

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ YÖNETİMİNDE MALİYET VE TALEP GÜÇ OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah Haşim ATINÇ

TEMMUZ 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ YÖNETİMİNDE MALİYET VE TALEP GÜÇ OPTİMİZASYONU

Abdullah Haşim ATINÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07/06/2024

Tezin Savunma Tarihi : 02/07/2024

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Zeynep HASIRCI TUĞCU

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Enerji Yönetiminde Maliyet ve Talep Güç Optimizasyonu” isimli bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, hiçbir koşulda şahsıma ve yeteneklerime güvenini yitirmeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep HASIRCI TUĞCU’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’a, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma, tez çalışmamda teknik hiçbir desteğini esirgemeyen Aras EDAŞ Akıllı Şebekeler ve AR-GE Müdürü Sayın Ali GEYİKOĞLU öncülüğünde tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım

Her zaman daha müreffeh bir yaşam sürmemiz için çabalayan başta kıymetli aile büyüğüm Behice Atınç’a, Annem Hatice Atınç’a, Babam Fahrettin Atınç’a ve kardeşlerime de teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Abdullah Haşim ATINÇ
Trabzon, 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Enerji Yönetiminde Maliyet ve Talep Güç Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi. Zeynep HASIRCI TUĞCU sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/07/2024

Abdullah Haşim ATINÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
KISALTMALAR VE SEMBOLLER VE DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Akıllı Şebekeler.....	4
1.2.1. Akıllı Ölçüm (Akıllı Sayaç)	6
1.3. Talep Tarafı Yönetimi	8
1.4. Yük Yönetimi	10
1.5. Talep Yanıtı.....	11
1.6. Talep Yanıtının Faydaları.....	15
1.7. Tezin Amacı	15
1.8. Literatür Özeti	16
1.9. Talep Tarafı Yönetiminde Optimizasyon Yaklaşımları	22
1.10. Meta-Sezgisel Algoritmalar	23
1.10.1. Genetik Algoritma (GA)	24
1.10.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	29
1.10.3. Yıldırım Arama Algoritması (YAA).....	32
1.11. Sırt Çantası Problemi.....	37
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	38
2.1. Problemin Formülasyonu	38
2.2. Benzetim Çalışmaları	42
3. SONUÇLAR.....	65
4. ÖNERİLER.....	69
5. KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ENERJİ YÖNETİMİNDE MALİYET VE TALEP GÜÇ OPTİMİZASYONU

Abdullah Haşim ATINÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep HASIRCI TUĞCU

2024, 72 Sayfa

Elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, enerji talebini karşılamak adına yeni üretim tesisleri devreye alınmaktadır. Ancak geleneksel yöntemlerle ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi ekonomik, çevresel ve şebeke entegrasyonları açısından olumsuz yönlere sahiptir. Klasik elektrik şebekesinin akıllı şebeke yapısına dönüşümünün artması sayesinde talep tarafı yönetiminde yer alan yük yönetim stratejileri uygulanabilir bir yapıya dönüşmüştür. Akıllı ölçüm cihazları ve haberleşme altyapısıyla birlikte tüketiciler tüketimlerini izleyebilir ve kontrol edebilir hale gelmiştir. Bu tez çalışması kapsamında mesken tipi bir tüketicinin, bir günlük tüketim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işleminde Genetik Algoritma, Binary Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Yıldırım Arama Algoritması aracılığıyla planlamalar gerçekleştirilmiştir. Planlamalar 1 saat, 30 dakika ve 15 dakika olacak şekilde kullanım zamanı fiyatlandırması ve gerçek zamanlı fiyatlandırma kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir ve başarı performansları kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Şebeke, Talep Tarafı Yönetimi, Optimizasyon, PAR

Master Thesis

SUMMARY

COST AND DEMAND POWER OPTIMIZATION IN ENERGY MANAGEMENT

Abdullah Haşim ATINÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electric And Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Zeynep HASIRCI TUĞCU
2024, 72 Pages

The demand for electrical energy is increasing day by day. Therefore, new production facilities are being commissioned to satisfy energy demand. However, electricity generation with traditional methods and renewable energy sources has negative aspects in terms of economic, environmental and grid integration. Thanks to the increasing transformation of the classical electricity grid into a smart grid structure, load management strategies in demand side management become a feasible structure. With smart metering devices and communication infrastructure, consumers have become able to monitor and control their consumption. Within the scope of this thesis study, a daily consumption optimization of a residential type consumer was carried out. In the optimization process, plans were made through Genetic Algorithm, Binary Particle Swarm Optimization and Lightning Search Algorithm. Planning was carried out separately using time-of-use pricing and real-time pricing for 1 hour, 30 minutes and 15 minutes, and their success performances were compared.

Key Words: Smart Grid, Demand Side Management, Optimization, PAR

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Türkiye fiili tüketim miktarının yıllara göre değişimi (GWh)	2
Şekil 2.	2022 yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (%).....	3
Şekil 3.	Örnek yük profili	8
Şekil 4.	TTY teknikleri.....	9
Şekil 5.	Dinamik fiyatlandırma politikaları yük azaltma potansiyelleri.....	14
Şekil 6.	Fiyatlandırma politikaları tüketici fatura indirimi potansiyeli	14
Şekil 7.	Optimizasyon teknikleri	23
Şekil 8.	Meta-sezgisel algoritmalar	24
Şekil 9.	Rulet seçimi.....	25
Şekil 10.	Stokastik Evrensel Seçim	26
Şekil 11.	Elitist seçim	26
Şekil 12.	Genetik Algoritma gen, kromozom ve çaprazlama noktası gösterimi	27
Şekil 13.	Çaprazlama sonrası oluşan kromozomlar	27
Şekil 14.	Mutasyon örnekleri	27
Şekil 15.	Yaygın kullanılan çaprazlama teknikleri (a) 2 nokta çaprazlama, (b) Üniform çaprazlama, (c) k-nokta çaprazlama gösterimine örnek olarak 5 nokta çaprazlama.....	28
Şekil 16.	Genetik Algoritma akış diyagramı	29
Şekil 17.	BPSO algoritması akış diyagramı	32
Şekil 18.	YAA akış diyagramı.....	36
Şekil 19.	Günlük tüketim eğrisi.....	39
Şekil 20.	1 Saatlik planlama maliyet (Durum 2)	49
Şekil 21.	1 saatlik planlama PAR (Durum 2)	50
Şekil 22.	1 saatlik planlama PAR (Durum3).....	51
Şekil 23.	30 dakikalık planlama maliyet (Durum 1)	52
Şekil 24.	30 dakikalık planlama maliyet (Durum 2)	52
Şekil 25.	30 dakikalık planlama PAR (Durum 2).....	53
Şekil 26.	30 dakikalık planlama PAR (Durum3).....	54
Şekil 27.	15 dakikalık planlama maliyet (Durum 1)	55
Şekil 28.	15 dakikalık planlama maliyet (Durum 2)	55
Şekil 29.	15 dakikalık planlama PAR (Durum 2).....	56

Şekil 30.	15 dakikalık planlama PAR (Durum 3).....	57
Şekil 31.	Planlama öncesi ve optimize edilmiş yük profilleri	57
Şekil 32.	GZF Yük profilleri	58
Şekil 33.	GZF Fiyat sinyali	59
Şekil 34.	KZF Yük profilleri	59
Şekil 35.	KZF Fiyat sinyali	60
Şekil 36.	1 saatlik planlama global minimuma yakınsama durumları.....	61
Şekil 37.	30 dakikalık planlamada global minimuma yakınsama durumları.	62
Şekil 38.	15 dakikalık planlamada global minimuma yakınsama durumları	63



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	2018-2021 Yılları arası Türkiye net elektrik tüketimi	2
Tablo 2.	Faturalanan tüketimin tüketici türü bazında yıllar itibariyle gelişimi	3
Tablo 3.	Akıllı şebeke ve geleneksel şebeke karşılaştırması	5
Tablo 4.	Üç zamanlı tarife	15
Tablo 5.	Özet literatür taraması	21
Tablo 6.	PSO Algoritması parametreleri	30
Tablo 7.	Cihaz durum bildirim cetveli.....	39
Tablo 8.	GZF Fiyat tablosu.....	40
Tablo 9.	Ağırlık katsayıları durumları	42
Tablo 10.	GA ile planlama sonrası maliyet	43
Tablo 11.	GA ile planlama sonrası PAR	44
Tablo 12.	BPSO ile planlama sonrası maliyet.....	45
Tablo 13.	BPSO ile planlama sonrası PAR	45
Tablo 14.	YAA ile planlama sonrası maliyet	46
Tablo 15.	YAA ile planlama sonrası PAR	46
Tablo 16.	1 Ocak 2024 itibariyle geçerli nihai tarife tablosuna göre 3 zamanlı tarife	47
Tablo 17.	1 Saatlik planlama ve algoritmaların maliyet durumları (Durum 1 & Durum 2)	48
Tablo 18.	1 Saatlik planlama PAR (Durum 2 & Durum 3).....	50
Tablo 19.	30 dakikalık planlama ve algoritmaların maliyet durumları (Durum1 & Durum 2)	51
Tablo 20.	30 dakikalık planlama PAR (Durum 2 & Durum 3)	53
Tablo 21.	15 dakikalık planlama maliyet (Durum 1 & Durum 2).....	54
Tablo 22.	15 dakikalık planlama PAR (Durum 2 & Durum 3)	56
Tablo 23.	Planlama öncesi ve planlama sonrası PAR ve maliyet	67

KISALTMALAR VE SEMBOLLER VE DİZİNİ

a	: Arama uzayı alt limiti
AA	: Ateşböceği Algoritması
b	: Arama uzayı üst limiti
BBO	: Beluga Balina Optimizasyonu
BPSO	: Binary Parçacık Sürü Optimizasyonu
BSA	: Balık Sürüsü Algoritması
BYTA	: Bakteriyel Yiyecek Tarama Algoritması
c	: Işık hızı
ÇA	: Çilek Algoritması
ÇE	: Çapraz Entropi
DEA	: Diferansiyel Evrim Algoritması
dk	: Dakika
DÜK	: Dağıtık Üretim Kaynağı
DYK	: Doğrudan Yük Kontrolü
EPDK	: Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu
EYK	: Endirekt Yük Kontrol
FBTY	: Fiyat Bazlı Talep Yanıtı
GA	: Genetik Algoritma
GKKAA	: Gri Kel Kartal Arama Algoritması
GWDO	: Geliştirilmiş Wind Driven Optimizasyon
GWh	: Gigawatt Saat
GZF	: Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma
h	: Saat
HAA	: Harmoni Arama Algoritması
HGPSO	: Hibrit Genetik Parçacık Sürü Optimizasyonu
KKA	: Karınca Kolonisi Algoritması
KKAA	: Kel Kartal Arama Algoritması
KPF	: Kritik Pik Fiyatlandırma
KPİ	: Kritik Pik İndirimi
kWh	: Kilowatt Saat

KZF	: Kullanım Zamanı Fiyatlandırmaası
LBBO	: Lider Beluga Balina Optimizasyonu
m	: Roket kütlesi
MASS	: Milli akıllı sayaç sistemi
MKKA	: Mutasyona uğratılmış Karınca Kolonisi Algoritması
MWh	: Megawatt Saat
OSOS	: Otomatik Sayaç Okuma Sistemi
PAR	: Peak to Average Ratio
PLC	: Power Line Communication
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
PZİ	: Pik Zaman İndirimi
RF	: Radyo Frekans
s	: İyonizasyon yolu uzunluğu
TAŞ	: Türkiye Akıllı Şebekeler
TBTY	: Teşvik Bazlı Talep Yanıtı
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TTY	: Talep Tarafı Yönetimi
TWh	: Terawatt Saat
TY	: Talep Yanıtı
W	: Eylemsizlik katsayısı
WDO	: Wind Driven Optimizasyon
YAA	: Yıldırım Arama Algoritması
YBSA	: Yapay Balık Sürüsü Algoritması
σ	: Ölçeklendirme parametresi
w	: Çanta kapasitesi
$\bar{p}_l$	: Zıt roket
CO_2	: Karbondioksit
F_i	: İyonizasyon oran sabiti
G_{best}	: Sürünün global en iyi konumu
p^L	: Eski roket
P_{best}	: Kişisel en iyi konum
P_i^s	: i. adım pozisyonu
P_m	: Mutasyon oranı
P_{yeni}^L	: Yeni roket

V_0	: Roket başlangıç hızı
V_R	: Roket hızı
V_i	: Parçacık hızı
c_1	: Bilişsel sabit
c_2	: Sosyal sabit
p_i	: Orijinal roket
r_{ij}	: Üniiform dağılıma sahip $\{0,1\}$ arasında sayı
v_n	: Eşya değeri
x^T	: Rastgele sayı
x_i	: Parçacık konumu
x_n	: Eşya ağırlığı
μ	: Şekillendirme parametresi

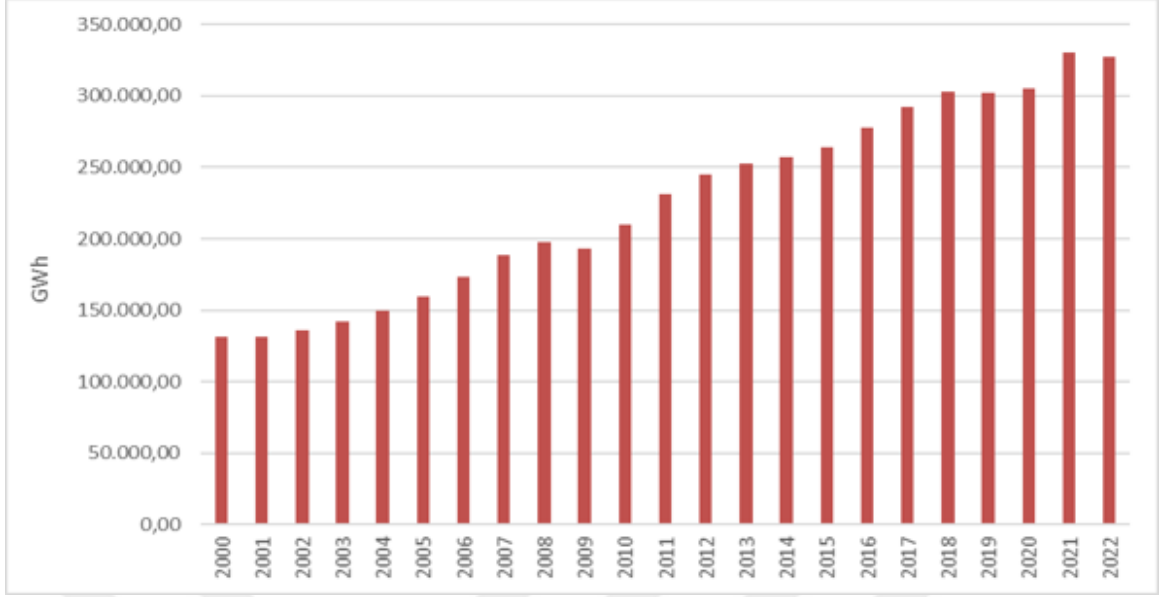
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elektrik enerjisi, üretildiği noktadan uzun mesafeler boyunca taşınarak tüketicilere ulaştırılır. Elektrik santrallerde üretilir, ardından son tüketim noktasına iletilmek için yüksek gerilim seviyesinde trafo merkezlerine taşınır. Trafo merkezlerinde dağıtım seviyesine düşürülen elektrik enerjisi, dağıtım merkezlerinde alçak gerilim seviyesine indirilerek tüketicilere ulaştırılır. Üretim santrallerinden tüketicilere kadar olan bu altyapı sistemi elektrik şebekesi olarak tanımlanır. Elektrik şebekesi iletim hatları, dağıtım hatları, transformatörler, transformatör merkezleri, kesici, ayırıcı, koruma röleleri ve sigortalar gibi çeşitli güç cihazlarını içerir.

Elektrik tüketimi modern toplumların yaşam standartlarını belirleyen ekonomik, sosyal ve çevresel etkilere sahiptir. Günümüzde elektrik enerjisine olan talep dünya nüfusunun artması, sanayi bölgelerinin gelişmesi, gelişen teknolojiyle birlikte artan elektrifikasyon, elektrikli araçların şebeke entegrasyonları gibi faktörlere bağlı olarak hızla artmaktadır.

Türkiye’de fiili elektrik tüketim miktarları Şekil 1’de paylaşılmıştır. Son 22 yılda 2001, 2009, 2019 ve 2022 yıllarında fiili tüketim miktarları bir önceki yıla göre azalış göstermiştir. 2022 yılında bir önceki yıla göre fiili tüketim %1 azalış göstermiştir.



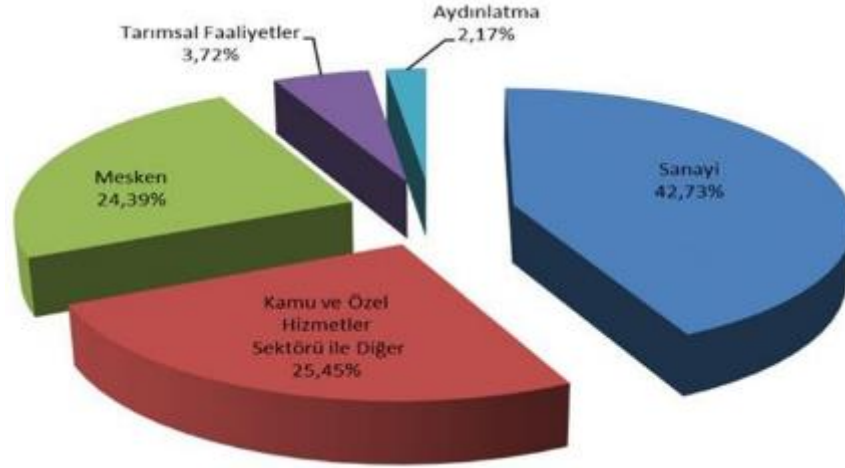
Şekil 1. Türkiye fiili tüketim miktarının yıllara göre değişimi (GWh) (URL-1, 2023)

Fiili tüketim miktarlarından iç ihtiyaç ile teknik ve teknik olmayan iletim ve dağıtım seviyesindeki kayıplar çıkarıldığında, 2018-2021 yılları arasındaki net elektrik tüketim verileri Tablo 1’ deki gibi olmaktadır.

Tablo 1. 2018-2021 Yılları arası Türkiye net elektrik tüketimi (GWh) (URL-2, 2023)

	2018	2019	2020	2021
Fiili Tüketim	304.166,9	303.320,4	306.109,0	332.871,2
İç İhtiyaç	14.299,7	14.761,8	14.039,0	15.183,1
İletim Kayıpları	5.120,3	5.585,2	4.956,5	5.368,5
Dağıtım Kayıpları	26.514,7	25.700,3	24.411,4	25.627,8
Net Tüketim	258.232,2	257.273,1	262.702,1	286.691,5

2022 yılı net elektrik tüketimi verileri, 2023 yılı raporlarında “Resmi İstatistik Programı” kapsamında yayınlanacaktır. Aynı şekilde 2023 yılı net elektrik tüketim verileri, 2024 yılı raporlarında “Resmi İstatistik Programı” kapsamında yayınlanacaktır. Bu nedenle Tablo 1’de, 2022 ve 2023 yılı verilerine yer verilmemiştir.



Şekil 2. 2022 yılı faturalanan tüketimin tüketici türüne göre dağılımı (%) (URL-1, 2023)

Tablo 2. Faturalanan tüketimin tüketici türü bazında yıllar itibariyle gelişimi (URL-1, 2023)

Tüketici Türü	Tüketim Miktarı MWh			
	2019	2020	2021	2022
Sanayi	94.462.699	99.635.062	111.762.705	108.369.171
Kamu ve Özel Hizmetler Sektörü ile diğer	65.150.389	57.328.859	60.839.211	64.550.205
Mesken	56.389.775	60.437.634	61.603.820	61.868.288
Tarımsal Faaliyetler	8.553.367	10.947.411	13.497.475	13.332.526
Aydınlatma	5.041.683	5.048.410	5.353.694	5.501.261
Genel Toplam	229.597.914	233.397.377	253.056.905	253.621.451

Elektrik enerjisine olan talep, elektrik şebekesini zorlayacak derecede artış göstermektedir. Artan bu enerji talebini karşılamak adına yeni elektrik santrallerinin devreye alınması gerekmektedir. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi geleneksel enerji kaynakları, çevre ve sürdürülebilirlik bakımından tehlike oluşturmaktadır. Bu bağlamda yeni enerji kaynaklarının, enerjinin güvenli, verimli ve daha kontrol edilebilir şekilde iletilmesine olanak sağlayan şebeke yapılarının geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Elektrik üretiminde rüzgâr, dalga-gelgit ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları geleneksel enerji kaynaklarına karşı iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekesine entegrasyonunda güneş ve rüzgâr gibi enerji kaynaklarının değişken doğası nedeniyle enerji tedarikinde dalgalanmalar, gerilim ve frekans dalgalanmaları, yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut elektrik altyapısı sistemine uyum zorlukları ve altyapı yenileme gereksinimleri gibi sorunlar bulunmaktadır. Öte yandan güneş enerji santralleri, kapasitif etkilerinden dolayı şebekede harmoniklerin

meydana gelmesine sebebiyet vermektedir. Oluşan harmonikleri filtrelemek, ek bir teçhizat ihtiyacı doğurmakta ve bu da şebeke yöneticilerine fazladan maliyet oluşturmaktadır. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarını tercih etmek çevre ve sürdürülebilirlik açısından olumlu olsa bile bu kaynakların plansız bir şekilde kullanımı şebeke üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

Klasik elektrik şebekesindeki teçhizatlar bugünün ihtiyaçlarına cevap verebilmek adına gelişen teknolojiye ayak uydurmakta ve daha izlenebilir, kontrol edilebilir, haberleşebilen, güvenli ve etkin bir hâl almaktadır. Şebekenin birçok noktasından akıllı ölçüm cihazları, haberleşme altyapısı kullanılarak veriler toplamakta ve bu veriler anlamlandırılarak şebeke yönetim süreçlerinde değerlendirilmektedir. Tüm bu süreci daha etkili yönetebilen şebeke yapısı akıllı şebeke olarak tanımlanmaktadır.

Akıllı şebeke, şebekeye bağlı tüm kullanıcıların yani üretim, iletim, dağıtım ve tüketim faaliyeti gösterenlerin faaliyetlerini; ekonomik, sürdürülebilir ve güvenli bir şekilde sürdürebilmesini akıllıca sisteme entegre edebilen elektrik şebeke yapısıdır. Akıllı şebeke, bilgi ve haberleşme teknolojisi, çevresel sürdürülebilir sistemler ve güç elektroniği gibi ileri teknolojileri kullanarak daha verimli bir enerji sistemi oluşturur. Akıllı şebekeler, saldırılara ve doğal etkenlere karşı olan riski azaltan ve daha iyi güvenilirlik sağlayan yaygın üretim ünitelerini kullanır (Çolak vd., 2020). Akıllı şebekeler, güç kaynaklarının verimliliğini, izlenebilirliğini ve kontrol edilebilirliğini, sürekliliğini ve güvenilirliğini artırmak için bilgisayar destekli kontrol ve otomasyon sistemlerinden faydalanan elektrik güç sistemleri olarak da tanımlanabilir.

1.2. Akıllı Şebekeler

Elektrik şebekesi dört temel birimden oluşmaktadır. Bunlar üretim, iletim, dağıtım ve tüketimdir. Akıllı şebeke, şebekeye bağlı tüketicilere verimli, güvenli, sürekli ve ekonomik elektrik enerjisinin tedarikini amaçlar. Klasik elektrik şebekesine göre bir dizi iyileştirme ve eklentiler içermektedir.

Akıllı şebekeler, çift yönlü haberleşme ve enerji akışına olanak sağlayan, etkin, erişilebilir, esnek, sürdürülebilir, kararlı, güvenli ve ölçeklenebilir bir yapıya sahiptir. Akıllı şebekeler, dijital iletişim ve kontrol teknolojilerini kullanarak elektrik üretimi, iletimi ve tüketimi arasında çift yönlü ve etkili iletişim sağlar. Klasik şebeke yapısının aksine, akıllı şebekeler, tüketici taleplerine daha hızlı yanıt verebilirler. Akıllı şebekeler, akıllı ölçüm

cihazları aracılığıyla şebekenin birçok noktasından veri alabilir ve bu veriler şebekenin işletilmesinde kullanılır. Akıllı şebeke sayesinde var olan enerji daha iyi yönetilerek, devreye alınacak yeni tesislerin çevresel, sosyal etkilerinin azaltılabılmesinin yanı sıra, yatırım maliyetleri de azaltılabilmektedir.

Klasik elektrik şebekesi ile akıllı şebeke arasında çok net bir akıllılık çizgisi bulunmamaktadır. Yani elektrik şebekesi her zaman biraz akıllık içermektedir. Klasik elektrik şebekesi yapısı içerisinde de akıllı şebeke özellikleri arasında sayılan özellikleri bulundurmaktadır. Akıllı şebeke ve klasik (geleneksel) şebeke arasında, zaman ve işlevsellik açısından net bir ayrım yapılamaz (Palensky ve Kupzog, 2013).

Tablo 3. Akıllı şebeke ve geleneksel şebeke karşılaştırması

Özellikler	Akıllı Şebeke	Geleneksel Şebeke
Tüketici katılımı	Aktif tüketici katılımı bulunmakta	Tüketici katılımı pasiftir.
Dağıtık Üretim Kaynaklarının (DÜK) şebekeye entegrasyonu	DÜK şebeke entegrasyon sorunları bulunmamakta	DÜK entegrasyon problemleri vardır.
Yeni hizmet, ürün ve pazar fırsatları	Tüketiciler için iyi entegre olmuş yeni piyasa teklifleri, hizmet ve ürünler sunar	Sınırlı ve zayıf tüketici fırsatları içerir
Şebeke varlıklarının optimizasyonu	Şebeke varlıklarından büyük ölçüde verilerin toplanması	Operasyonel verilerin varlıklarla çok az eşleştirilmesi
Doğal afet ve siber saldırılara karşı dayanıklılık	Doğal afet ve siber saldırılara karşı dayanıklı ve hızlı toparlanma kapasitesi	Siber saldırılara karşı nispeten savunmasız ve doğal afet durumlarında yavaş tepki
Sistem arızalarının tahminlenmesi ve kendi kendini onarma	Arızalar otomatik algılanarak cevap üretilir ve daha fazla tüketicinin etkilenmesi önlenir	Arıza durumlarında daha fazla hasarı önlemek için koruma tepkisi gösterir
Şebeke Topolojisi	Ağ şebeke	Radyal şebeke
Yenileme	Manuel	Merkezileştirilmemiş kontrol
Güvenilirlik	Statik çevrimdışı model ve benzetimlere dayalı	Gerçek sistem verileriyle proaktif gerçek zamanlı tahminler
Yük akış kontrolü	Daha kapsamlı	Kısıtlı
Üretim	Merkezi ve merkezi olmayan DÜK entegrasyonları	Merkezi üretim planlaması
Operasyon ve Bakım	Dağıtılmış izleme (birçok noktadan şebeke analizi), teşhis ve tahmine dayalı	Manuel
Reaksiyon hızı	Hızlı reaksiyon zamanı	Yavaş reaksiyon zamanı
Maliyet	Yüksek	Düşük

Tablo 3’te akıllı şebeke ve geleneksel şebekeye dair özellikler üzerinden bir kıyaslama sunulmaktadır. Geleneksel şebekenin topolojisi merkezi elektrik üretim santralleri göz önünde bulundurularak planlanmış ve uygulanmıştır. Akıllı şebeke topolojisinde daha dağıtık bir mimari bulunmaktadır. Yani şebekedeki daha fazla fiziksel varlığın adaptif kontrol ve akıllı algoritmalar kullanarak daha fazla bilgi ve haberleşme teknolojisiyle esnekleştirilen şebekeye entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. (Dileep, 2020; Momoh, 2012). Akıllı şebekenin geleneksel şebekeye göre daha tercih edilebilir olmasının önemli bir sebebi, sahadan akıllı ölçüm cihazları ve sensörler aracılığıyla toplanan veriler şebeke yönetim süreçlerinde kullanılmaktadır. Uçtan uca haberleşmeye imkân tanıyan akıllı şebeke, şebeke yöneticisine şebekenin bakım, arıza durum ve tahminlerine, güvenliğine dair yorumlar sunmaktadır. Tüketicie gerçek zamanlı şebeke verileri sunulmaktadır. Böylece tüketici tüketim modelini ayarlayabilmektedir ve sürdürülebilir enerjiye katkı sunmaktadır. Özetle akıllı şebekede gerçek zamanlı ölçüm, verilerin toplanması ve anlamlandırılması şebeke gereksinimlerini karşılayabilmek adına kilit rol oynamaktadır.

