

T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

SEZGİSEL ALGORİTMA KULLANARAK YAĞLI TİP  
DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİN ÇOK AMAÇLI  
TASARIM OPTİMİZASYONU

Mohammad Hassan HASHEMI

Danışman: Doç. Dr. Ulaş KILIÇ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Elektrik Doktora Programı

İzmir  
2023



Mohammad Hassan HASHEMI tarafından Doktora tezi olarak sunulan “SEZGİSEL ALGORİTMA KULLANARAK YAĞLI TİP DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİN ÇOK AMAÇLI TASARIM OPTİMİZASYONU” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 04/12/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri üyeleri**

**İmza**

**Jüri Başkanı** : Prof. Dr. Kürşat AYAN

**Raportör Üye** : Doç. Dr. Ulaş KILIÇ

**Üye** : Prof. Dr. Erkan MEŞE

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kubilay EKER

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Hakan AKÇA



# EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “SEZGİSEL ALGORİTMA KULLANILARAK YAĞLI TIP DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİN ÇOK AMAÇLI TASARIM OPTİMİZASYONU” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

04/12/2023

İmzası

Mohammad Hassan HASHEMI



**ÖZET****SEZGİSEL ALGORİTMA KULLANARAK YAĞLI TİP  
DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİN ÇOK AMAÇLI  
TASARIM OPTİMİZASYONU**

HASHEMI, Mohammad Hassan

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ulaş KILIÇ

Aralık 2023, 89 sayfa

Bu tez çalışmasında, hermetik yağlı tip üç fazlı dağıtım transformatörlerinin tasarım optimizasyonunda kullanılmak üzere bir optimizasyon programı geliştirilmiştir. Optimizasyon programı, müşteri tarafından belirlenen tüm spesifikasyonları içerir. Ayrıca, çeşitli gerilim seviyelerinde ve 3150 kVA'ya kadar nominal güçte dağıtım transformatörleri tasarlama yeteneğine sahiptir. Transformatör tasarım optimizasyon probleminin ana amaçları  $f_1$ : Transformatör hammadde maliyetinin minimizasyonu,  $f_2$ : Toplam güç kaybının minimizasyonu ve  $f_3$ : Transformatör ağırlığının minimizasyonudur. Bu optimizasyon probleminin geniş arama alanı nedeniyle, iteratif yöntemler hesaplama açısından uygun bir çözüm olmayacaktır. Bu nedenle, problemi çözmek için sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Bu algoritmalar çok daha hızlı yakınsama ve optimuma yakın çözümleri sunar.

İlk aşamada, bu amaç fonksiyonlarını ( $f_1$ ,  $f_2$ , ve  $f_3$ ) ayrı ayrı minimize etmek için Diferansiyel Evrim Algoritması (DE), Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması (PSO), Genetik Algoritma (GA) ve Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (GWO) olarak adlandırılan tek amaçlı sezgisel optimizasyon algoritmaları uygulanmıştır.

İkinci aşamada güç şebekesinin harmonikleri dikkate alınarak Ayrıştırma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Optimizasyon (MOEA/D), Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (MOGWO), Çok Amaçlı Balina Optimizasyon Algoritması (MOWOA) ve Domine Olmayan Sıralama Genetik Algoritma III (NSGA III) sezgisel optimizasyon algoritmaları transformatör tasarım optimizasyon problemini çözmek için kullanılmıştır. Çok amaçlı optimizasyonda,

hedeflerden ikisinin eş zamanlı olarak üç senaryoda minimize edilmiştir. Bu senaryolar  $F_1(f_1, f_2)$ ,  $F_2(f_1, f_3)$ , ve  $F_3(f_2, f_3)$ 'tür.

Son olarak, bu algoritmaların performansına ilişkin daha iyi içgörüler elde etmek için, her bir algoritma bağımsız olarak değişen popülasyon ve iterasyon boyutlarıyla yirmi kez çalıştırılmıştır. Her bir algoritmadan elde edilen sonuçlar diğer optimizasyon algoritmalarının sonuçları ve klasik yöntem kullanılarak tasarlanmış ve üretilmiş mevcut bir 3150 kVA dağıtım transformatörü ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Dağıtım transformatörü, enerji verimliliği, optimizasyon, sezgisel algoritmalar, transformatör tasarımı.





**ABSTRACT****MULTI-OBJECTIVE DESIGN OPTIMIZATION OF OIL  
IMMERSED DISTRIBUTION TRANSFORMER USING  
HEURISTIC ALGORITHMS**

HASHEMI, Mohammad Hassan

Ph.D. in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. ULAŞ KILIÇ

December 2023, 89 pages

In this thesis, an optimization tool is developed for use in the design optimization of hermetically sealed oil-immersed three-phase distribution transformers. The optimization program incorporates all customer specifications and is capable of designing distribution transformers in various voltage levels and nominal power ratings of up to 3150 kVA. The main objectives of the transformer design optimization problem are  $f_1$ : Transformer raw material cost minimization,  $f_2$ : Total power loss minimization, and  $f_3$ : Transformer weight minimization. Due to the large search space of this optimization problem, exhaustive methods will not be a computationally feasible solution. Thus, heuristic algorithms are used to solve the problem. These algorithms offer much faster convergence and near-optimal optimization solutions.

In the first stage, single objective heuristic optimization algorithms namely the Differential Evolution algorithm (DE), Particle Swarm Optimization algorithm (PSO), Genetic Algorithm (GA), and Grey Wolf Optimization algorithm (GWO) are applied to minimize these objective functions ( $f_1$ ,  $f_2$ , and  $f_3$ ) separately.

In the second stage, considering harmonics of the power grid, multi-objective heuristic optimization algorithms namely Decomposition-based Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MOEA/D), Multi-Objective Grey Wolf Optimization algorithm (MOGWO), Multi-Objective Whale Optimization Algorithm (MOWOA), and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III (NSGA III) are employed to address the transformer design optimization problem. In multi-objective optimization, two of the objectives are considered

to be minimized simultaneously in three scenarios. These scenarios are  $F_1(f_1, f_2)$ ,  $F_2(f_1, f_3)$ , and  $F_3(f_2, f_3)$ .

Finally, to gain better insights into the performance of these algorithms, each algorithm is independently run twenty times with varying population and iteration sizes. The results obtained from each algorithm are subsequently compared with the outcomes of the other optimization algorithms and an existing 3150 kVA distribution transformer that has been designed and manufactured using the conventional method.

**Keywords:** Distribution transformer, energy efficiency, optimization, heuristic algorithms, transformer design.





## ÖNSÖZ

Transformatörler, güç sisteminde en çok kullanılan ve en pahalı ekipmanlardan biridir. Transformatörlerin temel teknoloji ve çalışma prensibine bakıldığı zaman, ilk üretildiğinden bugüne pek değişmemiştir, fakat tasarımı, kullanılan malzemenin kalitesi ve transformatörün performansı ileri derecede geliştirilmiştir. Tasarımları ve üretim teknolojisi geliştikçe transformatörlerin hacmi, ağırlığı, maliyeti ve güç kayıpları büyük oranda azalmıştır. Verimli bir transformatör tasarımı, uygun malzemeler, kalifiye insan, üretim, test, çalıştırma ve bakım ile desteklenirse, transformatörün gerçek ömrü beklenen ömre yaklaşabilir. Tasarımı verimsiz olan transformatörler, yalnızca düşük ömür değerine sahip olmanın yanında, aynı zamanda iletim ve dağıtım sisteminde kayıplara sebep olurlar, bu da yüksek toplam enerji kayıpları, finansal kayıplar, toplam yaşam süresi maliyeti ve sera gazı emisyonlarına sebep olurlar.

Günümüz rekabetçi piyasa ortamında, yüksek kaliteli, düşük maliyetli ürünler ve süreçler küresel ekonomide hayatta kalmanın anahtarı haline geldiğinden, transformatör üretim endüstrisinin transformatör verimliliğini artırması ve maliyetleri düşürmesi için acil bir ihtiyaç vardır. Buna rağmen, toplam üretim maliyeti minimizasyonu, teknik literatürde nadiren ele alınmaktadır ve asıl yaklaşımlar, belirli ekipmanların maliyet minimizasyonu ile ilgilenmektedir. Bu nedenle, bu tezde çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılarak daha kapsamlı ve üretim firmasında uygulanabilir bir program hazırlanmıştır.

İZMİR

04/12/2023

*Mohammad Hassan HASHEMI*



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
İÇ KAPAK . . . . .	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI . . . . .	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI . . . . .	v
ÖZET . . . . .	vii
ABSTRACT . . . . .	x
ÖNSÖZ . . . . .	xiii
TABLolar DİZİNİ . . . . .	xx
1 GİRİŞ . . . . .	1
1.1 Motivasyon . . . . .	1
1.2 Problem Tanımı . . . . .	3
1.3 Tezin Katkısı . . . . .	5
1.3.1 Sanayi açıdan tezin katkısı . . . . .	5
1.3.2 Akademik açıdan tezin katkısı . . . . .	6
1.4 Organizasyon Planı . . . . .	6
2 GENEL BİLGİLER . . . . .	8
2.1 Transformatörün Çalışma Prensibi . . . . .	9
2.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması . . . . .	11
2.3 Transformatörün Bileşenleri . . . . .	12
2.4 Harmonikler ve Transformatör Üzerinde Etkileri . . . . .	12
2.5 Transformatörlerin Güvenilirliği . . . . .	14
2.6 Transformatör Testleri . . . . .	15

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.6.1	Rutin testler . . . . . 15
2.6.2	Tip testler . . . . . 16
2.6.3	Özel testler . . . . . 16
3	TRANSFORMATÖR TASARIMI . . . . . 18
3.1	Sargı Tasarımı ve Yükte Kayıplar . . . . . 21
3.1.1	Sargı tasarımı . . . . . 21
3.1.2	Sargı ağırlık hesabı . . . . . 24
3.1.3	Yükte kayıpların hesabı . . . . . 24
3.2	Nüve Tasarımı ve Boşta Kayıp Hesabı . . . . . 27
3.2.1	Nüve tasarımı . . . . . 27
3.2.2	Nüve ağırlığı hesabı . . . . . 30
3.2.3	Boşta kayıp hesabı . . . . . 31
3.3	Transformatörün Toplam Kaybı ve Tepe Verimliliği . . . . . 33
3.4	Kazan Tasarımı . . . . . 33
3.4.1	Dalga duvar hesabı . . . . . 34
3.4.2	Kazan ağırlık hesabı . . . . . 35
3.4.3	Yağ ağırlık hesabı . . . . . 36
3.5	Toplam Ağırlık Hesabı . . . . . 36
3.6	Maliyeti Hesabı . . . . . 37
3.7	Tasarım Kısıtları . . . . . 37
4	MATERYAL VE YÖNTEMLER . . . . . 41
4.1	Sezgisel Algoritmalar . . . . . 41
4.2	Tek Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları . . . . . 42
4.2.1	Genetik algoritma (GA) . . . . . 42

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2.2 Diferansiyel evrim (DE) algoritması . . . . .	43
4.2.3 Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması . . . . .	44
4.2.4 Gri kurt optimizasyon (GWO) algoritması . . . . .	45
4.3 Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları . . . . .	46
4.3.1 Domine olmayan sıralama genetik algoritma III (NSGA III) . . .	46
4.3.2 Ayrıştırma tabanlı çok amaçlı evrimsel optimizasyon (MOEA/D) .	48
4.3.3 Çok amaçlı gri kurt optimizasyon algoritması (MOGWO) . . . .	49
4.3.4 Çok amaçlı balina optimizasyon algoritması (MOWOA) . . . . .	50
5 OPTİMİZASYON SONUÇLARI . . . . .	53
5.1 Tek Amaçlı Optimizasyon . . . . .	54
5.1.1 Senaryo 1 . . . . .	55
5.1.2 Senaryo 2 . . . . .	58
5.1.3 Senaryo 3 . . . . .	61
5.2 Çok Amaçlı Optimizasyon . . . . .	64
5.2.1 Senaryo 4 . . . . .	66
5.2.2 Senaryo 5 . . . . .	70
5.2.3 Senaryo 6 . . . . .	74
6 SONUÇLAR . . . . .	79
7 ÖNERİLER . . . . .	81
KAYNAKLAR DİZİNİ . . . . .	86
TEŞEKKÜR . . . . .	87
ÖZGEÇMİŞ . . . . .	88

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Güç sistemi diyagramı . . . . .	9
2.2 Tek fazlı transformatörün yapısı . . . . .	9
2.3 Transformatör bileşenleri . . . . .	12
3.1 Levha iletken . . . . .	20
3.2 Soğutma kanalı . . . . .	20
3.3 Tel iletken . . . . .	20
3.4 Radyal ve aksenal tel iletkenleri . . . . .	21
3.5 Kazan tipi . . . . .	21
3.6 Transformatör nüve yapısı . . . . .	28
3.7 Üç farklı nüve yapısı (teckglobal.com.au (2017)) . . . . .	28
3.8 Radyal kuvvetlerin yönü (teckglobal.com.au (2017)) . . . . .	29
3.9 Oval nüve yapısı . . . . .	30
3.10 M3 sacın kayıp özelliği . . . . .	32
3.11 M4 sacın kayıp özelliği . . . . .	32
3.12 M5 sacın kayıp özelliği . . . . .	32
3.13 Transformatör kazan boyutları . . . . .	34
3.14 Dalga duvar dilim boyutları . . . . .	35
5.1 Toplam maliyet optimizasyonu (Senaryo 1) . . . . .	56
5.2 Toplam kayıp optimizasyonu (Senaryo 2) . . . . .	59
5.3 Toplam ağırlık optimizasyonu (Senaryo 3) . . . . .	62
5.4 Akım harmoniği spektrumu . . . . .	65
5.5 Senaryo 4 için MOEA/D sonuçları . . . . .	67

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6 Senaryo 4 MOGWO sonuçları . . . . .	67
5.7 Senaryo 4 MOWOA sonuçları . . . . .	67
5.8 Senaryo 4 NSGA III sonuçları . . . . .	68
5.9 Tüm algoritmaların en iyi sonuçları Senaryo 4 . . . . .	69
5.10 Senaryo 5 MOEA/D sonuçları . . . . .	71
5.11 Senaryo 5 MOGWO sonuçları . . . . .	71
5.12 Senaryo 5 MOWOA sonuçları . . . . .	71
5.13 Senaryo 5 NSGA III sonuçları . . . . .	72
5.14 Tüm algoritmaların en iyi sonuçları Senaryo 5 . . . . .	73
5.15 Senaryo 6 MOEA/D sonuçları . . . . .	75
5.16 Senaryo 6 MOGWO sonuçları . . . . .	75
5.17 Senaryo 6 MOWOA sonuçları . . . . .	75
5.18 Senaryo 6 NSGA III sonuçları . . . . .	76
5.19 Tüm algoritmaların en iyi sonuçları Senaryo 6 . . . . .	76

## TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Tier 2 transformatör özellikleri . . . . .	2
3.1 Tasarım Değişkenleri . . . . .	19
3.2 Farklı nüve yapısının karşılaştırması . . . . .	29
5.1 Optimizasyon senaryoları . . . . .	53
5.2 Transformatörün özellikleri . . . . .	54
5.3 Tek amaçlı optimizasyon durumları . . . . .	55
5.4 Tek amaçlı optimizasyon özeti . . . . .	55
5.5 Senaryo 1 . . . . .	57
5.6 Senaryo 1 için değişken değerleri . . . . .	58
5.7 Senaryo 2 . . . . .	60
5.8 Senaryo 2 için değişken değerleri . . . . .	61
5.9 Senaryo 3 . . . . .	63
5.10 Senaryo 3 için değişken değerleri . . . . .	64
5.11 Çok amaçlı optimizasyon durumları . . . . .	65
5.12 Akım harmoniği . . . . .	65
5.13 Çok amaçlı optimizasyon özeti . . . . .	66
5.14 Senaryo 4 için deneme sonuçları . . . . .	68
5.15 Senaryo 4 . . . . .	69
5.16 Senaryo 4 için değişken değerleri . . . . .	70
5.17 Senaryo 5 denemelerin sonuçları . . . . .	72
5.18 Senaryo 5 . . . . .	73
5.19 Senaryo 5 için değişken değerleri . . . . .	74
5.20 Senaryo 6 denemelerin sonuçları . . . . .	77
5.21 Senaryo 6 . . . . .	77
5.22 Senaryo 6 için değişken değerleri . . . . .	78

# 1 GİRİŞ

## 1.1 Motivasyon

Transformatör, güç sistemlerinde farklı gerilim seviyelerine sahip devreleri birbirine bağlamak için kullanılan en az iki sargılı statik elektromekanik bir cihazdır. Bir transformatör, toplam aktarılan gücü neredeyse sabit tutarak, primer sargısındaki bir gerilimin seviyesini sekonder sargısındaki farklı bir gerilim seviyesine dönüştürmek için elektromanyetik indüksiyon prensibine göre çalışır.

Sürdürülebilirlik ihtiyacı ve sera gazı (SG) azaltımı son yıllarda hayati bir konu olmuştur. Sera gazını azaltmak için önemli bir adım, düşük kayıplı ve yüksek verimli ekipman üretmektir. Güç ve dağıtım transformatörleri, yaklaşık %98'in üzerinde verime sahip olan, güç sistemlerinin en verimli bileşenlerindedir.

Transformatörlerin yüksek verimlerine rağmen, bu tip ekipmanların sürekli yüksek güçlerde çalışması ve güç sistemlerinde çok sayıda transformatör olması nedeniyle kayıpların geriye kalan %2'lik kısmı büyük miktarda enerji olacaktır (Georgilakis (2009)).

Örneğin, 1000 kVA kapasiteli, izin verilen maksimum yükte kaybı 7600 W ve boшта kaybı 693 W olan bir dağıtım transformatörü, tam yüklenme koşullarında yıllık 72.646.680 Wh enerji kaybına neden olacaktır. Kayıp minimizasyon stratejileri uygulanarak, bu örnek transformatör için kayıpta %1'lik bir azalmanın yıllık 726.466 Wh'lık enerji tasarruf sağlar (Hashemi et al. (2023)).

Düşük kayıplı eko-tasarım transformatöre ulaşmak için Avrupa Birliği (AB), 2009/125/EC sayılı direktifin uygulanmasına ilişkin 548/2014 sayılı komisyon tüzüğünde (AB) enerji sektörüyle ilgili ürünler için gereklilikleri belirlenmiştir. Bu direktife göre, üç fazlı yağlı tip transformatörler için 1 Temmuz 2021'den itibaren geçerli olan Tier 1 tasarımlarına kıyasla, Tier 2 tasarımlarının yükte kayıplarında %33'e ve boшта kayıplarında %10'a kadar

Tablo 1.1: Tier 2 transformatör özellikleri

	Max	Max	Min	
Güç (kVA)	Boşta Kayıp (W)	Yükte Kayıp (W)	Tepe Verimi (%)	$U_k$ (%)
$\leq 25$	600	63	98.251	4
50	750	81	98.891	4
100	1250	130	99.093	4
160	1750	189	99.191	4
250	2350	270	99.283	4
315	2800	324	99.320	4
400	3250	387	99.369	4
500	3900	459	99.398	4
630	4600	540	99.437	4 ya 6
800	6000	585	99.473	6
1000	7600	693	99.484	6
1250	9500	855	99.487	6
1600	12000	1080	99.494	6
2000	15000	1305	99.502	6
2500	18500	1575	99.514	6
3150	23000	1980	99.518	6

azalma olmalıdır. Üç fazlı yağlı tip transformatörlerin izin verilen maksimum yükte ve boşta kayıpları Tablo 1.1’de verilmiştir.

Dünya çapında, güç dağıtım sistemlerinde dağıtım transformatörlerin yaygın kullanımı göz önüne alındığında ve ortalama ömürlerinin 20-30 yıl olduğu düşünüldüğünde, kayıp minimizasyon tekniklerinin uygulanması, yalnızca azaltılmış güç üretimi yoluyla önemli maliyet tasarrufları sağlama potansiyeline sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda güç üretimiyle ilişkili emisyonları azaltması gibi ilave avantajlarda sağlar.

## 1.2 Problem Tanımı

Transformatör tasarımı, doğrusal ve doğrusal olmayan kısıtlı, sürekli ve ayrık değişken türleri ile konveks olmayan, Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama (Mixed Integer Nonlinear Programming - MINLP) problemidir (Tamilselvi et al. (2018)). Tasarım mühendisleri, IEC 60076 ve/ya ANSI/IEEE Standardı C57.12.00 gibi transformatör tasarım ve test standartlarında belirtilen termal, mekanik, dielektrik ve elektriksel kısıtlamaları dikkate alarak müşteriler tarafından verilen teknik şartnameleri de karşılamalıdır. Bu parametreler genellikle malzeme veri sayfaları, grafikler ve tablolardan alınır. Çok sayıda tasarım değişkeni ve birbiriyle çelişen fonksiyonlar nedeniyle, klasik yöntemlerin optimal çözümü bulması zordur. Bu tasarım değişkenlerine ait olan optimizasyon arama alanı ve tasarım olasılığı Tablo 3.1’de verilmiştir.

Transformatör tasarımındaki en yeni eğilim, amaç fonksiyonu olarak toplam sahiplenme maliyeti (TOC) ile sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanılmasıdır. Bununla birlikte, Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) esas olarak sezgisel algoritmalarla birlikte transformatör kayıp hesaplamaları ve tasarım doğrulaması için de kullanılır. (Alhan and Yumuşak (2017)) çalışmasında beş bacaklı dağıtım transformatörünün ana malzeme maliyetini en aza indirmek için beş farklı sezgisel optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Yazarlar Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony -ABC), Geri İzleme Arama Optimizasyon Algoritması (Backtracking Search Optimization Algorithm - BSOA), Rekabetçi Uyarlamalı Diferansiyel Evrim Algoritması (Competitive-Adaptive Differential Evolution Algorithm - CADEA), Guguk Kuşu Arama (Cuckoo Search - CS) algoritması ve Çiçek Tozlaşma Algoritması (lower Pollination Algorithm - FPA) kullanmışlardır. Algoritmalar yakınsama hızlarına göre değerlendirilmiştir. (Amarasinghe et al. (2015))’te yazarlar, hermetik kazanlı yağlı tip beşbacaklı bir dağıtım transformatörünün toplam sahiplenme maliyetini minimize etmek için MATLAB’in *fmincon* fonksiyonunu kullanmışlardır. Bu fonksiyon doğrusal olmayan bir fonksiyonun optimum çözümünü bulabilir, ancak; bu optimizasyon fonksiyonunun büyük bir dezavantajı, transformatör tasarımında uzmanlık gerektiren başlangıç noktasının uygun bir vektörünün belirlenmesidir. Deterministik optimizasyon tekniği olarak Karma Tamsayı Doğrusal Olmayan Programlama (MINLP) ve stokastik optimizasyon algo-

ritmaları olarak Uyumlu Arama (Harmony Search - HS), Genetik Algoritma (Genetic Algorithm - GA) ve Diferansiyel Evrim (Differential Evolution - DE) uygulamaları (Amoiralis et al. (2013))'de dağıtım transformatörünün tasarım optimizasyonunda incelenmiştir. Bu makalenin amaç fonksiyonu, farklı nominal güce sahip üç transformatörün aktif kısmının maliyetini en aza indirmektir. (Coelho et al. (2014))'te, 300 kVA nominal güce sahip kuru tip tek fazlı dağıtım transformatörünün verimliliğini artırmak için sınırsız popülasyon boyutuna ve kaotik dizi yaklaşımına sahip çok amaçlı bir sezgisel optimizasyon algoritması uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar, analitic yöntemler ile elde edilen sonucu ile karşılaştırılmıştır.

(Daneshmand and Heydari (2016))'daki çalışmada, üç fazlı yüksek sıcaklık süperiletken (HTS) sargılı transformatör tasarımının ana malzeme maliyeti ve kayıp azaltma optimizasyonu için çok amaçlı Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing - SA) ve genetik algoritması kullanılmışlardır. Elde edilen sonuçlar 2D-FLUX yazılımında sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanmıştır. (Dawood et al. (2019))'da, yaygın olarak M4 ve M5 olarak bilinen iki soğuk şekillendirilmiş tane yönlendirilmiş silikon sac (Cold Rolled Grain Oriented - CRGO), 2D sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılarak yüksüz kayıp açısından analiz edilmiş ve halihazırda inşa edilmiş bir transformatörün test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, M4 nüve malzemeli transformatörlerin M5 nüve malzemeli transformatörlere kıyasla %30 daha az boşta kayba sahip olduğunu ortaya koymaktadır. (Freitag and Leibfried (2017))'deki çalışmada tek malzemedan yapılan nüveye sahip geleneksel bir üç fazlı transformatörün nüve kaybı, iki farklı sac sınıfından yapılan nüve malzemesine sahip bir transformatörle karşılaştırılmıştır. Simülasyon *Ansys Maxwell* yazılımında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma, transformatörün nüvesinde sac malzemelerin bir kombinasyonu kullanılarak nüve kaybının %6,25'e kadar azaltılabileceğini iddia etmektedir. Bununla birlikte, iki farklı sac malzemesinden oluşan bir transformatörün imalat sürecindeki en büyük dezavantajı, nüve dizme aşamasında daha yüksek işçilik maliyetlerine ve zaman alıcı bir iş olmasıdır.

(Khatri et al. (2012))'deki çalışmada yazarlar, sadece dört tasarım değişkenini dikkate alarak 630 kVA'lık bir dağıtım transformatörünün aktif kısmının

maliyetini en aza indirmek için GA ve SA algoritmalarını kullanmışlardır. Optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar aynı transformatörün geleneksel tasarımı ile karşılaştırılmıştır. Önerilen tasarım optimizasyon algoritması, aktif kısmın maliyetini %1,5 oranında azaltmış, ancak geleneksel yöntemle kıyasla yükte kaybı %4,5 ve boşta kayıp %4,5 oranında artmıştır. (Petkovska et al. (2014))'te, bir dağıtım transformatörünün toplam kaybı, problemin amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Optimizasyon problemi daha sonra Örüntü Arama Yöntemi (Pattern Search Method - PSM) ve Taguchi Yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Örüntü arama yöntemi'nin başlangıç arama noktası vektörü ise, orijinal transformatörden alınan değerlerle tanımlanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemlerin yükte kaybını 5,27% ve boşta kaybını %10,94 oranında azaltabileceğini göstermektedir. (Mohammed and Vural (2018))'deki araştırmada, tasarımın uyarlanabilirliğini ve güvenilirliğini artırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte GA, DEA ve NSGA-II gibi çeşitli sezgisel algoritma tekniklerinin bir kombinasyonunu kullanmıştır. Toplam kayıpları ve sahiplenme maliyetini azaltmak için nüve sac kalınlığı, primer tarafta spir sayısı, sekonder tarafta spir sayısı, primerdeki iletken kesit alanı ve sekonder iletken kesit alanı olmak üzere beş parametre seçilmiştir.

### 1.3 Tezin Katkısı

Bu doktora tez çalışması **TÜBİTAK 2244 Sanayi Doktora Programı** kapsamında desteklenen *119C127* proje numaralı "**Yüksek Verimli Güç ve Dağıtım Transformatörlerinin Tasarımı ve Geliştirilmesi**" başlığında Ege Üniversitesi ve ELTAŞ Transformatör A.Ş. bünyesinde tezin katkısı Sanayi ve Akademik olarak iki farklı açıdan değerlendirilecektir.

#### 1.3.1 Sanayi açıdan tezin katkısı

Bugünün rekabetçi piyasa ortamında, yüksek kaliteli, düşük maliyetli ürünler küresel ekonomide hayatta kalmanın anahtarı haline gelmiştir. Bu açıdan, standartlara bağlı kalarak, transformatör verimliliğinin artması ve maliyetlerin düşürülmesi kaçınılmazdır.

Sanayide kullanılan transformatör optimizasyon programları genellikle bir firmanın özel gereksinimlerine ve üretim hatlarına uyacak şekilde yazıl-

maktadır. Bu optimizasyon programlarıyla ilişkili maliyetler oldukça fazladır ve optimizasyon programlarında yapılacak herhangi bir değişiklik, satış sonrası hizmetler şeklinde ek harcamalar getirmektedir. Bu tür optimizasyon programlarından avantaj elde edilemediğinde, işletmeler, elektrik ve makine mühendisleri tarafından klasik yöntemler ile tasarlanmış transformatörlere güvenmek zorunda kalmaktadır. Bu durumda, tasarım süreci birkaç saati aşabilir ve ayrıca klasik yöntemler genellikle en optimum tasarım çözümlerine ulaşmada yetersiz kalabilir. Bu çalışma sırasında geliştirilen optimizasyon aracı, trafo tasarım problemlerine birkaç dakika içerisinde çok daha optimum çözümler verebilmektedir. Ayrıca, müşteri tarafından istenilen herhangi bir kısıt veya özellik, kolayca programa uygulanabilir.

