

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GÖMÜLÜ SİSTEMLER İLE YARI-GİRİŞİMSEL YÜK İZLEME
KULLANARAK EV ALETLERİNİN ENERJİ TÜKETİMİNİN TAKİBİ VE
ENERJİ TASARRUFU ÖNERİLERİNİN SUNULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Şamil AYTEKİN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**GÖMÜLÜ SİSTEMLER İLE YARI-GİRİŞİMSEL İZLEME KULLANARAK EV
ALETLERİNİN ENERJİ TÜKETİMİNİN TAKİBİ VE ENERJİ TASARRUFU
ÖNERİLERİNİN SUNULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali Şamil AYTEKİN
(504221036)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aydın Tarık Zengin

ŞUBAT 2026

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**MONITORING HOUSEHOLD APPLIANCES' ENERGY CONSUMPTION
USING EMBEDDED SYSTEMS WITH SILM AND PROVIDING ENERGY-
SAVING RECOMMENDATIONS**

M.Sc. THESIS

**Ali Şamil AYTEKİN
(504221036)**

Department of Electrical Engineering

Electrical Engineering Program

Thesis Advisor: Assis. Prof. Dr. Aydın Tarık Zengin

FEBRUARY 2026

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504221036 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ali Şamil AYTEKİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GÖMÜLÜ SİSTEMLER İLE YARI-GİRİŞİMSSEL İZLEME KULLANARAK EV ALETLERİNİN ENERJİ TÜKETİMİNİN TAKİBİ VE ENERJİ TASARRUFU ÖNERİLERİNİN SUNULMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Aydın Tarık Zengin**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Duygu Bayram Kara**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İsmail Okan Atakişi
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Aralık 2025**
Savunma Tarihi : **4 Şubat 2026**





Aileme ve sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, konutlarda enerji tüketiminin cihaz düzeyinde izlenebilmesi ve kullanıcıya enerji tasarrufuna yönelik öneriler sunulabilmesi amacıyla yarı girişimsel yük izleme (SILM) yaklaşımını temel alan ve gerçek zamanlı özellik çıkarımına dayalı bir sistemin geliştirilmesine odaklanmıştır. Çalışma kapsamında, farklı güç/işaret özellikleri ile bunları bütünleştiren karar mekanizmaları bir araya getirilerek sahada uygulanabilir bir çözüm ortaya konmuştur.

Bu çalışmanın yürütülmesinde değerli bilgi ve yönlendirmeleriyle katkı sağlayan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Aydın Tarık Zengin'e teşekkür ederim. Süreç boyunca destek olan tüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve her koşulda yanımda olan aileme şükranlarımı sunarım.

Ocak 2026

Ali Şamil AYTEKİN
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Küresel Enerji Eğilimleri ve Sürdürülebilirlik İhtiyacı	1
1.2 Konut Sektöründe Enerji Tüketiminin Rolü	1
1.3 Cihaz Seviyesinde İzleme ve Kullanıcı Farkındalığı	2
1.4 Mevcut Yöntemlerin Sınırlılıkları: Akıllı Prizler ve Sayaçlar	2
1.5 Enerji İzleme Sistemlerindeki Mevcut Sorunlar ve İhtiyaçlar	3
1.6 Yarı-Girişimsel İzleme Yöntemine Yönelik Gereksinim	3
1.7 Gömülü Sistemlerin Rolü ve Teknik Yetenekleri	3
1.8 Tepe-Kararlı Farkı (Peak-to-Steady Difference) Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı	4
1.9 Harmonik Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı	5
1.10 Sonlu Durum Makinesi (FSM) ve Cihaz Tanıma	6
1.11 Gerilim-Akım (V-I) Grafiklerinin Cihaz Tanımındaki Rolü	7
1.12 Gömülü Sistem Tabanlı Karar Destek Mekanizması	7
1.13 Kablosuz Haberleşme ve IoT Entegrasyonu	8
1.14 Çalışmanın Yeniliği ve Katkıları	9
1.15 Geleceğe Dönük Uygulanabilirlik ve Genişleme Potansiyeli	10
2. ENERJİ TÜKETİMİNİN İZLENMESİNE YÖNELİK YÖNTEMLER VE TEKNOLOJİLER	13
2.1 Girişimsel Yük İzleme (Intrusive Load Monitoring)	13
2.2 Girişimsel Olmayan Yük İzleme (Non-Intrusive Load Monitoring)	15
2.3 Yarı Girişimsel Yük İzleme (Semi Intrusive Load Monitoring)	17
2.4 Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi	19
2.5 Lineer ve Lineer Olmayan Cihazlar	20
2.5.1 Basit lineer cihazlar	21
2.5.2 Karmaşık (çok modlu) lineer cihazlar	22
2.5.3 Lineer olmayan (nonlinear) cihazlar	22
2.6 Mutlak Değer Tabanlı Kenar Tespiti ile Grup Bazlı Eşik Uygulaması	24
2.7 Faz Kayması Tabanlı Reaktif Güç Hesabı ve Cihaz Tanıma	25
2.8 Ölçüm Doğruluğunu Artırmaya Yönelik Filtreleme Yöntemleri	27
2.8.1 Medyan filtre	27
2.8.2 Hareketli ortalama filtresi	28
2.8.3 Klasik hareketli ortalama hesabı ve zaman karmaşıklığı	28

2.8.4 Kayan toplam (sliding sum) ile optimize hareketli ortalama ve zaman karmaşıklığı.....	29
2.9 Harmonik Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı.....	29
2.9.1 Harmonik genlik ve faz vektörleri	30
2.9.2 Harmonik süperpozisyonu ve cihazların birlikte çalışması.....	31
2.9.3 Toplam harmonik bozulma (THD)	32
2.9.4 Harmonik bileşenlerin ayırt edici gücü	32
2.10 Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine) Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı.....	33
2.10.1 FSM'nin matematiksel tanımı	33
2.10.2 Güç değişimine dayalı giriş vektörü.....	34
2.10.3 Davranış imzası ve sıralı yapı	35
2.10.4 FSM'nin rolü: doğrulama ve maskeleye	35
2.11 Gerilim-Akım (V-I) Grafiklerinden Özellik Çıkarımı	36
2.11.1 V-I alanı (Loop area)	39
2.11.2 Faz ötelenmiş V-I alanına dayalı özellikler	40
2.11.3 Döngü genişliği: Loop width	41
2.11.4 Simetri oranı: Sym ratio	41
2.11.5 Kompaktlık: Compactness	42
2.11.6 Düşük cihaz yoğunluğuna sahip gruplarda tablo tabanlı cihaz tespiti	42
2.12 Akım Tabanlı Genlik ve Asimetri Özellikleri	43
2.12.1 Tepe faktörü: Crest current	43
2.12.2 Güç faktörü tahmini: Power factor estimation	44
2.12.3 Yarım dalga RMS farkı: Half wave RMS difference	44
2.13 Tepe-Kararlı Durum Farkı (Peak-to-Steady Difference, PSD) Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı	45
2.13.1 PSD tanımı	45
2.13.2 Ayrık zamanlı uygulama	46
2.14 Empedans Tabanlı Cihaz İzleme Yöntemi ve Şebeke Geriliminin Etkisi.....	46
2.14.1 Gerilim dalgalanmalarına karşı güç aralığı ölçekleme yaklaşımı	47
2.15 Yarı-Girişimsel Yük İzlemede Sensör-Kanal Azaltma ve Kombinasyonel İzleme Grupları.....	48
2.15.1 Sensör-topoloji ilişkisi.....	48
2.15.2 Zamana bağlı akım farkı ile grup çıkarımı	49
2.15.3 Kombinasyonel izleme grupları	50
2.16 Genel Akış Diyagramı	51
3. ÖNERİLEN YÖNTEM VE SİSTEM TASARIMI	53
3.1 Genel Sistem Mimarisi	53
3.2 Gömülü Donanım Yapısı ve Bileşenler.....	54
3.2.1 STM32F407VG mikrodenetleyici kartı	54
3.2.2 Akım ve gerilim sensörleri	55
3.2.3 Sinyal toplama ve adc yapılandırması.....	56
3.2.4 Zigbee haberleşme modülü ve kablosuz veri aktarımı.....	57
3.3 Sinyal İşleme ve Gürültü Azaltma	57
3.3.1 Medyan filtresi ile ani parazit bastırma.....	58
3.3.2 Hareketli ortalama filtresi ile gürültü yumuşatma.....	58
3.3.3 Filtrelenmiş ve filtrelenmemiş sinyallerin karşılaştırılması	58
3.4 Hareketli Ortalama Filtresinde Optimizasyonun İşlemci Kullanımına Etkisi..	60
3.5 Gerilim Ölçeklemesi ile Yakın Güç Değerlerine Sahip Cihazların Ayrımı	61
3.6 Aktif-Reaktif Güç Ölçümü ile Yük Tanımlama Yaklaşımı	62

3.7 PSD Değeri ile Cihaz Tespiti	64
3.8 FFT Analizi	67
3.8.1 Benzer güçteki cihazların FFT analizi ile ayrıştırılması	69
3.9 FSM Tabanlı Model İle Yanlış Cihaz Tespitlerinin Bastırılması	75
3.9.1 Bulaşık makinesine ait güç ölçümleri ve tipik çalışma dizisi	75
3.9.2 Durumların tanımlanması ve p-q bölgeleri	76
3.9.3 Güç değişim adımlarının çıkarılması ve fsm geçiş eşikleri	76
3.9.4 Fsm'in "maskeleme" amacıyla kullanılması.....	77
3.10 V-I Grafiklerinin Kullanımı.....	78
3.10.1 Gerçek zamanlı V-I verisinin elde edilmesi	78
3.10.2 V-I döngü alanı (loop area)	78
3.10.3 Ötelenmiş I-I alanı (loop area 90°) ile cihaz tespiti.....	82
3.10.4 Döngü genişliği: Loop width	87
3.10.5 Simetri oranı: Sym ratio	88
3.10.6 Kompaktlık: Compactness	89
3.11 Güç faktörü tahmini: Power factor estimation	91
3.12 Tepe faktörü: Crest current	91
3.13 Yarım dalga RMS farkı: Half wave rms diffrence	92
3.14 Düşük Cihaz Yoğunluklu Gruplarda Tablo Tabanlı Cihaz Tespiti Uygulaması	94
3.15 Hat Bazlı Karar Mekanizması ile Cihaz Tespiti.....	98
3.16 Cihazların Tespitte Kullanılan Özellikleri	100
3.17 Karmaşık Yüklerden Basit Cihazların Güçlerinin Ayrıştırılması ve Gerilim ile Ölçekleme.....	103
3.18 Sensör-Kanal Azaltma Uygulaması ve Grup Ayrıştırma Sonuçları.....	104
3.19 Anlık Uyarı Sistemi ve Enerji Tasarrufu Analizi.....	106
4. SONUÇ	111
4.1 Sinyal İşleme Ve Gürültü Azaltma	111
4.2 Optimizasyon Ve Gerçek Zamanlılık.....	112
4.3 Gerilim Ölçeklemesi İle Güç Tabanlı Eşiklerin Kararlılığı	112
4.4 Aktif-Reaktif Güç (P-Q) İle Yük Karakterinin Ayrıştırılması.....	112
4.5 PSD İle Geçiş İmzasının Kullanılması.....	112
4.6 FFT/Harmonik İmzalar İle Benzer Güçte Cihazların Ayrımı	113
4.7 FSM İle Karmaşık Cihazların Yapay Zekâ Olmadan İzlenebilir Hâle Getirilmesi.....	113
4.8 V-I Grafiklerinden Şekil Tabanlı Özellik Çıkarımı.....	113
4.9 Genel Başarı Düzeyi Ve Kullanıcıya Çıktı: Tespit + Tasarruf Önerisi.....	114
4.10 Sınırlılıklar Ve Gelecek Çalışmalar	114
KAYNAKLAR	115
EKLER	119
ÖZGEÇMİŞ.....	121



KISALTMALAR

GYİ	: Girişimsel Yük İzleme
GOYİ	: Girişimsel Olmayan Yük İzleme
YGYİ	: Yarı Girişimsel Yük İzleme
ILM	: Intrusive Load Monitoring
NILM	: Non Intrusive Load Monitoring
SILM	: Semi Intrusive Load Monitoring
PSD	: Peak Steady Difference
FSM	: Finite State Machine
RMS	: Root Mean Square
UART	: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
ADC	: Analog Digital Converter
DMA	: Direct Memory Access
DC	: Direct Current
SWV	: Serial Wire Viewer
EMI	: Electromagnetic Interference
FFT	: Fast Fourier Transform
THD	: Total Harmonic Distortion



SEMBOLLER

P	: Aktif Güç
Q	: Reaktif Güç
Δ	: Değişim
f	: Frekans
ϕ	: Faz Kayması
t	: Zaman
A_h	: h. Harmonik Bileşenin Genliği
Φ_h	: h. harmonik bileşenin fazı
π	: Pi
Ω	: Ohm



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Girişimsel, Girişimsel Olmayan ve Yarı Girişimsel yöntemlerin karşılaştırmalı özellikleri.	20
Çizelge 2.2: Cihaz türlerinin karşılaştırmalı özellikleri.	24
Çizelge 2.3: Hareketli ortalama filtrelerinin karmaşıklık karşılaştırması.	29
Çizelge 2.4: Senör sayısına bağlı olarak oluşturulabilecek izleme gruplarının çizelgesi.	50
Çizelge 3.1: Optimize edilmiş ve edilmemiş fonksiyonların işlemci üzerindeki harcanan zamanın karşılaştırılması.	61
Çizelge 3.2: Cihaz kombinasyonlarının V-I özellikleri ve bazı akım bazlı özelliklerin bulunduğu çizelge.	95
Çizelge 3.3: Cihazların tespit edildikleri özelliklerin çizelgesi.	101
Çizelge 3.4: Cihazların tespit edildikleri kalan özelliklerin çizelgesi.	102
Çizelge 3.5: Gruplar, cihazlar ve sensör tiplerine ait çizelge.	104



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Girişimsel Yük İzleme Yöntemine bir örnek.	13
Şekil 2.2 : Akıllı Priz	14
Şekil 2.3 : Girişimsel Olmayan Yük İzleme Yöntemine bir örnek.....	15
Şekil 2.4 : Yarı Girişimsel Yük İzleme Yöntemine bir örnek.	18
Şekil 2.5 : Basit lineer cihazın güç-zaman grafiği.	21
Şekil 2.6 : Çok Modlu Lineer cihazın güç-zaman grafiği.	22
Şekil 2.7 : Lineer olmayan cihazın (bilgisayar) güç-zaman grafiğine örnek.....	23
Şekil 2.8 : Sırasıyla rezistif cihazın zaman eksenindeki gerilim akım grafiği ve V-I eğrisi.....	37
Şekil 2.9 : Sırasıyla endüktif motorun zaman eksenindeki gerilim akım grafiği ve V-I eğrisi.....	37
Şekil 2.10 : Sensör-Kanal azaltma uygulamasındaki sensör yerleşimleri	48
Şekil 2.11 : Genel akış diyagramı	52
Şekil 3.1 : Sistemin prototip halindeki fotoğrafı.	53
Şekil 3.2 : Sistemin kullanıma hazır fotoğrafı.	54
Şekil 3.3 : Oluşturulan akım sensörünün fotoğrafı.....	55
Şekil 3.4 : Sistemin son halinin fotoğrafı.	56
Şekil 3.5 : Boşta çalışan bir sensör için filtrelenmemiş ve filtrelenmiş sinyallerin karşılaştırılması.	59
Şekil 3.6 : Endüktif motor çalışırken akım ve gerilim sinyallerinin filtrelenmemiş ve filtrelenmiş halleri.	59
Şekil 3.7 : Kahve makinesi çalışırken akım ve gerilim sinyallerinin filtrelenmemiş ve filtrelenmiş halleri.	60
Şekil 3.8 : Aktif güç değerleri aynı olup reaktif güç değerleri farklı olan iki cihazın zaman eksenindeki güç değişimleri.	63
Şekil 3.9 : Aktif güç değerleri aynı olup reaktif güç değerleri farklı olan iki cihazın zaman eksenindeki reaktif güç değişimleri.	64
Şekil 3.10 : Benzer güç değerlerine sahip olan cihazların güç zaman grafiği.	65
Şekil 3.11 : Açılış güç değişimleri farklı olan iki farklı cihazın zaman eksenindeki güç değişimleri.	66
Şekil 3.12 : Rezistif bir cihazın oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik değerleri.	67
Şekil 3.13 : Bir motorun oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik değerleri.	68
Şekil 3.14 : LED sürücüsünün oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik değerleri.	68
Şekil 3.15 : Benzer güç değerine sahip iki adet rezistif cihazın güç zaman grafiği gösterilmiştir.	69
Şekil 3.16 : Rezistif bir ısıtıcının oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik oranları.	70

Şekil 3.17 : Yarım dalga modunda çalışan rezistif bir cihazın oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve harmonik oranları.....	70
Şekil 3.18 : Sırasıyla yarım dalga çalışan cihaz ve tam dalga çalışan cihazın RMS akım harmonikleri.....	71
Şekil 3.19 : Sırasıyla tam dalga ve yarım dalga çalışan cihazların zaman alanında temel bileşene (A_1) oranla harmonik genliklerinin yüzde değerleri (A_1/A_n) $\times 100$	71
Şekil 3.20 : İki cihazın birlikte çalışma durumunda frekanslara göre RMS akım harmonikleri.....	72
Şekil 3.21 : İki cihazın birlikte çalışma durumunda frekans alanındaki temel bileşene (A_1) oranla harmonik genliklerinin yüzde değerleri (A_1/A_n) $\times 100$ ve RMS akım harmonikleri.	73
Şekil 3.22 : İki cihazın ayrı ve birlikte çalışma durumunda zaman alanındaki harmonik faz değişimleri.....	73
Şekil 3.23 : Farklı iki motor yükünün akım harmonik genlikleri ve bu harmoniklerin faz açılarının zaman alanındaki gösterimi.	74
Şekil 3.24 : Bulaşık makinesine ait zaman alanındaki aktif ve reaktif güç grafiği....	75
Şekil 3.25 : Bulaşık makinesine ait zamana bağlı mod değişimleri.	77
Şekil 3.26 : Üç ayrı cihazın zaman eksenindeki normaize edilmiş loop area değerleri.	79
Şekil 3.27 : Rezistif bir cihaza ait zamana bağlı gerilim-akım grafiği, V-I Grafiği ve zaman eksenine eklenmiş 3B V-I grafiği.....	79
Şekil 3.28 : Endüktif bir süpürgeye ait zamana bağlı gerilim-akım grafiği, V-I Grafiği ve zaman eksenine eklenmiş 3B V-I grafiği.....	80
Şekil 3.29 : Fan cihazına ait zamana bağlı gerilim-akım grafiği, V-I Grafiği ve zaman eksenine eklenmiş 3B V-I grafiği.	80
Şekil 3.30 : Sırasıyla rezistif ısıtıcının, endüktif süpürge ve fanın V-I alan grafiği.	81
Şekil 3.31 : Sırasıyla yalnızca süpürge devredeyken ve süpürge ve fan devredeyken ölçülen V-I alan grafiği.	81
Şekil 3.32 : Sırasıyla ısıtıcı, aydınlatma ve televizyon cihazlarının V-I eğrisi grafikleri.	82
Şekil 3.33 : Ötelenmemiş V-I eğrisi(solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I eğrisi(sağda).	83
Şekil 3.34 : Ötelenmemiş V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I alanı (sağda).	83
Şekil 3.35 : İki farklı güçteki rezistif cihazın ötelenmemiş mutlak V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş mutlak V-I alanı (sağda).	84
Şekil 3.36 : Televizyonun ötelenmemiş V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I alanı (sağda).	84
Şekil 3.37 : Aydınlatmanın ötelenmemiş V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I alanı (sağda).	85
Şekil 3.38 : İki farklı elektronik cihazın (a,b) ayrı ayrı ve birlikte çalışırken V-I normalize alanı (solda) ve mutlak alanı (sağda).	85
Şekil 3.39 : İki farklı elektronik cihazın (a,b) ayrı ayrı ve birlikte çalışırken V-I mutlak alanı (solda) ve ötelenmiş mutlak alanı (sağda).....	86
Şekil 3.40 : Elektronik cihazların (a+b) ayrı çalıştığı ve lehim aleti ile birlikte (a+b+c) çalıştığı durumlarda, ötelenmemiş (sol) ve ötelenmiş (sağ) V-I mutlak döngü alanları.....	86
Şekil 3.41 : Beş ayrı cihazın tekil çalışma durumundaki Loop Width değerleri.	87

Şekil 3.42 : Fan cihazının tekil çalıştığı durum ile fan ve süpürge'nin birlikte çalıştığı durumdaki Loop Width değerleri.	88
Şekil 3.43 : Saç kurutma makinesinin 6 ayrı modunun Symetry Ratio oranları.	89
Şekil 3.44 : Sırasıyla dikiş makinesi, küçük süpürge, büyük süpürge, fan ve lehim aletinin kompaktlık değerleri.	90
Şekil 3.45 : Beş ayrı cihazın tekil çalışma durumdaki PF Estimation değerleri....	91
Şekil 3.46 : Sırasıyla televizyon, büyük süpürge, küçük süpürge, fan ve lehim aletinin Crest değerleri.	92
Şekil 3.47 : Saç kurutma makinesinin 5 farklı modundaki RMS akım ve Half Wave RMS akım değerleri karşılaştırması.	92
Şekil 3.48 : Blender cihazının iki farklı çalışma modundaki RMS akım ve Half Wave RMS akım değerleri karşılaştırması.	93
Şekil 3.49 : Sabit bir temel yük çalışır durumdayken, yarım dalga karakterine sahip cihazın RMS akım ve Half Wave RMS akım değerleri karşılaştırması.	93
Şekil 3.50 : Salon grubu için oluşturulan cihaz özelliklerinin grafikleri.	96
Şekil 3.51 : Salon grubu için oluşturulan kalan cihaz özelliklerinin grafikleri.	97
Şekil 3.52 : Mutfak hattı için cihaz tespit karar mekanizması.	98
Şekil 3.53 : Banyo ve Salon hattı için cihaz tespit karar mekanizması.	99
Şekil 3.54 : Çocuk odası hattı için cihaz tespit karar mekanizması.	99
Şekil 3.55 : Çocuk odası grubunun güç sinyalinin zamanla değişimi.	103
Şekil 3.56 : Ayrıştırılmış çocuk odası hattının güç sinyalinin zamanla değişimi....	104
Şekil 3.57 : Sensör-Kanal Azaltma Uygulaması yapılarak tespit edilmiş yük grafiği.	105
Şekil 3.58 : Banyo ve mutfak gruplarına ait cihaz yük grafiği, gruba ait faz diyagramları ve cihazların aktifleşme geçmişi.	108
Şekil 3.59 : Çocuk odasına ait cihaz yük grafiği, gruba ait faz diyagramları ve cihazların aktifleşme geçmişi.	109
Şekil 3.60 : Cihaz kullanım tablosu ve tasarruf önerileri ekranı.	110



GÖMÜLÜ SİSTEMLER İLE YARI-GİRİŞİMSSEL YÜK İZLEME KULLANARAK EV ALETLERİNİN ENERJİ TÜKETİMİNİN TAKİBİ VE ENERJİ TASARRUFU ÖNERİLERİNİN SUNULMASI

ÖZET

Artan enerji talebi ve fosil yakıta dayalı üretimin çevresel etkileri, enerji tasarrufunu sürdürülebilirlik hedeflerinin merkezine yerleştirmektedir. Konutlar; ısıtma, soğutma, aydınlatma ve çok sayıdaki elektrikli cihaz nedeniyle toplam tüketimde kayda değer bir paya sahiptir. Bu nedenle tüketimin cihaz seviyesinde izlenebilmesi kullanıcıların tüketim alışkanlıklarını daha net görmesini sağlayarak tasarrufu teşvik etmektedir. Ancak akıllı priz gibi girişimsel çözümler her cihaza fiziksel erişim gerektirdiğinden maliyetli ve ölçeklenmesi zordur. Akıllı sayaçlar ise yüksek çözünürlüklü veri sunsa da cihaz bazında ayırım yapamamaktadırlar. Bu tezde ise, maliyeti düşük ve uygulanabilir bir çözüm olarak yarı girişimsel yük izleme (SILM) yaklaşımı öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, konut ortamında hat-bazlı çoklu sensör verisi kullanarak cihaz tespiti yapabilen bir SILM sistemi geliştirilmiştir. Cihazların sigorta/hat gruplarına ayrılmasıyla toplam yük üzerindeki karmaşa azaltılmış, karar mekanizması “tüm ev” yerine daha yönetilebilir alt problemlere indirgenmiştir. Geliştirilen sistem; ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla çeşitli filtreler ile gürültü bastırmayı, gerçek zamanlı çalışmayı desteklemek için hesaplama yükünün optimizasyonunu ve cihaz tanımada çoklu özellik doğrulamasını bir araya getirmektedir.

Yarı girişimsel yük izleme sisteminin çoklu sensör gereksimine çözüm olarak sensör-kanal azaltma yöntemi sunulmuş ve başarıyla uygulanmıştır.

Benzer güç değerlerine sahip cihazları ayırt etmek adına birden çok yöntem kullanılmıştır. Aktif–reaktif güç bileşenleri ($P-Q$), tepe–kararlı farkına dayalı PSD geçiş imzası, FFT/harmonik analizleri, FSM tabanlı durum doğrulaması ve çeşitli akım tabanlı özellikler kullanılmıştır. $V-I$ eğrilerinden türetilen şekil tabanlı özellikler (loop area, simetri, kompaktlık, vs.) kullanılarak benzer güçteki cihazların kombinasyonel verileri ile cihaz tespiti yapılmıştır. Ayrıca yeni bir $V-I$ özelliği üretilmiştir (90° ötelenmiş loop area).

Uygulanan filtreleme ile görünür güçteki gürültü düşürülmüş ve faz farkı hatası belirgin biçimde azaltılmıştır. Ayrıca hareketli ortalama filtresinin optimize edilmesiyle ana döngüye üç kat daha sık girilerek sistemin gerçek zamanlı çalışma performansı iyileştirilmiştir. Bu bütünlük yapı sayesinde, yapay zekâ kullanılmadan tespiti zor olan çok modlu beyaz eşyalar (bulaşık/çamaşır makineleri vs.) ile rastgele ve değişken yük profiline sahip bilgisayar gibi cihazların tüketimleri de izlenebilir hâle getirilmiştir. Yaklaşık 30 adet ev aletinin tespiti başarıyla sağlanmıştır. Elde edilen tespit çıktıları anlık uyarı ve günlük enerji analizi ekranlarıyla kullanıcıya sunulmuş ve üç zamanlı tarife yaklaşımıyla tasarruf önerileri üretilmiştir.



MONITORING HOUSEHOLD APPLIANCES' ENERGY CONSUMPTION USING EMBEDDED SYSTEMS WITH SILM AND PROVIDING ENERGY- SAVING RECOMMENDATIONS

SUMMARY

The increasing global demand for energy and the environmental impacts associated with fossil-fuel-based energy production have made energy conservation a central goal for global sustainability. Residential buildings account for a significant portion of this total consumption due to the widespread use of electrical appliances for heating, cooling, and lighting. Consequently, monitoring consumption at the appliance level is essential for fostering user awareness and encouraging energy-efficient habits. While traditional intrusive monitoring methods, such as smart plugs, offer high accuracy, they are often cost-prohibitive and difficult to scale because they require physical access to every single device. On the other hand, non-intrusive methods that rely on a single measurement point often lack the granularity required for detailed analysis. To address these challenges, this thesis presents a Semi-Intrusive Load Monitoring (SILM) system as a cost-effective, practical, and highly accurate alternative for residential environments.

The developed system is built upon a sophisticated hardware and software architecture designed for real-time operation. At its core is an STM32F407VG microcontroller, which manages high-frequency data acquisition from current and voltage sensors. The system utilizes Hall-effect sensors for current measurement and the ZMPT101B module for voltage monitoring, ensuring precise and isolated data collection. To maintain reliability under real-world conditions, where electrical signals are often plagued by electromagnetic interference and transient noise, the system implements a robust two-stage filtering process. First, a median filter is applied to suppress impulsive noise and outliers. Second, an optimized moving average filter is used to smooth the signal, bringing the apparent noise floor down significantly and improving the accuracy of phase difference calculations. A critical technical achievement of this work is the optimization of the moving average filter using a sliding sum approach, which reduced the processor load from 45.73% to 10.12%, allowing the system to perform complex calculations three times more frequently within the main processing loop.

One of the most significant contributions of this thesis is the demonstration that highly accurate load disaggregation can be achieved on embedded systems without the need for artificial intelligence (AI) or deep learning models. While contemporary non-intrusive monitoring often relies on heavy computational models, this system utilizes a deterministic and rule-based decision-making framework based on high-resolution electrical signatures. By grouping appliances into specific circuit feeders (SILM), the complexity of the total load is reduced, transforming the disaggregation problem into more manageable sub-tasks. The system differentiates between resistive, inductive, and capacitive loads by analyzing Active and Reactive Power (P-Q) components. This

allows the identification of devices that may have identical active power ratings but distinct reactive characteristics, such as distinguishing a simple heater from a motor-driven fan.

To further enhance the disaggregation capabilities, the thesis introduces the Peak-to-Steady Difference (PSD) metric. This feature captures the unique transient "inrush" signatures that occur during an appliance's startup phase. For instance, while a vacuum cleaner and a hair dryer might consume similar power during steady-state operation, the vacuum cleaner's motor produces a much higher transient peak compared to the dryer's resistive element. Additionally, the system employs Fast Fourier Transform (FFT) analysis to identify appliances based on their harmonic signatures. Devices with non-linear power supplies, such as LED drivers or computers, produce distinct harmonic distributions that serve as unique fingerprints, even when multiple devices are operating simultaneously.

The system also leverages Voltage-Current (V-I) trajectories to extract shape-based geometric features. By mapping instantaneous current against voltage, the system calculates metrics such as loop area, symmetry, compactness, and loop width. A novel feature developed in this study is the 90-degree phase-shifted loop area, which artificially increases the "thickness" of V-I curves for low-power electronic devices and resistive loads. This innovation allows for stable disaggregation in scenarios where traditional V-I area calculations would fail due to signal noise or near-zero phase shifts. For complex, multi-mode appliances like dishwashers and washing machines—which are notoriously difficult to track without AI—the system utilizes a Finite State Machine (FSM) model. This deterministic model tracks the sequential power stages of the appliance (e.g., water intake, heating, pumping) and acts as a "masking" mechanism to prevent internal state transitions from being misinterpreted as the activation of other devices.

To ensure the system's robustness against external factors, a voltage scaling approach is implemented. Since the power consumption of resistive loads is proportional to the square of the voltage, fluctuations in the grid can lead to shifting power thresholds. The developed algorithm dynamically scales these thresholds based on real-time voltage measurements, maintaining the stability of the appliance detection process. Furthermore, the system incorporates sensor-channel reduction techniques. By strategically placing sensors in a combinational topology, the system can monitor multiple electrical groups with fewer physical sensors, significantly reducing hardware costs and installation complexity.

The final output of the system is a user-centric energy management platform. Data processed by the embedded controller is transmitted via ZigBee wireless communication to a central interface. This interface provides real-time alerts, notifying users exactly when specific appliances are turned on or off. Beyond mere monitoring, the system provides a comprehensive daily energy analysis that matches appliance usage with a three-time tariff system. It specifically identifies high-consumption events occurring during peak price periods and generates tailored saving recommendations, suggesting when users should shift their activities to lower-cost intervals.

In conclusion, this thesis successfully bridges the gap between low-cost monitoring and high-accuracy disaggregation. By relying on advanced signal processing, optimized mathematical models, and multi-feature validation rather than artificial intelligence, the system offers a transparent, efficient, and resource-friendly solution

for residential energy management. The integration of PSD, FFT, FSM, and novel V-I features allows the system to accurately identify approximately 30 different household appliances, providing a solid foundation for future smart grid integrations and sustainable energy practices.





1. GİRİŞ

1.1 Küresel Enerji Eğilimleri ve Sürdürülebilirlik İhtiyacı

Günümüzde enerji yönetimi, artan enerji talebini karşılamak ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla sürdürülebilir çözümler geliştirme sürecinde kritik bir rol üstlenmektedir. Fosil yakıta dayalı enerji üretimi, küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olup, bu emisyonlar iklim değişikliği gibi küresel ölçekli tehditleri derinleştirmektedir (IPCC, 2023). Bu durum, enerji sistemlerinde verimliliğin artırılmasının ve çevre dostu çözümlerin yaygınlaştırılmasının kritik bir gereklilik hâline geldiğini göstermektedir (IEA, 2022).

Paris Anlaşması, küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme kıyasla 2 °C'nin oldukça altında tutulmasını ve mümkünse 1.5 °C ile sınırlandırılmasını hedefleyerek ülkeleri düşük karbonlu dönüşüme yönlendirmektedir (UNFCCC, 2015). Benzer şekilde Avrupa Yeşil Mutabakatı, enerji verimliliğini ve düşük karbonlu enerji kullanımını Avrupa Birliği'nin iklim nötrlüğü hedeflerine ulaşmasında temel politika araçları arasında konumlandırmaktadır (European Commission, 2019). Bu çerçevede, yalnızca enerji üretiminde değil, enerji tüketiminde de verimliliği artırmaya yönelik teknolojiler ve izleme çözümleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır (IEA, 2022).

1.2 Konut Sektöründe Enerji Tüketiminin Rolü

Enerji tüketiminin önemli bir kısmı konut sektöründe gerçekleşmektedir. Isıtma, soğutma, aydınlatma ve çeşitli elektrikli cihazların kullanımı, hanelerde yüksek oranda enerji harcanmasına ve buna bağlı olarak sera gazı salımlarının artmasına neden olmaktadır. IEA'nın 2022 yılı verilerine göre, Avrupa'da nihai elektrik tüketiminin %29,9'u, Kuzey Amerika'da %36'sı ve Asya-Pasifik bölgesinde %21,8'i konut sektöründe gerçekleşmiştir (IEA, 2022). Ayrıca, küresel nihai enerji tüketiminin yaklaşık üçte biri konut ve bina kaynaklıdır (Han ve Wei, 2021).

TEDAŞ'ın 2022 yılı verilerine göre Türkiye'de toplam elektrik tüketiminin %21,5'i konut sektöründe gerçekleşmiştir TEDAŞ (2023). Bu oran, Avrupa ve Amerika'nın

ortalamasının altında kalsa da konutların toplam enerji tüketimindeki kayda değer payını ortaya koymaktadır.

Türkiye Ulusal Enerji Planı'na göre bu tüketimin 2025 yılında 380,2 TWh'ye, 2030'da 455,3 TWh'ye ve 2035'te 510,5 TWh'ye yükselmesi beklenmektedir. 2024 yılı itibarıyla elektriğin %35,2'si kömürden, %18,9'u doğal gazdan, %21,5'i hidrolik enerjiden, %10,5'i rüzgâr, %7,5'i güneş ve %3,2'si jeotermal kaynaklardan elde edilmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Bu üretim yapısı, Türkiye'nin hâlâ % 50'den fazla oranda fosil yakıtlara dayandığını ve dolayısıyla elektrik tüketiminin sera gazı salımları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bu oranlar ve veriler, meskenlerdeki elektrik tüketiminin küresel enerji dengesi üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymakta ve sürdürülebilir enerji yönetiminin hane düzeyinde başlamasının önemini göstermektedir.

1.3 Cihaz Seviyesinde İzleme ve Kullanıcı Farkındalığı

Enerji verimliliği uygulamalarının yaygınlaştırılabilmesi için cihaz seviyesinde ayrıntılı tüketim verilerinin elde edilmesi ve analiz edilmesi büyük önem taşır. Böylece hem kullanıcı farkındalığı artırılabilir hem de enerji yönetimine yönelik daha etkili ve hedefli politikalar geliştirilebilir. Yapılan araştırmalar, bireysel cihaz tüketimi hakkında detaylı bilgi sağlanmasının tüketici alışkanlıklarını değiştirebileceğini ve enerji tasarrufunu artırabileceğini göstermiştir (Darby, S. 2006 ; Sovacool vd., 2021).

1.4 Mevcut Yöntemlerin Sınırlılıkları: Akıllı Prizler ve Sayaçlar

Geleneksel yöntemler, yalnızca toplam enerji tüketimini raporlayan aylık elektrik faturaları ile sınırlı kalmaktadır. Halihazırda elektrikli ev aletlerinin enerji harcamasını ölçen akıllı prizler mevcuttur. Ancak bu akıllı prizler sadece bir cihaz üzerinde çalıştığından, bütün bir evin harcamasını bu cihazlarla izlemek hem maliyetli hem de karmaşık olabilir; ayrıca her cihaza fiziksel erişim gerektirdiğinden pratik değildir. Bu noktada, akıllı sayaçlar daha merkezi ve kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Elektrik panosuna entegre edilen akıllı sayaçlar, ev veya bina genelindeki enerji tüketimini yüksek çözünürlüklü zaman serisi verileri olarak kaydedebilmekte ve bu verileri merkezi sistemlere iletebilmektedir. Akıllı sayaçlar, yalnızca faturalama amacıyla kullanılan geleneksel sayaçların çok ötesine geçerek, enerji tüketiminin detaylı

analizine olanak sağlar. Sadece Amerika’da 2010-2023 yılları arasında 90 milyon adet akıllı sayaç kurulumu olmuştur (Vaishvat, 2024). Dünya genelinde akıllı sayaçların kullanımı hızla yayılmakta olup, 2021 yılı verilerine göre 47 ülkede toplam 1,494 milyar haneye kurulum programları hedeflenmiştir (Sovacool vd., 2021).

1.5 Enerji İzleme Sistemlerindeki Mevcut Sorunlar ve İhtiyaçlar

Enerji izleme sistemleri, konutlarda ve endüstriyel tesislerde tüketimin analiz edilmesi ve yönetilmesi açısından önemli bir araçtır. Bununla birlikte, cihaz seviyesinde yüksek çözünürlüklü veri elde etmeye yönelik girişimsel yaklaşımlar, her cihaza ayrı ölçüm noktası eklenmesini gerektirdiğinden kurulum karmaşıklığını ve maliyeti artırmakta; sahada uygulanabilirliği ve yaygınlaştırılabilirliği sınırlamaktadır (Zoha vd., 2012) (Hart, 1992). Ayrıca kapsam genişledikçe çok sayıda alt-ölçüm donanımı ve veri toplama altyapısı ihtiyacı doğmakta; bu durum kurulum/entegrasyon yükünü artırarak pratik ölçeklenebilirliği zorlaştırmaktadır (Makonin vd., 2016).

Bu nedenle, çok cihazlı konut ve bina uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilecek çözümler için maliyet-etkinlik, kurulum kolaylığı ve veri işleme verimliliğini birlikte sağlayan izleme mimarilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Zeifman & Roth, 2011).

1.6 Yarı-Girişimsel İzleme Yöntemine Yönelik Gereksinim

Akıllı sayaçlar, enerji sağlayıcıları ile kullanıcılar arasında veri iletişimini mümkün kılarak enerji yönetimi ve şebeke işletimine katkı sağlayan önemli bir altyapı sunmaktadır (Depuru vd., 2011 ; Fang vd., 2012). Ancak akıllı sayaç verisi çoğu senaryoda toplam tüketime ilişkin olduğundan, cihaz bazlı ayrıştırma kapasitesi sınırlı kalır ve detaylı cihaz bilgisi için ek yöntemlere gereksinim doğar. Bu noktada yarı-girişimsel izleme (SILM) yaklaşımı, tam cihaz-başı ölçüm kurulumuna gitmeden, seçilmiş ölçüm noktaları ve/veya devre düzeyi izleme ile daha fazla gözlemlenebilirlik sağlayarak pratik bir ara çözüm sunar (Zeifman & Roth, 2011).

1.7 Gömülü Sistemlerin Rolü ve Teknik Yetenekleri

Enerji izleme sistemlerinde gömülü sistemler, veri toplama, işleme ve iletme süreçlerinin merkezinde yer alarak kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle konut ölçekli uygulamalarda, düşük maliyetli, taşınabilir ve özelleştirilebilir yapıları sayesinde

yaygın bir şekilde tercih edilmektedirler. Gömülü sistemler, mikrodenetleyiciler aracılığıyla akım ve gerilim gibi fiziksel büyüklükleri sayısal verilere dönüştürebilmektedir. Ve belirli algoritmalar doğrultusunda bu verileri analiz ederek enerji tüketimine dair anlamlı çıktılar üretebilmektedir. Günümüzde artan işlemci kapasiteleri ve gelişmiş çevresel arabirimler sayesinde, bu sistemler yalnızca veri toplama değil; aynı zamanda gerçek zamanlı sinyal işleme, sınıflandırma, karar verme ve uzaktan kontrol gibi daha karmaşık görevleri de başarıyla yerine getirebilmektedir. (Back vd., 2016 Aytekin & Zengin, 2025).

Bu çalışmada geliştirilen gömülü sistem, konut içi enerji izleme uygulamalarına yönelik olarak özelleştirilmiş bir donanım ve yazılım mimarisine sahiptir. Sistemde kullanılan mikrodenetleyici, yüksek örnekleme frekansı ile akım ve gerilim verilerini paralel kanallardan toplayabilmekte; bu veriler üzerinde RMS hesaplama, sinyal filtreleme, güç hesaplama ve faz kayması analizi gibi işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Böylece hem temel hem de geçici rejim davranışları hassas bir şekilde izlenebilmekte; bu da cihaz tanıma, kullanım alışkanlıklarının belirlenmesi ve yük optimizasyonu gibi işlemlerin sağlıklı biçimde yapılmasını mümkün kılmaktadır. (Zhou vd., 2016; Aytekin & Zengin, 2025).

1.8 Tepe–Kararlı Farkı (Peak-to-Steady Difference) Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı

Cihazların açılma ve kapanma anlarındaki geçici (transient) tepkileri, her cihaza özgü karakteristik davranışlar sergiler. Bu geçici davranışların nicel olarak ifade edilmesi amacıyla bu çalışmada Tepe–Kararlı Farkı (Peak-to-Steady Difference, PSD) adı verilen bir parametre tanımlanmıştır. Literatürde, cihazların açılış anında sergiledikleri geçici akım ve güç tepkilerinin, kalıcı durum özelliklerine kıyasla daha ayırt edici olduğu ve olay tabanlı yük tanıma yaklaşımlarında sıklıkla kullanıldığı bildirilmektedir (Zoha vd., 2012).

PSD, bir cihazın açılış anında oluşan tepe akım veya güç değerinin, olay sonrası oluşan kararlı durum ortalamasından farkını temsil eder.

Bu fark, cihazların dinamik davranışlarını doğrudan ortaya koyarak özellikle motor, ısıtıcı, LED sürücü ve SMPS gibi farklı başlama karakteristiklerine sahip yükler arasında ayırt edici bir özellik sunar. Örneğin rezistif yüklerde (ütü, kettle) açılış

anındaki akım değeri çoğunlukla kararlı duruma yakın olduğundan PSD küçük kalırken; motorlu veya doğrultucu tabanlı cihazlarda kısa süreli yüksek kalkış akımları nedeniyle PSD değerleri belirgin şekilde artabilmektedir. Literatürde, kalkış akımı (inrush current) genliği ve açılış anındaki güç değişimlerinin cihaz türüne özgü olduğu ve yük tanıma problemlerinde etkin biçimde kullanılabileceği birçok çalışmada gösterilmiştir (Chang, 2010).

PSD temelli analiz, harmonik analiz kadar yüksek örnekleme oranı gerektirmediğinden, gömülü sistemler üzerinde gerçek zamanlı olarak hesaplanabilir. Bu durum, düşük maliyetli donanımlar kullanılarak cihazların hızlı şekilde tanınmasını ve olay bazlı tespitlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılar. Bu çalışmada da PSD'nin geçici enerji bileşenleriyle birlikte değerlendirilmesiyle sınıflandırma başarımının artırılması hedeflenmektedir.

1.9 Harmonik Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı

Bu tezde hedeflenen yarı-girişimsel izleme yaklaşımında, sınırlı ölçüm noktalarından elde edilen veriyi daha ayırt edici hâle getirmek için harmonik-temelli özneliklerden yararlanılacaktır. Klasik RMS/aktif güç (P) tabanlı ölçümler, farklı cihazların benzer güç seviyelerinde çalıştığı durumlarda ayırt ediciliğini kaybedebilir; bu nedenle tek nokta ölçümlerde cihaz ayrıştırma için daha zengin “yük imzalarına” ihtiyaç duyulur (Hart, 1992).

Doğrusal olmayan konut tipi cihazlar ise akım dalga şekillerinde belirgin harmonik içerik oluşturarak temel frekansın katları biçiminde genlik ve faz bilgisi taşıyan ayırt edici bileşenler üretmektedir. Bu harmonik bileşenlerin dağılımı, cihazın iç devre yapısına ve çalışma karakteristiğine bağlı olduğundan, doğrusal olmayan yükler steady-state akım harmonikleri ile özgün biçimde tanımlanabilmektedir (Djordjević & Simić, 2018).

