

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

**GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ HATALARININ DESTEK
VEKTÖR MAKİNELERİ YAKLAŞIMIYLA BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKİF DEMİRÇALI

DENİZLİ, TEMMUZ - 2015

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



**GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ HATALARININ DESTEK
VEKTÖR MAKİNELERİ YAKLAŞIMIYLA BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKİF DEMİRÇALI

DENİZLİ, TEMMUZ - 2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Akif DEMİRÇALI tarafından hazırlanan “**Güç Transformatörü Hatalarının Destek Vektör Makineleri Yaklaşımıyla Belirlenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 29.07.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Selim KÖROĞLU



Üye
Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ



Üye
Doç. Dr. Emre ÇOMAK



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
20.08.2015 tarih ve 31/08 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.


Akif DEMİRÇALI

ÖZET

GÜÇ TRANSFORMATÖRÜ HATALARININ DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ YAKLAŞIMIYLA BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKİF DEMİRÇALI

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI:YRD. DOÇ. DR. SELİM KÖROĞLU)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2015

Tez çalışmasında, enerji sistemlerinin en önemli ve vazgeçilmez ekipmanlarından biri olan güç transformatörlerinde meydana gelen arızaların tanınması ve sınıflandırılması destek vektör makineleri (DVM) ile gerçekleştirilmiştir. . Güç transformatörleri hatalarının erken teşhisinde sıklıkla kullanılan ve etkili bir yöntem olan yağda çözünmüş gaz analizi (YGA) yöntemi tanıtılmıştır. Bu yöntemle elde edilen YGA verileri geliştirilen DVM modeli ile sınıflandırılarak modelin performansı incelenmiştir. Geliştirilen modelin hataları daha yüksek doğrulukta tanımlanabilmesi için model parametreleri örgü arama (ÖA), genetik algoritma (GA), diferansiyel evrim algoritması (DE) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemleri ile optimize edilmiştir. Aynı veri seti üzerinde farklı yöntemlerle optimize edilen DVM sınıflandırıcısının hangi yöntem ile daha yüksek doğrulukla sınıflandırma yaptığı gösterilmiştir. Ayrıca akıllı bir yöntem olan DVM'nin klasik YGA değerlendirme yöntemleriyle karşılaştırması yapılmış ve optimizasyon yöntemine bağlı olmaksızın DVM'nin klasik yöntemlerden daha yüksek doğruluk oranı ile güç transformatörü hatalarını tanımlayabildiği gösterilmiştir. Benzetim sonuçları göstermiştir ki, parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile optimize edilen DVM diğer yöntemlere göre daha kısa sürede ve daha yüksek doğruluk oranı ile güç transformatörü hata tanınması yapmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Destek vektör makineleri, Güç transformatörleri, Hata tanılama, Yağda çözünmüş gaz analizi, Parçacık sürü optimizasyonu, Diferansiyel evrim algoritması, Genetik algoritma

ABSTRACT

FAULT DIAGNOSIS OF POWER TRANSFORMERS WITH SUPPORT VECTOR MACHINES

MSC THESIS

AKİF DEMİRÇALI

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASST. PROF. SELİM KÖROĞLU)

DENİZLİ, JULY 2015

In this thesis, support vector machine (SVM) is used for the fault diagnosis and classification of power transformer; one of the most substantial and expensive equipment in power systems. Effective and widely used dissolved gases analysis (DGA) technique is presented for the early detection of power transformer faults. Obtained DGA data with this method is classified with proposed SVM model to investigate the performance of the model. The model parameters are optimized with grid search method (GS), genetic algorithm (GA), differential evolution algorithm (DE) and particle swarm optimization (PSO) algorithm for higher diagnostic accuracy. It is presented which method is the most effective for the fault classification on the same data set. Moreover, SVM, an artificial intelligence method, is compared with classical DGA assessment techniques and it is found that SVM has better diagnostic accuracy from classical methods without depending on optimization method. Simulation results indicate that support vector machine optimized with particle swarm optimization method diagnose the fault more quickly and with higher diagnostic accuracy than the others.

KEYWORDS:Support vector machines, Power transformers, Fault diagnosis, Dissolved gases analysis, Particle swarm optimization, Differential evolution algorithm, Genetic Algorithm

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİ	6
2.1 Transformatörlerin Çalışma Prensipleri	7
2.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması.....	9
2.2.1 Transformatörlerin Kullanım Amacına Göre Sınıflandırılması.....	9
2.2.1.1 Ölçü Transformatörleri.....	9
2.2.1.2 Yalıtım Transformatörleri	10
2.2.1.3 Dağıtım Transformatörleri	11
2.2.1.4 Güç Transformatörleri.....	11
2.2.2 Transformatörlerin Yalıtım Sistemine Göre Sınıflandırılması	11
2.2.2.1 Kuru Tip Transformatörler.....	11
2.2.2.2 Sıvı Yalıtımlı Transformatörler.....	12
2.2.2.3 Gaz Yalıtımlı Transformatörler.....	13
2.3 Güç Transformatörlerinde Bulunan Donanımlar.....	14
2.3.1 Nüve.....	14
2.3.2 Sargılar.....	15
2.3.3 Buşingler.....	16
2.3.4 Kademe Değiştirici	16
2.3.5 Soğutma Donanımı	17
2.4 Güç Transformatörlerinde Bulunan Standart Koruma Aksesuarları ..	18
2.4.1 Basınç Emniyet Vanası.....	18
2.4.2 Buchholz Rölesi.....	19
2.4.3 Nem Tutma Sistemi	19
2.4.4 Yağ Seviye Göstergesi.....	20
2.4.5 Topraklama Terminalleri	21
2.4.6 Diğer Donanımlar	21
3. YAĞDA ÇÖZÜNÜŞ GAZ ANALİZİ VE DEĞERLENDİRME	
YÖNTEMLERİ	22
3.1 Güç Transformatörlerinde Kullanılan Yağlar	23
3.1.1 Mineral Yağlar	23
3.1.2 Sentetik Yağlar	24
3.1.2.1 Sentetik Ester Yağlar.....	24
3.1.2.2 Poliklorlu Bifeniller	25
3.1.2.3 Silikon Temelli Yağlar	25
3.1.3 Bitkisel Yağlar	25
3.2 Güç Transformatöründe Gaz Oluşumu	26
3.3 Güç Transformatörlerinden Yağ Numunesi Alımı.....	28

3.3.1	Yağ Numunesi Alma İşlemi	28
3.3.2	Numune Alma Ekipmanları ve Bakımı	30
3.4	Yağ Numunesindeki Çözünmüş Gazların Belirlenmesi.....	31
3.5	Yağda Çözünmüş Gaz Analizi Değerlendirme Yöntemleri	32
3.5.1	Kılavuz Gaz Yöntemi	33
3.5.2	Duval Üçgen Yöntemi	35
3.5.3	Roger Gaz Oranları Yöntemi.....	36
3.5.4	IEC Gaz Oranları Yöntemi	37
3.5.5	Doernenburg Gaz Oranları Yöntemi.....	38
4.	DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ VE OPTİMİZASYON	
YÖNTEMLERİ	39	
4.1	Destek Vektör Makinelerinin Matematiksel Modeli.....	39
4.1.1	Doğrusal Sınıflandırma.....	39
4.1.2	Doğrusal Olmayan Sınıflandırıcı	43
4.2	Çok Katmanlı Destek Vektör Makineleri.....	46
4.2.1	Hepsine Karşı Bir Algoritması	47
4.2.2	Bire Karşı Bir Algoritması.....	47
4.2.3	Yönlendirilmiş Çevrimsiz Grafik Algoritması	48
4.2.4	İkili Karar Ağacı	49
4.3	Destek Vektör Makinelerinin Optimizasyonu.....	50
4.3.1	Örgü (Grid) Arama	50
4.3.2	Parçacık Sürü Optimizasyonu.....	51
4.3.3	Genetik Algoritma	53
4.3.4	Diferansiyel Evrim Optimizasyonu	54
5.	BENZETİM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	57
5.1	Yağda Çözünmüş Gaz Analizi Verilerinin Elde Edilmesi	57
5.2	Çok Katmanlı Destek Vektör Makineleri Sınıflandırıcısının Oluşturulması	58
5.3	DVM Sınıflandırıcısının Optimizasyonu	59
5.3.1	Benchmark Sonuçları.....	60
5.3.2	Optimizasyon Yöntemlerinin Karşılaştırması	60
6.	SONUÇLAR.....	66
7.	KAYNAKLAR.....	67
8.	EKLER.....	73
	EK A YGA Verileri.....	73
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Manyetik alan kuvvet çizgileri.	8
Şekil 2.2: Demir nüveli transformatör prensip şeması.....	8
Şekil 2.3: Ölçü transformatörleri a) Akım transformatörü, b) Gerilim transformatörü.	10
Şekil 2.4: Kuru tip transformatör.	12
Şekil 2.5: Sıvı yalıtımlı transformatörler a) Atmosfere kapalı b) Atmosfere açık.	13
Şekil 2.6: Gaz yalıtımlı transformatör.....	14
Şekil 2.7: Güç transformatörü nüvesi.	15
Şekil 2.8: Sürekli transpozeli kablo.	15
Şekil 2.9: Güç transformatörü buşingleri.....	16
Şekil 2.10: Kademe değiştirici a) Ana tank içerisinde b) Dışarıda.	17
Şekil 2.11: Soğutma sistemi isimlendirmesi.	18
Şekil 2.12: Buchholz rölesi.	19
Şekil 2.13: Transformatörler için nem tutucu cihaz.....	20
Şekil 2.14: Yağ seviye göstergesi.	20
Şekil 3.1: Güç transformatörlerinde yağ numunesi alma vanası.....	29
Şekil 3.2: Yağ numunesi alma ekipmanları a) Buzlu cam şırınga, b) Üç yollu vana.	30
Şekil 3.3: Gaz kromatografi.	31
Şekil 3.4: Duval üçgen diyagramı.	35
Şekil 4.1: En büyük aralıklı sınıflandırıcı.	40
Şekil 4.2: Esnek aralıklı sınıflandırıcı.	42
Şekil 4.3: Doğrusal olmayan sınıflandırıcı.....	43
Şekil 4.4: Öznitelik uzayı.....	44
Şekil 4.5: Hepsine karşı bir algoritması prensip şeması.	47
Şekil 4.6: Bire karşı bir algoritması prensip şeması.....	48
Şekil 4.7: Yönlendirilmiş çevrimsiz grafik şeması.	49
Şekil 4.8: a)İkili karar ağacı yapısı, b)Örnek bir sınıflandırma.	50
Şekil 4.9: PSO algoritmasının akış şeması.....	52
Şekil 4.10:Genetik algoritma akış şeması.	54
Şekil 4.11:Diferansiyel evrim algoritmasının akış şeması.....	56
Şekil 5.1: Güç transformatörü arıza tanılama için ikili karar ağacı yapısındaki DVM sınıflandırıcısı prensip şeması.	59
Şekil 5.2: DVM1 için parametrelerin sınıflandırma performansına etkisi.....	61
Şekil 5.3: PSO'nun en uygun çözüme yaklaşırken sergilediği davranış.....	62

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Soğutma sistemi isimlendirmelerinin açıklamaları.	18
Tablo 3.1: Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağları ve genel özellikleri.	23
Tablo 3.2: Karbon ve hidrojen atomları arasındaki bağların kopması ya da yeniden oluşması için gereken enerji miktarları.	26
Tablo 3.3: Gazların oluşabilmeleri için gerekli olan sıcaklıklar ve gerekli olan enerji miktarları.	27
Tablo 3.4: Kılavuz gazlara ilişkin genel arıza değerlendirmesi.	34
Tablo 3.5: Transformatörde meydana gelen arıza durumlarında yağda çözülmüş gazların arızanın türüne göre tahmini miktarları.....	34
Tablo 3.6: Duval üçgen yöntemi için arıza tanımı ve sınır bölgeler.....	36
Tablo 3.7: Roger gaz oranları ve bu oranlara ilişkin sınır değerler.	36
Tablo 3.8: Roger gaz oranı yöntemi için arıza tanımları.	37
Tablo 3.9: IEC gaz oranları ve bu oranlara ilişkin sınır değerler.....	37
Tablo 3.10: IEC gaz oranı yöntemi için arıza tanımları.....	38
Tablo 3.11: Doernenburg gaz oranları ve kısaltmaları.....	38
Tablo 3.12: Doernenburg yöntemi için gaz oranlarına göre arıza türleri.....	38
Tablo 5.1: Güç transformatörü hatalarına ilişkin YGA veri sayıları.	58
Tablo 5.2: Benchmark verilerinin özellikleri.	60
Tablo 5.3: Farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısının benchmark verilerini sınıflandırma yüzdeleri.	60
Tablo 5.4: Farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı için en uygun DVM parametreleri, sınıflandırma ve hata tespit oranları, optimizasyon ve test süreleri.	63
Tablo 5.5: Farklı yöntemlerle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı ve klasik yöntemlerin hata sınıflandırmasının gerçek hata türü ile karşılaştırılması.....	64
Tablo A.1: YGA verilerinin elde edildiği kaynaklar ve kaynak numaraları. ...	73
Tablo A.2: YGA verileri ve elde edildiği kaynaklar.	73

SEMBOL LİSTESİ

H_2	:	Hidrojen
CH_4	:	Metan
C_2H_2	:	Asetilen
C_2H_4	:	Etilen
C_2H_6	:	Etan
CO	:	Karbon monoksit
CO_2	:	Karbondioksit
ε	:	Elektromotor kuvvet
Φ_B	:	Manyetik akı
V_1	:	Primer sargı gerilimi
V_2	:	Sekonder sargı gerilimi
I_1	:	Primer sargı akımı
I_2	:	Sekonder sargı akımı
N_1	:	Primer sargı sarım sayısı
N_2	:	Sekonder sargı sarım sayısı
\mathfrak{R}^n	:	n boyutlu vektör uzayı
N	:	Veri sayısı
w	:	Ağırlık
b	:	Eşik değeri
m	:	Geometrik aralık
$L(.)$:	Lagrange fonksiyonu
α	:	Lagrange çarpanı
\mathcal{S}	:	Destek vektörleri kümesi
ζ	:	Sınıflandırıcının yaptığı hata
C	:	Ceza parametresi
\hat{y}	:	Model çıkışı
$\Phi(\cdot)$:	Dönüşüm fonksiyonu
\mathcal{F}	:	Öznitelik uzayı
K	:	Kernel fonksiyonu
σ	:	Genişlik parametresi
e	:	Euler sayısı
M	:	Sınıf sayısı
y_t	:	Doğru sınıflandırılan veri sayısı
y_f	:	Yanlış sınıflandırılan veri sayısı
v_i^d	:	i. parçacığın d. boyuttaki hızı
c_1	:	Bilişsel ivmelenme katsayısı
c_2	:	Sosyal ivmelenme katsayısı
R_1	:	Rastgele değişken
R_2	:	Rastgele değişken
p_i^d	:	i. parçacığın d. boyuttaki pozisyonu
F	:	Mutasyon katsayısı
CR	:	Çaprazlama katsayısı
$x_{i,G}$:	G. adımdaki i. birey

KISALTMALAR LİSTESİ

YGA	:	Yağda Çözünmüş Gaz Analizi
YSA	:	Yapay Sinir Ağları
DVM	:	Destek Vektör Makinesi
GA	:	Genetik Algoritma
PSO	:	Parçacık Sürü Optimizasyonu
BKB	:	Bire Karşı Bir
HKB	:	Hepsine Karşı Bir
ÖA	:	Örgü Arama
DE	:	Diferansiyel Evrim Algoritması
OECD	:	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (Organisation for Economic Co-operation and Development)
PCB	:	Poli Klorlu Bifenil (Polychlorinated biphenyl)
KD	:	Kısmi Deşarj
D1	:	Düşük Enerjili Deşarj
D2	:	Yüksek Enerjili Deşarj
T1	:	Düşük Sıcaklık Termik Arıza
T2	:	Orta Sıcaklık Termik Arıza
T3	:	Yüksek Sıcaklık Termik Arıza
NF	:	Normal sınıf

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca insani, ahlaki değerleri ile örnek edindiğim, yanında çalışmaktan onur duyduğum, ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam, Yrd. Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ'ye ve Yrd. Doç. Dr. Selami KESLER'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmayı, bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve benden maddi, manevi hiçbir desteği esirgemeyen aileme ve dostlarıma ithaf ederim.

1. GİRİŞ

Güç transformatörleri elektrik üretim, iletim, dağıtım sistemlerinin en pahalı ve önemli donanımlarından birisidir. Bu donanımın herhangi bir hata ve arıza yaşamadan çalışması enerji sistemlerinin güvenilirliği ve istikrarı açısından çok önemlidir. Güç transformatöründe meydana gelebilecek bir arıza o transformatörün bağlı bulunduğu sistemde enerji akışının kesintiye uğramasına sebep olabilir ve ciddi maddi kayıplara yol açar (Mirzai ve diğ. 2006). Güç transformatörlerinde meydana gelebilecek beklenmedik bir arızanın oluşmasını önceden kestirmek ve önleyici bakım tedbirlerini almak hem transformatörün ömrünü artırmakta hem de sistemin işletme performansına olumlu katkı sağlamaktadır. Bu amaç için transformatörlerde birçok koruma ekipmanı ve sistemleri mevcuttur. Bunların yanında meydana gelebilecek arızaların önlenmesi veya arızanın çok büyümeden tespit edilmesi için birçok test ve analiz yöntemleri de uygulanmaktadır.

Yağda çözünmüş gaz analizi (YGA) tüm dünyada kabul görmüş güç transformatörleri için iyi bir arıza tanılama yöntemidir. Özellikle yağlı transformatörlerde gelişmekte olan veya meydana gelmiş olası arızaların tespiti için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yağlı transformatörlerde meydana gelen arızalar transformatör içerisindeki yağın ve diğer yalıtım malzemelerinin bozunmasına sebep olur. Bu bozunma sonucunda, arızanın türü ve şiddetine bağlı olarak yağ içerisinde hidrojen (H_2), metan (CH_4), asetilen (C_2H_2), etilen (C_2H_4), etan (C_2H_6), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO_2) gazları çeşitli oranlarda açığa çıkar. Eğer gazların miktarları doğru olarak belirlenebilirse, gazların oluşmasına sebep olan arızanın da türü tespit edilebilir ve gerekli önlemler alınabilir (Shintemirov ve diğ. 2009). Bu yöntemle arızanın deşarj (kısmı deşarj, düşük enerjili deşarj ve yüksek enerjili deşarj) veya termal (düşük sıcaklık termik arıza, orta sıcaklık termik arıza ve yüksek sıcaklık termik arıza) bir sorundan kaynaklandığı rahatlıkla anlaşılabilir. Ayrıca, YGA'nın sağladığı bilgiler ile transformatörün çalışma ve bakım programı yeniden düzenlenebilir.

Literatürde güç transformatörü arızalarının YGA verilerine göre değerlendirilmesi için birçok yöntem önerilmiştir. Genel olarak bunlar klasik ve akıllı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılabilir.

YGA verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan başlıca klasik yöntemler arasında kılavuz gaz, Duval üçgen, Roger, IEC, Doernenburg gaz oranları vb. gösterilebilir (Muhamad ve diğ. 2007) (Duval ve Dukaram 2005). Bu yöntemlerin ortak noktası transformatör arızaları hakkındaki geçmiş deneyimler ve uzman görüşleri kullanılarak hazırlanmış tablo ya da grafiklere göre arıza tanılması yapmalarıdır (Köroğlu ve diğ. 2014). Arıza tanılmasında pratik, kullanışlı ve kolayca uygulanabilir olmalarına rağmen matematiksel bir formül ya da farklı koşullarda çalışan transformatörler için genel bir uyum sağlama yeteneğinden yoksundurlar. Bu nedenle arıza tanılmasında her zaman güvenilir ve doğru sonuçlar verememektedirler (Ganyun ve diğ. 2005).

YGA verilerinin değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer tanılama şekli ise akıllı yöntemlerdir. Özellikle, son yıllarda güç transformatörü arıza tanılmasında bu yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla en çok kullanılan yöntemlerin başında yapay sinir ağları (YSA) (Cho ve diğ. 2006) (Lee ve diğ. 2007), bulanık mantık temelli uzman sistemler (Huang ve Sun 2013) (Dhote ve Helonde 2014), destek vektör makineleri (DVM) (Ganyun ve diğ. 2005) gelir. Bunların yanı sıra gen programlama (Malik ve diğ. 2014), alakalı vektör makineleri (Liu ve Ding 2013) ve gri eklenti algoritması (Wang 2004) gibi farklı algoritma ve çeşitli yöntemler de kullanılmışlardır. Akıllı yöntemler, güç transformatörü arızalarının belirlenmesinde başarı ile uygulansalar da her yöntemin kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, YSA uzman görüşü ve deneyimi yerine arıza durumlarına ilişkin YGA verileri kullanır. Böylelikle YGA verileri ile arıza arasındaki ilişkiyi belirleyerek arıza tanılması yapar. Fakat YSA modelinin bu tür problemlerin çözümünde kendine özgü bazı eksiklikleri vardır. Diğer yöntemlere göre modelin eğitilmesinde daha çok veri sayısına ihtiyaç vardır. Ayrıca aşırı öğrenme, yerel optimumlara kolay takılma ve yavaş sonuç verme gibi yapısal sorunlardan dolayı arıza tanılama doğruluğu her zaman yüksek olamamaktadır. Benzer şekilde diğer bazı akıllı yöntemlerinde kendine has dezavantajları olabilmektedir. Örneğin üyelik fonksiyonlarını belirlenmesindeki zorluklar, bulanık mantık temelli uzman sistemlerin en önemli dezavantajıdır. Ayrıca

tanılama yaparken karar verme aşamasında çok fazla kuralın taranarak sonucun belirlenmesi gerekmektedir (Zhang ve diğ. 2010) (Beykverdi ve diğ. 2014). Literatürde akıllı yöntemlerle transformatör hata tanılmasına ilişkin sunulan bir çalışmada, YSA, bulanık mantık temelli uzman sistemler ve DVM karşılaştırılmıştır (Souahlia ve diğ. 2012). Bu çalışmada DVM'nin diğer yöntemlerden daha yüksek doğrulukta arıza tanılması yaptığı gösterilmiştir.

Son yıllarda, akıllı yöntemlerden DVM ile güç transformatörü hata tanılması ve sınıflandırılması konusunda kayda değer çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu yöntemin güç transformatörü arıza tanılmasında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. DVM diğer yöntemlere göre daha az eğitim verisine ihtiyaç duyar. Aynı zamanda doğrusal olmayan, yüksek boyutlu veri setlerinin sınıflandırmasında rahatlıkla ve yüksek doğrulukla kullanılabilir. Bu ve benzeri özellikler güç transformatörü arızalarının tanılmasında DVM'yi diğer akıllı yöntemlerden öne çıkaran üstünlüklerdir. Ayrıca, YSA her çalıştırıldığında farklı sonuçlar üretirken, DVM aynı parametre değerleriyle her çalıştırıldığında aynı sonucu üretmektedir. DVM sınıflandırıcısı bu alanda ilk defa 2005 yılında (Ganyun ve diğ. 2005) kullanılmıştır. Bu çalışmada başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fakat DVM sınıflandırıcısı parametrelerinin nasıl belirlendiği tam olarak açıklanmamıştır. Daha sonraki çalışmalarda araştırmacılar, bu parametrelerin optimum belirlenmesi için çapraz geçişleme (Bacha ve diğ. 2012), genetik algoritma (GA) (Fei ve Zhang 2009), ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Lee ve diğ. 2007) (Liao ve diğ. 2013) gibi algoritmalar kullanmışlardır. Ancak bütün bu optimizasyon yöntemleri tek bir YGA veri seti üzerinde uygulanarak hangi optimizasyon yönteminin daha uygun olduğu karşılaştırılmamıştır.