1.2.1. Akıllı Ölçüm (Akıllı Sayaç)

Akıllı sayaç, tüketicinin tüketim bilgilerini ölçen, izleme ve faturalandırma amacıyla bu bilgileri şebeke işletmecisine gönderen gelişmiş bir ölçüm cihazıdır. Akıllı sayaç frekans, gerilim, akım, güç faktörü gibi şebeke parametrelerini ölçerek gerçek zamanlı enerji tüketim verilerini kayıt altına almaktadır. Akıllı sayaç, şebeke işletmecisi ile tüketici arasında çift yönlü iletişimi desteklemektedir. Ayrıca akıllı sayaçlar şebekeden yük atma ve yükü devreye alma özelliğine sahiptirler (Zheng vd., 2013). Çift yönlü enerji akışına da imkân sağlayan akıllı sayaçlar, üreticiler ve üreten tüketiciler tarafından şebekeye verilen enerjinin de takibini gerçekleştirebilmektedir (Strbac, 2008). Akıllı sayaçlar klasik sayaçların işlevlerini yerine getirebilmesine ilaveten, tüm şebeke boyunca bir sensör olarak da konumlandırılabilir.

Tipik bir akıllı sayaç, ölçüm ve iletişim altyapılarını içermektedir. Akıllı sayacın ölçüm birimi fiyatlandırma politikasını, veri yönetim sistemini ve otomatik sayaç okuma sistemini (OSOS) içermektedir. Haberleşme birimi; güç hattı haberleşmesi, power line communication (PLC) veya radyo frekans (RF) gibi kablosuz yöntemleri içermektedir. Akıllı sayaçların iletişim birimi, sayacın merkezle arasında iletişim kurulabilmesini, kontrol komutlarının uygulanmasını sağlayan ağ yapısını içermektedir (Kabalıcı, 2016).

Şebeke boyunca tıpkı bir sensör gibi sahadan veri toplayan akıllı sayaçlar tarafından toplanan veriler, aşağıdaki işlemler için kullanılabilir (Yeung ve Jung, 2013).

- Kesinti tespiti ve hızlı müdahale
- Tüketicilerin şebeke durumları hakkında bilgilendirilmesi
- Şebeke varlık planlamalarında doğruluğu arttırarak kesinti sıklığı ve kesinti sürelerini azaltmak

Şebeke işletmecileri kesinti sıklıkları ve kesinti süreleri üzerinden bonuslara veya cezai işlemlere tabi tutulmaktadırlar. Kesintilerin sayısının ve sürelerinin azaltılmasıyla beraber, şebeke işletmecisi cezai işlemlerden kurtulmaktadır ve müşteri memnuniyeti artış göstermektedir.

Türkiye Akıllı Şebeke 2023 (TAŞ 2023) projeksiyonu kapsamında akıllı şebeke dönüşümü ve ölçüm sistemlerinin uçtan uca akıllı bir yapıda tanımlanması amacıyla Milli Akıllı Sayaç Sistemleri (MASS) projesi geliştirilmektedir.

MASS ana bileşenleri aşağıdaki donanım ve yazılımlardan oluşmaktadır:

1. Akıllı sayaç
2. Modem
3. Merkezi haberleşme yazılımı
4. Data yoğunlaştırıcı
5. Kullanıcı mobil uygulaması

Türkiye şebekesi içerisinde temelde iki çeşit akıllı sayaç bulunmaktadır. Bunlar Akıllı Sayaç EKO ve Akıllı Sayaç PRO. Akıllı Sayaç PRO, iki yönlü veri haberleşmesini destekleyen sayaçları tanımlamaktadır. Akıllı sayaç EKO, PRO sayaçlara göre kısıtlı özelliklere sahip olan yani çift yönlü haberleşme modülü bulunmayan sayaçları tanımlamaktadır (URL-3, 2023).

Kullanıcı mobil uygulamasının sayaç yeteneklerine bağlı olarak bulundurduğu bazı özellikler:

- a) Uygulama tüm mobil işletim sistemlerini faaliyet gösterebilmektedir.
- b) Tüketiciler, kullanım bilgilerini saatlik, günlük, aylık ve yıllık olarak takip edebilmektedir.
- c) Geçmişe yönelik tüketimler üzerinden görsel analizler sunmaktadır.
- d) Günlük ve aylık ortalama tüketim bilgileri ile aylık tüketimi tarife zaman dilimi bazında göstermektedir.

- e) Beklenmedik aşırı tüketimler, kullanıma kapalı dönemlerde tüketim gerçekleşmesi durumunda uyarı mesajları gönderilmektedir.
- f) Tüketici tarafından belirlenen tüketim miktarının aşılması durumunda uyarı mesajı gönderilmektedir.
- g) Tüketiciler kendi tüketimlerini aynı çevredeki tüketimlerle karşılaştırabilmektedir.
- h) Akıllı sayaç üzerinden alınan gerçek zamanlı veriler belirli bir gecikmeyle mobil uygulamada görüntülenebilmektedir.

Yük profili, 15, 30, 60 dakika (dk) aralıklarla saat başı ile çakışacak şekilde kaydedilmektedir. Alıcının talep etmesi durumunda 1 dk aralıklı şekilde yük profile kaydedilebilmektedir. Aksi belirtilmediği müddetçe varsayılan adım aralığı 15 dk olarak ayarlanmaktadır. Sayaçlar 15 dk adım aralıklı yük profillerini en az 180 gün, 1 dk adım aralıklı yük profillerini en az 30 gün hafızada tutabilmektedir (URL-4, 2019).

Tesisat	Profil Tarihi	Okuma Tarihi	Aktif Endeks	Aktif Endeks Veriş	RC Endeks	RC Endeks Veriş	RI Endeks	RI Endeks Veriş	Gerilim L1	Gerilim L2	Gerilim L3	Akım L1	Akım L2	Akım L3
10027***	15.03.2023 00:00:00	15.03.2023 00:30:18	20.468,64	1,168	348,929	0,014	1.265,570	0,015	219,000	220,000	220,900	0,360	0,370	0,320
10027***	15.03.2023 00:15:00	15.03.2023 01:17:32	20.468,691	1,168	348,932	0,014	1.265,571	0,015	219,000	220,100	220,800	0,360	0,340	0,310
10027***	15.03.2023 00:30:00	15.03.2023 01:17:32	20.468,746	1,168	348,934	0,014	1.265,571	0,015	219,400	220,400	221,100	0,340	0,350	0,310
10027***	15.03.2023 00:45:00	15.03.2023 01:17:32	20.468,803	1,168	348,936	0,014	1.265,571	0,015	220,000	221,200	221,800	0,340	0,350	0,320
10027***	15.03.2023 01:00:00	15.03.2023 02:18:03	20.468,859	1,168	348,938	0,014	1.265,571	0,015	219,400	220,600	221,100	0,350	0,350	0,320
10027***	15.03.2023 01:15:00	15.03.2023 02:18:03	20.468,914	1,168	348,941	0,014	1.265,571	0,015	217,200	218,400	219,000	0,350	0,340	0,310

Şekil 3. Örnek yük profili

1.3. Talep Tarafı Yönetimi

Artan enerji talebi sebebiyle talep tarafı yönetimi (TTY) uygulamaları daha da önem kazanmıştır. TTY politikaları sayesinde enerji daha verimli bir şekilde yönetilebilmektedir. Talep tarafı yönetimi, geleneksel düşünceyle tüketim miktarına karşılık olarak üretimi ayarlamak yerine, sistemdeki yüklerin yönetimini ayarlayarak kaynaklarına kullanım etkinliğini arttırmayı amaç edinmektedir (Palensky, 2011).

Talep tarafı yönetiminin geçmişe oranla önem kazanmasına sebep olan bir diğer faktör de akıllı şebekeler kapsamında yaşanan gelişmelerdir. Çift yönlü enerji ve bilgi akışına olanak sağlayan, gelişmiş ölçüm yapısına sahip ve tüketiciyi izleyici rolünden çıkartıp sistemin aktif bir parçası hâline getiren akıllı şebekeler, talep tarafı yönetimini şebeke

genelinde geniş bir ölçekte konumlandırmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca tüm tüketim gruplarının şebekeden gelen sinyallere göre yük yönetiminin otomatik olarak düzenlenmesine olanak sağlamaktadır (Siano, 2014).

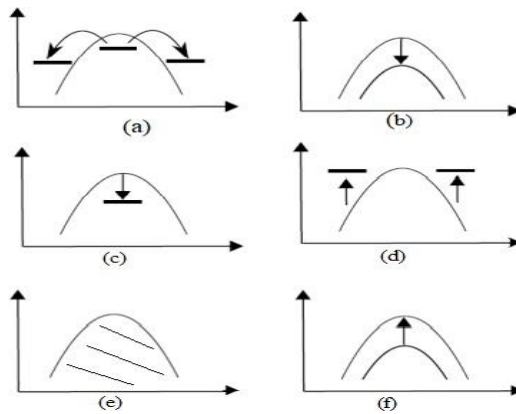
Akıllı şebeke konsepti tüketiciler için gerçek zamanlı tüketim eğrilerinin erişimine ve tüketim alışkanlıklarının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Gelişmiş haberleşme altyapısı sayesinde tüketicinin tüketim profili elde edilebilmektedir ve bu model üzerinden tüketiciye veya tüketici gruplarına özel teşvik ve fiyatlandırmalarla şebeke üzerindeki baskı azaltılabilmektedir. Bu nedenle akıllı şebeke yapısı TTY tekniklerinin uygulanması açısından elverişli olmaktadır.

TTY'nin amaçlarından biri de pik tüketimi azaltmaktır. TTY, şebekeyi daha verimli çalıştırmak için tüketici tarafındaki yüklerin kontrol edilmesini içermektedir. Bu işlem bir yük faktörünün elde edilmesini gerektirmektedir. Yük faktörünün elde edilmesi pik tüketim ile ortalama tüketim arasındaki ilişki ile tanımlanmaktadır (Macedo vd., 2015).

Yük profili; bir günün belirli bir saatine, haftanın bir gününe ve mevsime göre değişkenlik gösterir. Bu bağlamda yük profillerini şekillendirmek amacıyla sıklıkla kullanılan altı farklı TTY yöntemi bulunmaktadır.

Bunlar;

- Pik azaltma
- Düşük talep zamanlarını doldurma
- Yük kaydırma
- Stratejik yük büyütme
- Stratejik tasarruf
- Esnek yük şekillendirme olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 4. TTY teknikleri

Yük Kaydırma, yoğun kullanım saatlerinin yoğun olmayan kullanım saatlerine hem pik azaltma (yük kırpma), hem de düşük zaman taleplerini doldurma stratejilerini kullanmaktadır. Yükün genel talepte mevcut olması ve yük kırpma sırasında yükün ortadan kaldırılması açısından pik azaltma (yük kırpma) farklılık gösterir.

Stratejik Tasarruf, şebeke işletmecisi tarafından tüketiciye sunulan teşviklerle mevsimsel enerji tüketiminin azaltılması yöntemidir. Bu oldukça kapsamlı bir tekniktir. Ancak bir yük yönetim şekli olarak fazla tercih edilmemektedir. Çünkü bu teknik elektrik satışlarında düşüşe sebep olur. Bu düşüşle beraber tüketicinin tüketim eğrisi de yeniden şekillenir. Üstelik yeniden şekillenen bu yük eğrisi her zaman pik talebi azaltma yönünde olmayabilir (Depnath vd., 2017; Bakare vd., 2023).

Pik Azaltma (Yük Kırpma), yük eğrisindeki pik noktaların yoğun talep anlarında azaltılmasıdır. Bu teknik tüketicinin yüklerini doğrudan azaltarak, eşzamanlı olarak talep ve yoğun zamanları azaltmaktadır.

Düşük Talep Zamanlarını Doldurma, sistem dengesini sağlamak için tüketim maliyetinin düşük olduğu zamanlarda tüketimi arttırmaya dayanmaktadır. Bu durumda pik talep değişmez ve toplam tüketim miktarı artmaktadır.

Esnek Yük Şekillendirme, gerçek sistem koşullarını korumak için tüketicinin, belirli teşvik veya yük sınırlayıcı cihazlar kullanılarak tüketiminin azaltılması amaçlanmaktadır.

Stratejik Talep Büyütme, mevsimsel enerji kullanımının yönetilmesiyle beraber bir mevsimdeki puant talep arttırılmaktadır. Hem puant talepte hem de enerji tüketiminde ciddi artışlar yaşanmaktadır.

Talep Tarafı Yönetimi, özellikle pik dönemlerde elektrik arzı ve talebini dengelemede kritik bir rol oynamaktadır.

1.4. Yük Yönetimi

Yük yönetimi bir talep tarafı uygulamasıdır. Puant talebin azaltılması, müşteri konforunun artırılması, kârın maksimize edilmesi gibi yönlere sahiptir. Yük yönetimi programları, üretim tesislerinden maksimum düzeyde ve en verimli şekilde faydalanmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemler yükü düşük talep anlarına kaydırma veya yoğun yük anlarında gerekli enerji miktarını, fiilen yük azaltılmasını sağlayarak gerçekleştirmektedir. Yük yönetimi, doğrudan yük kontrolü ve dolaylı (endirekt) yük kontrolü olarak iki sınıfta

incelenmektedir. Bu yöntemler, enerji tüketimini optimize etmeye, şebeke istikrarını artırmaya ve enerji verimliliğini teşvik etmeye yardımcı olmaktadır (Dokuyucu, 2001).

Doğrudan yük kontrolü (DYK), yük atma kontrolüne dayanmaktadır. Tüketici yük tüketim kontrolü tüketicinin izin verdiği yüklerine doğrudan yük kontrolü ile gerçekleştirilebilmektedir. DYK, tüm tüketim gruplarında puant zamanlarda şebeke yükünü hafifletecek klima, aydınlatma, soğutucu vb. yükleri hedef almaktadır. Bu cihazları geçici olarak devreye sokarak veya devreden çıkartarak enerji kullanımını ve genel elektrik tüketimini azaltabilmektedir.

Dolaylı (endirekt) yük kontrolü (EYK), tüketici davranışlarını, teşvikleri, eğitimi ve teknoloji odaklı girişimleri kullanarak tüketicilerin tüketimlerini etkileyen bir yöntemdir. DYK 'nin aksine EYK, tüketicilerin cihazlarını doğrudan hedef almaz. Bunun yerine, talep yanıtı programları ve verimlilik önlemleri aracılığıyla genel talebi kaydırmayı veya azaltmayı amaçlar.

Doğrudan yük kontrolü ve dolaylı yük kontrolü, talep yönetiminin ayrılmaz birer parçası olup, enerji tüketimini optimize etmeye, şebeke güvenilirliğini ve sürdürülebilirliği artırmaya katkı sağlar.

Talep Tarafı Yönetimi, elektrik şebekelerinin devamlılığını sağlamak ve elektrik tüketimini optimize etmek için önemli bir araçtır. Talep yanıtı programları, akıllı şebeke teknolojileri, enerji verimliliği kampanyaları ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi stratejiler, gelecekteki enerji talebi ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri için kritik öneme sahiptir.

1.5. Talep Yanıtı

Talep yanıtı (TY), tüketicilere elektrik tüketimlerini izleme, maliyetlerini minimuma indirme ve tüketim alışkanlıklarını değiştirme fırsatı sunmaktadır. Elektrik tarifeleri ve TY programları; üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin verimliliğinde aktif rol oynar. Talep yanıtı programları, elektrik talebini yönetmek ve enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak için yaygın olarak kullanılan stratejilerdir. Bu programlar, genellikle teşvik bazlı ve fiyat bazlı talep yanıtı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir.

Her iki talep yanıtı stratejisi de elektrik talebini yönetme ve enerji sistemlerinin etkinliğini artırma açısından önemlidir. Ancak, fiyat bazlı ve teşvik bazlı yaklaşımlar arasında farklı teşvik mekanizmaları ve uygulama stratejileri bulunmaktadır.

Fiyat Bazlı Talep Yanıtı (FBTY), elektrik tüketim bedellerindeki değişim, şebeke yöneticisi tarafından doğrudan tüketiciye aktararak günün farklı saatlerinde elektrik bedelinin ödenmesini sağlamaktadır. Değişken tarife yapısıyla tüketici kullanım şeklini etkilemektedir. FBTY, temelde üç fiyatlandırma stratejisine sahiptir. Bunlar kullanım zamanı fiyatlandırması, gerçek zamanlı fiyatlandırma ve kritik pik fiyatlandırmasıdır.

- Kullanım Zamanı Fiyatlandırması (KZF) modelinde değişken bir tarife yapısı çerçevelenmiştir. Bu modelde, gün içerisinde elektrik tarifesini zaman dilimlerine göre sınıflandırılmaktadır. Kullanım zamanı fiyatlandırmasında fiyatlar mevsimsel veya aylık gibi belirli tüketim dönemlerinden sonra değişkenlik göstermektedir. Bu açıdan statik bir yapıya sahiptir.
- Kritik Pik Fiyatlandırması (KPF), şebeke yöneticisi tarafından belirlenen puant talep gücünün aşılması durumunda tüketiciyi daha yüksek bir fiyattan tarifelenerek tüketiminin daha az yoğun saatlere kaydırılmasını amaçlar. Bu yöntem teşvik bazlı talep yanıtı program olan Pik Zaman İndirimi stratejisiyle karışıklık gösterebilir. Ancak Pik Zaman İndirimi stratejisi, belirli puant dönemlerde tüketiciler tüketimlerini azalttığında, bu azalmaya karşılık maddi teşvik alırlar. Özetle, PZI tüketicilere pozitif bir teşvik sunarken, KPF daha çok tüketicileri puant saatlerinde cezalandırarak elektrik tüketimlerini azaltmaya teşvik eder. KPF, sınırlı bir yoğun kullanım döneminde sabit bir fiyatlandırma stratejisidir. Kullanım zamanı fiyatlandırmanın bir katmanıdır. KPF, yılda az sayıda saatle sınırlıdır.
- Gerçek zamanlı fiyatlandırma (GZF) stratejisinde tüketiciler günlük veya saatlik olarak değişkenlik gösteren fiyat sinyali bildirimi alırlar. Gerçek zamanlı fiyatlandırma, elektrik fiyatlarının anlık arz-talep durumlarına göre sürekli olarak değiştiği bir fiyatlandırma modelidir. Bu modelde elektrik fiyatları talebin en yüksek olduğu anlarda en yüksek seviyededir. GZF, elektrik piyasasındaki anlık değişikliklere daha hızlı tepki verebilmekte ve fiyat sinyalleri aracılığıyla talebi yönlendirebilmektedir. Elektrik talebi fazla esnek olmayan kullanıcılarda gerçek zamanlı fiyatlandırma politikası etkin olmayacaktır.

Üç fiyatlandırma politikası karşılaştırıldığında gerçek zamanlı fiyatlandırma stratejisi en az yaygın kullanıma sahip olanıdır. GZF için akıllı sayaçlar gibi teknolojiler destek amaçlı

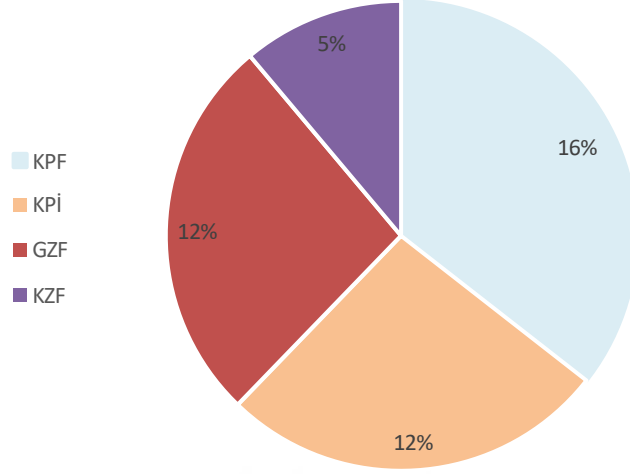
kullanılmaktadır. GZF’de elektrik perakende satış fiyatlarıyla ve tüketici geri bildirimleriyle bağlantılı olması gerekmektedir. Bunun için çift yönlü iletişime ve ölçüm hassasiyetine ihtiyaç vardır. Kullanım Zamanı Fiyatlandırması, günde iki seviyede fiyatlandırma (en yüksek ve en düşük fiyatlar) veya üç seviyeli fiyatlandırma (en yüksek fiyat, kısmi yüksek fiyat ve en düşük fiyat) seviyelerine sahiptir. Yoğun saatler ve fiyatlar tüketiciler tarafından önceden bilinmektedir. Fiyatlar mevsimsel değişkenlik gösterebilmektedir. KPF, elektrik fiyatlarının önemli ölçüde artırılmasını içermektedir. Sistem kararlılığı tehdit altında olduğunda, örneğin çok sıcak bir günde kesintiler meydana geldiğinde, artan tüketimin sebep olduğu yüksek elektrik satış fiyatları oluşmaktadır (Hu vd.2015; Stormback vd., 2011).

Tüm bu stratejilerin arkasındaki ana fikir, farklı saatlerdeki fiyat teşviklerini veya cezalandırmalarını kullanarak tüketicilerin esnek yüklerini daha az yoğun saatlere kaydırarak kapasite artırımının önüne geçmek ve puant tüketim noktasının daha düşük bir değere çekilmesidir (Panda vd., 2023).

Bu üç fiyatlandırma modeli, elektrik tüketimini yönetmek ve talebi dengede tutmak için farklı stratejiler sunmaktadır. Tüketicilerin tercihlerine, kullanım alışkanlıklarına ve fiyat duyarlılıklarına bağlı olarak, her bir strateji farklı avantajlar ve dezavantajlar sunabilir.

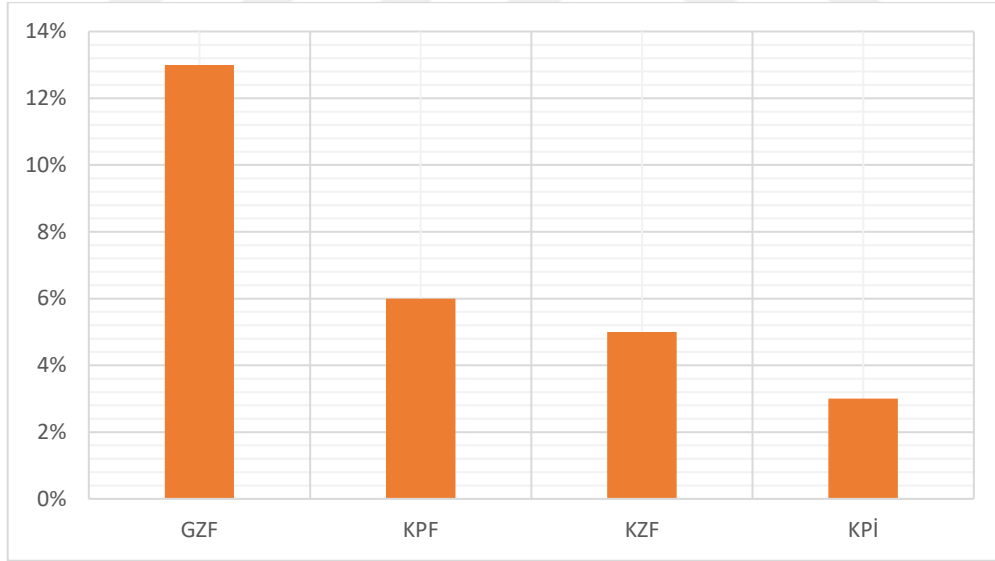
158 bin katılımcı ile gerçekleştirilen fiyatlandırma politikaları pilot çalışmasında dört farklı fiyatlandırma politikası, tüketim bedelinin en yüksek olduğu zamanlarda ortalama yük değişimi ve elde edilen tasarruf incelenmiştir. Şekil 6’da fiyatlandırma politikalarının tüketim fiyatlarının yüksek olduğu anlardaki ortalama yük değişimini yüzde cinsinden göstermektedir. GZF ve KZF, KPF ve Kritik Pik İndirimi (KPI)’ne göre daha düşük değişim göstermiştir. Ancak KZF ve GZF günlük olarak gerçekleşirken, KPF ve KPI yalnızca kritik yoğun dönemler için azalma sağlamaktadır (Stormback vd. 2011).

Yük Azaltımı (%)



Şekil 5. Dinamik fiyatlandırma politikaları yük azaltma potansiyelleri

Şekil 6’da tüm fiyatlandırma politikalarının tüketici faturaları üzerindeki azaltma etkisi gösterilmiştir. Buna göre en iyi başarıyı GZF politikası, onun ardından sırasıyla KPF, KZF ve KPI göstermiştir.



Şekil 6. Fiyatlandırma politikaları tüketici fatura indirimi potansiyeli

Türkiye’de elektrik tüketim bedelleri Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından belirlenmektedir. Tüketiciler iki türlü fiyatlandırma stratejisinden faydalanabilmektedir. Bunlar tek zamanlı tarife ve üç zamanlı tarifiedir. Üç zamanlı tarife, kullanım zamanı fiyatlandırma politikasıdır. Gün, üç seviyeli fiyatlandırmaya sahiptir. Tablo 4’te üç zamanlı tarife zamanları bulunmaktadır.

Tablo 4. Üç zamanlı tarife

	Dönem
T1	Gündüz (06.00-17.00)
T2	Puant (17.00-22.00)
T3	Gece (22.00-06.00)

1.6. Talep Yanıtının Faydaları

Akıllı şebeke yapısının sağladığı teknolojik imkanlar göz önünde bulundurularak talep yanıtının faydaları incelendiğinde, çift yönlü iletişim altyapısı ve akıllı ölçüm cihazları ile son kullanıcı sisteme entegre edilir. Talep yanıtı programları kullanılarak tüketimin yoğun olduğu dönemlerde kısa süreli kullanmak üzere yeni tesislerin devreye alınması yerine, tüketiciden yükü kesme, yükü başka bir zamana erteleme taleplerinde bulunarak hem maliyet azaltılması hem de kurulacak olan tesisten salınacak olan sera gazlarının önüne geçilerek sürdürülebilirlik sağlanmış olur. Talep yanıtının sisteme kattığı esneklik, yenilenebilir enerji üretimindeki dalgalanmaları tolere için kullanılabilir (Madsen vd., 2014).

