ise birincil sargı kalın kesitli ve az sarımlı, ikincil sargı ince kesitli ve çok sarımlı olarak yapılır. Şekil 2.1’de basit olarak bir fazlı bir transformatör görülmektedir.

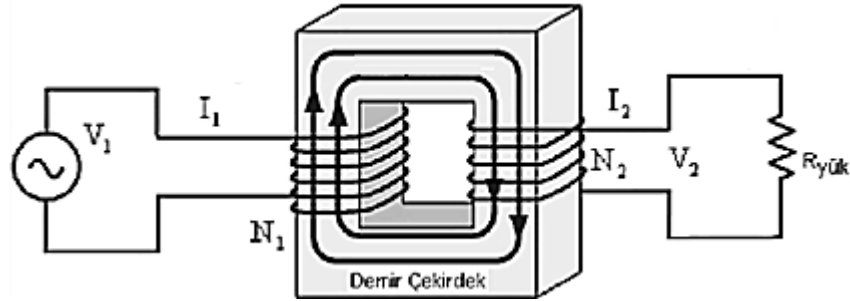


Şekil 2.1. Bir fazlı transformatör

Transformatörün birincil sargısına alternatif bir gerilim uygulandığında bu sargıda zamana göre yönü ve şiddeti değişen bir manyetik alan oluşur. Bu alan, üstünde ikincil sargının da bulunduğu manyetik demir nüve üzerinden devresini tamamlar. Zamana göre yönü ve şiddeti değişen bu alanın ikincil sargılarını kesmesi ile bu sargıda alternatif bir gerilim indüklenir. Faraday'ın indüksiyon prensibine göre bu gerilimin değeri; sarım sayısına, manyetik akının maksimum değerine ve frekansına bağlı olarak değişir.

$$e = -N \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.1)$$

Transformatörün birincil sargıya doğru gerilim uygulandığında demir nüve üzerinde sabit bir manyetik alan oluşur. Ama bu alan değişken olmadığından ikincil sargıda gerilim indüklenmesi söz konusu olamaz. Çünkü indüksiyon prensibine göre, değeri değişen manyetik alanlar tarafından etkilenen sargılarda indüksiyon gerilimleri oluşmaktadır. Şekil 2.2'de bir transformatörün akım gerilim ilişkilerini gösteren yapı görülmektedir.

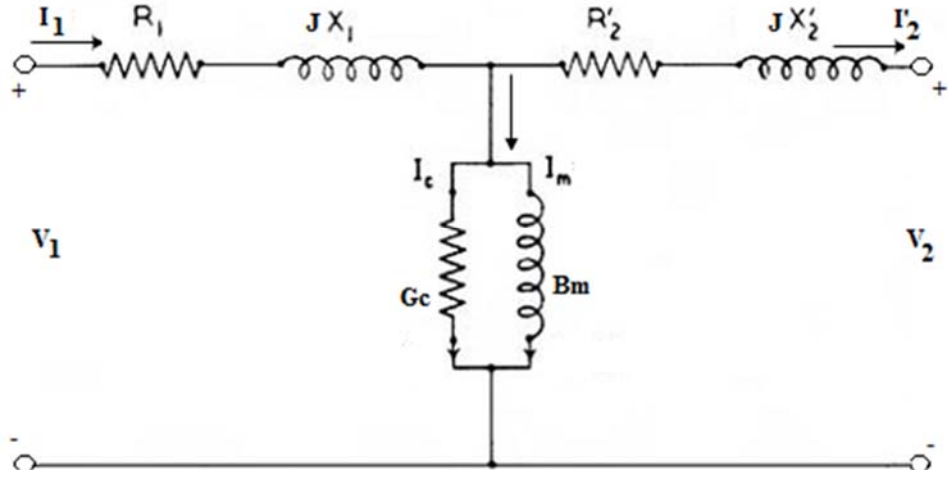


Şekil 2.2. Bir transformatörün akım – gerilim ilişkileri

Eşitlik (2.2)'de görüldüğü gibi transformatörde gerilim sarım sayısı ile doğru, akım ile ters orantılıdır.

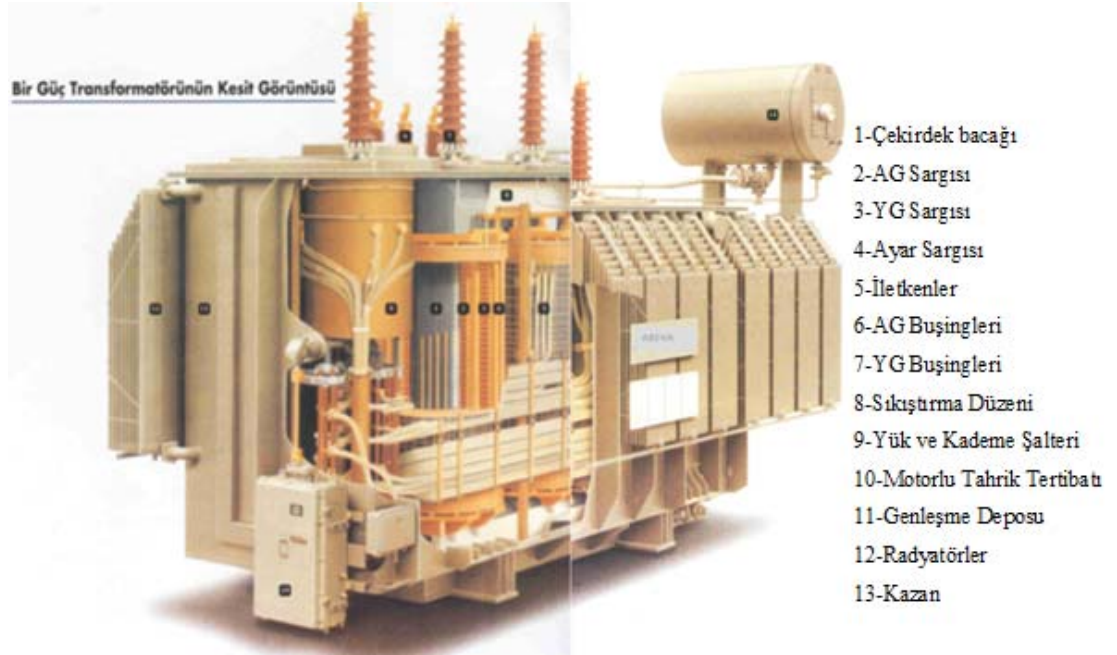
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.2)$$

Bir transformatör Şekil 2.3' de görüldüğü gibi eşdeğer bir elektrik devresi şeklinde ifade edilmektedir. Burada; R_1 birincil sargının omik direnci, X_1 birincil sargının endüktif direnci, N_1 birincil sargının siper sayısı, R_2 , ikincil sargının omik direnci, X_2 ikincil sargının endüktif direnci, N_2 ikincil sargının sargının siper sayısıdır.



Şekil 2.3. Bir transformatörün T – eşdeğer devresi

Şekil 2.4’te kesit görüntüsü verilen bir güç transformatörüne ait parçaların isimleri numaralandırılmıştır.



Şekil 2.4. Bir güç transformatörünün kesit görüntüsü

Transformatörlerin sınıflandırılması çeşitli kriterlere göre farklılık gösterir.

- Alçak gerilim 0-1kV
- Orta gerilim 1-3-5-10-20-25-30kV
- Yüksek gerilim 45-60-110kV
- Çok yüksek gerilim 150-220-380-400kV

Transformatörler genel sınıflandırması aşağıdaki gibi yapılabilir. Manyetik nüve şekline göre;

- Çekirdek,
- Mantel,
- Dağıtılmış,
- Ferrit Nüve.

Kuruluş yerlerine göre;

- İç (dahili) tip transformatörler,
- Açık hava (harici) tip transformatörler

Soğutma cinsine göre;

- Kuru transformatörler,
- Yağlı transformatörler

Sargı tipine göre;

- Silindirik sargılı,
- Dilimli sargılı.

Kullanılış şekline göre;

- Güç transformatörleri,
- Ölçü Transformatörleri

Faz sayısına göre;

- Bir fazlı,
- Üç fazlı.

2.2. Soğutma Ortamına Göre Transformatör Tipleri

Soğutma ortamına göre yapılan sınıflandırma üç şekilde yapılmaktadır.

1. Hava ile soğutma,
2. Yağ ile soğutma,
3. Su ile soğutma

Transformatörlerin soğutma şekli aşağıdaki gibi kısaltmalar ile ifade edilmektedir [5];

AN	Doğal Hava Soğutmalı
ON	Doğal Yağ Soğutmalı
ONAN	Doğal Yağ ve Hava Soğutmalı
ONAF	Doğal Yağ ve Zorlamalı Hava Soğutmalı
OFAN	Zorlamalı Yağ ve Doğal Hava Soğutmalı
OFAF	Zorlamalı Yağ ve Hava Soğutmalı[5]

2.2.1. Hava ile soğutma

Bu tür transformatörler kuru tip transformatörler olarak adlandırılır. Soğutan havadır ve iyi bir yalıtım malzemesidir. Burada hava aracılığı ile sargı ve demir çekirdek soğutulur. Isınan hava yükselir ve yerini soğuk havaya bırakır. Sıcaklığın transformatörün her yerde aynı olası mümkün değildir. Bu şekilde soğutma gerçekleşir. Havadaki tozlar, sargılara yapışmasıyla yalıtım özelliğini azaltırlar. Kuru transformatörler aşırı yük altında çalıştırılmamalıdır ve özellikle düşük güçlerde bu yöntem kullanılmaktadır.

2.2.2. Yağ ile soğutma

Yağlı transformatörlerde yalıtım ve soğutma şartları çok daha iyidir. Yağlı transformatörlerde, transformatör itina ile temizlenmiş madeni ya da bitkisel yağla dolu bir tankın içinde bulunur. Bu soğutma türünde yağ, sargılardan ve demir gövdeden aldığı ısı enerjisini taşınım yolu ile bulunduğu tankın çelik gövdesine iletir ve onun ısınmasını sağlar. Tankın dışında bulunan soğutucu hava da tankın soğumasını sağlayarak oluşan ısı enerjisini alır. Bu transformatörlerde soğutma yüzeyini artırmak için cidarlar çıkıntılı ve kaburgalı yapılır. Soğutmayı arttırmak üzere transformatör tanklarının cidarlarına cebri soğutucular (fanlar) ilave edilmektedir. Çünkü büyük ve gücü yüksek olan transformatörlerde akımın bıraktığı bütün ısıyı transformatör tankının cidarlarından dış ortama vermek doğal olarak zordur.

Yağlı transformatörler servis süresince çeşitli yükler altında çalışırlar. Bunlar, sargı sıcaklığını arttırdığı gibi iletkeni saran yalıtkan malzemenin zaman içerisinde ısınarak yıpranmasına sebep olur. Bu yıpranma sebebi ile iletkeni saran yalıtkan malzemedan kopan parçacıklar transformatör yağının hareketi nedeniyle bir süre yağ

içerisinde asılı kalır. Bu parçacıklar hemen tankın dibine çökmedikleri için çoğalarak kendi aralarında yapışarak büyük kütleler haline dönüşür ve tankın dibine çökerler. Bunun sonucunda bu kütleler dipte istenmeyen tortu oluştururlar ve aynı zamanda yağın yalıtım özelliğini de zayıflatır.

Mineral yağların yaygın olarak kullanılmasının asıl nedeni yüksek parlama noktasına sahip olmasıdır. Bunun yanı sıra yalıtkanlık özelliğinin iyi ve viskozitelerinin düşük olması nedeniyle hala kullanılmaktadır. Ancak kullanım ömrü biten mineral yağlar, çevreye olumsuz yönde zarar verebilmektedir.

Mineral yağlar dışında ester yağlar da transformatör yağı olarak da kullanılmaktadır. Ester yağlar, asit ve alkolün organik bileşiklerinden oluşur. Çevre öneminin giderek artması ile ester yağlar geliştirilmeye başlanmıştır. Doğal ve sentetik olmak üzere iki tip ester yağ vardır. Doğal ester yağlar, bitkilerden elde edilen yağların işlenmesi ile elde edilmektedir. Sentetik ester yağlar ise ısı ve oksidasyon kararlılıklarının yüksek olması sayesinde transformatörlerde kullanılmasına olanak sağlamıştır [33].

Transformatör içindeki olaylar ve transformatörü etkileyen dış faktörler

- Manyetik alanlar
- Elektriksel alanlar
- Gerilim (Voltaj) dalgalanmaları
- Arıza veya problemler
- Aşırı sıcaklık değişimleri
- Genleşme ve büzülme gibi termik olaylar
- Transformatörün ve yalıtım maddelerinin yaşlanması
- Transformatördeki kimyasal etkileşimler ve reaksiyonlar
- Dünyanın manyetik alanı
- Çevre ve iklim koşulları
- Transformatörün kendi ağırlığı
- Diğer olay ve etkenlerdir.

Güç transformatörlerinin üretim aşamasında yapılan testler daha çok tasarım ve montaj doğrulamaları için yapılmakta iken, işletmeye alındıktan sonra yapılmakta olan testler ise gelişen arıza olasılıklarını ve hatalı bileşenleri belirlemek için

yapılmaktadır. Transformator üretim aşamasında yapılan test ve ölçümlerden bazıları işleme alınmasından sonra da rutin olarak yapılmaya devam eden testlerdir. Müşterinin isteği göz önünde bulundurularak özel bazı test ve ölçümler ise yine üretim aşamasında gerçekleştirilebilmektedir.

2.3. Transformator ve Çevre Sıcaklığının Ölçülmesi

Bu ölçümler transformatorün enerjisi kesilmeden ve tam yükte çalışırken yapılır. Fabrikadaki ısınma deneyleri sırasında, transformatorün bakım – onarım işlerinden sonra, işletmede yapılan genel kontroller sırasında ve diğer testler sonucunda arıza kuşkusunu görüldüğü durumlarda yapılır. Aynı zamanda transformatordeki bazı mekanik arızaları bulmak için ana tank, buşingler, parafudurlar, radyatörler ve soğutma sistemlerinde termal kamera ile inceleme yapılır.

Hava ile soğutulan transformatorlerde, ortam sıcaklığı olarak çevredeki havanın sıcaklığı alınmalıdır. Standartlara göre soğutucu hava sıcaklığı transformator çevresine dağıtılmış 3 adet termometre veya termo elementle ölçülür. Ölçme 2 saat zaman-sabitesine sahip bir kap içine konan yağ içinde gerçekleştirilir. Kaplar aşırı hava akımlarına ve ısı ışınlarına karşı korunmuş olmalıdır. Kaplar ise transformatorün üç tarafında 1 ile 2m uzaklıkta ve soğutucuların yarı yüksekliğinde olmalıdır. Eğer transformator zorlamalı hava (fanlar) ile soğutuluyor ise ortam sıcaklığı olarak zorlamalı olarak fanların oluşturduğu havanın giriş sıcaklığı ölçülmelidir. Soğutucu ortam su ise su sıcaklığı soğutucunun girişinde termometre cebinde ölçülmektedir. Soğutucu ortam sıcaklığının (soğutucu hava veya su sıcaklığı) 1/2 veya 1 saatte bir kaydedilir ve testin son çeyreğindeki ortalama değerleri sıcaklık artış hesaplarında kullanılır.

Kapağın üstüne veya kazanın yan yüzlerine kaynak yapılan termometre ceplerine yerleştirilmiş termometreler aracılığıyla transformator yağın üst seviye sıcaklığı izlenir ve kontrol edilir. Maksimum göstergeli, elektriksel kontaksız, tek ve çift kontaklı termometreler kullanılır. Kontaklı termometreler transformatordeki ısı, belirlenen değerleri aştığı zaman bunları alarm ve açma sinyalleri şeklinde verir [34].

Transformatorlerde güvenlik amacıyla termik röle kullanılmaktadır. Termik röle, transformatorün aşırı yüklenmesi ya da sargıların kısa devre yapması halinde tankın

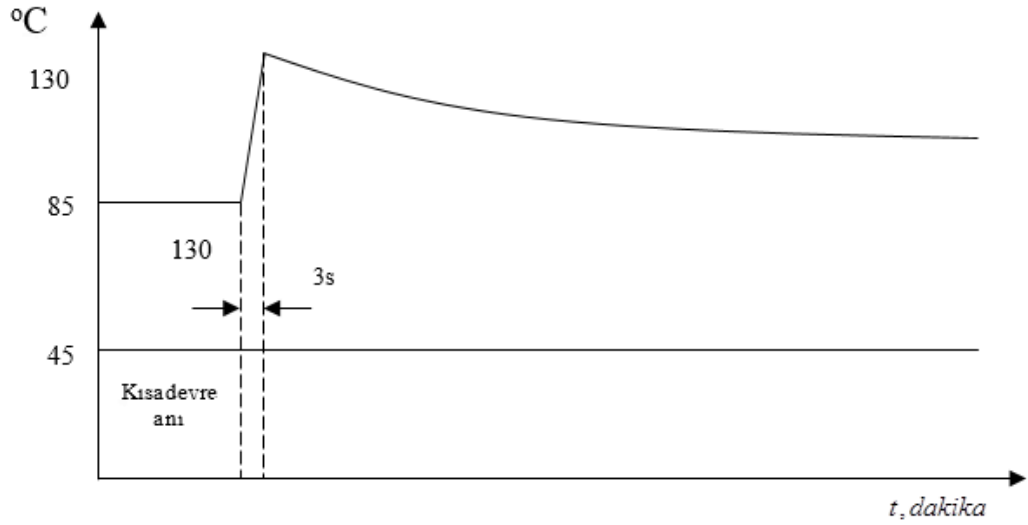
içerisinde bulunan yalıtım yağı aşırı derecede ısınır. Bu ısınma transformatörü tehlikeli bir hale sokmaya başlayınca devreye termik röle girer. Termik rölenin 2 kontağı bulunur. Yağ sıcaklığı 60°C'ye gelince bir kontağı kapanır ve fanları devreye alır, sıcaklığın 85°C'ye çıkması sonucunda ise diğer kontağını da kapatır ve bağlı olduğu kesiciyi açtırır.

2.4. Transformatörlerde Sıcaklık Artışı

Bütün elektrik makinelerinde olduğu gibi transformatörler de çalışmaları sırasında ısınırlar. Bu ısınma transformatörün özellikle sargılarında ve demir nüvesinde oluşan kayıpların bir sonucudur. Tasarım standartlarına göre sıcaklık artışı, transformatörün verilen bir bölümünün sıcaklığı ile soğutma ortamının sıcaklığı arasındaki farklılıktır. Aktif kısımlardaki bu sıcaklığın izin verilebilir sınırlarını, trafonun yapısal tasarımı, boyutları, maliyeti, yük taşıma kapasitesi ve işletme şartları etkilemektedir.

Transformatörün maksimum sürekli akım taşıma kapasitesi, üretici firmanın garanti ettiği veri değerlerine bakılarak, zamana bağlı olarak sıcaklık etkisi altında kalan yalıtkanın yaşlanması transformatörün sınıfına bağlıdır. Ek olarak, zaman sabiti büyüklüğünde ve aşırı yük verilen işletme şartları altında transformatörlerin periyodik maksimum yük taşıma kapasitesinin büyüklük(genlik) ve sürekliliği yapısal özelliklerine de bağlıdır.

Kısadevre akımı etkisi altında kalan transformatörün sargısında kayıplar meydana gelir. Bu da sargının ve her katmandaki sarım arasındaki yalıtkanın içerdiği ısının artmasına neden olur. Kısa süreli kısadevreden dolayı, gerçekte kısadevre akımının akışı esnasında yağa ısı transferi olmaz. Hatanın açığa çıkması ile birlikte ısı transferi başlar. Birkaç sarımın zaman sabitine karşılık gelen süreden sonra sargının tekrar normal işletme sıcaklığında olduğu varsayılır. Bu değişim Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5. Transformatör sargısının kısadevre ve hata meydana geldikten sonraki soğutma anındaki sıcaklık artışı ve zaman eğrisi [7]

Sargıda meydana gelen kayıplar, Bakır kayıpları ve fuko (edi akım) kayıplarından oluşmaktadır. Bakır kayıpları sıcaklıkla doğrusal olarak artarken fuko kayıpları sıcaklıkla ters orantılıdır.

l uzunluğundaki bir iletkende oluşan kısadevre anında kayıp artışı, yağlara transfer edilmeksizin iletkenin içermiş olduğu ısı artışına dönüştürülür ve Eşitlik (2.3)'teki gibidir.

$$\left[\left(\frac{I}{A_c} A_c \right)^2 \frac{1}{\sigma_{75}} \cdot \frac{235^\circ + \theta_w + \Delta\theta}{(235 + 35)^\circ C} \frac{l}{A_c} + \frac{e_{75}}{100} \left(\frac{I}{A_c} A_r \right)^2 \frac{1}{\sigma_{75}} \frac{(235 + 75)^\circ C}{235^\circ C + \theta_w + \Delta\theta} \frac{l}{A_c} \right] dt \quad (2.3)$$

$$= (A_c l_c \rho_c C_c + A_p l_p \rho_p C_p) \Delta\theta = A_c l (\rho_c C_c + k \rho_p C_p)$$

Burada I kısadevre akımını, A_c iletken kesidini, A_p iletken üzerindeki yalıtkanın kesidini, $k = A_c / A_p$ iki kesidin oranını, $J = I / A_c$ kısa devre akım yoğunluğunu, σ_{75} $75^\circ C$ 'de bakır iletken malzemenin elektriksel olarak öz iletkenliğini, θ_w kısadevre oluşumunda sargının ortalama sıcaklığını, l iletkenin uzunluğunu, e_{75} ; $75^\circ C$ 'de yüzdelik olarak ifade edilen bakır kayıplarını, $\Delta\theta$; θ_w 'ye göre kısadevre sıcaklık artışını ve $d\Delta\theta$; dt periyodu anındaki sıcaklık değişimini göstermektedir. Bu ifadeler yerlerine koyulursa[7];

$$\frac{J^2}{\sigma_{75}} \left(\frac{235^\circ\text{C} + \theta_w}{310^\circ\text{C}} + \frac{\Delta\theta}{310^\circ\text{C}} + \frac{e_{75} \cdot 3,1^\circ\text{C}}{235^\circ\text{C} + \theta_w + \Delta\theta} \right) dt = (\rho_c C_c + k\rho_p C_p) d\Delta\theta \quad (2.4)$$

değişkenler ayrılırsa;

$$dt = \frac{\sigma_{75}}{J^2} (\rho_c C_c + k\rho_p C_p) \frac{1}{\frac{235^\circ\text{C} + \theta_w}{310^\circ\text{C}} + \frac{\Delta\theta}{310^\circ\text{C}} + \frac{e_{75} \cdot 3,1^\circ\text{C}}{235^\circ\text{C} + \theta_w + \Delta\theta}} d\theta \quad (2.5)$$

Eşitliğin sağ tarafından karmaşık kesir kaldırılırsa;

$$dt = \frac{310 \cdot \sigma_{75} \cdot (\rho_c C_c + k\rho_p C_p)^\circ C}{J^2} \cdot \frac{\Delta\theta + \theta_w + 235^\circ\text{C}}{\Delta\theta^2 + 2(\theta_w + 235^\circ\text{C})\Delta\theta + (\theta_w + 235^\circ\text{C})^2 + e_{75} \cdot 960^\circ\text{C}^2} d\Delta\theta \quad (2.6)$$

aşağıdaki ifadelerle gösterilirse;

$$\Delta\theta = x ; d\Delta\theta = dx ;$$

$$\frac{310 \sigma_{75} (\rho_c C_c + k\rho_p C_p)^\circ C}{J^2} a_1 \quad (2.7)$$

a_1 terimi s olduğunda

$$\theta_w + 235^\circ\text{C} = a_2 \quad (2.8)$$

ve

$$e_{75} \cdot 960^\circ\text{C}^2 = a_3 \quad (2.9)$$

yukarıdaki ifadeler ile sıcaklık artışının türevsel denklemi;

$$dt = \frac{a_1 x + a_1 a_2}{x^2 + 2a_2 x + a_2^2 + a_3} dx \quad (2.10)$$

denklemin sağ tarafındaki bölüm değeri $\frac{a_1}{2}$ ile çarpanlara ayrılır;

$$dt = \frac{a_1}{2} \cdot \frac{2x + 2a_2}{x^2 + 2a_2 x + a_2^2 + a_3} dx \quad (2.11)$$

iki tarafın integrali alınırsa;

$$\int dt = \frac{a_1}{2} \cdot \int \frac{2x + 2a_2}{x^2 + 2a_2x + a_2^2 + a_3} dx \quad (2.12)$$

sonra sağ taraftaki kesrin pay, paydanın türevidir ve integralin sonucunda;

$$t = \frac{a_1}{2} \ln(x^2 + 2a_2x + a_2^2 + a_3) + C \quad (2.13)$$

Eğer $t=0$, $x=0$ olduğu zaman integral sabiti (C)

$$C = \frac{a_1}{2} \ln(a_2^2 + a_3) \quad (2.14)$$

olur.

Bu değer, integralden sonra elde edilen eşitlikte yerine yazılırsa;

$$t = \frac{a_1}{2} \ln \frac{x^2 + 2a_2x + a_2^2 + a_3}{a_2^2 + a_3} \quad (2.15)$$

her iki taraf üstel olarak yazılırsa;

$$e^t = \left(\frac{x^2 + 2a_2x + a_2^2 + a_3}{a_2^2 + a_3} \right)^{\frac{a_1}{2}} \quad (2.16)$$

$$x^2 + 2a_2x + (a_2^2 + a_3) \left(1 - e^{\frac{2t}{a_1}} \right) = 0 \quad (2.17)$$

$$x = -a_2 + \sqrt{a_2^2 - (a_2^2 + a_3) \left(1 - e^{\frac{2t}{a_1}} \right)^2} \quad (2.18)$$

$$x = \sqrt{e^{\frac{2t}{a_1}} (a_2^2 + a_3) - a_3} - a_2 \quad (2.19)$$

$$\Delta\theta = \sqrt{e^{\frac{2t}{a_1}} [(\theta_w + 235^\circ C) + e_{75} \cdot 960^\circ C] - e_{75} \cdot 960^\circ C^2 - (\theta_w + 235^\circ C)} \quad (2.20)$$

$$\Delta\theta = 31^\circ\text{C} \sqrt{e^{2/a_1} \left[\left(\frac{\theta_w + 235^\circ\text{C}}{31^\circ\text{C}} \right)^2 + e_{75} \right]} - (\theta_w + 235^\circ\text{C}) \quad (2.21)$$

elde edilir [7].

Burada;

$$a_1 = \frac{310^\circ\text{C} \sigma_{75} (\rho_c C_c + k \rho_p C_p)}{J^2} \quad (2.22)$$

Girişte de belirtildiği gibi, fuko kaybı ile yalıtkan malzemede depolanan ısı da göz önünde tutularak türevsel(diferansiyel) denklem düzenlenir.