Güç transformatörlerinde meydana gelen arıza kendini genel anlamda deşarj veya termal problem şeklinde gösterir. Bununla birlikte deşarj ve termal sorunlarda düşük, orta ve yüksek şeklinde ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla arıza tanılmasında genelden daha özele birçok sınıf bulunabilir. Bu alanda DVM ile yapılan ilk çalışmada (Ganyun ve diğ. 2005), üç katmanlı ikili karar ağacı yapısındaki DVM sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Yani hata sınıfı normal, termal, düşük enerjili deşarj ve yüksek enerjili deşarj olmak üzere dört grupta sınıflandırmıştır. Ayrıca kullanılan YGA veri sayısı azdır ve DVM parametrelerinin nasıl belirlendiği konusu cevapsız kalmıştır. Daha

sonra DVM ve YSA'nın parametre optimizasyonu klonlanmış seçilim algoritması (Cho ve diğ. 2006) ve PSO yöntemi (Lee ve diğ. 2007) ile yapılmıştır. Benzer olarak DVM'nin parametrelerini seçiminde GA kullanılmıştır (Fei ve Zhang 2009). Yapılan başka bir çalışmada, araştırmacılar YGA giriş verilerinin DVM sınıflandırma performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Bacha ve diğ. 2012). Diğer bir çalışmada, bire karşı bir (BKB), hepsine karşı bir (HKB) ve ikili karar ağacı yapısındaki üç çok katmanlı DVM sınıflandırıcısının güç transformatörü hata tanımlanması konusundaki karşılaştırması yapılmıştır (Mehta ve diğ. 2013). Bire karşı bir yapısındaki çok katmanlı DVM sınıflandırıcısının optimizasyonu zamanla ivmelenen katsayılı PSO ile yapılmış ve az veri sayısı ile yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir (Liao ve diğ. 2013). Üç farklı DVM tabanlı sınıflandırıcı olan klasik DVM, en küçük kareler DVM ve destek vektör alan tanımlaması yöntemi kullanılmış ve bunların karşılaştırması yapılmıştır (Wei ve diğ. 2014^a). Bu üç model de daha yüksek sınıflandırma yüzdesi elde etmek amacıyla optimizasyon yöntemi olarak PSO kullanılmıştır. Ancak bu modelde hatalar yalnızca dört sınıfa ayrılmıştır ve dolayısıyla arızaların ayırt edilmesinde daha genel sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan DVM modeli giriş verisi olarak gaz değerleri yerine gazların oranlarını giriş verileri olarak kullanmaktadır. DVM sınıflandırıcısının diğer akıllı yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği ve hata tespit yüzdesini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Yine benzer bir çalışmada DVM sınıflandırıcısı özgün özellik önceliklendirmesi ile birlikte yüksek sınıflandırma yüzdesi elde edilmiştir (Wei ve diğ. 2014^b). Bu çalışmada da hata dört sınıfa ayrıldığı için daha fazla sınıfa ayıran çalışmalarla kıyaslanması çok doğru değildir. Sınıflandırıcı parametrelerinin optimizasyonundan söz edilmemiş ve YGA verilerine herhangi bir ön işlem uygulanmamıştır.

Güç transformatörü arızalarının tanımlanması konusunda yapılan önemli bazı literatür çalışmalarının eksikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- DVM parametre optimizasyonu yok (Ganyun ve diğ. 2005) (Mehta ve diğ. 2013).
- Giriş verilerinde özellik çıkarımı yok (Fei ve Zhang 2009) (Mehta ve diğ. 2013) (Liao ve diğ. 2013).
- Sınıflandırılan sınıf sayısı az (Ganyun ve diğ. 2005) (Wei ve diğ. 2014^{a,b}).

- Doğrulama veri seti yok (Ganyun ve diğ. 2005) (Wei ve diğ. 2014^{a,b}) (Bacha ve diğ. 2012) (Mehta ve diğ. 2013) (Liao ve diğ. 2013).

Literatürde, YGA verileri ile güç transformatörü arıza tanılmasında DVM sınıflandırıcısı farklı yapılarda oluşturulmuş ve çeşitli yöntemlerle optimize edilmiştir. Fakat bu optimizasyon yöntemleri aynı sınıflandırma sayısı ve aynı veri seti üzerinde denenip karşılaştırması yapılmamıştır.

Bu tez çalışmasında, YGA verileri kullanılarak güç transformatörü hatalarının tanılmasında çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı geliştirilmiştir. DVM parametrelerinin optimizasyonu için önemli optimizasyon yöntemleri karşılaştırmıştır ve optimum algoritma belirlenmiştir. Ayrıca yeni modelin oluşturulmasında, daha önceki çalışmaların eksik yönleri göz önüne alınmıştır. Hataları yüksek doğruluk oranı ile tanıyabilmek için çok katmanlı DVM sınıflandırıcısının parametre optimizasyonu; örgü arama (ÖA), genetik algoritma (GA), diferansiyel evrim algoritması (DE) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemleri ile yapılmıştır. Bu yöntemin güç transformatörü arızalarının tanılmasında başarıyla kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bu tez kapsamında; birinci bölüm kısa bir giriş ve daha önce yapılmış literatür çalışmalarının özeti şeklindedir. İkinci bölümde güç transformatörleri, temel prensibi ve genel yapıları hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde sınıflandırılacak verilerin elde etme yöntemi olan YGA anlatılmış ve elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılan klasik yöntemler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde DVM genel matematiksel modeli, yapısı, çekirdek fonksiyonları, çok katmalı yapının oluşturulması ve kullanılan optimizasyon yöntemleri anlatılmıştır. Beşinci bölümde kullanılan YGA verilerinin oluşturulması, hazırlanması, çok katmanlı DVM yapısının kurulması ve nasıl optimize edildiği anlatılmıştır. Elde edilen sonuçların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Altıncı ve son bölümde de tez çalışmasından elde edilen sonuçlar vurgulanmıştır.

2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİ

Transformatörler güç sistemlerinin en vazgeçilmez ve işlevsel ekipmanlarından birisidir. Güç transformatörleri, elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar olan safhalarda enerjinin güvenli ve verimli bir şekilde aktarılmasında önemli görevler üstlenir. Büyük güçlerin aktarımında kullanılan bu ekipmanların sorunsuz ve güvenli bir şekilde çalışması, enerji iletimi için hayati önem arz eder. Bu sebeplerden dolayı bu elemanların korunması, arıza durumlarının mümkün olduğunca önlenmesi, sürekli gözlem altında tutulması ve bakım onarım periyodlarının takip edilmesi gerekir. Böylelikle işletme güvenliği, sürdürülebilirliği ve olası kesintilerin yaşanması önlenerek operasyonel kayıpların en aza indirilmesi sağlanır.

Elektrik üretim santrallerinde üretilen elektrik enerjisi uzaktaki tüketim merkezlerine enerji nakil hatları vasıtasıyla iletilirken iletim hatları iletkenlerinde gerilim düşümleri ve önemli ölçüde ısı şeklinde güç kayıpları meydana gelir. Bu kayıpların mümkün olduğu ölçüde azaltılmasında en etkili yöntem enerji iletimini yüksek gerilimle sağlamaktır. Ayrıca gerilimin sabit bir güçte yükseltilmesi akımın azalması anlamına gelir ki bu da yüksek güçlü enerjinin iletilmesi için kullanılacak iletken kesitlerinin düşmesi ve enerji nakil hattı boyutlarının küçülmesini sağlar. Böylelikle iletim maliyetleri daha ekonomik olur.

19. yüzyılın başlarında elektromanyetik konusunda yaşanan buluşlar ve gelişmeler alternatif akımın yaygınlaşması ve kullanımında çığır açmıştır. Bunu izleyen yıllardaki gelişmelere bağlı olarak büyük güçlerde alternatif elektrik enerjisi jeneratörler yardımıyla kolay bir şekilde üretilebilir hale gelmiştir. Buna bağlı olarak üretilen bu alternatif enerjinin kullanılması ve taşınabilmesi için farklı çözümler ortaya çıkmıştır. Günümüze kadar enerjinin iletilmesinde ve kullanılmasındaki en yaygın ve etkin biçim alternatif enerji olmuştur. Böylelikle, transformatörler 19. yüzyılın sonlarında ticari ve güvenilir bir şekilde kullanılmaya başlamış ve günümüz tesislerinin en önemli ekipmanlarından biridir (Areva 2008).

Güç transformatörlerinin üretimi ve kullanımı konusunda ilk olarak kullanılmaya başlanmalarından itibaren temel prensip olarak fazla bir değişiklik olmamıştır. Ancak gelişen teknolojiler ve enerji tüketimindeki artışa paralel olarak

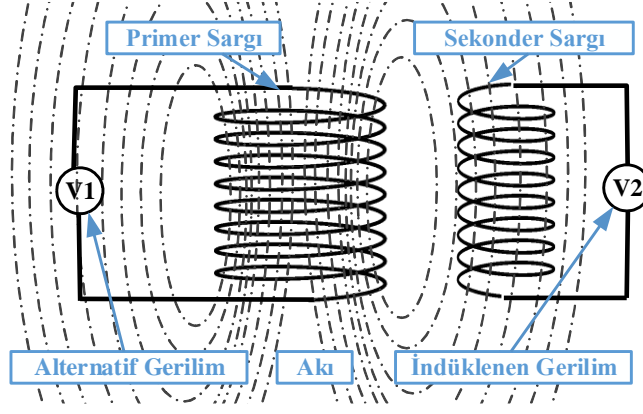
transformatörün güç seviyelerinde önemli artışlar olmuştur. İlaveten koruma düzen ve ekipmanlarında da büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmelere bağlı olarak transformatörlerde olası arızaların önüne geçilmesi, arızaların mümkün olduğunca erken teşhis edilmesi ve gerekli bakım/onarımların uygulanması için birçok test ve arıza tanılama yöntemleri geliştirilmiştir.

2.1 Transformatörlerin Çalışma Prensibi

Transformatörler, Faraday'ın elektrik alan ile manyetik alan arasındaki ilişkiyi ortaya koyan, elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışırlar. Bu kanuna göre manyetik akıda zamana göre meydana gelen değişim o alan içerisindeki iletkende indüklenen gerilimle doğrudan orantılıdır. Eğer bir iletken zamana göre değişen bir akım geçiyorsa iletkenin etrafında zamanla değişen manyetik bir alan oluşur. Şekil 2.1'de transformatörün temelini oluşturan bir sargı etrafında oluşan manyetik alan ve kuvvet çizgileri görülmektedir. Buradan manyetik alanın yönünü ve kuvvetini gösteren kuvvet çizgileri ile oluşan alan rahatlıkla anlaşılabilir. Birinci sargının yakınına, manyetik alan çizgilerinin bir kısmını çevreleyecek şekilde ilkinden bağımsız bir sargı daha getirilirse, ikinci sargıda elektromanyetik indüksiyon prensibine göre bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilimin miktarı çevrelediği manyetik akı miktarı ile doğru orantılıdır. Elektromotor kuvvet ve manyetik akı arasındaki ilişki denklem (2.1)'de verilmiştir.

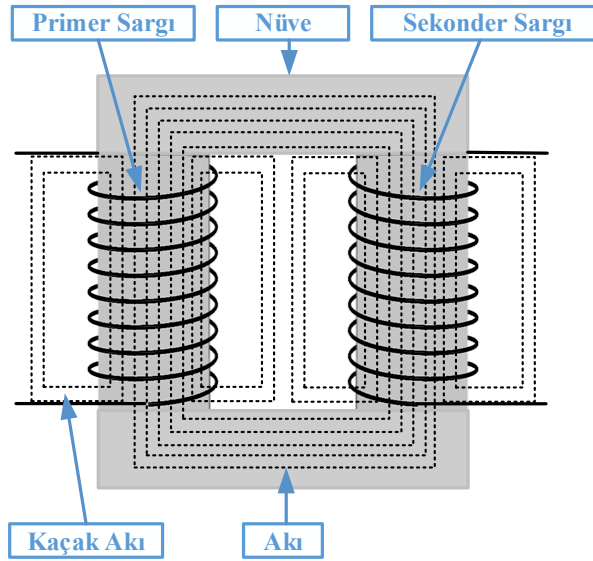
$$\varepsilon = - \left(\frac{d\Phi_B}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Burada ε elektromotor kuvveti, Φ_B ise manyetik akıyı temsil etmektedir.



Şekil 2.1: Manyetik alan kuvvet çizgileri.

Transformatörde manyetik alanı meydana getiren sargıya birincil (primer) sargı, değişken manyetik alan sayesinde üzerinde gerilim indüklenen sargıya da ikincil (sekonder) sargı denir. Transformatörlerin bu enerji dönüşümü verimli bir şekilde yapması manyetik akının sekonder sargıya aktarımına bağlıdır. Dolayısıyla primer sargı tarafından üretilen akının ne kadarı sekonder sargıya aktarılırsa verimde o kadar yüksek olur. Bu akı aktarımını mümkün olduğu ölçüde artırmak amacıyla transformatörlerde primer ve sekonder sargılar demir ya da çelik bir nüve etrafına sarılırlar. Şekil 2.2’de demir nüveli bir transformatörün genel prensip şeması gösterilmiştir. Demirin manyetik geçirgenlik katsayısı havaya göre 10000 kat daha fazladır ve üretilen akının büyük bir bölümü nüve yolunu takip eder. Böylelikle sekonder sargının sarım sayısına bağlı olarak birincil sargıya uygulanan gerilimle orantılı bir gerilim dönüşümü elde edilmiş olur.



Şekil 2.2: Demir nüveli transformatör prensip şeması.

Sargıların sarım sayısı ve gerilimleri arasındaki ilişki denklem (2.2)'deki gibi ifade edilir. Burada V_1 ve V_2 sargıların gerilimlerini, I_1 ve I_2 sargılardan geçen akımları ve N_1 ve N_2 de sarım sayılarını ifade etmektedir.

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

Bir transformatörün verimini hesaplamak için, transformatörün giriş ve çıkış güçleri mutlaka bilinmelidir. Transformatörün giriş gücü primer sargısına uygulanan gerilim ve akımın çarpımıdır. Çıkış gücü ise sekonder sargıdan elde edilen gerilim ve akımın çarpımına eşittir. Çıkış gücü ve giriş gücü arasındaki fark transformatörde meydana gelen kayıplar dolayısıyla oluşur. Transformatörün verimi denklem (2.3)'deki standart verim denklemi yardımıyla hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} * 100 \quad (2.3)$$

2.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması

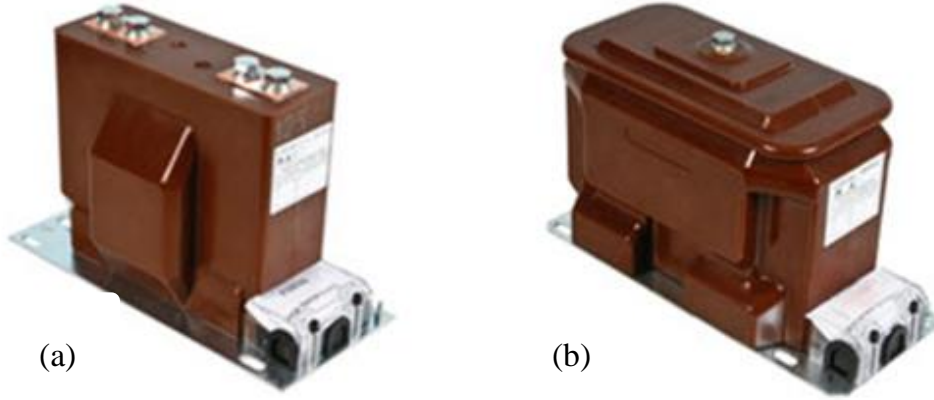
Transformatörler yapısı, sargı tipi, soğutma sistemi, faz sayısı ve kullanım amacı gibi çok farklı tespit kriterlerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Güç transformatörlerini diğer transformatörlerden ayıran en önemli özellikler yalıtım sistemleri ve yüksek güç seviyeleridir. Bu bölümde transformatörlerin sınıflandırılması yapılırken kullanım amacı ve yalıtım sistemi esası dikkate alınmıştır.

2.2.1 Transformatörlerin Kullanım Amacına Göre Sınıflandırılması

2.2.1.1 Ölçü Transformatörleri

Ölçü transformatörleri, konvansiyonel ölçü aletleri ile doğrudan ölçülemeyecek büyüklükteki akım ya da gerilimin ölçülmesi için kullanılır. Şekil 2.3'de örnek bir akım ve gerilim transformatörleri görülmektedir. Her ikisinin de

Çalışma prensibi benzerdir. Akım ya da gerilim yüke bağlı olmaksızın ve aralarında faz farkı oluşturmadan ölçülebilecek bir seviyeye dönüştürülür.



Şekil 2.3: l transformatörleri a) Akım transformatörü, b) Gerilim transformatörü.

Akım transformatörlerinin primer sargıları kalın telden az sarımlı, sekonder sargıları ise ince telden çok sarımlı yapılır. Giriş akımları 10-2000 amper, çıkış akımları ise genellikle 1-5 amper arasındadır. Dönüştürme oranına göre primer sargıdan ne kadar akım geçtiği rahatlıkla belirlenir.

Gerilim transformatörleri, genellikle 600 volttan daha büyük gerilimlerin ölçülmesi için kullanılmaktadır. Dşrc bir transformatör gibi yapırlar ve primer sargıları ölçülmek istenilen yüksek gerilim şebekesine bağlanır. Sekonder tarafları ise ölçü aletlerine bağlanır. Bu l aletlerinin i dirençlerinin çok yüksek olması gerekmektedir.

2.2.1.2 Yalıtım Transformatörleri

İzolasyon transformatörü olarak adlandırılan yalıtım transformatörleri bire bir dönüştürme oranına sahiptirler. Bu transformatörler daha ziyade, primer ve sekonder sargılarına bağlı bulunan devre ve sistemleri elektriksel olarak yalıtım amacıyla kullanılır. Böylelikle, şebeke veya sistemde oluşan elektromanyetik girişimlerin iletim yoluyla yayılmasının da önüne geçilmiş olur. Ayrıca laboratuvar gibi elektrik çarpılması riski bulunan yerlerde ve şebekede nötr noktası bulunmayan durumlarda nötr noktası elde etmek amacıyla da kullanılır.

2.2.1.3 Dağıtım Transformatörleri

Dağıtım transformatörleri, enerji iletim sistemlerinin tüketici ile olan ara kısımda bulunan önemli güç sistemi aygıtlarındandır. Enerjinin nihai tüketiciye dağıtılmasında orta gerilim seviyesinden düşük gerilim seviyesine dönüşümü (33 /0,4 kV) sağlayan bu transformatörler genellikle 500 kVA değerinin altındaki güçlerde bulunurlar. Daha yüksek güçte kullanılan dağıtım transformatörleri bulunabilse de transformatörün türü daha ziyade kullanım amacına göre belirlenir. Dağıtım transformatörleri genel olarak orta gerilim seviyesinin altı gerilimin dağıtımında, yüzde 50-75 arası verimlerde çalışırlar. Manyetik kayıpları azdır. Küçük boyutlarda, montajı kolay olacak şekilde üretilirler. Dağıtım şebekelerinde kullanıldığı için yük değişimlerinden direkt etkilenirler. Bu yüzden 24 saatlik çalışma periyodu düşünüldüğünde tam yüklerinin en fazla yüzde 75'i kadar yükte çalışırlar.

2.2.1.4 Güç Transformatörleri

Güç transformatörleri genel olarak elektriğin üretildiği yer ile dağıtım şebekesi arasında bulunan 500 kVA değerinden başlayarak 200 MVA ve üstü güçlere kadar bulunan transformatörlere verilen isimdir. Güç transformatörlerinin hangi güç aralıklarında bulunduğu ile ilgili kesin sınırlar yoktur. Kullanıldığı yere göre aynı güç değerlerinde dağıtım ve güç transformatörleri bulunabilir. Güç transformatörleri elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde çok farklı gerilim seviyeleri bulunduğu için genellikle 33 kV üstü her gerilim seviyesini birbirine bağlayacak şekilde bulunur. Genel olarak tam yük altında çalışırlar. Bu yüzden bakır kayıplarını en aza indirecek şekilde tasarlanarak yüksek verimli olarak imal edilebilir. Yüksek güçlü transformatörlerde giriş gücünün %99,5'ini çıkışa aktarabilmek mümkündür.

2.2.2 Transformatörlerin Yalıtım Sistemine Göre Sınıflandırılması

2.2.2.1 Kuru Tip Transformatörler

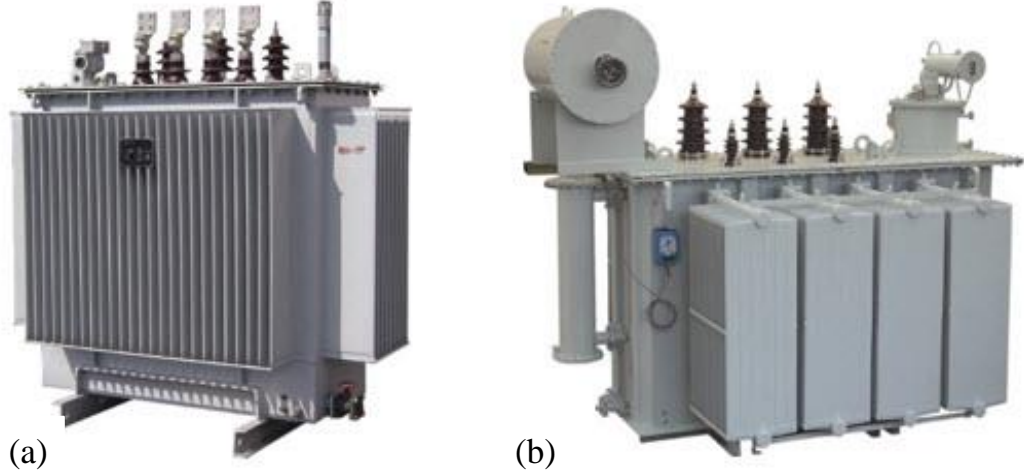
Transformatörler yalıtımı sağlamak ve soğutma işlemini kolaylaştırmak için çeşitli şekillerde üretilirler. Kuru tip transformatörlerde yalıtım için bir sıvı bulunmamaktadır. Genel yapısı Şekil 2.4’de gösterildiği gibidir. Soğutma işlemi transformatörün hava ile temasıyla ya da fan ile sağlanır. Kuru tip transformatörlerin nüveleri oksitlenmeye karşı boyanır. Sargıları cam elyaf destekli reçineyle kaplanmış, dış etkilere karşı yalıtılmıştır. Ağır çalışma koşulları için kullanılırlar ve yanıcı bir sıvı bulunmadığı için yangına karşı dayanıklıdırlar. Genellikle yeraltı transformatör merkezlerinde tercih edilirler ve sıvı yalıtımlı transformatörler kadar bakım gerektirmezler. Yalıtım problemleri nedeniyle genellikle orta gerilim seviyelerine kadar imal edilir, yüksek gerilim seviyelerinde kullanılmazlar.



Şekil 2.4: Kuru tip transformatör.

2.2.2.2 Sıvı Yalıtımlı Transformatörler

Sıvı yalıtımlı transformatörler, yalıtım ve soğutma amacıyla sargılarının bulunduğu bir tank içerisinde yağ ihtiva eden transformatörlerdir. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi atmosfere tam kapalı ve genişleme tankı bulunan atmosfere açık olmak üzere iki çeşidi vardır. Her iki çeşitte de sargılar tamamıyla yalıtım yağı içerisinde. Atmosfere tam kapalı tip transformatörler yağın genişleme ve büzülmesine müsaade edecek şekilde petekli olarak imal edilirler. Atmosferle temas olmadığı için transformatörün içerisi oksitlenmez ve nemden etkilenmez. Bu sebeple genişleme tankı bulunan transformatörlere göre daha uzun ömürlüdürler.



Şekil 2.5: Sıvı yalıtımlı transformatörler a) Atmosfere kapalı b) Atmosfere açık.

Genleşme tankı bulunan atmosfere açık transformatörler ise genellikle daha yüksek güçlerde kullanılırlar. Transformatörü nemden korumak için yağın atmosferle olan teması, genellikle bir nem tutucu sistem üzerinden gerçekleşir. Yine de atmosferle olan bu temastan dolayı periyodik olarak bakımları yapılmalı ve aktif kısımları gerektiğinde kurutulmalıdır.

2.2.2.3 Gaz Yalıtımlı Transformatörler

Gaz yalıtımlı transformatörlerde genel olarak SF₆ (Sülfür hekzaflorid) gazı kullanılır. SF₆ gazı yüksek dielektrik dayanımı, ısı iletim yeteneği, ark söndürme özelliği, kimyasal kararlılığı nedeniyle transformatör ve diğer elektrik şalt donanımlarında kullanılmaktadır. Ayrıca SF₆ gazı çevre açısından kalıcı bir kirletici olmadığı için transformatörlerde kullanımının insan ve çevre sağlığı açısından hiçbir zararı yoktur. Şekil 2.6'da örnek bir gaz yalıtımlı transformatör gösterilmiştir.

Gaz yalıtımlı transformatörler yangın çıkma ihtimali yüksek olan yerlerde ya da yangın anında yangının mümkün olduğu ölçüde yayılmasının engellenmek istendiği durumlarda kullanılır. Transformatörde kullanılan gaz, transformatörün daha küçük boyutlarda üretilebilmesini mümkün kılar. Böylelikle gaz yalıtımlı transformatörler tesis alanı açısından sıkıntılı olan büyük şehirlerde, özellikle Doğu Asya ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.6: Gaz yalıtımlı transformatör.

2.3 Güç Transformatörlerinde Bulunan Donanımlar

2.3.1 Nüve

Transformatörde manyetik akıya yol sağlayan ve yönlendiren, aralarında yalıtkan bir malzeme bulunan ince silisli saçların üst üste paketlenmesi ile oluşturulmuş yapıya nüve ya da çekirdek denir. Nüve çeliği sıcak ya da soğuk haddelenmiş olabilir. 0.23 mm ile 0.36 mm arasında değişebilen kalınlıktaki silisli saçların paketlenmesi ile oluşturulan nüve dikdörtgen ya da dairesel olabilir. Dairesel yapılı nüve genellikle yüksek güçlü transformatörlerde kullanılır. Şekil 2.7’de farklı genişlikteki silisli saçlardan oluşturulmuş dairesel yapılı bir nüve görülmektedir.