1.7. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, giderek artan enerji tüketimine çözüm olarak yeni üretim santrallerini devreye almak yerine, var olan enerjinin tüketici ve şebeke işletmecisi ortaklığında daha etkin bir tüketim modeli oluşturmaktır. Optimizasyon tabanlı maliyet ve puant güç talebi minimizasyon işleminde, bir mesken tipi tüketicinin bir gününe ait tüketimi, tüketicinin günlük tüketim miktarını etkilemeden, tüketimin dolu kullanım saatlerinden boş kullanım saatlerine aktarılmasıyla oluşan yeni koşullarda puant güç talebi ve tüketici günlük maliyetinin minimize edilmesini sağlamaktadır.

Optimize edilen amaç fonksiyonu; optimize edilen cihazların güç değerlerini, cihazların optimize edilen zaman dilimindeki açık veya kapalı olma durumlarını, önerilen fiyat tarifesini ve kısıtlarını dikkate almaktadır. Optimizasyon problemi, Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Yıldırım Arama Algoritması (YAA) meta-sezgisel algoritmaları kullanılarak çözülmüştür. Amaç fonksiyonunun bir parçası olan fiyat tarifi, Türkiye'deki 3 zamanlı tarife ve bu tarifiedeki fiyatlar kullanılarak, tüketim değerleri

üzerinden belirlenmiş olan bir kuralla oluşturulan gerçek zamanlı fiyatlandırma politikası kullanılmıştır.

Kullanılan optimizasyon algoritmaları:

- GA
- PSO
- YAA

Kullanılan Fiyatlandırma politikaları:

- KZF
- GZF

Bu çalışma kapsamında oluşturulan model, dağıtım transformatörlerinin aşırı yüklenmesinin önüne geçmeyi, şebeke işletmecisi tarafından enerji sürekliliğinin sağlanmasını, hat kayıplarının azaltılmasını, şebeke bozucu parametrelerin minimize edilmesini ve/veya ortadan kaldırılmasını, tüketicinin tüketim eğrisinin düzleştirilmesini amaçlamaktadır. Böylece şebeke işletim koşullarının iyileştirilmesine ve maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlanabilecektir.

1.8. Literatür Özeti

Silva vd. (2024), Karınca Kolonisi Algoritması (KKA) ve Genetik Algoritma kullanılarak oluşturulan hibrit bir optimizasyon algoritması kullanarak sezgisel optimizasyona dayalı talep tarafı yönetimine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Önerilen hibrit algoritma hem tek bir mesken kullanıcısı hem de topluluklar için benzetilmiştir. Benzetim sonuçları mevcut KKA ve Mutasyona uğratılmış KKA'sına (MKKA) kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Tekil mesken kullanıcısı senaryosunda hibrit algoritma, KKA ve MKKA'sına kıyasla elektrik maliyetlerini azaltma bakımından sırasıyla %13.26 ve %7.51 azalma sağlanmıştır.

Khan vd. (2018), yaptıkları çalışmada maliyet ve şebeke faktörünü azaltmak amacıyla Enerji Yönetim Kontrolcüsü önermiştir. İki farklı meta sezgisel optimizasyon algoritmasıyla maliyet ve şebeke faktörü (PAR) azaltılmasını hedeflemiştir. Çalışmada Çilek Algoritması (ÇA) ve geliştirilmiş Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA), optimize edilmeyen durumlarla kıyaslanmıştır. Benzetim sonuçlarında her iki algoritmayla gerçekleştirilen optimizasyonlar planlanmayan duruma göre daha iyi sonuçlar vermiştir. İki optimizasyon algoritmasının başarımları kendi aralarında kıyaslandığında maliyeti minimize etme

işleminde ÇA, DEA'ya göre %30 daha az maliyet oluşturmuştur. PAR azaltılması amacıyla ise DEA, ÇA'ya göre %30 daha iyi bir başarımlı göstermiştir. Yapılan bu çalışmada fiyatlandırma politikasının gerçek zamanlı fiyatlandırma olduğu belirtilmektedir.

Alsollout (2020), Puant güç talebini ve enerji maliyetlerini minimize etmek amacıyla Binary Genetik Algoritma ile mesken türünde bir kullanıcının bir günlük elektrik tüketimini optimize etmiştir. Meskende kullanılan yükler kaydırılabilir, kısmen kaydırılabilir, kaydırılamaz ve güç kaydırılabilir olmak üzere 4 gruba ayrılmıştır. Çalışma içerisinde tüm bu grupların amaç fonksiyonu ayrı ayrı oluşturulmuştur ve birlikte temsil edilmiştir. Ayrıca cihazların farklı zaman dilimlerine kaydırılması işleminde 1 gün 255 parçaya ayrılarak yani 5'er dakika aralıklarla optimize edilmiştir. Temsil açısından karışıklığı önlemek adına 24 saat olarak temsil edilmiştir.

Moed ve arkadaşları (2022), yaptıkları bildiride saatlik yük eğrisini düzleştirmek amacıyla Genetik Algoritma tabanlı bir TTY önermiştir. Önerilen yöntem PAR'ı en aza indirebilmek için yükleri yoğun zamanlardan, düşük talep zamanlarına doğru yeniden tahsis etmektedir. Ayrıca yüklerin yeniden konumlandırılacağı zamanlar belirlenirken tüketici konforu da ön planda tutulmaktadır. Çalışma kapsamında yükler kaydırılabilir ve kaydırılamaz yükler olarak iki gruba ayrılmıştır ve iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Birinci senaryo da kaydırılamayan yüklerin toplam tüketimi önceden belirlenen uygunluk değerini aşmakta ve ikinci senaryoda ise toplam talep belirlenmiş uygunluk değerini aşmaktadır. Birinci senaryoda PAR %31, ikinci senaryoda ise %42 oranında azaltılabilmektedir.

Ishaq vd. (2018), Harmoni Arama Algoritması (HAA), Ateşböceği Algoritması (AA) ve Bakteriyel Yiyecek Tarama Algoritmalarını (BYTA) kullanarak maliyeti en aza indirmek, PAR'I azaltmayı hedeflemiştir. Meta sezgisel teknikler kullanılarak yük yoğun saatlerden yoğun olmayan saatlere aktarılmaktadır. Kullanım Zamanı Fiyatlandırması kullanılarak gerçekleştirilen bu optimizasyon işleminde AA'da maksimum tüketim değeri 9 kWh, HAA'da 8,2 kWh ve BYTA'da 8,3 kWh olmuştur. Planlanmayan durumda maksimum tüketim değeri ise 11 kWh'dir. Maliyetin minimize edilmesi amacıyla ise kullanılan algoritmaların tümü programlanmamış duruma göre daha iyi sonuçlar vermiştir. En iyi maliyet minimizasyonu AA'da gerçekleşmiştir. En yüksek maliyet ise HAA'da gerçekleşmiştir. Uygulanan yaklaşımlar planlanmamış maliyetle karşılaştırıldığında maliyet %15 azalmıştır.

Nawaz vd. (2020), yaptıkları çalışmada mesken tüketiciler için Enerji Yönetim Kontrolcüsü önermektedir. Mesken yük yönetimi için önerilen kontrolcü, Binary PSO, GA

ve Hibrit Genetik PSO (HGPSO) kullanarak gün öncesi fiyat bazlı, gerçek zamanlı fiyatlandırma, kapsamında mesken yükünü planlayarak TTY gerçekleştirmektedir. Yükler bu çalışma kapsamında da kaydırılabilir, kısmi kaydırılabilir ve kaydırılmaz yükler olarak gruplandırılmıştır. Önerilen hibrit algoritma maliyet, PAR ve CO_2 salınımının azaltıldığını, tüketici konforunu artırdığını öne sürmektedir. BPSO, GA ve HGPSO algoritmaları kendi aralarında karşılaştırıldığı zaman %20,53 PAR azaltılması ile hibrit algoritma en başarılı azaltma gerçekleştirmiştir. Ardından %13,94 azalma ile PSO ve son olarak %1,87 azaltma ile GA gelmektedir. Maliyetin azaltılmasında ise en başarılı sonuç hibrit algoritmada %11,16 düşüş, ardından BPSO %10,10 düşüş ve son olarak %8 ile GA olmuştur.

Youssef vd. (2023), Lider Beluga Balina Optimizasyonu (LBBO) ve Beluga Balina Optimizasyonu (BBO) kullanarak yük yönetim stratejisi oluşturmak amacıyla Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma tarifesini ile Talep Tarafı Yönetimi uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan 3 farklı senaryo için optimizasyon benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Tüm durumlar için elektrik tüketim maliyetleri ve PAR azaltılması başarılı bir şekilde sonuçlanmıştır. İki algoritmanın kendi içlerinde başarımları karşılaştırıldığında ise Lider Beluga Balina Optimizasyonunun daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

Javaid vd. (2017), yaptıkları çalışmada tüketicilerin yük profillerini düzleştirebilmek için meta-sezgisel algoritma tabanlı bir enerji kontrolörü tasarlanmıştır. Genetik Algoritma, BPSO, YAA, Wind-Driven Optimizasyon (WDO), ve hibrit Genetik WDO (GWDO) olmak üzere toplamda 5 adet algoritma değerlendirilmiştir. Bu algoritmalar GZF koşullarında mesken yüklerinin yoğun saatler ile yoğun olmayan saatler arasında programlamak için kullanılırken tüketici konforunu artırmayı, elektrik tüketim maliyetlerini ve PAR'ı minimize etmeyi amaçlamaktadır. Tek bir mesken tüketicisinin ve birden fazla mesken tüketicisinin yükünün programlanması üzerine tüm bu algoritmalar iki farklı senaryo üzerinde benzetilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde önerilen hibrit GWDO algoritmasının diğer algoritmalarından daha başarılı performans gösterdiği görülmektedir.

Talha vd. (2018), yaptıkları çalışmada TTY için Yapay Balık Sürüsü Algoritması (YBSA) ve Genetik Algoritma performansları değerlendirilmiştir. GZF kullanılarak PAR ve maliyet minimizasyonuna sahip amaç fonksiyonu; yükü yoğun kullanım saatlerinden yoğun olmayan kullanım saatlerine aktararak PAR ve maliyet başarılı bir şekilde azaltılmıştır. YBSA'nın maliyeti GA ile optimize edilen duruma göre %11, optimize edilmemiş durumdaki maliyetten ise %30 daha az olmuştur. YBSA ve GA'nın PAR azaltılması ise sırasıyla %56 ve %48 olarak gerçekleşmiştir.

Ali vd. (2018), yaptıkları çalışmayla Genetik Algoritma, Balık Sürüşü Algoritması (BSA) ve Bakteriyel Yiyecek Arama Algoritmalarının PAR azaltılması ve maliyet minimizasyonu başarımlarını değerlendirmektedir. Planlanmamış durumdaki PAR oranı 7.0423'tür. BSA ile optimize edilmiş durumda 4.1922 olarak ölçülmüştür. Bu durumda PAR %43,99 azalma göstermiştir. Bu azalma miktarı GA'ya göre %4,81, BYAA'ya göre ise %10,1 daha fazla azalma anlamına gelmektedir. BSA ile toplam maliyet planlanmamış maliyetten %33,41 azalma göstermiştir. GA ve BYAA dan ise sırasıyla %8,45 ve %7,70 daha fazla azalma gerçekleşmiştir. Planlanmış durumdaki ve planlanmamış durumdaki maksimum anlık tüketim değerleri karşılaştırıldığında BSA 11.58, GA 12.36 kWh, BYAA 12.52 kWh ve planlanmamış durumda ise 15.97 kWh olmuştur.

Polaki vd. (2015), iki farklı uygunluk fonksiyonu kullanılarak Genetik Algoritma ile tüketim değerleri birbirinden farklı üç tüketici için bir optimizasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Uygunluk fonksiyonlarından ilki tamamen minimum maliyetin en iyi durum olduğuna odaklanmıştır. İkinci fonksiyon da ise kromozomların %90'ının en iyi olduğu kabul edilmiştir ve kromozomların %10'u en kötü olarak kabul edilmiştir. Bu durumun daha iyi sonuçlar verebileceği öngörülmektedir. Gerçekleştirilen benzetim işlemlerinin sonuçları incelendiğinde her iki uygunluk fonksiyonuyla gerçekleştirilen GA ile optimizasyon işlemlerinde planlanmamış duruma göre daha az maliyetler elde edilmiştir. Daha iyi sonuçlar vereceği öngörülen ikinci uygunluk fonksiyonu yalnızca 50 kWh maksimum talebe sahip olan birinci tüketici için birinci uygunluk fonksiyonundan daha iyi sonuç vermiştir.

Makroum vd. (2023), Genetik algoritmayı temel alan, dinamik fiyatlandırma yönteminin kullanıldığı bir ev enerji yönetim sistemi önermektedirler. Fas'taki bir mesken tüketicisinin toplanan gerçek verileri üç farklı senaryoda optimize edilmiştir. Sadece elektrik şebekesinden kullanımın olduğu birinci senaryoda optimizasyon yalnızca şebekeden enerji alan bir meskenin günlük elektrik maliyetini azaltmaya odaklanmaktadır. Kullanıcı konforu da yine üç farklı senaryo ile oluşturulmaktadır. Planlamanın esnek olduğu senaryoda maliyette %33,64 oranında bir azalma görülmektedir. En katı planlama koşullarının geçerli olduğu senaryoda enerji yönetim sisteminin kabiliyetleri sınırlı kaldığından maliyette %4,27 oranında azalma olmuştur. Yalnızca güneş panellerinden sağlanan enerji ile tüketimin gerçekleştiği ikinci senaryoda; kurulması planlanan panel sisteminin tek başına sistemi çalıştıramadığı görülmektedir. Dolayısıyla üçüncü senaryoda tüketim hem şebekeden hem güneş enerjisinden elde edilen enerji ile gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, elde edilen maliyet

azalmaları birinci senaryoya göre daha yüksek olmuştur. En esnek planlamaya sahip durumda maliyette %63,48'lik bir maliyet azalması sağlanmıştır. En katı planlama kurallarının olduğu senaryoda ise %56,24'lük bir maliyet azalması olmuştur. Bu, esnek olmayan senaryoda bile önemli düzeyde maliyet tasarrufu sağlanabildiğini göstermektedir. Jiang & Xiao (2019), Genetik Algoritma tabanlı GZF politikasını kullanan bir mesken tipi tüketici yük yönetim stratejisi önermektedir. Yapılan çalışmanın sonucunda maliyette %29 oranında bir azalma gerçekleşmiştir. Aynı zamanda PAR da %36,2 oranında bir azalma olmuştur.

Abreu vd. (2019), yaptıkları çalışmayla Genetik Algoritma ile Çapraz Entropi (ÇE) metodunu karşılaştırmaktadır. Bu çalışma, enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama formülasyonunu çözmek için düşük güçlü mesken enerji yönetim sistemlerinde GA ve ÇE kullanılmasını önermektedir. Geleneksel deterministik çözücülere karşılık olarak deterministik olmayan optimizasyon yöntemlerin daha az benzetim süresinde deterministik yöntemlerle karşılaştırılabilir çözümler üretebildiği göstermektedir.

Latif vd. (2018), mesken tüketicisinin yükleri baz yük, kesintili kaydırılabilir yük (az esnek yükler) ve kesintisiz kaydırılabilir yük (tamamen esnek yükler) olarak üç ayrı sınıfa ayırmıştır. Kullanım Zamanı Fiyatlandırması kullanılarak Genetik Algoritma, Yarasa Algoritması ve bu iki algoritmanın melezi olarak ortaya çıkartılan Hibrit Genetik Yarasa Algoritmasının maliyet azaltılması, PAR azaltılması ve kullanıcı konforu etkisi 1 saat, 30 dakika ve 15 dakika zaman aralıklı planlamalarla incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda kullanılan tüm algoritmaların belirli parametrelerde diğerlerinden üstünlük kurduğu görülmektedir. Örneğin 1 saatlik ve 30 dakikalık bir planlama yapısında en iyi maliyet azaltılmasını melez algoritma diğerler algoritmalarından daha başarılı olarak gerçekleştirmiştir. Ancak 15 dakikalık planlamada en başarılı performansı Genetik Algoritma göstermiştir. PAR azaltılmasında tüm planlamalar için en başarılı performansı hibrit olarak geliştirilen algoritma göstermiştir. En başarısız olarak görülen ise Genetik Algoritma olmuştur. 10 cihazlı bir meskenin planlamasının gerçekleştirildiği bu çalışmada bazı cihazların çalışma süreleri planlama aralıklarından daha kısa olduğu için planlama zaman sıklılığı arttıkça maliyet düşüşü daha fazla olmaktadır.

Oladeji & Olakanmi (2014), yaptıkları çalışmada GZF stratejisi kullanarak Genetik Algoritma tabanlı mesken bir tüketicinin 5 adet yükünün planlamasının benzetimlerini gerçekleştirmişlerdir. Benzetim sonuçları hem günlük maliyet azaltılması konusunda hem

de saatlik maksimum talebin azaltılması dolayısıyla PAR azaltılması konusunda önerilen sistemin başarılı olarak çalıştığını göstermektedir. Zhao vd. (2013), ise bir meskene veya tüketimi düşük olan bir işletmeye yönelik Enerji Yönetim Sistemine entegre bir model önermektedir. Bu modelde yükler otomatik yönetilebilen cihazlar (Bulaşık makinesi, klima, çamaşır makinesi vb.) ve manuel yönetilebilen cihazlar (Televizyon, bilgisayar vb.) olarak iki ayrı sınıfa ayrılmaktadır. Önerilen modelde de GZF ve Genetik Algoritma kullanılarak Maliyet ve PAR azaltılmasında başarılı sonuçlar alınmıştır.

Youssef vd. (2024), Kel Kartal Arama Algoritması kullanarak 9 adet elektrikli cihaza sahip bir meskenin yük yönetimine odaklanmaktadır. Enerji yönetim sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla dinamik fiyatlandırma yöntemlerini kullanmaktadır. PAR azaltılması ve elektrik faturası üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla orijinal Kel Kartal Arama Algoritması (KKA) ile Geliştirilmiş Kel Kartal Arama Algoritması (GKKA) kıyaslanmıştır ve sonuç olarak iki algoritmanın sonuçlarının birbirinden çok farklı olmadığı görülmüştür. Önerilen GKKA tüm fiyatlandırma stratejilerini kullanmıştır. Kullanım Zamanı Fiyatlandırmasının çalışma kapsamında oluşturulan GZF ve KPF'den daha ekonomik olduğu görülmüştür.

Alghassab (2024), yaptığı çalışmada Suudi Arabistan'ın çeşitli bölgelerinden toplanan sayaç verileri üzerinden bulanık mantık tabanlı, gerçek zamanlı enerji yönetim sistemi önermektedir. Önerilen sistem, bulanık mantık yaklaşımlarını kullanarak enerji kullanımını optimize etmeyi, yoğun talebi azaltmayı ve böylece enerji verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Bulanık karar verme algoritmasıyla; klima, aydınlatma ve elektrikli cihazların kullanıcı tercihiye göre planlaması gerçekleştirilmektedir. Planlama sonrası ve baz senaryo karşılaştırıldığında önerilen sistemin tüm sistem gerekliliklerini başarıyla karşıladığı görülmektedir.

Tablo 5. Özet literatür taraması

Referans Çalışma	Tüketici	Enerji Kaynağı	Kontrol	Metot	FP	Maliyet	PAR	Diğer
Silva vd., 2024	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel (Hibrit)	KKA ve GA	GZF	✓	✓	-
Khan vd., 2018	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	SBA ve DEA	GZF	✓	✓	-
Alsollut 2020	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	BPSO	GZF	✓	✓	-
Moet vd., 2022	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	GA	-	-	✓	-

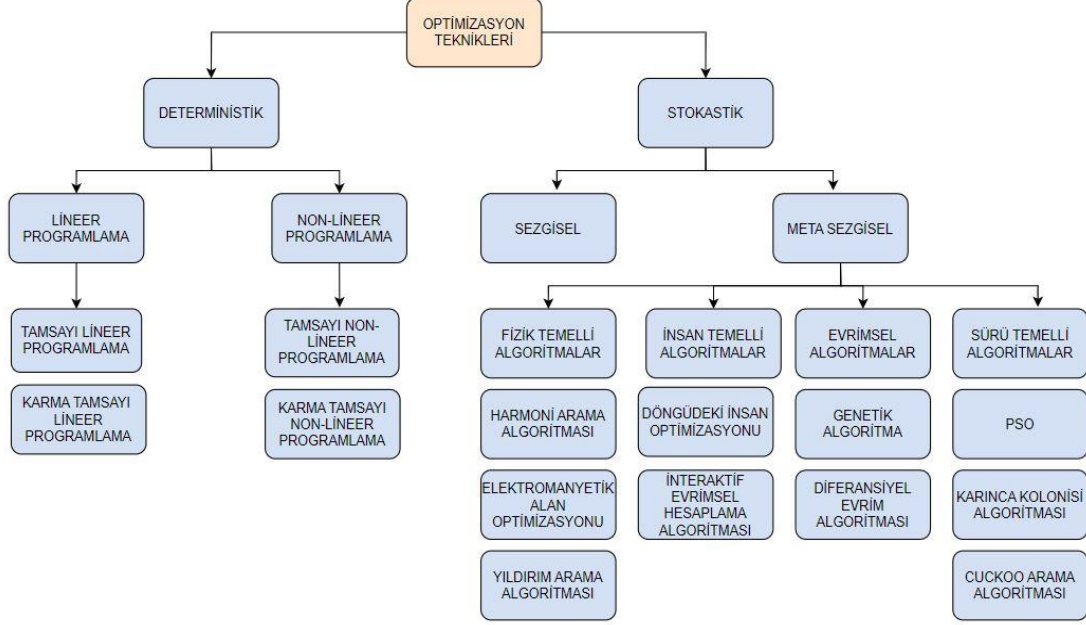
Tablo 5'in devamı

Referans Çalışma	Tüketici	Enerji Kaynağı	Kontrol	Metot	FP	Maliyet	PAR	Diğer
Ishaq vd., 2018	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	HAA, AA ve BYTA	KZF	✓	✓	-
Nawaz vd., 2020	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel (Hibrit)	GA, BPSO ve HGPSO	GZF	✓	✓	CO ₂
Youssef vd., 2023	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	LBBO ve BBO	GZF	✓	✓	-
Javaid vd., 2017	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel (Hibrit)	GA, BPSO, WDO, BYAA ve GWDO	GZF	✓	✓	-
Talha vd., 2018	-	Şebeke	Meta-sezgisel	YBSA ve GA	GZF	✓	✓	-
Ali vd, 2018	-	Şebeke	Meta-sezgisel	GA, BSA ve BYAA	GZF	✓	✓	-
Polaki vd., 2015	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	GA	GZF	✓	✓	-
Makroum vd., 2023	Mesken	Şebeke + GES	Meta-sezgisel	GA	GZF	✓	✓	-
Jiang & Xiao, 2019	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	GA	GZF	✓	✓	-
Latif vd., 2018	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel (Hibrit)	GA ve YA	KZF	-	✓	-
Oladeji & Olakanmi	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	GA	GZF	✓	✓	-
Youssef vd. 2024	Mesken	Şebeke	Meta-sezgisel	KKAA ve GKAA		✓	✓	
Alghassab, 2024		Şebeke	Bulanık Mantık	-	-	-	✓	-

1.9. Talep Tarafı Yönetiminde Optimizasyon Yaklaşımları

Talep tarafı yönetiminde çeşitli optimizasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Her yöntemin etkinliği problemin karmaşıklığına, mevcut hesaplama kaynaklarına ve sistemin belirli kısıtlamaları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Optimizasyon yöntemleri veya algoritmaları özelleştirilmiş bir denklemin çözümünü bulmak için kullanılmaktadır. Optimizasyon yöntemleri tüm eşitlik, eşitsizlik ve kısıtlamaları karşılarken amaç fonksiyonunun en iyi değerlerinin kombinasyonundan oluşur. Optimizasyon, bir fonksiyonun yerel veya global optimumlarının bulunmasıyla ilgilidir. Tüm optimizasyon problemlerini çözecek tek bir optimizasyon algoritması bulunmadığının farkında olunmalıdır (Venter, 2010).

Optimizasyon teknikleri deterministik ve stokastik algoritmalar olarak temelde iki ana başlığa ayrılmaktadır. Şekil 7’ de optimizasyon teknikleri gösterilmektedir.



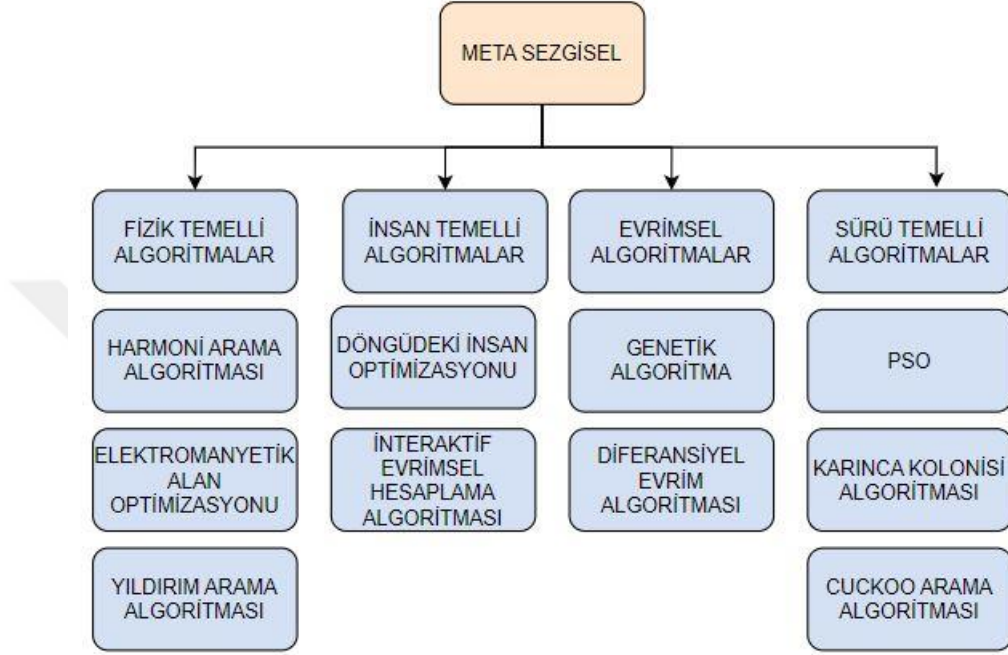
Şekil 7. Optimizasyon teknikleri

Bu tez çalışması kapsamında stokastik optimizasyon tekniklerinin alt başlığı olarak yer alan meta-sezgisel algoritmalarından Fizik Temelli Algoritmalar için Yıldırım Arama Algoritması, Evrimsel Algoritmalarından Genetik Algoritma ve Sürü Temelli Algoritmalarından Parçacık Sürü Optimizasyonu seçilmiş ve problemin çözümündeki performansları açısından kıyaslanmıştır.

1.10. Meta-Sezgisel Algoritmalar

Tarihsel olarak stokastik süreçlere sahip olan yöntemlere sezgisel algoritmalar adı verilmektedir. Meta, seviyenin ötesinde veya daha yüksek anlamına gelmektedir. Meta sezgisel yöntemlerin çoğu doğası gereği deneyseldir. Meta-sezgisel algoritmalar klasik yöntemlerle çözülemeyen problemlerin çözümünde kullanılan optimizasyon algoritmalarıdır. Bu algoritmalar evrimsel, sürü davranışları, insan veya fizik gibi doğal süreçlerden ilham almaktadır. Bu algoritmalar bir problemin global optimumunu bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Genetik Algoritmalar, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Karınca

Kolonisi Optimizasyonu ve Tabu Arama popüler meta-sezgisel algoritmalarıdır. Karmaşık problemlerin çözümünde kısa sürelerde mükemmel çözümler geliştirilebilmektedirler. Bu nedenle optimizasyon problemlerini çözmek için etkili bir strateji olmaktadır (Almufti vd., 2023).



