

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AKILLI ŞEBEKELERDE GERÇEK ZAMANLI EV ENERJİ YÖNETİMİ
UYGULAMASI VE HARMONİK AZALTIMI

DOKTORA TEZİ

Metin TÜYSÜZ

EYLÜL 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AKILLI ŞEBEKELERDE GERÇEK ZAMANLI EV ENERJİ YÖNETİMİ
UYGULAMASI VE HARMONİK AZALTIMI

Metin TÜYSÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 25 / 09 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Akıllı şebekelerde gerçek zamanlı ev enerji yönetimi uygulaması ve harmonik azaltımı” başlıklı bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı’nda hazırlanmıştır. Tez, harmonik kirliliği azaltmayı ve enerji yönetimi stratejileri ile sistem performansını artırmayı amaçlamaktadır. Trabzon'da dört kişilik bir evde, 26 cihazın 1 saniye çözünürlüklü verileri toplanmış ve DPSO ile DTLBO yöntemleri kullanılarak enerji yönetimi optimize edilmiştir. Bu çalışma, talep tarafı yönetimi (DSM) stratejilerinin hem harmonik bozulmayı azaltma hem de enerji verimliliğini artırma konusundaki etkinliğini ortaya koymaktadır.

Tez çalışmam süresince her an yanımda olan ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken bana kıymetli bilgileri ve tecrübeleri ile rehberlik eden danışman hocam Sayın Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkılarda bulunan kıymetli hocalarım Sayın Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ’ye, eğitim-öğretim hayatım boyunca bana katkıda bulunan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde ortak çalışmalar yürüttüğüm ve her türlü yardımı esirgemeyen Arş. Gör. Bora ÇAVDAR, Öğr. Gör. Dr. Şeyma AYMAZ ve Dr. Öğr. Üyesi Arda ÜSTÜBİÖĞLU’na şükranlarımı sunarım. Ayrıca, KTÜ Trabzon MYO’daki hocalarım Saffet KAHVECİ, Ramazan ÇETİN, Mehmet KALKIŞIM, Uğurtan TOYGAR, Önder CİVELEK, Ergin ŞAHİN ve Enes Halit AYDIN’a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan annem Nuriye TÜYSÜZ ve babam Abdulkadir TÜYSÜZ’e, kardeşlerime, sabır ve anlayışla her zaman yanımda olan eşim Tuğba TÜYSÜZ’e ve neşe kaynağım olan çocuklarım Hüseyin, Hasan ve Zeynep’e, ayrıca tüm gönül dostlarıma teşekkürlerimi sunar, minnettarlığımı ifade ederim.

Bu tez çalışmasının, bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Metin TÜYSÜZ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Akıllı şebekelerde gerçek zamanlı ev enerji yönetimi uygulaması ve harmonik azaltımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’un 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. 25/09/2024

Metin TÜYSÜZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Harmonik Azaltım ve Talep Tarafı Yönetimi	2
1.3. Harmonik Analizin Matematiksel Altyapısı	5
1.4. Talep Tarafı Yönetimi ve Elektrik Tarifesi.....	8
1.5. Talep Tarafı Yönetimi Kapsamında Yük Profili Analizi	11
1.6. Meta-sezgisel Algoritmalar	12
1.6.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO).....	13
1.6.2. Öğretme ve Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO)	13
1.7. Literatür Araştırması.....	14
1.8. Çalışmanın Motivasyonu ve Katkıları.....	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	35
2.1. Ölçüm Sistemi	35
2.2. Optimizasyon Süreci	36
2.2.1. Optimizasyon Algoritmaları.....	36
2.2.2. PSO Algoritmaları.....	37
2.2.3. TLBO Algoritmaları.....	39
2.2.4. Optimizasyon Problemi için Amaç Fonksiyonu	42
2.2.5. Optimizasyon Problemi için Kısıtlar.....	43
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
3.1. Cihazların Yük Profilleri, Enerji Tüketimleri ve Harmonik Bozulmaları.....	45
3.1.1. Buzdolabı	45
3.1.2. Modem	47

3.1.3.	Termosifon	48
3.1.4.	Saç Kurutma Makinesi.....	50
3.1.5.	Airfryer (20 dakika 200°C).....	51
3.1.6.	Airfryer (30 dakika 160°C).....	51
3.1.7.	Çay Makinesi	52
3.1.8.	Yumurta Pişirici	53
3.1.9.	Tost Makinesi.....	54
3.1.10.	Saç Düzleştirici	55
3.1.11.	Elektrikli Süpürge	56
3.1.12.	Ütü.....	57
3.1.13.	Vantilatör	57
3.1.14.	Elektrikli Fırın.....	58
3.1.15.	Elektrikli Çırpıcı	59
3.1.16.	Çamaşır Makinesi (Az Dolu)	60
3.1.17.	Çamaşır Makinesi (Tam Dolu)	61
3.1.18.	Bulaşık Makinesi.....	62
3.1.19.	LED TV.....	63
3.1.20.	Dizüstü Bilgisayar.....	64
3.1.21.	Masaüstü Bilgisayar.....	65
3.1.22.	Masaüstü Monitör	66
3.1.23.	Telefon Şarj Cihazı	67
3.1.24.	CFL Lamba (Çocuk Odası).....	68
3.1.25.	LED Lamba (Oturma Odası).....	69
3.1.26.	LED Lamba (Mutfak)	70
3.1.27.	CFL Lamba (Misafir Odası)	71
3.1.28.	CFL Lamba (Banyo)	72
3.2.	Cihazların Elektriksel Parametrelerinin Değerlendirilmesi	74
3.3.	Senaryolar ve Bulgular	82
3.3.1.	Senaryoların PAR ve Maliyet Karşılaştırmaları	84
3.3.2.	Senaryoların Harmonik Bozulma Endeksleri ve Karşılaştırmaları.....	87
4.	SONUÇLAR.....	93
5.	ÖNERİLER.....	95
6.	KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

AKILLI ŞEBEKELERDE GERÇEK ZAMANLI EV ENERJİ YÖNETİMİ UYGULAMASI VE HARMONİK AZALTIMI

Metin TÜYSÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ
2024, 102 Sayfa

Bu çalışmada, Trabzon'da dört kişilik bir evde 26 cihazın harmonik ölçümleri analiz edilmiştir. IEEE 519 ve IEC 61000 standartlarına göre konut dağıtım şebekelerinde alternatif akım kaynakları tarafından çalıştırılan doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik kirliliğin kontrol edilmesi ihtiyacı vurgulanmaktadır. Talep tarafı yönetimi (DSM) stratejileri kullanılarak akıllı şebeke konseptinde güç kalitesinin iyileştirilebileceği gösterilmiştir. Çalışmada cihazların aktif güç, aktif enerji ve harmonik değerleri 1 saniye çözünürlüklü ölçümler ile elde edilmiştir. DPSO ve DTLBO optimizasyon yöntemleri kullanılarak enerji yönetimi için yük kaydırma stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejiler güç kalitesi gereksinimlerini karşılamak için analiz edilmiştir. Gerçek zamanlı olarak 24 saat boyunca 1 saniye çözünürlükte alınan ölçümler, yük kaydırma yöntemlerinin hem yük eğrisini düzgünleştirdiğini hem de fatura maliyetlerini azalttığını göstermiştir. Çalışma, DSM stratejilerinin gerçek dünya senaryolarında harmonik bozulmayı azaltmada etkili olduğunu ve IEEE standartlarına uygunluğu sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, enerji maliyetlerini azaltmak ve sistem verimliliğini artırmak için DSM yöntemlerinin potansiyel faydalarını vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: harmonik akım, harmonik bozulma, talep yanıtı, enerji yönetimi, ev aletleri, yük çizelgeleme

PhD. Thesis

SUMMARY

REAL-TIME HOME ENERGY MANAGEMENT APPLICATION AND HARMONIC MITIGATION IN SMART GRIDS

Metin TÜYSÜZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ
2024, 102 Pages

In this study, harmonic measurements of 26 appliances in a four-person household in Trabzon are analysed. According to IEEE 519 and IEC 61000 standards, the need to control harmonic pollution caused by nonlinear loads driven by alternative current sources in residential distribution grids is emphasised. It is shown that power quality can be improved in the smart grid concept by using demand side management (DSM) strategies. In the study, active power, active energy and harmonic values of the appliances are obtained with 1 second resolution measurements. Load shifting strategies for energy management are developed using DPSO and DTLBO optimisation methods. These strategies are analysed to meet the power quality requirements. Measurements taken in real time for 24 hours with 1 second resolution showed that load shifting methods both smooth the load curve and reduce billing costs. The study revealed that DSM strategies are effective in reducing harmonic distortion in real-world scenarios and can ensure compliance with IEEE standards. These findings highlight the potential benefits of DSM methods to reduce energy costs and improve system efficiency.

Key Words: harmonic current, harmonic distortion, demand response, energy management, household appliances, load scheduling

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. DSM stratejileri	9
Şekil 2. Dinamik fiyatlandırma şemaları	11
Şekil 3. D-PSO algoritmasının akış şeması.....	39
Şekil 4. D-TLBO algoritmasının akış şeması	41
Şekil 5. Buzdolabının P, E ve THDi eğrileri	46
Şekil 6. Buzdolabı kapısı açıkken P, E ve THDi eğrileri	47
Şekil 7. Modemin P, E ve THDi eğrileri	48
Şekil 8. Termosifonun P,E ve THDi eğrileri	49
Şekil 9. Saç kurutma makinesinin P, E ve THDi eğrileri	50
Şekil 10. Air fryer'ın P, E ve THDi eğrileri (200°C)	51
Şekil 11. Air fryer'ın P, E ve THDi eğrileri (160°C)	52
Şekil 12. Çay makinesinin P, E ve THDi eğrileri.....	53
Şekil 13. Yumurta pişiricinin P, E ve THDi eğrileri	54
Şekil 14. Tost makinesinin P, E ve THDi eğrileri	55
Şekil 15. Saç düzleştiricinin P, E ve THDi eğrileri	56
Şekil 16. Elektrikli süpürge'nin P, E ve THDi eğrileri	56
Şekil 17. Ütünün P, E ve THDi eğrileri.....	57
Şekil 18. Vantilatörün P, E ve THDi eğrileri.....	58
Şekil 19. Elektrikli fırının P, E ve THDi eğrileri.....	59
Şekil 20. Elektrikli çırpıcının P, E ve THDi eğrileri	60
Şekil 21. Çamaşır makinesinin P, E ve THDi eğrileri (az dolu).....	61
Şekil 22. Çamaşır makinesinin P, E ve THDi eğrileri (tam dolu)	62
Şekil 23. Bulaşık makinesinin P, E ve THDi eğrileri	63
Şekil 24. LED TV'nin P, E ve THDi eğrileri	63
Şekil 25. LED TV kanal değişiminin P, E ve THDi eğrileri	64
Şekil 26. Dizüstü bilgisayarın P, E ve THDi eğrileri.....	65
Şekil 27. Masaüstü bilgisayarın P, E ve THDi eğrileri.....	66
Şekil 28. Masaüstü monitörün P, E ve THDi eğrileri.....	67
Şekil 29. Telefon şarj cihazının P, E ve THDi eğrileri	68
Şekil 30. CFL lambanın P, E ve THDi eğrileri (çocuk odası)	69

Şekil 31.	Led lambanın P, E ve THDi eğrileri (oturma odası)	70
Şekil 32.	Led lambanın P, E ve THDi eğrileri (mutfak).....	71
Şekil 33.	CFL lambanın P, E ve THDi eğrileri (misafir odası)	72
Şekil 34.	CFL lambanın P, E ve THDi eğrileri (banyo)	73
Şekil 35.	Harmonik akım spektrumları a) masaüstü bilgisayar b)çamaşır makinesi c)elektrikli süpürge d)saç düzleştirici e)dizüstü bilgisayar f)telefon şarj cihazı g)modem h)led lamba (mutfak).....	77
Şekil 36.	Tüm cihazların THD değerleri	81
Şekil 37.	Toplam aktif güç eğrileri a)Temel Senaryo b) D-PSO Senaryo c) D-TLBO Senaryo.....	85
Şekil 38.	THD eğrileri a)Temel Senaryo b) D-PSO Senaryo c) D-TLBO Senaryo	88
Şekil 39.	TDD eğrileri a)Temel Senaryo b) D-PSO Senaryo c) D-TLBO Senaryo	91

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. IEEE std 519-1992 harmonik akım limitleri.	3
Tablo 2. Harmonik kirliliği sınırlandırmak için elektrikli ekipmanların sınıflandırılması	3
Tablo 3. Literatür incelemesi	33
Tablo 4. Evdeki elektrikli aletlerin nominal gücü.....	35
Tablo 5. Örnek elektrikli aletler ve programlama aralıkları	37
Tablo 6. Kullanım süresi fiyat tarifeleri.....	42
Tablo 7. Kaydırılabilir cihazların başlangıç zamanı ve çalışma süreleri	44
Tablo 8. Elektrikli cihazların elektriksel parametreleri	74
Tablo 9. Elektrikli cihazların harmonik akım oranı.....	76
Tablo 10. Farklı senaryolar için elektrikli cihazların çalışma süreleri.....	83
Tablo 11. Peak ve PAR değerleri.....	86
Tablo 12. Mevcut elektrik tarife saatlerine göre enerji tüketimi.....	87
Tablo 13. TDD sınırlandırmaları	92

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

I_1	: Temel Akım
I_{SC}	: Maksimum Kısa Devre Akımı
I_L	: Maksimum Yük Akımı
I_n^{HR}	: Akımın Harmonik Oranı
U_n^{HR}	: Gerilimin Harmonik Oranı
P_t^{kul}	: Anlık Tüketilen Güç
P_{ort}	: Ortalama Güç
V_{rms}	: Gerilimin RMS Değeri
I_{rms}	: Akımın RMS Değeri
THD	: Toplam Harmonik Bozulma
TDD	: Toplam Talep Bozulması
DPSO	: Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu
DTLBO	: Ayrık Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon
PAR	: Maksimumun Ortalamaya Oranı
CFL	: Kompakt Florasan Lamba
SG	: Akıllı Şebeke
AMI	: Gelişmiş Ölçüm Altyapısı
DR	: Talep Yanıtı
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı
DC	: Doğru Akım
TOU	: Kullanım Süresi
RTP	: Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma
CPP	: Kritik Puant Fiyatlandırma
IBR	: Eğimli Blok Fiyatlandırma
TSP	: Gezgin Satıcı Problemi
Gbest	: Küresel En İyi Parçacık
Pbest	: Yerel En İyi Parçacık
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeler, elektronik endüstrisinde köklü bir dönüşüm sağlamış ve yarı iletken donanımlı ekipmanlar ev aletleri pazarında hâkim konuma gelmiştir. Aynı zamanda, yaşam standartlarının yükselmesiyle ev tipi yüklerin kullanımı hızla artmaktadır. Bu iki gelişme, dağıtım şebekelerinde güç elektroniğine dayalı modern yüklerin, özellikle evsel kullanımda, giderek yaygınlaşmasına neden olmaktadır (Sharma, Rylander, & Dorr, 2013; Muscas, 2010). Bu da modern yüklerin etkisinin daha da belirgin hale gelmesine yol açmaktadır (Rodríguez-Pajarón, Hernández, Mendonça, & Milanović, 2022). Bu bağlamda, bu trendlerin enerji altyapısında yapısal değişikliklere yol açması ve gelecekteki enerji yönetim stratejilerini şekillendirmesi beklenmektedir.

Elektrik enerjisi üretim ve tüketim dengesinin sağlanması, elektrik şebekesinin güç kalitesinin sürekli olarak değişmesine neden olur. Bu dinamik süreç, şebekenin yapısı ve yüklerdeki değişikliklerden doğrudan etkilenir (Kumar, Bansal, Gautam, Mahela, & Khan, 2022). Son yıllarda, doğrusal olmayan, dengesiz ve yüksek frekanslı anahtarlama yüklerin artan kullanımı, güç sistemindeki bozucu bileşenleri önemli ölçüde artırmıştır (Liu & Niu, 2021). Bu durum, güç kalitesinde belirgin bir düşüşe neden olmuştur. Yük karakteristiklerindeki bu değişimler, güç kalitesi üzerine yapılan araştırmaların önemini daha da artırmıştır.

Konut dağıtım şebekelerindeki en önemli güç kalitesi sorunlarından biri harmoniklerdir. Doğrusal olmayan ev yükleri arasında yer alan buzdolapları, çamaşır makineleri, elektrikli süpürgeler, telefon şarj cihazları, bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlar, modemler, televizyonlar, CFL/LED lambalar, klimalar ve saç düzleştiriciler gibi çeşitli ev aletleri harmonik kaynağıdır. Bu tür yüklerin doğrusal olmayan gerilim-akım (V-I) karakteristiğine sahip olmaları, dağıtım şebekesine birçok harmonik bileşen enjekte etmelerine neden olur. Bu durum, dağıtım sistemi operasyonlarında endişe verici bir güç kalitesi sorunu olan harmonik kirliliğine yol açmaktadır (Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016; Xiao, Li, Wang, & Zhou, 2020).

Harmonik akımların dağıtım şebekelerine enjekte edilmesi, çeşitli olumsuz etkilere sebep olabilir. Bunlar arasında, transformatörlerin ve diğer güç ekipmanlarının aşırı ısınması

ve arızalanması, nötr bağlantı kablolarının aşırı yüklenmesi, kapasitör banklarının zarar görmesi, koruyucu rölelerin yanlış tetiklenmesi, mikroişlemci gibi hassas cihazların arızalanması, kontrol hataları ve hat kayıplarının artması bulunmaktadır (Ghorbani & Mokhtari, 2015; Balasubramaniam & Prabha, 2015). Ayrıca, harmonik akımların varlığı güç sistemlerinde yerel paralel ve seri rezonanslara, gerilim düşüşüne, iletişim sistemlerinde parazit oluşumuna, titreşimlere ve kesintilere neden olabilir (Bottura, Oleskovicz, Le, & Petit, 2019; Ding, Lihakanga, Correia, Goussetis, & Carvalho, 2020; Stones & Collinson, 2001). Harmonik bozulma, trafo merkezlerinin kullanılabilir gücünü %30-45 oranında azaltabilir ve güç transformatörlerinin kayıplarını yaklaşık %25 oranında artırabilir (Tofoli, Sanhueza, & de Oliveira, 2006; Masoum, Moses, & Masoum, 2008). Bu nedenle, ev tipi dağıtım şebekelerindeki doğrusal olmayan yüklerin etkilerini anlamak için, bu yüklerin harmonik özelliklerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir (Hu, ve diğerleri, 2023).

1.2. Harmonik Azaltım ve Talep Tarafı Yönetimi

Elektrik şebekesine enjekte edilen harmonik akımların seviyesinin düşürülmesi; aktif güç kayıplarının azaltılmasına ve elektrik kalitesinin optimal seviyede tutulmasına yani elektrik üretim maliyetlerinin azaltılması yönünde önemli katkılar sağlar (Michalec, ve diğerleri, 2021). Bu nedenle, harmonik azaltımı, sadece kamu hizmeti sağlayıcılarının değil, aynı zamanda araştırmacıların, son kullanıcıların, mühendislerin ve üreticilerin de sorumluluğundadır (Vinogradov, Vinogradova, & Bolshev, 2020). Kullanıcıların elektrik şebekesine enjekte etmelerine izin verilen harmonik akım seviyeleri, IEC 61000 veya IEEE Std 519 standartlarına göre belirlenmiştir (F II, 1993; CODE & PRIX, 2008). IEEE Std 519-2014. Alçak gerilim sistemlerinde toplam harmonik bozulmanın (%5'i geçmemesi gereken) THD değerini belirtir. Tablo 1'de toplam talep bozulması (TDD) için akım harmonik bozulma limitleri sunulmaktadır (Blooming & Carnovale, 2006).

Tablo 1. IEEE std 519-1992 harmonik akım limitleri (Blooming & Carnovale, 2006).

I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

 I_{sc} : Maks. Kısa Devre Akımı I_L : Maks. Yük Akımı

Tablo 2'de IEC 61000-3-2 standardı, bireysel konut yüklerinin ürettiği harmonik akım miktarını sınırlayan belirli limitler sunar. Bu standart, (A-D) ile belirtilen dört farklı ekipman sınıfı için harmonik emisyon limitlerini belirler (Abidin, 2006).

Tablo 2. Harmonik kirliliği sınırlandırmak için elektrikli ekipmanların sınıflandırılması (Abidin, 2006)

Sınıf A	Sınıf B	Sınıf C	Sınıf D
Dengeli üç fazlı ekipman ile B, C ve D sınıflarına ait olmayan diğer tüm ekipmanlar	Taşınabilir aletler ve profesyonel olmayan kaynak ekipmanları	Dimmer cihazları dâhil ancak akkor lamba dimmerleri hariç aydınlatma ekipmanları	Aktif giriş gücü 600 W'tan az olan ve standartta gösterilen yöntemle ölçülen "özel dalga şekline" sahip bir giriş akımına sahip ekipman

Toplam harmonik bozulma (THD) ve toplam talep bozulması (TDD), güç sistemlerindeki harmonik bozulmanın ölçülmesinde yaygın olarak kullanılan iki temel endekstir. Bu endeksler, IEEE 519-1992 ve IEC 61000 serisi gibi standartlarında detaylı olarak tanımlanmıştır (Purwadi, Heryana, Nurafiat, Mawardi, & Pranyoto, 2011). TDD'nin hesaplanması, THD'nin hesaplanma yöntemine benzerlik gösterir. THD hesaplanırken, ölçülen harmonikler temel akım ile karşılaştırılırken, TDD hesaplamasında ölçülen harmonikler maksimum talep akımı ile karşılaştırılır.

Dağıtım sistemlerindeki temel gerilim ve akımın sürekli olarak değişken olduğu gerçeği göz önünde bulundurulduğunda, toplam harmonik bozulma (THD) terimi harmonik bozulma seviyesi için bazen yanıltıcı olabilir. Bu durum, gün içindeki farklı saatlerde

sistemdeki temel akımların sıfıra yakın olması ve bu durumun yüksek bir THD değeriyle sonuçlanmasıyla özellikle belirgin hale gelir (Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016). Dolayısıyla, sabit bir nominal değerin yüzdesi olarak dalga formunun harmonik yapısını ifade eden değiştirilmiş toplam harmonik bozulma endeksi olan TDD, THD yerine tercih edilir. Bu, sistemin harmonik bozulmasını daha doğru bir şekilde tanımlar ve değerlendirir.

Bir sistemdeki harmonik bozulmaların azaltılması için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlar arasında K faktörlü transformatörler, hat reaktörleri, faz kaydırıcı transformatörler, ayarlı harmonik filtreler, çoklu darbeleri doğrultucular, düşük geçişli harmonik filtreler, seri ve paralel pasif filtreler, aktif filtreler ve hibrit harmonik filtreler gibi çözümler bulunmaktadır (Schwanz, Bollen, & Larsson, 2016; Senthil Kumar, Surya Prakash, Yokesh Kiran, & Sahana, 2019; Lumberras, Gálvez, Collado, & Zaragoza, 2020). Bu yöntemlerin her biri, kendine özgü avantajlar sunarken, aynı zamanda dezavantajları da beraberinde getirir (Senthil Kumar, Surya Prakash, Yokesh Kiran, & Sahana, 2019; Lumberras, Gálvez, Collado, & Zaragoza, 2020). Ancak, bu teknikler genellikle maliyetlidir ve uygulamada belirli zorluklarla karşılaşılabilir. Son dönemde, bazı araştırmacılar uygun maliyetli enerji tüketimini ve harmonik bozulmayı azaltmak için talep tarafı yönetim tekniklerine ilgi göstermektedir. Bu yöntemler, sistem genelinde harmonik bozulmayı azaltmak için aktif olarak enerji talebini yönetmeyi içerir. Bu yaklaşım, geleneksel çözümlere alternatif olabilir ve daha ekonomik bir seçenek sunabilir.

Akıllı şebeke (SG) sistemleri; akıllı sayaçlar (SM), akıllı kontrol sistemleri, gelişmiş ölçüm altyapısı (AMI) ve gelişmiş iletişim teknolojileriyle donatılmıştır (Manzoor, ve diğerleri, 2017). Enerji yönetimi, artan enerji talebini karşılamak için son derece kritiktir. Bu yönetim, genellikle iki ana kategori altında incelenir: arz tarafı yönetimi (SSM) ve talep tarafı yönetimi (DSM) (Manzoor, ve diğerleri, 2017). DSM, talebi karşılamak için yeni üretim kapasitesi eklemek yerine enerji tasarrufu tekniklerini, değişken veya dinamik fiyatlandırma stratejilerini ve talep yanıtı (DR) tabanlı programları entegre ederek pik yükleri azaltmaya odaklanır (Panda, ve diğerleri, 2022).

Konut yükleri, ülkeler arasında değişiklik gösterse de, genellikle şebeke genelindeki elektrik tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturur (genellikle %30-40 arası). Konut yükleri ticari yüklerden daha esnektir, bu nedenle DSM teknikleri daha esnek bir şekilde uygulanabilir ve hem hizmet sağlayıcıların hem de müşterilerin faydalarını en üst düzeye çıkarabilir.

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki (ICT) ilerlemeler, konut sektöründeki talep yanıtlarını geliştirmek için büyük fırsatlar sunar. Talep yanıtı (DR), mevcut enerji kaynaklarını kullanarak yeni üretim kapasitesi eklemeksizin gereksinim duyulan talebi karşılamayı hedefler (Haider, See, & Elmenreich, 2016).

Talep yanıtının uygulanması, müşteri memnuniyetini sürdürmek, sistem verimliliğini artırmak ve optimum enerji tüketimini sağlamak için optimizasyon stratejilerinin kullanılmasını gerektirir. DSM optimizasyonunun odak noktası, konut enerji tüketiminde maksimum verimliliği elde etmektir. Bu, enerji arz ve talep sürecinde tüketicilere ve kamu hizmetlerine maksimum fayda sağlayarak minimum maliyetle gerçekleşir (Panda, ve diğerleri, 2022).

Farklı hedeflere yönelik olarak yaygın olarak kullanılan yük kaydırma, tepe kırma, vadi doldurma ve stratejik yük artışı gibi DSM alt programları arasında yük kaydırma, harmonik bozulmaların azaltılması ve endekslerin standart değerler arasında tutulması açısından en umut verici çözümlerden biri olarak kabul edilebilir (Çiçek, ve diğerleri, 2021). Konut yüklerinin kullanım periyodu değiştirilerek THD ve TDD değerleri yük kaydırma yaklaşımı ile iyileştirilebilir (Çiçek, ve diğerleri, 2021).

1.3. Harmonik Analizin Matematiksel Altyapısı

Harmonik kirlilik olgusu, doğrusal olmayan yüklerin artan yaygınlığı ve harmonik kaynakların çoğalması sonucunda giderek daha sorunlu hale gelmektedir. Enerji tasarrufu ilkeleri, dağıtım şebekelerindeki mevcut harmonik seviyelerinin azaltılmasını gerektirmektedir. Harmonikleri kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için, toplam harmonik bozulma (THD) ve toplam talep bozulma (TDD) seviyeleri IEC 61000 ve IEEE 519 tarafından tanımlanan uluslararası standartlar ile düzenlenmektedir.

Sinüzoidal olmayan dalga biçimlerini matematiksel olarak formüle etmek için Fourier serileri kullanılır. Denklem (1) sinüzoidal olmayan sinyalleri zaman düzleminde ifade etmek için kullanılır. Bu denklemde A_0 fonksiyonun sabit terimini ve n harmonik bileşenin mertebesini göstermektedir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (1)$$

Bir sistemde harmoniklerin olması durumunda, anlık gerilim Denklem (2)'deki gibi ve anlık akım Denklem (3)'deki gibi gösterilmektedir. Bu denklemlerde V_0 ve I_0 DC bileşenini temsil eder. DC bileşenleri 0'a yakın olduğu için genellikle gözardı edilirler. V_n ve I_n , n'inci harmonik bileşendeki gerilim ve akımın efektif değerlerini temsil eder. w_1 değeri temel frekanstaki açısal hızdır. θ_n ve δ_n n'inci harmonik bileşendeki gerilim ve akımın açısal değerleridir (Ahmed, Said, Mageed, & Ammar, 2022; Kalair, Abas, Kalair, Saleem, & Khan, 2017).

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (V_n(t)) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(nw_1 t + \theta_n) \quad (2)$$

$$I(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (I_n(t)) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(nw_1 t + \delta_n) \quad (3)$$

Ayrıca bir sistemde harmonikler mevcut olduğunda, harmonik bileşenler nedeniyle gerilim ve akımın efektif (etkin) değerleri artmaktadır. Denklem (4) ve (5)'te gösterildiği gibi, gerilim ve akımın efektif değerleri, temel bileşen de dâhil olmak üzere tüm harmonik bileşenlerin karelerinin toplamının karekökü alınarak elde edilir. Denklem (4)'teki $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ temelden yüksek dereceli harmonik bileşenlere kadar olan gerilim değerleridir. Akım değerleri ise Denklem (5)'te $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ olarak verilmiştir (Kalair, Abas, Kalair, Saleem, & Khan, 2017).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots V_n^2} \quad (4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots I_n^2} \quad (5)$$

Denklemlerde, $V_1, V_2, \dots, V_n$ gerilim harmoniklerinin sırasını ve $I_1, I_2, \dots, I_n$ akım harmoniklerinin sırasını temsil eder.

Harmonik yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri sırasıyla Denklem (6) ve (7)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) \quad (6)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (7)$$

Görünür güç Denklem (8)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$S = V_{rms} I_{rms} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (8)$$

Burada D, bozulma gücüdür. Bu güç reaktif güç karakteristiğine sahiptir ve doğrusal devrelerde sıfırdır.

Toplam harmonik bozulma (THD), iletim ve dağıtım sistemlerindeki güç kalitesi sorunlarını belirlemek için sıklıkla kullanılan önemli bir endekstir. Her bir harmonik bileşenin sinyal üzerindeki etkisini dikkate alır. Gerilim ve akım için toplam harmonik bozulma değeri sırasıyla (9) ve (10) denklemlerine göre hesaplanır (Çiçek, ve diğerleri, 2021).

$$THD_v(\%) = 100 * \frac{\sqrt{(\sum_{n>1}^{n_{max}} V_n^2)}}{V_1} = 100 * \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots V_n^2}}{V_1} \quad (9)$$

$$THD_i(\%) = 100 * \frac{\sqrt{(\sum_{n>1}^{n_{max}} I_n^2)}}{I_1} = 100 * \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots I_n^2}}{I_1} \quad (10)$$

THD'nin yanı sıra harmonik analizde sıklıkla kullanılan bir diğer endeks TDD'dir. TDD'nin THD'ye göre avantajı, paydadaki yük akımının büyüklüğünü dikkate almasıdır. Yük akımı, bir gün boyunca 15 dakikalık bir aralıktaki ortalama yük akımının maksimum değerini temsil eder. Bu akım, harmonik analizi için bir referans noktası görevi görür. Farklı zamanlardaki harmonik akımın ortak bir referansa sahip olması, farklı zamanlardaki harmonik akımın genliğinin karşılaştırılmasına olanak tanır. TDD'nin 24 saatlik değişim eğrisi, THD'den daha sezgisel olan harmonik akım değişimini doğrudan yansıtabilir. Bu nedenle, bina sakinlerinin harmonik özelliklerini belirlemek için THD yerine TDD'yi kullanmak daha pratik bir öneme sahiptir. TDD, Denklem (11)'de gösterildiği gibi hesaplanır:

$$TDD_i(\%) = 100 * \frac{\sqrt{(\sum_{n>1}^{n_{max}} I_n^2)}}{I_{Lmax}} = 100 * \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots I_n^2}}{I_{Lmax}} \quad (11)$$

Harmoniklerin sayısı (n) 1'den büyük pozitif bir tamsayı olmalıdır. Tamsayı harmoniklerin yanı sıra, kesirli n değerleri interharmonikler olarak adlandırılır. Interharmonikler, temel frekanstan daha yüksek ancak tam sayı katı olmayan frekanslarda oluşurken, alt harmonikler temel frekanstan daha düşük frekanslara sahiptir.

Denklemlerde gösterildiği gibi THD değeri, harmonik bileşenlerin efektif değerinin temel bileşenin efektif değerine oranıdır. Bu genellikle yüzde olarak ifade edilir. Ayrıca, her bir harmonik bileşenin sinüzoidal bir dalgadaki bozulmaya bireysel katkısı, sırasıyla gerilim ve akım için Denklem (12) ve (13) ile elde edilir. Bu değer, harmonik bileşenin efektif değerinin temel bileşenin efektif değerine oranı ile bulunur.

n'inci harmonik gerilim içeriğinin oranı U_n^{HR} (U_n Harmonik Oranı) olarak ifade edilir. Bu oran, sırasıyla U_n ve U_1 olarak belirlenen sırasıyla n'inci harmonik gerilimin ve temel gerilimin efektif değerlerinin oranı olarak tanımlanır.

$$U_n^{HR} = \frac{U_n}{U_1} * 100\% \quad (12)$$

n'inci harmonik akım içeriğinin oranı I_n^{HR} (I_n Harmonik Oranı) olarak ifade edilir. Burada I_n ve I_1 sırasıyla n'inci harmonik akımın ve temel akımın efektif değerleridir (Testa, ve diğerleri, 2007).

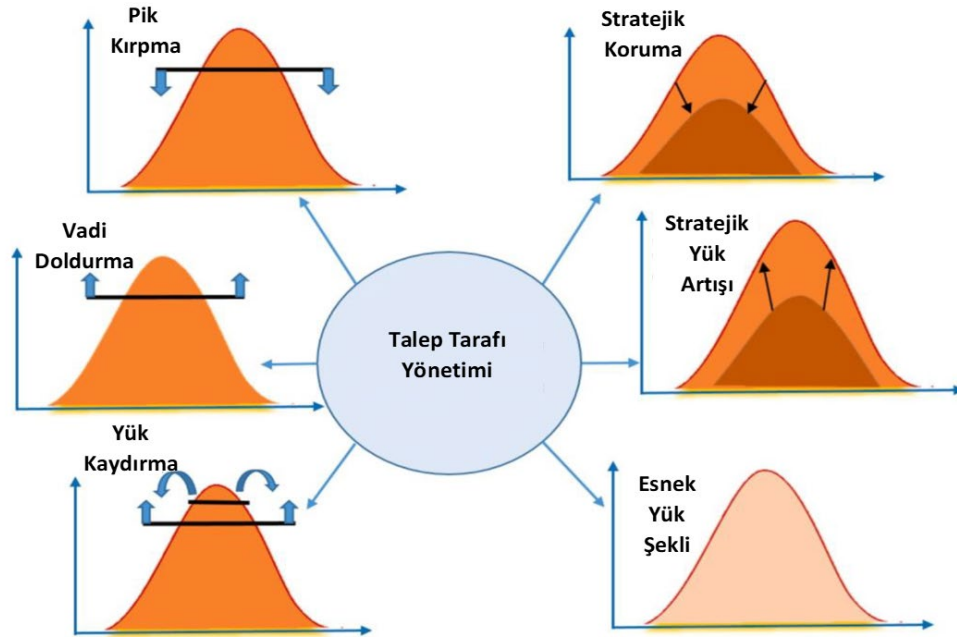
$$I_n^{HR} = \frac{I_n}{I_1} * 100\% \quad (13)$$

1.4. Talep Tarafı Yönetimi ve Elektrik Tarifesi

DSM, tüketicilerin elektrik tüketiminin zamanlamasını ve miktarını etkileyerek puant yükte bir azalma elde etmek için tasarlanan, yürütülen ve denetlenen bir kamu hizmeti faaliyetidir (Kinhekar, Padhy, & Gupta, 2014). Bu metodolojiler arasında, yük yönetimi teknikleri, özellikle de talep yanıtı (DR) stratejileri, güç sistemi operasyonlarında artan bir ilgi görmektedir (Paterakis, Erdinç, & Catalão, 2017). Talep tarafı yönetimi ve talep yanıtı,

enerji verimli teknolojilerin kullanılması, genel güç tüketiminin azaltılması ve toplam güç talebinin kontrol edilmesi gibi ortak hedefleri paylaşırsa da, farklı kavramları temsil etmektedir (Javaid, ve diğerleri, 2017).

Şekil 1'de elektrik tüketimini yeniden şekillendirmek için kullanılan altı DSM stratejisi gösterilmektedir (Gellings, 1985). Pik saatler günün nispeten küçük bir bölümünü oluşturmasına rağmen, pik talebi karşılamak için üretim, iletim ve dağıtım sistemlerine ek yatırımlar yapılmasını gerektirmektedir. Bu da elektrik tedariki ile ilgili maliyetlerin artmasına neden olmaktadır (Jordehi, 2019). Pik kırpma, talebin en yüksek olduğu dönemlerde şebeke yükünü azaltmayı amaçlarken, vadi doldurma ise elektrik profilinin düşük olduğu dönemlerde arz ve talebi dengelemeye çalışır. Yük kaydırma stratejisi, yükün pik dönemlerden pik olmayan dönemlere aktarılmasını ve böylece toplam enerji tüketimini değiştirmeden pik talebin azaltılmasını içerir ve DSM içindeki en etkili yük yönetimi uygulamalarından biri olarak kabul edilir. Stratejik koruma, tüketici sahalarındaki yük profilini değiştirerek hem puant talebi hem de toplam enerji tüketimini azaltmaya çalışır. Stratejik yük artışı, tüketici yük kullanımını belirli bir eşiğe kadar artırarak şebeke istikrarını korumayı ve sorunsuz enerji hizmeti işletimini teşvik etmeyi ifade eder. Esnek yük şekli, finansal teşviklere yanıt veren ve hizmet kalitesinde değişikliklere izin veren esnek tüketicilere dayanır. Bu altı geleneksel yaklaşım arasında "yük kaydırma" en geniş kullanıma sahiptir (Panda, ve diğerleri, 2022; Sharda, Singh, & Sharma, 2021).

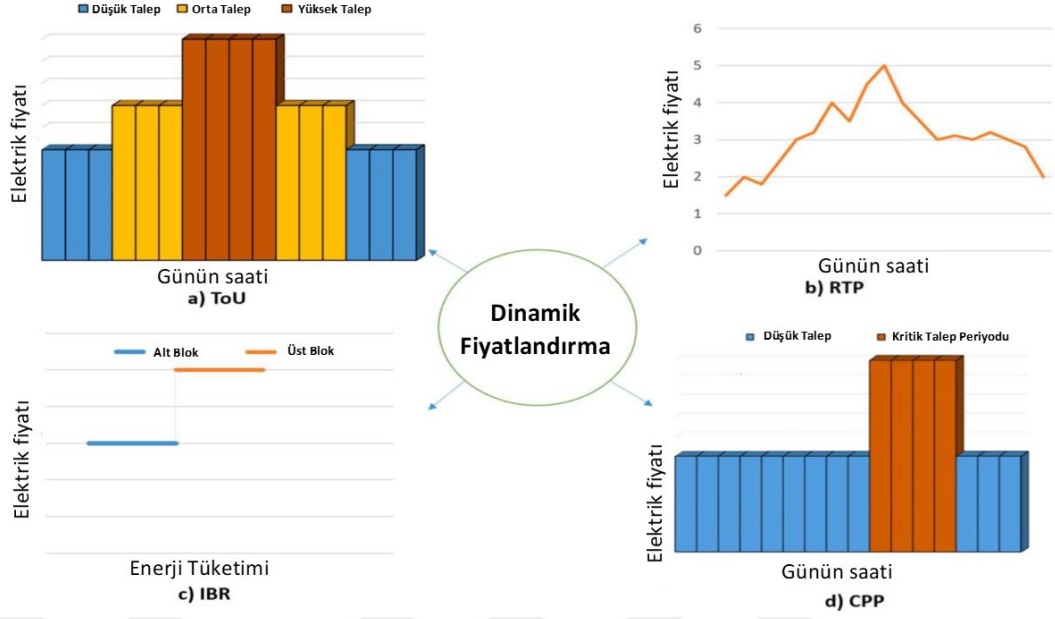


Şekil 1. DSM stratejileri (Sharda, Singh, & Sharma, 2021)

DR, fiyat bazlı veya teşvik bazlı programlar aracılığıyla puant talebi azaltmayı, talep eğrisini düzleştirmeyi ve hem kamu hizmetleri hem de müşteriler için düşük maliyetli enerji kullanımı sağlamayı amaçlamaktadır (Panda, ve diğerleri, 2022; Chen, ve diğerleri, 2022). Müşteriler, enerji tüketimini azaltarak veya yük dengesini sağlamak için tüketimi pik saatlerden pik olmayan saatlere kaydırarak kendi yüklerini yönetmeye teşvik edilir (Haider, See, & Elmenreich, 2016). Fiyata dayalı planlar, değişen oranlar altında günlük elektrik maliyetini en aza indirmeyi amaçlarken, teşvike dayalı planlar tipik olarak kritik pik veya acil durum dönemlerinde doğrudan yük kontrol sinyallerini içerir (Chen, ve diğerleri, 2022). Fiyatlandırma yapılarına örnek olarak Şekil 2'de gösterildiği gibi kullanım süresi (TOU), gerçek zamanlı fiyatlandırma (RTP), kritik puant fiyatlandırma (CPP) ve eğimli blok fiyatlandırma (IBR) (Sharda, Singh, & Sharma, 2021) verilebilir.