Eğer fuko kayıpları ihmal edilirse $\Delta\theta$ için elde edilen σ_{75} ' i içeren terimler denklemden çıkartılır. Yalıtkan malzemedeki ısı da ihmal edilirse a_1 aşağıdaki ifade gibi olacaktır [7].

$$a_1 = \frac{310^\circ\text{C} \sigma_{75} \rho_c C_c}{J^2} \quad (2.23)$$

a_1 için belirtilen ifadede görülen fiziki özellikler;

Elektrolitik bakır için:

$$\rho_c = 8900 \text{kgm}^{-3}, \quad \sigma_{75} = \frac{10^6}{0,0217} \text{AV}^{-1}\text{m}^{-1},$$

$$C_c = 401 \text{Wskg}^{-1}\text{C}^{-1} \quad (100 \text{ile} 200^\circ\text{C})$$

Alüminyum için:

$$\rho_a = 2700 \text{kgm}^{-3}, \quad \sigma_{75} = \frac{10^6}{0,036} \text{AV}^{-1}\text{m}^{-1},$$

$$C_c = 961 \text{Wskg}^{-1}\text{C}^{-1} \quad (100 \text{ile} 200^\circ\text{C})$$

Yağlı kâğıt için:

$$\rho_p = 600 \text{kgm}^{-3}, \quad C_p = 1600 \text{Wskg}^{-1}\text{C}^{-1}$$

Sargı malzemesinin bakır olduğu durumda, yalıtıkana depolanan ısı e' 'nin üssü olarak elde edilir.

$$\frac{2t}{a_1} = \frac{1}{2,55.k.0,685} \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 .t \quad (2.24)$$

Parantezden önceki ifadenin değeri $m^4s^{-1}A^{-2}$ 'dir. Yalıtıkanda depolanan ısı ihmal edilirse;

$$\frac{2t}{a_1} = 0,392 \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 .t \quad (2.25)$$

Aynı şekilde parantezden önceki değerin birimi $m^4s^{-1}A^{-2}$ 'dir.

Sargı malzemesi alüminyum olma durumunda yalıtıkanda depolanan ısı göz önünde bulundurulursa e' 'nin üssü olarak ifade edilir.

$$\frac{2t}{a_1} = \frac{1}{1,115.k.0,413} \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 .t \quad (2.26)$$

Parantezden önceki ifadenin değeri $m^4s^{-1}A^{-2}$ 'dir.

Yalıtıkanda depolanan ısı ihmal edilirse;

$$\frac{2t}{a_1} = 0,897 \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 .t \quad (2.27)$$

k katsayısı, sadece kesit oranlarıyla değil sargı malzemesinden sargılar arasındaki yalıtıkana aktarılan ısı gecikmesi ile de hesaba katılabilir. Bu gecikme yüzünden k değeri yarıya indirilirse yapılan hata güvenli olan kısma eklenir.

Bilindiği gibi yağlı transformatörlerde yağın rolü, ısı taşınımı ile ortam sıcaklığına getirmektir ve ek olarak da yalıtıklık görevini üstlenmektedir. Bu ısı, transformatörün aktif bölümü olan sargılarda oluşmakta olup yağ tarafından soğurular ve ısı değişimi sağlanan bölgelere taşınır. Çoğu durumlarda ısı değiştiricileri olarak yağ – hava soğutucuları veya nadiren yağ – su soğutucuları kullanılmaktadır.

2.5. Isıl Faktörlerden Kaynaklanan Arızalar

Transformatörün işletmeye girmesinden sonra zaman içerisinde selüloz bazlı yalıtıkanda bozulma beklenir. Transformatörün yüklenmesi ile normal sıcaklık artışı ve işletme sırasında maruz kalacağı çalışma şartları yalıtkanın ısıl olarak dayanıklılığının azalmasına neden olur. Isıl dayanıklılığın azalması sonucunda yalıtıkanda fiziksel anlamda bir kayıp olacaktır. Transformatörün işletmesi sırasında içinde oluşabilecek sarsıntı ve mekanik harekete karşı deforme olan kâğıt yalıtkan mekanik zorlanmalara dayanamayacaktır. Transformatör tasarımcıları her ne kadar bu sorunun farkında olsa da iyi tasarlanmış, işletilmiş ve bakımı yapılmış transformatör bile en fazla 20–30 yıl veya biraz daha fazla işletmede kalabilmektedir. Zamanından önce transformatörde oluşabilecek sorun, genellikle zayıf işletme ve yetersiz bakım pratiği bulunması durumunda veya hatalı işçilik, hatalı malzeme kullanılmasında meydana gelir. Isıl sebeplerden kaynaklanan sorunlar ve arızalar ise şöyle sıralanabilir;

- Transformatörün uzun süreli olarak tasarlanmış olan kapasitesinin üzerinde yüklenmesi,
- Transformatörün soğutma sisteminden kaynaklanan problemler nedeni ile ısıl arıza söz konusu olabilir. Örneğin radyatörlerde ve soğutucularda tıkanma veya kirlenme, yağ pompasının arızalanması ve yağ dağıtım direk akışında arıza olduğunda ısıl arıza söz konusu olabilir.
- Yağın çok az kısmının sargılara temas etmesi durumunda ısıl arıza gerçekleşebilir.
- Transformatörün aşırı gerilim veya düşük frekans altında çalıştırılması ile yalıtkanın aşırı ısınması veya diğer malzemelerin etkilenmesi olabilir.
- Trafonun aşırı nemli şartlar altında sürekli işletilmesi sonucu ısıl arıza olabilir.

Arıza incelemesinde ısıl nedenlerden kaynaklanan arıza söz konusu ise diğer bulgular ile birlikte mekaniksel veya elektriksel arızaları da belirleyecek senaryoların değerlendirilmesi gerekmektedir [35, 36].

2.6. Isı Transferi

Transformatörün çalışmasında demir gövdede oluşan histerisiz ve fuko kayıpları ile sargılarda meydana gelen joule kayıpları, sargıların ve demir çekirdeğin sıcaklıklarını belli bir zaman içinde yükseltir. Sıcaklığın yükselmesini önlemek için transformatörün içinde üretilen ısı enerjisinin transformatörün dışına atılması gerekir. Buna soğutma denir. Termodinamiğin 2. Yasasına göre, iki ortam arasında sıcaklık farkı varsa, ısı yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama geçer. Isının geçişi ortam sıcaklıklarındaki farka bağlı olduğu kadar, ortam ve yüzeylerinin özelliklerine de bağlıdır. Bu sebeple ısı enerjisi ortamda, iletim (conduction), taşınım(convection), ışınım (radiation) olmak üzere üç şekilde yayılabilir.

2.6.1. Radyasyon (Işınım)

Bir cisim meydana getiren parçacıkların ısıl hareketi elektro manyetik ışınım şeklinde enerji yaymalarına neden olur. Sıcaklığın artması, taneciklerin harekete geçmesine sebep olur. Yani bu sayede enerji bulunduğu ortamdan dışarıya atılır. Buna Işınım denir. Bazı cisimler bu yapılan ışınım enerjisini soğurur, bazıları yansıtır, bazıları da içlerinden daha serbestçe geçirmeye izin verir. Böylece ısı enerjisi oluşan sistemden, ışınımı soğuran sisteme ısı enerjisi aktarılmış olur. Sistemlerden birinin sıcaklığı azalırken diğerinin sıcaklığı artar. İdeal bir radyatörden toplam ısıl ışınım 1879 yılında Stefan tarafından deneysel olarak verilmiş ve 1884'te Boltzman tarafından teorik olarak elde edilmiştir. Yağlı transformatörlerin çalışma sıcaklıkları 60°C'dir. Bu sıcaklıkta ışınım yoluyla yayılan ışınım enerjisi sıcaklığın çok düşük olmasından dolayı ihmal edilecek seviyelerde bir değere (%1) sahiptir.

2.6.2. Konveksiyon (Taşınım)

Farklı sıcaklıklara sahip ve biri akışkan olan ortamlar birbirleri ile temas ederek ısı transferini gerçekleştirirler. Ortam bir sıvı veya gaz ise, akışkan hareketi ile ısı enerjisi bir bölgeden diğer bir bölgeye sıcaklık farkından dolayı geçmektedir. Isı enerjisini verene soğutulan, ısı enerjisini alana ise soğutan adı verilir. θ_s sıcaklığındaki yüzey ile ona temasta olan θ_a sıcaklığındaki akışkan arasında birim zamanda meydana gelen ısı taşınımı:

$$q = h(\theta_y - \theta_a) \quad (2.28)$$

olur. Burada;

q birim zamanda birim yüzeyden taşınan ısı miktarı, (W/m²)

h ısı taşınım katsayısı, (W/m²K)

olarak ifade edilmektedir. Transformatörlerde yağ aracılığı ile demir çekirdek ve sargılar soğutulmaktadır. Eşitlik (2.29)'daki ifade A (m²) yüzey alanı için metre başına taşınım yoluyla geçen toplam ısı enerjisi miktarı W_{conv} [37, 38];

$$W_{conv} = h.A(\theta_y - \theta_a) \quad (2.29)$$

olmaktadır.

2.6.3. İletim

İletim, ısı transfer mekanizması bir sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru ısının transferine denir. Bir ortam içerisindeki bölgeler arasında veya doğrudan doğruya fiziksel temas durumunda bulunan farklı ortamlar arasında, atom ve moleküllerin fark edilebilir bir yer değiştirmesi olmaksızın, doğrudan temas sonucu meydana gelen ısı yayılımı işlemidir. Termodinamiğin ikinci kanununa göre, ısı enerjisi yüksek sıcaklıktaki bir bölgeden düşük sıcaklıktaki bir bölgeye doğru akar.

Bu kanuna göre, birim zamanda birim yüzeyden x yönüne transfer edilen ısı enerjisi miktarı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$q_x = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\theta}{dx} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (2.30)$$

Burada;

q_x x yönünde birim zamanda birim yüzeyden transfer edilen ısı enerjisi, (W/m²)

ρ malzemenin ısı öz direnci, (K.m/W)

λ malzemenin ısı iletim katsayısı, (W/K.m)

$d\theta$ sıcaklık değişimini, (K)

ifade etmektedir [38].

2.7. Transformatörlerde Kullanılan Yalıtkan Malzemeler

Transformatör yapımında kullanılan yalıtkan malzemelerin yapısı çoğunlukla selülozdan oluşmaktadır. Yaşlanma durumu, ısı ve oksijen etkisinin sürekli olarak tesir etmesinden dolayı meydana gelmektedir. Transformatörlerde iki ana yalıtkan malzeme söz konusudur. Bunlar, kâğıt ve yağdır.

Birkaç on yıllık deneyim ve yalıtkan malzemelerdeki laboratuvar deneylerinden, tehlikeli sıcaklık sınırı bir yalıtkan malzeme için elde edilebilmektedir. Fakat bununla birlikte verilen yalıtkan malzeme için sıcaklık, ısıl etkinin süresi ve yaşlanmanın büyümesi arasında üstel bir ilişki kurulabilmektedir. Deneysel kurallar göz önünde bulundurulursa, yıpranma süresi ve transformatörün teknik anlamda devre dışı bırakılması sonucu sıcaklık limiti beklenen ekonomik işletme ömrünün izin verilebilir yaşlanma oranı ile belirlenmektedir. Yaşlanma nemin bulunduğu yerlerde daha fazla görülmektedir.

Yalıtkan malzeme olarak kullanılan yağ ve kâğıt, transformatörün yaşlanma mekanizmasını belirleyen temel unsurlardır.

2.7.1. Yağlar

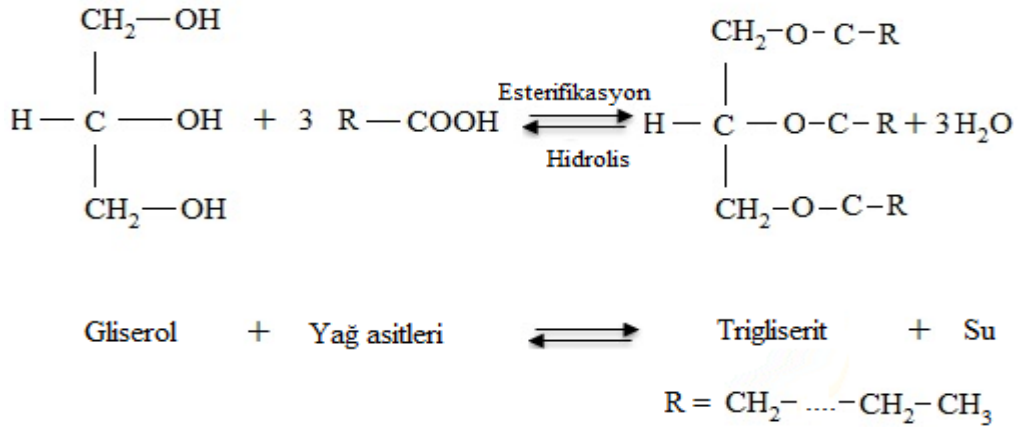
Yağların öncelikli görevleri; elektriksel yalıtımı sağlamak ve ısı transferi yoluyla ısınan parçaları soğutmaktır. Aynı zamanda, elektrik donanımında meydana gelen arkları söndürür ve temas ettiği yüzeyleri korur. Transformatörde meydana gelen kısmi deşarjlar, arklar ve aşırı sıcaklıklar olduğu sırada, bazı arıza gazları oluşarak yağ içinde çözünür. Çözünen bu gazların kalitatif ve kantitatif analizleri yapılarak, arızanın türü ve boyutu hakkında çok önemli bilgiler elde edilir. Bu şekilde, donanımla ilgili bilgi taşıyarak önemli bir görev daha yapar. Çoğu zaman transformatörün açılmasına bile gerek kalmadan, gelişmekte olan birçok arızalar önceden bulunarak, gerekli önlemler alınabilir. Yağlar, yalıtım görevi yanında soğutma işlevi de gördüğünden oldukça etkindir.

Transformatörlerde en yaygın kullanılan mineral yağlar Parafin, Olefin, Naphten ve Aromate gibi değişik hidrokarbonlardan oluşur. Bu hidrokarbonlar ise karbon ve hidrojenlerin tek ya da çift bağlarla bağlanmasından meydana gelir. Bağ yapılarının

çeşidine bağlı olarak da moleküllerin yaşlanma kararlılığı değişir. Piroliz, hidroliz ve elektrik alanı gibi zorlamalar yüzünden, bağlar çarpışmaya meyillidir ve bunun sonucu olarak farklı çözülmüş gazlara öncülük eder [39].

Mineral yağlar güç trafolarındaki kullanımı, yaşlanma karakterleri ve düşük viskoziteleri bakımından oldukça güvenilir olmalarına karşın, çevreye olumsuz etkileri, elektriksel ve dielektriksel özelliklerinin sıcaklığa ve neme bağlı olmaları birer dezavantajlarıdır [6, 39]. Transformatörlerde soğutma ve yalıtım amacıyla yaygın olarak kullanılan madeni yağların yerine, doğada büyük oranda çözülebilen daha çevreci yağlar kullanılmaya başlanmıştır.

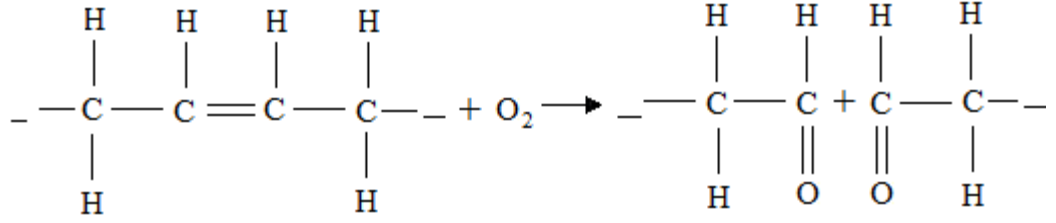
Mineral yağlara alternatif olarak sentetik ya da doğal olarak oluşturulan ester yağlar bulunmaktadır. Esterlerin hepsi bir asit ve alkolün sentezlenmesinden oluşur. Bununla birlikte, sadece Poly ve Kompleks esterler yüksek gerilim trafosunda gerekli olan yüksek stres için yeterlidirler [39]. Şekil 2.6'da örnek bir ester oluşum yapısı gösterilmektedir. Mineral yağa göre bitkisel yağların viskoziteleri 4 – 5 kat daha yüksektir. Viskozitenin düşük olması istenen bir durumdur. Çünkü düşük viskozite yalıtım akışkanında daha yüksek bir soğutma verimi sağlar.



Şekil 2.6. Esterifikasyon ve hidroliz reaksiyonu

Ester yağlarda Şekil 2.6'da görülen reaksiyon sonucunda, su moleküllerinin yok edilmesiyle bir alkol ve üç asidin reaksiyonundan trigliserid adlı ester molekülü ve su açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonun tersi de hidroliz olarak adlandırılır [40]. Yağ asidi bileşenleri yağın oksidasyonuna ve kararlılığına etkendirler. Doymamış yağ asitlerinden mono yağ asidi oranının yüksek olması, di ya da tri doymamış yağ asidine göre daha iyi oksidasyon özelliği sergiler [40, 41]. Şekil 2.7'de gösterildiği

gibi, oksijenin çift karbon bağlarına etkisi nedeniyle, trigliserid parçalanır ve asitlerin bir kısmı ya da tamamı ayrılır.



Şekil 2.7. Yağ asitlerinin parçalanması

Bitkisel yağların yaşlanma işlemi, oksidasyon ve ısıl stres altındaki doymamış bağlarının yapışmasıyla yani oluşan çift karbon bağı ile açıklanabilir. Çift bağların sayısı yağın dayanıklılığını belirler. Çift bağ (doymamış yağ asitleri) sayısı ne kadar fazlaysa, yağın dayanıklılığı o kadar azdır. Bununla birlikte, doymuş yağ asidi oranının yüksek olması, hava ile temas eden yağın daha çok kararlı olmasını sağlar.

Bu nedenle yaşlanma mekanizmasında üç aşama mevcuttur.

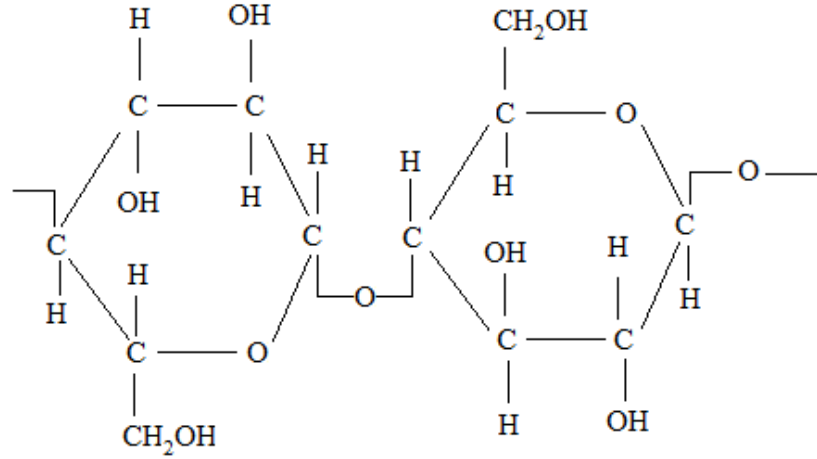
- Hidrolik kesme,
- Oksidasyon
- Oksidatif polimerazyon

2.7.2. Kâğıt

Yalıtkan kâğıtların elektriksel, mekaniksel ve kimyasal özellikleri yaşlanma ile değişim göstermektedir. Dikkate alınmayan yaşlanma yüzünden dielektrik dayanımın azalmasına rağmen mekaniksel özelliklerinin (dayanıklılığının arttırılması ve gerilmenin azalması), kısa devre anındaki elektrodinamik etkiyle sargıların yer değiştirmesinde transformatörün hassas duruma gelmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak transformatörün yaşlanan yalıtkanındaki sargılar arası hata artmaya başlamaktadır. Gerilme dayanımının uzunluğu ile karakterize edilen delinme dayanımının orijinal değeri önemsenmeyecek derecede yaşlanan yalıtkanın kimyasal özelliklerinde polimerizasyon derecesinde değişim, moleküler zincir uzunluğunun kısalması en önemli karakteristik değişikliktir.

İşletim sırasında, sargı üzerine sarılan kâğıdın değiştirilmesi mümkün olmazken, özelliği kaybolan yağ değiştirilebilir durumdadır. Bu nedenle transformatörlerde

kullanılan yalıtkan kâğıt, temel olarak selülozdan üretilmektedir ve yalıtkan olarak kullanılan kâğıt, kraft paper olarak adlandırılmaktadır. Bir selülozun kimyasal formülü Şekil 2.8’de verildiği şekliyle aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.8. Kâğıt yalıtkanın kimyasal formülü

Kâğıt yalıtkan, normal sıcaklıklarda kırılmaz, esnek ve oldukça yumuşak bir yüzeyi vardır. Sıcaklık arttıkça malzeme giderek sertleşir ve yüksek sıcaklıklarda uzun süreli zorlamalara nedeniyle mikro çatlaklar oluşur. Bu özellikleri zamana ve işleme durumuna bağlı olmaktadır. Kâğıt yalıtkan, hava veya oksijene maruz kaldığında düşük sıcaklıklarda bile okside olurlar. Başlangıçta reaksiyon yavaştır ancak zamanla hızlanır. Hızlı reaksiyon sıcaklığa ve moleküler yapıya çok bağlıdır ve bu reaksiyon başladığı zaman faydalı ömrü azalır. Oksidasyon arttıkça dielektrik kayıp faktörü artar ve nihayet renk değiştirme ve kimyasal bozulma oluşur, bağlarda kopma ile son bulur.

2.7.3. Güç transformatorlerinde yapılan deney ve testler

2.7.3.1. Yalıtım yağı deneyleri

Yalıtım yağları çeşitli nedenlerle kirlenir, bozulur veya yaşlanarak özelliklerini kaybeder ve görevini tam olarak yapamaz. Böyle yağlar, temas ettiği malzemeye hem zarar verir, hem de elektriksel yalıtımının zayıflamasına yol açar. Bu nedenle yağlar; taşıma, depolama sırasında ve işletmede kaldığı sürece, düzenli olarak denetim altında tutulmalıdır. Özellikle işletmedeki transformator ve diğer donanımlarındaki yağ ölçümlerinin periyodik olarak yapılması yararlı olmaktadır.

Transformatörün uzun ömürlü olması, güvenli ve verimli şekilde çalışması, bu deneylerin rutin şekilde yapılmasına bağlıdır.

Transformatörlere uygulanan deneyler üç grupta toplanabilmektedir.

Rutin Deneyler;

- Çevirme Oranı Ölçümü: Bağlantı grubunun belirlenmesi ve farklı bağlantı grubundan transformatörlerin paralel çalışması
- Sargı DC – direnç ölçümü
- Uygulanan gerilim deneyi
- İndüklenen gerilim deneyi
- Boşta çalışma deneyi
- Yükte kayıp ve kısadevre empedans gerilim ölçümü

Tip Deneyleri;

- Sıcaklık artış deneyi
- Darbe gerilim deneyi: Yıldırım darbe gerilimi, Kesik Dalga gerilimi
- Gürültü seviye ölçümü
- Kısa devrelere karşı mekanik dayanım deneyi

Özel Deneyler;

- Kapasite ve yalıtkan kayıp faktörü ölçümü (Doble Testi)
- Yalıtım direnci ölçümü (Meger Testi)
- Sıvı yalıtımda dielektrik dayanımı ve güç faktörü ölçümü
- Boşta akım harmonikleri ölçümü
- Kısmi deşarj deneyi
- Sıfır bileşen empedans ölçümü
- Yükte kademe değiştirici fonksiyonel deneyler [6].

Delinme Gerilimi: Belli koşullar altında ve enerjili iki elektrot arasında bulunan bir yalıtım yağının, delindiği gerilim değeridir. Yağın yalıtkanlık derecesini gösterir. Yağ içerisinde bulunan su ve parçacıkların miktarı bu ölçümü doğrudan olarak etkiler [42,43].

Güç Faktörü: Yağa uygulanan gerilim ile toplam akım arasındaki faz açısının kosinüsüdür. Yüksek bir değer, yağın kirlendiğini ve oksidasyon ürünlerinin varlığını gösterir. Bu test yapılırsa, yağın direncini ölçmeye gerek yoktur [44, 45, 46].

Su Miktarı: Yağdaki su miktarının en az düzeyde olması gerekir. Yalıtım sistemine ve elektriksel dayanıma doğrudan etki eder. Oksidasyon ürünleri ve diğer kirlerle kararlı kompleksler yaparak, yağın güç faktörünü yükseltir [47,48].

Asit Miktarı: Yağdaki asit içeren maddelerin toplam miktarının ölçülmesidir. Yüksek değerler; boya, vernik ve diğer yabancı maddelerle yağın kirlendiğini veya yaşlandığını gösterir. Bu maddeler, yağın yalıtım özelliğini bozar. Metallerin korozyona uğramasına ve selüloz kısmın erken yıpranmasına yol açar. Isı transferini de zorlaştırabilir [49, 50].

Renk ve Görünüş: Yeni yağlarda kaliteyi göstermez. Servisteki yağlarda ise rengin koyulaşması; kirlenmeyi veya bozulmayı ya da her ikisini birden gösterir. Yağın temiz ve berrak olması gerekir. Yağın içinde su miktarı arttıkça bulanık bir görüntü oluşur. Eğer servisteki bir yağın görüntüsü bulanık ve delinme gerilimi normale, bulanıklık oksidasyon ürünlerinin oluşturduğu çamurlardan meydana gelmiştir [51, 52, 53].

İç Yüzey Gerilimi: Yağ ve su yüzeyleri arasından, yağ film yüzeyini çekerken kopması için gerekli olan kuvvettir. Servisteki yağlarda iç yüzey geriliminin düşmesi; yağın kirli olduğuna, bozulduğuna veya yaşlandığına işaret eder [54, 55].

Viskozite: Sıvıların akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Soğutma özelliğine direkt etki eden bir özelliktir. Düşük viskoziteli yağlar daha iyi soğutma sağlar. Sıcaklık düştükçe viskozite yükseleceğinden, yağ dolaşımı yavaşlar ve soğutma işlemi zorlaşır. Bu nedenle, soğuk iklimlerde düşük viskoziteli yağlar kullanılmalıdır. Yağlar yaşlanmaya başlarken, oksidasyon ürünleri artacağı için viskozite yükselme eğilimi gösterir [56, 57, 58].

Parlama Noktası: Yağ buharının yanabildiği en düşük sıcaklıktır. Yağdaki uçucu ve hafif maddelerin varlığını gösterir. Sıcak ortamda çalışan trafolarında, parlama noktası yüksek olan yağlar gerekir [59, 60].

Akma Noktası: Yağın akabildiği en düşük sıcaklıktır. Özellikle soğuk iklimde çalışan trafolarla, yağ dolaşımının kolay olması için, akma noktası düşük yağlar seçilir [61, 62].

Anilin Noktası: Yağdaki aromatik bileşiklerin miktarı ve yağın çözücülüğü hakkında bilgi verir. Düşük değer, aromatik bileşiklerin fazla ve çözücülüğün daha yüksek olduğunu gösterir [63].

Yoğunluk: Belli sıcaklıktaki bir yağın birim hacminin, kütesine olan oranıdır. Soğuk iklimlerde, yoğunluğu sudan ve buzdan daha küçük olan yağlar kullanılmalıdır. Aksi durumda, su ve buz parçacıkları yağın içinde yüzeceği için özellikle iletken bölgelerde elektriksel deşarjlara yol açar [64, 65, 66].