Şekil 8. Meta-sezgisel algoritmalar

1.10.1. Genetik Algoritma (GA)

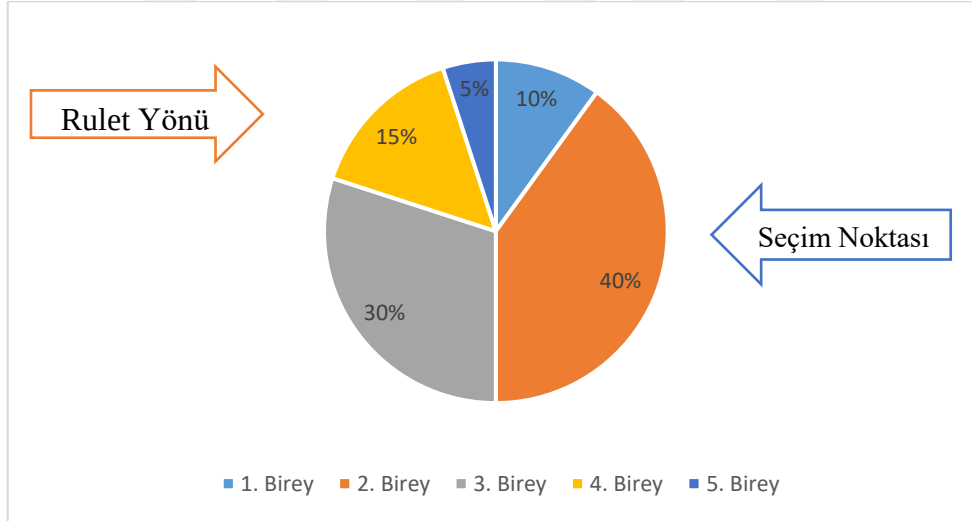
Genetik Algoritmalar (GA), biyolojik süreçlerden ve doğal seçimden ilham alınarak tasarlanmıştır ve çözüm sezgisel (buluşsal) yollarla gerçekleştirilmektedir. GA, uygulamalarda sıkça tercih edilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Temel mantığı bir toplulukta genlerin nesilden nesile aktarılması esnasında kötü genlerin aktarılmasının önüne geçilip daha iyi çözümlere ulaşılmasına dayanmaktadır. GA, rastgele belirlenmiş bir popülasyonla başlamaktadır. Rastgele olarak üretilen popülasyondaki her bir bireyin uygunluk fonksiyonu hesaplanmaktadır ve son olarak seçim, mutasyon, çaprazlama işlemleri uygulanarak yeni bireylerin oluşturulması gerçekleştirilmektedir. Seçim, mutasyon ve çaprazlama genetik operatörlerdir.

Seçim operatörü popülasyondaki en uygun bireyleri düşük uyum gösteren bireylere tercih etmektedir. Uygunluk fonksiyonu düşük olan bir birey yerine uygunluk fonksiyonu

yüksek olan birey ebeveyn olarak tercih edilmektedir. Seçim işleminin ana amacı ebeveynlerinden daha iyi genetiğe sahip çocuklar oluşturabilmektir. Seçim işleminde yaygın tercih edilen bazı yöntemler:

- Rulet Seçimi
- Turnuva Seçimi
- Stokastik Evrensel Seçim
- Elitist Seçim

Rulet seçiminde popülasyondaki tüm bireylerin uygunluk değerleri toplandıktan sonra her bireyin seçilme olasılığı, uygunluk değerinin toplam değere oranıyla oluşturulmaktadır. Şekil 9’da rulet seçiminin mantığı aktarılmaktadır. Belirli bir yönde dönen rulet popülasyondaki birey sayısı kadar parçaya ayrılmıştır. Bireylerin rulet üzerindeki sahip olduğu paylar uygunluk değerlerine göre belirlenmektedir. En büyük paya sahip olan birey uygunluk değeri en yüksek olan bireydir ve seçilme olasılığı rulet üzerinde en düşük paya sahip olan uygunluk değeri en küçük bireye göre daha yüksektir.

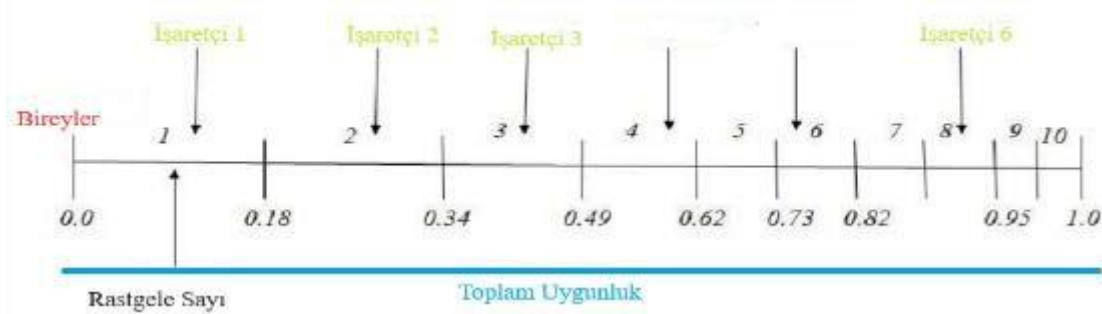


Şekil 9. Rulet seçimi

Turnuva seçimi, popülasyon içerisinde rastgele n adet birey seçilmektedir. Bu bireylerden en yüksek uygunluk değerine sahip olanın doğrudan ebeveyn olarak seçilmesine yönelik bir seçim yöntemidir.

Stokastik evrensel seçim, seçilmesi gereken ebeveyn sayısı N kadar eşit aralığa sahip işaretçiler kullanılmaktadır. Bireyler sıralandıktan sonra her bireyin arasındaki mesafe $1/N$ kadar olacak şekilde ayarlanmaktadır. Daha sonra $0-1/N$ arasında rastgele belirlenen bir sayı

ile ebeveyn olacak bireyler seçilmektedir. Bu yöntem rulet seçiminde güçlü olan bireyin seçilmesi ihtimalini daha yüksek olması adaletsizliğini ortadan kaldırmaktadır.



Şekil 10. Stokastik Evrensel Seçim

Elitist seçim, sıralanmış kromozomlardan en iyi uygunluğa sahip N adet bireyin seçilerek diğer nesillere aktarılmasına dayanmaktadır.

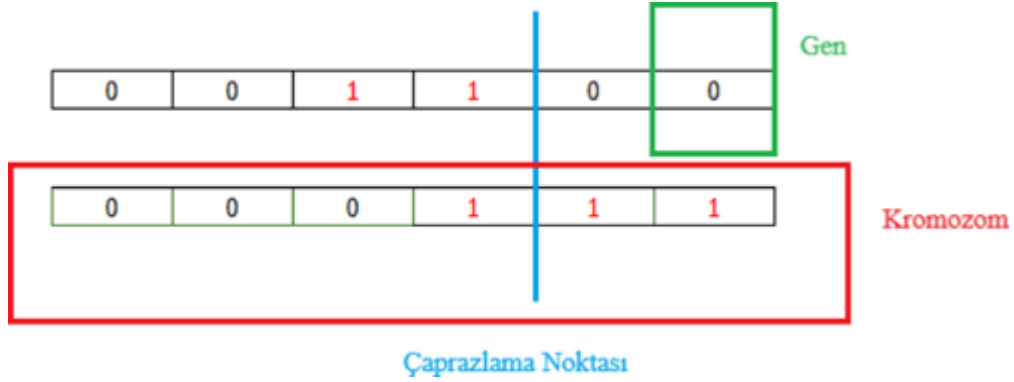
1. Birey	1	0	1	1	0
2. Birey	1	0	0	1	1
3. Birey	0	0	1	1	0
4. Birey	1	0	1	0	0
5. Birey	1	0	1	0	0

N=3

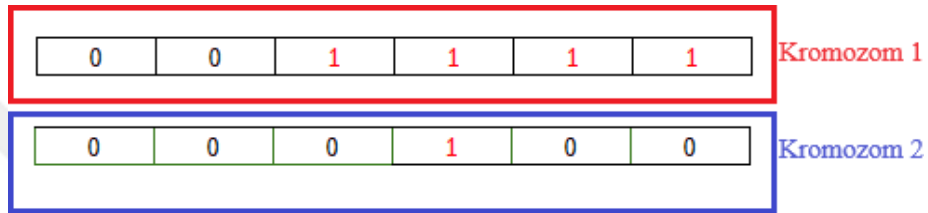
1. Birey	1	0	1	1	0
2. Birey	1	0	0	1	1
4. Birey	1	0	1	0	0

Şekil 11. Elitist seçim

Popülasyondaki her bir birey kromozoma sahiptir ve kromozomlar, genlerden oluşmaktadır. Popülasyondaki bireylerin yeniden oluşturulması sürecinde uygulanan çaprazlama işlemi gen takası işlemidir. Şekil 12’de iki kromozomdaki genlerin çaprazlama işlemi ile takası gösterilmektedir. Şekil 12’de gerçekleştirilen çaprazlama işlemine tek nokta çaprazlama adı verilmektedir. Şekil 13’te çaprazlama işlemi sonrası oluşan kromozomlar gösterilmektedir. Çaprazlama işleminde yaygın kullanılan bazı çaprazlama teknikleri tek nokta çaprazlama, 2 nokta çaprazlama, k-nokta çaprazlama ve üniform çaprazlamadır.

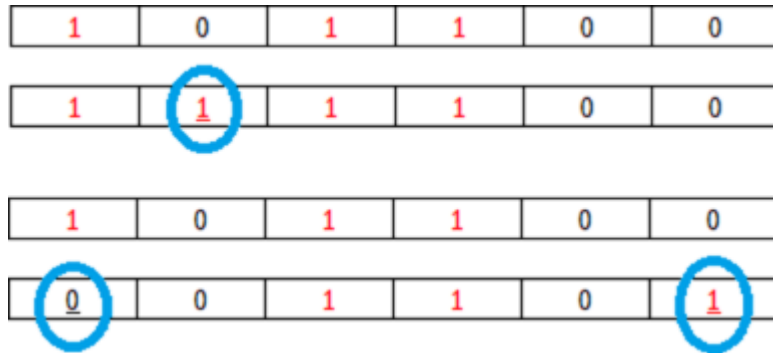


Şekil 12. Genetik Algoritma gen, kromozom ve çaprazlama noktası gösterimi

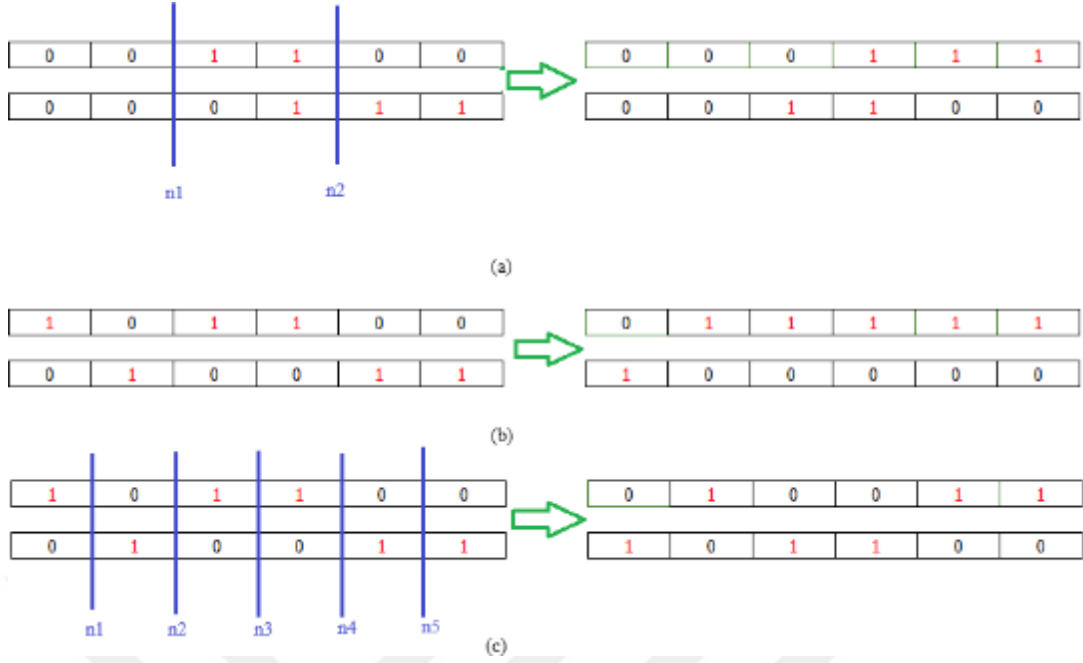


Şekil 13. Çaprazlama sonrası oluşan kromozomlar

Mutasyon operatörü, genetik çeşitliliği sağlamak amacıyla ebeveynlerin çaprazlanmasıyla oluşan yeni bireyin alel genlerinin rastgele olarak önceden belirlenmiş ve çok küçük tutulan P_m mutasyon olasılığıyla orantılı olarak değiştirilmesidir. Şekil 14’te iki adet mutasyon örneği sunulmaktadır. Bunlardan ilki rastgele bir genin değerinin önceden belirlenmiş alt ve üst sınırlar arasında seçilen bir tam sayı değeriyle değiştirilmesidir. İkinci mutasyon örneği ise pozisyona göre iki genin değiştirilmesiyle oluşturulmuş bir mutasyonu temsil etmektedir. Şekil 15’te yaygın kullanılan çaprazlama teknikleri gösterilmektedir.

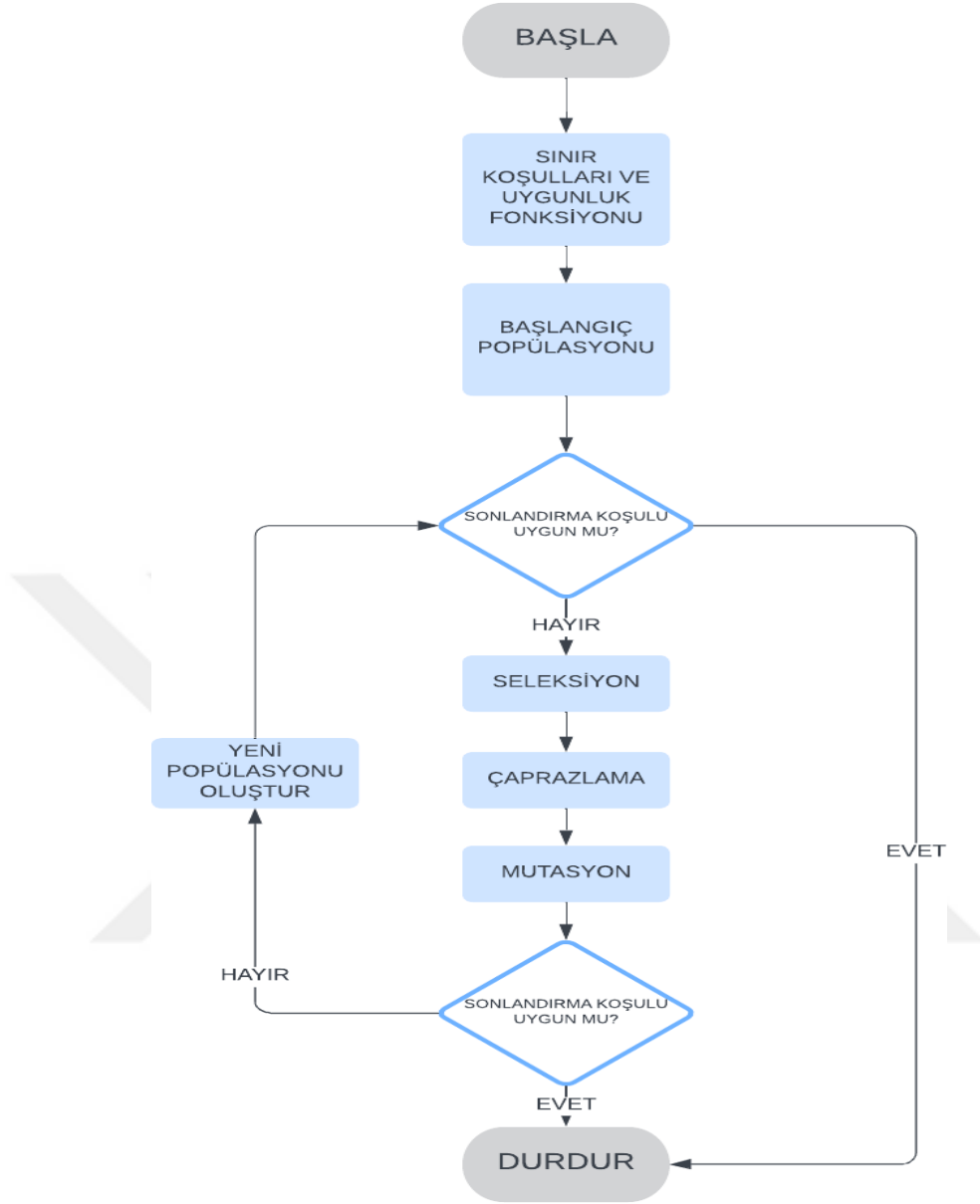


Şekil 14. Mutasyon örnekleri



Şekil 15. Yaygın kullanılan çaprazlama teknikleri (a) 2 nokta çaprazlama, (b) Üniform çaprazlama, (c) k-nokta çaprazlama gösterimine örnek olarak 5 nokta çaprazlama

Şekil 16'da Genetik algoritmanın akış diyagramı paylaşılmaktadır. Diyagrama göre algoritma optimizasyon problemlerinin sınır koşulları ve amaç fonksiyonu sağlanana kadar yinelemeli bir yapı içermektedir.



Şekil 16. Genetik Algoritma akış diyagramı

1.10.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

PSO, sürü halinde hareket eden kuş, balık, arı gibi hayvan kolonilerinin yiyecek arama, yön bulma vb. davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş sürü zekâsına dayalı bir algoritmadır. PSO'da her bir bireye parçacık denilmektedir. PSO algoritması bireyler arasındaki bilgi paylaşımı esasına dayanmaktadır. PSO da parçacığın hızı ve pozisyonu dikkate alınmaktadır. Her iterasyonda, her parçacık pozisyonunu sürüdeki en iyi pozisyona ayarlamaktadır. PSO, temel olarak sürüde bulunan parçacıkların pozisyonunun, sürünün en

iyi pozisyona sahip olan bireyine yaklaştırılmasına dayanır (Özsağlam & Çunkaş, 2008). PSO'da parçacıkların hızları Denklem 1'de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$V_i(t_{PSO} + 1) = W V_i(t_{PSO}) + c_1 rand_1(P_{best} - x) + c_2 rand_2(G_{best} - x) \quad (1)$$

Denklem 2 parçacıkların yeni konumlarını hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$x_i(t_{PSO} + 1) = x_i(t_{PSO}) + V_i(t_{PSO} + 1) \quad (2)$$

W , Eylemsizlik katsayısı olarak alınmaktadır. Önceki hız vektörünün yeni hız vektörü üzerindeki ağırlığını temsil etmektedir. P_{best} kişisel en iyi konumu G_{best} ise sürünün global en iyi konumunu temsil etmektedir.

Tablo 6. PSO Algoritması parametreleri

Parametre	Sembol	Değer Aralığı
Bilişsel sabit	c_1	2
Sosyal sabit	c_2	2

Tablo 6'da PSO algoritmasının sahip olduğu parametreler ve uygulamalarda tercih edilen değerleri sunulmaktadır. PSO algoritması, binary olarak çalıştırılacak ise parçacıkların hızları Denklem 1'deki gibi hesaplandıktan sonra sigmoid fonksiyonu kullanılarak elde edilen değerlerin 0-1 değerlerine atanması gerçekleştirilmektedir.

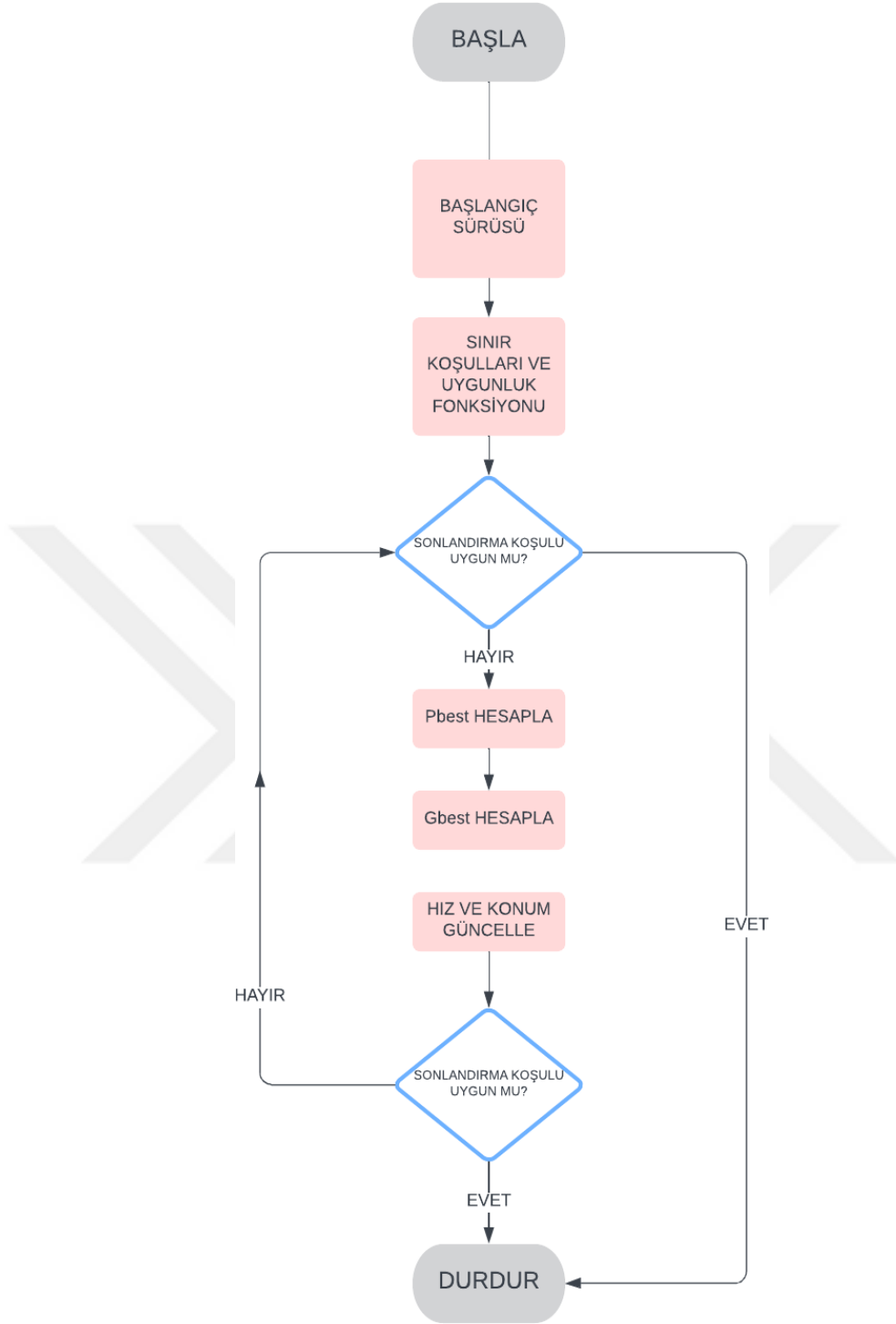
$$V_{yeni} = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (3)$$

Denklem 1'de hesaplanan parçacıkların hızları Denklem 3' aracılığıyla 0-1 arasındaki değerlere haritalanmaktadır. Bu işlemden sonra parçacıkların konumları Denklem 4'e göre hesaplanmaktadır.

$$x_i(t_{PSO} + 1) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } r_{ij} < \text{sigmoid}(V_i(t_{PSO} + 1)) \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4)$$

r_{ij} , üniform dağılıma sahip $\{0 - 1\}$ aralığında rastgele üretilmiş bir sayıdır. Sigmoid fonksiyonu ile normalleştirilen parçacık hızı r_{ij} sayısından daha büyük ise parçacığın konumu 1 olarak belirlenmektedir. Eğer r_{ij} sayısı, normalize edilmiş parçacık hızından daha büyük ise parçacık konumu 0 olarak belirlenmektedir. Denklem 4 göz önüne alındığında, bitin sonraki değeri bitin mevcut değerinden oldukça bağımsızdır ve değer yalnızca hız vektörü kullanılarak güncellenmektedir. (Khanesar vd., 2007).

Şekil 17’ de BPSO’ya ait algoritma akış diyagramı bulunmaktadır. PSO ve BPSO algoritmaları birbirinden bağımsız bir yapıya sahip değildir. BPSO algoritması özelinde parçacık konumları yalnızca 0 ve 1 değerlerini alabileceğinden Denklem 3 ve Denklem 4’teki işlemler gerçekleştirilmektedir. Her iki algoritmada tıpkı evrimsel algoritmalar gibi en iyi yaklaşımı elde edene kadar yinelemeli bir yapıya sahiptir.



Şekil 17. BPSO algoritması akış diyagramı

1.10.3. Yıldırım Arama Algoritması (YAA)

YAA, yıldırımın yeryüzüne düşmesi olayından esinlenerek geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. YAA algoritması Roket ve adım lideri yayılımı, roketin

özellikleri ve roket modellenmesi ve adım lideri hareketi olmak üzere 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Doğada yıldırım bulutlarında yıldırımın oluşabilmesi için gerekli bazı kimyasal ve fiziksel süreçler yer almaktadır. Fırtına bulutu içerisindeki su molekülleri hızla donmaktadırlar. Buza sığmayan su molekülleri, oluşan buzun içerisinde yoğun hızlarda sıkışarak dışarı çıkmaktadırlar. Bu sırada oksijen ve hidrojen atomları ayrılır ve roketler halinde rastgele bir yönde fırlamaktadırlar. Roket atmosfer boyunca ilerler. Çarpışma ve adım liderine geçiş yoluyla bir başlangıç İyonizasyon yolu veya kanal oluşturulmaktadır. YAA, gelen her bir roketin bir adım lideri ve kanal oluşturduğunu varsaymaktadır. Roket problemin başlangıç popülasyonunu temsil etmektedir. Roket kavramı PSO algoritmasındaki parçacık kavramına veya genetik algoritmadaki birey kavramına oldukça benzerdir (Shareef vd., 2015; Duman & Yıldız, 2018).

Bir roket atmosfer boyunca ilerlerken havadaki atom ve moleküllerle çarpışma sırasında kinetik enerjisi azalmaktadır. Bir roketin hızı Denklem 5'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_R = \left[1 - \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c} \right)^2}} - s \frac{F_i}{m} c^2 \right)^{-2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

V_0 , roketin başlangıçtaki hızını, c ışık hızını, F_i iyonizasyon oran sabitini temsil etmektedir. m , roket kütlesi s ise iyonizasyon yolunun uzunluğunu temsil etmektedir. Denklem 5 incelendiğinde bir roketin hızının kütleye ve lider ucunun konumuna bağlı olduğu görülmektedir. Kütle düşük olduğunda veya İyonizasyon yolu uzunluğu uzun olduğunda roketin iyonlaşma, geniş bir alana ilerleyebilme potansiyeli düşüktür (Shareef vd., 2014).