Kullanım zamanı (TOU) fiyatlandırması, tüketicileri yoğun saatlerde tüketimlerini azaltmaya teşvik eder ve günün belirli dönemlerinde elektrik kullanımıyla ilişkili uzun vadeli tedarik maliyetlerini yansıtarak değişen elektrik kullanımını telafi eder (Paterakis, Erdinç, & Catalão, 2017; Jordehi, 2019). Kritik pik fiyatlandırması (CPP), elektrik sistemi için kritik kabul edilen dönemlerin kısa vadeli maliyetlerini yakalamak için tasarlanmıştır ve TOU'ya benzer bir fiyatlandırma şeması sunar (Jordehi, 2019; Khan, Mahmood, Safdar, Khan, & Khan, 2016). Gerçek zamanlı fiyatlandırma (RTP), tüketicileri toptan enerji piyasasındaki maliyetlerin değişkenliğine doğrudan maruz bırakır ve fiyatlar genellikle saatlik olarak güncellenir (Paterakis, Erdinç, & Catalão, 2017; Khan, Mahmood, Safdar, Khan, & Khan, 2016). Ancak tüketiciler genellikle gerçek zamanlı fiyatları izlemekte ve fiyat dalgalanmalarına zamanında yanıt vermekte zorlanmaktadır. Eğimli blok oranı (IBR), fiyatın tüketilen elektrik miktarıyla doğru orantılı olarak değiştiği ve yük senkronizasyonu sorunlarını azaltmayı amaçlayan bir fiyatlandırma mekanizmasıdır (Sharda, Singh, & Sharma, 2021).

Araştırmalar, fiyatların gün boyunca yüksek, orta ve düşük fiyat dönemleri arasında değiştiği kullanım zamanı (ToU) perakende tarifelerinin yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir. Bununla birlikte, ToU tarifelerini kullanan bazı çalışmalar, yükün yoğun olmayan saatlere kaydırılması ihtiyacının altını çizmiş ve bu da yük dengesizliğine doğru bir eğilime yol açabilmektedir (Menos-Aikateriniadis, Lamprinos, & Georgilakis, 2022).



Şekil 2. Dinamik fiyatlandırma şemaları (Sharda, Singh, & Sharma, 2021)

1.5. Talep Tarafı Yönetimi Kapsamında Yük Profili Analizi

Enerji sektöründe yaşanan hızlı değişim ve teknolojik gelişmeler, elektrik tüketiminin daha etkin yönetilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyaç akıllı şebeke konsepti ile karşılanmaya çalışılmaktadır. Akıllı şebeke kavramı, elektrikli cihazların günlük, aylık veya yıllık tüketim verilerini kullanarak enerji tüketicilerini alışkanlıklarını değerlendirmeye ve fatura maliyetlerini azaltmaya yönlendirme fırsatı sunmaktadır (Iqbal, Malik, Muhammad, Qureshi, & Chishti, 2021).

Bu noktada talep tarafı yönetimi (DSM) stratejisi, özellikle üretimin kısıtlı olduğu dönemlerde elektrik şebekesinde arz ve talebi dengelemek için kullanılan bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Konut yüklerinin toplam elektrik tüketimindeki büyük payı nedeniyle, konut yükleri elektrik dağıtım şebekesinin optimize edilmesinde ve üretim kapasitesinin planlanmasında kritik bir rol oynamaktadır (Paatero & Lund, 2006). Güç tüketiminin zaman içindeki grafiksel gösterimi olan yük profili, DSM alanında uzun bir geçmişe sahiptir ve bu profilin doğru belirlenmesi DSM çalışmalarının doğruluğunu etkileyebilmektedir (Kewo, Manembu, & Nielsen, 2023). Bu bağlamda, konut yük profillerini ve elektrik tüketimini belirlemek için çeşitli modelleme yöntemleri kullanılmıştır (Pipattanasomporn, Kuzlu, Rahman, & Teklu, 2013; Bissey, Jacques, & Le Bunetel, 2017). Yük profili modellemesinde iki yaygın yaklaşım vardır: aşağıdan yukarıya ve istatistiksel (Diao, Sun, Chen, & Chen, 2017; Fischer, Wolf, Scherer, & Wille-Hausmann, 2016). Aşağıdan yukarıya yöntemi,

küçük cihazlardan başlayarak ev içindeki enerji tüketimini analiz ederken, istatistiksel yöntem ölçülen yük profillerine dayalı olarak girdi verilerinin özelliklerini belirleyerek tahmin modelleri oluşturur (Jardini, Tahan, Gouvea, Ahn, & Figueiredo, 2000; Høverstad, Tidemann, Langseth, & Öztürk, 2015). Aşağıdan yukarıya yöntemi, ev aletlerinin tüketim davranışını yansıtabilecek büyük miktarda veri gerektirmesine rağmen yüksek tahmin doğruluğuna sahiptir. Bununla birlikte, veri toplamanın zorluğu aşağıdan yukarıya yönteminin gelişimini sınırlamıştır (Iqbal, Malik, Muhammad, Qureshi, & Chishti, 2021). Bugüne kadar, bu yöntemin geliştirilmesiyle ilgili zorlukların üstesinden gelmek için temsili veriler ve cihaz tüketiminin istatistiksel ortalamaları kullanılmıştır (Issi & Kaplan, 2018).

Yenilikçi teknolojilerin gelişmesiyle birlikte, yeni nesil akıllı sayaçlar, ayrıntılı enerji tüketimi verileri sağlama ve geleneksel sayaçların yerini alma özellikleriyle karakterize edilmiştir (Shin, ve diğerleri, 2019). Bu ayrıntılı bilgiler, enerji tüketim modellerinin analizi ve tahmini, talep yanıtı ve kullanıcı segmentasyonu gibi birçok alanda önemli ilerlemelere olanak sağlamaktadır. Akıllı sayaçlar bir hanenin toplam enerji talebini ölçebilir. Ancak tüketici davranışları üzerine yapılan araştırmalar, enerji verimliliğinin tek tek cihazların tüketimi hakkında bilgi sağlanarak geliştirilebileceğini göstermiştir. Cihaz düzeyinde kullanım bilgilerinin en önemli faydalarından biri, bir evdeki enerji tüketimini en etkili şekilde azaltabilecek cihazları belirlemek için otomatik, kişiselleştirilmiş öneriler sunma yeteneğidir. Tavsiye sistemi, cihaz kullanımını günün elektrik fiyatlarının daha düşük olduğu saatlerine kaydırarak konut sakinlerini potansiyel tasarruflar konusunda bilgilendirebilir. Buna ek olarak, yüksek çözünürlüklü bilgiler, gerekenden daha fazla enerji kullanan hatalı veya arızalı cihazları tespit etmek için kullanılabilir (Uttama Nambi, Reyes Lua, & Prasad, 2015).

Cihaz düzeyinde güç tüketim profillerine ilişkin yüksek çözünürlüklü verilerin eksikliği, enerji verimliliği ve talep yönetimi stratejilerinin tüm potansiyelinin hayata geçirilmesini engellemektedir. Literatürdeki sınırlı sayıdaki yük profili çalışmaları az sayıda cihazla gerçekleştirilmiştir ve elektrikli cihazların harmonik özelliklerini analiz etmemektedir.

1.6. Meta-sezgisel Algoritmalar

Konut DSM ile ilgili çeşitli optimizasyon problemlerine çözüm bulmak için, doğadan esinlenen çeşitli meta-sezgisel teknikler uygulanabilir ve kısıtlı kaynaklar altında en uygun

çözüm arayışına girilebilir. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995), Genetik Algoritma (GA) (Holland, 1973), Benzetimli Tavlama (SA) (Van Laarhoven, Aarts, van Laarhoven, & Aarts, 1987), Öğretme ve Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) (Rao, Savsani, & Vakharia, 2011) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) (Dorigo, Birattari, & Stutzle, 2006) konut DSM çalışmalarında sıkça kullanılan başlıca meta-sezgisel algoritmalar arasındadır.

1.6.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu, balık ve kuş sürülerinin kolektif hareketlerinden esinlenen bir optimizasyon tekniğidir. İlk olarak 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından tanıtılmıştır (Kennedy & Eberhart, 1995). Sürü halinde yaşayan organizmaların rastgele hareket ederek hedeflerine daha verimli bir şekilde ulaştıkları gözlemlenmiştir. Sürü üyeleri hedeflerine ulaşmak için rastgele bir şekilde hedeflerine doğru hareket ederler. Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasında sürüdeki bireyler arasında sürekli bir bilgi paylaşımı vardır. Paylaşılan bu bilgiler ışığında belirli bir döngü içerisinde bir arama gerçekleştirilir. Bu arama işlemi belirli sınırlar ve kurallar dâhilinde gerçekleştirilir.

Parçacık Sürü Optimizasyonu, topluluk tabanlı bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemde belirli sayıda bireyden oluşan bir topluluk vardır ve bu bireyler 'parçacık' olarak adlandırılır. Her parçacık, iterasyonlar sırasında önceki deneyimlerinden yararlanarak en iyi konumu bulmaya çalışır. Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasının temel amacı, topluluktaki en iyi pozisyona sahip parçacığa yaklaşımdır. Bu yaklaşım, en iyi noktayı tespit ederek problemler için en uygun çözümü sağlamayı amaçlar.

1.6.2. Öğretme ve Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO)

Öğretme ve Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritmaları, ilk kez 2011 yılında Rao ve çalışma arkadaşları tarafından öğretim ve öğrenme süreçlerinden esinlenilerek geliştirilmiştir. Doğa olayları ve gerçek yaşam durumlarından ilham alınan diğer optimizasyon yöntemleri gibi, TLBO da öğretmen-öğrenci ilişkilerini ve öğrencilerin birbirleriyle olan etkileşimlerini model alarak problem çözme amaçlar. Bu algoritma, öğrencilerin bilgi seviyelerini artırarak hedefe ulaşmayı ve problemlerin iyileştirilmesini sağlayan etkili bir optimizasyon tekniği sunar (Rao, Savsani, & Vakharia, 2011).

Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritmasının çözüm uzayı bir sınıftaki öğretmen ve öğrencilerden meydana gelir. Bu algoritmanın temel amacı, öğrencilerin ortalama bilgi seviyesini artırarak belirlenen hedefe ulaşmaktır. TLBO'nun çalışma süreci iki ana bileşene ayrılmıştır: “Öğretmen Aşaması” ve ‘Öğrenci Aşaması’.

İlk aşama olan 'Öğretmen Aşaması', öğretmenin bilgi ve deneyimlerini öğrencilere aktarmasını içerir. Öğretmen en bilgili kişi olarak kabul edilir ve öğrencilerin notlarını iyileştirmede önemli bir rol oynar. İkinci aşama olan 'Öğrenci Aşaması' ise öğrencilerin akranlarıyla etkileşime geçerek öğrenmelerini içerir. Tüm popülasyondaki en iyi çözüm öğretmen olarak kabul edilir ve bu süreç algoritmanın etkinliğini artırır.

Bu iki aşamalı kontrol süreci sayesinde TLBO, diğer algoritmalara kıyasla daha az iterasyonda amaç fonksiyonuna ulaşabilmektedir. TLBO algoritmasında sonuçlar, öğretmenin kalitesine bağlı olarak öğrencilerin performansına veya notlarına göre değerlendirilir (Rao, Savsani, & Vakharia, 2011).

1.7. Literatür Araştırması

Talep tarafı yönetimi (DSM) ve harmonik analizi, elektrik sistemlerinin verimliliği, güvenilirliği ve güç kalitesi açısından kritik öneme sahip iki temel araştırma alanı olarak kabul edilmektedir. Bu iki disiplin genellikle ayrı ayrı incelenirken, mevcut literatürde her iki alanı bir arada ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında her iki konu da ayrı ayrı ele alınmış ve kapsamlı bir literatür taraması sunulmuştur.

DSM birçok çalışmada ele alınmıştır. Çoğu DSM stratejisi, müşteri yüklerini yönetmek için fiyat dalgalanmalarına veya acil durumlara dayalı olarak bir programlama tekniği gerektirir. DSM uygulaması, optimum maliyet, enerji tasarrufu, müşteri yükü çizelgelemesi ve yük eğrisi düzleştirilmesi için daha derinlemesine incelenmiştir.

Mevcut literatür temel alınarak, talep tarafı yönetimi (DSM) alanındaki gelişmelerin bir literatür incelemesi aşağıda sunulmuştur:

Mohsenian-Rad ve arkadaşları, müşteri yüklerini çizelgeleyerek akıllı bir şebekenin puant-ortalama oranını (PAR) optimize etmek için işbirlikçi bir oyun teorisi modeli önermişlerdir. Bu makalede, birden fazla kullanıcı ortak bir enerji kaynağını paylaştığında enerji maliyetini en aza indirmek ve ayrıca toplam konut yükünü dengelemek için optimal, otonom ve dağıtılmış teşvik tabanlı bir enerji tüketimi çizelgeleme algoritması önerilmiştir. Müşteri yükünü planlamak için pik dönem

(gündüz) ve normal dönem (gece) olmak üzere iki zaman periyoduna sahip bir ToU talep yanıtı şeması kullanılmıştır. Önerilen yöntem, 10-20 kaydırılabilir yüke sahip 10 müşteri üzerinde simüle edilmiştir. Sonuçlar, PAR'ın %17 oranında azaldığını ve enerji maliyetlerinin %18 oranında düştüğünü göstermektedir (Mohsenian-Rad, Wong, Jatskevich, Schober, & Leon-Garcia, 2010).

Fernandes ve arkadaşları, talep yanıtı olaylarına dayalı olarak akıllı bir ev için dinamik çok kaynaklı bir yük çizelgeleme yönetimi önermişlerdir. Bu yöntemde, pik talepler sırasında yeterli konfor seviyelerini sağlamak için yük azaltma ve çizelgeleme işlemleri uyarlanmıştır. Pik yük tüketimi belirli bir tüketim eşiği seviyesine göre yönetilmiştir. Optimizasyon modülü, her an en az önemli yükü belirlemek için yük önceliklerini kullanmıştır. Biri 30 dakika, diğeri 240 dakika süreli bir talep yanıtını ele alan iki senaryolu bir vaka çalışması sunulmuştur. Her iki simülasyonda da talep tarafı etkinliği, etkinlik sırasında güç tüketiminin azaltılmasını önermektedir. Sunulan ev yönetim sistemi tarafından kontrol edilen gerçek ve sanal olmak üzere toplam 18 yük kullanılmıştır (Fernandes, Morais, Vale, & Ramos, 2014).

Setlhaolo ve arkadaşları, elektrik maliyetlerini en aza indirmek ve ilgili teşviki elde etmek için tipik ev aletlerinin programlanması yoluyla konut talep yanıtını incelemişlerdir. Bir karma tamsayılı doğrusal olmayan (MINLP) optimizasyon modeli, bir kullanım zamanlı elektrik tarifiesi altında oluşturulmuştur. Model 10 dakikalık bir örnekleme periyoduna sahiptir ve optimizasyon 24 saatlik bir dönemi kapsamaktadır. Bu vaka çalışmasında, 10 adet cihaz ile yapılan çalışmada tüm cihazlar tüketici tarafından belirlenen belirli zaman aralıklarında esnektir, bu nedenle tasarruf nispeten daha yüksektir. Bu vaka çalışması, bir hanenin değişen fiyatlar ve teşvikler karşısında tüketimini değiştirebileceğini ve tüketicinin %25'in üzerinde elektrik maliyeti tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir (Setlhaolo, Xia, & Zhang, 2014).

Farzambehboud ve arkadaşları, Türkiye'deki Yıldız Teknik Üniversitesi'nde bulunan deneysel bir akıllı evin, fiyat tabanlı bir DR şemasına odaklanan bir simülasyon çalışmasını sunmuşlardır. 16 farklı kontrol edilebilir ve kontrol edilemez elektrikli cihaz, 1 saniye çözünürlüklü gerçek ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak modellenmiştir. Bir enerji yönetimi konsepti sağlamak için, değiştirilebilir yükleri kontrol ederek elektrik faturalarını en aza indirmek ve pik talebi azaltmak için bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, MATLAB'da tanımlanan FMINCON fonksiyonunu kullanarak, iç nokta algoritması ile ilgili maliyet fonksiyonunu en aza indirmektedir. Bu çalışmada, çamaşır

makinesi ve bulaşık makinesi kontrollü değiştirilebilir yükler olarak kabul edilmiştir. Çalışma, Türkiye'de halihazırda kullanılan ToU ve FTP fiyatlandırma yöntemleri kullanılarak optimizasyon öncesi ve sonrası maliyet değişikliklerini incelemektedir. Vaka çalışmaları sonucunda, dinamik fiyatlandırmanın FTP'ye göre %5 maliyet avantajı sağladığı ve genel maliyetlerde %20'lik bir düşüş gösterdiği belirlenmiştir. (Farzambehboudi, Erdinç, Boynueğri, Uzun, & AliÖz, 2018).

Derakhshan ve arkadaşları, Öğretme ve Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve Karıştırılmış Kurbağa Sıçraması (SFL) algoritmalarını kullanarak akıllı şebekede tüketim planlaması için bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Bu çalışma, İran'ın Tahran şehrinin merkezinde bulunan bazı konut binalarında yaz aylarında elde edilen verilere dayanarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmada dört tip konut tüketicisi incelenmiştir: birincisi kullanım zamanı fiyatlandırması, ikincisi gerçek zamanlı fiyatlandırma, üçüncüsü kritik puant fiyatlandırması ve son tüketicinin fiyatlandırma için tarifi yoktur. Sonuçlar, talep tarafı katılım programlarının uygulanmasının toplam fatura maliyetini azaltabileceğini ve optimizasyon tekniklerinin daha verimli kullanılabileceğini göstermektedir. Çalışmada, tüketicilerin maliyetlerinin ortalama 35.000 sent civarında azaldığı ve daha düşük maliyetlerle karşılaştıkları tespit edilmiştir. Ayrıca, TLBO algoritmasının SFL algoritmasına kıyasla daha optimize sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir (Derakhshan, Shayanfar, & Kazemi, 2016).

Manzoor ve arkadaşları, elektrik fiyatlarının bir gün önceden ilan edildiği kabul edilerek, konut yük planlaması için Öğretme Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) algoritması ile Genetik Algoritma (GA) birleşimini içeren ve Öğretme Öğrenme Genetik Optimizasyonu (TLGO) olarak adlandırılan bir hibrit teknik önermişlerdir. Bu araştırmanın temel odak noktası, müşterinin elektrik faturasını minimum konfor değişikliği ile azaltmaktır. Yük planlaması, bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmış ve en uygun planlamayı elde etmek için bir minimizasyon problemi çözülmüştür. Ayrıca, esnek güç cihazlarının tüketicilerin faturaları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen teknikle maliyet azaltma ve kullanıcı rahatsızlığını en aza indirme açısından daha iyi bir performans sergilediğini ve daha uygulanabilir olduğunu doğrulamaktadır. Toplam zaman periyodu 24 saat iken, cihazların planlanması için 1 saatlik ve 15 dakikalık zaman aralıkları kullanılmıştır (Manzoor, ve diğerleri, 2017).

Chen ve arkadaşları, konut binaları için dört farklı konut yükü türü için bir talep yanıtı (DR) çizelgeleme yaklaşımı sunmuşlardır. Bunlar; kesintili ve ertelenebilir yükler,

kesintisiz ve ertelenebilir yükler, kesintisiz ve ertelenemez yükler ve iklimlendirme yükleridir. En düşük elektrik maliyeti ve minimum rahatsızlık endeksi hedefleri doğrultusunda, çok amaçlı bir optimizasyon algoritması olan baskın olmayan sıralama genetik algoritması II (NSGA-II) kullanılmıştır. Çalışmada, ASHRAE 140 standart binası bir vaka çalışması olarak ele alınmış ve önerilen çizelgeleme yaklaşımı, çalışma günleri ve çalışma dışı günler olmak üzere iki farklı senaryo altında değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, yolcuların konfor seviyelerini dikkate alarak pik yükleri pik olmayan zamanlara kaydırabilir ve elektrik faturalarını azaltabilir. Çalışmada, optimizasyon zaman aralığı 60 dakika, optimizasyon süresi ise 24 saat olarak belirlenmiştir (Chen, ve diğerleri, 2022).

Mahmood ve arkadaşları, cihazları belirli kısıtlamalar ve etkin kullanım süreleri ile gruplayarak kullanıcı memnuniyetsizliğini azaltmak ve cihaz kullanımını artırmak için bir Gerçekçi Çizelgeleme Mekanizması (RSM) önermişlerdir. Bu mekanizma, ev aletlerinin işleyişini düzenlemek için algoritmalar sunmaktadır. 24 saatlik bir zaman penceresi, her biri 6 saatlik (360 dakika) dört mantıksal alt zaman dilimine ayrılmıştır. Önerilen RSM, yalnızca istenilen cihazları (cihaz sınıflandırmasına göre) programlayarak güç tüketimini kısıtlayan dinamik olarak modellenmiş bir güç kullanım sınırlayıcısını kullanır ve hem elektrik tüketicisini hem de elektrik tedarikçisini dikkate alır. Cihazların, zaman ve güç kullanım sınırlayıcılarının modellenmesinden sonra, her bir alt zaman dilimini temsil eden belirli kısıtlamalarla çizelgeleri en iyi şekilde oluşturmak için İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO) gibi sezgisel bir algoritma kullanılmıştır. Bu çizelgeler, cihaz faydası ve maliyet etkinliği arasında denge sağlamayı hedeflemektedir. Önerilen RSM'nin doğrulanması için, doğrudan BPSO ve RSM tarafından programlanan programlanmamış elektrik yükü kullanımı arasında, maliyet etkinliği ve cihaz faydasına dayalı kullanıcı konforunu yansıtan karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Maliyet analizi sonucunda, güç bankalı (PB'li) RSM programlanmamış elektrik faturalarında %65 tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca, programlanmamış elektrik yüküne göre PB'li RSM'de elde edilen toplam kullanıcı konfor 0,185 olup BPSO çizelgeleme ile elde edilen kullanıcı konforundan 0,104 birim daha yüksektir (Mahmood, ve diğerleri, 2016).

Rezaee Jordehi, ev enerji yönetim (HEM) sistemlerinde ev aletlerinin optimum çizelgelenmesi problemini, tamsayı karar değişkenlerine sahip kısıtlı, çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak ele almıştır. Bu problemi çözmek için parçacık sürü optimizasyonunun bir varyantı olan gelişmiş lider parçacık sürü optimizasyonu (ELPSO)

yöntemini önermiştir. Cihazların optimum çizelgelemesi, farklı talep yanıt programlarını dikkate alan 10 farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Problem, her ikisi de büyük bir konut yükü olarak elektrikli araç içeren, sırasıyla 10 ve 11 cihazlı iki farklı akıllı ev için çözülmüştür. İlk evde zaman çözünürlüğü 30 dakika olarak belirlenmiş ve 24 saatlik zaman ufku için 48 zaman aralığı elde edilmiştir. İkinci evde zaman çözünürlüğü 10 dakika olarak belirlenmiş ve 24 saatlik zaman ufku için 144 zaman aralığı elde edilmiştir. Yapılan tüm karşılaştırmalar, ELPSO'nun temel PSO, yapay arı kolonisi (ABC), geri izleme arama algoritması (BSA), yerçekimsel arama algoritması (GSA) ve yusufçuk algoritmasına (DA) göre üstün performans sergilediğini ortaya koymaktadır (Rezaee Jordehi, 2020).

Zhu ve arkadaşları, enerji verimliliğini artırmak amacıyla pik yükleri azaltarak ve yük dengelemesini sağlayarak, birden fazla akıllı evin cihaz çizelgelemesini incelemişlerdir. Çizelgeleme problemi, karmaşık bir ayırık-sürekli doğrusal olmayan optimizasyon problemi olduğundan, parçacık erken olgunlaşmasını ve yavaş yakınsamayı önlemek için Stokastik Çeşitlilik Çekme-İtme ile geliştirilmiş PSO (CPSO) varyantı olan (CPSO-SARD) algoritmasını önermişlerdir. Deneysel sonuçlar, önerilen algoritmanın literatürdeki diğer yedi CPSO tabanlı algoritmadan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, parametrik olmayan bir Friedman testi, CPSO-SARD'ın gelişiminin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu doğrulamıştır. Farklı evler arasındaki koordinasyonun etkisini göstermek için dört senaryo simüle edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, birden fazla akıllı evin etkili bir şekilde koordine edilmesinin kullanıcı konforunu koruyabileceğini (örneğin, iç ortam sıcaklığının istenen sıcaklıkta $\pm 2^{\circ}\text{C}$ içinde tutulması, sıcak su sıcaklığının 65°C ile 70°C arasında tutulması gibi) göstermektedir. Ayrıca, bu koordinasyonun, normal bir konut bölgesi için bir yılda elektrik santrali üretim maliyetini %15,6 azaltabileceği ve 24,528 Euro tasarruf sağlayabileceği gösterilmiştir (Zhu, Lin, Lei, Liu, & Tao, 2019).

Kinhekar ve arkadaşları, DSM uygulamaları için, hem kamu hizmetlerine hem de tüketicilere fayda sağlamak amacıyla tamsayı genetik algoritmasına dayalı çok amaçlı bir DSM çözümü sunmuşlardır. Bu önerilen yöntem, Hindistan'daki kamu hizmetlerinde DSM tekniklerinin etkili bir şekilde kullanılmasına yeni bir bakış açısı getirmektedir. Simülasyonlar, Hindistan'daki dağıtım sisteminde büyük ticari ve endüstriyel yükler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen algoritmanın simülasyon sonuçlarına göre, endüstriyel tüketiciler için %12,27'lik ve ticari tüketiciler için %10,56'lık puant talep azaltımı elde edilmiştir (Kinhekar, Padhy, & Gupta, 2014).

Jiang ve Wu, akıllı şebekede talep yanıtı için maliyet verimliliği (CE) ve tüketici tercihi (CP) bazlı bir konut yük çizelgeleme algoritması geliştirmiştir. Bu metodolojide, tüketici tercihi (CP) yük çizelgeleme çerçevesi içerisinde modellenmiş, CP'ye göre maliyet verimliliği (CE) ise tüketim harcamalarının etkinliğini ölçmek için kullanılmıştır. Ayrıca, CE ile CP arasındaki ilişki de araştırılmıştır. Yöntem, gerçek veri setleri kullanılarak test edilmiştir. Bu çalışmada, dört elektrikli cihazın (çamaşır makinesi, TV, klima ve aydınlatma) tüketici tercihi maliyeti modellenmiştir. Avustralya'daki tüketicilerin yaşam tarzına dayalı olarak dört farklı hane tüketim modeli (Model I, Model II, Model III ve Model IV) tartışılmıştır. CE, bu farklı tüketim modellerine göre incelenmiştir. CE ve CP'nin kritik analizi, önerilen algoritmanın akıllı evdeki elektrikli cihazların çalışma sürelerini ve güçlerini planlayarak toplam maliyet verimliliğini (CE) en üst düzeye çıkarabileceğini göstermektedir. Simülasyon sonuçlarında, Model I, II, III ve IV'te klimanın çalışma gücü sırasıyla 0,19 kW/h, 0,96 kW/h, 1,12 kW/h ve 1,24kW/h olarak belirlenmiştir. I, II, III ve IV numaralı modellerde aydınlatmanın çalışma gücü ise sırasıyla 0,2 kW/h, 0,38 kW/h, 0,45 kW/h ve 0,5 kW/h olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, konforun tercih edilmesi için ağırlığın artmasıyla birlikte klimanın ve aydınlatmanın çalışma gücünün de arttığını göstermektedir. Bu bağlamda, CE ve CP arasında pozitif bir korelasyon olduğu ortaya konulmuştur. Önerilen yaklaşım, ekonomik verimlilik ve tüketici tercihi arasında istenen dengeyi sağlayarak tüketicilerin maliyet tasarrufu yaparken konforlarını korumalarına yardımcı olmaktadır (Jiang & Wu, 2020).

Huang ve arkadaşları, konut tipi talep yanıtı için konveks olmayan bir karma tamsayılı doğrusal olmayan problem (MINLP) çözümüne yönelik hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Bu problem, ayrık ve sürekli değişkenlere ayrıştırılarak farklı algoritmalarla optimize edilmektedir. Ayrık değişkenler parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ile belirlenirken, sürekli değişkenler gradyan tabanlı deterministik bir algoritma ile optimize edilmektedir. Cihaz çizelgelemesi, bir gün 24 adet bir saatlik periyoda bölünerek gerçekleştirilmektedir. Önerilen algoritma, ticari optimizasyon yazılımı ve sezgisel tabanlı bir algoritma ile karşılaştırılmıştır. Geleneksel sezgisel algoritma, problemin konveks olmayan doğası nedeniyle uygulanabilir bir çözüm bulamamıştır. Ticari çözücü Knitro kolayca yakınsamış ancak optimum olmayan bir çözüm üretmiştir. Öte yandan, önerilen hibrit algoritma konveks olmayan MINLP'yi en iyi şekilde çözebilmiştir. PSO, Knitro ve hibrit algoritmanın uygunluk değerleri sırasıyla 54.48, 44.89 ve 43.68'dir. Önerilen yöntemin

konut talep tarafı katılımındaki (DR) etkinliği simülasyon çalışmaları ile test edilmiş ve sonuçlar sunulmuştur (Huang, Zhang, Mo, Lu, & Ma, 2020).

Soares ve arkadaşları, evdeki elektrik tüketiminin bir karakterizasyonunu sunarak son kullanım yüklerinin işlevsel bir sınıflandırmasını önermişlerdir. Bu çalışmada sunulan vaka çalışmalarına göre, enerji yönetim sistemlerinin (EMS) farklı penetrasyon oranları ve/veya EMS'nin farklı son kullanım yüklerini kontrol etme kapasitesine izin veren farklı irade yüzdeleri, çeşitli tasarruf potansiyellerine yol açacak ve konut yük profili üzerinde çeşitli etkilere sahip olacaktır. Elde edilen sonuçlar, tasarrufların %0,5 ila %5 arasında değişebileceğini göstermektedir. Simülasyon çalışmaları, elektrik tüketiminin kaydırılmasıyla hane yük diyagramındaki tepe noktalarının azaltılabileceğini ve daha düz bir tüketim modelinin elde edilebileceğini göstermektedir (Soares, Gomes, & Antunes, 2014).

Issi ve Kaplan, Çankırı'da iki kişinin yaşadığı bir evde, 1 saniye çözünürlükle 12 farklı ev aletinin güç tüketim verilerini elde etmişlerdir. Her bir cihaz için güç tüketim analizi ve yük profili çıkarılmıştır. Elde edilen veriler, her bir cihazın ortalama güç tüketimini ve farklı çalışma modlarını veya döngülerini karakterize etmektedir. Ayrıca, bu cihazların ev enerji yönetimi çalışmaları ve bekleme güç tüketimleri üzerindeki etkisi de tartışılmaktadır (Issi & Kaplan, 2018).

Du ve arkadaşları, ev aletlerinin enerji çizelgelemesini, elle çalıştırılan aletlerin (MOA'lar) enerji tüketiminin belirsizliğini dikkate alarak bir gürbüz optimizasyon problemi olarak tanımlamışlardır. MOA'ların tüm olası enerji tüketim durumları arasında, gürbüz yaklaşım, eğimli blok oranı ile birlikte gerçek zamanlı elektrik fiyatlandırma şemasına dayalı olarak tüm ev aletlerinin elektrik ödemesini azaltmak için en kötü senaryoyu dikkate alır. Bu gürbüz optimizasyon problemi, iç genetik algoritma ve dış parçacık sürü optimizasyon algoritmaları ile iç içe geçmiş bir sezgisel algoritma olan nesiller arası projeksiyon evrimsel algoritması ile çözülür. Cihazların genel çalışma süresi göz önünde bulundurularak, 1 saatlik süre, 5 zaman dilimine bölünmüş ve enerji tüketimi 12 dakikalık zaman aralıklarıyla planlanmıştır. Vaka çalışmaları, çeşitli programlanabilir cihaz ve elle çalıştırılan cihaz kombinasyonları ile bir günlük ve bir aylık senaryolar üzerinde yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, belirsizlikleri göz ardı eden yaklaşımla ve sabit modelli MOA'ları dikkate alan yaklaşım ile karşılaştırıldığında, önerilen yaklaşımın elektrik maliyetlerini azaltmada daha etkili olduğunu göstermektedir (Du, Jiang, Li, & Wu, 2016).

Ahmed ve arkadaşları, enerji yönetimi için yeni bir ikili geri izleme arama algoritması (BBSA) kullanarak HEMS için gerçek zamanlı optimum bir çizelgeleme programı

önermişlerdir. Akıllı prizlerin donanım prototipi ve grafiksel kullanıcı arayüzü yazılımı, önerilen HEMS'i göstermek ve yükler ile zamanlayıcı arasında arayüz sağlamak için tasarlanmıştır. Önerilen çizelgeleme algoritması, hafta içi sabah 4 ile 11 arasında çalışmayı dikkate alan ilk senaryo ve hafta sonları günün farklı saatlerinde çalışmayı dikkate alan ikinci senaryo olmak üzere iki durumda uygulanmıştır. Önerilen BBSA çizelgeleme denetleyicisinin deneysel sonuçları, geliştirilen kontrolörün HEMS'deki doğruluğunu belirlemek için ikili parçacık sürü optimizasyonu (BPSO) çizelgeleme denetleyicisi ile karşılaştırılmıştır. BBSA program denetleyicisi, enerji tüketimini ve toplam elektrik faturasını azaltmada ve belirli yüklerin yoğun olduğu saatlerde enerji tasarrufu sağlamada BPSO program denetleyicisine göre daha iyi sonuçlar vermektedir. BBSA program denetleyicisi hafta içi 4,87 kWh (günlük %21,07) ve hafta sonu 6,6 kWh (günlük %26,1) tasarruf sağlamıştır. BPSO program denetleyicisi hafta içi 4,52 kWh/gün (günde %20,55) ve DR dönemlerinde 6,3 kWh/gün (günde %25) tasarruf sağlamıştır (Ahmed, ve diğerleri, 2017).

Javaid ve arkadaşları konut kullanıcılarının cihazlarını planlamak amacıyla ikili parçacık sürü optimizasyonu (BPSO), genetik algoritma (GA) ve guguk kuşu araması (CS) gibi evrimsel algoritmalara dayalı bir talep tarafı yönetimi (DSM) modeli geliştirmişlerdir. Bu model, üç farklı senaryo için bir kullanım zamanı fiyatlandırma ortamında simüle edilmiştir: 1) Geleneksel evler (HEMS olmadan), 2) Akıllı evler ve 3) Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip akıllı evler. Simülasyon sonuçları, önerilen modelin cihazları en uygun şekilde programladığını ve bunun sonucunda elektrik faturalarında ve pik yük talebinde azalma sağladığını göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla (YEK'li) ve YEK'siz her iki durumda da guguk kuşu arama algoritmasının GA ve BPSO'ya kıyasla sırasıyla %6,93 ve %43,10'luk bir azalma ile daha üstün sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Javaid, ve diğerleri, 2017).

Philipo ve arkadaşları, yük kaydırma ve pik kırpmaya dayalı bir talep tarafı yönetim stratejisi önermişlerdir. Bu yaklaşım MATLAB/Simulink R2021a ortamında modellenmiş ve bir yapay sinir ağı (YSA) algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Modelin etkinliğini test etmek için Doğu Afrika'da bağımsız bir PV-batarya mikro şebekesi üzerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Önerilen algoritma, yük profilini hedeflenen seviyeye getirerek pik talebi azaltmakta ve sistemin PAR değerini düşürmektedir. Daha esnek bir talep tarafı yönetimi sağlamak için ertelenebilir yüklerin varlığı da hesaba katılmıştır. Sonuçlar,

pik talebinde %31,2 ve PAR oranında %7,5 oranında azaltılabileceğini göstermektedir (Philipo, Kakande, & Krauter, 2022).

Tezde ve arkadaşları, dağıtık enerji üretimi ve depolama sistemlerine sahip hanelerin güç tüketimini planlamak için iki aşamalı bir hibrit optimizasyon algoritması sunmuşlardır. İlk aşamada, özdeş olmayan Ev Enerji Yönetim Sistemleri (HEMS) modellenmiştir. Her bir HEMS için, genetik algoritma (GA) kullanılarak bir dizi optimum tüketim programı hesaplanmıştır. Her hane, bu optimizasyon sonuçlarını bir Bayesian oyunu içinde değerlendirerek, hangi optimizasyon sonucunun uygulanacağını belirler. İkinci adımda ise Bayesian Oyununa (BG) dayalı bir Mahalle Enerji Yönetim Sistemi (NEMS) kurulur. Bu algoritmada, HEMS kullanıcıların elektrik maliyetini azaltırken, NEMS ise dağıtım transformatörüne aşırı yüklenmeyi önlemek için mahalle yük eğrisini düzleştirir. Sonuç olarak, önerilen hibrit enerji yönetim sistemi %25'e kadar enerji tasarrufu sağlar ve maliyeti ortalama %8,7 oranında azaltır (Tezde, Okumus, & Savran, 2019).

Bu literatür taraması talep tarafı yönetimi (DSM) alanındaki bir dizi çalışmayı içermektedir. Araştırmacılar, enerji tüketimini optimize etmek ve talep yanıtını iyileştirmek için çeşitli algoritmalar, optimizasyon modelleri ve simülasyon yöntemleri kullanarak bir dizi strateji geliştirmiştir. Bu çalışmaların birçoğu enerji yönetim sistemleri, akıllı şebeke uygulamaları ve ev otomasyon sistemleri de dâhil olmak üzere farklı senaryolarda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların sonuçları, talep tarafı yönetimi yoluyla tüketimin optimize edilmesiyle enerji tasarrufu sağlanabileceğini, maliyetlerin azaltılabileceğini ve yük eğrisinin yumuşatılabileceğini göstermektedir.

Konut dağıtım şebekelerinde harmoniklerin azaltılması enerji tasarrufuna katkı sağlar. Harmonik analizi, bu azalmanın sağlanması için çok önemli bir araçtır. Genellikle, harmonik analiz çalışmalarının çoğu, cihazların harmonik etkilerini belirlemek amacıyla ölçümler yapılmasını gerektirir.

Literatür incelendiğinde, konut dağıtım şebekelerindeki harmonik bozulmaların çeşitli yüklerden kaynaklandığı ve bu bozulmaların güç kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Çiçek ve arkadaşları, İstanbul'da Yıldız Teknik Üniversitesi Akıllı Ev Laboratuvarında ev aletlerinin gerçek harmonik ölçümlerini yapmışlardır. Bu ölçümler, ev aletlerinin çalışması sırasında gerilim, akım, aktif, reaktif ve görünür güce dayalı olarak farklı yük profillerinin oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Araştırma kapsamında, manuel olarak uygulanan yük kaydırma stratejilerinin güç kalitesi gereksinimlerine etkisini

değerlendirmek için üç farklı vaka çalışması analiz edilmiştir. Sonuç olarak, IEEE tarafından belirlenen standart limitlere uygun olarak harmonik bozulmanın sistem üzerindeki etkisini gösteren toplam talep bozulması (TDD) endeksinin, harmonik bozulmanın azaltılmasıyla yaklaşık %8'in altına düştüğü gösterilmiştir (Çiçek, ve diğerleri, 2021).