Transformatör içerisindeki diğer donanımlar gibi nüvenin de sebep olduğu sıcaklığın doğru bir şekilde dağıtılması gerekir. Nüvenin yapıldığı çeliğin sıcaklığa dayanımının iyi olmasına rağmen temas halinde olduğu yalıtım malzemeleri yüksek sıcaklıklara dayanamazlar. Bu sebeple gerekli olduğu durumlarda nüvenin içerisinde nüveyi soğutacak boru şeklinde bir yapı da yerleştirilebilir.

Nüve kendisini tutan manyetik yapıdan yalıtılmalı ve tek bir noktadan topraklanmalıdır. Birden çok topraklama noktası dolaşım akımlarına yol oluşturacak

ve güç kaybı ile birlikte nüvenin ısınmasına sebep olacaktır. Ayrıca, topraklama noktasının test yapılacağı zaman topraktan ayrılabilir yapıda olması gerekir.



Şekil 2.7: Güç transformatörü nüvesi.

2.3.2 Sargılar

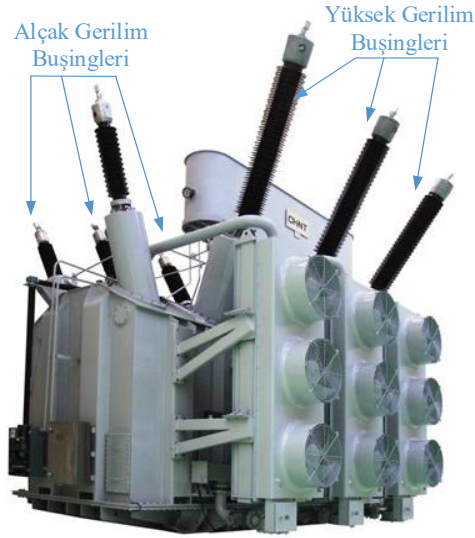
Güç transformatörü sargıları, genellikle yüzeyi yalıtılmış bakır iletkenlerin nüve etrafına sarılması ile oluşturulur. Primer ve sekonder sargı arasında herhangi bir elektriksel bağlantı yoktur ve çoğunlukla nüvenin üzerine üst üste sarılırlar. Sargıları oluşturan iletkenler genellikle bakırdır ve dikdörtgen kesit alanına sahiptir. Birden çok bakır iletken paralel sarılıp, sargı sonunda uçları birleştirilebilir. Böyle bir durumda paralel kollarda meydana gelecek dolaşım akımlarını engellemek için belirli aralıklarla bu iletkenlerin birbiri ile yerinin değiştirilmesi gerekir. Eğer bu transpoze işlemi yapılmazsa, konumlarından dolayı manyetik alandan farklı etkilenip farklı gerilimlere sahip olan kollar arasında dolaşım akımları meydana gelebilir. Bu sürekli yer değiştirme işlemi temin etmek için Şekil 2.8’de gösterildiği gibi sürekli transpozeli kablolar imal edilmiştir. Bu amaç için oldukça pratik bir kullanım sağlamaktadır.



Şekil 2.8: Sürekli transpozeli kablo.

2.3.3 Buşingler

Güç transformatörlerinde, enerji kablolarının transformatöre giriş ve çıkışlarında, iletkenlerin transformatör gövdesiyle yalıtımını sağlamak için yerleştirilen izolatlara buşing denir. Bu cihazlar sayesinde elektriksel yönden güvenli bir geçiş sağlanmış olmaktadır. Şekil 2.9’da güç transformatöründe kullanılan alçak ve yüksek gerilim buşingleri gösterilmiştir. Güç transformatörlerinde kullanılan buşingler genellikle yüksek kaliteli porselenden yapılırlar. Buşinglerin boyları ve yüzey uzunlukları transformatörün çalışacağı gerilim seviyesine göre belirlenir. Transformatörle olan bağlantısında ise buşing metal kısım ile doğrudan temas etmeyecek şekilde yapılmaktadır. Bunu sağlamak için kullanılacak malzemenin, metal kısımlarla kimyasal reaksiyona girmeyen ve genleşmelerden etkilenmeyen özellikte olması istenir.

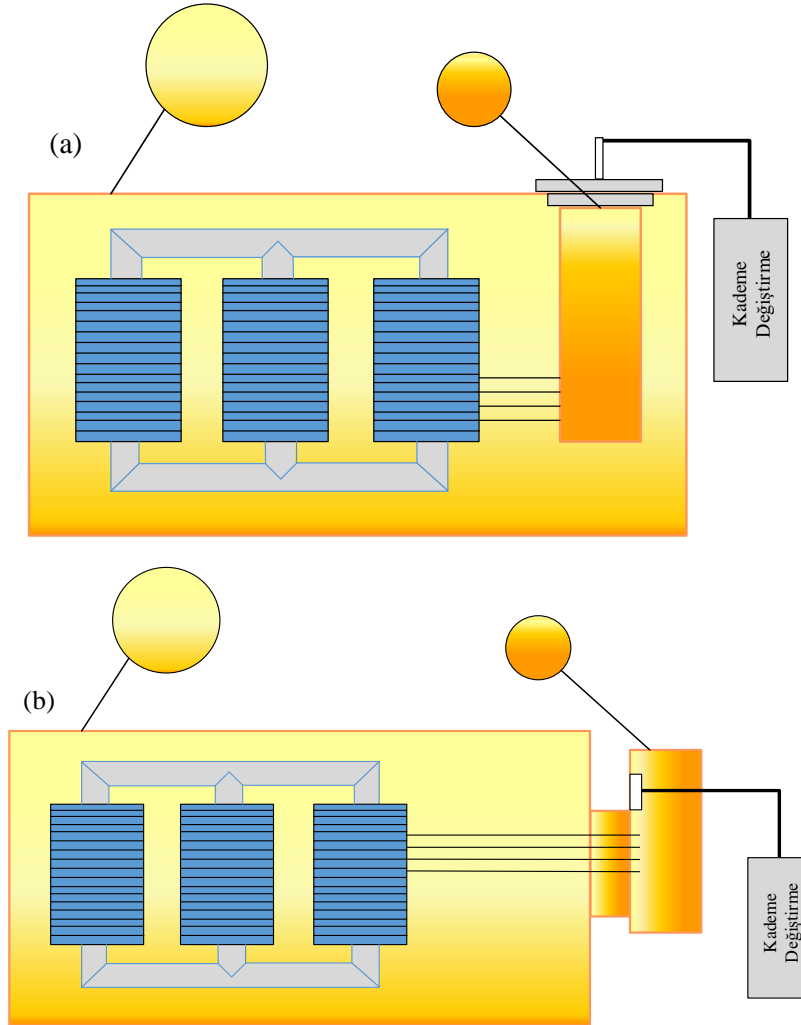


Şekil 2.9: Güç transformatörü buşingleri.

2.3.4 Kademe Değiştirici

Güç transformatörlerinde, transformatörün farklı yüklenme koşullarında gerilimde meydana gelebilecek dalgalanmaları düzeltmek için genellikle birincil sargının sarım oranlarının değiştirilebilir olması istenmektedir. Bu işlemi gerçekleştiren düzeneğe de kademe değiştirici denir. Yük altında ve yüksüz olmak üzere iki farklı şekilde bulunabilir. Büyük güçlü transformatörlerde yük altında

kademe değiştirme işlemi için genellikle harici bir kademe değiştirme sargısı bulunur. Kademe değiştirici sargılarını ana sargıya ekleyerek ya da çıkartarak gerilim ayarlaması yapılabilir. Kademe değiştirme sargıları Şekil 2.10'de gösterildiği gibi ana tank içerisinde ya da dışarısında harici bir tank içerisinde bulunabilir (Areva 2008).

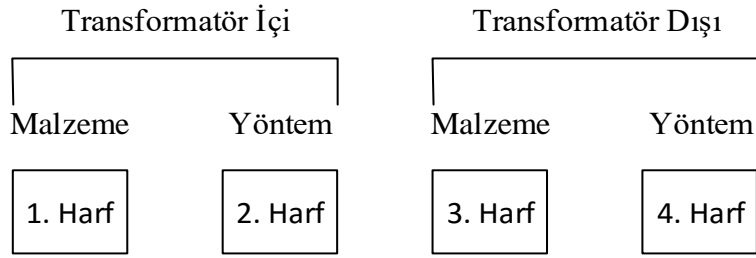


Şekil 2.10: Kademe değiştirici a) Ana tank içerisinde b) Dışarıda.

2.3.5 Soğutma Donanımı

Hemen hemen tüm elektrik makinalarında olduğu gibi transformatörlerde de bir güç kaybı meydana gelir ve genellikle ısı olarak açığa çıkar. Bu ısı transformatörün çalışma performansını ve verimini olumsuz yönde etkiler. Bu yüzden, ısının değişik yol ve yöntemlerle uzaklaştırılması gerekir. Transformatör nüvesinde meydana gelen eddy/histerezis kayıplarıyla, sargılarda oluşan bakır kayıpları oluşan bu ısının ana kaynağıdır. Kuru tip transformatörlerde soğutma direkt olarak hava ile sağlanmaktadır.

Fakat sıvı yalıtımlı transformatörlerde, ısının dışarıya transferi bir sıvı vasıtasıyla gerçekleştirilir. Sıvı yalıtımlı güç transformatörlerinde soğutma sistemleri, ısının hangi malzeme ile nasıl transfer edildiği ve hangi malzeme ile nasıl soğutulduğuna göre farklı şekillerde nitelendirilir. Soğutma sisteminin yapısına göre isimlendirme biçimi Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Bu isimlendirmede kullanılacak harfler anlamları ile birlikte Tablo 2.1’de verilmiştir. Genellikle bu harflerin etiketlemede kullanılan malzemenin ya da yöntemin İngilizce baş harfi kullanılır (Harlow 2007).



Şekil 2.11: Soğutma sistemi isimlendirmesi.

Tablo 2.1: Soğutma sistemi isimlendirmelerinin açıklamaları.

		Harf	Açıklama
Transformatör İçi	İlk Harf	O	Parlama noktası ≤ 300 °C olan yalıtım sıvıları
		K	Parlama noktası ≥ 300 °C olan yalıtım sıvıları
		L	Parlama noktası ölçülemeyen yalıtım sıvıları
	İkinci Harf	N	Doğal dolaşım
		F	Zorlamalı dolaşım (sıvı pompası)
		D	Zorlamalı ve yönlendirilmiş dolaşım
Transformatör Dışı	Üçüncü Harf	A	Hava
		W	Su
	Dördüncü Harf	N	Doğal dolaşım
		F	Zorlamalı dolaşım (Fan ya da su pompası)

2.4 Güç Transformatörlerinde Bulunan Standart Koruma Aksesuarları

2.4.1 Basınç Emniyet Vanası

Basınç emniyet vanası, genellikle transformatörün kapağına yerleştirilir. Tank içerisinde meydana gelebilecek ani basınç artışında, basınç emniyet vanası anında

açılarak yüksek basınçlardan dolayı oluşması muhtemel zararlardan transformatörü korur. Büyük güçlü transformatörlerde, gövde tankı büyük ve haliyle içindeki yağ miktarı da çok olacaktır. Transformatör içerisinde her hangi bir elektriksel hata ve sorun durumunda anlık çok miktarda yüksek basınçlı gazlar oluşur. Bu sebeple, özellikle büyük güçlü transformatörlerde birden çok basınç emniyet vanası bulunabilir.

2.4.2 Buchholz Rölesi

Buchholz rölesi güç transformatörlerinde zamanla açığa çıkan gazları biriktirmek ve anlık artışlarını tespit edebilmek için genleşme tankı ile ana tank arasındaki boru hattına yerleştirilir. Transformatörde meydana gelen arızalar neticesinde açığa çıkan gazlar buchholz rölesinde birikmeye başlar. Buchholz rölesi, bu biriken gazların basıncı belli bir değeri aşarsa uyarı verir. Eğer gaz basıncı tehlike sınırına gelirse, buchholz rölesi transformatörü devreden çıkararak korumaya alır.



Şekil 2.12: Buchholz rölesi.

2.4.3 Nem Tutma Sistemi

Nem tutma sistemi, transformatör tankının atmosfere açılan çıkışına yerleştirilen ve geçen havanın nemini tutan silika jel adı verilen malzeme ile doldurulmuş bir sistemdir. Nemin transformatöre girişini önlediği için yalıtım yağının ve dolayısıyla transformatörün nemden dolayı zarar görmesini engeller.

Transformatörlerde kullanılan nem tutucu sistemi Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Başlangıçta mavi olan silika jeller nem aldıkça pembeleşir. Pembe olan silika jellerin hangi taraftan pembeleşmeye başladığına bakılır ve yenisi ile değiştirilir. Dolayısıyla pembeleşmenin nerede olduğu da bir anlamda nemin kaynağı ve transformatörün durumu hakkında bilgi verir.



Şekil 2.13: Transformatörler için nem tutucu cihaz.

2.4.4 Yağ Seviye Göstergesi

Yağ seviye göstergesi, yağ seviyesi soğutma ve yalıtım açısından çok önemli olduğu için yağlı tip güç transformatörlerinde standart olarak bulunması zorunlu bir donanımdır. Genleşme tankı içerisinde yağ seviyesinin değişmesiyle hareket eden bir pistonu bulunan ve buna bağlı olarak ibresi değişerek yağ seviyesini gösteren bir cihazdır. Şekil 2.14'de yuvarlak yapılu yağ seviyesi ölçü aleti görülmektedir.



Şekil 2.14: Yağ seviye göstergesi.

2.4.5 Topraklama Terminalleri

Güç transformatörlerinde bulunan standart donanımlardan birisidir. Tank ile toprak arasındaki bağlantı direkt olarak ya da bir akım transformatörü vasıtası ile yapılabilir. Akım transformatörü kullanılmasının sebebi nötr sistemlere topraklama yapıldığı zaman meydana gelebilen yüksek dolaşım akımlarıdır. Bir akım transformatörü ve bir akım rölesi bağlanarak bu akımlar kontrol edilir ve topraklama arızası meydana gelmesi engellenmiş olur.

2.4.6 Diğer Donanımlar

Güç transformatörlerinde, transformatörün durumunu gözlemlemek ya da yapılacak işlemler ve testleri kolaylaştırmak amacıyla çok çeşitli donanımlar bulunmaktadır. Bu donanımlardan bazıları standart olarak bulunmak zorunda iken bazıları da transformatörün türüne ya da işletmenin tercihinine göre transformatöre yerleştirilir. Güç transformatörünün türü ne olursa transformatör bilgi tabelası, termometre cebi, yağ tahliye, örnek alma vanası, radyatör, çekme/kaldırma halkaları ve priz standart olarak bütün güç transformatörlerinde bulunmak zorundadır (Sezer 2014). Ancak bazı donanımlar güç transformatörünün yapısına ve isteğe bağlı olarak değişebilir. Örneğin transformatörün soğutma sistemine göre hava ya da su soğutma sistemi, yağ veya su dolaşım göstergeleri, pompa veya fan vb. bulunabilir.

3. YAĞDA ÇÖZÜNMÜŞ GAZ ANALİZİ VE DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Yağda çözünmüş gaz analizi (YGA) tekniği herhangi bir yağın içerisinde çözünmüş bulunan gazların türünü ve miktarlarını belirlemeye yarayan bir yöntemdir. Yağ içerisinde çözünmüş olan gazların türlerinin ve miktarlarının bilinmesi, yağ içerisinde bulunan donanımın durumu hakkında bilgi verir. Bu teknik yağla doldurulmuş güç transformatörlerinin durumlarının izlenmesi ve arızalarının belirlenmesi açısından dünyaca kabul görmüş oldukça önemli ve kullanışlı bir yöntemdir.

Güç transformatörlerinde bulunan yağ, transformatörün soğutulması ve elektriksel yalıtımı sağlamak amacıyla kullanılır. Bu yüzden yağın yapısında ya da içeriğinde meydana gelebilecek değişiklikler transformatörün çalışmasını doğrudan etkiler. Transformatörde meydana gelen korona boşalması, ark olayları, ısınma, düşük ve yüksek enerjili deşarjlar transformatör içerisinde bulunan yağın deforme olmasına ve çoğunlukla da selülozdan meydana gelen yalıtım malzemelerinin parçalanmasına sebep olur. Parçalanan bu yalıtım malzemeleri temel olarak hidrojen (H_2), metan (CH_4), asetilen (C_2H_2), etilen (C_2H_4), etan (C_2H_6), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO_2) gazlarının çeşitli yoğunluklarda ortaya çıkmasına ve transformatör yağının niteliğinin değişmesine yol açar (Sezer 2014). Transformatör yağının yapısının değişmesi, yağın işlevini yerine getirememesine ve transformatörün zaman içerisinde ciddi tehlikelerle karşı karşıya gelmesine sebep olur. Bu tür arızaların önüne geçmek ve transformatörün verimli bir şekilde çalışmaya devam etmesini sağlamak amacıyla transformatör yağından belirli aralıklarla numune alınarak yağda çözünmüş olan gazların miktarları ölçülür. Bu ölçüm sonuçları çeşitli değerlendirme yöntemleriyle değerlendirilir ve transformatörün durumu hakkında bilgi elde edilir. Bu bölümde güç transformatörlerinde kullanılan yalıtım yağı çeşitleri ve gaz oluşumu, transformatörden yağ numunesinin alınması ve dikkat edilecek hususlar ele alınacaktır. Ayrıca, YGA sonuçlarından ölçülen gaz miktarlarına göre arıza tanılmasında kullanılan başlıca klasik yöntemler anlatılmıştır.

3.1 Güç Transformatörlerinde Kullanılan Yağlar

Güç transformatörlerinde, transformatörün kullanım yerine ve amacına göre çeşitli yalıtım sıvıları soğutma ve yalıtım maksadıyla kullanılmaktadır. Transformatörlerin yerleşim yerlerine yakınlığı ve çevresel koşullar düşünüldüğünde transformatör yağı seçiminde birçok kıstas dikkate alınmalıdır. Bu sebeple, transformatörde kullanılacak yağ belirlenirken, transformatörün çalışmasını etkileyen faktörlerin yanı sıra insan sağlığına ve çevreye etkileri ve herhangi bir yangın meydana gelmesi durumundaki riskler de göz önünde bulundurulur. Gerek transformatörün çalışmasını etkileyen faktörleri iyileştirmek gerekse yağın çevresel etkileri düşünülerek çok çeşitli yağlar geliştirilmiştir. Elde edildiği hammadde ve hammaddenin özelliklerine göre transformatörde kullanılan yağları çeşitli sınıflara ayırmak mümkündür. Bu yağların genel özellikleri (Rozga 2013) Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağları ve genel özellikleri.

Özellik	Mineral Yağlar	Sentetik Yağlar			Bitkisel Yağlar
		Sentetik Ester Yağlar	PCB	Silikon Temelli Yağlar	
Akma Sıcaklığı (°C)	-50	-60	-40	-50	-21
Yanma Sıcaklığı (°C)	170	316	400	370	360
Parlama Sıcaklığı (°C)	150	260	Yok	268	316
Biyolojik Çözünürlük (%)	10	89	-	<10	97

3.1.1 Mineral Yağlar

Güç transformatörlerinde en çok kullanılan yalıtım sıvılarıdır. Mineral yağlar petrol türevi yağlardır ve içlerinde oksitlenme, aşınma ve yanmayı önleyici çeşitli kimyasallar bulunur. Bu katkıların oran ve içeriği yağın kullanım alanına göre değişir.

Güç transformatörlerinde mineral yağların kullanımı neredeyse transformatörün ilk kullanıldığı yıllarda başlamıştır denilebilir. Mineral yağlar, parafin ve naftalin temelli olmak üzere ikiye ayrılabilir. En çok kullanılan naftalin temelli

mineral yağlardır ve parafin temelli yağlara göre daha düşük sıcaklıklarda kullanılabilirler. Parafin temelli mineral yağ oksitlenmeye karşı daha dayanıklıdır ve yüksek sıcaklıklarda görece daha iyi özellikler sergilemektedir. Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelerle, ham petrolün rafine edilmesi aşamasında eklenen kimyasallarla birlikte her iki mineral yağ tipi de standartları sağlar hale gelmiştir ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Mineral yağların bilinen en önemli avantajları; yüksek elektriksel dayanım, iyi soğutma özelliği, yaşlanma süresinin uzunluğu ve arzu edilen viskoziteye sahip olmasıdır. Transformator içerisinde kullanılan katı yalıtkan malzemelerle iyi uyum sağlar. Birçok ülkede üretildiği için diğer transformator yağlarına göre daha ucuzdur. Ana dezavantajı ise transformatorde bir kaçak meydana gelmesi durumunda düşük biyolojik çözünebilirliği sebebiyle çevreye verdiği zarardır. OECD standartlarına göre bir yağın biyolojik çözüner olarak sınıflandırılabilmesi için 28 günde %60'dan fazla çözünmesi gerekmektedir (OECD 1992). Mineral yağlarda bu rakam %10'lar civarındadır. Bu düzey mineral yağların çevreye olumsuz yönde kalıcı etkiler oluşturmalarına sebep olur (Rozga 2013). Ayrıca, düşük yanma ve parlama sıcaklığı sebebiyle yangın riskinin olduğu ve yağın yüksek sıcaklıklara çıkacağı yerlerde kullanılamaz.

3.1.2 Sentetik Yağlar

Sentetik yağlar yenilenebilir olmayan, petrolden elde edilen yağlara bir alternatif sunmak amacıyla geliştirilen, kimyasal yollarla elde edilen yağlardır. Yüksek dielektriksel ve sıcaklık dayanımının yanı sıra yağda tortu oluşumu ve yaşlanması mineral yağlara göre daha azdır. Ayrıca parafin içermediği için düşük sıcaklıklarda rahatlıkla kullanılabilir.

3.1.2.1 Sentetik Ester Yağlar

“*Sentetik ester yağlar*” çeşitli kimyasallar kullanılarak elde edilirler. Mineral ve bitkisel yağlara göre akma noktaları daha düşüktür. Böylelikle daha düşük sıcaklıklarda kullanılabilmesi mümkündür. Mineral yağlardan daha yüksek, bitkisel yağlardan daha düşük yanma ve parlama sıcaklığına sahiptir. 28 günde %87 biyolojik

çözünürlüğe sahiptir (Rozga 2013) ve OECD'nin biyolojik çözünürlük standartlarını sağlar.

3.1.2.2 Poliklorlu Bifeniller

Günümüzde kullanılan bazı transformatörlerde yalıtım sıvısı olarak “*poliklorlu bifenil*” (PCB) isimli sentetik organik bir kimyasal kullanılmaktadır. PCB'ler her biri altı karbon atomu içeren iki benzen halkasından oluşan yapıya bağlı 1 ile 10 arası klor atomunun bağlanması ile oluşan organik bileşiklerdir. PCB'ler yüksek toksid içermeleri ve kalıcı organik kirletici olarak sınıflandırılmaları nedeniyle 1979'da Amerika'da ve 2001'de “*Kalıcı Organik Kirletici Maddelere İlişkin Stockholm Sözleşmesi*”nde (UNEP 2001) üretimi yasaklanmıştır. Sözleşme hükümlerine göre taraf olan 125 ülke, PCB içeriği 50 ppm ve üzeri olan teçhizatın belirlenmesi, etiketlenmesi ve kullanımının yasaklanmasını taahhüt etmişlerdir. Mart 2006'da yapılan bir envanter çalışmasına göre Türkiye'de çeşitli kuruluşlar bünyesinde 154 adet PCB içeren transformatör bulunmaktadır (Acara 2006). Yalıtım özellikleri ve yangına karşı dayanımı çok iyi olmasına rağmen üretilmesi yasaklandığı için yalnızca eski transformatörlerde bulunmaktadır.

3.1.2.3 Silikon Temelli Yağlar

Silikon temelli yağlar, sentetik yağlardandır ve transformatörde kullanılmak için çeşitli avantajlara sahiptir. Köpürmezler, dielektrik dayanımları iyi ve oksitlenme dirençleri yüksektir. Yüksek yanma sıcaklığına sahiptirler ve transformatördeki yapı malzemeleri ile iyi uyum sağlarlar. Bütün özellikleri ile PCB'lere alternatif olabilecek niteliktedirler. Silikon temelli yağlar yanabilirler fakat yakıcı kaynak ortadan kalktığında kendiliğinden sönerler.

3.1.3 Bitkisel Yağlar

Bitkisel yağlar başlangıç olarak transformatör yağının çevresel etkileri düşünülerek geliştirilmeye başlanmış yağlardır ve “*doğal ester yağlar*” olarak da

isimlendirilirler. Genellikle kanola, soya fasulyesi ve mısırdan üretilirler. Doğada tamamen çözünüp zehirli bileşik içermezler. En büyük dezavantajları yüksek akma noktası sıcaklığı ve kötü oksitlenme özelliğidir. Transformatör yağları içerisinde doğa ile en uyumlu yağlardır denilebilir. 28 günde %99,9'a varan oranda çözünebilme özelliği ile OECD'nin biyolojik çözünürlük standartlarını fazlasıyla sağlar (Rozga 2013).