### 1.3.2 Akademik açıdan tezin katkısı

Tezin önemli katkılarından biri, literatörde ilk kez transformatör tasarımına etkisi olan tüm değişkenler göz önüne alarak bir tasarım ve optimizasyon yapılmıştır. Bu değişkenler, iletken ve nüve boyutları, soğutma sistemi ve kanalları, malzeme türleri, kazan boyutları, teknik ve üretimde bulunan kısıtlamalar ve tüketici özellikleri gibi tüm tasarım değişkenlerini dikkate alan toplam 21 değişkeni içermektedir. Bu çalışmada, birbiriyle çelişen tüm tasarım amaçların formüle edilmiş ve tasarım sürecinde dikkate alınmıştır. Uygun tasarım değişkenlerinin kullanılması, transformatör yükte kayıpları ve boşta kayıplar, transformatör ağırlığı, termal kısıtlamalar, aktif parça maliyeti ve transformatörün toplam sahip olma maliyeti açısından klasik yöntemle kıyasla optimum amaçla ulaşmasını garanti etmektedir. *No Free Lunch (NFL)* teoremi (Wolpert and Macready (1997)) dikkate alarak farklı optimizasyon algoritmaları deneyip ve problem özelliklerine ait en başarılı sezgisel algoritmaların kullanılmasına karar verilmiştir. Önerilen yöntem, tüm güçlerde bulunan yağlı tip hermetic transformatörlerin tasarım ve optimizasyonunu yapabilecek hale getirmektedir.

## 1.4 Organizasyon Planı

Bu tez toplamda yedi bölümden oluşmaktadır;

Birinci kısım olan "GİRİŞ" bölümünde transformatör tasarımının prob-

lem tanımı, tezin amacı ve sanayiye katkısı özetlenmiştir.

İkinci kısım olan "GENEL BİLGİLER" bölümünde transformatörlerin bir güç şebekesindeki önemi, çalışma prensibi, uygulanması gereken testler ve standartlar anlatılmıştır.

Üçüncü kısım olan "TRANSFORMATÖR TASARIMI" bölümünde hermetik yağlı tip dağıtım transformatörünün toplam maliyet, kayıp ve ağırlık hesabı detaylı olarak anlatılmıştır.

Dördüncü kısım olan "MATERYAL VE YÖNTEMLER" bölümünde tez kapsamında kullanılan tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon algoritmaları özetlenmiştir.

Beşinci kısım olan "OPTİMİZASYON SONUÇLARI" bölümünde farklı senaryolardan elde edilen tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyonların sonuçları detaylı bir şekilde sunulmuş ve yorumlanmıştır.

Sonraki bölümlerde ise tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar paylaşılmış ve yapılabilecek benzer konular önerilmiştir.

## 2 GENEL BİLGİLER

Elektrik tüketimi, artan dijitalleşme ve nüfus artışı nedeniyle son yıllarda hızla artmaktadır. Ortalama elektrik tüketimindeki artışın, güç ve dağıtım transformatörlerinin pazarındaki istikrarlı büyümeyi açıklayacağı tahmin edilmektedir

Güç sisteminin çeşitli bileşenleri, örneğin jeneratörler, iletim hatları, dağıtım şebekeleri ve son kullanıcılar, en uygun gerilim seviyelerinde çalıştırılabilir. Elektrik güç sistemi içinde, iletim hatlarında yüksek gerilimler kullanılması gerektiğinde, farklı gerilim seviyelerine sahip sistemlerin birbirine bağlanması için yine transformatörler önemli bir rol üstlenir.

Transformatörler, elektrik enerjisini, frekansında herhangi bir değişiklik olmadan elektromanyetik indüksiyon yoluyla bir devreden diğerine aktaran, statik bir cihaz olarak tanımlanabilir. Bu önemli cihazlar, farklı gerilimlere sahip devreleri birbirine bağlayarak, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı için alternatif akım sisteminin evrensel olarak kullanılmasına olanak tanımıştır.

Transformatörün tanımı IEC (International Electrotechnical Commission) ve IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tarafından aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- International Electrotechnical Commission (**IEC**):

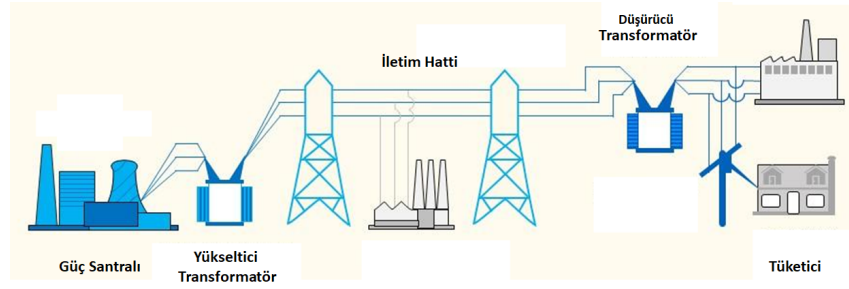
Transformatör, elektromanyetik indüksiyonla bir alternatif gerilim ve akım sistemini, elektrik enerjisi iletmek amacıyla genellikle farklı değerlerde ve aynı frekansta başka bir gerilim ve akım sistemine dönüştüren iki veya daha fazla sargılı statik bir cihazdır.

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (**IEEE**):

Transformatör, elektrik devreleri arasında karşılıklı kuplaj oluşturmak için manyetik çekirdekli veya manyetik çekirdekli olmayan iki veya daha fazla sargıdan oluşan bir statik elektrik cihazdır.

Transformatörler, üretim istasyonları ile kullanım noktaları arasında hayati bağlantılar sağlayarak güç sisteminde kritik bir konuma sahiptir. Bu sayede elektrik enerjisi etkin bir şekilde iletilir ve dağıtılır, sistemin verimliliği artar ve güvenilirlik sağlanır.

Ayrıca, bu ekipman, bir yüksek gerilim transformatör merkezinin toplam

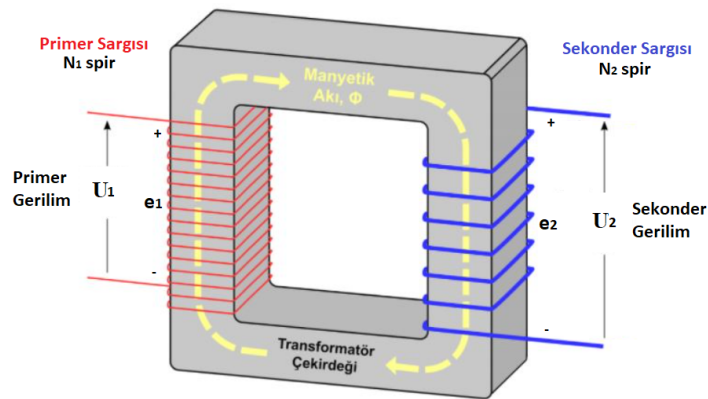


Şekil 2.1: Güç sistemi diyagramı

yatırımının %60'a kadarını oluşturan bir elektrik şebekesinin en önemli ve pahalı bileşenlerinden biridir (Jahromi et al. (2009)). Sonuç olarak, transformatörler, elektrik enerjisinin aktarımı ve dağıtımını için vazgeçilmez ve hem sanayide ve hem akademik literatürde önemli bir konu olarak yer almaktadır.

## 2.1 Transformatörün Çalışma Prensibi

Transformatörün çalışma prensibi, elektrik enerjisini manyetik indüksiyon yoluyla bir devreden diğerine verimli bir şekilde aktarılmasına dayanır. Bir transformatörün bir sargısına alternatif akım (AC) kaynağından enerji verildiğinde, transformatörün çekirdeğinde alternatif bir manyetik alan oluşur. Transformatörün çekirdeğinde dolaşan manyetik alana "akı" denir. Aynı çekirdeğin etrafındaki ikinci sargıda alternatif akı tarafından bir gerilim indüklenir. Şekil (2.2)'de tek fazlı ideal bir transformatörün yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Tek fazlı transformatörün yapısı

İdeal bir transformatörün özellikleri (J Chapman (2004)):

*i.* Kaçak akı yoktur: Her iki sargının manyetik akıları yalnızca çekirdeğin içinden akar.

ii. Sargıların direnci sıfırdır: Hem primer ve hem sekonder sargıların direnci sıfır olduğu için sargılara uygulanan gerilim ve sargılarda indüklenen gerilimler eşittir ( $V_1 = e_1$  ve  $V_2 = e_2$ ).

iii. Çekirdeğin manyetik geçirgenliği sonsuzdur ( $\mu = \infty$ ): Manyetik geçirgenlik sonsuz olduğu için, çekirdekte relüktans sıfırdır ( $\mathfrak{R} = 0$ ).

iv. Çekirdeğin eddy ve histerizis kayıpları sıfırdır.

Primer ve sekonder sargıları sırasıyla  $N_1$  ve  $N_2$  spirlerine sahiptir. Karşılıklı akı nedeniyle sargı 1'de indüklenen elektromotor kuvvetin ( $emf$ ) anlık değeri eşitlik (2.1)'de verilmiştir. Uygulanan gerilimin anlık değeri sinüzoidal olarak değiştiğinden, karşılıklı akı ( $\phi_m$ ) da frekans ( $f$ ) ile değişen sinüzoidal yapıda olmalıdır.

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.1)$$

$$\phi_m = \phi_{\max} \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

$$\phi_{\max} = B_{\max} A_{eff} \quad (2.3)$$

burada  $\phi_{\max}$  karşılıklı akının tepe değerini,  $\omega = (2\pi f)$ ,  $B_{\max}$  maksimum akı yoğunluğunu ve  $A_{eff}$  nüvenin efektif kesit alanını göstermektedir.

Eşitlik (2.2) ve (2.3)'ü, eşitlik (2.1)'de yazılırsa, eşitlik (2.4) elde edilir.

$$e_1 = \omega \cdot N_1 \cdot B_{\max} \cdot A_{eff} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)'te verilen indüklenen gerilimin etkin değeri ( $rms$ ), eşitlik (2.5)'te verilmiştir.

$$e_{1,rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot B_{\max} \cdot A_{eff} = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot B_{\max} \cdot A_{eff} \quad (2.5)$$

Transformatörün ideal olduğu varsayıldığından dolayı, transformatörün primer tarafına uygulanan gerilim ve primer sargısında indüklenen gerilim eşittir.

$$e_{1,rms} = U_1 \quad (2.6)$$

Benzer şekilde sekonder sargı için:

$$U_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot B_{\max} \cdot A_{eff} \quad (2.7)$$

Transformatörün çevirme oranı ( $\alpha$ ), eşitlik (2.8)'de verilmiştir.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.8)$$

Transformatörün çevirme oranı için uluslararası IEC 60076-1 standartında  $\% \pm 0,5$  tolerans değeri belirlenmiştir.

## 2.2 Transformatorlerin Sınıflandırılması

Transformatorlerin farklı özellikleri göz önüne alınarak değişik şekillerde sınıflama yapılabilir. Burada en önemli kriterler teknik yapılar, büyüklük, kullanım amaçları ve üstlendiği görevlerdir. Teknik yapısı, tipi, görevi, amacı, faz sayısı, soğutma şekli, bulunduğu yer ve gerilim seviyesi gibi özelliklerine göre transformatorler aşağıdaki gruplara ayırabiliriz:

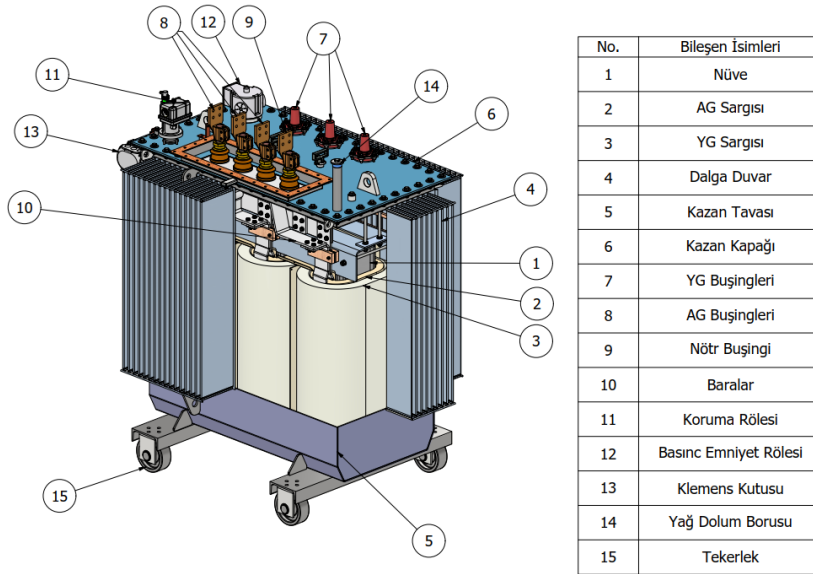
- Manyetik nüvenin yapısına göre
  - Mantel tipi (beş bacaklı)
  - Ççekirdek tipi (üç bacaklı)
- Faz
  - Tek fazlı
  - Üç fazlı
- Kullanım
  - Güç transformatorü
    - \* Güç ( $S_r > 40$  MVA)
    - \* Orta seviye ( $3, 15$  MVA  $< S_r \leq 40$  MVA)
    - \* Dağıtım ( $S_r \leq 3, 15$  MVA)
  - İzolasyon transformatorü
  - Ölçü transformatorü
    - \* Akım
    - \* Gerilim
  - Oto transformator
- Frekans
  - Düşük frekanslı
  - Yüksek frekanslı
- Yalıtım ve soğutma sistemi
  - Yağlı tip
  - Kuru tip
- Gerilim oranı

- Yükseltici
- Düşürücü

Bu sınıflandırmalara ek olarak, her biri farklı uygulama ve endüstrilerdeki belirli gereksinimleri karşılamak üzere tasarlanmış, literatürde bulunan bazı makaleler, kitaplar ve ulusal/uluslararası standartlarda farklı sınıflandırmalar da olabilir.

### 2.3 Transformatörün Bileşenleri

Bir transformatör çeşitli bileşenlerden oluşur, bu bileşenlerin her biri transformatörün performansına farklı bir şekilde katkıda bulunur. Ana bileşenler nüve, sargılar, yalıtım malzemeleri, transformatör yağı, kazan, kademe değiştirici, koruyucu, soğutma sistemi, Buchholz rölesi ve tekerliklerdir. Bir hermetik tipi dağıtım transformatörünün ana bileşenleri Şekil (2.3)'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Transformatör bileşenleri

### 2.4 Harmonikler ve Transformatör Üzerinde Etkileri

Güç elektroniği eviricilerinin ve diğer doğrusal olmayan yüklerin yaygın olarak kullanılması, elektrik sistemlerinin kalitesini kötüleştiren ve harmonik bozulmanın ana nedenlerinden biridir. Bu nedenle, elektrik üretim ve dağıtım şirketlerinin elektrikli ürünlerin kalitesinin uygun şekilde raporlanma-

siyla ilgilenmesi giderek daha önemli hale gelmektedir (Khan et al. (2017)). Harmonikler ve ara harmonikler, hem düşük hem de yüksek frekanslarda titreşime, ekipmanların aşırı ısınmasına, şebekede güç kayıplarına, haberleşme sistemlerinde parazit ve kontrol sistemlerinde ve dijital sayaçlarda hatalar gibi istenmeyen etkilere sebep olur (Kalair et al. (2017))

Toplam Harmonik Bozulma (THD), güç sistemlerinde kaliteyi sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için IEEE ve IEC standartlarında kullanılan en önemli ölçüm indekslerinden biridir. Akım ve gerilim toplam harmonik bozulmalar eşitlik 2.10 ve 2.9'da verilmiştir. Alçak gerilim ve orta gerilim şebekeleri için izin verilen maksimum THD% değeri IEEE 519-2022 ve IEC 61000 standartlarına göre, gerilim bozulması için yaklaşık %8 ve akım bozulması için %5-8 civarında olabilir (IEEE (2022) ,IEC (2010)).

$$THD_U(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1} \times 100 \quad (2.9)$$

$$THD_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.10)$$

Burada  $THD_U$  ve  $THD_I$  gerilim ve akım harmoniklerinin toplam bozulması,  $U_1$  ve  $I_1$  gerilim ve akım harmoniklerinin temel bileşenleri,  $h$  ise harmonik sayısıdır.

Transformatör üreticileri genellikle transformatörleri, anma gerilimi ve sinüzoidal akımda minimum kayıpları olacak şekilde tasarlamaya çalışırlar. Ancak, son yıllarda lineer olmayan yüklerin artması ile şebekenin akım ve gerilim tam olarak sinüzoidal değildir. Sinüzoidal olmayan bu akım ve gerilim, transformatörlerde ekstra kayıplara ve sıcaklığa neden olur. Doğrusal olmayan yüklerin dağıtım ve güç transformatörleri üzerindeki en yaygın etkileri aşağıdaki gibidir (Pejovski et al. (2017)):

- Çalışma noktasını doğrusal olmayan ( $B-H$ ) eğrisinin diz bölgesine doğru değiştirerek transformatör nüvesinin doyuma ulaşmasına neden olur.
- Nüvede oluşan eddy kayıplarının artışına neden olur..
- Sargılarda oluşan bakır kayıplarının artışına neden olur..

- Sargılarda, baralarda, yalıtım malzemelerinde ve takozlarda aşırı ısınmaya neden olur..
- Buşingler, kademe değiştirici ve kablo bağlantıları yüksek gerilimlere maruz kalıp ve bu da transformatörün arızasına neden olur.
- Transformatörün toplam verimini azaltır.
- Transformatörün kullanım ömrünü azaltır.

Bu sebeplerden dolayı, güç ve dağıtım transformatörlerinin imalatında harmoniklerin göz önünde bulundurulması, enerjinin verimli iletilmesi, yönetmeliklere uyum, uzun vadede maliyet azaltılması ve elektrik şebekesinde çevresel sürdürülebilirliğin teşvik edilmesi için esastır.

## 2.5 Transformatörlerin Güvenilirliği

Güç sistemi içerisinde transformatörlerin güvenilirliği büyük önem taşımaktadır. Transformatörlerde yüksek güvenilirlik elde edilmesinde çeşitli faktörler önemli bir rol oynamaktadır. Temel faktörler, güç kayıplarını en aza indirmeyi amaçlayan optimum transformatör tasarımı, düzenli izleme, bakım uygulamaları ve uygun yüklemeyi kapsar.

Güç kayıpları transformatör içinde ısı üretimine neden olur. Transformatörlerde bakır ve demir kayıpları şeklinde kayıplar yaşanır ve bunlar transformatör içinde ısı ve stres oluşturur Tang et al. (2014). Aşırı ısı, yalıtım malzemelerini zamanla bozarak kullanım ömrünün kılmasına ve güvenilirliğin azalmasına neden olabilir.

Transformatörlerdeki güç kayıpları ile transformatörlerin güvenilirlikleri arasındaki ilişki oldukça önemlidir. Bakır kayıpları sargılardaki direnç nedeniyle meydana gelirken, demir kayıpları alternatif akım döngüsü sırasında nüvenin mıknatıslanması ve manyetikliğinin giderilmesinden kaynaklanır. Yüksek kayıplar daha yüksek ısı üretimine neden olarak yalıtım malzemelerinin daha hızlı bozulmasına ve potansiyel olarak kısa devrelere veya operasyonel arızalara yol açma riski oluşturur. Yüksek kayıplara sahip transformatörler genellikle daha fazla bakım gerektirir ve verimsizlikleri, genel güvenilirliği etkileyerek yaşam döngüsü maliyetlerinin artmasına neden olur.

Sonuç olarak, kayıpların azaltılması ve optimal transformatör tasarımı,

transformatörün güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük kayıplar aşırı ısınmayı azaltarak yalıtımı korur ve olası kısa devreleri veya arızaları engeller. Optimize edilmiş bir tasarım, bileşenler üzerindeki stresi azaltarak verimli bir performans sağlar ve transformatörün işlevsel ömrünü uzatır. Bu önlemler birlikte güvenilirliği güçlendirir, güç sistemlerinde tutarlı ve güvenilir bir işlevselliği temin eder.

## 2.6 Transformatör Testleri

Elektrik transformatörlerinde uygulanan testler ve standartlar, transformatörlerin kalitesini ve güvenilirliğini sağlamak için önemli adımlardır. Bu testler ve standartlar, trafoların tasarımından imalatına ve işletmeye alınmasına kadar çeşitli aşamalarda uygulanır. Transformatörler için uygulanan standartlar ise ülkelere ve bölgelere göre farklılık gösterebilir. Örneğin, IEC 60076 standardı ve ANSI/IEEE C57.12.00 standardı gibi transformatörler için uluslararası standartlar olarak tanımlanmaktadır. IEC 670076 standardına göre transformatörler üzerine uygulanan testler aşağıda listelenmiştir.

### 2.6.1 Rutin testler

Rutin testler, üretim tesisinden gönderilmeden önce bir transformatörün her bir birimi üzerinde gerçekleştirilen standart elektrik testleridir. Bu testler, transformatörün temel elektriksel özelliklerini ve performansını doğrulamak için kullanılır. Rutin testler, transformatörün belirtilen tasarım gereksinimlerini karşılama ve normal çalışma koşullarında doğru çalıştığını garanti etmektedir. Güç ve dağıtım transformatörleri için bazı yaygın rutin testler şunları içerir:

- Sargı direncinin ölçülmesi.
- Gerilim oranı ve faz kayması ölçümü.
- Boşta kayıp ve akımın ölçülmesi.
- Kısa devre empedansı ve yükte kaybının ölçülmesi.
- Kademe değiştirici testleri.
- Yağlı tip transformatörler için basınçla ölçülen yağ kaçak testi.

- Dielektrik testler.
- Vektör grubu doğrulaması.

### 2.6.2 Tip testler

Tasarım testleri olarak da bilinen tip testleri, aşırı veya anormal çalışma koşulları altında tasarım ve performansı doğrulamak için yapılır. Bu testler transformatörün örnek bir birim veya prototipi üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı ve daha detaylı testlerdir. Her üniteye yapılan rutin testlerden farklı olarak tip testleri, tasarımın onaylanması için sadece temsili bir ünite üzerinde yapılır. Tip testleri şunları içerir:

- Sıcaklık artış tip testi.
- Dielektrik tip testleri.
- Gürültü seviyesi ölçümü.
- Fan ve sıvı pompası motorlarının çektiği gücün ölçülmesi.
- Nominal gerilimin %90 ve %110'unda boşta kayıp ve akım ölçülmesi.

### 2.6.3 Özel testler

Özel testler, müşteri tarafından talep edildiğinde veya bazı standart dışı özellikler veya uygulamalar söz konusu olduğunda transformatörler üzerinde yapılan testlerdir. Bu testler, bireysel trafo siparişlerine özeldir ve rutin veya tip testlerinin parçası değildir. Özel test örnekleri şunları içerebilir:

- Dielektrik özel testler.
- Sargı sıcak nokta (Hot Spot) sıcaklık artışı ölçümleri.
- Sargılardan toprağa ve sargılar arasındaki kapasitansların belirlenmesi.
- Yalıtım sistemi kapasitanslarının dağılım faktörünün ( $\tan \delta$ ) ölçümü.
- Geçici aşırı gerilim testleri.
- Kısa devre dayanım testi.
- DC yalıtım direncinin her sargının toprağa ve sargılar arasında ölçümü.
- Vakum sapma testi.
- Basınç sapma testi.

- Frekans Tepkisi Analizi (FRA) testi.
- Dielektrik sıvıda çözünmüş gazların ölçümü.
- Tankın nakliye uygunluğu için mekanik testi.



### 3 TRANSFORMATÖR TASARIMI

Transformatör tasarımını gerçekleştirmek için, ulusal / uluslararası standartlara ek olarak, müşteri şartnamelerine dayanan teknik özellikler de belirlenmelidir. Transformatör tasarımında kullanılan ana parametreler aşağıda belirtilmiştir.

- Transformatörün nominal gücü ( $S_r$ ) - (kVA)
- Alçak gerilimin nominal değeri ( $U_{AG}$ ) - (kV)
- Yüksek gerilimin nominal değeri ( $U_{YG}$ ) - (kV)
- Alçak gerilimin bağlantı tipi (Üçgen ( $\Delta$ ), Yıldız ( $Y$ ), Zigzag ( $Z$ ))
- Yüksek gerilimin bağlantı tipi (Üçgen ( $\Delta$ ), Yıldız ( $Y$ ), Zigzag ( $Z$ ))
- Kademe değiştiricinin özellikleri (kademe sayısı ve yüzdesi)
- Kısa devre empedansı ( $U_k$ ) - (%)
- Çalışma frekansı ( $f$ ) - (Hz)
- Alçak gerilim sargının malzemesi (bakır ( $cu$ ), alüminyum ( $al$ ))
- Yüksek gerilim sargının malzemesi (bakır ( $cu$ ), alüminyum ( $al$ ))
- Alçak gerilim sargı yapısı (yassı tel, levha)
- Yüksek gerilim sargı yapısı (yassı tel, levha)
- İzin verilen maksimum yükte kayıp ( $P_Y^{\max}$ ) - (watt)
- İzin verilen maksimum başta kayıp ( $P_B^{\max}$ ) - (watt)
- İzin verilen maksimum toplam kayıp ( $P_T^{\max}$ ) - (watt)
- İzin verilen maksimum sargı sıcaklığı ( $\theta_{sargi}^{\max}$ ) - ( $^{\circ}C$ )
- İzin verilen maksimum yağ sıcaklığı ( $\theta_{yag}^{\max}$ ) - ( $^{\circ}C$ )
- İzin verilen minimum tepe verimliliği ( $\eta_{\min}$ ) - (%)
- Kullanılan malzemelerin birim fiyatı - (\$)
- Gerekli aksesuarlar ve fiyat listeleri

Yukarıda belirlenen müşteri şartnamesi ve ulusal / uluslararası standartlar kısıtlamalarına ek olarak, imalat sırasında bulunan malzeme kısıtları ve firmaya ait standartlarda tasarımda dikkate alınmalıdır. Hermetik tipi

dağıtım transformatörü tasarımı için kullanılan tasarım değişkenleri Tablo 3.1'de verilmistir.

Tablo 3.1: Tasarım Değişkenleri

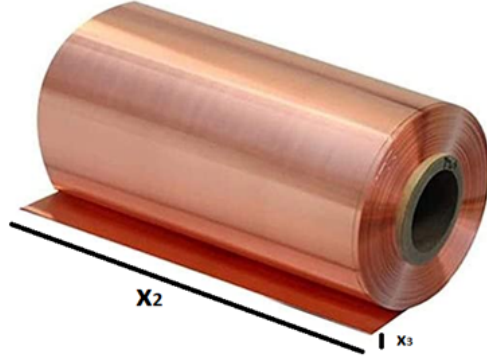
NO.	Değişken Adı	Birim	Alt Limit	Üst Limit	Adım Aralığı	Olasılık
$x_1$	Nüve kesit alanı	$cm^2$	275	1000	1	726
$x_2$	AG levha genişliği	$mm$	300	1000	10	71
$x_3$	AG levha kalınlığı	$mm$	0,5	5	0,1	46
$x_4$	AG radyal levha sayısı	--	1	2	1	2
$x_5$	AG sipir sayısı	--	8	25	1	18
$x_6$	AG tam kanal sayısı	--	0	5	1	6
$x_7$	AG yarım kanal sayısı	--	0	2	1	3
$x_8$	YG tel genişliği	$mm$	2	16	0,1	141
$x_9$	YG tel kalınlığı	$mm$	1,8	4	0,1	23
$x_{10}$	YG aksel tel sayısı	--	1	2	1	2
$x_{11}$	YG tam kanal sayısı	--	0	4	1	5
$x_{12}$	Nüve eksen oranı	--	1,3	1,95	0,01	66
$x_{13}$	Nüve malzeme tipi	--	M3 – M4 – M5	--	--	3
$x_{14}$	Nüve kesitin ana kademesi	--	300	600	3	101
$x_{15}$	DD <sup>i</sup> dilimler arası mesafe	--	40	70	1	31
$x_{16}$	DD köşe tipi ( $KB^{ii}$ , $KD^{iii}$ )	--	1	2	1	2
$x_{17}$	Yağ tipi	--	1	5	1	5
$x_{18}$	DD dilim uzunluğu	$mm$	400	1400	100	11
$x_{19}$	DD dilim derinliği (uzun kenar)	$mm$	50	400	10	36
$x_{20}$	DD dilim derinliği (kısa kenar)	$mm$	50	400	10	36
$x_{21}$	YG yarım kanal sayısı	--	0	2	1	3

<sup>i</sup> DD: Dalga Duvar, <sup>ii</sup> KB: Köşesi Boş , <sup>iii</sup> KD: Köşesi Dolu

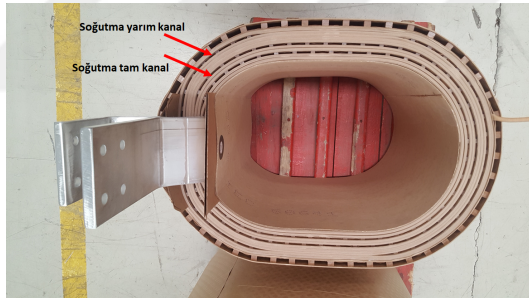
Tablo (3.1)'de verilen değişkenlerden yağ tipi değişkeni için olasılıklar farklı fiyat, soğutma performansı, yoğunluk ve viskozite özelliklerine sahip, 1: *Nynas*, 2: *Shell*, 3: *FR3*, 4: *MIDEL*, ve 5: *POWEROIL* isimli yağlardan oluşurken; diğer bir değişken, nüve malzemesi için olasılıklar sac kalınlığına göre belirlenen ticari olarak isimlendirilen *M3*, *M4*, ve *M5* saclar sırasıyla 0.23, 0.27 ve 0.30 mm kalınlığından oluşmaktadır. Diğer değişkenler ise Şekil (3.1-3.5)'te ve ilgili bölümlerde gösterilmiştir.