Eduful ve arkadaşları, güç sistemlerindeki harmonik emisyonlarla ilgili iki önemli uluslararası standardı, IEEE-519 ve IEC-61000 serisini, kapsamlı bir şekilde gözden geçirmişlerdir. Bu incelemenin amacı, kamu hizmetleri ve paydaşların harmonik emisyonlar için güvenli sınırlar hakkında bilinçli kararlar almasına yardımcı olmaktır. Ayrıca, hangi standardı benimseyeceklerine karar vermelerine yönelik rehberlik sağlamayı hedeflemektedir. Makale, ortak bağlantı noktasının (PCC) orijinal amacının arkasındaki ilkeleri açıklamakta ve bu standartların uygulanmasıyla ilgili bazı zorlukları vurgulamaktadır. PCC'nin yerinin güç dağıtım sistemi yöntemine göre nasıl belirlenebileceği de gösterilmektedir.(Eduful, Jackson, & Cole, 2014).

Rawa ve arkadaşları, LCD TV, normal buzdolabı ve Ayarlanabilir Hız Sürücülü (ASD) yıkayıcı gibi doğrusal olmayan yükler tarafından enjekte edilen harmonikleri ölçmek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Daha sonra bu yükleri modellemek ve simüle etmek için Matlab Simulink kullanılmış ve deneysel ölçümlere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada, yüklerin ayrıntılı modellemesi yerine Sabit Yük Gücü (CLP) modeli kullanılmıştır. LCD TV, normal buzdolabı ve ASD yıkayıcı gibi doğrusal olmayan yüklerin CLP modeli ile simülasyon sonuçlarının, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bu doğrultuda, CLP modelinin bu tür doğrusal olmayan yükleri modellemek için uygun olduğu doğrulanmıştır (Rawa, Thomas, & Sumner, 2014).

Ayan ve Türkay, halojen lambalar, kompakt floresan lambalar (CFL'ler) ve ışık yayan diyot (LED) lambaların harmonik analizi ve güç kalitesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, CFL'ler ve LED'lerin doğrusal olmayan yük karakteristiklerine sahip olduğu ve halojen lambalara kıyasla daha fazla bozulmuş akımlar ürettiği tespit edilmiştir. Her bir lambanın harmonik emisyonu test edilmiş ve analiz edilmiştir. Ayrıca, farklı LED gruplarıyla yapılan ölçümler, çeşitlilik faktörlerinin etkilerini değerlendirmiştir. Sonuç olarak, LED'lerin önemli miktarda harmonik akım üretmesine rağmen, farklı LED türlerinin birleştirilmesiyle harmonik miktarının azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Ayan & Turkay, 2022).

Ahmed ve arkadaşları, ölçülecek yüklere göre yük akımını okuyan yeni bir etkileşimli teknik önermişlerdir. Bu sistem, ekipmana ilk güç verildiğinde hemen üç döngü için bozulmuş akımı ölçer. Temel akım, sistem tarafından alınan ölçümlere dayanarak tahmin edilir. Daha sonra, toplam harmonik akımları elde etmek için bu tahmini temel akımı sensör akım okuyucusundan çıkarır. Bu sayede, sistem uygun anahtarlama frekansı ve modülasyon endeksi kullanarak akım kaynaklı invertör (CSI) için bir darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyali üretebilir. Simülasyon modelinin sonuçları laboratuvar ölçümleri ile karşılaştırılmış ve gerçek ölçümlerle önemli bir uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Bu yeni teknik, ölçüm yüklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve analiz edilmesi için bir yöntem sunmaktadır (Ahmed, Said, Mageed, & Ammar, 2022).

Bajagain ve Dubey, Kuzey Amerika'daki bir konut dağıtım sisteminde doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik bozulmaların analizini yapmışlardır. Araştırmada, dizüstü bilgisayarlar, TV'ler, LED lambalar ve buzdolapları gibi yükler dikkate alınmıştır. Çalışmanın amacı, bu yüklerin konut dağıtım sistemlerindeki etkilerini analiz etmektir. Bu amaçla, konut yüklerinin ayırık fazlı bir transformatör ve tripleks hatlar üzerinden beslendiği varsayılmıştır. Çalışmada öncelikle eşdeğer akım kaynağı modeli ve ev aletlerinin tam doğrultucu tabanlı modelinden kaynaklanan harmonik bozulmalar karşılaştırılmıştır. Ardından, doğrusal olmayan yüklerin sisteme olan etkileri IEEE 13-bus sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Test sistemi, bölünmüş fazlı bir konut dağıtım sistemini içermektedir. Doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik bozulmalar, bölünmüş fazlı bir transformatör modeli ve karşılık gelen tek fazlı eşdeğer model ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, tek fazlı eşdeğer modelin dengesiz yükleme durumunda akım harmonik bozulmalarını düşük, gerilim harmonik bozulmalarını ise yüksek tahmin ettiği belirlenmiştir (Bajagain & Dubey, 2021).

Xiao ve arkadaşları, konut dağıtım şebekelerindeki harmonik bozulmaların tespiti için mevcut izleme altyapısının yetersizliğini ele alarak bu sorunu çözmek için bir çözüm önerisinde bulunmuşlardır. Öncelikle, birkaç temsili hizmet transformatöründe ölçümler yapılarak ikincil konut sistemi için birleşik bir harmonik model geliştirilmiştir. Bu model, akıllı sayaçlar tarafından sağlanan aktif güç verilerini kullanarak konut yüklerinin harmonik davranışındaki belirsizliği azaltmaktadır. Ardından, şebeke tarafından sağlanan şebeke modeli kullanılarak olasılıklı bir harmonik yük akışı algoritması önerilmiştir. Ölçüm bilgilerini dâhil etmek için gevşek harmonik kaynakları kavramı tanıtılmış ve mevcut harmonik ölçümleri de göz önünde bulundurulmuştur. Bu yaklaşım, tahmin belirsizliğini

önemli ölçüde azaltmaktadır. Son olarak, önerilen yöntem Kuzey Amerika'da gerçek bir üç fazlı, dört telli konut sistemi kullanılarak doğrulanmıştır (Xiao, Li, Wang, & Zhou, 2020).

Wang, ve arkadaşları, Kuzey Amerika'daki konut dağıtım sistemlerinin saha verilerini analiz ederek farklı kaynaklardan gelen harmonik akımların iptal derecesini belirlemişlerdir. Konut, ticari ve endüstriyel fiderlerin harmonik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, konut fiderlerinin harmonik bozulma seviyelerinin endüstriyel ve ticari fiderlere göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Konut yükleri için en büyük endişe kaynağı 3. ve 5. harmonikler olup, özellikle 3. harmonik konut fiderlerinde yaygındır. Farklı evlerden gelen düşük dereceli harmonik akımlar genellikle eklenme eğilimindedir. Bireysel evlerdeki toplam talep bozulma (TDD) seviyesi, aktif güç ile bazı korelasyonlara sahipken, dağıtım fiderlerinde TDD seviyesi aktif güç ile güçlü bir korelasyon göstermektedir. Bu çalışma, konut dağıtım sistemlerinde harmonik bozulma sorunlarına dikkat çekmektedir (Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016).

Rodríguez-Pajarón ve arkadaşları, bir haftalık bir süre boyunca bir dakikalık zamansal çözünürlükle 24 konutta saha ölçümleri gerçekleştirmiştir. Bu ölçümlerde, harmonik akım büyüklükleri ve 25. mertebeye kadar olan tek harmonik mertebelerinin faz açıları ile talep edilen aktif ve reaktif güç verileri kaydedilmiştir. Ölçüm analizinde iki farklı denetimsiz öğrenme tekniği (parametrik olmayan yoğunluk tahmini ve Gauss karışım modelleri) kullanılmış ve sonuç olarak bireysel yerleşim alanlarının harmonik etkilenimine ilişkin iki olasılıksal model geliştirilmiştir. Her bir harmonik mertebenin büyüklüğü ve fazı için farklı güç talebi aralıklarına göre tabakalandırılmış istatistiksel olasılık dağılımları oluşturulmuştur. Geliştirilen modeller, ölçümlerden elde edilen veriler ile sentetik olarak üretilen akımların enjeksiyonundan kaynaklanan harmonik gerilimlerin karşılaştırılması yoluyla bir test fiderinde doğrulanmıştır (Rodríguez-Pajarón, Hernández, Mendonça, & Milanović, 2022).

Hu ve arkadaşları, modern güç sistemlerindeki yaygın harmonik kaynak modellerini incelemiştir. Bu kaynakların matematiksel modelleri, devre yapıları ve operasyonel süreçleri hakkında detaylı bilgi sağlanmıştır. Ayrıca, tipik konut güç yükleri, frekans dönüşüm hız regülatörleri, elektrikli araç şarj senaryoları, elektrik ark ocakları, yenilenebilir enerji üretim senaryoları ve elektrikli lokomotif yükleri gibi tipik çalışma senaryolarında çeşitli kaynakların harmonik özellikleri incelenmiştir (Hu, ve diğerleri, 2023).

Saadat ve arkadaşları, güç sistemi şebeke harmoniklerini düzenlemek için harmonik fiyatlandırma yoluyla yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşımda, harmonik katkının

belirlenmesinde baskın mertebeleri toplamak için yeni bir endeks önerilmiştir. Harmonik fiyatlandırma için, ortak bağlantı noktasındaki (PCC) harmonik katkı kullanılmaktadır. Katkıyı belirleme yöntemi, ortak bağlantı noktasının akım ve gerilim ölçümlerini kullanan üç nokta yöntemine dayanmaktadır. Önerilen yöntemin harmonik fiyatlandırmadaki etkinliği, standart bir IEEE 14-bus şebekesi üzerinde elde edilen simülasyon sonuçlarının analizi ile gösterilmiştir (Saadat, Hooshmand, Kiyoumarsi, & Tadayon, 2019).

Ghosh ve arkadaşları, bir konut sisteminde sadece giriş toplu gerilim-akım verilerini kullanarak harmonik kirleticiler yükleri tanımlamak için geliştirilmiş bir metodoloji sunmuşlardır. Önerilen yük izleme tekniği Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmasını kullanmaktadır. Mevcut metodolojilerden farklı olarak, bu teknik sistem için önemli bir eğitim mekanizması gerektirmez. Bu algoritma, PLAID veri kümeleri kullanılarak doğrulanmış ve sonuçlar son teknoloji tekniklerle karşılaştırılmıştır. Önerilen metodolojinin kapasitesini göstermek için bir konut sistemi üzerinde uygun simülasyonlar ve ampirik olarak oluşturulmuş veri kümesi analizi gerçekleştirilmiştir (Ghosh & Chatterjee, 2021).

Khan ve arkadaşları, harmoniklerin zararlı etkileri, yaygın üretim kaynakları, mevcut standartlar ve tespit yöntemleri üzerine kapsamlı bir inceleme sunmuşlardır. Hem şebekeye bağlı hem de adalı mikro şebekeler için doğrusal olmayan yüklerin varlığında harmoniklerin azaltılması için çeşitli kontrol stratejilerini tartışmaktadırlar. Makale, çeşitli harmonik tespit tekniklerini, bunları düzenleyen standartları ve optimizasyon içeren yaklaşımları detaylandırarak, farklı uygulamaları gözden geçirmeyi ve kategorize etmeyi amaçlamaktadır (Khan, Vijay, & Doolla, 2021).

Kit ve arkadaşları, besleme gerilimi bozulmasının modern ev aletlerinin akım harmonikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. T8 floresan armatürler, masaüstü bilgisayar ve kompakt floresan lamba gibi en son düşük THD anahtar modlu güç kaynağı kullanan modern ev aletlerinin ölçümleri yapılmıştır. Farklı besleme gerilimi bozulmaları altında, akım dalga şekilleri kaydedilmiş ve harmonik analiz için harmonik spektrumlar elde edilmiştir. Bu ölçümlerin sonuçları, gerilim bozulmasının akım harmonikleri üzerindeki etkisini gösteren korelasyon eğrileri oluşturmak için kullanılmıştır. Ayrıca, bireysel akım harmonikleri ile gerilim harmonikleri arasındaki etkileşimler analiz edilmiştir. Gerilim harmoniklerinin akım harmonikleri üzerindeki etkisini karakterize etmek için zayıflama faktörü kullanılmıştır (Kit, Tse, & Lau, 2012).

Farooq ve arkadaşları, dağıtım sistemlerinde çeşitli doğrusal olmayan konut yüklerinin neden olduğu harmonik bozulmayı incelemişlerdir. Çeşitli ev aletlerinin harmonik spektrumları deneysel olarak elde edilmiş ve Elektriksel Geçici Durum Analiz Programı (ETAP) kullanılarak tipik bir İngiltere dağıtım sisteminin simülasyonunda kullanılmıştır. Sonuçlar, dağıtım sistemindeki ortak bağlantı noktasında (PCC) yüksek düzeyde harmonik bozulma olduğunu ve dağıtım transformatörünün daha yüksek bir yükleme seviyesi düşünüldüğünde bu durumun daha da kötüleştiğini ortaya koymaktadır (Farooq, Zhou, & Farrag, 2013).

Djordjevic ve Simic, doğrusal olmayan cihazların tespiti için özellikle uygun olan kararlı durum akımının harmonik analizi yoluyla cihaz yükü izleme yöntemini tartışmışlardır. Mevcut harmonik tabanlı müdahaleci olmayan yük izleme (NILM) yöntemlerinin, hedef cihaz sayısı katlanarak arttıkça artan karmaşıklıkları nedeniyle sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sorunu ele almak için bu makale, cihazlar için bir algılama özelliği olarak akım harmonik fazörlerinde adım değişikliklerinin kullanılmasını önermişlerdir. Önerilen yöntemin temel avantajı, tüm olası cihaz kombinasyonları için yük imzaları gerektiren önceki NILM yöntemlerinin aksine, yük faaliyetlerini tanımlamak için yalnızca bireysel cihaz imzalarına ihtiyaç duyması ve düşük hesaplama karmaşıklığı sunmasıdır. Önerilen yöntem, LCD monitör, floresan lamba, halojen lamba ve bir masaüstü bilgisayar dâhil olmak üzere dört ev aleti seti üzerinde test edilmiştir (Djordjevic & Simic, 2018).

Sun ve arkadaşları, konutlarda enerji kullanımındaki harmoniklerin değerlendirilmesi için yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, doğrusal olmayan ev aletleri tarafından üretilen harmonikleri analiz eden aşağıdan yukarıya bir yaklaşımı benimsemektedir. Yöntemin ilk kısmı, harmonik bağlantı modelidir ve bu model, tek tek cihazlar tarafından üretilen harmonikleri hesaplar. Model, farklı mertebelerdeki harmonik gerilimler ve akımlar arasındaki bağlantıları doğrudan gösterir. İkinci kısım, Markov zinciri Monte Carlo yöntemi kullanılarak oluşturulan rastgele kullanım modelidir ve bu model, ev aletlerinin kullanım düzenini belirler. Yöntemin üçüncü kısmı, büyük ölçekli konut yüklerinin harmoniklerini ve gücünü değerlendirmek için önerilen elektrik ve rastgele kullanım modellerini kullanır. Büyük ölçekli konut yüklerinin harmoniklerini ve gücünü değerlendirmek için yine aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanılmaktadır. Önerilen yöntemin doğruluğunu ve geçerliliğini doğrulamak amacıyla saha ölçümleri ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca,

sekiz farklı kompakt floresan lambanın (CFL) ölçülen harmonik akım dalga şekilleri de gösterilmiştir. (Sun, ve diğerleri, 2020).

Rodríguez-Pajarón ve arkadaşları, modern akıllı şebekelerde konut yükleri tarafından enjekte edilen harmonik akımların stokastik profillerini modellemek için yenilikçi bir simülasyon aracı geliştirmiştir. Bu araç, aşağıdan yukarıya bir yaklaşım benimseyerek, her bir ev cihazının stokastik tüketim modellerini ve Gauss karışımları ile modellenen harmonik enjeksiyon spektrumlarını dikkate almaktadır. Simülatör, hem tek bir konut hem de birden fazla konut için haftalık harmonik enjeksiyon profilleri oluşturma yeteneğine sahiptir. Modelin güvenilirliğini sağlamak için, on yedi konuttan alınan haftalık akım enjeksiyon ölçümleri kullanılarak doğrulama yapılmıştır. Bu sayede, simülasyon aracının doğruluğu ve geçerliliği ispatlanmıştır (Rodríguez-Pajarón, Caro, Hernández, & Izzeddine, 2022).

Hardie ve Watson, modern cihazların güç kalitesi özelliklerini belirlemek amacıyla bir ölçüm çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, müzik setleri, plazma TV'ler, LCD TV'ler, kompakt floresan lambalar (CFL'ler) ve ısı pompaları gibi çeşitli cihazların ölçümleri ve analizleri yapılmıştır. Sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur. Ayrıca, bu cihazların tipik bir dağıtım fideri üzerindeki harmonik gerilim etkilerini göstermek için bilgisayar modellemesi kullanılmıştır. Bu modelleme, cihazların güç kalitesi üzerindeki etkilerini ve dağıtım sistemine olan potansiyel etkilerini anlamaya yönelik veriler sağlamıştır (Hardie & Watson, 2010).

Michalec ve arkadaşları, alçak gerilim şebekesindeki harmonik akım kirliliğine odaklanan bir güç kalitesi analizi sunmuştur. Bu çalışmada, konutlarda ve ticari tesislerde yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımların davranışı incelenmiştir. Yapılan deneysel testler, birden fazla doğrusal olmayan yük türü tarafından üretilen harmonik akımların, mevcut toplam harmonik bozulma faktörünü (THDi) azaltma eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Farklı konutlar, ticari işletmeler veya aydınlatma sistemlerinin kombinasyonlarının mevcut toplam harmonik bozulma faktörlerinin (THDi), tek başına test edilen ünitelerden daha düşük olduğu belirlenmiştir (Michalec, ve diğerleri, 2021).

Purwadi ve arkadaşları, alçak gerilim, orta gerilim ve yüksek gerilim şebekelerine bağlı endüstrilerde farklı yük tipleri üzerinde yapılan ölçümleri ele alan kapsamlı bir çalışma sunmuştur. Araştırmanın odak noktası, yüksek gerilim şebekesindeki harmonik ölçümleridir ve bu bağlamda iki büyük 150 kV müşteri ve bir büyük 70 kV müşterinin bir hafta boyunca kaydedilen verileri incelenmiştir. Sonuçlar, iki büyük müşteri için toplam talep bozulması

(TDD) değerlerinin IEEE 519-1992 standartlarında önerilen sınırları aştığını ortaya koymuştur. Harmonik akım kirliliğinin ana kaynağı olarak ark ocağı yükü kullanan bir müşteri belirlenmiştir. Orta ve alçak gerilim şebekelerindeki harmonik ölçümleri iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. İlk yöntemde, harmonik seviyelerini ve oluşma olasılıklarını belirlemek amacıyla orta gerilim müşterilerinin sekiz örneği bir hafta boyunca sürekli olarak kaydedilmiştir. İkinci yöntemde ise orta gerilim şebekesinde pik yük sırasında beş dakika boyunca anlık ölçümler yapılmıştır. Elde edilen veriler, ölçülen dağıtım trafo merkezlerinde toplam harmonik bozulmanın (THDi) %5'i aştığını ve ölçülen müşterilerin %70'inin THDi değerlerinin %10'un üzerinde olduğunu göstermiştir (Purwadi, Heryana, Nurafiat, Mawardi, & Pranyoto, 2011).

Yukarıdaki çalışmalar, harmonik konuların ele alınmasında harmonik analizin öneminin altını çizmektedir.

Bu çalışma ile literatürde incelenen talep tarafı yönetimi (DSM) ve harmonik analizine ait çalışmalar arasındaki farklar aşağıda belirtilmiştir.

Talep Tarafı Yönetimi ile Harmonik Azaltımın Sağlanması: Harmonik analiz ile talep tarafı yönetimi araştırmalarını bir arada ele alan az sayıda çalışma bulunmaktadır. İncelenen çalışmalar arasında sadece (Çiçek, ve diğerleri, 2021) adlı çalışma, harmonik azaltımı için bir DSM stratejisi kullanmaktadır. Bu çalışmada, yük kaydırmanın harmonik etkisi ve standartlara uygunluğu tartışılmaktadır. Ancak, yük kaydırma işlemi herhangi bir optimizasyon yöntemi kullanılmadan manuel olarak gerçekleştirilmiştir. 18 farklı cihazın bireysel ölçümleri 3 saniyelik bir çözünürlükle gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte cihazların birlikte çalıştığı senaryoların gerçek zamanlı ölçümleri gerçekleştirilmemiştir. Bireysel cihaz ölçüm verileri kullanılarak farklı senaryolar için güç ve TDD değerleri hesaplanmıştır. (Çiçek, ve diğerleri, 2021) adlı çalışmada, bir senaryodaki toplam harmonik akım, cihazların harmonik akımlarının skaler toplamı olarak hesaplanmıştır. Ancak, birlikte çalışan birden fazla cihazın harmonik etkisi, tek başına çalışan cihazların harmonik etkilerinin toplamından farklı olabilir. Bu nedenle, TDD ve THD değerlerinin en doğru şekilde belirlenmesi gerçek zamanlı ölçümlerle elde edilebilir. Bu çalışma, DSM stratejilerinin gerçek zamanlı ölçümlerle toplam harmonikleri azaltılabileceğini gösteren ilk çalışmadır.

DSM Çerçevesinden Gerçek Ölçümler: Bu araştırma, gerçek cihazları kullanarak gerçek bir ev ortamında yapılan ölçümlerle, önceki talep tarafı yönetimi (DSM) çalışmalarındaki kısıtlamaları aşmayı amaçlamaktadır. Çoğu DSM araştırması,

simülasyon ortamlarından elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Deneysel çalışmaların çoğunda ise sonuçlar gerçek cihazlar yerine test yükleri ile elde edilmektedir. Ancak bu çalışmada, gerçek cihazlar ve ölçümler kullanılarak gerçek bir ev ortamından elde edilen sonuçlar öne çıkmaktadır. Araştırma, hem 26 farklı cihazdan alınan bireysel ölçümleri hem de bu 26 cihazın 24 saatlik bir süre boyunca üç farklı senaryoda birlikte çalıştırılmasından elde edilen ölçümleri içermektedir. Bu çalışma, gerçek cihazların kullanıldığı sınırlı sayıdaki DSM çalışmasının (Çiçek, ve diğerleri, 2021; Farzambehboudi, Erdinç, Boynueğri, Uzun, & AliÖz, 2018; Issi & Kaplan, 2018; Ahmed, ve diğerleri, 2017) eksikliklerini gidermiştir. (Çiçek, ve diğerleri, 2021), (Farzambehboudi, Erdinç, Boynueğri, Uzun, & AliÖz, 2018), (Issi & Kaplan, 2018) ile (Ahmed, ve diğerleri, 2017) çalışmalarında kullanılan cihaz sayısı bu çalışmadakinden önemli ölçüde daha azdır. Ayrıca, bu çalışma hem DSM hem de harmonik analizi dikkate alırken, (Çiçek, ve diğerleri, 2021) hariç diğer çalışmalar sadece DSM'ye odaklanmaktadır. Yukarıda bahsedilen çalışmalardan biri dışında, DSM stratejileri bireysel cihaz ölçümlerine dayalı olarak belirlenmiştir. Sadece (Ahmed, ve diğerleri, 2017) çalışmasında cihazların birlikte çalışmasına dair gerçek ölçümler yapılmıştır. Ancak, (Ahmed, ve diğerleri, 2017)'deki toplu ölçümlerde kullanılan cihaz sayısı oldukça sınırlıdır (dört cihaz). Mevcut literatürde, gerçek bir ev ortamında çok sayıda cihazın bulunduğu hem bireysel hem de toplu cihaz ölçümlerini içeren kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma, gerçek verilerle güvenilir sonuçlar sağlayarak teorik modelleri ve simülasyon araştırmalarını aşmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, hane düzeyinde gerçek zamanlı ölçümler içeren en kapsamlı DSM çalışmasını temsil etmektedir.

Harmonik Analiz Çerçevesinden Standartlara Uygunluk ve Senaryoların Gerçek Ölçümleri: DSM'ye benzer şekilde, senaryoların gerçek ölçümlerle doğrulandığı sınırlı sayıda harmonik analiz çalışması mevcuttur (Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016; Xiao, Li, Wang, & Zhou, 2020; Rodríguez-Pajarón, Caro, Hernández, & Izzeddine, 2022). Bu çalışmaların hiçbirinde DSM konusunu ele alınmamış ve bireysel cihaz ölçümleri yapılmamıştır. Bu çalışmaların bir diğer eksikliği de ölçümlerin çözünürlük hassasiyetinin düşük olmasıdır. Ayrıca, (Xiao, Li, Wang, & Zhou, 2020) ve (Rodríguez-Pajarón, Caro, Hernández, & Izzeddine, 2022) harmonik kriterlere uyumu incelememiştir. Harmonik analiz literatüründe sadece birkaç çalışma (Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016; Purwadi, Heryana, Nurafiat, Mawardi, & Pranyoto, 2011;

Çiçek, ve diğerleri, 2021; Farooq, Zhou, & Farrag, 2013) standartlara uyumu değerlendirmiştir. Bununla birlikte, bu araştırmalar düşük çözünürlüklü ölçüm verileri ve çok kısıtlı sayıda cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışmaların hiçbirinde optimizasyon yöntemleri kullanılmamıştır. Öte yandan, (Çiçek, ve diğerleri, 2021) harmonikleri ve ve DSM'yi birlikte ele alırken (Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016; Purwadi, Heryana, Nurafiat, Mawardi, & Pranyoto, 2011; Farooq, Zhou, & Farrag, 2013) DSM'yi ele almamaktadır. (Purwadi, Heryana, Nurafiat, Mawardi, & Pranyoto, 2011; Çiçek, ve diğerleri, 2021; Farooq, Zhou, & Farrag, 2013) çalışmaları senaryolarının sonuçlarını gerçek zamanlı ölçümlerle sunmamış, sadece (Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016) çalışması senaryolarının sonuçlarını gerçek zamanlı ölçümlerle elde etmiştir.

Bu çalışma, yüksek çözünürlüklü gerçek ölçüm verilerini elde ederek literatürün harmonik analiz alanındaki eksikliklerini gidermeyi amaçlamaktadır. Bu veri setinden yararlanılarak kapsamlı bir harmonik analiz gerçekleştirilmiş ve harmonik standartlara uygunluk incelenmiştir.

Elektrikli Cihazların Çeşitliliği ve Sayısı: Elektrikli ev cihazları üzerine yapılan araştırmalar genellikle sınırlı sayıda cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir, ancak bazı çalışmalarda 20'nin üzerinde cihazın kullanıldığı sınırlı örnekler bulunmaktadır (Sun, ve diğerleri, 2020; Hardie & Watson, 2010). Bu çalışmalar genellikle sadece harmonik analiz üzerine odaklanmış olup, DSM alanını incelememiştir. Ayrıca, bu çalışmaların hiçbirinde harmonik standartlara uygunluğu değerlendiren çalışmalar yer almamaktadır. (Sun, ve diğerleri, 2020) çalışmasında, cihazların birlikte çalışmasına bağlı olarak harmonik bozulma endekslerindeki değişiklikler araştırılmamıştır. (Hardie & Watson, 2010) çalışmasında ise cihazların birlikte çalışması gerçek ölçümler kullanılarak incelenmemiştir.

Yüksek Çözünürlüklü Verilerin Kullanımı: Bu çalışmada 26 farklı elektrikli cihazın bireysel ve toplu ölçümleri gerçekleştirilerek 1 saniyelik yüksek çözünürlüklü güç, enerji ve harmonik akım verileri elde edilmiştir. Benzer şekilde literatürdeki bazı çalışmalarda (Farzambehboudi, Erdinç, Boynueğri, Uzun, & AliÖz, 2018; Issi & Kaplan, 2018) ölçümlerini 1 saniye çözünürlükle gerçekleştirmiştir. Ancak bu çalışmalar harmonik analizi kapsamamaktadır. (Farzambehboudi, Erdinç, Boynueğri, Uzun, & AliÖz, 2018) çalışmasında 16 farklı cihazın bireysel ölçümleri yapılmış, birleştirilmiş cihaz ölçümleri yapılmamıştır ve cihazların birlikte çalışmasının sonuçları simülatif olarak elde edilmiştir.

(Issi & Kaplan, 2018) çalışmasında ise, 12 farklı cihaz için bireysel ölçümler yapılmış, ancak toplu cihaz ölçümleri incelenmemiştir. Ayrıca, DSM ile ilgili herhangi bir vaka çalışması yapılmamış, sadece DSM'nin potansiyel faydalarından bahsedilmiştir.

Optimizasyon ve Hassasiyet: Bu çalışma, fatura maliyetini azaltmanın yanı sıra PAR değerini de düşürerek elektrik güç kalitesini iyileştirmeyi hedefleyen çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Bu doğrultuda çalışmada DPSO ve DTLBO optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu çalışma, yük çizelgeleme optimizasyonunda bir günlük optimizasyon süresinin 1 dakikalık zaman aralıklarına bölerek cihazların kontrol edilmesi ve amaç fonksiyonu formülasyonlarında 1 saniye çözünürlüklü gerçek verilerin kullanılması nedeniyle optimizasyon doğruluğu ve hassasiyet açısından diğer DSM çalışmalarından farklıdır. Ayrıca, cihaz çizelgelemesi için optimizasyon sürecinde belirlenen kısıtlar, kullanıcı konfor seviyesini en az etkileyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, hem kullanıcıların hem de elektrik şebekesinin faydaları dikkate alınmaktadır.

1.8. Çalışmanın Motivasyonu ve Katkıları

Bu çalışmanın amacı, DSM stratejilerini kullanarak bir konutun tüketim tarafını optimize etmektir. Çalışmanın temel hedefleri, fatura maliyetini düşürmek, yük eğrisini düzleştirmek ve doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik kirliliği azaltmaktır. Bu doğrultuda, yük kaydırma stratejilerine dayalı olarak geliştirilen yük çizelgeleme senaryoları için gerçek zamanlı ölçümler yapılmış ve yüksek çözünürlüklü sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşım, modelleme hatalarını önlerken daha güvenilir ve gerçekçi sonuçlar ile karşılaştırmalar yapılmasına olanak tanımaktadır.

Tablo 3, literatür taraması bölümünde atıfta bulunulan çalışmaların kapsamlı bir karşılaştırmasını sunarak mevcut araştırmalardaki boşlukları ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın motivasyonu, Tablo 3'te belirtilen literatürdeki bu boşlukları doldurmaktır.

Tablo 3. Literatür incelemesi

Referans	Talep Tarafı Yönetimi	Optimizasyon Yöntemi	P&E	TDD%	THD%	Harmonik Akım Spektrumu	Harmonik Standartlara Uygunluk	Ev Aletleri Ölçümü +20	≤ 1 s Veri Çözünürlüğü	Gerçek Zamanlı Ev Aletleri Ölçümü	Gerçek Zamanlı Senaryo Ölçümü
(Çiçek, ve diğerleri, 2021)	√		√	√		√	√			√	
(Wang, Yong, Sun, Xu, & Wong, 2016)			√	√		√	√				√
(Purwadi, Heryana, Nurafiat, Mawardi, & Pranyoto, 2011)				√	√		√				
(Hardie & Watson, 2010)					√			√		√	
(Farooq, Zhou, & Farrag, 2013)						√	√			√	
(Farzambehboudi, Erdiñç, Boynueğri, Uçun, & AliÖz, 2018)	√	√	√						√	√	
(Mohsenian-Rad, Wong, Jatskevich, Schober, & Leon-Garcia, 2010)	√	√	√								
(Fernandes, Morais, Vale, & Ramos, 2014)	√	√	√								
(Ahmed, ve diğerleri, 2017)	√	√	√							√	√
(Javaid, ve diğerleri, 2017)	√	√	√								
(Rezaee Jordehi, 2020)	√	√									
(Setlhaolo, Xia, & Zhang, 2014)	√	√	√								
(Derakhshan, Shayanfar, & Kazemi, 2016)	√	√	√								
(Manzoor, ve diğerleri, 2017)	√	√	√								
(Chen, ve diğerleri, 2022)	√	√	√								
(Mahmood, ve diğerleri, 2016)	√	√	√								
(Zhu, Lin, Lei, Liu, & Tao, 2019)	√	√	√								
(Jiang & Wu, 2020)	√	√	√								
(Huang, Zhang, Mo, Lu, & Ma, 2020)	√	√	√								
(Soares, Gomes, & Antunes, 2014)	√		√								
(Issi & Kaplan, 2018)			√						√	√	
(Du, Jiang, Li, & Wu, 2016)	√	√	√								
(Philipo, Kakande, & Krauter, 2022)	√	√	√								
(Tezde, Okumus, & Savran, 2019)	√	√	√								
(Rawa, Thomas, & Sumner, 2014)						√				√	
(Ayan & Turkay, 2022)						√				√	
(Ahmed, Said, Mageed, & Ammar, 2022)						√				√	
(Bajagain & Dubey, 2021)						√					
(Xiao, Li, Wang, & Zhou, 2020)			√								√
(Hu, ve diğerleri, 2023)						√					
(Ghosh & Chatterjee, 2021)		√				√					
(Djordjevic & Simic, 2018)						√				√	
(Kit, Tse, & Lau, 2012)						√					
(Michalec, ve diğerleri, 2021)						√				√	
(Sun, ve diğerleri, 2020)			√	√				√		√	
(Rodríguez-Pajarón, Caro, Hernández, & Izzeddine, 2022)					√						√
Bu Çalışma	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

Tablo 3'te özetlenen taksonomi dikkate alındığında, bu çalışmanın başlıca katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bu çalışmada 26 farklı cihazdan alınan 1 saniye yüksek çözünürlüklü aktif güç, aktif enerji ve 50. mertebeye kadar akım harmonikleri ölçümleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş ve modelleme hatalarından kaçınılarak gerçekçi yük profilleri oluşturulmuştur. Ayrıca cihazların hem bireysel hem de birlikte çalışmalarına ait analizlere ve yük profillerine yer verilmiştir.

- Literatürdeki yük profili çalışmaları, elektrikli cihazların harmonik karakteristiklerini analiz etmemektedir. Bu çalışma ise hem cihazların yük profillerinin hem de harmonik özelliklerinin gerçek zamanlı bir analizini sunmaktadır.

- Elektrikli cihazlar için en uygun günlük yük çizelgesini oluşturmak amacıyla DPSO ve DTLBO yöntemleri kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları arasında fatura maliyetlerinin ve PAR'ın minimize edilmesi bulunmaktadır. Yük çizelgesi optimizasyonu, 1 saniyelik yüksek çözünürlüklü veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bir günlük optimizasyon süresi 1 dakikalık aralıklara bölünerek cihaz kontrolü sağlanmıştır. Bu farklılıklar, optimizasyon sonuçlarının yüksek doğruluk ve hassasiyetle elde edilmesine olanak tanımıştır.

- Konut talep tarafı yönetimi algoritması, Trabzon'da dört kişilik bir ailenin yaşadığı bir evde çeşitli senaryolarda test edilmiştir. Her senaryo için 24 saatlik bir süre boyunca gerçek cihazlar kullanılarak 1 saniyelik çözünürlükte gerçek ölçümler alınmıştır. Bulgular, bu ölçümlerden elde edilen aktif güç, aktif enerji, TDDi ve THDi sonuçlarını kapsamaktadır.

- Gerçek zamanlı ölçümlerden elde edilen talep tarafı yönetimi yöntemlerinin sonuçları, yük eğrisinin düzgünleştirilmesi, fatura maliyetinin düşürülmesi ve ilgili standartlara göre harmoniklerin azaltılması ile TDDi'nin düşürülmesindeki etkinlikleri açısından değerlendirilmiştir.

Bu tezin geri kalan bölümleri aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2'de yapılan çalışmalar kapsamlı açıklamalarla tanımlanmaktadır. Bölüm 3'te bulgular ve tartışma kısmında gerçek ölçüm sonuçları ve analizleri sunulmaktadır. Bölüm 4'te sonuçlar ele alınmakta ve Bölüm 5'te gelecekteki potansiyel çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Ölçüm Sistemi

Bu çalışmada, Trabzon'da dört kişilik bir ailenin yaşadığı bir evde yaygın olarak kullanılan 26 farklı doğrusal ve doğrusal olmayan elektrikli cihazların elektriksel parametreleri ölçülmüştür. Bir saniyelik çözünürlükle yapılan bu ölçümler, cihazların güç tüketimi ve harmonik karakteristiklerini daha doğru bir şekilde ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu sayede, modelleme hatalarından kaçınılarak cihazların yük profillerinin ve harmonik etkilerinin daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Deneysel ölçümler, tipik bir Türk evinde yaygın olarak bulunan ve Tablo 4'te nominal güçleri belirtilen kapsamlı bir cihaz yelpazesini içermektedir. Test edilen konut Trabzon, Türkiye'de yer almakta olup, dört odadan (üç yatak odası ve bir oturma odası) oluşan 140 metrekarelik bir alanı kapsamaktadır.

Tablo 4. Evdeki elektrikli aletlerin nominal gücü

Cihaz	Nominal gücü(kW)	Cihaz	Nominal gücü(kW)
Airfryer	1,5	LED lamba (mutfak)	0,013
CFL lamba (banyo)	0,023	LED lamba (oturma odası)	0,035(5*7W)
CFL lamba (çocuk odası)	0,04(5x8W)	LED TV	0,11
CFL lamba (misafir odası)	0,023	Elektrikli çırpıcı	0,3
Masaüstü bilgisayar	0,31	Modem	0,018
Masaüstü monitör	0,019	Telefon şarj cihazı	0,01
Bulaşık makinesi	2,2	Buzdolabı	0,095
Yumurta pişirici	0,5	Çay makinesi	1,5
Elektrikli fırın	2,4	Termosifon	1,98
Saç düzleştirici	0,05	Tost Makinesi	2
Saç kurutma makinesi	1	Elektrikli süpürge	0,6
Ütü	2,4	Vantilatör	0,065
Dizüstü Bilgisayar	0,065	Çamaşır makinesi	2,3

Elektrikli cihazların güç kalitesi, Kyoritsu 6315 güç analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Her bir cihaz için ölçüm tertibatı, akım ve gerilim harmoniklerinin yanı sıra güç, enerji, güç faktörü, faz açısı ve frekansı ölçmek için kullanılmıştır. Güç tüketimleri ve harmonik bozulma sorunu, Kyoritsu 6315 cihazından bir bilgisayara veri aktarımı yapılarak incelenmiştir. Ölçümler, kullanılan güç analizörü cihazının yüksek çözünürlük kapasitesi sayesinde bir saniyelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

2.2. Optimizasyon Süreci

Elektrikli cihazların çizelgelenmesi için optimizasyon süreci uygulanmıştır. Bu amaçla, iki farklı optimizasyon yöntemi seçilmiş ve her iki yöntem için ortak bir amaç fonksiyonu tasarlanmıştır. Bu amaç fonksiyonu, piklerin ortalamaya oranını (PAR) azaltmayı ve kullanım zamanı (TOU) fiyat tarifesini kullanarak fatura maliyetini en aza indirmeyi hedeflemektedir. Sonuç olarak, 26 farklı elektrikli cihaz için optimum çizelgeleme elde edilmiştir. Yöntemler ve amaç fonksiyonları sonraki alt bölümlerde detaylandırılmaktadır.