Adım liderinin önemli bir özelliği çatallanmadır. Çatallanma, eş zamanlı simetrik iki dalın ortaya çıktığı durumdur. Bu olay çekirdek çarpışması durumunda meydana gelmektedir. Çatallanma sonucunda roket sayısı artış göstermektedir. Bu durum popülasyon genişliğinin artması anlamına gelmektedir. Çatallanma iki yöntemle benzetilebilmektedir. Denklem 6'da verildiği üzere çekirdek çarpışması esnasında simetrik kanalların oluşmasını temsil etmek amacıyla zıt sayı kullanılabilir. Burada $\bar{p}_i$ zıt roketi temsil etmektedir. p_i ise orijinal roketi temsil etmektedir. a ve b ise arama uzayının limitlerini temsil etmektedir. İkinci

yöntemde ise birkaç yayılma denemesinin ardından başarısız lider nedeniyle kanalın adım lideri ucunda görüntülendiği kabul edilmektedir ve başarısız lider, izin verilen maksimum deneme sayısını kanal süresi olarak tanımlayarak yeniden dağıtılabilmektedir. Bu durumda adım liderlerinin popülasyon büyüklüğü artmaz (Shareef vd., 2014; Abualgah vd., 2020).

$$\bar{p}_i = a + b - p_i \quad (6)$$

Roket modellemesi ve adım liderinin hareketi, ilk adım lider popülasyonu N 'yi oluşturmak amacıyla kullanılan geçiş roketleri için üç tür roket uygulanmaktadır. Bunlar Geçiş Roketi, Uzak Roketi ve Lider roketidir. Geçiş roketinde lider ucu, fırlatılan roketin geçiş kullanılarak gök gürültüsü hücresinden rassal oluşturulması nedeniyle erken aşamada oluşturulmaktadır. Böylece Denklem 7' de tanımlanan üniform bir dağılımdan rassal bir sayı üretilerek temsil edilebilmektedir. x^T rastgele bir sayıdır, a ve b arama uzayının alt ve üst limitlerini temsil etmektedir (Abualgah vd., 2020)

$$f(x^T) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x^T \leq b \\ 0 & x < a \text{ veya } x^T > b \end{cases} \quad (7)$$

Uzak roketlerinin adım+1 yani bir sonraki adım için pozisyonları $P^S = [P^S, P^S, P^S, \dots, P^S]$ şekillendirme parametresi (μ), kullanılarak eksponansiyel dağılımdan üretilen rastgele bir sayı olarak ifade edilebilmektedir (Shareef vd., 2014).

$$f(x^S) = \begin{cases} \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x^S}{\mu}} & x^S \geq 0 \\ 0 & x^S \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Şekillendirme parametresi, bir sonraki iterasyonda yönü veya uzak roketinin pozisyonunu kontrol etmek için kullanılmaktadır. Bir sonraki adımda P^S 'nin pozisyonu

Denklem 9'daki gibi ifade edilmektedir (Duman & Yıldız, 2018).

$$fP_{i(yeni)}^S = P_i^S \pm \exp(rand(\mu_i)) \quad (9)$$

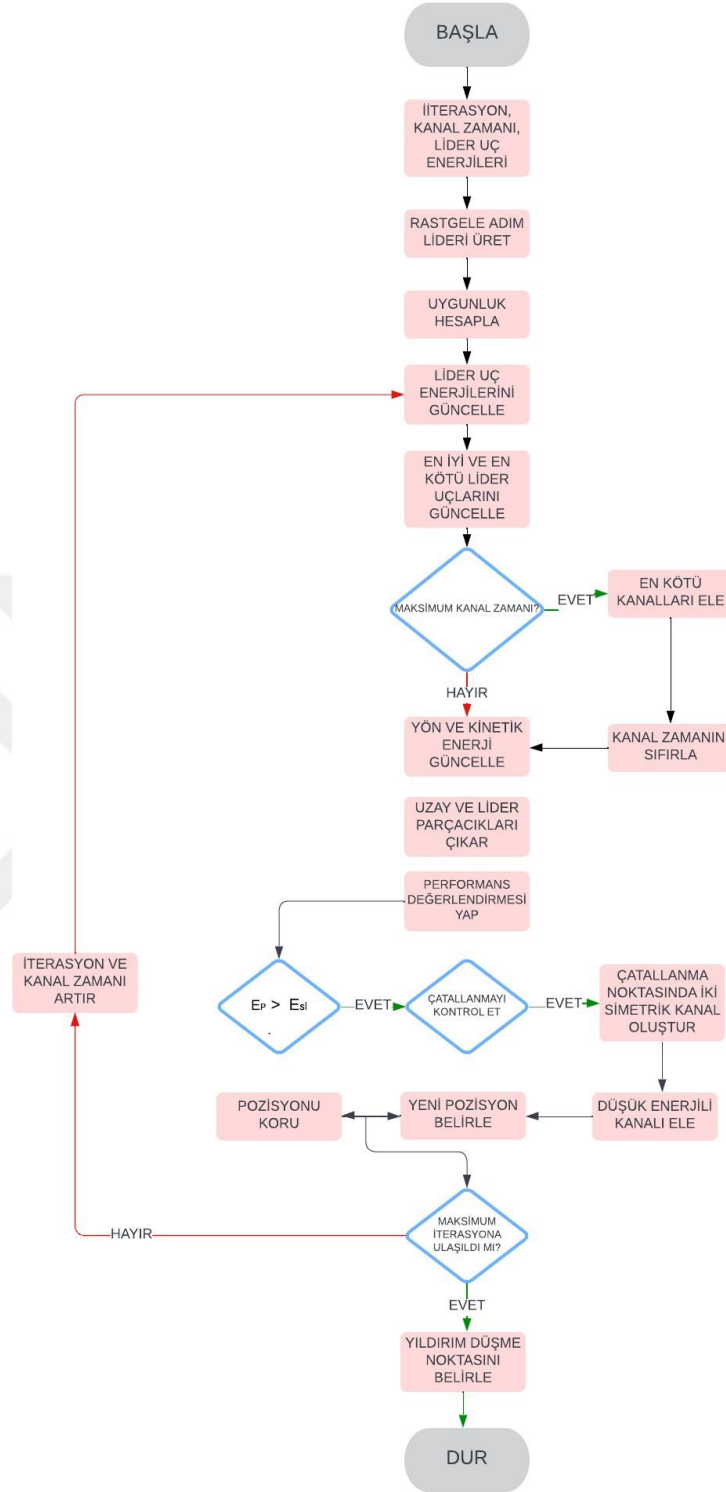
Lider roket, normal dağılım ile şekillendirme ve ölçeklendirme (σ) parametreleri kullanılarak oluşturulan rastgele sayıyı temsil etmektedir. Denklem 10'da normal dağılım

fonksiyonu sunulmaktadır. Ölçeklendirme parametresi en iyi sonuca doğru üstel olarak azalmaktadır. Bir sonraki adımda P^L 'nin pozisyonu Denklem 11'deki gibi ifade edilmektedir (Duman & Yıldız, 2018).

$$f(X^L) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(X^L-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (10)$$

$$P_{yeni}^L = P^L + normrand(\mu_L, \sigma_L) \quad (11)$$

P^L eski lider roketi, P_{yeni}^L ise yeni lider roketi ifade etmektedir. *normrand* dağılım fonksiyonu tarafından üretilen rastgele sayıyı temsil etmektedir (Duman & Yıldız, 2018). YAA'nın akış diyagramı Şekil 18'de gösterilmektedir.



Şekil 18. YAA akış diyagramı

1.11. Sırt Çantası Problemi

Sırt Çantası problemi matematikte ve bilgisayar bilimlerinde optimizasyon problemlerinin çözümünde sıkça tercih edilen klasik bir optimizasyon problemidir. Problem, sırt çantasının toplam kapasitesini aşmadan sırt çantasının içerisinde maksimum değerdeki eşyayı sığdırabilmektir. Problemde çantaya dâhil edilebilecek eşyalar belirli bir ağırlığa ve değere sahiptirler.

$$\sum_{n=1}^N v_n x_n \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^N x_n w_n < W \quad x_n \in \{1,0\} \quad (13)$$

Sırt Çantası Probleminin amaç fonksiyonu Denklem 12'deki gibidir. Denklem 13 ise problemin kısıtıdır. Binary karar değişkeni x_n aracılığıyla en değerli eşyalarla maksimum fayda amaçlanmaktadır. Ancak W , çanta kapasitesinin de aşılması Denklem 13 ile kısıtlanmaktadır.

Sırt Çantası Problemi, optimizasyona dayalı enerji yönetim uygulamalarında da kullanılmaya elverişlidir. Planlaması gerçekleştirilen zaman dilimi bir sırt çantası olarak ele alındığında bu zaman dilimi içerisindeki toplam tüketim miktarı çantanın kapasitesini temsil edecektir. Elektrikli cihazlar belirli bir güç tüketimine sahiptirler ve bu durum çantaya alınabilecek olan eşyanın ağırlığına karşılık gelmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında mesken türü bir tüketicinin bir günlük tüketim verileri üzerinden Genetik Algoritma (GA), Binary Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO) ve Yıldırım Arama Algoritması (YAA) optimizasyon algoritmaları aracılığıyla planlamalar gerçekleştirilmiştir. Planlamalar 1 saatlik, 30 dakikalık ve 15 dakikalık periyotlarla tüketicinin 1 günü için gerçekleştirilmiştir. Planlamalar da Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma ve Kullanım Zamanı Fiyatlandırması yöntemleri tercih edilmiştir.

2.1. Problemin Formülasyonu

Enerji Yönetim Optimizasyonu, günlük enerji tüketim maliyetini ve pik talebi minimum olacak şekilde formülize edebilmektedir. Çok amaçlı bu optimizasyon probleminin doğasından ötürü meta-sezgisel yöntemler kullanılarak çözülmesi uygundur. Bu doğrultuda, literatürde yaygın olarak tercih edilen algoritmalarından GA, BPSO ve bu kapsamda daha önce denenmemiş olan YAA kullanılarak bu problem için en optimum çözümlere ulaşılmaya çalışılmıştır.

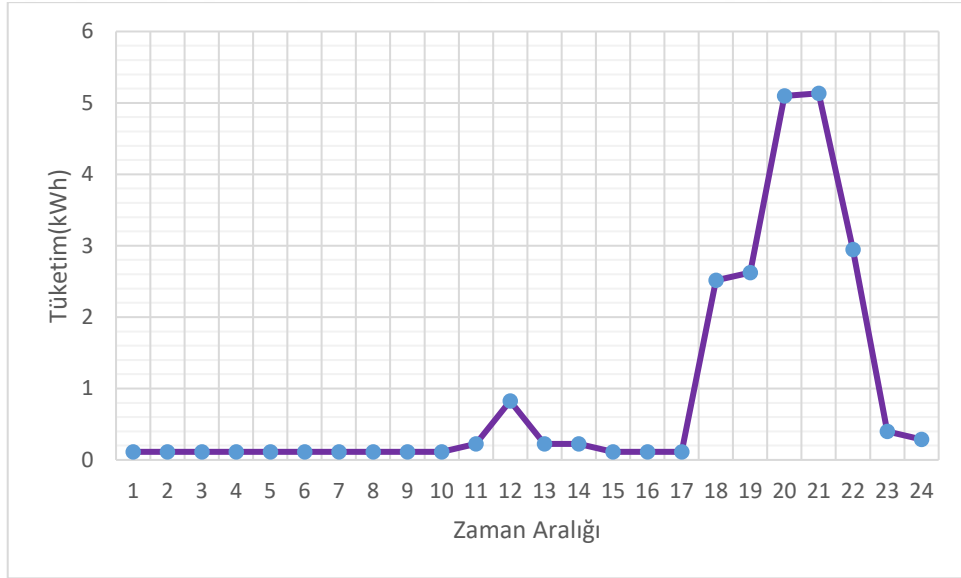
Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, amaca verilen öneme göre ağırlık katsayıları uygulanmaktadır. Bu problemin çözümünde de maliyetin ve pik talebin dengeli bir şekilde optimize edilmesi, sadece maliyetin optimize edilmesi ve son olarak sadece pik talebin optimize edilmesi olmak üzere üç farklı durum ele alınmıştır. Optimize etmek amacıyla ise 7 adet elektrikli cihaz ve 5 ayrı grupta aydınlatma tesisatı kullanılmıştır. Tüm cihazlar kaydırılabilir yükler, kaydırılamaz yükler ve kısmen kaydırılabilir olarak üç farklı sınıfa ayrılmıştır. Kaydırılamaz yükler günün belirli saatlerinde daima devre de olacağından bu yükler optimizasyon sürecine dahil edilmemiştir. Ancak optimize edilecek olan yüklerde kaydırılamaz yüklerin güç tüketimleri ve tüketim zaman aralıkları da dikkate alınmıştır.

Tablo 7’de problemde değerlendirmeye alınan gerçek bir hanedeki elektrikli cihazlar ve güç tüketimleri ile optimize edilen gün içerisindeki çalışma saat aralıkları ve yük tipleri yer almaktadır. Tablo 7’nin oluşturulması aşamasında ilgili meskenin aktif cihazları ve gün içerisindeki işlemleri saatleriyle birlikte kaydedilmiştir. Cihazlardaki en düşük operasyon zaman aralığı ise 15 dakika olarak ölçülmüştür. Zaman aralıkları başlangıç ve bitişleri operasyon zaman aralığını artırmayacak şekilde saat başı ve saat sonlarına ertelenerek

kaydedilmiştir. İlgili mesken tüketicisinin endeks okuma verileri üzerinden ilgili güne dair planlama öncesi 24 saatlik tüketim eğrisi oluşturulmuştur. Şekil 19’da oluşturulan günlük tüketim eğrisi yer almaktadır.

Tablo 7. Cihaz durum bildirim cetveli

Cihaz	Güç Tüketimi (kWh)	Çalışma Saatleri	Yük Tipi
Buzdolabı	0,095	00:00-23:59	Kaydırılmaz
Süpürge	0,6	11:00-11:45	Kaydırılabilir
Çamaşır Makinesi	2,3	19:00-22:00	Kaydırılabilir
TV	0,11	10:00-14:00	Kısmen Kaydırılabilir
Bulaşık Makinesi	2,2	19:45-21:00	Kaydırılabilir
Aydınlatma Grup-1	0,2	19:30-21:45	Kaydırılmaz
Aydınlatma Grup-2	0,175	19:30-23:30	Kaydırılmaz
Aydınlatma Grup-3	0,023	20:00-21:15	Kaydırılabilir
Aydınlatma Grup-4	0,013	20:00-21:00	Kaydırılmaz
Aydınlatma Grup-5	0,023	21:30-22:00	Kaydırılmaz
Modem	0,018	00:00-23:59	Kaydırılmaz
Fırın	2,400	17:30-18:30	Kaydırılabilir



Şekil 19. Günlük tüketim eğrisi

Planlamalarda, Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma (GZF) ve Kullanım Zamanı Fiyatlandırması (KZF) için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunun (EPDK) 1 Ocak 2024 tarihinde yayınladığı Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tablosundaki Nihai Tarife

Tablosunda yer alan Mesken 8kW/h gün ve üstü çok terimli tarife fiyatları ve tek terimli tarife fiyatları kullanılarak fiyat dizisi oluşturulmuştur (URL-5, 2023). Kullanım Zamanı Fiyatlandırmasında fiyat sinyali Tablo 4’te yer alan ve ülkemizde kullanılan Üç Zamanlı Tarifeye göre oluşturulmuştur. Ülkemizde Gerçek Zamanlı Fiyatlandırmaya yönelik bir uygulama bulunmamasından dolayı çalışma kapsamında kullanılan GZF politikası Tablo 8’deki gibidir. Tablo 8’de ki fiyatlandırma tez kapsamında incelemeye alınan tüketici için geçerlidir ve başka tüketiciler için ortalama tüketim miktarı ve ortalama tüketim miktarının 1 kWh alt ve üst tüketim miktarlarına göre esnek bir yapıda şekillenebilmektedir.

Tablo 8. GZF Fiyat tablosu

Tüketim (kWh)	Tüketim Bedeli (TL)
$0 < \text{Tüketim} < 1$	1.2761
$1 \leq \text{Tüketim} < 2$	1.9910
$2 \leq \text{Tüketim} < 3$	2.0165
diğer	2.9420

Fiyatlandırma dizilerinin oluşturulmasının ardından probleme dâhil edilen tüm elektrikli cihazların tüketim dizileri oluşturulmuştur. Oluşturulan fiyat ve tüketim dizileri 1 saatlik planlama durumunda 24 adet elemandan oluşmaktadır. 30 dakikalık planlamada bir gün 48 eşit parçaya ayrılarak 48 adet elemandan oluşmaktadır ve en kısa operasyon zaman aralığı 15 dakikalık planlama durumunda ise 96 eşit parçaya ayrılarak 96 adet elemandan oluşmaktadır.

$$T^S = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_S\}, \forall t \in T \quad (14)$$

Denklem 14’te planlama zaman aralıklarının zaman dizisi ifade edilmektedir. 1 saatlik planlama durumunda $S=24$, 30 dakikalık planlama durumunda $S=48$ ve 15 dakikalık planlama durumunda ise $S=96$ olmaktadır.

$$P_n^t = \{p_n^1, p_n^2, p_n^3, \dots, p_n^S\}, n = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

Denklem 15 planlama zaman aralıklarında herhangi bir t anındaki n . cihaza ait gücü temsil etmektedir.

$$F_{Maliyet} = \min_{X \in \{0,1\}} \left(\sum_{t=1}^S \sum_{n=1}^N P_n^t C_t X_n^t \right) \quad (16)$$

Denklem 16’da belirtilen fonksiyon ile optimizasyon probleminde maliyetin minimize edilmesi sağlanmaktadır. Herhangi bir t zaman anında X binary mantıksal değişkeninin alacağı 1 veya 0 değerine göre ilgili zaman anında P_n^t ile ifade edilen n . cihaz açık veya kapalı olarak konumlandırılacaktır. Denklemde yer alan C_t ise ilgili zamana ait elektrik tüketim bedelini temsil etmektedir.

Bu bağlamda oluşturulan bir sistemin kısıtları mevcuttur. Bunlar;

- Planlama öncesi ve sonrası günlük toplam tüketim miktarının sabit kalması,
- Planlama öncesi ve sonrası günlük toplam yük miktarının sabit kalması,
- Planlama işlemi sonrasında oluşan yeni modeldeki pik tüketim miktarının önceki duruma göre küçük olması gerekmektedir.

Pik tüketim miktarı, pik talep ile doğru ilişkilidir. Bu talebi yönetebilmek PAR’ı yöneterek gerçekleştirilebilmektedir. Denklem 17 ile PAR’ın minimizasyon işlemi açıklanmaktadır.

$$F_{PAR} = \min \left(\frac{\text{Anlık maksimum tüketim}}{\text{Ortalama tüketim miktarı}} \right) \quad (17)$$

Denklem 18 ile bu tez çalışması kapsamında hedeflenen çok amaçlı optimizasyon fonksiyonunun amaç fonksiyonu tanımlanmaktadır. Amaç fonksiyonu Denklem 16’da verilen maliyetin minimizasyonu ve Denklem 17’de verilen PAR minimizasyonu amaçlarının tek bir amaç fonksiyonunda kullanılmasıyla oluşturulmaktadır.

$$F_{obj} = \alpha_1 F_{Maliyet} + \alpha_2 F_{PAR} \quad (18)$$

Amaç fonksiyonunda yer alan α_1 ve α_2 ağırlık katsayılarıdır ve $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ’dir. Ağırlık katsayıları almış oldukları değerlere göre çok amaçlı fonksiyondaki amaçlara eğilim değişimini göstermektedir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında Tablo 8’ de detayları verilen 3 farklı durum için bu eğilimler incelenmiştir.

Tablo 9. Ağırlık katsayıları durumları

Durum	α_1	α_2
Durum 1(Maliyet odaklı)	1	0
Durum 2 (Eşit eğilim odaklı)	0,5	0,5
Durum 3 (PAR odaklı)	0	1

2.2. Benzetim Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm benzetim çalışmaları MATLAB programı 23.2.0.2485118 (R2023b) Update 6 versiyonunda gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında 16 gigabayt RAM, 12. Nesil İntel i5 işlemcili, 64 bit Windows işlemcili makina kullanılmıştır.

Tablo 7’de tüketim programı verilen mesken tüketicisinin tüketimi GA, PSO ve YAA algoritmaları kullanılarak planlanmıştır. Planlamalarda GZF ve KZF politikaları kullanılmıştır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere otomatik sayaç okuma sistemleri tüketicilerin 1 saat, 30 dakika, 15 dakika ve 5 dakikalık endeks değerlerini okuyabilmektedir. 5 dakikalık tüketim endeksi okuma işlemi kritik öneme sahip tüketicilerde tercih edildiğinden standart bir tüketici için 1 saatlik, 30 dakikalık ve 15 dakikalık yük profilleri rahatlıkla oluşturulabilmektedir. Bu sebeple gerçekleştirilen çalışma kapsamında tüketicinin tüketim planlanması işlemi 1 saat, 30 dakika ve 15 dakika olacak şekilde yapılmıştır. Öncelikle, tüketicinin yük profili üzerinden planlanmamış duruma ait günlük maliyet ve PAR hesaplaması gerçekleştirilmiştir.

Planlaması gerçekleştirilen tüketici tek terimli tek zamanlı abone grubuna ait bir tüketicidir. Bu tüketici için günün her saatinde tek bir fiyat üzerinden tüketim bedeli hesaplanmaktadır. Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tablosunda ilgili tüketim grubu için tüketim bedeli 1,9912 TL olarak belirtilmektedir. Bu durumda tüketicinin planlaması gerçekleştirilecek güne ait tüketim bedeli 45,797 TL olarak hesaplanmaktadır. Tüketici kullanım zamanı fiyatlandırmasından yararlanmak amacıyla tek terimli üç zamanlı abone grubuna dahil olması sonrasında oluşacak günlük tüketim bedeli ise 60,995 TL olmaktadır. Yani abone grubunun değişimi sonucunda maliyet %33,18 artış göstermektedir. Planlama öncesi durum için tüketicinin tek terimli tek zamanlı abone grubunda kalması tüketici açısından daha ekonomik olacaktır. Tüketicinin yük profili üzerinden elde edilen planlama öncesi PAR ise 6,285 olarak hesaplanmıştır.

Önerilen problem MATLAB programında GA, BPSO ve YAA algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. Yük profili alınan tüketici için en kısa operasyon süresi 15 dakikadır. Doğrudan 1 saatlik bir yük profili üzerinden 1 saatlik zaman aralıklı optimizasyon işleminde en kısa operasyon süresi 1 saat olarak alınmaktadır. Bu durumda devreye alınan bir elektrikli cihaz en az 1 saat çalışmış gibi optimize edilmektedir. 30 dakikalık yük profili üzerinden yapılacak olan planlamada ise en kısa operasyon zaman aralığı 30 dakika olarak baz alınarak planlama işlemi gerçekleştirilmektedir. 15 dakikalık yük profili üzerinden planlama işlemini gerçekleştirmek tüm durumlar arasında en sağlıklı sonuçları verecek olan planlama modeli olacaktır. Çünkü minimum operasyon aralığı olarak planlaması gerçekleştirilen tüketicinin minimum operasyon aralığı seçilmiş olacaktır.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında GA, BPSO ve YAA Algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilen planlamalara ait sonuçlar yer almaktadır. Planlama sonuçları maliyet ve PAR minimizasyonu başarımlarını Durum 1 (Maliyet odaklı), Durum 2 (Eşit eğilim odaklı) ve Durum 3 (PAR odaklı) olacak şekilde 3 farklı durumda sunulmaktadır. Sonuçların maliyete ilişkin incelenmesinde Durum 3'ün tamamen PAR odaklı bir durum olması ve maliyete dair bir kısıt içermemesinden dolayı Durum 1 ve Durum 2 değerlendirilmiştir. PAR'a ilişkin incelemelerde ise Durum 1'in tamamen maliyete odaklı bir durum olması ve PAR'a dair bir kısıt içermemesinden dolayı Durum 2 ve Durum 3 değerlendirilmiştir.

Planlama öncesindeki tek terim tek zamanlı aboneye ait günlük maliyet birim maliyet olarak alınmaktadır ve planlamalar sonrasında oluşan maliyetler bu birim maliyete oranlanarak verilmektedir.

Tablo 10. GA ile planlama sonrası maliyet

Genetik Algoritma (Maliyet)						
	1 Saat		30 Dakika		15 Dakika	
	GZF	KZF	GZF	KZF	GZF	KZF
Durum 1	0,590	0,612	0,638	0,651	0,564	0,657
Durum 2	0,613	0,636	0,656	0,669	0,587	0,682
Durum 3	0,762	0,741	0,795	0,729	0,749	1,004

Tablo 10'da GA ile planlama sonrası oluşan maliyetler yer almaktadır. Durum 1 ve Durum 2 incelendiğinde GZF politikasının maliyet açısından KZF fiyatlandırmasından daha iyi sonuç verdiği gözlenmektedir. Bunun sebebi KZF' de her saatin tüketim bedeli optimizasyon işlemi öncesinde belirlenmiştir ve optimizasyonda kısıtların söz konusu

olması sebebiyle pahalı tüketim bedeline sahip zaman aralıklarına da cihaz yerleştirilmektedir. GZF, zaman aralığı içerisindeki toplam tüketim miktarına göre bir fiyat belirlemesi gerçekleştirdiğinden en uygun şekle sokma sürecinde kısıtları da göz önünde bulundurarak daima daha düşük tüketim miktarı ve dolayısıyla daha düşük maliyet prensibine dayalı optimize etmektedir. En iyi maliyet 15 dakikalık planlama durumunda GZF ile elde edilmiştir. Bu durumun birim maliyete oranı 0,564'tür ve %43,56 oranında maliyette azalmanın olduğunu göstermektedir. Maliyette en az azalma ise %31,81 oranında Durum 2 koşullarında KZF kullanılarak gerçekleştirilen 15 dakikalık planlamada elde edilmiştir.

Tablo 11. GA ile planlama sonrası PAR

Genetik Algoritma (PAR)						
	1 Saat		30 Dakika		15 Dakika	
	GZF	KZF	GZF	KZF	GZF	KZF
Durum 1	3,16	3,73	8,14	6,38	6,08	6,76
Durum 2	2,47	3,58	3,5	3,79	3,76	3,83
Durum 3	2,93	2,67	3,17	2,91	2,77	2,83

Tablo 11’de GA planlama sonrası elde edilen PAR oranları yer almaktadır. PAR, anlık maksimum tüketim miktarının tüm tüketimin ortalamasına bölünmesiyle elde edilmektedir. Durum 2 ve Durum 3 incelendiğinde 1 saatlik planlama ve 30 dakikalık planlamalarda KZF politikası GZF politikasına göre daha iyi sonuç vermiştir. Ancak 15 dakikalık planlama işleminde her iki fiyatlandırma politikası birbirine yakın sonuçlar verse de GZF politikası KZF’ye göre daha iyi sonuç vermiştir.

15 dakikalık planlama işleminde GZF ve KZF için Durum 2 ve Durum 3’te oluşan anlık maksimum tüketim miktarı ve ortalama tüketim miktarı incelendiğinde GZF’ de her iki durum için de pik tüketim miktarının 0,73 kW olduğu, Durum 2 için ortalamanın yaklaşık 0,194 kW, Durum 3 için ise ortalamanın yaklaşık 0,263 kW olduğu saptanmıştır. KZF’de ise Durum 2 için pik tüketim miktarı 0,743 kW, ortalama tüketim miktarı yaklaşık 0,193 kW; Durum 3 için pik tüketim miktarı 0,755 kW, ortalama tüketim miktarı yaklaşık 0,267 kW olarak saptanmıştır. Bu değerler incelendiğinde KZF özellikle doğrudan PAR’a odaklanılan Durum 3’te pik tüketime karşı ortalama tüketim miktarındaki artış oranını GZF’ye göre daha kötü yönetmiştir. Bu sebeple 15 dakikalık planlamada GZF, KZF’ye göre daha iyi sonuç vermiştir.