3.2 Güç Transformatöründe Gaz Oluşumu

Güç transformatörlerinde kullanılan yağlar değişik yapıda ve türde yüzlerce hidrokarbon molekülünün bir karışımıdır. Karbon ve hidrojen atomlarının çok farklı kombinasyonları mevcuttur. Bu kombinasyonların değişik şekillerde bir araya gelmeleri ile yağ molekülleri oluşur. Transformatörde herhangi bir arıza meydana gelmesi durumunda yeterli miktarda ısı enerjisi açığa çıkarsa karbon atomları arasındaki ya da karbon ve hidrojen atomları arasındaki bağlar kopar. Bu bağların kopması ya da yeniden oluşması için gereken enerji miktarları Tablo 3.2'de verilmiştir (Sezer 2014).

Tablo 3.2: Karbon ve hidrojen atomları arasındaki bağların kopması ya da yeniden oluşması için gereken enerji miktarları.

Bağın Yapısı	Gereken Enerji Miktarı (kJ/mol)
$C - H$	388
$C - C$	607
$C = C$	720
$C \equiv C$	960

Bu kimyasal bağların kopma ya da yeniden oluşması olayları, hızlı ve karmaşık bir dizi reaksiyonla gerçekleşir. Transformatörde ani bir ısı ve elektriksel deşarj olması durumunda, kimyasal tepkimeler sebebiyle öncelikle kararsız kökler ve iyonlar oluşur. Açığa çıkan enerji miktarına bağlı olarak, daha sonra bu küçük gruplardan değişik yapılarda yeni moleküller oluşur. Yeni oluşan bu maddelerin arasında; hidrojen, metan, etan, etilen, asetilen, propan, propilen, bütan ve bütil gibi yanıcı gazlar ve bazı katı bileşikler bulunabilir. Bu gazların oluşabilmeleri için gerekli olan sıcaklıklar ve gerekli olan enerji miktarları Tablo 3.3'de verilmiştir (Sezer 2014).

Tablo 3.3: Gazların oluşabilmeleri için gerekli olan sıcaklıklar ve gerekli olan enerji miktarları.

Gazın Türü	Kısaltması	Yarı Açık Formülü	Oluşum Sıcaklığı (°C)	Oluşum Enerjisi (kJ/mol)
Hidrojen	H ₂	<i>H – H</i>	<500	>338
Metan	CH ₄	<i>H – CH₃</i>	<500	>607
Etan	C ₂ H ₆	<i>H₃C – CH₃</i>	<500	>607
Etilen	C ₂ H ₄	<i>H₂C = CH₂</i>	>500	>720
Asetilen	C ₂ H ₂	<i>HC ≡ CH</i>	>800-1200	>960
Karbon monoksit	CO	-	>105-300	-
Karbondioksit	CO ₂	-	>105-300	-

Tablo 3.3'den de görüldüğü gibi etilenin oluşma sıcaklığı metan ve etana göre daha yüksektir. Asetilen düşük sıcaklıklarda oluşa da yüksek miktarda oluşabilmesi için yağın sıcaklığının 800-1200 °C arasında olması gerekmektedir. Bundan dolayı, bu sıcaklıklar yüksek enerjili deşarjlar sırasında meydana geldiği için transformatör yağında yüksek miktarda asetilen gazının bulunması, yüksek enerjili deşarjın göstergesidir. Kısmi deşarjların enerji düzeyi düşük olduğu için ise yalnızca karbon ve hidrojen atomları arasındaki bağların kopmasına sebep olur. Böylelikle, yağın içerisinde serbest halde çok miktarda hidrojen gazı bulunur.

Yağın oksitlenmesi sırasında oluşan CO ve CO₂'nin miktarı çok düşüktür. Transformatör içerisinde bulunan katı yalıtkanlar olan selülozik yapıdaki kağıt, tahta ve presbort gibi maddelerde bulunan kimyasal bağlar hidrokarbon bağlarına göre oldukça zayıftır. Bu sebeple, düşük sıcaklıklarda başlayan bozunmalar 300 °C'ye ulaşıldığında tamamlanmış olur ve transformatör yağında bulunan CO, CO₂ gazlarının çok büyük çoğunluğu bu bağların parçalanmaları sebebiyle meydana gelir. CO, CO₂ gazlarının oluşumu yalnızca sıcaklıkla değil, aynı zamanda yağ ve kağıttaki nem oranıyla da ilgilidir. Selülozun bozunması sonucunda bu gazların yanı sıra az miktarda hidrokarbon gazları ve furanik bileşikler de oluşur. Yağda çözünmüş gaz analizinin yanında furanik bileşiklerin de analizi yapılarak selülozdaki bozunmanın derecesi daha net anlaşılabilir.

Genel olarak, yağda çözünmüş olan gazlar transformatörün çalışmasını kısa vadede olumsuz yönde çok fazla etkilemezler. Yalnızca oksijen gazı transformatör yağının ve selüloz maddelerin oksitlenmesine, dolayısıyla erken yaşlanmasına sebep olur. Bunun haricinde, yağda çözünmüş olan gazların yüksek miktarda bulunması, transformatördeki bir arızanın sebebi değil sonucudur. Yağda bulunan gazların

giderilmesi arızanın ortadan kaldırılmasını sağlamaz. Bu gazların detaylı bir şekilde incelenmesi arızanın türünün ve nedeninin bulunmasını sağlar.

3.3 Güç Transformatörlerinden Yağ Numunesi Alımı

Transformatör yalıtım yağından numune alınması, YGA yönteminin doğru ve güvenilir sonuç verebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu işlem gerçekleştirilirken, alınan numunenin transformatörü temsil eder nitelikte ve kullanılan teçhizatın temiz olmasına dikkat edilmesi gerekir. Transformatörden yağ numunesi almadan önce yalıtım yağının türü ve niteliği belirlenmeli, örneğin PCB içerip içermediği kesinlikle bilinmelidir. Transformatör yalıtım sıvısı olarak en çok kullanılan mineral yağlar normal olarak PCB içermezler. Transformatörde bulunan yağın türü biliniyorsa yağ numunesi alma işlemine geçilebilir. Yağ numunesi alınırken ve analiz için başka bir yere taşınırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bu hususlar alt başlıklarda anlatılmıştır.

3.3.1 Yağ Numunesi Alma İşlemi

Yağ numunesi olağan çalışma şartlarında ya da aşırı yük altındaki transformatörden alınır. Yüksüz halde bulunan veya çok düşük yükler altında çalışan transformatörlerden alınan yağ numunesinin YGA sonuçları transformatörün durumunu ve karakteristik hatayı tam anlamıyla temsil etmez. Bunun sebebi çalışmayan ya da çok düşük yükler altında çalışan transformatörden alınan yağ numunesinin yağ dolaşımı yeterli olmadığı için homojen olmaması ve zaman içinde yağda çözülmüş olan gazların serbest gaz haline geçmesidir. Alınan yağ numunenin transformatör karakteristiklerini en iyi şekilde temsil etmesi için bazı hususlara dikkat edilmelidir. Eğer numune alma işleminden önce transformatörün gazı alınmış ya da yağ herhangi bir işleme tabi tutulmuşsa, tank içerisindeki yağın birbirine tamamen karışması için yeterli bir süre beklendikten sonra numune alınmalıdır.

Yağda çözülmüş olan gazların basınç farklılığından dolayı havaya karışmaları ya da havadaki gazların veya nemin yağda çözünmelerini engellemek için alınan numune atmosferle temas etmemelidir. Numune ve numune alma teçhizatını bu gibi

etkenlerden uzak tutmak için yağmurlu ve karlı havalarda numune çok gerekli olmadıkça alınmamalıdır.

Güç transformatörlerinde yağ numunesinin kolay bir şekilde alınabilmesi için transformatörün en alt kısmında, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bir vana vardır. Örnek alma işleminde numunenin atmosferle temas etmemesi için yağ, bu vanadan özel bir şırınga yardımıyla alınır. Numune almadan önce bir miktar yağ vanadan boşa akıtılmalıdır. Akıtılan yağ, numune alma borusu ve vanasında biriken, transformatör yağının tamamını temsil eder nitelikte olmayan yağın uzaklaştırılmasını sağlar. Akıtılacak yağın miktarı transformatörün büyüklüğüne ve yapısına bağlıdır. Yağ miktarı az olan ya da genleşme kabı olmayan bir transformatörden numune alınacaksa, fazla yağ yerine temsili bir numune elde edinceye kadar az yağ akıtılması yeterlidir. Akıtılacak bu yağ ile numune almada kullanılacak vana, şırınga ve numune kabı çalkalanabilir. Böylelikle, numune almadan önce bu ekipmanlarda herhangi bir kalıntının kalmaması sağlanabilir. Alınan numunenin atmosferle temas etmesini engellemek amacıyla numune kabı genişleyorsa hacmi tamamen yağ ile doldurulmalıdır ve mümkünse kapağı contalı olmalıdır.



Şekil 3.1: Güç transformatörlerinde yağ numunesi alma vanası.

Numune alma işlemi sırasında boşa akıtılan yağ toprağa ya da çevreye dökülmemeli, atık yağ talimatları uyarınca imha edilmesi sağlanmalıdır.

3.3.2 Numune Alma Ekipmanları ve Bakımı

Transformatörden yağ numunesi alınırken Şekil 3.1 (a)'da gösterilen buzlu camdan gövde ve pistonlu gaz geçirmez cam şırıngalar kullanılmalıdır. Ayrıca Şekil 3.1 (b)'deki gibi şırınganın ucunda numunenin atmosferle temas etmesini engelleyecek ve numune alınmadan önce yağın bir miktar akıtılmasını sağlayacak üç yollu plastik musluk bulunmalıdır. Şırınga kullanmanın en büyük faydalarından biri numunenin atmosferle hiçbir temas olmaksızın alınması sağlar. Böylece numune yağ atmosferdeki havanın bozucu etkenlerinden korunmuş olur.



Şekil 3.2: Yağ numunesi alma ekipmanları a) Buzlu cam şırınga, b) Üç yollu vana.

Yağ numunesi analiz edileceği laboratuvara şırınga ile götürülecekse, şırınganın ucu hava almayacak şekilde kapatılıp pistonunun rahat hareket edebilmesi sağlanmalıdır. Numune eğer cam veya metal kavanoz içerisinde muhafaza edilecekse bu kaplar hacimlerinin tamamı yağ ile dolacak şekilde doldurulmamalıdır. Aksi takdirde soğuyan yağ hacim kaybedeceği için kabın kırılmasına ya da kap içerisinde oluşacak negatif basınçta yağ içerisindeki çözülmüş gazların serbest hale geçerek birikmesine sebep olur.

Yağ numunesi eğer renksiz cam şişeye alınmışsa, örnek alma işleminden hemen sonra üzeri ışık geçirmeyen bir örtü ile örtülmelidir. Güneş ışığında bulunan ultraviyole ışınlar yağ moleküllerini parçalar ve alınan numunede, transformatörde bulunan gaz yüzdesinden daha fazla bir gaz miktarı oluşmasına sebep olur. Ayrıca ışık altında, yağ içerisinde bulunan oksijen oksitlenme neticesinde tüketilebilir. Oksitlenmeyi artırıcı bir diğer etken de sıcaklıktır. Bu sebeple alınan numuneler soğuk ortamlarda muhafaza edilmelidir. Yağ numunesi alma işleminde kullanılan araç ve gereçler her kullanımdan sonra mutlaka temizlenmelidir. Bütün numune kapları önce

kalıntı bırakmayan pamuksu bezle daha sonra “*stoddard solvent*” de denilen tiner ile temizlenmelidir. Temizleme işleminden sonra kaplarda herhangi bir kimyasal kalıntı kalmaması için 100 °C sıcaklığa kadar ısıtılıp kurutulmaları gerekir. Ayrıca bir sonraki numune alma işleminden önce, yine numune alınacak yağ boşa akıtılırken kapların çalkalanması kap üzerindeki kalıntıların giderilmesine yardımcı olur. Böylece alınan numunenin daha güvenilir olması sağlanır.

Bu kurallara uyulmasıyla elde edilecek numuneden sağlıklı gaz analiz sonuçları elde edilir. Böylelikle transformatörün durumu hakkında daha net bilgilere ulaşılmış olur. Aksi takdirde ölçülen gaz miktarları yapılacak değerlendirmelerin yanlış yapılmasına sebebiyet verebilir.

3.4 Yağ Numunesindeki Çözünmüş Gazların Belirlenmesi

Transformatörden alınan yağ numunesi içerisinde çözünmüş olarak bulunan gazların türü ve miktarlarının dikkatli ve doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bu işlem yapılırken gazların miktarlarında herhangi bir değişikliğe sebep olabilecek dış kaynaklı etmenler önlenmeli, ayrı ayrı bütün gazlarının miktarları doğru bir şekilde tespit edilmelidir. Bunu sağlamak için geliştirilen “*gaz kromatografisi*” kimya alanında gazların ve uçucu maddelerin analizi ve ayrılmasında uygun bir yöntem olarak kabul edilmiştir (Adams 2007). Sıvı içerisindeki gazların ölçümünü hassas bir şekilde yapan ve bu yöntemi uygulayan cihazlara ise “*kromatograf*” adı verilir. Şekil 3.3’te örnek bir gaz kromatografisi cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Gaz kromatografisi.

Kromatografi yöntemi, farklı özelliklere sahip maddelerin, farklı çözücüler yardımıyla bir ortamda sürüklendiklerinde, özelliklerine bağlı olarak farklı hızlarda yol almaları prensibine dayalı bir saflık analizidir. İlke olarak bir sabit faz ve bir hareketli faz barındıran bu ayırıştırma ve analiz tekniğinin birçok çeşidi vardır. Hareketli faz olarak gaz, sabit faz olarak da sıvı kullanılan kromatografi türüne gaz kromatografisi denir. Gaz kromatografinin hareketli fazı, genellikle helyum gibi bir inert gaz veya azot gibi reaktif olmayan bir taşıyıcı gazdır. Sabit fazı ise cam parçası içinde veya kolon diye adlandırılan metal hortum gibi inert bir katı destek üzerinde sıvı veya polimer bir mikroskopik tabakadır.

Gaz kromatografisi yöntemi ile farklı bileşenlerden oluşan bir karışımı ayırmak ve bu bileşenlerin göreceli miktarlarını tespit etmek mümkündür. Transformator yağı içerisinde çözülmüş olarak bulunan gazların miktarları “ppm” değerleri olarak bulunur. Birim olarak ppm milyon birim içerisindeki bir birim anlamına gelir. Eğer bir yağ numunesi içerisinde bulunan herhangi bir gazın miktarı 1 ppm ise bu 1 milyon litre içerisinde 1 litre ya da 1 milyon gram içerisinde 1 gram anlamına gelebilir. Önemli olan değerlendirilmek istenilen gazın toplam miktar içerisindeki göreceli bulunma miktarı ya da yüzdesidir. Gaz kromatografisi ile belirlenen gaz miktarları transformatorde meydana gelmiş olan ya da devam etmekte olan hatalar hakkında önemli bilgiler sağlar.

3.5 Yağda Çözülmüş Gaz Analizi Değerlendirme Yöntemleri

Güç transformatorlerinde alınan yağ numunesinden çözülmüş olan gazların miktarları belirlendikten sonra sıra bu verilerin değerlendirilmesine gelir. Elde edilen bu gaz sonuç ve miktarlarına bakılarak yapılacak değerlendirmelerle transformatorün durumu hakkında önemli bilgiler elde edilir. Fakat YGA sonuçlarından doğrudan hata durumunu anlamak zordur. Bu sonuçların değerlendirilmesi uzmanlık, bilgi birikimi ve tecrübe gerektirir. Dolayısıyla YGA verilerinin değerlendirilmesi amacıyla çok çeşitli tespit yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemleri klasik ve akıllı yöntemler olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür.

Klasik yöntemler, verileri değerlendirirken uzun yıllar süren tecrübeleri ve hatanın meydana gelmesi aşamasındaki süreçleri esas alır. Kılavuz gaz, Duval üçgen,

Roger gaz oranları, IEC ve Doernenburg gaz oranları yöntemleri başlıca klasik yöntemler arasında sıralamak mümkündür. Bu yöntemler belirli gaz miktarlarına veya onların oranlarına göre önceden hazırlanmış tablo ve grafikler yardımıyla arıza sınıflandırması yapmaktadır. Bu tablo ve grafikler uzun yıllar boyunca karşılaşılan arızalar ve bu arızalar ilişkin gaz verileri veya arıza istatistikleri ile oluşturulmuştur. Bu sebeple, her bir yöntemin doğruluğu toplanan bilgi birikimiyle doğru orantılıdır (Yadaiah ve Ravi 2007) (IEEE 2008). Bu yüzden kullanılan değerlendirme yöntemlerinin hepsi transformatör arızalarının belirlenmesinde büyük önem teşkil etmektedir.

Akıllı yöntemler ise daha çok bilgisayar destekli yapay zeka ve akıllı algoritmalar kullanılarak elde edilen sistem modelleridir. Genellikle bu tür modellemelerde gerçek hata sonuçları bilinen çok miktarda YGA verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Model önce bilinen verilerle eğitilerek test edilecek YGA verileri için de genelleme yetisi kazanmış olur. Eğitim ve test sürecinden geçen model yeni YGA verilerini sınıflandırabilecek hale gelir. Akıllı yöntemler, meydana gelmiş hatalardan oluşturulmuş YGA verilerini kullanarak sınıflandırma yapan ve bu verilerden hangi hatanın ne tür gaz sonucu verdiğini öğrenen yöntemlerdir. Yapay sinir ağları, bulanık mantık temelli uzman sistemler ve destek vektör makineleri bu yöntemlerin başında gelir. Akıllı yöntemlerin transformatör arızaları tanımlamaları, kullanılan modelin yapısı ve kullanılan eğitim verilerinin niteliği ile doğrudan ilgilidir. Bu tez çalışmasında akıllı yöntemlerden destek vektör makineleri güç transformatör arızalarının sınıflandırılmasında kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan YGA verileri klasik yöntemlerle de değerlendirilmiştir. Klasik yöntemler ile akıllı bir yöntem olan destek vektör makinelerinin başarımlarını oranları karşılaştırılmış, sistemlerin avantaj ve dezavantajları ortaya koyulmuştur.

3.5.1 Kılavuz Gaz Yöntemi

Kılavuz gaz yönteminin temeli, hata meydana geldiğinde yağ içerisinde çözünen gazların oluşumuna sebep olan koşulların ve bu koşullara ilişkin sonuçların bilinmesi esasına dayanır. Kısaca sebep sonuç arasındaki ilişkiden hareket eden bir yöntemdir. Transformatörde bir hata meydana gelmesi, transformatör içerisinde bir ısı

artışına sebep olur. Bu termal ve elektriksel değişiklikler yalıtım yağı ve yağ içerisindeki yalıtım malzemelerinin kimyasal yapısının bozulmasına neden olur. Sonuç olarak yağ içerisinde çözünen bu gazların miktarı ve türü meydana gelen sıcaklık değişimi ya da açığa çıkan enerji miktarıyla ilgilidir. Dolayısıyla hata türüne bağlı olarak bazı gaz miktarları bazı hata türlerinde daha baskın olarak açığa çıkmaktadır. Kılavuz gaz yöntemi gazların oranları yerine tek tek gazların miktarlarını kullanır. Bu gaz miktarlarının toplam yanıcı gazlar içerisindeki yüzde miktarına göre kılavuz gaz/gazlar belirlenir. Tablo 3.4’de tespit edilen kılavuz gazlar ve bu gazlara ilişkin genel arıza değerlendirmeleri verilmiştir. Transformatörde meydana gelen arıza durumlarında yağda çözünmüş gazların yaklaşık miktarlarının arızanın türüne göre değişimi Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.4: Kılavuz gazlara ilişkin genel arıza değerlendirmesi.

Kılavuz gaz	Genel değerlendirme
Hidrojen (H ₂)	Elektriksel deşarj (Korona deşarjı, kısmı deşarj)
Etilen(C ₂ H ₄)	Termik arıza
Asetilen (C ₂ H ₂)	Yüksek enerjili deşarj (ark, kıvılcım)
Oksijen (O ₂)	Bağlantı gevşekliği
Etan (C ₂ H ₆)	Termik arızanın ikincil göstergesi
Metan (CH ₄)	Ark ve aşırı ısınmanın ikincil göstergesi
Karbonmonoksit (CO)	Selülozun ısınması
Karbondioksit (CO ₂)	Selülozun ısınması

Tablo 3.5: Transformatörde meydana gelen arıza durumlarında yağda çözünmüş gazların arızanın türüne göre tahmini miktarları.

Transformatör Arızası	Hidrojen (H₂)	Metan (CH₄)	Etilen (C₂H₄)	Etan (C₂H₆)	Asetilen (C₂H₂)
Kısmi Deşarj	Çok fazla	Fazla	-	-	-
Düşük Enerjili Deşarj	Çok fazla	Fazla	Az	Az	-
Yüksek Enerjili Deşarj	Çok fazla	Az	Az	-	Çok fazla
Termik Arıza	Az	Fazla	Çok fazla	Fazla	-

3.5.2 Duval Üçgen Yöntemi

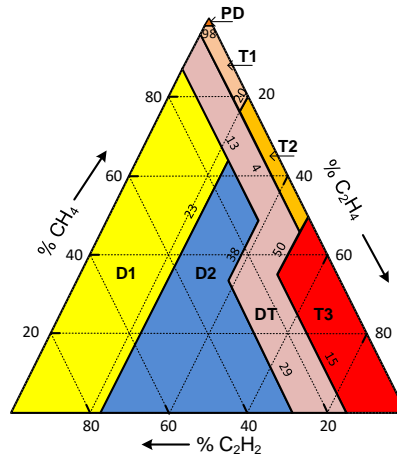
Duval üçgeni yöntemi ilk olarak 1974'te ortaya konulan grafiksel bir hata tanımlama yöntemidir (Duval 1974). Bu yöntemde sadece metan, asetilen ve etilen gaz miktarlarının yüzde değerleri kullanılır. Bu yüzde değerleri $x = [CH_4]$, $y = [C_2H_4]$, $z = [C_2H_2]$ olmak üzere denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) vasıtasıyla hesaplanır.

$$\%CH_4 = \frac{100 \times x}{x + y + z} \quad (3.1)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100 \times y}{x + y + z} \quad (3.2)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{100 \times z}{x + y + z} \quad (3.3)$$

Bu yöntemle göre arıza tanımı yapılırken Şekil 3.4'de görüldüğü gibi farklı bölgelere bölünmüş olan Duval üçgen diyagramı kullanılır. Duval üçgen diyagramında, ilgili gazların hesaplanan yüzde değerlerinin kesiştiği noktanın bulunduğu tanım bölgesi, transformatörde meydana gelen muhtemel hata türünü verir.



Şekil 3.4: Duval üçgen diyagramı.

Tablo 3.6'da Duval üçgen diyagramına ait her bir hata tanım bölgesinin sınırları ve o bölgeye ait arıza türü verilmiştir. Bu yöntemle arıza türleri, kısmi deşarj (KD), düşük enerjili deşarj (D1), yüksek enerjili deşarj (D2), düşük sıcaklık termik arıza (T1), orta sıcaklık termik arıza (T2) ve yüksek sıcaklık termik arıza (T3) olmak üzere altı sınıfa ayrılır. Ayrıca (DT) bölgesi de termal ve elektriksel hataların aynı anda bulunduğunu ifade etmektedir.

Tablo 3.6: Duval üçgen yöntemi için arıza tanımı ve sınır bölgeler.

Arıza Türü	Arıza Tanımı	%		
		CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
KD	Kısmi Deşarjlar	98	-	-
D1	Düşük Enerjili Deşarjlar	-	23	13
D2	Yüksek Enerjili Deşarjlar	-	23-38	13-29
T1	Termik Arıza T < 300 °C	-	10	4
T2	Termik Arıza 300 °C<T<700 °C	-	10-50	4
T3	Termik Arıza T >700 °C	-	50	15

3.5.3 Roger Gaz Oranları Yöntemi

Roger gaz oranları yöntemiyle arıza tanılması CH₄/H₂, C₂H₆/CH₄, C₂H₄/C₂H₆ ve C₂H₂/C₂H₄ olmak üzere dört farklı gaz oranından hareketle yapılır. Bu yöntemde arıza tanılmasında kullanılan gaz oranlarına ilişkin sınır değerler ve bu oranların basitçe kodlanması Tablo 3.7’de verilmiştir. Bu gaz oranlarının karşılık geldiği kod güç transformatoründe meydana gelen hatanın türünü verir ve bu hata türleri Tablo 3.8’de görülebilir (Muhamad ve diğ. 2007). Bu yöntemde arıza bir normal durum ve 11 hata sınıfı olmak üzere 12’ye ayrılabilir.

Tablo 3.7: Roger gaz oranları ve bu oranlara ilişkin sınır değerler.