Djordjević ve Simić, steady-state akım harmoniklerinin genlik ve faz bilgisini birlikte kullanan harmonik akım fazörlerine dayalı bir yaklaşım önererek, özellikle doğrusal olmayan cihazların tek nokta ölçümden yüksek doğrulukla tanınabildiğini göstermiştir. Çalışmada, harmonik akımlarının adım değişimlerinin cihaz açma/kapama olaylarını temsil eden ayırt edici bir yük imzası sunduğu ve bu yöntemin

klasik güç-temelli yaklaşımlara kıyasla daha iyi ayrıştırma sağladığı deneysel olarak doğrulanmıştır (Djordjević & Simić, 2018).

Harmonik tabanlı ayrıştırmanın pratik değerini destekleyen güncel bir örnek olarak Dinar ve arkadaşları (Dinar vd., 2025), harmonik içeriğin aynı anda çalışan birden çok cihaz varken dahi kararlı ve ayırt edici imzalar üretebildiğini; bu nedenle harmonik içeriğin NILM'deki temel zorluklardan birine (örtüşen senaryolar) çözüm sağlayabildiğini göstermektedir. Ayrıca aynı çalışma, rezistif yüklerin çok düşük harmonik bozulum ürettiğini; motorlu cihazlar ve SMPS tabanlı elektronik cihazların ise daha “zengin” harmonik profillere sahip olduğunu belirterek harmonik uzayının sınıflandırma için anlamlı bir özellik alanı sunduğunu ifade eder. Bu nedenle harmonik içeriği zayıf yüklerde, güç geçişi ve/veya transient özelliklerle harmoniğin birlikte kullanıldığı hibrit bir strateji tercih edilecektir.

1.10 Sonlu Durum Makinesi (FSM) ve Cihaz Tanıma

Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine – FSM), bir sistemin davranışını sınırlı sayıda durum ve bu durumlar arasındaki geçiş kuralları ile ifade eden bir modelleme yaklaşımıdır. Birçok ev tipi elektrikli cihaz; ısıtma, motor sürme, durulama, kurutma ve bekleme gibi ardışık ve tekrarlayan çalışma evrelerine sahip olup, bu evreler arasında belirgin durum geçişleri göstermektedir (Zeifman & Roth, 2011). Bu nedenle cihazların elektriksel güç profilleri, her bir çalışma moduna özgü ayırt edici imzalar üretmektedir.

FSM tabanlı modeller, cihazlara ait enerji tüketim paternlerinin durum-geçiş yapısı içinde sistematik biçimde temsil edilmesine olanak tanıyarak yük izleme yaklaşımlarında önemli avantajlar sunmaktadır (Kolter & Johnson, 2011). Cihazın farklı çalışma modları ile güç tüketimi arasındaki ilişkiyi açıkça tanımlayan bu yaklaşım, ölçülen akım ve güç davranışlarındaki değişimlerin rastlantısal dalgalanmalardan mı yoksa cihazın doğal bir çalışma modu geçişinden mi kaynaklandığının ayırt edilmesine yardımcı olmaktadır (Makonin vd., 2016). Böylece cihaz tanıma sürecinde yalnızca anlık ölçümler değil, cihazın tüm çalışma döngüsü dikkate alınarak daha kararlı ve tutarlı bir sınıflandırma gerçekleştirilebilir (Zeifman & Roth, 2011).

1.11 Gerilim–Akım (V–I) Grafiklerinin Cihaz Tanımındaki Rolü

Bu çalışmada kullanılan yarı-girişimsel izleme yaklaşımının temel unsurlarından biri, cihazların gerilim–akım (V–I) davranışlarının incelenmesidir. V–I eğrisi (V–I trajectory), belirli bir zaman aralığında ölçülen anlık gerilim ve akım örneklerinin, zamandan bağımsız biçimde akım–gerilim düzleminde birlikte gösterilmesiyle elde edilen ve dalga şekli bilgisini doğrudan yansıtan bir yük imzasıdır. Bu sayede cihazlar yalnızca ortalama güç büyüklükleriyle değil; doğrusal/doğrusal olmayan karakteristikleri, faz ilişkileri ve dalga şekli biçimleriyle birlikte değerlendirilerek daha ayırt edici bir temsil elde edilebilir. Literatürde, benzer aktif güce sahip cihazların dahi V–I eğrilerinden çıkarılan özellikler yardımıyla ayrıştırılabildiği ve V–I tabanlı temsilin yük tanıma problemlerinde önemli avantajlar sağladığı belirtilmektedir (Hassan vd., 2014 ; De Baets vd., 2018).

Doğrusal, saf dirençli bir yük ideal olarak orijinden geçen yaklaşık doğrusal bir V–I doğrusu ile temsil edilirken; doğrultuculu/anahtarlamalı yüklerde ve endüktif/kapasitif karaktere sahip cihazlarda V–I eğrileri kapalı döngüler ve farklı simetri/genişlik özellikleri sergileyen şekiller hâline dönüşmektedir. Bu geometrik farklılıklar, anlık gerilim–akım ilişkisindeki doğrusal olmayanlığın ve dalga şekli bozulmalarının bir yansıması olup cihaz türüne özgü ayırt edici ipuçları taşır. Nitekim NILM literatüründe V–I trajectory (V–I yörünge) imzaları; alan (area), simetri (symmetry) ve döngü yönü (looping direction) gibi şekil tabanlı ölçütlerle nicelleştirilerek yüklerin karakterizasyonu ve sınıflandırılmasında kullanılmaktadır (Lu vd., 2023).

Geliştirilen sistemde gerilim ve akım, STM32 tabanlı gömülü platform üzerinde şebeke periyodunu temsil edecek kısa zaman pencereleri hâlinde (20 ms) eş zamanlı olarak örneklenmektedir. Her pencere için alınan örnekler üzerinden güvenilir V–I eğrileri üretilmekte ve bilgisayar tarafında MATLAB ortamında zaman alanı ve V–I düzleminde görselleştirilerek sistemin işleyişi doğrulanmaktadır. Bu tez kapsamında, elde edilen V–I eğrileri üzerinden çeşitli sayısal öznitelikler tanımlanmakta ve bu öznitelikler ilerleyen bölümlerde cihaz tespiti için kullanılmaktadır.

1.12 Gömülü Sistem Tabanlı Karar Destek Mekanizması

Çalışmanın öne çıkan katkılarından biri, gömülü sistemlerden elde edilen verilerin analizine dayalı olarak geliştirilen bir karar destek mekanizmasıdır. Bu sistem,

cihazların enerji tüketim profillerini zaman serisi olarak değerlendirerek, hangi cihazın hangi zaman aralığında çalıştırılmasının daha uygun olduğunu belirlemeye çalışmaktadır. Kural tabanlı bu yaklaşım, yükleri gün içerisindeki düşük maliyetli tarife dilimlerine kaydırmayı hedeflemekte; böylece hem kullanıcı maliyetlerini azaltmakta hem de şebeke üzerindeki pik yüklerin dengelenmesine katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle sistem, yalnızca pasif bir izleme aracı değil; aynı zamanda aktif bir yönetim ve yönlendirme bileşeni olarak konumlandırılmıştır.

Sonuç olarak, gömülü sistemlerin sahip olduğu teknik yetenekler sayesinde, yarı-girişimsel enerji izleme uygulamaları daha verimli, esnek ve kullanıcı dostu hale gelmiştir. Yüksek çözünürlükte veri elde etme, yerel işleme kabiliyeti, gerçek zamanlı analiz yapabilme ve ağ üzerinden uzaktan erişim gibi özellikler; bu sistemleri enerji yönetimi alanında hem bugünkü ihtiyaçlara hem de gelecekteki akıllı şebeke sistemlerine entegre olabilecek bir yapı haline getirmektedir.

1.13 Kablosuz Haberleşme ve IoT Entegrasyonu

Gömülü bir enerji izleme sisteminde yalnızca ölçüm yapmak yeterli değildir; elde edilen verinin merkezi bir birime düzenli, hızlı ve güvenilir şekilde aktarılması da gerekir. Bu nedenle bu çalışmada, ölçüm yapan gömülü kart ile bilgisayar tabanlı analiz birimi arasında ZigBee modülü kullanılarak kablosuz haberleşme kurulmuştur. ZigBee tabanlı çözümler; düşük güç tüketimi, düşük veri hızı ihtiyacı ve kararlı bağlantı özellikleri sayesinde özellikle sensör tabanlı izleme uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Kuzlu vd., 2011; Kohvakka vd.). Kablosuz haberleşme modülü yalnızca veri iletimini sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda sistemin mobilitesini ve modülerliğini de artırmaktadır. Bu yapı sayesinde sistem, farklı konutlara taşınabilir hale gelmekte ve kablolama gereksinimi olmadan çok kısa sürelerde kurulabilmektedir. Sistemde ZigBee modülü, mikrodenetleyiciye UART (seri) arayüzü üzerinden bağlanmıştır. Bu yapı, ölçülen verilerin seri port üzerinden modüle aktarılmasını ve kablosuz ağ üzerinden bilgisayara iletilmesini mümkün kılar. Haberleşme altyapısı, iki uç arasında doğrudan iletişim sağlayan point-to-point (noktadan noktaya) yapılandırma ile kurulmuştur; böylece ölçüm verileri kablo gerektirmeden anlık olarak bilgisayara aktarılabilmiştir. Kablosuz iletişim yaklaşımı yalnızca veri aktarımını kolaylaştırmakla kalmaz; aynı zamanda sistemin taşınabilirliğini ve sahada kurulum pratikliğini artırır. Kablolama ihtiyacının azalması

sayesinde sistem farklı konutlara taşınabilir ve yeni bir ortamda kısa sürede devreye alınabilir. Konut ölçekli akıllı ölçüm ve izleme uygulamalarında ZigBee kullanımıyla benzer şekilde gerçek zamanlı veri toplama ve kablosuz iletimin uygulanabildiği gösterilmiştir (Kuzlu vd., 2011; Ali & Partal, 2022). Bu yönüyle ZigBee tabanlı haberleşme, geliştirilen ölçüm altyapısının modüler ve uygulanabilir bir yapıda tasarlanmasına katkı sağlamaktadır.

1.14 Çalışmanın Yeniliği ve Katkıları

Bu tez çalışması, literatürde yer alan yarı girişimsel yük izleme (SILM) yaklaşımını temel alarak, konut ortamında hat-bazlı çoklu sensör verisi ile gerçek zamanlı çalışabilen bir cihaz tespit sisteminin tasarım ve uygulamasını ortaya koymaktadır. Pratikte karşılaşılan maskeleme, kararsız eşikler, gürültü ve hesaplama yükü gibi problemler hedeflenerek, uçtan uca uygulanabilir bir mimari ve bütünleşik karar mekanizması geliştirilmiştir.

saha koşullarında ölçülen sinyallerdeki ani parazit ve gürültünün tespiti kararsızlaştırmasını önlemek amacıyla medyan filtre + hareketli ortalama tabanlı bir sinyal işleme zinciri kullanmakta; bu sayede RMS/güç türevli metriklerin ve faz farkı hesaplarının daha tekrarlanabilir hale gelmesi sağlanmaktadır. Ayrıca gömülü tarafta gerçek zamanlı çalışmayı mümkün kılmak için filtreleme ve özellik çıkarma adımları hesaplama maliyeti açısından optimize edilmiş, böylece CPU yükü düşürülerek sistemin çevrim süreleri iyileştirilmiştir.

Bir diğer önemli katkı, şebeke gerilimi dalgalanmalarının sabit güç eşikleriyle yapılan tespiti kaydırması problemine karşı, rezistif yüklerde gücün gerilimin karesiyle değiştiği fiziksel ilişkiyi kullanarak güç aralıklarının anlık gerilime göre dinamik ölçeklenmesidir. Bu yaklaşım saha koşullarında güç tabanlı kararların daha kararlı çalışmasını sağlamaktadır.

Çalışmanın bir diğer katkısı, şebeke gerilimi dalgalanmalarının özellikle rezistif yüklerde güç eşiklerini kaydırması problemine karşı, referans güç aralıklarının anlık gerilime göre dinamik ölçeklenmesi ile saha koşullarında daha kararlı bir tespit altyapısının oluşturulmasıdır. Cihaz tanıma katmanında ise tek bir özelliğe dayalı karar vermek yerine, aktif–reaktif güç ($P-Q$) ile yük karakteri ayrımı, PSD ile geçiş/kalkış imzası, FFT/harmonik dağılım ve THD tabanlı imzalar ve $V-I$ eğrilerinden elde edilen

şekil tabanlı metrikler birlikte kullanılarak çoklu doğrulama yaklaşımı benimsenmiştir. Buna ek olarak, çok adımlı ve çok modlu çalışan beyaz eşyalar gibi yapay zekâ olmadan izlenmesi zor cihazlar için, tipik çalışma dizisini temsil eden FSM tabanlı durum modeli kurgulanmış; böylece sıralı durum kısıtı ile tutarsız tespitlerin bastırılabilirdiği gösterilmiştir.

Son olarak geliştirilen sistem, tespit sonuçlarını yalnızca izleme düzeyinde bırakmayıp, kullanıcıya anlık uyarı ve günlük enerji analizi çıktıları sunmakta; ayrıca üç zamanlı tarife yaklaşımıyla yüksek güçlü ve çalışma zamanı esnetilebilen yüklerin uygun zaman dilimlerine kaydırılmasına yönelik tasarruf önerileri üreterek ölçüm–tespit–yorumlama zincirini tamamlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem gömülü sistem düzeyinde gerçek zamanlı ve maliyet-etkin bir SILM altyapısı ortaya koymakta, hem de cihaz tespitini kullanıcı faydasına dönüştüren bir çıktı katmanı sağlamaktadır.

1.15 Geleceğe Dönük Uygulanabilirlik ve Genişleme Potansiyeli

Ölçeklenebilir mimarisi sayesinde sistem, daha fazla sensörle genişletilerek çok odalı veya çok katlı yapılarda kullanılabilir hale getirilebilmektedir. STM32F407VG mikrodenetleyicisinin desteklediği çoklu ADC kanalları ve DMA yapısı, daha fazla izleme noktasını sisteme entegre etmeye olanak sunmaktadır. Aynı şekilde ZigBee modülünün mesh ağ yapısını desteklemesi, ilerleyen çalışmalarda çok noktalı haberleşme mimarilerinin hayata geçirilmesine imkân tanımaktadır.

Bununla birlikte, sistemin modüler donanım yapısı farklı türde sensörlerin, örneğin sıcaklık, nem veya hareket sensörlerinin entegre edilmesine de açıktır. Bu durum, enerji izleme ile birlikte çevresel parametrelerin de değerlendirilebildiği akıllı bina senaryoları için önemli bir adım teşkil etmektedir.

Öte yandan, maliyet ve karmaşıklığı azaltmak amacıyla sensör sayısının minimize edilmesine yönelik çalışmalar da bu sistemin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Özellikle benzer karakteristiklere sahip cihazların güç tüketimlerinin gruplanarak analiz edilmesi ve basit cihazların toplam güçten çıkarılması yoluyla, kompleks cihazların güç profillerinin daha kesin tahmin edilmesi sağlanmaktadır. Bu sensör azaltma yöntemi, hem donanım maliyetlerini düşürmekte hem de kurulum ve bakım süreçlerini kolaylaştırmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen gömülü sistem tabanlı enerji izleme platformu, hem bugünkü ihtiyaçlara yanıt verebilecek etkin bir yapı sunmakta hem de sensör azaltma ve modüler genişleme olanaklarıyla geleceğin akıllı enerji yönetim sistemlerine uyum sağlayabilecek güçlü bir altyapı oluşturmaktadır.



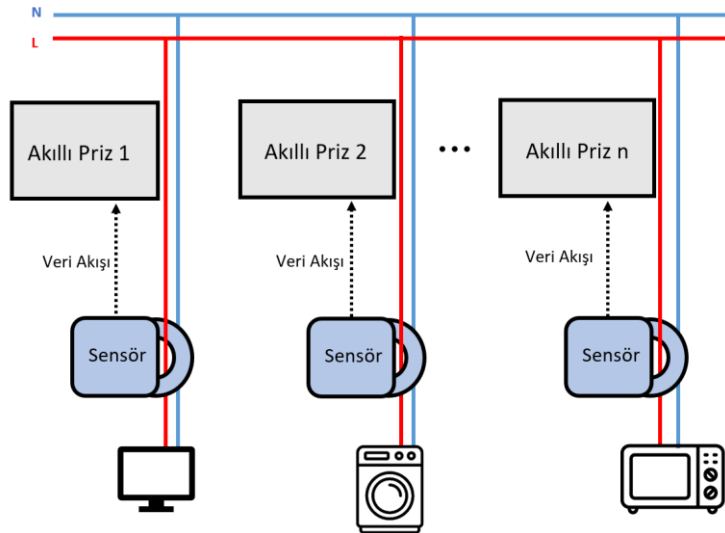


2. ENERJİ TÜKETİMİNİN İZLENMESİNE YÖNELİK YÖNTEMLER VE TEKNOLOJİLER

Kullanılan yöntemler, veri toplama teknikleri, doğruluk düzeyleri, maliyet ve uygulama zorlukları açısından farklılık göstermektedir. Konut ve ticari alanlarda enerji kullanımının detaylı analizini mümkün kılan başlıca üç yaklaşım bulunmaktadır. Her bir yöntem, teknolojik altyapı ve veri işleme bakımından kendine özgü avantajlar ve sınırlılıklar taşımaktadır. Bu bölümde, enerji tüketiminin izlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler tanıtılacak, avantajları ve dezavantajları ile birlikte karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Böylece, her yöntemin hangi koşullarda tercih edildiği ve enerji yönetimindeki rolü daha iyi anlaşılacaktır.

2.1 Girişimsel Yük İzleme (Intrusive Load Monitoring)

Girişimsel Yük İzleme (GYİ) (Intrusive Load Monitoring – ILM), elektrikli cihazların enerji tüketimlerini doğrudan ve bireysel olarak izlemek amacıyla her bir cihaza özel fiziksel ölçüm donanımı yerleştirilmesini esas alan bir enerji izleme yaklaşımıdır (Dhaou, 2023). Sistem mimarisi Şekil 2.1’de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Girişimsel Yük İzleme Yöntemine bir örnek.

Bu yöntem, enerji verilerinin cihaz düzeyinde ayrıntılı biçimde toplanmasını sağlayarak; enerji yönetimi, bakım planlaması ve tüketim analizleri gibi birçok uygulama alanında yüksek hassasiyet sunar. GYİ sistemlerinde genellikle her cihazın fişine entegre edilen akıllı prizler (smart plugs) kullanılır ve bu sayede doğrudan tüketim verisi elde edilerek kablosuz iletişim yoluyla merkezi veri toplama birimine iletilir (Dhaou, 2023). Akıllı priz Şekil 2.2’de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Akıllı Priz

Bu prizler genellikle Wi-Fi veya Bluetooth gibi kablosuz iletişim protokolleri aracılığıyla merkezi veri toplama birimine bağlanır ve ölçüm sonuçlarını anlık olarak iletir. Böylece kullanıcılar veya enerji yöneticileri, tüketim verilerini gerçek zamanlı takip edebilir, analiz edebilir ve gerektiğinde müdahalede bulunabilir.

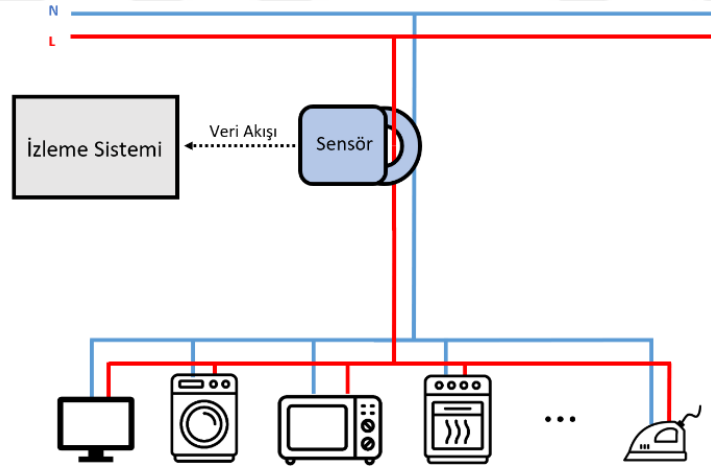
GYİ yönteminin temel avantajı, doğrudan ölçüm yapması nedeniyle yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunmasıdır. Cihaz bazında tüketim verilerinin elde edilmesi, herhangi bir tahmin, sınıflandırma veya sinyal işleme algoritmasına ihtiyaç kalmadan, gerçek zamanlı olarak cihazların enerji tüketim profillerinin net bir şekilde ortaya konmasına olanak tanır. Bu durum, özellikle enerji yönetimi, cihaz arızalarının erken tespiti ve bakım planlaması gibi uygulamalarda kritik önem taşır.

Ancak GYİ yönteminin kapsamlı uygulanması bazı zorlukları da beraberinde getirir. Her bir cihaza özel donanım yerleştirilmesi, özellikle büyük ölçekli binalar veya çok sayıda cihaz içeren endüstriyel tesislerde ciddi kurulum maliyetleri doğurabilir. Ayrıca, fiziksel erişimin sınırlı olduğu veya teknik müdahalenin zor olduğu alanlarda cihazlara erişim problemi yaşanabilir. Bu durum, GYİ’nin yaygınlaşmasını kısıtlayan önemli faktörlerden biridir. Sistem tüm cihazları kapsadığında, sensör ve bağlantı sayısının artması sistem karmaşıklığını ve bakım ihtiyacını yükseltir.

Sonuç olarak, Girişimsel Yük İzleme yöntemi; yüksek doğruluk ve detaylı veri sağlama kapasitesi sayesinde özellikle hassas enerji yönetimi, performans takibi ve arıza teşhisi gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak kurulum maliyetleri, sistem karmaşıklığı nedeniyle özellikle geniş ölçekli ve çok cihazlı ortamlarda uygulanabilirliği sınırlı kalabilmektedir.

2.2 Girişimsel Olmayan Yük İzleme (Non-Intrusive Load Monitoring)

Girişimsel Olmayan Yük İzleme (GOYİ), Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) olarak adlandırılan ve ilk kez 1992 yılında George W. Hart tarafından tanımlanan bir enerji izleme yöntemidir (Hart, 1992). Bu yöntem, bireysel cihazlara fiziksel sensörler yerleştirmeye gerek kalmadan, bir binadaki toplam elektriksel tüketimi tek bir noktadan izleyerek, bu toplamdan her bir elektrikli cihazın tüketimini tahmin etmeyi amaçlar. Genellikle bina girişindeki ana dağıtım panosu ya da elektrik sayacı gibi tek bir ölçüm noktasına yerleştirilen akım ve gerilim sensörleri yardımıyla sistemin genel tüketimi zaman serisi biçiminde izlenir. Bu yöntem, sistemin genel mimarisini Şekil 2.3'te gösterildiği gibi merkezi bir ölçüm ve merkezi bir analiz yaklaşımı üzerine kurar.



Şekil 2.3 : Girişimsel Olmayan Yük İzleme Yöntemine bir örnek.

GOYİ yönteminin en büyük avantajı, doğrudan cihazlara müdahale edilmesini gerektirmemesidir. Girişimsel yöntemlerde her bir cihaza özel sensör veya akıllı priz yerleştirilirken, GOYİ’de yalnızca tek bir ölçüm noktası kullanılır. Bu nedenle “girişimsel olmayan” olarak tanımlanır. Özellikle mevcut binalara entegrasyonu oldukça kolaydır; çünkü kablo altyapısında bir değişikliğe gidilmeden mevcut ana panoya ölçüm cihazı bağlanarak sistem devreye alınabilir. Bu özelliği sayesinde

GOYİ, düşük kurulum maliyeti, hızlı devreye alma ve kolay bakım gibi operasyonel avantajlar sunar (Liu vd., 2021). Ayrıca sistemin tüm tüketimi tek bir noktadan izlemesi sayesinde, sistem mimarisi sadeleşir ve uygulama alanı genişler. Bu sebeplerle, veri gizliliğine daha az müdahale edilmesi ve genel enerji yönetimi uygulamalarına kolayca entegre edilebilmesi açısından önemli bir çözüm haline gelmiştir (Tokam ve Ouro-Djobo, 2023).

Ancak GOYİ yönteminin bazı teknik sınırlılıkları da bulunmaktadır. Herhangi bir cihaza doğrudan bağlanmadığı için, sistem yalnızca toplam güç tüketimi verisini kullanarak, bu toplamın hangi cihazlara ait olduğunu ayırt etmeye çalışır. Bu da oldukça karmaşık algoritmalara ve yüksek işlem gücüne ihtiyaç duyan bir problem ortaya çıkarır. Sistem, birden fazla cihazın aynı anda çalıştığı, cihazların benzer güç profilleri gösterdiği veya kullanıcı davranışlarının rastlantısal olduğu durumlarda ayırt edici bilgiye ulaşmakta zorlanabilir. Ayrıca, toplam veriye yük gürültüsü gibi dışsal etkiler de karışabildiği için, ayrıştırma doğruluğu bu etkenlerden olumsuz etkilenebilir (Chen vd., 2016). Eşzamanlı çalışan cihazların oluşturduğu üst üste binmiş sinyaller, özellikle aynı güç seviyelerinde çalışan cihazların ayrıştırılmasını daha da zorlaştırmaktadır.

GOYİ sistemlerinde temel analiz birimi olan “yük imzası”, her bir cihazın çalışması sırasında ortaya çıkan özgün elektriksel özelliklerin bütünüdür. Bu imzalar; cihazın açılma ve kapanma süresi, anlık akım değişimi, güç katsayısı, harmonikler gibi çok sayıda bileşeni içerebilir. Ancak bu imzalar çoğunlukla çok boyutludur ve sinyal işleme açısından yüksek çözünürlük gerektirir. Özellikle benzer karakteristiklere sahip cihazlar söz konusu olduğunda, yük imzalarının doğru bir şekilde ayrıştırılması kritik bir rol oynamaktadır (Hoyo-Montaña vd., 2016). Literatürde, cihazları bu yük imzalarına göre tanımlamak amacıyla çok sayıda yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler genel olarak dört ana yaklaşım altında toplanmaktadır. İlk grupta yer alan kararlı ve geçici durum analizleri, cihazların açma–kapama anlarında ortaya çıkan ani güç değişimlerini ve geçici dalgalanmaları inceleyerek cihaz tanımlaması yapmayı hedeflemektedir (Hart, 1992). İkinci yaklaşım grubu olan frekans alanı analizleri, zaman alanındaki sinyaller yerine sinyalin frekans bileşenlerini değerlendirmekte; bu kapsamda harmonik içerik, spektral dağılım ve benzeri parametreler cihazlara özgü ayırt edici özellikler olarak kullanılmaktadır (Kang vd., 2020). Üçüncü grupta yer alan istatistiksel özellik tabanlı yöntemler ise ortalama, varyans ve maksimum değer gibi

temel istatistiksel ölçütler üzerinden ayırıştırma gerçekleştiren daha klasik yaklaşımları kapsamaktadır (Schirmer ve Mporas, 2019). Son olarak, derin öğrenme tabanlı yaklaşımlarda, evrişimli sinir ağları (Convolutional Neural Networks – CNN) gibi modeller kullanılarak ham ölçüm verilerinden özelliklerin otomatik olarak çıkarılması sağlanmakta ve sınıflandırma işlemi bu öğrenilen temsiller üzerinden gerçekleştirilmektedir (Bai vd., 2017). Özellikle son yıllarda yapay zekâ alanında yaşanan gelişmeler, GOYİ sistemlerinin doğruluğunu ve genel başarımını önemli ölçüde artırmıştır. Derin öğrenme tabanlı modeller, verilerden otomatik olarak öğrenme yapabildikleri için manuel özellik mühendisliğine gerek duymazlar ve benzer yük profillerini dahi başarıyla ayırt edebilirler. Bu nedenle, son dönem GOYİ çalışmalarının büyük bir bölümü yapay zekâ tekniklerine odaklanmıştır (Silva ve Liu, 2024).

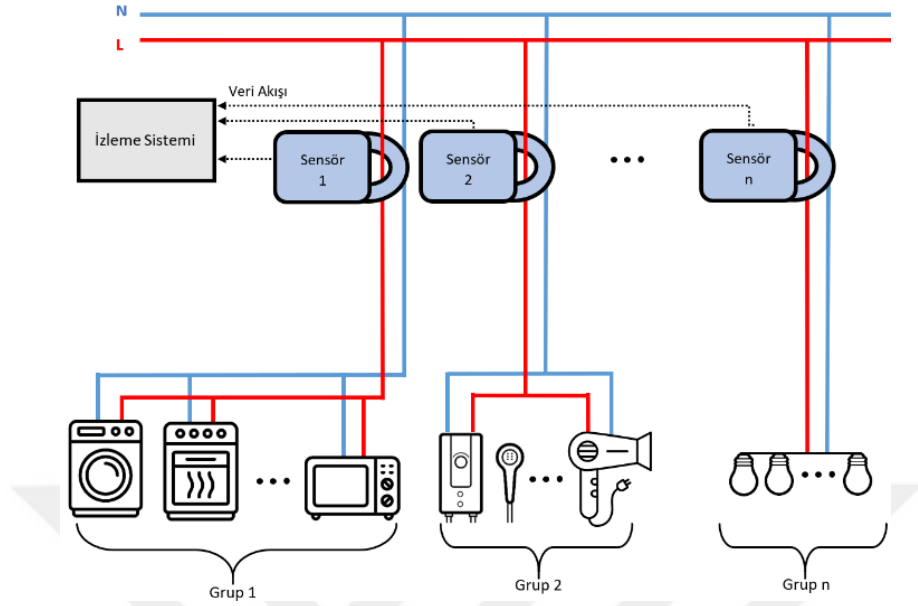
Sonuç olarak, GOYİ yöntemi, donanımsal sadeliği, düşük maliyeti ve mevcut altyapılarla kolay entegrasyonu sayesinde özellikle konut ve ticari yapılarda enerji yönetimi uygulamalarında güçlü bir çözüm haline gelmiştir. Ancak sistemin başarımı, kullanılan algoritmaların yetkinliğine, veri setlerinin kalitesine ve çevresel etkenlerin etkisine bağlıdır. Bu nedenle GOYİ sistemlerinin başarısı donanımdan çok yazılım altyapısının gelişmişliğine dayanmaktadır.

2.3 Yarı Girişimsel Yük İzleme (Semi Intrusive Load Monitoring)

Yarı Girişimsel Yük İzleme (YGYİ) yöntemi, Semi-Intrusive Load Monitoring (SILM) olarak adlandırılan, enerji tüketiminin izlenmesi ve analiz edilmesi konusunda Girişimsel Yük İzleme (GYİ) ve Girişimsel Olmayan Yük İzleme (GOYİ) yaklaşımlarının avantajlarını bir araya getirmeyi amaçlayan, hibrit ve dengeli bir yöntemdir (Tang vd., 2016), (Azizi vd., 2022). Duan ve arkadaşlarının belirttiği gibi, YGYİ sistemleri GYİ sistemlerine kıyasla daha az mahremiyet ihlali riski taşıırken, GOYİ sistemlerine göre ise daha yüksek doğruluk oranları sunmaktadır (Duan vd., 2022). Bu sayede, hem gizlilik hem de doğruluk açısından önemli avantajlar sağlanmaktadır.

Yarı girişimsel yöntemin temel prensibi, toplam elektrik yükünün işlevsel veya mekânsal temellere dayanarak farklı gruplara ayrılmasıdır. Bu gruplar, örneğin belirli bir oda, kat veya cihaz kategorisi gibi anlamlı kümeler oluşturur. Her grup, bağımsız

olarak izlenir ve bu sayede izleme süreci hem daha verimli hem de daha yönetilebilir hale gelir. YGYİ sisteminin genel yapısı Şekil 2.4'te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.4 : Yarı Girişimsel Yük İzleme Yöntemine bir örnek.

Bu yaklaşımda her bir sensör, belirli bir grup içindeki sınırlı sayıda cihazı izler ve bu sayede ayrık bir durum tablosu oluşturur. Böylece, karmaşık veri analizi işlemleri kolaylaşır ve ayrıştırma işleminin doğruluğu artar (Duan vd., 2022). Ayrık durum tablosunun gruplara ayrılması bahsedilen benzer yük karakteristiğine sahip cihazların tespitini kolaylaştırır. Yarı girişimsel yöntemlerde, her grup hattı girişimsel olmayan tekil bir kanal gibi değerlendirilir ve her bir kanal üzerinden toplanan veriler ayrı ayrı analiz edilir (Azizi vd., 2022). Bu yapı, hem ölçüm donanımı sayısının azaltılmasını sağlar hem de veri işleme açısından daha esnek ve etkili bir altyapı sunar.

YGYİ sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, grup bazında ölçüm yapılması sayesinde GYİ yöntemlerine kıyasla donanım ihtiyacının önemli ölçüde azalmasıdır. Geleneksel GYİ sistemlerinde her cihaz için ayrı bir akıllı priz veya sensör gerekebilirken, YGYİ'de bu sensör sayısı önemli oranda azaltılabilir. Örneğin, bir GYİ sistemi genellikle 20 ila 35 arasında sensör gerektirirken, yarı girişimsel bir sistem yalnızca 4 ila 6 sensörle benzer düzeyde ve etkili grup izleme gerçekleştirebilir. Bu, sensör sayısında yaklaşık %80'e varan bir azalma anlamına gelir. Sensör-cihaz sayısının azalması, kurulum maliyetlerinin düşmesine, montaj süresinin kısılmasına ve bakım gereksinimlerinin azalmasına yol açarak kullanıcıya operasyonel kolaylıklar

sağlar. Yapılan araştırmalar da az sayıda ek ölçüm noktasından elde edilen verilerin yük ayrıştırma işlemlerine önemli katkı sağladığını göstermektedir (Tang vd., 2016).

YGYİ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sensör türlerinden biri, Hall etkisi sensörleridir. Bu sensörler, manyetik alan ölçüm yetenekleri ve düşük maliyetleri sebebiyle tercih edilmektedir (Langevin vd., 2020). Ancak, bu sensörler manyetik alanlardan kolayca etkilenebilir ve bu durum ölçüm hatalarına yol açabilir. Özellikle sensörler arası enterferans (crosstalk) nedeniyle %35'e kadar hatalar görülebilir; bu da enerji tüketim tahminlerinin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir (Langevin vd., 2020). YGYİ sistemlerinin sensör maliyeti, GOYİ sistemlerine kıyasla biraz daha yüksek olsa da, uygun fiyatlı Hall etkisi sensörlerinin yaklaşık 4 dolar gibi düşük bir maliyete sahip olması, getirdiği ayrıştırma kolaylığı ve doğruluk avantajları göz önüne alındığında bu fark genellikle göz ardı edilebilmektedir.

Yarı girişimsel yük izlemenin bir diğer önemli avantajı ise çözünürlüğün ayarlanabilir olmasıdır. Yani, farklı güç seviyelerine sahip gruplar için farklı özelliklerde sensörler seçilebilir. Örneğin, diğer gruplara kıyasla daha düşük güç tüketen bir grubun ölçüm sensörü de düşük güçlü seçildiğinde, çözünürlük kaybı yaşanmaz. Bu durum, cihazların daha rahat ayrıştırılmasını ve enerji tüketim profillerinin daha hassas bir şekilde belirlenmesini sağlar.

Sonuç olarak, Yarı Girişimsel Yük İzleme yöntemi, enerji tüketiminin izlenmesi ve yönetiminde hem ekonomik hem de teknik açıdan dengeli ve etkili bir çözüm sunmakta; enerji verimliliği hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır.

2.4 Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Enerji tüketiminin izlenmesinde kullanılan GYİ (ILM), GOYİ (NILM) ve YGYİ (SILM) yaklaşımları; doğruluk, maliyet, kurulum karmaşıklığı ve mahremiyet açısından farklı avantajlar sunar.

GYİ, her cihaza ayrı sensör yerleştirerek ölçüm yaptığı için en yüksek doğruluğu sağlar ve ayrıştırma için genellikle ek algoritmaya ihtiyaç duymaz. Ancak çok sayıda sensör gerektirdiğinden maliyeti ve kurulum/bakım ihtiyacı yüksektir. Cihaz bazlı veri üretmesi nedeniyle mahremiyet riski de görece fazladır. Üç yöntemin genel karşılaştırması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Girişimsel, Girişimsel Olmayan ve Yarı Girişimsel yöntemlerin karşılaştırmalı özellikleri.

Özellik	GYİ (ILM)	GOYİ (NILM)	YGYİ (SILM)
Doğruluk	Yüksek	Orta (algoritmaya bağlı)	Orta
Ayarlanabilir Çözünürlük	Yüksek	Düşük	Orta
Donanım Maliyeti	Yüksek	Düşük	Orta-düşük
Kurulum Karmaşıklığı	Yüksek	Düşük	Düşük
Mahremiyet Riski	Yüksek	Düşük	Düşük
Bakım İhtiyacı	Yüksek	Düşük	Düşük
Ölçeklenebilirlik	Yüksek	Düşük	Orta
Algoritma İhtiyacı	Düşük	Yüksek	Orta
En Uygun Kullanım	Hassas enerji yönetimi	Genel tüketim izleme	Dengeli doğruluk ve maliyet

GOYİ, tek noktadan alınan toplam tüketim sinyalini ayrıştırmaya dayanır. Bu nedenle donanım maliyeti ve kurulum karmaşıklığı düşüktür, mevcut binalara entegrasyonu kolaydır. Buna karşın cihaz tespiti başarımı yüksek oranda algoritma gücüne ve veri kalitesine bağlıdır; benzer güç karakteristiğindeki cihazlarda hata payı artabilir. Mahremiyet açısından genelde daha avantajlıdır.

YGYİ ise cihazları gruplara ayırıp her grup için ölçüm alarak iki yaklaşım arasında denge kurar. Maliyet ve kurulum, GYİ'ye göre daha düşük; ayrıştırma başarımı ise GOYİ'ye göre daha yüksektir. Grup bazlı ölçüm sayesinde mahremiyet riski azalırken, doğru gruplandırma ile doğruluk-karmaşıklık dengesi pratik olarak iyileştirilebilir.

Genel olarak, GYİ hassas ve cihaz bazlı izleme için; GOYİ düşük maliyetli genel izleme için; YGYİ ise doğruluk-maliyet dengesinin istendiği konut uygulamaları için daha uygun bir seçenek sunmaktadır.

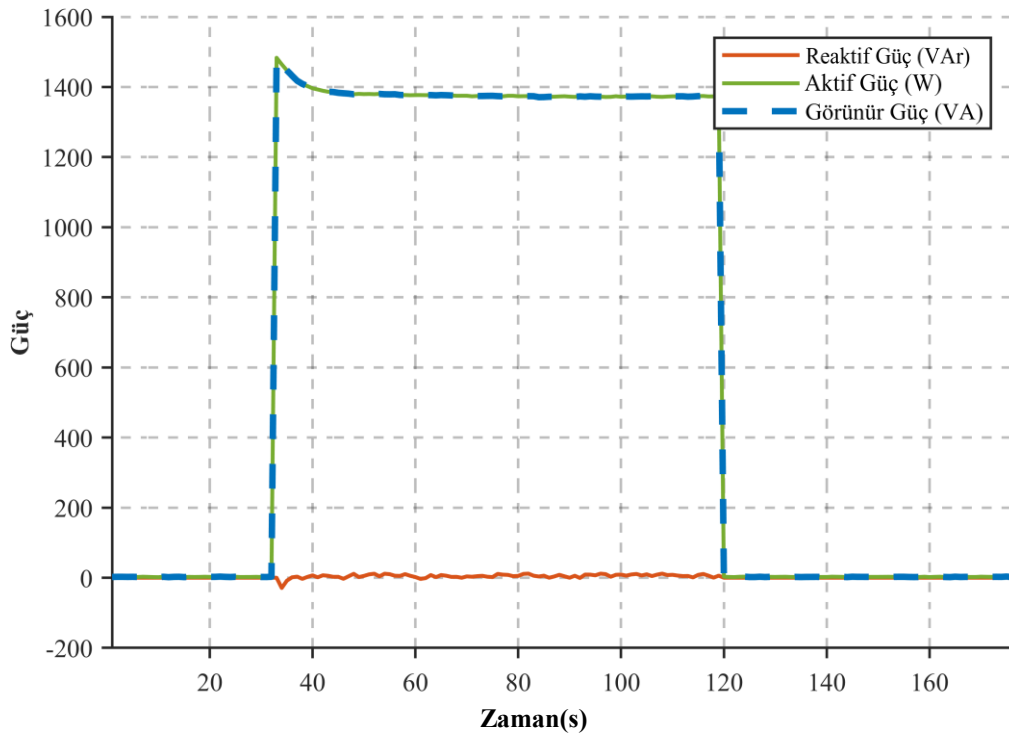
2.5 Lineer ve Lineer Olmayan Cihazlar

Enerji tüketimi izleme sistemlerinde, cihazların çalışma karakteristikleri sinyal işleme ve ayrıştırma yöntemlerinin başarısını doğrudan etkilemektedir. Genel olarak, cihazlar lineer ve lineer olmayan davranış özellikleri gösterir. Lineer cihazlar, giriş sinyali ile çıkış güç tüketimi arasında doğrusal ve öngörülebilir bir ilişki kurar. Bu durum, özellikle sinyal modelleme ve ayrıştırma işlemlerinde sadeleştirme sağlar.

2.5.1 Basit lineer cihazlar

Enerji tüketimi izleme sistemlerinde, cihazların çalışma karakteristikleri sinyal işleme ve ayrıştırma yöntemlerinin başarısını doğrudan etkilemektedir. Genel olarak, cihazlar lineer ve lineer olmayan davranış özellikleri gösterir. Lineer cihazlar, giriş sinyali ile çıkış güç tüketimi arasında doğrusal ve öngörülebilir bir ilişki kurar. Bu durum, özellikle sinyal modelleme ve ayrıştırma işlemlerinde sadeleştirme sağlar.

Tipik olarak tek kademeli ve sabit yük profiline sahip cihazlar (elektrikli ısıtıcılar, akkor lamba vs.) çalışma süresi boyunca kararlı bir güç tüketimi sergiler. Bu cihazların zaman eksenindeki sinyal çıktısı, Şekil 2.5'te görüldüğü üzere ilk açılma anından sonra düz ve sabit genlikli bir yapıya sahiptir.



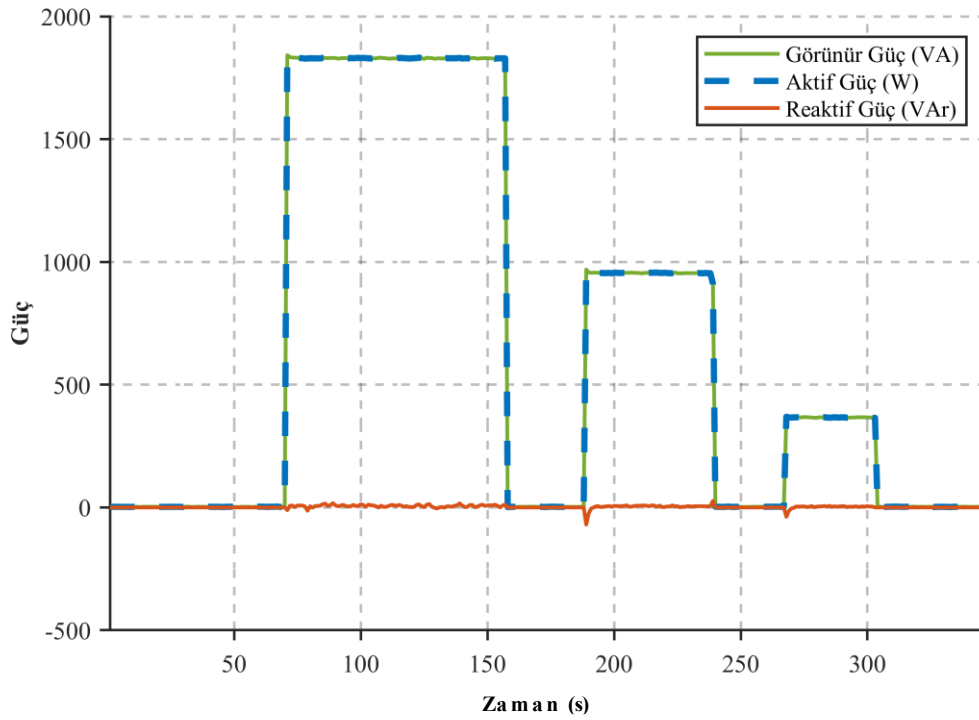
Şekil 2.5 : Basit lineer cihazın güç-zaman grafiği.

Bu tür cihazların ölçüm sisteminden ayıklanması, hem sinyal bileşenlerinin sadeleştirilmesini sağlar hem de diğer cihazlara ait sinyallerin daha net analiz edilmesine imkân tanır.

2.5.2 Karmaşık (çok modlu) lineer cihazlar

Öte yandan, bazı cihazlar birden fazla modda çalışan, çok kademeli güç profiline sahip sistemlerdir. Bu cihazlar temel yapıda olmalarına rağmen, kullanıcı tercihinine göre farklı seviyelerde çalışabilir.

Şekil 2.6, bu tür çok kademeli çalışan basit bir cihazın yalnızca kullanıcı kontrolüyle değişen modlarının güç tüketim profilini göstermektedir.