Planlama işleminin ikinci kısmında MATLAB programı üzerinden BPSO algoritması oluşturularak problem optimize edilmiştir. GA ile gerçekleştirilen planlama işleminde olduğu gibi BPSO algoritması kullanılarak optimizasyon işlemi 1 saat, 30 dakika ve 15 dakika olarak planlanmıştır.

Tablo 12. BPSO ile planlama sonrası maliyet

BPSO (Maliyet)						
	1 Saat		30 Dakika		15 Dakika	
	GZF	KZF	GZF	KZF	GZF	KZF
Durum 1	0,605	0,672	0,719	0,752	0,567	0,701
Durum 2	0,628	0,687	0,761	0,781	0,592	0,733
Durum 3	0,752	0,748	0,928	0,895	0,754	0,742

Tablo 12’de BPSO ile planlama sonrası oluşan maliyetler yer almaktadır. Durum 1 ve Durum 2 incelendiğinde tüm planlama zaman aralıklarında GZF politikası KZF politikasına göre daha iyi sonuç vermiştir. BPSO kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyonda da tıpkı GA ile gerçekleştirilen optimizasyonda olduğu gibi maliyette en fazla azalma Durum 1 koşullarında GZF kullanılarak gerçekleştirilen 15 dakikalık planlamada elde edilmiştir. Bu durumun birim maliyete oranı 0,567’dir ve %43,10 oranında maliyette azalma olduğunu göstermektedir. En az azalma ise %21,89 ile Durum 2 koşullarında KZF kullanılarak gerçekleştirilen planlamada elde edilmiştir.

Tablo 13. BPSO ile planlama sonrası PAR

BPSO (PAR)						
	1 Saat		30 Dakika		15 Dakika	
	GZF	KZF	GZF	KZF	GZF	KZF
Durum 1	3,981	3,763	6,380	5,314	6,761	6,251
Durum 2	3,238	3,294	3,792	3,962	3,833	5,823
Durum 3	2,814	2,962	2,908	2,671	2,833	4,159

Tablo 13’te BPSO algoritması kullanılarak oluşturulan planlama sonrası oluşan PAR oranları verilmektedir. PAR oranına dair incelemeler gerçekleştirildiğinde Durum 3 için 30 dakikalık planlama haricindeki diğer koşullarda GZF politikası KZF politikasına göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Durum 3 için 30 dakikalık planlamada oluşan farklılık pik tüketim ve ortalama tüketim miktarları karşılaştırıldığında GZF politikasının pik tüketim miktarı 1,632 kW, ortalama tüketim miktarı ise 0,561 kW olarak hesaplanmıştır. KZF politikasının

pik tüketim miktarı ise 1,312 kW, ortalama tüketim miktarı 0,491 kW olarak hesaplanmıştır. KZF pik tüketim miktarını GZF politikasına göre daha düşük ayarlayarak GZF'ye göre daha başarılı sonuç vermiştir.

Çalışma kapsamında son olarak MATLAB programı kullanılarak YAA algoritmasıyla birlikte problem optimize edilmiştir.

Tablo 14. YAA ile planlama sonrası maliyet

YAA (Maliyet)						
	1 Saat		30 Dakika		15 Dakika	
	GZF	KZF	GZF	KZF	GZF	KZF
Durum 1	0,620	0,662	0,697	0,781	0,544	0,758
Durum 2	0,682	0,771	0,712	0,795	0,595	0,836
Durum 3	0,776	0,909	0,969	0,876	0,770	0,919

Tablo 14'te YAA ile yapılan planlama sonrası oluşan maliyet sonuçları yer almaktadır. Durum 1 ve Durum 2 incelendiğinde GZF politikasının KZF politikasından daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Maliyetteki en fazla azalma tıpkı GA ve BPSO da olduğu gibi Durum 1 koşullarında GZF kullanılarak gerçekleştirilen 12 dakikalık planlamada elde edilmiştir. Bu durumun maliyetinin birim maliyete oranı 0,544'tür ve %45,56 oranında maliyette azalmayı ifade etmektedir. En az azalma ise Durum 2 koşullarında KZF kullanılarak gerçekleştirilen 15 dakikalık planlamada elde edilmiştir. Bu durumun maliyetinin birim maliyete oranı 0,836'dır ve %16,38 oranında maliyette azalma olduğunu göstermektedir.

Tablo 15. YAA ile planlama sonrası PAR

YAA (PAR)						
	1 Saat		30 Dakika		15 Dakika	
	GZF	KZF	GZF	KZF	GZF	KZF
Durum 1	3,89	3,74	6,38	3,96	5,52	5,211
Durum 2	3,71	3,68	3,66	3,84	4,32	3,508
Durum 3	2,54	2,72	2,99	3,16	3,97	2,906

Tablo 15'te YAA algoritması ile planlama sonrası oluşan PAR oranları yer almaktadır. Durum 2 için 1 saatlik ve 15 dakikalık planlamalarda KZF politikası GZF politikasından daha iyi sonuç vermektedir. 30 dakikalık planlama için ise GZF politikası KZF politikasından daha iyi sonuç vermiştir. Durum 3 için 1 saatlik ve 30 dakikalık planlamada

GZF politikası KZF politikasından daha iyi sonuç vermiştir. 15 dakikalık planlamada ise KZF politikası, GZF politikasından daha iyi sonuç vermiştir.

Optimizasyon işlemleri, Tablo 9’da yer alan üç farklı duruma yönelik olarak GZF ve KZF fiyatlandırma politikaları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tamamen maliyete odaklı Durum 1’ de PAR’ın herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. En minimum maliyet sonucuna yakınsamak amacıyla optimizasyon sırasında problemin kısıtları aşılmayacak şekilde cihazlar ucuz tüketim anlarına kaydırılmaktadır. Maliyet odaklı optimizasyonlarda pik tüketim miktarı yüksek olmaktadır. Bu durumun sonucunda yüksek PAR oranları ve düşük maliyetle karşılaşılmaktadır. Amaç tamamen PAR oranını minimize etmek olduğunda ise maliyet önemsenmeksizin cihaz planlama zaman aralıklarına olabildiğince homojen kaydırılarak pik tüketim miktarı ortalama tüketim miktarına yaklaştırılmaktadır. Bunun sonucunda yüksek maliyet düşük PAR oranıyla karşılaşılmaktadır. Maliyet ve PAR eşit oranda eğilime sahip oldukları durumda ise optimizasyon algoritması cihazların zaman aralıklarına kaydırılması işlemini en düşük maliyete yakınsamak amacıyla ucuz tüketim bedelinin olduğu anlara kaydırmakta ve en minimum PAR oranını elde etmeye çalışırken olabildiğince homojen kaydırma işlemi gerçekleştirmektedir. Tek bir amaca yönelik olmayan bu durumda diğer durumlar kadar esnek bir çözüm bulunmamaktadır. Bu sebeple eşit eğilime sahip olan Durum 2 için GA, BPSO ve YAA algoritmalarından alınan sonuçlar her zaman Durum 1 ve Durum 3 arasında değerler almaktadır.

Fiyatlandırma politikaları arasında oluşan PAR ve maliyet farklılıkları incelendiğinde ise KZF, Tablo 16’da yer alan ve Türkiye’de kullanılmakta olan üç zamanlı tarife yapısını esas almaktadır. Bu tarife modelinde gün üç parçaya bölünmüştür. Gündüz ve gece eşit saat aralığına ve farklı tüketim bedeline sahiptir. Puant yani Türkiye genelinde en yüksek elektrik tüketiminin gerçekleştiği, daha kısa zaman aralığıdır ve en yüksek tüketim bedeline sahiptir.

Tablo 16. 1 Ocak 2024 itibariyle geçerli nihai tarife tablosuna göre 3 zamanlı tarife

Tarife	Dönem	Tüketim Bedeli (kr/kW)
T1	Gündüz (06.00-17.00)	201,6583
T2	Puant (17.00-22.00)	294,2528
T3	Gece (22.00-06.00)	127,6108

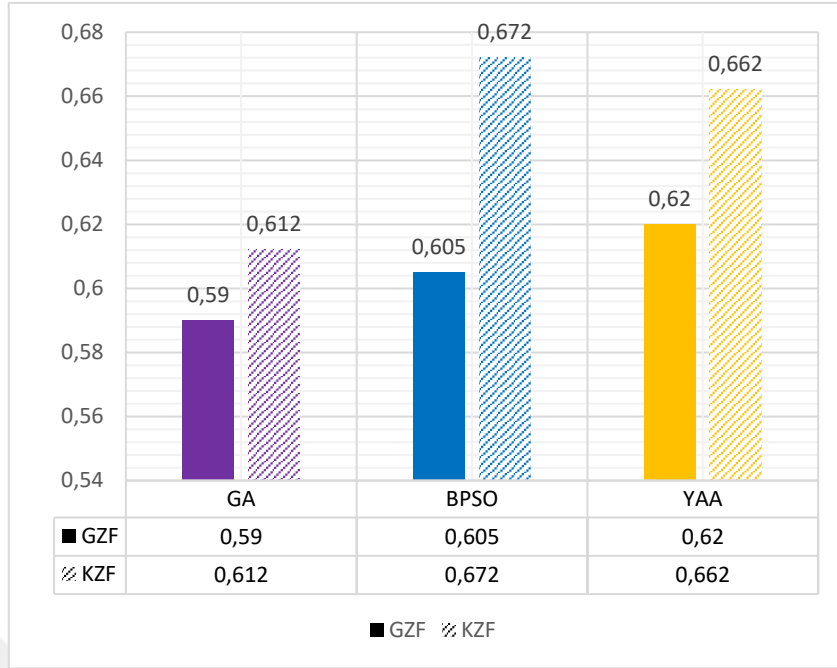
Ülkemizde henüz GZF politikasına dair bir uygulama bulunmamasından ötürü tez çalışması kapsamında kullanılan GZF politikası tüketicinin ortalama tüketim miktarının ± 1 kW tüketim değerleri Gündüz tüketim bedeline, bu skalayı aşan tüketim değerlerinin

Puant tüketim değerine, skalanın altında kalan tüketim değerleri ise Gece tüketim bedeline eşit olacak şekilde bir fiyatlandırma modeli önerisi sunulmuştur. Optimizasyon sırasında KZF’de her zaman dilimindeki tüketim bedeli en başta belirlidir. Buna karşılık GZF’de tüketim bedeli optimizasyon sırasında oluşan tüketim değerine göre belli olmaktadır. Bu sebeple GZF politikasında kısıtları da değerlendirerek ucuz tüketim bedeline sahip anlara cihazları kaydırmak KZF politikasına göre daha rahat olmaktadır. Sonuç olarak önerilen GZF politikası, KZF politikasına göre daha düşük maliyetli çözümler sunmaktadır.

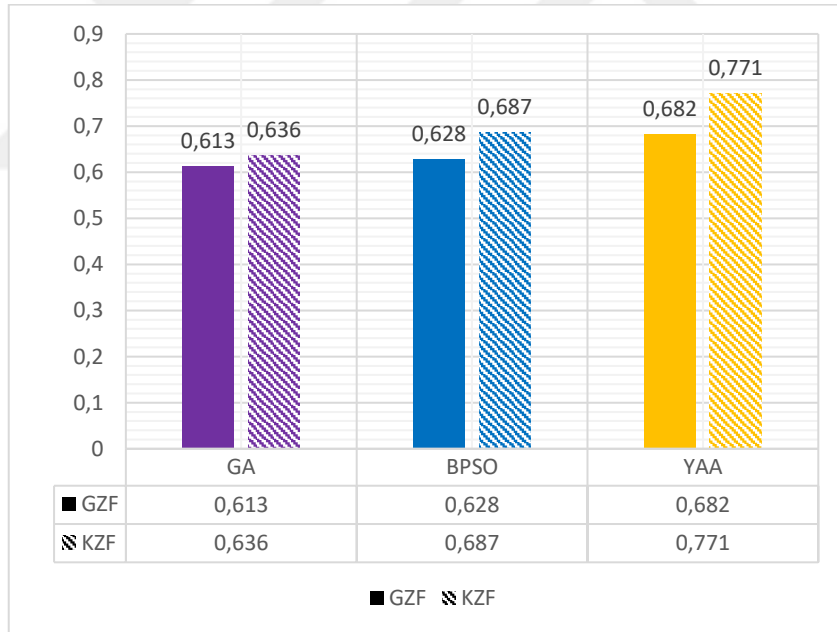
Tablo 17. 1 Saatlik planlama ve algoritmaların maliyet durumları (Durum 1 & Durum 2)

1 Saatlik Planlama (Maliyet)				
	Durum 1		Durum 2	
	GZF	KZF	GZF	KZF
GA	0,590	0,612	0,613	0,636
BPSO	0,605	0,672	0,628	0,687
YAA	0,620	0,662	0,682	0,771

1 saatlik planlama ile gerçekleştirilen optimizasyon işleminde çalışma kapsamında tercih edilen üç farklı algoritmaya ait optimize edilmiş maliyet durumları Tablo 17’de verilmektedir. Tamamen maliyet odaklı durumda fiyatlandırma politikalarının tümünde GA diğer algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir. GZF politikası kullanılarak gerçekleştirilen planlamalarda GA ile birim maliyete göre % 41 oranında azalma BPSO ile birim maliyete göre %39,45 oranında azalma YAA ile ise birim maliyete göre %38,02 oranında azalma olduğu görülmektedir. KZF kullanılarak gerçekleştirilen planlamalarda ise birim maliyete göre GA ile %38,79 oranında azalma BPSO ile %32,77 oranında azalma ve YAA ile %33,80 oranında azalma olduğu görülmektedir. Eşit eğilim odaklı durum incelendiğinde ise GA’nın tüm fiyatlandırma politikalarında diğer algoritmalarından daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. GZF politikası kullanılarak gerçekleştirilen planlamalarda GA ile birim maliyete göre %38,66 oranında azalma BPSO ile birim maliyete göre %37,20 oranında azalma YAA ile ise birim maliyete göre %31,74 oranında azalma olduğu görülmektedir. KZF kullanılarak gerçekleştirilen planlamalarda ise birim maliyete göre GA ile %36,36 oranında azalma BPSO ile %31,31 oranında azalma ve YAA ile %22,86 oranında azalma olduğu görülmektedir. Şekil 20 ve Şekil 21’de Durum 1 ve Durum 2 için algoritmaların maliyet yönünden grafiksel yöntemle karşılaştırılması sunulmaktadır.



Şekil 20. 1 Saatlik planlama maliyet (Durum 1)

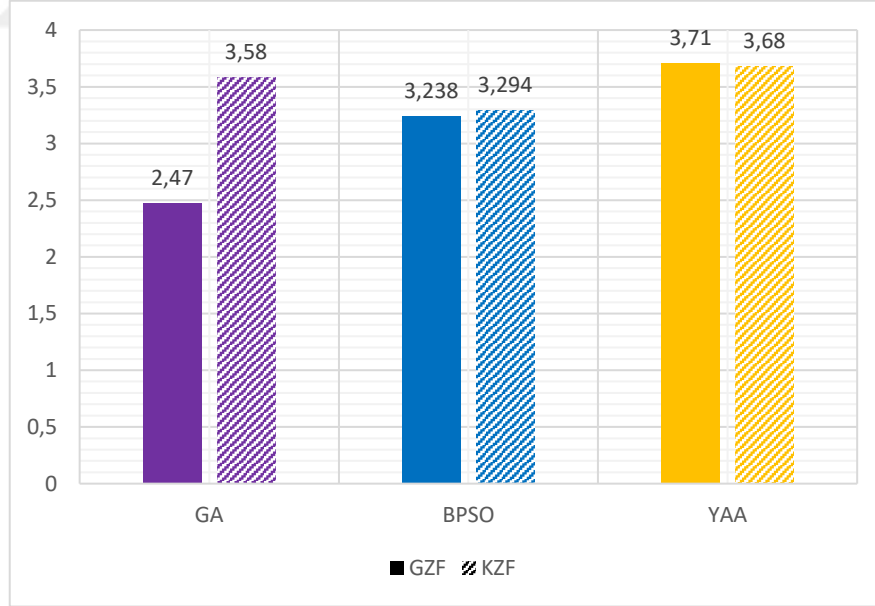


Şekil 21. 1 Saatlik planlama maliyet (Durum 2)

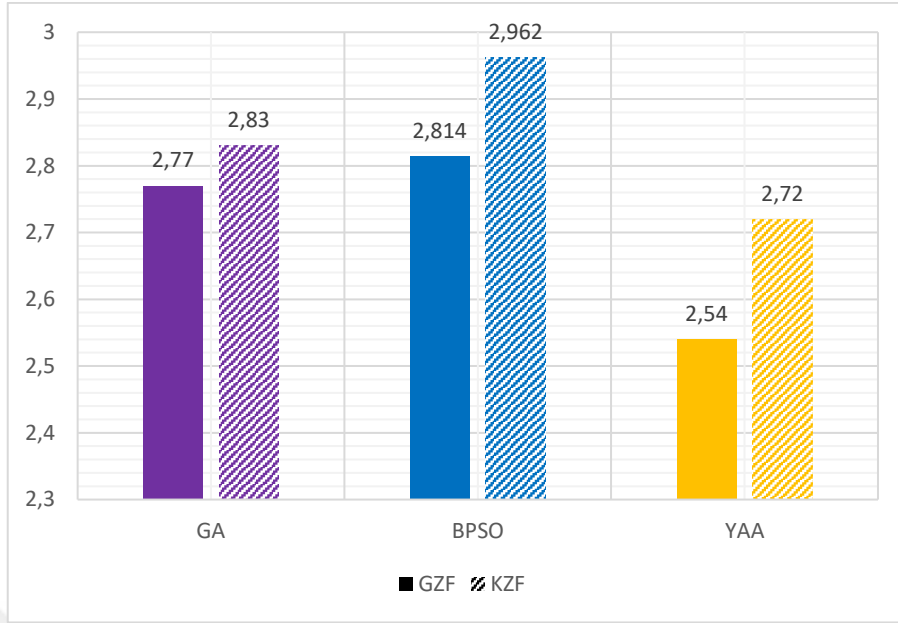
Tablo 18. 1 Saatlik planlama PAR (Durum 2 & Durum 3)

1 Saatlik Planlama (PAR)				
	Durum 2		Durum 3	
	GZF	KZF	GZF	KZF
GA	2,47	3,58	2,77	2,83
BPSO	3,238	3,294	2,814	2,962
YAA	3,71	3,68	2,54	2,72

Tablo 18’de 1 saatlik planlama için çalışma kapsamında tercih edilen algoritmaların ve fiyatlandırma politikalarının optimizasyon sonuçları yer almaktadır. Tamamen PAR odaklı durumda elde edilen sonuçlar incelendiğinde en iyi PAR oranının GZF politikası kullanılarak YAA ile elde edilmiştir. En iyi PAR oranı sırası ile YAA, GA ve BPSO olarak gerçekleşmiştir. Eşit eğilim odaklı durumda elde edilen sonuçlarda ise en iyi PAR başarımlarının GZF politikası kullanılarak GA ile elde edildiği görülmektedir. Durum 2 için en iyi PAR başarımları ise sırasıyla GA, BPSO ve YAA olarak gerçekleşmiştir. Şekil 22 ve Şekil 23’te Durum 2 ve Durum 3 için algoritmaların grafiksel yöntemle PAR yönünden karşılaştırılması sunulmaktadır.



Şekil 22. 1 saatlik planlama PAR (Durum 2)

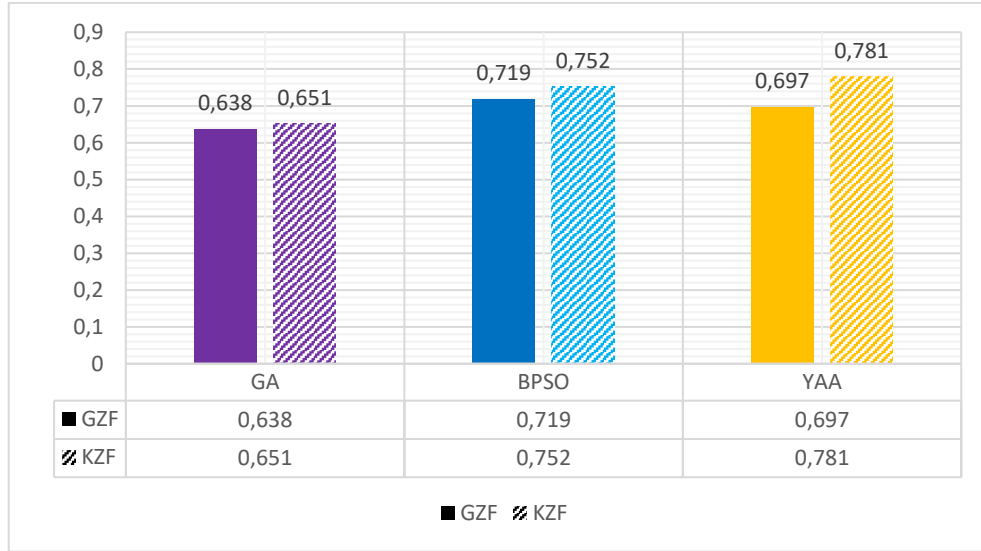


Şekil 23. 1 saatlik planlama PAR (Durum3)

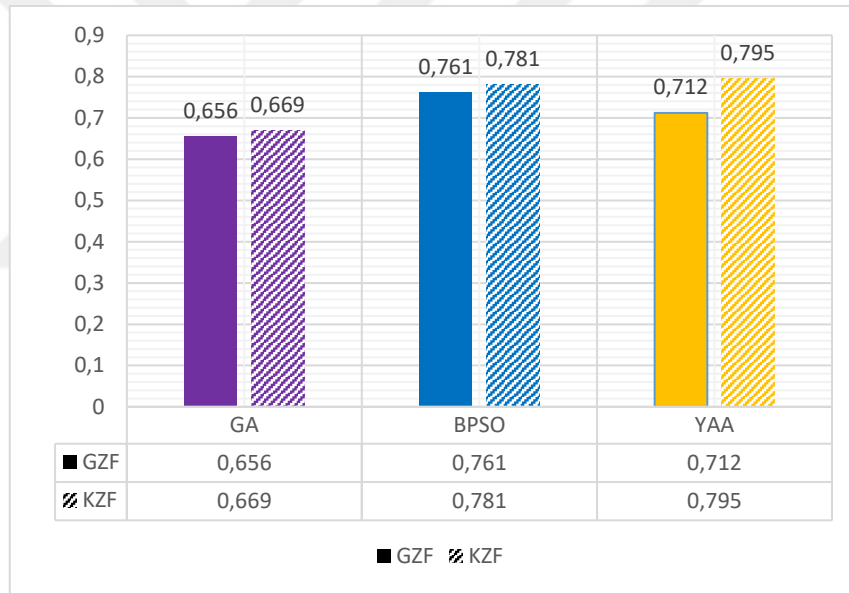
30 dakikalık planlama ile gerçekleştirilen optimizasyon işleminde çalışma kapsamında tercih edilen üç farklı algoritmaya ait maliyet durumları Tablo 19’da verilmektedir. Tamamen maliyet odaklı durumda fiyatlandırma politikalarının tümünde GA diğer algoritmalarından daha iyi sonuç vermiştir. Eşit eğilim odaklı durum incelendiğinde ise GA’nın yine tüm fiyatlandırma politikalarında diğer algoritmalarından daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 24 ve Şekil 25’te Durum 1 ve Durum 2 için algoritmaların maliyet yönünden grafiksel yöntemle karşılaştırılması sunulmaktadır.

Tablo 19. 30 dakikalık planlama ve algoritmaların maliyet durumları (Durum1 & Durum 2)

30 Dakikalık Planlama (Maliyet)				
	Durum 1		Durum 2	
	GZF	KZF	GZF	KZF
GA	0,638	0,651	0,656	0,669
BPSO	0,719	0,752	0,761	0,781
YAA	0,697	0,781	0,712	0,795



Şekil 24. 30 dakikalık planlama maliyet (Durum 1)



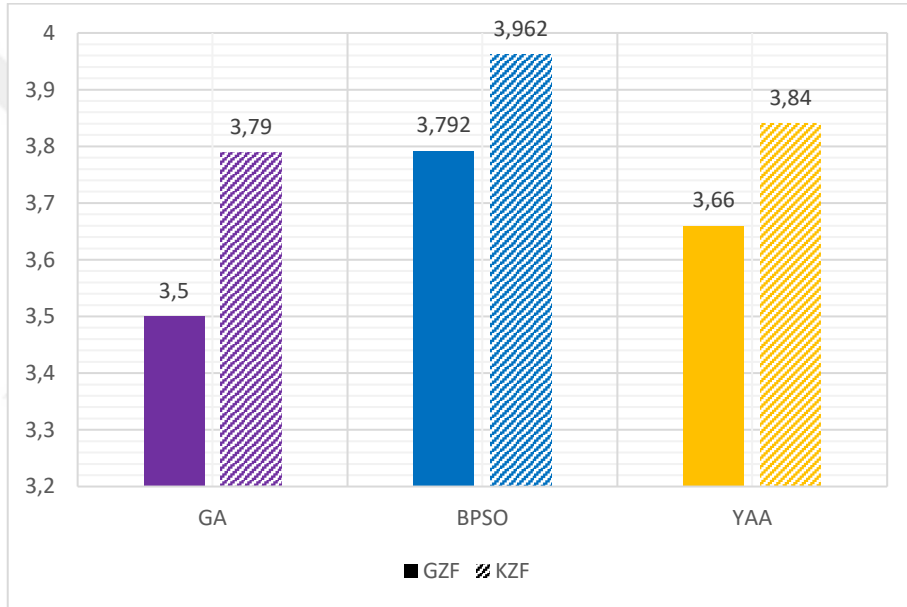
Şekil 25. 30 dakikalık planlama maliyet (Durum 2)

Tablo 20’de 30 dakikalık planlama için çalışma kapsamında tercih edilen algoritmaların ve fiyatlandırma politikalarının optimizasyon sonuçları yer almaktadır. Tamamen PAR odaklı durumda elde edilen sonuçlar incelendiğinde en iyi PAR oranının KZF politikası kullanılarak BPSO ile elde edilmiştir. BPSO algoritması kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyonda KZF ile elde edilen en iyi PAR başarımından sonra en iyi ikinci PAR başarımı GZF kullanılan BPSO ile elde edilmiştir. Eşit eğilim odaklı durumda elde edilen sonuçlarda ise en iyi PAR başarım oranının GZF politikası kullanılarak GA ile

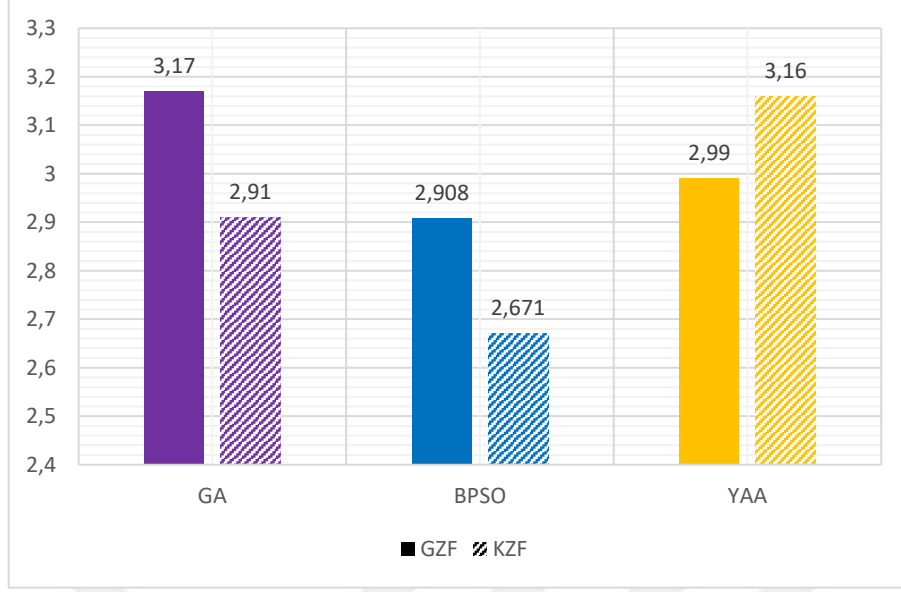
elde edildiği görülmektedir. Şekil 25 ve Şekil 26’da Durum 2 ve Durum 3 için algoritmaların grafiksel yöntemle PAR yönünden karşılaştırılması sunulmaktadır.