Gaz Oranı	Oran Kodu	Sınırlar	Kod
CH ₄ /H ₂	i	i ≤ 0,1	5
		0,1 < i < 1,0	0
		1,0 ≤ i < 3,0	1
		i ≥ 3,0	2
C ₂ H ₆ /CH ₄	j	j < 1,0	0
		j ≥ 1,0	1
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	k	k < 1,0	0
		1,0 ≤ k < 3,0	1
		k ≥ 3,0	2
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	l	l < 0,5	0
		0,5 ≤ l < 3,0	1
		l ≥ 3,0	2

Tablo 3.8: Roger gaz oranı yöntemi için arıza tanımları.

i	j	k	l	Hata Türü
0	0	0	0	Normal bozunum
5	0	0	0	Kısmi deşarj
1-2	0	0	0	Termik Arıza $T < 150$ °C
1-2	1	0	0	Termik Arıza 150 °C $<T<200$ °C
0	1	0	0	Termik Arıza 200 °C $<T<300$ °C
0	0	1	0	Genel iletken aşırı ısınması sorunu
1	0	1	0	Sargı akımları dolaşımı
1	0	2	0	Nüve ve tank gövdesinde dolaşım akımları, aşırı ısınmış bağlantı noktaları
0	0	0	1	Dolanarak ark
0	0	1-2	1-2	Ark
0	0	2	2	Değişken gerilime sürekli kıvılcım oluşumu
5	0	0	1-2	Peş peşe Kısmi deşarj

3.5.4 IEC Gaz Oranları Yöntemi

IEC gaz oranları yöntemi, Roger gaz oranları yöntemi esas alınarak oluşturulmuş bir diğer hata tanımlama yöntemidir. Bu yöntem Roger gaz oranları yöntemindeki C_2H_6/CH_4 gaz oranı hariç diğer üç gaz oranı olan CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 ve C_2H_2/C_2H_4 değerleri kullanır. Bu gaz oranı yalnızca termal hatanın hangi sıcaklık aralığında olduğunu tespitine yardımcı olan bir gaz oranıdır. Arıza tanınması için gaz oranları, oran kodları ve bu oranlara ilişkin IEC sınır değerleri Tablo 3.9’da verilmiştir. Elde edilen kod değerlerine göre hata tanımları Tablo 3.10’da verilmiştir (Muhamad ve diğ. 2007). Bu yöntemde arıza bir normal durum ve 8 hata sınıfı olmak üzere 9 sınıfa ayrılabilir.

Tablo 3.9: IEC gaz oranları ve bu oranlara ilişkin sınır değerler.

Gaz Oranı	Oran Kodu	Sınırlar	Kod
C_2H_2/C_2H_4	l	$l < 0,1$	0
		$0,1 \leq l < 1,0$	1
		$1,0 \leq l < 3,0$	1
		$l \geq 3,0$	2
CH_4/H_2	i	$i < 0,1$	1
		$0,1 \leq i < 1,0$	0
		$1,0 \leq i < 3,0$	2
		$i \geq 3,0$	2
C_2H_4/C_2H_6	k	$k < 0,1$	0
		$0,1 \leq k < 1,0$	0
		$1,0 \leq k < 3,0$	1
		$k \geq 3,0$	2

Tablo 3.10: IEC gaz oranı yöntemi için arıza tanımları.

l	i	k	Hata Türü
0	0	0	Normal bozunum
*	1	0	Düşük enerjili kısmi deşarj
1	1	0	Yüksek enerjili kısmi deşarj
1-2	0	1-2	Düşük enerjili deşarj (kıvılcım)
1	0	2	Yüksek enerjili deşarj (Ark)
0	0	1	Termik Arıza $T < 150^{\circ}\text{C}$
0	2	0	Termik Arıza $150^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$
0	2	1	Termik Arıza $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$
0	2	2	Termik Arıza $T > 700^{\circ}\text{C}$

3.5.5 Doernenburg Gaz Oranları Yöntemi

Doernenburg gaz oranları yöntemi de diğer klasik yöntemlerde olduğu gibi meydana gelen hata istatistikleri ve uzun yıllar süren tecrübeler sonucu oluşturulan belirli gaz oranları arasındaki ilişkiye göre sınıflandırma yapan bir yöntemdir. Tablo 3.11’de Doernenburg gaz oranları yönteminde kullanılan gaz oranları ve onların kısaltılmış sembolleri verilmiştir. Bu yöntemle tespit edilebilen arıza türleri ve onların karşılık geldiği gaz oranların sınır değerleri Tablo 3.12’de verilmiştir (IEEE 2008). Bu yöntemle hata termik arıza, düşük enerjili deşarj ve yüksek enerjili deşarj olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir.

Tablo 3.11: Doernenburg gaz oranları ve kısaltmaları.

Oran	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$
Kısaltma	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄

Tablo 3.12: Doernenburg yöntemi için gaz oranlarına göre arıza türleri.

Arıza türü	R₁	R₂	R₃	R₄
Termik arıza	>1	< 0,75	< 0,3	> 0,4
Düşük enerjili deşarj	<0,1	-	< 0,3	> 0,4
Yüksek enerjili deşarj	0,1-1	> 0,75	> 0,3	< 0,4

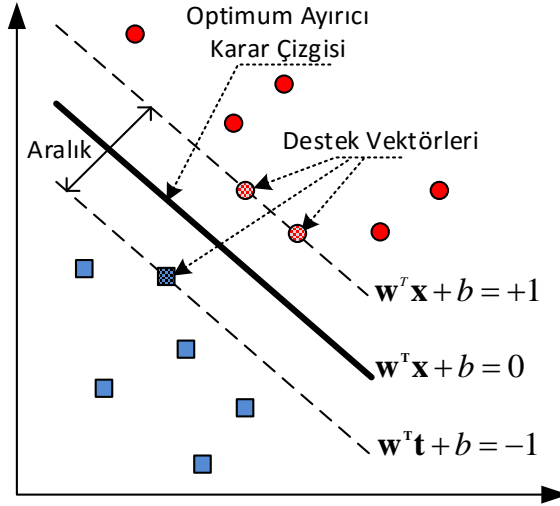
4. DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ VE OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Destek vektör makinelerinin teorik temelleri 1960 yıllarında ortaya atılan istatistiksel öğrenme teoremi üzerine kurulmuştur. Destek vektör makineleri (DVM) ilk olarak Vapnik tarafından 1995 yılında sınıflandırma problemlerinin çözümü konusunda önerilmiş bir yöntemdir (Vapnik 1995). Yapay sinir ağları gibi diğer makine öğrenmesi algoritmalarının aksine, deneysel risk minimizasyonu değil yapısal risk minimizasyonunu kullanarak çalışan bir algoritmadır. DVM başlangıçta sınıflandırma için oluşturulmuş bir yöntem olmasına karşın tahmin ve kümeleme için de kullanılmıştır. DVM matematiksel yapı itibarıyla basit ve kullanımı oldukça kolay bir yöntemdir. En büyük avantajlarından birisi, diğer çoğu sınıflandırma yönteminin aksine yerel değil global bir çözüm elde etmesidir.

4.1 Destek Vektör Makinelerinin Matematiksel Modeli

4.1.1 Doğrusal Sınıflandırma

DVM'nin temelini oluşturan bu yaklaşımda amaç verilen verileri en iyi şekilde ayıran bir düzlem elde etmektir. Kolaylık olması açısından verilerin iki boyutlu ve ikiye ayrılabilir doğrusal veriler olduğu varsayalım. Şekil 4.1'de en büyük aralıklı sınıflandırıcı yapısı görülmektedir. Verileri birbirinden ayıran birçok karar çizgisi mevcuttur. Fakat Şekil 4.1'den de görüleceği gibi karar çizgilerinden en iyi olanı, veri setleri ile arasındaki mesafe en büyük olandır. Böylelikle gürültülü ya da hatalı bir veri sınıflandırılmaya çalışıldığında dahi doğru bir sınıflandırma yapmak mümkün olur (İplikçi 2013).



Şekil 4.1: En büyük aralıklı sınıflandırıcı.

$D = \{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ şeklinde verilen doğrusal bir veri setinde $x_i \in \mathfrak{R}^n$ giriş vektörlerini, $y_i \in \{-1, +1\}$ ise her vektöre karşılık gelen sınıf etiketini, N ise veri sayısını ifade etsin. Veri setlerini en iyi ayırma işlemini matematiksel olarak gösterecek olursak, bu verileri ayıran karar çizgisi denklemleri $\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b = 0$ şeklinde ifade edilir. Bu karar çizgisine paralel olan sınır çizgilerinin denklemleri ise $\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b = -1$ ve $\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b = +1$ olur. Buradan iki sınır çizgisi arasındaki geometrik aralık hesaplanacak olursa $m = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$ bulunur. Burada amaç bu geometrik aralığı en büyük yapmaktır. Bu amaçla geometrik aralığı en büyük yapmak için elde edilen denklemden $\|\mathbf{w}\|$ ya da kolaylık olması açısından $\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2$ yi en küçük yapmak aynı sonucu verir. Bu denkleme göre en büyük aralığa sahip sınıflandırıcının denklemleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$\max_{w,b} \frac{2}{\|\mathbf{w}\|} = \min_{w,b} \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} \quad (4.1)$$

$$\text{Kısıt: } y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) \geq 1, \quad i = 1, \dots, N$$

Problem eşitsizlik-kısıtlı bir problemdir. Problemin en büyük ya da en küçük değerini bulmak problemde yer alan kısıt dolayısıyla her zaman çok kolay olmaz. Bunun için problem Lagrange çarpanı prensibine göre kısıtı da asıl probleme dahil ederek tekrar yazılır ve ara işlemler gerçekleştirilirse aynı problemin ikincil denklemini daha sade bir şekilde aşağıdaki gibi bulunur (Topaloğlu 2014).

$$\min_{\alpha} L(\alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (4.2)$$

$$Kısıt: \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0$$

En büyük aralıklı sınıflandırıcı probleminden elde edilen denklemlerin birincil ve ikincil uzaydaki ifadelerinin her ikisi de karesel programlama problemidir. Burada şunu belirtmek gerekir ki ikincil formda ifade edilen denklemin karmaşıklığı giriş vektörü \mathbf{x} 'in boyutundan bağımsızdır. Yalnızca sınıflandırılacak veri sayısı olan N ile orantılıdır. Böylelikle, en büyük aralıklı sınıflandırıcı probleminin ikincil ifadesinden N adet tamamı negatif olmayan ve bazıları sıfır olan Lagrange çarpanı elde edilir. $\alpha_i > 0$ şeklinde Lagrange çarpanına sahip olan \mathbf{x}_i vektörlerine “Destek Vektörleri” denir. Bütün destek vektörleri $y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) = 1$ şartını sağlar ve karar çizgisine eşit uzaklıkta bulunan sınır çizgileri üzerinde yer alırlar. Birincil uzaydaki $\hat{y} = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b$ olan sınıflandırıcı modeli ikincil uzayda (4.3) eşitliğindeki hali alır.

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^T \mathbf{x} + b \quad (4.3)$$

Elde edilen Lagrange çarpanlarının bazılarının sıfır olması dolayısıyla her giriş verisinin sınıflandırma çıkışına bir katkısı yoktur. Sınıflandırma modelinin çıkışını yalnızca destek vektörleri belirler. Dolayısıyla (4.3) eşitliğindeki sınıflandırıcı modeli tekrar ifade edilecek olursa daha seyrek bir model (4.4) eşitliğindeki gibi bulunur.

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in \mathcal{S}} \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^T \mathbf{x} + b \quad (4.4)$$

Burada \mathcal{S} destek vektörleri kümesini ifade etmektedir. Elde edilen modele de destek vektör modeli denilmektedir. Giriş verilerinden destek vektörü olmayan giriş verilerinin uzaklaştırılması durumunda dahi aynı Lagrange katsayıları ve sınıflandırıcı modeli elde edilir.

Sınıflandırma işlemi sırasında her zaman verileri doğrusal olarak ayırmak mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda dahi, doğruluktan bir miktar ödün vererek

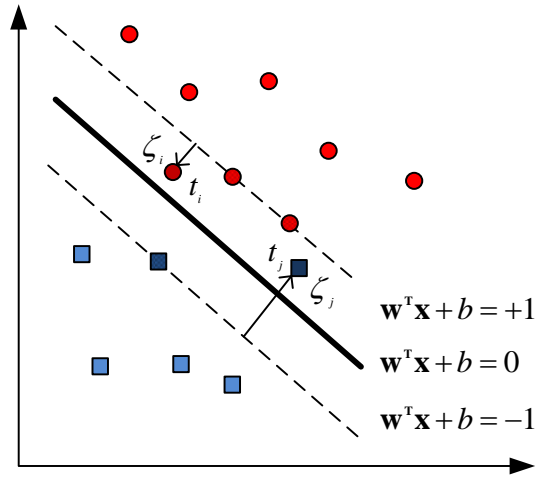
verileri doğrusal olarak sınıflandırabilmek mümkündür (İplikçi 2013). En büyük aralıklı sınıflandırıcı denkleminde hatalı sınıflandırmaya belli oranda müsaade eden fakat bu hataları cezalandıran esnek aralıklı sınıflandırıcıya geçilecek olursa sınıflandırma probleminin denklemi (4.5) denklemindeki gibi olur. Burada ζ ilgili giriş verisi için sınıflandırıcının yaptığı hata miktarıdır.

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^N \zeta_i$$

$$\text{Kısıt: } y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \zeta, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

$$\zeta_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, N$$

Şekil 4.2’de esnek aralıklı sınıflandırıcıda yanlış sınıflandırılan veriler ve bu verilere ilişkin cezalandırmalar gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi doğrusal olarak ayrılamayan verileri dahi az bir hata payı ile doğrusal bir karar çizgisi ile ayırmak mümkündür.



Şekil 4.2: Esnek aralıklı sınıflandırıcı.

Denklem (4.5)’in Lagrange dönüşümü ile elde edilen ikincil formu ise (4.6)’daki denklem gibi olur. Burada C hataları cezalandıran bir ceza parametresidir ve denklemde ζ kalmamıştır.

$$\min_{\alpha} L(\alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i$$

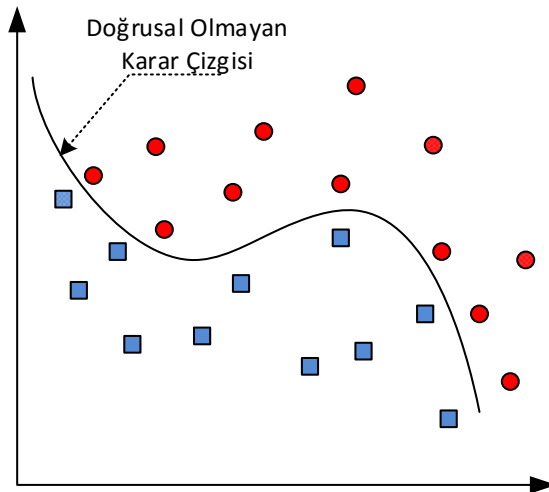
$$\text{Kısıt: } \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C, \quad i = 1, \dots, N$$
(4.6)

Esnek aralıklı sınıflandırıcı modeli de tıpkı en büyük aralıklı sınıflandırıcı gibi $\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in \mathcal{S}} \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^T \mathbf{x} + b$ şeklindedir. Aradaki tek fark Lagrange katsayılarındaki $0 \leq \alpha_i \leq C$ şeklindeki üst sınırdır.

4.1.2 Doğrusal Olmayan Sınıflandırıcı

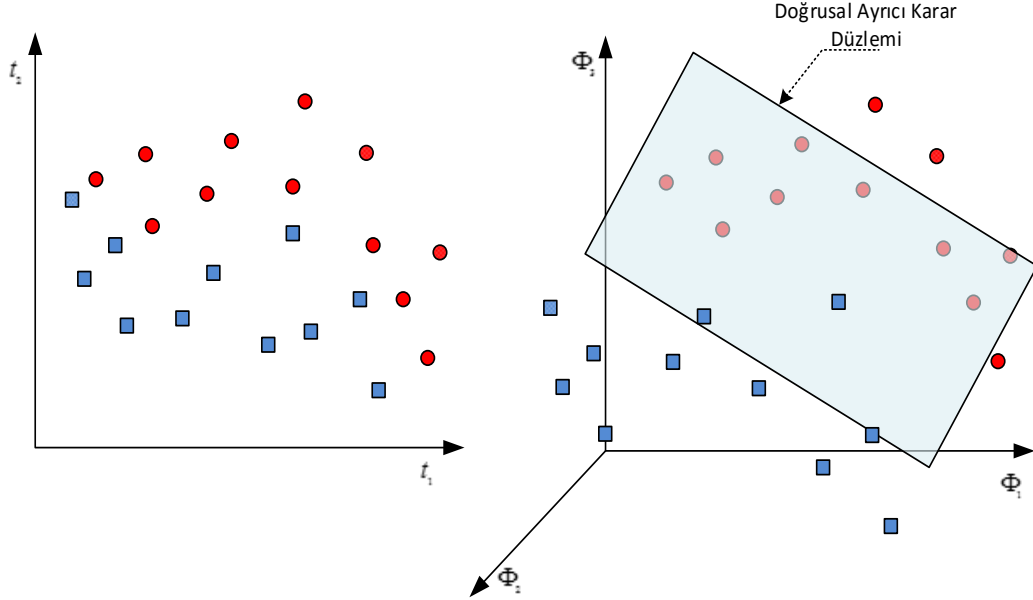
Sınıflandırma problemlerinde sınıflandırılacak veriler genellikle doğrusal değildir. Bu sebeple, başlangıç olarak doğrusal olmayan verilerin, doğrusal olarak ayrılacakları daha yüksek boyutlara dönüştürülmeleri gerekebilir. Şekil 4.3'te doğrusal olarak ayrılamayan iki boyutlu, iki sınıflı veriler ve bu verileri ayıran doğrusal olmayan örnek bir karar çizgisi gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Doğrusal olmayan sınıflandırıcı.

Doğrusal olmayan karar çizgisini giriş uzayında elde etmek zordur. Bu sebeple sınıflandırılacak verilerin $\Phi(\cdot)$ gibi bir dönüşüm fonksiyonu kullanılarak daha yüksek boyutlara dönüştürülmeleri gerekir. Her bir verinin dönüştürüldüğü bu daha yüksek

boyutlu uzay \mathcal{F} ile gösterilir ve öznitelik uzayı olarak isimlendirilir. Öznitelik uzayında sınıflandırılacak veriler daha kolay sınıflandırılabilir. Hatta doğrusal olarak ayrılabilir hale gelir. Bu durum Şekil 4.4’de verilen öznitelik uzayından rahatlıkla görülebilir.



Şekil 4.4: Öznitelik uzayı.

Doğrusal olmayan verilerin sınıflandırılması yapılırken sınıflandırma problemi öznitelik uzayında aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$\min_{\alpha} L(\alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \Phi^T(x_i) \Phi(x_j) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (4.7)$$

$$\text{Kısıt: } \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C, \quad i = 1, \dots, N$$

Denklem (4.7)’nin esnek aralıklı sınıflandırıcı formülünden tek farkı $x_i^T x_j$ iç çarpımı yerine $\Phi^T(\cdot) \Phi(\cdot)$ iç çarpımının gelmiş olmasıdır. DVM sınıflandırıcısında $\Phi(\cdot)$ dönüşüm fonksiyonunun bulunması, öznitelik uzayının boyutu yüksek ya da sonsuz ise hesaplama işlemleri açısından oldukça zor hatta imkansız olabilmektedir. Dolayısıyla, sınıflandırıcı probleminin ve sınıflandırıcı modelinin matematiksel ifadesine bakılacak olursa $\Phi(\cdot)$ dönüşüm fonksiyonundan ziyade $\Phi^T(\cdot) \Phi(\cdot)$ iç çarpımının değeri bilinebilirse doğrusal olmayan verileri de öznitelik uzayında doğrusal olarak ayırmak mümkün olur.

Bu noktada $\Phi^T(\mathbf{x}_i)\Phi(\mathbf{x}_j)$ iç çarpımının bulunması için kernel (çekirdek) fonksiyonu yaklaşımı kullanılmaktadır. Kernel fonksiyonu, öznitelik uzayında iç çarpıma denk düşen bir fonksiyondur ve genel ifadesi denklem (4.8)'de verilmiştir.

$$\Phi^T(\mathbf{x}_i)\Phi(\mathbf{x}_j) = K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (4.8)$$

Bir fonksiyonun kernel fonksiyonu olabilmesi için sağlaması gereken koşullar vardır. “Mercer Koşulları” olarak bilinen bu koşulları sağlayan her fonksiyon kernel fonksiyonudur ve DVM’de kullanılabilir. Genellikle, ilgili dönüşüm fonksiyonuna karşılık gelen kernel fonksiyonunun bulunması, ya da tam tersi şekilde ilgili kernel fonksiyonuna karşılık gelen dönüşüm fonksiyonunun bulunması çok zor ve hatta bazı durumlarda imkansızdır. Sınıflandırma problemlerinde hangi kernel fonksiyonunun kullanılacağını açıklayan bir teori olmaması sebebiyle kernel fonksiyonunun seçimi önemli bir sorundur. DVM’de sıklıkla kullanılan ve farklı problemlerde iyi sonuçlar veren birçok kernel fonksiyonu vardır (Campbell 2002). Bu kernel fonksiyonlarından hangisinin seçileceğine genellikle deneyimle ve sınıflandırma problemi hakkındaki bilgi ile karar verilir. Aşağıda DVM’de en çok kullanılan kernel fonksiyonları ve bunların özellikleri verilmiştir.

- *Polinom kernel fonksiyonu*; Denklem (4.9)’daki gibi ifade edilir. Burada c negatif olmayan sabit bir sayıdır ve genellikle $c=1$ şeklinde kullanılır. d ise polinom derecesi olup kernel fonksiyonunun parametresidir.

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j + c)^d \quad (4.9)$$

- *Sigmoid kernel fonksiyonu*; Denklem (4.10)’daki gibi ifade edilir. Bu Kernel fonksiyonu Mercer koşullarını her değeri için sağlamayıp bazı k ve θ değerleri için sağlamaktadır. Bu değerlerin tespitinde teorik bir yaklaşım olmayıp deneme yanılma yöntemiyle bulunmaktadır. Fonksiyon kullanılırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (k\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j + \theta) \quad (4.10)$$

- *Gauss kernel fonksiyonu*; Denklem (4.11)'daki gibi ifade edilir. Ayarlanması gereken tek parametresi olan “ σ ” aynı zamanda “*genişlik parametresi*” olarak da isimlendirilmektedir.

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\frac{\|\mathbf{x}_i^T - \mathbf{x}_j\|^2}{2\sigma^2}} \quad (4.11)$$

Kernel fonksiyonu sınıflandırma problemindeki dönüşüm fonksiyonunun iç çarpım ifadesinin yerine yerleştirilirse sınıflandırma probleminin ifadesi ve sınıflandırıcı modelin denklemi sırasıyla denklem (4.12) ve (4.13)'deki gibi yazılır.

$$\min_{\alpha} L(\alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathbf{K}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \sum_{i=1}^N \alpha_i$$

$$\text{Kısıt: } \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \quad (4.12)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C, \quad i = 1, \dots, N$$

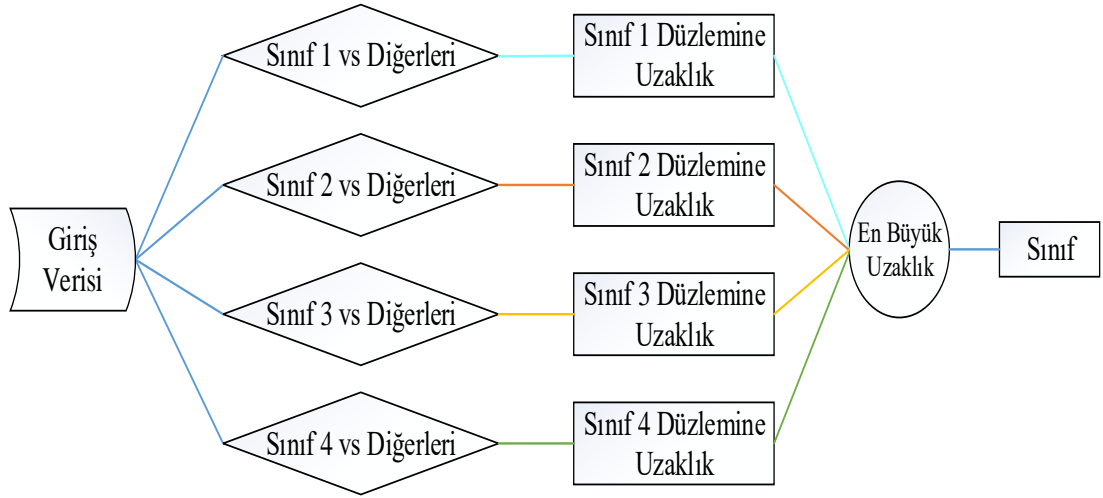
$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in \mathcal{S}} \alpha_i y_i \mathbf{K}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (4.13)$$

4.2 Çok Katmanlı Destek Vektör Makineleri

DVM teorik olarak başlangıçta iki sınıflı verileri sınıflandırmak için geliştirilmiştir. Ancak iki sınıflı sınıflandırmanın uygulama alanı çok kısıtlıdır. Pratik uygulamaların çoğunda ikiden çok çıkış sınıfına sahip verilerin sınıflandırılması gerekmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla literatürde iki sınıflı destek vektör makinelerini kullanarak çok sınıflı verileri sınıflandıran yöntemler önerilmiştir (Fei ve Liu 2006) (Madzarov ve diğ. 2009). Bu yöntemlerde, çok sayıda ikili sınıflandırıcı oluşturularak bu sınıflandırıcıların sonuçlarından test verisine ait sınıf etiketi elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntemlerin yanı sıra DVM yapısında yapılan değişikliklerle aynı anda birden çok sınıf etiketinin belirlendiği yöntemler de vardır (Hsu ve Lin 2002).