Furanik Bileşikler: Kâğıt ve tahta gibi selüloz yalıtım maddelerinin bozulmasıyla oluşan kimyasal bileşiklerdir. Kâğıt sargıların durumu hakkında çok önemli bilgiler verir. Kâğıt kısmında bozulmalar arttıkça furanik bileşiklerin miktarı da artış gösterir [67, 68].

Oksidasyon Stabilitesi (yaşlandırma): Bir yalıtım yağının hiç bozulmaya uğramadan, her türlü etki ve elektriksel gerilime karşı gösterdiği dayanma direncine stabilite denir. Laboratuvar ortamında yapay koşullar hazırlanarak, yağın yıllarca sürecektir yaşlanma süreci kısaltılır. Örneğin; yağın içinden oksijen gazı geçirilir, sıcaklığı yükseltilir ve reaksiyonları hızlandırmak için katalizör maddeler kullanılır. İşlemin sonunda; çamur, tortu, asit ve güç faktörü gibi bazı testler yapılarak, yağın bozulma düzeyi araştırılır [69].

2.7.3.2. Transformator testleri

Transformatorler işletme esnasında bir takım faktörlerden oldukça etkilenirler. Bu nedenle transformatorlerin çalıştığı bölgeler göz önünde tutulmalıdır. Güç transformatorlerinin üretim aşamasında yapılan testler daha çok tasarım ve montaj doğrulamaları için yapılmakta iken, işletmeye alındıktan sonra yapılmakta olan testler ise gelişen arıza olasılıklarını ve hatalı bileşenleri belirlemek için yapılmaktadır. Transformator üretim aşamasında yapılan test ve ölçümlerden bazıları işletime alınmasından sonra da rutin olarak yapılmaya devam eden testlerdir.

Müşterinin isteği göz önünde bulundurularak özel bazı test ve ölçümler ise yine üretim aşamasında gerçekleştirilebilmektedir.

Doble Testleri: Bir transformatörün sargılarındaki ve buşinglerindeki yalıtkan kayıpları, sargı ve çekirdekdeki problemler hakkında çok önemli ve yararlı ilgiler verir. Doble testleri için özel tasarlanarak üretilmiş ölçüm cihazları ve setleri kullanılarak sonuçlar otomatik olarak değerlendirilir. Ölçümler sonucunda yalıtım kalitesi dört farklı durumda gösterilebilir;

- G – İyi
- I – Kuşkulu
- D – Arızalı
- B – Ciddi Arızalı

Güç faktörü ölçümü: Bu testin amacı, sargıların ve yalıtım sisteminin kurulum veya nemlilik düzeyini saptamaktadır. Sargılar, buşingler ve yalıtım yağını kapsayan toplam yalıtım için bir güç faktörü ($I^2.R$) ölçülür. Güç faktörü, buşinglerdeki ve transformatördeki toplam yalıtkan kayıplarını gösterir. Yalıtım sisteminin yani yağ ve kâğıdın yaşlarını belirlemek için ölçüm değerleri arasında bağlantı kurulur.

Kapasitans testleri: Kapasitans yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları, yüksek gerilim sargısı ve tank topraklaması, alçak gerilim sargısı ve tank topraklaması arasına uygulanır. Transformatör yaşlandığı zaman ya da transformatör yakınlarında şimşek çakması, arıza meydana gelmesi, sargıların bozulması, sargılardaki destek veya takozların gevşememesi, kayması veya hasar görmesi gibi istenmeyen olaylar olduğunda kapasitans değerlerinde değişimler olabilir.

Yüzde empedans/kaçak reaktans testi: Bu testler sargılarda meydana gelen bozulmaları gösterir.

- Sargılardaki büyük bozulmalar transformatörde oluşan arızayı gösterir.
- Sargılardaki küçük bozulmalar oluşabilecek arıza olasılığını işaret eder.

Bu ölçüm yapılırken alçak gerilim sargısı kısa devre yapılır ve yüksek gerilim sargısına bir test gerilimi uygulanır. Bu testler; arızaları, yaşlanmayı ve yakınına yıldırım düşmesi sonucu oluşan dalgaları belirlemeye yardımcı olur.

Manyetik akıya karşı gösterilen zorluğa relüktans (manyetik direnç) denir. YG ve AG sargıları ile çekirdek arasındaki boşluklarda relüktans çok yüksektir. Relüktans değişimleri, reaktans kaçaklarındaki değişimdir. Yani kaçak reaktans testi, ara boşluklardaki relüktansı ve uyarma akım testi ise çekirdekteki relüktansı gösterir.

Uyarma akımı testi: Bu ölçüm, transformatörde meydana gelen kısa devreler, iletkenlerdeki gevşek bağlantılar, çekirdek saclarındaki bozulmalar ve kısa devreler, çekirdek ve sargılardaki problemler, kademe değiştirici veya şalter arızaları gibi olayları ortaya çıkarmak için yapılır.

Bu testler sırasında çekirdeği mıknatıslamak ve sargılarda manyetik alan oluşturmak için gerekli akımın değeri ölçülür. Bu testler DC testten önce yapılmalıdır aksi takdirde çekirdekte mıknatıslama oluşacağından ölçüm değerleri hatalı çıkar.

Buşing testleri: Bu testin amacı buşinglerdeki güç kayıplarını görmek içindir. Buşing arızalarının çoğu nem oranının artmasıdır. Nem miktarı yüksek olduğu zamanda güç faktörü de yükselir.

Frekans tepki analizi (FRA – Frequency response analysis): Bu testler transformatör taşınmadan önce ve sonra, arızalardan sonra yapılır. Ayrıca bu testler çekirdek kaymaları, çekirdekteki topraklama arızalarını, çekirdek veya sargıdaki diğer problemleri, taşıma sırasında ve bir arıza esnasında transformatörde oluşan hasarları belirlemek için yapılır.

Kısmi Deşarj (Korona) Araştırması: Transformatör enerjiliyken parafudur, buşing ve diğer yüksek gerilim bağlantı noktaları kontrol edilerek kısmi deşarjların olup olmadığı araştırılır. Korona sırasında buşinglerde fiziksel bozulmalar başlar ve bu durum olası arızanın habercisi olabilir.

Çevirme Oranı Testi: Sargılarda meydana gelen kısa devreler ve kopmalar açığa çıkarmak için ve aynı zamanda yağda çözünmüş gaz analizi sonuçları aracılığıyla transformatörde herhangi bir arıza kuşkusu görüldüğünde, double testleri bir problemi işaret ederse, herhangi bir arıza veya olaydan dolayı koruma röleleri çalışırsa çevirme oranı testi uygulanır.

Sargı DC – Direnç Ölçümü: DC testleri, uyarma akımı ölçümünden sonra yapılmalıdır. Direnç testleri ile çok ciddi arızalar ortaya çıkarılabilir. Etilen, etan ve metan gazlarının miktarları arttığında sargı dirençleri ölçümleridir. Çevirme oranı, doble ve FRA testlerinin sonuçları maksimum değerleri aşıyorsa ya da röle açmaları olmuşsa DC – direnç ölçümlerinin yapılması gerektiğini gösteren uyarıdır.

Ölçümler sonucunda buşingteki gevşek bağlantılar, buşinglerdeki kırılmalar veya kopmalar, kademe değiştiricideki hatalı temaslar, temas noktalarındaki yüksek dirençler veya gevşek bağlantılar gibi problemleri bulmaya yardımcı olur. Bu işlem, transformatörün enerjisi kesildikten sonra ortam sıcaklığında yapılırsa daha iyi sonuç vermektedir.

Çekirdek Yalıtım Direnci ve Topraklama Testi (Meger): Çekirdeğin topraklamasında bir arıza ya da arıza kuşkusu olduğu zaman bu ölçüm uygulanır. Yağda çözünmüş gaz analizi sonuçları bu durumu belirlemede kullanılabilir. Etan, etilen ve metan gazları olduğu zaman kademe değiştiricide kötü kontaklar veya buşingin alt kısmındaki bağlantıda gevşeme olabilir. Eğer kademe değiştiricide bir sorun yoksa ve bağlantılar iyi durumdayken sargı direnci yüksekse bu ölçümler gerçekleştirilir.

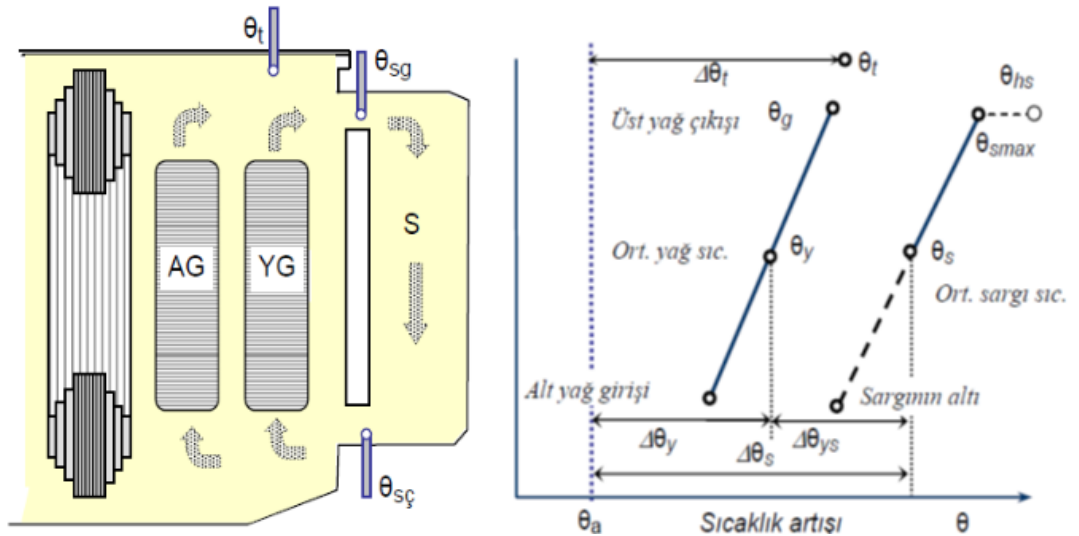
Sonik ve Ultrasonik İnceleme: Yağ örneğindeki gaz analizi sonucunda hidrojen miktarı yüksek olduğu zaman bu incelemeler yapılır. Çünkü transformatörün içinde kısmi deşarjlar olduğunda, hidrojen ile birlikte metan, etan ve etilen gazları da oluşur. Kısmi deşarjda hidrojen, transformatördeki ark olunca asetilen, termik ısınma olduğunda etilen gazları çoğalır. Böylece yüksek yoğunluklu deşarjlar (arklar), kısmi deşarjlar, gevşek bağlantılar, azot gazı kaçakları, ekran bağlantılarındaki gevşemeler, transformatör içinde gevşeyen parça ve bağlantılar, fan ve pompada oluşan mekanik problemler ortaya çıkartılır. Bu inceleme sayesinde transformatörün kalan işletme ömrü belirlenir.

Vibrasyon (titreşim) Ölçümü/Gürültü Seviyesi: Bir transformatörde, transformatörün dış kısmında bulunan parçaların gevşemesi, çekirdek saclarında meydana gelen gevşemeler, ekran bağlantılarında gevşeme ve kopmalar, iç kısımdaki bağlantılarda gevşemeler, Soğutma pompası ve faz arızaları vibrasyona(titreşim) neden olur[6, 70].

3. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN ISIL MODELLENMESİ VE YÜKLENEBİLİRLİK ANALİZİ

3.1. Transformatörün Isıl Modelleri

Bir transformatörün maksimum ömrü süresince işletilmesi istenir. Ancak çoğu durumda beklenen ömründen daha erken devre dışı kalabilir. Bilindiği gibi güç transformatörlerinin bedeli yüksek meblağlarda olduğu gibi arızalandığında tamiri de yüksek meblağlarda olabilir. Eğer bir de sistemde yedek bir güç transformatörü yoksa işletme ya da bölge enerjisiz kalır. Buna istinaden arızaları ve yıpranmaları en aza indirmek için iyi bir şekilde güvenilir ısıl model yapılmalıdır. Çünkü güç transformatörlerinde beklenen ömür süresince istenilen değerlerde yüklenmesi ile ekonomik olarak işletilmesi sağlanır. Böylece transformatörlerin kesintisiz ve güvenilir bir şekilde çalışması gerçekleşir. Bir transformatördeki basitleştirilmiş sıcaklık dağılımı Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Bir transformatörde basitleştirilmiş sıcaklık dağılımı [71]

- θ_t : En yüksek yağ sıcaklığı (kapak altı)
 $\Delta\theta_t$: Ortam sıcaklığı ile en yüksek yağ sıcaklığı arasındaki fark $\Delta\theta_t = \theta_t - \theta_a$
 θ_{amb} : Ortam sıcaklığı
 θ_s : Ortalama sargı sıcaklığı
 $\Delta\theta_s$: Ortalama sargı ile ortam arasındaki sıcaklık farkı $\Delta\theta_s = \theta_s - \theta_a$
 θ_{sg} : Soğutucuya giriş sıcaklığı
 $\theta_{sç}$: Soğutucudan çıkış sıcaklığı
 θ_{smax} : En yüksek sargı sıcaklığı
 S : Soğutucu
 θ_y : Ortalama yağ sıcaklığı
 $\Delta\theta_{sy}$: Sargı ve yağ arasındaki sıcaklık farkı
 $\Delta\theta_y$: Ortalama yağ sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki fark
 θ_{hs} : Hot-spot sıcaklığı (Sıcak nokta değeri)

3.1.1. Elektriksel – ısı benzetim modeli

Basit bir ısı model çıkartabilmek için elektriksel benzetim yapmak gerekmektedir. Bu elektriksel – ısı benzetim Tablo 3.1’de olduğu gibidir. Elektriksel – ısı benzetimde ısı transferi fonksiyonunun iki önemli parametresi olan, malzemeye ait ısı kapasite ve ısı direnç parametrelerinin bilinmesi veya hesaplanması gerekmektedir. Elektriksel direnç ve kapasiteye ait akım gerilim denklemleri Eşitlik (3.1)’de görülmektedir. Bu ifadelerde gerilim, sıcaklığa, akım da ısı enerjisine benzetilerek Eşitlik (3.2) yazılabilir [17, 72].

Bu elektriksel benzetim ile Şekil (3.2)’de gösterildiği gibi en basit ısı – elektriksel devre modeli oluşturulmaktadır.

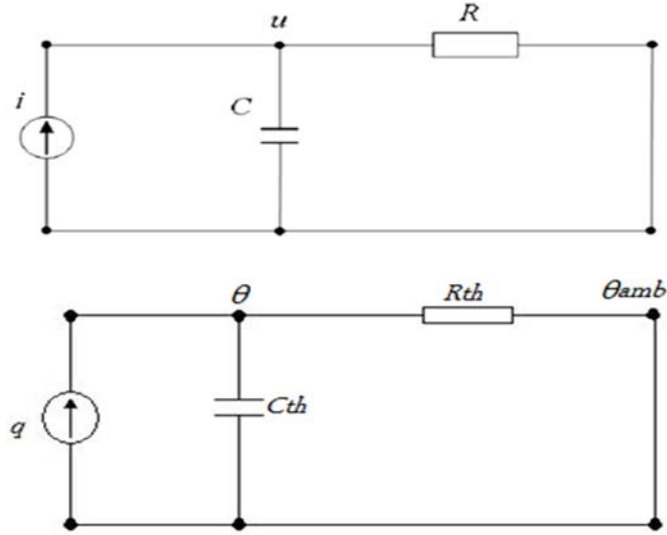
$$v = R_{el} \cdot i \quad i = C_{el} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.1)$$

$$\theta = R_{th} \cdot q \quad q = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.2)$$

Tablo 3.1. Elektriksel ısı benzetim

Isıl		Elektriksel	
Üretilen Isı	q	Akım	i
Sıcaklık	θ	Gerilim	V
Isıl Direnç	R_{th}	Direnç	R_{el}
Isıl Kapasite	C_{th}	Kapasite	C_{el}

Bu elektriksel benzetim ile Şekil 3.2’de gösterildiği gibi en basit ısı – elektriksel devre modeli oluşturulmaktadır.



Şekil 3.2. Basit ısı – elektriksel devre modeli

3.1.1.1. Doğrusal olmayan ısı direnç

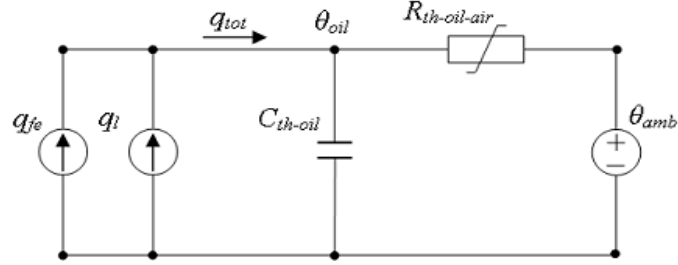
Doğrusal olmayan yağ ısı direnci ($R_{th-oil} - m^2K/W$), ısı transfer teorisine göre aşağıdaki formül ile gösterilmektedir [73, 74, 75].

$$R_{th-oil} = \frac{1}{h.A} = \frac{\Delta\theta_{oil}}{q} \quad (3.3)$$

Burada h ; ısı transfer katsayısını, A ; yüzeyi, $\Delta\theta_{oil}$; yağ sıcaklık değişimini, q ise kayıpların oluşturduğu ısı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (3.1)’de görüldüğü gibi doğrusal olmayan ısı direnç ısı transfer katsayısı ile ters orantılıdır.

3.1.1.2. Yağın üst seviye ısıl modeli

Yağın üst seviye ısıl modeli Şekil 3.3'te gösterilmekte olup bu model ısıl elektrik benzetim ve ısı transfer teorisi temel alınarak oluşturulmuştur[73, 75].



Şekil 3.3. Yağın üst seviye ısıl modeli[75]

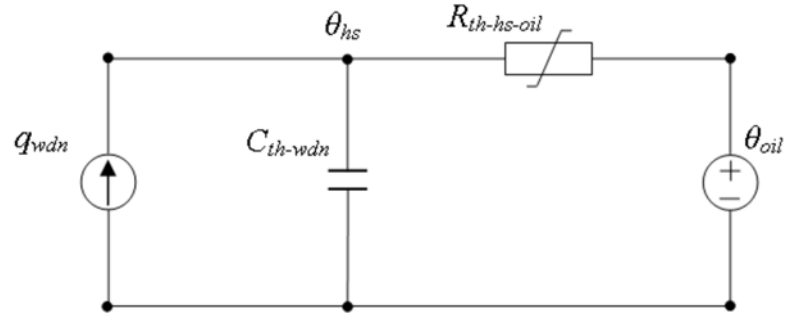
Şekil 3.3'te: q_{tot} ; toplam kayıplar tarafından oluşturulan ısı, q_{fe} ; transformatörün boşta çalışma sırasındaki kayıpların oluşturduğu ısı, q_l ; yükteki kayıpların oluşturduğu ısı, C_{th-oil} ; transformatör yağının eşdeğer ısıl kapasitans, θ_{oil} ; yağın üst seviye sıcaklığı, $R_{th-oil-air}$; yağ ile hava arasındaki doğrusal olmayan ısıl direnç, θ_{amb} ; ortam sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır.

Boşta ve yükte iken oluşan ısı, iki ideal ısı kaynağını ve ortam sıcaklığı da ideal sıcaklık kaynağını temsil etmektedir [17, 24].

$$q_{fe} + q_l = C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{R_{th-oil-air}} \quad (3.4)$$

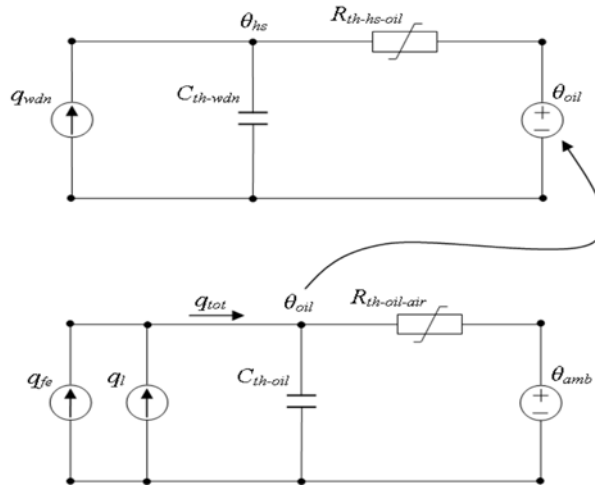
3.1.1.3. Transformatördeki sıcak noktanın ısıl modeli

Isıl direnç, geleneksel ısı transfer teorisine bağlıdır. Sıcak noktanın modeli, yağın üst seviye sıcaklık modeli ve doğrusal olmayan ısıl direnç için belirtilen geleneksel ısı transfer teorisindeki gibi bir ısıl devreye sahiptir [17, 24, 75].



Şekil 3.4. Sıcak noktanın ısıl modeli [75]

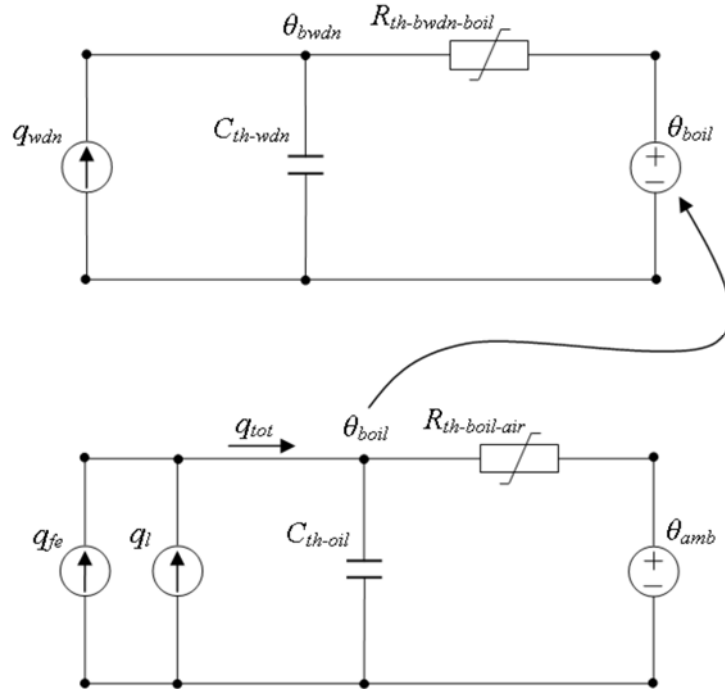
Şekil 3.4'te, q_{wdn} ; sargıdaki kayıplar tarafından oluşturulan ısı, C_{th-wdn} ; sargının ısıl kapasitansı, θ_{hs} ; sıcak nokta değeri, $R_{th-hs-oil}$; yağ ile sargı arasındaki doğrusal olmayan ısıl direnç, θ_{oil} ; yağın üst seviye sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır. Sonuç olarak transformatörün üst yağ seviyesi için genel ısıl devre Şekil 3.5' deki gibi elde edilebilir.



Şekil 3.5. Transformatördeki yağın üst seviyesinin genel ısıl modeli

3.1.1.4. Transformatör sargısı ve yağın alt seviye ısıl modeli

Şekil 3.6' da bir transformatörün sargı ve yağın alt seviyesinin genel ısıl devre modeli görülmektedir [17, 24, 75]. Bu model oluşturulurken üretici firmaların belirledikleri değerler kullanılmaktadır.

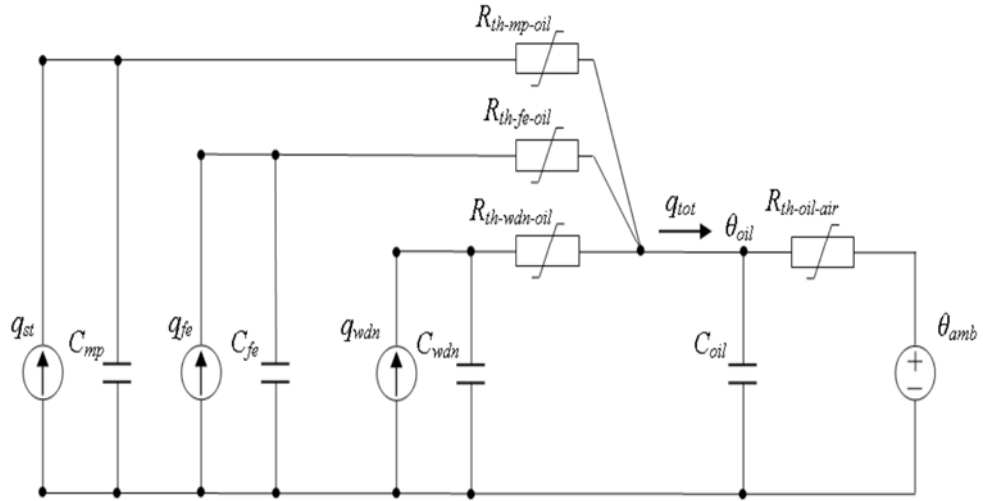


Şekil 3.6. Transformatör sargısı ve yağın alt seviyesinin genel ısıl devre modeli

Şekil 3.6'daki ısıl devre modelindeki elemanlar aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

- q_{tot} : Toplam kayıplar tarafından oluşan ısı,
- q_{fe} : Demir kayıplarının oluşturduğu ısı,
- q_{wdn} : Sargıdaki kayıpların oluşturduğu ısı,
- q_l : Yükteki kayıpların oluşturduğu ısı,
- C_{th-oil} : Transformatör yağının eşdeğer ısıl kapasitansı,
- C_{th-wdn} : Sargının ısıl kapasitansı,
- q_{boil} : Yağın alt seviye sıcaklığı,
- q_{bwdn} : Sargının alt seviyesindeki en sıcak nokta değeri,
- $R_{th-boil-air}$: Yağın alt seviyesi ile hava arasındaki doğrusal olmayan ısıl direnç,
- $R_{th-bwdn-boil}$: Sargı ve yağın alt seviyeleri arasındaki ısıl direnç,
- θ_{amb} : Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)

Yağın üst seviye ısıl devre modelinde sargı ile transformatörün nüve ve tank gibi diğer parçaları arasındaki doğrudan ısı transferi nedeniyle silindirik olarak yerleştirilen yalıtkanlardaki değerler ihmal edilerek düşünüldüğünde Şekil 3.7' de verilen karmaşık ısıl devre modeli elde edilmektedir[7, 75].



Şekil 3.7. Yağın üst seviyesinin karmaşık ısıl devre modeli

Şekil 3.7'deki ısıl devre modelinde;

- q_{st} : Kaçak kayıplardan dolayı oluşan ısı,
 q_{fe} : Nüvedeki kayıplardan dolayı oluşan ısı,
 q_{wdn} : Sargıdaki kayıplardan dolayı oluşan ısı,
 C_{wdn} : Sargıdaki bakır malzemenin ısıl kapasitansı,
 C_{fe} : Nüvenin ısıl kapasitansı,
 C_{oil} : Yağın ısıl kapasitansı,
 C_{mp} : Tank ve diğer parçalar arasındaki ısıl kapasitans,
 $R_{th-oil-air}$: Yağ ile hava arasındaki doğrusal olmayan ısıl direnç,
 $R_{th-wnd-oil}$: Sargı ile yağ arasındaki doğrusal olmayan ısıl direnç,
 $R_{th-fe-oil}$: Yağ ile nüve arasındaki doğrusal olmayan ısıl direnç,
 $R_{th-mp-oil}$: Tank ve diğer metal parçalar ile yağ arasındaki doğrusal olmayan ısıl direnç,
 θ_{oil} : Yağ sıcaklığı
 θ_{amb} : Ortam sıcaklığını ifade etmektedir.