2.2.1. Optimizasyon Algoritmaları

Ana amaç, kaydırılabilir yükleri kontrol ederek PAR ve fatura maliyetini en aza indirmektir. Bunu başarmak için bu çalışmada iki farklı sezgisel çözüm önerilmiştir. Elektrikli cihazlar sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılarak çizelgelenirken, kullanıcı konforunun olumsuz etkilenmemesine özen gösterilmektedir. Bu nedenle, cihazların çalışma aralıkları için müşteriler tarafından belirlenen kısıtlamalar uygulanmıştır. Cihazların çizelgelenmesi için seçilen iki sezgisel optimizasyon yöntemi: Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) yöntemleridir.

PSO yöntemi çok sayıda olası çizelgeleme kombinasyonunu hızlı bir şekilde keşfedebilir ve etkili çözümler bulabilir. Çeşitli çizelgeleme problemlerine uyarlanabilir ve özel ihtiyaçlara göre özelleştirilebilir. PSO'nun başarısı, problemin doğasına ve yapılandırmasına bağlıdır. PSO yönteminin önemli avantajı, optimizasyon problemlerinde hızlı ve verimli sonuçlar elde etme yeteneğidir.

TLBO yöntemi ise, bir öğrenme mekanizması içerir ve bireylerin birbirlerinden öğrenmelerine olanak tanır. Sonuç olarak, potansiyel çözümler öğrenme yoluyla geliştirilebilir. PSO'dan farklı olarak, TLBO'da en iyi bireyin diğerlerine öğretmesinin yanında, bireyler birbirlerinden de öğrenirler. Bu durum, hızlı bir şekilde gelişmeye ve daha iyi çizelgelerin üretilmesine olanak tanır. TLBO yöntemi de, PSO'ya benzer şekilde, farklı çizelgeleme problemlerine uyarlanabilir. Bu yöntemler, probleme uygun olarak ayrık formda uygulanmıştır.

2.2.2. PSO Algoritmaları

PSO yöntemi, kuş sürülerinin hareket modellerinden esinlenerek geliştirilen sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. PSO'nun çalışma prensibine göre, en iyi çözüme doğru bir yakınsama süreci vardır ve bu süreçte hız ve konum vektörleri kullanılır. Orijinal formunda tasarlanan PSO, sürekli problemler için uygundur. Ancak, bu çalışmada gerçek sayılar yerine tamsayı dizileri kullanıldığı için Ayırık PSO (D-PSO) yöntemi tercih edilmiştir. PSO'nun ayırık formdaki ilk uygulaması Gezgin Satıcı Problemi'ni (TSP) çözmek amacıyla gerçekleştirilmiştir (Wang, Huang, Zhou, & Pang, 2003).

Ayırık formda uygulanan D-PSO yönteminin farkı, hız ve konum vektörlerinin hesaplanmasında yatmaktadır. Bu çalışmada elektrikli cihazların çizelgelenmesi için en uygun çözümün bulunması hedeflenmiştir. D-PSO'nun probleme uygulanmasını göstermek için dört farklı cihaz seçilmiştir: Bu cihazlar; Airfryer, saç düzleştirici, yumurta pişirici ve tost makinesidir. Tablo 5'te kullanıcı konfor memnuniyetine göre belirlenen bu cihazlar için çizelgeleme aralıkları verilmektedir. Seçilen cihazların tümü sabah saatlerinde çalışmaktadır ve bu örnek için cihazların en sık kullanıldığı dönem tercih edilmiştir.

Tablo 5. Örnek elektrikli aletler ve programlama aralıkları

Cihaz	Çizelgeleme Aralığı
Airfryer	7.00-7.10
Saç düzleştirici	7.00-7.20
Yumurta pişirici	7.00-7.17
Tost makinesi	7.00-7.26

Başlangıç parçacıkları belirlenirken, her bir cihaz için ortalama uygun zaman aralıkları 1 dakikalık hassasiyetle belirlenmiştir. Bu yaklaşım, cihazların günlük yük çizelgeleme optimizasyonunda kullanılan zaman dilimlerini 1 dakikalık aralıklara böler, böylece bir gün için toplam 1440 zaman dilimi elde edilir. Örneğin, Tablo 5'te verilen örnek için, airfryer çalışma başlangıç saati 7:00 ile 7:10 arasında herhangi bir zaman diliminde olabilir, bu da 11 farklı alternatif sunar. Bu detaylı zaman aralıkları hesaplama sürecini artırsa da, 1 dakikalık aralıkların kullanımı hesaplama doğruluğunu artırır ve bu nedenle tercih edilmiştir. Her cihaz için belirlenen uygun zaman dilimleri esas alınarak, D-PSO algoritmasında her bir

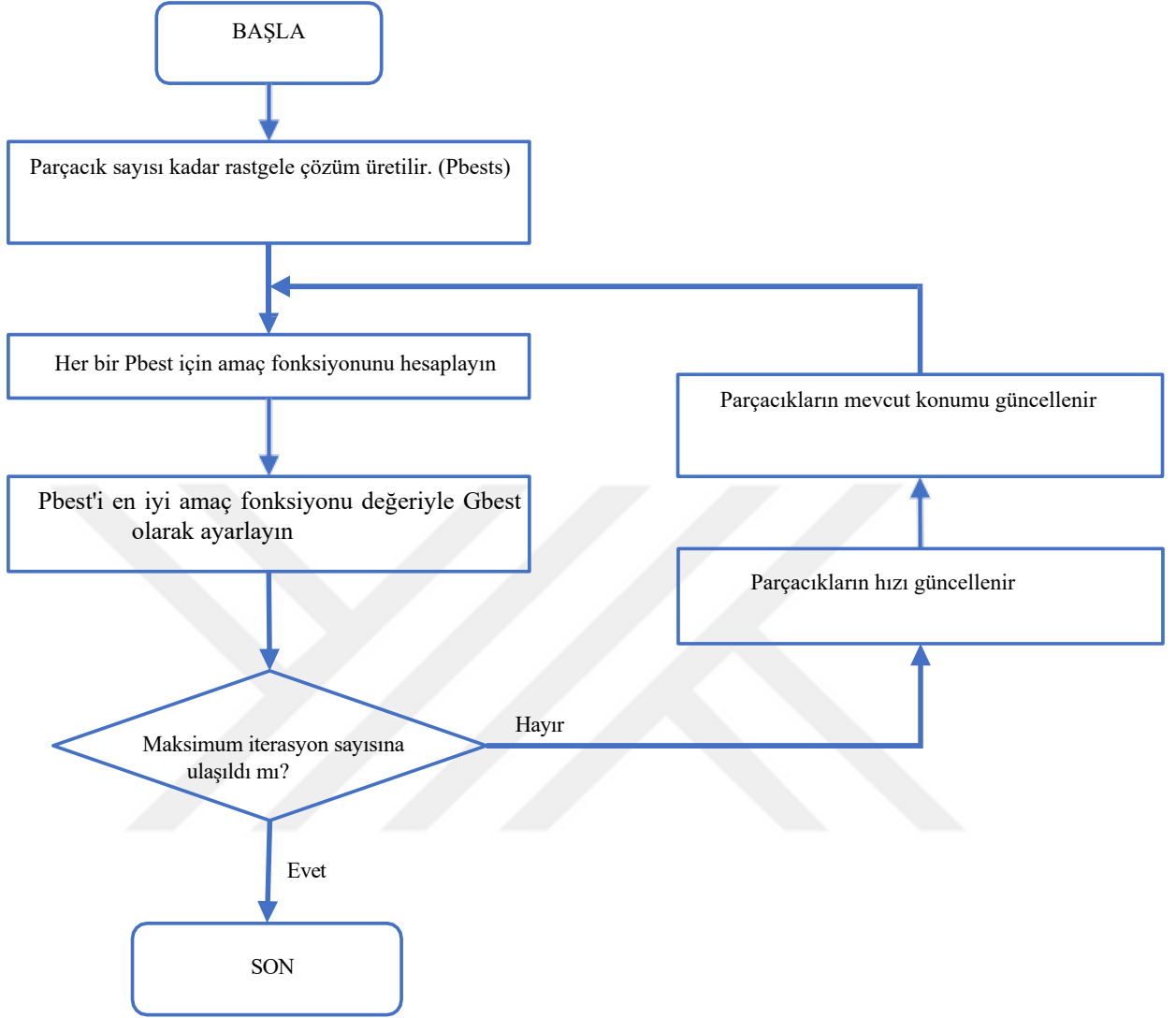
dizi bir parçacık olarak adlandırılmıştır. Örneğin, Tablo 5'e göre elde edilen örnek parçacıklar [7.02 7.18 7.17 7.05], [7.10 7.14 7.14 7.25] vb. şeklinde olduğunu varsayalım. Tüm olası parçacıkların tek tek incelenmesi yerine, hızlı bir şekilde yakınsama sağlayan D-PSO yöntemi en uygun çözümü aramak için tercih edilmiştir.

D-PSO algoritması, başlangıçta birkaç olası parçacıkla başlar ve bu parçacık sayısı genellikle problem karmaşıklığına ve hesaplama kaynaklarına bağlı olarak belirlenir. Parçacık sayısının artmasıyla birlikte, algoritmanın doğru çözüme yakınsama olasılığı artar, ancak hesaplama süresi ve yükü de artar. Bu nedenle, parçacık sayısının doğru bir şekilde belirlenmesi kritik önem taşır ve spesifik bir probleme göre optimize edilir. Örneğin, iki parçacıkla başladığımızı düşünelim. Başlangıçta, rastgele seçilen olası çözümler $Pbest_1 = [7.02 \ 7.18 \ 7.17 \ 7.05]$ ve $Pbest_2 = [7.10 \ 7.14 \ 7.14 \ 7.25]$ olarak belirlendiğini varsayalım. Her bir parçacık için amaç fonksiyonu değerlendirilir ve en uygun çözüm $Pbest$ parçacıkları arasından seçilerek küresel en iyi çözüm ($Gbest$) olarak belirlenir. Örneğin, $Pbest_2$ 'nin amaç fonksiyonu daha düşükse, $Gbest$ değeri [7.10 7.14 7.14 7.25] olarak belirlenir.

Önerilen algoritmada, $Pbest$ değerleri $Gbest$ değerine doğru yakınsar. Bu süreç, hız ve konum vektörlerinin güncellenmesiyle sağlanır. İlk olarak, hız vektörü $Gbest$ dizisinden rastgele seçilen iki cihaz değeri kullanılarak belirlenir. Örneğin, birinci ve ikinci cihazlar rastgele seçilir ve bu değerler hız vektörü olarak atanır. Sonrasında, her bir parçacığın konumu, belirlenen hız vektörü kullanılarak güncellenir. Bu güncelleme işlemi, hız vektöründe tanımlanan $Gbest$ parçacıklarının, $Pbest$ parçacıklarına atanmasıyla gerçekleştirilir. Örneğin, seçilen hız vektörüne bağlı olarak $Pbest_1$ 'in yeni konumu [7.10 7.14 7.17 7.05] olarak güncellenir, burada 1. ve 2. cihaz $Gbest$ değerine göre yeniden belirlenir.

Hız ve konum güncellemeleri her bir parçacık için ayrı ayrı gerçekleştirilir. Bu güncellemelerin ardından, güncellenen tüm $Pbest$ değerleri için amaç fonksiyonu yeniden hesaplanır ve en uygun parçacık belirlenir. Belirlenen parçacık, mevcut $Gbest$ parçacığı ile karşılaştırılarak amaca en uygun olanı yeni $Gbest$ değeri olarak atanır.

Optimal çözüm arayışı, belirli bir probleme göre tanımlanan önceden belirlenmiş sayıda iterasyon boyunca devam eder. İterasyon sayısı, problem karmaşıklığına ve istenen doğruluğa bağlı olarak belirlenir. Önerilen yaklaşımda, başlangıçta rastgele üretilen parçacık sayısı 50 olarak belirlenmiş ve durdurma kriteri olarak 10 iterasyon belirlenmiştir. Ayrık Parçacık Sürü Optimizasyonu (D-PSO) sürecini gösteren akış şeması Şekil 3'te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. D-PSO algoritmasının akış şeması

2.2.3. TLBO Algoritmaları

Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO), doğal öğrenme sürecini taklit eden bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem, öğretmen ve öğrenci arasındaki öğrenme sürecini modeller. Burada öğretmen en iyi çözümü temsil ederken, öğrenciler diğer potansiyel çözümleri simgeler ve öğretmenden öğrendikleriyle çözümlerini geliştirirler (Rao, Savsani, & Vakharia, 2011).

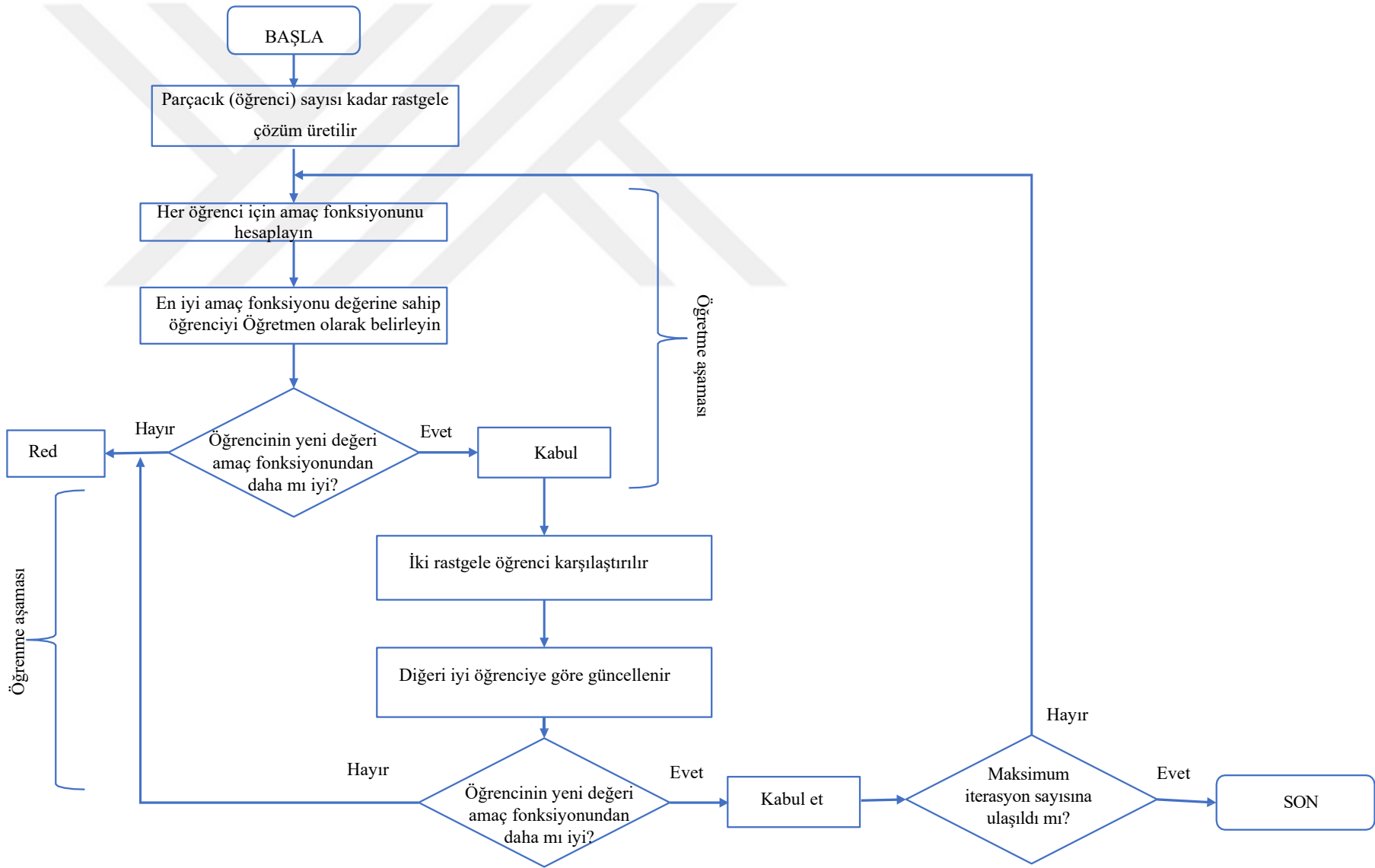
Ayrık formda uygulanan TLBO yönteminin probleme uygulanmasını açıklamak için Tablo 5'te verilen cihazlar ve bunların çizelgeleme aralıkları kullanılmaktadır.

Algoritmadaki ilk adım başlangıç parçacıklarının belirlenmesidir. Başlangıç parçacıklarının belirlenmesi, D-PSO yöntemindekine benzer şekilde gerçekleştirilir. TLBO yönteminde başlangıç parçacıkları belirlenirken cihazlar için anlamlı olan zaman aralıkları 1 dakikalık bir hassasiyetle temsil edilir ve bir gün 1440 dilime bölünür. Tablo 5’te dört farklı cihaz için çizelgeleme aralığı değerleri kullanılarak oluşturulan diziler gösterilmektedir. Parçacık olarak adlandırılan her bir dizi rastgele seçilmiştir. Rastgele seçilen bu çözümler, parçacıklar için en iyi yolları temsil eder ve Pbest olarak adlandırılır. Örneğin, başlangıçta rastgele seçilen başlangıç parçacıklarının $Pbest_1 = [7.00 \ 7.20 \ 7.11 \ 7.25]$ ve $Pbest_2 = [7.10 \ 7.15 \ 7.10 \ 7.11]$ olduğunu varsayalım. Bu rastgele parçacıklar oluşturulduktan sonra, öğretim ve öğrenme aşamaları başlar.

Öğretim Aşaması: Bu aşamada öğretmen, öğrencilere bilgi aktarır. Her bir parçacık için amaç fonksiyonu ayrı ayrı hesaplanır ve amaca en uygun olan parçacık, küresel en iyi parçacık (Gbest) olarak belirlenir. Örneğin, amaç fonksiyonunun $Pbest_1$ için daha düşük hesaplandığını varsayalım. Bu durumda, Gbest değeri $[7.00, 7.20, 7.11, 7.25]$ olacaktır. Bu aşamada algoritma, Pbest değerlerini Gbest değerine doğru yakınlılaştırarak günceller. Gbest'e göre güncellenen parçacıklar için amaç fonksiyonu yeniden hesaplanır. Güncellenen değerle mevcut değeri karşılaştırılır ve amaca en uygun olan değerle işlemlere devam edilir. Böylece, Pbest değeri, Gbest'e göre güncellenir veya zaten uygunsa mevcut haliyle kalır.

Öğrenme Aşaması: Bu aşamada öğrenciler, birbirlerinden öğrenir. Her parçacık, rastgele seçilen başka bir parçacıkla karşılaştırılır ve daha iyi olan parçacığa göre güncellenir. Tüm parçacık güncellemeleri tamamlandığında, en iyi parçacık yeniden belirlenir ve Öğretim Aşaması yeniden başlar. Optimal çözüm arayışı, iterasyon sayısına bağlı olan durdurma kriteri karşılanana kadar devam eder.

D-TLBO yönteminde kullanılan parametre değerleri, D-PSO yönteminde kullanılan parametre değerleriyle uyumlu olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımda, başlangıçta 50 rastgele parçacık oluşturulmuş ve durdurma kriteri 10 iterasyon olarak belirlenmiştir. Ayrık Öğretim-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (D-TLBO) sürecini gösteren akış şeması Şekil 4’te gösterilmektedir.



Şekil 4. D-TLBO algoritmasının akış şeması

2.2.4. Optimizasyon Problemi için Amaç Fonksiyonu

Her iki optimizasyon tekniğinde de amaç fonksiyonunun belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu problem için özel olarak tasarlanan amaç fonksiyonu, Pik-Ortalama Oranı (PAR) değeri ile fatura maliyetini önceliklendirir. Hedef, her iki değeri de minimize ederek optimum çözüme ulaşmaktır. Önerilen yöntem, kullanım süresi (TOU) fiyatlandırmasını kullanarak fatura maliyetini azaltmayı ve yük eğrisini düzleştirerek PAR değerini en aza indirmeyi amaçlar.

Kullanım zamanı fiyatlandırması, elektrik veya enerji tüketiminin kullanım zamanına bağlı olarak değişen oranlarda faturalandırılması uygulamasını ifade eder. Bu tarifeler, tüketicilerin enerji kullanımlarını daha verimli yönetmelerine olanak tanır. Fiyatlar genellikle tüketimin en yoğun olduğu dönemlerde daha yüksek, talebin azaldığı dönemlerde ise daha düşüktür. Sonuç olarak, kullanıcılar enerji tüketimlerini daha ucuz olduğu zamanlarda gerçekleştirmeye teşvik edilir. Bu yaklaşım için kullanılan TOU tarife modeli, bir günü üç farklı döneme ayırır ve her dönem boyunca tüketilen enerji kWh cinsinden ölçülerek fiyatlandırılır. Bu modelin ayrıntıları Tablo 6'da açıklanmıştır.

Tablo 6. Kullanım süresi fiyat tarifeleri

Zaman	06:00-17:00	17:00-22:00	22:00-06:00
kr/kWh	201.6583	294.2528	127.6108

Amaç fonksiyonunun tasarımında Pik-Ortalama Oranı (PAR) bir metrik olarak kullanılır. PAR, tepe sinyal değerinin ortalama değerine oranını ifade eder. Düşük bir PAR değeri daha düzgün bir sinyal anlamına gelirken, yüksek PAR değeri daha fazla dalgalanmaya işaret eder. Bu bağlamda, amaç fonksiyonu PAR değerini en aza indirmeyi hedefler. Denklem (14) hanede tüketilen ortalama gücü hesaplar. Denklem (15) ise herhangi bir zaman aralığında cihazlar tarafından tüketilen güç (P_t^{kul}) ile tüm aralıklardaki ortalama güç (P_{ort}) arasındaki farkların karelerinin toplamını hesaplar. Denklem (15)'ten elde edilen değerin düşürülmesi, yük eğrisinin düzleştirildiğini gösterir ve bu da daha düşük bir PAR değerine karşılık gelir.

$$P_{ort} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_t^{kul} \cdot \Delta t) \quad (14)$$

$$\text{Min } f = \sum_{t=1}^T [P_t^{kul} - P_{ort}]^2 \quad (15)$$

Hem TOU hem de PAR değerlerini içeren amaç fonksiyonu Denklem (16)'da gösterilmektedir.

$$\text{Amaç fonksiyonu} = 0.5 * \frac{tou_i}{ortalama(tou)} + 0.5 * \frac{PAR_i}{ortalama(PAR)} \quad (16)$$

Bu problemde iki metriğin eşit derecede öncelikli olduğu göz önünde bulundurularak, denklemde her bir metriğe atanan ağırlıklar 0,5 olarak belirlenmiştir. Metriklerin farklı değer aralıklarına sahip olması nedeniyle, sonuçları birbirine yaklaştırmak için normalizasyon uygulanmıştır.

Minimum TOU ve PAR değerlerine ulaşılması, enerji dağıtımının en verimli şekilde yapıldığını gösterir. Bu nedenle, PSO ve TLBO yöntemleri kullanılarak amaç fonksiyonu hesaplanırken minimum değer hedeflenmesi daha uygundur. Amaç fonksiyonunun hesaplanmasında minimum değerlerin kullanılması, optimal çözüme ulaşılmasını sağlar.

2.2.5. Optimizasyon Problemi için Kısıtlar

Optimizasyon yöntemlerini seçerken, hızlı yakınsama sağlamak amacıyla bilinen sezgisel yöntemler tercih edilmiştir. Kullanıcı memnuniyetini ve cihaz çizelgelemesini öncelikli hedef olarak belirleyen mantık, bu yöntemlerin cihaz çizelgelemesine uygulanmasında temel bir kısıtlama oluşturmuştur. Sonuç olarak, her cihaz için uygun çizelgeleme aralıkları belirlenmiştir. Örneğin, akıllı olmayan veya programlı çalışma özelliği bulunmayan bir cihazın uyku saatlerinde çalışması uygun değildir. Benzer şekilde, sabah erken saatlerde kahvaltı için çalışması planlanan cihazların gün ortasında veya gece geç saatlerde çalışması uygun değildir. Bu yönergeler doğrultusunda, tüm cihazlar için çizelgeleme aralıkları belirlenmiştir. Yük çizelgeleme optimizasyon sürecinde kullanıcı, kaydırılacak yükler için Tablo 7'de olduğu gibi çalışma aralıklarını belirler ve bu

kısıtlamalara bağlı kalınarak yük kaydırma işlemi gerçekleştirilir. Yük çizelgeleme tasarımı, kullanıcı rahatsızlığını en aza indirecek şekilde planlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemleri, kullanılan cihaz sayısından bağımsız olarak çözümler üretmektedir. Dolayısıyla, önerilen modelin genel kısıtları optimizasyon yöntemlerinin genel kısıtlarıyla benzerdir. Optimizasyon yöntemlerinin başlıca sınırlaması, yerel minimum veya maksimumlarda takılıp kalma eğilimidir. D-PSO ve D-TLBO yöntemlerinde bu sınırlamayı hafifletmek için daha fazla sayıda başlangıç parçacığı seçilir ve sonuç, çok sayıda iterasyon boyunca elde edilen ortalama değeri yansıtır.

Tablo 7. Kaydırılabilir cihazların başlangıç zamanı ve çalışma süreleri

Cihaz	Başlangıç zamanı	Çalışma Süresi (Dakika)
Termosifon	07:00-07:44 & 21:10-22:14	10
<u>Saç kurutma makinesi*</u>	Termosifon + 11 dakika	5
Air fryer	07:00-07:10 & 19:15-20:15	20 & 30
Çay makinesi	07:00-07:21 & 20:25-20:36	9 & 9
Yumurta Pişirici	07:00-07:17	13
Tost makinesi	07:00-07:26	4
Saç düzleştirici	07:00-07:20	10
Elektrikli süpürge	10:00-17:00	47
Ütü	10:00-17:00	62
<u>Elektrikli çırpıcı*</u>	Air fryer-10 dakika	5
Çamaşır makinesi	00:00-21:13	167
Bulaşık makinesi	00:00-22:37	83
Elektrikli fırın	17:00-18:05	40
<u>CFL Lamba (Banyo)*</u>	Termosifon – 5 dakika	25

*Başlangıç zamanı başka bir cihaza bağlıdır

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Cihazların Yük Profilleri, Enerji Tüketimleri ve Harmonik Bozulmaları

Yük profillerinin analizi, enerji tüketimini ve verimliliğini optimize etmeyi amaçlayan talep tarafı yönetimi (DSM) stratejilerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak cihaz düzeyinde güç tüketim profillerine ilişkin yüksek çözünürlüklü verilerin eksikliği, enerji verimliliği ve talep yönetimi stratejilerinin tam potansiyeline ulaşmasını engellemektedir. Literatürdeki sınırlı sayıdaki yük profili çalışmaları az sayıda cihazla gerçekleştirilmiş olup, elektrikli cihazların harmonik özelliklerini analiz etmemektedir. Bu tez çalışmasında, gerçek zamanlı ölçümlerle çok sayıda cihazın yük profilleri ve harmonik analizleri birlikte ele alınmaktadır. Günümüzde elektrikli cihazların çoğu doğrusal olmayan özelliklere sahip olduğundan, harmonik bozulma endekslerinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, harmonik bozulma endekslerinin yük profili çalışmalarıyla birlikte analiz edilmesi, elektrikli cihazların gerçek dünya koşullarındaki etkisinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

Bu bölümde, elektrikli ev aletlerinin yük profilleri, enerji tüketimleri ve toplam harmonik bozulma (THDi) eğrileri 1 saniye çözünürlükle sunulmakta ve kapsamlı analizlere yer verilmektedir.

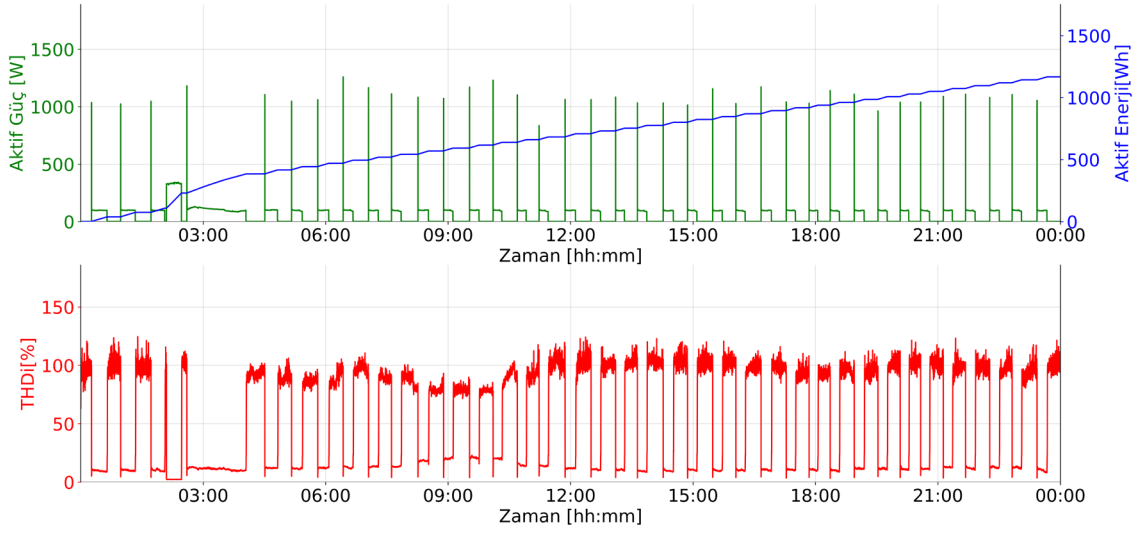
3.1.1. Buzdolabı

Nominal gücü 95 W olan buzdolabı, Eco Holiday modunda 6°C ve -16°C sıcaklıklarda çalışmaktadır. Ölçüm süresi 24 saat olarak belirlenmiştir.

Şekil 5, cihazın çalışması sırasında edinilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 48,6576 W olarak gerçekleşmiştir. En yüksek güç tüketimi no frost fonksiyonu nedeniyle buz çözme sırasında olup, değeri 342,500 W olmuştur. PAR değeri 7,0390 olarak hesaplanmıştır. 24 saatlik zaman diliminde tüketilen toplam enerji 1167,5375 Wh olmuştur. Buzdolabı ON-OFF modunda çalışan bir cihazdır. 24 saat içinde, ON modda geçen süre 39425 saniye olup, bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 105,1469 W olmuştur. OFF modda geçen süre 46975 saniye olup, ortalama güç tüketimi 1,2474 W olarak kaydedilmiştir. Buzdolabının OFF modda tükettiği az miktarda güç, cihazın elektronik ekranını çalıştırmak, sıcaklık sensörlerini, kontrol kartını ve diğer

elektronik bileşenleri aktif tutmak için gereklidir. Veriler 1 saniye çözünürlükle kaydedildiği için buzdolabı motoru çalışmaya başladığında demeraj akımının ölçülmesi mümkün olmuştur. Demeraj akımı bazen ON moddaki akım değerinin 10 katından fazla olabilmektedir. Ölçülen maksimum demeraj akımı 5,8640 A olarak kaydedilmiştir.

Buzdolabının çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, buzdolabı OFF modundayken ortalama THDi değerinin %90'ı aştığı ve zaman zaman %100'ü geçtiği tespit edilmiştir. Buna karşın, buzdolabı ON modundayken ortalama THDi değeri yaklaşık %12, yüksek akım tüketimi olan buz çözme aşamasında ise yaklaşık %2 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. Buzdolabının P, E ve THDi eğrileri

Buzdolabının çalışması sırasında; 6194. saniyeden 14593. saniyeye kadar (toplam 8400 saniye), buzdolabı no-frost fonksiyonu nedeniyle ON-OFF güç eğrisinden farklı bir karakteristiğe sahip olmuştur. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 132,6978 W olarak gerçekleşmiştir.

Buzdolabının no-frost fonksiyonunun olması nedeniyle farklı bir karakteristik gösterdiği zaman diliminin ayrıntılı bir açıklaması aşağıda sunulmuştur:

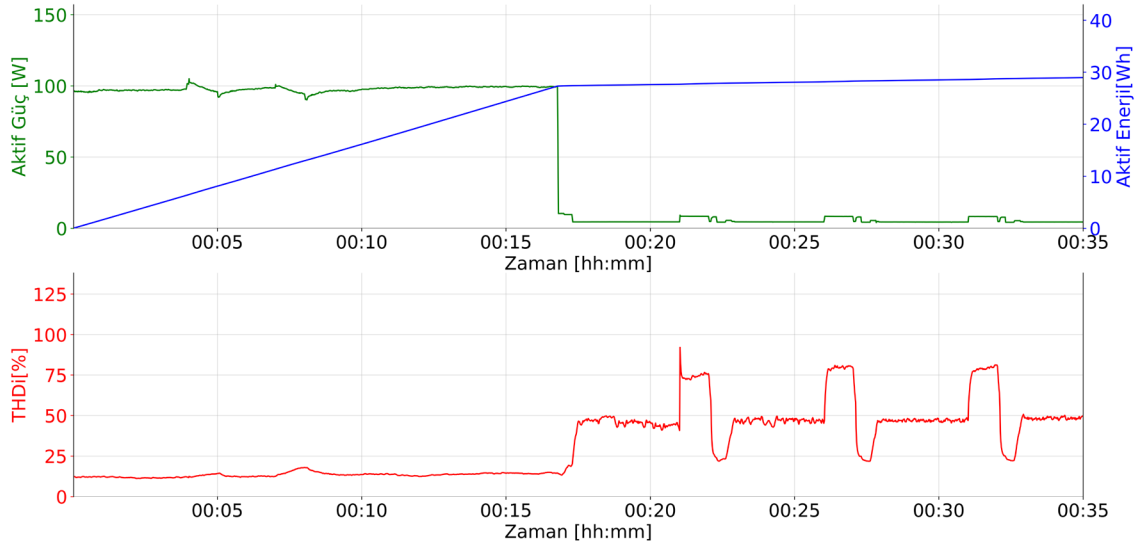
7558 saniye ile 8876 saniye arasında (toplam süre 1319 saniye), buzdolabı uzun bir süre boyunca en yüksek güç tüketimini gerçekleştirmiştir. Bu zaman diliminde ortalama güç tüketimi 332,7493 W olarak gerçekleşmiştir.

Buzdolabı, 9356. saniyeden 14563. saniyeye kadar (toplam 5208 saniye), 24 saatlik periyodun en uzun süresi boyunca ON modda kalmıştır. Daha uzun bir süre boyunca yapılan

çeşitli ölçümlerden anlaşılabacağı üzere, buzdolabı no-frost fonksiyonu nedeniyle 24 saatlik bir süre içinde en az bir kez bu güç tüketimi davranışını sergilemiştir.

Bu olağandışı davranışın sebebi, buzdolabının karı eritmek için ısıtıcı kullanmasıdır. Isıtıcı belirli bir süre çalışır, ardından bir süre durur ve sonra tekrar çalışmaya başlar. Kar eritme modunu kompresörün çalışması izler. Kar eritme modunda kompresör, normal çalışma süresine göre daha uzun süre devrede kalır.

Şekil 6, buzdolabı kapısı açıldığında elektrik parametrelerdeki değişiklikleri göstermektedir. 35 dakikalık kayıt süresi boyunca, buzdolabı ON modundayken, buzdolabı kapısı kayıt süresinin 4 ila 5. dakikaları ve 7 ila 8. dakikaları arasında birer dakika açık kalmıştır. Buzdolabı OFF modundayken ise, buzdolabı kapısı kayıt süresinin 21-22, 26-27 ve 31-32. dakikalarında birer dakika açık kalmıştır. Şekil 6'da görüldüğü üzere, buzdolabı kapısının ON modundayken açılması güç ve harmonik değerlerinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Öte yandan, buzdolabı kapısının OFF modda açılması, güç ve harmonik değerlerinde nispeten daha fazla değişikliğe yol açmıştır.



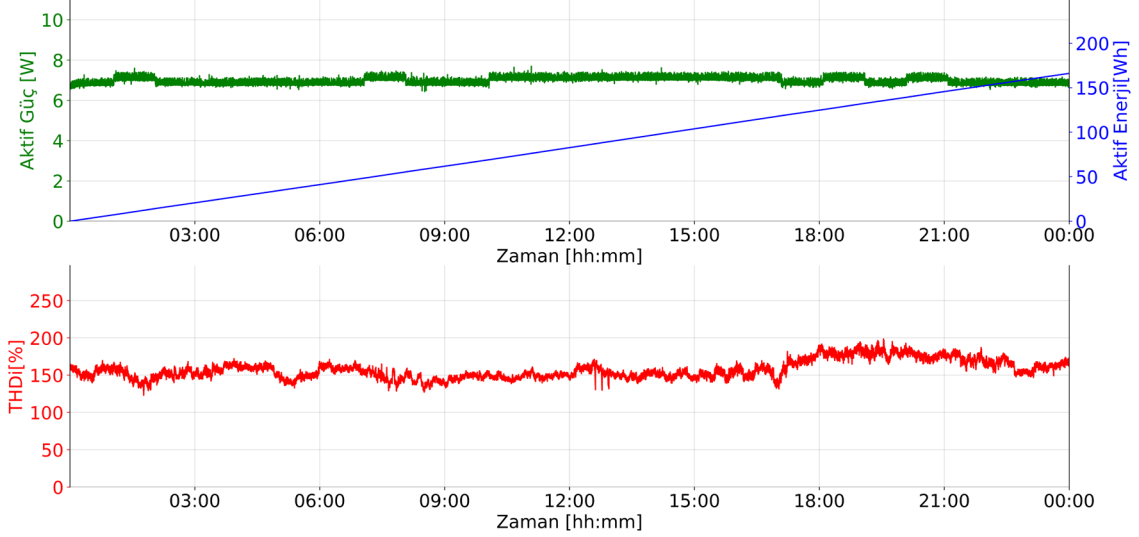
Şekil 6. Buzdolabı kapısı açıkken P, E ve THDi eğrileri

3.1.2. Modem

Nominal gücü 18 W olan bir modem, 24 saat boyunca çalıştırılmıştır. Şekil 7, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 6,9204 W, maksimum güç ise 7,6930 W olarak

ölçülmüştür. PAR değeri 1,1116 olarak hesaplanmıştır. 24 saatlik süre boyunca tüketilen toplam enerji 166,0930 Wh olmuştur.

Modemin çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değerinin %150'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

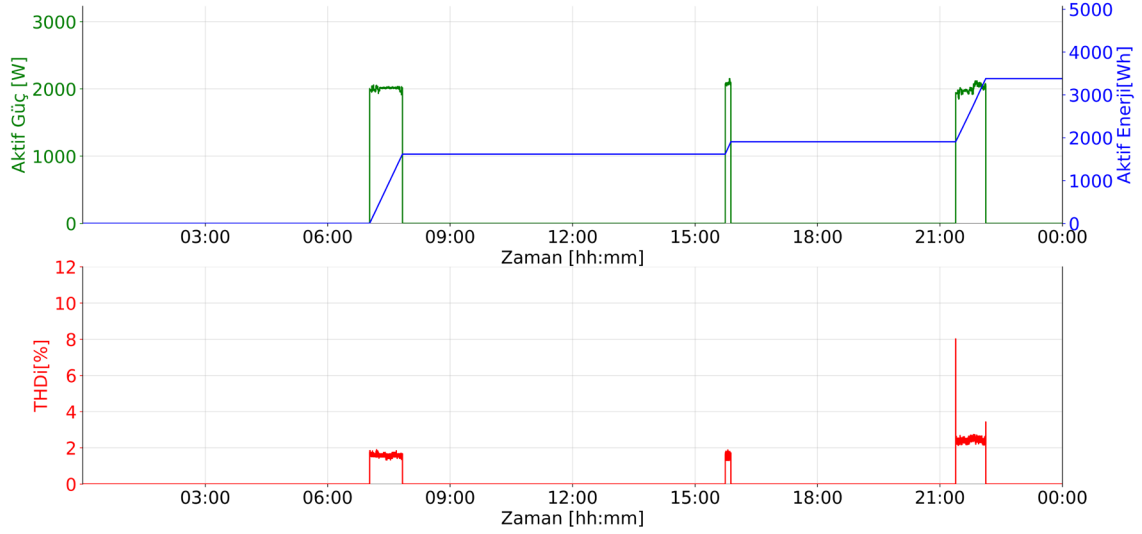


Şekil 7. Modemin P, E ve THDi eğrileri

3.1.3. Termosifon

Nominal gücü 1980 W olan termosifon ekonomi modunda çalıştırılmıştır. Termosifonun 24 saatlik çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrileri Şekil 8'de gösterilmiştir.