4.2.1 Hepsine Karşı Bir Algoritması

Çok sınıflı problemlerin çözümünde en kolay çözümlerden biri hepsine karşı bir algoritmasıdır. Bu yöntem ‘kazanan hepsini alır’ yöntemi olarak da isimlendirilmektedir. Eğer veri seti M sınıfa ayrılacak ise Şekil 4.5’teki gibi M tane DVM sınıflandırıcısı oluşturulur. M tane sınıflandırıcı her bir sınıfı geriye kalan $M - 1$ sınıftan ayıracak şekilde eğitilir. Uygulama ve test aşamasında giriş verileri lineer ayırıcı hiper düzlemlen uzaklıkları bulunarak sınıflandırılır. Sınıf etiketini gösteren son çıkış değeri ise en büyük aralığa sahip sınıflandırıcının ayırdığı sınıftır. Bu yöntemin en büyük avantajı gerekli olan ikili sınıflandırıcı sayısının sınıflandırılacak sınıf sayısına eşit olmasıdır. Ancak, eğitim aşamasında eğitim verilerinin karesi kadar çok hafızaya ihtiyaç duyması bu yöntemin ana dezavantajlarından. Özellikle büyük eğitim seti olan sınıflandırma problemlerinde sorunlara yol açar. Bunun yanı sıra eğer M tane sınıfın hepsi de eşit eğitim verisine sahipse, eğitim aşamasında bir sınıflandırıcıdaki eğitim verilerinin oranı $1/(M - 1)$ olacak ve dengesizliklere yol açacaktır.



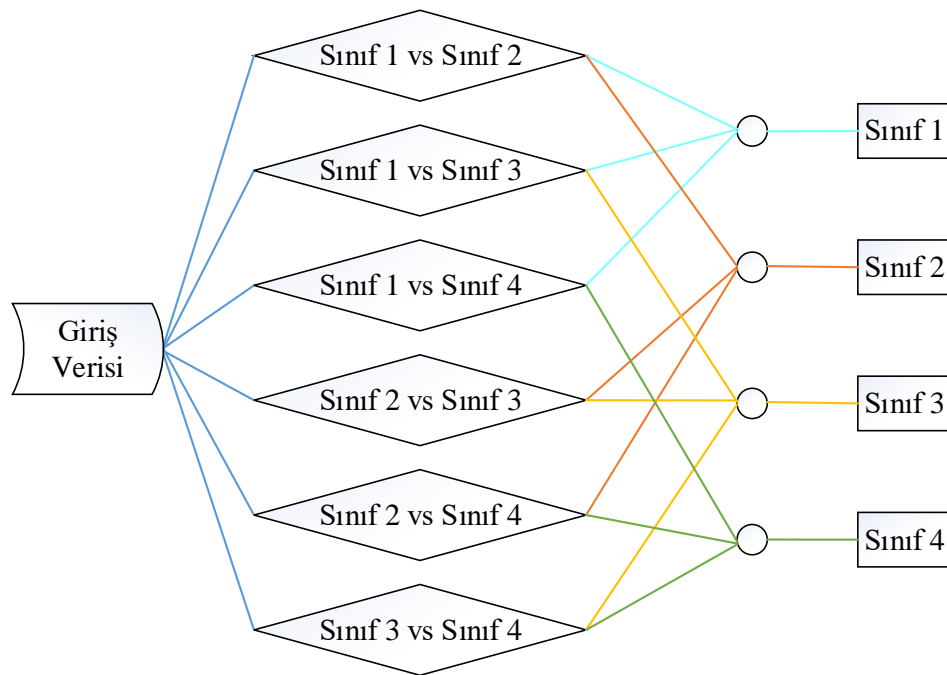
Şekil 4.5: Hepsine karşı bir algoritması prensip şeması.

4.2.2 Bire Karşı Bir Algoritması

Bire karşı bir algoritmasında, her bir olası sınıf çifti için ikili DVM sınıflandırıcıları oluşturulur. Dolayısıyla M tane sınıf için Şekil 4.6’daki gibi $M * (M - 1)/2$ tane ikili sınıflandırıcı gerekmektedir. Sınıflandırma aşamasında her

sınıflandırıcıdan bir sınıf etiketi elde edilir. En çok elde edilen sınıf etiketi ilgili giriş verisinin ait olduğu sınıf olarak bulunur. Eşitlik durumunda ise genellikle eşit sayıda sonuçta yer alan sınıf etiketlerinden rastgele bir tanesi seçilir.

Bu algorithmada oluşturulan sınıflandırıcı sayısı hepsine karşı bir algoritmasına göre oldukça fazladır. Fakat her sınıflandırıcı için eğitim verilerinin sayısı göreceli olarak oldukça düşüktür. Bir sınıfla diğer bir sınıf ayırt edilmeye çalışıldığından daha dengelidir ve simetrik olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla kernel matrisinin oluşturulması için gereken hafıza ihtiyacı daha azdır.

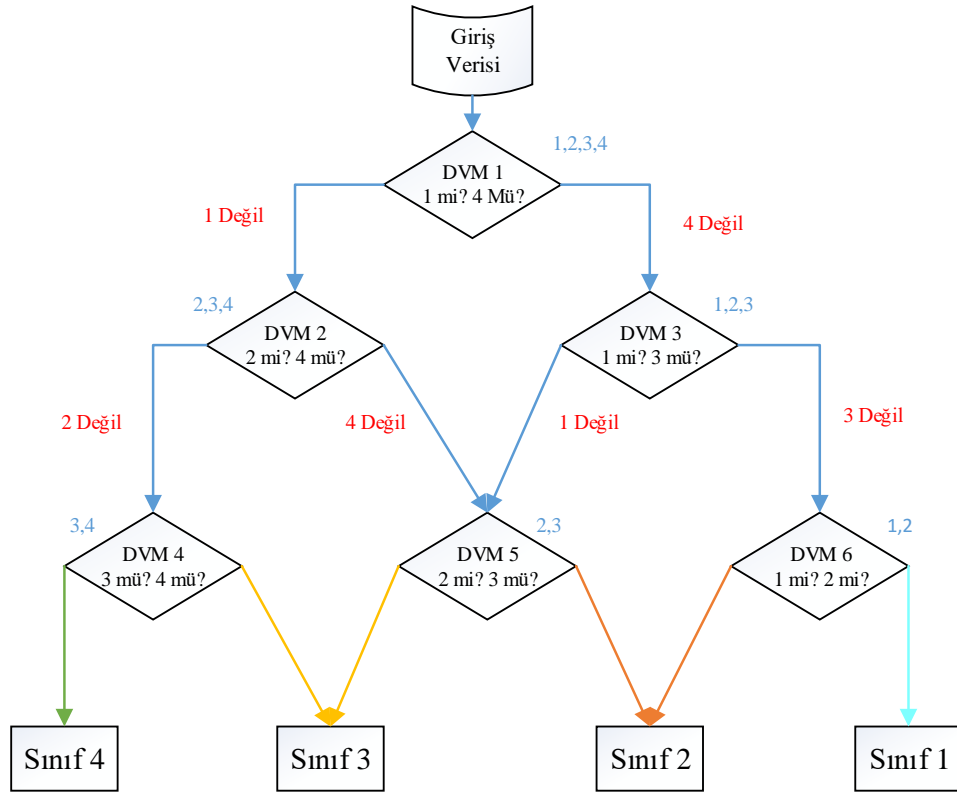


Şekil 4.6: Bire karşı bir algoritması prensip şeması.

4.2.3 Yönlendirilmiş Çevrimsiz Grafik Algoritması

Çok sınıflı sınıflandırma için önerilmiş olan bu yöntemde (Platt ve diğ. 2000) eğitim aşamasında bire karşı bir algoritmasında olduğu gibi yine M sınıfı ayırmak için $M * (M - 1)/2$ sınıflandırıcı oluşturulur. Sınıflandırma aşamasında ise bire karşı bir algoritmasından farklı olarak sınıf etiketini belirlemek için Şekil 4.7’de gösterilmiş olan yönlendirilmiş çevrimsiz grafik yapısını kullanır (Platt ve diğ. 2000). Bu yöntemde test işlemi, test verisinin her sınıflandırıcıda hangi sınıftan olmadığını belirlenmesiyle ilerler. Böylelikle $M - 1$ sınıflandırıcıdan sonra test verisine ait sınıf

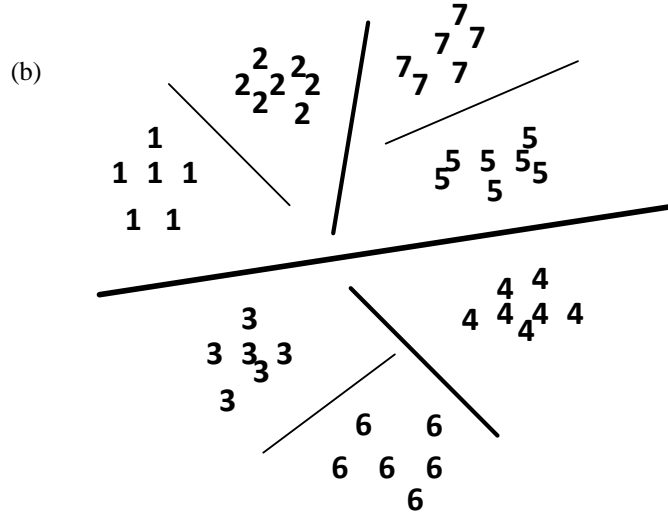
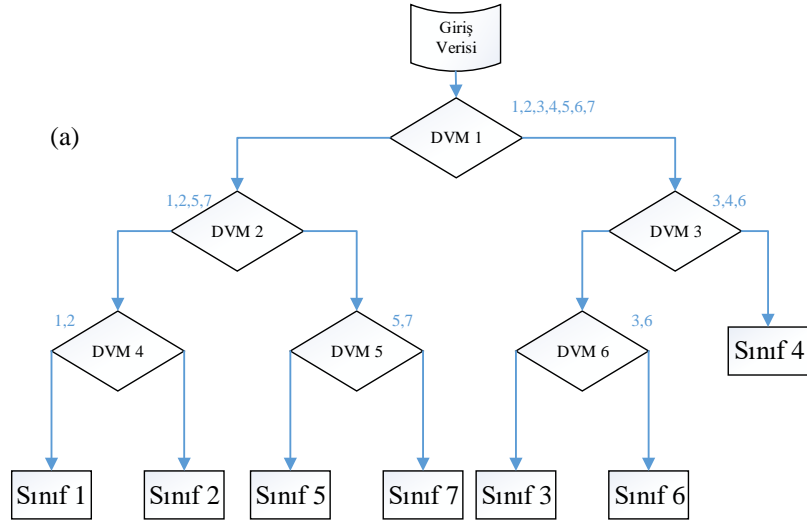
etiketi elde edilmiş olur. Bu yöntem bire karşı bir algoritması ile aynı doğruluk oranlarına sahiptir ve daha hızlı test süresi vardır.



Şekil 4.7: Yönlendirilmiş çevrimsiz grafik şeması.

4.2.4 İkili Karar Ağacı

Bu yöntemde M sınıflı bir sınıflandırma yapmak için Şekil 4.8’da gösterildiği gibi $M - 1$ tane DVM sınıflandırıcısından oluşan ikili karar ağacı kullanılır (Fei ve Liu 2006). Her DVM sınıflandırıcısı, eğitim verisini belirli gruplara bölecek şekilde eğitilir. Hangi sınıflandırıcının hangi grupları ya da sınıfları birbirinden ayıracağı, ayrılacak sınıfların birbirine benzerliği ya da farklılığına göre belirlenir. Yalnızca o verilerle eğitilir. Böylelikle karar ağacında yukarıdan aşağıya doğru ilerledikçe sınıflandırıcıların giriş veri sayısı ve karmaşıklığı azalır. Test aşamasında ise M sınıflı sınıflandırırken, bir giriş verisinin sınıflandırılması için en fazla $\log_2 M$ tane sınıflandırıcıya ihtiyaç vardır (Madzarov ve diğ. 2009).



Şekil 4.8: a) İkili karar ağacı yapısı, b) Örnek bir sınıflandırma.

4.3 Destek Vektör Makinelerinin Optimizasyonu

4.3.1 Örgü (Grid) Arama

Örgü arama yöntemi DVM'nin en uygun sınıflandırmayı gerçekleştirmesi için gerekli olan parametrelerin doğrudan bulunmasına yarayan bir arama algoritmasıdır. Bilindiği üzere DVM'nin sınıflandırmada elde edeceği doğruluk yüzdesi C ve σ parametreleri ile doğrudan ilgilidir.

Örgü arama algoritmasında, parametrelerin Kartezyen koordinatlarda belirlenen bütün kombinasyonları ile DVM sınıflandırıcısı eğitilir. Her eğitimden

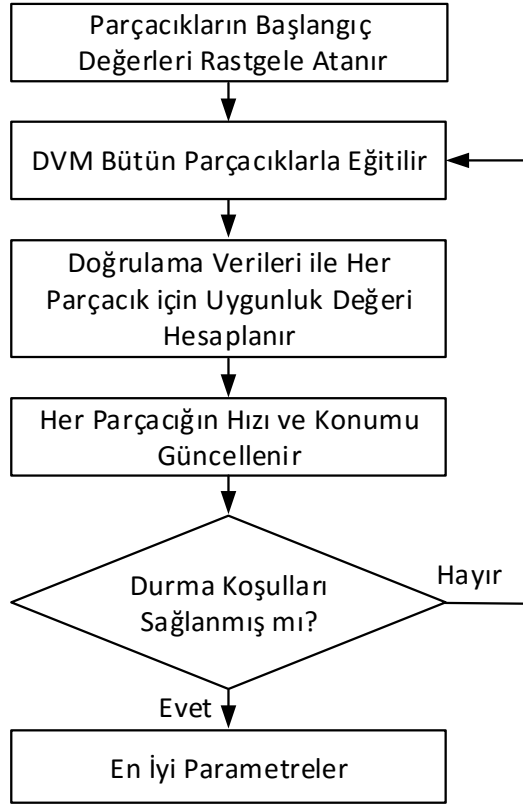
sonra elde edilen sınıflandırıcı modelleri doğrulama verileri ile test edilir ve bu kombinasyonların doğru sınıflandırma yüzdeleri bulunur. En yüksek doğru sınıflandırma yüzdesine sahip parametre çifti ise sınıflandırma için en uygun parametreler olarak belirlenir.

C ve σ parametrelerinin hangi aralıkta aranacağı bilinmiyorsa diğer arama ve optimizasyon yöntemlerine göre en uygun parametrelerin bulunması uzun zaman alır. Bunu aşmak için parametrelerin alacağı değerler bazen 2^x ya da e^x şeklinde ayarlanır ve x 'e ardışık değerler verilerek daha geniş bir alanın taraması sağlanabilir. Araması süresi bu şekilde azaltılsa bile daha geniş aralıklar aranmadan atlandığı için en uygun parametrelerin bulunması çok kolay değildir.

4.3.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında önerilmiş bir metasezgisel optimizasyon yöntemidir (Kennedy ve Eberhart 1995). Bu yöntemde, kuş ve balık sürülerinin doğada yiyecek ararken yapmış oldukları hareketlerden esinlenilmiştir. PSO yöntemi, verilen hedef fonksiyonunu çözüm uzayında dolaşan parçacıklar yardımı ile optimize eder. Bu parçacıklar başlangıçta çözüm uzayına rastgele dağıtılır. Her adımda pozisyonunu ve hızını güncelleyerek en iyi çözümü arar. Her parçacığın güncelleme işlemi o parçacığın ve bütün popülasyonun en iyi deneyimlerine göre yapılır. Şekil 4.9'da PSO'nun DVM'nin parametrelerini bulmak için oluşturulan akış şeması gösterilmiştir. Bu algoritmanın her adımı aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- **Adım 1:** PSO'nun sürü büyüklüğü, ivmelenme katsayıları, eylemsizlik katsayısı, en büyük hız ve adım sayısı gibi parametreleri tanımlanır. Her parçacığın pozisyonu ön tanımlı bir aralıkta rastgele belirlenir.
- **Adım 2:** DVM sınıflandırıcısı her parçacık ile ayrı ayrı eğitilir ve her biri için bir DVM modeli elde edilir.



Şekil 4.9: PSO algoritmasının akış şeması.

- **Adım 3:** Elde edilen DVM modeli, doğrulama verileri ile test edilir ve eşitlik (4.14)'e göre her parçacık için uygunluk değeri hesaplanır. Bu uygunluk değerlerinden ilgili parçacığın tüm adımlardaki en büyük uygunluk (p_{eniye}) ve bütün sürünün o adıma kadar elde etmiş olduğu en büyük uygunluk (g_{eniye}) değerleri bulunur.

$$Uygunluk = \frac{y_t - y_f}{y_t} * 100 \quad (4.14)$$

Burada y_t ve y_f sırasıyla toplam doğrulama veri sayısını ve yanlış sınıflandırılan veri sayısını ifade eder.

- **Adım 4:** Hesaplanan uygunluk değerlerine göre her parçacığın hızı denklem (4.15)'e göre hesaplanır. Konumları ise denklem (4.16)'ya göre güncellenir.

$$v_i^d(t+1) = w * v_i^d(t) + c_1 * R_1 * (p_{eniye}^d(t) - p_i^d(t)) + c_2 * R_2 * (g_{eniye}^d(t) - p_i^d(t)) \quad (4.15)$$

$$p_i^d(t+1) = p_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (4.16)$$

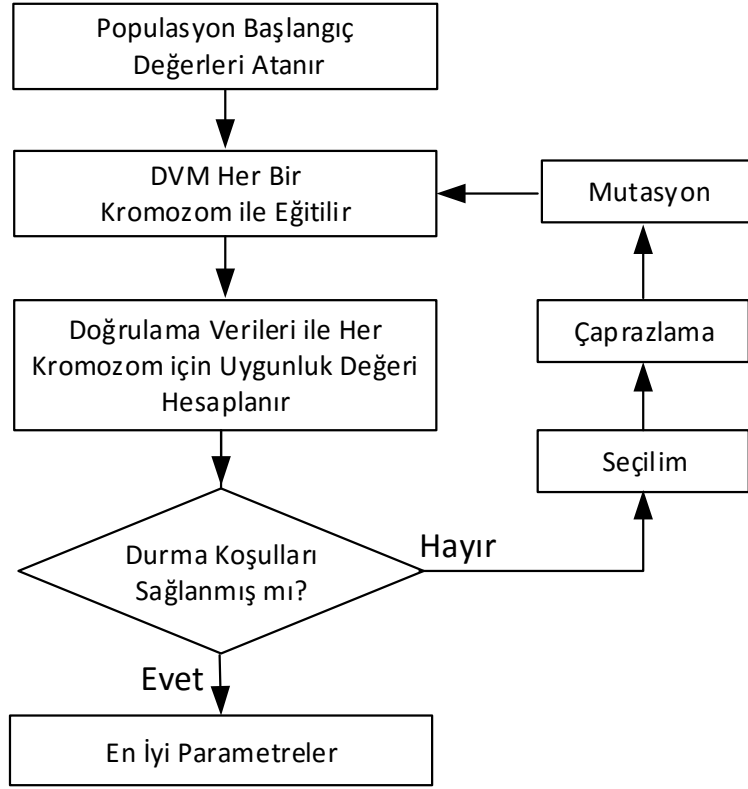
Burada c_1 ve c_2 bilişsel ve sosyal ivmelenme katsayıları, w eylemsizlik katsayısı, R_1 ve R_2 de rastgele değişkenler ve $p_i^d(t)$ i'inci parçacığın pozisyonudur.

- **Adım 5:** Eğer uygunluk değeri istenilen değeri sağlarsa ya da en fazla işlem adımına ulaşırsa algoritma döngüden çıkar.
- **Adım 6:** PSO algoritması sonlandırılır ve en iyi parametreler elde edilmiş olur.

4.3.3 Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), John Henry Holland tarafından ortaya koyulmuş, doğal seçilim ve popülasyon genetiği teoremlerine dayanan, sezgisel bir arama ve optimizasyon yöntemidir (Holland 1992). GA, Charles Darwin'in "güçlü olan hayatta kalır" prensibinin benzerini optimizasyon problemine uygular. Yöntem, popülasyon adı verilen aday çözümlerden oluşan küme ile optimizasyona başlar. Her aday çözüme kromozom adı verilir. Bir takım evrimsel süreçten geçerek her adımda en uygun çözüme doğru yaklaşır. GA ile DVM'nin parametrelerinin optimize edilmesi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bu süreç aşağıda adımlar halinde anlatılmıştır:

- **Adım 1:** Yöntem kromozomlardan oluşan popülasyonun rastgele oluşturulması ile başlar.
- **Adım 2:** DVM her bir kromozomla eğitilir ve her biri için DVM modeli elde edilir.
- **Adım 3:** Elde edilen DVM modelleri doğrulama verileri ile test edilir ve uygunluğu denklem (4.14)'e göre hesaplanır.
- **Adım 4:** Eğer elde edilen uygunluk değeri istenilen değeri sağlamazsa her bir kromozom sırasıyla seçilim, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden geçirilir ve algoritma Adım 2'ye gider.
- **Adım 5:** Eğer uygunluk değeri istenilen değere erişmiş ya da en fazla tekrarlama sayısına ulaşılmışsa algoritma döngüden çıkar ve en uygun parametreler elde edilmiş olur.



Şekil 4.10:Genetik algoritma akış şeması.

4.3.4 Diferansiyel Evrim Optimizasyonu

Diferansiyel Evrim (DE) algoritması Storn ve Price tarafından ortaya koyulmuş bir yöntemdir (Storn ve Price 1997). DE de GA ve PSO gibi sezgisel, rastgele ve popülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemde, GA'dan farklı olarak, ebeveynlerden yeni nesiller oluşturulurken klasik çaprazlama ve mutasyonun yerine özel bir diferansiyel operatör kullanılır. Seçilim aşamasında ise yine Charles Darwin'in prensibine uygun olarak en iyi bireyin seçilmesi söz konusudur. Uygulaması kolay ve ayarlanması gereken parametre sayısı az olan bir optimizasyon yöntemidir. Yalnızca birey sayısı, mutasyon katsayısı (F) ve çaprazlama katsayısının (CR) ayarlanması ile hızlı bir şekilde uygulanabilir. DE'nin işleyişi aşağıda adım adım anlatılmış ve Şekil 4.11'de DE optimizasyonu akış şeması verilmiştir.

- **Adım 1:** DE algoritması her biri en uygun çözüm adayı olan popülasyonu oluşturan bireylere, rastgele ve önceden belirlenmiş aralıkta değerler verilmesi ile başlar. Bu yöntemde popülasyondaki birey sayısı (N) en az 4 olmalıdır.

- **Adım 2:** Her iterasyonda bir birey $x_{i,G}$ ve bundan farklı üç birey daha $x_{r1,G}$, $x_{r2,G}$ ve $x_{r3,G}$ olarak seçilir. Bu işlem popülasyondaki her birey için tekrarlanır. Buradaki alt indisler, i , $r1$, $r2$ ve $r3$ bireylerin birbirinden farklı olduğunu ve G alt indisi de tekrarlama sayısı ya da diğer bir deyişle bireyin kaçınıcı nesilde yer aldığını ifade eder.
- **Adım 3:** Mutasyon: Seçilen iki bireyin ağırlıklı farkları denklem (4.17)'deki gibi üçüncü bireye eklenir ve yeni bir vektör elde edilir.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F * (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (4.17)$$

Burada F mutasyon katsayısıdır ve $[0,2]$ aralığında sabit bir sayıdır. $v_{i,G+1}$ vektörü “donör vektör” olarak isimlendirilir.

- **Adım 4:** Çaprazlama: Deneme bireyi ($u_{i,G+1}$), hedef birey ($x_{i,G}$) ve donör vektörün ($v_{i,G+1}$) denklem (4.18)'deki gibi çaprazlanması sonucu elde edilir.

$$u_{j,i,G+1} = \begin{cases} v_{j,i,G+1} & \text{if } rand_{j,i} \leq CR \text{ or } j = I_{rand} \\ x_{j,i,G} & \text{if } rand_{j,i} \leq CR \text{ and } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (4.18)$$

Burada, CR çaprazlama oranı, I_{rand} ; 1 ile bireyin boyutu arasında rastgele bir tamsayı, ve $rand_{j,i}$ de $[0,1]$ aralığında rasgele bir sayıdır.