Sonraki bölümlerde, bir transformatörün aktif ve aktif olmayan parçaları anlatılacaktır. Aktif parçalar, gerilim ve akımla temas halinde olan elemanlar

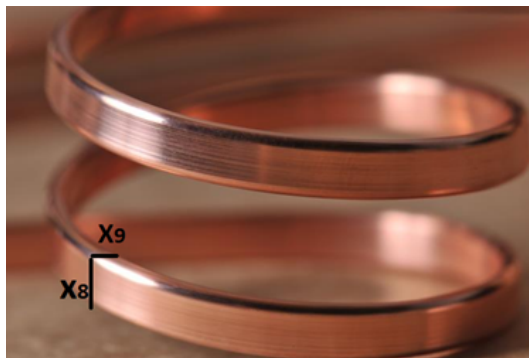
gibi esas olarak sargılar, nüve ve kademe değiştiriciden oluşur. Aktif olmayan parçalar ise kazan, kapak, yağ, koruyucu röleler vb. gibi diğer bileşenlerden oluşmaktadır.



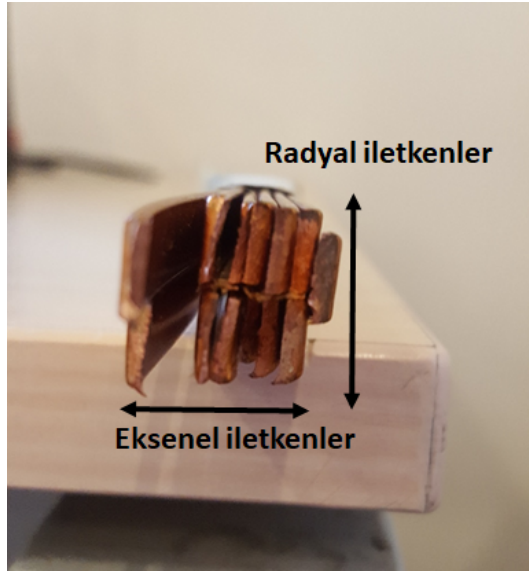
Şekil 3.1: Levha iletken



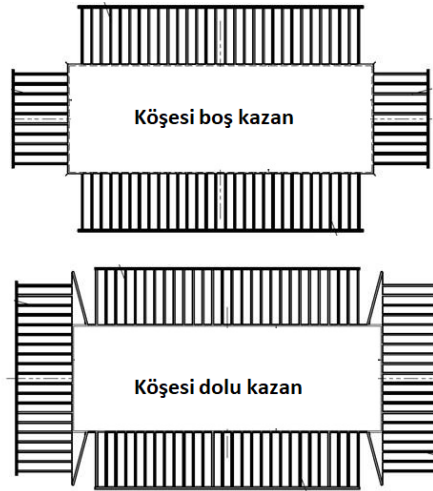
Şekil 3.2: Soğutma kanalı



Şekil 3.3: Tel iletken



Şekil 3.4: Radyal ve aksel tel iletkenleri



Şekil 3.5: Kazan tipi

### 3.1 Sargı Tasarımı ve Yükte Kayıplar

Bu bölümde, bir transformatörün sargı tasarımı, sargı ağırlığı ve sargılarda oluşan kayıplar detaylı şekilde verilmiştir.

#### 3.1.1 Sargı tasarımı

Transformatör sargı iletkeni genellikle bakır ve alüminyum malzemelerinden yapılır. Bakırın iletkenliği alüminyuma göre daha yüksek ama daha maliyetlidir ve daha ağırdır. Bu yüzden dağıtım transformatör üretiminde

alüminyum iletkeni fiyat-performans açısından daha fazla tercih edilmektedir. Dağıtım transformatörlerinin sargısı genel olarak levha veya yassı tel şeklinde olur. Yüksek akım düşük gerilim sargısı levha ve yüksek gerilim sargısı yassı tel olarak kullanılır (Nair (2021)).

Transformatör sargı tasarımında ilk adım, sargının gerilim ve akımını belirlemektir. Müşteri şartnamesinde belirlenen gerilim, hat gerilimidir. Transformatörün sargı bağlantısına göre faz gerilimi ve faz akımı hesaplanır. Üç fazlı transformatör için:

Üçgen bağlantı ( $\Delta$ ):

$$U_{faz} = U_{hat} \quad (3.1)$$

$$I_{hat} = \frac{S_r}{U_{hat}\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

$$I_{faz} = \frac{I_{hat}}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

Yıldız bağlantı (Y) ve Zigzag bağlantı (Z):

$$U_{faz} = \frac{U_{hat}}{\sqrt{3}} \quad (3.4)$$

$$I_{hat} = \frac{S_r}{U_{hat}\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

$$I_{faz} = I_{hat} \quad (3.6)$$

burada  $S_r$  transformatörün nominal gücü,  $I_{hat}$  ve  $I_{faz}$  sırasıyla hat akımı ve faz akımı,  $U_{hat}$  ve  $U_{faz}$  ise sırasıyla hat gerilimi ve faz gerilimidir Nair (2021). Akım yoğunluğu ve iletken boyutları hesabı AG sargısı için eşitlik (3.7,3.8) ve YG sargısı için eşitlik (3.9,3.10)'da verilmiştir.

$$\delta_{AG} = \frac{I_{faz}}{A_{AG}} \quad (3.7)$$

$$A_{AG} = (L_g \cdot L_k)L_{rad,AG} \cdot L_{eks,AG} \quad (3.8)$$

$\delta_{AG}$ : Alçak gerilim sargısında akım yoğunluğu.

$A_{AG}$ : Alçak gerilim levha iletkenin kesit alanı.

$L_g$  ve  $L_k$ : Levhanın genişliği ve kalınlığı.

$L_{rad,AG}$  ve  $L_{eks,AG}$ : Radyal ve eksenel levha sayısı.

$$\delta_{YG} = \frac{I_{faz}}{A_{YG}} \quad (3.9)$$

$$A_{YG} = (T_g \cdot T_k) T_{rad,YG} \cdot T_{eks,YG} \quad (3.10)$$

$\delta_{YG}$ : Yüksek gerilim sargısında akım yoğunluğu.

$A_{YG}$ : Yüksek gerilim yassı tel iletkenin kesit alanı.

$T_g$  ve  $T_k$ : Telin genişliği ve kalınlığı.

$L_{rad,AY}$  ve  $L_{eks,YG}$ : Radyal ve eksenel tel sayısı.

Transformatörün alçak gerilim iletkeni alüminyum levha kullanılmıştır.

Kullanılan sargının uzunluğu eşitlik (3.11)'de verilmiştir.

$$l_{AG} = \frac{3C_{AG} \cdot N_{AG}}{100} \quad (3.11)$$

$$C_{AG} = \frac{r_e + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + r_{k,AG}}{10} \cdot \pi \quad (3.12)$$

$$r_e = \frac{[2(a+b) + 2\pi(\frac{b}{2}) - 8(\frac{b}{2})]}{\pi} \quad (3.13)$$

$$r_{k,AG} = (L_k \cdot N_{AG} \cdot L_{rad,AG}) + Y_{k,AG} + (K_{tam,AG} \cdot K_g) \quad (3.14)$$

$l_{AG}$  : Alçak gerilimde kullanılan levhanın uzunluğu.

$C_{AG}$  : Alçak gerilim ortalama çevresi.

$N_{AG}$  : Alçak gerilim sargısının siper sayısı.

$r_e$  : Eşdeğer kalıp çapı.

$\varepsilon_1$  : Alçak gerilim sargısı ve nüve arasında kullanılan tüp kalınlığı.

$\varepsilon_2$  : Alçak gerilim sargısı ve tüp arasındaki mesafe.

$r_{k,AG}$  : Alçak gerilim sargısının ortalama radyal kalınlığı.

$K_{tam,AG}$  : Alçak gerilim soğutma tam kanal sayısı.

$K_g$  : Tam kanal soğutma genişliği.

$Y_{k,AG}$  : AG sargının toplam yalıtım kalınlığı.

Transformatörün yüksek gerilim iletkeni alüminyum yassı tel kullanılmıştır. Kullanılan sargının uzunluğu eşitlik (3.15)'te verilmiştir.

$$l_{YG} = \frac{3C_{YG} \cdot N_{YG}}{100} \quad (3.15)$$

$$C_{YG} = \frac{r_e + [2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + r_{k,AG})] + r_{k,YG}}{10} \cdot \pi \quad (3.16)$$

$$r_{k,YG} = (T_k \cdot N_{YG} \cdot T_{rad,AG}) + Y_{k,YG} + (K_{tam,YG} \cdot K_g) \quad (3.17)$$

$l_{YG}$  : Yüksek gerilimde kullanılan tel uzunluğu.

$C_{YG}$  : Yüksek gerilim ortalama çevresi.

$N_{YG}$  : Alçak gerilim sargısının siper sayısı.

$r_e$  : Eşdeğer kalıp çapı.

$\varepsilon_1$  : Alçak gerilim sargısı ve nüve arasında kullanılan tüp kalınlığı.

$\varepsilon_2$  : Alçak gerilim sargısı ve tüp arasındaki mesafe.

$\varepsilon_3$  : Alçak gerilim ve yüksek gerilim sargular arası mesafe.

$r_{k,YG}$  : Yüksek gerilim sargısının ortalama radyal kalınlığı.

$K_{tam,YG}$  : Yüksek gerilim soğutma tam kanal sayısı.

$K_g$  : Tam kanal soğutma genişliği.

$Y_{k,YG}$  : YG sargısının toplam yalıtım kalınlığı.

### 3.1.2 Sargı ağırlık hesabı

Alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılarının ağırlıkları sırasıyla eşitlik (3.18) ve (3.19)'da verilmiştir.

$$W_{AG,s} = l_{AG} \cdot \rho \cdot L_g \cdot L_k \cdot L_{rad,AG} \cdot L_{eks,AG} \cdot 10^{-3} \quad (3.18)$$

$$W_{YG,s} = l_{YG} \cdot \rho \cdot T_g \cdot T_k \cdot T_{rad,YG} \cdot T_{eks,YG} \cdot 10^{-3} \quad (3.19)$$

burada  $\rho$  sargı malzemesinin yoğunluğudur.  $\rho$  değeri alüminyum için  $2,7 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$  ve bakır için  $8,9 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$  dır.

### 3.1.3 Yükte kayıpların hesabı

Yük kayıpları bazen bakır kayıpları veya doğru akım (DC) kayıpları olarak da adlandırılır. Bu kayıplar primer ve sekonder sargı direncinden kaynaklanır, yük akımının karesi ile doğru orantılıdır. Yük arttıkça kayıplar da artar. Yükte kayıplar genel olarak üç bileşenden oluşur. Bu bileşenler DC kayıplar ( $P_{DC}$ ), eddy kayıplar ( $P_{eddy}$ ) ve kazan-kapak kayıpları ( $P_{stray}$ ) olarak isimlendirilir. DC kaybı, transformatörün test aşamasında DC akım uygulanır ve bu akımdan ölçülen kayıplara denir. Eddy kayıplar, sargılarda dolaşan AC akım nedeniyle oluşan kayıplara denir. Sargıda oluşan akımdan dolayı transformatörün kazan, kapak ve diğer metal parçalarda oluşan kayıplara

( $P_{stray}$ ) denir (Çımar et al. (2017), Nair (2021)). Toplam yükte kayıplar ( $P_Y$ ) eşitlik (3.20)'de verilmiştir.

$$P_Y = P_{DC} + P_{eddy} + P_{stray} \quad (3.20)$$

$$P_Y = P_{DC,AG} + P_{DC,YG} + P_{eddy,AG} + P_{eddy,YG} + P_{stray} \quad (3.21)$$

**DC kaybı hesabı:** Bir iletkenin toplam ağırlığını kullanarak DC kaybı hesaplanabilir. Bir iletkenin ağırlığı ise eşitlik (3.23)'te verilmiştir.

$$P_{DC} = I^2 R = I^2 \frac{Dl}{A} \quad (3.22)$$

$$W = l \cdot A \cdot \rho \quad (3.23)$$

$$l = \frac{W}{A \cdot \rho} \quad (3.24)$$

burada  $I$  akım,  $R$  direnç,  $D$  iletken malzemenin elektrik direnci,  $l$  iletkenin uzunluğu ve  $A$  iletkenin kesit alanı,  $W$  iletkenin ağırlığı ve  $\rho$  iletkenin yoğunluğudur.

Eşitlik (3.24)'ü eşitlik (3.22)'de yazdığımız zaman:

$$P_{DC} = I^2 R = I^2 \frac{Dl}{A} = I^2 \frac{D(\frac{W}{A \cdot \rho})}{A} = I^2 \frac{D \cdot W}{A^2 \cdot \rho} \quad (3.25)$$

Eşitlik (3.25) sadeleştirirsek:

$$P_{DC} = \sigma W \delta^2 \quad (3.26)$$

burada  $\delta^2 = \frac{I^2}{A^2}$  akım yoğunluğunun karesi ve  $\sigma = \frac{D}{\rho}$  malzemenin elektrik direnci ve yoğunluğuna göre bir katsayıdır.

Eşitlik (3.26)'i kullanarak alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılarında oluşan DC kayıplar sırasıyla eşitlik (3.27) ve (3.28)'de verilmiştir.

$$P_{DC,AG} = \sigma \cdot W_{AG,s} \cdot \delta_{AG}^2 \quad (3.27)$$

$$P_{DC,YG} = \sigma \cdot W_{YG,s} \cdot \delta_{YG}^2 \quad (3.28)$$

burada  $\sigma$  katsayısı değeri alüminyum için 12,4 ( $\frac{\Omega m^4}{kg}$ ) ve bakır için 2,44 ( $\frac{\Omega m^4}{kg}$ ) dir.

**Eddy kaybı hesabı:** Alternatif akımın (AC) sargılarda sirkülasyonu, özellikle yüksek frekansta veya büyük akımlarla çalışan cihazlarda enerji kaybına yol açabilir. Bu kayba "eddy kayıpları" veya "eddy current losses" denir.

Eddy kayıpları, sargı içinde dolaşan eddy akımları nedeniyle sargıların direnci tarafından oluşturulan ısı olarak ortaya çıkar ve bu ısı enerjisinin kaybına yol açar.

Alçak gerilim sargısında meydana gelen eddy kaybının ( $P_{eddy,AG}$ ) ampirik formülü eşitlik (3.29-3.30)'da verilmiştir.

$$P_{eddy,AG} = P_{DC,AG} \cdot K_{eddy,AG} \quad (3.29)$$

$$K_{eddy,AG} = \frac{(k_e \cdot L_k)^4 (kat_{AG} \cdot N_{AG})^2}{9} \cdot K_{harmonik} \quad (3.30)$$

$$K_{harmonik} = \frac{\left[ \sum_{h=1}^n \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2 \right]}{\left[ \sum_{h=1}^n \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right]} \quad (3.31)$$

benzer şekilde, Yüksek gerilim sargısında meydana gelen eddy kaybı ( $P_{eddy,YG}$ ) eşitlik (3.32)'de verilmiştir.

$$P_{eddy,YG} = P_{DC,YG} \cdot K_{eddy,YG} \quad (3.32)$$

$$K_{eddy,YG} = \frac{(k_e \cdot T_k)^4 (kat_{YG} \cdot N_{YG})^2}{9} \cdot K_{harmonik} \quad (3.33)$$

$$K_{harmonik} = \frac{\left[ \sum_{h=1}^n \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2 \right]}{\left[ \sum_{h=1}^n \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right]} \quad (3.34)$$

Burada  $K_{eddy,AG}$  ve  $K_{eddy,YG}$  sırasıyla AG ve YG sargıların eddy kayıpları katsayılarıdır.  $K_{harmonik}$  akım harmoniklerinin etki faktörüdür.  $kat_{AG}$  ve  $kat_{YG}$  sırasıyla AG ve YG sipir katlarıdır.  $h$  harmonik mertebesi ve  $k_e$  eddy kaybı katsayısı değeri alüminyum için 0,0753 ve bakır için 0,0954.

**Stray kaybı hesabı:** Stray kaybı veya kazan-kapak kaybı, sargılardaki yüksek akım nedeniyle kaçak manyetik akı oluşur. Meydana gelen kaçak akı, transformatörün kazanı ve diğer metal yapısal bileşenleri arasında enerji kaybı oluşturur. Bu kayıpları etkileyen faktör sargıdaki akım ve transformatörün aktif parça ve kazan-kapak arasındaki mesafedir. Bu kayıplar genellikle sonlu elemanlar metodu kullanılarak hesaplanabilir (Çınar et al. (2017)). Transformatör kayıpları hesaplama testi sırasında AC akım ile hesaplanan kayıp ve DC akım ile hesaplanan kayıp arasındaki fark, kazan-kapak kaybı olarak geçir.

Transformatörün test aşamasında ölçülen stray kaybın hesabı eşitlik (3.35)'te verilmiştir.

$$P_{stray} = P_Y - (P_{DC} + P_{eddy}) \quad (3.35)$$

$$P_{stray} = P_{stray,AG} + P_{stray,YG} \quad (3.36)$$

Bu tez kapsamındaki incelenen transformatör için AG sargısındaki akım ( $I_{AG}$ ) ve YG sargısındaki akım ( $I_{YG}$ ) dan oluşan stray kaybın ampirik hesabı eşitlik (3.37) ve (3.38)'de verilmiştir.

$$P_{stray,AG} = 0.0005I_{AG}^2 - 0.7347I_{AG} + 217.02 \quad (3.37)$$

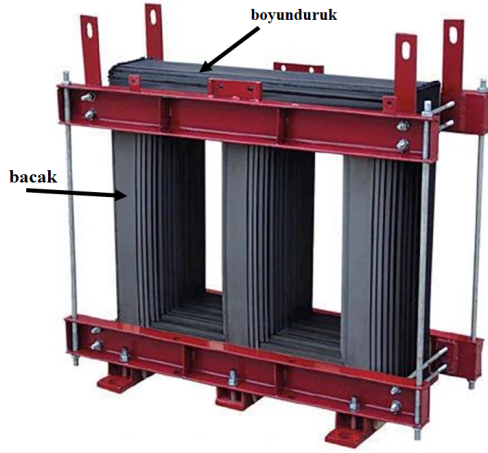
$$P_{stray,YG} = (3 \times 10^{-6}I_{YG}^3) - (0.0034I_{YG}^2) + (1.3065I_{YG}) - (7 \times 10^{-11}) \quad (3.38)$$

## 3.2 Nüve Tasarımı ve Boşta Kayıp Hesabı

Bu bölümde, bir transformatörün nüve tasarımı, nüve ağırlığı ve nüvede oluşan boşta kayıplar detayli şekilde verilmiştir.

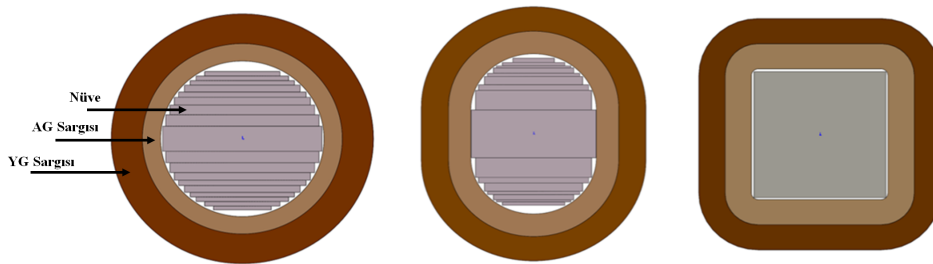
### 3.2.1 Nüve tasarımı

Nüve malzemesi Soğuk Haddelenmiş Silikon Çelik Laminasyonu (Cold Rolled Grain Oriented Steel- CRGO ) malzemesinden üretildiği için manyetik geçirgenliği yüksektir ve manyetik akıya karşı düşük manyetik direnç (Relük-tans) gösterir. Nüvede oluşan eddy ve histerezis kayıplarını en aza düşürmek için nüve ince saclardan dizi şeklinde üretilir. Nüvenin ana kısımları bacaklar (dikey kısımlar) ve boyunduruklardır (yatay kısımlar). Transformatörün nüve yapısı Şekil (3.6)'de gösterilmiştir.



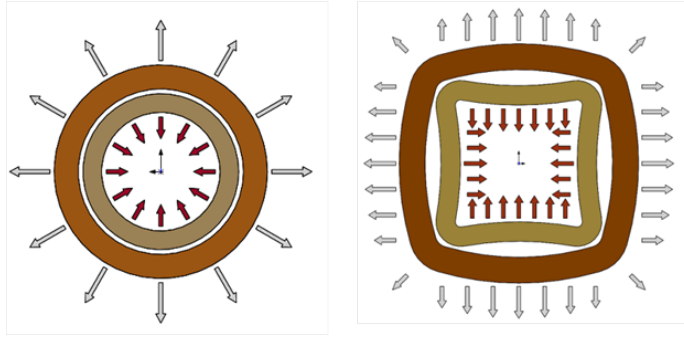
Şekil 3.6: Transformatör nüve yapısı

Transformatör nüve tasarımı için kesit alanı dairesel, oval ve dikdörtgen şekilde yapılabilir. İdeal bir yapıda, sargı ve nüve arasında boşluk olmaması gerekmektedir. Nüve kademe sayısı kısıtı dikkate alınarak, dairesel şekilli nüvede, AG ve YG sargıları sarıldığında, manyetik akı taşıyan nüve ve sargı arasındaki boşluk tamamen doldurmaz ve bir kısım boşluk oluşur. Hava boşluğu hacmi, küçükten büyüğe doğru sırasıyla; dikdörtgen, oval ve dairesel nüve yapısındadır. Hava boşluğunun düşük olması, nüvede oluşan boşa kayıpların daha düşük olmasını sağlar. Şekil (3.7), nüvenin AG ve YG sargıları tarafından kaplandığı durumda, nüve ve sargı arasındaki hava boşluklarını göstermektedir.



Şekil 3.7: Üç farklı nüve yapısı (teckglobal.com.au (2017))

Nüvede oluşan kayıp ve üretim kolaylığına ek olarak, transformatörün aktif kısmında radyal ve eksenel kuvvetlerin de dikkate alınması gerekir. Akım yoğunluğu ( $\vec{J}$ ) ve manyetik alan yoğunluğu ( $\vec{B}$ ) arasındaki etkileşim,



Şekil 3.8: Radyal kuvvetlerin yönü (teckglobal.com.au (2017))

transformatör sargılarındaki elektromanyetik kuvvetleri üretir.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (3.39)$$

Bu kuvvetler hem yüksek gerilim hem de düşük gerilim sargılarında mevcuttur. Transformatörün sargısındaki elektromanyetik kuvvetler ve kaçak manyetik akılar normal koşullarda nispeten küçüktür. Bununla birlikte, kısa devre koşulları veya harici arızalar sırasında, güç transformatörü sargılarındaki akım artar ve sargıda daha yüksek elektromanyetik kuvvetlere, dolayısıyla sargıların deformasyon ve yer kaymasına neden olur (Wang et al. (2019)). Radyal kuvvetler dış sargı üzerinde dışa doğru ve iç sargı üzerinde içe doğrudur (Sousa et al. (2021)). Radyal kuvvetlerin yönü Şekil (3.8)'te gösterilmiştir.

Dairesel, oval ve dikdörtgen nüve yapısının performans değerlendirilmesi Tablo (3.2)'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Farklı nüve yapısının karşılaştırması

Nüve Yapısı	Kısa devreye dayanımı	Güç kaybı performansı	Üretim maliyeti
<b>Dairesel</b>	Çok iyi	Düşük	Yüksek
<b>Oval</b>	İyi	İyi	Orta
<b>Dikdörtgen</b>	Düşük	Çok iyi	Düşük

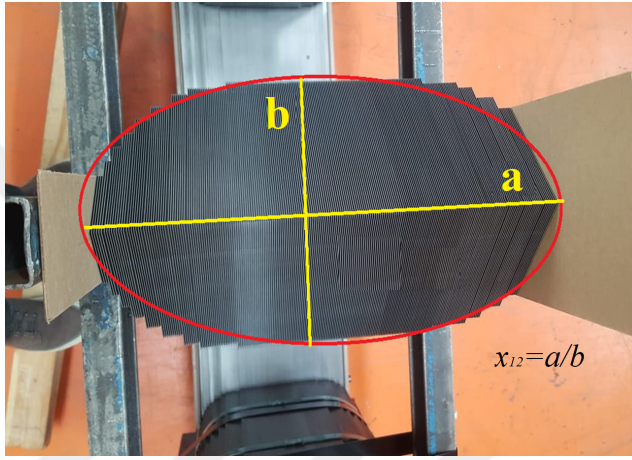
Fiyat-performans değerlendirilmesi sonucunda, yüksek frekanslı güç elektroniğinde kullanılan transformatörlerde dikdörtgen nüve, düşük güçlerdeki transformatörlerde dairesel nüve yapısı ve yüksek güçlerde ise oval nüve yapısı tercih edilmektedir. Transformatör nüvesinin kesit alanının hesabı eşitlik (3.40)'ta verilmiştir.

$$A_{eff} = \frac{U_1}{4,44 \cdot B_m \cdot f \cdot N_1} \quad (3.40)$$

burada  $A_{eff}$  nüve kesit alanının efektif değeri,  $U_1$  primer sargısındaki gerilimi,  $B_m$  akı yoğunluğunu ve  $N_1$  primer sargısının siper sayısını göstermektedir. Nüve yapısı oval ise, uzun çap ( $a$ ) ve kısa çap ( $b$ ) değerleri transformatörün boyutlarını etkileyen değişkenlerdir.  $a$  ve  $b$  değerlerinin oranı ise transformatörün tasarım değişkenidir.

$$A_{eff} = \pi \cdot a \cdot b \quad (3.41)$$

$$O = \frac{a}{b} \quad (3.42)$$



Şekil 3.9: Oval nüve yapısı

### 3.2.2 Nüve ağırlığı hesabı

Nüve ağırlık hesaplaması, nüvenin boyutları, nüve malzemesinin türü ve yoğunluğu ve transformatör tasarımına özgü ek faktörler dahil olmak üzere çeşitli parametrelerden oluşur. Transformatör nüvesinin ağırlığını eşitlik (3.43) kullanılarak hesaplanır.

$$W_{nuve} = \rho \cdot V_{nuve} \quad (3.43)$$

burada  $W_{nuve}$  nüvenin toplam ağırlığı,  $V_{nuve}$  nüvenin hacmi ve  $\rho$  nüve malzemesinin yoğunluğudur. Transformatör nüvesinde kullanılan CRGO malzemenin yoğunluğu  $\rho = 7,65$ . Üç bacaklı nüvenin toplam ağırlığı eşitlik (3.44)'te verilmiştir.

$$W_{nuve}(kg) = A_{eff} [(3L_p) + (4L_b) + (2L_{bg,max})] \rho \cdot 10^{-4} \quad (3.44)$$

$$L_{bg,max} = \left[ \sqrt{\frac{4A_{eff}}{O \cdot \pi}} \right] \cdot 10 \approx b \quad (3.45)$$

burada  $L_p(mm)$  nüve pencere yüksekliği (mm),  $L_b(mm)$  iki bacak eksenindeki mesafe ve  $L_{bg,max}(mm)$  nüvenin maksimum basamak genişliğidir.