Tanktan sıcak su akışı 24 saat boyunca, 07:00-07:10 ve 21:20-21:30 periyotlarında sağlanmıştır. Her iki zaman diliminde de sıcak su musluğu aynı şartlar altında (78°'lik bir açıyla ve aynı su akış hızında) açılmıştır. Depoya giren soğuk su, ısıtıcı elemanlar tarafından ısıtılmıştır. Tüketilen güç değeri, soğuk suyu ısıtmak için gereken güçtür. Şebekeden kazana giren soğuk suyun sıcaklık değeri aynı günün farklı zaman dilimlerinde değişiklik gösterdiğinden, termosifon iki farklı periyotta aynı şartlarda çalıştırılrsa dahi suyu ısıtma süresi, güç ve tüketilen enerji farklı olmaktadır.



Şekil 8. Termosifonun P,E ve THDi eğrileri

Termosifonun 24 saatlik çalışma süresi boyunca gerçekleşen durumların açıklaması şu şekildedir;

07:00-07:10 saatleri arasında gerçekleşen 10 dakikalık sıcak su akışı nedeniyle kazandaki güç tüketimi 07:01:40'ta başlamış ve 07:49:57'de sona ermiştir. Bu süre boyunca ortalama güç tüketimi 2007,9196 W, maksimum güç tüketimi ise 2058 W olarak gerçekleşmiştir. Bu dönem için PAR değeri 1.0249 olarak hesaplanmıştır. Bu süre boyunca tüketilen toplam enerji 1616,6822 Wh olmuştur.

21:20-21:30 arasında gerçekleşen 10 dakikalık sıcak su akışı nedeniyle, termosifonun güç tüketimi 21:23:05'te başlamış ve 22:07:18'de sona ermiştir. Bu süre zarfında tüketilen ortalama güç 2000,4077 W, maksimum güç tüketimi ise 2119 W olmuştur. PAR değeri 1,0593 olarak hesaplanmıştır. Bu süre boyunca tüketilen toplam enerji 1474,3680 Wh kaydedilmiştir.

Termosifon, 15:44:20 ile 15:52:38 saatleri arasında musluktan sıcak su akışı olmamasına rağmen enerji tüketmeye devam etmiştir. Benzer bir durum 24 saat süresince, termosifondan alınan farklı ölçümlerde de gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi, termosifon kazanındaki bekleyen sıcak suyun zamanla soğumasından kaynaklanmaktadır. Termostat kontrolü, sıcak su kullanılsa bile kazandaki su sıcaklığını belirlenen seviyede tutmak için devreye girer. Bu çalışmada, kazandaki su sıcaklığını korumak için yaklaşık sekiz dakika boyunca güç tüketimi gerçekleşmiştir. Bu süre boyunca ortalama güç tüketimi 2084,7355 W olarak ölçülmüştür.

Termosifon tarafından 24 saat boyunca tüketilen toplam enerji 3381,3130 Wh olmuştur. Termosifonun 24 saatlik süredeki toplam güç tüketimi incelendiğinde, ortalama güç tüketimi 2010,9595 W, maksimum güç tüketimi ise 2154 W olarak ölçülmüştür. Bu dönem için PAR değeri 1,0711 olarak hesaplanmıştır.

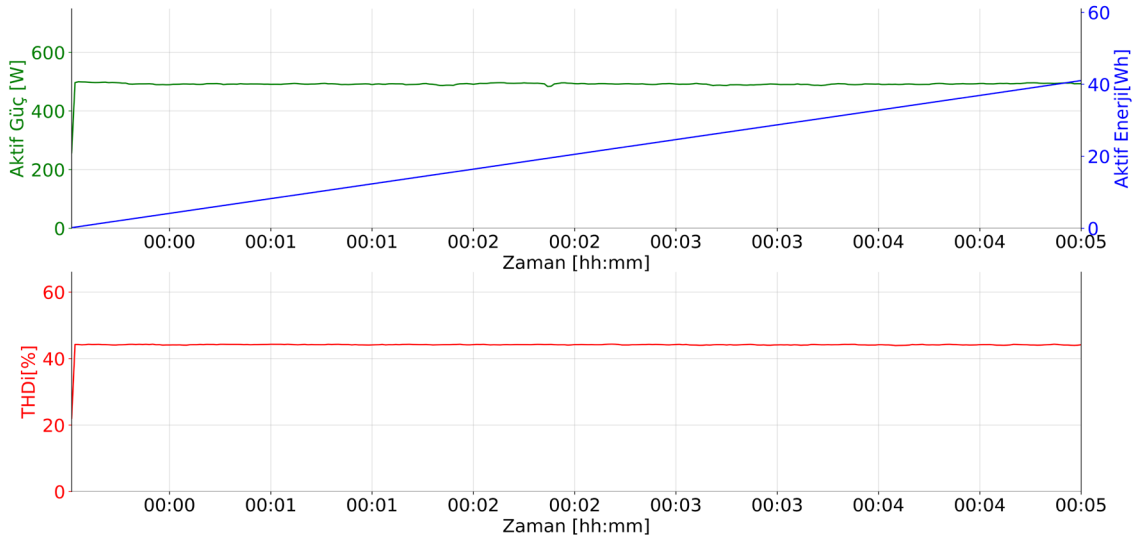
Termosifonun çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, termosifonun güç tükettiği zaman dilimlerinde ortalama THDi değeri yaklaşık %2 olduğu belirlenmiştir. Termosifon omik yük karakteristiğinde olması nedeniyle harmonik bozulma endeksi düşük çıkmıştır.

3.1.4. Saç Kurutma Makinesi

Nominal gücü 1000 W olan saç kurutma makinesi Seviye I'de çalıştırılmaktadır. Çalışma süresi 5 dakika olarak belirlenmiştir.

Şekil 9, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 491,5827 W, maksimum güç tüketimi ise 499,9000 W olarak ölçülmüştür. PAR değeri 1,0169 olarak hesaplanmıştır. 5 dakika süresince tüketilen toplam enerji 41,0344 Wh olmuştur.

Saç kurutma makinesinin çalışması sırasında akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %44 olarak tespit edilmiştir.



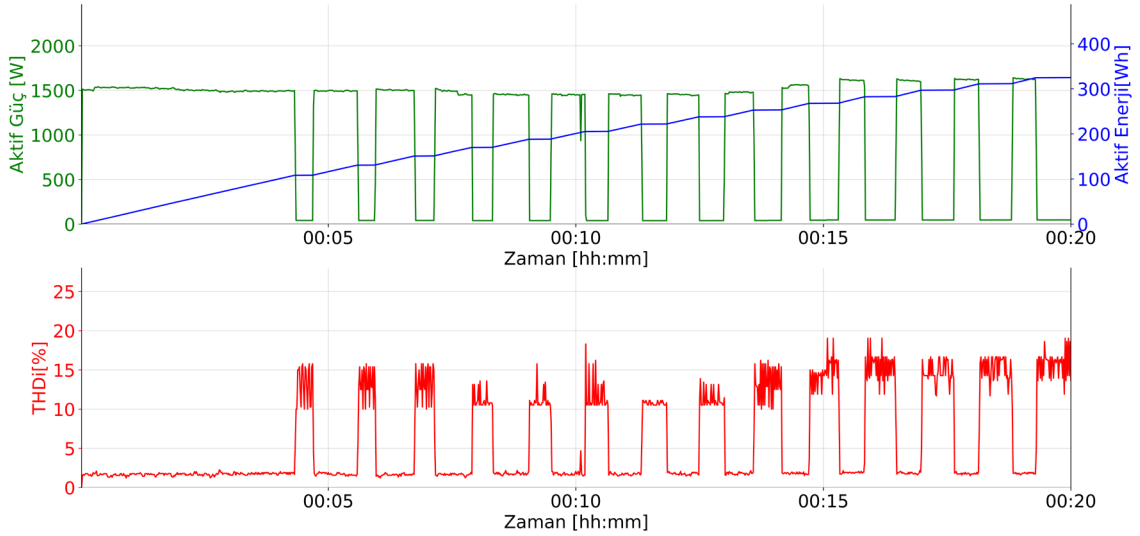
Şekil 9. Saç kurutma makinesinin P, E ve THDi eğrileri

3.1.5. Airfryer (20 dakika 200°C)

Airfryer, 6 litrelik bir kapasiteye ve 1500 W nominal güce sahiptir. Cihaz, patates kızartma programında çalıştırılmıştır. Pişirme süresi 20 dakika ve sıcaklık 200°C olarak ayarlanmıştır.

Şekil 10, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 976,1082 W, maksimum güç tüketimi ise 1642 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,6822 olarak hesaplanmıştır. 20 dakikada tüketilen toplam enerji 325,1594 Wh olmuştur. Airfryer ON-OFF modunda çalışmaktadır. ON modda geçen süre 772 saniye ve bu moddaki ortalama güç tüketimi 1493,9379 W'tır. OFF modda geçen süre 428 saniye olup, bu süredeki ortalama güç tüketimi ise 42,0789 W olmuştur.

Airfryer 200°C'de 20 dakika boyunca çalıştırıldığında akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ON moddaki ortalama THDi değeri yaklaşık %2 civarındayken, OFF moddaki THDi değeri zaman zaman %10'u aşmıştır.



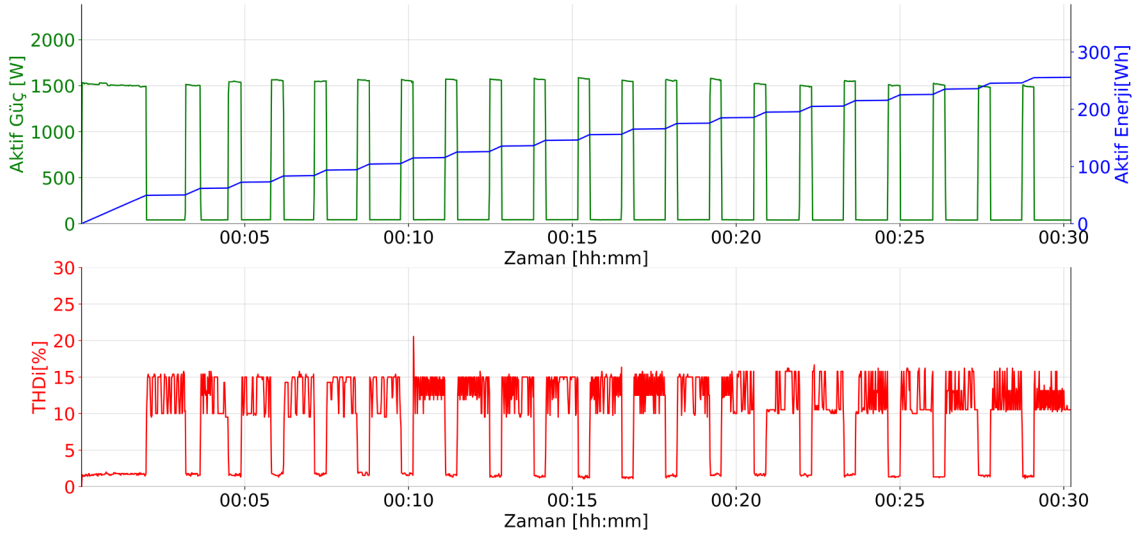
Şekil 10. Air fryer'ın P, E ve THDi eğrileri (200°C)

3.1.6. Airfryer (30 dakika 160°C)

Airfryer, 6 litrelik bir kapasiteye ve 1500 W nominal güce sahiptir ve kek programında çalıştırılmaktadır. Program süresi 30 dakika 13 saniye olup sıcaklık 160°C'ye ayarlanmıştır.

Şekil 11, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 508,1553 W, maksimum güç tüketimi ise 1588 W olmuştur. PAR değeri 3,1250 olarak hesaplanmıştır. 30 dakika 13 saniyede tüketilen toplam enerji 255,8915 Wh'dir. ON modda geçirilen süre 582 saniye olup bu moddaki ortalama güç tüketimi 1495,5148 W olmuştur. OFF modda geçirilen süre 1231 saniye olup bu esnadaki ortalama güç tüketimi 41,3452 W'tır.

Airfryer, 160°C'de 30 dakika süresince çalıştırıldığında akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ON moddaki ortalama THDi değeri yaklaşık %2 civarındayken, OFF moddaki THDi değeri zaman zaman %10'u aşmıştır.



Şekil 11. Air fryer'ın P, E ve THDi eğrileri (160°C)

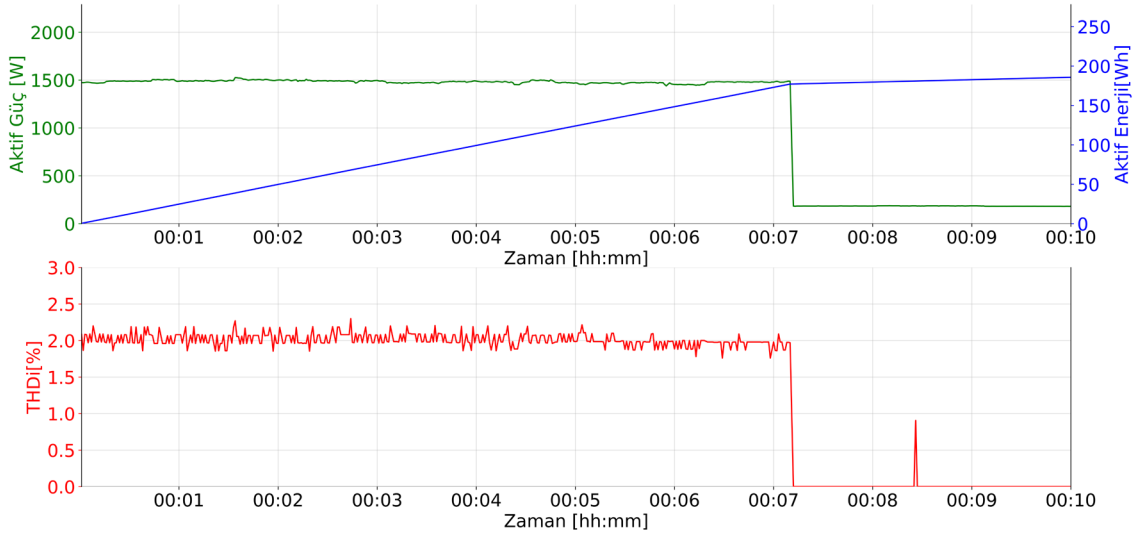
3.1.7. Çay Makinesi

Nominal gücü 1500 W olan çay makinesi 10 dakika boyunca çalışmıştır. Çay makinesi 1,7 litre su ile doldurulmuştur. Suyun kaynaması 7 dakika 11 saniye sürmüş, kalan 2 dakika 49 saniye ise çayın demlenmesi sürecidir.

Şekil 12, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 1115,6440 W, maksimum güç tüketimi ise 1526 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,3678 olarak hesaplanmıştır. 10 dakika boyunca tüketilen toplam enerji 185,7577 Wh olmuştur. 10 dakikalık süre boyunca suyun kaynama aşamasında geçirdiği süre 431 saniye olmuştur. Su kaynayan

kadar geçen sürede ortalama güç tüketimi 1481,0104 W olarak ölçülmüştür. Çay demleme süresi ise 169 saniye sürmüştür. Demleme aşamasında ortalama güç tüketimi 183,8515 W olarak ölçülmüştür.

Çay makinesinin çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, suyun kaynama aşamasındaki ortalama THDi değeri yaklaşık %2 civarındadır. Çay demleme aşamasındaki THDi değeri ise yaklaşık %0,01 olarak gerçekleşmiştir.



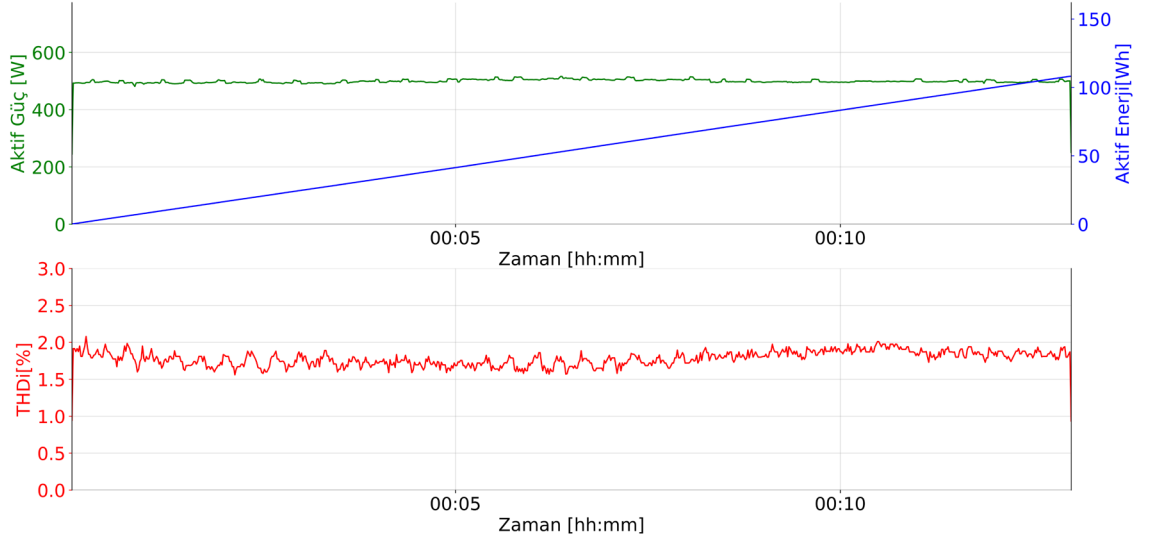
Şekil 12. Çay makinesinin P, E ve THDi eğrileri

3.1.8. Yumurta Pişirici

Nominal gücü 500 W olan bir yumurta pişirici, tam pişirme programına ayarlandığında yumurtaların pişirilme süresi 13 dakika sürmüştür.

Şekil 13, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrileri gösterilmektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 499,0581 W, maksimum güç tüketimi ise 516,100 W olmuştur. PAR değeri 1,0341 olarak hesaplanmıştır. 13 dakika boyunca tüketilen toplam enerji 108,1349 Wh olmuştur.

Yumurta pişiricinin çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %2 olarak tespit edilmiştir.

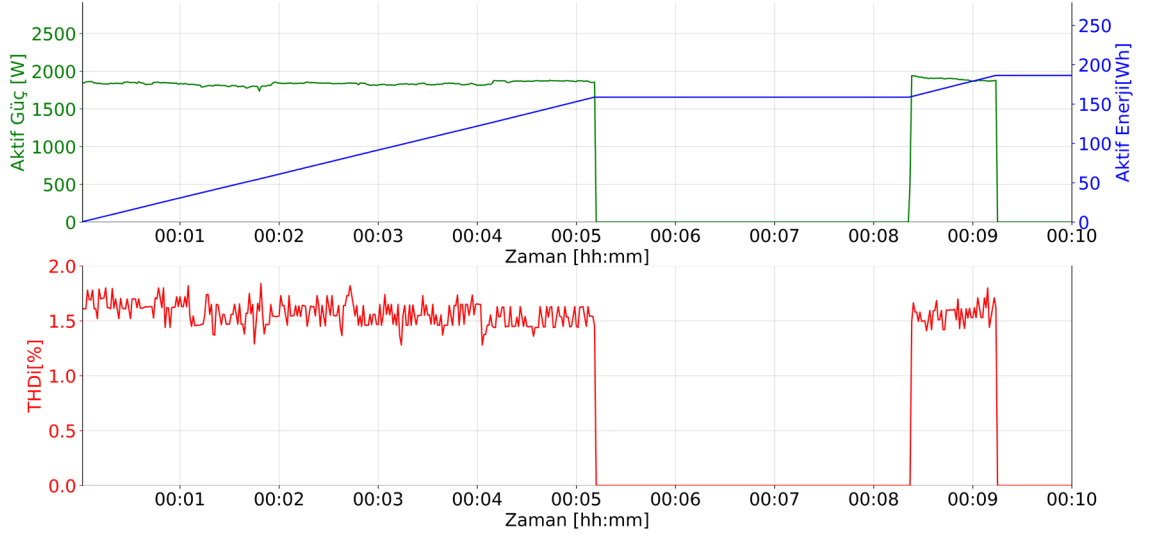


Şekil 13. Yumurta pişiricinin P, E ve THDi eğrileri

3.1.9. Tost Makinesi

Nominal gücü 2000 W olan bir tost makinesi, 10 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Şekil 14, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 1117,7943 W, maksimum güç tüketimi ise 1941 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,7365 olarak hesaplanmıştır. 10 dakika boyunca tüketilen toplam enerji 186,4565 Wh olmuştur. Tost makinesi ON-OFF modunda çalışan bir cihazdır. ON modunda geçen süre 364 saniyedir ve bu süreçte ortalama güç tüketimi 1842,5181 W'tır. OFF modda geçen süre 236 saniyedir ve bu süreçteki ortalama güç tüketimi 0 W'tır.

Tost makinesinin çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ON moddaki ortalama THDi değeri yaklaşık %2 olarak tespit edilmiştir.



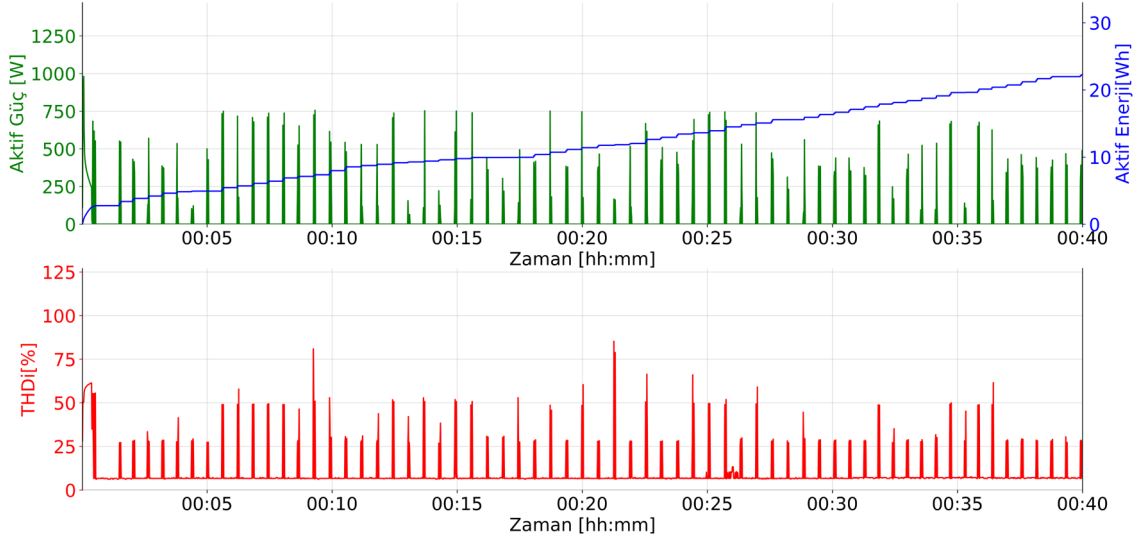
Şekil 14. Tost makinesinin P, E ve THDi eğrileri

3.1.10. Saç Düzleştirici

Nominal gücü 50 W olan bir saç düzleştirici 30 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 15, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 34,1167 W, maksimum güç tüketimi ise 981,100 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 28,7623 olarak hesaplanmıştır. Saç düzleştirici, tüm cihazlar arasında en yüksek PAR değerine sahip olduğu belirlenmiştir. 40 dakika boyunca tüketilen toplam enerji 22,2629 Wh olmuştur.

Saç düzleştiricinin çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, yüksek güç tüketimi dönemlerinde THDi değerlerinin bazen %50'nin üzerine çıktığı tespit edilmiştir.



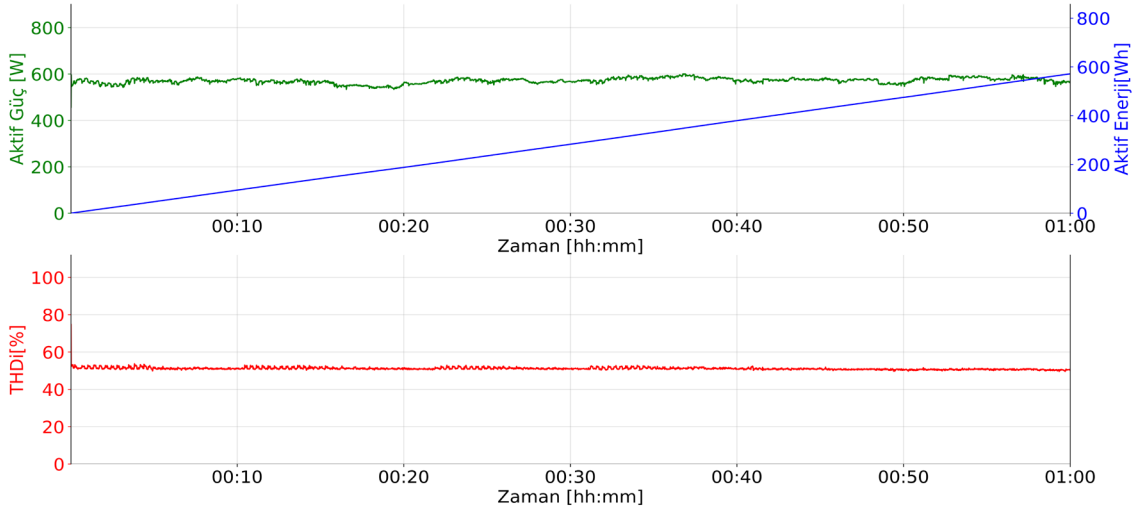
Şekil 15. Saç düzleştiricinin P, E ve THDi eğrileri

3.1.11. Elektrikli Süpürge

Nominal gücü 600 W olan bir elektrikli süpürge 60 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 16, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 571,6011 W, maksimum güç tüketimi ise 600,9000 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,0513 olarak hesaplanmıştır. 60 dakikada boyunca tüketilen toplam enerji 571,6064 Wh'dir.

Elektrikli süpürge çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %51 olarak tespit edilmiştir.



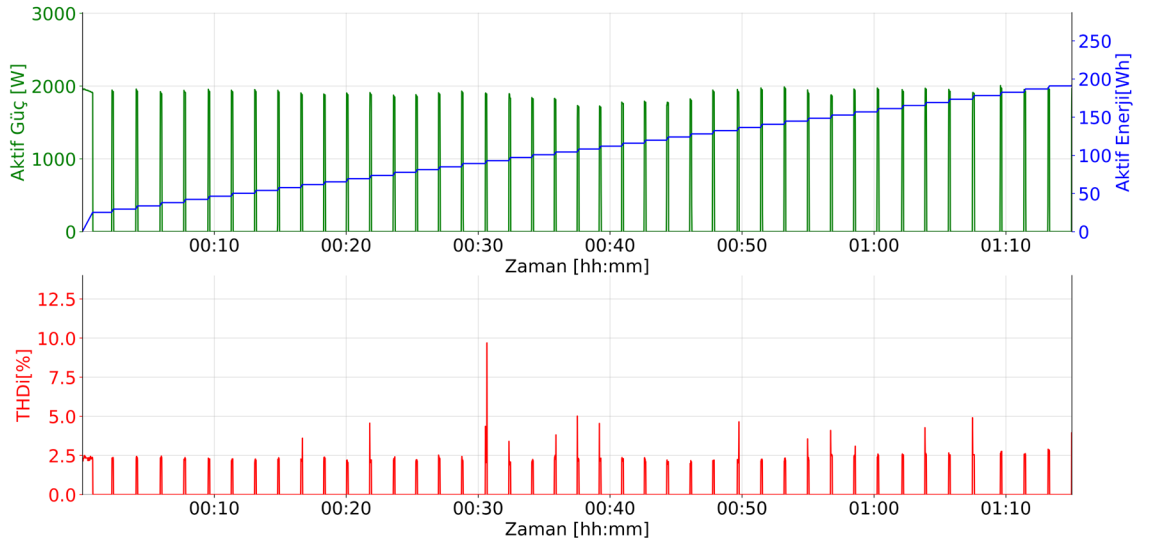
Şekil 16. Elektrikli süpürge çalışması sırasında P, E ve THDi eğrileri

3.1.12. Ütü

Nominal gücü 2400 W olan bir ütü 75 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Su haznesi tamamen doldurulmuştur. Pamuklu kumaş ve buhar programlarında çalıştırılmıştır.

Şekil 17, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 153,9189 W, maksimum güç tüketimi ise 2007 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 13,0393 olarak hesaplanmıştır. 75 dakika boyunca tüketilen toplam enerji 191,9911 Wh'dir. Ütü ON-OFF modunda çalışmaktadır. Toplam çalışma süresinde ON modunda geçirilen süre 396 saniyedir ve bu süre boyunca ortalama güç tüketimi 1749,0786 W'tır. OFF modda geçirilen süre 4104 saniyedir ve bu süre boyunca ortalama güç tüketimi 0 W'tır.

Ütünün çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ON modundaki ortalama THDi değeri yaklaşık %2 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 17. Ütünün P, E ve THDi eğrileri

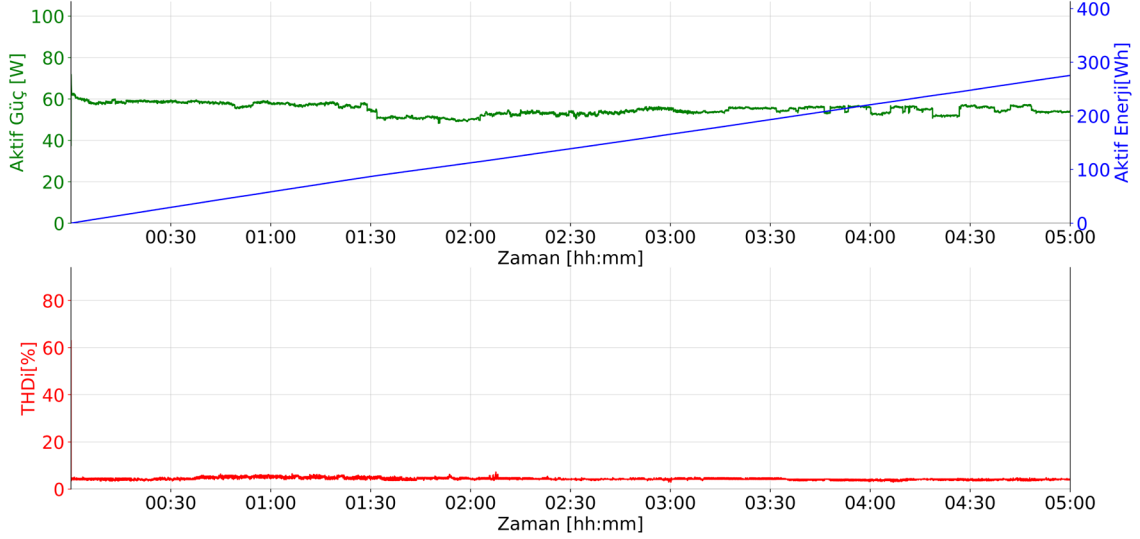
3.1.13. Vantilatör

Nominal gücü 65 W olan bir vantilatör 5 saat boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 18, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 55,0836 W, maksimum

güç tüketimi ise 71,8400 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,3042 olarak hesaplanmıştır. 5 saat boyunca tüketilen toplam enerji 275,4265 Wh olmuştur.

Vantilatörün çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri %4'ün üzerine çıkmıştır.



Şekil 18. Vantilatörün P, E ve THDi eğrileri

3.1.14. Elektrikli Fırın

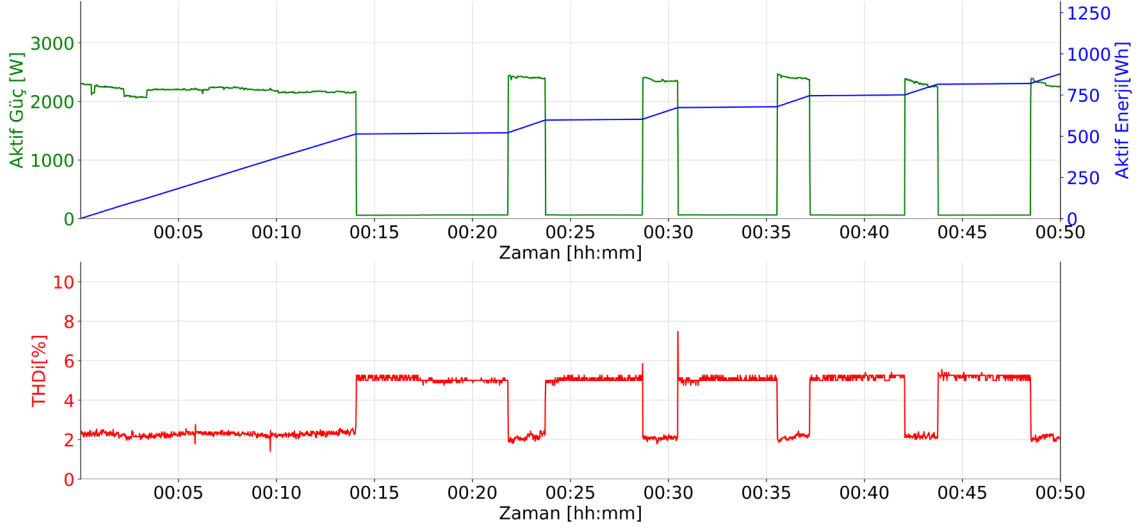
Nominal gücü 2400 W olan bir elektrikli fırın, fan destekli üst ve alt ısıtma programı kullanılarak 50 dakika boyunca 180°C sıcaklıkta çalıştırılmıştır.

Elektrikli fırın ON-OFF modunda çalışmaktadır. İlk aşamada, ısıtma elemanı en uzun süre boyunca (844 saniye) ON modda çalışmıştır. Fırın sıcaklığı ayarlanan dereceye ulaştığında, ısıtma elemanı devre dışı bırakılır ve cihaz OFF moda geçer. Isıtma elemanı, ilk aktivasyondan başlayarak pişirme sürecinin sonuna kadar toplam altı farklı süre boyunca ON modda çalıştırılmıştır. Bu sayede fırın sıcaklığının istenen seviyede kalması sağlanmıştır.

Şekil 19, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında cihazın ortalama güç tüketimi 1055,1367 W, maksimum güç tüketimi ise 2472 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 2,3428 olarak hesaplanmıştır. 50 dakika boyunca tüketilen toplam enerji 879,0571 Wh olmuştur. Cihazın 50 dakikalık bir süre boyunca ON modda çalışma süresi 1363 saniyedir. ON modunda

ortalama güç tüketimi 2249,1208 W olmuştur. OFF modda geçirilen süre 1637 saniye ve bu sürede ortalama güç tüketimi 61,0009 W'tır.

Elektrikli fırının çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ON moddaki ortalama THDi değeri yaklaşık %2 iken, OFF moddaki ortalama THDi değeri yaklaşık %5 olarak tespit edilmiştir.



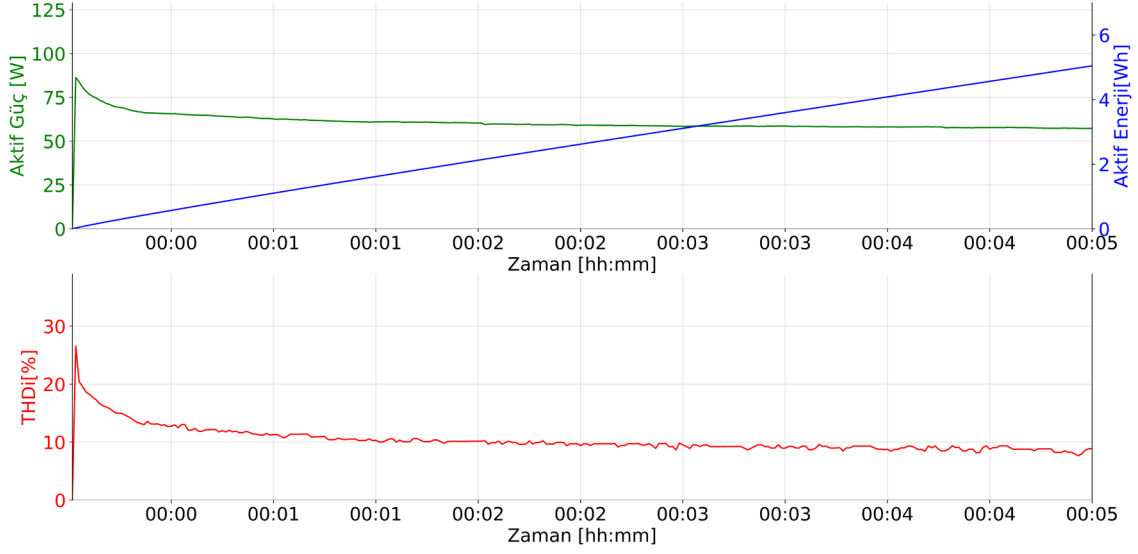
Şekil 19. Elektrikli fırının P, E ve THDi eğrileri

3.1.15. Elektrikli Çırpıcı

Nominal gücü 300 W olan bir elektrikli çırpıcı, 5 dakika boyunca 1. seviyede çalıştırılmıştır.

Şekil 20, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında cihazın ortalama güç tüketimi 60,5726 W, maksimum güç tüketimi ise 86,2900 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,4246 olarak hesaplanmıştır. 5 dakika boyunca tüketilen toplam enerji 5,0459 Wh olmuştur.

Elektrikli çırpıcının çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değerinin %10'un biraz üzerine olduğu görülmüştür.



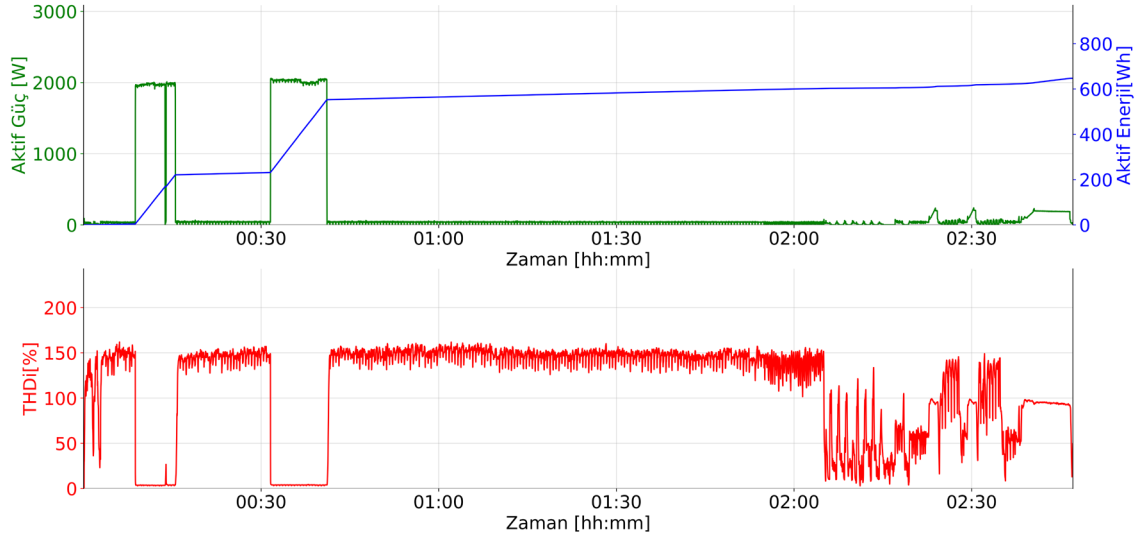
Şekil 20. Elektrikli ırpıcının P, E ve THDi eğrileri

3.1.16. Çamaşır Makinesi (Az Dolu)

Nominal gücü 2300 W olan bir çamaşır makinesi, 60°C pamuklu yıkama programında 800 devir/dakika hızında çalışırken yapılan ölçümlerle incelenmiştir. İki farklı giysi (bir sweatshirt ve bir eşofman) 10 kg kapasiteli çamaşır makinesine yerleştirilmiştir. Yıkama süresi 2 saat 47 dakika 05 saniye olmuştur.