Tablo 20. 30 dakikalık planlama PAR (Durum 2 & Durum 3)

30 Dakikalık Planlama (PAR)				
	Durum 2		Durum 3	
	GZF	KZF	GZF	KZF
GA	3,5	3,79	3,17	2,91
BPSO	3,792	3,962	2,908	2,671
YAA	3,66	3,84	2,99	3,16



Şekil 26. 30 dakikalık planlama PAR (Durum 2)

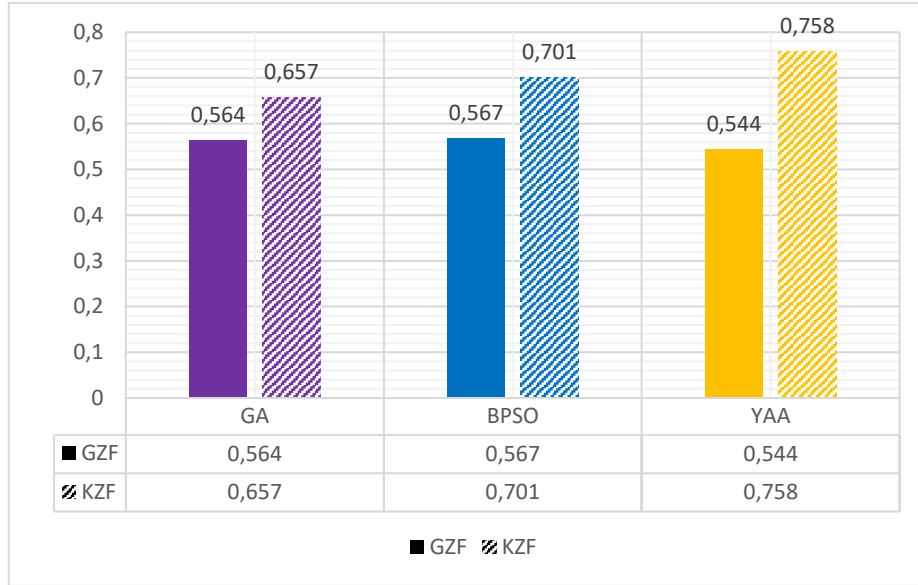


Şekil 27. 30 dakikalık planlama PAR (Durum3)

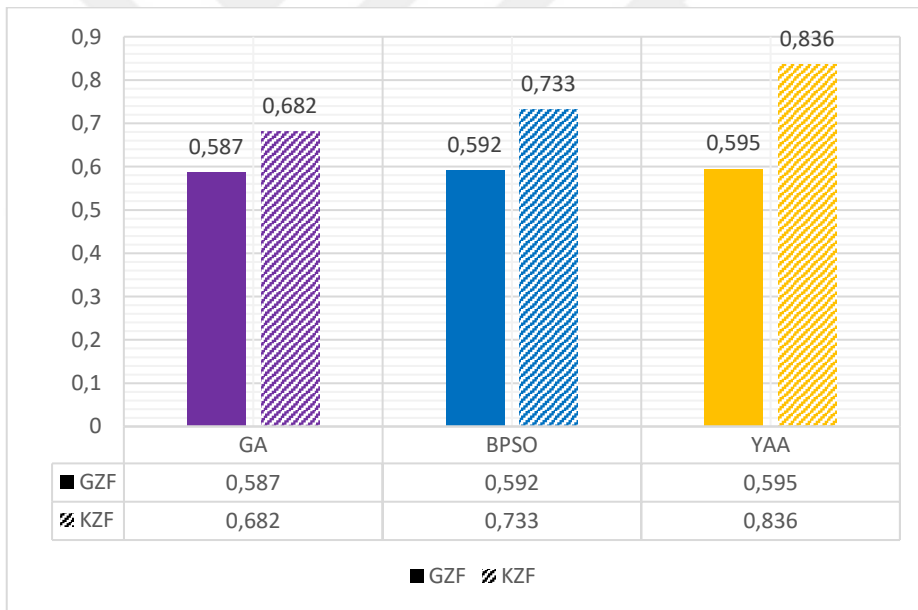
Tablo 21’de 15 dakikalık planlama için çalışma kapsamında tercih edilen algoritmaların ve fiyatlandırma politikalarının optimizasyon sonuçları yer almaktadır. Tamamen maliyet odaklı durumda elde edilen sonuçlar incelendiğinde en iyi maliyet minimizasyonunun GZF politikası kullanılarak YAA ile elde edildiği görülmektedir. Eşit eğilim odaklı durumda elde edilen sonuçlarda ise en iyi maliyet başarımının GZF politikasının kullanıldığı GA ile olduğu görülmüştür. Şekil 27 ve Şekil 28’de Durum 2 ve Durum 3 için algoritmaların grafiksel yöntemle maliyet yönünden karşılaştırılması sunulmaktadır.

Tablo 21. 15 dakikalık planlama maliyet (Durum 1 & Durum 2)

15 Dakikalık Planlama (Maliyet)				
	Durum 1		Durum 2	
	GZF	KZF	GZF	KZF
GA	0,564	0,657	0,587	0,682
BPSO	0,567	0,701	0,592	0,733
YAA	0,544	0,758	0,595	0,836



Şekil 28. 15 dakikalık planlama maliyet (Durum 1)



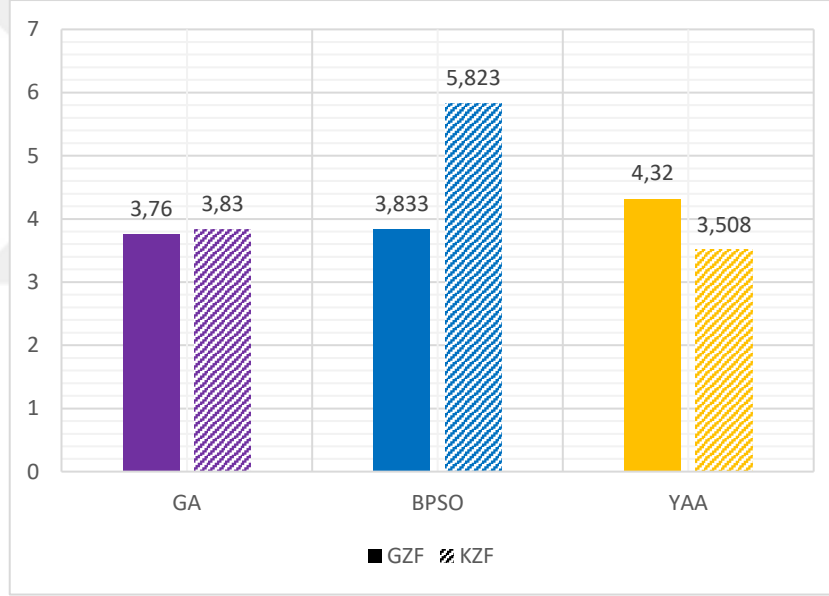
Şekil 29. 15 dakikalık planlama maliyet (Durum 2)

Tablo 22’de 15 dakikalık planlama için çalışma kapsamında tercih edilen algoritmaların ve fiyatlandırma politikalarının optimizasyon sonuçları yer almaktadır. Tamamen PAR odaklı durumda elde edilen sonuçlar incelendiğinde en iyi PAR oranının GZF politikası kullanılarak GA ile elde edilmiştir. GA kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyonda GZF ile elde edilen en iyi PAR başarımından sonra en iyi ikinci PAR başarımı KZF kullanılan GA ile elde edilmiştir. Eşit eğilim odaklı durumda elde edilen

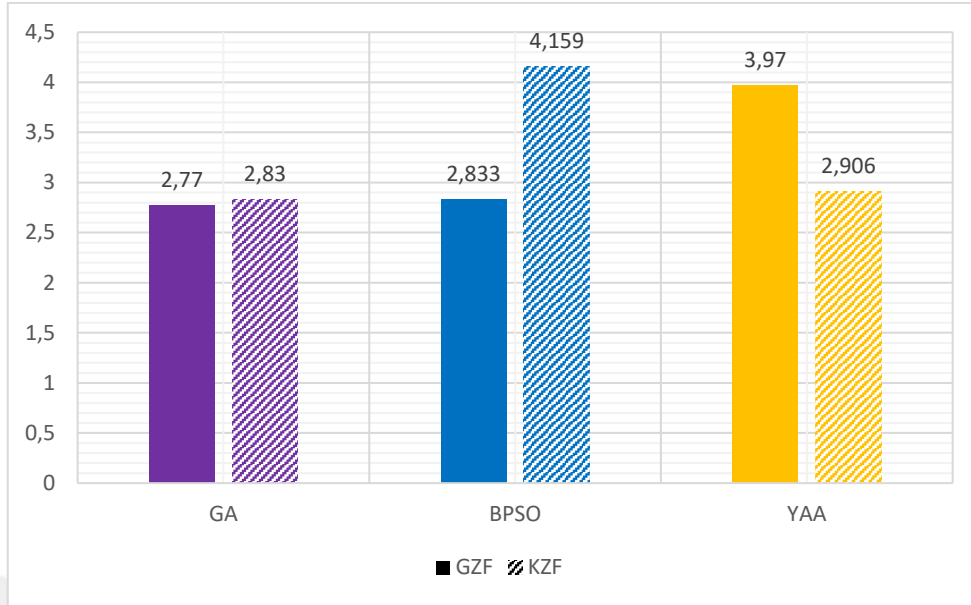
sonuçlarda ise en iyi PAR başarımlarının GZF politikası kullanılarak GA ile elde edildiği en iyi ikinci başarımın ise KZF kullanılarak yine GA ile elde edildiği görülmektedir. Şekil 27 ve Şekil 28’de Durum 2 ve Durum 3 için algoritmaların grafiksel yöntemle PAR yönünden karşılaştırılması sunulmaktadır.

Tablo 22. 15 dakikalık planlama PAR (Durum 2 & Durum 3)

15 Dakikalık Planlama (PAR)				
	Durum 2		Durum 3	
	GZF	KZF	GZF	KZF
GA	3,76	3,83	2,77	2,83
BPSO	3,833	5,823	2,833	4,159
YAA	4,32	3,508	3,97	2,906

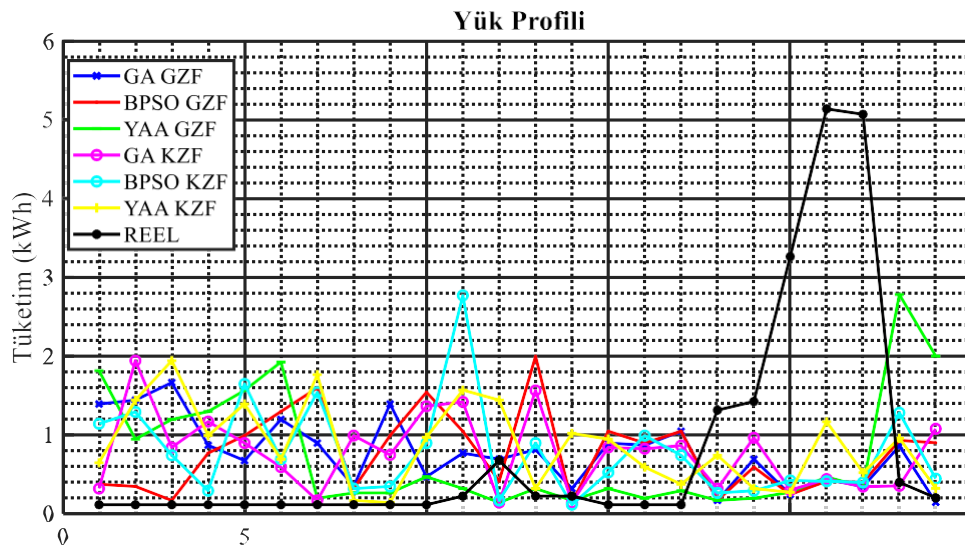


Şekil 30. 15 dakikalık planlama PAR (Durum 2)



Şekil 31. 15 dakikalık planlama PAR (Durum 3)

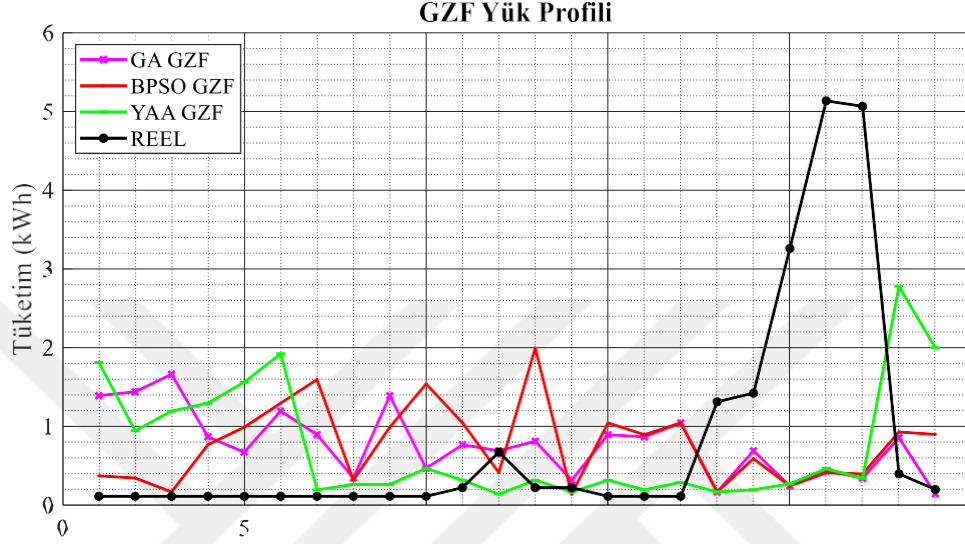
Çalışmanın bundan sonraki kısmında operasyon zaman aralığı 15 dk olarak seçilen optimizasyon sonuçları ve gerçek tüketim verisine ait yük profilleri sunulacaktır. Bir güne ait yük profili 15 dakikalık zaman dilimleri yerine 1 saatlik tüketim verilerine dönüştürülerek sunulmaktadır. Böyle bir gösterim grafikler üzerinde bir günlük PAR değişimini yükün zaman dilimlerine yayılım şeklini ve gerçek veri ile algoritmalar arasındaki kıyası iyi bir şekilde sunmaktadır.



Şekil 32. Planlama öncesi ve optimize edilmiş yük profilleri

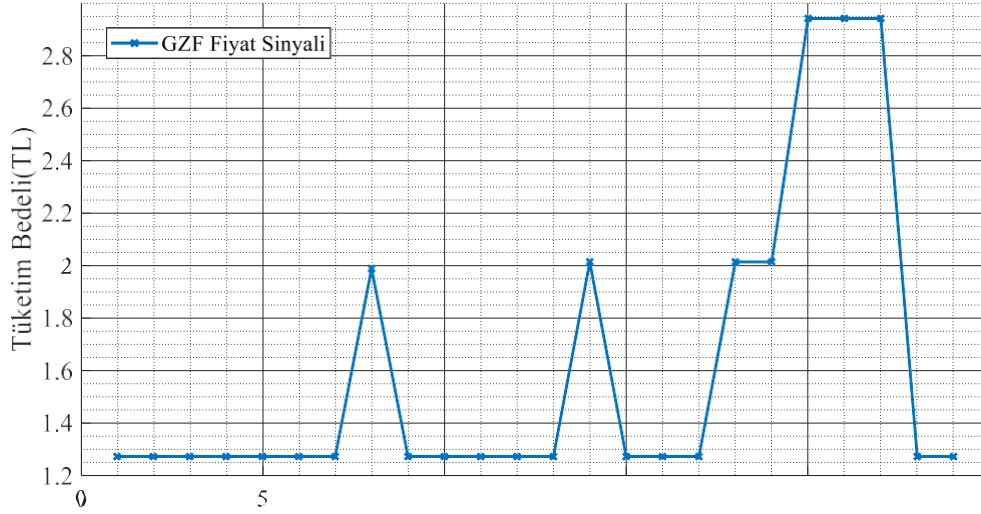
Şekil 31’de 15 dakikalık planlama ile elde edilen GA, PSO ve YAA algoritmalarına ait optimize edilmiş bir günlük tüketim yük profilleri ve optimize edilen güne ait gerçek yük

profili sunulmaktadır. Her profile ait pik talep noktası grafik üzerinde etiketlenmiştir. Yük profilleri incelendiğinde gerçek verideki pik yükün tüm algoritma ve fiyatlandırma politikalarında başarılı bir şekilde diğer zaman dilimlerine yayıldığı ve anlık pik tüketim değerinin tüm algoritmalar da azaltılabildiği görülmektedir.

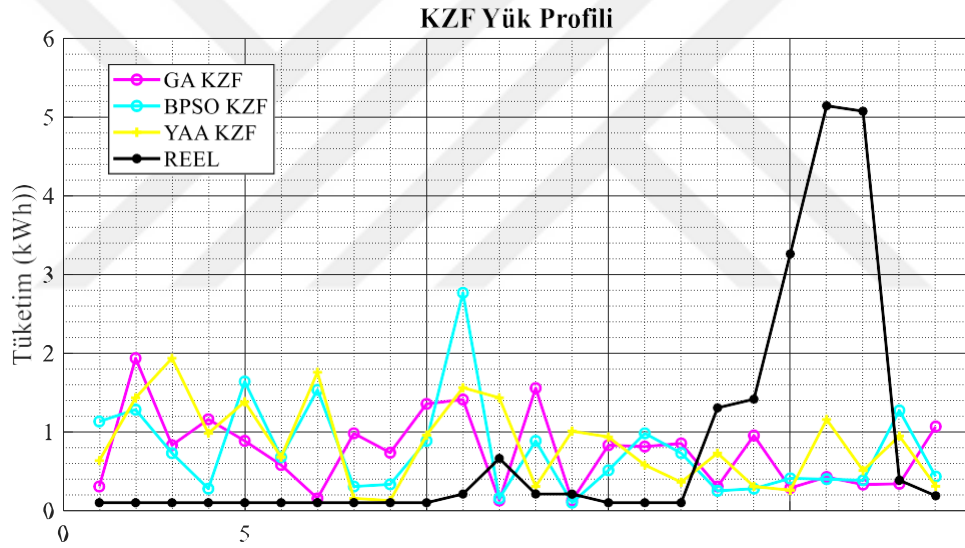


Şekil 33. GZF Yük profilleri

Şekil 32’de gerçek veriye ait olan ve GZF politikasının kullanıldığı optimizasyonlara ait yük profilleri sunulmaktadır. Siyah renkli grafik gerçek veriye ait olan yük profilini temsil etmektedir. GZF kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinde fiyat sinyali bu grafikteki verilere göre oluşturulmaktadır. Şekil 34’te gerçek tüketim verisi üzerinden elde edilen GZF fiyat sinyali gösterilmektedir. Bu şekildeki bir optimizasyon işleminde gerçek veriye ait pik talep anları en yüksek tüketim bedeline sahip olacaktır ve optimizasyon sırasında ilgili zaman anlarında tüketim olabildiğince minimum seviyede olacak şekilde ayarlanacaktır. En düşük tüketim anlarında ise en düşük tüketim bedeline sahip olacaktır. Optimizasyon işleminde en düşük tüketim bedeline sahip zamanlara kısıtlar dahilinde en yüksek tüketimler kaydırılacaktır. Şekil 33 incelendiğinde saat 20.00 ile 22.00 arasında gerçek verinin pik tüketime sahip olduğu görülmektedir. Buna karşılık GA, PSO ve YAA algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyonlara ait yük profillerine bakıldığında zaman saat 20.00 ile 22.00 arasında minimum tüketime sahiptirler. Pik tüketim anları incelendiğinde Şekil 33’teki fiyat sinyalinde minimum tüketim bedeline sahip anlarda olduğu görülmektedir.

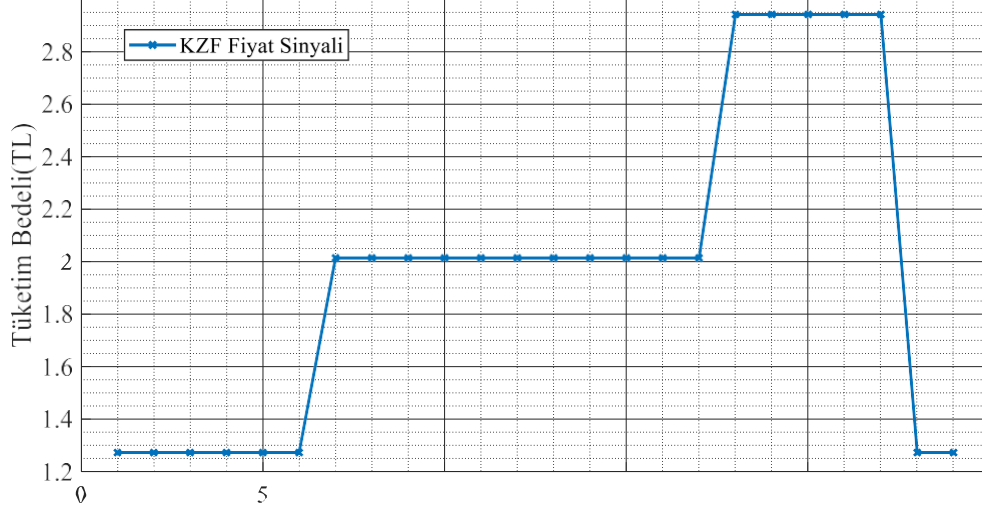


Şekil 34. GZF Fiyat sinyali



Şekil 35. KZF Yük profilleri

Şekil 34'te ise gerçek tüketime ait ve KZF kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyonlara ait yük profilleri sunulmaktadır. KZF politikasında fiyat sinyali sabittir ve tüketim miktarına göre değişiklik göstermemektedir.

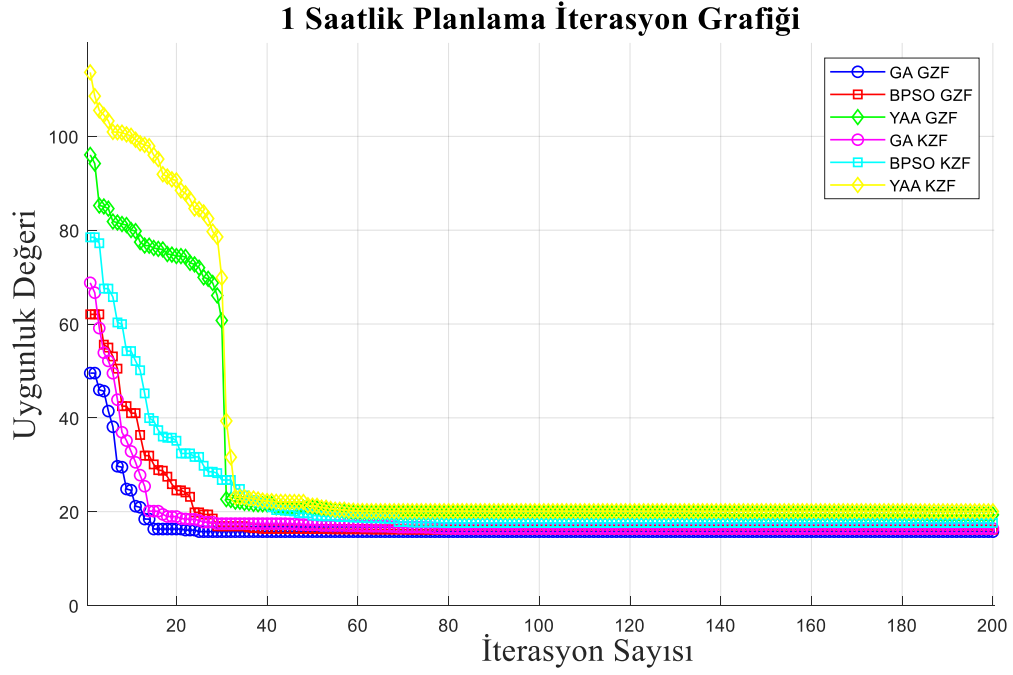


Şekil 36. KZF Fiyat sinyali

Şekil 35'te KZF'ye ait fiyat sinyali verilmiştir. Bu şekilde olan bir fiyat sinyalinde saat 18.00 ile saat 22.00 arasında optimize edilen tüketimlerin minimum tüketim değerine almaya yönelik olması gerekmektedir. Şekil 35'te KZF kullanılan yük profillerine bakıldığında bu zaman dilimlerinde minimum tüketim değerine almaya yönelik oldukları görülmektedir. Fiyat sinyalinde 00.00 ile 06.00 saatleri minimum tüketim bedeline sahiptir. Bu zaman aralığında ise optimize edilen tüketimlerin kısıtlar dahilinde maksimum değerini alması hedeflenmektedir. Şekil 35'te ilgili zaman aralıkları incelendiğinde GA ve YAA algoritmalarının pik talep zamanlarının ilgili zaman aralığında gerçekleştiği ve tüm algoritmaların yükleri çoğunlukla bu zaman aralığına kaydırıldığı görülmektedir.

Tüm yük profilleri ve fiyat sinyalleri incelendiğinde elde edilen verilerin tüketim optimizasyonu işleminin felsefesiyle uygunluk gösterdiği ve tez çalışması kapsamında tercih edilen algoritmalarından GA, maliyet ve PAR optimizasyon işlemlerini diğer algoritmalara göre daha iyi gerçekleştirmiştir. YAA, tamamen maliyete veya tamamen PAR'a odaklanılan durumlarda planlama zaman aralığı daraldıkça en iyi sonuca ulaşan algoritma olmuştur. Algoritmaların sonuca yakınsama hızları karşılaştırıldığında YAA algoritmasının en hızlı algoritma olduğu görülmüştür.