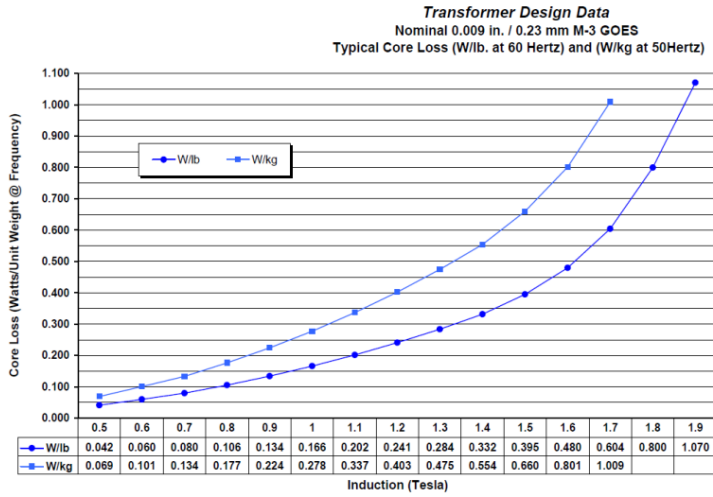
### 3.2.3 Boşta kayıp hesabı

Boşta kayıp veya demir kaybı, bir transformatörün sekonder sargısına bağlı bir yük olmadan çalışırken transformatörde meydana gelen güç kaybını ifade eder. Çok küçük değerdeki bakır ve dielektrik kayıpları dikkate alınmazsa, boşta kayıp iki ana bileşenden oluşur; eddy ve histerezis kaybı.

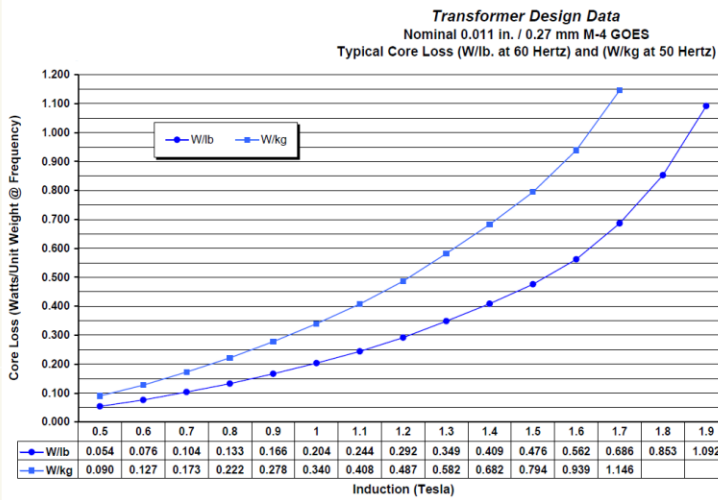
$$P_B = P_{ed} + P_{his} \quad (3.46)$$

- Eddy kaybı: Ferromanyetik malzemeler aynı zamanda iyi elektrik iletkenleridir. Dolayısıyla transformatör nüvesinde az miktarda gerilimin indüklenmesiyle bile nüveden akım akar. Nüvedeki bu akım, elektriksel kayıplara ve nüvenin ısınmasına neden olur.
- Histerezis Kaybı: Transformatörün primerine gerilim uygulandığında, primerde akan alternatif akım nüveyi mıknatıslar. Nüve manyetize edildiğinde ve bu manyetizasyon tersine çevrildiğinde enerji kaybı olur. Bu, manyetik nüvenin içindeki atomların manyetik alanlarındaki değişimlerden kaynaklanır.

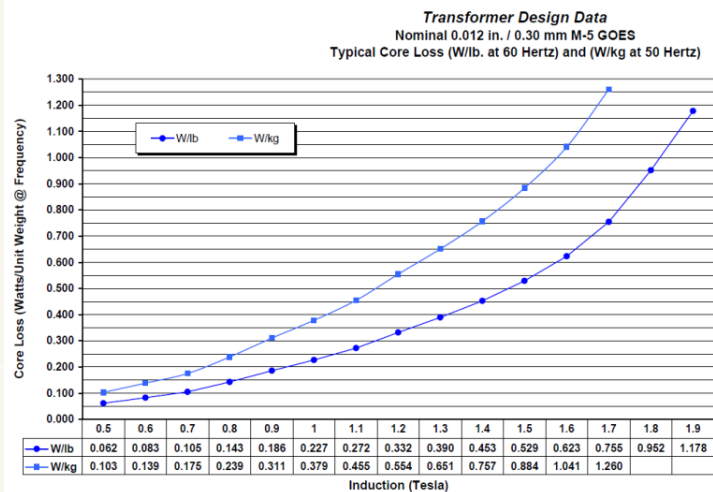
Boşta kayıpları azaltmak için nüve lamine edilir ve birbirlerinden yalıtılır. Laminasyon kalınlığına göre, nüve sacları çeşitli sınıflara ayrılır. Güç ve dağıtım transformatör imalatında sık kullanılan saclar M3, M4 ve M5 ticari isimli saclardır. Bu sacların kalınlığı sırasıyla 0.23 , 0.27 ve 0.30 milimetredir. Şekil (3.10)-(3.12)'den tasarlanan akı yoğunluğu için malzeme ait spesifik boşta kayıp (Specific No Load Loss) değerleri bulunur. Transformatörün boşta kayıp hesabı, bulunan bu değer ile nüvenin toplam ağırlığının çarpımıyla elde edilir.



Şekil 3.10: M3 sacın kayıp özelliği



Şekil 3.11: M4 sacın kayıp özelliği



Şekil 3.12: M5 sacın kayıp özelliği

Transformatörün toplam boşa kaybı eşitlik (3.47)'de verilmiştir.

$$P_B = (SNLL)W_{nuve} \quad (3.47)$$

burada  $SNLL$  nüve malzemesinin spesifik boşa kaybı (Specific NoLoad Loss) ve  $W_{nuve}$  nüvenin toplam ağırlığıdır.

### 3.3 Transformatörün Toplam Kaybı ve Tepe Verimliliği

Bir transformatörün toplam kaybı, iki ana bileşenin toplamından oluşur: yükte kayıplar ve boşa kayıplar.

$$P_T = P_Y + P_B \quad (3.48)$$

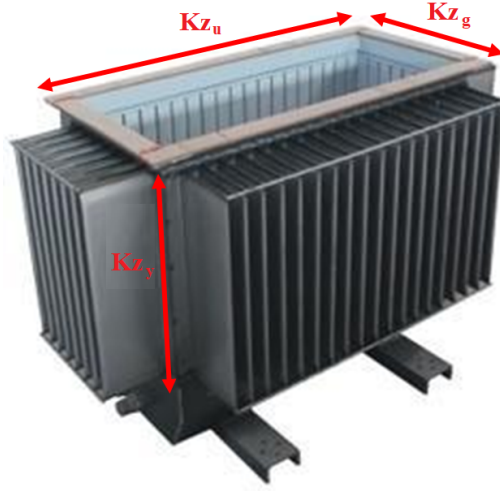
Transformatörün tepe verimliliği ise eşitlik (3.49)'da verilmiştir. Eko-tasarım transformatörler için, tepe verimliliği Tablo (1.1) verilen minimum tepe verimliliğinden düşük olmamalıdır.

$$\eta = 1 - \frac{2P_B}{S_r \sqrt{\frac{P_B}{P_Y}}} \quad (3.49)$$

burada  $S_r$  transformatörün nominal gücü,  $P_B$  toplam boşa kayıp ve  $P_Y$  toplam yükte kaybı ifade etmektedir.

### 3.4 Kazan Tasarımı

Transformatör tankı, yağı ve aktif parçaları muhafaza ederek transformatörün çeşitli bileşenlerine fiziksel destek ve koruma sağlar. Transformatör kazan (Şekil 3.13) tasarımı için yapılması gereken ilk adım, kazanın boyutlarını hesaplamaktır. Kazan uzunluğu ( $Kz_u$ ), kazan genişliği ( $Kz_g$ ) ve kazan yüksekliği ( $Kz_y$ ) sırasıyla eşitlik (3.50), (3.51) ve (3.52)'de verilmiştir.



Şekil 3.13: Transformatör kazan boyutları

$$Kz_u = 2L_{EA} + 2\left(\frac{b}{2} + r_{k,AG} + r_{k,YG} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3\right) + 2\varepsilon_4 \quad (3.50)$$

$$Kz_g = a + 2(r_{k,AG} + r_{k,YG} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 2\varepsilon_4 \quad (3.51)$$

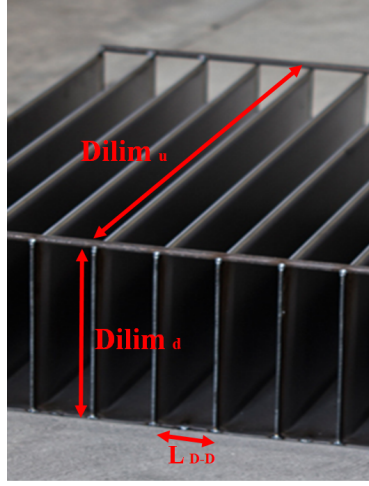
$$Kz_y = 2b + L_p + L_{k-k} \quad (3.52)$$

$$V_{kazan} = Kz_u \cdot Kz_g \cdot Kz_y \quad (3.53)$$

burada  $l_{EA}$  nüve eksenleri arasındaki mesafe,  $\varepsilon_4$  (mm) transformatörün yüksek gerilim sargısı ve kazan arası boşluk mesafesidir,  $L_{k-k}$  (mm) ise transformatörün klemp ve kapak arasındaki mesafesi ve  $V_{kazan}$  kazanın hacmidir .

### 3.4.1 Dalga duvar hesabı

Transformatörün yükte ve boшта kayıplarından meydana gelen kayıplardan dolayı transformatörün aktif kısmı ısınır. Transformatörü soğutmak için transformatörde yağ kullanılır. Kazanda bulunan yağ soğutmaya ek olarak yalıtım özelliğine de sahiptir. Isınmış yağı soğutmak ve yağın sirkülasyonunu sağlamak için transformatör kazanı dalga duvarlı yapılır.



Şekil 3.14: Dalga duvar dilim boyutları

Dalga duvar imalatında genellikle dilim kalınlığı ve dilimler arası mesafe, makine ve dalga duvarda kullanılan demir sac kalınlığına bağlıdır. Bu değerler dilim kalınlığı ( $D_k$ ) için 6-10 (mm) ve dilimler arası mesafe ( $L_{D-D}$ ) için 35-70 (mm) değişebilir. Kazanın uzun kenarlarındaki toplam dilim sayısı ( $TD_{u,k}$ ), kısa kenarlarındaki toplam dilim sayıları ( $TD_{k,k}$ ) ve Ttransformatörün toplam dilim sayısı ( $TD$ ) sırasıyla eşitlik (3.54), (3.55), ve (3.56)'da verilmiştir.

$$TD_{u,k} = \frac{2Kz_u}{L_{D-D}} \quad (3.54)$$

$$TD_{k,k} = \frac{2Kz_g}{L_{D-D}} \quad (3.55)$$

$$TD = TD_{u,k} + TD_{k,k} \quad (3.56)$$

Dalga duvar dilim boyutları ve dili içindeki yağ hacmine göre yağ sirkülasyonu ve yağ sıcaklık düşüşü değişir. Bir dilimin hacmi eşitlik (3.57) ve dilimlerin toplam hacmi eşitlik (3.58)'de verilmiştir.

$$V_{dilim} = D_k \cdot D_d \cdot D_u \quad (3.57)$$

$$V_{dilimler,toplam} = TD \times V_{dilim} \quad (3.58)$$

burada  $D_k$  dilim kalınlığı,  $D_d$  dilim derinliği ve  $D_u$  dilim uzunluğunu ifade eder.

### 3.4.2 Kazan ağırlık hesabı

Transformatör dalga duvarının toplam ağırlık ( $W_{DD}$ ) hesabı eşitlik (3.61)'de verilmiştir.

$$W_{u,k} = D_u [TD_{u,k}(2D_d) + L_{D-D}(TD_{u,k} - 1)] \cdot Kz_{sac,k} \cdot \rho_{sac} \quad (3.59)$$

$$W_{k,k} = D_u [TD_{k,k}(2D_d) + L_{D-D}(TD_{k,k} - 1)] \cdot Kz_{sac.k} \cdot \rho_{sac} \quad (3.60)$$

$$W_{DD} = W_{u,k} + W_{k,k} \quad (3.61)$$

burada  $W_{u,k}$  ve  $W_{k,k}$  sırasıyla kazanın uzun kenarları ve kısa kenarları ağırlığı,  $Kz_{sac.k}$  kazan dalga duvarında kullanılan demir sacın kalınlığı ve  $\rho_{sac}$  demir sacın yoğunluğudur.

Kazanın kapak ağırlığı ( $W_{kapak}$ ) ve kazan tava ağırlığı ( $W_{tava}$ ) ise sırasıyla eşitlik (3.62) ve (3.63)'te verilmiştir.

$$W_{kapak} = Kz_u \cdot Kz_g \cdot Kp_{sac.k} \cdot \rho_{sac} \quad (3.62)$$

$$W_{tava} = Kz_u \cdot Kz_g \cdot Kt_{sac.k} \cdot \rho_{sac} \quad (3.63)$$

burada  $Kp_{sac.k}$  kapak sacının kalınlığı ve  $Kt_{sac.k}$  tava sacının kalınlığıdır. Transformatör kazanının toplam ağırlığı eşitlik (3.64)'te verilmiştir.

$$W_{kazan} = W_{DD} + W_{kapak} + W_{tava} \quad (3.64)$$

### 3.4.3 Yağ ağırlık hesabı

Hermetik transformatörün kazanında kullanılan yağın hesabı aşağıda verilmiştir.

$$V_{yag} = V_{kazan} + V_{dilimler,toplam} - V_{aktif} \quad (3.65)$$

$$V_{aktif} = V_{nuve} + V_{AG,s} + V_{YG,s} \quad (3.66)$$

burada  $V_{aktif}$  transformatörün aktif parçasının hacmidir.  $V_{nuve}$ ,  $V_{AG,s}$ , ve  $V_{YG,s}$  ise sırasıyla nüvenin, alçak gerilim sargıların ve yüksek gerilim sargıların hacmini ifade eder. Kullanılan yağın toplam ağırlığı ( $W_{yag}$ ) eşitlik (3.67)'de verilmiştir.

$$W_{yag} = V_{yag} \cdot \rho_{yag} \quad (3.67)$$

burada  $\rho_{yag}$  yağın yoğunluğudur.

## 3.5 Toplam Ağırlık Hesabı

Bir transformatörün toplam ağırlığının hesaplanması, yapımında kullanılan malzemelerin türü ve boyutu ile ek bileşenler dahil olmak üzere çeşitli

faktörlerin dikkate alınmasını gerektirir. Bir transformatörün toplam ağırlığını tahmin etmek için genel bir yaklaşım eşitlik (3.68)'da verilmiştir.

$$W_T = W_{kazan} + W_{nuve} + W_{AG,s} + W_{YG,s} + W_{yag} + W_{yalitim} + W_{diger} \quad (3.68)$$

burada  $W_{yalitim}$  kullanılan yalıtım malzemelerinin,  $W_{diger}$  ise buşingler, kontrol panosu ve tekerlik gibi bileşenlerin ağırlığıdır.

### 3.6 Maliyeti Hesabı

Transformatörün toplam üretim maliyeti ( $M_T$ ), kullanılan bileşenlerin ham madde ağırlık başına birim fiyatı ( $\frac{\$}{kg}$ ) ve bazı sabit maliyetlerden oluşur. Bir transformatörün toplam maliyet hesabı eşitlik (3.69)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} M_T = & (W_{nuve} \cdot F_{nuve}) + (W_{AG,s} \cdot F_{AG,s}) \\ & + (W_{YG,s} \cdot F_{YG,s}) + (W_{kazan} \cdot F_{kazan}) \\ & + (W_{yag} \cdot F_{yag}) + (W_{yalitim} \cdot F_{yalitim}) + F_{diger} \end{aligned} \quad (3.69)$$

burada  $W_{nuve}$ ,  $W_{AG,s}$ ,  $W_{YG,s}$ ,  $W_{kazan}$ ,  $W_{yag}$  ve  $W_{yalitim}$  sırasıyla nüve, alçak gerilim sargı, yüksek gerilim sargı, kazan, yağ ve yalıtım malzemelerinin toplam ağırlıklarını ifade eder.  $F_{nuve}$ ,  $F_{AG,s}$ ,  $F_{YG,s}$ ,  $F_{kazan}$ ,  $F_{yag}$  ve  $F_{yalitim}$  sırasıyla nüve, alçak gerilim sargı, yüksek gerilim sargı, kazan, yağ ve yalıtım malzemelerinin birim fiyatlarını ( $\frac{\$}{kg}$ ) ifade etmektedir.  $F_{diger}$  ise transformatör tasarımından bağımsız bileşenlerin fiyatıdır.

### 3.7 Tasarım Kısıtları

Transformatör tasarım optimizasyon problemi performans kısıtlamalarına, dielektrik kısıtlamalara, termal kısıtlamalara ve kayıp kısıtlamalarına tabidir. Bu kısıtlamalar uluslararası standartlarına göre aşağıda verilmiştir (IEC (2010), Tamilselvi et al. (2018)).

**Çevirme oranı kısıtlaması:** Primer faz geriliminin ( $U_1$ ) sekonder faz gerilimine ( $U_2$ ) oranı, primer sargının siper sayısının ( $N_1$ ) sekonder sargının siper sayısına ( $N_2$ ) oranına eşit olmalıdır.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.70)$$

**İndüklenen gerilim kısıtlaması:** Transformatörün primer ve sekonder sargılarındaki indüklenen gerilim ( $U_2$ ), maksimum akı yoğunluğu ( $B_m$ ) ve çekirdeğin etkin kesit alanı ( $A_{eff}$ ) denklemi (eşitlik 3.71) karşılmalıdır.

$$U_1 = 4,44 \cdot B_m \cdot A_{eff} \cdot f \cdot N_1 \quad (3.71)$$

$$A_{eff} = (CSF)A_c \quad (3.72)$$

burada  $f$  frekanstır,  $N_1$  primer sargının sipir sayısıdır,  $A_c$  çekirdeğin kesit alanıdır ve CSF çekirdek dizim faktörüdür (CSF=0.95, 0.96, ..., 0.99).

**Kısa devre empedansı kısıtlaması:** Transformatör empedans gerilimi ( $U_k$ ), garanti edilen minimum kısa devre empedansı ( $U_k^{\min}$ ) ile garanti edilen maksimum Kısa devre empedansı ( $U_k^{\max}$ ) arasında olmalıdır.  $U_k$  değerinin minimum değerden daha düşük olması, transformatör sargısına daha fazla baskı uygulanmasına; maksimum değerden daha yüksek olması ise bakır kayıplarının artmasına, sargı ve yağ sıcaklığının yükselmesine neden olur. Sonuç olarak her iki durumda da transformatörün verimliliği azalır. Bu nedenle, transformatör tasarım optimizasyonunda kısa devre empedansının garanti edilen bölgede olması çok önemlidir. Kısa devre empedansı için garanti edilen tolerans genellikle  $U_k$ 'nin  $\pm 10\%$ 'udur. Eko-tasarım transformatörler için ise kısa devre empedansı Tablo 1.1'de verilmiştir.

$$U_k^{\min} \leq U_k \leq U_k^{\max} \quad (3.73)$$

**Maksimum akı yoğunluğu kısıtlaması:** Maksimum akı yoğunluğu ( $B_m$ ), doyumluk akı yoğunluğundan ( $B_{sat}$ ) daha küçük olmalıdır.

$$B_m \leq B_{sat} \quad (3.74)$$

**Gerilim regülasyonu kısıtlaması:** Transformatörün gerilim regülasyonu ( $\Delta V$ ) maksimum gerilim regülasyonundan ( $\Delta V_{\max}$ ) daha küçük olmalıdır.

$$\Delta V < \Delta V_{\max} \quad (3.75)$$

**Boşta akım kısıtlaması:** Boşta akım, transformatörün sekonder sargısı açık devre olduğunda nominal primer akım değerinin bir yüzdesi olarak tanımlanır. Transformatör boşta akımının ( $i_o$ ) maksimum boşta akımdan ( $i_o^{\max}$ ) daha küçük olması gerekir.

$$i_o < i_o^{\max} \quad (3.76)$$

**Yalıtım kısıtlaması:** İndüklenmiş aşırı gerilim testi sırasında, katmanlar arasında nominal frekansın iki katı ve nominal gerilimin iki katı uygulanır ve katmanlar arası yalıtımın indüklenmiş gerilime dayanması gerekir. Endüklenen aşırı gerilim ( $Induced_{AG}$ ), yalıtımın dayanabileceği maksimum endüklenen gerilimden ( $Induced_{AG}^{max}$ ) daha küçük olmalıdır. Benzer şekilde YG sargısı için de aşağıdaki kısıtlamalar sağlanmalıdır.

$$\begin{aligned} Induced_{AG} &< Induced_{AG}^{max} \\ Induced_{YG} &< Induced_{YG}^{max} \end{aligned} \quad (3.77)$$

**Transformatör yağ sıcaklığı kısıtlaması:** Transformatör yağ sıcaklığı ( $\theta_{yag}$ ), izin verilen maksimum yağ sıcaklığından ( $\theta_{yag}^{max}$ ) küçük olmalıdır. IEC standartında belirlenen maksimum yağ sıcaklığı dağıtım transformatörleri için  $60\text{ }^{\circ}C$ 'dir.

$$\theta_{yag} < \theta_{yag}^{max} \quad (3.78)$$

**Transformatör sargı sıcaklığı kısıtlaması:** Transformatör sargı sıcaklığı ( $\theta_{sargi}$ ) izin verilen maksimum sargı sıcaklığından ( $\theta_{sargi}^{max}$ ) daha küçük olmalıdır. IEC standartında belirlenen maksimum yağ sıcaklığı dağıtım transformatörleri için  $65\text{ }^{\circ}C$ 'dir.

$$\theta_{sargi} < \theta_{sargi}^{max} \quad (3.79)$$

**Transformatörün boшта güç kaybı kısıtlaması:** Transformatör boшта güç kaybı ( $P_B$ ), izin verilen maksimum boшта güç kaybindan ( $P_B^{max}$ ) daha küçük olmalıdır. Eko-tasarım transformatörler için izin verilen maksimum boшта kayıplar Tablo 1.1'de verilmiştir.

$$P_B \leq P_B^{max} \quad (3.80)$$

**Transformatörün yükte güç kaybı kısıtlaması:** Transformatörün yükte güç kaybı ( $P_Y$ ), izin verilen maksimum yükte güç kaybindan ( $P_Y^{max}$ ) daha küçük olmalıdır. Eko-tasarım transformatörler için izin verilen maksimum yükte kayıplar Tablo 1.1'de verilmiştir.

$$P_Y \leq P_Y^{max} \quad (3.81)$$

**Transformatörün toplam güç kaybı kısıtlaması:** Transformatörün toplam güç kaybı ( $P_T$ ), izin verilen maksimum toplam güç kaybindan ( $P_T^{max}$ )

daha küçük olmalıdır.

$$\begin{aligned} P_T &\leq P_T^{\max} \\ (P_B + P_Y) &\leq (P_B^{\max} + P_Y^{\max}) \end{aligned} \quad (3.82)$$

**Tepe verimlilik kısıtlaması:** Transformatorün verimliliği ( $\eta$ ), Tablo 1.1'de verilen transformatorün minimum tepe verimliliğinden ( $\eta_{\min}$ ) büyük olmalıdır.

$$\eta > \eta_{\min} \quad (3.83)$$

**Üretim kısıtlamaları:** Yukarıda verilen kısıtlamalara ek olarak transformatorün yüksekliği, transformatorün genişliği, transformatorün toplam ağırlığı ve transformatorün toplam sahiplenme maliyeti müşterilerin talep kısıtlamalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca üreticinin, Tablo 3.1'de verilen üretimde kullandığı malzemelerin alt ve üst limit kısıtlamaları da bulunmaktadır.

## 4 MATERYAL VE YÖNTEMLER

Son yıllarda, optimizasyon problemlerini ele almak için deterministik ve stokastik algoritmalar da dahil olmak üzere birçok optimizasyon algoritmaları önerilmiştir. Deterministik algoritmalar bir çözüm buluna kadar olası tüm seçenekleri gözden geçirir. Bununla birlikte, bu algoritmalar birçok problemde iyi bir performansa sahiptir. Bu algoritmalar, daha büyük boyutta ve oldukça doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmede verimli değildir çünkü bu problemlerde, arama alanı problem değişkeni ile birlikte üstel olarak büyür (Kokash (2005)).

Modern problemler çok karmaşıktır ve büyük veri setlerinin analizi ile ilgilidir. Kesin bir algoritma geliştirilse bile, problemi çözme süresi kabul edilemez olabilir. Bu tür problemlerde amaç, tüm olası çözümlerin en uygununu, yani bir amaç fonksiyonunu en aza indiren (*minimizasyon*) veya en çoklayan çözümü (*maksimizasyon*) bulmaktır. Amaç fonksiyonu, üretilen çözümün kalitesini değerlendirmek için kullanılan bir fonksiyondur.

### 4.1 Sezgisel Algoritmalar

Doğadan ilham alan sezgisel algoritmalar, biyolojik veya fiziksel olayları taklit ederek optimizasyon problemlerini çözer. Bu algoritmalar üç ana kategoriye ayrılabilirler: evrim tabanlı, fizik tabanlı ve sürü tabanlı yöntemler (Mirjalili and Lewis (2016a)). Sezgisel optimizasyon algoritmaları genellikle mühendislik, yöneylem araştırması, bilgisayar bilimi ve yapay zeka gibi çeşitli alanlardaki problemlere uygulanır. Bu algoritmalar, geleneksel optimizasyon yöntemlerinin yüksek hesaplama gereksinimleri nedeniyle zorlanabileceği büyük, doğrusal olmayan veya yüksek boyutlu arama uzayına sahip problemlerin çözümünde kullanılır. Bu tez kapsamında, transformatör tasarım optimizasyonu için kullanılan tasarım değişkenleri ve her değişkenin alt ve üst limitleri Tablo (3.1)'de verilmiştir. Eşitlik (4.1)'de değişkenlere bağlı toplam tasarım olasılığı (arama uzayı) verilmiştir.

$$\prod_{i=1}^{21} P(x_i) = 1,321119 \times 10^{25} \quad (4.1)$$

## 4.2 Tek Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları

Tek amaçlı bir optimizasyon probleminin genel biçimi eşitlik 4.2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \min f_1(x_i), \quad & i = 1, 2, \dots, N \\
 h_j(x_i) \leq 0, \quad & j = 1, 2, \dots, J \\
 g_k(x_i) = 0, \quad & k = 1, 2, \dots, K \\
 x_i^{lb} \leq x_i \leq x_i^{ub}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

burada  $x_i$ , i-inci tasarım değişkeni,  $h_j$  j-inci eşitsizlik kısıtı,  $g_k$  k-inci eşitlik kısıtı  $x_i^{lb}$  ve  $x_i^{ub}$  ise i-inci tasarım değişkeninin alt ve üst sınırları,  $N$  optimizasyon probleminin değişken sayısı,  $J$  ve  $K$  ise sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarının sayısıdır.

### 4.2.1 Genetik algoritma (GA)

Genetik algoritma kavramı, Amerikalı bir bilim adamı ve Profesör olan John Holland tarafından tanıtıldı ve geliştirildi (Holland (1976)). Genetik algoritma, doğal seleksiyon sürecinden ilham alan hesaplamalı bir optimizasyon ve arama tekniğidir. Genetik algoritma, özellikle arama uzayının geniş olduğu ve optimum çözümü bulmak için doğrudan bir yöntemin olmadığı problemlerin çözümünde kullanışlıdır. GA algoritmasının çalışma aşamaları bunları içerir: **Başlangıç:** Algoritma, genellikle rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturarak başlar.

**Değerlendirme:** Popülasyondaki her birey bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir. Uygunluk fonksiyonu, problemi ne kadar iyi çözdüğüne bağlı olarak her bireye bir uygunluk puanı atar. Minimizasyon problemlerinde uygunluk puanının küçük olması çözümü iyileştirir.

**Seçim:** Seçim süreci, bir sonraki nesil için hangi bireylerin ebeveyn olarak seçileceğini belirler. Daha iyi bireylerin seçilme olasılığı daha yüksektir. Bu adım "en uygun olanın hayatta kalması" kavramından esinlenmiştir.

**Çaprazlama:** Seçilen çiftler (ebeveynler) çaprazlama noktalarında kombine edilerek yeni çocuk bireyler oluşturur. Bu süreç biyolojik rekombinasyon kavramına benzer.

**Mutasyon:** Popülasyon içerisinde rastgele seçilen bireyin genetik bilgilerinde

rastgele değişiklikler ile mutasyonlu bireyler oluşturulur. Mutasyon, çözüm uzayından farklı alanların keşfedilmesi ile popülasyona çeşitlilik katar.

**Değiştirme:** Sonlandırma koşulu karşılanana kadar, tüm popülasyon içerisindeki bireylerden başlangıçta belirlenen sayıda ki bireyler genlerini bir sonraki nesle aktarır. Tüm popülasyon içerisindeki bireylerden başlangıçta belirlenen sayıda birey genlerini bir sonraki nesle aktarır.