Şekil 21, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında cihazın ortalama güç tüketimi 232,1262 W, maksimum güç tüketimi ise 2058 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 8,8659 olarak hesaplanmıştır. 2 saat 47 dakika 5 saniye boyunca tüketilen toplam enerji 647,3201 Wh olmuştur.

Çamaşır makinesinin bu programda ve belirtilen koşullarda çalışması sırasında, akımın THDi değeri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değerinin yüksek güç tüketimi dönemlerinde yaklaşık %4, düşük güç tüketimi dönemlerinde ise yaklaşık %124 olduğu tespit edilmiştir.



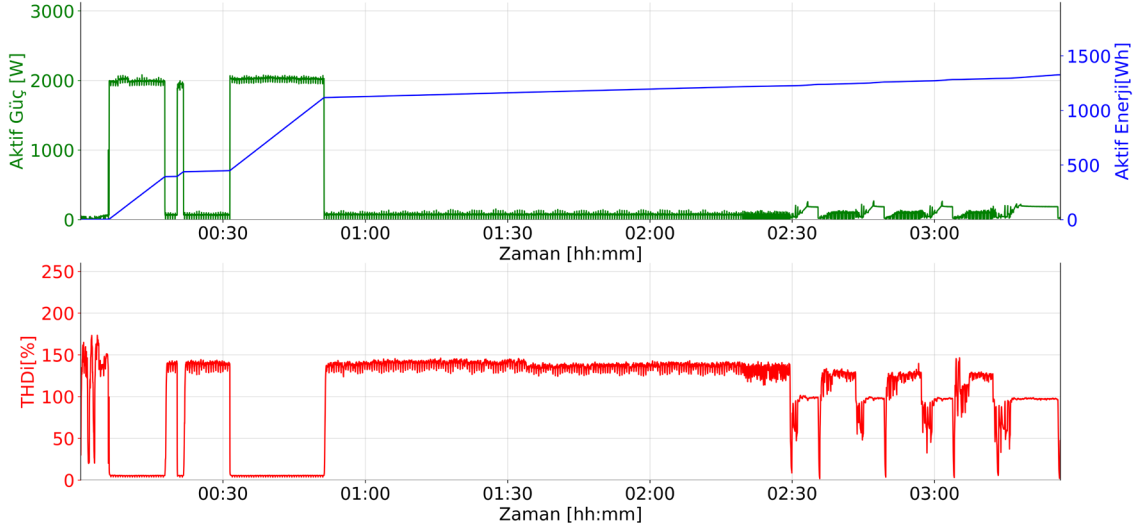
Şekil 21. Çamaşır makinesinin P, E ve THDi eğrileri (az dolu)

3.1.17. Çamaşır Makinesi (Tam Dolu)

Nominal gücü 2300 W olan bir çamaşır makinesi, 60°C pamuklu yıkama programında 800 devir/dakika hızında çalışırken yapılan ölçümlerle incelenmiştir. Ölçümler, 10 kg'lık çamaşır makinesi tam dolu bir çamaşır yükünü yıkarken gerçekleştirilmiştir. Yıkama süresi 3 saat 26 dakika 32 saniye olmuştur.

Şekil 22, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 385,2297 W, maksimum güç tüketimi ise 2081 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 5,4020 olarak hesaplanmıştır. Cihazın 3 saat 26 dakika 32 saniyede tükettiği enerji 1326,4480 Wh olmuştur.

Çamaşır makinesinin bu programda ve belirtilen koşullarda çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, yüksek güç tüketiminin olduğu dönemlerde ortalama THDi değeri yaklaşık %5, düşük güç tüketiminin olduğu dönemlerde ise ortalama THDi değeri yaklaşık %124 olarak gerçekleşmiştir.



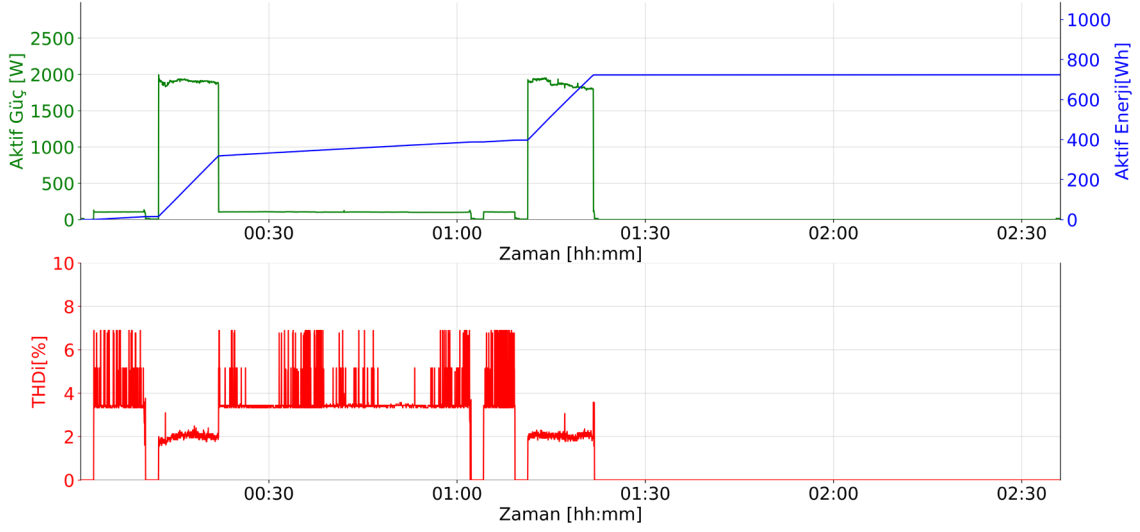
Şekil 22. Çamaşır makinesinin P, E ve THDi eğrileri (tam dolu)

3.1.18. Bulaşık Makinesi

Nominal gücü 2200 W olan bir bulaşık makinesi 50°C'de ekonomi (P2) programında çalıştırılmış ve yıkama süresi 2 saat 36 dakika 10 saniye olmuştur. Bu program tüm bulaşık makinelerinde ön yıkama (soğuk), sıcak yıkama, sürekli yıkama, soğuk durulama, sıcak durulama ve kurutma döngülerinden oluşmaktadır.

Şekil 23, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 277,7225 W, maksimum güç tüketimi ise 1994 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 7,1798 olarak hesaplanmıştır. Cihazın 2 saat 36 dakika 10 saniyede tükettiği enerji 723,7958 Wh olmuştur.

Bulaşık makinesinin bu programda ve belirtilen koşullarda çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, yüksek güç tüketiminin olduğu dönemlerde ortalama THDi değeri yaklaşık %2, düşük güç tüketiminin olduğu dönemlerde ise ortalama THDi değeri yaklaşık %3 olarak gerçekleşmiştir.



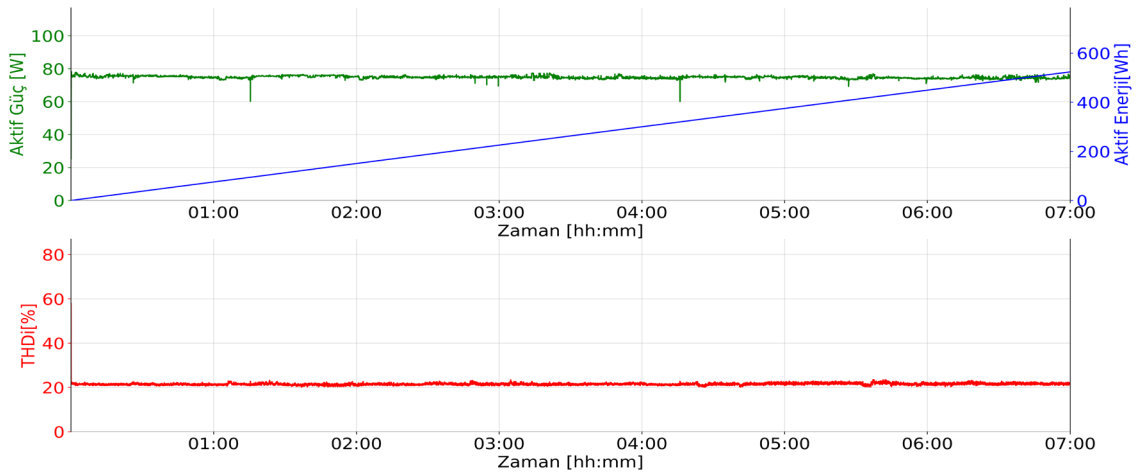
Şekil 23. Bulaşık makinesinin P, E ve THDi eğrileri

3.1.19. LED TV

Nominal gücü 110 W olan bir LED TV 7 saat boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 24, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 74,8337 W, maksimum güç tüketimi ise 78,2700 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,0459 olarak hesaplanmıştır. 7 saat içinde tüketilen enerji 523,8444 Wh olmuştur.

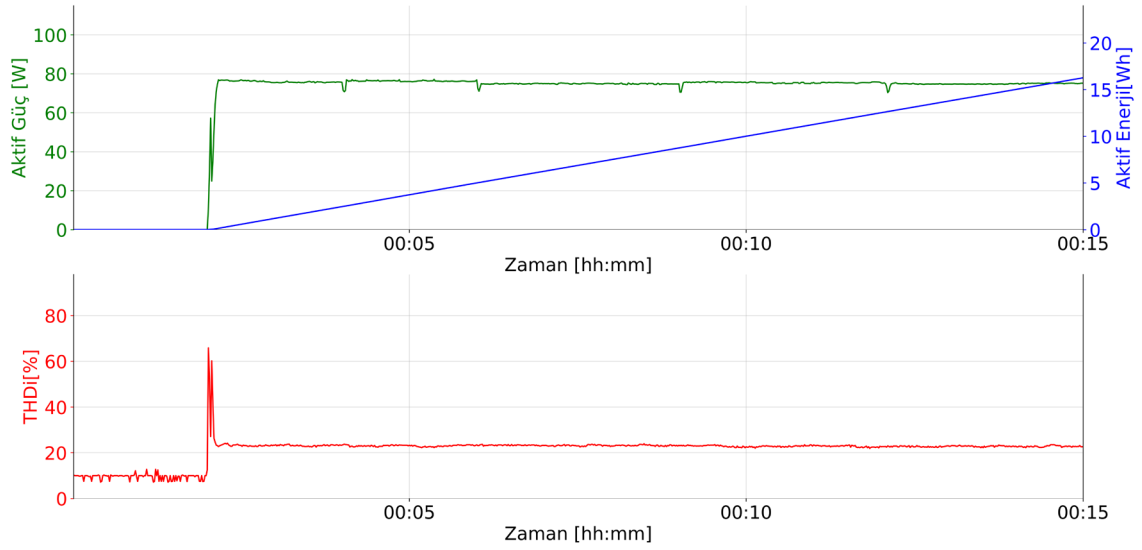
LED TV'nin çalışması sırasında akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükte incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %22 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 24. LED TV'nin P, E ve THDi eğrileri

Şekil 25, LED TV için 15 dakikalık ölçüm süresini göstermektedir. LED TV ölçüm süresinin ilk 2 dakikasnda fişe takılı ve kapalıydı. LED TV, 13 dakika boyunca açık kalmış ve ölçüm süresinin 4., 6., 9. ve 12. dakikalarında kanal değişikliği yapılmıştır. Şekil 25'te gösterildiği gibi, TV kanalı değişikliği güç tüketiminde küçük değişikliklere neden olmaktadır.

LED TV kapalıyken ortalama THD yaklaşık %10'dur. TV açıkken ortalama THD değeri %20'nin üzerine çıkmıştır. TV kanalının değiştirilmesi THD'de önemli bir değişikliğe neden olmamıştır.



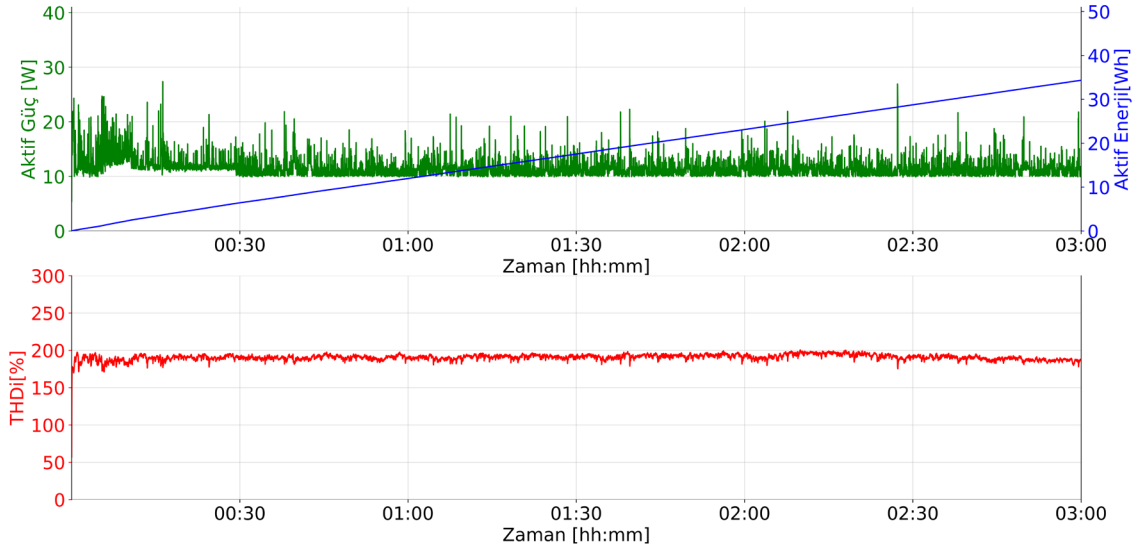
Şekil 25. LED TV kanal değişiminin P, E ve THDi eğrileri

3.1.20. Dizüstü Bilgisayar

Nominal gücü 65 W olan bir dizüstü bilgisayar, 3 saat boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 26, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 11,4447 W, maksimum güç tüketimi ise 27,3600 W olmuştur. PAR değeri 2,3906 olarak hesaplanmıştır. 3 saat içinde tüketilen enerji 34,3457 Wh olmuştur.

Dizüstü bilgisayarın çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %190 olarak tespit edilmiştir.



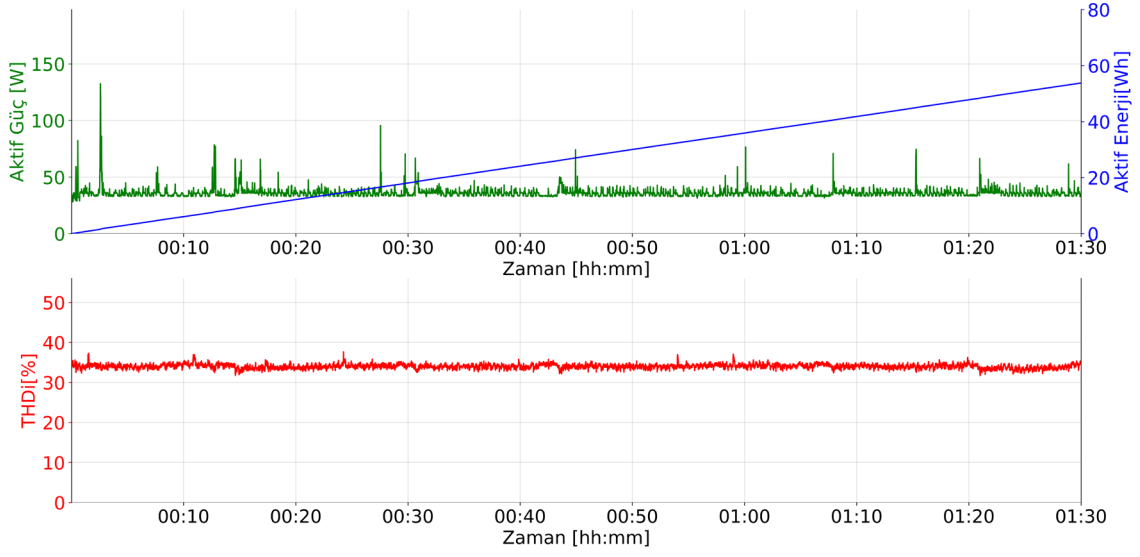
Şekil 26. Dizüstü bilgisayarın P, E ve THDi eğrileri

3.1.21. Masaüstü Bilgisayar

Nominal gücü 310 W olan bir masaüstü bilgisayar, 90 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 27, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 35,8276 W, maksimum güç tüketimi ise 132,5000 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 3,6983 olarak hesaplanmıştır. 90 dakika içinde tüketilen enerji 53,7905 Wh olmuştur.

Masaüstü bilgisayarın çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %34 olarak tespit edilmiştir.



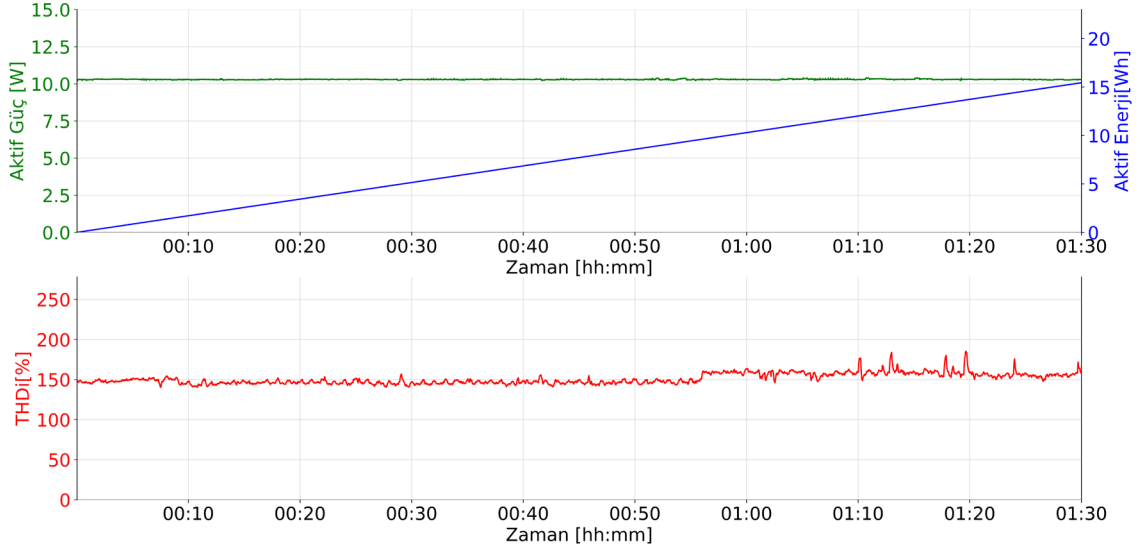
Şekil 27. Masaüstü bilgisayarın P, E ve THDi eğrileri

3.1.22. Masaüstü Monitör

Nominal gücü 19 W olan bir masaüstü monitör 90 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 28, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 10,2967 W, maksimum güç tüketimi ise 10,4000 W olarak gerçekleşmiştir. PAR değeri 1,0100 olarak hesaplanmıştır. Cihazın 90 dakika boyunca tükettiği enerji 15,4449 Wh olmuştur.

Masaüstü monitörün çalışması sırasında akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %151 olarak tespit edilmiştir.



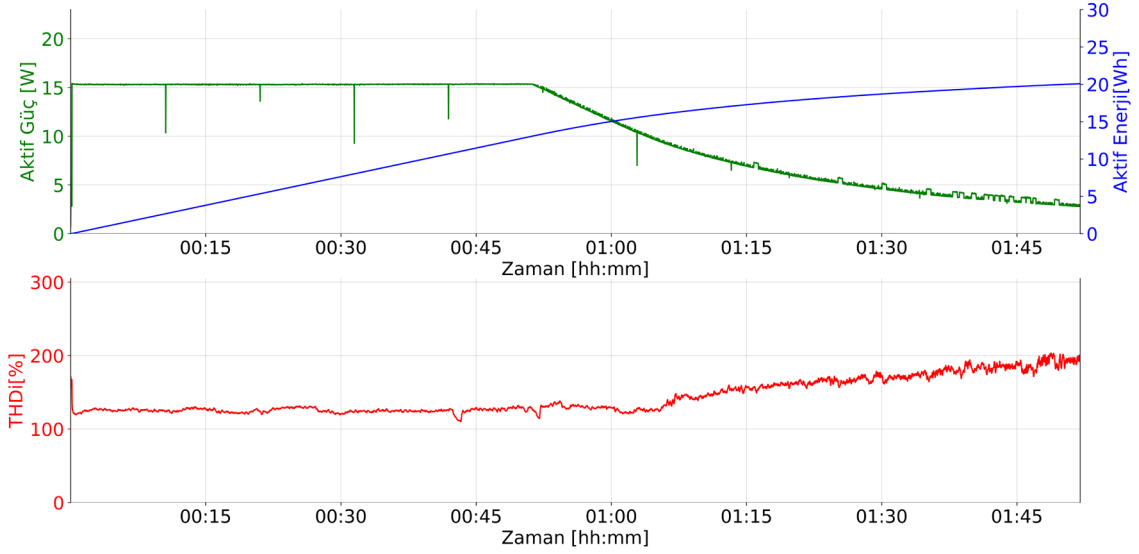
Şekil 28. Masaüstü monitörün P, E ve THDi eğrileri

3.1.23. Telefon Şarj Cihazı

Telefon, nominal gücü 10 W olan bir telefon şarj cihazı kullanılarak şarj edilmiş ve 1 saat 52 dakikalık ölçüm kaydedilmiştir. Ölçüm, telefon %0'dan tam şarja ulaşırken gerçekleştirilmiştir. Telefonun %100 şarja ulaşması 1 saat 46 dakika sürmüştür. %100 şarjdan sonra, elektriksel parametrelerdeki değişiklikleri incelemek için ölçümlere 6 dakika daha devam edilmiştir. Telefon tamamen şarj olduğunda bile, şarjda bırakılmaya devam edilirse güç tüketmeye devam etmektedir.

Şekil 29, 1 saat ve 52 dakika süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. 1 saat 52 dakika baz alındığında, cihazın ortalama güç tüketimi 10,7515 W ve maksimum güç tüketimi 15,4100 W olmuştur. PAR değeri 1,4333 olarak hesaplanmıştır. 1 saat 52 dakika içinde tüketilen enerji 20,0739 Wh olmuştur. 1 saat 46 dakika baz alındığında, bu süre zarfında cihazın ortalama güç tüketimi 11,1835 W ve maksimum güç tüketimi 15,4100 W olmuştur. PAR değeri 1,3779 olarak hesaplanmıştır. Cihazın 1 saat 46 dakika içinde tükettiği enerji 19,7615 Wh olmuştur.

Telefon şarj cihazının çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, yüksek güç tüketiminin olduğu dönemlerde ortalama THDi değeri yaklaşık %125, düşük güç tüketiminin olduğu dönemlerde ise ortalama THDi değeri yaklaşık %164 olarak tespit edilmiştir.



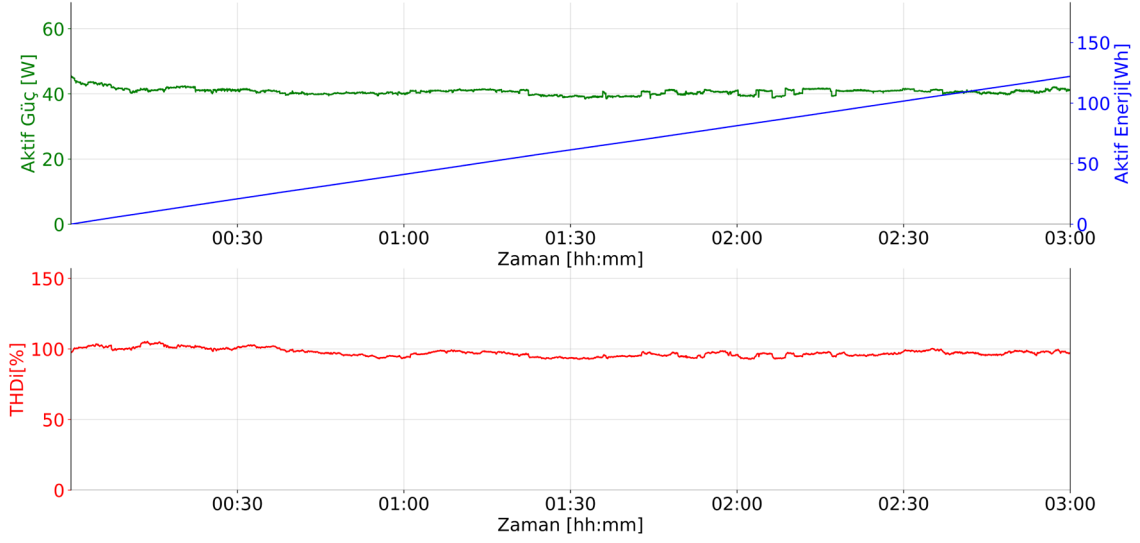
Şekil 29. Telefon şarj cihazının P, E ve THDi eğrileri

3.1.24. CFL Lamba (Çocuk Odası)

Nominal gücü 8 W olan bir CFL lamba sarı ışık fonksiyonuna ve E14 duyuna sahiptir. Beş E14 duyuna sahip avizede kullanılan aynı tip 5 CFL lambanın toplam nominal gücü 40 W'tır.

Şekil 30, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 40,6954 W, maksimum güç tüketimi ise 45,5400 W olmuştur. PAR değeri 1,1190 olarak hesaplanmıştır. 3 saat içinde tüketilen enerji 122,0870 Wh olmuştur.

Beş adet CFL lambanın çalışması sırasında akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %97 olarak tespit edilmiştir.



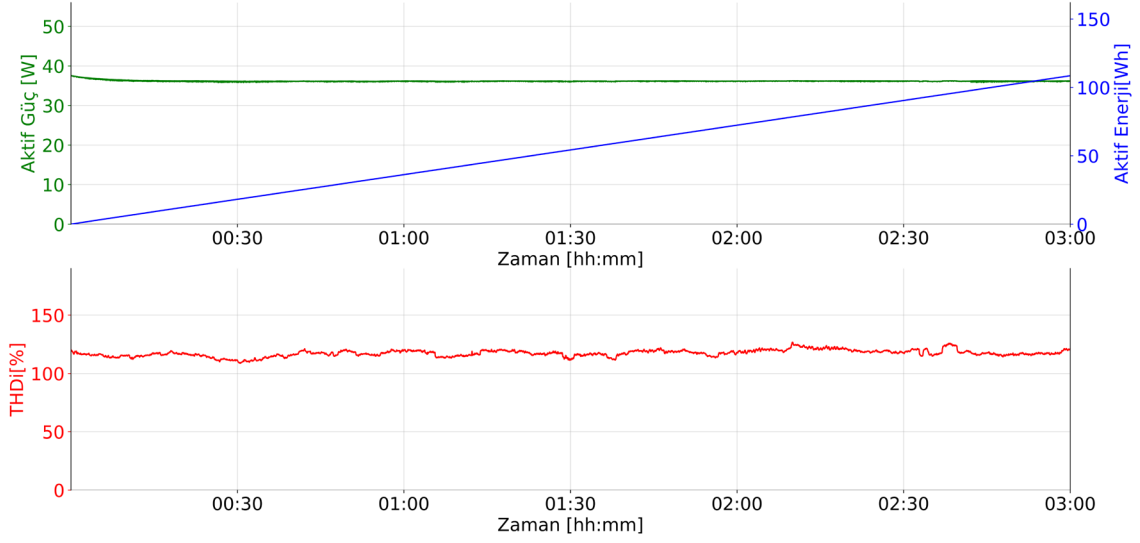
Şekil 30. CFL lambanın P, E ve THDi eğrileri (çocuk odası)

3.1.25. LED Lamba (Oturma Odası)

Nominal gücü 7 W olan bir LED lamba soğuk gün ışığı fonksiyonuna ve E14 duyuna sahiptir. Beş E14 duyuna sahip avizede kullanılan aynı tip 5 LED lambanın toplam nominal gücü 35 W'tır.

Şekil 31, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 36,1784 W, maksimum güç tüketimi ise 37,5400 W olmuştur. PAR değeri 1,0376 hesaplanmıştır. 3 saat içinde tüketilen enerji 108,5349 Wh olmuştur.

Beş adet LED lambanın çalışması sırasında akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %117 olarak tespit edilmiştir.



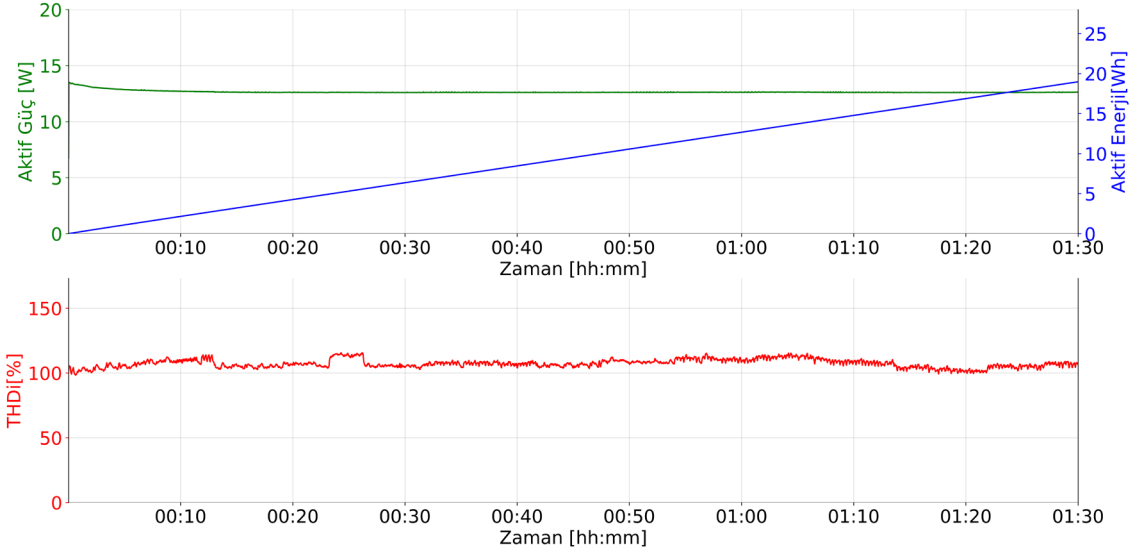
Şekil 31. Led lambanın P, E ve THDi eğrileri (oturma odası)

3.1.26. LED Lamba (Mutfak)

Nominal gücü 13 W olan, soğuk gün ışığı fonksiyonlu ve E27 duylu LED lamba, 90 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 32, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 12,6526 W, maksimum güç tüketimi ise 13,5200 W olmuştur. PAR değeri 1,0686 hesaplanmıştır. Cihazın 90 dakika boyunca tükettiği enerji 18,9808 Wh olmuştur.

13W LED lambanın çalışması sırasında, akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %107 olarak tespit edilmiştir.



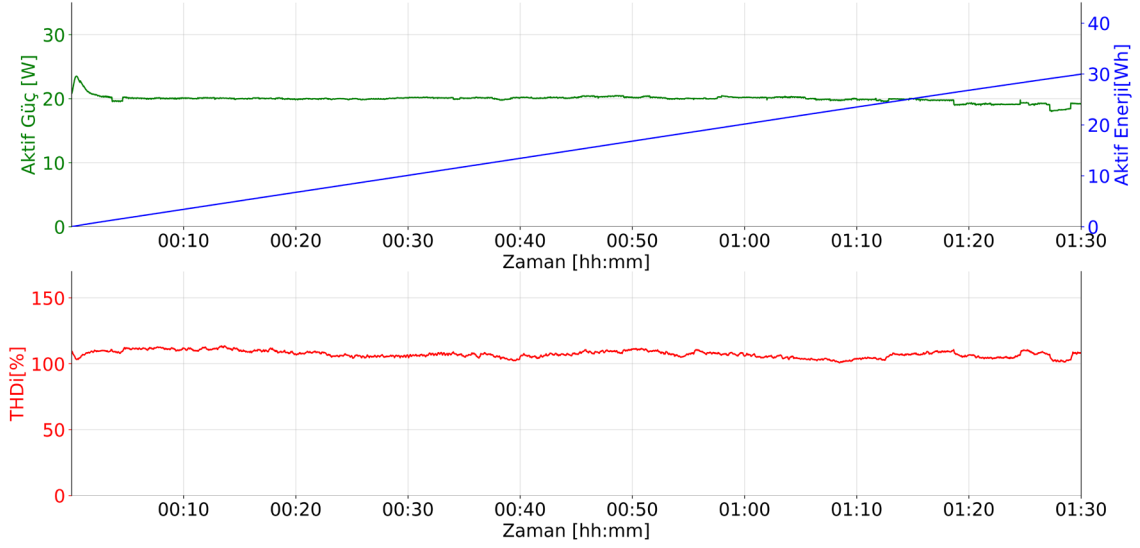
Şekil 32. Led lambanın P, E ve THDi eğrileri (mutfak)

3.1.27. CFL Lamba (Misafir Odası)

Nominal gücü 23 W (Marka 1) olan, soğuk gün ışığı fonksiyonlu ve E27 duylu CFL Lamba, 90 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 33, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 19,9749 W, maksimum güç tüketimi ise 23,5100 W olmuştur. PAR değeri 1,1770 olarak hesaplanmıştır. Cihazın 90 dakika boyunca tükettiği enerji 29,9617 Wh olmuştur.

Marka 1'e ait 23 W CFL lambanın çalışması sırasındaki akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %107 olarak tespit edilmiştir.



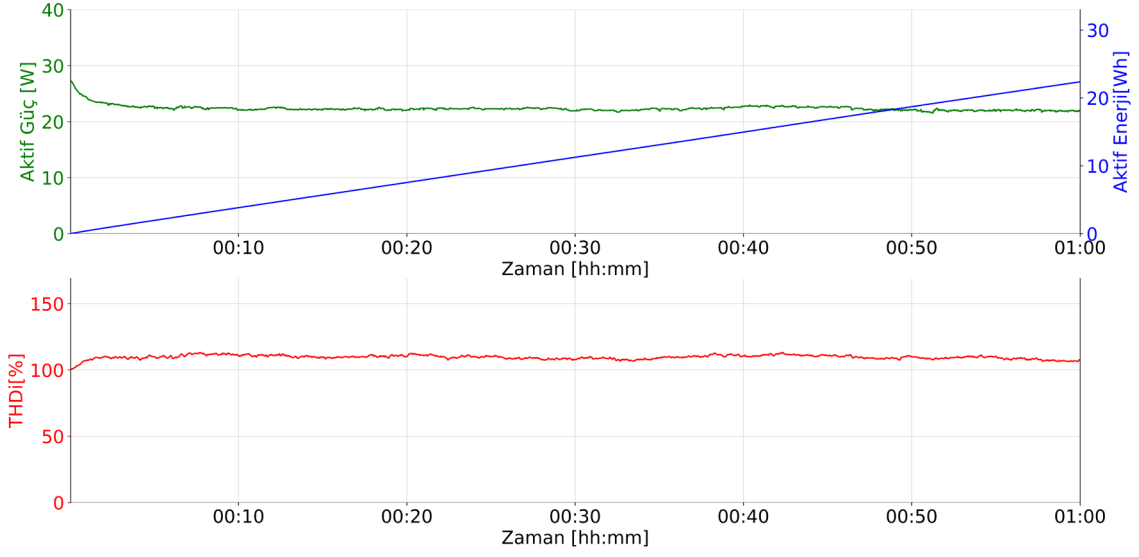
Şekil 33. CFL lambanın P, E ve THDi eğrileri (misafir odası)

3.1.28. CFL Lamba (Banyo)

Başka bir üreticinin ürettiği, 23 W nominal güce sahip CFL lamba (Marka 2), soğuk gün ışığı fonksiyonuna ve E27 duyunu sahiptir. Lamba 60 dakika boyunca çalıştırılmıştır.

Şekil 34, cihazın çalışması süresince elde edilen aktif güç, aktif enerji ve THDi eğrilerini göstermektedir. Bu süre zarfında ortalama güç tüketimi 22,3673 W, maksimum güç tüketimi ise 27,2900 W olmuştur. PAR değeri 1,2201 olarak hesaplanmıştır. 60 dakikada tüketilen enerji 22,3669 Wh olmuştur.

Marka 2'ye ait 23 W CFL lambanın çalışması sırasındaki akımın THDi değerleri 1 saniye çözünürlükle incelendiğinde, ortalama THDi değeri yaklaşık %110 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 34. CFL lambanın P, E ve THDi eğrileri (banyo)

Bu çalışma ile modern ev aletlerinin yük profilleri ayrıntılı olarak belirlenmiş ve güç tüketimleri ile harmonik özelliklerinin kapsamlı analizleri yapılmıştır. Yüksek çözünürlüklü veriler özgün olarak elde edilerek, modelleme hatalarından kaçınarak her bir cihaz için gerçekçi yük profillerinin oluşturulmasına olanak tanınmıştır. Bu da DSM stratejilerinin etkinliğini artırmak ve enerji yönetim sistemlerini optimize etmek için sağlam bir temel oluşturmuştur. Akıllı şebekelerin ortaya çıkmasıyla birlikte, daha gerçekçi yük profillerine ve cihaz düzeyinde ayrıntılı güç tüketimi ile harmonik karakteristiklere duyulan ihtiyaç bu çalışma ile giderilmeye çalışılmıştır.

Literatürde çoğu çalışma, elektrikli ekipmanların güç tüketiminin nominal güçte sabit olduğunu ve çalışma sırasında herhangi bir döngü veya değişim olmadığını varsaymaktadır. Bu yanılmanın temel nedeni, cihazların ayrıntılı çalışma özellikleri hakkında bilgi eksikliği ve cihaz ölçüm verilerinin yeterince incelenmemesidir. Bu çalışmada, fırın, çamaşır makinesi, airfryer, bulaşık makinesi, dizüstü bilgisayar, ütü, saç düzleştirici ve buzdolabı gibi bazı ev aletlerinin çalışma süresi boyunca güç tüketiminde doğal bir değişkenlik olduğu tespit edilmiştir.

CFL, LED lamba, yumurta pişirici, elektrikli ırpıcı, masaüstü monitör, elektrikli süpürge gibi bazı cihazlarda ise çalışma süresi boyunca güç değeri neredeyse sabit kalmakta veya çok az değişmektedir. Cihazların güç değerlerinde gözlemlenen bu durum, harmonik etkilerinde de görülmektedir. Bazı cihazlarda THD değeri çalışma süresi boyunca değişim

gösterirken, bazı cihazlarda THD değeri neredeyse sabit kalmakta veya çok az değişmektedir.

Yük profillerinin analizi, enerji tüketimini ve verimliliğini optimize etmeyi amaçlayan DSM stratejilerinde kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, DSM stratejilerinin doğruluğunu ve etkinliğini artırmak adına sağlam bir zemin oluşturmakta ve enerji yönetim sistemlerinin optimizasyonu için önemli bilgiler sağlamaktadır.

3.2. Cihazların Elektriksel Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Tablo 8'de ölçülen cihazların çalışma süreleri, nominal güç değerleri, ortalama güç tüketimi, maksimum güç tüketimi, enerji tüketimi, THDi değerleri ve PAR değerleri listelenmektedir.