Yani transformatördeki yük kayıpları, sargının DC, fuko ve metal parçalardaki kaçak kayıpların toplamına eşittir. Böylece toplam kayıplar:

$$q_{tot} = q_{fe} + q_{wdn} + q_{st} \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5) tekrar düzenlendiğinde,

$$q_{tot} = \frac{q_{fe}}{q_{tot}} \cdot q_{tot} + \frac{q_{wdn}}{q_{tot}} \cdot q_{tot} + \frac{q_{st}}{q_{tot}} \cdot q_{tot} \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6) elde edilir. Eşitlik (3.6)'daki kesirli ifadeler sembolize edilerek Eşitlik (3.7), (3.8) ve (3.9) elde edilir.

$$\frac{q_{fe}}{q_{tot}} \cdot q_{tot} = Y_{fe} \quad (3.7)$$

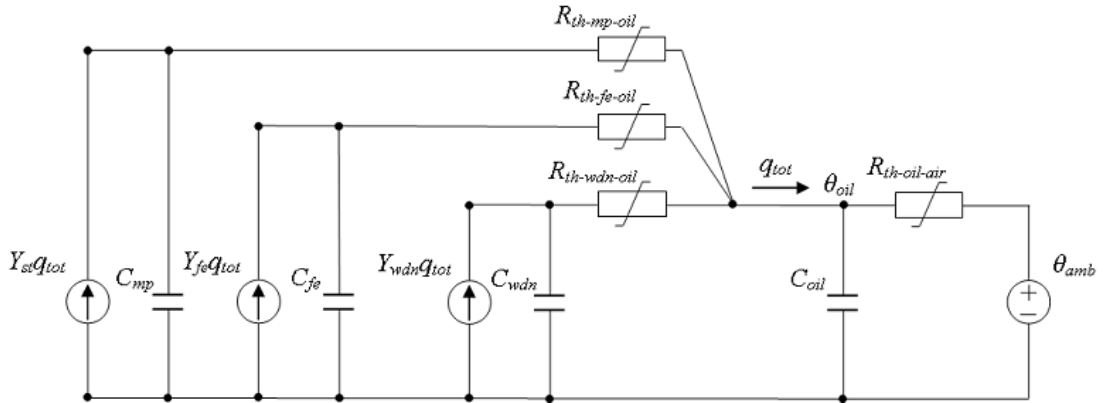
$$\frac{q_{wdn}}{q_{tot}} \cdot q_{tot} = Y_{wdn} \quad (3.8)$$

$$\frac{q_{st}}{q_{tot}} \cdot q_{tot} = Y_{st} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki eşitlikler Eşitlik (3.6)'da yerine yazılırsa toplam kayıp;

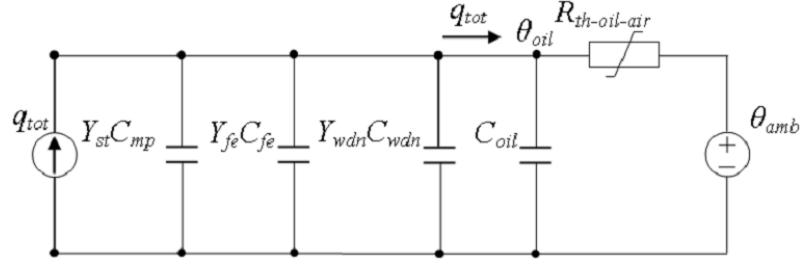
$$q_{tot} = Y_{fe} \cdot q_{tot} + Y_{wdn} \cdot q_{tot} + Y_{st} \cdot q_{tot} \quad (3.10)$$

elde edilir. Böylece Şekil (3.7)'deki devre tekrar düzenlenecek olursa yağın üst seviye ısıl devresi Şekil (3.8)'deki gibi olacaktır.



Şekil 3.8. Yağın üst seviye ısıl devre modelinin tekrar düzenlenmiş hali

Şekil 3.8' de görülen $R_{th-wdn-oil}$, $R_{th-fe-oil}$ ve $R_{th-mp-oil}$ ifadelerin değerleri $5 \cdot 10^{-5} K/W$ gibi çok düşük olduğu için çalışmanın kolaylaştırılması amacıyla ihmal edilebilir [4, 15, 75] ve ısıl devre Şekil 3.9'deki hali alır.



Şekil 3.9. Yağın üst seviyesinin dönüştürülmüş ısı devre modeli

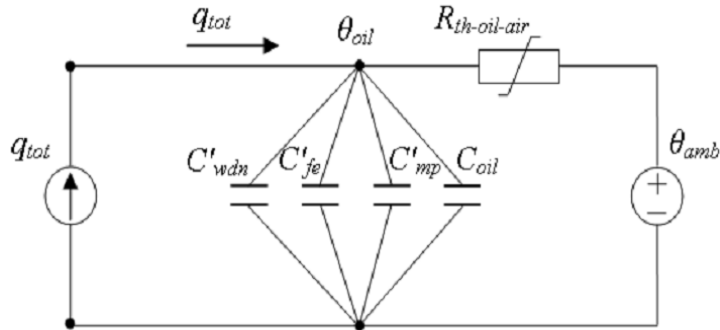
Her koldaki ısıl kapasitanslar tekrar formülize edilerek aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$C'_{wdn} = Y_{wdn} \cdot C_{wdn} \quad (3.11)$$

$$C'_{fe} = Y_{fe} \cdot C_{fe} \quad (3.12)$$

$$C'_{mp} = Y_{st} \cdot C_{mp} \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.11), (3.12) ve (3.13) ile Şekil 3.7 'deki devre Şekil 3.10'daki gibi değiştirilerek ısıl kapasite devre modeli elde edilir [75].



Şekil 3.10. Isıl kapasite devresi

3.2. Yüklenebilirlik Analizi ve Ömür Kaybı

Bir transformatörün ısıl özelliği, yükleme koşullarını düzenlemek için önemli bir etkidir. Bir transformatörün yüklenebilirliği sargının izin verilebilir en sıcak nokta değeri ile sınırlıdır. Ayrıca, ömür kaybını (L_{Loss}) hesaplayabilmek için güç transformatörünün içerisinde üretilen en sıcak nokta değerini bilmek gerekmektedir. Sıcak noktanın değeri, günümüz teknolojisinde fiber optik sensörler kullanılarak ölçülür ya da bir güç transformatörünün ısıl modeli kullanılarak hesaplanabilir [76, 77]. Isıl model, rasgele zamana bağlı olarak değişen yük faktörü ile ortam sıcaklığına

bağlı diferansiyel denklemler ile tanımlanabilmektedir [17, 28]. En sıcak nokta değeri, aşağıda verilen Eşitlik (3.14)'te olduğu gibi üç bileşenden oluştuğu bilinmektedir [4, 78].

$$T_{HS} = T_A + \Delta T_{TO} + \Delta T_{HS} \quad (3.14)$$

Bu eşitlikte, T_A ortam sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$), ΔT_{TO} o ortamdaki yağın üst seviyesindeki sıcaklık artışı ($^{\circ}\text{C}$), ΔT_{HS} sıcak nokta değerinin artışı ($^{\circ}\text{C}$) göstermektedir. Zamanla yük değiştirilerek yağın üst seviyesindeki sıcaklık artışı, yağın zaman sabitini içeren üstel ifade Eşitlik (3.15) ve (3.16)'de olduğu gibidir.

$$\Delta T_{TO} = (\Delta T_{TO,u} - \Delta T_{TO,i}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{TO}}}\right) + \Delta T_{TO,i} \quad (3.15)$$

$$\tau_{TO} \frac{d\Delta T_{TO}}{dt} = (\Delta T_{TO,u} - \Delta T_{TO}) \quad (3.16)$$

Burada herhangi bir yük için, $\Delta T_{TO,i}$ başlangıçtaki yağın üst seviyesindeki sıcaklık artışı, $\Delta T_{TO,u}$ yağın üst seviyesinin en yüksek sıcaklık artışı ifade etmektedir. Yağ zaman sabitinin değeri (τ_{TO}), yağın üst seviyesindeki sıcaklık artışı ve güç kayıpları ile değişim gösterir. Yağ zaman sabitinin nasıl hesaplanacağı ilgili standartta belirtilmektedir [4, 78]. İki basamaklı aşırı yüklenmede başlangıçta yağın üst seviyesindeki sıcaklık artışı aşağıdaki Eşitlik (3.17)'deki gibi ifade edilir;

$$\Delta T_{TO,i} = \Delta T_{TO,R} \left[\frac{K_i^2 \cdot R + 1}{(R + 1)} \right]^n \quad (3.17)$$

Yağın üst seviyesinin en yüksek sıcaklık artışı ise Eşitlik (3.18)'de verilmiştir.

$$\Delta T_{TO,u} = \Delta T_{TO,R} \left[\frac{K_u^2 \cdot R + 1}{(R + 1)} \right]^n \quad (3.18)$$

Burada K birim değer olarak yüke bağlı yüklenme oranı, R yüklü ve yüksüz durumdaki yük oranını, n seçilen soğutma türüne göre yağ katsayısıdır:

Sürekli değişen sargının en sıcak noktanın değeri yağın üst seviyesindeki sıcaklığı aşabilmektedir ve aşağıdaki gibi bulunur.

$$\Delta T_{HS} = (\Delta T_{HS,u} - \Delta T_{HS,i}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_w}} \right) + \Delta T_{HS,i} \quad (3.19)$$

Zaman sabiti ise;

$$\tau_w \frac{d\Delta T_{HS}}{dt} = [\Delta T_{HS,u} - \Delta T_{HS}] \quad (3.20)$$

elde edilir. Burada, kullanılan bir yük için $\Delta T_{HS,i}$ başlangıçtaki sargının en sıcak nokta değerinin artışı, $\Delta T_{HS,u}$ sargının en sıcak noktasının en yüksek sıcaklık değerine artışıdır. Sargı zaman sabiti değeri (τ_w), sıcak nokta değeri ve güç kaybı ile değişim gösterir. Sargı zaman sabitinin hesaplanması ilgili standartta verilmiştir [4].

Başlangıçtaki sıcak nokta değerinin artışı Eşitlik (3.19)'da verilmiştir.

$$\Delta T_{HS,i} = \Delta T_{HS,R} K_i^{2m} \quad (3.19)$$

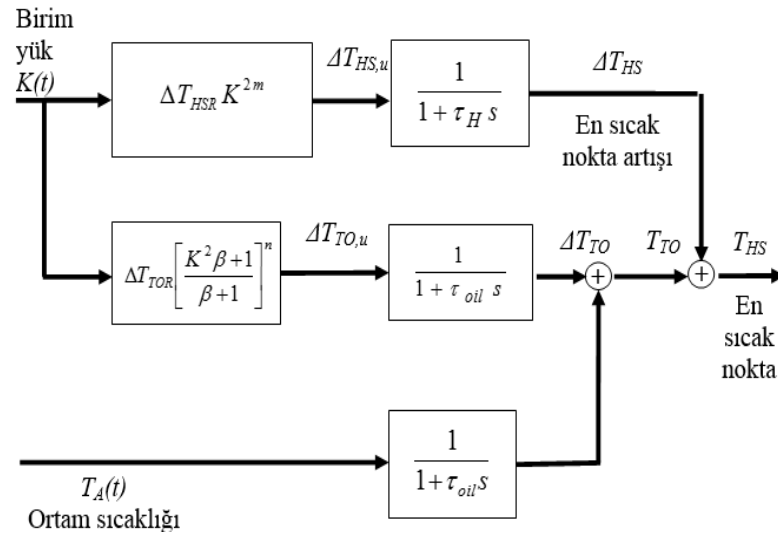
Ulaşılan en son sıcak nokta değerinin artışı ise Eşitlik (3.20)'de verilmiştir.

$$\Delta T_{HS,u} = \Delta T_{HS,R} K_u^{2m} \quad (3.20)$$

Burada m soğutma sistemine bağlı üstel katsayıdır. Ortam sıcaklığı zaman sabitini etkilemektedir.

Transformatörün tesis edildiği bir yerde gün içerisinde sürekli değişen ortam sıcaklığında aynı şekilde değişen genlikte yük kaybından dolayı yağın üst seviyesindeki sıcaklığı artar [26]. Bu nedenle yağın üst seviye sıcaklık denklemi tekrar modifiye edilir [26, 79, 80].

Kurulan model iki aşamalıdır. İlk aşamada, ortam sıcaklığı ve yük faktörü giriş parametresi olarak alınır. Sıcak nokta değeri, ömür kaybını hesaplamak için bu ısıl model kullanılarak bulunur. Yük faktörü bilgisine göre ortam sıcaklığı ve ısıl model Şekil 3.11'da görüldüğü oluşturulabilir.



Şekil 3.11. En sıcak nokta değerinin ısıl modeli [4, 80, 81]

Tablo 3.2. Sıcaklık hesaplamasında kullanılan üstel katsayılar [63]

Soğutma cinsi	IEC		IEEE	
	n	m	n	m
OA/ONAN	0,9	0,8	0,8	0,8
FA/ONAF	0,9	0,8	0,9	0,8
NDFOA/OFAF	1,0	0,8	0,9	0,8
DFOA/ODAF	1,0	1,0	1,0	1,0

IEEE C57.91-95 standardına göre, nominal işletme şartlarında, sıcak nokta değeri 110°C iken, güç transformatörünün servis ömrü yaklaşık 20,55 yıl (180.000 saat) olduğu belirtilmektedir [82]. Bu iki standarda ilişkin farklılık arz eden bir diğer nokta, ortam sıcaklığı sabit değerlerinin farklı olmasıdır. IEEE standardına göre sabit ortam sıcaklığı 30°C, IEC standardında ise bu değer 20°C olarak belirlenmiştir. IEC – 60354/1991 standardında ısıl özelliği artırılmamış kâğıt için ortam sıcaklığı 20°C iken sıcak nokta değeri 98°C ile sınırlıdır. Bu yaşlanma oranı Eşitlik (3.21)'de gösterilmektedir [82, 83]:

$$\text{Yaşlanma Oranı (V)} = 2^{(T_{HS}-98)/6} \quad (3.21)$$

Bu denklemdeki V yaşlanma ivmesini, T_{HS} (hot spot) sıcak nokta değerini ifade etmektedir. Formülden de anlaşılacağı üzere, 98°C değerini geçen her 6°C'lik sıcaklık artışında yaşlanma ivmesi iki katına çıkmaktadır. Bu formül, ısıl olarak güçlendirilmemiş kâğıdın (non-thermally upgraded paper) yaşlanma oranını belirtmektedir. Ancak ısıl olarak güçlendirilmiş (thermally upgraded paper) kâğıt

malzemenin yaşlanma oranı IEEE C57.91-95 ve IEC 60076-7 standartlarında aşağıdaki sekliyle yer almaktadır [3, 4]. Buna göre ısı olarak güçlendirilmiş kâğıt malzeme kullanılan güç transformatörlerinde izin verilebilir sıcak nokta değerinin sınırı 110°C olarak kabul edilmektedir.

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_{HS} + 273} \right]} \text{ pu} \quad (3.22)$$

Bu tez çalışmasında (ONAF – 250MVA) bir güç transformatörünün parametreleri IEEE'nin Yüklenme Kılavuzundan alınmış olup özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Aynı teknik özellikteki doğal ester ve mineral yağ dolu güç transformatörü için Matlab – Simulink ile iki farklı model oluşturulmuştur.

Tablo 3.3. 250 MVA Güç transformatörünün parametreleri [16, 25, 84]

Ortama bağlı yağın üst seviye sıcaklık artışı	38,3°C
Yağın üst seviyesindeki sıcaklığa bağlı sıcak nokta değerinin artışı	20,3°C
Yük kayıplarının yüksüz kayıplara oranı	6,20
Sıcak noktadaki eddy akım kayıpları(bd),AG	0,65
Sıcak noktadaki eddy akım kayıpları(bd),YG	0,3
Yağın üst seviyesinin zaman sabiti	170 dakika
Sıcak noktanın zaman sabiti	6 dakika
Katsayı n	0,9
Katsayı m	0,8

Günümüzde doğal ester yağların(bitkisel bazlı yağ) sıvı yalıtkan malzemesi olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Ancak, sıcak nokta değerinin hesaplanması doğal ester yağ ile mineral yağ dolu transformatör için farklı prosedürler uygulanmaktadır. Literatürdeki deneysel çalışmalara göre, doğal ester yağ ve mineral yağın sıcaklık artış farkı 21°C'yi aşmaz [22, 23, 26]. Normal işletme koşullarında bu fark 5 – 10°C arasında değişebilir [23]. Bu nedenle literatürdeki çalışmalara göre, doğal ester yağlı transformatör için üstel olarak değişen bir model tasarlanmıştır.

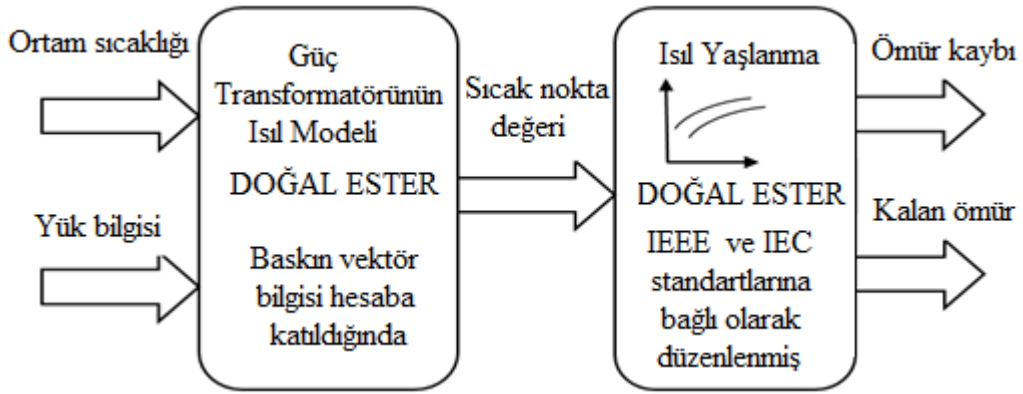
Hızlandırılmış yaşlanma faktörü: Modellemenin ikinci aşaması ise yaşlanma özelliklerinin hesaplanmasıdır. Burada, doğal ester yağ için revize edilmiş ancak mineral yağ için revize edilmemiş hızlandırılmış yaşlanma faktörünü hesaplamak için önerilen eşitlikler Tablo 3.4'te görülmektedir. Literatürde, genel olarak, bitkisel bazlı yağlar, aynı sıcaklıkta 5 – 8 kat arasında katı yalıtkanın ömrünü uzattığından

bahsedilmektedir. Bu nedenle doğal ester yağ için yaşlanma modelinin hesaplanmasında bir R katsayısı eklenmelidir. Bu yağların yüklenebilirlik değerlerini veya kullanım ömürlerini artırdığına dönük deneysel çalışmalar mevcuttur. Doğal ester yağ için önerilen modelde mineral yağa nazaran daha fazla sıcaklık artışı göstermesi kayda değer bir durumdur. Özellikle doğal ester yağlı transformatörlerde normal işletilme koşullarında çok büyük avantaj sağlamaktadır. Normal şartlardakinin üzerinde yüklenirse bu dezavantaja döner.

Tablo 3.4. Güncellenmiş yaşlanma katsayısı [81,85]

Standartlar	Mineral Yağ (Yaşlanma Katsayısı)	Doğal Ester Yağ(Güncellenen yavaş yaşlanma katsayısı)
ANSI/IEEE C57: 91	$e^{\left[\frac{B}{(383)} - \frac{B}{(\theta_{HS}+273)}\right]}$	$R.e^{\left[\frac{B}{(383)} - \frac{B}{(\theta_{HS}+273)}\right]}$
IEC 354: 91	$2^{\frac{(\theta_{HS}-98)}{6}}$	$R.2^{\frac{(\theta_{HS}-98)}{6}}$

B Yaşlanma oranı sabiti.
 θ_{HS} Sıcak nokta değeri
R Doğal esterler için yavaş yaşlanma katsayısı
Bu değerler doğal yağların özelliklerine göre 1/5 ila 1/8 arasında değişebilir.



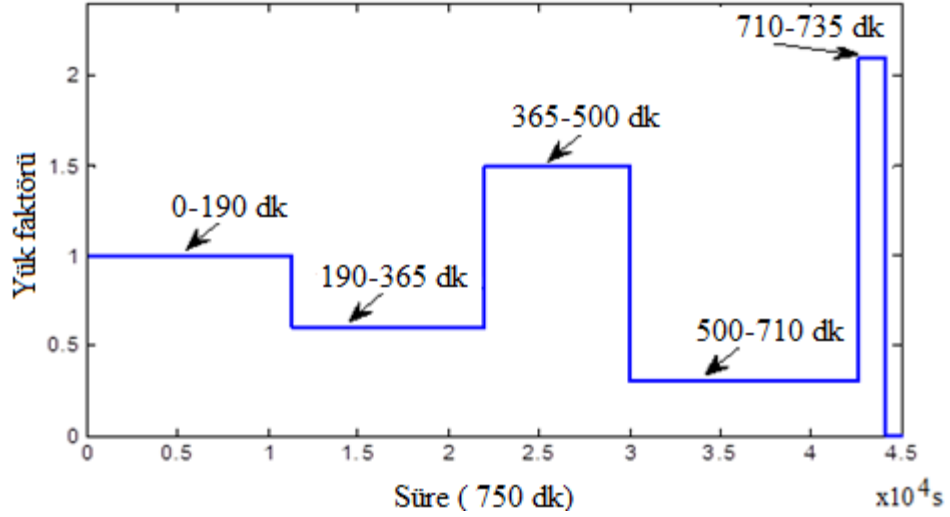
Şekil 3.12. Önerilen ısı modeli ve yaşlanma hesaplama aşamaları [81,85]

Şekil 3.12’de görülen modelde, sıcak nokta değeri ve yaşlanma parametresi olarak bilinen yalıtkanın ömür kaybı ve kalan ömür süresi alınan ortam sıcaklığında farklı yükler altında hem doğal ester yağ hem de mineral yağ için hesaplanabilmektedir.

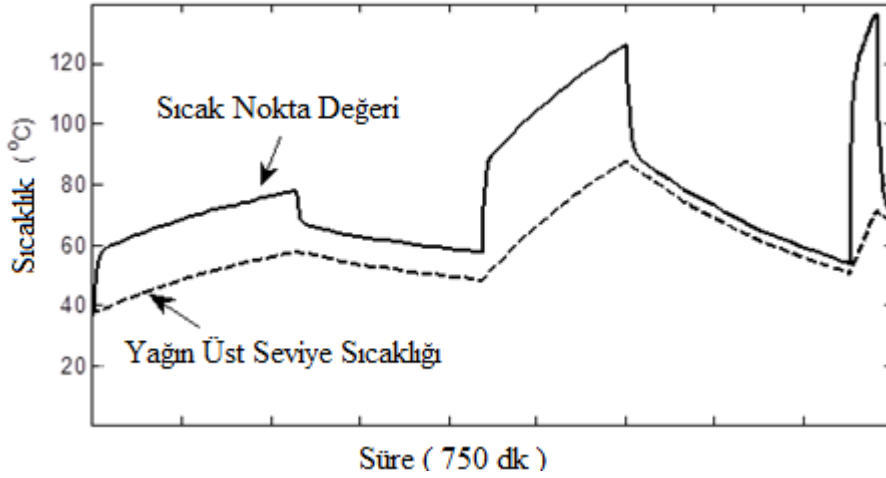
3.2.1. Analiz sonuçları

750 dakikalık bir süresi için basamak yük değişimi Şekil 3.13’te gösterilmiştir. Mineral yağlı transformatörlerde kullanılan sıcak nokta değeri ve yağın üst seviye sıcaklığı ısı model cevabı Şekil 3.14’te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Sıcaklık

artışının kararlı hale ulaşamayacağı anlaşılmaktadır. Bunun anlamı yük artışı ile aynı hızda sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu durum kullanılan malzemelerin ısı kapasitelerinden kaynaklanmaktadır.

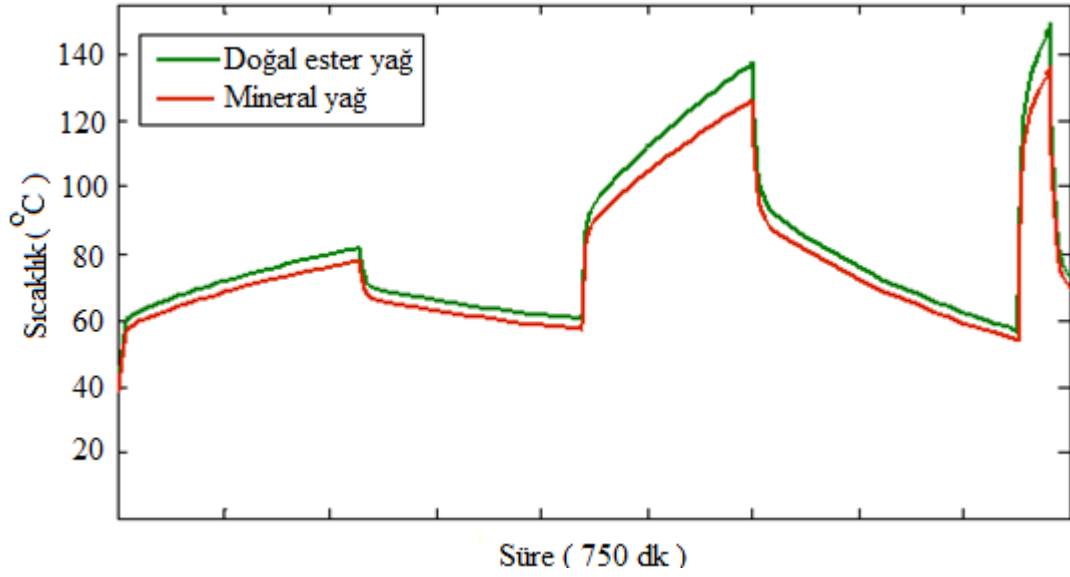


Şekil 3.13. Yük değişimi [3, 85]



Şekil 3.14. Mineral yağın sıcaklığa cevabı [85]

Aynı sürede, doğal ester ve mineral yağ için hesaplanan sıcak nokta değerinin artışı Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Doğal ester yağ ve mineral yağ arasındaki sıcaklık farkı güç faktöründe olduğu gibi artış gösterir. Doğal ester yağın ısı direnç ve ısı kapasitansı mineral yağa göre daha büyük olduğundan ısı cevabı daha geç vermektedir.