**Sonlandırma:** Algoritma, sonlandırma koşulu karşılandığında sonlanır. En iyi birey veya en iyi bireyler kümesi, problemin en uygun çözümünü/çözümlerini temsil eder. Sonlandırma koşulu maksimum nesil sayısı, belirli bir uygunluk sınırı veya bir zaman sınırı olabilir.

#### 4.2.2 Diferansiyel evrim (DE) algoritması

Diferansiyel Evrim (Differential Evolution - DE) algoritması, *Rainer Storn* ve *Kenneth Price* tarafından 1997'de geliştirilmiştir (Storn and Price (1997)). DE algoritması dört aşamadan oluşmaktadır.

**Başlangıç popülasyonu:** Optimizasyon probleminin arama alanında rastgele bireylerle bir popülasyon başlatılır. Her bir birey, problem değişkenlerini temsil eden gerçel sayı vektörü olarak ifade edilir.

$$x_{j,i}^{(0)} = x_i^{lb} + rand \cdot (x_i^{ub} - x_i^{lb}) \quad (4.3)$$

burada,  $x_i^{lb}$  ve  $x_i^{ub}$ , i-inci değişkenin alt ve üst limitleri ve  $rand$  ise 0 ve 1 arasında rastgele bir sayıdır.

**Mutasyon:** Populasyon içindeki her bireyin mutasyonu için üç farklı birey seçilir. Mutasyon adımı, temel vektör ve diğer iki vektör arasındaki ağırlıklı farkı kullanarak mutant vektör oluşturulur. i-inci birey için mutant vektör hesaplama formülü eşitlik (4.4)'te verilmiştir.

$$v_n^{g+1} = x_{r1,i}^g + F(x_{r2,i}^g + x_{r3,i}^g) \quad (4.4)$$

burada,  $v_n^{g+1}$  mutant vektörü,  $x_{r1,i}^g$ ,  $x_{r2,i}^g$  ve  $x_{r3,i}^g$  populasyon içinden seçilen sırasıyla temel vektör, farklı vektör 1 ve farklı vektör 2'yi ifade eder.  $F \in [0 - 2]$  ise mutasyon ölçek faktörüdür ve mutasyonun büyüklüğünü kontrol eder.

**Çaprazlama:** Mutant vektörü ve başlangıç popülasyon vektörü eşitlik (4.5)'te verilen çaprazlama operasyonu ile birleştirilir.

$$u_{n,i}^{g+1} = \begin{cases} v_{n,i}^{g+1} & \text{if } rand() \leq C_p \\ x_{n,i}^g & \text{if } rand() > C_p \end{cases} \quad (4.5)$$

burada,  $u_{n,i}^{g+1}$  ebeveyn ( $x_{n,i}^g$ ) ile rekabet edecek çocuğu ifade eder,  $v_{n,i}^{g+1}$  mutant vektördür,  $C_p$  çaprazlama oranıdır  $C_p \in [0 - 1]$ , ve  $rand()$  rastgele 0 ile 1 arasında seçilen bir sayıdır.

**Seçim:** Seçim aşaması, uygunluk değerlerine göre hangi aday çözümlerin hayatta kalacağını ve sonraki nesle geçeceğini belirler. Bu aşamanın amacı, optimizasyon probleminde daha iyi uygunluk gösteren çözümleri tercih ederek, ardışık nesiller boyunca popülasyonun kalitesini kademeli olarak iyileştirmektir. Bu aşama (4.6)'da belirlenmiştir.

$$x_{n,i}^{g+1} = \begin{cases} u_{n,i}^{g+1} & \text{if } F(u_{n,i}^{g+1}) \leq F(x_{n,i}^g) \\ x_{n,i}^g & \text{if } F(u_{n,i}^{g+1}) > F(x_{n,i}^g) \end{cases} \quad (4.6)$$

burada,  $F$  optimize edilecek amaç fonksiyonudur.

### 4.2.3 Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması

Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritması, literatörde iyi bilinen, bir popülasyon tabanlı sezgisel tekniktir. Bu algoritma, yiyecek hedefine ulaşmak için sürü içindeki kuşların sosyal davranışlarını simüle eder. Hem öz hem de sosyal deneyimin birleşimiyle, bir kuş sürüsü yiyecek hedeflerine yaklaşır. Kendi en iyi pozisyonlarına ve tüm sürünün en iyi pozisyonuna göre pozisyonlarını sürekli olarak güncellerler ve kendilerini yeniden gruplandırarak optimal bir oluşumla sonuçlanırlar. Kuşların bu sosyal-psikolojik davranışı, Russell Elberhart (elektrik mühendisi) ve James Kennedy'ye (sosyal psikolog) bu sosyal etkileşim ilkesini problem çözmeye uygulama konusunda ilham vermiştir (Kennedy and Eberhart (1995)). PSO algoritması, bir durdurma kriteri karşılanana kadar iterasyona devam eder. İterasyonlar boyunca parçacıklar, kendi en iyi konumları ve sürü tarafından bulunan global en iyi konum tarafından yönlendirilen arama uzayında daha iyi çözümlere doğru yakınsama eğilimindedir.

PSO algoritmasında sürüdeki parçacıkların her birinin hızı (4.7) ve konumu

(4.8) aşağıdaki denklemlere göre değişir:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (Pbest_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (Gbest_i^t - x_i^t) \quad (4.7)$$

Burada  $v_i^{t+1}$ ,  $i$  parçacığının  $(t + 1)$ -inci iterasyondaki hızıdır;  $\omega = [0, 1 - 1]$ , bir parçacığın atalet ağırlık katsayısı olarak adlandırılır;  $x_i^t$ ,  $i$  parçacığının  $t$ -inci iterasyondaki pozisyonudur;  $Pbest_i^t$ ,  $i$  parçacığının  $t$ -inci iterasyondaki bireysel en iyi pozisyonudur;  $Gbest_i^t$  herhangi bir parçacığın  $t$ -inci iterasyondaki global en iyi pozisyonudur;  $c_1$  ve  $c_2$ , global ve bireysel en iyi konumların parçacığın hızını ne kadar etkilemesi gerektiğini kontrol eden gerçek ivme katsayılarıdır;  $r_1$  ve  $r_2$  ise 0 ve 1 aralığında rastgele sayılardır.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (4.8)$$

burada  $x_i^{t+1}$ ,  $i$  parçacığının  $(i + 1)$ -inci iterasyondaki konumudur;  $v_i^{t+1}$ ,  $i$  parçacığının  $(t + 1)$ -inci iterasyondaki hızıdır ve  $x_i^t$ ,  $i$  parçacığının  $t$ -inci iterasyondaki konumudur

#### 4.2.4 Gri kurt optimizasyon (GWO) algoritması

Gri kurt optimizasyon (GWO) algoritması, doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisini ve avlanma mekanizmasını simüle eden, popülasyon tabanlı bir sezgisel algoritmadır. Gri kurt sürüsünde ortalama 5-12 kurt vardır. Her kurt belli bir statüye ve tanımlanmış görevlere tabidir. Gri kurtların hiyerarşisinin en üstünde alfa ( $\alpha$ ) kurtlar adı verilen liderler bulunur. Alfalardan sonra, karar verme ve avlanma sürecinde alfalara yardımcı olan beta ( $\beta$ ) kurtlar vardır. Omega ( $\omega$ ) kurtlar, gri kurt hiyerarşisinin en altında yer alır. Geriye kalan kurtlara delta ( $\delta$ ) adı verilir. Delta gri kurtlar genellikle izciler, nöbetçiler, yaşlılar, avcılar ve sürünün bekçilerinden oluşur (Mirjalili et al. (2014)).

GWO algoritmasında alfa, beta ve delta gri kurtları sırasıyla problemin en iyi birinci, ikinci ve üçüncü çözümlerini temsil etmektedir. Diğer çözümler omega kurtlarla temsil edilmektedir. Gri kurt sürüsünün çevrelemesi ve avlanma süreci eşitlik 4.9 ve 4.15 arasında verilmiştir.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (4.9)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.10)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4.11)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|, \\ \vec{D}_\beta &= \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X} \right|, \\ \vec{D}_\delta &= \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X} \right| \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (4.15)$$

burada  $t$  mevcut iterasyonu,  $\vec{A}$ ,  $\vec{C}$  ve  $\vec{D}$  katsayı vektörlerini,  $\vec{X}(t+1)$  gri kurtların yeni konum vektörlerini,  $\vec{X}$  gri kurtların konum vektörlerini,  $\vec{a}$  iterasyona bağlı olarak 2'den 0'a doğrusal azalan değeri,  $\vec{X}_p$  avın konum vektörlerini,  $\vec{r}_1$  ve  $\vec{r}_2$  ise  $[0, 1]$  aralığında rastgele sayı vektörlerini göstermektedir. Her gri kurdun yeni konum vektörü, gri kurdun mevcut konum vektörü, alfa, beta ve delta gri kurtlarının konum vektörlerinin bir fonksiyonudur.

### 4.3 Çok Amaçlı Optimizasyon Algoritmaları

Çok amaçlı bir optimizasyonun probleminin genel biçimi eşitlik (4.16)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \min F(f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_M(x_i)) \quad & i = 1, 2, \dots, N \\ h_j(x_i) \leq 0, \quad & j = 1, 2, \dots, J \\ g_k(x_i) = 0, \quad & k = 1, 2, \dots, K \\ x_i^{lb} \leq x_i \leq x_i^{ub} \end{aligned} \quad (4.16)$$

burada  $x_i$ , i-inci tasarım değişkeni,  $h_j$  j-inci eşitsizlik kısıtı,  $g_k$  k-inci eşitlik kısıtı  $x_i^{lb}$  ve  $x_i^{ub}$  ise i-inci tasarım değişkeninin alt ve üst sınırları,  $M$  optimize edilecek toplam amaç sayısı,  $N$  optimizasyon probleminin değişken sayısı,  $J$  ve  $K$  ise sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarının sayısıdır.

#### 4.3.1 Domine olmayan sıralama genetik algoritma III (NSGA III)

NSGA-III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III), çok amaçlı (multi-objective) optimizasyon problemlerini çözmek için genetik algoritma

tabanlı bir sezgisel algoritmadır. NSGA-III, bir optimizasyon probleminde birden fazla çatışan amaç fonksiyonunu aynı anda optimize etmek için kullanılır. Bu algoritma, özellikle çok sayıda amaç fonksiyonunun olduğu problemleri ele almak için geliştirilmiştir ve NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (Deb et al. (2002))) adlı önceki bir algoritmanın bazı sınırlamalarını gidermek amacıyla tasarlanmıştır (Deb and Jain (2013)).

**Başlangıç:** Başlangıç popülasyonu sınır değerler içerisinde rastgele oluşturulur.

**Değerlendirme:** Popülasyon içindeki her çözüm, problemin birden fazla amaç fonksiyonuna dayalı olarak değerlendirilir. Bu amaç fonksiyonları, farklı performans ölçütlerini temsil edebilir.

**Domine olmayan Sıralama (Non-dominated Sorting):** Popülasyondaki çözümler, domine olan ve olmayan olarak sınıflandırılır. Bir çözüm, diğer çözümden tüm amaçlarda daha iyi (küçük veya eşit) veya en az bir amaçta kesin olarak daha iyi olduğunda (küçük) bu çözümün diğerini domine ettiği söylenir ve iyi olan çözüm, domine olmayan sınıfına dahil edilir. Bu sınıflandırma her iterasyonda yapılır.  $M$  amaçlı optimizasyon probleminin dominasyon şartı (4.17)'de verilmiştir (Liu et al. (2019)).

$$\begin{cases} \forall i \in \{1, 2, \dots, M\}, & f_i(x_A) \leq f_i(x_B) \\ \exists i \in \{1, 2, \dots, M\}, & f_j(x_A) < f_j(x_B) \end{cases} \quad (4.17)$$

burada  $f_i(x_A)$  ve  $f_i(x_B)$ ,  $x_A$  ve  $x_B$  deki çözümlerin  $i$ -inci amaç uygunluk değerleridir.  $f_j(x_A)$  ve  $f_j(x_B)$ ,  $x_A$  ve  $x_B$  deki çözümlerin  $j$ -inci amaç uygunluk değerleridir. Eşitlik (4.17)'de verilen koşullardan birinin sağlanması ile  $x_A$ ,  $x_B$  yi domine eder ( $x_A \prec x_B$ ).

**Çeşitlilik Koruma (Diversity Maintenance):** NSGA-III, çözümler arasındaki çeşitliliği korumak için amaç uzayında referans noktalara dayalı özgün bir yöntem kullanır. Referans noktaları ( $H$ ), amaç uzayında ideal bir noktayı temsil eden vektörlerdir ve çözümleri bu referans noktalarına olan mesafelerine göre karşılaştırır.

$$H = \begin{pmatrix} M + p - 1 \\ p \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

burada  $M$  problemdeki amaç sayısı ve  $p$  her amaç için belirlenen bölüm sayısıdır.

**Çevresel Seçim (Environmental Selection):** Dominasyon sıralaması ve çeşitlilik koruma sonrasında NSGA-III, bir sonraki nesil için çaprazlama ve mutasyon yöntemlerini kullanarak yeni bir popülasyon oluşturur. Bu popülasyon, çözümlerden referans noktalarına yakın olanları tercih ederken aynı zamanda da çeşitliliği korumaya çalışır.

**Sonlandırma (Termination):** Algoritma, sonlandırma koşuluna ulaşılan kadar non-dominated sıralama, çeşitlilik koruma ve çevresel seçim adımlarını tekrarlayarak yeni nesiller oluşturmaya devam eder. Sonlandırma koşulu genellikle bir maksimum nesil sayısı, maksimum iterasyon veya problem özelinde belirlenen diğer kriterlere dayanabilir.

#### 4.3.2 Ayrıştırma tabanlı çok amaçlı evrimsel optimizasyon (MOEA/D)

MOEA/D (Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition) Qingfu Zhang ve Hui Li tarafından geliştirilen çok amaçlı bir optimizasyon algoritmasıdır (Zhang and Li (2007)). MOEA/D'nin çalışma prensibi, çok amaçlı optimizasyon probleminin her biri ayrı ayrı optimize edilen bir alt probleme ayrıştırılmasını içerir. Ayrıştırılma yaklaşımları *Weighted Sum Yaklaşımı*, *Tchebycheff Yaklaşımı* ve *Boundry Intersection Yaklaşımı* kullanılabilir. Bu tez kapsamında *Tchebycheff Yaklaşımı* kullanılmıştır. Bu yaklaşımda *Tchebycheff* fonksiyonu kullanılarak, çok amaçlı problem tek amaçlı bir probleme dönüşür.

$$\min F^{te}(x) = \max_{1 \leq i \leq M} \{\lambda_i |f_i(x) - z_i^*|\} \quad (4.19)$$

burada  $z_i^* = (z_1^*, \dots, z_M^*)$  referans noktasıdır. MOEA/D algoritmasının çalışma aşamaları aşağıda verilmiştir.

**Başlangıç:** Başlangıç popülasyonu, ağırlık vektörü ( $\lambda$ ) ve referans noktalar vektörü ( $z_i^*$ ) oluşturulur.

**Ayrıştırma:** *Tchebycheff Yaklaşımı* kullanılarak çok amaçlı problemi tek amaçlı probleme dönüştürmek.

**Evrimsel İşlem:** Her bir alt problemi popülasyondan bağımsız olarak optimize etmek için bir evrimsel algoritmanın seçim, çaprazlama, mutasyon ve

değiştirme işlemlerini uygulama.

**Komşuluk Seçimi (Neighborhood Selection):** Çözümlerin komşu alt problemler arasında geçişine izin vermek için alt problemler arasında bir komşuluk ilişkisi tanımlanır.

**Güncelleme:** Hem mevcut popülasyonu hem de komşu alt problemlerden gelen en iyi çözümleri dikkate alarak popülasyondaki çözümleri periyodik olarak güncellenir.

**Sonlandırma:** Bir sonlandırma koşulu (maksimum iterasyon sayısı veya yakınsama değeri) karşılanana kadar optimizasyona daki boyunca yinelemeye devam edilir.

### 4.3.3 Çok amaçlı gri kurt optimizasyon algoritması (MOGWO)

Tek amaçlı gri kurt algoritması 2014'de (Mirjalili et al. (2014)) ve çok amaçlı gri kurt algoritması 2016'da aynı yazarlar tarafından oluşturuldu (Mirjalili et al. (2016)). MOGWO algoritması, GWO'nun tüm özelliklerini taşımaktadır, bu da arama bireylerin arama uzayını aynı şekilde aradığı ve kullandığı anlamına gelmektedir. Temel fark, MOGWO'nun bir dizi arşiv üyesi etrafında arama yapmasıdır, GWO ise yalnızca en iyi üç çözümü kaydeder ve geliştirir.

Gri kurt optimizasyon algoritması, doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisini ve avlanma mekanizmasını simüle eden, popülasyon tabanlı bir sezgisel algoritmadır. Gri kurt sürüsünde ortalama 5-12 kurt vardır. Her kurt belli bir statüye ve tanımlanmış görevlere tabidir. Gri kurtların hiyerarşisinin en üstünde alfa ( $\alpha$ ) kurtlar adı verilen liderler bulunur. Alfalardan sonra, karar verme ve avlanma sürecinde alfalara yardımcı olan beta ( $\beta$ ) kurtlar vardır. Omega ( $\omega$ ) kurtlar, gri kurt hiyerarşisinin en altında yer alır. Geriye kalan kurtlara delta ( $\delta$ ) adı verilir. Delta gri kurtlar genellikle izciler, nöbetçiler, yaşlılar, avcılar ve sürünün bekçilerinden oluşur (Mirjalili et al. (2014)).

GWO algoritmasında alfa, beta ve delta gri kurtları sırasıyla problemin en iyi birinci, ikinci ve üçüncü çözümlerini temsil etmektedir. Diğer çözümler omega kurtlarla temsil edilmektedir. Gri kurt sürüsünün çevrelemesi ve avlanma süreci eşitlik 4.20 ve 4.26 arasında verilmiştir.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (4.20)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.21)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4.22)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|, \\ \vec{D}_\beta &= \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X} \right|, \\ \vec{D}_\delta &= \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X} \right| \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (4.26)$$

burada  $t$  mevcut iterasyonu,  $\vec{A}$ ,  $\vec{C}$  ve  $\vec{D}$  katsayı vektörlerini,  $\vec{X}(t+1)$  gri kurtların yeni konum vektörlerini,  $\vec{X}$  gri kurtların konum vektörlerini,  $\vec{a}$  iterasyona bağlı olarak 2'den 0'a doğrusal azalan değeri,  $\vec{X}_p$  avın konum vektörlerini,  $\vec{r}_1$  ve  $\vec{r}_2$  ise  $[0, 1]$  aralığında rastgele sayı vektörlerini göstermektedir. Her gri kurdun yeni konum vektörü, gri kurdun mevcut konum vektörü, alfa, beta ve delta gri kurtlarının konum vektörlerinin bir fonksiyonudur.

GWO ile çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirmek için iki yeni bileşen entegre edilmiştir.

1. Domine edilmemiş çözümleri saklamak için GWO algoritmasına bir arşiv entegre edilmiştir.
2. Arşivdeki çözümleri güncellemek ve değiştirmek için alfa, beta ve delta kurtlarına dayalı bir lider seçim mekanizması önerilmiştir

#### 4.3.4 Çok amaçlı balina optimizasyon algoritması (MOWOA)

Kambur balinalar dünyanın en büyük memelilerinden biridir. Whale Optimization Algorithm (WOA) 2016'da Mirjalili tarafından kambur balinaların özel avlanma davranışlarından esinlenilmiştir (Mirjalili and Lewis (2016b)). Bu avlanma süreci kabarcık ağı besleme (Bubble Net Feeding) yöntemi olarak da bilinir. Bu avlanma yönteminde bir grup balina yaklaşık 12m-15m aşağıya dalar ve ardından avın etrafında spiral şeklinde baloncuklar oluşturarak yüzeye doğru yüzer. Bu algoritmanın çok amaçlı versiyonu ise domine olmayan

sıralamalı (Non-dominated Sorting) yöntemi kullanılarak 2017’de türetilmiştir (Jangir and Jangir (2017)). Çok amaçlı balinalar optimizasyon algoritması (MOWOA) aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

**Avın etrafını sarma (Encircling prey):** Bu teknikte arama uzayının konumu önceden bilinmemektedir, WOA mevcut konumun en iyi çözüm olduğunu varsayar ve daha sonra konumunu günceller. Bu aşama denklem (4.27) ve (4.28)’de verilmiştir.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (4.27)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.28)$$

burada  $t$  mevcut iterasyon,  $\vec{X}(t)$  t-inci iterasyondaki konum,  $\vec{X}^*(t)$  t-inci iterasyona kadar bulunan en iyi konumdur.  $\vec{A}$  ve  $\vec{C}$  ise eşitlik (4.29) ve (4.30)’da verilmiştir.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (4.29)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (4.30)$$

burada  $\vec{r}$ , 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı ve  $\vec{a}$  iterasyona bağlı olarak 2’den 0’a doğrusal azan değerdir.

**Ava doğru hareket etmek (Bubble-net attacking)** Balinaların ava doğru hareket ve saldırımları, denklem (4.31)’de verildiği gibi, spiral hareket veya avın etrafındaki çemberi doğrusal olarak daraltmaktır.

$$X(t+1) = \begin{cases} \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \\ \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \end{cases} \quad (4.31)$$

$$\vec{D}' = \left| \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (4.32)$$

burada  $b$  spiral şeklini belirleyen sabit bir sayı,  $l$  değeri  $[-1,1]$  arasında rastgele bir sayı,  $p$  0 ile 1 arasında rastgele bir sayı,  $\vec{D}'$  ise i-inci balinanın avdan mesafesini ifade etmektedir. Eğer  $p$  sayısı 0.5’e eşit veya büyük ise balina spiral hareket yapmaktadır, değilse avın etrafındaki çemberi doğrusal olarak daraltacaktır.

**Av aramak (Search for prey)** Bu aşamada, balinaların yeni konumu, balinaların mevcut konumu ve arama uzayında üretilen rastgele konum vektörü, eşitlik (4.33) ve (4.34) kullanılarak bulunur.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_r - \vec{X} \right| \quad (4.33)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_r - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.34)$$

burada  $\vec{X}_r$  mevcut iterasyonda rastgele üretilen balinaların konum vektörüdür.

Çok amaçlı problemleri çözmek için domine olmayan çözümler bir arşiv denetleyicisi tarafından belirlenir ve elde edilen en iyi çözümler bir arşiv deposunda saklanır.



## 5 OPTİMİZASYON SONUÇLARI

Elektrik transformatörlerinin tasarlanmasında kullanılan optimizasyonun amacı genellikle belirli gereksinimleri ve standartları sağlayarak en iyi performansı, verimliliği ve minimum maliyeti elde etmektir. Transformatörlerin tasarım optimizasyonunda bazı yaygın amaçlar aşağıda verilmiştir.

- $f_1$ : Transformatörün toplam üretim maliyeti.
- $f_2$ : Transformatörün toplam güç kaybı.
- $f_3$ : Transformatörün toplam ağırlığı.

Bu tez kapsamında hermetik yağlı tip dağıtım transformatörün tasarımı, tek amaçlı ve çok amaçlı sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan optimizasyon programı, tasarımda kullanılan ve transformatörün performansına etkisi olan tüm değişkenleri içerirken çeşitli güç ve gerilim seviyelerindeki dağıtım transformatörlerini optimum bir şekilde tasarlama özelliğine sahiptir.

Önerilen tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon algoritmaları, altı senaryo kapsamında çalıştırılmıştır. Senaryo 1, 2 ve 3 tek amaçlı algoritmalar kullanılarak belirlenen amaç fonksiyonlarını müşteri şartnamesi ve ulusal/uluslararası standartları dikkate alarak optimize etmektedir. Senaryo 4, 5 ve 6 ise çok amaçlı optimizasyon algoritmaları kullanarak belirlenen amaç fonksiyonlarını ikişer ikişer optimize etmektedir. Bu senaryolar Tablo (5.1)'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Optimizasyon senaryoları

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4	Senaryo 5	Senaryo 6
$\min(f_1)$	✓			✓	✓	
$\min(f_2)$		✓		✓		✓
$\min(f_3)$			✓		✓	✓

Tablo (5.2)'de verilen özelliklere sahip bir transformatörün tasarım optimizasyonu örnek olarak yapıлып ve elde edilen sonuçlar daha önce klasik yöntem kullanılarak tasarlanmış referans bir transformatör ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.2: Transformatörün özellikleri

Güç ( $S_r$ )	3150 kVA
Primer Gerilim ( $U_{YG}$ )	21 kV
Sekonder Gerilim ( $U_{AG}$ )	0,8 kV
Bağlantı Şekli	$\Delta yn11$
Frekans ( $f$ )	50 Hz
Kademe Değiştirici	off-load $2 \times \pm\%2,38$
Soğutma Sistemi	ONAN
Kısa Devre Empedansı ( $U_k$ )	$6 \pm \%10$
AG Sargı Malzemesi	Alüminyum Levha
YG Sargı Malzemesi	Alüminyum Yassı Tel
$P_B^{\max}$	1980 watt
$P_Y^{\max}$	23000 watt
$P_T^{\max}$	24980 watt
$\eta_{\min}$	$\%99,518$
$P_T^{\max}$	24980 watt
$\theta_{sargi}^{\max}$	$65 \text{ }^\circ\text{C}$
$\theta_{yag}^{\max}$	$60 \text{ }^\circ\text{C}$

## 5.1 Tek Amaçlı Optimizasyon

Tez kapsamında, literatürde benzer problemlerin çözümünde kullanılan birçok farklı sezgisel algoritma transformatör tasarım probleminin çözümünde kullanıldıktan sonra, yakınsama süresi, tüm kısıtların sağlanması ve klasik yöntem sonuçları ile kıyaslama kriterlerine göre en iyi performans gösteren DE, PSO, GWO ve GA algoritmaları seçilmiştir. Bölüm (4.1)'de seçilen algoritmaların açıklaması verilmiştir. Bu algoritmalar aşağıda belirtilen üç senaryo üzerinde değerlendirilmiştir. Her senaryo için, farklı popülasyon ve iterasyon parametreleri belirlenerek dokuz durum oluşturulmuştur. Her durum için bir algoritma 20 kez çalıştırılmış ve toplamda 2160 deneme yapılmıştır. Önerilen algoritmalar ile elde edilen sonuçlar, klasik yöntem sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tek amaçlı optimizasyon için belirlenen durumlar Tablo (5.3)'te verilmiştir. Tek amaçlı optimizasyon için önerilen algoritmalar elde edilen sonuçların özeti Tablo (5.4)'te verilmiştir.