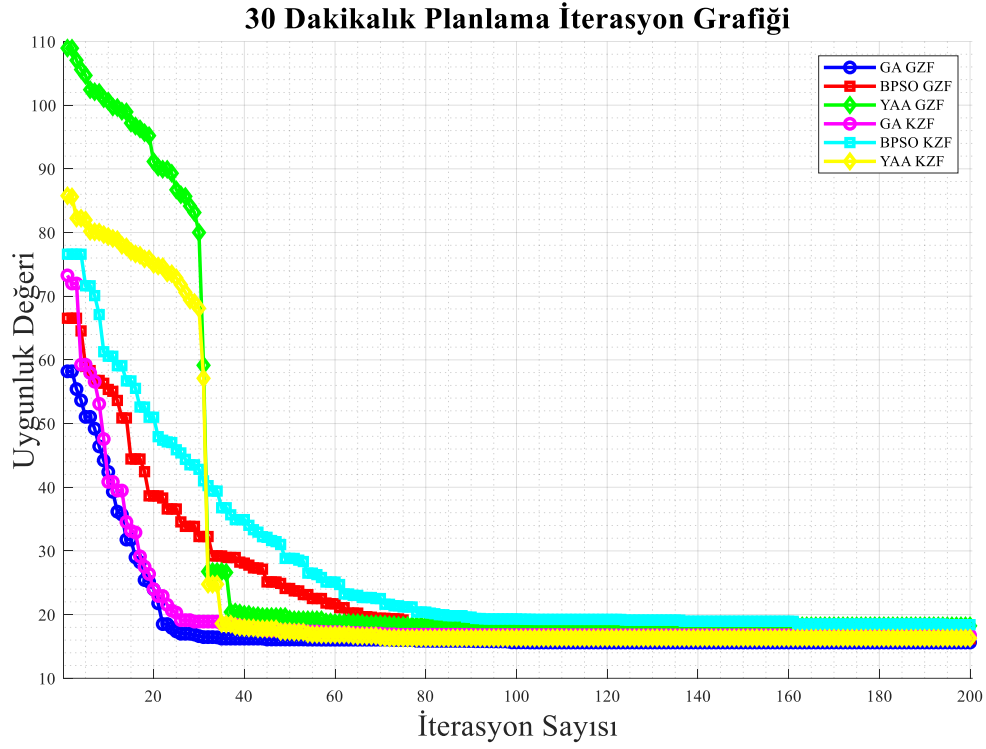
Optimizasyon problemlerinde diğer bir önemli kriter ise global minimuma yakınsama süresidir. Bu kapsamda eşit eğilim odaklı durumda GA, PSO ve YAA algoritmalarıyla GZF ve KZF kullanılarak 1 saat, 30 dakika ve 15 dakikalık planlamaya ait tüm kodlar 300 iterasyon için MATLAB programında 200 kere çalıştırılmıştır.



Şekil 37. 1 saatlik planlama global minimuma yakınsama durumları

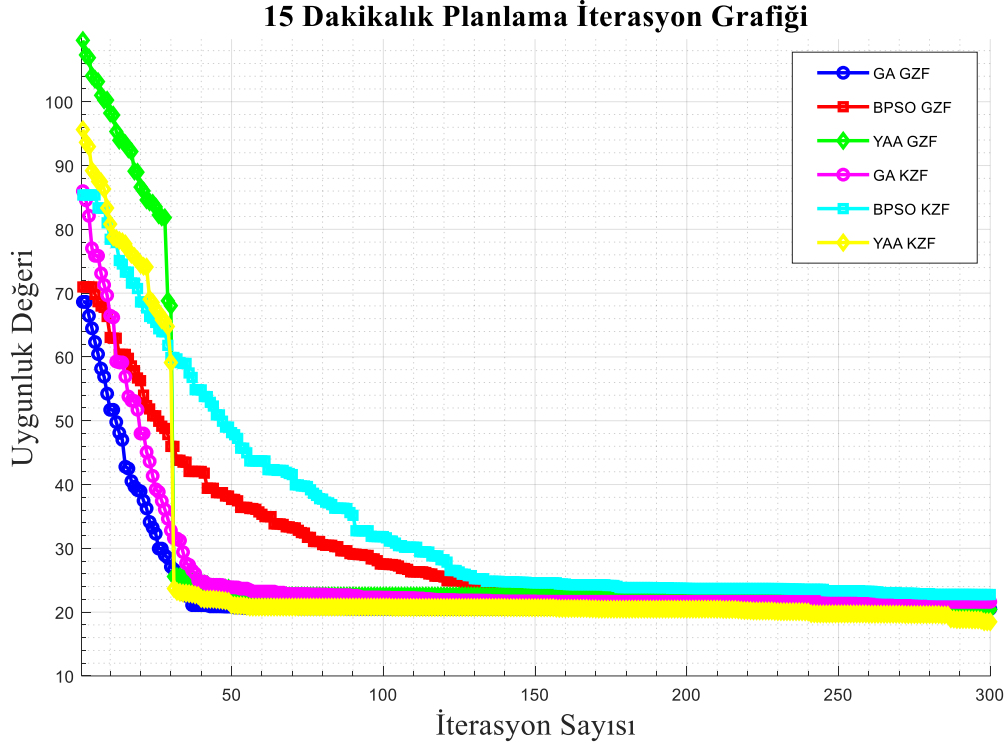
Şekil 36’da 1 saatlik planlamaya ait eşit eğilim odaklı tüm optimizasyon durumlarına ait 150 iterasyonluk bir döngüde global minimuma yakınsama hızlarını gösteren grafikler sunulmaktadır.

Global minimum noktasına GA’ya ait GA GZF (Gerçek zamanlı fiyatlandırma) ve GA KZF (kullanım zamanı fiyatlandırması) en çabuk yaklaşan algoritmalarlardır. PSO algoritmasında PSOGZF GA’dan hemen sonra global minimuma yaklaşmıştır. YAA’da uygunluk fonksiyonu ilk iterasyonlarda diğer algoritmalarla göre daha yüksek değerlerden hesaplanmaya başlanmıştır ancak belirli bir iterasyondan sonra hızlı bir şekilde global minimum değerine yakınsamaya başlamaktadır. Bu durumda YAA’ya ait YAA GZF ve YAA KZF global minimuma PSO KZF’den daha önce yaklaşım göstermektedir. Global minimum değerine en hızlı yakınsama sırasıyla GA GZF, GA KZF, BPSO GZF, YAA GZF, YAA KZF ve BPSO KZF şeklindedir.



Şekil 38. 30 dakikalık planlamada global minimuma yakınsama durumları.

Şekil 37’de 30 dakikalık planlama için eşit eğilim odaklı durumda algoritmaların global minimuma yakınsama grafikleri sunulmaktadır. 30 dakikalık planlama durumu için global minimuma en hızlı yakınsayan GA’ya ait GA GZF ve GA KZF olmuştur. GA’nın ardından global minimuma en çabuk yakınsayan YAA algoritmasıdır. YAA 1 saatlik planlamaya benzer bir şekilde ilk iterasyonlarda uygunluk değerini yüksek hesaplamaktadır belirli bir iterasyondan sonra hızlı bir şekilde azalarak global minimuma yakınsamaktadır. Bu planlama durumu için son olarak PSO algoritmasına ait BPSO GZF ve BPSO KZF global minimum değerine yakınsama göstermektedir. Global minimum değerine en hızlı yakınsama sırasıyla GA KZF, GA RTP, YAA KZF, YAA KZF, BPSO KZF ve BPSO GZF şeklindedir.



Şekil 39. 15 dakikalık planlamada global minimuma yakınsama durumları

Şekil 38’de 15 dakikalık planlama için eşit eğilim odaklı durumda algoritmaların global minimuma yakınsama grafikleri sunulmaktadır. Bu durumda global minimuma en çabuk yakınsayan YAA algoritması olmaktadır. Ardından GA ve son olarak PSO algoritması global minimuma yakınsamaktadır. Global minimum değerine en hızlı yakınsama sırasıyla YAA KZF, YAA KZF, GA GZF, GA KZF, BPSO GZF ve BPSO KZF şeklindedir.

Algoritmaların global minimuma en erken yakınsama noktalarına odaklanabilmek amacıyla Şekil 38 ve Şekil 39’da ilk 150 iterasyona kadar değerler gösterilmektedir. Şekil 40’da ise ilk 200 iterasyona kadar olan değerler alınmıştır. Grafikler incelendiğinde operasyon zaman aralığı kısaldıkça global minimuma yakınsanan iterasyonun arttığı görülmektedir. Bunun başlıca sebebi 1 saatlik planlama için 120 adet veri ve 24 elemanlı fiyat sinyali bulunmaktadır. 30 dakikalık planlama için 240 adet veri 48 elemanlı fiyat sinyali bulunmaktadır. 15 dakikalık planlama için 480 adet veri 96 elemanlı fiyat sinyali bulunmaktadır. veri sayısındaki artış sebebiyle algoritmaların global minimuma yaklaştıkları iterasyon da artış göstermektedir. Ancak YAA algoritması bu konu da diğer algoritmalarla göre daha istikrarlı bir davranış göstermektedir. YAA’nın tercih edildiği tüm planlamalarda yaklaşık 30. İterasyondan sonra hızlı bir şekilde global minimum noktasına yaklaşıldığı görülmektedir. İlgili optimizasyonların tek bir tüketim noktasından toplu tüketim

optimizasyonlarına taşındığı durumda tercih edilecek olan optimizasyon algoritmasının global minimuma yaklaşma hızı da bir seçim parametresi olarak görülebilecektir.



3. SONUÇLAR

Günümüzde elektrik enerjisine olan talep giderek artmaktadır. Her geçen gün elektrik şebekesine yeni bir tüketici veya elektrikli araçlar vb. farklı tüketim ürünleri dâhil edilmektedir. Artan enerji talebini karşılamak için yeni üretim tesisleri devreye alınmaktadır. Geleneksel yöntemlerle elektrik üretiminin ekonomik ve çevresel yönlerden etkisi birçok çalışmada ele alınmıştır. Öte yandan yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak yapılan elektrik üretimi de maliyetlidir. İlâveten, dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye entegrasyon problemleri de söz konusu olmaktadır.

Elektrik enerjisinin artan talebine karşılık yeni üretim santrallerinin devreye alınmasının şebeke karakteristiği, maliyet, sosyal ve çevresel yönlerden olumsuz etkilerinin bulunmasından dolayı var olan enerjinin daha akıllı ve optimum bir şekilde yönetilebilmesi, tüketici ile şebeke işletmecisinin ortak eylem planlaması yapması gerekliliğini zorunlu kılmaktadır.

Akıllı şebeke yapısı ile elektrik şebekesi uçtan uca izlenebilir ve kontrol edilebilir bir yapıya dönüşmektedir. Şebekenin herhangi bir noktasından elde edilen veri anlamlandırılarak üreticiden tüketiciye kadar şebekenin tüm paydaşlarının hizmetine sunulmaktadır. Uçtan uca bir yapıyla birlikte çift yönlü haberleşme ve enerji akışı sağlayan akıllı şebeke mimarisinde talep tarafı yönetimi kavramı daha fazla önem kazanmaktadır. Talep tarafı yönetiminde ise yük yönetimi amacıyla kullanılan farklı stratejiler bulunmaktadır. Akıllı şebeke altyapısıyla birlikte şebeke operasyon süreçlerine dahil olan tüketiciler yük yönetimi süreçlerinin de aktif bir parçası haline gelmektedirler. Akıllı ölçüm cihazları ve haberleşme üniteleri ile tüketiciler artık anlık olarak tüketimlerini izleyebilir ve yönetebilir hale gelmektedir.

Literatür ve uygulamalar incelendiğinde yük yönetimi konusunda doğrudan tüketicinin cihaz gruplarının talep kontrol cihazları aracılığıyla yönetildiği doğrudan yük kontrolü ve tüketici ile şebeke yöneticisinin karşılıklı fayda içerisinde yükün farklı tüketim anlarına taşındığı çeşitli teşvik senaryolarının yer aldığı dolaylı yük yönetimi bulunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında mesken tipi bir tüketicinin bir günlük tüketimi GA, BPSO ve YAA algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. Temel amaç tüketicinin yoğun tüketim gösterdiği zamanlardan farklı zamanlara yükleri kaydırarak pik tüketim ile ortalama tüketim miktarı arasındaki oranı ifade eden PAR ve maliyette minimizasyonu elde etmektir.

PAR oranının minimize edilmesi tüketicinin yük profilinin ortalama tüketime yaklaştırılarak daha düz bir tüketim eğrisinin elde edilmesini sağlamaktadır. Daha düz bir tüketim eğrisi, şebeke yöneticisinin yük akışı planlamasında ve arz talep dengesini korumasında kolaylıklar sağlamaktadır. Tüketicilerin yüklerinin kontrol edilmesine ve farklı zamanlara kaydırmasına teşvik etmek amacıyla elektrik tüketiminin optimize edilen şekilde olması halinde günlük tüketim bedelinin optimize edilmemiş duruma göre daha düşük duruma getirilmektedir. Literatür de yaygın olarak tercih edilen, maliyetten bu şekilde tasarruf sağlamak amacıyla kullanılan üç farklı fiyatlandırma politikasından ikisi olan gerçek zamanlı fiyatlandırma (GZF) ve kullanım zamanı fiyatlandırma (KZF) bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Türkiye’de günü üç farklı zaman dilimine ayıran üç zamanlı tarife yapısı KZF’ ye örnek teşkil etmektedir. Ancak ülkemizde GZF politikasına dair henüz bir uygulama örneği bulunmamaktadır. Elektrik tüketim bedelleri üç aylık periyotlarda EPDK tarafından ilan edilmektedir. Elektrik tüketim bedelinin belirlenmesi belirli matematiksel yöntemlere ek olarak stokastik yaklaşımlar içerdiğinden dolayı tez çalışması kapsamında GZF politikası resmi kaynaklardan bağımsız bir şekilde tüketicilerin ortalama tüketimlerinin mevcuttaki üç zamanlı tarifenin gündüz tarifesine denk olacak şekilde bir ölçeklendirme çalışması gerçekleştirilerek modellenmiş ve böylece gerçeğe yakınsaması amaçlanmıştır.

Optimizasyon problemi hem maliyeti hem de PAR’ı minimize etmeyi amaçlayan çok amaçlı bir problem olmasından dolayı her amaçta ne kadar başarımlı elde edilmek istendiğiyle orantılı olarak değişik değerler alan ancak toplamının 1’e eşit olduğu iki adet katsayı bulunmaktadır. Maliyet fonksiyonuna bağlı katsayının 1 olması PAR’a bağlı katsayının sıfır olmasını gerektirmektedir. Aynı durum tersi için de söz konusu olmaktadır. Ancak optimizasyon problemi maliyeti minimize ederek hem bir sosyal fayda, PAR’ı minimize ederek hem de şebeke yönetimine dair fayda içermektedir. Bu sebeple üçüncü bir tercih olarak her iki amaca bağlı katsayıların 0,5 değerinde alınmasıyla eşit eğilim odaklı çalışma ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında üç farklı durum, iki farklı fiyatlandırma politikası ve üç farklı optimizasyon algoritması ve üç farklı planlama zaman aralığıyla toplam 72 adet senaryo incelenmiştir.

Planlama zaman aralıkları 1 saat, 30 dakika ve 15 dakika şeklinde seçilmiştir. Planlamalara ait sonuçlar benzetim çalışmaları bölümünde detaylıca sunulmaktadır. Optimize edilen tüketim de minimum operasyon zaman aralığı 15 dakikadır. Bu sebeple yük profilinin 15 aralıklı olacak şekilde elde edilip 15 dakika üzerinden optimizasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerçek veriye daha fazla uygunluk taşımaktadır. Bu kapsamda ilgili

tüketicinin tek terim tek zamanlı abone grubunda olması durumunda, tek terim üç zamanlı abone grubunda olması durumunda, eşit eğilim odaklı optimizasyon sonucunda tek terim üç zamanlı (KZF) durumunda tez çalışması kapsamında öne sürülen gerçek zamanlı fiyatlandırmayla (GZF) birlikte eşit eğilim odaklı optimize edilmesi durumunda PAR ve maliyete ait elde edilen kazanımlar Tablo 23'te sunulmaktadır

Tablo 23. Planlama öncesi ve planlama sonrası PAR ve maliyet

	Tek Terim Tek Zamanlı	Tek Terim Üç Zamanlı	KZF			GZF		
			GA	BPSO	YAA	GA	BPSO	YAA
Maliyet (Birim)	1	1,33	0,682	0,733	0,836	0,586	0,592	0,595
PAR	6,285		3,830	5,823	3,508	3,760	3,833	4,320

Tablo 23'e göre ilgili tüketici abone grubunu tek terim üç zamanlı abone grubuna taşıdığında %33,18 zarar etmektedir. Türkiye'de kullanılan üç zamanlı tarifeye esas bir optimizasyon işlemine tabi tutulduğunda tek terim tek zamanlı abone grubuna göre GA ile optimizasyonda %31,81, BPSO ile optimize edildiğinde %26,66 ve YAA ile optimize edildiğinde ise %16,38 kâr etmektedir. Tez çalışması kapsamında önerilen GZF politikası kullanılarak GA ile optimize edildiğinde tek terim tek zamanlı abone grubuna göre %41,31 BPSO ile optimize edildiği durumda %40,82 ve YAA ile optimize edildiği durumda ise %40,45 kâr etmektedir.

Planlama öncesinde PAR 6,285 olarak hesaplanmıştır. Üç zamanlı tarifeyi temsil eden KZF ile optimize edildiğinde GA tercih edilmesi durumunda %39,01 azalma, BPSO tercih edilmesi durumunda %7 ve YAA tercih edildiği durumda %44,17 azalma sağlanmaktadır. Tez çalışması kapsamında önerilen GZF politikası kullanılarak optimize edilmesi durumunda GA ile %40,16 BPSO ile %39 ve YAA ile %31,25 azalma sağlanmaktadır.

Tüketici maliyet açısından en iyi senaryoda %40,16 en kötü senaryoda ise %7 kar elde etmektedir. PAR açısından ise en iyi senaryoda %44,17 oranında, en kötü senaryoda ise %7 azalma göstermektedir.

Optimizasyonu gerçekleştirilen tüketici mevcut durumda tek zamanlı tek terimli tarifeden yararlanmaktadır. Türkiye'de kullanılan tek terim üç zamanlı tarife gece fiyatlandırması döneminde mevcuttaki tarife dönemine göre daha avantajlıdır. Ancak tüketiciler için tüm yüklerini gece fiyatlandırması döneminde çalıştırması ertelenemez

yükler, kısmi ertelenebilir yükler ve tüketici konforu açısından uygun değildir. Puant zaman ve gündüz fiyatlandırması döneminde gerçekleştirilen tüketimler tüketiciyi maliyet açısından zarara sokmaktadır. Mevcutta kullanılan tarifelere bir alternatif olarak optimize edilmiş KZF ve GZF tarifeleri şebeke işletmecisi ve tüketici için bir fırsat oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak Türkiye’de kullanılan KZF’yi ve daha esnek bir yapıya sahip olan ancak mevcutta uygulama örneği bulunmayan GZF politikası için gerçeğe yakın bir GZF politikası kullanılarak GA, BPSO ve YAA algoritmalarıyla talep tarafı yönetimi için maliyet ve PAR optimizasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma KZF ve GZF politikalarını birlikte kullanarak tüketicinin kârlılığı ve fiyatlandırma politikalarının yük profilinin şekillenmesi üzerindeki etkisini birlikte sunmasıyla, literatürde bu alanda henüz tercih edilmemiş YAA’nın performansının değerlendirilmesi ve optimizasyon algoritmalarının global minimuma yakınsama hızlarının değerlendirilmesiyle literatüre katkı sağlamaktadır.

4. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan yük yönetim şekli cihazların farklı zaman dilimlerine kaydırılmasını temel almaktadır. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde cihazların güçleri esas alınmıştır. Toplayıcı platformları gibi bir ekosistemde birden fazla tüketici için doğrudan cihaz güçleri üzerinden işlemleri gerçekleştirmek zorlaşacaktır. Alınan yük profilindeki anlık toplam tüketim güç üzerinden günlük tüketimi optimize etmek hem farklı abone grupları için uygulanabilirliği artıracaktır hem de birden fazla abonenin yük yönetimi merkezi bir şekilde kolayca gerçekleştirilebilecektir.

Tez çalışmasında geliştirilen GZF politikasının ülkemizde henüz kullanımı söz konusu olmasa da şebekenin geleceğe yönelik ihtiyaçları bu konu özelinde çalışmaları gerektirmektedir. Çalışma sonuçlarından görülebileceği gibi mevcut KZF politikasından türetilmiş bir GZF politikası hem tüketici hem de şebeke için diğer politikalardan daha iyi faydalar sağlamaktadır. Daha uygulanabilir bir GZF politikası üzerinde yapılacak olan yenilikçi öneriler ilgili çalışmanın da daha sağlam bir zemine oturtulmasını sağlayacaktır.

Bu çalışma, doğrudan abone grubu bilinen ve akıllı sayaç sistemine sahip bir tüketici için gerçekleştirilmiştir. Her tüketici için şebeke işleticisinin tüm bu operasyonları tek tek gerçekleştirmesi büyük bir veri yoğunluğu oluşturacaktır. Yapay sinir ağları kullanılarak benzer tüketime sahip aynı dağıtım bölgesinden enerji alan kullanıcılar için gerçekleştirilecek sınıflandırma işlemiyle birlikte aynı sınıftaki tüketiciler için aynı öneri ve teşvik mekanizmaları geliştirilebilir. Sınıflandırma ile gerçekleştirilen bir yük yönetimi ile doğrudan tüketici bazlı gerçekleştirilen yük yönetimi arasında fayda-maliyet analizinin yapılması ayrı bir çalışma olarak planlanmaktadır.

5. KAYNAKLAR

- Palensky, P., & Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE transactions on industrial informatics*, 7(3), 381-388.
- Hu, Z., Kim, J. H., Wang, J., & Byrne, J. (2015). Review of dynamic pricing programs in the US and Europe: Status quo and policy recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 743-751.
- Al-Duais, A., Osman, M., Shullar, M. H., & Abido, M. A. (2021, October). Optimal real-time pricing-based scheduling in home energy management system using genetic algorithms. In *2021 IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)* (pp. 243-248).
- Palensky, P. & Kupzog, F. (2013). Smart grids. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 201-226.
- Tezde,E. (2019). Akıllı Şebeke Bağlantılı Karma Enerji Sistemi İçin Optimizasyon Tabanlı Güç Yönetimi, K.T.Ü.,Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Strbac, G. (2008). Demand side management: Benefits and challenges. *Energy policy*, 36(12), 4419-4426.
- Pinson, P., & Madsen, H. (2014). Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 686-699.
- Anderson, Çolak, İ., Bayındır, R., & Sağiroğlu, Ş., (2020). The effects of the smart grid system on the national grids . *IEEE 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid'20)*, 122-126. Paris, France.
- Alghassab, M. A. (2024). Fuzzy-based smart energy management system for residential buildings in Saudi Arabia: a comparative study. *Energy Reports*, 11, 1212-1224.
- Molla, T., Khan, B., & Singh, P. (2018). A comprehensive analysis of smart home energy management system optimization techniques. *Journal of Autonomous Intelligence*, 1(1), 15-21.
- Talha, M., Saeed, M. S., Mohiuddin, G., Ahmad, M., Nazar, M. J., & Javaid, N. (2018). Energy optimization in home energy management system using artificial fish swarm algorithm and genetic algorithm. In *Advances in Intelligent Networking and Collaborative Systems: The 9th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2017)*, 203-213.
- Polaki, S. K., Reza, M., & Roy, D. S. (2015). A genetic algorithm for optimal power scheduling for residential energy management. In *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2061-2065.

- El Makroum, R., Khallaayoun, A., Lghoul, R., Mehta, K., & Zörner, W. (2023). Home Energy Management System Based on Genetic Algorithm for Load Scheduling: A Case Study Based on Real Life Consumption Data. *Energies*, 16(6), 2698.
- Jiang, X., & Xiao, C. (2019). Household energy demand management strategy based on operating power by genetic algorithm. *IEEE Access*, 7, 96414-96423.
- Cabaña, A., & Cabaña, E. (2003). Tests of normality based on transformed empirical processes. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 5(3), 309-335.
- Abreu, C., Soares, I., Oliveira, L., Rua, D., Machado, P., Carvalho, L., & Peças Lopes, J. A. (2019). Application of genetic algorithms and the cross-entropy method in practical home energy management systems. *IET Renewable Power Generation*, 13(9), 1474-1483.
- Latif, U., Javaid, N., Zarin, S. S., Naz, M., Jamal, A., & Mateen, A. (2018, May). Cost optimization in home energy management system using genetic algorithm, bat algorithm and hybrid bat genetic algorithm. In *2018 IEEE 32nd international conference on advanced information networking and applications (AINA)* 667-677.
- Oladeji, O., & Olakanmi, O. O. (2014). A genetic algorithm approach to energy consumption scheduling under demand response. In *2014 IEEE 6th international conference on adaptive science & technology (ICAST)*, 1-6.
- Özsağlam, M. Y., & Çunkaş, M. (2008). Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu algoritması. *Politeknik Dergisi*, 11(4), 299-305.
- Youssef, H., Kamel, S., Hassan, M. H., Nasrat, L., & Jurado, F. (2024). An improved bald eagle search optimization algorithm for optimal home energy management systems. *Soft Computing*, 28(2), 1367-1390.
- Zhao, Z., Lee, W. C., Shin, Y., & Song, K. B. (2013). An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system. *IEEE transactions on smart grid*, 4(3), 1391-1400.
- Macedo, M. N., Galo, J. J., De Almeida, L. A. L., & Lima, A. D. C. (2015). Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 128-133.
- Kabalci, Y. (2016). A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 302-318.
- Khanesar, M. A., Teshnehlab, M., & Shoorehdeli, M. A. (2007, June). A novel binary particle swarm optimization. In *2007 Mediterranean conference on control & automation* (pp. 1-6)
- Shareef, H., Ibrahim, A. A., & Mutlag, A. H. (2015). Lightning search algorithm. *Applied Soft Computing*, 36, 315-333.
- Saboor, A., Javaid, N., Iqbal, Z., Abbas, Z., Khan, A. J., Rashid, S., & Awais, M. (2018). Home energy management in smart grid using evolutionary algorithms. In *2018*

IEEE 32nd international conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), 1070-1080.

- Duman, S., & Yıldız, B. (2018). Ekonomik Emisyon Yük Dağıtım Problemi İçin Kaotik Yıldırım Arama Algoritması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 406-417.
- Shareef, H., Ibrahim, A. A., & Mutlag, A. H. (2015). Lightning search algorithm. *Applied Soft Computing*, 36, 315-333.
- Almufti, S. M., Shaban, A. A., Ali, Z. A., Ali, R. I., & Fuente, J. A. D. (2023). Overview of metaheuristic algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, 2(2), 10-32.
- Venter, G. (2010). Review of optimization techniques.
- Zheng, J., Gao, D. W., & Lin, L. (2013, April). Smart meters in smart grid: An overview. In *2013 IEEE green technologies conference (GreenTech)* (pp. 57-64). IEEE.
- Dokuyucu, G. (2001), Investigation of Thermostat Set Controls As A New Direct Load Control Method, İ.T.Ü., Institute Of Science And Technology , Master Thesis, İstanbul.
- URL-1. (2024, Mart 6). 2022 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu: www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-24/yillik-sektor-raporu adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Mart 7). 2022 Yılı Tükiye Elektrik Dağıtım Sektör Raporu: www.tedas.gov.tr/tr/1/sektor-raporlari/Page/63c65a7ad27de36b22f9cf2f adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Mart 12). Elektrik Piyasası Tüketici Hizmetleri Yönetmeliği: www.epdk.gov.tr/elektrik-piyasasi-tuketici-hizmetleri-yonetmeliği adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Nisan 1), TEDAŞ-MLZ 2017-062.A Elektronik Elektrik Sayaçları Teknik Şartnamesi: www.tedas.gov.tr/tr/1/sartnameler/RoutePage/63c658e3d27de36b22f9cef6 adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Şubat 25), Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari> adresinden alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim ve Ortaöğretimini Erzurum'da tamamlamıştır. 2020 yılında lisans öğrenimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümde tamamlamıştır. 2023 yılından beri Aras Elektrik Dağıtım A.Ş. Akıllı Şebekeler ve Ar-Ge Müdürlüğünde Ar-Ge Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Şebeke Yönetimi konusunda çalışmalarına devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