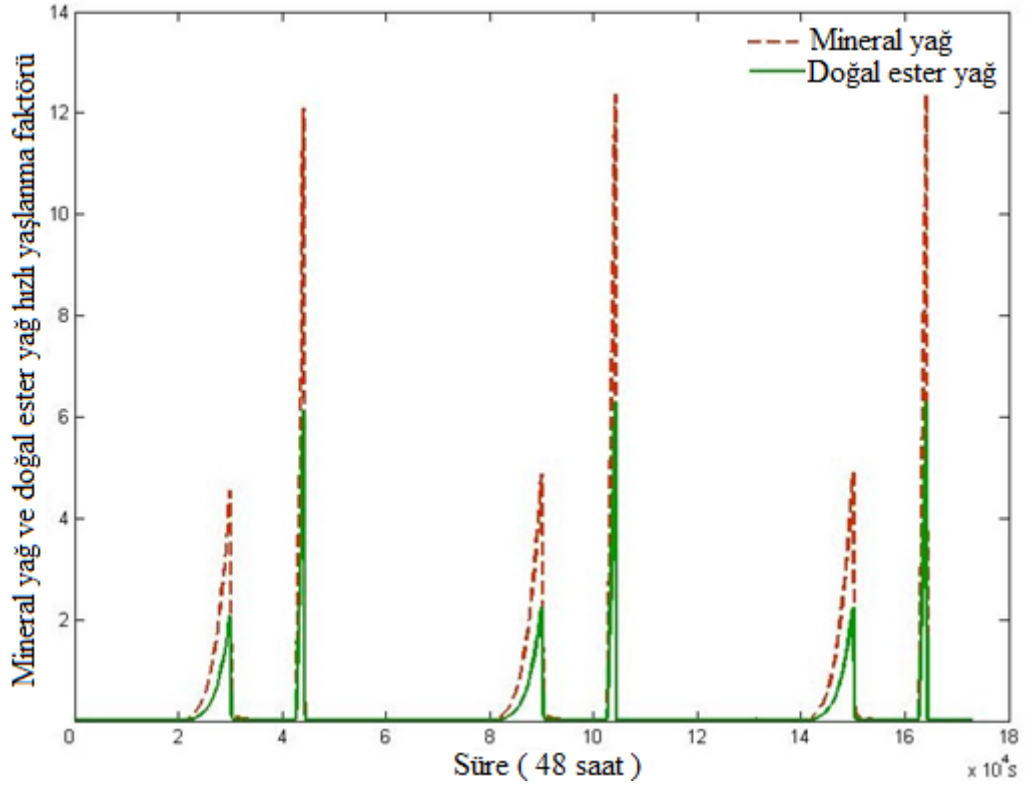


Şekil 3.15. Doğal ester yağ ile mineral yağ arasındaki sıcak nokta değerlerinin farkı [85]

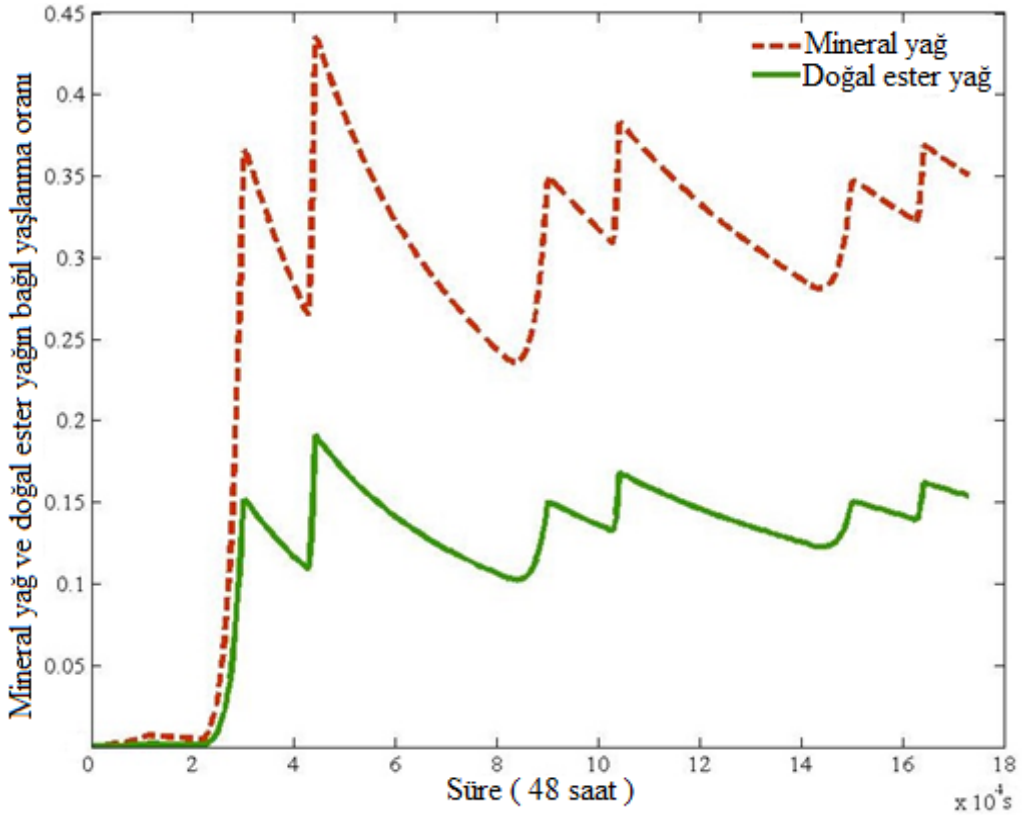
Açıkça yaşlanma özelliklerini belirlemek için, yüklenme süresi 48 saate çıkartılmış ve yüklenme bu süre zarfında üç kez tekrarlanır. Bu model kullanılarak aşağıdaki durumlar analiz edilmektedir;

- Hızlı yaşlanma faktörü değişimi
- Zamana bağlı bağlı yaşlanma oranı değişimi
- Ömür kaybı değişimi

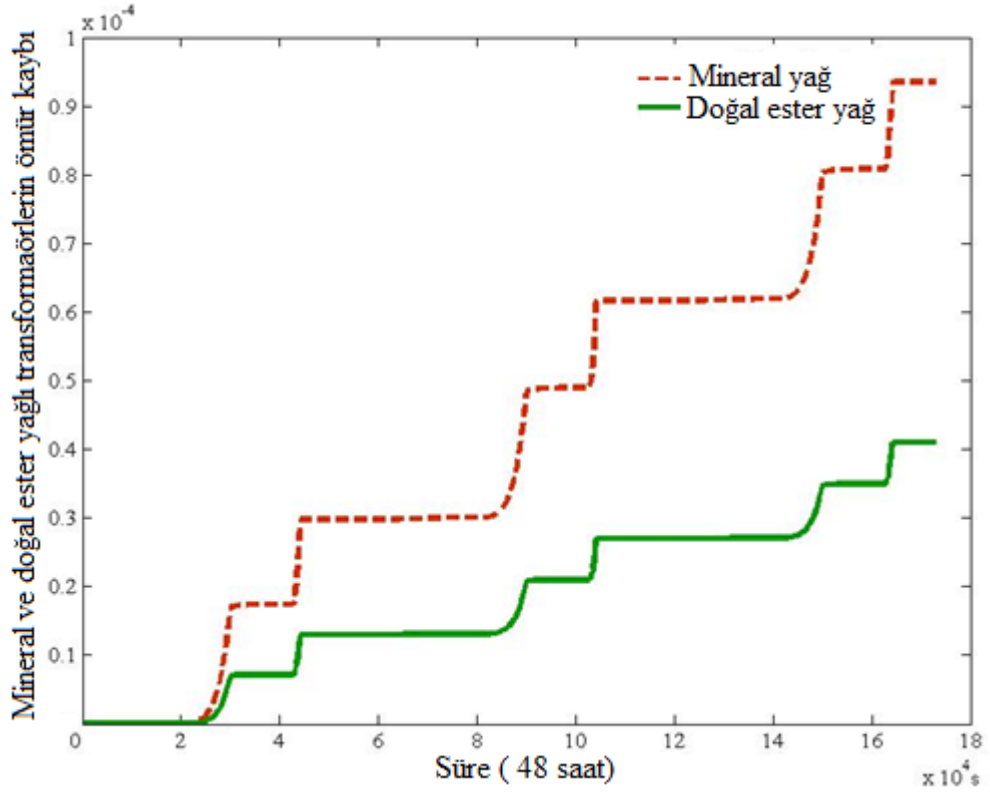
Şekil 3.16'da, doğal ester ve mineral yağın hızlı yaşlanma faktörü elde edilmiştir. Yaşlanma aynı özellik göstermesine rağmen mineral yağın hızlı yaşlanma faktörü doğal ester yağına göre yaklaşık iki daha fazladır. Aynı zamanda bu bağlı yaşlanma oranını da etkiler. Şekil 3.17'de görüldüğü gibi süre artışının tersine doğal ester ve mineral yağdaki bağlı yaşlanma oranının azalma eğilimindedir. Katı yalıtkanın ömür kaybı transformatörün ömür kaybında olduğu gibi genellikle Şekil 3.18'de verilen ve aynı şartlar altında mineral yağdaki yalıtkanın ömür kaybı nerdeyse 2,4 kat doğal ester yağdakine göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.16. Mineral ve doğal ester yağ için hızlı yaşlanma faktörünün değişimi [85]



Şekil 3.17. Mineral yağ ve doğal ester yağın zamana bağlı ortalama bağlı yaşlanma oranı değişimi [85]



Şekil 3.18. Mineral yağ ve doğal ester yağlı transformatörler için ömür kaybı değişimi [85]

4. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN YAŞLANMA DAVRANIŞI

Bir güç transformatörü işletim süresi boyunca çok sayıda zorlanmaya (gerilime – stresse) maruz kalır. Bunların başında elektrik, ısı ve mekanik zorlanmalar sayılabilir ve genelde bunlar transformatörlerde kullanılan yalıtkanlara zarar vermektedir. Zarar görmenin anlamı ise, yalıtkanın niteliğinin azalması, kısmi boşalmaların başlaması ve bu yalıtkanlarda delinmenin meydana gelmesi şeklinde kendini gösterir. Yalıtkanın yaşlanma davranışını, transformatörün tesis edildiği ve kullanıldığı işletme koşulları, özellikle elektriksel ve ısı koşulları ile ortamdaki nem belirlemektedir. Transformatörün maruz kaldığı en önemli etki ise maksimum işletim sıcaklığıdır.

Yaşlanma, yalıtkan bir malzemenin kullanım durumunun geri dönüşü olmayan zararlı bir değişimdir. Bu değişimin niteliği bazı nedenlerden dolayı farklılık gösterebilir. Yalıtkanın malzemenin yaşlanması, uygulanan zorlanmalar ve kullanılan yalıtkan malzemenin türüne bağlı olarak değişir. Yaşlanmayı oluşturan etkenlere yaşlanma faktörleri adı verilir. Yaşlanma faktörleri dört ana başlık altında toplanabilmektedir. Bunlar kısmi boşalma, aşırı gerilim gibi elektriksel faktörler; çatlaklar, basınç ve titreşim gibi mekanik faktörler; nem, gaz, asit, hava basıncı ve ışığa gibi çevresel faktörler ve sıcaklık, oksidasyon ve hidroliz gibi ısı faktörleridir.

Yaşlanma sadece tek bir yaşlanma faktörü ile gerçekleşiyorsa buna tek faktörlü yaşlanma, eğer yaşlanma birden fazla yaşlanma faktörü ile gerçekleşiyorsa, yani aynı anda ya da sırayla uygulanıyorsa bu tip yaşlanmaya da çok faktörlü yaşlanma adı verilir. Yaşlanma sürecinde yalıtkanlarda delinme oluşursa yaşlanmanın hızı daha da artabilmektedir ve yalıtkanın ömrü delinme süresine bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Yalıtkanlarda hiçbir arıza meydana gelmezse normal şartlar altında 20 – 30 yıl kadar ömürlerini sürdürmeleri beklenmektedir. Bunun yerine, laboratuvar testleri ile yaşlanma süreci hızlandırılır ve böylece yalıtkan ömrü ciddi bir şekilde azalır. Bu genellikle amaca uygun olarak tasarlanan zorlamanın artırılması ile gerçekleştirilir.

Yeterince yaşlanma verisi elde edilmediği zaman istatistiksel boyutları da göz önünde bulundurulmalıdır. Hızlandırılmış yaşlanma testi sonuçlarından işletme koşullarında yalıtkan ömrü uygun bir yaşlanma modeli yardımıyla tahmin edilebilir. Ancak ihtiyaca göre herhangi bir ekstrapolasyon yöntemi uygulanabilmelidir. Yaşlanma sürecinin hızlanması sadece stres seviyesinin artış etkisinden kaynaklanmayabilir. Diğer yaşlanma süreçleri de baskın olabilmektedir ki hızlandırılmış stres seviyesinde veya doğrusal olmayan bir şekilde streslerin artması ile de oluşabilir. Bununla beraber, pratik olarak yalıtkan ömrü boyunca yaşlanma oranının sabit kalması beklenemez. Yaşlanmanın başındaki baskın yaşlanma işlemi yalıtkanın ömrü boyunca aynı olmayabilir. Bundan dolayıdır ki hızlandırılmış stres seviyelerinden kullanım etkilerine kadar ekstrapolasyon metodu tek başına yeterli olmayabilir. Süre-arıza tahminlerinin güvenilirliğini arttırmanın en iyi yolu, yaşlanmada kimyasal ve fiziksel bilgilerine sahip olmaktır.

4.1. Yaşlanma Analizleri ve Beklenen Ömür Süresi

Yaşlanmanın 98°C üzerindeki sıcaklık artışının 5°C veya 10°C olması durumunda 2 kat hızlandığını ileri sürmüşlerdir. Genellikle transformatörün çalışma aralığı 80°C ile 140°C arasındadır. Bu sıcaklıklar arasında uygulanabilir Montsinger formülüne göre:

$$E = De^{-p\theta} \text{ yıl} \quad (4.1)$$

Burada E; işletme süresi, D; yıl olarak sabit, p; °C⁻¹ cinsinden sabit, θ ; °C cinsinden sıcaklığı vermektedir. Kabul edilen sıcaklıklar arasında 6°C artış gösterildiğinde aşağıdaki formülden de görüleceği gibi işletme ömrü yarıya inmektedir. Sayısal olarak p değerini tanımlayabilmek için aşağıdaki formüller kullanılmaktadır;

$$\begin{aligned} \frac{E}{2} &= De^{-p(\theta+6^\circ\text{C})} \\ &\Rightarrow \\ &= EDe^{-p6^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$2 = De^{p6^\circ\text{C}} \quad (4.3)$$

ise buradan

$$p = 0.1155^{\circ} C^{-1} \quad (4.4)$$

olarak hesaplanmaktadır.

IEC, yayınladığı bir raporda transformatörlerin yaşlanmasıyla ilgili dört temel etmen ele alınmış, önem sırası ve kendi aralarındaki etkileşimleri göz önünde bulundurularak zamana göre arızanın hangi etmenden kaynaklanabileceği bildirilmiştir [3]. IEC 60076'ya göre işletme altında olan bir transformatörün sıcak nokta değeri 98°C ve ortam sıcaklığı da 20°C olup bu değişkenler de kontrol edildiğinde transformatörün servis ömrü maksimum düzeye çıkabilmektedir.

Transformatörlerin sargıları arasındaki yalıtkanların yaşlanmaya başladığı sıcak nokta değeri 98°C olup bu sıcaklıktan sonraki sıcaklıklarda Montsinger'e göre bu sıcaklık işletme sıcaklığı olarak referans alındığında artan 6°C'lik sıcaklıklarda yaşlanma iki kat artmaktadır. Bu formüle göre transformatörün bağıl ömür kaybı Eşitlik (4.5) ile hesaplanabilmektedir.

$$V = e^{0.1155(\theta - 98^{\circ} C)} \quad (4.5)$$

İşletim sıcaklık seviyelerinin belirlenmesi ve farklı yükler altındaki sıcaklık değerlerinin önceden bilinmesi, güç transformatörleri için yüklenebilirlik analizini gerçekleştirmede önemlidir. Farklı işletim durumları için yapılan aşırı yük testleri güç transformatörlerinin ömür kaybına neden olduğundan tercih edilmemektedir. Modelleme sayesinde sistemden çekilen o anki yüke göre sıcaklık değerleri tespit edilebileceğinden uzun vadede ömür tahminleri de gerçekleştirmek mümkün olabilecektir. Doğrulukları yüksek modellerin gerçekleştirilmesi aynı zamanda, transformatörlerin tasarlanması ve yüklenebilirlik tahminlerinin yapılmasını güvenli ve ekonomik hale getirdiğinden üreticiler tarafından da tercih edilebilmektedir.

Perkins ve arkadaşları güç transformatörlerinde ömür kayıplarını hesaplarken çözülmüş gaz analizi, elektriksel ve fiziksel özellikleri, sıcaklık verileri kullanmışlardır. Bu değişkenlerin her birine farklı ağırlık veren bir algoritma geliştirmişlerdir [8]. Thomas ve Shukla, transformatör kâğıdının polimerizasyon derecesinin farklı sıcaklıklardaki işletim süresinin değişiminden faydalanarak yaşlanma durumlarını kimyasal yöntemle incelemiştir [9]. Wilson ve Lapworth

tarafından sargıların orta kısmından üst kısımlara doğru gidildikçe transformatörde kullanılan kâğıttaki polimerizasyon derecesinin azaldığı gösterilmiştir [10]. Bolhuis ve arkadaşları; sıcaklık, kademe değiştirici, dielektrik özellikler, çözünmüş gaz analizi ve kısmi deşarjlar ile bir izleme sistemi geliştirmişlerdir [11]. Kovacevic ve Dominelli, bir güç transformatörünün ideal ömrü boyunca kullanılması amaçlı yeni bir sistem geliştirmişlerdir. İşletimde olan transformatörün yağ çevrimini ince fiber zarlardan geçirmek suretiyle, yağ içerisindeki parçacıkları, çözünmüş gaz ve suyu ayırtmaya çalışmışlar, sonuçları değerlendirmişlerdir ve almış oldukları sonuçlar itibariyle olumlu katkılar sağlamıştır [12]. Reddy ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise transformatör buşinglerindeki yağlı kâğıtların dielektrik özelliklerinin değişimi sayesinde ömür tahminleri yapılmıştır [13]. Güncel çalışmalarda yaşlanma analizleri ve ömür tahminleri yapılırken önem derecesine göre etki eden tüm unsurların bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir [14, 15].

Bir güç transformatörünün kalan ömrünün yaklaşık olarak bilinmesi önem arz etmektedir. Böylece yapılacak olan bakım ve onarım için gerekli işlemlerin nasıl olması gerektiği hakkında bilgi verir. Yaşlanmış yani özelliğini yitirmiş bir transformatörün değiştirilmesi ya da geniş kapsamlı bakımının yapılması, kalan ömrünün kaç yıl olduğunun tahmini olarak bilinmesi ile gerçekleşir. Çalışmakta olan bir transformatörün ömrü, büyük oranda sargıların üzerine sarılan kâğıdın durumu belirler. Kâğıdın yıpranması, transformatörün kullanım süresinin bitmesine işaret etmektedir. Kullanılan kâğıdın işletme ömrü de transformatörde kullanılan yağın kalitesi ve işletme koşullarına bağlıdır. Kaliteli bir yağın kullanılması ile transformatörün işletme ömrü de olması gereken süre boyunca işletilebilir.

Transformatörlerin işletilmesi sırasında kullanılan yalıtkan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, işletme sıcaklığı ve oksijen miktarına bağlı olarak elektriksel yalıtımı zayıflar. Genellikle uygulamalarda yalıtkan, çeşitli zorlamalara maruz kalabilir. Özellikle elektriksel zorlanmalar dikkate alınmalıdır. Katı yalıtkanlardaki problemlerin ana kaynağı, imalat sırasında malzeme üzerinde oluşan hava boşluklarıdır. Elektrik alana maruz kalan yalıtkan malzemedeki hava boşlukları sebebiyle kısmi deşarj oluşur. Bu kısmi deşarjlar malzemenin bozulmasına neden olur ve sonunda yalıtkan tamamen delinebilir. Kısmi deşarj sadece bir bölgede oluşan bir olgu olmayıp aynı zamanda yalıtkanın yüzeyi boyunca da

görülebilmektedir. Yani, katı yalıtkan ve çevresindeki gaz ya da atmosfer arasındaki bölgelerde yüzeysel deşarj oluşur ve yalıtkan yüzeyindeki oluşan iletken yollar boyunca erozyon yani bozulmalar meydana gelebilir. Nem ya da pisliklerden kaynaklanan hareketli iyonların çok sayıda olması ile yalıtkanın delinme etkisi artmaktadır. Dielektriklerdeki elektriksel yaşlanma aynı zamanda hava boşluklarının miktarına da bağlıdır.

Isıl zorlanmalar ise diğer önemli bir zorlanma etkenidir. Transformatörlerde bulunan sargılardan geçen nominal yük akımı iletkende omik kayıplara yani joule kayıplarına sebebiyet verir. Bu sebepten dolayı sargılar üzerinde ısı oluşur. Yalıtkan yüzeyi boyunca oluşan ısının dağıtılması gerekmektedir. Isıl zorlanmalar sonucunda yalıtkan malzemenin tipine göre özelliği kötüye gidebilir. Bu etki aynı zamanda oksidasyon ve hidroliz gibi önemli kimyasal bozulma reaksiyonlarına neden olmaktadır. Geçici veya periyodik sıcaklık değişimleri aynı zamanda mekanik zorlanmalara da yol açabilir.

Bunun yanı sıra çevresel etkenler de önemli olabilmektedir. Genellikle çevresel etkenlere örnek olarak güneş ışınları, nem ve ortamı çevreleyen gazın basıncı, tipi vs. verilebilir. Bu sebeple iyi bir yerleşim bölgesi seçilmeli ve sağlam zemine monte edilmelidir. Böylece her türlü çevre koşullarına karşı alınması gereken tedbirler sayesinde olası zararlı etkilerin en düşük seviyede olması sağlanabilir.

Mekaniksel zorlanmalar da göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı mekaniksel zorlanmalar sonucu, örneğin iletkenlerin bükümü, titreşimi, ya da heterojen sistemlerdeki farklı ısıl genleşmeler ve yalıtkan malzemelerdeki mikroçatlaklar da oluşabilir. Sonuç olarak da kısmi deşarjlar ortaya çıkabilir. Bu da transformatörün sağlığı açısından büyük bir tehdit oluşturur.

Bahsedilen tüm zorlanmaların sinerjik etkisiyle yalıtkan malzemelerde yaşlanma gerçekleşir. Çeşitli zorlanmalara maruz kalan yalıtkanlarda her bir etkenin birlikte etki etmesine bağlı olarak yaşlanma hızlanabilir. Yaşlanma oranı, yaşlanma etkenlerinin belirli tip ya da kombinasyonlarına bağlıdır. Bu nedenle farklı yaşlanma koşulları altında yaşlanma sürecini gösteren bir model oluşturmak gerekmektedir.

Temelde güç transformatörünün servis ömrünü belirleyen unsur en sıcak bölgesinde bulunan kâğıt yalıtkanın fiziksel durumudur. Bilindiği üzere bu bölümdeki selülozik malzeme sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak yaşlanma sürecini tamamlayarak kullanım ömrünü tamamlar ve bu aynı zamanda transformatörün servis ömrünün de sonudur. Kâğıt malzemenin gerilme dayanımı %20 değerinin altına düştüğünde fiziksel ömrünü çok büyük oranda tamamladığı kabul edilir[4].

Malzemenin yaşlanmasını ısı etkenlere bağlı olarak saptamak için iki farklı yöntem 1930 – 40’lı yıllarda önerilmiş olup, günümüzde de halen kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi Montsinger’in kâğıt – yağ ilişkisi için özel olarak yaptığı ve deneysel sonuçlara dayanan en basit ampirik yaşlanma formülü $L = e^{-p\theta}$ şeklindedir. İkincisi ise Dakin – Arrhenius reaksiyon denklemi olarak bilinen ve tüm malzemeler için genelleştirilmiş yöntemlerdir[4]. Bu denklemlerden her ikisi de yaşlanma için en sıcak nokta değerini temel almaktadır. Arrhenius’a ait ifade Eşitlik (4.6)’da gösterilmiştir;

$$L = A e^{B/T} \quad (4.6)$$

Burada L saat olarak yalıtkan ömrünü, A ve B bağıl yaşlanma oranı ve yalıtkan cinsine bağlı sabitleri, T ise Kelvin cinsinden bağıl sıcaklığı ($273+^{\circ}C$) ifade etmektedir. Literatürde IEC standardı, Montsinger’in ampirik formülünü temele alır.

Dakin tarafından 1948 yılında deneysel olarak oluşturulan model, Simoni tarafından gözlenmiş yasa ters üst kanun olarak adlandırılmış bir modeldir. Bu model yalıtkanların ömür sürelerinin $t = C.E^{-n}$ olarak ifade edilmiştir [86]. Burada E elektrik alanına bağlı olduğu gösterilmektedir. Aynı zamanda C ve n deney koşullarının sabitleridir. Simoni’nin yapmış olduğu deney sonucunda elde ettiği değerlerin bir benzeri Kierstyzn tarafından da bulunmuştur [87]. Bu kanuna göre, $\log t - \log E$ çizimi düz bir çizgi olması gerekirken Aras ve arkadaşları ters üst kanununun uzun süreli yaşlanmalarda düz bir eğri olmadığını ve geçerli olmayacağını bildirmişlerdir [88]. Bahder ve arkadaşları da 1982 yılında yaptıkları deneyler sonucunda düşük elektrik alanlarında eğimin değişiminin gözlenmesinden, gerilimin eşik değeri altında ömür sonsuza yakın bir ömür gösterdiği sonucuna varmışlardır [89]. Yani gerilimin eşik değerine kadar ters orantılı bir şekilde

yaşlanma olduğu görülürken eşik değerinin altında ömrün sonsuza yakın olduğu belirlenmiştir.

1965 yılında Rus bilim adamı olan Zhurkov termodinamik yasalarından faydalanmıştır. Zhurkov, mekaniksel zorlanmaların sıcaklıkla birlikte uygulandığında yalıtıkanda daha düşük serbest enerji bariyerlerine neden olduğunu ve ısı reaksiyon sürecinin daha hızlı gelişmesine yol açtığını yani yaşlanmayı hızlandırdığını ortaya koymuştur [90].

$$t = C_1 \cdot e^{\left(\frac{\Delta H_M - \sigma M}{kT}\right)} \quad (4.7)$$

ΔH_M kırılma sürecinin aktivasyon enerjisi, C_1 ve σ yapıya bağlı sabit, M ise mekaniksel zorlamadır. Aynı zamanda bu model yapılan sonraki çalışmalarda başka polimerler içinde geçerliliğini kanıtlamıştır. Farklı sıcaklıklar altında polimer filimler için Bogirov ve arkadaşları ile yapılmış olup birçok dış etkenin aynı andaki etkisi altında polimer kompozitlerin yıpranması çalışmasını 1999 yılında Varol ve Mamedov yapmışlardır [91].