Tablo 5.3: Tek amaçlı optimizasyon durumları

Durum No.	İterasyon	Popülasyon
Durum 1	500	200
Durum 2	500	400
Durum 3	500	500
Durum 4	700	200
Durum 5	700	400
Durum 6	700	500
Durum 7	1000	200
Durum 8	1000	400
Durum 9	1000	500

**Senaryo 1:** Toplam maliyet minimizasyonu.  $\min(f_1)$

**Senaryo 2:** Toplam güç kaybı minimizasyonu.  $\min(f_2)$

**Senaryo 3:** Toplam ağırlık minimizasyonu.  $\min(f_3)$

Tablo 5.4: Tek amaçlı optimizasyon özeti

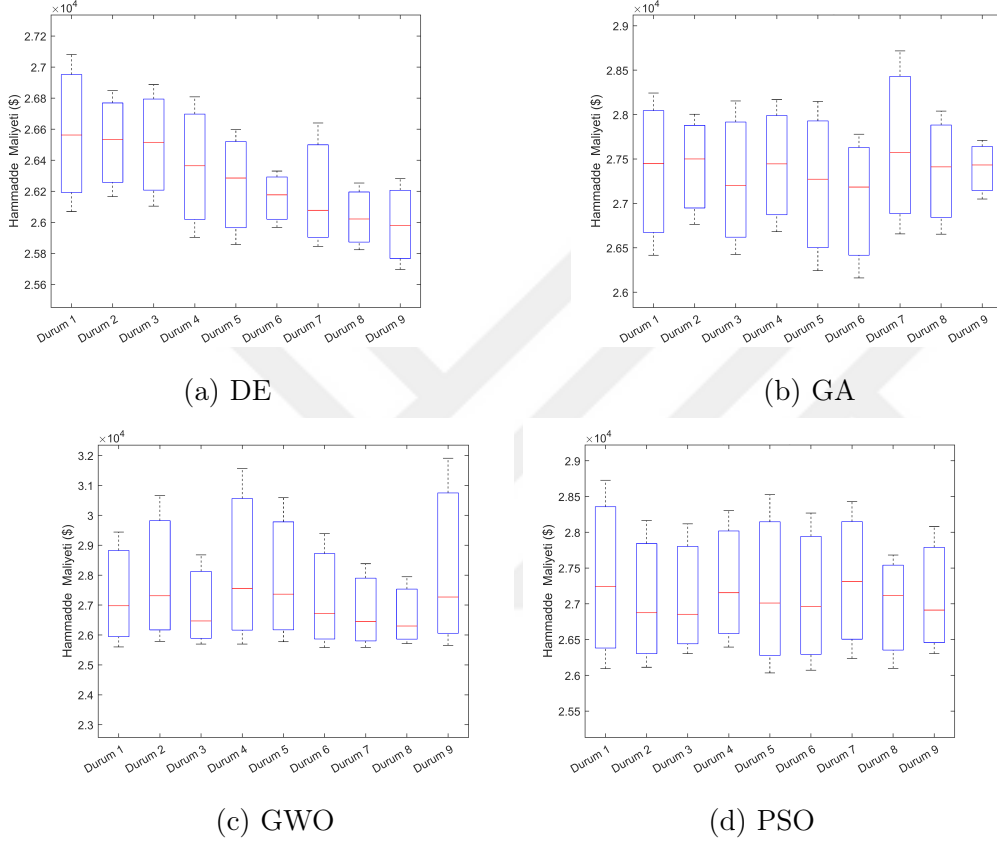
Senaryo No.	Birim	DE	PSO	GWO	GA	Klasik Yöntem	
Senaryo 1	$f_1$	\$	25659	26034	<b>25541</b>	26161	26800
	$f_2$	watt	24976	24908,3	24866,9	24930	24495
	$f_3$	kg	6000,9	6048,6	6011,7	6046,1	6136
Senaryo 2	$f_1$	\$	28323	28314	28346	28328	26420
	$f_2$	watt	21797,4	21763,4	<b>21727</b>	22121,1	22335
	$f_3$	kg	6348,4	6393,3	6332,5	6422,2	6716
Senaryo 3	$f_1$	\$	26076	26267	25744	26928	26420
	$f_2$	watt	24912,2	24958,6	23908,5	23563,9	24587
	$f_3$	kg	5987,5	5988,4	<b>5881,7</b>	6118,8	6108

Bölüm 5.1.1, 5.1.2 ve 5.1.3'te, yukarıda belirtilen senaryolar için önerilen algoritmalar ile elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

### 5.1.1 Senaryo 1

Senaryo 1'de eşitlik (3.69)'da verilen transformatörün toplam ham madde maliyeti minimize edilmiştir. Toplam maliyet optimizasyonunda bölüm 3.7'de verilen tüm ulusal/uluslararası kısıtlar ve Tablo (3.1)'de verilen malzeme kısıtları dikkate alınmıştır. Her algoritma Tablo (5.3)'te verilen durumlar

kapsamında 20 kez çalıştırılmıştır. Senaryo 1'in her duruma ait sonuçları Şekil (5.1)'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Toplam maliyet optimizasyonu (Senaryo 1)

Algoritmalar ile farklı durumlar için yapılan denemeler sonucunda elde edilen en düşük maliyetler; DE, GA, GWO ve PSO algoritmaları için sırasıyla Durum 9, 6, 6 ve 5'tir. Tablo (5.5)'te, algoritmaların en iyi sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5.5: Senaryo 1

	Birim	Garanti Değerleri	DE	PSO	<b>GWO</b>	GA	Klasik Yöntem
Durum No.			9	5	6	6	
Toplam maliyet ( $f_1$ )	\$		25659	26034	<b>25541</b>	26161	26800
Toplam kayıplar ( $f_2$ )	watt	24980	24976	24908,3	24866,9	24930	24495
Toplam ağırlık ( $f_3$ )	kg		6000,9	6048,6	6011,7	6046,1	6136
DC Kayıp (AG)	watt		10020,9	9398,56	9656,38	8834,77	10908
DC Kayıp (YG)	watt		11282,26	11435,33	11511,63	12325,28	9765
Eddy kayıp (AG)	watt		110,35	8,05	133,19	149,42	73
Eddy kayıp (YG)	watt		363,3	868,59	370,33	419,72	553
Stray kayıp (AG)	watt		1130,8	1130,8	1130,8	1130,8	1131
Stray kayıp (YG)	watt		89,595	89,595	89,595	89,595	90
Yükte kayıplar	watt	23000	22997	22931	22892	22950	22520
Boşta kayıplar	watt	1980	1979	1977,3	1974,9	1980	1975
$U_k$	%	5,4 - 6,6	6,3705	6,463	6,4812	6,317	6,42
Nüve ağırlığı	kg		2385,5	2481,5	2352,8	2522,9	2574
Aktif kısmın ağırlığı	kg		3539,3	3643,3	3499,2	3688,4	3829
Tank ağırlığı	kg		1282	1209,2	1322,6	1164,6	1118,01
Yağ ağırlığı	kg		1115,6	1132,1	1125,9	1129,1	1125
Tekerlikler	kg		64	64	64	64	64
Yağ sıcaklığı	$^{\circ}C$	60	52,02	53,634	51,103	55,195	55,14
Sargı sıcaklığı	$^{\circ}C$	65	60,544	60,901	60,917	60,906	59,93

Senaryo 1 için Tablo (5.5)'te verilen sonuçlara göre, klasik yöntemden Diferansiyel Evrim (DE) algoritması %4,25, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması %2,85, Gri Kurt Optimizasyon (GWO) algoritması %4,70 ve Genetik Algoritma (GA) %2,38 düşük maliyetli sonuç elde etmiştir.

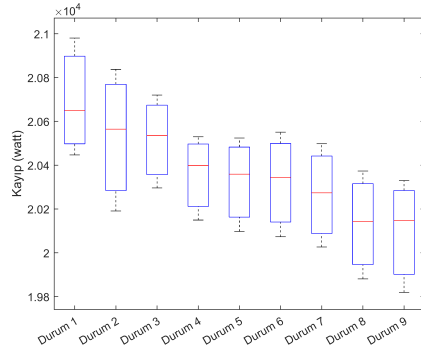
Tablo (5.5)'te elde edilen tasarım sonuçlarına ait değişkenlerin değeri Tablo (5.6)'da verilmiştir.

Tablo 5.6: Senaryo 1 için değişken değerleri

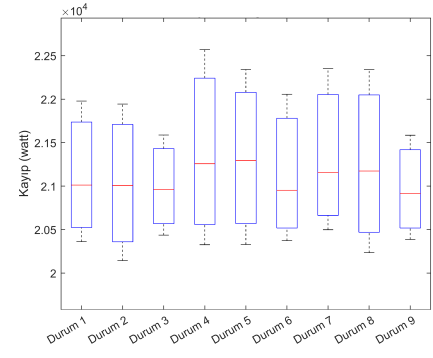
	$x_i^{lb}$	$x_i^{ub}$	Adım Aralığı	DE	PSO	GWO	GA	Klasik Yöntem
$x_1$	275	1000	1	657	661	651	707	660
$x_2$	300	1000	10	830	830	830	820	840
$x_3$	0,5	5	0,1	1,5	1,4	1,8	1,8	1,7
$x_4$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_5$	8	25	1	20	20	20	19	20
$x_6$	0	5	1	2	2	1	1	1
$x_7$	0	2	1	0	0	1	1	1
$x_8$	2	16	0,1	16	12	14,5	13,3	14,8
$x_9$	1,8	4	0,1	2,5	3,5	2,6	2,8	2,4
$x_{10}$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_{11}$	0	4	1	1	1	1	1	1
$x_{12}$	1,3	1,95	0,01	1,95	1,63	1,92	1,9	1,77
$x_{13}$	M3-M4-M5		1	M3	M3	M3	M3	M3
$x_{14}$	300	600	3	300	300	363	300	300
$x_{15}$	40	70	1	42	40	40	46	40
$x_{16}$	1	2	1	2	2	2	2	2
$x_{17}$	1	5	1	2	2	2	2	2
$x_{18}$	400	1400	100	1200	1400	1400	1200	1250
$x_{19}$	50	400	10	320	210	220	280	250
$x_{20}$	50	400	10	160	210	200	240	250
$x_{21}$	0	2	1	0	0	0	0	0
Toplam maliyet ( $f_1$ )			\$	25659	26034	<b>25541</b>	26161	26800

### 5.1.2 Senaryo 2

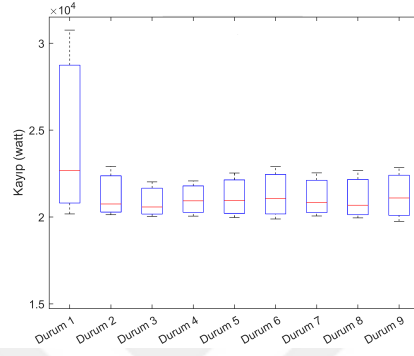
Senaryo 2’de eşitlik (3.48)’de verilen transformatörün toplam güç kaybı minimize edilmiştir. Toplam güç kaybı optimizasyonunda bölüm 3.7’de verilen tüm ulusal/uluslararası kısıtlar ve Tablo (3.1)’de verilen malzeme kısıtları dikkate alınmıştır. Her algoritma Tablo (5.3)’te verilen durumlar kapsamında 20 kez çalıştırılmıştır. Senaryo 2’nin her duruma ait sonuçları Şekil (5.2)’de verilmiştir.



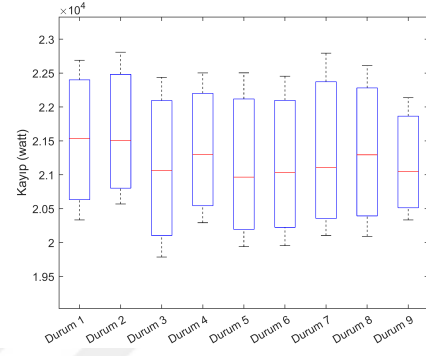
(a) DE



(b) GA



(c) GWO



(d) PSO

Şekil 5.2: Toplam kayıp optimizasyonu (Senaryo 2)

Algoritmalar ile farklı durumlar için yapılan denemeler sonucunda elde edilen en düşük maliyetler; DE, GA, GWO ve PSO algoritmaları için sırasıyla Durum 9, 3, 9 ve 2'dir. Tablo (5.7)'de, algoritmaların en iyi sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5.7: Senaryo 2

	Birim	Garanti Değerleri	DE	PSO	<b>GWO</b>	GA	Klasik Yöntem
Durum No.			9	3	9	2	
Toplam maliyet ( $f_1$ )	\$		28323	28314	28346	28328	29472
Toplam kayıplar ( $f_2$ )	watt	24980	21797,4	21763,4	<b>21727</b>	22121,1	22335
Toplam ağırlık ( $f_3$ )	kg		6348,4	6393,3	6332,5	6422,2	6716
DC Kayıp (AG)	watt		8634,39	8664,26	7984,67	8315,08	8268
DC Kayıp (YG)	watt		9196,5	9279,09	9772,15	9642,5	10135
Eddy kayıp (AG)	watt		161,49	10,111	216,73	187,91	170
Eddy kayıp (YG)	watt		606,59	611,44	553,99	777,4	628
Stray kayıp (AG)	watt		1130,8	1130,8	1130,8	1130,8	1131
Stray kayıp (YG)	watt		89,595	89,595	89,595	89,595	90
Yükte kayıplar	watt	23000	19819	19785	19748	20143	20422
Boşta kayıplar	watt	1980	1978,4	1978,4	1979	1978,1	1913
$U_k$	%	5,4 - 6,6	6,3924	6,4177	6,5642	6,4078	6,35
Nüve ağırlığı	kg		2782,6	2782,6	2799,2	2774,3	2865
Aktif kısmın ağırlığı	kg		4139,6	4113,2	4216,9	4098,3	4279
Tank ağırlığı	kg		1062,1	1108,3	949,46	1130,7	1150
Yağ ağırlığı	kg		1082,7	1107,8	1102,2	1129,1	1122
Tekerlikler	kg		64	64	64	64	64
Yağ sıcaklığı	$^{\circ}C$	60	55,318	54,39	55,765	52,893	51,12
Sargı sıcaklığı	$^{\circ}C$	65	60,829	60,507	60,283	58,95	56,02

Senaryo 2 için Tablo (5.7)'de verilen sonuçlara göre, klasik yöntemden Diferansiyel Evrim (DE) algoritması %2,41, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması %2,56, Gri Kurt Optimizasyon (GWO) algoritması %2,72 ve Genetik Algoritma (GA) %0,96 düşük güç kaybı sonuç elde etmiştir.

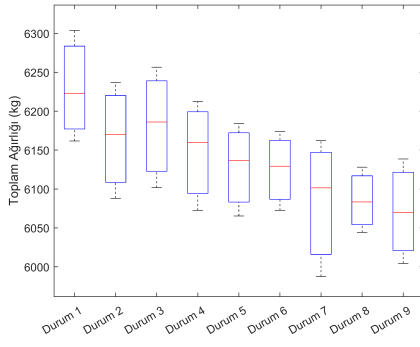
Tablo (5.7)'de elde edilen tasarım sonuçlarına ait değişkenlerin değeri Tablo (5.8)'de verilmiştir.

Tablo 5.8: Senaryo 2 için değişken değerleri

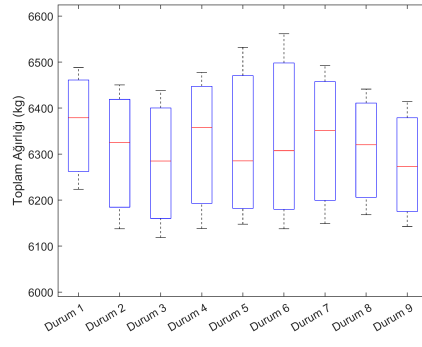
	$x_i^{lb}$	$x_i^{ub}$	Adım Aralığı	DE	PSO	GWO	GA	Klasik Yöntem
$x_1$	275	1000	1	724	724	726	723	700
$x_2$	300	1000	10	830	810	830	810	900
$x_3$	0,5	5	0,1	2	1	2,2	2,1	2
$x_4$	1	2	1	1	2	1	1	1
$x_5$	8	25	1	19	19	19	19	20
$x_6$	0	5	1	1	1	1	1	1
$x_7$	0	2	1	0	0	0	0	0
$x_8$	2	16	0,1	16	15,6	15,8	13,1	14
$x_9$	1,8	4	0,1	2,7	2,7	2,6	3,1	2,9
$x_{10}$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_{11}$	0	4	1	1	1	1	1	1
$x_{12}$	1,3	1,95	0,01	1,96	1,78	1,95	1,78	1,71
$x_{13}$	M3-M4-M5		1	M3	M3	M3	M3	M3
$x_{14}$	300	600	3	300	330	519	318	387
$x_{15}$	40	70	1	41	48	41	51	41
$x_{16}$	1	2	1	1	2	2	2	2
$x_{17}$	1	5	1	2	2	2	2	2
$x_{18}$	400	1400	100	1200	1100	1400	1200	1300
$x_{19}$	50	400	10	300	250	180	330	200
$x_{20}$	50	400	10	120	280	160	190	230
$x_{21}$	0	2	1	0	0	0	0	0
Toplam kayıplar ( $f_2$ )			watt	21797,4	21763,4	<b>21727</b>	22121,1	22335

### 5.1.3 Senaryo 3

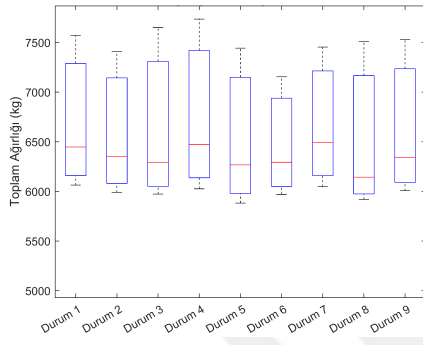
Senaryo 3'te eşitlik (3.69)'da verilen transformatörün toplam ağırlığı minimize edilmiştir. Toplam ağırlık optimizasyonunda bölüm 3.7'de verilen tüm ulusal/uluslararası kısıtlar ve Tablo (3.1)'de verilen malzeme kısıtları dikkate alınmıştır. Her algoritma Tablo (5.3)'te verilen durumlar kapsamında 20 kez çalıştırılmıştır. Senaryo 3'ün her duruma ait sonuçları Şekil (5.3)'te verilmiştir.



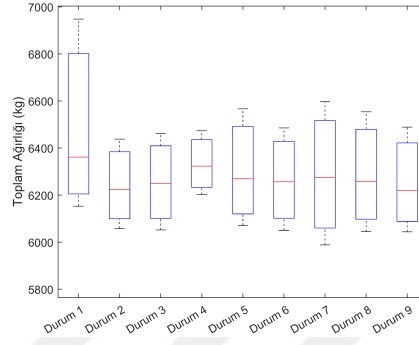
(a) DE



(b) GA



(c) GWO



(d) PSO

Şekil 5.3: Toplam ağırlık optimizasyonu (Senaryo 3)

Algoritmalar ile farklı durumlar için yapılan denemeler sonucunda elde edilen en düşük maliyetler; DE, GA, GWO ve PSO algoritmaları için sırasıyla Durum 7, 3, 5 ve 7'dir. Tablo (5.9)'da, algoritmaların en iyi sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 5.9: Senaryo 3

	Birim	Garanti	DE	PSO	GWO	GA	Klasik
		Değerleri					Yöntem
Durum No.			7	7	5	3	
Toplam maliyet ( $f_1$ )	\$		26076	26267	25744	26928	26420
Toplam kayıplar ( $f_2$ )	watt	24980	24912,2	24958,6	23908,5	23563,9	24587
Toplam ağırlık ( $f_3$ )	kg		5987,5	5988,4	<b>5881,7</b>	6118,8	6108
DC Kayıp (AG)	watt		11182,68	11495,19	9467,55	9383,33	9822
DC Kayıp (YG)	watt		9949,94	9159,21	10584,48	10311,77	11053
Eddy kayıp (AG)	watt		75,211	58,629	130,34	116,34	108
Eddy kayıp (YG)	watt		534,53	1055,3	536,77	553,68	407
Stray kayıp (AG)	watt		1130,8	1130,8	1130,8	1130,8	1131
Stray kayıp (YG)	watt		87,595	84,59	91,595	89,595	90
Yükte kayıplar	watt	23000	22961	22983	21942	21585	22611
Boşta kayıplar	watt	1980	1951,2	1975,6	1966,5	1978,9	1976
$U_k$	%	5,4 - 6,6	6,5245	6,2219	6,5197	5,8982	6,10
Nüve ağırlığı	kg		2474,8	2544,5	2442,3	2649,1	2528
Aktif kısmın ağırlığı	kg		3684,1	3745,9	3676,1	3844,4	3712
Tank ağırlığı	kg		1145,3	1078,4	1065,5	1125,1	1199,17
Yağ ağırlığı	kg		1094,1	1100	1076,1	1085,3	1132
Tekerlikler	kg		64	64	64	64	64
Yağ sıcaklığı	$^{\circ}C$	60	54,811	55,15	54,191	54,681	53,19
Sargı sıcaklığı	$^{\circ}C$	65	60,538	60,906	60,999	60,999	60,67

Senaryo 3 için Tablo (5.9)'da verilen sonuçlara göre, klasik yöntemden Diferansiyel Evrim (DE) algoritması %1,97, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması %1,95, Gri Kurt Optimizasyon (GWO) algoritması %3,70 düşük ağırlık sonuç elde etmiştir. Genetik Algoritma (GA) ise, en iyi denemesi klasik yönetime göre %0,96 daha ağır sonuç vermiştir.

Tablo (5.9)'da elde edilen tasarım sonuçlarına ait değişkenlerin değeri Tablo (5.10)'da verilmiştir.

Tablo 5.10: Senaryo 3 için değişken değerleri

	$x_i^{lb}$	$x_i^{ub}$	Adım Aralığı	DE	PSO	GWO	GA	Klasik Yöntem
$x_1$	275	1000	1	657	661	651	707	660
$x_2$	300	1000	10	830	830	830	820	840
$x_3$	0,5	5	0,1	1,5	1,4	1,8	1,8	1,7
$x_4$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_5$	8	25	1	20	20	20	19	20
$x_6$	0	5	1	2	2	1	1	1
$x_7$	0	2	1	0	0	1	1	1
$x_8$	2	16	0,1	16	12	14,5	13,3	14,8
$x_9$	1,8	4	0,1	2,5	3,5	2,6	2,8	2,4
$x_{10}$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_{11}$	0	4	1	1	1	1	1	1
$x_{12}$	1,3	1,95	0,01	1,95	1,63	1,92	1,9	1,77
$x_{13}$	M3-M4-M5		1	M3	M3	M3	M3	M3
$x_{14}$	300	600	3	300	300	363	300	300
$x_{15}$	40	70	1	42	40	40	46	40
$x_{16}$	1	2	1	2	2	2	2	2
$x_{17}$	1	5	1	2	2	2	2	2
$x_{18}$	400	1400	100	1200	1400	1400	1200	1250
$x_{19}$	50	400	10	320	210	220	280	250
$x_{20}$	50	400	10	160	210	200	240	250
$x_{21}$	0	2	1	0	0	0	0	0
Toplam ağırlık ( $f_3$ )			kg	5987,5	5988,4	<b>5881,7</b>	6118,8	6108

## 5.2 Çok Amaçlı Optimizasyon

Tez kapsamında, **ilk kez**, harmonikli güç şebekesinde çok amaçlı transformator tasarım optimizasyon problemi sezgisel algoritmalar kullanılarak çözülmüştür. Literatürde benzer çok amaçlı problemlerin çözümünde kullanılan birçok farklı çok amaçlı sezgisel algoritma denenmiş, yapılan denemeler sonucunda yakınsama süresi, tüm kısıtların sağlanması ve klasik yöntem sonuçları ile kıyaslama kriterlerine göre en iyi performans gösteren MOEA/D, MOGWO, MOWOA ve NSGA III algoritmaları seçilmiştir. Bölüm (4.3)'te seçilen algoritmaların açıklaması verilmiştir. Bu algoritmalar aşağıda belirtilen üç senaryo üzerinde değerlendirilmiştir. Her senaryo için, farklı popülasyon ve iterasyon parametreleri belirlenerek dokuz durum oluşturulmuştur. Her durum için bir algoritma 20 kez çalıştırılmış ve toplamda 2160 deneme yapılmıştır. Önerilen algoritmalar ile elde edilen sonuçlar, klasik yöntem sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon için belirlenen durumlar Tablo

(5.11)'de verilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon için önerilen algoritmalar ile elde edilen sonuçların özeti Tablo (5.13)'te verilmiştir.

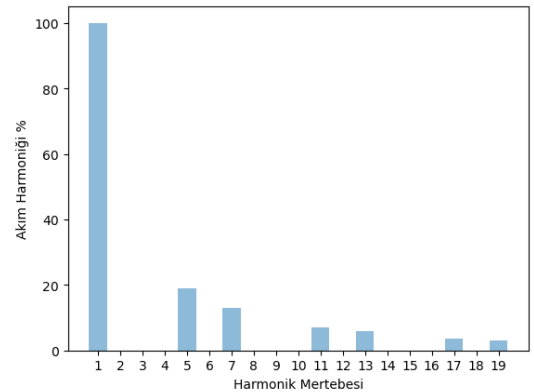
Tablo 5.11: Çok amaçlı optimizasyon durumları

Durum No.	İterasyon	Popülasyon
Durum 1	300	300
Durum 2	300	400
Durum 3	300	500
Durum 4	400	300
Durum 5	400	400
Durum 6	400	500
Durum 7	500	300
Durum 8	500	400
Durum 9	500	500

Şebekede olan akım ve gerilim harmonikleri, transformatörde boşa ve yükte kayıpların artmasına ve transformatörün ömrünün azalmasına neden olur. Bölüm (2.4)'te açıklanan nedenlerden dolayı, transformatörlerin tasarımı şebekenin harmoniklerini göz önüne alınarak yapılmalıdır. Böylece, yapılan transformatör tasarımı uzun vadeli yatırım maliyeti açısından fayda sağlayacaktır. Örnek bir şebekenin harmonik spektromu ve değerleri Tablo (5.12) ve Şekil (5.4)'te verilmiştir.

Tablo 5.12: Akım harmoniği

Harmonik (h)	Büyükük (%)
1	100
5	19
7	13
11	7
13	6
17	3,5
19	3



Şekil 5.4: Akım harmoniği spektromu

Önerilen algoritmalar ile elde edilen çok amaçlı optimizasyon sonuçlarının özeti Tablo (5.13)'te verilmiştir. Her senaryoya ait sonuçlar ilerleyen bölüm-

lerde değerlendirilmiştir.

**Senaryo 4:** Toplam maliyet ve güç kaybı minimizasyonu.  $\min(f_1, f_2)$

**Senaryo 5:** Toplam maliyet ve ağırlık minimizasyonu.  $\min(f_1, f_3)$

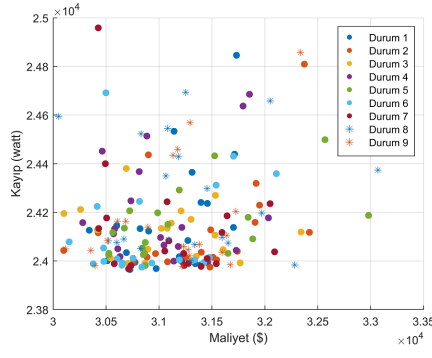
**Senaryo 6:** Toplam güç kaybı ve ağırlık minimizasyonu.  $\min(f_2, f_3)$

Tablo 5.13: Çok amaçlı optimizasyon özeti

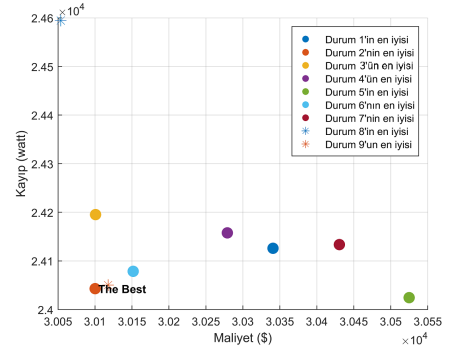
Senaryo No.		Birim	MOEA/D	MOGWO	MOWOA	NSGA III	Referans
Senaryo 4	$f_1$	\$	30100,2	30079,3	29894,7	29742,1	31264,8
	$f_2$	watt	24043,2	24089,3	24291,6	23996,4	24633
	$f_3$	kg	6878	6836,8	6803,3	6786,2	7074
Senaryo 5	$f_1$	\$	29524,8	29449,1	29440,4	29241,1	31264,8
	$f_2$	watt	24563,7	24596	24859,5	24555,2	24633
	$f_3$	kg	6721,5	6763,6	6736,2	6680,8	7074
Senaryo 6	$f_1$	\$	29898,6	30104,1	31988	31961,8	31264,8
	$f_2$	watt	23996,2	23987,6	22882,2	22856,5	24633
	$f_3$	kg	6682,6	6780,2	7137,3	7115,9	7074

### 5.2.1 Senaryo 4

Senaryo 4'te dört farklı optimizasyon algoritması, Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma (MOEA/D), Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (MOGWO), Çok Amaçlı Balina Optimizasyon Algoritması (MOWOA) ve Üçüncü Nesil Sıralama Yapmayan Genetik Algoritma (NSGA III), dağıtım transformatörün toplam maliyet ( $f_1$ ) ve toplam güç kayıpları ( $f_2$ ) minimizasyonu için kullanılmıştır. Her algoritma Tablo (5.11)'de verilen durumlar için 20 kez denenmiştir. Tüm deneme sonuçları Şekil 5.5-5.8 (a)'da ve her duruma ait en iyi sonuç Şekil 5.5-5.8 (b)'de gösterilmiştir.