Tablo 8. Elektrikli cihazların elektriksel parametreleri

Cihaz	Çalışma Süresi	Nominal Gücü [W]	Ortalama Gücü [W]	Maksimum Gücü [W]	Enerji [Wh]	THDi [%]	PAR Değeri
Buzdolabı	24 h	95	48,6576	342,5000	1167,5375	12,1979	7,0390
Modem	24 h	18	6,9204	7,6930	166,0930	155,8671	1,1116
Termosifon	24 h	1980	2010,9595	2154,0000	3381,3130	1,9940	1,0711
Saç kurutma makinesi	5 m	1000	491,5827	499,9000	41,0344	44,2016	1,0169
Airfryer 200°C	20 m	1500	976,1082	1642,0000	325,1594	2,0646	1,6822
Airfryer 160°C	30 m	1500	508,1553	1588,0000	255,8915	2,4909	3,1250
Çay makinesi	10 m	1500	1115,6440	1526,0000	185,7577	2,0306	1,3678
Yumurta pişirici	13 m	500	499,0581	516,1000	108,1349	1,8128	1,0341
Tost makinesi	10 m	2000	1117,7943	1941,0000	186,4565	1,6280	1,7365
Saç düzleştirici	40 m	50	34,1167	981,1000	22,2629	45,1552	28,7623
Elektrikli süpürge	1 h	600	571,6011	600,9000	571,6064	51,4288	1,0513
Ütü	75 m	2400	153,9189	2007,0000	191,9911	2,4202	13,0393
Vantilatör	5 h	65	55,0836	71,8400	275,4265	4,5420	1,3042
Elektrikli fırın	50 m	2400	1055,1367	2472,0000	879,0571	2,2493	2,3428
Elektrikli çırpıcı	5 m	300	60,5726	86,2900	5,0459	10,7606	1,4246
Çamaşır makinesi (az dolu)	2 h 47 m	2300	232,1262	2058,0000	647,3201	22,2872	8,8659
Çamaşır makinesi (tam dolu)	3 h 27 m	2300	385,2297	2081,0000	1326,4480	23,8251	5,4020
Bulaşık makinesi	2 h 36 m	2200	277,7225	1994,0000	723,7958	2,2657	7,1798
LED TV	7 h	110	74,8337	78,2700	523,8444	21,6785	1,0459
Dizüstü bilgisayar	3 h	65	11,4447	27,3600	34,3457	190,3462	2,3906
Masaüstü bilgisayar	1 h 30 m	310	35,8276	132,5000	53,7905	34,2684	3,6983
Masaüstü monitör	1 h 30 m	19	10,2967	10,4000	15,4449	150,6569	1,0100
Telefon şarj cihazı (tam şarj)	1 hr 46 m	10	11,1835	15,4100	19,7615	130,7528	1,3779
Telefon şarj cihazı (aşırı şarj)	1 h 52 m	10	10,7515	15,4100	20,0739	131,4689	1,4333
CFL lamba (çocuk odası)	3 h	40	40,6954	45,5400	122,0870	97,1779	1,1190
LED lamba (oturma odası)	3 h	35	36,1784	37,5400	108,5349	117,0984	1,0376
LED lamba (mutfak)	1 h 30 m	13	12,6526	13,5200	18,9808	106,9376	1,0686
CFL lamba (misafir odası)	1 h 30 m	23	19,9749	23,5100	29,9617	107,0687	1,1770
CFL lamba (banyo)	1 h	23	22,3673	27,2900	22,3669	109,5383	1.2201

Tablodaki sürelerin cihazların günlük kullanım süreleri olduğu varsayıldığında, en yüksek enerji tüketiminin 3381,3130 Wh ile termosifondan kaynaklandığı görülebilir. Yüksek enerji tüketimine sahip diğer cihazlar çamaşır makinesi (1326,4480 Wh), buzdolabı (1167,5375 Wh), elektrikli fırın (879,0571 Wh) ve bulaşık makinesi (723,7958 Wh) olmuştur. En düşük enerji tüketimine sahip cihaz ise 5,0459 Wh ile elektrikli çırpıcı olmuştur.

En yüksek ortalama güç tüketimine sahip cihazlar termosifon (2010,5959 W), tost makinesi (1117,7943 W), çay makinesi (1115,6440 W) ve elektrikli fırındır (1055,1367 W).

En düşük ortalama güç tüketimine sahip cihazlar ise modem (6,9204 W), masaüstü monitör (10,2967 W) ve telefon şarj cihazı (10,7515 W) olmuştur.

Cihazların THDi değerleri incelendiğinde, en yüksek THDi değerlerine sahip cihazlar dizüstü bilgisayar (%190,3462), modem (%155,8671), masaüstü monitör (%150,6569), telefon şarj cihazı (%131,4689) olmuştur. Bununla birlikte, ölçülen tüm LED lamba ve CFL lamba türleri yüksek THD değerlerine sahiptir.

Yüksek PAR değerlerine sahip cihazlar: saç düzleştirici (28,7623), ütü (13,0393), çamaşır makinesi (8,8659), bulaşık makinesi (7,1798) ve buzdolabıdır (7,0390).

Ayrıca her bir cihaz için 50. dereceye kadar harmonik akım ölçümleri yapılmıştır. Her bir cihazın 10. dereceye kadar olan harmonik akım oranları Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Elektrikli cihazların harmonik akım oranı

Cihaz (I_n^{HR} - %)	I[01]	I[02]	I[03]	I[04]	I[05]	I[06]	I[07]	I[08]	I[09]	I[10]
Buzdolabı	100	4,361	4,993	2,13	9,12	1,697	2,774	0,743	1,475	0,179
Modem	100	0,074	94,141	0,061	82,286	0,049	65,508	0,039	48,37	0,027
Termosifon	100	0,001	0,832	0	1,427	0	0,863	0	0,613	0
Saç kurutma makinesi	100	43,029	0,778	9,118	1,155	2,534	0,884	2,699	0,635	0,729
Airfryer 200°C	100	0,022	1,395	0,008	1,239	0,004	0,808	0,002	0,343	0,002
Airfryer 160°C	100	0,051	1,843	0,015	1,477	0,008	0,666	0,004	0,38	0,003
Çay makinesi	100	0,008	0,814	0	1,513	0	0,928	0	0,385	0
Yumurta pişirici	100	0,083	0,652	0,08	1,364	0,06	0,758	0,014	0,488	0,001
Tost makinesi	100	0,008	0,703	0,003	0,701	0,001	1,196	0,001	0,42	0,001
Saç düzleştirici	100	43,800	6,384	7,125	4,113	1,444	1,605	1,811	0,815	0,812
Elektrikli süpürge	100	1,314	48,933	1,105	14,922	0,721	3,364	0,487	3,112	0,015
Ütü	100	0,182	1,632	0,046	1,592	0,026	0,668	0,016	0,196	0,009
Vantilatör	100	0,001	2,554	0,003	3,663	0	0,675	0	0,477	0
Elektrikli fırın	100	0,017	0,882	0,002	1,766	0,001	0,924	0	0,525	0
Elektrikli çırpıcı	100	0,028	10,029	0,01	3,831	0,005	0,727	0,003	0,016	0,002
Çamaşır makinesi (az dolu)	100	0,182	13,92	0,104	12,433	0,01	9,308	0,001	6,129	0,001
Çamaşır makinesi (tam dolu)	100	0,096	15,79	0,043	13,032	0,004	9,353	0	5,975	0
Bulaşık makinesi	100	0,004	1,121	0,001	1,517	0	1,177	0	0,405	0
LED TV	100	1,732	19,696	0,037	8,212	0,008	1,695	0	2,125	0,001
Dizüstü bilgisayar	100	0,441	90,942	0,423	85,572	0,405	80,342	0,376	70,017	0,335
Masaüstü bilgisayar	100	0,158	28,554	0,026	14,868	0,005	9,185	0,002	4,192	0,001
Masaüstü monitör	100	0,006	81,094	0,004	72,263	0,002	66,253	0,002	53,581	0,002
Telefon şarj cihazı (tam şarj)	100	0,047	86,191	0,037	66,848	0,041	44,275	0,051	27,001	0,054
Telefon şarj cihazı (aşırı şarj)	100	0,046	86,235	0,036	67,157	0,04	44,783	0,05	27,645	0,053
CFL lamba (çocuk odası)	100	0	68,259	0	41,704	0,004	39,165	0,006	28,168	0,009
LED lamba (oturma odası)	100	0,01	75,199	0,011	49,282	0,047	42,575	0,072	37,121	0,08
LED lamba (mutfak)	100	0	70,795	0	42,779	0	41,069	0	36,107	0
CFL lamba (misafir odası)	100	0,001	71,49	0	43,227	0	40,29	0	37,049	0
CFL lamba (banyo)	100	0	68,221	0	43,459	0,001	46,201	0,001	39,47	0,001

Harmonik verilerin analizi, elektrikli cihazların 3. , 5. ve 7. harmoniklerinin baskın olduğunu göstermektedir.

En yüksek 3. harmonik oranına sahip cihazlar modem (%94,141), dizüstü bilgisayar (%90,942), telefon şarj cihazı (%86,235), masaüstü monitör (%81,094) ve LED lamba (oturma odası) (%75,199) olmuştur.

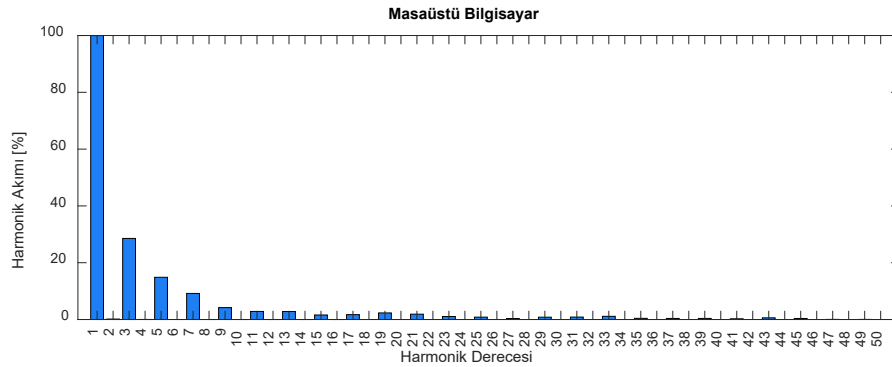
En yüksek 5. harmonik oranına sahip cihazlar dizüstü bilgisayar (%85,572), modem (%82,286), masaüstü monitör (%72,263), telefon şarj cihazı (aşırı şarj) (%67,157) ve LED lamba (oturma odası) (%49,282) olmuştur.

En yüksek 7. harmonik oranına sahip cihazlar dizüstü bilgisayar (%80,342), masaüstü monitör (%66,253), modem (%65,508), CFL lamba (banyo) (%46,201) ve telefon şarj cihazı(aşırı şarj) dır (%44,783).

Elektrikli cihazların çift harmonikleri genellikle düşük seviyede olup, tek harmonikler kadar baskın değildir. Ancak, bu çalışmada incelenen 26 cihaz arasında, iki cihazın çift harmonikleri belirgin şekilde baskındır. Bu cihazlar saç düzleştirici ve saç kurutma makinesidir. Saç düzleştiricinin 2. harmonik oranı %43,800 iken, saç kurutma makinesinin 2. harmonik oranı ise %43,029 olarak tespit edilmiştir.

Öte yandan tost makinesi, yumurta pişirici, termosifon, çay makinesi ve elektrikli fırın gibi cihazlar omik yük karakteristiğine sahip olup, düşük harmonik bozulma endeksleri göstermektedir.

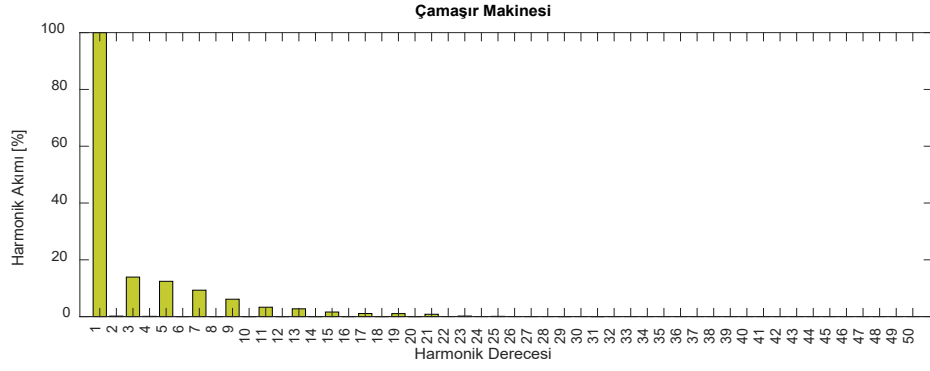
Test evindeki farklı harmonik özelliklere sahip elektrikli cihazların harmonik yüzdeleri Şekil 35'te gösterilmiştir. Cihazlar arasında masaüstü bilgisayar, çamaşır makinesi, elektrikli süpürge, saç düzleştirici, dizüstü bilgisayar, telefon şarj cihazı, modem ve led lamba bulunmaktadır. Tek harmoniklerin genellikle daha yüksek değerlere sahip olmaları nedeniyle, ev aletlerinde çift harmoniklere kıyasla daha baskın olduklarını belirtmek gerekir. Bu çalışmada hem tek hem de çift harmonik bileşenler 50. mertebeye kadar analiz edilmiştir.



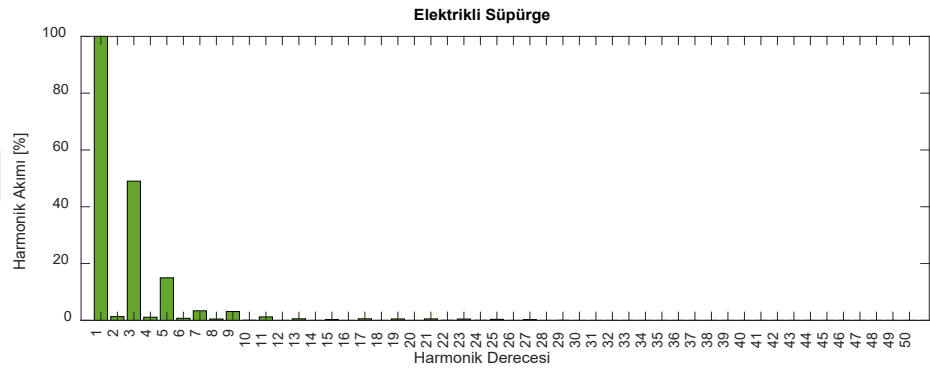
(a)

Şekil 35. Harmonik akım spektrumları a) masaüstü bilgisayar b) çamaşır makinesi c) elektrikli süpürge d) saç düzleştirici e) dizüstü bilgisayar f) telefon şarj cihazı g) modem h) led lamba (mutfak)

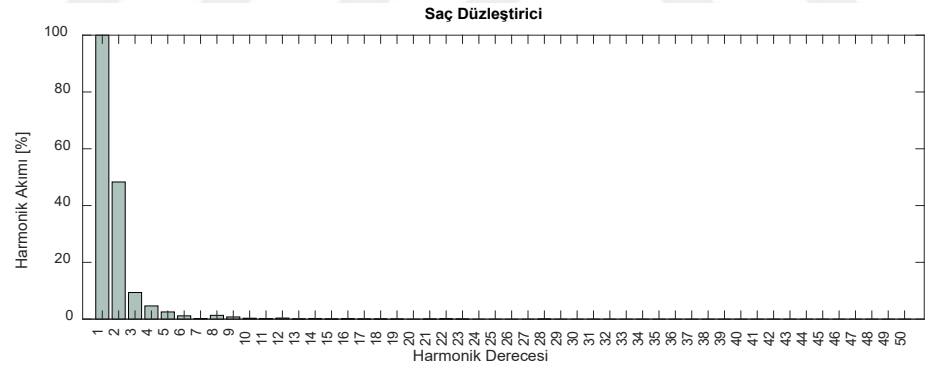
Şekil 35'in devamı



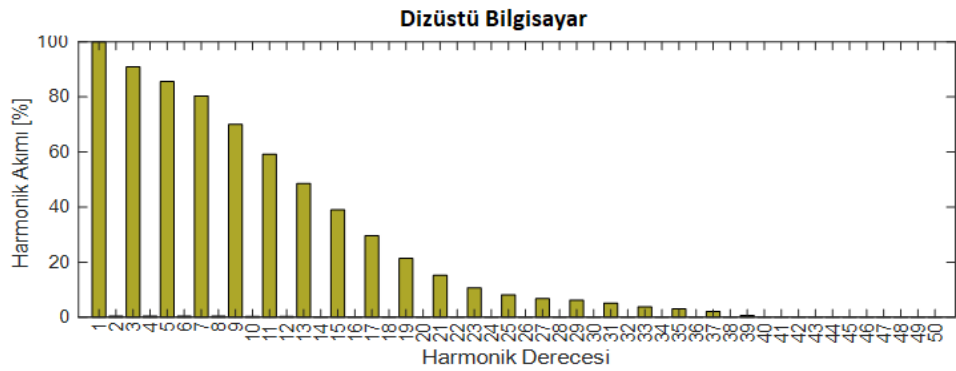
(b)



(c)

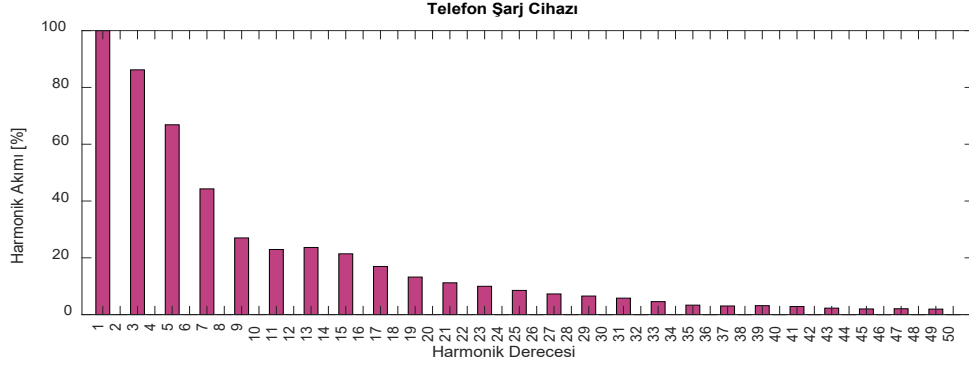


(d)

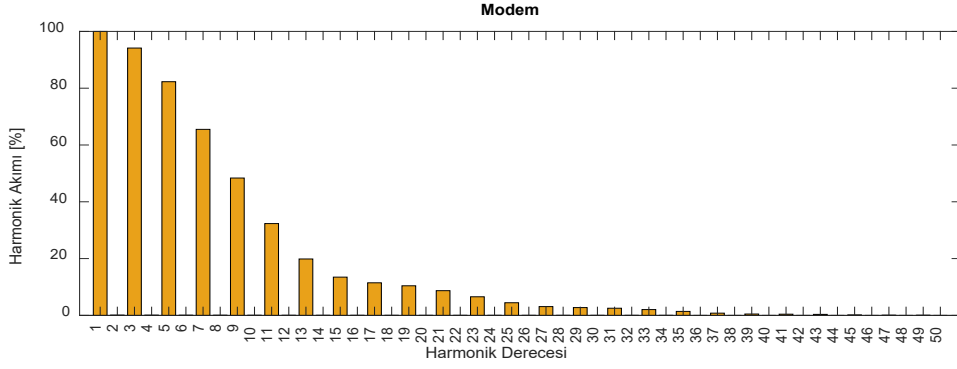


(e)

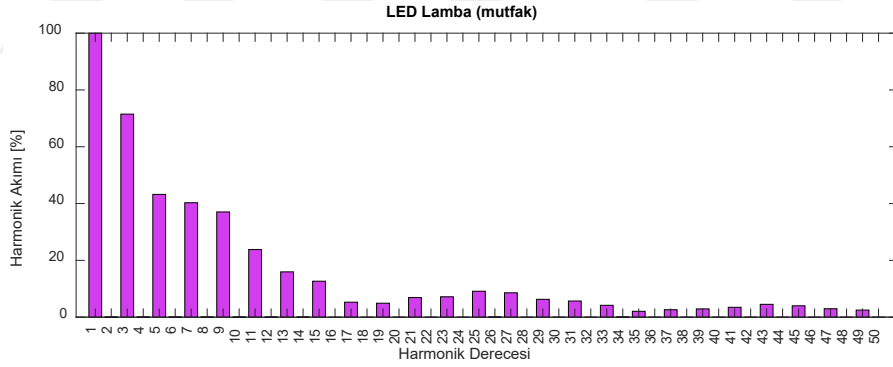
Şekil 35'in devamı



(f)



(g)



(h)

Şekil 35'te gösterilen cihazların harmonik karakteristikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- Şekil 35(a) masaüstü bilgisayar için akım harmonik bileşenlerini göstermektedir. En baskın harmonikler 3. , 5. ve 7. harmonik bileşenlerdir. 3. harmonik bileşenin yüzdesi %28,554'tür. Tekil bileşenlerin 23. bileşenden sonra %1'in altına düştüğü gözlemlenmiştir. 23. bileşenden sonra sadece 33. bileşen %1'in üzerine çıkmıştır.

- Şekil 35(b) çamaşır makinesinin akım harmonik bileşenlerini göstermektedir. En baskın harmonikler 3. , 5. ve 7. harmonik bileşenlerdir. 3. harmonik bileşenin yüzdesi %13,92'dir. Tekil bileşenlerin 19. bileşenden sonra %1'in altına düştüğü gözlemlenmiştir.

- Şekil 35(c) elektrikli süpürge'nin akım harmonik bileşenlerini göstermektedir. 3. ve 5. harmonikler en baskın olanlarıdır ve 3. harmonik %48,933 ile özellikle yüksektir. Çift harmonikler düşük değerlere sahipken, tek bileşenler 11. bileşenden sonra %1'in altına düşmektedir.

- Şekil 35(d) saç düzleştiricinin akım harmonik bileşenlerini göstermektedir. Diğer elektrikli cihazların aksine, çift harmoniklerin 2. ve 4. harmonik bileşenleri baskındır. Özellikle 2. harmonik bileşen %43,800 ile oldukça yüksektir. Tek harmonik bileşenler arasında 3. ve 5. harmonik bileşenler baskındır. Tek bileşenlerin yüzdesinin 5. bileşenden sonra %1'in altına düştüğü gözlemlenmiştir.

- Şekil 35(e) dizüstü bilgisayarın mevcut harmonik bileşenlerini göstermektedir. Tek harmonik bileşenlerin 25. harmoniğe kadar %10'un üzerindedir. 3. , 5. ve 7. harmonik bileşenlerin baskın olduğu ve 3.harmonik bileşenin %90,942, 5. ve 7. harmonik bileşenlerin sırasıyla %85,572 ve %80,342 olduğu görülmektedir. 37. bileşenden sonra tek bileşenler %1'in altına düşmüştür.

- Şekil 35(f) telefon şarj cihazının akım harmonik bileşenlerini göstermektedir. Tek harmonik bileşenler, 23. harmonik bileşene kadar %10'un üzerine çıkmıştır. 50. harmoniğe kadar tüm tek harmonikler %1'in üzerinde olup, en düşük tek harmonik bileşen %1,94 değeriyle 49. harmoniktir.

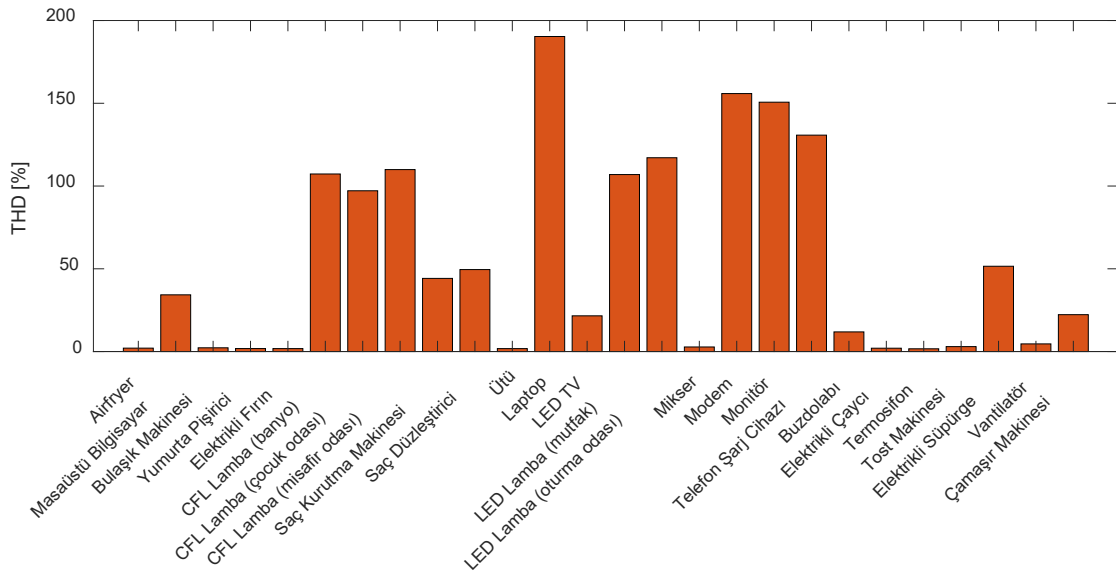
- Şekil 35(g) modemin akım harmonik bileşenlerini göstermektedir. En baskın harmonikler 3. , 5. ve 7. harmonik bileşenlerdir. 3. harmonik bileşenin oranı %94,141, 5. harmonik bileşenin oranı %82,286 ve 7.harmonik bileşenin oranı %65,508'dir. Tek harmonik bileşenler 19. harmonik bileşene kadar %10' un üzerine çıkmıştır. Tekil bileşenlerin 35. harmonikten sonra %1'in altına düştüğü gözlemlenmiştir.

- Şekil 35(h) led lambanın (mutfak) akım harmonik bileşenlerini göstermektedir. En baskın harmonikler 3. , 5. ve 7. harmonik bileşenlerdir. Tek harmonik bileşenlerden hiçbirisi %2'nin altına düşmemiştir.

Çeşitli ev aletlerinin harmonik karakteristikleri analiz edildiğinde, her bir cihazın belirli harmonik bileşenlerinin baskın olduğu görülmektedir. Örneğin, masaüstü bilgisayar, çamaşır makinesi, elektrikli süpürge, dizüstü bilgisayar ve telefon şarj cihazında 3., 5. ve 7. harmonikler öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bazı elektrikli cihazlarda (örneğin saç düzleştirici ve saç kurutma makinesi) nadiren de olsa çift harmonikler baskın olabilir. Bazı cihazlarda, belirli harmonik bileşenlerin yüzdesi, aynı cihazın diğer harmonik bileşenlerinden önemli ölçüde daha yüksek olabilir. Örneğin, bir elektrikli süpürge 3.

harmonik %48,933 gibi çok yüksek bir değere sahipken, bir saç düzleştiricide 2. harmonik %43,800 ile öne çıkmaktadır. Bu, ev aletlerinin harmonik özelliklerinin cihaza bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, genel olarak, ev aletleri genellikle tek harmoniklerin baskınlığını sergiler. Yüksek harmonik bileşenler elektrik şebekesinin güç kalitesini olumsuz etkileyebilir ve cihaz performansını da potansiyel olarak düşürebilir. Bu nedenle, harmonik etkileri azaltmak veya kontrol altına almak için uygun önlemler alınmalıdır. Uygun önlemlerin alınmaması, cihaz arızalarına ve enerji verimliliğinin azalmasına yol açabilir. Bu bilgiler doğrultusunda, bir evdeki farklı cihazların harmonik özelliklerini analiz etmek, bir elektrik sisteminin güç kalitesini ve performansını anlamada önemli bir adımdır.

Şekil 36, ölçüm yapılan evdeki tüm cihazlar için THD değerlerini göstermektedir.



Şekil 36. Tüm cihazların THD değerleri

Güç elektroniği teknolojisi kullanılan cihazlar, doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiklerine sahiptir. Bu cihazların kullanımı, toplam harmonik bozulma (THD) değerlerinin artmasına neden olur. Dizüstü bilgisayarlar, modemler, masaüstü monitörler ve telefon şarj cihazları gibi cihazlar, bu artışın tipik örneklerindendir. Benzer şekilde, aydınlatma ürünlerinde de yüksek THD değerleri görülmektedir. Farklı markalar tarafından üretilen LED ve CFL lambaların ölçümleri, bu ürünlerin yüksek THD değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın, omik yük cihazları, çok daha düşük THD değerlerine

sahiptir. Örneğin, airfryer, yumurta pişirici, elektrikli fırın, ütü, termosifon ve çay makinesi gibi cihazlar, düşük THD değerlerine sahiptir.

3.3. Senaryolar ve Bulgular

Yük kaydırma stratejilerinin yük eğrisi düzgünleştirme ve fatura maliyetini azaltma üzerindeki etkinliğini doğrulamak için üç farklı vaka çalışması ele alınmıştır. Ayrıca, bu stratejilerin harmonik bozulmaları azaltma üzerindeki etkisi de incelenmiştir. İlk vaka çalışması, tipik bir ailenin 24 saat içindeki elektrikli cihaz kullanımını gösteren temel senaryoyu temsil etmektedir. İkinci ve üçüncü vaka çalışmaları ise sırasıyla DPSO ve DTLBO yöntemleri kullanılarak optimize edilmiş yük çizelgelerini içermektedir. Her bir vaka çalışması için cihazların kullanım aralıkları Tablo 10'da listelenmiştir.

Tablo 10. Farklı senaryolar için elektrikli cihazların çalışma süreleri

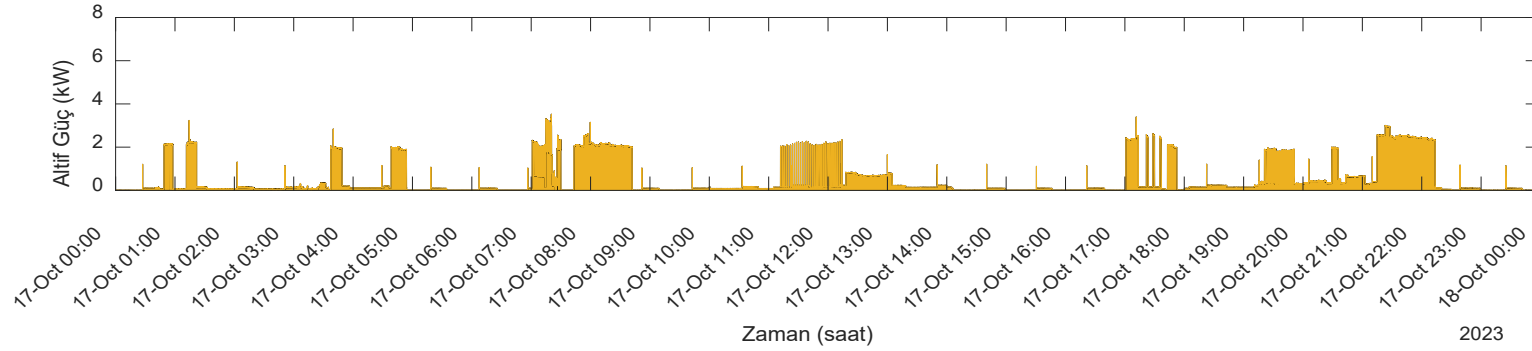
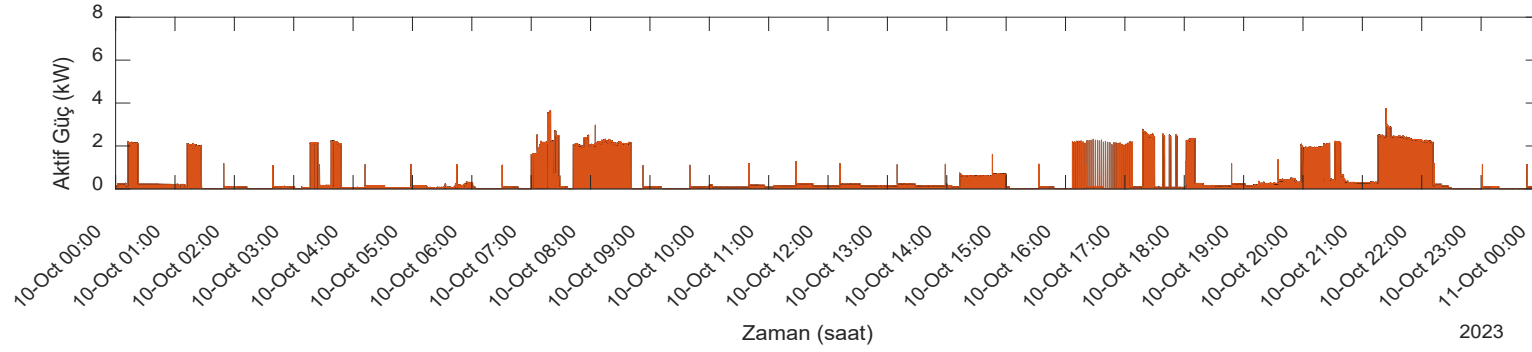
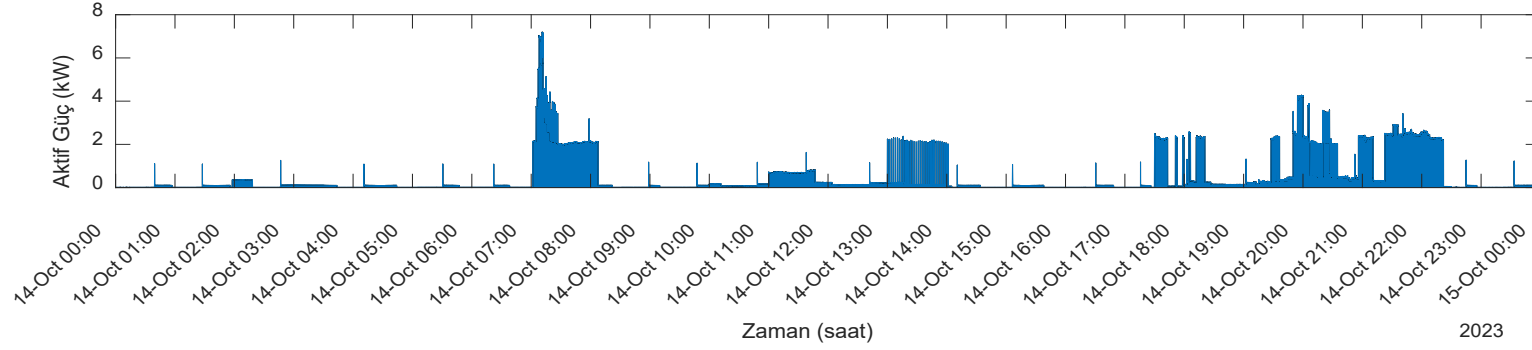
Cihaz	Temel Senaryo	D-PSO Senaryo	D-TLBO Senaryo
Air fryer	07:07-07:27, 20:05-20:35	07:00-07:20, 19:58-20:28	07:01-07:21, 19:21-19:51
Masaüstü bilgisayar	19:15-20:45	19:15-20:45	19:15-20:45
Bulaşık makinesi	19:42-21:12	00:00-01:27	03:25-04:54
Yumurta pişirici	07:06-07:19	07:16-07:29	07:01-07:14
Elektrikli fırın	17:30-18:10	17:18-17:58	17:01-17:41
CFL lamba (banyo)	21:15-21:40	21:08-21:33	21:07-21:32
CFL lamba (çocuk odası)	19:35-22:00	19:35-22:00	19:35-22:00
CFL lamba (misafir odası)	20:00-21:15	20:00-21:15	20:00-21:15
Saç kurutma makinesi	07:11-07:16, 21:31-21:36	07:53-07:58, 21:24-21:29	07:53-07:58, 21:23-21:28
Saç düzleştirici	07:15-07:25	07:06-07:16	07:20-07:30
Ütü	13:00-14:02	16:07-17:09	11:12-12:14
Dizüstü bilgisayar	19:10-22:10	19:10-22:10	19:10-22:10
LED TV	10:00-14:00, 18:00-22:20	10:00-14:00, 18:00-22:20	10:00-14:00, 18:00-22:20
LED lamba (mutfak)	19:40-21:10	19:40-21:10	19:40-21:10
LED lamba (oturma odası)	19:30-22:30	19:30-22:30	19:30-22:30
Elektrikli çırpıcı	19:55-20:00	19:48-19:53	19:11-19:16
Modem	00:00-24:00	00:00-24:00	00:00-24:00
Masaüstü monitör	19:15-20:45	19:15-20:45	19:15-20:45
Telefon şarj cihazı	20:40-22:26	20:40-22:26	20:40-22:26
Buzdolabı	00:00-24:00	00:00-24:00	00:00-24:00
Çay makinesi	07:05-07:14, 20:20-20:29	07:16-07:25, 20:32-20:41	07:15-07:24, 20:29-20:38
Termosifon	07:00-07:10, 21:20-21:30	07:42-07:52, 21:13-21:23	07:42-07:52, 21:12-21:22
Tost makinesi	7:08- 07:12	07:24-07:28	07:26-07:30
Elektrikli süpürge	11:00-11:47	14:13-15:00	12:18-13:05
Vantilatör	11:05-14:05, 18:05-22:05	11:05-14:05, 18:05-22:05	11:05-14:05, 18:05-22:05
Çamaşır makinesi	19:19-22:08	03:08-06:01	00:40-03:33

Gerçekçi varsayımlar yapabilmek için her bir cihazın çalışma süresinin farklı senaryolarda aynı olduğuna dikkat edilmesi önemlidir. Ancak, gerçek ölçümlerde özellikle su ısıtan cihazların (çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, termosifon ve su ısıtıcısı) döngülerini tamamlamak için harcadıkları süre ve tükettikleri güç, suyun sıcaklığına bağlı olarak biraz değişiklik göstermektedir. Kullanılan su, belediye şebekesinden geldiği için su sıcaklığının her gün aynı kalması zordur. Bu etkiyi en aza indirmek için, tüm senaryolar benzer hava koşulları dikkate alınarak yakın tarihlerde gerçekleştirilmiştir.

Vaka çalışmalarında, her bir senaryonun yük profili, yukarıda belirtilen ev aletlerinin yük çizelgelerine göre çalışması sonucunda evin ana elektrik hattından alınan gerçek ölçümlerle oluşturulmuştur.

3.3.1. Senaryoların PAR ve Maliyet Karşılaştırmaları

Temel senaryo, Senaryo 2 ve Senaryo 3'e ait toplam talep gücü eğrileri sırasıyla Şekil 37a, b ve c'de gösterilmektedir. Her üç senaryoda da, sadece modem ve buzdolabının birlikte çalıştığı ve bu ikisi dışında üçüncü bir cihazın çalışmadığı uzun dönemler gözlemlenmiştir. En düşük güç tüketimi, 24 saat boyunca sadece modem çalışırken, buzdolabı OFF konumunda ve başka hiçbir cihaz çalışmaz iken gerçekleşmiştir. Bu durumda güç tüketimi yaklaşık 15 W olmuştur. Bu tüketim, modem çalışması ve buzdolabı ile ankastre fırın gibi cihazların elektronik ekranını çalıştırmak, kontrol kartını ve diğer elektronik bileşenleri aktif tutmak için gereken güçtür. Buzdolabı ON konumunda ve modem dışında başka bir cihaz çalışmadığında ise yaklaşık 100 W güç tüketilmektedir.



Şekil 37. Toplam aktif güç eğrileri a) Temel Senaryo b) D-PSO Senaryo c) D-TLBO Senaryo

Temel senaryo için pik yük, gündüz 07:11'de, 7,193 kW'a ve 19:58'de, 4,280 kW'a ulaşmıştır. Bu, sabah ve akşam piklerinin büyüklüğü açısından üç senaryo arasında en yüksek yüklenme durumudur. Senaryo 2 ve Senaryo 3'te, optimizasyon yöntemleri kullanılarak daha dengeli bir yük profili elde edilmiştir. Senaryo 2'de pik yük, gündüz 07:19'da, 3,643 kW'a ve 21:24'te, 3,051 kW'a ulaşmıştır. Akşam 21.24.02'de buzdolabı devreye girdiğinde demeraj akımının etkisiyle kısa süreliğine 3,746 kW güç değeri ortaya çıkmaktadır. Ancak bu durumu sürekli bir yük olarak değerlendirilmemelidir. Senaryo 3'te pik yük sabah 07:20'de 3,527 kW'a ve akşam 21:24'te 3,010 kW'a ulaşmıştır. Akşam 17.11.29'da buzdolabı devreye girdiğinde demeraj akımının etkisiyle kısa süreliğine 3,399 kW güç değeri görülmüştür. Benzer şekilde 03:39.59 ve 01.14.20 saatlerinde buzdolabı devreye girdiğinde demeraj akımının etkisiyle yine sırasıyla 2,843 kW ve 2,772 kW güç değerleri ortaya çıkmıştır. Bu ani artışlar, sürekli yük olarak değerlendirilmemelidir.