Katı yalıtkanların yaşlanma modelleri için kullanılan ve en yaygın olarak bilinen model Arrhenius modelidir. Bu model sıcaklık artışına bağlı olarak meydana gelen kimyasal reaksiyonların hızlanması nedeniyle oluşan ısı yaşlanma mekanizmasını açıklamaktadır. 1960 yılında Dakin ömür süresinin aşağıda verilen veriler ile orantılı olarak değiştiğini önerdi [88, 92, 93].

$$t = A \cdot e^{\left(\frac{E}{kT}\right)} \quad (4.8)$$

Burada, E sürecin aktivasyon enerjisi, A ayarlanabilir parametre, k Boltzman sabiti, T sıcaklıktır. Bu model, yalıtkanın delinmesinin E_0 başlangıç değeri üzerinde meydana gelen kısmi boşalmalar nedeniyle oluştuğunu, zarar verme oranının ise ısı aktivitesine bağlı olduğunu ve bu yüzden E aktivasyon enerjisi ile karakterize edilmesi gerektiğini savunmuştur. Ancak kısmi boşalmaların oluşabilmesi için elektrik alanın mevcudiyeti gereklidir ve bu modelde elektrik alan yer almadığından, bu model, yaşlanma mekanizmasını tam olarak açıklamakta eksik kalmaktadır. Böylece yeni modellerin oluşturulmasına sebebiyet verdi. Bir diğer yaşlanma için kullanılan diğer üstel model ise Eyring modelidir [93]. Buna göre ömür:

$$t = \frac{h}{k.T} \cdot e^{(\Delta G/kT)} \quad (4.9)$$

Burada h Planck sabiti, ΔG serbest aktivasyon enerjisi, k Boltzman sabiti ve T sıcaklığı ifade etmektedir. Bu model termodinamik esaslara dayanmaktadır ve öncekiler gibi ayarlanabilir her hangi bir parametre içermemektedir. Ancak ömür süresi ΔG serbest aktivasyon enerjisine bağlıdır ve $\Delta G = \Delta H - \Delta S$ olarak verilmektedir. Burada ΔH aktivasyon entalpisi, ΔS ise aktivasyon entropisini göstermektedir. Kimyasal olarak bu sürecin tespiti ve ömür süresinin sağlıklı bir şekilde tahmin edilmesi oldukça zordur.

Bu nedenle, katı yalıtkanların elektrik ve ısıl zorlanma altında yaşlanma mekanizmasını açıklayan ve Zhurkov Modeline dayanan aşağıdaki model ortaya konmuştur ve modelin parametreleri fiziksel anlam taşımaktadır ve deneyle kolayca belirlenmektedir [38].

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - \chi E}{kT} \quad (2.30)$$

U_0 : Aktivasyon enerjisi ($E=0$), τ_0 : Malzemenin molekülerinin ters titreşim frekansı (s), χ : Yapısal parametre, k: Boltzman sabiti, T: Sıcaklık($^{\circ}K$) olarak ifade edilmektedir.

5. DENEYSEL UYGULAMA VE SONUÇLARIN ANALİZİ

Transformatörler işletme sırasında birçok etkiye maruz kalmaktadırlar. Bu etkiler; sıcaklık, elektrik, nem, mekanik, kimyasal vb. olarak sayılabilir. Çok sayıda etki olmasına karşın esas itibariyle sıcaklık ve elektrik burada en etkili olanlarıdır. Transformatörlerde izin verilebilir maksimum işletim sıcaklığı genellikle çok önemlidir. Yeterince ön çalışmanın yapılmadığı ve maksimum kapasitesine yakın değerlerde işletilen transformatörlerde, artan talebi karşılayamama nedeniyle bu sınır değer aşılabilmektedir. Bunun fark edilememesi veya göz ardı edilmesi kablo ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Çünkü en sıcak noktadaki ısıl etkileşim yaşlanma sürecini daha da hızlandırmaktadır ve transformatör beklenenden daha kısa sürede devre dışı kalmaktadır.

Kullanılan kâğıt yalıtkanın yağ içerisinde zamanla birçok etki altında yaşlanması kaçınılmaz bir süreçtir. Bu süreci tanımlamak ve yaşlanma mekanizmasını belirlemek amacıyla bazı deneysel uygulamalar standartlar kapsamında yapılmış ve elde edilen sonuçları analiz edilmiştir.

5.1. Numunelerin Hazırlanması

Günümüzde, transformatörlerde yalıtkan olarak kâğıt kullanılmaktadır. Yaşlanma deneylerinde kullanılmak üzere, şekil 5.1'deki resimde görülen, 0,2mmx1280mm'lik PSP3055 transformer presspaper AREVA firmasınca sağlanmıştır. Bu malzemeden 8–10 cm ebadında yuvarlak numuneler kesilmek suretiyle deneylerde kullanılacak kâğıt numuneler elde edilmiştir. Numunelerin IEC 641–2 yapılan nem içeriği %8'dir. Deney düzeneği 100kV'luk bir gerilim kaynağı ve bunu kontrol eden donanımlardan oluşmaktadır. Yaşlanma hücresi, 30cmX30cm ebatlarında galvanizli saçtan yapılmış, sıcaklık ve basınç kontrollü bir hücre içerisinde ASTM D149 ve IEC 641–2 standartlarına uygun elektrot sistem içermektedir. Elektrotlar değiştirilebilir ve ayarlanabilir durumdadır [94, 95]. Numune elektrotlar arasına yerleştirildikten sonra, yağ içerisinde ısıl ve elektriksel zorlanma uygulanmaktadır. Gerilim istenilen hızda (2kV/s) motor kontrollü bir varyak ile uygulanmaktadır.



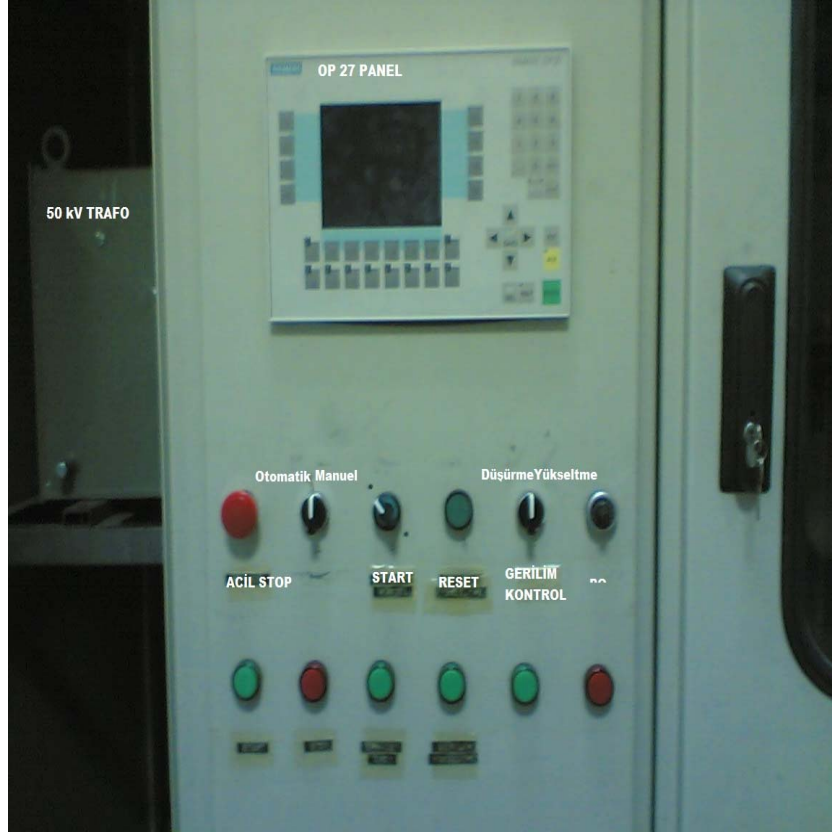
Şekil 5.1. Kullanılan yağ ve kağıt numuneler

Şekil 5.2’de yaşlanma deneylerinin yapılabilmesi için kullanılan yaşlanma hücresi görülmektedir.

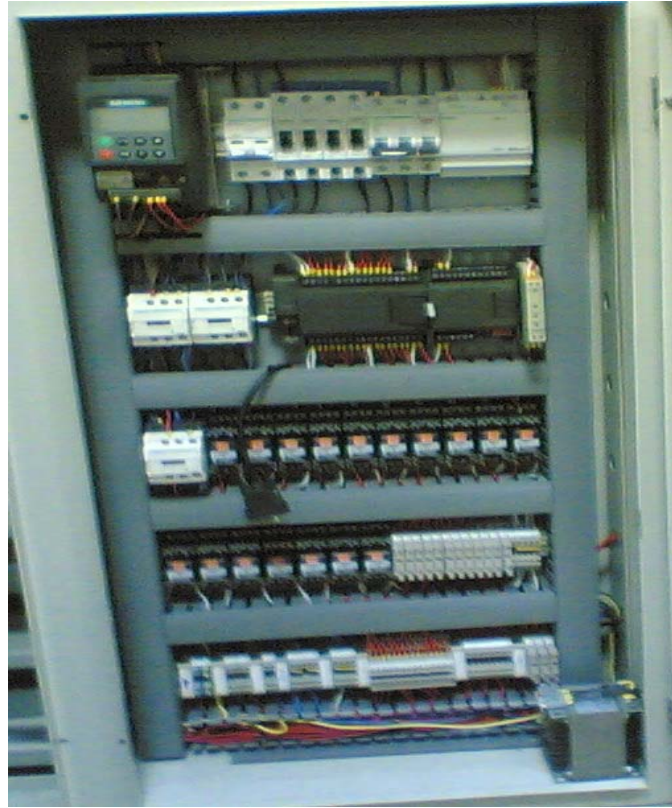


Şekil 5.2. Yaşlanma hücresi

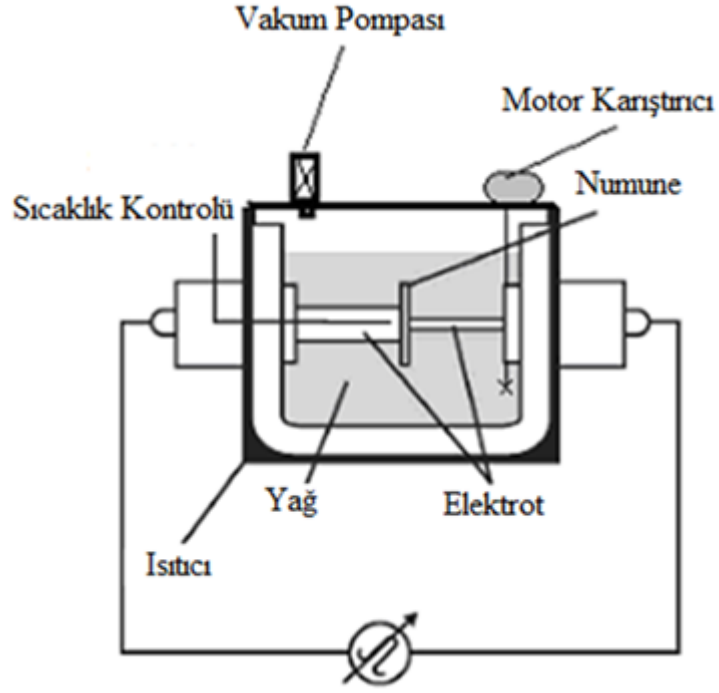
Bu tez çalışmasında kullanılan 50kV’luk yaşlanma hücre sisteminin otomatik ve manuel kontrolü Şekil 5.3 ve 5.4’te görülmektedir.



Şekil 5.3. Kontrol panelinin ön görünüşü



Şekil 5.4. 50kV'luk yaşlanma hücre sisteminin kumanda paneli



Şekil 5.5. 50kV'luk Yaşlanma hücresi

Elektrik alan ve sıcaklıkla hızlandırılmış çok sayıda test yapılma zorunluluğu nedeniyle yaşlanma süreleri en fazla birkaç haftadır. Ancak numuneler üzerinde uzun süreli ısıl etkileri araştırmak amacıyla iki adet deney fırını Şekil 5.6'daki gibi laboratuvar ortamında tesisi edilerek 2000 saatlik numuneler analiz için hazırlanmıştır. Bu amaçla numuneler 100°C ve 140°C de ayarlanmış fırınlarda aşağıdaki ısıl yaşlanma etkilerine maruz bırakılmışlardır;

- Kâğıt numune mineral yağ içerisinde 100°C 2000 saat
- Kâğıt numune doğal ester yağ içerisinde 100°C 2000 saat
- Kâğıt numune mineral yağ içerisinde 140°C 2000 saat
- Kâğıt numune doğal ester yağ içerisinde 140°C 2000 saat



Şekil 5.6. Kâğıt numunelerin ısıl yaşlanma amaçlı hazırlanması

Bu sıcaklık değerleri uluslararası standartlar ve yaptığımız simülasyon çalışmaları sonucunda karar verilmiş değerlerdir [96]. IEC 60076 da sıcaklık etkisi altındaki transformatörlerin sargıları arasındaki yalıtkanların yaşlanmaya başladığı en sıcak nokta değeri 98°C 'dir. Diğer bir ifadeyle 20°C 'lik soğutma sıcaklığı ile sürekli yük altındaki çalışmada oluşan bir değer olmasıdır. Sargının “sıcak nokta değeri” veya “en sıcak nokta değeri” IEC 60076’ de belirlenmiştir. A sınıfı yalıtkan malzemeler için en yüksek izin verilebilir işletme sıcaklığı 115°C ’ dir. Uygulamalı zorluklar karşısında olduğu gibi transformatörlerde ortaya çıkan bu sıcaklığın kontrol sınırı, hiç hesaplama yöntemlerine gerek kalmadan standartlar vasıtasıyla belirlenmesi önerilmektedir. Kısa süreli aşırı yüklenmelerde, IEC 60354’e göre 140°C en yüksek sıcak nokta değeri olarak belirlenmektedir.

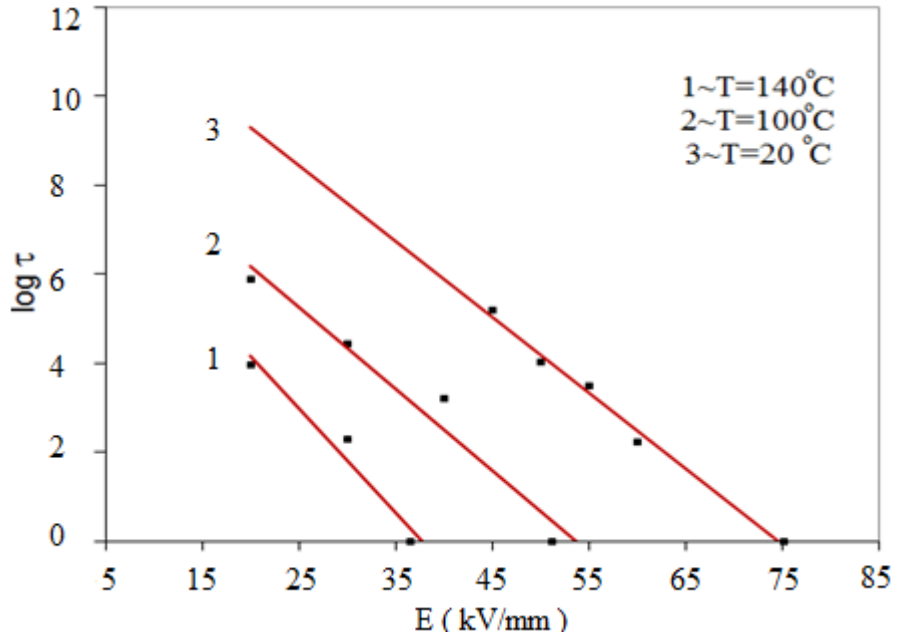
5.2. Deneyin Yapılışı ve Elde Edilen Sonuçlar

5.2.1. Elektriksel ve ısı stres altında yaşlanma

Deneyle, Şekil 5.1’de görülen deney düzeneği kullanılarak ve 0,2mm kalınlığındaki kâğıt örnekler üzerinde yapılmıştır. İlk olarak, 20°C oda sıcaklığında örnekler üzerinde ani delinme süreci incelenmekte ve sonra ani delinme değerinden daha küçük elektrik gerilimlerindeki kısa süreli hızlandırılmış yaşlanma süreçleri incelenmektedir. Gerek ani delinme için gerekse diğer testlerin her birinde en az 5 adet deney yapılarak bunların ortalaması tek bir değer (nokta) olarak alınmaktadır. Benzer işlemler diğer sıcaklık değerleri (100°C, 140°C) için de tekrar edilmektedir. Bu süreç mineral ve doğal ester yağ ortamı için iki kez tekrarlanmaktadır. Bu nedenle süreç oldukça uzamaktadır.

Tablo 5.1. Mineral yağdaki yaşlanma ömür süreleri

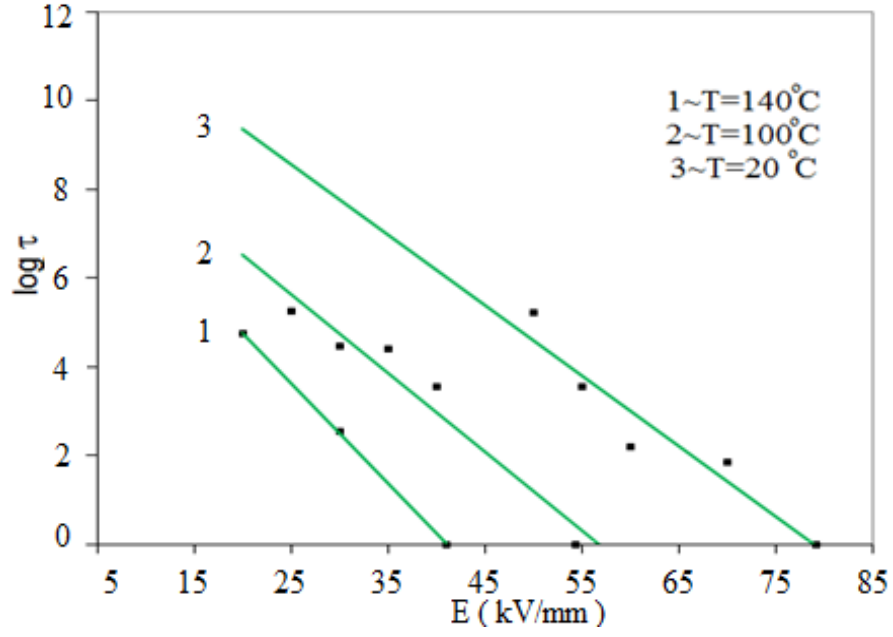
Mineral Oil	Log τ		
	293 °K	373 °K	413 °K
E (kV/mm)			
20		5,88	3,96
25			
30		4,43	2,29
35			
40		3,2	
45	5,19		
50	4,02		
55	3,48		
60	2,21		
Ed	75,2	51,2	36,53
kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm



Şekil 5.7. 20°C, 100°C ve 140°C mineral yağ ortamında kâğıdın yaşlanması

Tablo 5.2. Doğal ester yağdaki yaşlanma ömür süreleri

Doğal Ester	Log τ			
	E(kV/mm)	293 °K	373 °K	413 °K
20				4,75
25			5,23	
30			4,47	2,55
35			4,38	
40			3,54	
45				
50	5,22			
55	3,55			
60	2,2			
70	1,84			
Ed	79,23	54,41	41,1	
kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	



Şekil 5.8. 20°C, 100°C ve 140°C doğal ester yağ ortamında kâğıdın yaşlanması

Elde edilen sonuçlardan, yaşam ömrü τ 'nın sıcaklığa bağlılığının literatürde de verildiği gibi üstel (exponansiyel) karakterde olduğu bir kez daha kanıtlanmaktadır.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'den görülebileceği gibi, mineral yağda ve doğal ester yağda kâğıdın delinme dayanımları birbirine çok yakındır. Doğal ester yağın delinme dayanımı daha yüksek olmasına rağmen, mineral yağda delinme dayanımlarında bariz kaymalar görülmektedir. Bunun anlamı, gerçek delinme dayanımının ölçülen delinme dayanımlarından daha büyük olması gerektiğidir. Aynı zamanda, düşük elektrik alanlarda ve uzun süreli yaşlanmalarda ömür eğrisinin eğimleri belirgin şekilde değişmektedir. Düşük alan uygulamalarında doğal ester yağda kâğıt yalıtkanın yaşlanma süreci mineral yağa göre daha da uzamaktadır.

Diğer taraftan, 100°C ve 140°C'lik fırın ortamında yapılan ısı yaşlandırma sonucunda aşağıdaki testler yapılarak, sonuçlar Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te verilmektedir. Yine aynı numuneler üzerinde FTIR (Fourier Transform InfraRed Spectroscopy) ve SEM (Scanning Electron Microscope) analizleri incelenmiş olup değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

Tablo 5.3. IEC 60422 standardına göre 2000 saat süresince 100°C sıcaklıkta içerisinde kâğıt tutulmuş yağların analiz sonuçları

Karakteristikler	Test Metodları	Birimler	Mineral yağ	Doğal ester
Tan δ (DDF) 90°C	IEC 60247	Sayısal	0,00691	0,064
Dielektrik Delinme Gerilimi	IEC 60156	kV	76,5	68,3
Su İçeriği	IEC 60814	ppm	3,4	110
Renk Numarası	ISO 2049	-	0,5	1,5
Asidite	IEC 62021-1	mgKOH/g oil	0,1285	0,1776
Yüzey Gerilimi (IFT) 25°C	ISO 6295	mN/m	32,7	17,7

Tablo 5.4. IEC 60422 standardına göre 2000 saat süresince 140°C sıcaklıkta içerisinde kâğıt tutulmuş yağların analiz sonuçları

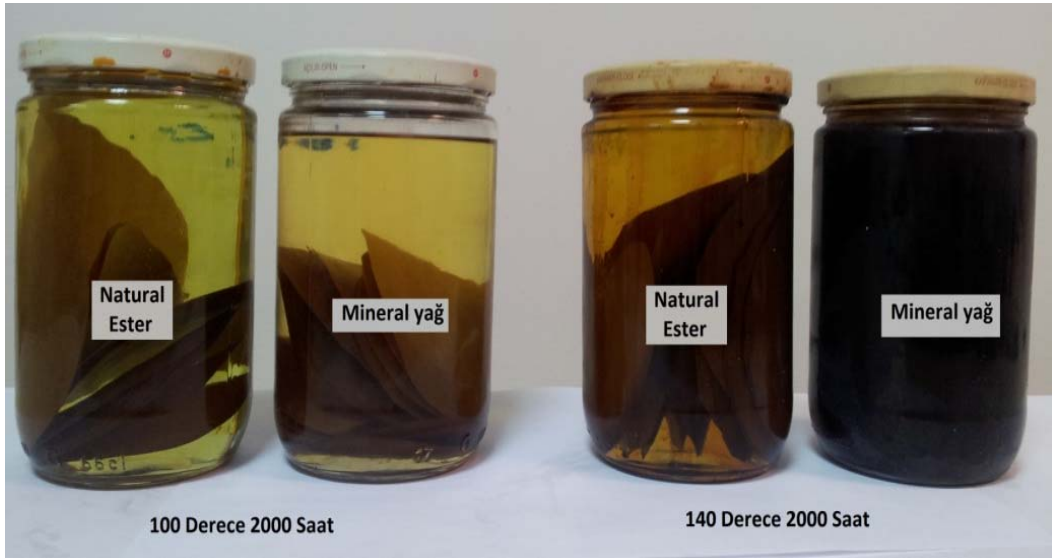
Karakteristikler	Test Metodları	Birimler	Mineral yağ	Doğal ester
Tan δ (DDF) 90°C	IEC 60247	Sayısal	0,1461	0,961
Dielektrik Delinme Gerilimi	IEC 60156	kV	71	49,5
Su İçeriği	IEC 60814	ppm	10,8	106,4
Renk Numarası	ISO 2049	-	8	2,5
Asidite	IEC 62021-1	mgKOH/g oil	0,2428	0,2685
Yüzey Gerilimi (IFT) 25°C	ISO 6295	mN/m	-	17,5

Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'ün incelenmesinden;

- Dielektrik kayıp faktörü tandelta, mineral yağa göre doğal ester yağda daha yüksek gerçekleşmiştir. Ancak 100°C'ye göre 140°C'de mineral yağ için 21 kat artarken doğal ester yağ için 15 kat bir artış söz konusudur. Bu durum oksidasyonun artışı ve polar kirlenmenin başladığını ifade etmektedir.
- Dielektrik dayanımı doğal ester yağın mineral yağa göre düşük, su içeriği ise oldukça yüksektir. Bu durum doğal ester yağ için bir dezavantaj gibi görünse de, esas itibariyle kâğıt yalıtkanın durumu göz önüne alındığında bu bir üstünlüktür. Çünkü doğal ester yağ, kâğıttaki nemi kendi bünyesine çekmekte ve muhafaza etmektedir. Böylelikle su içeriği yükselirken delinme dayanımı azalmaktadır.
- Doğal ester yağın asidite miktarı mineral yağa göre daha yüksektir. Bu durum su miktarı ve güç faktörünün büyük olması ile de tutarlıdır. Ancak artış oranları

100°C'ye göre 140°C'de mineral yağ için 2 kat olarak gerçekleşirken, doğal ester yağdaki asit artış oranı 1,5 kat olarak gerçekleşmiştir.

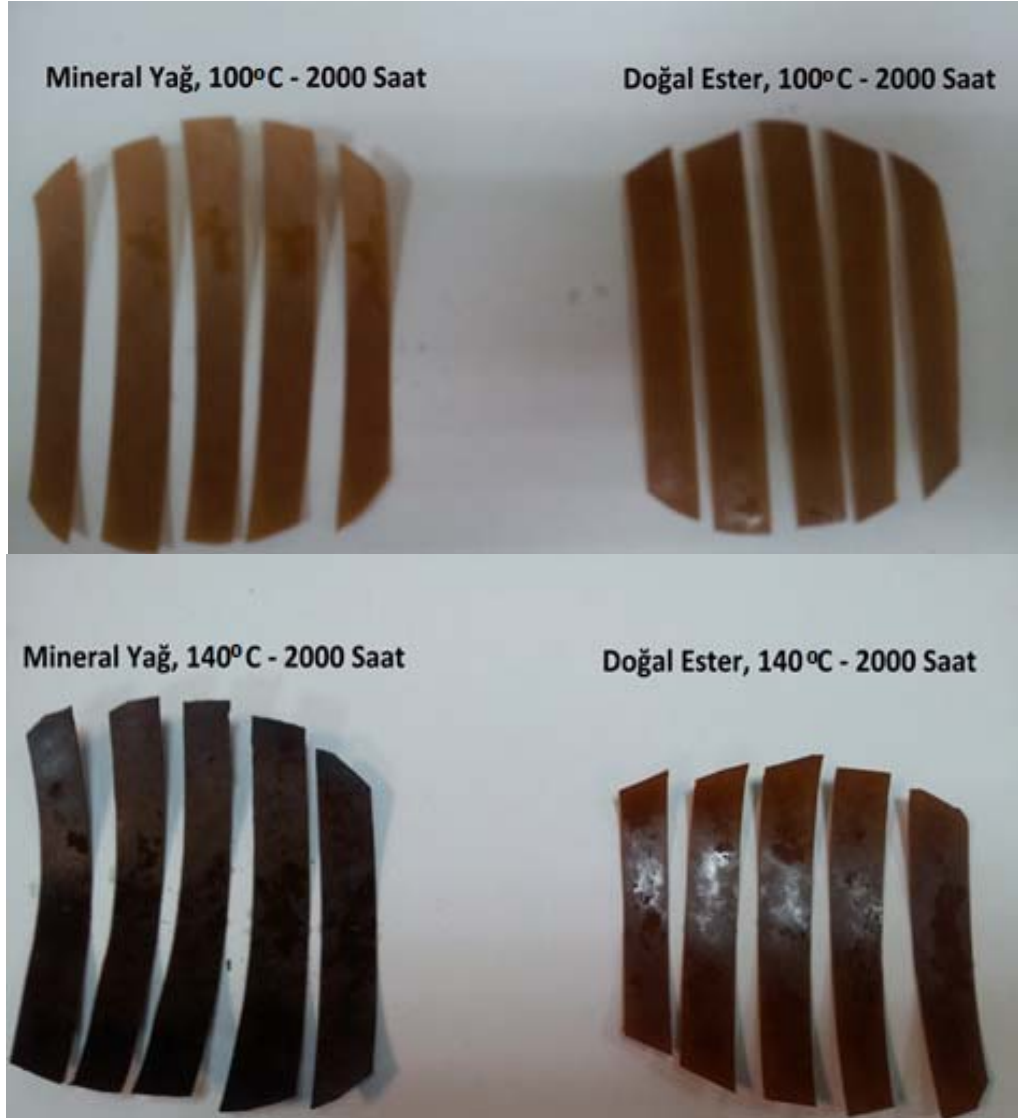
- Renk durumları, 100°C'den 140°C'ye doğal ester yağın renk değişimi 1,5 dan 2,5'a çıkarken mineral yağın 0,5 den 8 kademesine ulaşmıştır. Doğal ester yağın çok iyi durumda olduğu görülebilir. Ancak 2,5 aşırı suyun olduğunu ifade etmektedir. Zaten bunu doğrulayıcı bir su içeriği değeri analizlerde çıkmıştır. Mineral yağın renk durumu oldukça kötüdür ve çok fazla partiküllerin kâğıttan koptuğu, yüksek ısıya bağlı karbonlaşmanın etkisiyle karardığı ve kâğıdın bozulduğunu niteleyen önemli göstergedir.
- Bu durum numuneler fırından çıkarıldıktan sonra deney kapları ve kâğıt numunelerin resimlerinin gözlenmesinden de aşağıdaki gibi Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'dan rahatlıkla görülebilmektedir.