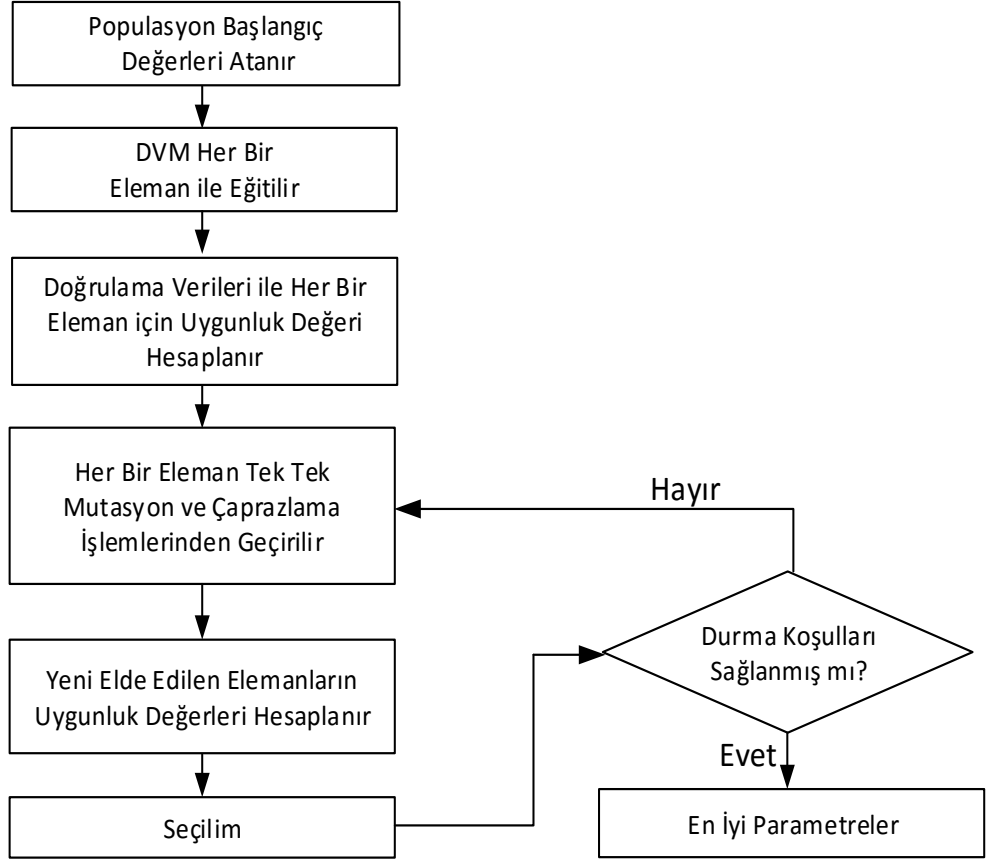
- **Adım 5:** Seçim: $x_{i,G}$ bireyinin uygunluk değeri, yeni elde edilen $u_{i,G+1}$ bireyinin uygunluk değeri ile denklem (4.19)'daki gibi karşılaştırılır. Uygunluk değeri büyük olan birey bir sonraki nesilde popülasyonda yer alır.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & \text{eğer } \text{Uygunluk}(u_{i,G+1}) \geq \text{Uygunluk}(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{Diğer Durumlarda} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.19)$$

Her bir bireyin uygunluk değeri ise denklem (4.14)'e göre hesaplanır.

- **Adım 6:** Eğer uygunluk değeri istenilen kadar olmaz ya da durma şartları sağlanmazsa algoritma Adım 2'ye gider ve DE operatörleri her bir bireye tekrar daha iyi çözümü bulmak için uygulanır.

- **Adım 7:** Eğer uygunluk değeri istenilen seviyeye ulaşmış ya da en fazla tekrarlama sayısına ulaşılmışsa algoritma döngüden çıkar ve en uygun parametreler elde edilmiş olur.



Şekil 4.11:Diferansiyel evrim algoritmasının akış şeması.

5. BENZETİM SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

5.1 Yağda Çözünmüş Gaz Analizi Verilerinin Elde Edilmesi

Bu tez çalışmasında, geliştirilen DVM sınıflandırıcı modelinin eğitilip test edilmesinde farklı güç transformatörlerine ait 150 adet YGA verisi kullanılmıştır. YGA verileri, literatürdeki çalışmalarda bulunan gaz verilerinden elde edilmiştir. Bu verilerin tamamı hata sınıfları kaynakça belirtilerek Ek-A'da verilmiştir. Verilerin hata sınıfları ve DVM'de kullanılış biçimlerine göre sayıları Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Elde edilen gaz verileri eğitim, doğrulama ve test üzere üç sete bölünmüştür. Sırasıyla modelin eğitimin setinde 100, doğrulama setinde 25 ve test aşamasında 25 YGA verisi bütün hata durumlarını temsil edecek şekilde kullanılmıştır. YGA verileri bir normal sınıf (NF) ve beş hata sınıfı olmak üzere toplam altı sınıfa ayrılmıştır. Güç transformatöründe meydana gelen bu hata sınıfları kısmi deşarj (KD), düşük enerjili deşarj (D1), yüksek enerjili deşarj (D2), düşük ve orta dereceli termik hata (T1&T2) ve yüksek sıcaklık termik hata (T3) sınıflarından oluşmaktadır.

Elde edilen her bir YGA verisi H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 ve C_2H_6 olmak üzere beş gaz miktarından oluşmaktadır. Bu gaz verileri güç transformatörünün durumu hakkında çeşitli bilgiler içermektedirler. DVM sınıflandırıcısının bu verileri daha iyi sınıflandırabilmesi için her bir YGA verisi bir ön işlemden geçmektedir. Bu işlemde YGA verisi içerisindeki gaz miktarları denklem (5.1)'deki gibi normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur.

$$x_k = \frac{c^k}{\max_{0 \leq i \leq 5} (c^i)} \quad k = 1, 2, \dots, 5 \quad (5.1)$$

Burada k her gaz verisinin indisini, c^k ise ppm olarak gaz miktarını ifade etmektedir. Normalizasyon işlemi sırasında, işlemin yapısı gereği bir takım veri kayıpları olmaktadır. Örneğin $X_1 = [10; 9; 8; 7; 6]$ ve $X_2 = [100; 90; 80; 70; 60]$ şeklinde olan iki YGA gaz verisi normalizasyon işlemi sonrasında $X'_{1,2} = [1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6]$ şeklindeki aynı giriş vektörüne dönüşmektedir. Bu veri kaybını

ve karışıklığı engellemek için her YGA verisine denklem (5.2)'deki gibi altıncı bir x_6 verisi eklenmektedir.

$$x_6 = \log_{10} \left(\max_{1 \leq x \leq 5} c^i \right) \quad (5.2)$$

Dolayısıyla DVM sınıflandırıcısında kullanılacak olan giriş vektörleri $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$ şeklinde normalize edilmiş yanıcı gaz değerlerine eklenen yeni değerle birlikte altı boyutlu olarak oluşturulmuştur.

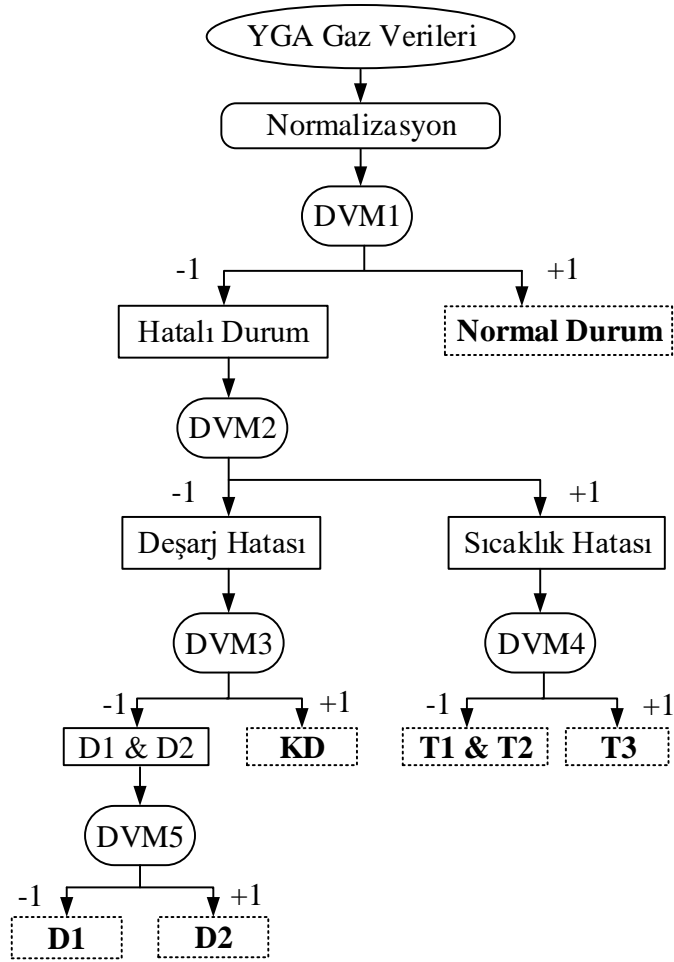
Tablo 5.1: Güç transformatörü hatalarına ilişkin YGA veri sayıları.

Kısaltma	Güç Transformatörü Hata Türü	Eğitim	Doğrulama	Test
NF	Normal durum	17	4	3
KD	Kısmi deşarj	7	2	2
D1	Düşük enerjili deşarj	17	5	5
D2	Yüksek enerjili deşarj	27	5	6
T1 & T2	Orta ve düşük sıcaklık hatası $T < 700$ °C	14	5	5
T3	Yüksek sıcaklık hatası $T > 700$ °C	18	4	4
Toplam YGA verisi sayısı		100	25	25

5.2 Çok Katmanlı Destek Vektör Makineleri Sınıflandırıcısının Oluşturulması

Bu tez çalışmasında, çok katmanlı DVM sınıflandırıcısının oluşturulmasında ikili karar ağacı yapısı kullanılmıştır. Şekil 5.1'de güç transformatörü arıza tanınması için ikili karar ağacı yapısındaki DVM sınıflandırıcısı prensip şeması gösterilmiştir. Burada çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı, giriş verilerini altı sınıfa ayırmak amacıyla beş adet ikili DVM sınıflandırıcısından oluşmaktadır. Altı sınıftan biri normal durumu, diğer beşi de hatalı durumları ifade etmektedir (KD, D1, D2, T1&T2 ve T3). Başlangıç olarak bütün YGA verileri normalize edilmektedir. Daha sonra DVM1 sınıflandırıcısı normal durum ile hatalı durumu ayırt edecek şekilde eğitilir. DVM1 sınıflandırıcısına giren veri normal bir duruma ait veri ise sınıflandırıcı +1, diğer durumlarda ise -1 sonucunu verir. Benzer şekilde diğer DVM sınıflandırıcıları da girişlerindeki veriyi iki sınıfa ayıracak şekilde eğitilirler. Bu DVM sınıflandırıcılarına uygulanan giriş verileri hangi duruma ait ise sınıflandırıcılar da o sonucu verecek şekilde çıkış verirler.

Böylelikle test edilmek istenilen giriş verisi Şekil 5.1'deki yapıda yukarıdan aşağıya doğru ilerler ve hatanın ait olduğu sınıf bulunmuş olur.



Şekil 5.1: Güç transformatörü arıza tanılması için ikili karar ağacı yapısındaki DVM sınıflandırıcısı prensip şeması.

5.3 DVM Sınıflandırıcısının Optimizasyonu

DVM sınıflandırıcısının bilindiği üzere sınıflandırma performansını doğrudan etkileyen C ve σ gibi iki parametresi vardır. Bu parametrelerin en uygun şekilde belirlenmesi doğru sınıflandırma yapabilmek açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla, DVM sınıflandırıcısının parametrelerinin en uygun şekilde nasıl bulunacağını belirlemek ve elde edilen parametrelerin sınıflandırma oranını nasıl etkilediğini ve en iyi optimizasyon yöntemini bulmak amacıyla DVM sınıflandırıcısı çeşitli optimizasyon yöntemleri ile optimize edilmiştir.

5.3.1 Benchmark Sonuçları

İlk olarak, farklı optimizasyon teknikleriyle optimize edilen DVM sınıflandırıcısının doğruluğunu test etmek için bütün oluşturulan modeller California Üniversitesinden (Lichman 2013) elde edilen İris, Wine ve Glass benchmark veri setleri ile test edilmiştir. Bu veri setlerinin özellikleri Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edilen DVM sınıflandırıcısının elde ettiği performanslar da Tablo 5.3’te ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 5.2: Benchmark verilerinin özellikleri.

Veri Seti	Sınıf Sayısı	Verilerin Boyutu	Toplam Veri Sayısı	Eğitim Verisi Sayısı	Test Verisi Sayısı
Iris	3	4	150	113	37
Wine	3	13	178	134	44
Glass	7	9	214	161	53

Tablo 5.3: Farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısının benchmark verilerini sınıflandırma yüzdeleri.

Veri Seti	Sınıflandırma Doğruluğu (%)					
	Eğitim			Test		
	GA	DE	PSO	GA	DE	PSO
Iris	97,35	100	100	97,30	100	100
Wine	76,86	91,79	97,01	70,45	77,27	84,09
Glass	49,06	80,74	95,65	43,40	62,26	79,24

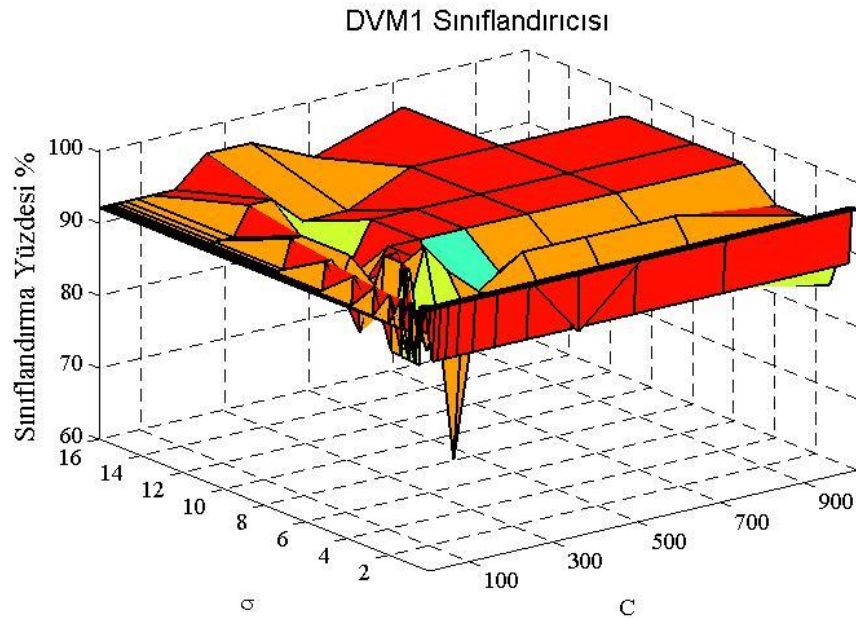
5.3.2 Optimizasyon Yöntemlerinin Karşılaştırması

Geliştirilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısının parametreleri, hangi optimizasyon yönteminin daha yüksek sınıflandırma yüzdesine ve daha az optimizasyon zamanına sahip olduğunu belirlemek için ÖA, GA, DE ve PSO algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. DVM sınıflandırıcısı, gerçek transformatör arızalarından elde edilmiş olan YGA verileriyle eğitilmiş, doğrulanmış ve test edilmiştir. Doğrulama veri seti optimizasyon sürecinde elde edilen uygunluk değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Bütün optimizasyon yöntemlerinde DVM parametreleri, doğrulama setinde en yüksek sınıflandırma yüzdesini elde etmek amacıyla optimize edilmiştir. Elde edilen en uygun parametrelerle DVM sınıflandırıcısı eğitilmiş ve test verileriyle test edilmiştir. Böylelikle sınıflandırıcının

herhangi bir YGA verisiyle test edildiğinde ne kadar doğrulukla hatayı belirleyebileceği gösterilmiştir. DVM sınıflandırıcısının farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edildiğinde elde ettiği sınıflandırma yüzdesi, optimizasyon zamanı ve her DVM sınıflandırıcısı için elde edilen en uygun parametreler Tablo 5.4’de verilmiştir.

Örgü arama algoritması için σ ve C değerleri 2^x fonksiyonu ile belirlenmiştir. Burada σ için değiştirme aralığı -4’ten 4’e kadar, C için ise -2’den 10’a kadar olacak şekilde sınırlandırılmış ve x değeri 0.5 adım aralığıyla değiştirilmiştir. Örnek olarak, DVM1 için örgü arama yöntemiyle belirlenen parametrelere bağlı sınıflandırma performansı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi doğrulama verileri için elde edilen en yüksek sınıflandırma yüzdesi % 96’dır. Bu doğruluk oranını veren σ ve C parametreleri de sırasıyla 1 ve 1,41’dir.

Örgü arama yöntemiyle optimize edilmesi 180,43 saniye süren çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı, en uygun parametreler elde edildikten sonra test verileriyle test edilmiştir. Elde edilen sınıflandırıcı test verilerinin % 84’ünü doğru bir şekilde sınıflandırabilmiştir.



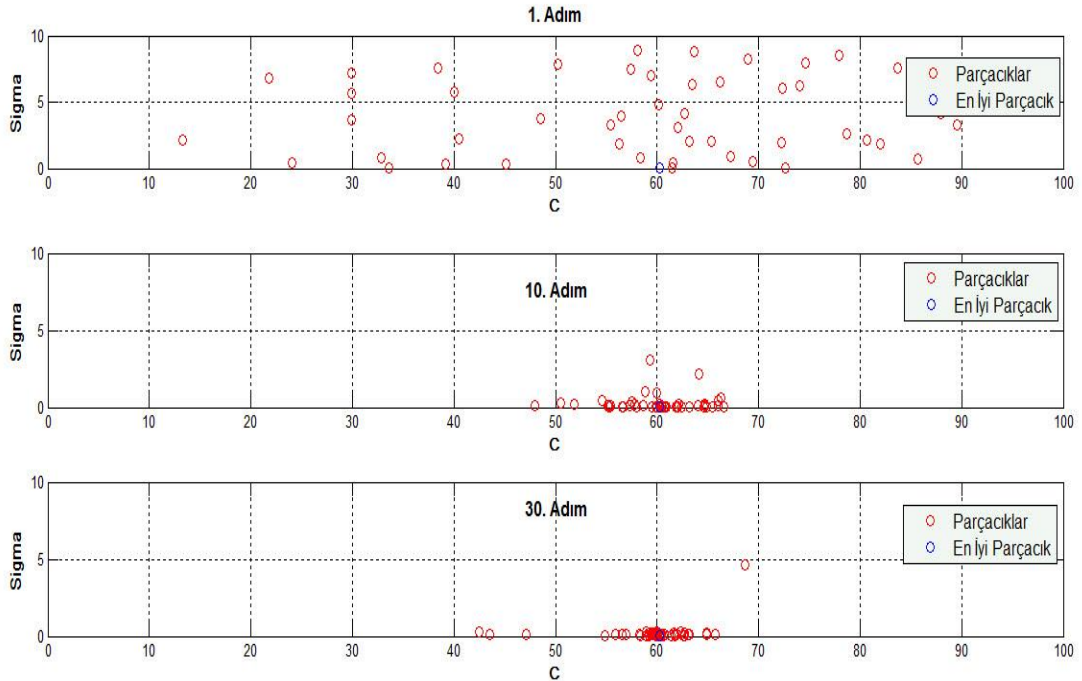
Şekil 5.2: DVM1 için parametrelerin sınıflandırma performansına etkisi.

Geliştirilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı GA ile optimize edildiğinde %88 hata tanılama yüzdesi elde edilmiştir ve optimizasyon işlemi 109,48 saniye

sürmüştür. Burada GA parametreleri olan popülasyon sayısı 40, çaprazlama oranı 0.8 mutasyon oranı 0,1 olarak belirlenmiştir. Kromozom uzunluğu ise ilk 25 hanesi C parametresini, kalan 30 hanesi σ parametresini temsil etmek üzere 55 haneli olarak belirlenmiştir.

DE optimizasyon yöntemi ile optimize edilen DVM sınıflandırıcısında da GA'ya benzer olarak % 88 doğruluk oranı elde edilmiş ve optimizasyon işlemi 246,29 saniye sürmüştür. DE algoritmasında birey sayısı, mutasyon katsayısı (F) ve çaprazlama katsayısının (CR) sırasıyla 40; 0,8 ve 0,4 olarak belirlenmiştir.

PSO algoritmasıyla optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısında da her katmandaki DVM sınıflandırıcısı, diğer optimizasyon yöntemlerinde olduğu gibi doğrulama verilerini en yüksek doğrulukla sınıflandıracak şekilde eğitilmiştir. PSO algoritmasının popülasyon sayısı 40 olarak seçilmiştir. 104,30 saniyede optimize edilmiştir. Elde edilen sınıflandırıcı test verileriyle test edildiğinde de bu verilerin % 92'sini doğru bir şekilde sınıflandırmıştır. Şekil 5.3'de PSO algoritmasının en uygun çözüme yaklaşırken sergilediği davranış görülebilir.



Şekil 5.3: PSO'nun en uygun çözüme yaklaşırken sergilediği davranış.

Tablo 5.4: Farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı için en uygun DVM parametreleri, sınıflandırma ve hata tespit oranları, optimizasyon ve test süreleri.

Metot	DVM Sınıflandırıcısı	Parametreler		Sınıflandırma Oranı (%)	Hata Tespit Oranı (%)	Optimizasyon Süresi (saniye)	Test süresi (saniye)
		C	σ				
DVM-ÖA	DVM1	1,41	1	88	84	180,43	0,154
	DVM2	4	0,35	100			
	DVM3	5,65	0,707	100			
	DVM4	2	0,5	88.89			
	DVM5	0,25	0,0625	100			
DVM-GA	DVM1	54,54	9,99	92	88	109,48	0,134
	DVM2	22,05	0,13	100			
	DVM3	39,48	1,98	100			
	DVM4	66,77	0,64	88.89			
	DVM5	6,33	0,05	100			
DVM-DE	DVM1	45,31	10	92	88	246,29	0,190
	DVM2	20,86	1,15	100			
	DVM3	23,47	1,63	100			
	DVM4	44,47	0,51	88.89			
	DVM5	19,22	0,77	100			
DVM-PSO	DVM1	52,04	7,59	96	92	104,30	0,086
	DVM2	75,97	0,41	100			
	DVM3	98,28	2,44	100			
	DVM4	74,16	0,64	88.89			
	DVM5	17,48	0,76	100			

Optimizasyon ve test süreleri karşılaştırılabilir olması için farklı optimizasyon yöntemlerinin test ve karşılaştırma işlemleri aynı koşul ve şartlar altında aynı bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı için en uygun DVM parametreleri, sınıflandırma ve hata tespit oranları, optimizasyon ve test süreleri Tablo 5.4 karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tablo 5.4'den görülebileceği gibi PSO ile optimize edilen DVM sınıflandırıcısının optimizasyon süresi ve test süresi diğer yöntemlerden daha azdır. Ancak bütün yöntemler için test süreleri çok kısadır ve optimizasyon işlemi de tek bir sefer yapılacağı için optimizasyon yöntemlerinden hangisinin daha iyi olduğunu belirlemede çok fazla bir önemi yoktur.

Farklı yöntemlerle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı ve klasik yöntemlerin hata sınıflandırmasının gerçek hata türü ile karşılaştırılması Tablo 5.5'te verilmiştir. Optimizasyon yöntemlerini karşılaştırmada kullanılan 25 adet test verisi ve farklı optimizasyon yöntemleriyle optimize edilen DVM sınıflandırıcısının bu verileri hangi hata sınıflarına sınıflandırdığı, gerçek hata durumlarıyla birlikte bu

tablodan rahatlıkla görülür. Klasik yöntemlerle den en yüksek tutarlılıkta olan ve en yüksek sınıflandırma yüzdesi elde eden Duval üçgen ve IEC gaz oranları yöntemlerinin test verilerini sınıflandırdıkları sınıflar da Tablo 5.5’de gösterilmiştir.

Tablo 5.5: Farklı yöntemlerle optimize edilen çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı ve klasik yöntemlerin hata sınıflandırmasının gerçek hata türü ile karşılaştırılması.