Temel senaryo incelendiğinde, pik yüklerin sabah ve akşam saatlerinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Müşterilerin konfor seviyeleri dikkate alınarak yük kaydırma stratejisi uygulandığında, pik dönemlerdeki yükler daha az yoğun dönemlere kaydırılarak yük eğrisi yumuşatılabilmektedir. Bu sayede, pik dönemlerde şebekede aşırı yüklenmelerin önüne geçilebilir. Ayrıca, üç zamanlı tarifeye göre, puant zaman dilimindeki yükler daha düşük tarifeli zaman dilimlerine kaydırılarak faturalama maliyeti azaltılabilir.

Tablo 11'de gösterildiği üzere, DPSO ile yapılan yük çizelgeleme sonucunda PAR değeri temel senaryoya kıyasla sabah saatlerinde %47,359, akşam saatlerinde ise %25,908 oranında azalmıştır. DTLBO yöntemiyle ise PAR değerleri sabah saatlerinde %50,160 ve akşam saatlerinde %28,516 oranında azalmıştır.

Tablo 11. Peak ve PAR değerleri

Senaryolar	Öğleden önce tepe değeri		Öğleden sonra tepe değeri	
	kW	PAR	kW	PAR
Temel	7,193	14,921	4,280	8,878
D-PSO	3,643	7,854	3,051	6,578
D-TLBO	3,527	7,437	3,010	6,436

Ayrıca, yük kaydırma stratejisi, temel senaryoya kıyasla fatura maliyetlerinde de azalmaya yol açmıştır. Türkiye'de kullanılan üç zamanlı tarifeye göre, üç senaryonun enerji

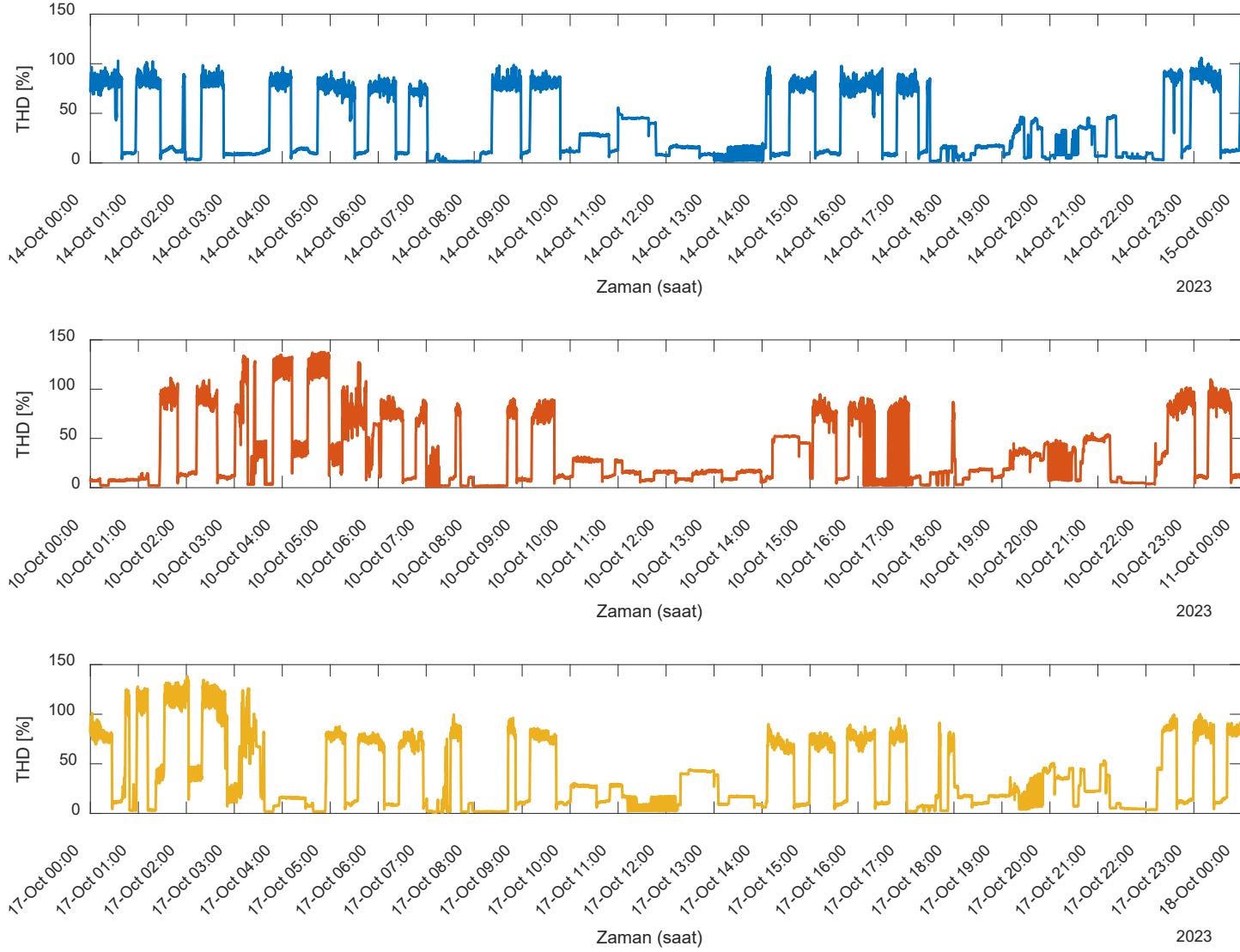
tüketim miktarları Tablo 12'de listelenmiştir. Bu durumda, fatura maliyetleri temel senaryoya (vaka 1) kıyasla DPSO ile optimize edilmiş senaryoda (vaka 2) %11,1, DTLBO ile optimize edilmiş senaryoda (vaka 3) ise %8,7 oranında azalmıştır.

Tablo 12. Mevcut elektrik tarife saatlerine göre enerji tüketimi

Senaryolar	06:00-17:00 (kWh)	17:00-22:00 (kWh)	22:00-06:00 (kWh)	Fatura Bedeli
Temel	4.478	5.684	1.405	27,55 TL
D-PSO	4.298	4.261	2.572	24,49 TL
D-TLBO	4.262	4.474	2.642	25,14 TL

3.3.2. Senaryoların Harmonik Bozulma Endeksleri ve Karşılaştırmaları

Şekil 38'de üç farklı senaryonun 1 saniye çözünürlükte 24 saatlik THD eğrileri, Şekil 39'da ise TDD eğrileri gösterilmektedir. Her üç senaryoda da modem ve buzdolabı gün boyunca birlikte çalışmıştır. Buzdolabı ON-OFF modunda çalışan bir cihazdır. Sadece bu iki cihazın çalıştığı zamanlarda, buzdolabı OFF modundayken modem çalışan tek cihazdır ve başka hiçbir elektrikli cihaz çalışmamaktadır. Bu çalışma durumunda modem düşük bir akıma sahip olmasına rağmen, ortalama THD değeri her üç senaryoda da yaklaşık %80'dir. Bu çalışma durumunda bazen %105'e varan THD değerleri gözlenmektedir. Buzdolabı ON modundayken (çalışan cihazlar sadece modem ve buzdolabıdır), ortalama THD değeri yaklaşık %10'a düşer. Aynı koşullar altında, buzdolabı OFF modundayken, ortalama TDD değeri yaklaşık %0,29'dur. Buzdolabı ON modundayken (sadece modem ve buzdolabı çalışıyor), TDD değeri yaklaşık %0,24'tür. THD değişimi buzdolabının ON veya OFF olmasına bağlı olarak %10 ila %105 arasında değişirken, TDD değeri %0,3'te neredeyse sabit kalmaktadır.



Şekil 38. THD eğrileri a) Temel Senaryo b) D-PSO Senaryo c) D-TLBO Senaryo

Bu örnekte gösterildiği gibi, düşük akımlarda yüksek THD değerlerinin oluşmasının ve küçük akım değişimlerinde THD değerindeki yüksek dalgalanmaların yaşanmasının nedeni, THD hesaplamasında temel bileşenin (I_1) paydada yer almasıdır. Diğer yandan TDD değerindeki çok küçük dalgalanmanın nedeni ise TDD hesaplamasında temel bileşen (I_1) yerine maksimum yük akımının (I_L) paydada bulunmasıdır. TDD formülündeki maksimum yük akımı referans standart olarak kullanılmıştır. Bu sayede, bir gün içinde farklı zaman noktalarındaki harmonik akımlar birleşik bir referansa sahiptir ve farklı zamanlardaki harmonik akım genlikleri karşılaştırılabilir. TDD'nin 24 saatlik değişim eğrisi, THD'ye göre harmonik akım değişimini daha anlamlı ve sezgisel bir şekilde yansıtabilir. Bu nedenle, konut sakinlerinin harmonik özelliklerini belirlemek için TDD'nin kullanılması pratik öneme sahiptir.

Saat 07:00'den itibaren yüksek güç tüketimi sergileyen cihazlar çalışmaya başladığında, THD değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. 24 saatlik TDD grafikleri incelendiğinde, aktif gücün artmasıyla TDD değerlerinin de arttığı görülmektedir. Aktif güç değişimi ile TDD değişimi arasındaki korelasyon dikkat çekicidir.

Şekil 39a'da saç kurutma makinesi 07:11'de çalıştırıldığında, sabah saatlerinde en yüksek TDD değerinin yaklaşık %9 olduğu görülmektedir.

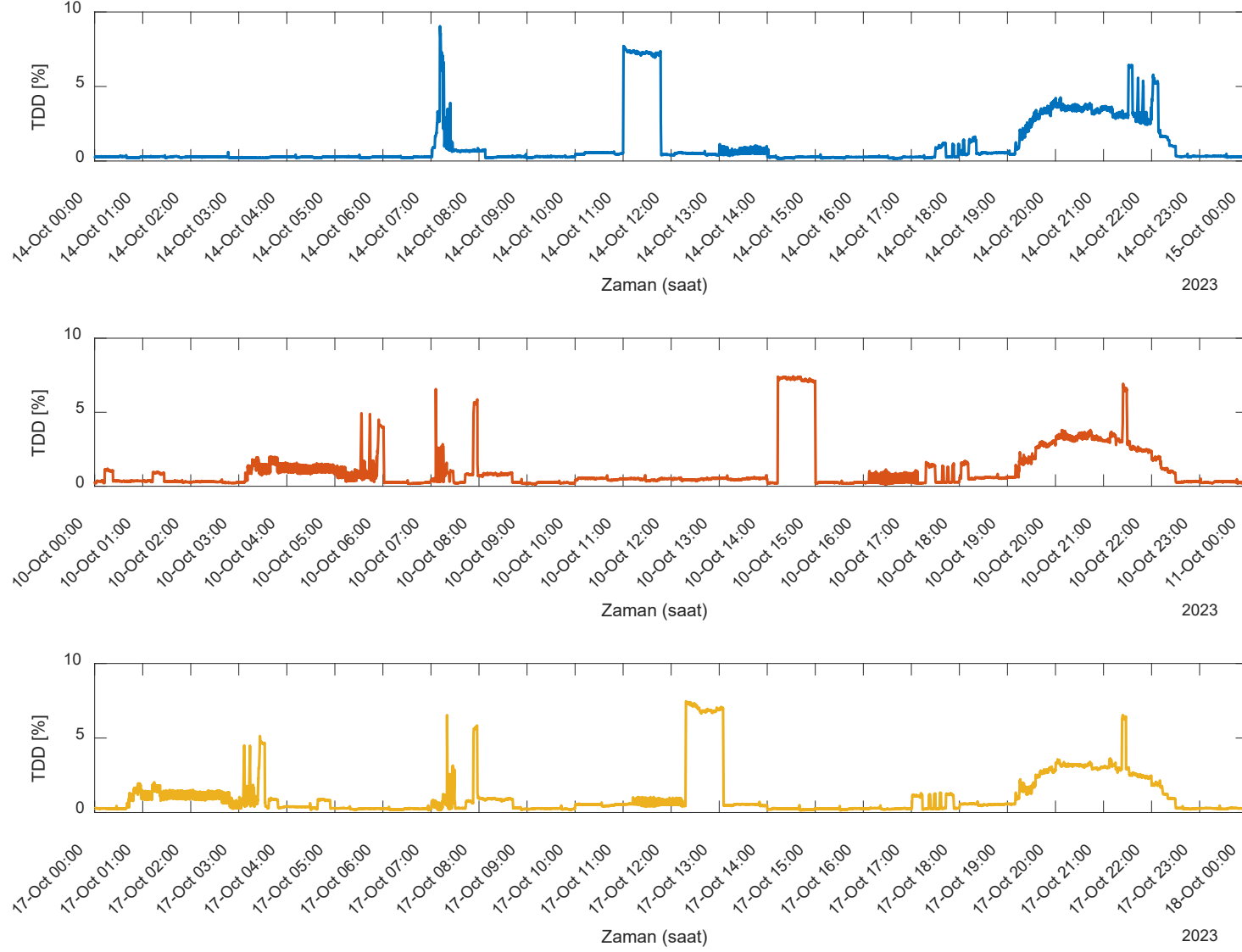
Şekil 39b'de ise saç düzleştirici 07:06'da ve saç kurutma makinesi 07:53'te çalıştırıldığında, TDD değerlerinin %5 sınırını aştığı gözlemlenmiştir. TDD değerindeki bu artış, bu iki cihazın çalışma zamanlarında üç farklı senaryoda da gözlemlenmiştir.

Şekil 39c'de, saç düzleştirici 07:20'de ve saç kurutma makinesi 07:53'te çalıştırıldığında, TDD değerlerinin %5 sınırını aştığı görülmektedir. Her üç senaryoda da öğle saatlerinde çalışan cihazların (LED TV, Vantilatör, Ütü ve Elektrikli süpürge) bireysel THD özellikleri 24 saatlik THD grafiğine yansımıştır. Elektrikli süpürge hariç, öğle saatlerinde çalışan cihazların THD değerleri düşüktür. Her üç senaryoda da elektrikli süpürgenin çalışması sırasındaki ortalama THD değeri yaklaşık %45'tir. Aynı zaman aralığındaki ortalama TDD değeri ise %7'dir. Bu TDD değeri, 24 saatlik TDD grafiğinde gözlemlenen en yüksek değerler arasında yer almaktadır. Elektrikli süpürgenin 3. harmonik akımı nispeten büyük bir sayısal değere sahiptir ve bu da yüksek TDD değerlerine neden olmaktadır. Akşam periyodunda her üç senaryoda da TDD değerinin aktif güçteki artışa paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 39a'da 21:31, Şekil 39b'de 21:24 ve Şekil 39c'de 21:23'te saç kurutma makinesi kullanımdayken %5 TDD sınır değerleri aşılmıştır.

Çamaşır makinesinin harmonik etkisi de önemlidir. Şekil 39a'da 19:19-22:08, Şekil 39b'de 03:08-06:01 ve Şekil 39c'de 00:40-03:33 saatleri arasında çalışan çamaşır makinesinin harmonik etkisi grafiklere yansımıştır. Çamaşır makinesi su ısıtma döngüsü sırasında şebekeden yüksek akım çekmektedir. Su ısıtma, omik yük çalışmasına bir örnektir. Bu durumda, ortalama THD değeri yaklaşık %4'tür. Durulama ve sıkma döngüleri sırasında ise THD değeri %120'yi aşmıştır. Bu döngüler esnasında çamaşır makinesi nispeten daha yüksek bir akım çektiğinde, ortalama TDD değeri yaklaşık %4'tür. Bu değer, 24 saatlik TDD ortalamasından yüksektir. Çamaşır makinesinin çalışması süresince ortalama TDD değeri yaklaşık %1,35'tir. THD'nin aksine, bu süre zarfındaki TDD değerleri önemli dalgalanmalara neden olmamıştır.

Her üç senaryonun aktif güç ve TDD grafikleri karşılaştırıldığında, aktif güçteki değişim ile TDD'deki değişim arasında belirgin bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kullanılan cihazların harmonik etkisi TDD sınır değerlerinin aşılmasına etki etmektedir. Bu çalışmada incelenen elektrikli süpürge, saç kurutma makinesi, saç düzleştirici ve çamaşır makinesinin durulama ve sıkma döngüleri sırasında TDD değerleri yüksek çıkmıştır. Bu durum, kullanılan cihazların harmonik özelliklerinin sistemin harmonik bozulmasını önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermektedir. Özellikle yüksek güç tüketimine sahip cihazlar arasında yüksek THD'ye sahip cihazların olduğu görülmektedir. Bu cihazların harmonik değerleri, sistemin harmonik bozulma endeksini gösteren TDD değerinde belirleyici rol oynamaktadır.



Şekil 39. TDD eğrileri a) Temel Senaryo b) D-PSO Senaryo c) D-TLBO Senaryo

TDDi ile ilgili vaka çalışmaları için yüzde sınırları Tablo 13'te gösterilmektedir. Senaryoların hiçbirisi %12 sınırını aşmamıştır. %8 sınırı yalnızca temel senaryoda aşılmıştır. DPSO ve DTLBO optimizasyonları sonucunda elde edilen senaryolar %8 sınırının altında kalmıştır. %5 sınırında, DPSO ve DTLBO ile optimize edilen senaryolar, temel senaryodan daha iyi performans göstermiştir.

Tablo 13. TDD sınırlandırmaları

Senaryolar	5%		8%		12%	
	%	Aşım Sayısı	%	Aşım Sayısı	%	Aşım Sayısı
Temel	95,57	3825	99,93	59	100	0
D-PSO	96,04	3418	100	0	100	0
D-TLBO	96,03	3426	100	0	100	0

TDDi ile ilgili vaka çalışmaları için aşım sayıları da Tablo 13'te verilmiştir. Bu tablodan, %8 sınırı 1 saniye bazında değerlendirildiğinde; temel senaryoda %8 sınırının 59 kez aşıldığı, DPSO ve DTLBO'lu senaryolarda ise %8 sınırının aşılmadığı görülebilir. Temel senaryodaki %5 sınırının aşılması, diğer senaryolardaki %5 sınırının aşılmasından yaklaşık 400 daha fazladır. Böylece, yük kaydırma stratejisi ile elde edilen diğer önemli kazanımlara ek olarak TDDi belirgin bir ölçüde iyileştirilmiştir. Bu nedenle, yük kaydırma stratejileri özellikle güç kalitesi gereksinimleri için umut verici bir çözüm sunabilir. Sonuç olarak bu çalışmanın bulguları, DSM yöntemlerinin gerçek zamanlı ölçümler ile IEEE standart limitlerine göre harmonik bozulmanın sistem üzerindeki etkisini gösteren TDD değerini azaltabileceğini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Saf sinüsoidal kaynaklar tarafından çalıştırılan doğrusal olmayan yükler veya sinüsoidal olmayan kaynaklar tarafından çalıştırılan doğrusal yükler dağıtım şebekesinde harmonikler oluşturur. Son yıllarda, doğrusal olmayan yük özelliklerine sahip ev aletlerinin hızla artan penetrasyonu nedeniyle konut dağıtım şebekelerindeki harmonik akım miktarı artmıştır. Bu durum, dağıtım sistemi operasyonlarındaki en önemli güç kalitesi sorunlarından biri olan harmonik kirliliğine neden olmaktadır. Harmonikleri belirli sınırlar içinde tutmak için toplam harmonik bozulma (THD) ve toplam talep bozulma (TDD) seviyeleri IEEE 519 ve IEC 61000 gibi uluslararası standartlar tarafından belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Trabzon'da dört kişilik bir ailenin yaşadığı bir evde, günümüzde evlerde yaygın olarak kullanılan 26 farklı cihazın (hem doğrusal hem de doğrusal olmayan) gerçek harmonik ölçümleri yapılmıştır. Her bir elektrikli cihazın aktif güç, aktif enerji ve harmonik değerlerini gösteren veriler 1 saniye çözünürlüklü ölçümlerden elde edilmiştir. Ayrıca, bir enerji yönetimi konsepti sağlamak için, elektrikli cihazların optimum günlük yük çizelgesini elde etmek için DPSO ve DTLBO optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu optimizasyon yöntemleri kullanılarak yük çizelgeleme, yüksek çözünürlüklü veriler ve 1 dakikalık optimizasyon zaman aralıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ev yüklerinin çok amaçlı optimizasyonu, kaydırılabilir yükleri kontrol ederek PAR değerini ve elektrik faturasını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Cihaz çizelgeleme kısıtlamaları, kullanıcı konforundaki memnuniyetsizliği en aza indirmek için kullanıcı tarafından belirlenmiştir. Farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilen yük kaydırma stratejilerinin, ilgili harmonik standartların karşılanması açısından güç kalitesi gereksinimleri üzerindeki etkisini araştırmak için çeşitli vaka çalışmaları ele alınmıştır. Bu vaka çalışmalarının her biri için 24 saatlik güç verileri, aktif enerji, TDD ve THD verileri, belirtilen çizelgeye göre gerçek ölçümlerden elde edilmiştir. Bu yaklaşım, modelleme hatalarını önler ve gerçekçi karşılaştırmalara ve sonuçlara olanak tanır. Çalışma ayrıca gerçek bir evde gerçek cihazlarla ölçümler yaparak DSM stratejilerinin gerçek dünya senaryolarında nasıl çalıştığını gösterir. Sonuçlar daha sonra fatura maliyeti, PAR değeri ve harmonik azaltım açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma, DPSO ile yük çizelgelemenin temel senaryoya kıyasla sabah döneminde PAR değerinde %47,359'luk ve akşam döneminde %25,908'lik bir düşüşe yol açtığını göstermektedir. Benzer şekilde, DTLBO, temel senaryo ile karşılaştırıldığında PAR

değerinde sabah döneminde %50,160 ve akşam döneminde %28,516'lık bir azalma ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca, yük kaydırma stratejisinin uygulanması, temel senaryoya kıyasla faturalama giderlerinde bir azalma ile sonuçlanmıştır. Türkiye'de kullanılan 3 zamanlı tarife sistemine göre, faturalama maliyeti Vaka 1'e (temel senaryo) kıyasla Vaka 2'de (DPSO) %11,1 ve Vaka 3'te (DTLBO) %8,7 oranında azalmıştır. Yük kaydırma stratejisi uygulanarak harmonik bozulma seviyesinin IEEE 519 standardı açısından uygun değerlerde olması hedeflenmiştir. Konut son kullanıcıları için trafonun farklı I_{sc} akım değerleri dikkate alınarak, TDDi değerleri %5, %8 ve %12 TDDi sınırlamaları sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir. TDDi ile ilgili vaka çalışmaları için yüzde sınırları göz önüne alındığında, senaryoların hiçbiri %12 sınırını aşmamıştır. Sadece temel senaryo %8 sınırını aşmıştır. DPSO ve DTLBO optimizasyonları sonucunda elde edilen senaryolarda TDDi değeri %8 sınır değerinin altına düşmüştür. %5 sınır değerinde DPSO ve DTLBO, temel senaryoya göre daha iyi performans göstermiştir. Vaka çalışmalarında, TDDi için %8 sınırı, 1 saniyelik çözünürlükte değerlendirildiğinde temel senaryoda 59 kez aşılmıştır. Ancak, DPSO ve DTLBO senaryolarında %8 sınırı aşılmamıştır. Temel senaryodaki %5 sınırının aşılması, diğer senaryolardaki %5 sınırının aşılmasından yaklaşık 400 daha fazla olmuştur. Yük kaydırma stratejisi, TDDi harmonik bozulma endeksini iyileştirmiş ve önemli faydalar sağlamıştır. Bu durum, yük kaydırma stratejilerinin güç kalitesi gereksinimleri için umut verici bir çözüm olabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, DSM yöntemlerinin IEEE standart limitlerine göre harmonik bozulmanın sistem üzerindeki etkisini gösteren TDD değerini gerçek zamanlı ölçümler yoluyla azaltılabileceğini gösteren literatürdeki ilk çalışmadır.

5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara dayanarak, gelecekteki araştırmacılar ve uygulayıcılar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Önerilen şema sadece bir ev için uygulanmış olsa da, gelecekteki çalışmalar farklı tür ve sayıda konut son kullanıcılarını içerecek şekilde mahalle düzeyinde bir mikro şebeke sistemi çerçevesinde değerlendirilebilir.
- Bu çalışmada konut müşterileri için veriler sunulmuştur. Gelecekteki araştırmalarda endüstriyel ve ticari müşterilerin verileri kullanılarak saha çalışmaları yapılabilir.
- Müşterilerin talep tarafı yönetimi ve harmonik azaltımına katkıları göz önünde bulundurularak, bu katkılara göre farklı fiyat indirimleri sunan çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abidin, M. N. (2006). IEC 61000-3-2 harmonics standards overview. *Schaffner EMC Inc., Edison, NJ, USA*.
- Ahmed, E. F., Said, E.-S. S., Mageed, H. M., & Ammar, A. A. (2022). A novel interactive technique for load current harmonic reduction for any randomly utilized household equipment. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 13(4), 2159.
- Ahmed, M. S., Mohamed, A., Khatib, T., Shareef, H., Homod, R. Z., & Abd Ali, J. (2017). Real time optimal schedule controller for home energy management system using new binary backtracking search algorithm. *Energy and Buildings*, 138, 215--227.
- Ayan, O., & Turkay, B. E. (2022). A comparative study on harmonic analysis and thermal performance of different types of lamps for residential building. *Energy Reports*, 8, 932--945.
- Bajagain, S., & Dubey, A. (2021). Harmonic Distortion Analysis in North American Residential Power Distribution Systems. *2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)* (s. 1--5). IEEE.
- Balasubramaniam, P., & Prabha, S. (2015). Power quality issues, solutions and standards: A technology review. *Journal of applied Science and Engineering*, 18(4), 371--380.
- Bissey, S., Jacques, S., & Le Bunetel, J.-C. (2017). The fuzzy logic method to efficiently optimize electricity consumption in individual housing. *Energies*, 10(11), 1701.
- Blooming, T. M., & Carnovale, D. J. (2006). Application of IEEE Std 519-1992 harmonic limits. *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* (s. 1--9). IEEE.
- Bottura, F. B., Oleskovicz, M., Le, T. D., & Petit, M. (2019). Optimal positioning of power quality meters for monitoring potential conditions of harmonic resonances in a MV distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(5), 1885--1897.
- Chen, Z., Chen, Y., He, R., Liu, J., Gao, M., & Zhang, L. (2022). Multi-objective residential load scheduling approach for demand response in smart grid. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103530.
- CODE, P., & PRIX, C. (2008). Electromagnetic compatibility (EMC)--Part 3-6: Limits--Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.
- Çiçek, A., Erenoğlu, A. K., Erdinç, O., Bozkurt, A., Taşcıkaraoğlu, A., & Catalão, J. P. (2021). Implementing a demand side management strategy for harmonics mitigation in a smart home using real measurements of household appliances. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106528.

- Derakhshan, G., Shayanfar, H. A., & Kazemi, A. (2016). The optimization of demand response programs in smart grids. *Energy Policy*, 94, 295--306.
- Diao, L., Sun, Y., Chen, Z., & Chen, J. (2017). Modeling energy consumption in residential buildings: A bottom-up analysis based on occupant behavior pattern clustering and stochastic simulation. *Energy and Buildings*, 147, 47--66.
- Ding, Y., Lihakanga, R., Correia, R., Goussetis, G., & Carvalho, N. B. (2020). Harmonic suppression in frequency shifted backscatter communications. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 990--999.
- Djordjevic, S., & Simic, M. (2018). Nonintrusive identification of residential appliances using harmonic analysis. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26(2), 780--791.
- Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 1(4), 28--39.
- Du, Y. F., Jiang, L., Li, Y., & Wu, Q. (2016). A robust optimization approach for demand side scheduling considering uncertainty of manually operated appliances. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 743--755.
- Eduful, G., Jackson, E. A., & Cole, J. E. (2014). Harmonic emission limits and selecting PCC location based on the type of distribution system. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 1, s. 301--306.
- F II, I. (1993). IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. *New York, NY, USA*, 1--1.
- Farooq, H., Zhou, C., & Farrag, M. E. (2013). Analyzing the harmonic distortion in a distribution system caused by the non-linear residential loads. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2(1), 46--51.
- Farzambehboudi, Y., Erdinç, O., Boynueğri, A. R., Uçun, L., & AliÖz, M. (2018). Economic impact analysis of load shifting in a smart household. *2018 International conference on smart energy systems and technologies (SEST)* (s. 1--5). IEEE.
- Fernandes, F., Morais, H., Vale, Z., & Ramos, C. (2014). Dynamic load management in a smart home to participate in demand response events. *Energy and Buildings*, 82, 592--606.
- Fischer, D., Wolf, T., Scherer, J., & Wille-Haussmann, B. (2016). A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households. *Energy and Buildings*, 124, 120--128.
- Gellings, C. W. (1985). The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, 73(10), 1468--1470.
- Ghorbani, M. J., & Mokhtari, H. (2015). Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 5(1).

- Ghosh, S., & Chatterjee, D. (2021). Non-intrusive identification of harmonic polluting loads in a smart residential system. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26, 100446.
- Haider, H. T., See, O. H., & Elmenreich, W. (2016). A review of residential demand response of smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 166--178.
- Hardie, S., & Watson, N. (2010). The effect of new residential appliances on Power Quality. *2010 20th Australasian universities power engineering conference*, 1--6.
- Holland, J. H. (1973). Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. *SIAM journal on computing*, 2(2), 88--105.
- Høverstad, B. A., Tidemann, A., Langseth, H., & Öztürk, P. (2015). Short-term load forecasting with seasonal decomposition using evolution for parameter tuning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4), 1904--1913.
- Hu, Z., Han, Y., Zalhaf, A. S., Zhou, S., Zhao, E., & Yang, P. (2023). Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: A comprehensive overview. *Electric Power Systems Research*, 218, 109234.
- Huang, Y., Zhang, J., Mo, Y., Lu, S., & Ma, J. (2020). A hybrid optimization approach for residential energy management. *IEEE Access*, 8, 225201--225209.
- Iqbal, H. K., Malik, F. H., Muhammad, A., Qureshi, M. A., & Chishti, A. R. (2021). A critical review of state-of-the-art non-intrusive load monitoring datasets. *Electric Power Systems Research*, 192, 106921.
- Issi, F., & Kaplan, O. (2018). The determination of load profiles and power consumptions of home appliances. *Energies*, 11(3), 607.
- Jardini, J. A., Tahan, C. M., Gouvea, M. R., Ahn, S. U., & Figueiredo, F. (2000). Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers. *IEEE Transactions on power delivery*, 15(1), 375--380.
- Javaid, N., Ullah, I., Akbar, M., Iqbal, Z., Khan, F. A., Alrajeh, N., & Alabed, M. S. (2017). An intelligent load management system with renewable energy integration for smart homes. *IEEE access*, 5, 13587--13600.
- Jiang, X., & Wu, L. (2020). A residential load scheduling based on cost efficiency and consumer's preference for demand response in smart grid. *Electric Power Systems Research*, 186, 106410.
- Jordehi, A. R. (2019). Optimisation of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 103, 308--319.
- Kalair, A., Abas, N., Kalair, A. R., Saleem, Z., & Khan, N. (2017). Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152--1187.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*. 4, s. 1942--1948. IEEE.

- Kewo, A., Manembu, P. D., & Nielsen, P. S. (2023). A Rigorous Standalone Literature Review of Residential Electricity Load Profiles. *Energies*, 16(10), 4072.
- Khan, A. R., Mahmood, A., Safdar, A., Khan, Z. A., & Khan, N. A. (2016). Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1311--1322.
- Khan, I., Vijay, A., & Doolla, S. (2021). Nonlinear load harmonic mitigation strategies in microgrids: state of the art. *IEEE Systems Journal*, 16(3), 4243--4255.
- Kinhekar, N., Padhy, N. P., & Gupta, H. O. (2014). Multiobjective demand side management solutions for utilities with peak demand deficit. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 612--619.
- Kit, M. Y., Tse, C. N., & Lau, W. (2012). A study on the effects of voltage distortion on current harmonics generated by modern smps driven home appliances in smart grid network.
- Kumar, R., Bansal, H. O., Gautam, A. R., Mahela, O. P., & Khan, B. (2022). Experimental investigations on particle swarm optimization based control algorithm for shunt active power filter to enhance electric power quality. *IEEE Access*, 10, 54878--54890.
- Liu, H., & Niu, J. (2021). Study on the influence of nonlinear load on complex power grid structure. *2021 5th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT)* (s. 455--459). IEEE.
- Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: A review. *Energies*, 13(21), 5792.
- Mahmood, D., Javaid, N., Alrajeh, N., Khan, Z. A., Qasim, U., Ahmed, I., & Ilahi, M. (2016). Realistic scheduling mechanism for smart homes. *Energies*, 9(3), 202.
- Manzoor, A., Javaid, N., Ullah, I., Abdul, W., Almogren, A., & Alamri, A. (2017). An intelligent hybrid heuristic scheme for smart metering based demand side management in smart homes. *Energies*, 10(9), 1258.
- Masoum, M. A., Moses, P. S., & Masoum, A. S. (2008). Derating of asymmetric three-phase transformers serving unbalanced nonlinear loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2033--2041.
- Menos-Aikateriniadis, C., Lamprinos, I., & Georgilakis, P. S. (2022). Particle swarm optimization in residential demand-side management: A review on scheduling and control algorithms for demand response provision. *Energies*, 15(6), 2211.
- Michalec, Ł., Jasiński, M., Sikorski, T., Leonowicz, Z., Jasiński, Ł., & Suresh, V. (2021). Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network--review and case study. *Energies*, 14(12), 3665.

- Mohsenian-Rad, A.-H., Wong, V. W., Jatskevich, J., Schober, R., & Leon-Garcia, A. (2010). Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE transactions on Smart Grid*, 1(3), 320--331.
- Muscas, C. (2010). Power quality monitoring in modern electric distribution systems. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 13(5), 19--27.
- Paatero, J. V., & Lund, P. D. (2006). A model for generating household electricity load profiles. *International journal of energy research*, 30(5), 273--290.
- Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*, 8, 3727--3766.
- Paterakis, N. G., Erdinç, O., & Catalão, J. P. (2017). An overview of Demand Response: Key-elements and international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 871--891.
- Philipo, G. H., Kakande, J. N., & Krauter, S. (2022). Neural Network-Based Demand-Side Management in a Stand-Alone Solar PV-Battery Microgrid Using Load-Shifting and Peak-Clipping. *Energies*, 15(14), 5215.
- Pipattanasomporn, M., Kuzlu, M., Rahman, S., & Teklu, Y. (2013). Load profiles of selected major household appliances and their demand response opportunities. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 742--750.
- Purwadi, A., Heryana, N., Nurafiat, D., Mawardi, A., & Pranyoto, M. F. (2011). A study of harmonic impacts on high voltage, medium voltage and low voltage networks in PT. PLN distribution system. *11th International conference on electrical power quality and utilisation* (s. 1--7). IEEE.
- Rao, R., Savsani, V., & Vakharia, D. (2011). Teaching-learning-based optimization, Constrained benchmark functions, Mechanical design optimization. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315.
- Rawa, M. J., Thomas, D. W., & Sumner, M. (2014). Experimental measurements and computer simulations of home appliances loads for harmonic studies. *2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation* (s. 340--344). IEEE.
- Rezaee Jordehi, A. (2020). Enhanced leader particle swarm optimisation (ELPSO): A new algorithm for optimal scheduling of home appliances in demand response programs. *Artificial Intelligence Review*, 53(3), 2043--2073.
- Rodríguez-Pajarón, P., Caro, E., Hernández, A., & Izzeddine, M. (2022). A Bottom-up model for simulating residential harmonic injections. *Energy and Buildings*, 265, 112103.

- Rodríguez-Pajarón, P., Hernández, A., Mendonça, H., & Milanović, J. V. (2022). Residential Harmonic Injection Models Based on Field Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 38(1), 575--587.
- Saadat, A., Hooshmand, R.-A., Kiyoumars, A., & Tadayon, M. (2019). Harmonic pricing in power systems based on identifying the appropriate contribution of customers. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(1), 73--80.
- Schwanz, D., Bollen, M., & Larsson, A. (2016). A review of solutions for harmonic mitigation. *2016 17th International conference on harmonics and quality of power (ICHQP)* (s. 30--35). IEEE.
- Senthil Kumar, R., Surya Prakash, R., Yokesh Kiran, B., & Sahana, A. (2019). Reduction and elimination of harmonics using power active harmonic filter. *Int. J. Recent Technol. Eng*, 8.
- Setlhaolo, D., Xia, X., & Zhang, J. (2014). Optimal scheduling of household appliances for demand response. *Electric Power Systems Research*, 116, 24--28.
- Sharda, S., Singh, M., & Sharma, K. (2021). Demand side management through load shifting in IoT based HEMS: Overview, challenges and opportunities. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102517.
- Sharma, H., Rylander, M., & Dorr, D. (2013). Grid impacts due to increased penetration of newer harmonic sources. *2013 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)* (s. B5--1). IEEE.
- Shin, C., Lee, E., Han, J., Yim, J., Rhee, W., & Lee, H. (2019). The ENERTALK dataset, 15 Hz electricity consumption data from 22 houses in Korea. *Scientific data*, 6(1), 193.
- Soares, A., Gomes, Á., & Antunes, C. H. (2014). Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 490--503.
- Stones, J., & Collinson, A. (2001). Power quality. *power engineering journal*, 15(2), 58--64.
- Sun, Y., Xie, X., Wang, Q., Zhang, L., Li, Y., & Jin, Z. (2020). A bottom-up approach to evaluate the harmonics and power of home appliances in residential areas. *Applied Energy*, 259, 114207.
- Testa, A., Akram, M., Burch, R., Carpinelli, G., Chang, G., Dinavahi, V., . . . others. (2007). Interharmonics: Theory and modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(4), 2335--2348.
- Tezde, E. I., Okumus, H. I., & Savran, I. (2019). Two-stage energy management of multi-smart homes with distributed generation and storage. *Electronics*, 8(5), 512.
- Tofoli, F. L., Sanhueza, S. R., & de Oliveira, A. (2006). On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(2), 971--978.

- Uttama Nambi, A. S., Reyes Lua, A., & Prasad, V. R. (2015). Loced: Location-aware energy disaggregation framework. *Proceedings of the 2nd acm international conference on embedded systems for energy-efficient built environments*, (s. 45--54).
- Van Laarhoven, P. J., Aarts, E. H., van Laarhoven, P. J., & Aarts, E. H. (1987). *Simulated annealing*. Springer.
- Vinogradov, A., Vinogradova, A., & Bolshev, V. (2020). Analysis of the quantity and causes of outages in LV/MV electric grids. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 6(3), 537--542.
- Wang, K.-P., Huang, L., Zhou, C.-G., & Pang, W. (2003). Particle swarm optimization for traveling salesman problem. *Proceedings of the 2003 international conference on machine learning and cybernetics (IEEE cat. no. 03ex693)*. 3, s. 1583--1585. IEEE.
- Wang, Y., Yong, J., Sun, Y., Xu, W., & Wong, D. (2016). Characteristics of harmonic distortions in residential distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(3), 1495--1504.
- Xiao, X., Li, Z., Wang, Y., & Zhou, Y. (2020). A practical approach to estimate harmonic distortions in residential distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(3), 1418--1427.
- Zhu, J., Lin, Y., Lei, W., Liu, Y., & Tao, M. (2019). Optimal household appliances scheduling of multiple smart homes using an improved cooperative algorithm. *Energy*, 171, 944--955.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Çağlayan İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2002 yılında Trabzon Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2002-2003 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2007 yılında bu bölümden mezun oldu. 2007-2017 yılları arasında Türk Telekomünikasyon A.Ş.'de çalıştı. 2017 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon MYO Elektrik ve Enerji Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans tezini 2018 yılında tamamladı. Evli ve 3 çocuk babasıdır.

Tüysüz, M., Okumuş, H. I., Aymaz, Ş., & Çavdar, B., (2024). Real-time application of a demand-side management strategy using optimization algorithms. *APPLIED ENERGY*, vol.368, 1-17.