Şekil 5.9. 2000 saat süresince 100°C ve 140°C'de yaşlanmış numuneler



Şekil 5.10. 2000 saat süresince 100°C ve 140°C’de yaşlanmış kâğıt numuneler



Şekil 5.11. 2000 saat süresince 100°C ve 140°C’de yaşlanmış kâğıt numuneler

Tablo 5.5. 2000 saat 100°C’de Mineral yağ ve doğal ester yağın gaz analizi

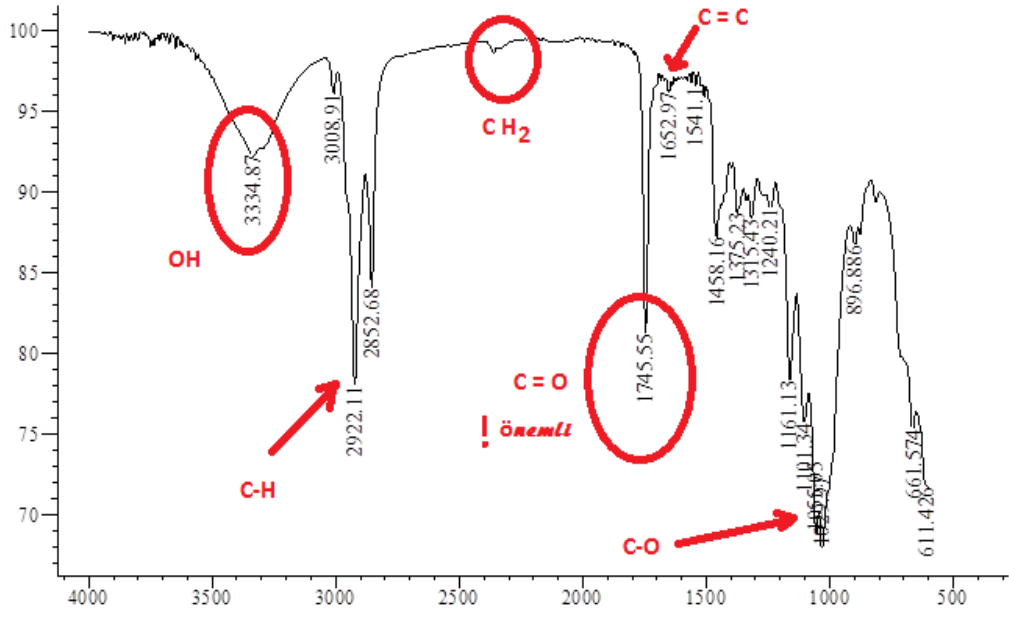
Gazlar		Mineral yağ (2000h -100°C)	Doğal ester (2000h-100°C)
H ₂	Hidrojen	0 (ppm)	9 (ppm)
CH ₄	Metan	4 (ppm)	9 (ppm)
CO	Karbon-monoksit	250 (ppm)	124 (ppm)
CO ₂	Karbon-dioksit	0 (ppm)	5914 (ppm)
C ₂ H ₄	Etilen	0 (ppm)	0 (ppm)
C ₂ H ₆	Etan	0 (ppm)	728 (ppm)
C ₂ H ₂	Asetilen	0 (ppm)	0 (ppm)

Tablo 5.6. 2000 saat 140°C’de Mineral yağ ve doğal ester yağın gaz analizi

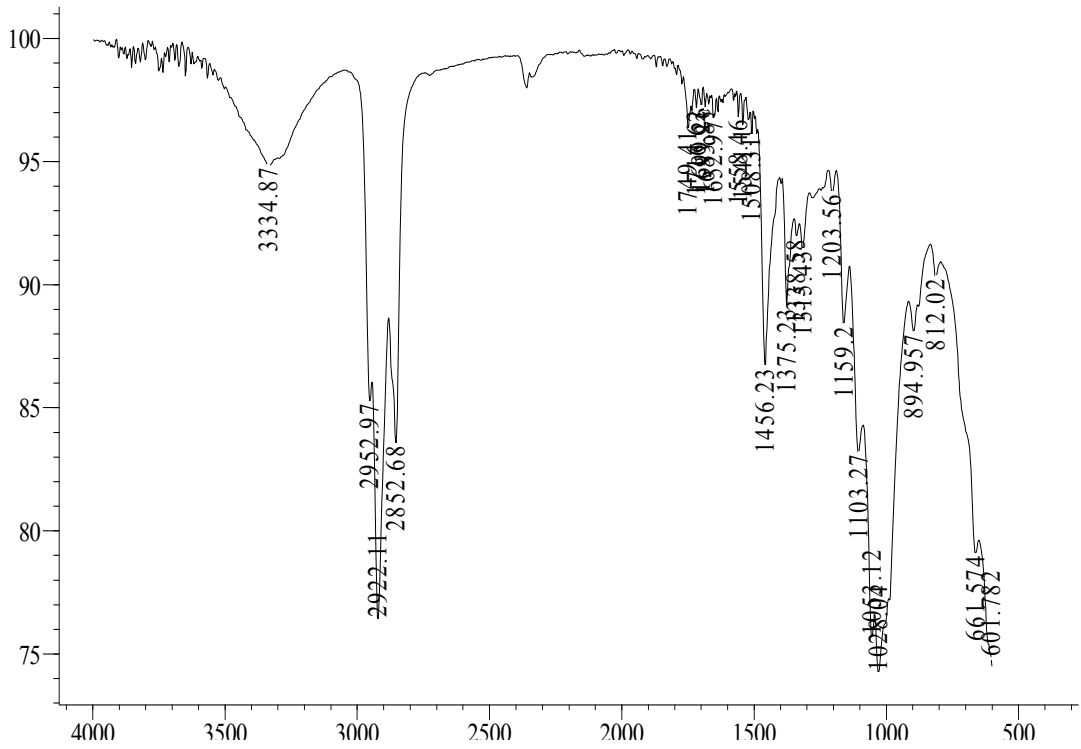
Gazlar		Mineral yağ (2000h -140°C)	Doğal ester (2000h-140°C)
H ₂	Hidrojen	10 (ppm)	429 (ppm)
CH ₄	Metan	22 (ppm)	125 (ppm)
CO	Karbon-monoksit	390 (ppm)	1730 (ppm)
CO ₂	Karbon-dioksit	0 (ppm)	23809 (ppm)
C ₂ H ₄	Etilen	0 (ppm)	0 (ppm)
C ₂ H ₆	Etan	0 (ppm)	1062 (ppm)
C ₂ H ₂	Asetilen	0 (ppm)	0 (ppm)

Tablo 5.5 ve tablo 5.6’da gösterilen her iki yağ numunelerinde yapılan çözünmüş gaz analizi sonuçlarına bakıldığında farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır.

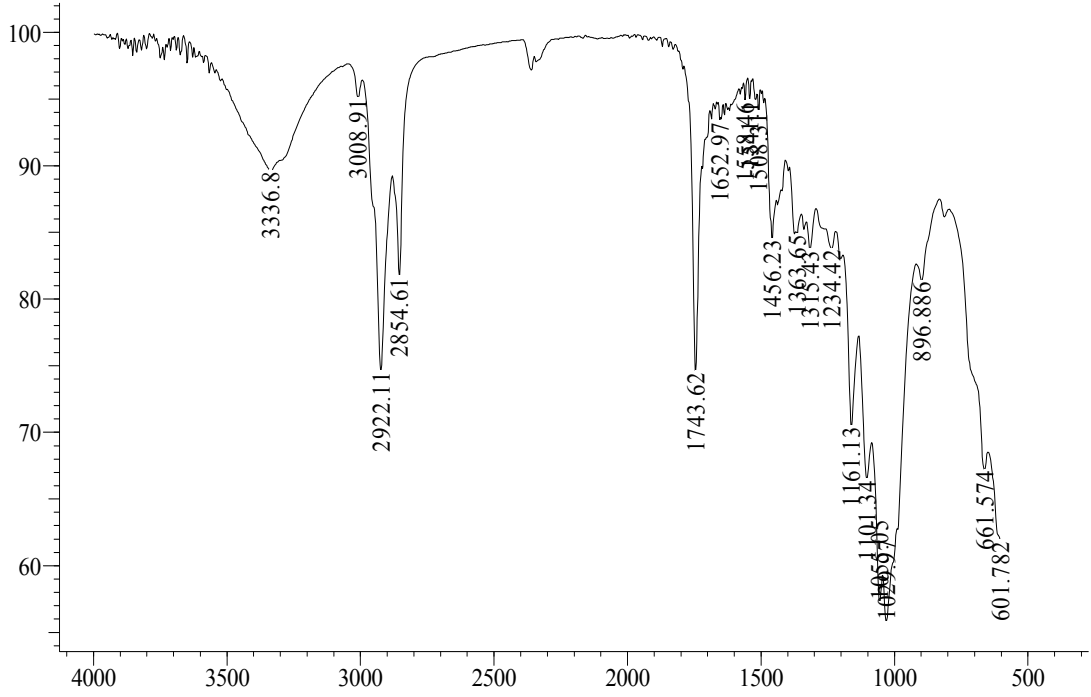
Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da görülen 100°C ve 140°C’de mineral yağ ve doğal ester yağ içerisinde 2000 saatlik yaşlanmış dört adet numune üzerinde FTIR (Fourier Transform InfraRed Spectroscopy) incelemeleri yapılmış olup Şekil 5.11-5.14’de sunulmuştur.



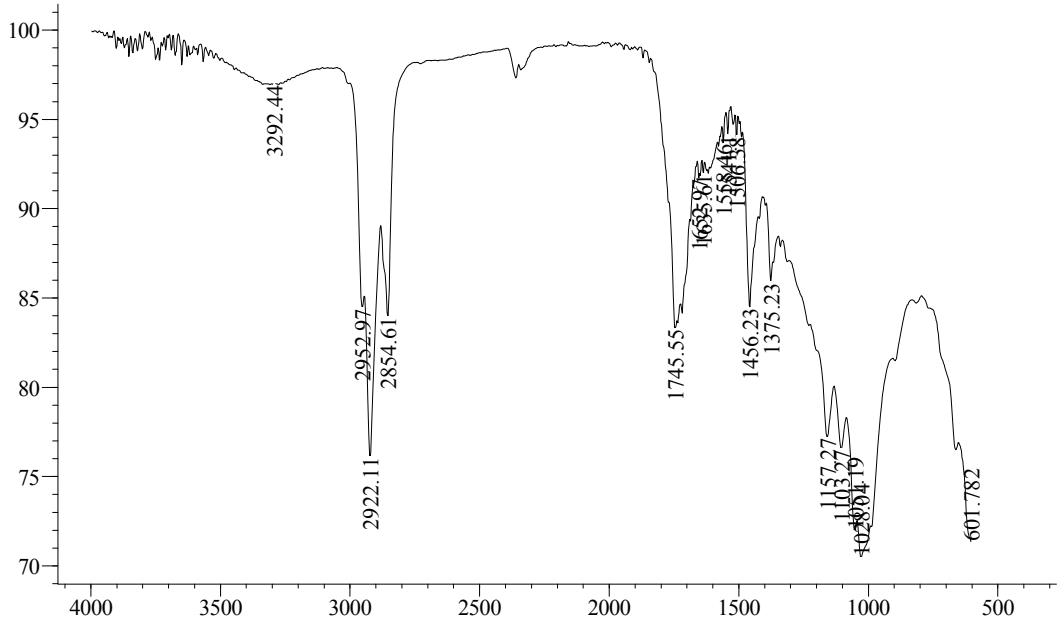
Şekil 5.12. FTIR 100°C’ de mineral yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune



Şekil 5.13. FTIR 100°C’ de doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune



Şekil 5.14. FTIR 140°C’ de mineral yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune



Şekil 5.15. FTIR 140°C’ de doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numune

Şekil 5.11, 5.12, 5.13 ve Şekil 5.14’ün karşılaştırmalı FTIR (Fourier Transform InfraRed Spectroscopy) analizlerinden;

- 3300 cm^{-1} OH pikleri oluştuğu görülmektedir. 100°C’de mineral yağda yaşlanmış kâğıt numunede oluşan OH pikinin şiddeti doğal ester yağda yaşlanmış

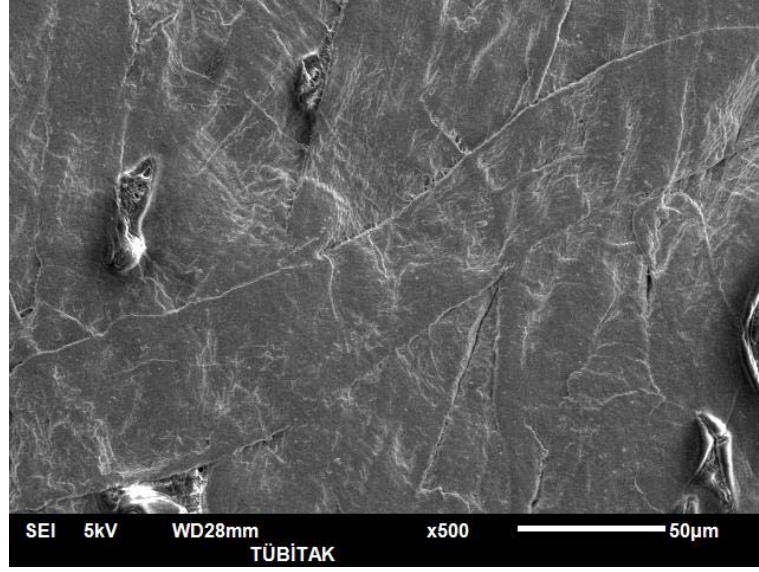
numuneye göre %3 daha fazla olduğu görülmektedir. 140°C’de ise bu fazlalık artmış ve oran %7 ye çıkmıştır.

- 100°C’de mineral yağda yaşlanmış kâğıt numunede 3008 cm^{-1} = CH gerilim pikleri oluşken, kısmi deşarjların oluşumunun bir sonucu olan bu pikin doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numunede oluşmadığı görülmektedir. Benzer durum 140°C için de geçerli olduğu görülmektedir.
- Yine her iki sıcaklıkta ve her iki numunede 2900 civarı meydana gelen Alkan yapısındaki C – H gerilmelerinin benzer olduğu görülmektedir.
- CO₂ oluşumunu gösterir 2300 cm^{-1} pikinin 100°C’de doğal ester yağda yaşlanmış numunede 2000 saat sonunda çok az oluşurken, 100°C’de mineral yağda yaşlanmış kâğıt numunede oluştuğu, yine 140°C’de her iki numunede de oluştuğu görülmektedir.
- Yaşlanma için çok önemli bir gösterge olan ve oksidatif bozulmaya işaret eden karbonil grubunun C = O gerilim titreşimleri, 100°C’de doğal ester yağda yaşlanmış numunede oluşmazken, mineral yağda yaşlanmış kâğıt numunede belirgin olduğu görülmektedir. 140°C’de ise, hem doğal ester yağdaki yaşlanmış numunede hem de mineral yağda yaşlanmış kâğıt numunede belirgin olduğu görülmektedir. Bu pikin şiddeti, doğal ester yağa göre mineral yağda yaşlanmış numunede %8 daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun anlamı 140°C’deki analizlerde polimer zincirde önemli kopmaların meydana geldiği görülmektedir.
- 1600 cm^{-1} civarı aromatik veya alifatik yapıda olabilecek C = C titreşimlerinin meydana geldiği görülmektedir.
- 1100 cm^{-1} civarında meydana gelen karbon oksijen tek bağı C – O eterik titreşim gerilimleri meydana gelmiş ve her iki sıcaklıkta mineral yağdaki numunede, doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış numuneye göre %5 daha fazla gerçekleşmiştir.

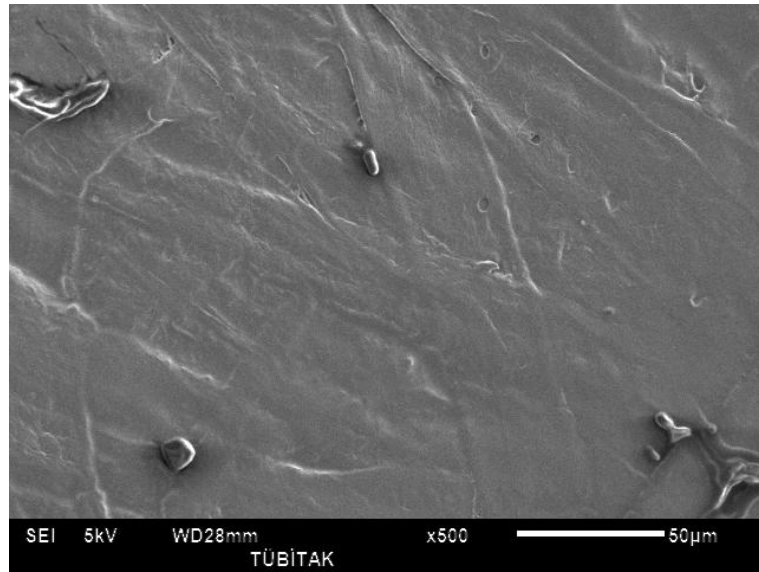
5.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM – Scanning Electron Microscope) yapısal görüntü analizleri

TUBİTAK' ta gerçekleştirilen SEM görüntü analizleri aşağıdaki gibidir.

- Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da 100°C'de mineral ve doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numunelerinde yapısal bozulma izlenmemekte, doğal estere göre hafif kararma (karbonlaşma) görülmektedir.

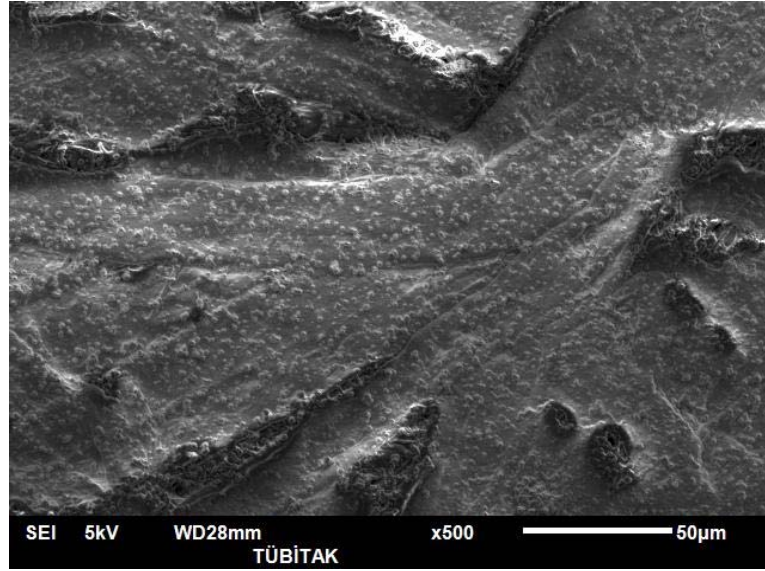


Şekil 5.16. 100°C' de 2000 saat mineral yağda yaşlanmış kâğıt numune

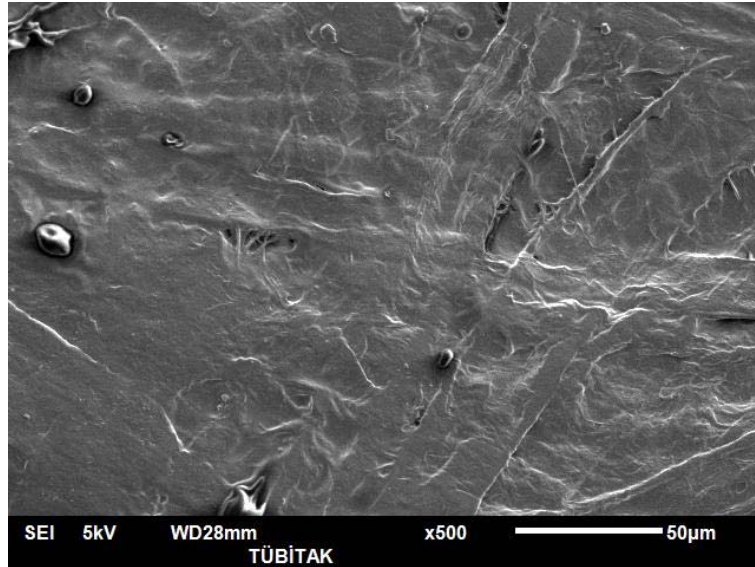


Şekil 5.17. 100°C' de 2000 saat doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numune

- 140°C’ de mineral ve doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numunelerin karşılaştırılmasında Şekil 5.17’de, mineral yağda yaşlanmış numunede oksidasyona bağlı yapısal bozulma ve karbonlaşma belirgin olarak görülürken, Şekil 5.18’de doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numunede ise yapısal bozulma izlenmemektedir.



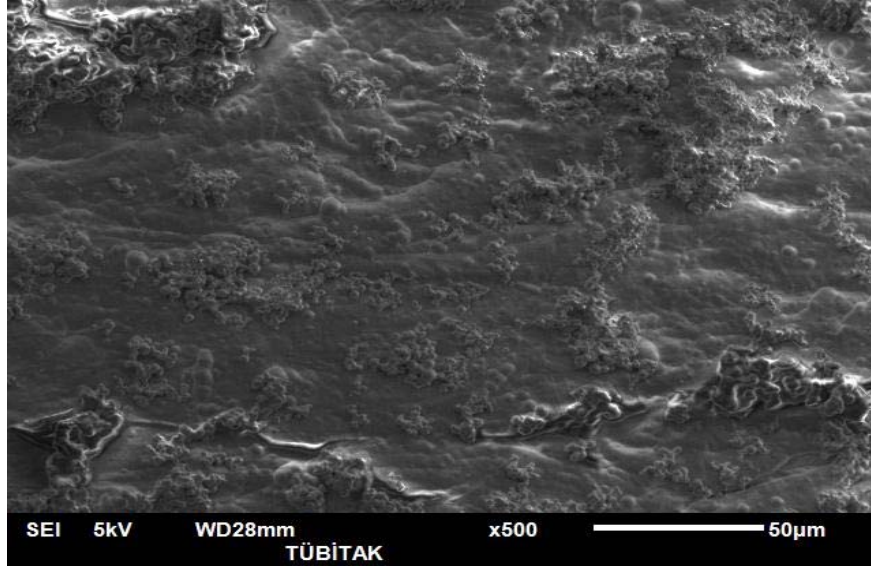
Şekil 5.18. 140°C’ de 2000 saat mineral yağda yaşlanmış kâğıt numune



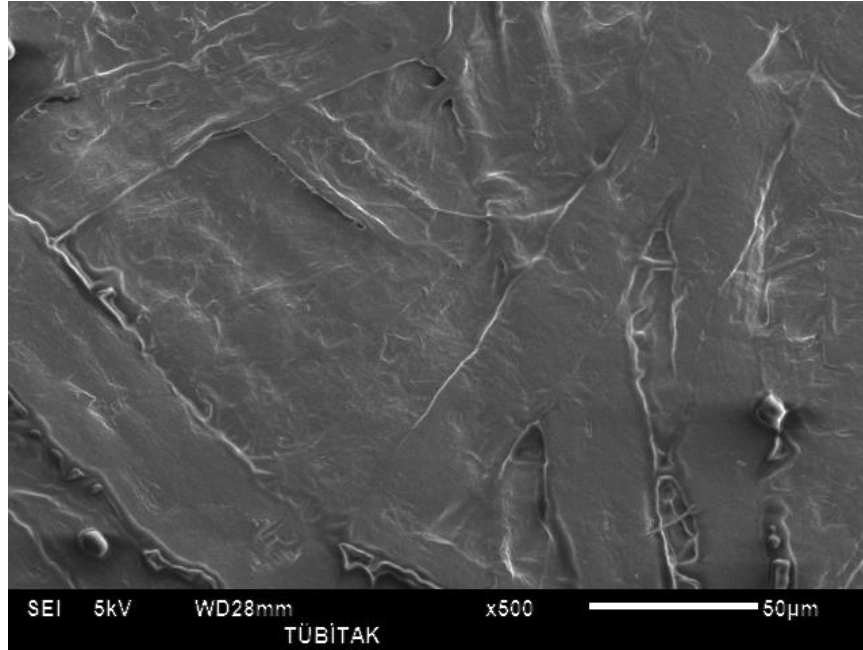
Şekil 5.19. 140°C’ de 2000 saat doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numune

- 140°C’de mineral ve doğal ester yağda 3000 saatlik yaşlanmış kâğıt numuneler üzerinde yapılan SEM görüntüleme analizinde, Şekil 5.19’da, mineral

yağda yaşlanmış numunede hızlı oksidasyona bağlı yapısal bozulmanın arttığı ve FTIR çakimlerini teyit eden karbonlaşmanın (C = C titreşimlerinin) meydana geldiği görülmektedir. Buna karşın Şekil 5.20’de doğal ester yağda 3000 saatlik yaşlanmış numunede sadece hafif renk değıştirme izlenmesine rağmen yapısal bozulma izlenmemektedir.