	YGA Verileri					Gerçek Hata	Klasik Yöntemler		DVM			
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂		IEC Gaz Oranları	Duval Üçgen	DVM-ÖA	DVM-GA	DVM-DE	DVM-PSO
1	6,7	10	11	71	3,9	NF	T3	-	D2	T3	D2	D2
2	3,5	5	5,5	10,5	2,5	NF	ND	-	NF	NF	NF	NF
3	21,54	4,86	113	0,98	0	NF	NF	-	NF	NF	KD	NF
4	41	112	0	254	4536	KD	ND	D1	KD	KD	KD	KD
5	1600	4000	500	8500	16000	KD	D2	D2	KD	KD	KD	KD
6	565	93	34	47	0	D1	T1&T2	T2	D1	D1	D1	D1
7	150	53	34	20	0	D1	NF	T2	D1	D1	D1	D1
8	152	54	32	20	3	D1	ND	D-T	D1	D1	D1	D1
9	42	59	8	28	8	D1	ND	T2	D1	T1&T2	D1	D1
10	651	52	35	21	0	D1	KD	T2	D1	D1	D1	D1
11	59	7,1	19	4,5	71	D2	ND	D1	D2	D2	D2	D2
12	293	50	13	115	120	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
13	443	85	9,5	103	174	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
14	32,4	5,5	1,4	12,6	13,2	D2	D2	D2	NF	D2	D2	D2
15	33	5,4	1,5	12,9	13,6	D2	D2	D2	NF	D2	D2	D2
16	469	147	12,5	265	520	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
17	300	490	180	360	5	T1&T2	T1&T2	T2	T3	T3	T3	T3
18	157	127	34	96	0	T1&T2	T1&T2	T2	T1&T2	T1&T2	T1&T2	T1&T2
19	34,88	76,93	52,89	8,74	3,86	T1&T2	ND	T1	T1&T2	T1&T2	T1&T2	T1&T2
20	3675	6392	2500	7691	5	T1&T2	T3	T3	T1&T2	T1&T2	T1&T2	T1&T2
21	48	610	29	10	0	T1&T2	T1&T2	KD	T1&T2	T1&T2	T1&T2	T1&T2
22	200	700	250	740	1	T3	T1&T2	T3	T3	T3	T3	T3
23	162,5	224	45,5	497	12,5	T3	T3	T3	T3	T3	T3	T3
24	220	340	41	492	14	T3	T3	T3	T3	T3	T3	T3
25	45	167,5	82	330	3,5	T3	T3	T3	T3	T3	T3	T3
Doğru sınıflandırılan veri sayısı							13/25	13/22	21/25	22/25	22/25	23/25
Hata Tespit Yüzdesi							52	59,09	84	88	88	92

-: Uygulanabilir değil (Duval üçgen yöntemi normal durumu tespit edemez).

D-T : Deşarj ve sıcaklık hatası bir arada

ND : Tanımsız

Tablo 5.5’den de görüldüğü gibi IEC gaz oranları, Duval üçgen, DVM-ÖA, DVM-GA, DVM-DE ve DVM-PSO yöntemlerinin hata tanılama yüzdeleri sırasıyla % 52, % 59,09, % 84, % 88, % 88 ve % 92’dir. Bütün bu sonuçlar göstermektedir ki çok katmanlı DVM sınıflandırıcısı hangi yöntemle optimize edilirse edilsin klasik yöntemlerden daha etkili, tutarlı ve yüksek doğruluk oranı ile hataları tespit edebilmektedir.

Dikkat edilirse Tablo 5.5’de 1’inci ve 17’inci satırlarda DVM-PSO hataları doğru tespit edememiştir. Bunlardan 1’inci satırdaki YGA verisini diğer bütün

yöntemler yanlış sınıflandırmıştır. Bu sonuç, ilgili verinin gerçekte yanlış yorumlanmış ve yanlış sınıflandırılmış olabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen bütün çok katmanlı DVM sınıflandırıcıları güç transformatörlerinin arıza tespitinde kullanılabilir durumdadır. Fakat, DVM-PSO diğerleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek hata sınıflandırma yüzdesine, daha hızlı optimizasyon ve test süresine sahiptir.

6. SONUÇLAR

Güç transformatörlerinde arıza tanılmasının başlangıç aşamasında fazla büyümeden, doğru bir şekilde tespit edilmesi transformatörlerin sorunsuz çalışması, uzun ömürlü olmaları, muhtemel enerji kesinti ve kayıplarının önüne geçilmesi ve enerji sisteminin güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Bu amaçla güç transformatörlerinde yağda çözünmüş gaz analizi dünyaca kabul görmüş ve etkin kullanılan bir yöntemdir. Burada önemli olan süreçlerden birisi ise bu YGA verilerinin hızlı ve doğru bir şekilde değerlendirilmesidir.

Bu tez çalışmasında, yağlı güç transformatörlerinin YGA verileri kullanılarak arıza tanılması için çok katmanlı DVM ile hata sınıflandırması yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin sınıflandırma doğruluğunu ve arıza tanılama hızını artırabilmek için ÖA, GA, DE ve PSO algoritmalarıyla optimizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen DVM modeli elde edilen YGA verileri ile eğitilmiş, doğrulanmış ve test edilmiştir. Böylelikle her optimizasyon yönteminin bu alanda kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır. Benzetim sonuçları göstermiştir ki, akıllı bir yöntem olan çok katmanlı DVM, hangi yöntemle optimize edilirse edilsin klasik yöntemlerden çok daha yüksek doğruluk oranı ile güç transformatörü hata tanılması yapabilmektedir. Optimizasyon yöntemlerinin içerisinde ise PSO, diğer yöntemlere göre daha kısa sürede daha yüksek hata tanılama doğruluğu elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca elde edilen bu sonuçlar göstermiştir ki, oluşturulan model çevrimiçi çalışarak meydana gelebilecek olası transformatör hatalarını en kısa sürede tanımlayabilecek kapasiteye sahiptir.

7. KAYNAKLAR

Acara, A., “Türkiye’nin kalıcı organik kirletici maddelere (pop’ler) ilişkin Stockholm sözleşmesi için taslak ulusal uygulama planı”, Proje No. GF/TUR/03/008, (2006)

Adams, R. P., *Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry*, Illinois, USA: Allured Publishing Corporation (2007).

AREVA, *Power Transformers: Fundamentals and Expertise*, Paris, Fransa: AREVA T&D, (2008).

Bacha, K., Souahlia, S., and Gossa, M., “Power transformer fault diagnosis based on dissolved gas analysis by support vector machine”, *Electric Power Systems Research*, 83 (1), 73-79, (2012).

Beykverdi, M., Faghihi, F., and Pour, A. M., “A new approach for transformer incipient fault diagnosis based on dissolved gas analysis (DGA)”, *Nova Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2 (3), 1-8, (2014).

Campbell, C., “Kernel methods: a survey of current techniques,” *Neurocomputing*, 48 (1-4), 63-84, (2002).

Cho, M.-y., Lee, T.-f., Gau, S.-w., and Shih, C.-n., “Power transformer fault diagnosis using support vector machines and artificial neural networks with clonal selection algorithms optimization”, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems Lecture Notes in Computer Science*, 4251, 179-186, (2006).

Cortes, C., and Vapnik, V., “Support-vector networks,” *Machine Learning*, 20 (3), 273-297, (1995).

Dhote, N. K., and Helonde, J. B., “Improvement in transformer diagnosis by DGA using fuzzy logic”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 9, 615-621, (2014).

Duval, M., “Fault gases formed in oil-filled breathing EHV power transformers- The interpretation of gas analysis data”, *IEEE PAS Conf.*, Paper No C 74 476-8, (1974)

Duval, M., dePablo, A., “Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases”, *Electrical Insulation Magazine*, 17 (2), 31-41, (2001).

Duval, M., and Dukaram, J., “Improving the reliability of the transformer gas-in-oil diagnosis”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 21 (4), 21-27, (2005).

Fei, B. and Liu, J., “Binary Tree of SVM: A New Fast Multiclass Training and Classification Algorithm”, *IEEE Transaction on neural networks*, 17 (3), 696-704, (2006).

Fei, S.-w., and Zhang, X.-b., “Fault diagnosis of power transformer based on support vector machine with genetic algorithm”, *Expert Systems with Applications*, 36 (8), 11352-11357, (2009).

Ganyun, L.V., Haozhong, C., Haibao, Z., and Lixin, D., “Fault diagnosis of power transformer based on multi-layer SVM classifier”, *Electric Power Systems Research*, 74 (1), 1-7, (2005).

Harlow, J. H., “*Electric Power Transformer Engineering*”, Boca Raton, FL, CRC Press Second Edition, (2007).

Holland, J.H., “Genetic algorithms”, *Scientific American*, pp. 66-72, 1992.

Hsu, C-W., Lin, C-J., “A comparison of methods for multiclass support vector machines,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13 (2), 415-425, (2002).

Huang, Y. C., and Sun, H. C., “Dissolved gas analysis of mineral oil for power transformer fault diagnosis using fuzzy logic”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20 (3), 974-981, (2013).

IEEE Guide for the interpretation of gases generated III oil immersed transformers, IEEE Power Eng. Soc., IEEE Std C57.104™, 2008.

İplikci, S., *Optimizasyon Teknikleri Ders Notları*, Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli, (2013).

Kennedy, J., Eberhart, R., “Particle swarm optimization”, *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, Perth, Australia, 1942-1948, (1995).

Köroğlu, S., Demirçalı, A., Yıldız, M., Çalı, M. E., ve Mıhçı, G., “Güç transformatörleri arızalarının yağda çözünmüş gaz analiziyle tanılanması”,

Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), Bursa, Türkiye, 221-224, (2014).

Lee, T.-H., Cho, M.-Y., and Fang, F.-M., “Features selection of SVM and ANN using particle swarm optimization for power transformers incipient fault symptom diagnosis”, *International Journal of Computational Intelligence Research*, 3 (1), 60-65, (2007).

Liao, R.J., Zheng, H.B., Grzybowski, S., and Yang, L.J., “A multiclass SVM-based classifier for transformer fault diagnosis using a particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 23, 181-190, (2013).

Lichman, M. (2013). UCI Machine Learning Repository [<http://archive.ics.uci.edu/ml>]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science.

Liu, L., and Ding, Z., “Modeling analysis of power transformer fault diagnosis based on improved relevance vector machine”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1-6, (2013).

Madzarov G., Gjorgjevikj D. and Chorbev I., “A multiclass SVM classifier utilizing binary decision tree”, *Informatica*, 33 (2), 233-241, (2009).

Malik, H., Mishra, S., and Mittal, A. P., “Selection of most relevant input parameters using waikato environment for knowledge analysis for gene expression programming based power transformer fault diagnosis”, *Electric Power Components and Systems*, 42 (16), 1849-1861, (2014).

Mehta, A.K., Sharma, R.N., Chauhan, S., and Saho, S., “Transformer diagnostics under dissolved gas analysis using support vector machine”, *Proceedings of 2013 International Conference on Power, Energy and Control, ICPEC 201*, Dindigul, India, 181-186, (2013).

Mirzai, M., Gholami, A., and Aminifar, F., “Failures analysis and reliability calculation for power transformers”, *Journal of Electrical System*, 2(1), 1-12, (2006).

Muhamad, N. A, Phung, B. T., Blackburn, T. R., and Lai, K. X., “Comparative study and analysis of DGA methods for transformer mineral oil”, *Proceedings Power Technology*, Lausanne, Switzerland, 45–50, (2007).

OECD, “OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, Test No. 301: Ready Biodegradability”, *OECD Publishing*, Paris, (1992)

Platt, J. C., Cristianini, N. and Shawe-Taylor, J., “Large margin DAG's for multiclass classification”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 12, 547-553, (2000).

Rozga, P., “Properties of new environmentally friendly biodegradable insulating fluids for power transformers”, *1st Annual International Interdisciplinary Conference (AIIC)*, Azores, Portugal, 358-364, (2013).

Sezer, M., *Trafo Bakımı ve Yalıtım Yağı*, Balıkesir: Çağdaş basımevi, 3. Basım, (2014).

Shintemirov, A., Tang, W., and Wu, Q.H., “Power transformer fault classification based on dissolved gas analysis by implementing bootstrap and genetic programming”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews*, 39 (1), 69-79, (2009).

Souahlia, S., Bacha, K., and Chaari, A., “Artificial intelligence tools aided-decision for power transformer fault diagnosis”, *International Journal of Computer Applications*, 38(3), 0975- 8887, (2012).

Storn, R., and Price, K., “Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces”, *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359, (1997).

Topaloğlu, M., “Çevrimiçi destek vektör makineleri tabanlı model öngörülü denetim”, (Yüksek Lisans), *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2014).

UNEP. “Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants”, *United Nations Environment Program*, Stockholm, (2001).

Wang, M. H., “A novel extension method for transformer fault diagnosis”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (1), 164-169, (2003).

Wang, M. H., “Grey-extension method for incipient fault forecasting of oil-immersed power transformer”, *Electric Power Components and Systems*, 32 (10), 959–975, (2004).

Wei, C.H., Tang, W.H., and Wu, Q.H., “A hybrid least-square support vector machine approach to incipient fault detection for oil-immersed power transformer”, *Electric Power Components and Systems*, 42 (5), 453-463, (2014).

Wei, C.H., Tang, W.H., and Wu, Q.H., “Dissolved gas analysis method based on novel feature prioritisation and support vector machine”, *IET Electric Power Applications*, 8 (8), 320-328, (2014).

Yadaiah, N., and Ravi, N., “Fault detection techniques for power transformers”, *Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, Alberta, Canada, 6-11, (2007).

Zhang, Y., Zhang, B., Yuan, Y., Pei, Z., and Wang, Y., “Transformer fault diagnosis based on support vector machine”, *3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*, Chengdu, China, 405-408, (2010).

EKLER

8. EKLER

EK A YGA Verileri

Tezde kullanılan bütün YGA verilerinin elde edildiği kaynaklar ve kaynak numaralandırması Tablo A.1’de verilmiştir.

Tablo A.1: YGA verilerinin elde edildiği kaynaklar ve kaynak numaraları.

Kaynak İsmi	Kaynak Numarası
Ganyun ve diğ. 2005	[1]
Liu ve Ding 2013	[2]
Wang 2003	[3]
Zhang ve diğ. 2010	[4]
Yadaiah ve Ravi 2007	[5]
Duval ve dePablo 2001	[6]

Tablo A.2’de, bu tez çalışmasında kullanılan bütün YGA verileri gerçek hata durumları ve elde edildikleri kaynak ile birlikte verilmiştir.

Tablo A.2: YGA verileri ve elde edildiği kaynaklar.

Sıra No	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Gerçek Durum	Veri Sınıfı	Kaynak
1	10	4	3	33	6	NF	Eğitim	[1]
2	8,5	7,2	4,3	3,9	3,5	NF	Eğitim	[1]
3	32	31	7,5	50	1,1	NF	Eğitim	[1]
4	13,5	1,7	1,2	0,6	0	NF	Eğitim	[1]
5	9,87	2,49	0,79	4,06	4,81	NF	Eğitim	[1]
6	10	4	3	33	6	NF	Doğrulama	[1]
7	14,7	3,8	10,5	2,7	0,2	NF	Doğrulama	[1]
8	6,7	10	11	71	3,9	NF	Test	[1]
9	5	3	2	6	6	NF	Eğitim	[2]
10	6	7	6	13	6	NF	Eğitim	[2]
11	14,7	3,7	10,5	2,7	0,2	NF	Eğitim	[3]
12	5,6	1,6	1,1	0,5	3,3	NF	Eğitim	[4]

13	4,5	2,45	0,75	4	3,2	NF	Eğitim	[4]
14	2	1,5	0,6	0,7	0,5	NF	Eğitim	[4]
15	3,5	1,7	1,4	8,8	3,1	NF	Eğitim	[4]
16	4,5	3	2,5	10,5	2,7	NF	Eğitim	[4]
17	7,5	3	5,5	2,5	0,3	NF	Doğrulama	[4]
18	0,32	0,25	0,04	0,25	0	NF	Doğrulama	[4]
19	3,5	5	5,5	10,5	2,5	NF	Test	[4]
20	27,21	25,08	169,1	125	1,09	NF	Eğitim	[5]
21	11,82	3,12	120,8	0,67	1,98	NF	Eğitim	[5]
22	21,54	4,86	113	0,98	0	NF	Test	[5]
23	60	40	50	60	3	NF	Eğitim	-
24	85	0	80	35	70	NF	Eğitim	-
25	980	73	58	12	0	KD	Eğitim	[3]
26	56	61	75	32	31	KD	Doğrulama	[3]
27	297	9	211,67	154,5	3,97	KD	Eğitim	[5]
28	16000	3600	670	14	0	KD	Eğitim	[6]
29	6600	1000	38	2	19	KD	Eğitim	[6]
30	5000	4000	2000	2000	8000	KD	Eğitim	[6]
31	24,3	15,7	6,4	11,2	29,8	KD	Eğitim	[6]
32	200	230	2	170	480	KD	Eğitim	[6]
33	890	110	3	84	700	KD	Doğrulama	[6]
34	41	112	0	254	4536	KD	Test	[6]
35	16000	4000	500	8500	16000	KD	Test	[6]
36	27	90	42	63	0,2	T1&T2	Eğitim	[3]
37	160	130	33	96	0	T1&T2	Eğitim	[3]
38	95	110	160	150	0	T1&T2	Doğrulama	[3]
39	300	490	180	360	5	T1&T2	Test	[3]
40	625	130	47	2	0	T1&T2	Eğitim	[3]
41	44,2	101	13	11,8	0,45	T1&T2	Eğitim	[4]
42	11	31	26	52	0	T1&T2	Eğitim	[4]
43	46	98	41,3	26,3	0	T1&T2	Eğitim	[4]
44	140	173	45	17	0	T1&T2	Eğitim	[4]
45	18	20	6	12	2	T1&T2	Doğrulama	[4]
46	77,5	160	984	352	9	T1&T2	Doğrulama	[4]
47	157	127	34	96	0	T1&T2	Test	[4]

48	27,5	88	40,5	62	0,2	T1&T2	Eğitim	[4]
49	178	259	40	26.5	0	T1&T2	Eğitim	[4]
50	24,28	74,59	74	2,67	0,23	T1&T2	Eğitim	[5]
51	34,88	76,93	52,89	8,74	3,86	T1&T2	Test	[5]
52	11,6	67,25	96,23	166	1	T1&T2	Eğitim	[5]
53	1270	3450	520	1390	8	T1&T2	Eğitim	[6]
54	3420	7870	1500	6990	33	T1&T2	Eğitim	[6]
55	3675	6392	2500	7691	5	T1&T2	Test	[6]
56	48	610	29	10	0	T1&T2	Test	[6]
57	12	18	4	4	0	T1&T2	Eğitim	[6]
58	66	60	2	7	0	T1&T2	Doğrulama	[6]
59	1450	940	211	322	61	T1&T2	Doğrulama	[6]
60	74	523	142	1200	6	T3	Eğitim	[2]
61	220	382	82	1019	17	T3	Eğitim	[2]
62	116	352	90	465	5	T3	Doğrulama	[2]
63	173	334	172	812,5	37,7	T3	Eğitim	[3]
64	220	340	42	480	14	T3	Eğitim	[3]
65	170	320	53	520	3,2	T3	Eğitim	[3]
66	56	286	96	928	7	T3	Eğitim	[3]
67	78	161	86	353	10	T3	Doğrulama	[3]
68	200	700	250	740	1	T3	Test	[3]
69	45	168	82	330	3,1	T3	Eğitim	[4]
70	6,9	80,6	47,4	351	4,9	T3	Eğitim	[4]
71	56	144	36	164	1,8	T3	Eğitim	[4]
72	80	243	274	1348	8,4	T3	Eğitim	[4]
73	143	305	78	721	2	T3	Eğitim	[4]
74	76	202	275	3216	16	T3	Eğitim	[4]
75	7,8	111	129	701	2,8	T3	Eğitim	[4]
76	58	103	51	251	6	T3	Eğitim	[4]
77	82	161	79	406	8,9	T3	Eğitim	[4]
78	279	487	109	708	4,4	T3	Eğitim	[4]
79	14	237	92	470	0	T3	Doğrulama	[4]
80	172	336,5	172,5	821	37	T3	Doğrulama	[4]
81	162,5	224	45,5	497	12,5	T3	Test	[4]
82	220	340	41	492	14	T3	Test	[4]

83	45	167,5	82	330	3,5	T3	Test	[4]
84	54,17	90,32	2,19	456,2	1,8	T3	Eğitim	[5]
85	45,42	39,31	7,92	60,32	0,34	T3	Eğitim	[5]
86	650	53	34	20	0	D1	Eğitim	[1]
87	0	5,2	5,12	9,58	14,6	D1	Eğitim	[1]
88	1565	93	34	47	0	D1	Eğitim	[1]
89	160	90	27	17	5,8	D1	Eğitim	[1]
90	35	25	0	23	22	D1	Eğitim	[1]
91	980	73	58	12	0	D1	Eğitim	[1]
92	160	90	27	17	5	D1	Doğrulama	[1]
93	176	206	47,7	75,7	68,7	D1	Doğrulama	[1]
94	565	93	34	47	0	D1	Test	[1]
95	150	53	34	20	0	D1	Test	[1]
96	566	92	35	46	2	D1	Eğitim	[2]
97	152	54	32	20	3	D1	Test	[2]
98	172	78	36	28	6	D1	Doğrulama	[2]
99	345	112,3	27,5	51,5	58,8	D1	Eğitim	[3]
100	565	53	34	47	0	D1	Eğitim	[3]
101	4,1	3,5	0,68	1,2	5,2	D1	Eğitim	[4]
102	43	36	41	47	13	D1	Eğitim	[4]
103	49,1	12,2	0,3	3,9	4,8	D1	Eğitim	[4]
104	316	36,1	37,3	109	440	D1	Eğitim	[4]
105	26,5	29,8	0	69,3	8,6	D1	Eğitim	[4]
106	46,7	8,2	1,8	5,1	4,1	D1	Eğitim	[4]
107	72	116	36	70	19	D1	Eğitim	[4]
108	42	59	8	28	8	D1	Test	[4]
109	36	24	0	24	21	D1	Doğrulama	[4]
110	49	12	0,3	4	4,8	D1	Doğrulama	[4]
111	260,5	130,5	29	84	92	D1	Eğitim	[4]
112	651	52	35	21	0	D1	Test	[4]
113	40,8	3	3,6	3,5	7,4	D2	Eğitim	[1]
114	23	12	12	10	61	D2	Eğitim	[1]
115	57	13	0,1	11	12	D2	Eğitim	[1]
116	31	6,6	19	4,7	67	D2	Eğitim	[1]
117	285	36,3	75	8,4	133	D2	Eğitim	[1]

118	528	3179	320	3020	2314	D2	Eğitim	[1]
119	335	67	18	143	170	D2	Eğitim	[1]
120	44	12,2	3,4	3,2	17,4	D2	Eğitim	[1]
121	42	62	5	63	73	D2	Eğitim	[1]
122	60	40	9,9	110	70	D2	Eğitim	[1]
123	240	28	6	26	85	D2	Eğitim	[1]
124	466,5	148,8	13	266	511	D2	Doğrulama	[1]
125	260	130	29	84	92	D2	Doğrulama	[1]
126	250	63	3,8	66	120	D2	Doğrulama	[1]
127	59	7,1	19	4,5	71	D2	Test	[1]
128	293	50	13	115	120	D2	Test	[1]
129	443	85	9,5	103	174	D2	Test	[1]
130	295	51	12	117	124	D2	Eğitim	[2]
131	449	83	12	104	176	D2	Eğitim	[2]
132	127	107	11	154	224	D2	Eğitim	[3]
133	60	40	6,9	110	70	D2	Eğitim	[3]
134	200	48	14	117	131	D2	Eğitim	[3]
135	32,4	5,5	1,4	12,6	13,2	D2	Test	[3]
136	21	7,6	4,7	96,3	26,73	D2	Eğitim	[4]
137	48,3	47,4	7,3	52,2	7,3	D2	Eğitim	[4]
138	65	26,1	10,1	41,6	57,8	D2	Eğitim	[4]
139	421	135	27,7	351	374	D2	Eğitim	[4]
140	2054	370	26	535	805	D2	Eğitim	[4]
141	49	41,6	25,1	124	15,7	D2	Eğitim	[4]
142	335	67	18	143	170	D2	Eğitim	[4]
143	443	85	9,5	103	174	D2	Eğitim	[4]
144	59,5	41	9,9	111	70	D2	Eğitim	[4]
145	201	47,5	13,5	116	130	D2	Eğitim	[4]
146	293,5	50	13,5	116,5	123	D2	Eğitim	[4]
147	239	27,5	5,5	25,5	85	D2	Doğrulama	[4]
148	128	106	11,5	153	223	D2	Doğrulama	[4]
149	33	5,4	1,5	12,9	13,6	D2	Test	[4]
150	469	147	12,5	265	520	D2	Test	[4]

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Akif DEMİRÇALI

Doğum Yeri ve Tarihi : Çivril-30.08.1990

Lisans Üniversite : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Elektronik posta : akifdemircali@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Konak Mahallesi- Baklan/DENİZLİ

Yayın Listesi :

- Köroğlu, S., Demirçalı, A., Yıldız, M., Çalı, ve M. E., Mıhçı, G., “Güç transformatörleri arızalarının yağda çözünmüş gaz analiziyle tanılanması”, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 221-224, (2014).