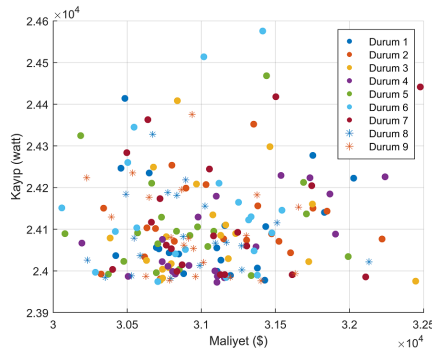


(a) Tüm denemeler

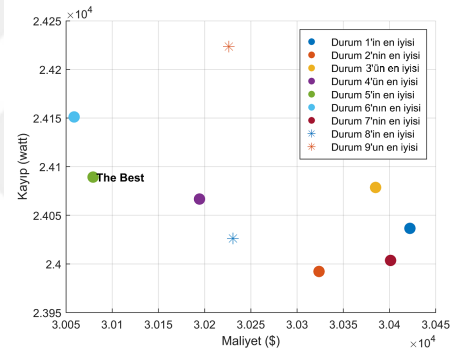


(b) Tüm durumların en iyileri

Şekil 5.5: Senaryo 4 için MOEA/D sonuçları

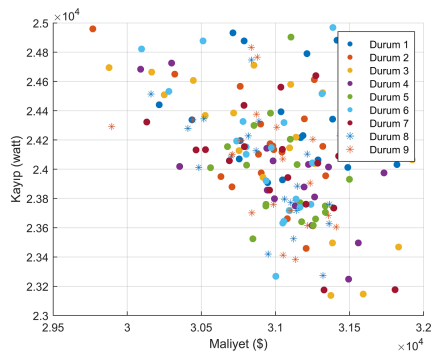


(a) Tüm durumlar

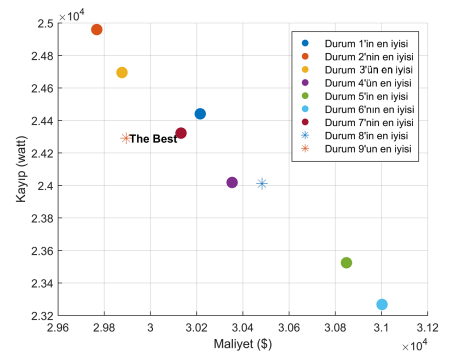


(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.6: Senaryo 4 MOGWO sonuçları

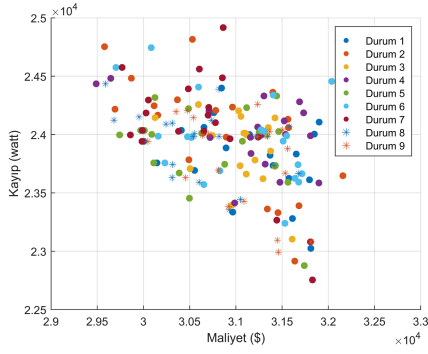


(a) Tüm durumlar

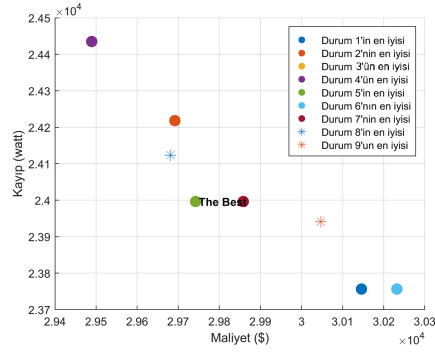


(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.7: Senaryo 4 MOWOA sonuçları



(a) Tüm durumlar



(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.8: Senaryo 4 NSGA III sonuçları

Optimizasyon sonunda bu dört algoritmaya ait en iyi performans (toplam maliyet ve güç kaybı minimizasyon açısından), MOEA/D algoritması için durum 2 de, MOGWO algoritması için durum 5 de, MOWOA algoritması için durum 9 da ve NSGA III algoritması için durum 5 te elde edilmiştir.

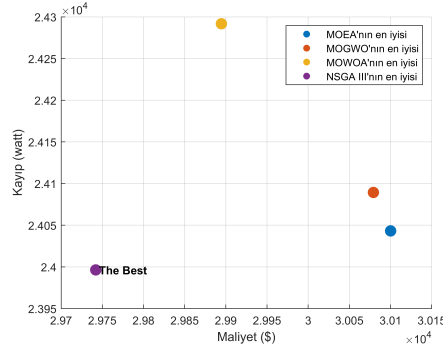
Tablo (5.14)'te tüm durumlara ait en iyi sonuç ve deneme sayısı verilmiştir. Burada  $DX(dx)$  formatında verilen  $\mathbf{X}$ , durum ve  $\mathbf{x}$ , deneme sayısını ifade etmektedir (örnek D1(d3):1. Durum, 3. deneme)

Tablo 5.14: Senaryo 4 için deneme sonuçları

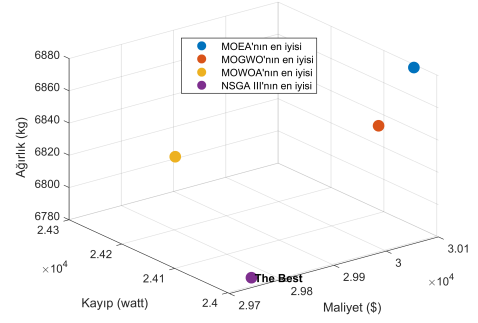
	D1(d7)	<b>D2(d15)</b>	D3(d8)	D4(d17)	D5(d6)	D6(d4)	D7(d8)	D8(d2)	D9(d16)	
MOEA/D	$f_1$	30340,7	30100,2	30100,7	30279,1	30524,9	30151,7	30430,5	30053,7	30117,8
	$f_2$	24126,1	24043,1	24195,3	24157,7	24024,7	24078,7	24133,8	24594,5	24050,4
	$f_3$	6900,3	6878	6903,6	6886,4	6918,5	6880,9	6996,5	6888,4	6857,8
	D1(d16)	D2(d7)	D3(d6)	D4(d3)	<b>D5(d19)</b>	D6(d2)	D7(d1)	D8(d2)	D9(d16)	
MOGWO	$f_1$	30422,1	30323,8	30385	30194,4	30079,3	30058,7	30401,2	30230,8	30226,3
	$f_2$	24036,7	23992,3	24078,7	24066,8	24089,4	24151,2	24003,7	24026,2	24223,5
	$f_3$	6927,2	6878,7	6979,7	6953,2	6836,8	6910,8	6876,3	6834,8	6891,2
	D1(d8)	D2(d3)	D3(d10)	D4(d20)	D5(d16)	D6(d9)	D7(d12)	D8(d12)	<b>D9(d4)</b>	
MOWOA	$f_1$	30215,4	29767,8	29877,1	30353,4	30848	31002,3	30132	30482,3	29894,7
	$f_2$	24440,7	24959,1	24694,8	24018,3	23524	23267,8	24322,2	24011,3	24291,7
	$f_3$	6849,2	6828	6827,8	6889,3	6910,6	6962,4	6879,7	6900	6803,3
	D1(d5)	D2(d7)	D3(d16)	D4(d8)	<b>D5(d9)</b>	D6(d9)	D7(d2)	D8(d2)	D9(d5)	
NSGA III	$f_1$	30145,8	29691,9	30126,2	29489,3	29742,1	30232,1	29858,5	29680,7	30047,1
	$f_2$	23756,4	24218,1	24145,6	24435	23996,5	23756,4	23996,5	24123,7	23941,1
	$f_3$	6841,7	6765,5	6853,6	6727,4	6786,2	6877,6	6835,1	6754,4	6839,8

Şekil (5.9)'da algoritmaların en iyi sonuçları karşılaştırmak amacıyla iki boyutlu ve üç boyutlu alanda gösterilmiştir. İki boyutlu alanda, minimizasyonu yapılan amaç fonksiyon değerleri; üç boyutlu alanda ise tüm amaç fonksiyonla-

rının değerleri gösterilmiştir. Senaryo 4 de, NSGA III optimizasyon algoritması her iki amaç için diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç elde etmiştir. Tüm algoritmaların en iyi sonuçları detaylı olarak Tablo (5.15)'te verilmiştir.



(a) Tüm algoritmaların 2D analizi



(b) Tüm algoritmaların 3D analizi

Şekil 5.9: Tüm algoritmaların en iyi sonuçları Senaryo 4

Tablo 5.15: Senaryo 4

	Birim	Garanti Değerleri	MOEA/D	MOGWO	MOWOA	<b>NSGA III</b>	Klasik Yöntem
Durum No.			2	5	9	5	
Toplam maliyet ( $f_1$ )	\$		30100,2	30079,3	29894,7	29742,1	31264,8
Toplam kayıplar ( $f_2$ )	watt	24980	24042,8	24089,4	24291,7	23996,4	24634
Toplam ağırlık ( $f_3$ )	kg		6878	6836,8	6803,3	6786,2	7074
DC Kayıp (AG)	watt		9686,5	9293,8	9225,4	9265,1	8198
DC Kayıp (YG)	watt		9340,6	9742,5	9980,1	9667,7	10096
Eddy kayıp (AG)	watt		515	676,1	605,8	609,9	859
Eddy kayıp (YG)	watt		1300,7	1179	1288	1256	2307
Stray kayıp (AG)	watt		1130,8	1130,8	1130,8	1130,8	1131
Stray kayıp (YG)	watt		89,6	89,6	89,6	89,6	90
Yükte kayıplar	watt	23000	22063,2	22111,8	22319,7	22019,1	22680
Boşta kayıplar	watt	1980	1979,6	1977,6	1972	1977,3	1953
$U_k$	%	5,4 - 6,6	6,5	6,3	6,4	6,4	6,1
Nüve ağırlığı	kg		2981,3	2994,6	2980,7	2925	3155
Aktif kısmın ağırlığı	kg		4357,8	4328,4	4320,6	4265,3	4571
Tank ağırlığı	kg		1131,5	1255,8	1197,7	1247	1203
Tekerlikler	kg		64	64	64	64	64
Yağ ağırlığı	kg		1324,7	1188,6	1220,9	1209,8	1237
Yağ sıcaklığı	$^{\circ}C$	60	53,8	53	54,5	53	53,55
Sargı sıcaklığı	$^{\circ}C$	65	60,9	61	60,9	61	59,25

Senaryo 4'te maliyet ve güç kaybı optimizasyonu sonuçları, klasik bir transformatör tasarımı ile karşılaştırıldığında, MOEA/D algoritması tarafından %3,72 maliyet ve %2,4 güç kaybı azaltması sağlandığı gözlemlenmiştir.

MOGWO algoritması ise %3,79 maliyet ve %2,21 güç kaybı azaltması gerçekleştirmiştir. Öte yandan, MOWOA ve NSGA III algoritmaları sırasıyla %4,38 ve %4,87 maliyet azaltma ve %1,39 ve %2,59 güç kaybı azaltma sonuçları elde etmişlerdir. Bu senaryo içinde en üstün performansı NSGA III algoritması sergilemiştir.

Tablo (5.14)'te elde edilen tasarım sonuçlarına ait değişkenlerin değeri Tablo (5.10)'da verilmiştir.

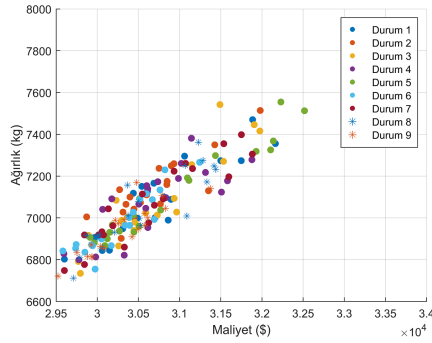
Tablo 5.16: Senaryo 4 için değişken değerleri

	$x_i^{lb}$	$x_i^{ub}$	Adım Aralığı	MOEA/D	MOGWO	MOWOA	NSGA III	Klasik Yöntem
$x_1$	275	1000	1	744	787	745	744	799
$x_2$	300	1000	10	840	800	840	840	850
$x_3$	0,5	5	0,1	1,8	2	1,9	1,9	2,2
$x_4$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_5$	8	25	1	19	18	19	19	18
$x_6$	0	5	1	1	1	1	1	1
$x_7$	0	2	1	1	0	1	1	0
$x_8$	2	16	0,1	12,3	11,7	10,9	11,8	15,2
$x_9$	1,8	4	0,1	1,8	1,8	1,9	1,8	2,7
$x_{10}$	1	2	1	2	2	2	2	1
$x_{11}$	0	4	1	1	1	1	1	1
$x_{12}$	1,3	1,95	0,01	1,58	1,95	1,55	1,55	1,85
$x_{13}$	M3-M4-M5		1	M3	M3	M3	M3	M3
$x_{14}$	300	600	3	417	378	303	300	444
$x_{15}$	40	70	1	40	40	44	52	40
$x_{16}$	1	2	1	2	2	2	2	2
$x_{17}$	1	5	1	3	2	2	2	2
$x_{18}$	400	1400	100	1400	1100	1200	1200	1200
$x_{19}$	50	400	10	220	240	250	300	160
$x_{20}$	50	400	10	180	310	250	270	280
$x_{21}$	0	2	1	0	1	0	0	1
Toplam maliyet ( $f_1$ )			\$	30100,2	30079,3	29894,7	29742,1	31264,8
Toplam kayıplar ( $f_2$ )			watt	24042,8	24089,4	24291,7	23996,4	24634

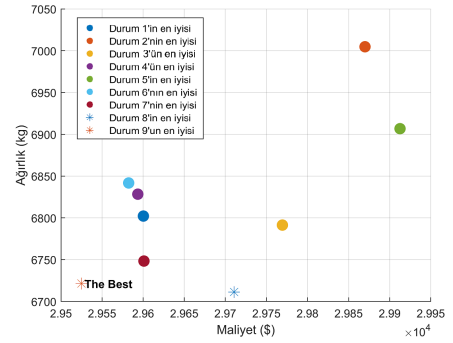
### 5.2.2 Senaryo 5

Senaryo 5'te dört farklı optimizasyon algoritması, Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma (MOEA/D), Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (MOGWO), Çok Amaçlı Balina Optimizasyon Algoritması (MOWOA) ve Üçüncü Nesil Sıralama Yapmayan Genetik Algoritma (NSGA III), dağıtım transformatörünün toplam maliyet ( $f_1$ ) ve toplam ağırlık ( $f_3$ ) minimizasyonu için kullanılmıştır. Her algoritma Tablo (5.11)'de verilen durumlar için 20 kez

denenmiştir. Tüm deneme sonuçları Şekil 5.10-5.13 (a)'da ve her duruma ait en iyi sonuç Şekil 5.10-5.13 (b)'de gösterilmiştir.

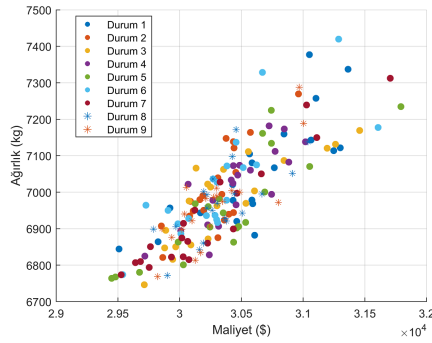


(a) Tüm durumlar

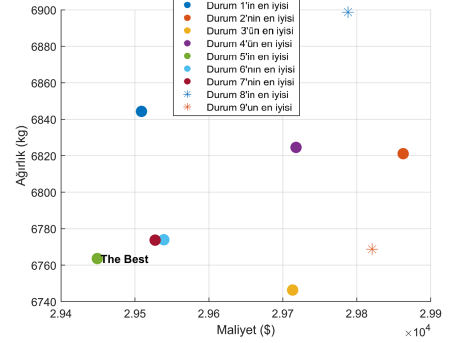


(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.10: Senaryo 5 MOEA/D sonuçları

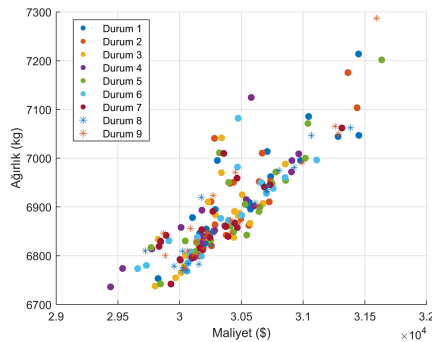


(a) Tüm durumlar

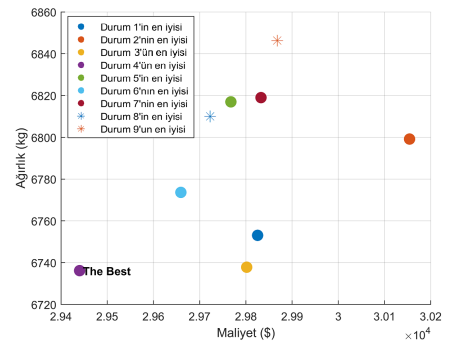


(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.11: Senaryo 5 MOGWO sonuçları

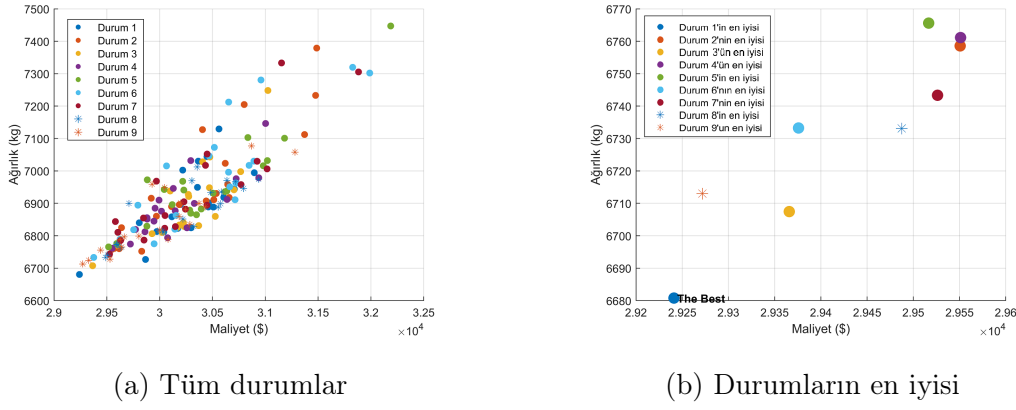


(a) Tüm durumlar



(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.12: Senaryo 5 MOWOA sonuçları



Şekil 5.13: Senaryo 5 NSGA III sonuçları

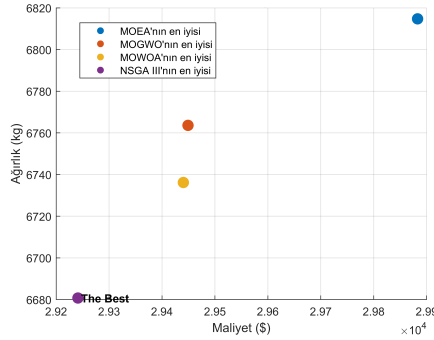
Optimizasyon sonunda bu dört algoritmaya ait en iyi performans (toplam maliyet ve ağırlık minimizasyon açısından), MOEA algoritması için durum 9'da, MOGWO algoritması için durum 5 de, MOWOA algoritması için durum 4'te ve NSGA III algoritması için durum 1'de elde edilmiştir.

Tablo 5.17: Senaryo 5 denemelerin sonuçları

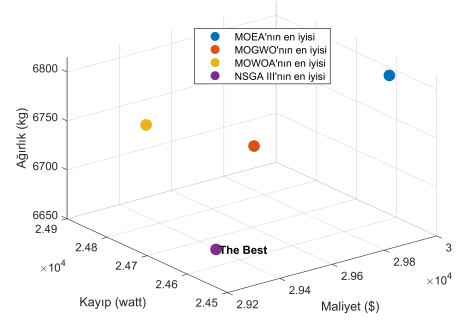
	D1(d17)	D2(d8)	D3(d9)	D4(d14)	D5(d12)	D6(d15)	D7(d14)	D8(d14)	<b>S9(d17)</b>	
MOEA/D	$f_1$	29600,2	29870	29769,4	29593,5	29912,5	29582,4	29600,9	29710,5	29524,8
	$f_2$	24777,2	24900,5	24905,5	24817,6	24820,1	24944,6	24563,6	24494,8	24563,6
	$f_3$	6802,3	7004,8	6791,3	6828,4	6906,8	6841,8	6748,4	6711,4	6721,5
	D1(d16)	D2(d16)	D3(d15)	D4(d4)	<b>D5(d5)</b>	D6(d4)	D7(d9)	D8(d7)	D9(d14)	
MOGWO	$f_1$	29508,8	29862,6	29713,3	29717,8	29449,1	29539	29527,3	29788,1	29820,9
	$f_2$	24965,3	24721,9	24436,5	24748,7	24596	24810,4	24707,8	24839,4	24832,9
	$f_3$	6844,3	6821,1	6746,3	6824,6	6763,6	6773,9	6773,7	6898,8	6768,8
	D1(d4)	D2(d7)	D3(d9)	<b>D4(d1)</b>	D5(d6)	D6(d2)	D7(d9)	D8(d17)	D9(d1)	
MOWOA	$f_1$	29825,3	30154,1	29801,7	29440,4	29767,5	29659,4	29832,7	29722,8	29867,9
	$f_2$	24779,4	24548,8	24815,5	24859,5	24872,8	24654,1	24681,5	24881,5	24894,9
	$f_3$	6753,1	6799,1	6737,8	6736,2	6817	6773,7	6819	6810	6846,3
	<b>D1(d2)</b>	D2(d4)	D3(d16)	D4(d12)	D5(d13)	D6(d11)	D7(d5)	D8(d9)	D9(d3)	
NSGA III	$f_1$	29241,1	29550,8	29365,8	29551,1	29516,6	29375,8	29526,3	29487,4	29271,7
	$f_2$	24555,2	24530,2	24636,2	24530,2	24795,9	24739,4	24435	24530,2	24694,4
	$f_3$	6680,8	6758,6	6707,5	6761,2	6765,6	6733,2	6743,4	6733,1	6713

Şekil (5.14)'te algoritmaların en iyi sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla iki boyutlu ve üç boyutlu alanda gösterilmiştir. İki boyutlu alanda, minimizasyonu yapılan amaç fonksiyon değerleri; üç boyutlu alanda ise tüm amaç fonksiyon değerleri gösterilmiştir. Senaryo 5'te, NSGA III optimizasyon algoritması her iki amaç için diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç elde

etmiştir. Tüm algoritmaların en iyi sonuçları detaylı olarak Tablo (5.18)'te verilmiştir.



(a) Tüm algoritmaların 2D analizi



(b) Tüm algoritmaların 3D analizi

Şekil 5.14: Tüm algoritmaların en iyi sonuçları Senaryo 5

Tablo 5.18: Senaryo 5

	Birim	Garanti Değerleri	MOEA/D	MOGWO	MOWOA	<b>NSGA III</b>	Klasik Yöntem
Durum No.			9	5	4	1	
Toplam maliyet ( $f_1$ )	\$		29524,8	29449,1	29440,4	29241,1	31264,8
Toplam kayıplar ( $f_2$ )	watt	24980	24563,7	24596	24859,5	24555,2	24634
Toplam ağırlık ( $f_3$ )	kg		6721,5	6763,6	6736,2	6680,8	7074
DC Kayıp (AG)	watt		9485,3	9814,2	9740,6	9814,2	8198
DC Kayıp (YG)	watt		9982,4	9787,4	10098,1	9751,3	10096
Eddy kayıp (AG)	watt		691,5	524,7	519,4	524,7	859
Eddy kayıp (YG)	watt		1206,4	1271,6	1302,6	1266,9	2307
Stray kayıp (AG)	watt		1130,8	1130,8	1130,8	1130,8	1131
Stray kayıp (YG)	watt		89,6	89,6	89,6	89,6	90
Yükte kayıplar	watt	23000	22586	22618,2	22881,1	22577,4	22680
Boşta kayıplar	watt	1980	1977,7	1977,8	1978,3	1977,8	1953
$U_k$	%	5,4 - 6,6	6,4	6,5	6,4	6,5	6,1
Nüve ağırlığı	kg		2935,9	2854,8	2905,9	2854,8	3155
Aktif kısmın ağırlığı	kg		4237,1	4239,5	4217,7	4176,2	4572
Tank ağırlığı	kg		1219,9	1270,9	1240,2	1250,3	1203
Yağ ağırlığı	kg		1200,5	1189,2	1214,3	1190,3	1237
Tekerlikler	kg		64	64	64	64	64
Yağ sıcaklığı	$^{\circ}C$	60	53,2	53,7	53,7	53,7	53,55
Sargı sıcaklığı	$^{\circ}C$	65	60,8	61	60,9	60,9	59,25

Senaryo 5'te transformatörün maliyeti ve toplam ağırlığı optimizasyonu sonuçları, klasik bir transformatör tasarımı ile karşılaştırıldığında, MOEA/D algoritması tarafından %5,57 maliyet ve %4,98 toplam ağırlık azaltması sağlandığı gözlemlenmiştir. MOGWO algoritması ise %5,81 maliyet ve %4,39

toplam ağırlık azaltması gerçekleştirmiştir. Öte yandan, MOWOA ve NSGA III algoritmaları sırasıyla %5,84 ve %6,47 maliyet azaltma ve %4,78 ve %5,56 toplam ağırlık azaltma sonuçları elde etmişlerdir. Bu senaryo içinde en üstün performansı NSGA III algoritması sergilemiştir.

Tablo (5.17)'de elde edilen tasarım sonuçlarına ait değişkenlerin değeri Tablo (5.19)'da verilmiştir.

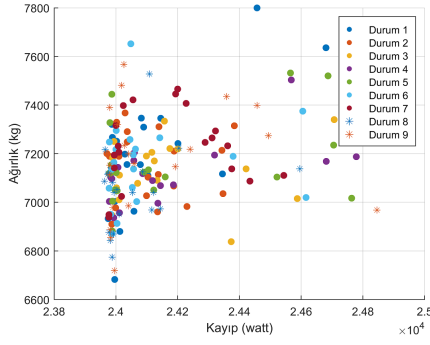
Tablo 5.19: Senaryo 5 için değişken değerleri

	$x_i^{lb}$	$x_i^{ub}$	Adım Aralığı	MOEA/D	MOGWOA	MOWOA	NSGA III	Klasik Yöntem
$x_1$	275	1000	1	781	732	737	732	799
$x_2$	300	1000	10	780	840	840	840	850
$x_3$	0,5	5	0,1	2	1,8	1,8	1,8	2,2
$x_4$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_5$	8	25	1	18	19	19	19	18
$x_6$	0	5	1	1	1	1	1	1
$x_7$	0	2	1	1	1	1	1	0
$x_8$	2	16	0,1	11,4	11,9	10,8	11,9	15,2
$x_9$	1,8	4	0,1	1,8	1,8	1,9	1,8	2,7
$x_{10}$	1	2	1	2	2	2	2	1
$x_{11}$	0	4	1	1	1	1	1	1
$x_{12}$	1,3	1,95	0,01	1,92	1,8	1,68	1,8	1,85
$x_{13}$	M3-M4-M5		1	M3	M3	M3	M3	M3
$x_{14}$	300	600	3	342	624	303	300	444
$x_{15}$	40	70	1	41	44	43	48	40
$x_{16}$	1	2	1	2	2	2	2	2
$x_{17}$	1	5	1	2	2	2	2	2
$x_{18}$	400	1400	100	1200	1200	1200	1200	1200
$x_{19}$	50	400	10	350	350	280	280	160
$x_{20}$	50	400	10	130	300	230	310	280
$x_{21}$	0	2	1	0	1	0	0	1
Toplam maliyet ( $f_1$ )			\$	30100,2	30079,3	29894,7	29742,1	31264,8
Toplam ağırlık ( $f_3$ )			kg	6721,5	6763,6	6736,2	6680,8	7074

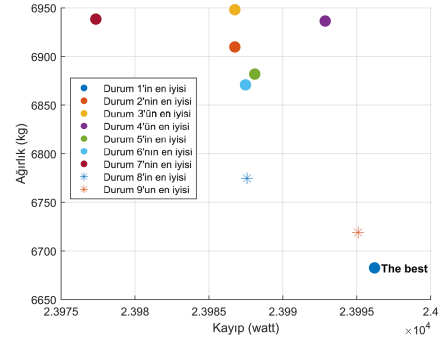
### 5.2.3 Senaryo 6

Senaryo 6'da dört farklı optimizasyon algoritması, Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma (MOEA/D), Çok Amaçlı Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (MOGWO), Çok Amaçlı Balina Optimizasyon Algoritması (MOWOA) ve Üçüncü Nesil Sıralama Yapmayan Genetik Algoritma (NSGA III), dağıtım transformatörünün toplam güç kaybı ( $f_2$ ) ve toplam ağırlık ( $f_3$ ) minimizasyonu için kullanılmıştır. Her algoritma Tablo (5.11)'de verilen durumlar için 20 kez denenmiştir. Tüm deneme sonuçları Şekil 5.15-5.18 (a)'da ve her duruma ait

en iyi sonuç Şekil 5.15-5.18 (b)'de gösterilmiştir.