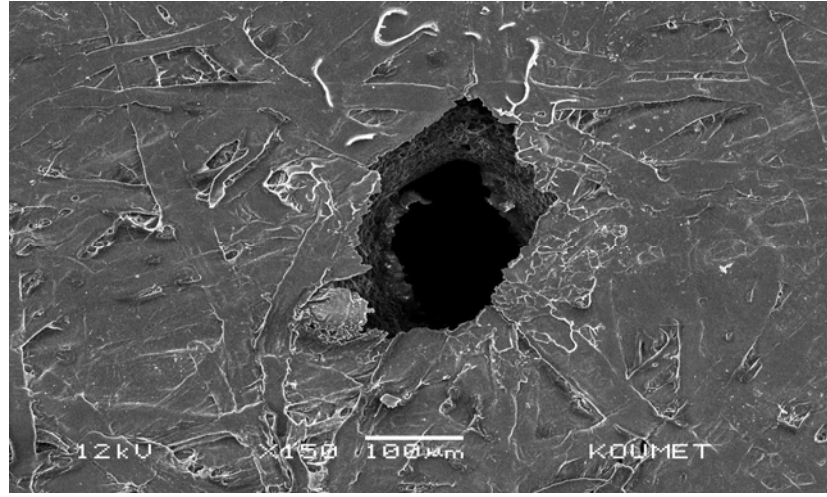


Şekil 5.20. 140°C’ de 3000 saat mineral yağda yaşlanmış kâğıt numune

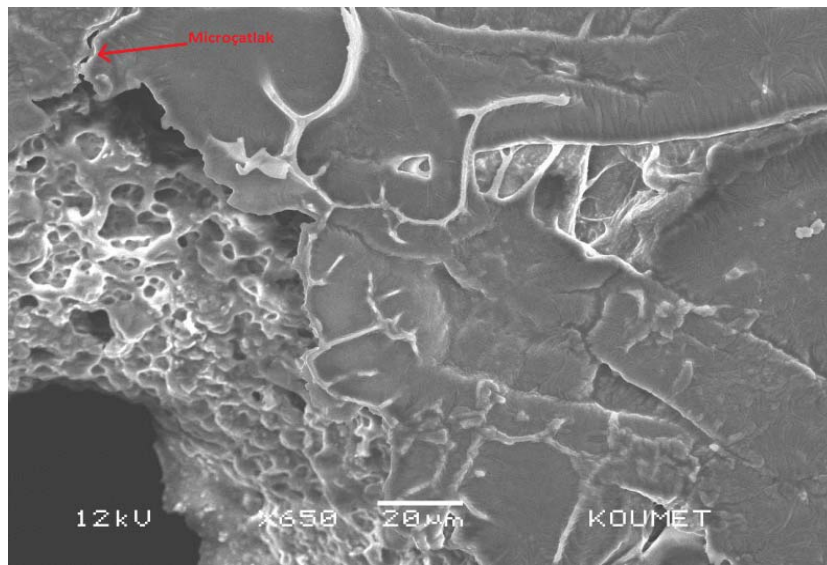


Şekil 5.21. 140°C’ de 3000 saat doğal ester yağda yaşlanmış kâğıt numune

Elektrik alan ve ısı zorlanma uygulanan numunede meydana gelen delinme sonucunda oluşan yapısal değişimi gözlemek amacıyla çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilmektedir. 120°C’ de ısı zorlanma ve 20kV/mm elektriksel zorlanma altında 384 saat sonucunda delinmiş kâğıt numunenin incelenmesinden, yapısal bozulma meydana gelmeden delinmenin olduğu görülmektedir. Bunun anlamı yapıda oluşan mikro çatlaklarda meydana gelen kısmi boşalmaların delinme ile sonuçlanması olabilir. Bunun kanıtını aramak için yapının daha fazla büyütülmüş halinin yer aldığı Şekil 5.22’de mikro çatlak açıkça görülmektedir.



Şekil 5.22. 120°C’ de ısı zorlanma ve 20kV/mm elektrik zorlanma altında 384 saat sonucunda delinmiş kâğıt numune



Şekil 5.23. 120°C’ de ısı zorlanma ve 20kV/mm elektriksel zorlanma altında 384 saat sonucunda delinmiş kâğıt numune

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güç transformatörlerinde, son yıllarda doğal esterlerin çevreci özelliklerinden dolayı kullanım oranının arttığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında güç transformatörlerinde ana yalıtım materyali olarak kullanılan kâğıt (Kraft-paper), mineral yağ ve doğal esterler içerisinde kimyasal, fiziksel ve elektriksel olarak ve karşılaştırmalı şekilde birçok teste tabi tutulmuşlardır. Kullanılan sıvı yalıtım materyalleri de çeşitli test ve yöntemlerle izlenmiştir. Farklı sıcaklık değerlerinde, farklı elektriksel potansiyeller altında ve farklı zaman ölçeklerinde bu testler (Dielektrik dayanım, SEM, FTIR, tan δ , asidite, renk, DGA vb.) tekrarlanmıştır.

Ana yalıtkan malzemesinin yaşlanmasında en önemli faktör sıcaklık parametresidir. Doğal ester yağ kullanılan transformatörde ısı transferi açısından bir dezavantaj ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi viskozite değerinin diğer yağ cinslerine oranla oldukça yüksek oluşudur. Ancak bu olumsuzluğa rağmen doğal esterlerin önceki bölümlerde açıklanan pozitif özellikleri daha fazladır.

Yaşlanma esas itibariyle meydana gelen kısmi boşalmalar nedeniyle oluşmakta, zarar verme süresi ise ısıl aktivitesine bağlı olarak değişmektedir. Kısmi boşalmalar sonucunda oluşan mikro çatlaklar yapısal ve kimyasal değişimlerden kaynaklanmaktadır. Bunu hızlandıran etki ısıl etkidir ve moleküler zincirin uzunluğunu karakterize etmektedir. Yani yaşlanan yalıtkanın kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişim ile bu zincirin kısalması yalıtkanın yaşlanmasında en önemli karakteristik değişikliktir.

- Yapılan testler sonucunda elde edilen verilerin analizinden, yaşlanmayı hızlandıran etkilerin mineral yağda doğal estere göre daha fazla oluştuğu ve bunun özellikle yüksek sıcaklıklarda daha da belirginleştiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Elde edilen sonuçlardan, yaşam ömrü τ 'nın sıcaklığa bağlılığının literatürde de verildiği gibi üstel (exponansiyel) karakterde olduğu bir kez daha kanıtlanmaktadır. Mineral yağ ve doğal esterde kâğıdın delinme dayanımları birbirine çok yakındır.

Düşük alan uygulamalarında doğal esterde kâğıt yalıtkanın yaşlanma süreci mineral yağa göre daha uzamaktadır.

- Dielektrik dayanımı doğal esterin mineral yağa göre düşük, su içeriği ise oldukça yüksektir. Çünkü doğal ester kâğıttaki nemi kendi bünyesine çekmekte ve muhafaza etmektedir. Böylelikle su içeriği yükselirken delinme dayanımı azalmaktadır.
- Mineral yağın renk durumu oldukça kötüdür ve çok fazla partiküllerin kâğıttan koptuğu, yüksek ısıya bağlı karbonlaşmanın etkisiyle karardığı ve kâğıdın bozulduğunu niteleyen önemli göstergedir.
- Yaşlanma için çok önemli bir gösterge olan ve oksidatif bozulmaya işaret eden karbonil grubunun C = O gerilim titreşimleri, 100°C’de doğal esterde yaşlanmış numunede oluşmazken, mineral yağda yaşlanmış kâğıt numunede belirgin olduğu görülmektedir. 140°C derecede ise, hem doğal esterdeki yaşlanmış numunede hem de mineral yağda yaşlanmış kâğıt numunede belirgin olduğu görülmektedir. Bu pikin şiddeti, doğal estere göre mineral yağda yaşlanmış numunede %8 daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun anlamı 140°C’deki analizlerde polimer zincirde önemli kopmaların meydana geldiği görülmektedir.
- 140°C’de mineral ve doğal ester yağda 2000 saat yaşlanmış kâğıt numunelerin SEM karşılaştırılmasında, mineral yağda yaşlanmış numunede oksidasyona bağlı yapısal bozulma ve karbonlaşma belirgin olarak görülürken, doğal esterde yaşlanmış kâğıt numunede ise yapısal bozulma izlenmemektedir.
- 140°C’de mineral ve doğal ester yağda 3000 saatlik yaşlanmış kâğıt numuneler üzerinde yapılan SEM görüntüleme analizinde, mineral yağda yaşlanmış numunede hızlı oksidasyona bağlı yapısal bozulmanın arttığı karbonlaşmanın meydana geldiği görülmektedir. Buna karşın doğal esterde 3000 saatlik yaşlanmış numunede sadece hafif renk değiştirme izlenmesine rağmen yapısal bozulma izlenmemektedir.
- Sonuç ve analizlerden, transformatörün normal işletim sıcaklığında ve altında mineral ve doğal esterin yaşlanma süreçlerinin yakın olduğu ancak yüksek sıcaklıklarda yaşlanma sürecinin mineral yağda daha fazla olduğu görülmektedir. Bu

nedenle yüksek sıcaklıklarda işletilen ve uzun yıllar önce tesis edilmiş transformatörlerde mineral yağ yerine doğal ester yağ kullanılması daha uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] Jin S. H., Scott H. D., Power transformer, Editors: James H. H., Richard C. D., *Electric power engineering handbook*, 2nd ed., CRC Press, California, 26 – 48, 2007.
- [2] Gözütok A., Güç Trafolarına Ait Yağda Erimiş Gaz Analizi Sonuçlarının Yapay Sinir Ağları İle Değerlendirilmesi ve Arıza Analizi, EÜAŞ, <http://www.euas.gov.tr/Documents/E-Bulten/agozutok.07.2006.pdf> (Ziyaret tarihi: 20 Mart 2014)
- [3] IEC 60076–7, Loading Guide for Oil–Immersed Power Transformers, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [4] IEEE Standard C57.91 – 1995, Guide for Loading Mineral – Oil – Immersed Transformers, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, US&Canada, 1996.
- [5] Montsinger V. W., Loading Transformers by Temperature, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, AIEE*, 1930, **49**(2), 776 – 790.
- [6] Sezer M., *Yalıtım Yağı ve Trafo Bakımı*, II. Basım, Çağdaş Basımevi, Balıkesir. 2009.
- [7] Karsai K., Kerényi D., Kiss L., *Large Power Transformers*, 1st ed., Elsevier, Budapest, 1987.
- [8] Perkins M., Pettersson L., Fantana N. L., Oornnen T. V., Jordan S., Transformer Life Assessment Tools with Specific Application to Nuclear Power Station Generator Transformers, *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding*, Cincinnati, United States, 26 – 28 October 1999.
- [9] Thomas P., Shukla A. K., Ageing Studies on Paper And Oil to Assess The Condition of Solid İnsulation Used in Power Transformers, *IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics ICSD'01*, Eindhoven, Netherlands, 25 – 29 June 2001.
- [10] Wilson A., Lapworth J. A., Defining the Life of Major Assets, *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21 – 24 April 2008.
- [11] Van Bolhuis J. P., Gulski E., Smit J. J., Monitoring and Diagnostic of Transformer Solid Insulation, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2002, **17**(2), 528 – 536.

- [12] Kovacevic S., Dominelli N., Ward B., Transformer Life Extension by Continuous On-Line Oil Conditioning, *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology*, British Columbia, Canada, 23 – 25 September 2003.
- [13] Reddy C. C., Elizabeth J., Ramu T. S., On the Life Estimation of Oil Impregnated Paper Insulated Transformer Bushings, *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing*, Nashville, United States, 22 – 24 October 2007.
- [14] Khederzadeh M., Transformer Overload Management and Condition Monitoring, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation ISEI 2008*, Vancouver, Canada, 9 – 12 June 2008.
- [15] Zhang G. J., Wei J. L., Dong M., Mu H. B., Li H. J., Zhang Y. B., Li Y. M., Yan Z., Lifetime Monitoring and Estimation Strategy for Large Power Transformer, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis CMD 2008*, Beijing, China, 21-24 April 2008.
- [16] Swift G., Fredirchuk D., Zhang Z., Transformer Thermal Overload Protection – What’s It All About?, *25th Annual Western Protective Relay Conference International Agriculture Trade Center*, Washington, USA, 13 – 15 October 1998.
- [17] Swift G., Molinski T. S., Lehn W., “A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling – Part I: Theory and Equivalent Circuit ve Part–II: Field Verification, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, **16**(2), 171 – 180.
- [18] Arshad M., Islam S. M., Khaliq A., Power Transformer Aging and Life Extension, *IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Iowa, United States, 16 September 2004.
- [19] Radaković Z., Popović A., Variation of Steady – State Thermal Characteristics of Transformers with OFWF Cooling in Service, *Electric Power Components and Systems*, 2003, **31**(8), 817 – 829.
- [20] Al – Nadabi A., Al – Riyami H., Design a Simulation Model to Estimate the Hot Spot Temperature in Power Transformers, *Sixth IEEE International Multi – Conference on Systems, Signal&Devices, SSD – 09*, Djerba, Tunisia, 23 – 26 March 2009.
- [21] Savaghebi M., Jalilian A., Gholami A., A New Approach for Transformer Loading Capability Assesment under Non – Linear Load Currents, *IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2008*, Chengdu, China, 21 – 24 April 2008.
- [22] Rosas C., Moraga N., Bubnovich V., and Fischer R.. Improvement of the Cooling Process of Oil-Immersed, Electrical Transformers Using Heat Pipes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, **20**(3), 1955 – 1961.

- [23] Susa D., Lehtonen M., Nordman H., Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, **20**(1), 197–204.
- [24] Susa D., Lehtonen, M., Nordman, H., Dynamic Thermal Modeling of Distribution Transformers, *IEEE Transaction Power Delivery*, 2005, **20**(3), 1919–1929.
- [25] Susa D., Matti Lehtonen, Dynamic Thermal Modeling of Power Transformers: Further Development—Part I, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, **21**(4), 1961 – 1970.
- [26] Elmoudi A., Lehtonen M., Nordman H., Thermal Model for Power Transformers Dynamic Loading, *Conference Record of The 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Toronto, Ontario, Canada, 11 – 14 June 2006.
- [27] Preis K., Bíró O., Buchgraber G., Ticar I., Thermal – Electromagnetic Coupling in the Finite – Element Simulation of Power Transformers, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, **42**(4), 999 – 1002.
- [28] Elmoudi A., Thermal Modeling and Simulation of Distribution Transformers, *5th International Multi – Conference on Systems, Signals and Devices*, Amman, Jordan, 20 – 22 July 2008.
- [29] Ishak M. T., Wang Z., Transformer Hotspot Temperature Calculation Using IEEE Loading Guide, *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21 – 24 April 2008.
- [30] Tamsir Y., Sumaryadi, Gumilang H., Pharmatrisanti A., Cahyono B., Siregar R., Thermal Condition Assessment for Power Transformers Operated in Tropical Condition, *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21 – 24 April 2008.
- [31] Cahyono B., Pharmatrisanti A., Tamsir Y., Sumaryadi, Siregar R., Thermal Monitoring on Power Transformers, *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21 – 24 April 2008.
- [32] Takami K. M., Gholnejad H. and Mahmoudi J., Thermal and Hot Spot Evaluations on Oil Immersed Power Transformers by FEMLAB and MATLAB Software's. *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems, EuroSime 2007*, London, England, 16 – 18 April 2007.
- [33] Yıldız H. A., İsmailoğlu H., Güç Transformatörlerinde Kullanılan Selüloz Bazlı Katı ile Sıvı Yalıtım Malzemelerinin Özellikleri ve Etkileşimleri, *III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 21 – 24 Kasım 2013.
- [34] <http://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-trafolari/yagli-tip-trafo-1901/>, (Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2013).

- [35] Mamizadeh A., Yağlı Tip Transformatörlerin Doğrusal Olmayan Dinamik Termal Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 268102.
- [36] İlkahraman M., Güç Transformatör Arızalarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 212762.
- [37] Anders G. J., *Rating of Electric Power Cables*, 1st ed., IEEE Press Power Engineering Series, New Jersey,USA, 1997.
- [38] Aras F., Elektrik ve Isıl Gerilimler Altında 154kV XLPE Yeraltı Güç Kablosunun Yaşlanma Davranışının Deneysel İncelenmesi ve Ampasite ile İlişkilendirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000, 96848.
- [39] Borsi H., Gockenbach E., Dolata B., Ester Fluids as Alternative for Mineral Based Transformer Oil, *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, Futuroscope-Chasseneuil, France, 30 June – 03 July 2008.
- [40] Tenbohlen S., Koch M., Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers, *IEEE Transaction on Power Delivery*, **25**(2), 825 – 830, 2010.
- [41] Gockenbach E., Borsi H., Natural and Synthetic Ester Liquids as Alternative to Mineral Oil for Power Transformers, *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Quebec, Canada, 26 – 29 October 2008.
- [42] IEC 60156, Insulating Liquids – Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency – Test Method, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 1995.
- [43] ASTM D 1816, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2012.
- [44] IEC 60247 Insulating Liquids – Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor ($\tan \delta$) and D.C. Resistivity, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 2004.
- [45] IEC 61120, Digital Audio Tape Recorder Reel to Reel System, Using 6,3 mm Magnetic Tape for Professional Use. Magnetic Tape Properties: Definitions and Methods of Measurement, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 1993.
- [46] ASTM D 924, Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2008.
- [47] IEC 60814, Insulating Liquids – Oil – Impregnated Paper and Pressboard – Determination of Water by Automatic Coulometric Karl Fischer Titration,

International Electrotechnical Commission – IEC Committee, Geneva, Switzerland, 1997

- [48] ASTM D 1533, Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2012.
- [49] IEC 62021 – 1, Insulating Liquids – Determination of Acidity – Part 1: Automatic Potentiometric Titration, Mineral Insulating Oils, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee, Geneva, Switzerland, 2003.*
- [50] ASTM D 974, Standard Test Method for Acid and Base Number by Color – Indicator Titration, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2012.
- [51] ISO 2049, Petroleum Products – Determination of Colour (ASTM Scale), *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.*
- [52] ASTM D 1524, Standard Test Method for Visual Examination of Used Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin in the Field, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2010.
- [53] ASTM D 1500, Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale), *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2013.
- [54] ISO 6295, Petroleum Products – Mineral Oils – Determination of Interfacial Tension of Oil Against Water – Ring Method, *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1983.*
- [55] ASTM D 971, Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2012.
- [56] IEC 61868, Mineral Insulating Oils – Determination of Kinematic Viscosity at Very Low Temperatures, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee, Geneva, Switzerland, 1998.*
- [57] ISO 3104, Petroleum Products – Transparent and Opaque Liquids – Determination of Kinematic Viscosity and Calculation of Dynamic Viscosity, *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1997.*
- [58] ASTM D 445, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2012.
- [59] ISO 2719, Determination of Flash Point – Pensky – Martens Closed Cup Method, *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.*

- [60] ASTM D 92, Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2011.
- [61] ISO 3016, Petroleum Products – Determination of Pour Point, *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland, 1994.
- [62] ASTM D 97, Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2012.
- [63] ASTM D 611, Standard Test Methods for Aniline Point and Mixed Aniline Point of Petroleum Products and Hydrocarbon Solvents, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2007.
- [64] ISO 3675, Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products – Laboratory Determination of Density – Hydrometer Method, *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland, 1998.
- [65] ISO 12185, Crude Petroleum and Petroleum Products – Determination of Density – Oscillating U – Tube Method, *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland, 1996.
- [66] ASTM D 1298, Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method, *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2005.
- [67] IEC 61198, Mineral Insulating Oils – Methods for the Determination of 2 – Furfural and Related Compounds, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 1993.
- [68] ASTM D 5837, Standard Test Method for Furanic Compounds in Electrical Insulating Liquids by High-Performance Liquid Chromatography (HPLC), *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania, USA, 2005.
- [69] IEC 61125, Unused Hydrocarbon Based Insulating Liquids – Test Methods for Evaluating the Oxidation Stability, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 1992.
- [70] <http://www.besttrafo.com.tr/tr/asb-chemical-lab> (Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2010).
- [71] Odoğlu H., *Transformatör Deneyleri*, 1. Baskı, Bileşim Yayınevi, İstanbul, 2006.
- [72] Çilliyüz Y., Biçen Y., Aras F., Thermal Response of Power Transformer under Various Loading Conditions, *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 2013, **1**(1), 6 – 9.
- [73] King W. J., *The basic Laws and Data of Heat Transmission*, 1st ed., American Society of Mechanical Engineering, Wisconsin, 1932.

- [74] Tang W. H., Wu Q. H., Richardson Z. J., Equivalent Heat Circuit Based Power Transformer Thermal Model, *Electric Power Applications*, 2002, **149**(2), 87 – 92.
- [75] Susa, D., Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Power Systems and High Voltage Engineering, Finland, 2005, ISBN 951-22-7742-5.
- [76] Ravetta C., Bossi A., Stucchi A., Samanna M., Thermal Behavior of Distribution Power Transformers in Summertime and Severe Loading Conditions, *19th International Conference on Electricity Distribution, CIRED – 2007*, Vienna, 21 – 24 May 2007.
- [77] Weekes T., Molinski T., Swift G., Transient Transformer Overload Ratings and Protection, *Electrical Insulation Magazine*, 2004, **20**(2), 32 – 35.
- [78] Jr. Winders, J. J., *Power Transformers Principles and Applications*, 1st ed. PPL Electric Utilities Allentown, Pennsylvania, Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2002.
- [79] Lesieutre B. C., Hagman W. H., Kirtley Jr. J. L., An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in an On-Line Monitoring and Diagnostic System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997, **12** (1), 249 – 256.
- [80] Pansuwan S., Insulation Degradation, Assessment of Loss – of – Life and Optimization of Transformer Utilization in Power Distribution System, Doctor of Philosophy, Faculty of the graduate school of the university of Colorado, Department of Electrical and Computer Engineering, Colorado, 2001, UMI Number 3022403.
- [81] Biçen Y., Güç Transformatörlerini İzleme ve Arıza Önleme Odaklı Akıllı Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012, 323148.
- [82] Najdenkoski K., Rafajlovski G., Dimcev V., Thermal Aging of Distribution Transformers According to IEEE and IEC Standards, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, United States, 24 – 28 June 2007.
- [83] Sen P. K., Sarunpong P., Overloading and Loss-of-Life Assessment Guidelines of Oil-Cooled Transformers, *Rural Electric Power Conference*, Little Rock, United States, 29 April – 1 May 2001.
- [84] Elmoudi, A. A., Evaluation of Power System Harmonic Effects on Transformers, Doctoral Dissertation, Helsinki University, Power Systems and High Voltage Engineering, Helsinki, 2006, ISBN 951-22-8078-7 .
- [85] Biçen Y., Çilliyüz Y., Aras F., Aydugan G., An Assessment on Aging model of IEEE/IEC Standards for Natural and Mineral Oil – Immersed Transformer, *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, Trondheim, Norway, 26 – 30 June 2011.

- [86] Simoni, L., A General Approach to the Endurance of Electrical Insulation under Temperature and Voltage, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1981, **EI-16**(4), 277 – 289.
- [87] Kiersztyn S. E., Formal Theoretical Foundation of Electrical Aging of Dielectrics, *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, 1981, **PAS 100**(11), 4333 – 4341.
- [88] Aras F., Alekperov V., Can N., Kirkici H., Aging of 154 kV Underground Power Cable Insulation under Combined Thermal and Electrical Stresses, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2007, **23**(5), 25 – 33.
- [89] Bahder G., Garrity T., Sosnowski M., Eaton R., Katz C., Physical Model of Electric Aging and Breakdown of Extruded Polymeric Insulated Power Cables, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, **PAS-101**(No. 6), 1379 – 1390.
- [90] Zhurkov S.N., Kinetic Concept of Strength of Solids, *International Journal Fracture Mechanics*, 1965, **1**(4), 311 – 322.
- [91] Mamedov S., Varol H. S., Alekperov V. A., The Aging Model of Fiber Reinforced Polymer Composites under Combined Electric and Thermal Stress, *Turkish Physical 18th Physics Conference*, Adana, Turkey, 25 – 28 October 1999.
- [92] Dakin T. W., Electrical Insulation Deterioration, *Electrotechnology*, 1960, **66**, 123 – 130.
- [93] Crine J. P., The Compensation Law Revisited Application to Dielectric Aging, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1991, **26**(4), 811– 818.
- [94] ASTM D149, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies, *American Society for Testing and Materials*, USA, 2009.
- [95] IEC 60641, Pressboard and Presspaper for Electrical Purposes – Part 2: Methods of Tests, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 2004.
- [96] IEC 60505, Evaluation and Qualification of Electrical Insulation Systems, *International Electrotechnical Commission – IEC Committee*, Geneva, Switzerland, 2011.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Ayaz M., Erhan K., Özdemir E., **Çilliyüz Y.**, Animasyon Tabanlı PLC ve Operatör Panel Eğitim Seti, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2014 (Kabul Edilmiş Yayın).
- [2] **Çilliyüz Y.**, Biçen Y., Aras F., Thermal Response of Power Transformer under Various Loading Conditions, *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 2013, **1**(1), 6 – 9.
- [3] Biçen Y., **Çilliyüz Y.**, Aras F., Aydugan G., Aging of Paper Insulation in Natural Ester & Mineral Oil, *Scientific & Academic Publishing – Electrical and Electronic Engineering*, 2012, **2**(3), 141 – 146.
- [4] Biçen Y., **Çilliyüz Y.**, Aras F., Aydugan G., An Assessment on Aging Model of IEEE/IEC Standards for Natural and Mineral Oil–Immersed Transformer, *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, Trondheim, Norway, 26 – 30 June 2011.
- [5] **Çilliyüz Y.**, Bicen Y., Aras F., Güç Transformatörlerin Isıl Modellenmesi ve Farklı Yükler Altındaki Cevabının İncelenmesi, *Elektrik – Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, ELECO'2008*, Bursa, Türkiye, 26 – 30 Kasım 2008.
- [6] **Çilliyüz Y.**, Aras F., İnal M., Karaçor M., Yapay Sinir Ağları ile İklim Koşulları Etkili Bölgesel Yük Kestirimi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Ve Fuarı, ELECO'2006*, Bursa, Türkiye, 6 –10 Aralık 2006.
- [7] Keleş K., Aras, F., Şahin, Y. G., **Çilliyüz Y.**, İşletmedeki Güç Transformatör Yağlarının Elektrik Dayanımının Belirlenmesi, *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, MBGAK, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Araştırma Görevlileri Konseyi*, İstanbul, Türkiye, 17 – 19 Kasım 2005.
- [8] Keleş K., **Çilliyüz Y.**, Aras F., Farklı Kalınlıktaki Yalıtkan Malzemelerin Yalıtkan Malzemelerin Delinme Dayanımına Elektrot Tipi ve Sıcaklığın Etkisi, *Elektrik–Elektronik–Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı ELECO'2004*, Bursa, Türkiye, 8 – 12 Aralık 2004.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Bursa'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa'da tamamladı. 1998 yılında Demirtaşpaşa Anadolu Meslek Lisesi Elektrik Bölümü'nden mezun oldu. 2002 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nü bitirdi. 2002 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2006 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Aynı zamanda Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans yapmaktadır. Halen Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.