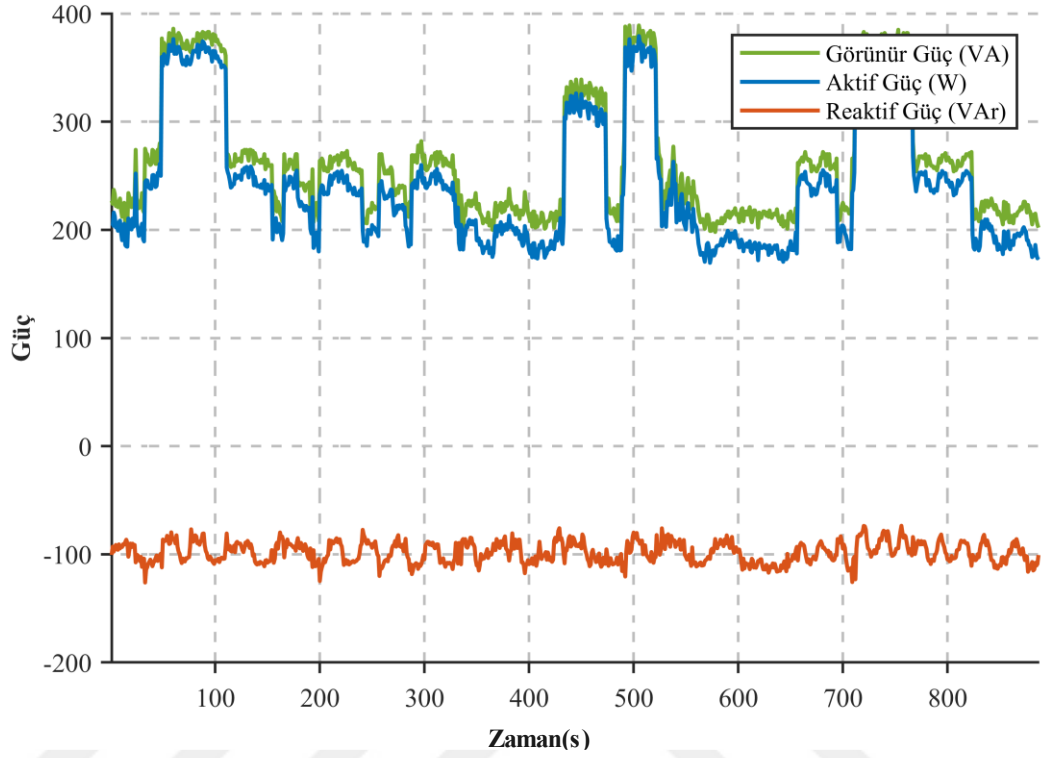


Şekil 2.6 : Çok Modlu Lineer cihazın güç-zaman grafiği.

2.5.3 Lineer olmayan (nonlinear) cihazlar

Lineer olmayan cihazlar, güç tüketiminde giriş sinyali ile çıkış arasında doğrusal olmayan, genellikle karmaşık ve dinamik davranışlar sergileyen cihazlardır. Bu cihazlar, elektriksel olarak değişken yükler içerir ve genellikle elektronik devreler, motor kontrol üniteleri veya inverter teknolojisi kullanırlar. Bu nedenle güç tüketimleri zaman içinde değişkenlik gösterebilir ve sinyal yapısı lineer cihazlara göre çok daha karmaşıktır.

Örnek olarak ayarlanabilir hız kontrolüne sahip matkaplar, inverterli klimalar, bilgisayarlar ve çamaşır makineleri gibi elektronik ve motor kontrollü cihazlar verilebilir. Bilgisayarın güç zaman grafiği Şekil 2.7’de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Lineer olmayan cihazın (bilgisayar) güç-zaman grafiğine örnek.

Bu tür cihazlarda, çalışma modlarına göre ani güç değişimleri olmasının yanında, çalışma esnasında meydana gelen sinyal bozulmaları, harmonikler ve gürültüler sinyal ayrıştırmayı zorlaştırır.

Lineer olmayan cihazların sinyal bileşenleri, geleneksel sinyal işleme teknikleriyle ve klasik yapay zeka modelleriyle ayrıştırılması güçtür. Bu nedenle, gelişmiş makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları gibi daha karmaşık yöntemler gerektirir. Ayrıca, cihazların farklı modlarda veya çalışma durumlarında ortaya çıkan güç dalgalanmalarının doğru tespiti ve ayrıştırılması, enerji izleme sistemlerinin performansını doğrudan etkiler.

Çok modlu ve dinamik davranışlar sergileyen bu cihazların izlenmesi, özellikle girişimsel olmayan (NILM) ve yarı-girişimsel yöntemlerde en büyük zorluklardan biridir. Bu nedenle, sinyal karmaşıklığını azaltmak amacıyla, önce lineer cihazların ayrıştırılması ve Çizelge 2.2’de cihaz türleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.2 : Cihaz türlerinin karşılaştırmalı özellikleri.

Cihaz Türü	Örnek Cihazlar	Çalışma Karakteristiği	Özellikler
Basit Lineer Cihazlar	Ampul (akkor), elektrikli ısıtıcı (rezistanslı), su ısıtıcısı, elektrikli ocak, elektrikli ütü, süpürge	Doğrusal (Lineer)	Sabit güç tüketimi, giriş-çıkış sinyallerinde doğrusal ilişki, sinyal ayrıştırması kolay.
Çok Modlu Lineer Cihazlar	Fön makinesi (birden çok ısı ve hız modu), elektrikli ısıtıcı (kademeli), süpürge (kademeli)	Doğrusal, birden fazla sabit modlu	Sabit güç seviyeleri, mod geçişlerinde ani güç değişimi, sinyalde birkaç sabit seviyede değişim
Lineer Olmayan Cihazlar	Çamaşır makinesi, inverterli klima, bilgisayar, mikrodalga, matkap, buzdolabı (inverterli)	Doğrusal olmayan, karmaşık ve değişken	Elektronik kontrol, inverter ve motor kullanımı nedeniyle karmaşık sinyal yapısı, ayrıştırılması zor

2.6 Mutlak Değer Tabanlı Kenar Tespiti ile Grup Bazlı Eşik Uygulaması

Enerji tüketimi izleme sistemlerinde cihazların devreye girip çıkması ya da çalışma modlarının değişmesi, güç zaman serisinde ani değişimlere neden olur. Bu geçişler, güç sinyalinin eğiminde keskin sıçramalar olarak gözlemlenebilir ve değişim algoritmalarıyla tespit edilebilir.

Bir zaman serisi olarak ifade edilen güç sinyali $P(t)$, zamana göre değişimi alındığında Denklem 2.1’de olduğu gibi ifade edilir.

$$\Delta P(t) = P(t) - P(t - \Delta t) \quad (2.1)$$

Bu farkın mutlak değeri, önceden tanımlanmış bir minimum güç değişim eşiği ile Denklem 2.2’de olduğu gibi karşılaştırılır.

$$|\Delta P(t)| > \Delta P_{\min} \quad (2.2)$$

Bu koşul sağlandığında, t anındaki değişim bir cihazın açılması, kapanması veya çalışma modunun değişimi olarak değerlendirilir. Yani, sinyalin eğimi yerine doğrudan güçteki ani sıçrama veya düşüş miktarı dikkate alınır. Aynı yöntem, reaktif güç $Q(t)$ için de ayrı ayrı uygulanarak kararın güvenilirliği artırılır.

Sistemde kullanılan grup bazlı sensör yerleşimi sayesinde, farklı fiziksel hatlara bağlı cihaz kümeleri birbirinden bağımsız olarak izlenmektedir. Her bir grubun yük

karakteristiği farklı olduğundan, güç değişim eşığı grupların her birine özel olarak belirlenmiştir. Örneğin:

- Yüksek güçlü cihazların bulunduğu gruplar için daha büyük eşik değerleri,
- Düşük güçlü cihazların bulunduğu gruplar için ise daha küçük eşik değerleri kullanılmaktadır.

Bu yaklaşım sayesinde, yüksek güçlü gruplarda küçük değişimlerin yanlış pozitif tespitlere neden olması engellenirken, düşük güçlü gruplarda küçük değişimlerin gözden kaçmaması sağlanmaktadır.

2.7 Faz Kayması Tabanlı Reaktif Güç Hesabı ve Cihaz Tanıma

Enerji izleme sistemlerinde yalnızca aktif güç değil, reaktif ve görünür güç gibi bileşenlerin de ölçülmesi, özellikle motorlu ve elektronik tabanlı cihazların ayrıştırılmasında kritik rol oynamaktadır. Bu kapsamda, gerilim ve akım sinyalleri arasındaki faz kaymasının hesaplanması; yalnızca enerji ölçümü değil, aynı zamanda cihaz tespiti için de güçlü bir parametre sunmaktadır.

Çalışmada, gerilim $V(t)$ ve akım $I(t)$ sinyallerinin ilk sıfır geçiş noktaları üzerinden faz kayması tespit edilmektedir. Her bir sinyal için negatiften pozitiften geçen ilk örnek tespit edilir:

- t_V : Gerilim sinyalinin sıfır geçiş zamanı
- t_I : Akım sinyalinin sıfır geçiş zamanı

Bu iki zaman farkı üzerinden faz farkı (radyan cinsinden) Denklem 2.3'te olduğu gibi hesaplanır:

$$\emptyset = 2\pi \cdot f \cdot |t_I - t_V| \quad (2.3)$$

Burada:

- f : Şebeke frekansı (50 Hz)
- $|t_I - t_V|$: Gerilim ve akımın sıfır geçiş zamanları arasındaki fark (saniye)

Bu işlem mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmakta ve faz farkının sürekli takibini sağlamaktadır.

RMS değeri, alternatif sinyalin eşdeğer doğru akım (DC) etkisini temsil eder ve güç hesaplamalarında temel bir parametredir.

Ayrık zamanlı bir sinyal için RMS değeri aşağıdaki Denklem 2.4'te olduğu gibi ifade edilir:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2} \quad (2.4)$$

Burada:

- $x[n]$: Sinyalin n. örneği,
- N : Örnekleme periyodu boyunca alınan örnek sayısı.

Faz farkı bilgisi kullanılarak, sistemde üç temel güç bileşeni hesaplanmaktadır:

Aktif Güç (P) Denklem 2.5'te olduğu gibi ifade edilir.

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\phi) \quad (2.5)$$

Reaktif Güç (Q) Denklem 2.6'te olduğu gibi ifade edilir.

$$Q = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin(\phi) \quad (2.6)$$

Görünür Güç (S) ise Denklem 2.7'te olduğu gibi ifade edilir.

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (2.7)$$

Burada:

- V_{rms} ve I_{rms} : Gerilim ve akımın RMS değerleridir.
- ϕ : Faz farkı, radyan cinsinden.

Sistem, bu üç güç bileşenini kullanarak cihazlara ait enerji davranışlarını ayırtmaktadır. Özellikle reaktif güç değeri, cihazların indüktif ya da kapasitif karakterlerini belirlemek açısından ayırt edici bir rol üstlenir.

Reaktif gücün sıfıra yakın olması cihazın rezistif, pozitif olması indüktif ve negatif olması kapasitif karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, aktif güç

değerleri benzer olan cihazlar, reaktif gücün işareti ve büyüklüğü kullanılarak daha güvenilir biçimde ayrıştırılabilmektedir.

2.8 Ölçüm Doğruluğunu Artırmaya Yönelik Filtreleme Yöntemleri

Faz kaymasının doğru ölçülebilmesi ve genel güç hesaplamalarının güvenilir bir şekilde yapılabilmesi, büyük ölçüde sinyalin gürültüden arındırılmış hâliyle işlenmesine bağlıdır. Bu bağlamda, sistemde uygulanan sinyal işleme süreci üç temel adımdan oluşmaktadır: filtreleme, parametre hesaplama ve kablosuz veri iletimi. Bu üçlü yapı, ölçüm sisteminin hem zamansal hem de hesaplama doğruluğunu artırmak üzere yapılandırılmıştır.

Gerçek dünya koşullarında, sensörlerden alınan akım ve gerilim sinyalleri genellikle çeşitli gürültü ve geçici rejim etkilerine maruz kalır. Özellikle anahtarlama güç kaynakları, elektromanyetik parazit (EMI) ve yük geçişlerinden kaynaklı geçici bozulmalar (transient etkiler), sinyalin saf karakteristik yapısını bozarak faz farkı, RMS ve güç hesaplamalarında hataya yol açabilir. Bu tür etkileri bastırmak amacıyla sistemde iki aşamalı filtreleme stratejisi uygulanmıştır.

2.8.1 Medyan filtre

İlk aşamada, sinyaldeki ani uç değerleri ve kısa süreli parazitik bozulmaları bastırmak üzere doğrusal olmayan bir medyan filtre kullanılmıştır. Bu filtre, örnekleme penceresindeki değerlerin ortanca (medyan) değerini alarak, sıçramaların sinyal üzerindeki etkisini azaltır ve daha stabil bir işaret elde edilmesini sağlar. Bu işlem özellikle switching kaynaklı ani sıçramaların baskılanmasında etkilidir.

Matematiksel tanımıyla, $x[n]$ giriş sinyali için medyan filtre çıkışı Denklem 2.8’de olduğu gibi tanımlanır:

$$y[n] = \text{median} \{ x[n - k], x[n - k + 1], \dots, x[n + k] \} \quad (2.8)$$

Burada:

- $x[n]$: Giriş (ölçülen) sinyalin n. örneği
- $y[n]$: Filtrelenmiş (çıktı) sinyal
- k : Filtre penceresinin yarı uzunluğu (pencere uzunluğu $W=2k+1$)

2.8.2 Hareketli ortalama filtresi

İkinci aşamada, medyan filtrelenmiş sinyalin genel eğilimlerini daha da yumuşatmak amacıyla hareketli ortalama filtresi uygulanmıştır. Bu filtre, her bir örnekleme anındaki değeri, belirli uzunluktaki pencere içerisindeki örneklerin aritmetik ortalamasıyla değiştirerek sinyali daha düzgün bir hale getirir.

Matematiksel olarak hareketli ortalama Denklem 2.9’da olduğu gibi ifade edilir:

$$y[n] = \frac{1}{W} \sum_{k=0}^{W-1} x[n - k] \quad (2.9)$$

Burada:

- $y[n]$: n. örnekteki filtrelenmiş çıkış
- $x[n-k]$: Giriş sinyalinin önceki W örneği
- W: Ortalama penceresinin uzunluğu (örnek sayısı)

2.8.3 Klasik hareketli ortalama hesabı ve zaman karmaşıklığı

Klasik (optimize edilmemiş) hareketli ortalama yaklaşımında, Denklem 2.10’de olduğu gibi her yeni örnek için pencere içindeki tüm değerler yeniden toplanır:

$$y[n] = \frac{1}{W} \sum_{k=0}^{W-1} x[n - k] \quad (2.10)$$

Bu yaklaşımda her çıktı örneği için yaklaşık W-1 toplama işlemi gerektiğinden, N örnek için toplam toplama sayısı yaklaşık olarak Denklem 2.11’de olduğu gibi ifade edilir.

$$N_{\text{add,klasik}} \approx (N - W + 1) \cdot (W - 1) \quad (2.11)$$

Dolayısıyla zaman karmaşıklığı $O(N \cdot W)$ olur. Pencere boyutu büyüdükçe işlem yükü doğrusal biçimde artar; bu durum yüksek örnekleme hızlarında gerçek zamanlı çalışmayı zorlaştırabilir.

2.8.4 Kayan toplam (sliding sum) ile optimize hareketli ortalama ve zaman karmaşıklığı

Optimize yaklaşımda “kayan toplam (sliding sum)” yöntemi kullanılır. İlk pencerenin toplamı bir kez hesaplandıktan sonra pencere her kaydırıldığında Denklem 2.12’de ve Denklem 2.13’te olduğu gibi yalnızca pencereye giren örnek eklenir ve çıkan örnek çıkarılır:

$$S[n] = S[n - 1] + x[n] - x[n - W] \quad (2.12)$$

$$y[n] = \frac{S[n]}{W} \quad (2.13)$$

Bu sayede her adımda sabit sayıda işlem (temelde bir toplama + bir çıkarma) yeterli olur. Toplam işlem sayısı yaklaşık olarak Denklem 2.14’te verilmiştir.

$$N_{\text{add, opt}} \approx (W - 1) + 2 \cdot (N - W) \quad (2.14)$$

Bu sayede zaman karmaşıklığı $O(N)$ seviyesine iner. Böylece pencere uzunluğunun işlem süresine etkisi büyük ölçüde azaltılarak gerçek zamanlı uygulamalara uygunluk artırılır.

Çizelge 2.3’te Hareketli ortalama filtrelerinin karmaşıklık karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Hareketli ortalama filtrelerinin karmaşıklık karşılaştırması.

Fonksiyon	Yaklaşım	Zaman Karmaşıklığı	Açıklama
moving_avg_opt_degil	Klasik toplama	$(O(N.W))$	Her adımda pencere yeniden toplanır
moving_average	Kayan toplam	$(O(N))$	Her adımda iki güncelleme işlemi

2.9 Harmonik Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı

Klasik RMS veya ortalama güç tabanlı yöntemler, farklı cihazlar benzer aktif güç (P) değerleri sergilediklerinde ayırt etme açısından yetersiz kalabilmektedir. Özellikle doğrusal olmayan yükler (örneğin, doğrultucu devreler, LED sürücüler, inverter tabanlı motorlar) bu duruma tipik örnek teşkil eder. Bu tür cihazlar, doğrusal olmayan akım-gerilim ilişkileri nedeniyle temel frekansın katları biçiminde harmonik bileşenler üretir.

Bir sinyalin zaman alanındaki ifadesi $i(t)$ iken, frekans alanındaki karşılığı Fourier dönüşümü aşağıdaki Denklem 2.15'te olduğu gibi elde edilir:

$$I(f) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.15)$$

Dijital uygulamalarda bu dönüşüm Ayırık Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile Denklem 2.16'da olduğu gibi gerçekleştirilir:

$$I[k] = \sum_{n=0}^{N-1} i[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.16)$$

Burada N , FFT penceresindeki örnek sayısını temsil eder. Elde edilen $I[k]$ spektrumu, temel bileşen (k_1) ve onun katları olan harmonikleri ($k_2, k_3, \dots$) içerir.

2.9.1 Harmonik genlik ve faz vektörleri

Her bir harmonik bileşen için genlik ve faz değerleri Denklem 2.17'de ve 2.18'de olduğu gibi tanımlanır:

$$A_h = \frac{2}{N} |I[h]| \quad (2.17)$$

$$\phi_h = \arg(I[h]) \quad (2.18)$$

Burada:

- A_h : h . harmonik bileşenin genliği,
- ϕ_h : h . harmonik bileşenin fazı,
- $h=1,2,3,\dots,H_{max}$: analiz edilen harmonik mertebesidir.

Bir cihazın imzası Denklem 2.19'da olduğu gibi vektörel biçimde ifade edilebilir.

$$H = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_H] \quad (2.19)$$

Veya genlik-faz ilişkilerini birlikte içeren karmaşık formda Denklem 2.20'de olduğu gibi ifade edilebilir.

$$H_c = [A_1 e^{j\phi_1}, A_2 e^{j\phi_2}, \dots, A_H e^{j\phi_H}] \quad (2.20)$$

Faz bilgisi, her harmonik bileşenin temel bileşene göre ne kadar ileride veya geride olduğunu gösterir.

Bu fark, Denklem 2.21'deki gibi tanımlanır:

$$\Delta\phi_h = \phi_h - \phi_1 \quad (2.21)$$

Bu değer, ilgili harmonik bileşenin faz önderliği ($\Delta\phi_h > 0$) veya faz geriliği ($\Delta\phi_h < 0$) miktarını ifade eder.

2.9.2 Harmonik süperpozisyonu ve cihazların birlikte çalışması

Bir sistemde birden fazla cihaz aynı anda çalışıyorsa, her biri kendi akımını sisteme ekler. Bu durumda toplam akım sinyali, cihazların akımlarının süperpozisyonu olarak ifade edilir. Denklem 2.22'de bu süperpozisyon verilmiştir.

$$i_{toplamlam}(t) = i_1(t) + i_2(t) + \dots + i_n(t) \quad (2.22)$$

Fourier dönüşümü doğrusal bir işlem olduğundan, frekans alanında da aynı ilişki Denklem 2.23'deki gibi geçerlidir:

$$i_{toplamlam}(f) = i_1(f) + i_2(f) + \dots + i_n(f) \quad (2.23)$$

Bu ifade, her bir cihazın kendi harmonik bileşenlerinin sistemin toplam spektrumuna bağımsız olarak katkıda bulunduğunu gösterir. Dolayısıyla iki cihaz aynı anda çalıştığında, her bir cihazın ürettiği harmonikler toplam spektrumda ayrı ayrı korunur. Örneğin biri doğrusal (rezistif), diğeri doğrusal olmayan (örneğin LED sürücü) bir cihaz olduğunda, LED sürücünün karakteristik harmonikleri (örneğin 3. ve 5. harmonikler) sistemde diğerk yüklerden etkilenmeden gözlenmeye devam eder.

Bu durumda toplam akımın temel bileşen genliği artsa bile, ilgili cihazın özgün harmonik genlikleri büyük oranda sabit kalır. Bu özellik, sistemde aynı anda çalışan cihazların frekans-domain imzaları üzerinden tanımlanabilmesini sağlar. Harmonik bileşenlerin bu “kalıcılığı”, cihazın aktif durumda olup olmadığının tespitinde güvenilir bir kriter sunar.

2.9.3 Toplam harmonik bozulma (THD)

Bir cihazın harmonik bileşen yoğunluğu, Toplam Harmonik Bozulma (THD) oranı ile nicel olarak Denklem 2.24'deki gibi ifade edilir:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{max}} A_h^2}}{A_1} \times 100\% \quad (2.24)$$

Bu oran, cihazın doğrusal olmayan davranışını yansıtır.

Örneğin:

- LED sürücüler veya SMPS devrelerinde $THD > 40$
- Saf rezistif yüklerde $THD \approx 0\%$ olur.

2.9.4 Harmonik bileşenlerin ayırt edici gücü

Cihaz tanıma sürecinde harmonik bileşenlerin genlik ve faz ilişkileri, cihazın elektriksel karakteristiğini doğrudan yansıtır. Her cihaz, yapısındaki doğrusal olmayan elemanlar (örneğin diyot, MOSFET, tristör, vb.) nedeniyle farklı harmonik bileşen oranlarına ve faz kaymalarına sahiptir. Bu farklılıklar, cihazın elektriksel davranışını temsil eden harmonik imzasını (harmonic signature) oluşturur.

Harmonik tabanlı öznitelikler genellikle aşağıdaki Denklem 2.25'deki gibi tanımlanır:

$$F_{harm} = [THD, A_3/A_1, A_5/A_1, \phi_3 - \phi_1, \dots] \quad (2.25)$$

Bu vektör, her cihaz için sabit kalan ve diğer cihazlardan farklılaşan bir desen üretir. Örneğin direnç tabanlı yüklerde (örn. tost makinesi, ütü) temel bileşen baskındır, harmonikler ihmal edilebilir düzeydedir. Doğrultucu veya SMPS tabanlı yüklerde (örn. LED sürücü, laptop adaptörü) 3. ve 5. harmonikler belirgin biçimde yüksektir. Motorlu cihazlarda ise (örn. fön, blender) temel bileşene ek olarak düşük mertebeli harmonikler faz kaymasıyla birlikte gözlemlenir.

Bu farklılıklar, cihaz tanıma algoritmalarında sınıflandırma öznitelikleri olarak kullanılabilir. Örneğin, A_3/A_1 oranı veya THD değeri, cihazın tipini belirlemede tek başına güçlü bir ayırım kriteri olabilir.

Bununla birlikte, harmonik faz ilişkilerinin eklenmesi, aynı güçteki benzer cihazların daha doğru şekilde ayırt edilmesini sağlar. Bu nedenle, harmonik tabanlı tanıma

yöntemleri, klasik RMS tabanlı yaklaşımlara kıyasla çok daha yüksek seçiciliğe sahiptir.

2.10 Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine) Tabanlı Cihaz Tanıma

Yaklaşımı

Enerji izleme ve cihaz tanıma sistemlerinde, cihazların yalnızca anlık güç değerleriyle değil, zaman içinde sergiledikleri davranış dizileri ile de tanımlanması mümkündür. Özellikle çok kademeli çalışan çamaşır/bulaşık makineleri gibi cihazlar, tek bir açma–kapama olayından ziyade, farklı güç seviyeleri arasında geçiş yapan çok sayıda çalışma modu içerir. Bu tez kapsamında, cihazların açılma, çalışma ve kapanma süreçleri boyunca gözlenen güç değişimlerinin sıralı yapısını modellemek için Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine – FSM) yaklaşımı kullanılmaktadır.

2.10.1 FSM’nin matematiksel tanımı

FSM, bir cihazın farklı çalışma modlarını (durumlarını) ve bu modlar arasındaki geçişleri temsil eden bir matematiksel modeldir. Genel biçimiyle FSM, Denklem 2.26’daki gibi tanımlanır:

$$FSM = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0) \quad (2.26)$$

Burada;

- $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$: cihazın olası durum kümesini (örneğin “kapalı”, “su alma”, “yıkama”, “ısıtma”, “durulama” vs.),
- $X = \{x_1, x_2, \dots\}$: giriş kümesini (bu çalışmada, ölçülen güç değişimleri veya bunlardan türetilen öznitelikler),
- $Y = \{y_1, y_2, \dots\}$: çıktı kümesini (“cihaz açıldı”, “cihaz kapandı”, “mevcut cihaz durum değiştirdi” vs.),
- $\delta: S \times X \rightarrow S$: durum geçiş fonksiyonunu,
- $\lambda: S \times X \rightarrow Y$: çıktı fonksiyonunu,
- s_0 : sistemin başlangıç durumunu ifade eder.

Bu yapıda FSM, her zaman adımında bir önceki durumu $s(t)$ ve o anda gözlenen giriş vektörünü $x(t)$ kullanarak bir sonraki durumu Denklem 2.27’de verildiği gibi $s(t+1)$ ’i belirler.

$$s(t + 1) = \delta(s(t), x(t)) \quad (2.27)$$

Denklem 2.28 ise, aynı anda mevcut durum ve girişe bağlı olarak $\lambda(\cdot)$ fonksiyonu üzerinden “cihaz açıldı/kapandı/durum değiştirdi” gibi olay çıktısı $y(t)$ ’nin özetilmesini tanımlar.

$$y(t) = \lambda(s(t), x(t)) \quad (2.28)$$

2.10.2 Güç değişimine dayalı giriş vektörü

Bu tezde enerji izleme, merkezi bir ölçüm noktasından elde edilen aktif güç $P(t)$ ve reaktif güç $Q(t)$ zaman serileri üzerinden yürütülmektedir. Cihaz tanıma temel olarak, bu zaman serilerinde gözlenen ani adım değişimlerinin tespiti ve yorumlanmasına dayanır. Bu nedenle FSM’in giriş vektörü Denklem 2.29’da gözüktüğü üzere ilgili zaman anında ölçülen güç değişimlerinden oluşturulmaktadır:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \Delta P(t) \\ \Delta Q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(t) - P(t^-) \\ Q(t) - Q(t^-) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

burada t^- , olay öncesi zamanı (bir önceki örnekleme anı) göstermektedir. $\Delta P(t)$ ve $\Delta Q(t)$ sırasıyla aktif ve reaktif güçteki ani değişimleri ifade eder ve her adım, potansiyel bir cihaz açma/kapatma ya da durum değiştirme olayının göstergesi olarak değerlendirilir.

Basit bir örnek olarak, tek kademeli bir cihazın (örneğin klasik bir rezistif yük) açılma–kapanma davranışı Denklem 2.30’da gözüktüğü gibi idealize edilebilir:

$$s(t + 1) = \begin{cases} s_{on}, & \text{eğer } \Delta P_{on} - A \leq \Delta P(t) \leq \Delta P_{on} + A \\ s_{off}, & \text{eğer } \Delta P_{off} - A \leq \Delta P(t) \leq \Delta P_{off} + A \\ s_{steady}, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (2.30)$$

Burada ΔP_{on} ve ΔP_{off} , ilgili cihaz için eşik değerlerini, A ise tolerans değerini temsil eder. Eşikler aşılsa FSM, cihazın “kapalı” durumundan “açık” durumuna ya da tam tersi yöne geçtiği sonucuna varır; aksi halde mevcut durumun korunduğu kabul edilir. Bu basit kural, tezde kullanılan daha karmaşık çok kademeli FSM yapısının temel mantığını göstermesi açısından yararlıdır.

2.10.3 Davranış imzası ve sıralı yapı

FSM yapısında, her cihaz belirli çalışma modları arasında, ölçülen enerji bileşenlerine göre geçiş yapar. Bu modlar; “kapalı”, “başlatılıyor”, “kararlı çalışma”, “yüksek güç modu”, “pompa çalışması”, “kapanış” gibi farklı fiziksel süreçlerle ilişkilendirilebilir. Cihazın çalışma süreci boyunca bu geçişlerin sırası ve karakteristik büyüklükleri, işlemci tarafından Denklem 2.31’deki biçimde kaydedilerek, her bir cihaza özgü bir davranış imzası (signature) oluşturulur.

$$\{s_0, s_1, s_2, \dots, s_k\} \quad (2.31)$$

Bu imza, cihazın yalnızca ortalama veya anlık güç tüketimiyle değil, zaman içindeki dinamik tepkisiyle de tanımlanmasını sağlar.

2.10.4 FSM’nin rolü: doğrulama ve maskeleyme

Literatürde FSM, çoğu zaman doğrudan “cihaz tanıma” modülü olarak ele alınmakta; her yeni durum geçişi bir cihazın açılması veya kapanması ile eşleştirilmektedir. Bu tezde ise FSM biraz farklı bir amaçla kullanılmaktadır. Geliştirilen yarı-girişimsel sistemde ölçülen toplam güçteki adım değişimleri analiz edilerek her olay için $\Delta P(t)$ ve $\Delta Q(t)$ çıkarılmıştır.

Özellikle bulaşık makinesi gibi çok kademeli cihazlar için çıkarılan FSM modeli, cihazın aktif olduğu süre boyunca aşağıdaki işlevleri üstlenir:

1. Cihazın o anda hangi durumda olduğunu (örneğin su alma, yıkama, ısıtıcı, durulama vb.) takip eder.
2. Yeni gözlenen $\Delta P(t)$, $\Delta Q(t)$ adımlarının, bu cihaz için fiziksel olarak beklenen bir durum geçişine karşılık gelip gelmediğini denetler.
3. Eğer adım, büyüklük olarak cihazın bilinen durum geçişlerinden biriyle uyumlu ve FSM’e göre mevcut durumdan izin verilen bir geçiş ise, bu olay “mevcut cihazın durum değiştirmesi” olarak yorumlanır ve yeni bir cihazın açıldığı bilgisi üretilmez.
4. Eğer adım, ne büyüklük ne sıra açısından FSM ile uyumlu değilse, bu durumda olay başka bir cihazın devreye girmesi olarak değerlendirilir.

Bu bakış açısıyla FSM, yalnızca “hangi cihaz çalışıyor?” sorusuna cevap vermekten ziyade, “şu anda çalışmakta olduğu bilinen cihaz ne yapıyor ve bu sırada diğer cihazların yanlış tespit edilmesi nasıl engellenir?” sorusuna odaklanmaktadır.

Sonuç olarak bu tezde FSM, güç değişimine dayalı cihaz tanıma mimarisinin kritik bir tamamlayıcı unsuru olarak konumlandırılmıştır. İlk katman, cihazları $\Delta P(t)$ ve $\Delta Q(t)$ üzerinden tanımlarken, FSM katmanı zaman içi tutarlılık ve durum geçiş sırası bilgisini kullanarak hem tanıma performansını artırmakta hem de çok cihazlı senaryolarda cihazların birbirine karışmasını önlemektedir.

2.11 Gerilim–Akım (V–I) Grafiklerinden Özellik Çıkarımı

Birinci bölümde, gerilim–akım (V–I) grafiklerinin yük tanıma problemlerindeki genel rolü ve sağladığı avantajlar özetlenmiştir. Bu bölümde ise, V–I eğrilerinin bu çalışmada nasıl sayısal hâle getirildiği ve cihazların elektriksel imzalarını temsil eden özellik (feature) vektörlerine nasıl dönüştürüldüğü matematiksel olarak açıklanmaktadır. Örnekleme aralığı T_s olmak üzere, ayırık zaman örnekleri Denklem (2.32)’de verilmiştir.

$$t_n = nT_s, n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2.32)$$

Bu zaman örneklerinde ölçülen gerilim ve akım değerleri sırasıyla Denklem (2.33) ve Denklem (2.34)’te verilmiştir:

$$v[n] = V(t_n) \quad (2.33)$$

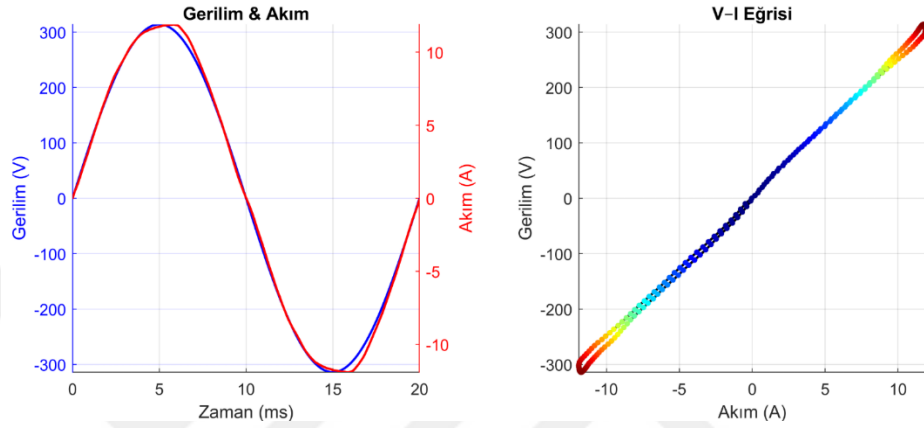
$$i[n] = I(t_n) \quad (2.34)$$

Her bir zaman penceresi için bu örnekler, V–I düzleminde Her bir zaman penceresi için elde edilen bu örnekler, V–I düzleminde akımın yatay eksen, gerilimin düşey eksen olacak şekilde tanımlanmasıyla, Denklem (2.35)–(2.36)’daki koordinatlara dönüştürülür.

$$x[n] = i[n] \quad (2.35)$$

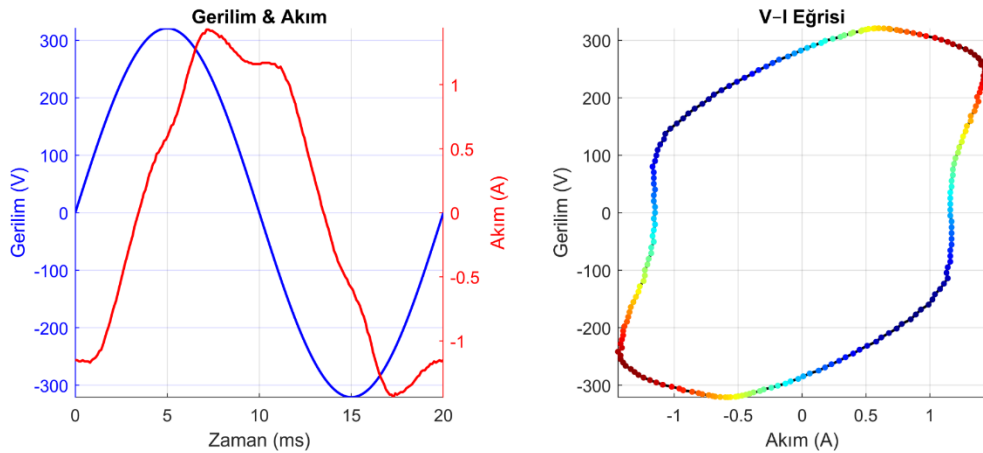
$$y[n] = v[n] \quad (2.36)$$

Bu dönüşüm sonucunda, her pencere V–I düzleminde bir adet kapalı eğri (döngü) oluşturur. V–I eğrisinin şekli ve düzlemdeki konumu, yükün temel elektriksel karakterini yansıtmaktadır. Saf ohmik bir yük için gerilim ve akım aynı fazda olduğundan, Denklem (2.33)–(2.36) ile tanımlanan V–I iz düşümü doğrusal bir ilişkiye yaklaşır; bu nedenle V–I düzleminde neredeyse düz bir doğruya yakın, dar bir eğri elde edilir. Aşağıdaki Şekil 2.8’de sırasıyla rezistif cihaza ait gerilim akım grafiği ve V-I eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.8 : Sırasıyla rezistif cihazın zaman eksenindeki gerilim akım grafiği, ve V-I eğrisi.

Endüktif ya da kapasitif bileşen içeren yüklerde ise akım gerilime göre faz gecikmesi veya faz ilerlemesi gösterdiği için, eğri kapalı bir döngü hâline gelir; döngünün saat yönünde veya ters yönde izlenmesi, ilgili yükün baskın olarak endüktif mi yoksa kapasitif mi davrandığına dair nitel bilgi sağlar. Böylece, farklı cihaz türleri için V–I eğrilerinin biçimi, kalınlığı, simetrisi ve kapladığı alan birbirinden ayrışan imzalar üretir. Şekil 2.9’da endüktif bir yükün gerilim akım grafiği ve V-I eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.9 : Sırasıyla endüktif motorun gerilim akım grafiği ve V-I eğrisi.

Bu çalışmada, her bir gözlem penceresi, V–I düzleminde örneklenmiş bir eğri olarak vektör biçiminde ifade edilmektedir. N adet örnekten oluşan bir pencere için V–I eğrisi X eksenini için Denklem 2.37’de verilmiş, Y eksenini için ise Denklem 2.38’de verilmiştir.

$$x = [x[0], x[1], \dots, x[N - 1]]^T \quad (2.37)$$

$$y = [y[0], y[1], \dots, y[N - 1]]^T \quad (2.38)$$

Burada her $(x[n], y[n])$ çifti V–I düzlemindeki bir noktaya karşılık gelir ve n indeksinin artması, eğrinin zaman içinde izlediği yolu gösterir. Böylece, zaman alanındaki dalga biçimi yerine, aynı fiziksel süreç, düzlemde izlenen kapalı bir geometri olarak yeniden ifade edilmiş olur. Bu dönüşümün ilk avantajı, yüksek boyutlu zaman serilerinin, daha düşük boyutlu ancak anlamlı geometrik özelliklerle özetlenebilmesidir.

V–I eğrilerinden çıkarılan özellikler, genel olarak üç ana grupta toplanabilir:

1. Genlik ve ölçek temelli özellikler: Eğrinin maksimum ve minimum akım/gerilim değerleri, tepe–tepe aralıkları bu gruptadır. Aynı aktif güce sahip farklı cihazlar için, tek başına genlik bilgisi ayırt edici olmaya yetmeyebilir; ancak diğer özelliklerle birlikte kullanıldığında güçlü bir ön filtreleme sağlar.
2. Geometrik ve şekil temelli özellikler: Eğrinin kapladığı alan, çevresi, genişliği ve yüksekliği, belirli eksenlere göre uzama miktarı bu gruba girer.
3. Simetri, doğrusal olmama ve asimetri temelli özellikler: Eğrinin birinci/üçüncü bölgede mi yoksa ikinci/dördüncü bölgede mi yoğunlaştığı, üst ve alt yarıların birbirine benzerliği, sağ ve sol lobların genişlik farkı gibi ölçüler bu gruptadır.

Bu tanımlamalar sayesinde, zaman düzlemindeki ham gerilim ve akım örnekleri, her pencere için sonlu boyutlu bir özellik vektörüne dönüştürülmektedir. Genel olarak, k adet özellik tanımlandığında, ilgili cihaza ait bir pencere aşağıdaki Denklem 2.39’daki gibi ifade edilir;

$$f = [f_1, f_2, \dots, f_k]^T \quad (2.39)$$

şeklinde bir vektörle temsil edilir. Buradaki her f_i , V–I eğrisi üzerinden türetilmiş ve belirli bir fiziksel yoruma sahip bir özelliktir. Farklı cihaz türleri için elde edilen bu vektörler, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınacak olan sınıflandırma ve kümeleme algoritmalarının giriş verisi olarak kullanılmakta; böylece V–I grafiklerinin

görsel sezgisel gücü, sayısal ve otomatik bir cihaz tanıma sürecine dönüştürülmektedir.

2.11.1 V–I alanı (Loop area)

tez kapsamında V–I eğrisinden türetilen alan tabanlı temel özelliklerden ilki klasik V–I alanıdır. Klasik V–I alanı, yükün doğrusal olmayan ve reaktif karakterine duyarlı bir gösterge olarak değerlendirilir.

Sürekli durumda V–I döngüsünün kapladığı alan Denklem 2.40’daki gibi tanımlanabilir.

$$A_{loop} = \frac{1}{2} \int (x dy - y dx) \quad (2.40)$$

Burada $x=i$, $y=v$ alınarak V–I eğrisi boyunca dolaşım yapılır.

Ayrık zamanda ise, $x[n]=i[n]$ ve $y[n]=v[n]$ dizileri kapalı bir çokgenin köşeleri olarak kabul edilirse alan aşağıdaki Denklem 2.41 gibi ifade edilir.

$$A_{loop} \approx \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n]y[n+1] - x[n+1]y[n]) \quad (2.41)$$

V–I döngüsünün alanı Denklem (2.40)–(2.41) ile işaretli (signed) alan olarak hesaplanmaktadır. Bu alanın işareti, eğrinin düzlemde izlenme yönüne bağlıdır: eğri saat yönünde dolaşıldığında $A_{loop} < 0$, saat yönünün tersinde dolaşıldığında $A_{loop} > 0$ elde edilir. Bu çalışmada alan, yön bilgisinden bağımsız olarak döngünün “büyüklüğünü” temsil eden bir özellik (feature) olarak Aşağıdaki Denklem 2.42’de olduğu gibi kullanılmaktadır.

$$A_{loop,abs} = |A_{loop}| \quad (2.42)$$

Mutlak değer, V–I eğrisinin “kalınlığını” ve doğrusal sapma miktarını nicel olarak gösterirken, işaret bilgisi döngünün izlenme yönüne bağlı olarak yükün baskın endüktif veya kapasitif karakterine ilişkin dolaylı bir gösterge sunmaktadır.

Farklı güç seviyelerine sahip cihazların karşılaştırılabilmesi için alan ayrıca normalize edilmiş gerilim ve akım üzerinden de tanımlanmıştır. Bunun için aşağıdaki Denklem 2.43’te ve Denklem 2.44’te olduğu gibi veriler normalize edilmiştir.

$$\tilde{i}[n] = \frac{i[n]}{\max_k |i[k]| + \varepsilon} \quad (2.43)$$

$$\tilde{v}[n] = \frac{v[n]}{\max_k |v[k]| + \varepsilon} \quad (2.44)$$

Boyutsuz işaretlerin normalize alan özelliği ise Denklem 2.45teki gibi hesaplanmaktadır.

$$A_{loop,norm} \approx \sum_{n=0}^{N-1} (\tilde{i}[n]\tilde{v}[n+1] - \tilde{i}[n+1]\tilde{v}[n]) \quad (2.45)$$

2.11.2 Faz ötelenmiş V–I alanına dayalı özellikler

Normal V–I alanının düşük güç seviyelerinde sınırlı ayırt ediciliğe sahip olması, ilave bir alan tabanlı özelliğin tanımlanmasını gerektirmiştir. Bu amaçla, tez kapsamında ek olarak faz ötelenmiş V–I alanı kullanılmaktadır. Burada temel fikir, akım dalga şeklinin yapay olarak ötelenmesiyle ikinci bir V–I eğrisi elde etmek ve bu eğrinin kapladığı alanı özellik olarak kullanmaktır.

Her pencere için ölçülen akım dizisi $i[n]$, sabit bir örnek sayısı kadar k_0 ötelenmekte ve yaklaşık 90° faz kaymasına karşılık gelen yeni bir akım dizisi aşağıdaki Denklem 2.46’da verilmiştir.

$$i_{90}[n] = i[(n + k_0) \bmod N] \quad (2.46)$$

Gerilim dizisi $v[n]$ değiştirilmemekte, yalnızca akım fazca kaydırılmaktadır. Böylece V–I düzleminde Denklem 2.47’de koordinatları ile tanımlanan ikinci bir eğri ortaya çıkmaktadır.

$$x_{90}[n] = i_{90}[n] \quad (2.47)$$

Bu yeni eğrinin kapladığı alan işse Denklem 2.48’de verilmiştir.

$$A_{loop90} \approx \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} (x_{90}[n]y[n+1] - x_{90}[n+1]y[n]) \quad (2.48)$$

Genlikten bağımsız bir şekil ölçütü elde etmek amacıyla faz ötelenmiş akım ve gerilim normalleştirilerek aşağıdaki Denklem 2.49’da gözüktüğü şekilde boyutsuz hâle getirilmektedir.

$$\tilde{i}[n] = \frac{i_{90}[n]}{\max_k |i_{90}[k]| + \varepsilon} \quad (2.49)$$

Veriler dizinin maksimum değerine bölünerek elde edilmiştir. Normalize faz ötelenmiş alanı Denklem 2.50’de verilmiştir.

$$A_{loop90,norm} \approx \sum_{n=0}^{N-1} (\tilde{i}_{90}[n]\tilde{v}[n+1] - \tilde{i}_{90}[n+1]\tilde{v}[n]) \quad (2.50)$$

2.11.3 Döngü genişliği: Loop width

Döngü genişliği, aynı gerilim seviyesinde V–I eğrisinin yukarı ve aşağı kolları arasındaki akım farkının ortalamasını ifade eden bir büyüklük olarak türetilmiştir. Başka bir deyişle, V–I eğrisi tek bir çizgi yerine bant şeklinde bir yapı oluşturduğunda, bu bantın kalınlığı döngü genişliği ile nicel hâle getirilmektedir. Ortalama döngü genişliği aşağıdaki Denklem 2.51 olarak önerilmiştir.

$$w_{ort} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |i_{up}(v_k) - i_{down}(v_k)| \quad (2.51)$$

Bu değer, farklı güç seviyelerindeki cihazların karşılaştırılabilmesi için akımın maksimum genliğine bölünerek aşağıdaki Denklem 2.52’de olduğu şekilde boyutsuz hâle getirilmektedir.

$$Loop\ width = w = \frac{w_{ort}}{\max |i[n]| + \varepsilon} \quad (2.52)$$

Döngü alanı, tüm eğrinin kapladığı toplam alanı ve histerezis benzeri enerjisi etkisini temsil ederken, loop width aynı gerilim seviyesindeki iki kol arasındaki farkı doğrudan ölçmekte ve özellikle doğrusal olmayan, harmonik içeriği yüksek yüklerde V–I eğrisinin “şişkinliğine” duyarlı tamamlayıcı bir şekil parametresi olarak kullanılmıştır.

2.11.4 Simetri oranı: Sym ratio

Öncelikle akım işareti, genlik ölçeğinden bağımsız bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla Denklem 2.53’de olduğu şekilde normalize edilir.

$$\tilde{i}[n] = \frac{i[n]}{\max_k |i[k]| + \varepsilon} \quad (2.53)$$

Normalleştirilmiş akım elde edildikten sonra, gerilimin pozitif ve negatif yarım periyotlarında akım büyüklüklerinin toplamı sırasıyla Denklem (2.54) ve Denklem (2.55) olarak hesaplanır.:

$$Q_{pos} = \sum_{n:v[n] \geq 0} |\tilde{i}[n]| \quad (2.54)$$

$$Q_{neg} = \sum_{n:v[n] < 0} |\tilde{i}[n]| \quad (2.55)$$

Son olarak simetri oranı, pozitif ve negatif yarım düzlemdeki toplam akım büyüklükleri arasındaki farkın, toplam büyüklüğe oranlanmasıyla Denklem (2.56)'ta tanımlanır.

$$sym\ ratio = 1 - \frac{|Q_{pos} - Q_{neg}|}{Q_{pos} + Q_{neg} + \varepsilon} \quad (2.56)$$

Bu grup, döngü alanından farklı olarak V-I eğrisinin üst ve alt yarım düzlemlerdeki enerji dağılımına odaklanır; özellikle yarım dalga doğrultuculu ve asimetric akım çeken cihazların ayrıştırılmasında etkilidir.

2.11.5 Kompaktlık: Compactness

Bu amaçla, normalize edilmiş işaretler kullanılarak ardışık örnek noktaları arasındaki Öklid uzaklıklarının toplamı ile çevre (perimeter) Denklem (2.57)'de hesaplanır.

$$perimeter = n = \sum_{n=0}^{N-2} \sqrt{(\tilde{i}[n+1] - \tilde{i}[n])^2 + (\tilde{v}[n+1] - \tilde{v}[n])^2} \quad (2.57)$$

Ardından kompaktlık katsayısı, mutlak döngü alanı $A_{loop,abs}$ 'nin çevrenin karesiyle normalize edilmesiyle Denklem (2.58)'de tanımlanır.

$$compactness = \frac{4\pi A_{loop,norm}}{perimeter^2 + \varepsilon} \quad (2.58)$$

Böylece bu özellik yalnızca alanı değil, aynı zamanda alan-çevre ilişkisini de dikkate alarak “sıkı” (daha dairesel) ve “yayvan” (daha uzamış) döngüler arasında ayrım yapar

2.11.6 Düşük cihaz yoğunluğuna sahip gruplarda tablo tabanlı cihaz tespiti

Bu çalışmada sigorta grupları, içerdiği cihaz sayısına bağlı olarak farklı tespit stratejileri ile ele alınmıştır. Cihaz sayısının sınırlı olduğu gruplarda (ör. salon gibi 3–4 cihazın bulunduğu hatlar), olası çalışma durumlarının sayısı yönetilebilir düzeyde

kaldığından cihaz tanıma süreci tablo tabanlı durum eşleştirme yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımın temel amacı, aynı grupta bulunan cihazların tekil veya birlikte çalıştığı durumlarda oluşan ölçüm imzalarını sistematik biçimde kayıt altına alarak, gerçek zamanlı ölçümlerin bu referans tablo ile karşılaştırılmasını sağlamaktır.

Salon gibi gruplarda düşük güçlü elektronik cihazlar bulunmaktadır. Özellikle bazı elektronik yüklerde akımın şebeke periyodunun dar bir bölümünde iletilmesi ve dalga şeklinin bozulması, V–I eğrisi geometrisini belirgin şekilde değiştirdiğinden, bu özellikler tablo tabanlı yöntemde ek ayrıştırma gücü sağlar.

2.12 Akım Tabanlı Genlik ve Asimetri Özellikleri

Bu çalışmada, doğru akım dalga şeklinin genlik özellikleri ve yarım periyot davranışını özetlemek amacıyla üç temel büyüklük kullanılmıştır: Crest Current, Power Factor ve Half-Wave RMS Difference. Bu özellikler; akım dalga şeklinin karakteristiği, güç faktörü ve yarım periyotlar arasındaki dengesizlik üzerinden tanımlanmaktadır. Böylece, V–I şekil özelliklerine ek olarak, akım ve gerilim dalga biçimlerinden türetilen tamamlayıcı özellikler de analiz sürecine dahil edilmiştir.

2.12.1 Tepe faktörü: Crest current

Crest faktörü, akım dalga şeklinin tepe değerinin RMS değerine oranını ifade eder ve dalga biçiminin “pikleşme” derecesini gösterir. Bir pencere için akımın RMS ve tepe değerleri sırasıyla Denklem 2.59’da ve 2.60’de olduğu gibi tanımlanır.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i[n]^2} \quad (2.59)$$

$$I_{peak} = \max_{0 \leq n \leq N-1} |i[n]| \quad (2.60)$$

Crest faktörü ise denklem 2.61’de olduğu şekilde bu iki değer oranlanmasıyla oluşur.

$$Crest\ Current = \frac{I_{peak}}{I_{rms}} \quad (2.61)$$

Saf sinüsoidal dalga için bu oran sınırlı ve görece düşüktür; doğrultuculu veya darbeli akım çeken elektronik yüklerde ise kısa süreli yüksek pikler nedeniyle crest faktörü

belirgin biçimde artar. Böylece bu özellik, V–I alanı veya döngü genişliğinden farklı olarak, zaman alanında tepe–ortalama ilişkisinin doğrudan bir ölçüsü olarak görev yapar.

2.12.2 Güç faktörü tahmini: Power factor estimation

Her pencere için ortalama aktif güç aşağıdaki Denklem 2.62’te olduğu gibi ölçülür.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n]i[n] \quad (2.62)$$

RMS büyüklükler ise Denklem 2.63 ve 2.64’te olduğu gibi hesaplanır.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n]^2} \quad (2.63)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i[n]^2} \quad (2.64)$$

Bu değerler kullanılarak aşağıdaki Denklem 2.65’da olduğu gibi güç faktörü tahmini yapılır.

$$pf\ est = \frac{P}{V_{RMS}I_{RMS}} \quad (2.65)$$

Bu büyüklük, faz açısı ve reaktif bileşene duyarlı olup, alan tabanlı geometrik özelliklerden farklı olarak klasik güç teorisine dayalı tek bir skaler gösterge sunar.

2.12.3 Yarım dalga RMS farkı: Half wave RMS difference

Half wave RMS özelliği, pencere içindeki iki ardışık yarım periyot arasında enerji düzeyinde ne kadar fark olduğunu ölçmek için tanımlanmıştır.

Pencere, Denklem 2.66 ve 2.67’deki gibi eşit uzunlukta iki bölüme ayrılır (örneğin M ve M örnek olacak şekilde). İlk yarım periyot akımı $i_1[n]$, ikinci yarım periyot akımı $i_2[n]$ olmak üzere aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$i_1[n] = i[n] \quad n = 0, \dots, M - 1 \quad (2.66)$$

$$i_2[n] = i[n + M] \quad n = 0, \dots, M - 1 \quad (2.67)$$

Her bir örnek için, iki yarım periyottaki mutlak akım farkı Denklem 2.68'deki gibi bulunur.

$$d[n] = ||i_1[n]| - |i_2[n]|| \quad n = 0, \dots, M - 1 \quad (2.68)$$

Bu fark dizisinin RMS değeri Denklem 2.69'a göre hesaplanır.

$$Half\ Wave\ RMS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} d[n]^2} \quad (2.69)$$

Bu özellik, klasik I_{RMS} değerinden farklı olarak tek bir pencere içindeki iki yarım dalga arasındaki dengesizliği nicel hâle getirir. Yük simetrik çalıştığında (örneğin saf sinüs, dengeli yük) iki yarım dalga benzer olduğundan half wave RMS çok küçük periyot içi dengesizliğin yüksek olduğu yarım dalga doğrultuculu veya zamana yayılmış darbeli akımlarda ise büyük değerler alır.

2.13 Tepe–Kararlı Durum Farkı (Peak-to-Steady Difference, PSD) Tabanlı Cihaz Tanıma Yaklaşımı

Elektrikli cihazlar, açılma ve kapanma anlarında kararlı çalışma koşullarından farklı, kısa süreli geçici rejim tepkileri üretir. Bu geçici rejimde gözlenen kalkış akımı, kısa süreli tepe (peak) oluşturabilir. Bu kalkış akımları cihazın iç yapısına (motor/rezistif/SMPS/LED sürücü vb.) bağlı olarak değişir. Bu nedenle transient davranışlar, olay tabanlı yük izleme ve cihaz tanıma yaklaşımlarında önemli bir ayırt edicilik kaynağı olarak değerlendirilir.

Bu bölümde, transient büyüklüğünü daha doğrudan temsil eden Tepe–Kararlı Durum Farkı (Peak-to-Steady Difference, PSD) yaklaşımı ele alınmaktadır. PSD, bir olay penceresinde gözlenen tepe değerini, olay sonrası kararlı durum ortalamasından mutlak farkını ifade eder..

2.13.1 PSD tanımı

Akım veya güç dalga biçimi genel olarak $x(t)$ ile gösterilsin. PSD, Denklem 2.70'te verildiği şekilde tanımlanır:

$$PSD_x = x_{peak} - \bar{x}_{steady} \quad (2.70)$$

Burada;

- x_{peak} : Olay penceresi içinde gözlenen maksimum (tepe) değer,
- $\bar{x}_{steady}$: Olay sonrası kararlı rejimi temsil eden bir zaman aralığındaki ortalama değer,

olarak tanımlanır. Akım ve güç için özel halleri Denklem 2.71’de ve 2.72’de verilmiştir.

$$PSD_I = I_{peak} - \bar{I}_{steady} \quad (2.71)$$

$$PSD_P = P_{peak} - \bar{P}_{steady} \quad (2.72)$$

2.13.2 Ayrık zamanlı uygulama

Gömülü sistemlerde akım/güç ölçümleri genellikle ayrık zamanlı $x[n]$ örnekleri olarak elde edilir. Bu durumda PSD hesabı Denklem 2.73’te verilmiştir.

$$PSD_x = \max x[n] - \frac{1}{N_s} \sum_{n=n_s}^{n_s+N_s-1} x[n] \quad (2.73)$$

- N_s : Kararlı durum ortalaması için kullanılan örnek sayısıdır.
- n_s : Kararlı durum penceresinin başladığı örnek indeksidir.

Hesaplama açısından PSD, yalnızca maksimum değer bulma ve ortalama alma işlemlerini içerdiğinden, gömülü sistemlerde düşük işlem yüküyle gerçek zamanlı uygulanabilir.

2.14 Empedans Tabanlı Cihaz İzleme Yöntemi ve Şebeke Geriliminin Etkisi

Enerji izleme sistemlerinde cihaz tanıma süreci çoğunlukla aktif güç (P), akım (I) veya empedans/admittans (Z/Y) gibi büyüklükler üzerinden yürütülür. Bu parametreler ideal koşullarda cihazların elektriksel karakteristiğini temsil etse de, gerçek şebeke ortamında şebeke gerilimi (V) sabit değildir ve gün içinde belirli aralıklarda dalgalanır. Bu dalgalanmalar, özellikle güç ve akım tabanlı özelliklerde ölçümün bağlama duyarlı hâle gelmesine neden olabilir. Buna karşılık, eşdeğer empedansının çalışma

koşullarına göre büyük ölçüde değişmediği (yaklaşık sabit Z/Y) yük sınıflarında empedans/admittans tabanlı yaklaşımlar, gerilim dalgalanmalarına daha az duyarlı olup cihaz tanıma açısından daha kararlı bir referans sağlayabilmektedir (Doğan vd., 2025).

Sabit empedanslı bir yükte, Denklem 2.74'te olduğu gibi çekilen akım gerilimle doğru orantılıdır.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.74)$$

Güç ise Denklem 2.75'te bilindiği üzere akım ve gerilimin çarpımıdır:

$$P = V \cdot I \quad (2.75)$$

Bu ifadeyi akım formülüne göre denklem 2.76'da açarsak.

$$P = V \cdot \frac{V}{Z} = \frac{V^2}{Z} \quad (2.76)$$

Sonuç olarak, sabit empedanslı yüklerde güç, gerilimin karesi ile doğru orantılıdır. Bu karesel ilişki, gerilimdeki küçük değişimlerin güçte daha büyük göreceli değişimlere yol açmasına neden olur. Örneğin gerilimdeki %5'lik bir azalma için aşağıdaki Denklem 2.77'de verildiği üzere güç yaklaşık %90 değerine düşer.

$$\frac{P_V}{P_{ref}} = \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^2 = \left(\frac{0.95V_{ref}}{V_{ref}} \right)^2 = (0.95)^2 = 0.9025 \quad (2.77)$$

Bu durum, aynı cihaz çalışıyor olsa dahi şebeke gerilimine bağlı olarak ölçülen güç değerinin kaymasına ve güç tabanlı eşikleme/sınıflandırma yaklaşımlarında hatalı kararların oluşmasına yol açabilir.

2.14.1 Gerilim dalgalanmalarına karşı güç aralığı ölçekleme yaklaşımı

Referans ölçümler V_{ref} geriliminde kaydedilmişse ve cihaz farklı bir şebeke geriliminde V gözleniyorsa, güç değerleri gerilim oranının karesiyle normalize edilerek karşılaştırılabilir.

Bu çalışmada güç tabanlı tespit eşiklerini gerilim değişimine uyarlamak için aşağıdaki Denklem 2.78'deki ölçekleme kullanılmıştır:

$$P(V) = P_{ref} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^2 \quad (2.78)$$

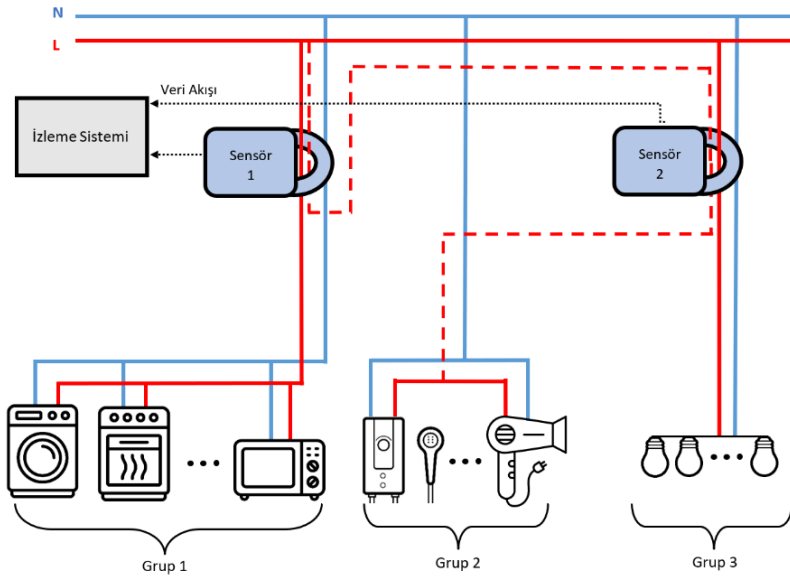
Bu yaklaşım, özellikle rezistif yüklerde gerilim dalgalanmasının güç ölçümüne etkisini telafi ederek tespit kararlılığını artırır. Ancak doğrultucu/SMPS tabanlı veya kontrol devreli bazı cihazlarda eşdeğer empedans çalışma koşuluna bağlı değişebileceğinden, gerilim ölçekleme doğruluğu sınırlı olabilir. Ev içinde kullanılan yüksek güçlü cihazlar genelde rezistif yükler olduğu için çoğu cihaz için uygulanabilir bir yöntemdir.

2.15 Yarı-Girişimsel Yük İzlemede Sensör-Kanal Azaltma ve Kombinasyonel İzleme Grupları

Yarı-girişimsel enerji izleme sistemlerinin temel hedeflerinden biri, minimum donanım kullanarak maksimum izleme doğruluğu elde etmektir. Bu doğrultuda, izleme donanımında kullanılan sensör sayısının azaltılması, hem sistem maliyetini düşürmekte hem de kurulum karmaşıklığını azaltmaktadır. Ancak bu sadeleştirme, yük tanıma doğruluğunu azaltmaksızın gerçekleştirilebilmelidir. Bu bağlamda, kanal azaltma ve mantıksal grup çıkarımı teknikleri kritik rol oynamaktadır.

2.15.1 Sensör-topoloji ilişkisi

Şekil 2.10’da verilen mimaride, fiziksel olarak ayrılmış üç elektrik grubu (hat) iki adet akım sensörü ile izlenmektedir.



Şekil 2.10 : Sensör-Kanal azaltma uygulamasındaki sensör yerleşimleri.

Bu yerleşimde gruplar aşağıdaki şekilde tanımlanır.

- Grup-1 : Yalnızca Sensör-1 üzerinden izlenmektedir.
- Grup -3 : Yalnızca Sensör-2 üzerinden izlenmektedir.
- Grup -2 : Sensör-1 ve Sensör-2 tarafından gözlemlenebilen ortak hattır.

Bu topoloji, olayların (cihaz açma-kapama gibi) hangi grupta gerçekleştiğini yalnızca ölçüm verisi üzerinden belirleyebilmek için senkron değişim analizine imkân tanır. Özellikle Grup-2'ye bağlı bir cihaz devreye girdiğinde/çıktığında, olay iki sensörde de aynı anda ve benzer büyüklükte bir akım adımı olarak görülür. Buna karşılık yalnızca Grup-1 veya Grup-3'teki bir olay, tek bir sensörde belirgin değişim üretirken diğer sensörde aynı anda benzer bir adım oluşturmaz.

2.15.2 Zamana bağlı akım farkı ile grup çıkarımı

Sensörlerden elde edilen akım zaman serileri sırasıyla $I_1(t)$ ve $I_2(t)$ olarak tanımlansın. Bu sinyallerin ani değişimleri, yani zamana bağlı farkları aşağıdaki Denklem 2.79 ve Denklem 2.80'de gözüktüğü şekilde hesaplanır:

$$\Delta I_1(t) = I_1(t) - I_1(t - \Delta t) \quad (2.79)$$

$$\Delta I_2(t) = I_2(t) - I_2(t - \Delta t) \quad (2.80)$$

Bir olayın ortak hatta (Grup-2) ait olduğuna karar vermek için iki sensördeki değişimin hem eşzamanlı hem de benzer büyüklükte olması beklenir. Bu durum aşağıdaki Denklem 2.81'deki koşullarla ifade edilebilir:

$$|\Delta I_1(t) - \Delta I_2(t)| < \varepsilon \text{ ve } |\Delta I_1(t)| > \theta \text{ ve } |\Delta I_2(t)| > \theta \quad (2.81)$$

Bu durumda olayın, her iki hatta da bağlı olan ortak bir grup hattı (Hat-3) üzerinde gerçekleştiği anlaşılır. ε senkron değişim toleransı olarak tanımlanır ve iki sensör arasında izin verilen maksimum farkı belirler. Bu parametre, sensörlerin hassasiyet farkı, örnekleme sapmaları ve çevresel gürültü etkileri göz önüne alınarak seçilir.

θ tespit eşiğidir; belirli bir grup hattında anlamlı bir olayın gerçekleştiğini varsayabilmek için fark sinyalinin mutlak değerinin bu eşikten büyük olması gerekir. Bu eşik değeri, sistemdeki cihazların karakteristiklerine ve beklenen yük değişimlerine göre grup bazında özelleştirilerek tanımlanır.

Bu yaklaşım ile olay tespiti yalnızca “bir cihaz açıldı/kapatıldı” bilgisini üretmekle kalmaz; aynı zamanda olayın topolojik konumunu (Grup-1 mi, Grup-2 mi, Grup-3 mü) belirlemede de kullanılır. Böylece fiziksel müdahaleye ihtiyaç duymadan grup ayrımı yapılabilir; daha az sensörle daha fazla bilgi elde edilerek sistem maliyeti ve kurulum karmaşıklığı düşürülür.

2.15.3 Kombinasyonel izleme grupları

Bu yaklaşımın temelinde, sensörlerin olası kombinasyonlarının oluşturduğu kapsayıcı grup yapıları yer alır. Matematiksel olarak, n adet sensör bulunduğunda, bu sensörlerin oluşturabileceği maksimum izleme grubu sayısı Denklem 2.82’ de verilen formül ile hesaplanır.

$$G = 2^n - 1 \quad (2.82)$$

G toplam grup sayısını verirken n ise sensör sayısını temsil eder.

Buradaki gruplar, hem bireysel sensörlere karşılık gelen tekil grupları hem de bu sensörlerin iki veya daha fazla sayıda kesişiminden oluşan birleşik grupları kapsamaktadır. Bu yapı, gözlem alanlarının örtüşmesini sistematik biçimde analiz edebilme yeteneği kazandırır. Her yeni eklenen sensör, yalnızca yeni bir fiziksel alanı değil, aynı zamanda mevcut gruplarla yeni kesişim kümeleri oluşturduğu için, izleme sisteminin ayırt edicilik yeteneği logaritmik değil, üstel düzeyde artar. Çizelge 2.4’te verilen grup temsilleri, bu yapının ne denli hızlı ölçeklenebildiğini göstermektedir.

Çizelge 2.4 : Sensör sayısına bağlı olarak oluşturulabilecek izleme grupları çizelgesi.

Sensör Sayısı (n)	Toplam Grup Sayısı ($2^n - 1$)	Grup Temsilleri
2	3	$S_1, S_2, S_1 \cap S_2$
3	7	$S_1, S_2, S_3, S_1 \cap S_2, S_1 \cap S_3, S_2 \cap S_3, S_1 \cap S_2 \cap S_3$
4	15	$S_1, S_2, S_3, S_4, S_1 \cap S_2, S_1 \cap S_3, S_1 \cap S_4, S_2 \cap S_3, S_2 \cap S_4, S_3 \cap S_4, S_1 \cap S_2 \cap S_3, S_1 \cap S_2 \cap S_4, S_1 \cap S_3 \cap S_4, S_2 \cap S_3 \cap S_4, S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap S_4$

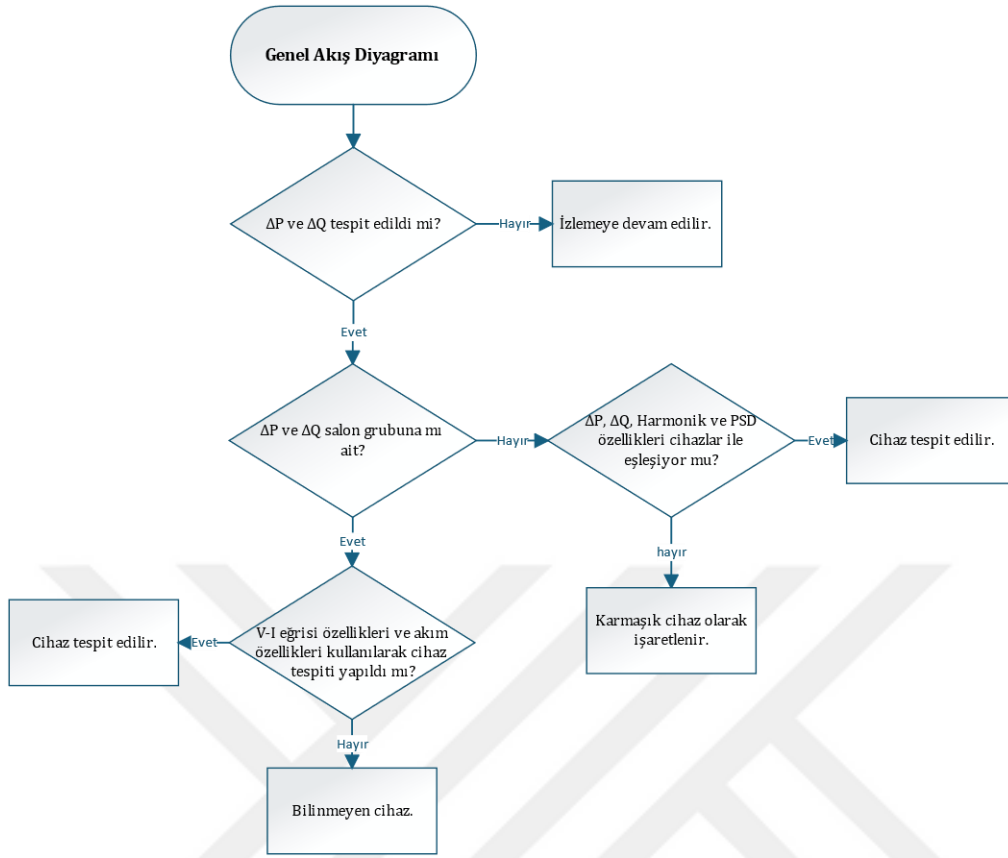
Örneğin yalnızca 4 sensörle bile 15 farklı gözlem grubu tanımlanabilmekte ve bu grupların her biri, yük tespiti ve sınıflandırma algoritmalarında farklı birer izleme bağlamı olarak ele alınabilmektedir.

Kombinasyonel gruplar sayesinde yalnızca hangi cihazın çalıştığı değil, bu cihazın hangi bağlamsal bölgede (örneğin: yalnızca Sensör-3'e bağlı mı, yoksa hem Sensör-2 hem de Sensör-3'ün kesişiminde mi?) aktif olduğuna dair ayrıntılı topolojik bilgi de elde edilir. Bu sayede aynı türden cihazlar, yalnızca yük imzasıyla değil, aynı zamanda bağlamsal grup konumu ile de birbirinden ayırt edilebilir hale gelir. Özellikle yük karakteristiği benzer olan cihazların farklı gruplarda yer alması, ayırıştırma doğruluğunu artırır.

Sonuç olarak, kombinasyonel izleme grubu yaklaşımı, sınırlı sayıda sensör ile maksimum gözlem alanı ve ayırıştırma kapasitesi elde etmenin akılcı bir yolunu sunar. Bu yaklaşım, yarı-girişimsel izleme sistemlerinin yalnızca donanımsal değil, aynı zamanda mantıksal olarak da ölçeklenebilir hale gelmesini sağlayarak, gelişmiş yük izleme sistemleri için güçlü bir temel oluşturur.

2.16 Genel Akış Diyagramı

Sistemin çok katmanlı yapısını ve cihaz tanıma sürecindeki hiyerarşiyi netleştirmek ve okuyucu için olası kafa karışıklıklarını amaciya genel akış diyagramı (flowchart) Şekil 2.11'de oluşturulmuştur. Bu diyagram; aktif ve reaktif güç değişimleri ile hareket tespiti ile başlayarak başlayarak P-Q analizi, PSD, FFT ve V-I grafikleri gibi farklı yük imza çıkarma tekniklerinin hangi mantıksal sıra ile devreye girdiğini bütünsel bir şekilde sunmaktadır. Böylece, karmaşık yüklerin ayırıştırılmasında kullanılan hiyerarşik karar mekanizmasının işleyişi ve sistemin "uçtan uca" mimarisi, teknik detaylar arasında boğulmadan görsel bir kılavuz eşliğinde takip edilebilir hale getirilmiştir.

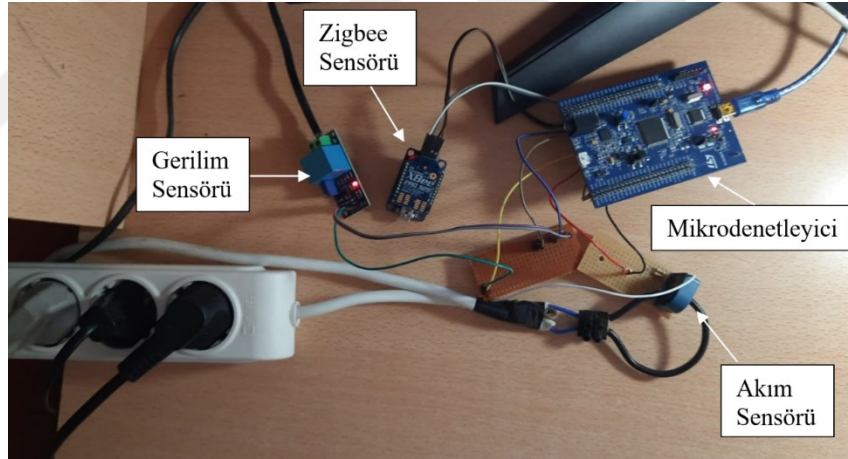


Şekil 2.11 : Genel akış diyagramı.

3. ÖNERİLEN YÖNTEM VE SİSTEM TASARIMI

3.1 Genel Sistem Mimarisi

Bu çalışmada geliştirilen yarı-girişimsel enerji izleme sistemi, konut tipi tek fazlı elektrik dağıtım hatlarında yer alan cihazların enerji tüketimini cihaz seviyesinde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Sistem, beş farklı cihaz grubunun beslendiği ayrı hatlardaki akımı ve ortak faz hattındaki gerilimi ölçmek üzere yapılandırılmıştır. Toplanan veriler, gömülü sistem tabanlı bir donanım aracılığıyla gerçek zamanlı olarak işlenmekte ve ardından kablosuz iletişim yoluyla merkezi bir bilgisayar birimine iletilmektedir. Aşağıdaki Şekil 3.1’de genel sistemin prototip aşamasındaki bir fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Sistemin prototip halindeki fotoğrafı.

Sistem üç temel katmandan oluşmaktadır:

- Veri Toplama Katmanı: Akım ve gerilim sensörleri, ADC birimleri ve örnekleme altyapısı,
- Gömülü İşlem Katmanı: STM32 tabanlı mikrodenetleyici, filtreleme, cihaz tespiti ve güç hesaplama algoritmaları,
- Haberleşme ve Görselleştirme Katmanı: ZigBee kablosuz modülü ve bilgisayar üzerindeki arayüz uygulaması.

Sensörlerden gelen analog sinyaller, mikrodnetleyiciye entegre analog-dijital çeviriciler (ADC) aracılığıyla dijital verilere dönüştürülmektedir. ADC çevrimleri DMA (Direct Memory Access) destekli olarak yapılandırılmış, böylece işlemci yükü minimize edilmiştir. Örnekleme süresi 10 μ s olarak belirlenmiş olup, bu sayede sistem saniyede 100.000 örnek alabilmektedir. Gömülü yazılım üzerinde gerçek zamanlı olarak RMS hesaplamaları, aktif, reaktif ve görünür güç tespiti ile faz kayması analizi gerçekleştirilmektedir.

Elde edilen ölçüm sonuçları, ZigBee S2B modülü üzerinden kablosuz olarak bilgisayara iletilmekte ve burada bir arayüz yazılımı aracılığıyla kullanıcıya görsel olarak sunulmaktadır. Yüksek zaman çözünürlüğü sayesinde sistem, ani güç değişimlerini algılayarak cihaz aktivitelerini ayırt edebilmekte ve az sayıda sensör ile çok sayıda cihaz grubunun izlenmesine imkân tanımaktadır.

3.2 Gömülü Donanım Yapısı ve Bileşenler

Önerilen sistemin temelinde yer alan donanım altyapısı, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bileşenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapı, hem güvenilir veri toplama hem de gömülü işleme yeteneklerini sağlayarak gerçek zamanlı enerji analizini mümkün kılmaktadır.

3.2.1 STM32F407VG mikrodnetleyici kartı

Sistemin kontrol ve işlem birimi, ARM Cortex-M4 mimarisi üzerine inşa edilmiş ve 168 MHz saat frekansında çalışan STM32F407VG mikrodnetleyici tabanlı geliştirme kartıdır. Aşağıdaki fotoğrafta sistemin hazır hali verilmiştir (Şekil 3.2).



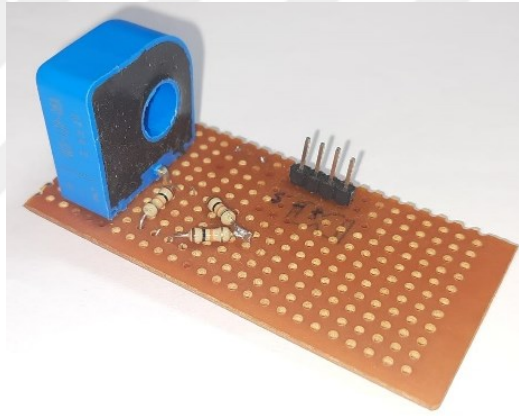
Şekil 3.2 : Sistemin kullanıma hazır fotoğrafı.

Mikrodenetleyici, 12-bit çözünürlüğe sahip üç adet ADC modülü (ADC1, ADC2, ADC3) barındırmakta ve toplamda 16 adet fiziksel ADC kanalını desteklemektedir. Bu çalışmada, 4 adet akım ve 1 adet gerilim sinyali olmak üzere toplamda 5 kanal senkron şekilde örneklenmektedir. Çoklu kanal veri toplama işlemi DMA yapısı ile entegre edilmiş, böylece ADC verileri işlemci müdahalesi olmadan bellek alanına paralel olarak aktarılmaktadır.

Gömülü yazılım, STM32CubeIDE geliştirme ortamında C dili kullanılarak yazılmıştır.

3.2.2 Akım ve gerilim sensörleri

Ölçüm sisteminde kullanılan analog sensörler, elektriksel büyüklüklerin güvenli ve doğru biçimde sayısallaştırılmasını sağlamaktadır. dört adet akım ve bir adet gerilim sensörü ile toplam beş kanal izlenmektedir. Aşağıdaki fotoğrafta akım sensörü gösterilmektedir(Şekil 3.3).



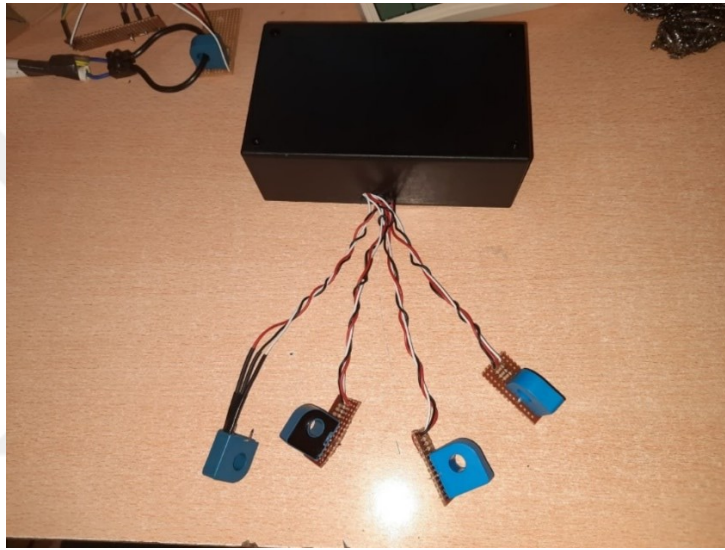
Şekil 3.3 : Oluşturulan akım sensörünün fotoğrafı.

Akım ölçümleri için HCS-LSP serisi Hall etkili sensörler kullanılmıştır. Bu sensörler, yüksek doğrulukta çalışmaları, galvanik izolasyon sağlamaları ve geniş akım aralıklarında çalışabilmeleri nedeniyle tercih edilmiştir. Kullanılan modeller; 6 A, 10 A ve 25 A gibi farklı aralıklarda seçilmiş ve cihaz gruplarının maksimum akım seviyelerine göre atanmıştır. Sensör çıkışları, tipik olarak 2.5 V doğru gerilim bileşeni (DC bileşeni) içeren analog sinyaller üretmekte ve akım yönüne bağlı olarak bu değerin üzerinde ya da altında salınmaktadır.

Gerilim değerinin ADC ile uyumlu aralıklarda kalmasını sağlamak amacıyla, HCS-LSP sensörlerinin çıkışına ADC girişinden önce bir gerilim bölücü devre eklenmiştir. Bu gerilim bölücü, sinyal genliğini maksimum 3.0 V seviyesine sınırlandıracak şekilde tasarlanmıştır. Böylece hem sensör çıkışı güvenli sınırlar içerisinde ADC'ye

uygulanmakta hem de ADC'nin giriş limiti aşılmadan ölçüm doğruluğu korunmaktadır.

Gerilim ölçümü için ZMPT101B modeli kullanılmıştır. Bu sensör, 220V AC şebeke gerilimini düşük seviyeli, izolasyonlu ve ADC ile uyumlu bir sinyale dönüştürmektedir. İç yapısında ölçüm transformatörü ve sinyal koşullayıcı devre barındıran ZMPT101B, çıkışında 0-5 V aralığında sinüs sinyali üretir. Yüksek lineerlik, düşük faz kayması ve düşük maliyet avantajlarına sahip olması nedeniyle konut tipi uygulamalar için oldukça uygundur. Aşağıdaki Şekil 3.4'te akım sensörleri kullanılmaya hazır olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Sistemin son halinin fotoğrafı.

3.2.3 Sinyal toplama ve adc yapılandırması

Enerji izleme sisteminin başarısı, akım ve gerilim sinyallerinin yüksek doğrulukla ve zamanlama açısından tutarlı bir şekilde dijital ortama aktarılmasına bağlıdır. Bu amaçla, sistemdeki ADC altyapısı ve veri toplama yöntemi, örnekleme hızı ve işlem yükü dikkate alınarak optimize edilmiştir.

Bu çalışmada sinyaller, STM32F407VG mikrodnetleyicisinin ADC1 modülü aracılığıyla sayısallaştırılmaktadır. Ölçüm yapılan beş analog kanal (4 akım + 1 gerilim), scan mode (çoklu kanal tarama modu) ve continuous conversion (sürekli dönüşüm) modunda yapılandırılmış ADC tarafından sırasıyla okunmaktadır. ADC çevrimleri, DMA (Direct Memory Access) desteği ile mikrodnetleyici belleğine doğrudan aktarılmakta, böylece işlemcinin aktif müdahalesi olmadan kesintisiz veri toplama gerçekleştirilmektedir.

Her bir ADC çevrimi 10 μ s örnekleme periyoduyla çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu da saniyede 100.000 örnek alınması anlamına gelir. Bu yüksek örnekleme hızı, özellikle 50 Hz frekanslı AC sinyallerin bir periyodu (20 ms) boyunca yaklaşık 2000 örnek toplanmasına imkân tanımakta ve bu sayede teorik olarak 0.18 dereceye kadar faz kayması hassasiyetine ulaşılabilir. Bu sayede güç analizlerin yüksek doğrulukla yapılabilmesini sağlamaktadır.

3.2.4 Zigbee haberleşme modülü ve kablosuz veri aktarımı

Önerilen sistemde, bilgisayar ile mikroişlemci arasındaki haberleşme, düşük güçlü kablosuz iletişim protokolü olan ZigBee üzerinden sağlanmıştır. Bu amaçla, XBee S2B modülleri kullanılmış ve haberleşme, UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) arayüzü üzerinden gerçekleştirilmiştir.

ZigBee, düşük güç tüketimi, güvenilir veri aktarımı ve mesh topolojisini desteklemesi gibi avantajları nedeniyle tercih edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, tek noktadan noktaya (point-to-point) haberleşme yapısı benimsenmiş olup, veri aktarımı yalnızca enerji izleme biriminden alıcı istasyona doğru tek yönlü olarak gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar tarafında, ZigBee alıcısı USB arayüzüyle doğrudan bağlantı kurmakta ve gelen veriler seri terminal veya özel bir yazılım arayüzü üzerinden alınmaktadır.

Veriler, 115200 baud hızında seri olarak kodlanmakta ve ZigBee üzerinden kablosuz olarak gönderilmektedir.

Ölçümler sırasında yaklaşık 8-10 metre iç mekân mesafesinde %100'e yakın veri başarı oranı elde edilmiştir.

3.3 Sinyal İşleme ve Gürültü Azaltma

Bu çalışmada geliştirilen yarı-girişimsel izleme sisteminde, ölçüm doğruluğunu artırmak ve sensör çıkışlarında oluşan parazitik etkileri azaltmak amacıyla iki kademeli bir filtreleme yaklaşımı uygulanmıştır.

Filtreleme süreci; önce medyan filtresi, ardından hareketli ortalama filtresi olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu filtrelerin teorik temelleri ve matematiksel ifadeleri 2. bölümde açıklanmış olup, bu kısımda sistem üzerindeki uygulama sonuçları ve performans etkileri ele alınmaktadır.

3.3.1 Medyan filtresi ile ani parazit bastırma

İlk aşamada, akım ve gerilim sensörlerinden elde edilen ham sinyallerdeki ani sıçramalar ve darbe tipi bozulmalar medyan filtresiyle bastırılmıştır.

Sistem, 5 örnek uzunluğunda bir pencere kullanarak uç değerleri ortanca değerle değiştirmiş, böylece sinyalin temel karakteri korunarak parazitler lokal olarak giderilmiştir. Bu işlem özellikle anahtarlama güç kaynaklarının devreye girme anlarında oluşan kısa süreli yüksek frekanslı gürültüleri azaltmıştır. Filtreleme sonrası sinyaller, faz farkı ölçümünde kararlılık kazanmış ve RMS hesaplamalarındaki dalgalanmalar belirgin biçimde azalmıştır.

3.3.2 Hareketli ortalama filtresi ile gürültü yumuşatma

İkinci aşamada, medyan filtresiyle işlenmiş sinyalde kalan düşük genlikli rastgele parazitler hareketli ortalama filtresiyle yumuşatılmıştır. Aynı örnekleme penceresi uzunluğu (50 örnek, 500 μ s zaman aralığı) kullanılmış ve sinyal genel eğilimi korunarak yüksek frekanslı bileşenler bastırılmıştır. Bu sayede, hem akım hem de gerilim sinyalleri düzgün bir sinüs formuna yaklaşmış, düşük güçlü cihazlarda bile ölçülebilir kararlı RMS değerleri elde edilmiştir.

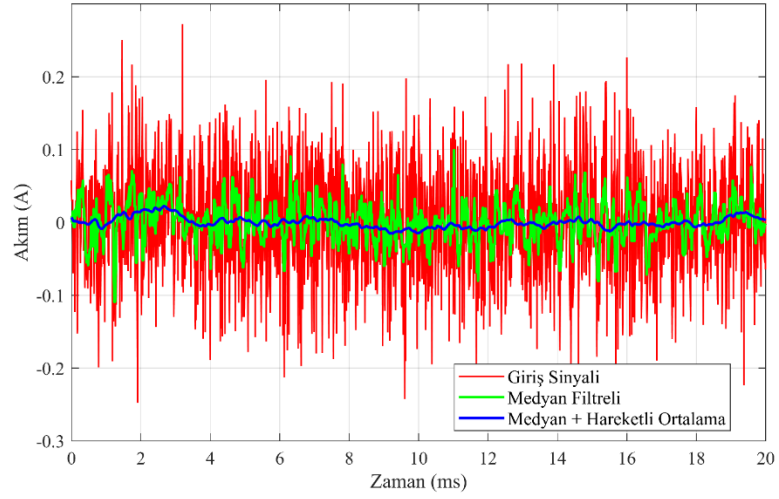
3.3.3 Filtrelenmiş ve filtrelenmemiş sinyallerin karşılaştırılması

Filtreleme sürecinin etkinliği üç farklı senaryo üzerinde test edilmiştir:

1. Boşta çalışan bir sensör,
2. Endüktif motor yükü,
3. Rezistif karakterde bir cihaz.

Filtreleme uygulanmadan önce, sistem boşta çalışan bir sensörden dahi yaklaşık 25 VA düzeyinde görünür güç okumaktaydı. Bu değer, sistemdeki elektromanyetik parazitlerin ve ADC girişindeki düşük genlikli gürültülerin bir sonucudur. Oysa sistemin donanımsal sınırları göz önünde bulundurulduğunda, STM32F407VG mikrodenetleyicisinin 12-bit ADC çözünürlüğü ve kullanılan gerilim bölücü yapısı ile ölçülebilecek en düşük güç değeri yaklaşık 3.45 VA olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.5'te, boşta çalışan bir sensörün filtrelenmemiş sinyali (kırmızı), yalnızca medyan filtresi uygulanmış hali (yeşil) ve medyan filtresi ile birlikte hareketli ortalama filtresi de uygulanmış hali (mavi) gösterilmektedir.



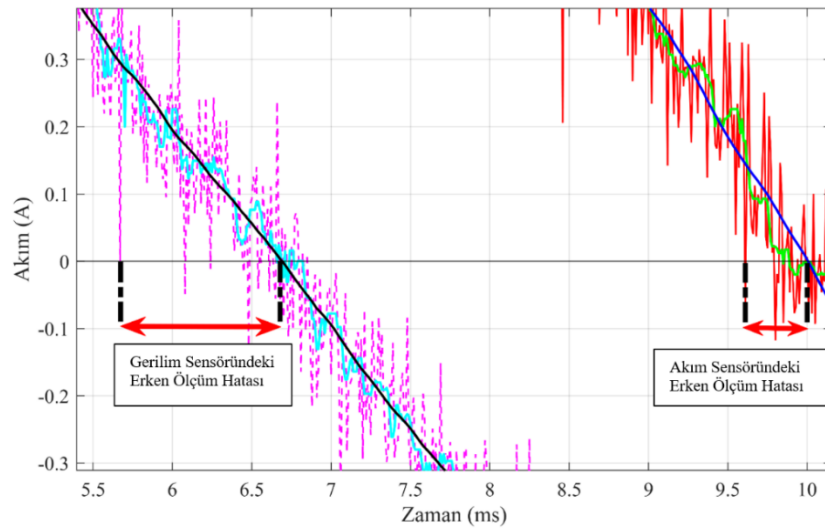
Şekil 3.5 : Boşta çalışan bir sensör için filtrelenmemiş ve filtrelenmiş sinyallerin karşılaştırılması.

Bu iki aşamalı filtreleme sonrasında, görünür güç değeri yaklaşık 3.5 VA seviyesine düşürülerek ölçüm hassasiyeti önemli ölçüde artırılmıştır.

Ayrıca, ani parazitlerin neden olduğu faz kaymasında sapmalara neden olmaktadır.

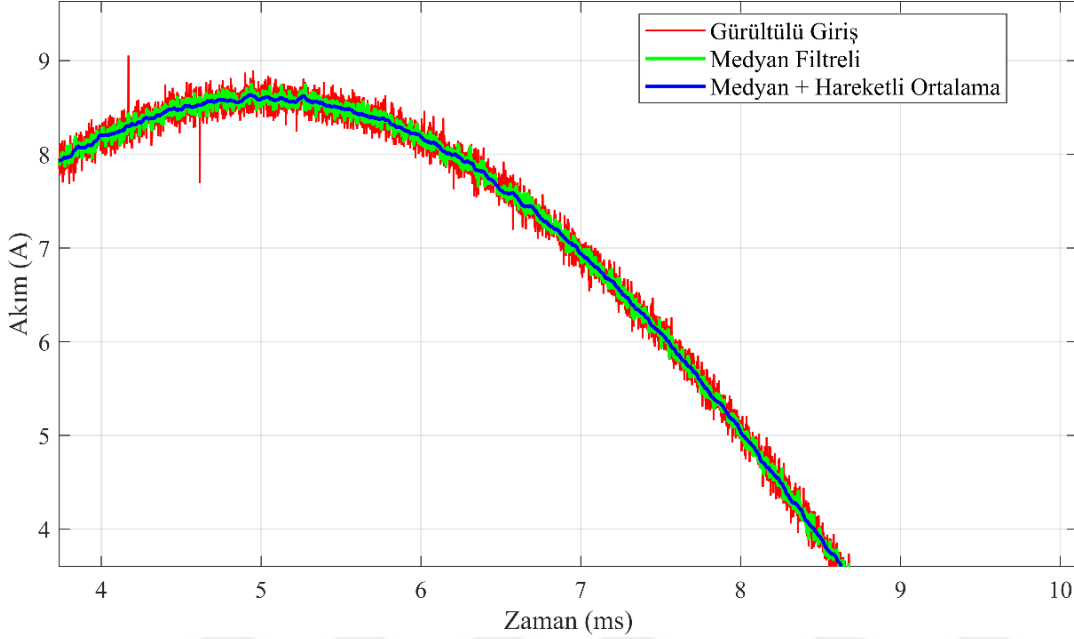
Aşağıda verilen Şekil 3.6’da yaklaşık 220 VA güç çeken bir endüktif motorun çalışması sırasında elde edilen ham sinyallerle yapılan faz farkı ölçümlerinde, ani parazitler nedeniyle ± 10 dereceye kadar hata gözlenmiştir. İki aşamalı filtreleme uygulandıktan sonra bu hata ± 1 dereceye kadar indirgenmiştir.

Böylece hem aktif hem reaktif güç hem de güç faktörü hesaplamalarında daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.6 : Endüktif motor çalışırken akım ve gerilim sinyallerinin filtrelenmemiş ve filtrelenmiş halleri.

Benzer bir değerlendirme, orta düzeyinde güç tüketen bir kahve makinesi üzerinde de gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın yüksek güç tüketimi yaptığı için $y=0$ eksenini daha dik bir şekilde kesmesi nedeniyle, faz kayması tespitinde parazitlerin etkisi daha sınırlı kalmıştır. Şekil 3.7’de, kahve makinesine ait parazitli sinyal, medyan filtre uygulanmış hali ve ardından hareketli ortalama uygulanmış hali karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7 : Kahve makinesi çalışırken akım ve gerilim sinyallerinin filtrenmemiş ve filtrenmiş halleri.

3.4 Hareketli Ortalama Filtresinde Optimizasyonun İşlemci Kullanımına Etkisi

Bu bölümde, STM32 tabanlı gerçek zamanlı ölçüm sisteminde hareketli ortalama filtresinin hesaplama yükü optimize edilerek işlemci kaynaklarının daha verimli kullanılması hedeflenmiştir. Filtre fonksiyonlarının işlemci üzerindeki etkisi, SWV (Serial Wire Viewer) profil aracı ile ölçülmüş ve optimizasyon öncesi/sonrası değerler karşılaştırılmıştır.

Klasik hareketli ortalama uygulamasında, her yeni örnek için pencere içerisindeki değerlerin yeniden işlenmesi nedeniyle işlemci yükünün belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. SWV profiline göre bu yaklaşımda hareketli ortalama fonksiyonunun işlemci kullanım oranı %45.73 olarak ölçülmüştür.

Optimizasyon sonrası sürümde hareketli ortalama hesabı daha düşük işlem maliyetiyle gerçekleştirilecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bu sayede filtre fonksiyonunun işlemci kullanımı %10.12 seviyesine düşmüş; hareketli ortalama hesaplamasının

sisteme getirdiği yük yaklaşık 4.5 kat azaltılmıştır. Ölçülen profil sonuçları ve karşılaştırmalı değerler Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : Optimize edilmiş ve edilmemiş fonksiyonların işlemci üzerindeki harcanan zamanın karşılaştırılması.

Fonksiyon	Optimize Edilmemiş Profil (%)	Optimize Edilmiş Profil (%)	Yorumlar ve Etkiler
Moving Average Filtre	45.73%	10.12%	Optimizasyon sonucu işlemci yükü yaklaşık 4.5 kat azalmış, kayan toplam yöntemi yüksek verimlilik sağlamıştır.
main() Fonksiyonu	8.79%	29.16%	Optimizasyon sonucu main fonksiyonunun görelî yükü artmış; bu sayede ana döngüye yaklaşık olarak 3 kat daha fazla girilmiştir.

Optimizasyonun sistem seviyesindeki etkisi, ana döngünün görelî işlemci payında da açık şekilde görülmüştür. Optimizasyon öncesinde main() fonksiyonunun işlemci kullanım oranı %8.79 iken, optimizasyon sonrasında bu oran %29.16’ya yükselmiştir. Bu durum, filtreleme adımının daha kısa sürede tamamlanmasıyla ana döngünün daha sık çalışabildiğini ve sistemin ölçüm/işleme adımlarını daha düzenli biçimde yürütebildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, hareketli ortalama filtresinde gerçekleştirilen optimizasyon, işlemci kullanımını belirgin ölçüde azaltarak gerçek zamanlı çalışmaya doğrudan katkı sağlamıştır. Bu iyileştirme sayesinde sistem, aynı donanım kaynaklarıyla daha yüksek örnekleme hızlarında daha kararlı çalışabilir hâle gelmiştir.

3.5 Gerilim Ölçeklemesi ile Yakın Güç Değerlerine Sahip Cihazların Ayrımı

Farklı gerilim seviyelerinde aynı cihazlar, ohmik dirençlerinin sabit olmasına rağmen farklı güç değerleri gösterebilir. Bu durum, özellikle rezistif yük karakterine sahip cihazlarda (örneğin fön makinesi, tost makinesi, kettle vb.) belirgindir. Çünkü bu tür cihazlarda güç, gerilimin karesiyle doğru orantılıdır ($P \propto V^2$). Örnek olarak iki farklı cihaz ele alındığında (Tost Makinesi: $Z= 31.11 \Omega$, Kettle $Z= 28.59 \Omega$)

Gerilim 230 V iken cihazların güç değerleri Denklem 3.1’de verilmiştir.

$$P_{Tost} = \frac{V^2}{R} = \frac{230^2}{31.11} = 1700W \quad P_{Kettle} = \frac{V^2}{R} = \frac{230^2}{28.59} = 1850W \quad (3.1)$$

Gerilim 215 V seviyesine düştüğünde aynı cihazların güçleri Denklem 3.2’de verilmiştir.

$$P_{Tost} = \frac{V^2}{R} = \frac{215^2}{31.11} = 1485W \quad P_{Kettle} = \frac{V^2}{R} = \frac{215^2}{28.59} = 1616 W \quad (3.2)$$

Bu durumda, 1700 W ile 1616 W aralığında her iki cihazın güç değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, sabit bir güç eşiği kullanılarak yapılan tespitlerde cihazlar arasında karışma olasılığı artmaktadır.

Bu problemi gidermek amacıyla, cihazların açılma veya kapanma anındaki güç değişim değerleri gerilimle orantılı olarak ölçeklenmiştir. Böylece her ölçüm, referans gerilim seviyesine göre normalize edilmiştir. Ölçekleme işlemi Denklem 3.3 ve Denklem 3.4’teki gibi gerçekleştirilmiştir:

$$\Delta P_{oranlanmış \text{ üst aralık}} = (\Delta P_{kaydedilmiş}) \times \left(\frac{V_{anlık}}{V_{referans}} \right)^2 + 25 \quad (3.3)$$

$$\Delta P_{oranlanmış \text{ alt aralık}} = (\Delta P_{kaydedilmiş}) \times \left(\frac{V_{anlık}}{V_{referans}} \right)^2 - 25 \quad (3.4)$$

Burada:

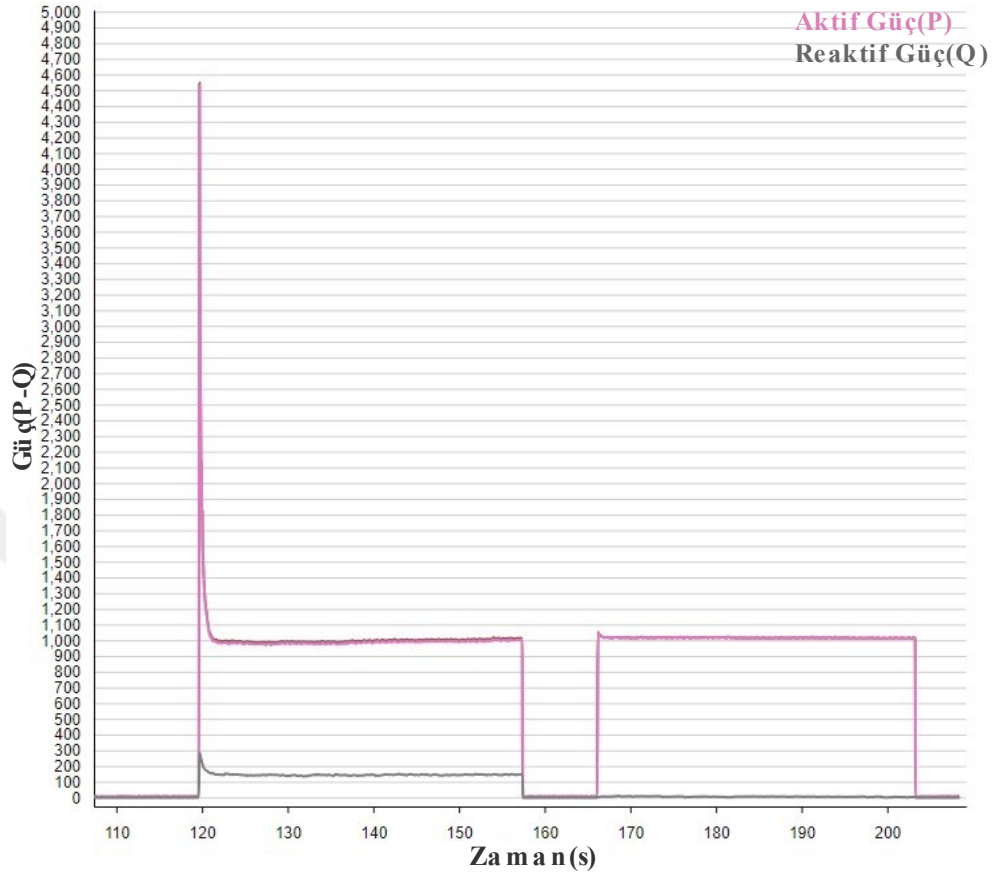
- $\Delta P_{kaydedilmiş}$: Referans gerilim altında ölçülmüş açılma gücü,
- $V_{anlık}$: Ölçüm anındaki şebeke gerilimi,
- $V_{referans}$: Referans anında cihazın ölçüldüğü gerilim,
- “+25” ve “-25” ifadeleri: cihaz tespitinde ± 25 W koruma (güvenlik) aralığıdır.

Bu ölçekleme sonucunda, gerilim değişimlerinden kaynaklanan güç sapmaları büyük ölçüde giderilmekte ve cihazların tespiti yaklaşık ± 25 W’lık tolerans aralığı içerisinde güvenilir şekilde yapılabilmektedir. Böylece gerilim dalgalanmalarının neden olduğu belirsizlikler minimize edilmiştir.

3.6 Aktif-Reaktif Güç Ölçümü ile Yük Tanımlama Yaklaşımı

Her cihaz devreye girdiğinde veya devreden çıktığında, toplam güçte belirgin bir değişim (ΔS) meydana gelmektedir. Bu değişimler, cihazın karakteristik çalışma yapısına bağlı olarak farklı büyüklük ve yönlerde oluşur. Benzer cihazlar sadece görünür güç değişimine bakılarak tespit edilemez. Bu yüzden (ΔP , ΔQ) değerleri

kullanılmalıdır. Aşağıda Şekil 3.8’de yakın güç değerine sahip iki cihazın güç zaman grafiği verilmiştir.

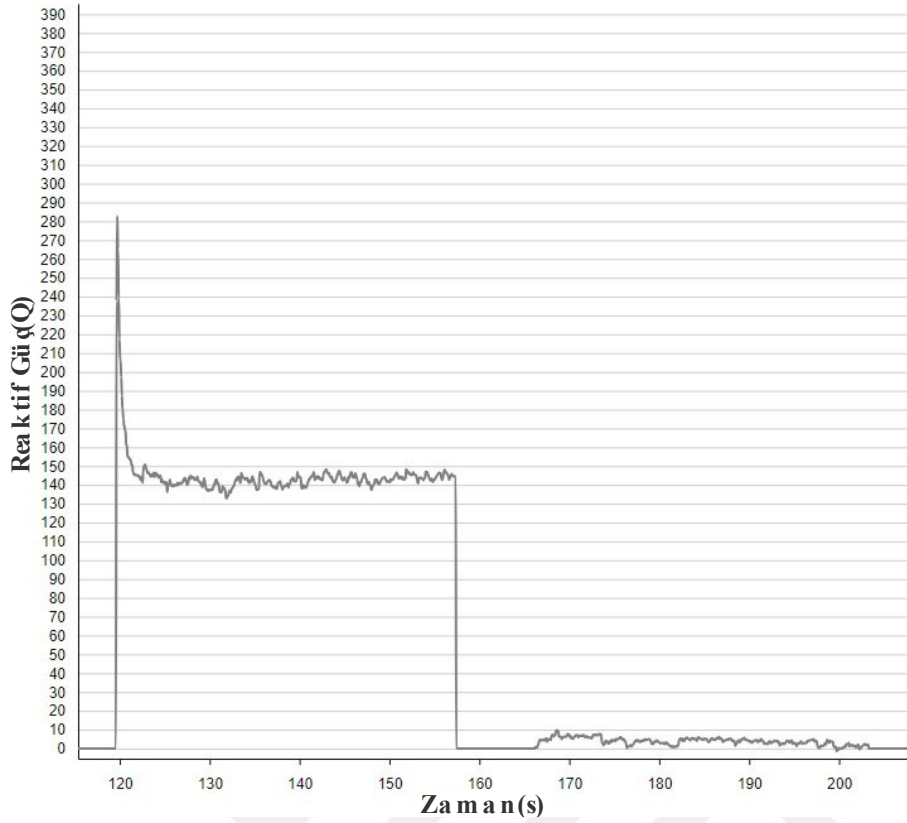


Şekil 3.8 : Aktif güç değerleri aynı olup reaktif güç değerleri farklı olan iki cihazın zaman eksenindeki güç değişimleri.

Her iki cihazın da toplam görünür güç seviyeleri benzer olmasına rağmen, reaktif güç davranışları birbirinden oldukça farklıdır.

Aşağıdaki Şekil 3.9’da ise aynı cihazların zamana bağlı Reaktif güç değişimi verilmiştir. İlk cihazın reaktif güç eğrisi incelendiğinde yaklaşık 140 Var seviyesinde reaktif güç değişimi meydana gelmiştir. Bu fark, cihazın endüktif bir bileşen içerdiğini ve dolayısıyla sistemden faz kaymalı akım çektiğini göstermektedir.

İkinci cihazın reaktif güç eğrisi incelendiğinde, sıfıra yakın bir VAr değeri gözlenmektedir. Bu durum, cihazın tamamen rezistif karakterde olduğunu göstermektedir. Bu gözlem, cihazların yalnızca aktif güç bileşenlerine göre değil, aynı zamanda reaktif güç bileşenlerindeki dinamik değişimlere göre de güvenilir biçimde ayrıştırılabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.9 : Aktif güç değerleri aynı olup reaktif güç değerleri farklı olan iki cihazın zaman eksenindeki reaktif güç değişimleri.

Reaktif güç bileşeni, özellikle cihazın yapısal türünü (örneğin rezistif, endüktif veya kapasitif) doğrudan yansıttığından, cihaz tanımlama algoritmasında güçlü bir ayırt edici öznelilik olarak kullanılmıştır.

Bu yöntem, güç büyüklükleri birbirine yakın cihazlarda dahi yüksek doğrulukla tanımlama yapılmasına olanak sağlamaktadır.

3.7 PSD Değeri ile Cihaz Tespiti

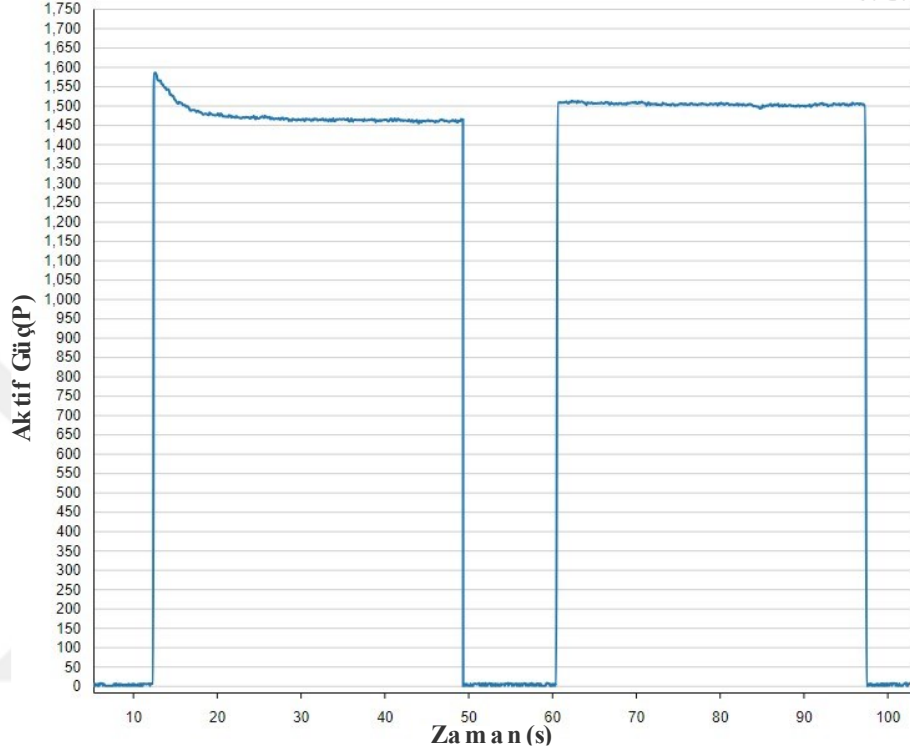
Aşağıdaki Şekil 3.10’da her iki cihaz da kararlı durumda yaklaşık 1500 W seviyesinde güç çekmektedir. Ancak açılış anından sonraki güç değişimleri birbirinden oldukça farklıdır. Elektrikli ısıtıcıda güç değerinin açılışta 1585 W seviyesine çıkıp daha sonra 1480 W seviyesine düştüğü görülürken, gözleme sacında güç değeri yaklaşık 1500 W civarında daha sabit ölçülmüştür.

Bu değerler kullanılarak hesaplanan PSD farkları Denklem 3.5 ve 3.6’daki gibidir.

$$PSD_{Soba} = 1585 - 1480 = 105 \text{ W} \quad (3.3)$$

$$PSD_{Sac} = 1507 - 1503 = 4 W \quad (3.4)$$

Şekil 3.10’da, her iki cihazın açılma anına ait güç-zaman grafikleri verilmiştir. Görüldüğü üzere, sobada belirgin bir tepe-kararlı fark oluşurken, gözleme sacında tepe davranışı oldukça sınırlıdır.

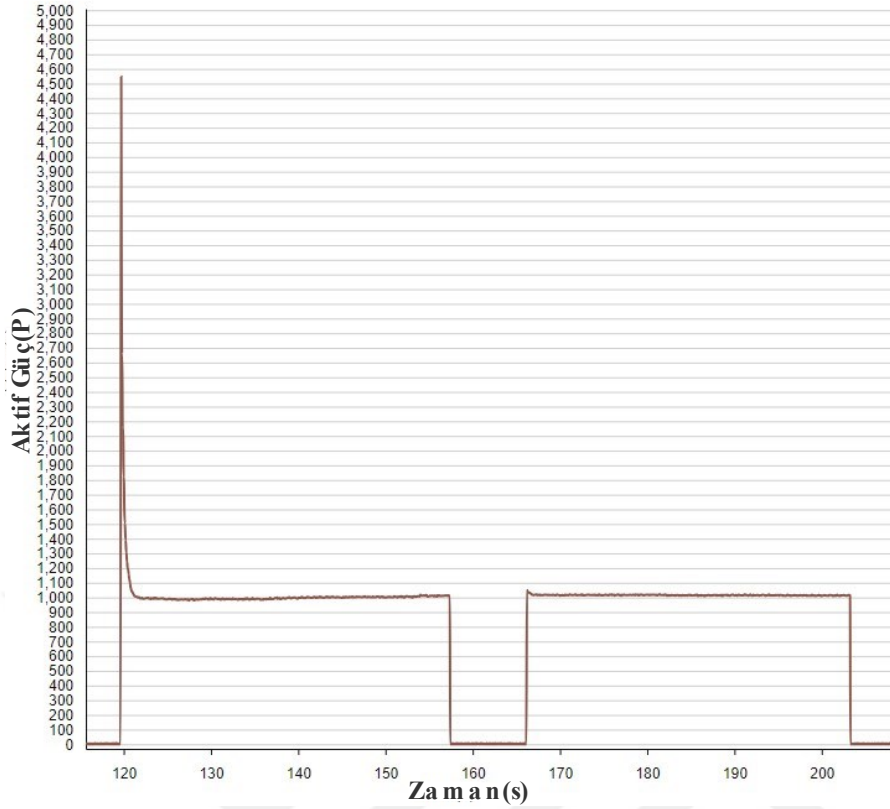


Şekil 3.10 : Benzer güç değerlerine sahip olan cihazların güç zaman grafiği.

Aşağıdaki Şekil 3.11’de başka örnek olarak süpürge ile fön makinesi cihazlarının güç zaman grafikleri verilmiştir.

Fön makinesi ise rezistif yapısı nedeniyle kararlı duruma neredeyse anında ulaşmakta, bu nedenle tepe/kararlı oranı oldukça düşük kalmaktadır.

Grafikten görüldüğü üzere, süpürge'nin kalkış anında kısa süreli keskin bir tepe oluşmakta, ardından güç değeri yaklaşık 2 saniye içinde kararlı hale gelmektedir. Fön makinesinde ise bu tepe davranışı gözlenmemekte, güç değeri doğrudan nominal seviyesinde sabitlenmektedir.



Şekil 3.11 : Açılış güç değişimleri farklı olan iki farklı cihazın zaman eksenindeki güç değişimleri.

Her iki cihaz da yaklaşık 1000 W seviyesinde kararlı durumda güç çekmektedir. Ancak açılış anındaki güç değişimleri birbirinden oldukça farklıdır. Süpürge motorunun ilk kalkışında gözlenen tepe güç değeri 4550 W, fön makinesinde ise 1010 W olarak ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak hesaplanan PSD farkları Denklem 3.7 ve 3.8'deki gibidir.

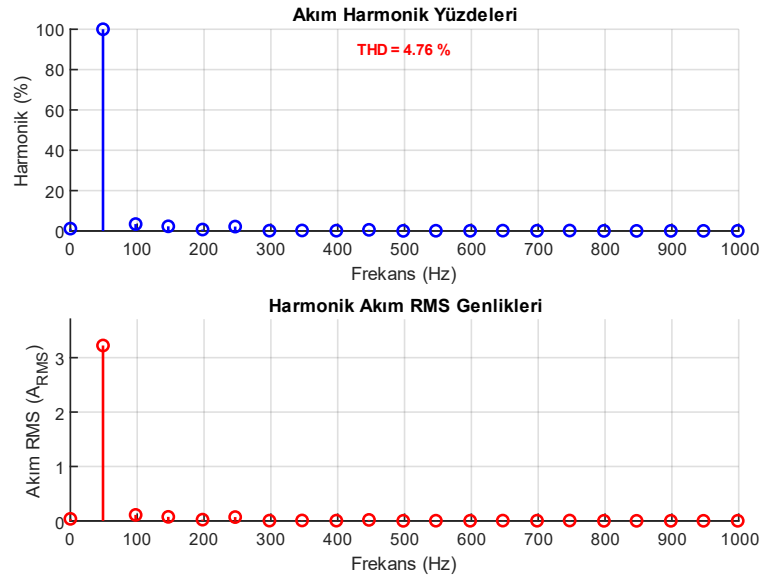
$$PSD_{süpürge} = 4550 - 1000 = 3550 \text{ W} \quad (3.5)$$

$$PSD_{fön} = 1010 - 990 = 20 \text{ W} \quad (3.6)$$

Bu gözlemler, PSD değerinin cihaz tespiti açısından güçlü bir ayırt edici metrik olduğunu göstermektedir. Benzer nominal güce sahip cihazlar arasında yalnızca açılış anındaki tepe davranışının kararlı seviyeden sapması incelenerek güvenilir bir ayırım yapılabilmektedir. Dolayısıyla, PSD tabanlı analiz, özellikle aynı güç seviyelerinde çalışan ancak kalkış karakteristikleri farklı olan cihazların tanımlanmasına anlamlı katkı sağlamıştır.

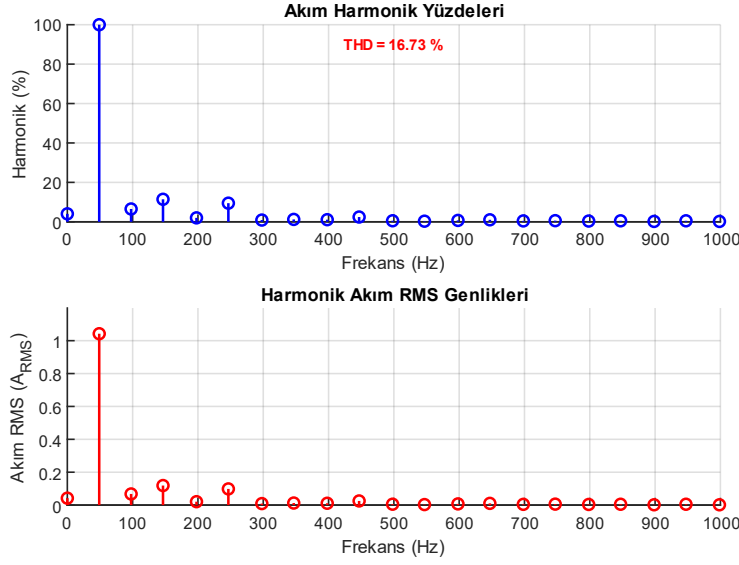
3.8 FFT Analizi

Her bir örnekleme penceresi için Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) gerçekleştirilmiş, böylece sinyalin frekans bileşenleri elde edilmiştir. Analizde kullanılan parametreler şu şekildedir: Örnekleme frekansı 100 kHz olarak belirlenmiş, hızlı Fourier dönüşümü için 2048 noktalı bir FFT uygulanmıştır. Bu yapı altında elde edilen frekans çözünürlüğü yaklaşık 48,83 Hz'tir. FFT sonucunda elde edilen spektrumdan, sıfırıncı harmonikten başlayarak bininci harmoniğe kadar olan harmonik bileşenlerin genlik değerleri çıkarılarak analizde kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.12'de rezistif bir cihazın yüzdelik A_1/A_n oranları ve altında RMS harmonik akımları gösterilmektedir. Baskın olarak sadece temel frekans değeri göze çarpmaktadır. THD değeri %4.76 olarak ölçülmüştür. Akım sensörünün oluşturduğu harmoniklerden dolayı saf rezistif yükte görece yüksek harmonikler çıkmaktadır.



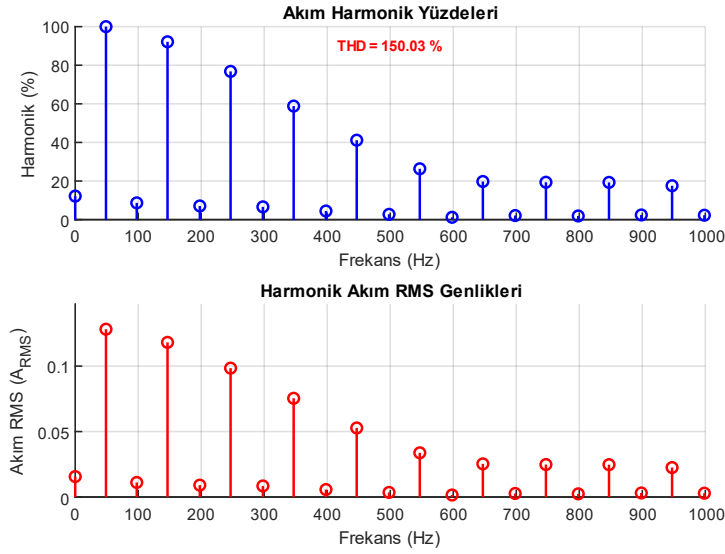
Şekil 3.12 : Rezistif bir cihazın oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik değerleri.

Aşağıdaki şekil 3.13'te ise tek fazlı asenkron motorun yüzdelik A_1/A_n oranları ve harmonik akımları gösterilmiştir. Çift harmonikler genellikle bastırılmıştır, çünkü akım dalga şekli yarı dalga simetrisine yakındır. Özellikle 5. ve 3. harmonikler, motorun manyetik doyumu ve endüktif karakteri nedeniyle belirgin biçimde ortaya çıkar. THD %16.73 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.13 : Bir motorun oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik değerleri.

Aşağıdaki Şekil 3.14'teki LED sürücüsüne ait akım spektrumu incelendiğinde, temel bileşenin yanında oldukça yüksek genlikli harmoniklerin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 3.14 : LED sürücüsünün oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik değerleri.

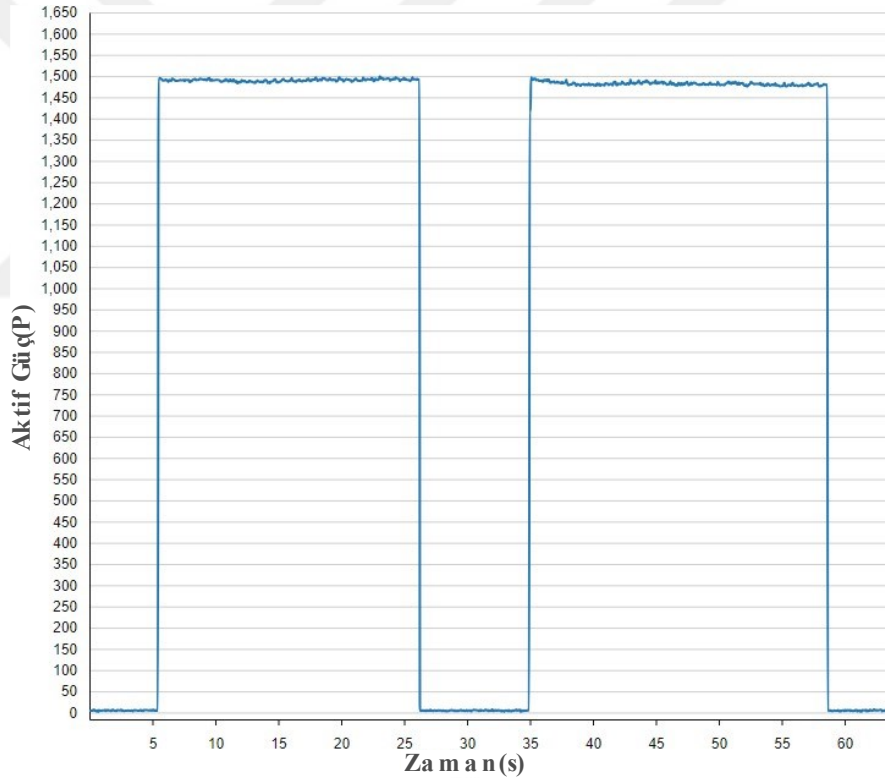
Bu yüksek harmonik bileşenler, sürücünün girişinde yer alan doğrultucu ve anahtarlama güç dönüştürücü (SMPS) yapısının şebekeden akımı doğrusal olmayan biçimde çekmesinden kaynaklanmaktadır.

Bu doğrusal olmayan davranışın sonucu olarak LED sürücüsüne ait akımın yüksek oranda bozulmuş harmonik bileşenleri açık biçimde görülmektedir. THD değeri %150 olarak ölçülmüştür.

3.8.1 Benzer güçteki cihazların FFT analizi ile ayrıştırılması

Benzer aktif güç değerine sahip cihazlar, kararlı durumda (steady-state) hemen hemen aynı ortalama gücü sergilese de, harmonik dağılımları farklılık gösterir. Bu farklar, cihazın türüne ve iç yapısına bağlı olarak oluşur.

Aşağıdaki her iki cihazın da aktif ve reaktif güçleri aynı seviyededir; bu nedenle yalnızca güç değişim analiziyle bu cihazların birbirinden ayrılması mümkün olmamaktadır. Aşağıdaki Şekil 3.15'te aynı güç değerine sahip iki adet rezistif cihazın güç zaman grafiği gösterilmiştir.

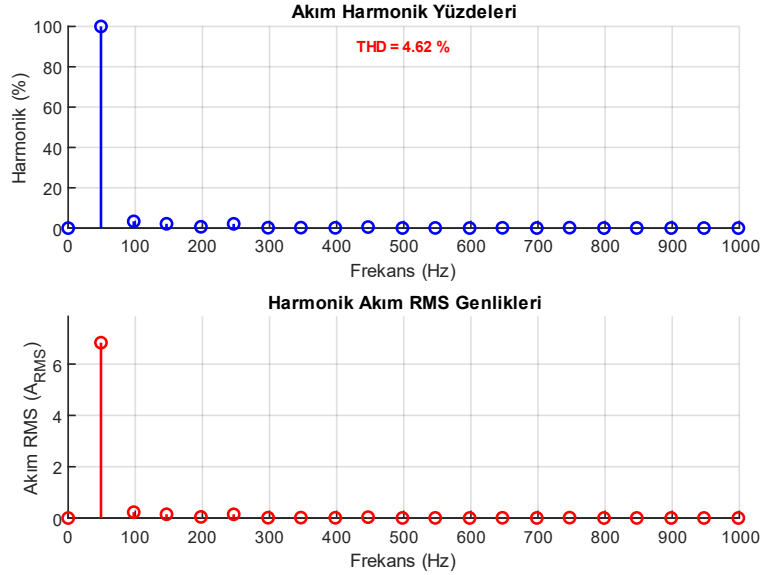


Şekil 3.15 : Benzer güç değerine sahip iki adet rezistif cihazın güç zaman grafiği gösterilmiştir.

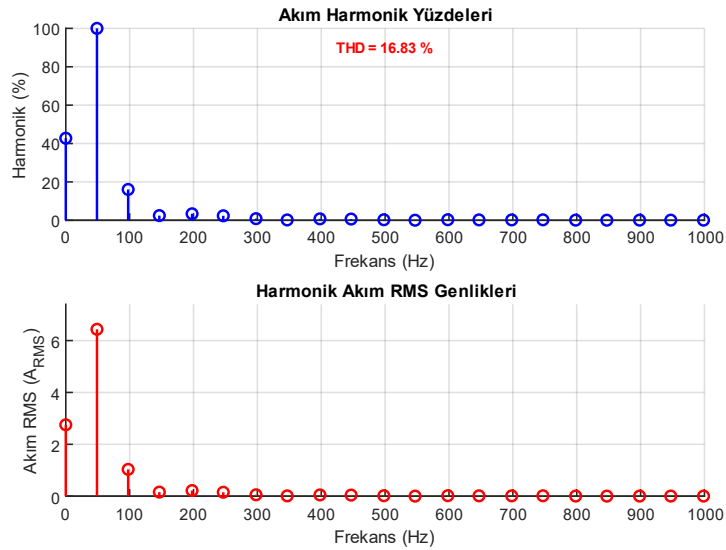
Ancak aşağıdaki frekans alanındaki harmonik bileşenler incelendiğinde (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17), cihazların karakteristik farkları açık biçimde görülmektedir. Özellikle ikinci cihazın spektrumunda(Şekil 3.17) sıfırıncı (DC) bileşenin ve ikinci harmonik (100 Hz) bileşenin genliklerinin belirgin biçimde yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu

durum, ikinci cihazın akımının yarım dalga doğrultulmuş yapıda olmasından kaynaklanmaktadır.

Aşağıdaki Şekil 3.16'da ve Şekil 3.17'de, iki cihazın ayrı ayrı harmonik yüzde ve genlik değerleri verilmiştir.

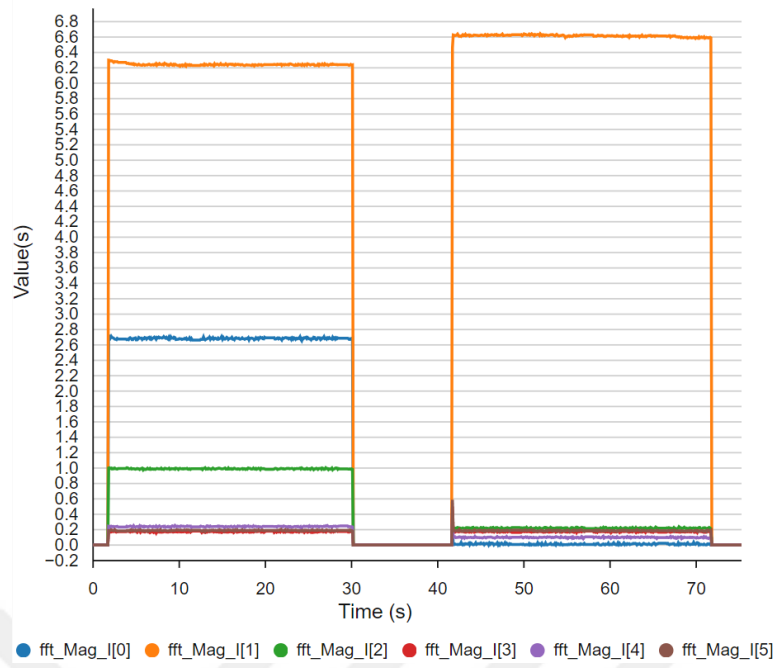


Şekil 3.16 : Rezistif bir ısıtıcının oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve yüzde harmonik oranları.



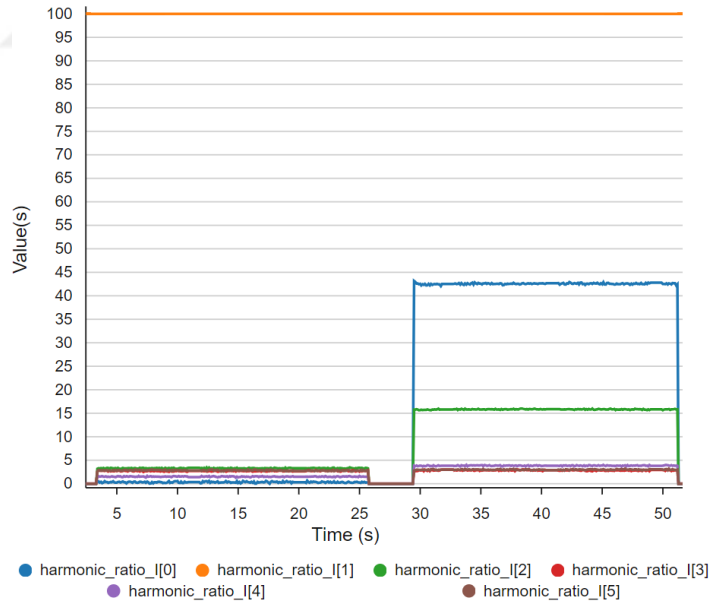
Şekil 3.17 : Yarım dalga modunda çalışan rezistif bir cihazın oluşturduğu frekans alanındaki akım harmonikleri ve harmonik oranları.

Şekil 3.18'de ise Bu iki cihazın harmonik akımlarının zaman ekseninde çizilmiş hali verilmiştir.



Şekil 3.18 : Sırasıyla yarım dalga çalışan cihaz ve tam dalga çalışan cihazın zaman eksenindeki RMS akım harmoikleri.

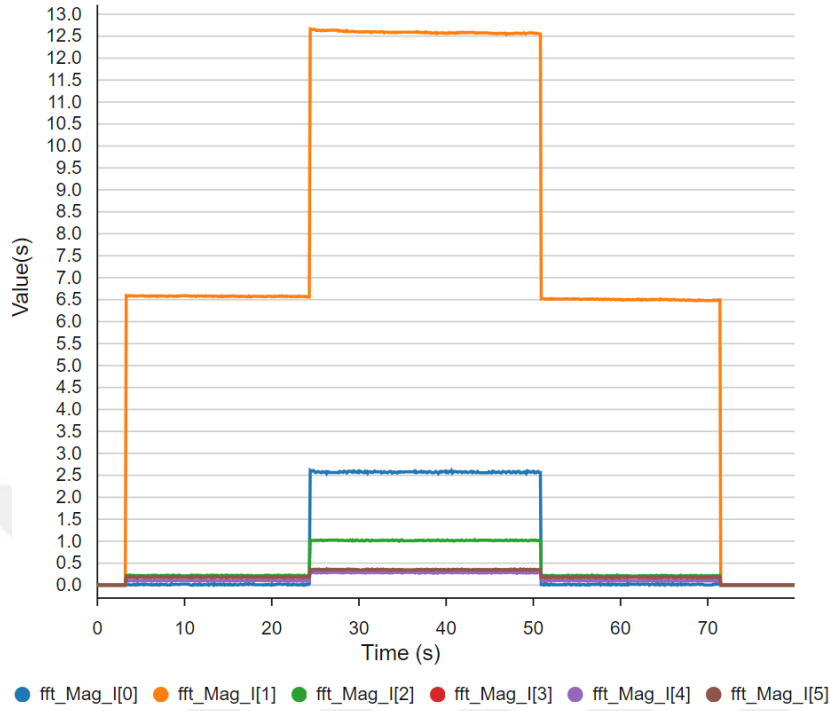
Şekil 3.19’da ise aynı cihazlar için temel bileşene (A_1) oranla harmonik genliklerinin yüzde değerleri $(A_1/A_n) \times 100$ gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : Sırasıyla tam dalga ve yarım dalga çalışan cihazların zaman ekseninde temel bileşene (A_1) oranla harmonik genliklerinin yüzde değerleri $(A_1/A_n) \times 100$.

Yukarıdaki Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 incelendiğinde, ikinci cihazın özellikle DC bileşen ve 2. harmonik oranlarında ilk cihaza göre belirgin fark oluşturduğu görülmektedir. Bu fark, cihazın doğrusal olmayan akım çekiş davranışını açıkça ortaya koymaktadır.

Aşağıdaki Şekil 3.20’de, iki cihazın birlikte çalışması gösterilmiştir. Şeklin orta kısmında harmonikli cihaz devreye alınıp devreden çıkarılmıştır.

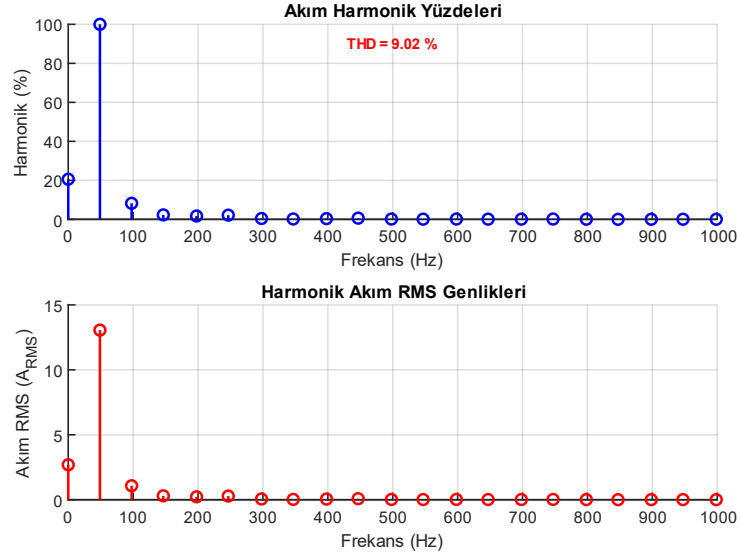


Şekil 3.20 : İki cihazın birlikte çalışma durumunda harmoniklere göre RMS akım harmoniklerinin değerleri.

Bu durumda, sistemde iki cihaz bulunmasına rağmen harmonikli cihazın karakteristik harmonik genlikleri (özellikle 0. ve 2. harmonikler) birlikte çalışma durumunda belirgin şekilde artmıştır.

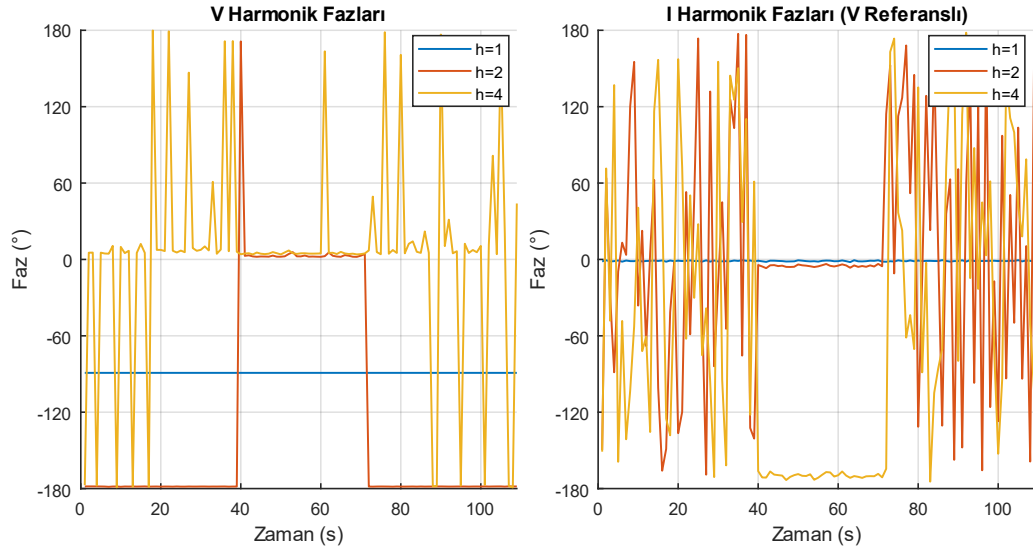
Benzer şekilde cihazların birlikte çalışma durumundaki yüzde değerleri ve RMS akım harmonikleri aşağıdaki şekil 3.21’de verilmiştir. Harmonikli cihazın frekans düzleminde belirgin ve kararlı bir “imza (signature)” oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Bu özellik cihaz tespitinde önemli bir avantaj sağlar; çünkü birden fazla cihaz aynı anda çalışıyor olsa bile, her bir cihazın ürettiği harmonik bileşenler belirli frekanslarda ayırt edici bileşenler olarak gözlemlenebilir.



Şekil 3.21 : İki cihazın birlikte çalışma durumunda frekans alanındaki temel bileşene (A_1) oranla harmonik genliklerinin yüzde değerleri $(A_1/A_n) \times 100$ ve RMS akım harmonikleri.

Ancak dikkat edilmesi gereken bir durum vardır. Birden fazla harmonikli cihaz aynı anda çalıştığında, her bir cihazın ürettiği harmonikler frekans düzleminde süperpozisyon prensibine göre toplanır. Bu davranış, iki cihazın birlikte çalışma durumunda seçili harmoniklerin faz açılarının zamana göre değişiminin verildiği Şekil 3.22 üzerinde açıkça izlenebilmektedir.

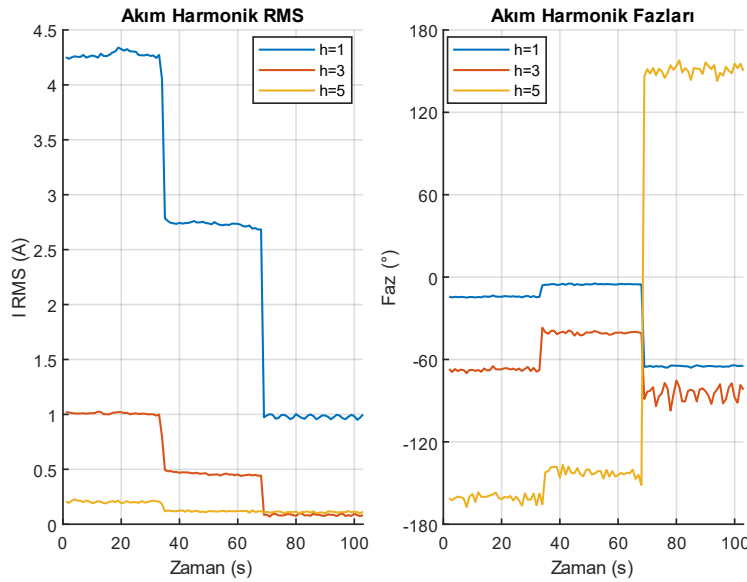


Şekil 3.22 : İki cihazın ayrı ve birlikte çalışma durumunda zaman alanındaki harmonik faz değişimleri. Şebeke gerilimi harmonik fazları (solda). Akım harmonik fazları (sağda).

Birinci cihazın çalışma anında alt harmonikler çok düşük olduğundan faz açıları stabil olarak tespit edilememiştir. Ancak harmonikli cihazın çalışma anındaki faz açıları net şekilde tespit edilebilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan tam dalga cihazın alt harmonik akım genlikleri ve DC bileşeni düşük olduğu için yarım dalga çalışan cihaz ile harmonik karışması gözlenmemiştir.

Üç farklı motorlu cihazın ardışık çalıştırılmasıyla elde edilen harmonik genlik ve faz– zaman izleri Şekil 3.23’te verilmiştir. Bu sonuçlar, harmonik faz davranışlarının yük değişimi ve çalışma karakteristiğine bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterebildiğini ortaya koymakta; dolayısıyla harmonik akım değişimine dayalı tespit yaklaşımına ek bir ayırt edici katman kazandırdığını göstermektedir.



Şekil 3.23 : Üç farklı motor yükünün harmonik RMS akım değerleri ve bu harmoniklerin faz açılarının zaman alanındaki gösterimi.

Bu nedenle, harmonik faz bilgilerinin yorumlanmasında söz konusu farklılıkların ve olası etkileşimlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Bununla birlikte genel olarak harmonik bileşenlerin zaman içindeki davranışı ve belirli frekanslardaki bileşenlerin varlığı izlenerek cihazların aktif olup olmadığı tespit edilebilmektedir. Böylece yalnızca güç değişim analizine dayanarak birbirinden ayıramayan cihazlar, harmonik imzalarının kararlılığı kullanılarak daha güvenilir biçimde tanımlanabilmektedir.

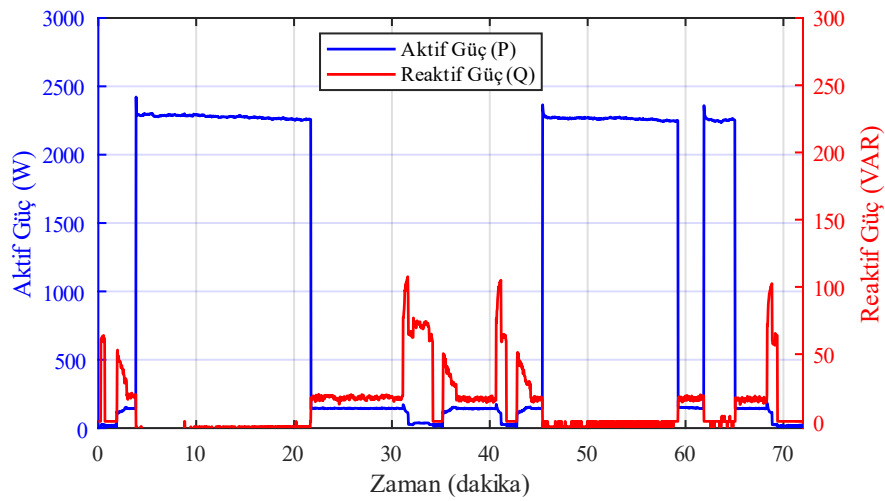
3.9 FSM Tabanlı Model İle Yanlış Cihaz Tespitlerinin Bastırılması

Bu bölümde, ikinci bölümde kuramsal temelleri verilen Sonlu Durum Makinesi (FSM) yaklaşımının, tez kapsamında ölçümü yapılan bulaşık makinesi için nasıl somutlaştırıldığı açıklanmaktadır. Amaç, bulaşık makinesinin çok kademeli güç profilini durum tabanlı bir modele dönüştürmek ve bu modeli kullanarak, özellikle çamaşır makinesi gibi başka cihazlar çalışırken, bulaşık makinesine ait iç güç geçişlerinin başka cihazların açılması/kapanması şeklinde yanlış yorumlanmasını engellemektir.

3.9.1 Bulaşık makinesine ait güç ölçümleri ve tipik çalışma dizisi

İlk adımda bulaşık makinesi, tek başına hatta bağlıyken çalıştırılmış ve cihazın tam bir program döngüsü boyunca aktif güç P ve reaktif güç Q değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen zaman serisi incelendiğinde, cihazın belirli çalışma modlarında kararlı güç seviyelerinde kaldığı ve bu modlar arasında ani güç adımları ile geçiş yaptığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.24). Ölçümler sonucunda bulaşık makinesinin tipik bir program döngüsü boyunca izlediği güç seviyesi dizisi özetle şu şekildedir:

0W → su alma (24 W, 60 var) → 0W → A (115 W, 50 var) → B(144W, 15 var) → ısıtıcı (2290 W) → B (144 W, 15 var) → C (174 W, 80 var) → 0 W → A (115 W, 50 var) → B (144 W, 15 var) → C (174 W, 80 var) → 0 W → A (115 W, 50 var) → ısıtıcı (2290 W) → B (144 W, 15 var) → ısıtıcı(2290 W) → B(144W, 15 var) → C (174 W, 80 var) → 0W



Şekil 3.24 : Bulaşık makinesine ait zaman alanındaki aktif ve reaktif güç grafiği.

Bu diziden ve yukarıdaki grafikten görüldüğü üzere, bulaşık makinesinin çalışma döngüsü farklı güç seviyeleri arasında tekrarlayan geçişler içermektedir. Özellikle ısıtıcı fazına giriş-çıkışlarda yaklaşık 2.2 kW mertebesinde büyük adımlar, 120 W bandında daha küçük adımlar oluşmaktadır.

3.9.2 Durumların tanımlanması ve p–q bölgeleri

Açılmayan cihazlar kapanamayacağından sadece yükselen kenarlardaki güç değişimleri durum olarak kaydedilmiştir. Bu durum göz önüne alınarak bulaşık makinesi için FSM'in yeni durum değişim kümesi S aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- 1) S_0 : Boş Çalışma (0 W, 0 var)
- 2) S_1 : Su alma modu (25 W, 60 var)
- 3) S_2 : A modu (115 W, 50 var)
- 4) S_3 : ısıtıcı modu (2300 W)
- 5) S_4 : B modu (144 W, 15 var)
- 6) S_5 : C modu (180 W, 80 var)

Her bir durum için, tek bir nokta değeri yerine, ölçüm gürültüsü ve şebeke dalgalanmalarını karşılayacak şekilde aktif ve reaktif güç aralıkları tanımlanmıştır.

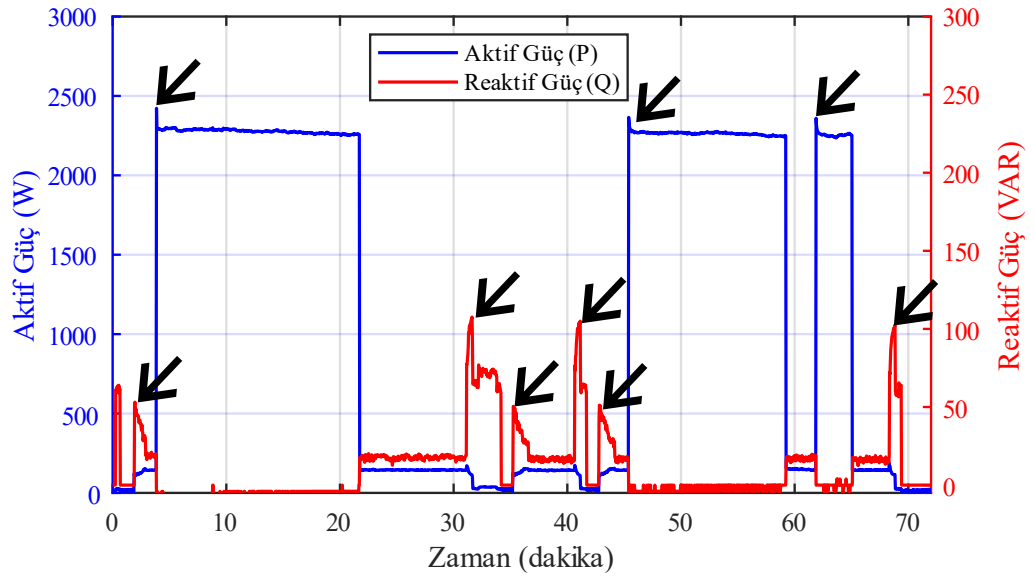
Yeni bir bölgeye geçemediği sürece sistem durumunun S_2 (A modu) olduğu kabul edilmektedir.

3.9.3 Güç değişim adımlarının çıkarılması ve fsm geçiş eşikleri

Bazı durumlarda cihazın güç değerleri zamana göre lineer olarak yavaş değiştiği tespit edilmiştir. Bu da güç değişim tespitini engellemektedir. Bu durum göz önüne alınarak bulaşık Bulaşık makinesinin tek başına çalıştığı ölçüm seanslarında, ardışık durumlar arasındaki aktif güç farkları analiz edilerek her bir durum geçişine karşılık gelen tipik adım büyüklükleri elde edilmiştir. Aşağıda geçiş değişimleri verilmiş, Şekil 3.25'te gösterilmiştir:

- 1) $S_0 \rightarrow S_1$ (0W $\rightarrow$ Su alma modu): +25W +60Var
- 2) $S_0 \rightarrow S_2$ (0W $\rightarrow$ A): +115W +50Var
- 3) $S_4 \rightarrow S_3$ (B $\rightarrow$ Isıtıcı): +2150 W

- 4) $S_4 \rightarrow S_5$ (B $\rightarrow$ C): +35 W +65Var
- 5) $S_0 \rightarrow S_2$ (0W $\rightarrow$ A): +115W +50Var
- 6) $S_4 \rightarrow S_5$ (B $\rightarrow$ C): +35 W +65Var
- 7) $S_0 \rightarrow S_2$ (0W $\rightarrow$ A): +115W +50Var
- 8) $S_4 \rightarrow S_3$ (B $\rightarrow$ Isıtıcı): +2150 W
- 9) $S_4 \rightarrow S_3$ (B $\rightarrow$ Isıtıcı): +2150 W
- 10) $S_4 \rightarrow S_5$ (B $\rightarrow$ C): +35 W +65Var



Şekil 3.25 : Bulaşık makinesine ait zamana bağlı mod değişimleri.

Her geçiş için bir $\Delta P_{i \rightarrow j}$ referansı ve buna ait bir tolerans $\Delta A_{i \rightarrow j}$ seçilmiş, koşul aşağıdaki Denklem 3.9 gibi olmuştur.

$$\text{Eğer } s(t) = S_i \text{ ve } |\Delta P(t) - \Delta P_{i \rightarrow j}| \leq \Delta A_{i \rightarrow j} \Rightarrow s(t + 1) = S_j \quad (3.7)$$

Bu sayede FSM, hem hangi durumda olduğunu (S_i) hem de o anda gözlenen güç adımının büyüklüğünü $\Delta P(t)$ $\Delta Q(t)$ birlikte değerlendirerek bir sonraki durumu belirlemektedir.

3.9.4 Fsm'in “maskeleye” amacıyla kullanılması

Bu tezde FSM, klasik anlamda sadece bulaşık makinesini tanımak için değil, daha kritik olarak yanlış cihaz tespitlerini bastırmak için kullanılmaktadır.

Bulaşık makinesinin çalıştığı tespit edildiğinde, ilgili FSM devreye sokulur ve sistem, o andan itibaren bulaşık makinesinin durumunu $S_0, S_1, \dots, S_n$ kümesi içinde takip etmeye başlar. Her yeni güç adımı geldiğinde eğer $\Delta P(t)$, o anda içinde bulunulan durumdan izin verilen bir sonraki duruma ait referans değere $\Delta P_{i \rightarrow j}$ yakınsa bu adım yeni bir cihaz açılması olarak yorumlanmaz, bulaşık makinesinin doğal iç geçişi olarak ele alınır ve $s(t + 1) = S_j$ olacak şekilde FSM içinde güncelleme yapılır.

Eğer $\Delta P(t)$, hem FSM'in izin verdiği geçişlerin dışında kalıyor hem de büyüklük olarak beklenen adım bantlarının dışına taşıyorsa, bu durumda adım, başka bir cihazın devreye girme ihtimali ile değerlendirilir ve birinci katmandaki cihaz tanıma algoritmasına “basit cihaz değişimi” olarak aktarılır.

Bu mekanizma sayesinde FSM, sistemin genel cihaz tanıma işlemi üzerinde bir “koruyucu maske” gibi çalışmaktadır.

3.10 V–I Grafiklerinin Kullanımı

Bu tez kapsamında geliştirilen yarı-girişimsel izleme sisteminde V–I grafiklerinin rolü, ikinci bölümde sunulan teorik çerçevenin ötesine geçerek, gömülü tarafta özellik çıkarımını ele alınmaktadır. Bu alt bölümde, V–I grafiklerinin önerilen yöntemde nasıl üretildiği, nasıl kullanıldığı ve cihaz tanıma problemini nasıl desteklediği uygulama odaklı olarak açıklanmaktadır.

3.10.1 Gerçek zamanlı V–I verisinin elde edilmesi

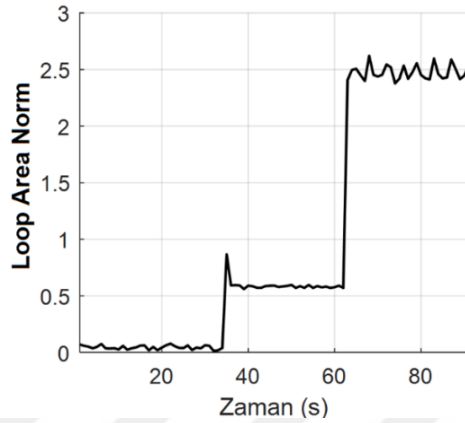
Geliştirilen sistemde, tek fazlı besleme hattı üzerinden ölçülen gerilim ve akım bilgileri, her cihaz grubu için sabit süreli analiz pencereleri hâlinde işlenmektedir. İkinci bölümde tanımlandığı üzere, şebeke frekansı $f_s \approx 50$ Hz kabul edilmekte ve yaklaşık $T \approx 20$ ms süren her periyot için 2000 adet eşzamanlı örnek alınmaktadır. Gömülü tarafta STM32 tabanlı donanım gerilim sensöründen ve akım sensöründen gelen analog sinyalleri ADC üzerinden örneklemekte ve her 20 ms’lik pencere sonunda oluşan $v[n]$ ve $i[n]$ dizilerini hem yerel özellik hesabı hem de seri haberleşme üzerinden bilgisayara aktarım için kullanmaktadır.

3.10.2 V–I döngü alanı (loop area)

Farklı güç seviyelerindeki cihazların karşılaştırılabilmesi için V-I alanı normalize edilmiş olarak $A_{loop,norm}$ şeklinde kullanılmış, böylece alan büyüklüğü cihazın mutlak

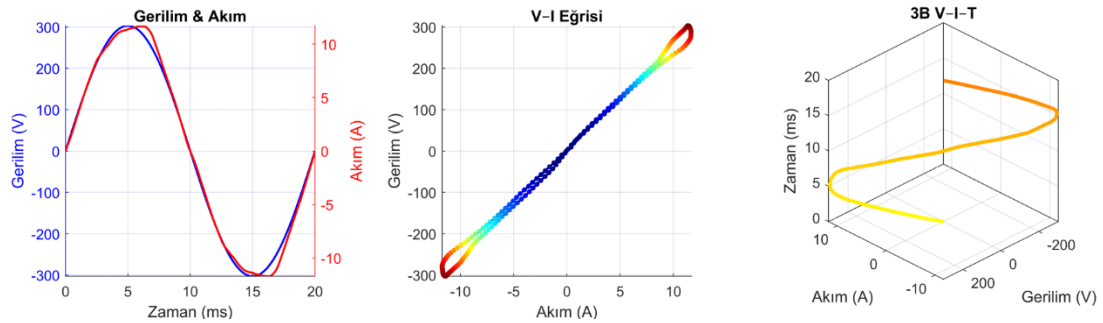
gücünden çok V–I eğrisinin şekline ve dolaylı olarak güç faktörüne bağlı hâle getirilmiştir.

Şekil 3.26’da, sırasıyla saf rezistif bir ısıtıcı, hafif reaktif karaktere sahip bir süpürge ve daha belirgin reaktif bileşen içeren bir fana ait V–I eğrileri ile bu eğrilerden türetilen normalize $A_{loop,norm}$ değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.26 : Üç ayrı cihazın zaman eksenindeki normalize edilmiş loop area değerleri.

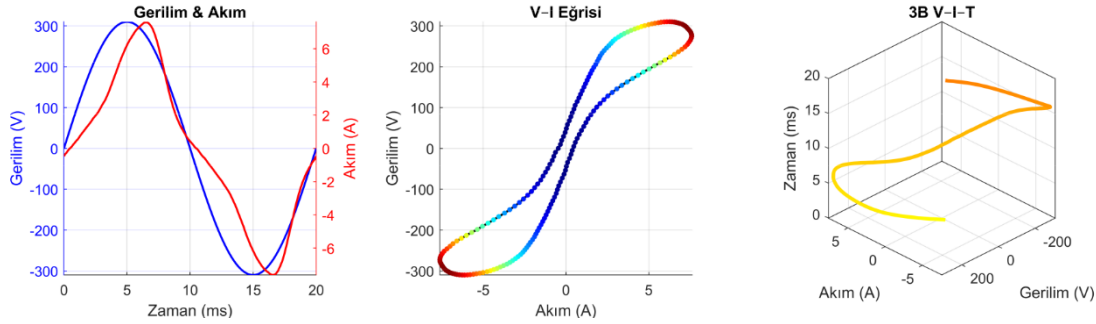
Aşağıdaki Şekil 3.27’de gözüktüğü üzere rezistif ısıtıcı için V–I eğrisi neredeyse tek bir doğruya indirgenmekte, dolayısıyla kapalı döngü alanı ihmal edilebilir düzeyde kalmakta ve normalize alan değeri $A_{loop,norm} = 0$ civarında gözlenmektedir.



Şekil 3.27 : Rezistif bir cihaza ait zamana bağlı gerilim-akım grafiği, V-I grafiği ve zaman eksenine eklenmiş 3B V-I grafiği.

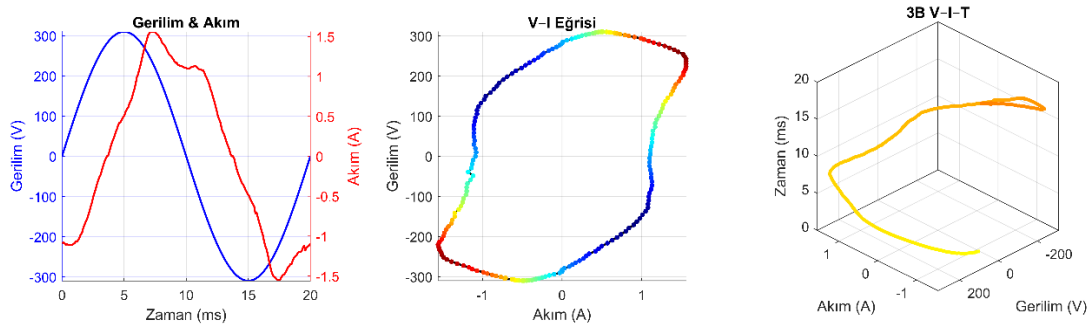
Ayrıca Şekil 3.26’da gözüktüğü üzere süpürge devreye girdiğinde motorun kalkış akımına bağlı kısa süreli bir tepe oluşmakta, bu anda normalize alan değerinde ani bir pik görülmekte ve cihaz kararlı çalışma bölgesine geçtiğinde $A_{loop,norm}=0,5$ seviyesinde sabitlenmektedir.

Süpürge cihazı endüktif yüke sahip olduğu için aşağıdaki Şekil 3.28’de görüldüğü üzere V-I alanı büyümüş ve yine cihazın içerdiği harmoniklerden dolayı V-I grafiği S şeklini almıştır.



Şekil 3.28 : Endüktif bir süpürgeye ait zamana bağlı gerilim-akım grafiği, V-I grafiği ve zaman eksenini eklenmiş 3B V-I grafiği.

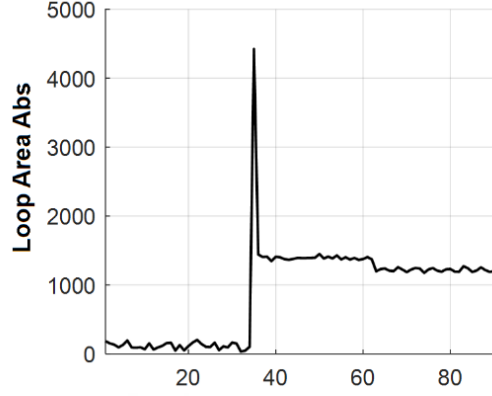
Fan için ise daha yüksek reaktif bileşen ve buna karşılık gelen faz kayması nedeniyle V-I döngüsünün kapladığı alan belirgin biçimde genişlemekte ve normalize alan değeri Şekil 3.26’da görüleceği üzere $A_{loop,norm}=2,5$ seviyesine kadar yükselmektedir. Aşağıda Şekil 3.29’da fanın V-I grafiği verilmiştir.



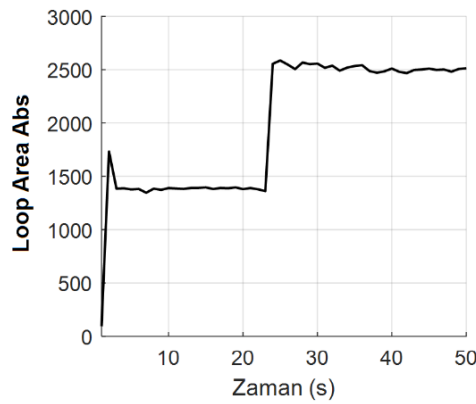
Şekil 3.29 : Fan cihazına ait zamana bağlı gerilim-akım grafiği, V-I grafiği ve zaman eksenini eklenmiş 3B V-I grafiği.

Böylece normalize alan değerinin cihazların güç faktörü ile ters orantılı şekilde arttığı; ısıtıcı, süpürge ve fanın Şekil 3.26’daki normalize alan grafiğinde tek boyutlu bu özellik ekseninde net biçimde ayrışabildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, normalize edilmiş loop area ölçütünün hem reaktif yüklerin ayrıştırılmasında tek başına yüksek ayırt edicilik sağladığını hem de ilerleyen bölümlerde sunulan çok özellikli sınıflandırma yapısına güçlü ve fiziksel anlamı açık bir girdi sunduğunu göstermektedir.

Normalize alanın aksine, Şekil 3.30’da gösterilen mutlak loop area değeri $A_{loop,abs}$ cihazların yalnızca reaktiflik derecesini değil, aynı zamanda devreden çekilen toplam akım/genlik düzeyini de yansıtmaktadır.



Şekil 3.30 : Sırasıyla rezistif ısıtıcının, endüktif süpürge ve fanın V-I alan grafiği. Tekil cihaz ölçümlerinde $A_{loop,abs}$ değerinin ısıtıcı çalışırken yaklaşık 100 civarında kaldığı, süpürge devreye girdiğinde kalkış anındaki kısa süreli tepeyi takiben 1400 seviyesine yerleştiği, fan çalıştığında ise yaklaşık 1100 civarında seyrettiği gözlenmiştir. Normalize grafikte fan en yüksek $A_{loop,norm}$ değeriyle en reaktif cihaz olarak ayrışırken, mutlak loop alanında süpürge fanına göre daha yüksek bir değere ulaşması, bu cihazın hem daha yüksek güç çektiğini hem de kayda değer bir reaktif bileşen içerdiğini göstermektedir. $A_{loop,norm}$ ile $A_{loop,abs}$ arasındaki temel fark, özellikle birden fazla cihazın aynı anda çalıştığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.31’de sırasıyla yalnızca süpürge açıkken ve süpürge ve fan devredeyken elde edilen $A_{loop,abs}$ zaman serileri gösterilmektedir.

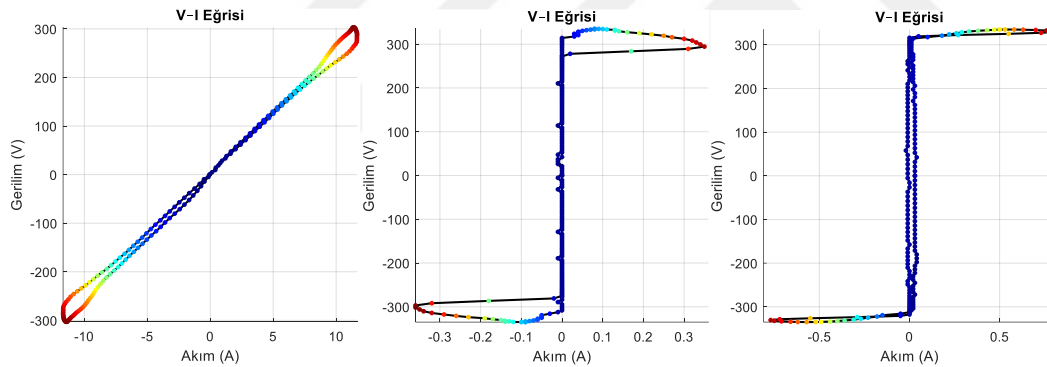


Şekil 3.31 : Sırasıyla yalnızca süpürge devredeyken ve süpürge ve fan devredeyken ölçülen V-I alan grafiği.

Grafiğin sol bölümünde yalnızca süpürge çalışmakta, bu aralıkta $A_{loop,abs}$ değeri 1100 seviyesinde ve anlık tepe değeri sonrası görece sabit kalmaktadır. İkinci bölümde fanın devreye girmesiyle $A_{loop,abs}$ değerinde belirgin bir sıçrama meydana gelmekte ve bu iki cihazın toplamı olan 2500 seviyesine çıkmaktadır. Her yeni cihazın sisteme eklenmesiyle mutlak loop alanının toplamsal bir davranış sergilediği açıkça görülebilmektedir. Reaktif cihazların çalıştığı durumda sadece $A_{loop,abs}$ değerindeki değişime bakılarak cihaz tespiti yapmak mümkün olduğu açıkça gözükmemektedir.

3.10.3 Ötelenmiş I-I alanı (loop area 90°) ile cihaz tespiti

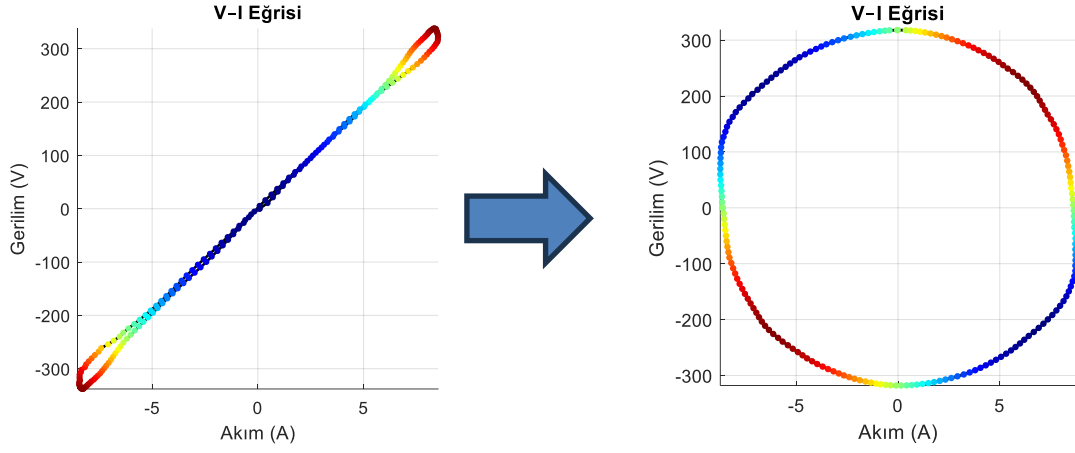
V-I alanı, reaktif bileşeni yüksek cihazlarda güçlü bir ayırıştırma sağlarken, saf rezistif yükler ve düşük güçlü elektronik cihazlar söz konusu olduğunda sınırlı kalmaktadır. Bunun temel nedeni, Şekil 3.32’de verildiği gibi bu tür cihazların V-I eğrilerinin ya neredeyse tek bir doğruya indirgenmesi (ısıtıcı) ya da (aydınlatma) ve (televizyon) görüldüğü gibi iletimin şebeke periyodunun dar bir bölümünde gerçekleşmesi nedeniyle kapalı döngü alanının çok küçük kalmasıdır.



Şekil 3.32 : Sırasıyla ısıtıcı, aydınlatma ve televizyon cihazlarının V-I eğrisi grafikleri.

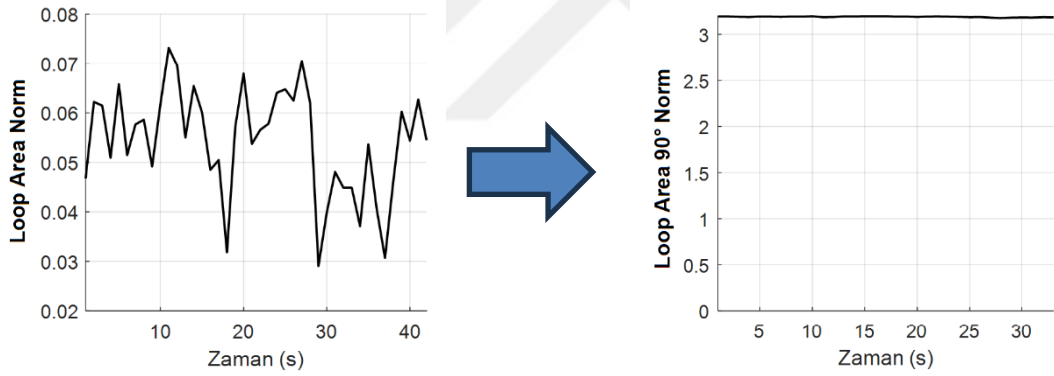
Bu kısıtları azaltmak amacıyla, bu çalışmada akım sinyali gerilime göre fazda 90° ötelenmiş ve V-I döngüsünün alanı yeni bir özellik olarak tanımlanmıştır. Böylece, faz farkı yapay olarak büyütülerek V-I eğrisinin kapladığı alan artırılmakta, klasik alanda “ince çizgi” gibi görünen eğriler daha geniş ve dolgun bir döngüye dönüşmektedir.

Şekil 3.33’de, rezistif bir cihazın önce klasik V-I eğrileri, ardından aynı sinyallerin 90° ötelenmiş akım ile elde edilen V-I eğrileri gösterilmekte; ötelenme sonrası her iki cihaz için de alanın görsel olarak çok daha belirgin hâle geldiği izlenmektedir.



Şekil 3.33 : Ötelenmemiş V-I eğrisi (solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I eğrisi(sağda).

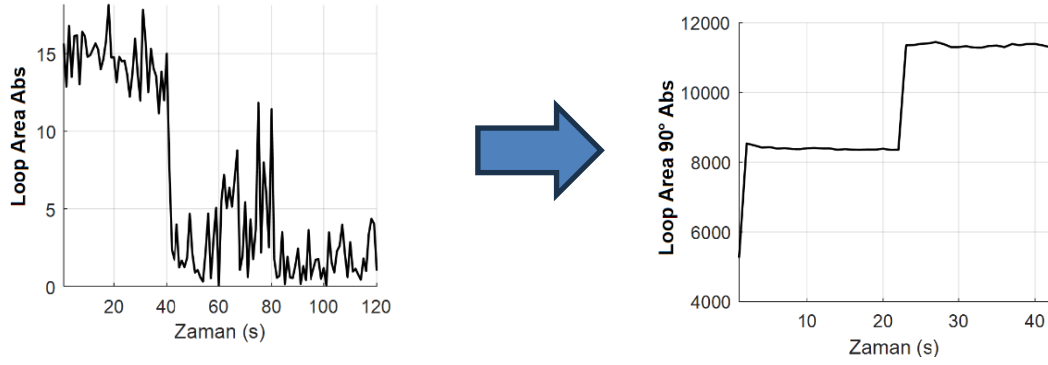
Ötelenmiş alan kullanıldığında normalize bileşen $A_{loop,norm}$, faz farkının yaklaşık 90° 'ye zorlanması sonucu her iki cihaz için de π ($\approx 3,14$) civarına doymakta, bu nedenle farklı rezistif cihazlar arasında yine anlamlı bir seviye farkı üretmemektedir. Aşağıdaki Şekil 3.34'te sıra ile çalışan iki farklı rezistif cihazın ötelenmemiş ve 90 derece ötelenmiş normalize alan grafiği verilmiştir.



Şekil 3.34 : Ötelenmemiş V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I alanı (sağda).

Buna karşın Şekil 3.35'te gösterilen $A_{loop90,abs}$ zaman serisi, iki cihaz devreye alındığında belirgin biçimde farklı genlik seviyeleri oluşturmaktadır.

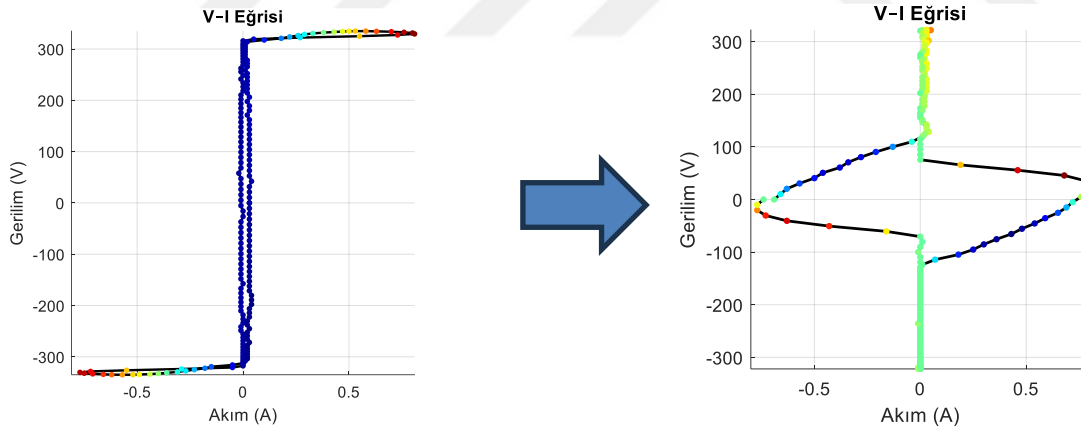
Birinci rezistif cihaz çalışırken $A_{loop90,abs}$ belirli bir plato seviyesinde sabitlenirken, sadece ikinci cihaz devreye alındığında bu seviye daha yüksek bir değere taşınmakta ve iki cihaz arasında tek boyutlu, net bir seviye ayrımı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.35 : İki farklı güçteki rezistif cihazın ötelenmemiş mutlak V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş mutlak V-I alanı (sağda).

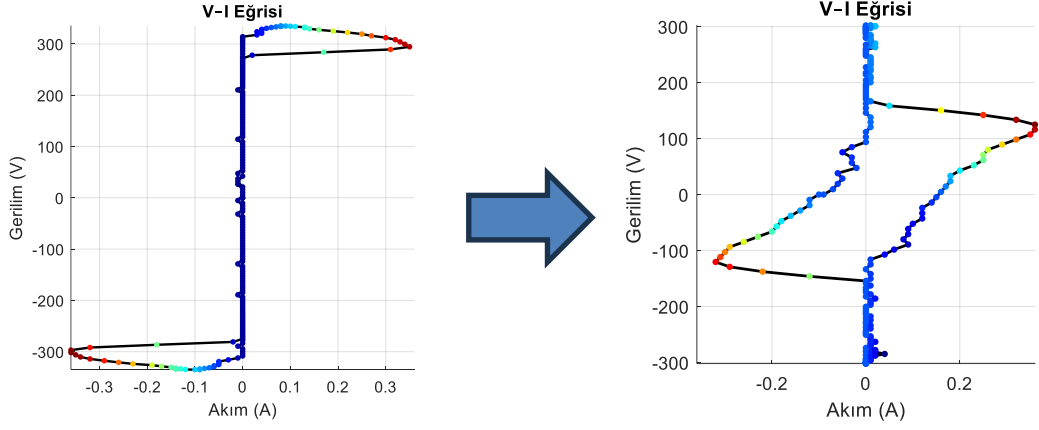
Klasik $A_{loop,abs}$ ile gözle bile seçilemeyen farklar, $A_{loop90,abs}$ ekseninde açık bir ayrışmaya dönüşmektedir. Bu sonuçlar, 90° ötelenmiş mutlak alan bileşeninin, benzer güçteki rezistif cihazları dahi ayırt edebilecek hassasiyete sahip olduğunu göstermektedir.

Ayrıca düşük güçlü elektronik cihazların olduğu sistemde de ötelenmiş alan özelliği güzel ayırıştırma olanağı sağlamaktadır. Aşağıda Şekil 3.36'da televizyon ve Şekil 3.37'de aydınlatmaya ait ötelenmemiş ve ötelenmiş alan grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.36 : Televizyonun ötelenmemiş V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I alanı (sağda).

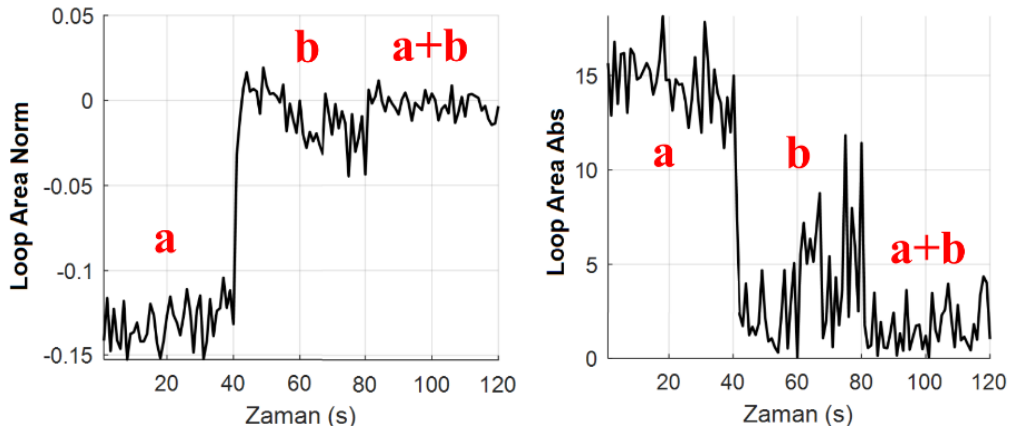
Elektronik cihazlarda doğrultucu ve anahtarlama elemanları nedeniyle akım, şebeke periyodunun yalnızca dar bir zaman aralığında akmaktadır. Bu durum V-I eğrisinin köşeli/parçalı ve dar bir yapı sergilemesine yol açar.



Şekil 3.37 : Aydınlatmanın ötelenmemiş V-I alanı (solda) ve 90 derece ötelenmiş V-I alanı (sağda).

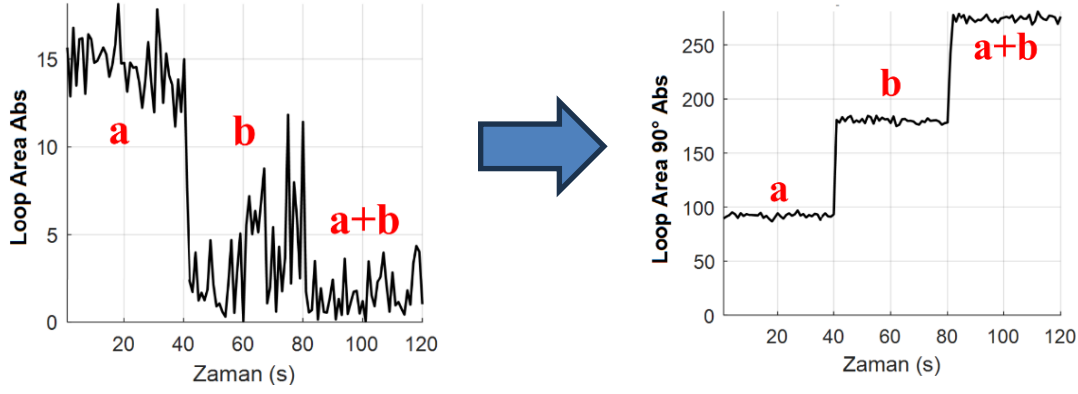
Sonuç olarak düşük güçlü elektronik cihazlarda klasik alan tabanlı özellikler olan $A_{loop,abs}$ ve $A_{loop,norm}$ değerleri düşük genlikli kalmakta; ölçüm gürültüsüne daha duyarlı ve zaman içinde daha kararsız bir görünüm sunabilmektedir.

Aşağıda Şekil 3.38’de çeşitli cihazların klasik (ötelenmemiş) alan metriklerinin zaman serileri verilmiştir.



Şekil 3.38 : İki farklı elektronik cihazın (a,b) ayrı ayrı ve birlikte çalışırken V-I normalize alanı (solda) ve mutlak alanı (sağda).

Yukarıdaki grafikler ayrı ve birlikte çalışma durumunda cihazların tespitini yapmanın çok zor olduğunu göstermektedir. Bu duruma karşıt $A_{loop90,abs}$ zaman serisi, elektronik cihazın devreye girdiği ve farklı çalışma seviyelerine geçtiği anlarda belirgin basamaklar oluşturmaktadır. Şekil 3.39’da sırasıyla aydınlatma cihazı, televizyon ve her iki cihazın birlikte çalıştığı durum gösterilmiştir.

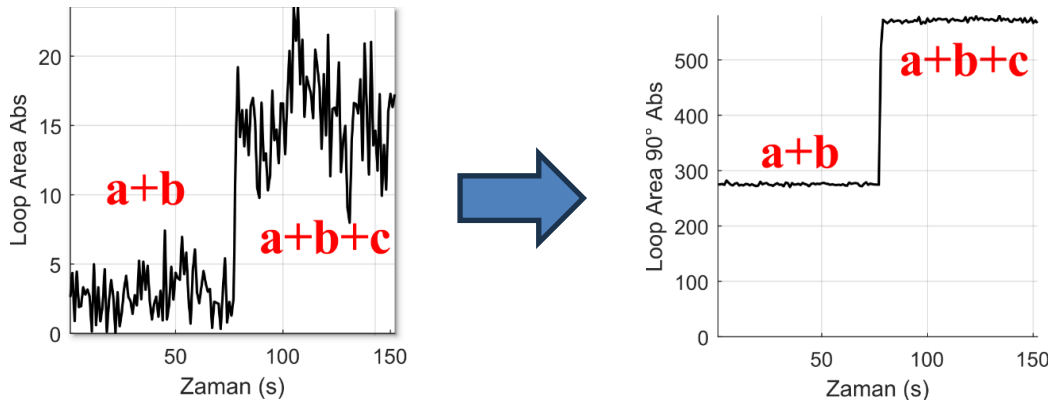


Şekil 3.39 : İki farklı elektronik cihazın (a,b) ayrı ayrı ve birlikte çalışırken V-I mutlak alanı (solda) ve ötelenmiş mutlak alanı (sağda).

Şekil 3.39’da Cihaz kapalıyken $A_{loop90,abs}$ sıfır seviyesinde seyrederken, aydınlatma cihazının aktif hâle geçmesiyle birlikte alan değeri açıkça ayırt edilebilen 90 seviyesine oturmaktadır. Sadece televizyon açıldığında ise b durumunda gözüktüğü üzere 185 değerine yükselmekte, iki cihazın birlikte çalışma durumunda ise a+b durumunda olduğu gibi iki cihazın alan toplamı 275 seviyesine oturmaktadır.

Böylece, klasik alan grafiklerinde “gürültü benzeri” dalgalanmalar şeklinde görülen etkiler, $A_{loop90,abs}$ ekseninde cihazın çalışma durumlarını temsil eden kararlı ve ayırık seviyelere dönüşmektedir.

Son olarak, aydınlatma ve televizyonun çalıştığı sisteme ek olarak rezistif bir lehim aletinin dahil edildiği karışık yük senaryosunda, ötelenmiş alan metriğinin sağladığı ayırıştırma avantajı daha da belirginleşmiştir. Hem ötelenmiş hem de klasik alan metrikleri birlikte değerlendirildiğinde, özellikle çoklu cihaz çalışması altında cihazların durumlarının ayrıştırılabilirliği Şekil 3.40’ta verilmiştir.



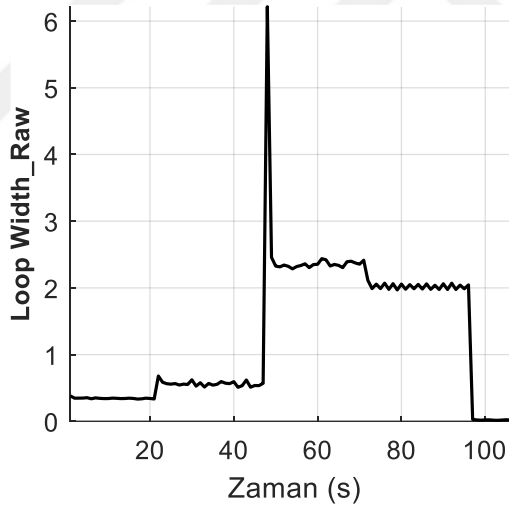
Şekil 3.40 : Elektronik cihazların (a+b) ayrı çalıştığı ve lehim aleti ile birlikte (a+b+c) çalıştığı durumlarda, ötelenmemiş (sol) ve ötelenmiş (sağ) V-I mutlak döngü alanları.

Bu kapsamda, $A_{loop90,abs}$, ve $A_{loop90,norm}$ zaman serisinin cihaz devreye giriş/çıkışlarında ve farklı çalışma seviyelerinde kararlı, ayrık basamak seviyeleri üreterek hem tekil hem çoklu cihaz senaryolarında yorumlanabilir bir “durum göstergesi” oluşturduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

3.10.4 Döngü genişliği: Loop width

Rezistif karakter baskın olduğunda V–I izi ince bir doğruya yaklaşırken, motorlu-reaktif yüklerde akımın aynı gerilim seviyesinde farklı izler oluşturması nedeniyle döngü genişleyerek belirginleşir. Bu nedenle loop width , özellikle motorlu cihazlarda yük karakterinin ve çalışma rejiminin izlenmesinde pratik bir ayrıştırıcı özellik sunar.

Şekil 3.41’de beş cihazın tekil çalışması altında elde edilen loop width raw zaman serileri verilmiştir. Dikiş makinesi tek başına çalıştığında loop width değerinin yaklaşık 0,4 seviyesinde kararlı kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.41 : Beş ayrı cihazın tekil çalışma durumundaki Loop Width değerleri.

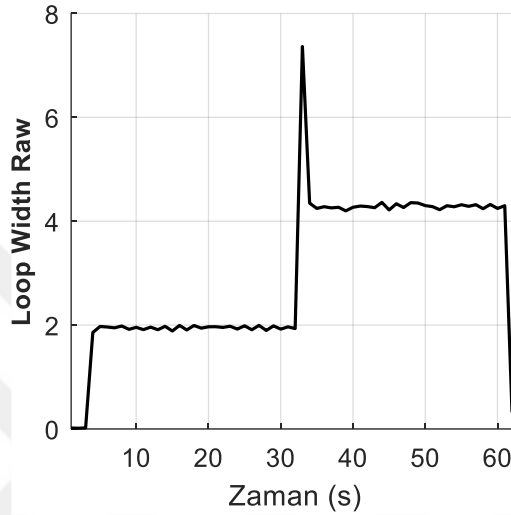
Küçük süpürge tekil çalışmada yaklaşık 0,6 civarında stabil bir plato sergilemiştir. Büyük süpürge devreye girişi sırasında loop width değerinde ani bir pik oluşmuş, bu geçici rejimin ardından değer yaklaşık 2,4 seviyesinde kararlı hâle gelmiştir. Bu durum, kalkış anında motor akımı ve komütasyon etkileri gibi geçici olayların loop width parametresine yansıdığını; kararlı çalışma koşullarında ise cihazın baskın elektriksel karakterinin sabit bir imza oluşturduğunu göstermektedir.

Fan tekil çalışmada yaklaşık 2,0 civarında stabil bir loop width değeri üretmiştir. Buna karşılık lehim aletinde loop width değerinin sıfıra indiği gözlemlenmiştir. Deney

sonuçları, her cihazın kısa bir geçiş sürecinden sonra kendine özgü kararlı (stabil) bir seviyeye oturduğunu göstermektedir.

Loop width, tekil cihazlar arasında (0.4, 0.6, 2.0, 2.4 vs.) birbirinden ayırık kararlı seviyeler üreterek ayırt edici bir özellik sunmaktadır.

İkinci aşamada, fanın üzerine büyük süpürge eklenerek iki cihazın birlikte çalıştığı durum incelenmiştir (Şekil 3.42).

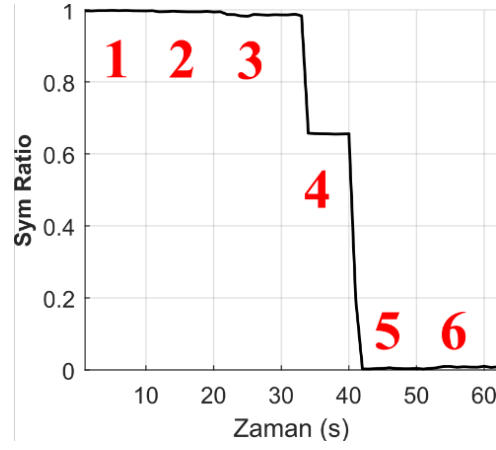


Şekil 3.42 : Fan cihazının tekil çalıştığı durum ile fan ve süpürge'nin birlikte çalıştığı durumdaki Loop Width değerleri.

Birlikte çalışmada loop width raw değerinin, cihazların tekil durumdaki kararlı değerlerinin toplamına yakın bir seviyeye yükseldiği gözlenmiştir. Başka bir ifadeyle, fan = 2 ve küçük süpürge $\approx 2,2$ seviyelerinde iken, beraber çalıştırıldıklarında toplam etkiye karşılık gelen yaklaşık $\approx 4,2$ düzeyine çıkmışlardır. Bu davranış, loop width özelliğinin çoklu yük senaryolarında toplamsal/üst üste binme (additif) bir eğilim gösterebildiğini ve bu sayede aynı hatta birden fazla cihaz devredeyken dahi “toplam imza değişiminin” izlenebildiğini ortaya koymaktadır.

3.10.5 Simetri oranı: Sym ratio

Banyo hattında kullanılan fön makinesi için toplam 6 farklı çalışma modu ayrı ayrı test edilmiş ve her modda hesaplanan sym ratio değerleri Şekil 3.43'te karşılaştırılmıştır.



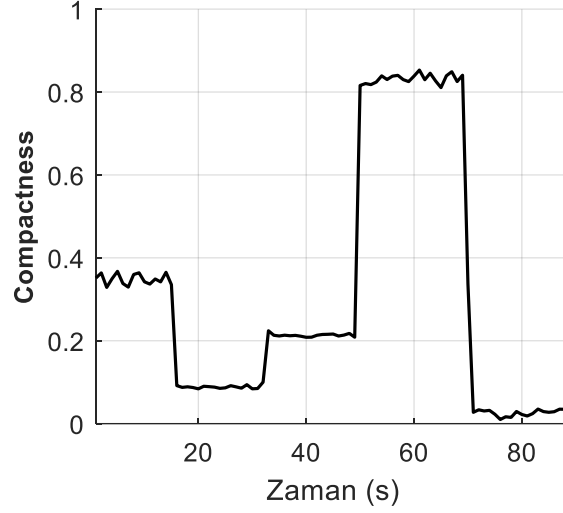
Şekil 3.43 : Saç kurutma makinesinin 6 ayrı modunun Symetry Ratio oranları.

Deney sonuçları, sym ratio'nun akımın alt ve üst alternanslarda ne kadar simetrik iletilildiğini doğrudan yansıttığını göstermiştir. Tam dalga modunda akım iki alternansta benzer şekilde aktığından sym ratio değeri 1'e çok yakın kalmış ve simetrik iletim net biçimde doğrulanmıştır. Alternanslardan birinin baskın olduğu asimetric modda ise iki yarım periyot arasındaki dengesizlik artmış ve sym ratio ≈ 0.65 seviyesine düşmüştür. Yarım dalga modlarının tamamında iletim tek alternansa sınırlı kaldığından sym ratio değeri 0'a kadar inmiş, böylece yarım dalga çalışma durumu keskin biçimde ayırt edilmiştir.

Bu bulgular, sym ratio özelliğinin fön makinesi gibi çalışma moduna bağlı olarak iletim simetrisi değişen cihazlarda, modların tam dalga / asimetric / yarım dalga şeklinde güvenilir biçimde sınıflandırılmasına olanak sağladığını ortaya koymaktadır.

3.10.6 Kompaktlık: Compactness

Farklı cihazların kompaktlık değerleri tekil çalışmaları altında ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 3.44'te karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, compactness değerinin cihazın V–I döngüsünün çizgiye mi yoksa daha dolgun bir elipse mi yaklaştığını doğrudan yansıttığını göstermiştir.



Şekil 3.44 : Sırasıyla dikiş makinesi, küçük süpürge, büyük süpürge, fan ve lehim aletinin kompaktlık değerleri.

Motorlu cihazlarda döngünün dolgunlaşmasıyla compactness belirgin şekilde artmıştır.

Dikiş makinesi ≈ 0.35 değeri ile diğer cihazlara göre orta seviyede bir kompaktlık sergilemiştir.

Küçük süpürge için compactness değeri ≈ 0.1 seviyesinde ölçülmüş; bu sonuç, cihazın rezistife kıyasla daha reaktif/karmaşık bir akım çektiğini ancak döngü dolgunluğunun sınırlı kaldığını göstermiştir.

Büyük süpürge için compactness değeri ≈ 0.2 seviyesinde ölçülmüş; bu sonuç, cihazın küçük süpürgeye kıyasla daha reaktif bir akım çektiğini göstermiştir.

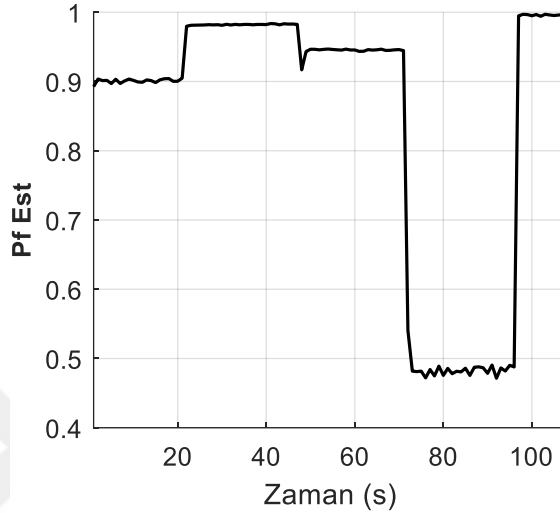
En yüksek değer fan cihazında gözlenmiş; compactness ≈ 0.8 seviyesine çıkarak V–I eğrisinin oldukça dolgun ve belirgin bir döngü oluşturduğunu göstermiştir.

En düşük değer ise lehim aletinde ≈ 0 gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, compactness özelliği deneylerde rezistif (0) ile yüksek reaktif/motorlu yükleri (0.8'e kadar) net biçimde ayırmış; ayrıca motorlu cihazlar arasında da (küçük süpürge 0.1, dikiş makinesi 0.35, büyük süpürge 0.8) farklı seviyeler üreterek cihazların elektriksel karakterinin V–I geometrisi üzerinden sonuç odaklı biçimde izlenebildiğini ortaya koymuştur.

3.11 Güç faktörü tahmini: Power factor estimation

Şekil 3.45’te, güç faktörleri birbirinden farklı 5 cihazın tekil çalışmaları sırasında elde edilen PF profilleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, tek cihaz aktifken güç faktörünün kararlı bir seviyeye oturduğunu ve bu kararlı seviyenin özellikle reaktif karakterli cihazların tespitinde ayırt edici olduğunu göstermiştir.



Şekil 3.45 : Beş ayrı cihazın tekil çalışma durumundaki PF Estimation değerleri.

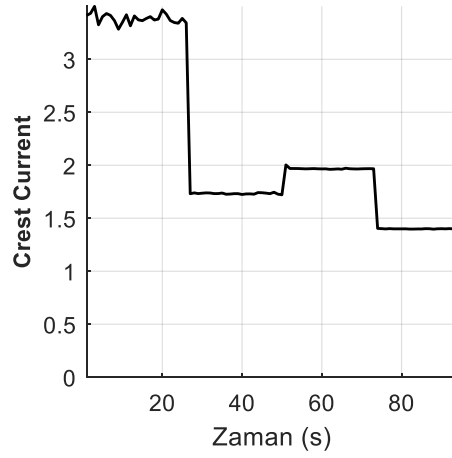
Buna karşın cihazlar birlikte çalıştığında, ölçülen PF artık tek bir cihazın imzasını değil, hat üzerindeki toplam P–Q bileşimini temsil ettiğinden PF’deki değişim doğrudan “hangi cihaz eklendi?” sorusuna tek başına cevap verememektedir. Bu nedenle PF, çoklu yük senaryolarında karar tablosuna bakılarak kullanılmıştır.

3.12 Tepe faktörü: Crest current

Şekil 3.46’da tekil cihaz çalışmaları altında elde edilen crest değerleri karşılaştırıldığında, her cihazın kendine özgü bir seviyede kararlı kaldığı görülmüştür.

Deney sonuçlarına göre televizyonda crest değeri ≈ 3.5 ölçülmüş ve bu değer, televizyonun sinüse yakın sürekli akım yerine dar tepe darbeleri ile akım çektiğini göstermiştir. Büyük süpürge de crest ≈ 1.75 seviyesinde bulunmuş; motorlu yük karakteri nedeniyle akım daha yayvan olmakla birlikte ideal sinüsten sapmalar içerdiği gözlenmiştir. Battaniye yükünde ise mod değişiminin crest değerine doğrudan yansıdığı görülmüştür: yarım dalga modunda crest ≈ 2 seviyesine yükselirken, tam dalga modunda crest ≈ 1.414 seviyesinde ölçülmüş ve daha düzenli/süreklilik gösteren

akım çekimi doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, crest current özelliğinin yalnızca cihaz tipini değil, aynı cihazın çalışma modunu da ayırt edebildiğini göstermektedir.

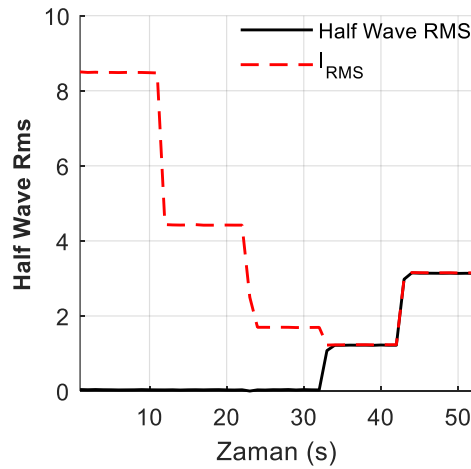


Şekil 3.46 : Sırasıyla televizyon, büyük süpürge, küçük süpürge, fan ve lehim aletinin Crest değerleri.

Sonuç olarak crest current, tekil testlerde özellikle elektronik ve darbeli akım çeken cihazları (televizyon vs.) ve kısmi iletimli modları (yarım dalga çalışma modu vs.) güçlü biçimde ayırt etmiş; çoklu cihaz koşullarında ise tek başına karar vermek yerine diğer özelliklerle birlikte eşleştirme tablosu ile değerlendirilmesi gereken destekleyici bir gösterge olarak belirlenmiştir.

3.13 Yarım dalga RMS farkı: Half wave rms difference

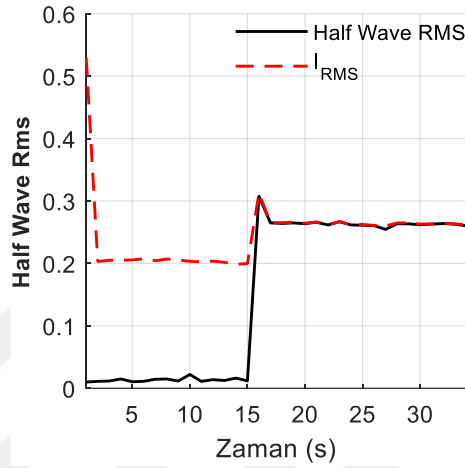
Şekil 3.47’de çok modlu saç kurutma makinesi sırasıyla farklı modlarda çalıştırılmıştır.



Şekil 3.47 : Saç kurutma makinesinin 5 farklı modundaki RMS akım ve Half Wave RMS akım değerleri karşılaştırması.

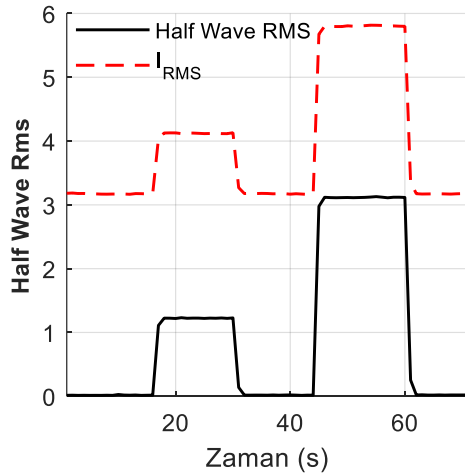
Grafik incelendiğinde, half wave RMS değerinin yalnızca yarım dalga iletim gerçekleşen modlarda aktif hâle geldiği, tam dalga veya simetrik iletim bölgelerinde ise düşük seviyede kaldığı görülmüştür. Bu davranış sayesinde doğrudan hangi iletim modunda çalıştığı half wave RMS üzerinden güvenilir biçimde belirlenebilmiştir.

Şekil 3.48’de ise blender cihazının iki farklı çalışma modu karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda half wave RMS, yarım dalga modu ile tam dalga modunu net bir eşikle ayırıştırabilmiştir.



Şekil 3.48 : Blender cihazının iki farklı çalışma modundaki RMS akım ve Half Wave RMS akım değerleri karşılaştırması.

Şekil 3.49’da ise sabit bir temel yük çalışır durumdayken, yarım dalga karakterine sahip cihaz aynı hatta devreye alınmıştır.



Şekil 3.49 : Sabit bir temel yük çalışır durumdayken, yarım dalga karakterine sahip cihazın RMS akım ve Half Wave RMS akım değerleri karşılaştırması.

Bu senaryoda dahi half wave RMS değerinin her iki cihaz için belirgin ve tekrarlanabilir bir tepki verdiği; dolayısıyla çoklu cihaz koşullarında yarım dalga iletimli cihazların varlığının güvenilir biçimde izlenebildiği gözlenmiştir.

3.14 Düşük Cihaz Yoğunluklu Gruplarda Tablo Tabanlı Cihaz Tespiti Uygulaması

Tablo tabanlı yöntemde her satır, gruba ait bir çalışma durumunu temsil eder. Bu durum; gruptaki cihazların açık/kapalı bilgisi ile varsa cihazın çalışma modlarını (ör. yarım dalga–tam dalga vs.) birlikte içerir. Böylece her satır, belirli bir kombinasyon altında oluşan elektriksel imzayı tanımlayan bir “referans” olarak kullanılır.

Aynı güç seviyesine sahip farklı yüklerin yalnızca aktif güç değeriyle ayrıştırılması her zaman mümkün olmadığından, bu çalışmada akım tabanlı parametrelere ek olarak V–I eğrisi temelli özellikler ve akım sinyali temelli bazı ayırt edici ölçütler de tabloya dâhil edilmiştir.

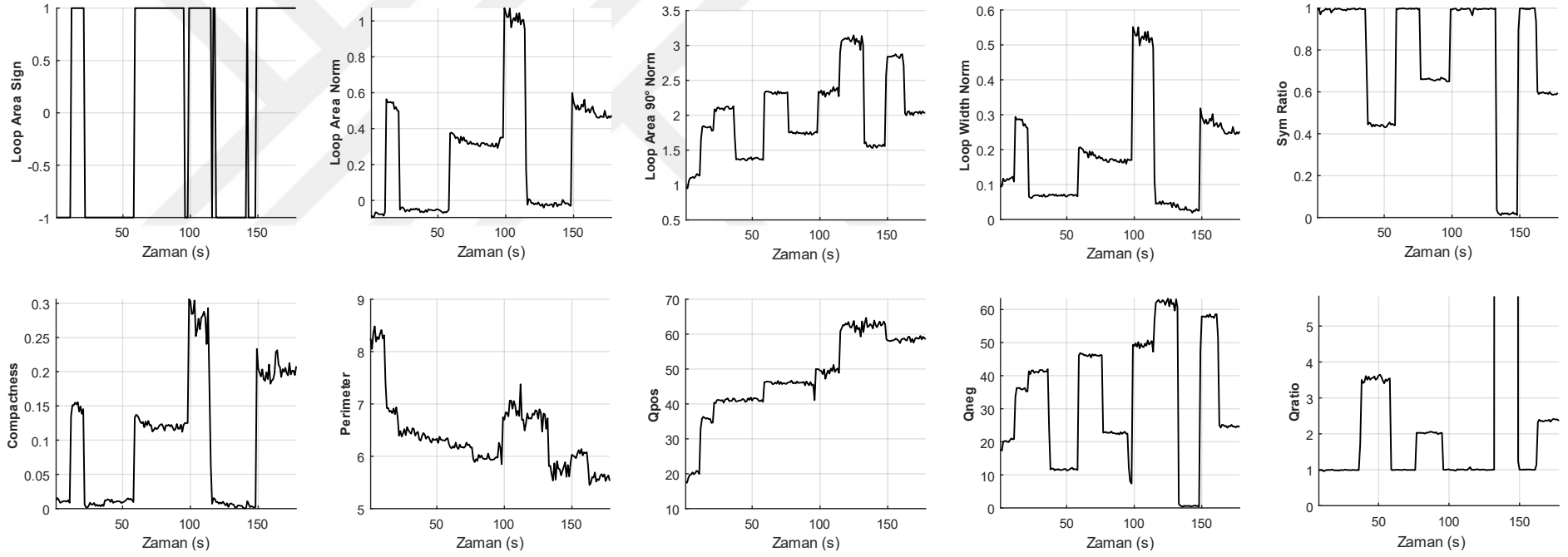
Seçilen tüm özellikler ve tanımları, düşük cihaz yoğunluklu salon grubu için oluşturulan referans tablo Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Ayrıca ilgili özelliklerin ölçüm pencereleri boyunca değişimi ve gruplar arasındaki karşılaştırmalı görünümü Şekil 3.50 ve Şekil 3.51’de sunulmuştur. Bu şekilde tablo tabanlı yaklaşım, yalnızca tek bir parametreye dayalı karar yerine, birden fazla özelliğin birlikte değerlendirilmesiyle daha kararlı ve açıklanabilir bir tespit mekanizması sağlamaktadır.

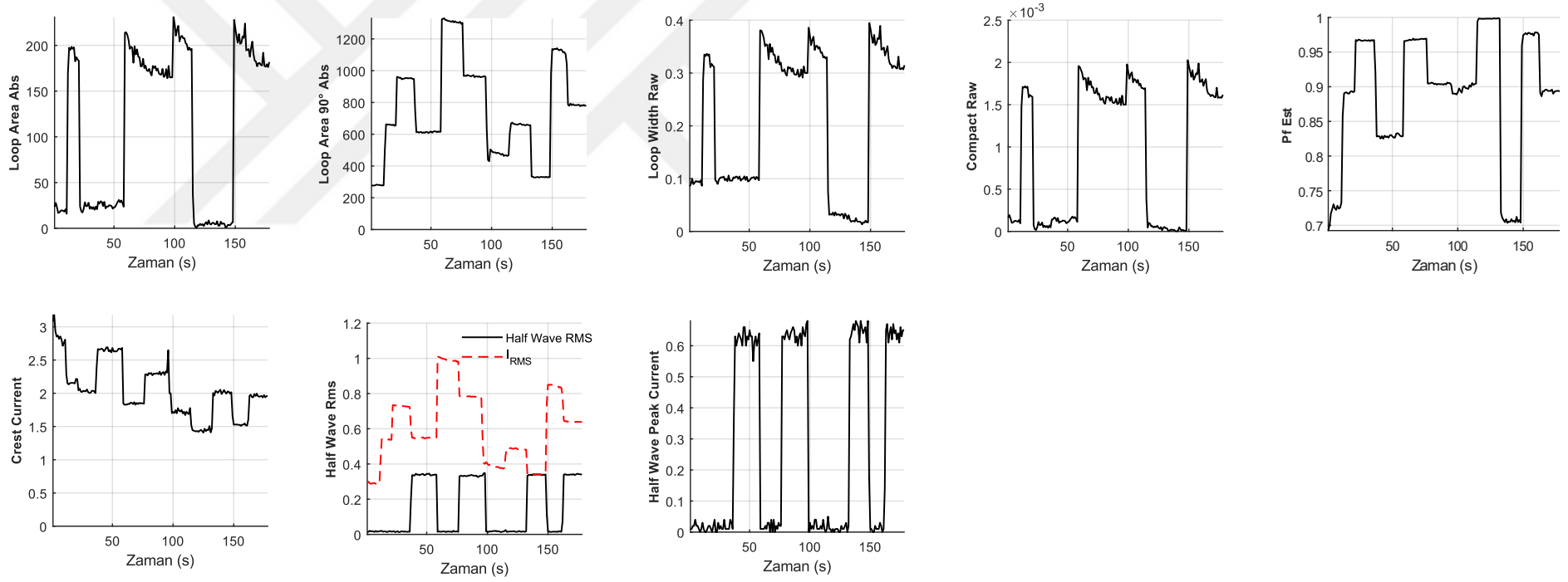
Gerçek zamanlı çalışmada ise anlık ölçümden çıkarılan özellik vektörü, Çizelge 3.2’deki referans değerlerle karşılaştırılarak eşleşen çalışma durumu belirlenmekte; böylece cihazların mevcut kombinasyonu ve varsa mod bilgisi sistem tarafından otomatik olarak tespit edilebilmektedir.

Çizelge 3.2 : Cihaz kombinasyonlarının V-I özellikleri ve bazı akım bazlı özelliklerin bulunduğu çizelge.

Kombinasyonlar	Min-Maks	Loop Area Norm	Loop Width Norm	Sym Ratio	Comp.	Loop A. 90° N.	Pf Est	Loop Area Abs	Crest	Loop A 90° Abs	Half Wave Rms	Loop Width Raw
TV	Min	-0.1	0.1	0.9	0	0.75	0.7	0	2.5	220	0	0.08
	Maks	0	0.15	1	0.05	1.25	0.75	25	3	250	0.1	0.11
TV+Dikiş	Min	0.5	0.25	0.9	0.125	1.75	0.85	175	2	650	0	0.3
	Maks	0.6	0.3	1	0.16	1.9	0.9	200	2.2	680	0.1	0.35
TV+E. Bat. T.	Min	-0.1	0	0.9	0	2	0.95	0	1.9	950	0	0.08
	Maks	0	0.1	1	0.1	2.2	0.975	25	2.1	990	0.1	0.11
TV+E. Bat. Y.	Min	-0.1	0	0.4	0	1.25	0.8	0	2.5	590	0.3	0.08
	Maks	0	0.1	0.5	0.05	1.5	0.85	25	2.75	650	0.38	0.11
TV+Dikiş+E. Bat. T.	Min	0.35	0.19	0.9	0.125	2.25	0.95	200	1.75	1300	0	0.35
	Maks	0.4	0.21	1	0.15	2.5	0.975	230	2	1350	0.1	0.4
TV+Dikiş+E. Bat. Y.	Min	0.35	0.19	0.65	0.125	1.4	0.9	150	2.15	960	0.3	0.3
	Maks	0.4	0.21	0.7	0.15	1.6	0.91	175	2.4	1000	0.38	0.35
Dikiş Mak.	Min	0.9	0.5	0.9	0.25	2.25	0.88	200	1.65	450	0	0.4
	Maks	1	0.55	1	0.3	2.5	0.9	210	1.85	500	0.1	0.3
E. Bat. T	Min	-0.1	0	0.9	0	3	0.99	0	1.6	650	0	0.05
	Maks	0	0.1	1	0.05	3.2	1	25	1.4	700	0.1	0
E. Bat. Y	Min	-0.1	0	0	0	1.5	0.7	0	1.9	300	0.3	0.05
	Maks	0	0.1	0.1	0.05	1.6	0.75	25	2.1	350	0.38	0
Dikiş+Battaniye T.	Min	0.5	0.25	0.9	0.17	2.75	0.95	200	1.45	1100	0	0.35
	Maks	0.4	0.3	1	0.25	2.8	0.99	210	1.6	1150	0.1	0.4
Dikiş+Battaniye Y.	Min	0.4	0.25	0.5	0.17	1.9	0.88	175	1.9	775	0.3	0.3
	Maks	0.5	0.27	0.6	0.25	2.1	0.9	200	2.1	825	0.38	0.35



Şekil 3.50 : Salon grubu için oluşturulan cihaz özelliklerinin grafikleri.

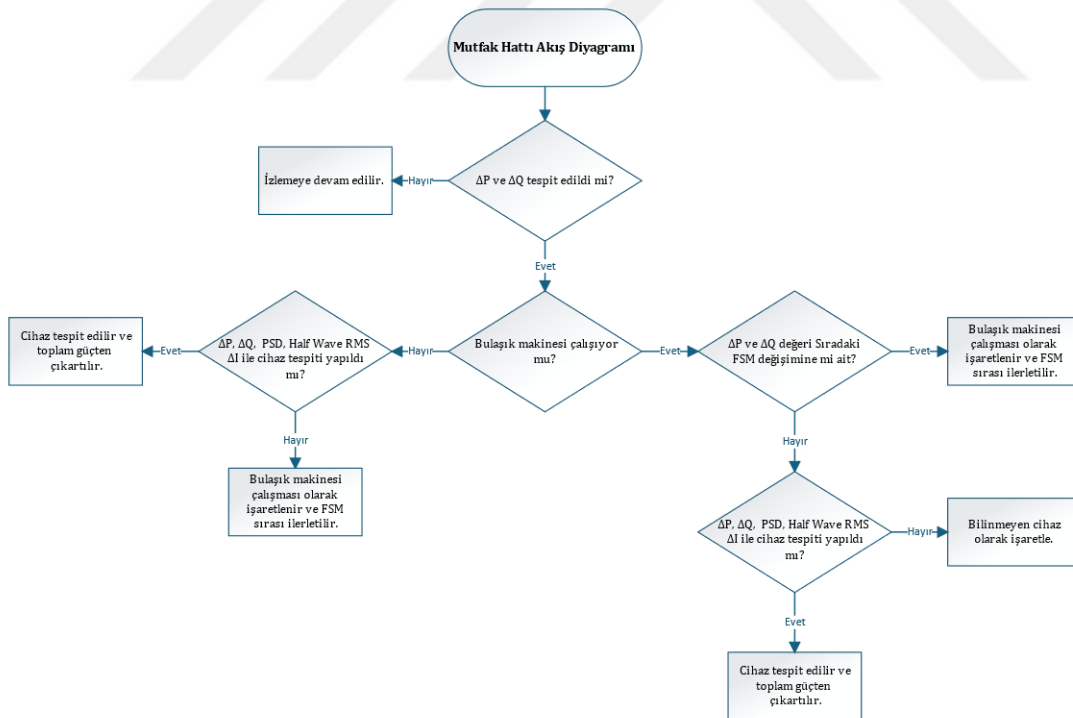


Şekil 3.51 : Salon grubu için oluşturulan kalan cihaz özelliklerinin grafikleri.

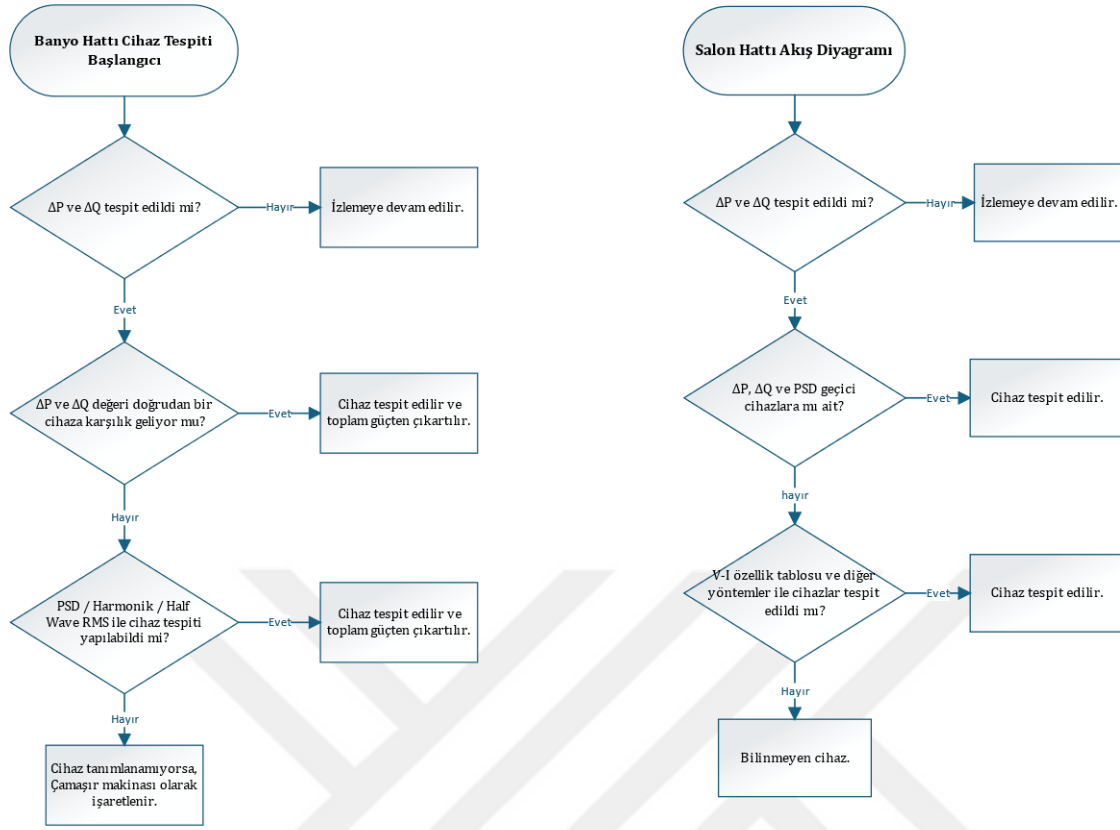
3.15 Hat Bazlı Karar Mekanizması ile Cihaz Tespiti

Bu çalışmada aynı hatta birden fazla cihazın birlikte çalışabilmesi nedeniyle cihaz tespiti, tek bir parametreye dayalı eşikleme yerine aşamalı (hiyerarşik) bir karar mekanizması ile gerçekleştirilmiştir. Her sigorta grubunun bağlı cihaz türleri farklı olduğundan, karar adımlarının önceliği hat bazında düzenlenmiş ve dört ayrı hat için karar akış diyagramları oluşturulmuştur (bkz. Şekil 3.52–Şekil 3.(54)).

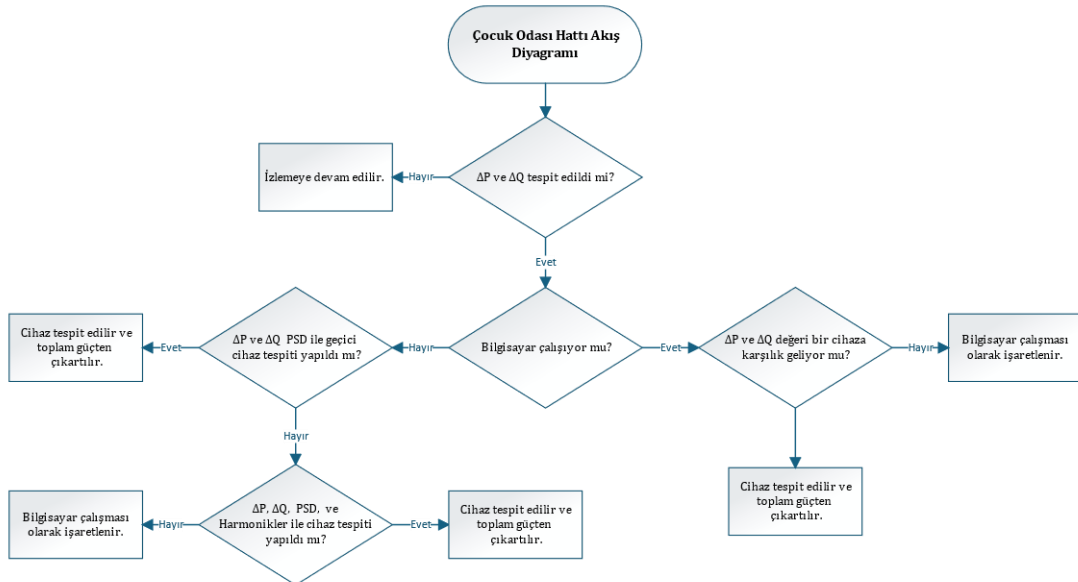
Karar süreci öncelikle ardışık pencereler arasındaki ΔP ve ΔQ değişimlerinin kontrolü ile başlar; anlamlı bir değişim yoksa sistem izlemeye devam eder. Olay tespit edildiğinde, hat üzerinde baskın veya sürekli çalışabilen yükler (ör. bilgisayar) dikkate alınarak mevcut durum değerlendirilir. Ardından ΔP - ΔQ değişimi, ilgili hatta tanımlı referans cihaz değerleriyle karşılaştırılır; eşleşme sağlanırsa cihaz tespit edilerek toplam güçten düşülür ve hat durumu güncellenir. ΔP - ΔQ ile net eşleşme yapılamayan durumlarda ise karar, PSD/harmonik gibi dalga şekli temelli ek ölçütlerle desteklenerek belirsizlik azaltılmış olunur.



Şekil 3.52 : Mutfak hattı için cihaz tespit karar mekanizması.



Şekil 3.53 : Banyo ve Salon hattı için cihaz tespit karar mekanizması.



Şekil 3.54 : Çocuk odası hattı için cihaz tespit karar mekanizması.

3.16 Cihazların Tespitte Kullanılan Özellikleri

Her cihazın hangi özellik(ler) ile tespit edildiği aşağıdaki çizelgelerde özetlenmiş; “√” işareti ilgili özelliğin karar mekanizmasında etkin kullanıldığını, “X” işareti ise kullanılmadığını göstermiştir.

Çizelge 3.3 ve 3.4 incelendiğinde, rezistif ağırlıklı ve belirgin güç değişimi oluşturan cihazların çoğunlukla ΔP üzerinden doğrudan tespit edilebildiği görülmektedir. Buna karşın modlu veya doğrusal olmayan karaktere sahip cihazlarda güç değişiminin tek başına yeterli olmadığı durumlarda PSD, harmonik içerik ve ΔI temelli ölçütler (harmonik genlik değişimi ve half-wave RMS vs.) devreye alınarak belirsizlik azaltılmıştır. Cihaz sayısının düşük olduğu gruplarda(salon–yatak odası) ise kombinasyon durumları yönetilebilir olduğundan V–I tablosu yaklaşımıyla durum eşleştirme tercih edilmiştir. Çok kademeli/karmaşık çalışma profiline sahip bazı cihazlarda ise tespit, doğrudan eşleşme yerine dolaylı (mevcut durumdan çıkarım) şekilde yapılmıştır.

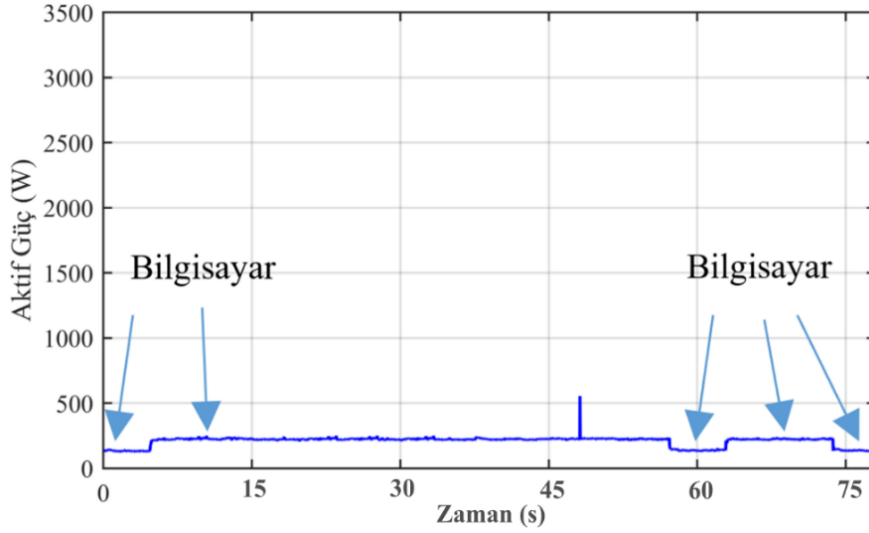
Sonuç olarak Çizelge 3.3 ve 3.4, her cihazın aynı yöntemle güvenilir biçimde tespit edilemediğini; bu nedenle ΔP - ΔQ , akım tabanlı özellikler ve V–I tabanlı özelliklerin hat ve cihaz tipine göre birlikte kullanıldığı uyarlanabilir bir tespit yapısının gerekli olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.3 : Cihazların tespit edildikleri özelliklerin çizelgesi.

	Cihazlar	ΔP	ΔQ	PSD	Harmonik ΔI Mag.	ΔI Half Wave	V-I ve Diğer Özellikler Tablosu	Dolaylı Yoldan Tespit
Banyo Grubu	Saç K. Mak. Mod 1	✓	X	X	X	X	X	X
	Saç K. Mak. Mod 2	✓	X	X	X	X	X	X
	Saç K. Mak. Mod 3	✓	X	X	X	X	X	X
	Saç K. Mak. Mod 4	X	X	X	✓	✓	X	X
	Saç K. Mak. Mod 5	X	X	X	✓	✓	X	X
	Saç K. Mak. Mod 6	X	X	X	✓	✓	X	X
	Isıtıcı	X	X	✓	X	X	X	X
	Çamaşır Makinesi	X	X	X	X	X	X	✓
Mutfak Grubu	Tost Mak.	✓	X	✓	X	X	X	X
	Blender Mod 1	✓	✓	✓	X	X	X	X
	Blender Mod 2	✓	X	X	X	✓	X	X
	Elektrikli Ocak	✓	X	X	X	X	X	X
	Kombi	✓	X	X	X	X	X	X
	Meyve Suyu Mak. 1	✓	✓	✓	X	X	X	X
	Meyve Suyu Mak. 2	✓	✓	✓	X	✓	X	X
	Buzdolabı Komp.	✓	✓	✓	X	X	X	X
	Buzdolabı Isıtıcı	✓	X	X	X	X	X	X
	Davlumbaz	✓	X	X	X	X	X	X
	Kettle	✓	X	✓	X	X	X	X
	Kahve Mak.	✓	X	X	X	X	X	X
	Bulaşık Mak.	X	X	X	X	X	X	✓

Çizelge 3.4 : Cihazların tespit edildikleri özelliklerin çizelgesi.

	Cihazlar	ΔP	ΔQ	PSD	Harmonik ΔI Mag.	ΔI Half Wave	V-I ve Diğer Özellikler Tablosu	Dolaylı Yoldan Tespit
Salon-Yatak Odası Grubu	Televizyon	X	X	X	X	X	✓	X
	Elk. Battaniye Mod 1	X	X	X	X	X	✓	X
	Elk. Battaniye Mod 2	X	X	X	✓	✓	✓	X
	Dikiş Makinesi	X	X	X	X	X	✓	X
Çocuk Odası Grubu	Gözleme Sacı	✓	X	X	X	X	X	X
	Fan	✓	✓	✓	✓	X	X	X
	Akvaryum Isıtıcısı	✓	X	X	X	X	X	X
	Bilgisayar	X	X	X	X	X	X	✓
Aydınlatma Grubu	Aydınlatmalar	X	X	X	X	X	X	✓
Gezici Cihazlar	Süpürge Küçük	✓	✓	✓	✓	X	X	X
	Süpürge Büyük	✓	✓	✓	✓	X	X	X



Şekil 3.56 : Ayrıştırılmış çocuk odası hattının aktif gücünün zamanla değişimi.

Ölçeklenmiş güç değerleri kullanılarak toplam sinyalden çıkarma işlemi yapılmış ve gerilim farklarının etkisi ortadan kaldırılmıştır. Böylece, sistem farklı şebeke koşullarında dahi doğru bir şekilde karmaşık cihazların net güç tüketimini hesaplayabilmektedir.

3.18 Sensör-Kanal Azaltma Uygulaması ve Grup Ayrıştırma Sonuçları

Sensör-kanal azaltma yönteminin doğrulanması amacıyla, dört farklı elektrik hattı içeren bir konut sisteminde deneysel uygulama gerçekleştirilmiştir.

Her grup belirli kategorideki cihazları temsil etmekte olup, sistemde yalnızca iki akım sensörü (Sensör-1 ve Sensör-2) kullanılmıştır. Sensörlerin yerleşimi, salon ve yatak odası grubunun hem Sensör-1 hem de Sensör-2 tarafından gözlemlenebileceği şekilde tasarlanmıştır. Böylece yalnızca iki sensör ile üç farklı hattın (Aydınlatma, Salon–Yatak Odası, Çocuk Odası) izlenmesi mümkün hâle getirilmiştir.

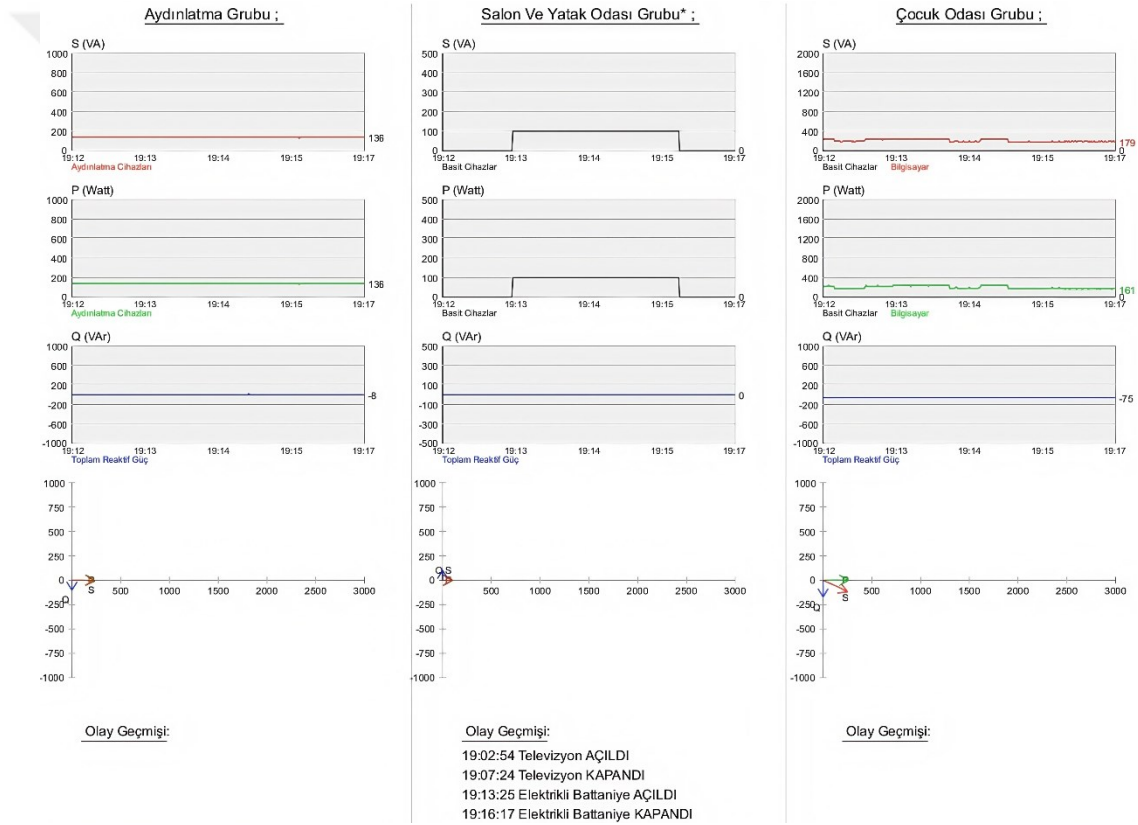
Çizelge 3.5 : Gruplar, cihazlar ve sensör tiplerine ait çizelge.

İzlenen Grup	İzlenen Nokta	Sensör Tipi
1)	Banyo Grubu	HES 25A
2)	Aydınlatma Grubu	HES 6A
2&3)	Salon Ve Yatak Odası Grubu *	HES 6A-10A*
3)	Çocuk Odası Grubu	HES 10A
4)	Mutfak Grubu	HES 25A

Aydınlatma grubu diğer gruplara göre stabil olduğu için seçilmiştir. Salon Ve Yatak Odası Grubu dolaylı yoldan izlenilebildiği gibi diğer gruplar da izlenebilmektedir.

3 kanal birlikte incelendiğinden V-I özellikleri ile salon hattında düşük güçlü cihazların tespiti yapılamamış, basit cihazlar tespit edilebilmiştir (Isıtıcı, Büyük Süpürge, Küçük Süpürge, televizyon, fan).

Sistemde her sensörden elde edilen aktif (P), reaktif (Q) ve görünür (S) güç değerleri zaman ekseninde analiz edilmiştir. Şekil 3.57’de sırasıyla aydınlatma grubu, çocuk odası grubu ve salon-yatak odası grubuna ait güç değişim grafikleri verilmiştir. Aşağıdaki şekil 3.57’de, sensör-kanal azaltma yönteminin grup ayrıştırmadaki başarısını açık biçimde gözükmemektedir.



Şekil 3.57 : Sensör-Kanal Azaltma Uygulaması yapılarak tespit edilmiş yük grafiği.

Şekil 3.57’de görüldüğü üzere, salon ve yatak odası grubunda meydana gelen güç değişimi yalnızca bu gruba ait sensör kombinasyonunda tespit edilmiştir; aynı anda aydınlatma veya çocuk odası gruplarında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, ortak hat üzerinde gerçekleşen olayın diğer gruplardan ayrıştırılabildiğini ve sistemin grup-temelli izolasyonu doğru biçimde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Bu analizde ayrıca, karmaşık yüklerin etkilerinin çıkarılması işlemi Denklem 3.10'da açıklanan şekilde uygulanmıştır. Yani, aydınlatma ve çocuk odası gruplarına ait güç serilerinden, salon-yatak odası grubunda oluşan senkron değişimlerin etkisi çıkarılmıştır. Böylece her grubun gerçek ve bağımsız güç bileşeni elde edilmiştir. Bu yaklaşım, sensörler arası kesişim bölgelerinde oluşabilecek fazladan güç yansımalarını ortadan kaldırarak, her grubun net enerji tüketiminin doğru biçimde belirlenmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak, elde edilen ölçümler sensör-kanal azaltma yönteminin pratik uygulamalarda da yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Yalnızca iki sensörle üç farklı hattın güç değişimleri ayrı ayrı izlenebilmiş; böylece sistemin hem donanımsal sadeleştirme hem de topolojik grup tespiti açısından hedeflenen performansa ulaştığı doğrulanmıştır.

3.19 Anlık Uyarı Sistemi ve Enerji Tasarrufu Analizi

Bu çalışmada geliştirilen yarı-girişimsel enerji izleme sistemine, kullanıcı bilgilendirmesini ve enerji farkındalığını artırmak amacıyla anlık uyarı ve enerji tasarrufu analiz modülü entegre edilmiştir. Bu modül, sistemin izleme altyapısından elde edilen cihaz bazlı güç verilerini kullanarak, cihazların çalışma sürelerini, anlık enerji tüketimlerini ve zaman bazlı maliyet etkilerini gerçek zamanlı olarak analiz etmektedir.

Uyarı sistemi iki ayrı görsel arayüz sayfası şeklinde tasarlanmıştır:

1. Anlık İzleme Sayfası, cihazların güç davranışlarını ve çalışma durumlarını gerçek zamanlı olarak gösterir.
2. Günlük Enerji Analiz Sayfası, gün içinde çalışan tüm cihazların enerji tüketimlerini, toplam maliyetlerini ve potansiyel tasarruf miktarlarını özetler.

Bu iki sayfa birlikte, kullanıcıya hem anlık bildirim hem de bütünsel enerji değerlendirmesi sunarak farkındalığı artırmaktadır.

Sistem, her cihazın açılma (ON) ve kapanma (OFF) anlarını, önceki bölümlerde açıklanan cihaz tespit yöntemleri ile tespit etmektedir.

Bu olay tespit edildiğinde, cihazın başlangıç zamanı (t_s), bitiş zamanı (t_e) ve toplam çalışma süresi ($\Delta t = t_e - t_s$) bilgileri otomatik olarak kaydedilir. Cihazların güç

değerleri anlık olarak ölçülmekte olup, enerji tüketimi bu anlık güç örneklerinin zaman içinde entegrasyonu ile hesaplanmaktadır.

Sistemde geliştirilen birinci sayfa (anlık izleme ekranı), kullanıcıya cihazların anlık çalışma durumlarını, güç faz diyagramlarını ve olay bildirimlerini dinamik olarak sunmaktadır.

Cihaz açıldığında sistem, örneğin “22.14 – Tost makinesi açıldı” mesajını; kapandığında ise “22.15 – Tost makinesi kapandı” mesajını arayüzde göstermektedir.

Ayrıca aynı ekranda cihazın çektiği anlık güç değeri ve faz ilişkisi grafik olarak çizilmektedir. Bu sayede kullanıcı, cihazın gerçek zamanlı güç davranışını hem sayısal hem de görsel olarak izleyebilmektedir.

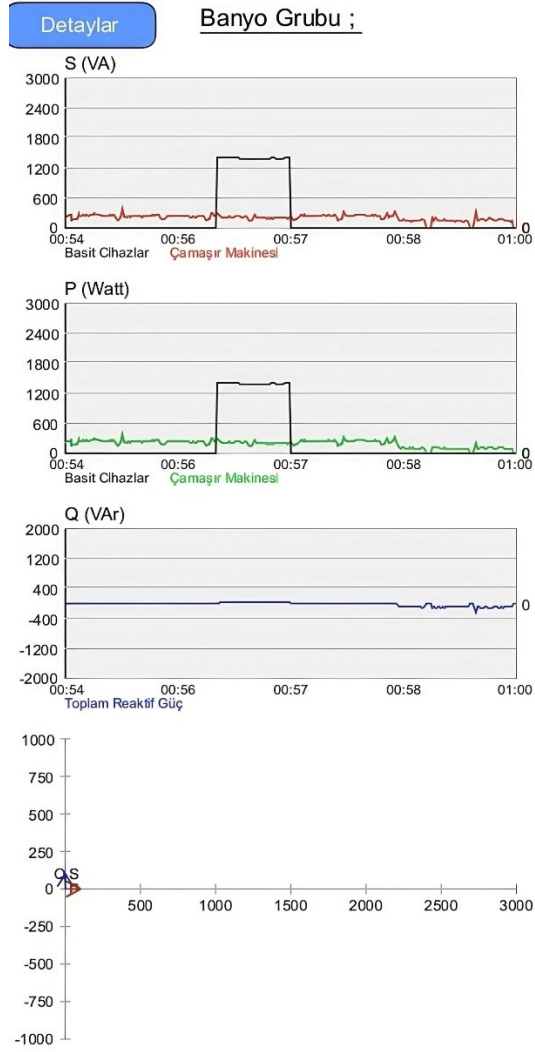
Şekil 3.58 ve 3.59’da geliştirilen sistemin bu anlık izleme sayfasına ait arayüz gösterilmektedir.

Sistemin ikinci sayfası, gün boyunca çalışan tüm cihazların özet verilerini sunmaktadır. Bu sayfada her cihaz için şu bilgiler listelenmektedir:

- Gün içindeki toplam çalışma süresi (saat veya dakika cinsinden)
- Harcanan toplam enerji miktarı (kWh)
- İlgili tarife dilimine göre enerji maliyeti (TL)
- Cihazın çalıştırıldığı zaman dilimine göre oluşan enerji farkı veya zarar miktarı

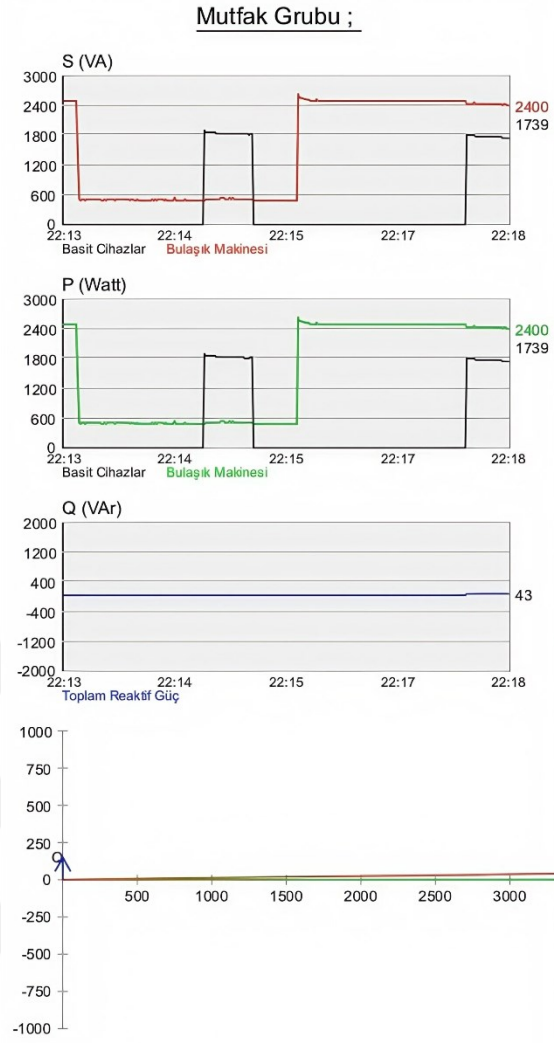
Türkiye’deki üç zamanlı enerji tarifi (gündüz, puant, gece) esas alınarak, her cihazın çalışma zaman damgaları bu tarifelerle eşleştirilmektedir. Eğer cihaz yüksek tarifeli bir zaman aralığında (örneğin puant) çalıştırılmışsa, sistem kullanıcıyı görsel olarak uyarır ve aynı cihazın düşük tarifiede (gece) çalıştırılması durumunda elde edilebilecek tasarrufu hesaplar.

Şekil 3.60’ta günlük analiz ekranı gösterilmektedir. Bu şekil, sistemin kullanıcıya sunduğu bilgilendirme mekanizmasını yansıtmaktadır. Cihazların çalışma durumu, enerji tüketim eğilimleri, tarife uygunluğu ve potansiyel tasarruf fırsatları eş zamanlı olarak görüntülenebilmekte; böylece kullanıcı hem anlık enerji akışını takip edebilmekte hem de gün sonunda enerji performansını bütünsel biçimde değerlendirebilmektedir.



Olay Geçmişi:

00:30:32 Fon Makinesi 3. Kademe AÇILDI
 00:30:56 Fon Makinesi 3. Kademe KAPANDI
 00:31:14 Fon Makinesi 1. Kademe AÇILDI
 00:31:40 Fon Makinesi 1. Kademe KAPANDI
 00:35:41 Fon Makinesi 3. Kademe AÇILDI
 00:48:16 Fon Makinesi 3. Kademe KAPANDI
 00:50:04 Fon Makinesi 3. Kademe AÇILDI
 00:51:01 Fon Makinesi 3. Kademe KAPANDI
 00:56:40 Isıtıcı AÇILDI
 00:57:30 Isıtıcı KAPANDI

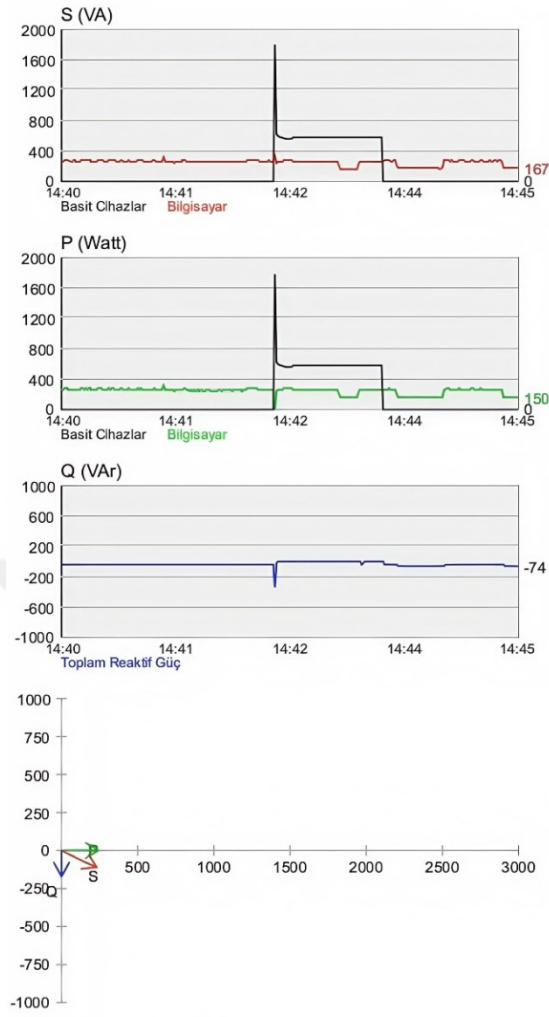


Olay Geçmişi:

22:14:51 Tost Makinesi AÇILDI
 22:15:25 Tost Makinesi KAPANDI
 22:17:49 Tost Makinesi AÇILDI

Şekil 3.58 : Banyo ve mutfak gruplarına ait cihaz yük grafiği, gruba ait faz diyagramları ve cihazların aktifleşme geçmişi.

Çocuk Odası Grubu ;



Olay Geçmişi:

- 14:11:56 Isıtıcı AÇILDI
- 14:12:58 Isıtıcı KAPANDI
- 14:14:39 Isıtıcı AÇILDI
- 14:15:07 Isıtıcı KAPANDI
- 14:25:28 Küçük Süpürge AÇILDI
- 14:26:52 Küçük Süpürge KAPANDI
- 14:31:41 Küçük Süpürge AÇILDI
- 14:32:53 Küçük Süpürge KAPANDI
- 14:42:30 Küçük Süpürge AÇILDI
- 14:43:46 Küçük Süpürge KAPANDI

Şekil 3.59 : Çocuk odasına ait cihaz yük grafiği, gruba ait faz diyagramları ve cihazların aktifleşme geçmiş

[Detaylar](#)

Cihaz Kullanım Tablosu ve Tasarruf Önerileri



Cihaz Adı	Süre	Tüketim	Maliyet	Zarar				
Buzdolabı Kompresör	00:18-00:35	0,05 kWh	₺0,09	₺0,00	Bulaşık Makinesi	18:42-19:56	1,11 kWh	₺5,13
Elektrikli Battaniye	00:00-01:13	0,12 kWh	₺0,24	₺0,00	Çamaşır Makinesi	20:12-21:44	0,77 kWh	₺3,54
Buzdolabı Kompresör	02:45-03:02	0,05 kWh	₺0,09	₺0,00	Kombi	21:30-21:45	0,04 kWh	₺0,17
Buzdolabı Kompresör	04:30-04:47	0,05 kWh	₺0,09	₺0,00	Isıtıcı	21:28-21:47	0,38 kWh	₺1,76
Buzdolabı Defrost	04:52-05:27	0,20 kWh	₺0,40	₺0,00	Saç Kurutma Makinesi 3. Kad.	21:47-21:49	0,04 kWh	₺0,18
Buzdolabı Kompresör	06:20-06:37	0,05 kWh	₺0,15	₺0,06	Buzdolabı Kompresör	22:50-23:07	0,05 kWh	₺0,09
Tost Makinesi	07:33-07:39	0,18 kWh	₺0,57	₺0,21	Televizyon	18:31-23:15	0,38 kWh	₺1,75
Buzdolabı Kompresör	08:15-08:32	0,05 kWh	₺0,15	₺0,06	Bilgisayar	12:13-23:59	2,00 kWh	₺6,30
Buzdolabı Kompresör	10:40-10:57	0,05 kWh	₺0,15	₺0,06				
Küçük Süpürge	13:15-13:28	0,13 kWh	₺0,41	₺0,15				
Buzdolabı Kompresör	14:20-14:37	0,05 kWh	₺0,15	₺0,06				
Blender	15:10-15:13	0,01 kWh	₺0,02	₺0,01				
Televizyon	16:20-18:05	0,14 kWh	₺0,44	₺0,17				
Fırın	18:40-18:59	0,47 kWh	₺2,19	₺1,26				
Buzdolabı Kompresör	19:10-19:27	0,05 kWh	₺0,22	₺0,13				

TOPLAM TÜKETİM: 6,40 kWh

TOPLAM MALİYET: ₺24,31

ULAŞILABİLİR KAR: ₺11,70

Şekil 3.60 : Cihaz kullanım tablosu ve tasarruf önerileri ekranı.

4. SONUÇ

Bu tez kapsamında, konut ortamında hat-bazlı çoklu sensör verisi kullanarak cihaz tespiti yapabilen bir yarı girişimsel (SILM) yük izleme sistemi geliştirilmiştir. SILM yaklaşımının en kritik avantajı, cihazları sigorta/hat gruplarına ayırarak toplam yük üzerindeki karmaşayı azaltması ve karar mekanizmasını “tüm ev” yerine daha yönetilebilir alt problemlere indirgemesidir. Bu sayede hem cihazların birbirini maskeleye olasılığı düşürülmüş hem de aynı güç seviyelerinde çalışan cihazların ayrıştırılabilmesi için gereken özellik seti daha hedefli biçimde seçilebilmiştir.

Ayrıca bu hat-bazlı ayrıştırma ve çoklu özellik doğrulaması sayesinde, yapay zekâ kullanılmadan tespiti oldukça zor olan ve yüzlerce olası çalışma moduna sahip karmaşık cihazların (ör. bulaşık/çamaşır makineleri) yanı sıra rastgele ve değişken yük profili üretebilen bilgisayar gibi cihazların harcadığı yüklerin de izlenebilir ve tespit edilebilir hâle getirildiği gösterilmiştir.

Bu çalışma; ölçüm doğruluğunu artıran sinyal işleme adımlarını (medyan + hareketli ortalama) kullanmış, gerçek zamanlı çalışmayı mümkün kılmak için hesaplama yükünü optimize etmiş ve cihaz tanımada tek bir özelliğe bağlı kalmadan P-Q, PSD, FFT tabanlı harmonik imzalar, FSM tabanlı zaman dizisi doğrulaması ve V-I geometrik özelliklerini hat-bazlı bütünsel bir karar mimarisinde birleştirmiştir.

4.1 Sinyal İşleme Ve Gürültü Azaltma

Gerçek saha koşullarında ölçülen akım/gerilim sinyallerinde ani parazitler (spike) ve geniş bant gürültü, RMS ve güç türevli özellikleri kararsızlaştırmakta; özellikle faz farkı hesabını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sistemde medyan filtre ile tekil ani parazitler bastırılmış, hareketli ortalama ile gürültü yumuşatılmıştır. Uygulanan filtreleme ile görünür güçteki gürültünün yaklaşık 25 VA $\rightarrow$ 3.5 VA seviyesine gerilediği ve böylece algılanabilir en küçük güç değişiminin ~ 3.45 VA mertebesine indirildiği görülmüştür; benzer şekilde Fan cihazındaki faz farkı hatası $\pm 10^\circ$ bandından $\pm 1^\circ$ bandına çekilmiştir. Bu iyileşme; $\Delta P/\Delta Q$, PSD, harmonik içerik ve V-I tabanlı

tüm karar adımlarının aynı pencere içinde daha tekrarlanabilir ve eşiklenebilir hale gelmesini sağlamıştır.

4.2 Optimizasyon Ve Gerçek Zamanlılık

Gömülü tarafta gecikme birikimini belirleyen kritik etken, filtreleme ve özellik çıkarımının CPU yüküdür. Hareketli ortalama filtresinde yapılan optimizasyonla toplam işlem yükünün %45.73'ten %10.12'ye düştüğü; ana döngü (main) zaman payının da 8.79% den 29.16% ya yaklaşık üç kat arttığı görülmüştür. Bu kazanım sayesinde sistemin çalışma hızı arttırılmıştır.

4.3 Gerilim Ölçeklemesi İle Güç Tabanlı Eşiklerin Kararlılığı

Şebeke gerilimi dalgalandığında özellikle rezistif yüklerin gücü yaklaşık olarak gerilimin karesi ile orantılı olarak değiştiği için, sabit güç eşikleriyle yapılan tespitler kayabilmektedir. Yüksek güçlü ev aletlerinin çoğu rezistif tipte olduğundan bu cihazlara yönelik daha net güç tespit aralığı sunulabilir. Bu tezde, referans gerilimde oluşturulan güç aralıklarının anlık gerilimle dinamik ölçeklenmesi sayesinde benzer güçteki rezistif cihazların tespit aralıkları yeniden hizalanmış; güç tabanlı kararların saha koşullarında daha kararlı çalışması sağlanmıştır.

4.4 Aktif-Reaktif Güç (P-Q) İle Yük Karakterinin Ayırıştırılması

Sadece aktif güç (P) ile karar vermek, benzer güçte çalışan cihazları ayırmada sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada reaktif gücün (Q), cihazın rezistif/indüktif/kapasitif karakterini yansıtan güçlü bir ayırt edici olduğu gösterilmiş; aktif gücü benzer birden çok cihazın ayırıştırılmasında temel yöntem olarak kullanılmıştır.

4.5 PSD İle Geçiş İmzasının Kullanılması

Kararlı güçleri benzer olsa da cihazların açılış anındaki tepe davranışı farklılaşabilmektedir. Benzer kararlı güçteki rezistif iki cihazda PSD'nin belirgin şekilde ayrışabildiği; süpürge-fön örneğinde süpürge'nin kalkışta yüksek tepe güç üretirken fönün daha düşük seviyede kaldığı gösterilmiştir. Bu yaklaşım, "kararlı güç benzerliği" problemine zamansal bir boyut ekleyerek tespit güvenilirliğini artırmıştır.

4.6 FFT/Harmonik İmzalar İle Benzer Güçte Cihazların Ayrımı

FFT tabanlı harmonik imzalar sayesinde rezistif, motorlu ve elektronik yüklerin THD ve harmonik dağılımı farklılıkları görünür hale gelmiş; elektronik cihazlarda doğrusal olmayan iletim nedeniyle harmonik içeriğin belirginleştiği vurgulanmıştır. Tam dalga–yarım dalga çalışan rezistif cihazların özellikle DC bileşen ve düşük mertebe harmonikler üzerinden ayrıştığı; iki cihaz birlikte çalıştığında harmonik genliklerin toplamsal davranarak çoklu yük senaryosunda ek doğrulama imkânı sunduğu gösterilmiştir.

4.7 FSM İle Karmaşık Cihazların Yapay Zekâ Olmadan İzlenebilir Hâle Getirilmesi

Bu tezde, özellikle çok adımlı ve çok modlu çalışabilen beyaz eşyaların (bulaşık/çamaşır makineleri vs.) güvenilir biçimde takip edilmesinin zor olduğu ele alınmış; çözüm olarak cihazın tipik çalışma dizisini temsil eden FSM tabanlı bir model kurgulanmıştır. Böylece cihazın farklı çalışma fazları P–Q düzleminde bölgeler ve geçiş eşikleriyle tanımlanmış; FSM’in maskeleyme/dogrulama işleviyle tutarsız tespitlerin bastırılabilmesi gösterilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde sıralı durum dizisi kısıtıyla hatalı tanımların önüne geçilmiştir.

4.8 V–I Grafiklerinden Şekil Tabanlı Özellik Çıkarımı

V–I eğrileri bu çalışmada sayısallaştırılmış “şekil tabanlı” özellikler üretmek için kullanılmıştır. 90° ötelenmiş loop area özelliği türetilmiş ve düşük güçlü rezistif yüklerde ya da elektronik cihazlarda bile yüksek ayırıştırma imkanı elde edilmiştir.

Loop width, simetri oranı, kompaktlık gibi metriklerle özellikle doğrusal olmayan cihazların oluşturduğu karakteristik dalga şekilleri yakalanmıştır. Bunun yanında, salon gibi benzer güçte birçok cihazın bulunduğu gruplarda yalnızca aktif güce dayalı eşikleme yetersiz kalırken, V–I grafikleri ve akım temelli özellikler cihaz tespitinde güçlü bir ayırıştırma sağlamaktadır. Bu sayede aynı güç bandında çalışan cihazlar, V–I şekil imzaları üzerinden daha net ayrılabilmiş; çıkarılan özellikler kullanılarak oluşturulan özellik tablosu (referans aralıklar) ile gerçek zamanlı ölçümlerin eşleştirilmesi sonucunda, çalışmakta olan cihazların tespitleri uygulanabilir ve kararlı bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir.

4.9 Genel Başarı Düzeyi Ve Kullanıcıya Çıktı: Tespit + Tasarruf Önerisi

Geliştirilen bütünleşik yapı sayesinde, çok düşük güçlü cihazlar hariç olmak üzere sistemin hedeflediği gruptaki cihazların büyük bölümünün tespit edilebildiği; özellikle rezistif, motorlu ve birçok elektronik yükün hem açma-kapama olayları hem de çalışma karakteristiği açısından izlenebilir hale geldiği görülmüştür. Tespit sonuçları yalnızca izleme düzeyinde bırakılmamış; sistem çıktısı anlık uyarı ve günlük enerji analizi ekranlarıyla kullanıcıya aktarılmış, üç zamanlı tarife yaklaşımıyla yüksek güçlü ve çalışma zamanı esnetilebilen cihazların uygun zaman dilimlerine kaydırılması üzerinden tasarruf önerileri sunulmuştur. Böylece çalışma, ölçüm–tespit–yorumlama zincirini tamamlayarak yalnız teknik doğruluğa değil, enerji maliyeti farkındalığı ve tasarruf davranışına da odaklanmıştır.

4.10 Sınırlılıklar Ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, çok düşük güçlü cihazlarda sinyal-gürültü oranının düşmesi ve güç değişimlerinin karar eşiklerinin altında kalabilmesi nedeniyle tespit performansı sınırlı kalmaktadır. Bu kapsamda 50 W altındaki cihazların tespiti hedeflenmemiştir. Buna ek olarak, bilgisayar gibi rastgele ve dalgalı yük profili üreten cihazların bulunduğu grupta, aynı hat üzerinde çalışan düşük güçlü rezistif cihazların güç adımları bu rastgele dalgalanmalar içinde maskeleyebildiğinden güvenilir tespit her zaman mümkün olamamaktadır.

Kombinasyonel cihaz sayısı çok artacağından V-I eğrisi ve akım özellikleri tablosu kullanılırken kanal azaltma sistemi kullanılmamıştır.

Akım sensörünün ideal olmaması ve şebeke geriliminin de ideal olmaması sebebiyle yüksek güçlü cihazların harmonikleri altında düşük cihazların harmonikleri ölçülememiştir.

Diğer bir sınırlılık, karar mekanizmasının pratik konut senaryolarına uygun biçimde tasarlanmasına rağmen, değerlendirmeler cihazların aynı anda devreye girmeyeceği varsayımıyla yürütülmüştür.

Ayrıca inverter tabanlı ve kademesiz/çok modlu yüklerde, güç değişimleri çoğu zaman keskin basamaklar üretmediğinden bu tip cihazların doğrudan tespiti yapılmamıştır.

KAYNAKLAR

- Ali, A. I., & Zorlu Partal, S.,** (2022). Development And Performance Analysis Of A Zigbee And Lora-Based Smart Building Sensor Network. *Frontiers in Energy Research*, 10, Article No. 933743. doi:10.3389/fenrg.2022.933743.
- Aytekin, A. Ş. & Zengin, A. T.** (2025). Monitoring household appliances' energy consumption using embedded systems with SILM and providing energy saving recommendations. In *2025 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, (pp.1–6). Bursa, Türkiye. doi:10.1109/ASYU67174.2025.11208363.
- Azizi, E., Beheshti, M. T. H. & Bolouki, S.** (2022). Quantification of disaggregation difficulty with respect to the number of smart meters, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13 (1), 516–525. doi:10.1109/TSG.2021.3113716.
- Back, J. A., Tedesco, L. P., Molz, R. F. & Nara, E. O. B.** (2016). An embedded system approach for energy monitoring and analysis in industrial processes, *Energy*, 115 (1), 811–819. doi:10.1016/j.energy.2016.09.045.
- Chang, Hsueh-Hsien.** (2010). Load identification of non-intrusive load-monitoring system in smart home. *WSEAS Transactions on Systems*. 9. 498-510.
- Chen, D., Irwin, D. & Shenoy, P.** (2016). SmartSim: A device-accurate smart home simulator for energy analytics. In *2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, (pp.686–692). Sydney, NSW, Australia. doi:10.1109/SmartGridComm.2016.7778841.
- Darby, S.** (2006). *The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays*. Environmental Change Institute, University of Oxford.
- De Baets, L., Ruysinck, J., Develder, C., Dhaene, T. & Deschrijver, D.** Appliance classification using VI trajectories and convolutional neural networks, *Energy and Buildings*, 158, 32–36. doi:10.1016/j.enbuild.2017.09.087.
- Depuru, S. S. S. R., Wang, L., & Devabhaktuni, V.** (2011). Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6), 2736–2742. doi:10.1016/j.rser.2011.02.039.
- Dhaou, I. B.** (2023). Design and implementation of an Internet-of-Things-enabled smart meter and smart plug for home-energy-management system, *Electronics*, 12 (19), 4041. doi:10.3390/electronics12194041.

- Dinar, F., Paris, S. & Busvelle, É.** (2025). Capturing high-frequency harmonic signatures for NILM: Building a dataset for load disaggregation, *Sensors*, 25 (15), 4601. doi:10.3390/s25154601.
- 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. doi:10.3906/elk-1705-262.
- Doğan, R., Çınar, S. M. & Akarslan, E.** (2025). A novel ZIP-based NILM method design robust to undervoltage and overvoltage conditions, *Arabian Journal for Science and Engineering*. doi:10.1007/s13369-025-10179-w.
- Duan, Q., Li, F. & Liu, J.** (2022). A Belief Propagation Based State Estimator for Semi-Intrusive Load Monitoring System, *IEEE Access*, 10, 110309–110322. doi:10.1109/ACCESS.2022.3214982
- European Commission** (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). Brussels: European Commission. Retrieved from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D.** (2012). Smart grid—The new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944–980. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087>
- Fischer, C.** (2008). Feedback on household electricity consumption: A tool for saving energy?, *Energy Efficiency*, 1, 79–104. doi:10.1007/s12053-008-9009-7.
- Han, X. & Wei, Y.-M.** (2021). Household energy consumption: State of the art, research gaps, and future prospects, *Environment, Development and Sustainability*, 23, 12479–12504. doi:10.1007/s10668-020-01179-x.
- Hart, G. W.** (1992). Nonintrusive appliance load monitoring, *Proceedings of the IEEE*, 80 (12), 1870–1891. doi:10.1109/5.192069.
- Hassan, T., Javed, F. & Arshad, N.** (2014). An empirical investigation of V-I trajectory based load signatures for non-intrusive load monitoring, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5 (2), 870–878. doi:10.1109/TSG.2013.2271282.
- Hoyo-Montañó, J. A., Pereyda-Pierre, C. A., Tarín-Fontes, J. M. & Leon-Ortega, J. N.** (2016). Overview of non-intrusive load monitoring: A way to energy wise consumption. In *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, (pp.221–226). Guanajuato, Mexico. doi:10.1109/CIEP.2016.7530760.
- IPCC.** (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (Eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

- IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022 (Report No. WEO-2022)*. Paris: IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Kolter, J. Z. & Johnson, M. J. (2011). REDD: A public data set for energy disaggregation research. In *Proceedings of the Workshop on Data Mining Applications in Sustainability (SIGKDD)*, 25, 59–62. San Diego, CA, USA.
- Kohvakka, M., Kuorilehto, M., Hännikäinen, M. & Hämäläinen, T. D. (2006). Performance analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications. In *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks (PE-WASUN '06)*, (pp.48–57). Torremolinos, Spain: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1163610.1163619.
- Kuzlu, M., Hasan, M., Rahman, S. & Dincer, H. (2011). *Design of wireless smart metering system based on MSP430 MCU and ZigBee for residential application*. In *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2011)* (pp. II-255–II-258). Bursa, Turkey, December 1–4.
- Langevin, A., Gagnon, G. & Cheriet, M. (2020). Crosstalk suppression in semi-intrusive load monitoring systems using Hall effect sensors, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11 (6), 5019–5027. doi:10.1109/TSG.2020.3002668.
- Le, T.-T.-H., Kang, H. & Kim, H. (2020). Household appliance classification using lower odd-numbered harmonics and the bagging decision tree, *IEEE Access*, 8, 55937–55952. doi:10.1109/ACCESS.2020.2981969.
- Liu, Y., Liu, W., Shen, Y., Zhao, X. & Gao, S. (2021). Toward smart energy user: Real time non-intrusive load monitoring with simultaneous switching operations, *Applied Energy*, 287, 116581. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116581.
- Lu, J., Zhao, R., Liu, B., Yu, Z., Zhang, J. & Xu, Z. (2023). An overview of non-intrusive load monitoring based on V-I trajectory signature, *Energies*, 16 (2), 939. doi:10.3390/en16020939.
- Makonin, S., Ellert, B., Bajić, I. V. & Popowich, F. (2016). Electricity, water, and natural gas consumption of a residential house in Canada from 2012 to 2014, *Scientific Data*, 3, 160037. doi:10.1038/sdata.2016.37.
- Schirmer, P. A. & Mporas, I. (2019). Statistical and electrical features evaluation for electrical appliances energy disaggregation, *Sustainability*, 11 (11), 3222. doi:10.3390/su11113222.
- Silva, M. D. & Liu, Q. (2024). A review of NILM applications with machine learning approaches, *Computers, Materials & Continua*, 79 (2), 2971–2989. doi:10.32604/cmc.2024.051289.
- Sovacool, B. K., Hook, A., Sareen, S. & Geels, F. W. (2021). Global sustainability, innovation and governance dynamics of national smart electricity meter

transitions, *Global Environmental Change*, 68, 102272. doi:10.1016/j.gloenvcha.2021.102272.

- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB).** (2022). *ürkiye Ulusal Enerji Planı (2022–2035)*. Ankara: ETKB. Retrieved from https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Planı.pdf
- Tang, G., Wu, K. & Lei, J.** (2016). A distributed and scalable approach to semi-intrusive load monitoring, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 27 (6), 1553–1565. doi:10.1109/TPDS.2015.2470238.
- Tokam, L. W. & Ouro-Djobo, S. S.** (2023). Comparative study on load monitoring approaches, *Applied Sciences*, 13 (9), 5755. doi:10.3390/app13095755.
- Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ).** (2024). *2023 Yılı Türkiye Elektrik Dağıtım Sektör Raporu*. Ankara: TEDAŞ, s. 15.
- UNFCCC** (2015). *Paris Agreement*. Bonn, Germany: UNFCCC, p. 3. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Vaishvat, A.** (2024). Smart grid technologies for enhanced energy distribution and management, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 13 (12), 19678–19685. doi:10.15680/IJIRSET.2024.1312031.
- Zeifman, M. & Roth, K.** (2011). Nonintrusive appliance load monitoring: Review and outlook, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57 (1), 76–84. doi:10.1109/TCE.2011.5735484.
- Zhou, B., Li, W., Chan, K. W., Cao, Y., Kuang, Y., Liu, X. & Wang, X.** (2016). Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 30–40. doi:10.1016/j.rser.2016.03.047.
- Zoha, A., Gluhak, A., Imran, M. A. & Rajasegarar, S.** (2012). Non-intrusive load monitoring approaches for disaggregated energy sensing: A survey, *Sensors*, 12 (12), 16838–16866. doi:10.3390/s121216838.

EKLER

-





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Ali Şamil Aytekin

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2022, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : -

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- -

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

-

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Aytekin, A. Ş. & Zengin, A. T. (2025).** Monitoring household appliances' energy consumption using embedded systems with SILM and providing energy saving recommendations. In *2025 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, (pp.1–6). Bursa, Türkiye.
doi:10.1109/ASYU67174.2025.11208363