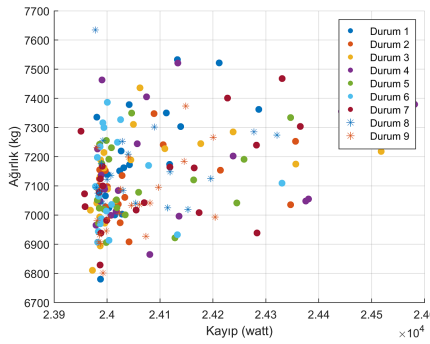


(a) Tüm durumlar

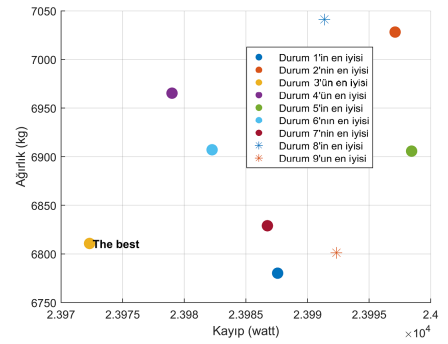


(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.15: Senaryo 6 MOEA/D sonuçları

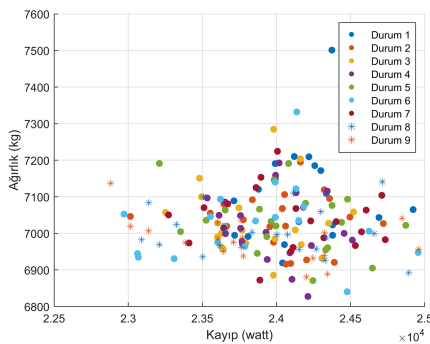


(a) Tüm durumlar

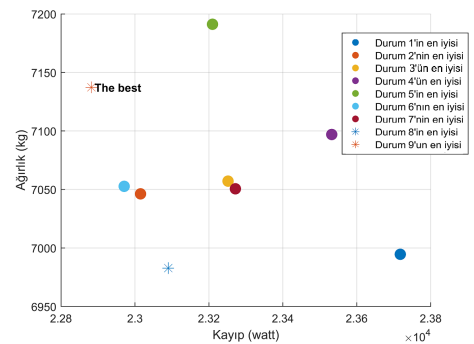


(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.16: Senaryo 6 MOGWO sonuçları

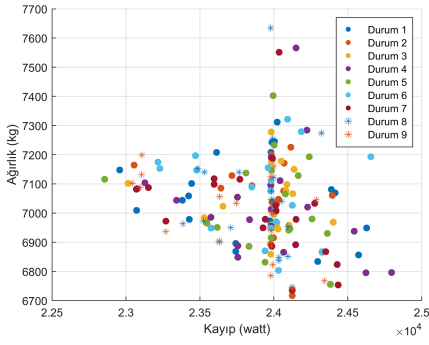


(a) Tüm durumlar

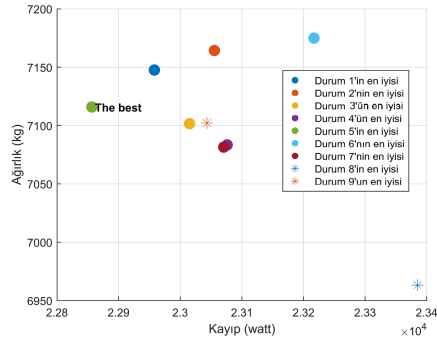


(b) Durumların en iyisi

Şekil 5.17: Senaryo 6 MOWOA sonuçları



(a) Tüm durumlar

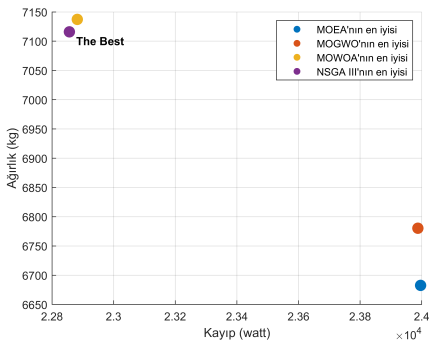


(b) Durumların en iyisi

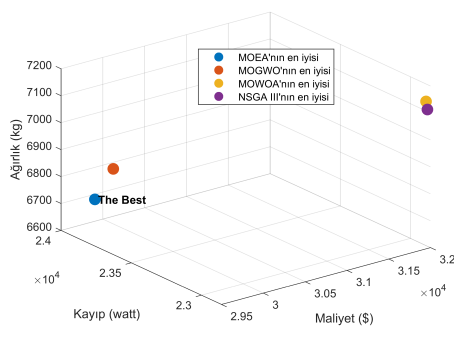
Şekil 5.18: Senaryo 6 NSGA III sonuçları

Optimizasyon sonunda bu dört algoritmaya ait en iyi performans (toplam güç kaybı ve ağırlık minimizasyon açısından), MOEA/D algoritması için durum 1'de, MOGWO algoritması için durum 3'te, MOWOA algoritması için durum 9'da ve NSGA III algoritması için durum 5'te elde edilmiştir.

Şekil (5.19)'da algoritmaların en iyi sonuçları karşılaştırmak amacıyla iki boyutlu ve üç boyutlu alanda gösterilmiştir. İki boyutlu alanda, minimizasyonu yapılan amaç fonksiyon değerleri; üç boyutlu alanda ise tüm amaç fonksiyonlarının değerleri gösterilmiştir. Senaryo 6'da, MOEA/D optimizasyon algoritması her iki amaç için diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç elde etmiştir. Tüm algoritmaların en iyi sonuçları detaylı olarak Tablo (5.21)'de verilmiştir.



(a) Tüm algoritmaların 2D analizi



(b) Tüm algoritmaların 3D analizi

Şekil 5.19: Tüm algoritmaların en iyi sonuçları Senaryo 6

Tablo 5.20: Senaryo 6 denemelerin sonuçları

		D1(d6)	D2(d4)	D3(d19)	D4(d15)	D5(d16)	D6(d17)	D7(d18)	D8(d20)	D9(d14)
MOEA/D	$f_1$	29898,6	30375,9	30472,2	30666,6	30556,8	30361,8	30476,1	30081,4	29981,3
	$f_2$	23996,2	23986,8	23986,8	23992,9	23988,1	23987,5	23977,4	23987,6	23995,1
	$f_3$	6682,6	6909,8	6948,1	6936,4	6881,9	6870,8	6938,4	6774,7	6719,1
		D1(d4)	D2(d5)	D3(d13)	D4(d13)	D5(d1)	D6(d5)	D7(d7)	D8(d3)	D9(d19)
MOGWO	$f_1$	30243,1	30934,2	30104,1	30350,5	30466,4	30651,3	30232,3	31033,7	30141,3
	$f_2$	23972,3	23997,1	23987,6	23979	23998,4	23982,3	23986,8	23991,4	23992,3
	$f_3$	6810,8	7028,1	6780,2	6965,4	6905,8	6907,1	6829	7041,2	6801,3
		D1(d8)	D2(d11)	D3(d14)	D4(d16)	D5(d8)	D6(d11)	D7(d2)	D8(d4)	D9(d13)
MOWOA	$f_1$	31159,3	31629,3	31595	31680,6	31997,9	31556	31370,3	31256,3	31988
	$f_2$	23717,4	23015	23251,7	23532,3	23209,7	22971	23271,7	23090	22882,2
	$f_3$	6994,6	7046,2	7057,1	7097	7191,2	7052,7	7050,6	6982,8	7137,3
		D1(d7)	D2(d2)	D3(d2)	D4(d15)	D5(d5)	D6(d2)	D7(d1)	D8(d3)	D9(d2)
NSGA III	$f_1$	31994,6	32034,4	31769,4	31598,4	31961,8	32069,7	31740,6	31015,5	31757,6
	$f_2$	22957,9	23055,3	23015	23076,2	22856,5	23216,9	23070,6	23385,1	23043,5
	$f_3$	7147,5	7164,3	7101,7	7083,4	7115,9	7174,9	7081,6	6963,3	7102,3

Tablo 5.21: Senaryo 6

	Birim	Garanti	MOEA/D	MOGWO	MOWOA	NSGA III	Klasik
		Değerleri					Yöntem
Durum No.			1	3	9	5	
Toplam maliyet ( $f_1$ )	\$		29898,6	30104,1	31988	31961,8	31264,8
Toplam kayıplar ( $f_2$ )	watt	24980	23996,2	23987,6	22882,2	22856,5	24633
Toplam ağırlık ( $f_3$ )	kg		6682,6	6780,2	7137,3	7115,9	7074
DC Kayıp (AG)	watt		9572,3	9242,2	8625,4	8990,1	8198
DC Kayıp (YG)	watt		9507,4	9703,9	8960,5	8623,9	10096
Eddy kayıp (AG)	watt		569,1	672	754,1	649,6	859
Eddy kayıp (YG)	watt		1152	1174,8	1348,9	1395,2	2307
Stray kayıp (AG)	watt		1130,8	1130,8	1130,8	1130,8	1131
Stray kayıp (YG)	watt		89,6	89,6	89,6	89,6	90
Yükte kayıplar	watt	23000	22021,2	22013,3	20909,2	20879,2	22680
Boşta kayıplar	watt	1980	1975	1974,3	1973	1977,3	1953
$U_k$	%	5,4 - 6,6	6,1	6,3	6,2	6,3	6,1
Nüve ağırlığı	kg		3040,3	3028	3262,2	3260,7	3155
Aktif kısmın ağırlığı	kg		4382,6	4365,1	4721,4	4715,3	4571
Tank ağırlığı	kg		1069,5	1185,6	1153,9	1131,2	1203
Yağ ağırlığı	kg		1166,5	1165,5	1198	1205,3	1237
Tekerlikler	kg		64	64	64	64	64
Yağ sıcaklığı	°C	60	54,6	54,5	55,3	55,6	53,55
Sargı sıcaklığı	°C	65	60,9	60,7	60,9	60,5	59,25

Senaryo 6'da transformatörün toplam güç kaybı ve toplam ağırlık optimizasyonu sonuçları, klasik bir transformatör tasarımı ile karşılaştırıldığında, MOEA/D algoritması tarafından %2,59 toplam güç kaybı ve %5,53 toplam

ağırlık azaltması sağlandığı gözlemlenmiştir. MOGWO algoritması ise %2,61 toplam güç kaybı ve %4,15 toplam ağırlık azaltması gerçekleştirmiştir. Öte yandan, MOWOA ve NSGA III algoritmaları sırasıyla %7,11 ve %7,21 toplam güç kaybı azaltma sağlarken %0,89 ve %0,59 toplam ağırlık artışı klasik yöntemle göre sonuçları elde etmişlerdir.

Tablo (5.20)'de elde edilen tasarım sonuçlarına ait değişkenlerin değeri Tablo (5.22)'de verilmiştir.

Tablo 5.22: Senaryo 6 için değişken değerleri

	$x_i^{lb}$	$x_i^{ub}$	Adım Aralığı	MOEA/D	MOGWOA	MOWOA	NSGA III	Klasik Yöntem
$x_1$	275	1000	1	792	791	821	820	799
$x_2$	300	1000	10	820	810	840	840	850
$x_3$	0,5	5	0,1	1,9	2	2,1	2	2,2
$x_4$	1	2	1	1	1	1	1	1
$x_5$	8	25	1	18	18	18	18	18
$x_6$	0	5	1	1	1	1	1	1
$x_7$	0	2	1	1	1	0	1	0
$x_8$	2	16	0,1	12	11,8	12,2	12,7	15,2
$x_9$	1,8	4	0,1	1,8	1,8	1,9	1,9	2,7
$x_{10}$	1	2	1	2	2	2	2	1
$x_{11}$	0	4	1	1	1	1	1	1
$x_{12}$	1,3	1,95	0,01	1,97	1,95	1,86	1,85	1,85
$x_{13}$	M3-M4-M5		1	M3	M3	M3	M3	M3
$x_{14}$	300	600	3	378	306	381	300	444
$x_{15}$	40	70	1	40	43	54	50	40
$x_{16}$	1	2	1	2	2	2	2	2
$x_{17}$	1	5	1	2	2	2	2	2
$x_{18}$	400	1400	100	1400	1200	1200	1200	1200
$x_{19}$	50	400	10	200	350	270	270	160
$x_{20}$	50	400	10	190	170	270	210	280
$x_{21}$	0	2	1	0	0	0	0	1
Toplam kayıplar ( $f_2$ )			watt	23996,2	23987,6	22882,2	22856,5	24633
Toplam ağırlık ( $f_3$ )			kg	6682,6	6780,2	7137,3	7115,9	7074

## 6 SONUÇLAR

Güç ve dağıtım transformatörleri bir elektrik şebekesinin en önemli ekipmanlarından biridir. İletim ve dağıtım hatlarının güç kayıplarını azaltmak için farklı tiplerde transformatör kullanılır. Elektrik ekipmanlar arasında transformatörler en verimli cihazlardandır. Bu ekipmanların toplam verimliliği %98 ve üzeridir. Transformatörler elektrik tesislerinin en pahalı ekipmanları olarak bilinir. Bir şebekede çok sayıda transformatör kullanılmaktadır ve %2 enerji kaybı bir transformatörün ömrü boyunca önemli güç ve dolayısıyla maliyet kaybıdır.

Transformatörlerin tasarımında ulusal/uluslararası standartlara ek olarak, müşteri şartnamesinde belirlenen özellikler de dikkate alınmalıdır. Bu ekipmanların tasarımında farklı malzemelerin özellikleri, elektromanyetik, güç kaybı, boyut, maliyet ve ağırlık hesapların yapılması gerekmektedir. Bu hesapların matematiksel modeli ve kullanılan malzemelerin özellikleri dikkate alındığında bir karmaşık karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama (MINLP) problemi çözülmesi gerekmektedir.

Bu sanayi odaklı doktora tezinde hermetik yağlı tip dağıtım transformatörlerin tasarım optimizasyonu ele alınmıştır. Bu tip transformatörün tasarımında **ilk kez** olarak tüm tasarım değişkenleri içerilmiş ve üretim hattına uygun sınırları belirlenmiştir. Toplam 21 tasarım değişkenlerine ait tasarım olasılığı (arama alanı)  $1,32 \times 10^{25}$  dir. Bu arama alanında en optimim sonucu bulmak için Brute Force metodu zaman açısından uygun bir yaklaşım değildir. Transformatör tasarım probleminin türünden dolayı sezgisel optimizasyon algoritmaları daha kısa çözüm süresi ve optimuma yakın sonuçlar sunmaktadır.

"No Free Lunch (NFL) teoremi" ilkesi tarafından yönlendirilen sezgisel optimizasyon algoritmalarının uygulamaları, araştırmamızın temel bir yönünü temsil etmektedir. Çeşitli sezgisel algoritmalar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerimizin sonunda transformatör tasarım problemini çözmek için en başarılı algoritmalar belirlenmiştir. Problemin çözümünde hem tek amaçlı hem de çok amaçlı optimizasyon ortamlarını kapsayan altı farklı senaryo üzerinden yürütülmüştür.

Tek amaçlı optimizasyonda, toplam maliyetler, güç kayıpları ve ağırlık amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Seçilen sezgisel algoritmaları dokuz

farklı durum çerçevesinde amaç fonksiyonlarında uygulanmıştır. Tek amaçlı optimizasyonda elde edilen sonuçlar mevcut tasarım yöntemi ile tasarlanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritmalar maliyet, toplam kayıp ve toplam ağırlık açısından mevcut yönteme göre sırasıyla %4,70 , %2,72 ve %3,70 daha iyi sonuç elde etmiştir. Bu sonuçlara dayalı olarak sezgisel optimizasyon yöntemlerinin tasarım sürecini kolaylaştırma, tasarım süresini azaltma ve transformatör tasarımlarının kalitesini artırma potansiyelinin altını çizmektedir.

Ayrıca, çok amaçlı optimizasyon algoritmaların uygulanmasında, güç şebekesinin harmonikleri göz önüne alınmıştır. Güç şebekesinde bulunan harmonikler transformatör sargılarında ve nüvesinde ek kayıplara sebep olur. Transformatör tasarımında harmonikleri göz önüne almak, bu ekipmanların verimli çalışma ömrünü arttırır. Çok amaçlı optimizasyonda maliyet, toplam kayıplar ve toplam ağırlık 3 farklı senaryo kapsamında ikişerli optimize edilmiştir.

Araştırmamızın öne çıkan başarılarından biri, 50 kVA ile 3150 kVA arasında değişen ve tüm tasarım değişkenlerini içeren, hermetik tip dağıtım transformatörleri için bir optimizasyon aracının geliştirilmesidir. Geliştirilen optimizasyon programı tamamen üretim hattına uygun olup ve tüm ulusal/uluslararası standartlar ve şartnamelere göre kolayca düzenlenebilir.

## 7 ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, hermetik yağlı tip dağıtım transformatörlerinin tasarım optimizasyonunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Yapılan çalışmada, dağıtım güç şebekesinin bu önemli ekipmanını sezgisel algoritmalar kullanılarak optimize edilmiştir. Ancak, bu çalışmanın ötesinde, gelecekteki araştırma ve geliştirme için daha fazla fırsat bulunmaktadır. Ele alınması gereken potansiyel alanları ve yapılabilecek çalışmalar aşağıda verilmiştir:

- Güç transformatörlerin tasarım optimizasyonu.
- Kuru tip transformatörlerin tasarım optimizasyonu.
- Beş bacaklı (Shell Type) transformatörlerin tasarım optimizasyonu.
- Şönt reaktörlerin tasarım optimizasyonu.
- Hibrit algoritmalar kullanarak transformatörlerin tasarım optimizasyonu.
- Özellik seçimi (Feature Selection) kullanılarak tasarım probleminin boyutunu küçültmek.
- Hibrit stokastik ve deterministik algoritmaların transformatörlerin tasarım optimizasyonunda kullanılması.
- Gerilim harmonikleri ve dalgalanmasının transformatör üzerindeki etkilerinin incelenmesi.
- Tasarım optimizasyonun işçilik maliyetlerine etkisi.

Bu öneriler, tezin çerçevesinde ortaya konan sonuçların, gelecekteki araştırmacılara ve endüstri profesyonellerine yol gösterici niteliktedir. Bu çalışmanın sunduğu sonuçlar, dağıtım transformatörlerinin daha iyi tasarlanması ve enerji sektörünün daha sürdürülebilir ve etkili hale getirilmesi için önemli bir adım olabilir.

Ayrıca, makine öğrenimi ve yapay zeka tekniklerinin transformatör tasarım optimizasyonuna dahil edilmesi, gelişmekte olan bir alanı temsil etmektedir. Bu teknolojilerden yararlanmak, yeni tasarım çözümlerinin keşfedilmesini ve transformatör tasarımlarını sürekli olarak iyileştirmek için gerçek dünya verilerinden uyarlanan ve öğrenen akıllı uygulamaların geliştirilmesini sağlayabilir.

## Kaynaklar

- Alhan, L.** and **Yumuşak, N.**, 2017. Design optimization of distribution transformers with nature-inspired metaheuristics: a comparative analysis. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(6):4673–4684.
- Amarasinghe, R.; Kumara, W.; Rajapaksha, R.; Rupasinghe, R.;** and **Wijayapala, W.**, 2015. A transformer design optimisation tool for oil immersed distribution transformers. In *2015 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, pages 100–105. IEEE.
- Amoiralis, E.I.; Tsili, M.A.; Pappas, D.G.;** and **Kladas, A.G.**, 2013. Global transformer design optimization using deterministic and nondeterministic algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(1):383–394.
- Coelho, L.D.S.; Mariani, V.C.; Guerra, F.A.; da Luz, M.V.;** and **Leite, J.V.**, 2014. Multiobjective optimization of transformer design using a chaotic evolutionary approach. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2):669–672.
- Çınar, M.A.; Alboyacı, B.; Çürükova, S.; Sönmez, O.;** and **Yapıcı, R.**, 2017. Transformatörlerin kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların azaltılması için en uygun şönt eleman boyutlarının belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4):1337–1346.
- Daneshmand, S.V.** and **Heydari, H.**, 2016. A diversified multiobjective simulated annealing and genetic algorithm for optimizing a three-phase hts transformer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(2):1–10.
- Dawood, K.; Komurgoz, G.;** and **Isik, F.**, 2019. Modeling of distribution transformer for analysis of core losses of different core materials using fem. In *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, pages 1–5. IEEE.
- Deb, K.** and **Jain, H.**, 2013. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part i: solving problems with box constraints. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 18(4):577–601.

- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; and Meyarivan, T.**, 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2):182–197.
- Freitag, C. and Leibfried, T.**, 2017. Mixed core design for power transformers to reduce core losses. In *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, pages 152–158. IEEE.
- Georgilakis, P.S.**, 2009. *Spotlight on Modern Transformer Design*. Springer London.
- Hashemi, M.H.; Kiliç, U.; and Dikmen, S.**, 2023. Applications of novel heuristic algorithms in design optimization of energy-efficient distribution transformer. *IEEE Access*, 11:15968–15980. doi:10.1109/ACCESS.2023.3245327.
- Holland, J.H.**, 1976. *Adaptation in natural and artificial systems* (john h. holland).
- IEC**, 2010. General guide on harmonics and interharmonics measurements, for power supply systems and equipment connected thereto.
- IEEE**, 2022. Ieee standard for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014)*, pages 1–31. doi:10.1109/IEEESTD.2022.9848440.
- J Chapman, S.**, 2004. *Electric machinery fundamentals*. McGraw-hill.
- Jahromi, A.; Piercy, R.; Cress, S.; Service, J.; and Fan, W.**, 2009. An approach to power transformer asset management using health index. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25(2):20–34. doi:10.1109/MEI.2009.4802595.
- Jangir, P. and Jangir, N.**, 2017. Non-dominated sorting whale optimization algorithm (nswoa): a multi-objective optimization algorithm for solving engineering design problems. *Glob. J. Res. Eng*, 17:15–42.

- Kalair, A.; Abas, N.; Kalair, A.; Saleem, Z.; and Khan, N.**, 2017. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78:1152–1187. ISSN 1364-0321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.121>.
- Kennedy, J. and Eberhart, R.**, 1995. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, volume 4, pages 1942–1948. IEEE.
- Khan, S.; Singh, B.; and Makhija, P.**, 2017. A review on power quality problems and its improvement techniques. In *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, pages 1–7. doi:10.1109/IPACT.2017.8244882.
- Khatri, A.; Malik, H.; and Member, O.R.**, 2012. Optimal design of power transformer using genetic algorithm. In *2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, pages 830–833. IEEE.
- Kokash, N.**, 2005. An introduction to heuristic algorithms. *Department of Informatics and Telecommunications*, pages 1–8.
- Liu, Q.; Liu, X.; Wu, J.; and Li, Y.**, 2019. An improved nsga-iii algorithm using genetic k-means clustering algorithm. *Ieee Access*, 7:185239–185249.
- Mirjalili, S. and Lewis, A.**, 2016a. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95:51–67. ISSN 0965-9978. doi:<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>.
- Mirjalili, S. and Lewis, A.**, 2016b. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95:51–67. ISSN 0965-9978. doi:<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>.
- Mirjalili, S.; Mirjalili, S.M.; and Lewis, A.**, 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69:46–61. ISSN 0965-9978. doi:<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- Mirjalili, S.; Saremi, S.; Mirjalili, S.M.; and Coelho, L.d.S.**, 2016. Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert systems with applications*, 47:106–119.

- Mohammed, M.S. and Vural, R.A.**, 2018. Nsga-ii+ fem based loss optimization of three-phase transformer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9):7417–7425.
- Nair, K.**, 2021. *Power and Distribution transformers: Practical design guide*. CRC press.
- Pejovski, D.; Najdenkoski, K.; and Digalovski, M.**, 2017. Impact of different harmonic loads on distribution transformers. *Procedia Engineering*, 202:76–87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.696>.
- Petkovska, L.; Digalovski, M.; Cvetkovski, G.; and Lefley, P.**, 2014. A novel approach to multi-objective efficiency optimisation for a distribution transformer based on the taguchi method. In *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pages 2228–2234. IEEE.
- Sousa, A.R.M.d.; Nunes, M.V.A.; Fonseca, W.d.S.; Araujo, R.C.F.; and Lima, D.d.S.**, 2021. Magneto-thermo-structural analysis of power transformers under inrush and short circuit conditions. *Energies*, 14(11):3266.
- Storn, R. and Price, K.**, 1997. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11:341–359.
- Tamilselvi, S.; Baskar, S.; Anandapadmanaban, L.; Karthikeyan, V.; and Rajasekar, S.**, 2018. Multi objective evolutionary algorithm for designing energy efficient distribution transformers. *Swarm and Evolutionary Computation*, 42:109–124.
- Tang, S.; Hale, C.; and Thaker, H.**, 2014. Reliability modeling of power transformers with maintenance outage. *Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*, 2(1):316–324.
- teckglobal.com.au**, 2017. The differences between square, oblong and circular transformer cores. <https://teckglobal.com.au/news/41-differences-square-oblong-circular-transformer-core>. Accessed: 2023-09-04.

- Wang, S.; Wang, S.; Zhang, N.; Yuan, D.; and Qiu, H.**, 2019. Calculation and analysis of mechanical characteristics of transformer windings under short-circuit condition. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(7):1–4.
- Wolpert, D.H. and Macready, W.G.**, 1997. No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1(1):67–82.
- Zhang, Q. and Li, H.**, 2007. Moea/d: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 11(6):712–731.



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmada bilgi, tecrübe ve desteğini benden esirmeyen ve doktora eğitimim boyunca bana yön gösteren kıymetli danışmanım sayın Doç. Dr. Ulaş KILIÇ hocama en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesi ve tez savunma jürisinde yer alan ve değerli yorumları ve görüşleriyle katkılar sağlayan Prof. Dr. Kürşat AYAN, Prof. Dr. Musa ALCI, Prof. Dr. Erkan MEŞE, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kubilay EKER ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan AKÇA hocalarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalışması, 119C127 numaralı TÜBİTAK 2244 üniversite-sanayi projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden ötürü proje yürütücüsü sayın Prof. Dr. Hasan YILDIZ'a, ELTAŞ Transformatör A.Ş. ve TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak, anlayış ve sevgisiyle her zaman yanımda olan sevgili eşim Fereshteh DADASHI'ye ve hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme yürekten teşekkür ederim.

04/12/2023

Mohammad Hassan HASHEMI

## ÖZGEÇMİŞ

Mohammad Hassan Hashemi 2009'da liseyi bitirdikten sonra Islamic Azad Üniversitesinde elektrik mühendisliği bölümünü kazandı. 2013-2015 yılları arasında Islamic Azad University Science and Research Branch (Tehran-Zanjan)'da yüksek lisansını Elektrik Mühendisliği bölümünde yüksek onur derecesiyle tamamladı. 2018-2019 yılında Türkçe dil eğitimini tamamlayıp ve 2019-2023 yılları arasında Ege Üniversitesinde doktora eğitimini Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında tamamladı. Bilim dalındaki ilgili alanları güç sistemleri analizi, yüksek gerilim sistemleri ve optimizasyondır.

### YAYINLAR;

- **Hashemi, M.H.**, U. Kiliç and S. Dikmen, "Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformer," in IEEE Access, vol. 11, pp. 15968-15980, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3245327.
- **Hashemi, M.H.**, U. Kılıç and S. Dikmen, "Application of Feature Selection in Distribution Transformer Design and Manufacturing Using Feed Forward Artificial Neural Network and Equilibrium Optimizer Algorithm," 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023, pp. 163-167, doi: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175790.
- **Hashemi, M.H.**, U.Kılıç, S.Dikmen "Hybrid Heuristic and Pattern Search Optimization Algorithm for Design Optimization of Energy Efficient Distribution Transformer", IEEE Global Energy Conference 2022
- **Hashemi, M.H.** and Dikmen, S., 2023, May. Real-Time Condition Monitoring of Power Transformers Using the Internet of Things (IoT) and Dissolved Gas Analysis. In 2023 XIX International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED) (pp. 1-4). IEEE.10.1109/ACED57798.2023.10143439.
- **Hashemi, M.H.**, N.S.Cetin, F.Salmanoglu, "Solar Chimney Power Plant Performance and Feasibility Study in Turkey" ", International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol 10, Issue 109, Feb 2021.
- S.Zolfaghari, **Hashemi, M.H.**, A.Zolfaghari, "Reserve Management in Restructured Power System Considering Loads Reliability" European Journal of Engineering Research and Science, Vol. 2, No. 12, Dec 2017.
- **Hashemi, M.H.**, M.Moghaddam, A.R.Salimi, "Technical and Economic Feasibility of Constructing a Zero-Energy Building: An Iranian Case Study", International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol. 5, Issue 48, Jan 2016.
- M.Moradlou, **Hashemi, M.H.**, M.Bigdeli, "Simultaneous Demand Side Management

of Residential, Commercial and Industrial Loads in a Smart Grid Using PSO Algorithm”, 31st International Power System Conference (PSC), 24-26 October, 2016, Tehran, Iran.

- **Hashemi, M.H.**, M.Moradlou, M.Bigdeli,” Demand Side Management Of Household Appliances in a Smart Residential Microgrid Using Particle Swarm Optimization Algorithm”, The 2nd National Conference on Optimization in Science and Engineering, Babol, Mazandaran, Iran, December 2015.
- **Hashemi, M.H.**, M.Moradlou, M.Bigdeli,” Energy Management of Industrial Loads In a Smart Micro grid Using Particle Swarm Optimization Algorithm” , The 2nd National Conference on Optimization in Science and Engineering, December 2015, Babol, Mazandaran, Iran.
- **Hashemi, M.H.**, M.Moghadam, M.Taleb, “Economic Feasibility Of Installing Solar Panels To Provide Electrical Energy For Residential Units In The City Of Zanjan”, The 8th International Conference On Electrical Engineering and Renewable Energy, August 2015, Golestan, Iran.

PROJE(LER);

- 119C127 numaralı TÜBİTAK 2244-Sanayi Doktora Programı, Bursiyer.  
YÜKSEK VERİMLİ GÜÇ VE DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİN TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ.