

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI ŞEBEKELERDE YÜK ŞEKİLLEME TABANLI MAHREMİYET
KORUMA STRATEJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Cihan Emre KEMENT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent TAVLI

ARALIK 2020

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Cihan Emre KEMENT

ÖZET

Doktora Tezi

AKILLI ŞEBEKELERDE YÜK ŞEKİLLEME TABANLI MAHREMİYET KORUMA STRATEJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Cihan Emre Kement

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Bülent TAVLI

Tarih: ARALIK 2020

Son yıllarda küresel çapta elektrik kullanımındaki ve elektrik üretim-tüketim çeşitliliğindeki artış, daha modern bir elektrik şebekesi ihtiyacını doğurmuştur. Akıllı şebeke konsepti, geleneksel elektrik şebekesini iki yönlü haberleşme ağı ile birleştirerek bu ihtiyaca cevap vermeyi amaçlamaktadır. Böylece, şebeke gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, kesintilere ve arızalara daha hızlı cevap verilebilmekte, kaçak kullanım tespit edilebilmekte, şebeke dağıtık bir şekilde yönetilebilmekte ve talep katılımı gibi yeni servisler sağlanabilmektedir. İleri ölçüm altyapısı (İÖA) bu akıllı şebeke mimarisinin temel yapıtaşlarından biridir. İÖA, elektrik kullanımının periyodik ya da isteğe bağlı olarak ölçülmesine, toplanmasına ve analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece, şebekenin daha etkin ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. İÖA sistemlerinin merkezinde bulunan akıllı sayaçlar (AS) da elektrik kullanımını gerçek zamanlı olarak ölçebilmekte, ve servis sağlayıcıya (SS) ya da kullanıcıya sık ve hassas ölçüm verisi gönderebilmektedir. Ancak, veri bilimindeki gelişmeler sayesinde bu yüksek çözünürlüklü ölçüm verisi farklı amaçlar için de kullanılabilir. Özellikle, Girişimsel Olmayan Cihaz Yüklü İzleme (GOCYİ) teknikleri bu veriyi cihaz kullanımına ya da nihai kullanımlara ayırabilmektedir. Bu nedenle, AS verisinden bir çok mahrem bilgi (evin boş olup olmadığı, ev sakinlerinin demografik bilgileri, günlük alışkanlıkları, vs.) çıkarılabilmektedir. Bundan dolayı, AS verisinin kötü niyetli kullanımının önüne geçmek önem arz etmektedir. Literatürde kullanıcı mahremiyetinin sağlanması için bir

çok farklı teknik öne sürülmüştür. Bunlardan bazıları kriptografik teknikler kullanarak veriyi saklarken, bazıları veriye gürültü ekleyerek veriyi bozmaktadır. Kullanıcı bilgisini anonimleştirmek ve ölçüm frekansını azaltmak da mahremiyeti sağlamak için öne sürülmektedir. Bu tekniklerin arasından, elektrik kullanımını çizelgeleyerek dışarıya mümkün olan en az bilginin çıkmasını sağlayan yük şekilleme metotları etkinlik ve kullanılabilirlik açısından öne çıkmaktadır.

Bu tezde, yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma stratejileri ile ilgili bir dizi karşılaştırmalı analiz sunulmaktadır. Giriş bölümünde akıllı şebekeler, İÖA, AS, talep katılımı, GOCYİ gibi kavramlar açıklanmakta ve literatürdeki çeşitli mahremiyet yaklaşımları özetlenmektedir. Ardından gelen dört bölüm, yük şekilleme tabanlı mahremiyet ile ilgili dört bağımsız çalışmayı konu almaktadır. İlk bölümde, literatürdeki 8 farklı yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma stratejisi, ortak bir stokastik optimizasyon çerçevesi altında karşılaştırılmakta ve analiz edilmektedir. İkinci çalışmada, ilk çalışmaya ek olarak SS'nin de amaç fonksiyonları ele alınarak, talep katılımı çerçevesinde kullanıcının amaçlarını (mahremiyet dahil) optimize etmenin SS'nin amaç fonksiyonlarını nasıl etkilediği analiz edilmektedir. Üçüncü çalışma, akıllı elektrik sayaçlarının reaktif gücü de ölçmesine odaklanmakta ve mahremiyetin tesis edilmesi için hem gerçek gücün hem de reaktif gücün birlikte şekillenmesi gerektiğini göstermektedir. Dördüncü çalışma, yeni gelişmekte olan akıllı su ve doğalgaz ölçümünü de akıllı elektrik ölçümü ile birlikte ele almakta, ve kullanıcı mahremiyeti problemini tüm akıllı ölçümleri dahil eden bütüncül bir anlayışla çözmeye çalışmaktadır. Sonuç ve öneriler de son bölümde sunulmaktadır.

Bu tezde sunulan karşılaştırmalı analizler, literatürdeki yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma metotlarının adil bir biçimde karşılaştırılabilmesini ve bunların SS'nin amaç fonksiyonları üzerindeki etkilerinin görülebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, literatürde henüz çalışılmamış olan bütüncül mahremiyet ile gerçek ve reaktif güç şekilleme tabanlı mahremiyet koruma konularına ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı şebekeler, Akıllı sayaçlar, Mahremiyet, Girişimsel Olmayan Cihaz Yükü İzleme, Yük şekilleme, Çok amaçlı optimizasyon.

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

COMPARATIVE ANALYSIS OF LOAD SHAPING BASED PRIVACY PROTECTION TECHNIQUES IN SMART GRIDS

Cihan Emre Kement

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Bülent TAVLI

Date: December 2020

The increase in the amount and the variety of electricity production and consumption globally during recent years necessitated a more modern electricity grid. The concept of smart grid aims to fulfill this necessity by combining the traditional grid with a communications network. Hence, the grid can be monitored in real-time, outages and failures can be responded more quickly, energy theft can be detected, the grid can be managed in a distributed way and new services such as demand response can be available. Advanced Metering Infrastructure (AMI) is one of the core elements of the smart grid architecture. AMI measures, collects and analyzes electricity usage either on-demand or in a periodic basis. Therefore, AMI enables the grid to be more efficient and reliable. Smart meters which are in the center of the AMI systems can measure electricity usage in real-time and can send frequent and accurate readings to the Utility Provider (UP) or to the customer. However, the fine-grained metering data can also be used for other purposes due to the advances in data science. Especially, Nonintrusive Appliance Load Monitoring (NIALM) techniques can be used to disaggregate the metering data into individual appliance usages or end-uses. Therefore, private information (e.g., vacancy of the house, demographics of the residents, daily habits) can be inferred from the smart meter data. Thus, it is of utmost importance to protect SM data from adversaries. Different approaches to ensure consumer privacy have been proposed in the literature. Some of these use cryptographic techniques to hide the data, while

others perturb it by adding random noise. Using pseudonyms instead of consumer ID's (anonymization) and decreasing the measurement frequency (downsampling) are also proposed to decrease the privacy threat. Among such methods, load shaping (LS) methods, where the consumer load is scheduled to release as little information as possible, shine out in terms of feasibility and effectiveness.

In this thesis, a series of comparative analyses of load shaping-based privacy protection strategies were presented. In the introductory section, the concepts of smart grid, AMI, smart metering, demand response and NIALM were explained. Various privacy protection approaches were reviewed. After the introductory section, there are four main sections. Each of these sections narrates an independent study about load shaping based privacy protection. The first study analyzes and compares 8 different LS-based privacy protection strategies from the literature under a unified stochastic optimization framework in a demand response scheme. The second study extends the first study by considering the UP and its goals, and analyzes how emphasizing the consumer's objectives (including privacy) affects the UP's objectives. The third study focuses on reactive power metering and it shows that in order to ensure privacy, real and reactive power must be shaped simultaneously. The fourth study considers the advancing smart water and natural gas metering in addition to smart electricity metering, and tackles the privacy problem in a holistic sense. Concluding remarks were presented in the concluding chapter.

The series of comparative analyses presented in this thesis enables a fair comparison of different LS-based privacy protection strategies as well as their effects on UP's objectives. Furthermore, it sheds light on the concept of holistic privacy as well as real and reactive power based privacy protection, which are virgin lands on the SG literature.

Keywords: Smart grids, Smart metering, Privacy, Nontintrusive Appliance Load Monitoring, Load shaping, Multi-objective optimization.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanlarım Prof. Dr. Bülent TAVLI ve Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN'e, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, doktoramı araştırma bursu ile yapmamı sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, ASELSAN A.Ő. 'ye, TÜBİTAK BİDEB'e, Türkiye Fulbright Eğitim Komisyonu'na, Massachusetts Institute of Technology (MIT) - Laboratory for Information and Decision Systems'taki kıymetli hocalarıma ve arkadaşlarıma, ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Mahremiyet Koruma Tekniklerine Genel Bir Bakış.....	4
1.2.1 Veriye gürültü ekleme - diferansiyel gizlilik	4
1.2.2 Veri birleştirme - homomorfik şifreleme	5
1.2.3 Anonimleştirme	5
1.2.4 Alt-örnekleme (Downsampling)	6
1.2.5 Yük şekilleme (Load shaping)	6
1.3 Literatür Araştırması	7
2. AKILLI ŞEBEKELERDE YÜK ŞEKİLLEME TABANLI MAHREMİYET KORUMA STRATEJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ .	13
2.1 Çalışmanın Amacı	13
2.2 Problem Formülasyonu	13
2.2.1 Temel matematiksel model	13
2.2.2 En İyi Gayret (Best Effort) stratejisi	16
2.2.3 Katlanılır Sapma (Tolerable Deviation) stratejisi.....	18
2.2.4 Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme (Non Intrusive Load Leveling) stratejisi	20
2.2.5 Basamaklandırma (Stepping) stratejisi	20
2.2.6 L2 normu minimize etme stratejisi	21
2.2.7 Cihaz L1 normunu minimize etme stratejisi	22
2.2.8 Mahremiyeti ele almama	23
2.3 Sistem Modeli	23
2.3.1 Yenilenebilir enerji kaynağı modelleme	23
2.3.2 Hane içi batarya modelleme	25
2.3.3 Cihaz modelleme	25
2.3.4 Elektrik fiyatlandırılması modeli	27
2.3.5 Kullanıcı konforunun modellenmesi	27
2.4 Mahremiyet Ölçütleri	27
2.4.1 Değişiklik Sayısı (Number of Changes) - DS	28
2.4.2 Determinasyon Katsayısı (Coefficient of Determination) - DK	29
2.4.3 Göreceli Entropi (Relative Entropy) - GE	29
2.4.4 Birleşik Mahremiyet ölçütü - BM	30

2.5 Karşılaştırmalı Analiz	30
2.5.1 Yenilenebilir enerji kapasitesinin mahremiyete etkisi	39
2.6 Sonuç ve Tartışma	40
3. AKILLI ŞEBEKELERDE TALEP TARAFI YÖNETİMİNİN BÜTÜN- CÜL ANALİZİ	43
3.1 Çalışmanın Amacı	43
3.2 Kullanılan Semboller ve Açıklamaları	43
3.3 Problem Formülasyonu	45
3.3.1 Temel problem (TP)	45
3.3.2 Amaç fonksiyonları	49
3.3.2.1 Kullanıcı maliyetini minimize etmek	49
3.3.2.2 Kullanıcı mahremiyetini maksimize etmek	50
3.3.2.3 Kullanıcı memnuniyetsizliğini minimize etmek	51
3.3.2.4 Gün içinde şebekeden çekilen gücün değişimini minimize etmek	52
3.3.2.5 Gün içinde şebekeden çekilen maksimum gücü minimize etmek	53
3.3.3 Çok amaçlı optimizasyon modeli: Ana problem (AP)	54
3.4 Sistem Modeli	55
3.4.1 Yenilenebilir enerji kaynağı modeli	57
3.4.2 Fiyat modeli	58
3.4.3 Cihaz modeli	59
3.4.4 Kullanıcı memnuniyetsizliği modeli	59
3.5 Nümerik Analiz	60
3.5.1 Problemin büyüklüğü ve çözüm zamanı	60
3.5.2 Amaç fonksiyonları arasındaki ilişkilerin karakterizasyonu	61
3.5.3 Stokastik modellemenin optimal sonuçlara etkisi	69
3.5.4 Optimal çizelgelerin zamansal karakteristikleri	70
3.5.5 Ev türünün optimal sonuçlara etkisi	74
3.6 Sonuç ve Tartışma	76
4. AKILLI ŞEBEKELERDE AKTİF VE REAKTİF GÜÇ ŞEKİLLEME TABANLI MAHREMİYET KORUMA	79
4.1 Çalışmanın Amacı	79
4.2 Problem Formülasyonu	80
4.2.1 Güneş enerjisi modeli	80
4.2.2 Amaç fonksiyonları	80
4.2.2.1 Aktif ve reaktif güçteki veri sızıntısını minimize etmek	81
4.2.2.2 Kullanıcı maliyetini minimize etmek	82
4.2.2.3 Kullanıcı rahatsızlığını minimize etmek	82
4.2.3 Kısıtlar	83
4.2.3.1 Cihaz güç kısıtları	83
4.2.3.2 Güç dengesi kısıtları	83
4.2.3.3 Batarya ve kapasitör kısıtları	84
4.2.3.4 Çok amaçlı optimizasyon modeli	84
4.3 Karşılaştırmalı Analiz	85
4.3.1 Reaktif gücün şekillenmesinin mahremiyete etkisi	86
4.3.2 Aktif ve reaktif gücü aynı anda şekillemenin diğer amaç fonksi- yonlarına olan etkisi	89

4.4 Sonuç ve Tartışma.....	90
5. BÜTÜNCÜL MAHREMİYET: YENİ NESİL ŞEBEKELERDE AKILLI ELEKTRİK, SU VE DOĞALGAZ ÖLÇÜMÜNE KARŞI MAHREMİYETİN KORUNMASI	91
5.1 Çalışmanın Amacı	91
5.2 Akıllı Kaynak Ölçümü ve Mahremiyet	91
5.3 Akıllı Kaynak Ölçümü Teknolojisindeki Gelişmeler.....	94
5.4 Su, Doğalgaz ve Girişimsel Olmayan Cihaz Yükü İzleme.....	95
5.5 Bütüncül Mahremiyet.....	95
5.6 Bütüncül Mahremiyetin Gerekliği.....	96
5.6.1 Matematiksel model	97
5.6.2 Yük şekillenmesiz durum (Vaka 0).....	100
5.6.3 Sadece elektrik yükü şekilleme (Vaka 1)	101
5.6.4 Elektrik, su ve doğalgazın aynı anda şekillenmesi (Vaka 2)	102
5.7 Sonuç ve Tartışma.....	104
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ	125

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Akıllı şebeke altyapısı.....	2
Şekil 2.1: Temel matematiksel model.....	17
Şekil 2.2: En İyi Gayret Stratejisinin (EİG) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	32
Şekil 2.3: En İyi Gayret Stratejisi-2'nin (EİG-2) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	33
Şekil 2.4: Katlanılır Sapma (KS) stratejisinin sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	33
Şekil 2.5: Katlanılır Sapma-2'nin (KS-2) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	35
Şekil 2.6: Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme (GOYD) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	36
Şekil 2.7: Basamaklandırma stratejisinin sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	36
Şekil 2.8: Cihaz L1 Normunu Minimize Etme stratejisi sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	38
Şekil 2.9: L2 Normu Minimize Etme stratejisi sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	38
Şekil 2.10: Mahremiyeti ele almayan stratejinin sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.	39

Şekil 2.11: New York şehri için konum tabanlı marjinal fiyatlandırma verisi (location based marginal pricing, $\$/kWh$) ve modellenen güneş enerjisi sisteminin gün içerisinde ürettiği güç miktarı (kW).	40
Şekil 3.1: Temel problemin ve ana problemin optimal çözümü bulmak için kullanımı.	47
Şekil 3.2: Varsayılan sistem modeli.	56
Şekil 3.3: Kullanıcı maliyetinin öncelik katsayısı γ_1 'in artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.	64
Şekil 3.4: Kullanıcı mahremiyeti öncelik katsayısı γ_2 'nin artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.	66
Şekil 3.5: Kullanıcı memnuniyeti öncelik katsayısı γ_3 'ün artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.	67
Şekil 3.6: Gün içerisinde şebekeden çekilen toplam güçteki değişimin öncelik katsayısı γ_4 'ün artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.	68
Şekil 3.7: Gün içerisinde şebekeden çekilen maksimum gücün öncelik katsayısı γ_5 'in artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.	69
Şekil 3.8: Eşit öncelikli ($\gamma_i = 1, \forall i$) optimal sonuçta bir hanenin gün içerisinde şebekeden çektiği güç miktarı: beklenen değer vs. senaryolara göre dağılım.	70
Şekil 3.9: Örnek bir hanenin gün içerisinde çektiği güç: Sadece maliyetin optimize edildiği ($\gamma_1 = 1$) durum, sadece mahremiyetin optimize edildiği ($\gamma_2 = 1$) durum, sadece konforun optimize edildiği ($\gamma_3 = 1$) durum ve tüm alt amaç fonksiyonlarının eşit önceliğe ($\gamma_i = 1, \forall i$) sahip olduğu durum.	71
Şekil 3.10: Şebekeden gün içerisinde çekilen toplam güç: Sadece maliyetin optimize edildiği ($\gamma_1 = 1$) durum, sadece mahremiyetin optimize edildiği ($\gamma_2 = 1$) durum, sadece konforun optimize edildiği ($\gamma_3 = 1$) durum, sadece toplam talepteki değişimin minimize edildiği ($\gamma_4 = 1$) durum, sadece toplam talepteki tepe değerinin minimize edildiği ($\gamma_5 = 1$) durum ve tüm alt amaç fonksiyonlarının eşit önceliğe ($\gamma_i = 1, \forall i$) sahip olduğu durum.	73
Şekil 4.1: Öne sürülen akıllı ölçüm modeli.	79
Şekil 4.2: Farklı vakalar için ölçülen/asıl aktif güçler arasındaki ve ölçülen/asıl reaktif güçler arasındaki karşılıklı bilgi.	87
Şekil 4.3: Evin ölçülen aktif ve reaktif gücü. a: orijinal veri (vaka 0). b: aktif güç şekilleme (vaka 1), c: reaktif güç şekilleme (vaka 2), d: aktif ve reaktif güç şekilleme (vaka 3).	88
Şekil 4.4: Farklı durumlarda ölçülen aktif ve reaktif güçteki değişim miktarları.	89
Şekil 5.1: Akıllı elektrik, su ve doğalgaz ölçümü.	92
Şekil 5.2: Birden fazla kaynağı eşzamanlı kullanan cihazlara örnek olarak çamaşır makinesi.	93
Şekil 5.3: Eğer cihaz birden fazla akıllı ölçülen kaynağı aynı anda kullanıyorsa, sadece elektrik verilerini gizlemek mahremiyet için yeterli olmayabilir.	96
Şekil 5.4: Akıllı ölçülen dakikalık elektrik, su ve doğalgaz verileri ile HVAC ve çamaşır makinesi cihazlarının elektrik, su ve doğalgaz kullanımları.	101
Şekil 5.5: Sadece ölçülen elektrik şekillendiğindeki elektrik, su ve doğalgaz verileri ile HVAC ve çamaşır makinesi cihazlarının elektrik, su ve doğalgaz kullanımları.	102
Şekil 5.6: Tüm kaynaklar şekillendiğindeki elektrik, su ve doğalgaz verileri ile HVAC ve çamaşır makinesi cihazlarının elektrik, su ve doğalgaz kullanımları.	103

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1: Hane içi elektrikli cihazların güç tüketimleri.....	26
Çizelge 2.2: Alt amaçların farklı ağırlıklarına göre stratejilerin çok amaçlı optimum sonuçları [Maliyet, Rahatsızlık, Değişim Sayısı (DS), Determinasyon Katsayısı (DK), Göreceli Entropi (GE)]......	31
Çizelge 2.3: Alt amaçların farklı stratejilerde tekil optimum sonuçları [Maliyet, Rahatsızlık, Değişim Sayısı (DS), Determinasyon Katsayısı (DK), Göreceli Entropi (GE)].	34
Çizelge 2.4: Alt amaçların farklı ağırlıklarına göre stratejilerin Birleşik Mahremiyet (BM) ölçütü sonuçları.	35
Çizelge 2.5: Farklı güneş paneli boyutlarına (m^2) göre stratejilerin optimum sonuçları [Maliyet, Rahatsızlık, Değişim Sayısı (DS), Determinasyon Katsayısı (DK), Göreceli Entropi (GE)]......	37
Çizelge 3.1: Semboller ve açıklamaları.....	44
Çizelge 3.2: Sistem parametreleri.....	56
Çizelge 3.3: Farklı tipteki evlerin özellikleri.	57
Çizelge 3.4: Çeşitli öncelik kombinasyonları için alt amaç fonksiyonlarının tekil optimal değerlerinden (G_i^*) yüzde sapmaları.....	63
Çizelge 3.5: Farklı ev tiplerinin optimal mahremiyet ve genel amaç fonksiyonu performansları.	75
Çizelge 4.1: Vakalar ve karşılık gelen γ_i değerleri.	86
Çizelge 4.2: Ölçülen aktif/reaktif güç ile cihazlar tarafından harcanan aktif/reaktif güç arasındaki karşılıklı bilgi miktarları.	87
Çizelge 4.3: Ölçülen aktif/reaktif güç ile cihazların aktif/reaktif güç kullanımları arasındaki ortalama deneysel karşılıklı bilgi.	88
Çizelge 4.4: Aktif ve reaktif güç şekillenmenin diğer kullanıcı amaç fonksiyonlarına etkisi.	90

KISALTMALAR

AMI	: Advanced Metering Infrastructure
AP	: Ana Problem
AS	: Akıllı Sayaç
BM	: Birleşik Mahremiyet
CCTV	: Closed-Circuit Television
DS	: Değişiklik Sayısı
DK	: Determinasyon Katsayısı
EİG	: En İyi Gayret
EWG	: Electricity-Water-Gas
GE	: Göreceli Entropi
GOCYİ	: Girişimsel Olmayan Cihaz Yüğü İzleme
GOYD	: Girişimsel Olmayan Yüğü Düzleştirme
HTTP	: Hypertext Transfer Protocol
HVAC	: Heating, Ventilation and Air Conditioning
IoT	: Internet of Things
İÖA	: İleri Ölçüm Altyapısı
KS	: Katlanılır Sapma
LS	: Load Shaping
MAC	: Media Access Control
MI	: Mutual Information
NIALM	: Nonintrusive Appliance Load Monitoring
NILL	: Nonintrusive Load Leveling
PAR	: Peak-to-Average Ratio
PV	: Photovoltaic
RAM	: Random Access Memory
SS	: Servis Sağlayıcı
ToU	: Time-of-Use
TP	: Temel Problem
TT	: Talep Toptancısı
TV	: Televizyon
UP	: Utility Provider
WM	: Washing Machine

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kümeler ve indisler

t, τ	zaman dilimi indeksi $[1, 2, \dots, T]$
a	cihaz indeksi $[1, 2, \dots, A]$
s	senaryo indeksi $[1, 2, \dots, S]$
i	amaç indeksi

Parametreler

ρ_s	senaryo s 'in olasılığı
c_t	t zaman aralığındaki elektrik fiyatı (\$/kWh)
α_a	a cihazının operasyon penceresi başlangıcı
β_a	a cihazının operasyon penceresi bitişi
E_a	a cihazının gerektirdiği enerji miktarı (kWh)
P_a^{max}	a cihazının çekebileceği maksimum güç (kW)
$P_{s,t}^g$	s senaryosunda t aralığında güneş enerjisinden gelen güç (kW)
$\phi_{a,t}$	a cihazının t zaman aralığında harcadığı gücün cezası
δ_a	a cihazının ceza katsayısı
γ_i	i amacının ağırlığı
G_i^*	i amaç fonksiyonunun (G_i) tekil optimal değeri
ΔT	bir zaman aralığının uzunluğu (dk)
P^{max}	bir evin maks. güç çekme kapasitesi (kW)
E^{bi}	bataryada saklanan ilk enerji miktarı (kWh)
E^{bmax}	bataryanın kapasitesi (kWh)
R^{cbmax}	bataryanın maks. şarj hızı (kW)
R^{dbmax}	bataryanın maks. deşarj hızı (kW)
η^c	bataryanın şarj verimliliği
η^d	bataryanın deşarj verimliliği

Değişkenler

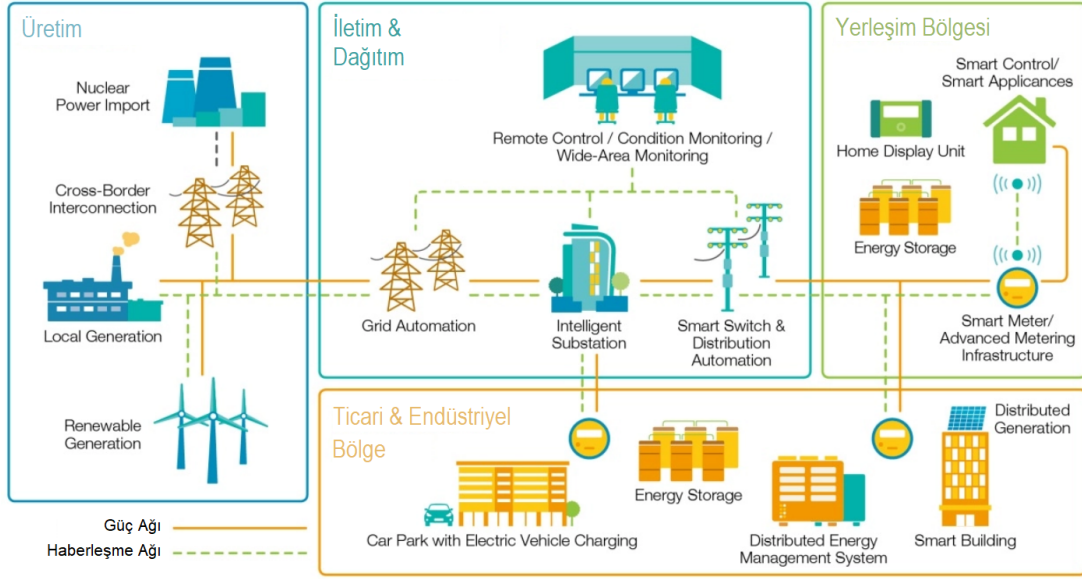
G_i	i amacının değeri
$p_{s,t}^c$	s senaryosunda t zaman aralığında ölçülen güç (kW)
$p_{a,s,t}^{ca}$	a cihazınca harcanan güç (kW)
$p_{s,t}^{cb}$	bataryaya şarj edilen güç (kW)
$p_{s,t}^{db}$	bataryadan deşarj edilen güç (kW)
$v_{s,t}$	s senaryosunda t zaman aralığında kullanılan yenilenebilir güç

1. GİRİŞ

Son yıllarda küresel çapta elektrik kullanımı hızla artmaktadır [1]. Bunun yanı sıra, elektrik üretim kaynaklarındaki ve tüketim türlerindeki çeşitlilik de artmaktadır. Dağıtık ve yenilenebilir (güneş ve rüzgar) enerjiye dayalı üretim toplam üretimdeki payı her geçen yıl yükselen bir trend içerisinde. Şarjlı elektrikli araçlar (plug-in electric vehicle) gibi elektrikli cihazların sayısının artması da hanelerin gün içerisindeki elektrik tüketim profilini değiştirmektedir.

Elektriğin üretiminde ve tüketimindeki bu çeşitlilik ve dağıtıklık, geleneksel şebekenin daha modern bir sistem ile güncellenmesi gerekliliğini doğurmuştur. Geleneksel elektrik şebekeleri merkezileştirilmiş bir yapıda olup, enerji ve bilgi akışı tek yönlü olacak şekilde tasarlanmıştır. İletişim ağlarında son yıllarda yaşanan önemli gelişmeler, geleneksel şebekelerin bileşenlerinin birbirleri ile çift yönlü olarak haberleşebilmesine ve dolayısıyla bilgi aktarabilmesine olanak sağlamaktadır. Elektriğin yanında verinin de çift yönlü olarak iletilebildiği bu modern şebekelere akıllı şebekeler (smart grids) denilmektedir. Bu çift yönlü veri akışı sayesinde akıllı şebekeler; arızalara ve elektrik kesintilerine daha hızlı yanıt verebilmekte, şebekenin dağıtık ve tak-çalıştır olabilmemesinin önü açılmakta, kaçak kullanımın tespiti daha kolay yapılabilmekte ve talep katılımı, talep tarafı yönetimi, gerçek zamanlı fiyatlandırma, net ölçüm (kullanıcıların kendi ürettikleri elektriği aynı anda hem kullanabilmesi hem de fazla elektriği şebekeye geri satabilmesi) gibi servislere olanak sağlanmaktadır.

Akıllı şebekelerin genel mimarisi Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Şekil 1.1'de de görüleceği üzere, akıllı şebekelerin ana unsurlarından biri de ileri ölçüm altyapısıdır (Advanced Metering Infrastructure). İleri ölçüm altyapısı, kullanıcıların sayaçları ile servis sağlayıcı arasında çift yönlü veri iletişimini sağlamakta, böylece sayaçlardan istenen sıklıkta ölçüm verisi alınabilmesine olanak sağlamaktadır. İleri ölçüm altyapısının temel bileşenleri; kullanıcı tarafındaki akıllı sayaçlar, servis sağlayıcı tarafındaki veri yönetim merkezi ve bu ikisinin arasındaki iletişime olanak sağlayan geniş-alan iletişim ağı (Wide Area Network) olarak sayılabilir. İleri ölçüm altyapısı; ölçüm verilerinin gerçek zamanlı toplanmasına olanak sağlamanın yanında, servis sağlayıcının kullanıcıların sayaçlarına veri ve komut gönderebilmesine de imkan vermektedir. Böylece, gerçek zamanlı fiyatlandırma, talep katılımı ve talep tarafı yönetimi gibi servisler gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin; servis sağlayıcı dinamik fiyatlandırma ile kullanıcıların yoğun zamanlardaki elektrik kullanımını farklı zamanlara kaydırmala-



Şekil 1.1: Akıllı şebeke altyapısı [2].

rını teşvik edebilmektedir. Buna talep katılımı (demand response) denmektedir. Buna ek olarak, hane içerisinde programlanabilir cihazların olması durumunda ise servis sağlayıcı bazı cihazların çizelgelerini bizzat belirleyebilmektedir. Buna da talep tarafı yönetimi (demand-side management) denilmektedir. Bu servisler sayesinde şebeke-deki tepe yük azaltılabilmekte ve böylece elektrik üretim maliyeti düşürülebilmektedir. Kullanıcılar da cihazlarını normal zamanlarından farklı zamanlarda çalıştırarak fatu-ralarını düşürebilmektedirler. Tabi ki kullanıcıların cihazlarını istedikleri zamandan farklı bir zamanda çalıştırmaları, belirli bir memnuniyetsizliğe (discomfort) de neden olmaktadır. Bu maliyet - konfor dengesi talep katılımının ana unsurlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Maliyet ve konfor dengesinin yanı sıra, akıllı sayaçlardan toplanan sık ve hassas elekt-rik kullanım verisi kullanıcılar için farklı bir soruna daha yol açmaktadır. Literatürde halihazırda geniş biçimde çalışılmış olan Girişimsel Olmayan Cihaz Yükü İzleme (No-nintrusive Appliance Load Monitoing - NIALM) teknikleri, akıllı sayaçlardan gelen hane elektrik kullanım verisini başarılı bir biçimde tekil cihaz kullanımlarına veya son kullanımlara ayırabilmektedir. Son yıllarda veri biliminde yaşanan gelişmeler ne-ticesinde, makine öğrenmesi teknikleri ile güçlenen Girişimsel Olmayan Cihaz Yükü İzleme (GOCYİ) metotları, akıllı sayaç verisindeki değişimler ile tetiklenmekte (edge detection), sayaç verisindeki kısa süreli (transient) ve uzun süreli (steady state) özellik-leri kullanarak bu değişimleri cihazlara tasnif etmektedir (classification). Elde edilen cihaz ya da son kullanım bilgileri, kullanıcıların özel hayatları ile ilgili bilgilerin çıkarı-labilmesine olanak sağlamaktadır. Evin günün hangi saatlerinde boş olduğu gibi kritik bilgilerin yanı sıra, evde kaç kişinin yaşadığı, evde yaşayanların demografik özellik-leri ve tüketim alışkanlıkları gibi ticari bilgiler de elde edilebilmektedir. Kötü niyetli

üçüncü bir kişi akıllı ölçüm veri paketlerini dinleyerek bu bilgileri elde edebileceği gibi, bu veriler direkt servis sağlayıcı tarafından da farklı amaçlar için kullanılabilir. Bu nedenle, akıllı ölçüm verilerinin kaynağında modifiye edilerek, bu iki farklı tehdite karşı da kullanıcının mahremiyetinin sağlanması gerekmektedir.

Literatürde akıllı ölçüm verisinin güvenliğini sağlamayı amaçlayan bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar tezin literatür araştırması kısmında daha ayrıntılı bir biçimde ele alınmaktadır. Literatürdeki bu çalışmalara bakıldığında, öne sürülen tekniklerin 5 ana başlık altında toplanabildiği görülmektedir. Bu ana başlıklar; birden fazla haneye ait ölçüm verilerinin homomorfik şifreleme (homomorphic encryption) yöntemleri ile şifrelenerek gönderilmesi, ölçüm verisine gürültü eklenerek verinin değiştirilmesi ve diferansiyel gizlilik (differential privacy) sağlanması, evdeki imkanlar (çizelgelenebilir cihazlar, hane içi bataryalar, yenilenebilir enerji kaynağı vb.) kullanılarak evin yükünün minimum cihaz verisi içerecek şekilde şekillendirilmesi (yük şekilleme - load shaping), ölçüm verisinin anonimleştirilmesi ve ölçüm verisinin gönderilme frekansının düşürülmesi (downsampling) olarak sayılabilir. Mahremiyet koruma teknikleri bölümünde bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları daha ayrıntılı bir şekilde ele alınmaktadır. Gerekirdiği hesaplama gücünün azlığı, halihazırda talep katılımı çerçevesinde kullanılıyor olması vb. nedenlerden dolayı, mahremiyet önleme metotlarının arasından yük şekilleme tabanlı olanlar öne çıkmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma tekniklerinin daha önce ele alınmamış şekilde bütüncül analizini mümkün kılmak ve bu teknikleri karşılaştırmalı bir biçimde analiz etmektir. Literatürdeki birçok yük şekilleme tabanlı mahremiyet çalışması, öne sürdükleri metotların literatürdeki diğer yöntemlerden mahremiyet açısından daha üstün çalıştığını iddia etmektedir. Bu tezde, literatürde sıkça bahsedilen ve referans noktası olarak kullanılan yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma metotları, ortak bir stokastik optimizasyon çerçevesi altında modellenerek, hem bu metotların optimal performansları hesaplanmış, hem de optimal performansları birbirleri ile adil biçimde kıyaslanabilmiştir. Sonrasında bu analizin kapsamı genişletilerek, yük şekilleme tabanlı mahremiyet korumanın arz tarafının (servis sağlayıcı) kendi hedeflerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bunun için, kullanıcıların amaç fonksiyonları ve servis sağlayıcının amaç fonksiyonları ortak bir stokastik optimizasyon çerçevesi altında modellenmiş, alt amaç fonksiyonlarının ağırlıkları değiştirilerek yapılan analizlerde bu alt amaç fonksiyonlarının birbirlerine göre önceliğinin artırılmasının geri kalan alt amaç fonksiyonlarını nasıl etkilediği ortaya çıkarılmıştır. Bir sonraki çalışmada, Girişimsel Olmayan Cihaz Yükü İzleme metotlarının aktif güç (real power - P) yanında reaktif

güçteki (reactive power - Q) değişimleri de özellik (feature) olarak kullandığından ve akıllı sayaçların aktif güç verisinin yanında çeşitli nedenlerle reaktif güç verisini de servis sağlayıcıya gönderdiği bilgisinden yola çıkılarak, gerçek ve reaktif güç şekilleme tabanlı mahremiyet koruma ele alınmıştır. Gerçek gücün ve reaktif gücün şekillenmesi yine bir optimizasyon programı çerçevesinde modellenmiş, sadece gerçek ya da sadece reaktif gücü şekillenmenin yeterli olmadığı, bütüncül mahremiyet çerçevesinde bu iki verinin de aynı anda şekillenmesi gerektiği ortaya konulmuştur. Son olarak da, halihazırda gelişmekte olan akıllı su ve doğalgaz ölçümü konusu ele alınmıştır. Gelecekte akıllı su ve doğalgaz ölçümünün de mahremiyet açısından tehdit oluşturacağı öngörülerek; elektriğin, suyun ve doğalgazın aynı anda şekillendirildiği bir bütüncül mahremiyet kavramı ortaya atılmıştır. Bütüncül mahremiyetin gerekli olduğunu göstermek için yine bir optimizasyon çerçevesi oluşturulmuş, bu çerçeve altında sadece elektriğin, suyun ya da doğalgazın şekillendirildiği optimal durum ile üçünün birden şekillendirildiği optimal durum karşılaştırılarak bütüncül mahremiyetin gerekli olduğu ortaya çıkarılmıştır.

1.2 Mahremiyet Koruma Tekniklerine Genel Bir Bakış

Daha önce bahsedildiği gibi, mahremiyet koruma teknikleri 5 ana başlık altında toplanabilmektedir [3]. Bu başlıklar; veriye gürültü ekleme (diferansiyel gizlilik), veri birleştirme (homomorfik şifreleme), anonimleştirme, alt-örnekleme (downsampling) ve yük şekillemedir. Bu bölümde, bu 5 mahremiyet koruma tekniği anlatılmakta ve avantajları ile dezavantajları ortaya konmaktadır.

1.2.1 Veriye gürültü ekleme - diferansiyel gizlilik

Akıllı şebekelerde mahremiyetin korunması için öne sürülen tekniklerden biri, ölçüm verisine gürültü eklenerek orijinal ölçüm verisinin bozulması (perturbation) ya da gizlenmesidir (obfuscation) [4–7]. Bu eklenen gürültü direkt olarak verinin değiştirilmesi ya da hane içi batarya kullanılarak tüketilen enerjinin değiştirilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Veriye gürültü ekleyerek mahremiyeti sağlamayı hedefleyen çalışmalardan bazıları, yüksek bir diferansiyel gizlilik [8] sağlamayı hedeflemektedirler. Diferansiyel gizlilik, aslen veri madenciliğinde kullanılan bir mahremiyet ölçütü olup, normalde birbirinin kopyası iki veritabanının bir satırında değişiklik yapılması durumunda istatistiksel olarak iki veritabanının aynı özellikleri göstermeye devam etmesi üzerine kurulmuş bir mahremiyet teorisidir.

Literatürde diferansiyel gizliliği hedefleyen bir çok mahremiyet koruma çalışması mev-

cuttur [9–17]. Ancak, diferansiyel gizlilik yöntemleri, tanım gereği çok nitelikli korelasyonları (multi-attribute correlation) ele almaması [18], gerekse izci saldırılarına (tracker attack) karşı savunmasız olması açısından eleştirilmektedir [19]. Ayrıca, gerçek elektrik kullanım verisinin değiştirilmesi verinin anlamlılığını azalttığı için akıllı şebekelerin en önemli getirilerinden biri olan yeni nesil kişiselleştirilmiş servislerin verilmesini zorlaştırmaktadır [20].

1.2.2 Veri birleştirme - homomorfik şifreleme

Veri birleştirme (data aggregation), birden fazla akıllı sayaçtan gelen veriyi birleştirip şifreleyerek bunların güvenli bir şekilde servis sağlayıcıya iletilmesini hedefler [21]. Homomorfik şifreleme ise, verinin şifrelenmiş halinin üzerinde çeşitli hesaplamalar yapılabilmesini, ve bu hesaplamaların verinin şifresiz halinde yapılan hesaplama ile aynı olmasını sağlayan şifreleme tekniklerine verilen isimdir. Dolayısıyla, homomorfik şifreleme, belli başlı işlemlerin şifrelenmiş verinin çözülmesine gerek kalmadan yapılabilmesini sağlar. İlk defa 1978’de öne sürülen homomorfik şifreleme konsepti [22], 2009’da tamamen homomorfik şifrelemenin başarılabildiğinin gösterilmesinden sonra [23] bir çok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde modern haberleşme sistemleri başta olmak üzere bir çok uygulama alanı mevcuttur.

Akıllı şebekelerde homomorfik şifrelemenin kullanılması esasına dayanan bir çok mahremiyet koruma yöntemi öne sürülmüştür [24–36]. Bu çalışmalarda kullanılan kriptografik sistemlerin arasında Paillier, Okamoto-Uchiyama, Naccache-Stern, RSA, El Gamal, Domingo-Ferrer ve Castelluccia, Mykletun, Tsudik sistemleri bulunmaktadır [37]. Ancak bu kriptografik yöntemlerin gerçekleşmesi akıllı sayaç tarafında ciddi bir hesaplama gücü gerektirmektedir [37, 38]. Bu hesaplamaların bir güvenilir üçüncü şahıs tarafından yapılması durumunda da güven probleminin servis sağlayıcıdan üçüncü şahısa kaymasından başka bir yarar elde edilmemektedir [20]. Ayrıca, evin hemen dışında çeşitli sensörlerle ya da veri paketlerini dinleyerek tüketim verisini ele geçiren hasım şahıslara karşı da önlem sağlanamamış olmaktadır.

1.2.3 Anonimleştirme

Ölçüm verilerini anonimleştirme, kullanıcı ismi ya da abone numarası yerine mahlas kullanma, kullanıcı mahremiyetini artırıcı bir yöntem olarak literatürde öne sürülen yöntemlerden biridir [21, 39]. Ancak anonimleştirme yöntemleri, şifreleme yöntemlerinde olduğu gibi, güvenilirlik problemini servis sağlayıcıdan güvenilir üçüncü şahısa kaydırmaktan başka bir işe yaramamaktadır [20]. Ayrıca, veriler anonim bir şekilde

akıllı sayaçtan servis sağlayıcıya gitse bile, hanenin hemen dışında sensör yardımı ile elektrik kullanımını ölçen, ya da paketleri dinleyen kötü niyetli şahıslara karşı bir koruma sağlamamaktadır. Ancak bu yöntemler diğer mahremiyet koruma metotlarının yanısıra destekleyici olarak gerçekleştirilerek mahremiyetin artırılmasına yardımcı olabilir.

1.2.4 Alt-örnekleme (Downsampling)

Girişimsel Olmayan Cihaz Yüğü İzleme yöntemlerinin performansı, akıllı sayaçların örnekleme frekansı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu temele dayanan literatürdeki bazı çalışmalar [40–42], ölçüm verisinin örnekleme frekansının düşürülmesinin Girişimsel Olmayan Cihaz Yüğü İzleme metotlarının performanslarının düşürülerek kullanıcı mahremiyetinin artmasına yardımcı olduğunu ortaya koymaktadır. Akıllı sayaçların örnekleme frekansının düşürülmesi (örneğin her dakika ölçüm verisi yollamak yerine ölçüm verisini saatte bir ya da günde bir yollaması) kullanıcı mahremiyetini artırmakla birlikte, akıllı şebekelerin getirdiği bir çok yeniliğin ve servisin kullanılmasını engellemektedir [20]. Örneğin, gün içerisindeki yükün profilinin çıkarılması, gün içerisindeki yük profiline göre dinamik fiyatlandırma yapılması ya da talep katılımı ile kullanıcıların talebin yoğun olduğu zamanlardaki elektrik kullanımlarını talebin yoğun olmadığı zamanlara kaydırmasını sağlama gibi avantajlar, gün içerisinde sıklıkla ölçüm verisi toplanmadan gerçekleştirilememektedir.

1.2.5 Yüğü şekilleme (Load shaping)

Akıllı şebekelerde mahremiyet koruma teknikleri arasında literatürde en çok öne sürülen yöntemlerden biri de yüğü şekillemedir [43–69]. Bu yöntemde hanenin gün içerisindeki elektrik tüketimi; batarya, şarjlı elektrikli araç, yenilenebilir enerji kaynağı, çizelgelenebilir cihazlar kullanılarak; ölçüm verisinde cihazlar hakkında mümkün olan en az veri olacak şekilde şekillendirilir. Böylece, ölçüm verisi hiçbir şifreleme ya da oynama olmadan gönderilse bile kullanıcı mahremiyeti sağlanmış olur. Ayrıca, gerçek tüketim verisi servis sağlayıcıya yollanarak verilerin doğru bir biçimde analiz edilebilmesine olanak yaratılmaktadır. Bunun yanında, akıllı sayaçlar ölçüm verilerini rahatlıkla sık aralıklarla gönderebilmekte, böylece arıza ve kaçak kullanım tespiti, dinamik fiyatlandırma, talep katılımı gibi hizmetler etkin bir biçimde verilmeye devam edilebilmektedir.

Literatürde sıkça çalışılmış olması, talep katılımı konseptinde elektrikli cihaz çizelgelenmenin halihazırda var olması, hem servis sağlayıcıya hem de kapının hemen dışın-

daki kötü niyetli şahıslara karşı etkili olması, servis sağlayıcıya ölçüm verisinin sık aralıklarla ve doğru bir biçimde gönderilmesine imkan tanınması açısından yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma metotları diğerlerine kıyasla bir adım öne çıkmaktadır. Bu tezde de, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı mahremiyet için yük şekilleme tabanlı stratejiler ele alınmıştır. Bir sonraki bölümde literatürdeki yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma çalışmaları ile ilgili özet bilgiler sunulmaktadır.

1.3 Literatür Araştırması

Literatürde akıllı şebekelerde mahremiyet ve güvenlik ile ilgili çalışmaları özetleyen bir çok çalışma [70–80] bulunmaktadır. Hatta halihazırdaki literatür tarama makalelerinin sayısının çokluğundan ötürü, bu literatür taramalarını tarayan çalışmalar da mevcuttur [81]. Bu gözden geçirme makalelerinde, akıllı şebekenin yapısı ve akıllı şebeke içerisindeki haberleşme ağı yapısı ve bileşenleri tanıtılmakta, sonrasında akıllı şebekelere yönelik mahremiyet tehditleri ve senaryolar (use case) tanımlanmakta, daha sonra da bu tehditleri bertaraf etmeye yönelik literatürdeki çalışmalar özetlenmekte ve kategorize edilmektedir. Akıllı şebekelerde genel siber güvenlik ve mahremiyet tehditleri ve bunlara yönelik alınabilecek önlemler, bu çalışmalarda ayrıntılı bir şekilde işlenmektedir. Bu tezdeki literatür araştırmasında ise, bu tezin konusu olan yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma teknikleri ile ilgili olan makalelere odaklanılmıştır. Böylece literatür araştırmasının kapsamının tez ile örtüşmesi sağlanmıştır.

Literatürdeki yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma teknikleri arasında Kalogridis ve ark. [43], McLaughlin ve ark. [44], Ge ve ark. [45], Yang ve ark. [46], öne sürdükleri buluşsal (heuristic) yöntemlerle öne çıkmışlardır. Literatürde daha sonra gelen makalelerin çoğu, bu buluşsal algoritmaların mahremiyet performansını kendi öne sürdükleri metotların performansı ile karşılaştırmışlardır. Referans [43]'te öne sürülen teknik, ilgili çalışmada "Best Effort" (en iyi gayret) olarak adlandırılmıştır. Bu teknikte, hane içerisinde olduğu varsayılan batarya kullanılarak gün içerisinde şebekeden çekilen gücün gün içerisinde mümkün olduğunca sabit olmasına çalışılmaktadır. Mahremiyet ölçüsü olarak üç farklı metrik kullanılmıştır. İlk olarak bilişim kuramında kullanılan bir metrik olan Kullback-Leibler uzaklığı (Kullback-Leibler divergence) mahremiyetin hesaplanmasında kullanılmıştır. Daha sonra, küme analizi (cluster analysis) yöntemi ile En İyi Gayret (EİG) metodunun cihaz izlerini saklama performansı ölçülmüştür. Son olarak da regresyon analizi (regression analysis) metodu kullanılarak ölçülen yük ile gerçek yükün arasındaki fark istatistiksel olarak hesaplanmıştır. 250W/500Wh, 500W/1kWh, 1KW/2kWh ve 2KW/4kWh kapasitelere sahip bataryalar için EİG algoritması çalıştırılarak batarya kapasitesinin EİG metodunun performansını nasıl etkilediği ortaya konmuştur.

McLaughlin ve arkadaşları [44] tarafından öne sürülen buluşsal metotta ise, bir evin gün içerisinde şebekeden çektiği güçteki değişim sayısı minimize edilmeye çalışılmaktadır. EİG metoduna benzer bir şekilde, hane içi bataryalar evin çektiği gücü şekillendirmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada 6kWh'lik (50Ah - 120V) bir bataryanın evde halihazırda olduğu varsayılmıştır. Çalışmada öne sürülen girişimsel olmayan yük düzleştirme (Nonintrusive Load Leveling - NILL) algoritmasının performansı, normalde evin şebekeden çektiği güç ile NILL sonrası şebekeden çektiği gücün özellik (feature) sayıları karşılaştırılarak yapılmıştır. Bunun nedeni de NIALM metotlarının ölçülen yükteki özelliklere göre cihazları tanımlayabilmesidir. Bunun yanında, [44] çalışmasında deneysel (empirical) entropi de bir performans ölçütü olarak kullanılmıştır. Buradaki mantık, NILL öncesi ve sonrasındaki zaman serisi (time series) verilerin entropilerinin, bu verilerden çıkarılabilecek maksimum veri miktarını gösteriyor olmasıdır. Bu ve benzeri bilişim kuramı temelli mahremiyet ölçütleri bu konuda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda tercih edilmektedir.

Kalogridis ve McLaughlin tarafından yayımlanan çalışmalar sonrasında, buluşsal mahremiyet koruma algoritma türetme çalışmaları hız kazanmış, yapılan çalışmalar performanslarını genelde bu iki çalışma ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalar arasında öne çıkan bir tanesi, Yang ve arkadaşları [46] tarafından yayımlanan çalışmadır. Bu çalışmada, basamaklandırma (stepping) tabanlı buluşsal mahremiyet koruma stratejileri öne sürülmüştür. Basamaklandırma algoritmalarında, akıllı sayaçlar tarafından ölçülen yük sadece belli ayırık (discrete) değerler arasında değişebilecek şekilde cihazlar ve batarya çizelgenmektedir. Böylece, hem ölçülen yükte cihazlara özgü olan değişimlerin gizlenmesi, hem de EİG ve KS'ye göre ölçülen yükün alabileceği değerler daha fazla olduğu için daha uygulanabilir bir metot olması hedeflenmiştir. Bu çalışmada basamaklandırma algoritmalarının performansları, referans [43]'teki EİG ve referans [44]'teki Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme (GOYD) ile karşılaştırılmıştır. Basamak büyüklüğünün kullanılan bataryanın şarj/deşarj hızına bağlı olarak belirlendiği bu çalışmada, hane içi bataryanın kapasitesinin 0.5kWh olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada basamaklandırma algoritmasının performansı karşılıklı bilgi (mutual information) cinsinden, EİG ve GOYD algoritmaları ile, farklı elektrik kullanım verisi setleri için ve farklı batarya kapasiteleri için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak basamaklandırma algoritmalarının genel olarak EİG ve GOYD'a göre daha düşük karşılıklı bilgi içerdiği gösterilmiştir.

Kalogridis ve ark. ile McLaughlin ve ark. yayınlarından esinlenen benzeri çalışmaların en önemlilerinden biri Ge ve arkadaşları tarafından yayımlanan Katlanılır Sapma (Tolerable Deviation - TD) algoritmasıdır [45]. Katlanılır Sapma (KS) algoritması, EİG metodundan farklı bir şekilde, ölçülen yükteki küçük değişimlerin (Örneğin; 80W) cihazların çalışma izleri ile ilgili bilgi içermediği ve bu yüzden bu değişimlerin hoşgö-

rülebileceği mantığı üzerine kurulmuştur. Böylece, EİG metoduna göre ölçülen yükün değişimindeki kısıt biraz daha gevşetilmiş ve ortaya çıkan KS metodunun EİG'ye göre daha iyi mahremiyet performansı sunduğu iddia edilmiştir. Yapılan simülasyonlarda 0 ila 5kWh arasında değişen batarya kapasiteleri varsayılmış, ve tolere edilecek değişim 0 - 300W arasında değişecek şekilde çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. EİG ile KS'nin performans karşılaştırmaları, ölçülen yükteki (tolere edilemeyen) değişim sayısı, ve ölçülen yük ile cihazların kullandığı güç arasındaki karşılıklı bilgi (mutual information) cinsinden yapılmıştır. Ayrıca, KS metodunun farklı tolerasyon seviyelerine göre karşılıklı bilgi performansı ölçülmüş olup, karşılıklı bilgedeki en düşük değerlerin tolerasyon seviyesinin 80W ila 200W arasında olduğu durumlarda elde edildiği bildirilmiştir.

Kalogridis, McLaughlin, Yang ve Ge'nin ortaya koyduğu yöntemlerden sonra, akıllı şebekelerde yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma çalışmaları hız kazanmıştır. Zhao ve ark. [16] çalışmalarında ölçülen yükte hane içi bataryayı kullanarak rastgele değişimler uygulayarak mahremiyeti sağlamayı hedeflemiştir. Bunu yaparken, daha önce bahsedilen veriye gürültü ekleme metodlarındaki gibi diferansiyel gizliliği hedeflemiştir. Egarter ve ark. [47] hane içi batarya yerine kaydırılabilir cihazları (çalışma zamanı ve/veya gücü gün içerisinde değiştirilebilir cihazlar) çizelgeleyerek kullanıcı mahremiyetini sağlamayı ele almıştır. Chen ve ark. [48, 49] da hane içi batarya kullanmak yerine ısı depolamayı (thermal storage) kullanarak ölçülen yükü şekillemeyi hedef almıştır. Bu çalışmada cihazların çektiği güçten daha fazla güç çekilmesi gerektiğinde, bu fazla elektrik hanenin sıcak su deposundaki suyu ısıtmada kullanılmıştır. Böylece konvansiyonel bir batarya yerine sıcak su deposu kullanılarak da mahremiyetin artırılacağı gösterilmiştir. Reinhardt ve ark. [50], hane içi bataryalar ya da kaydırılabilir cihazları kullanmak yerine evlerdeki yenilenebilir (fotovoltaik) enerji kaynağını kullanarak elektrik kullanımındaki cihaz izlerinin gizlenebileceğini göstermişlerdir. Liu ve ark. [51] birden fazla bataryanın kullanıcı mahremiyeti için kademeli olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Giaconi ve ark. ile Tan ve ark. [52, 53] hem hane içi bataryanın hem de yenilenebilir enerji kaynağının olduğu durumda yük şekilleme ile mahremiyetin ne kadar artırılabilirdiği üzerine çalışmışlardır. Sun ve ark. [54, 55], hane içi bataryaların yanısıra şarjlı elektrikli araç (plug-in electric vehicle) ve havalandırma (HVAC) gibi cihazları birer batarya gibi kullanarak kullanıcı mahremiyetinin artırılacağı göstermişlerdir. Moon ve ark. [56] hane içi bataryanın hem mahremiyet için hem de kullanıcı maliyetini (elektrik tüketim bedelini) düşürmek için kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Yine Moon ve ark. [57] bir talep katılımı (demand response) senaryosunda birden fazla evin mahremiyetini sağlayacak şekilde evlerin optimal cihaz çizelgelerini çıkarmışlardır. Bu çalışmada, cihazlar kaydırılabilirlik seviyelerine göre (elastik ve inelastik olarak) sınıflandırılmış ve bu cihaz özelliklerine göre çizelgeler

elde edilmiştir. Liu ve Cheng [58] kullanıcıların mahremiyetinin yanında maliyetlerini ve konforlarını da ele alan bir optimizasyon modeli öne sürmüşlerdir. Bu model hane içi batarya ve kaydırılabilir cihazlar da göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Tan ve ark. [59, 60] talep tarafı yönetiminde (demand side management) mahremiyet ve maliyetin optimizasyonundaki ödünleşmeyi (trade-off) ele almışlardır. Işıkman ve ark. [61] kullanıcıların mahremiyetini ve faydalarını (utiliy) ortaklaşa bir optimizasyon problemi çerçevesinde ve hane içi bataryalar ile yenilenebilir enerji kaynaklarını da göz önünde bulundurarak incelemişlerdir.

Yük şekilleme ile akıllı şebekelerde mahremiyeti sağlamak için nasıl teknikler uygulanabileceği ile ilgili de literatürde bir çok çalışma yapılmıştır. Li ve ark. [62, 63] ile Erdemir ve ark. [64] kullanıcılar için optimal mahremiyet koruma stratejisini araştırırken mahremiyet optimizasyonunu bir Markof karar süreci (Markovian decision process) olarak tanımlamışlar ve optimal stratejileri bu süreç üzerinden incelemişlerdir. Chen ve Wu [65] ile Yang ve ark. [66] hane içi bataryaları ve kaydırılabilir cihazları kullanan çevrimiçi (online) mahremiyet koruma metotları öne sürmüşlerdir. Bu çalışmalarda, optimal ya da optimale yakın stratejiler akıllı sayaçların ölçüm periyodlarına göre her periyotta güncellenerek çizelgeleme gerçek zamanlı olacak şekilde yapılmaktadır. Koo ve ark. [67] hane içi bataryanın kullanıcı maliyetini düşürecek ve mahremiyetini artıracak biçimde kontrol edilmesi için bir takviyeli öğrenme (reinforcement learning) metodu öne sürmüşlerdir. Hossain ve ark. [68] ile Natgunanathan ve ark. [69] kullanıcıların mahremiyetini hane içi batarya vasıtasıyla artırmak için çevrimiçi ve çevrimdışı metotlar öne sürmüşlerdir. Buraya kadar özetlenen çalışmalardan da görülebileceği gibi, akıllı şebekelerde mahremiyet koruma tekniklerini ortak bir paydada buluşturabilecek ve bu tekniklerin performanslarını adil bir biçimde ölçebilecek bir altyapı literatürde bulunmamaktadır. Bu tezin 2. bölümündeki çalışmada literatürdeki bu boşluk doldurulmuştur. Literatürde performans kıyaslamak için en çok kullanılan mahremiyet koruma stratejileri ortak bir stokastik optimizasyon çerçevesinde modellenmiş; hane içi bataryalar, yenilenebilir enerji kaynakları, kaydırılabilir cihazlar gibi imkanların hepsi modele dahil edilerek gerçekçi ve adil bir ortamda bu metotların performansı incelenmiştir. Kullanıcı mahremiyetinin yanında kullanıcı maliyeti ve kullanıcı memnuniyeti de ele alınmış, bu üç alt amaç fonksiyonu ortaklaşa bir biçimde optimize edilerek aralarındaki ödünleşme (trade-off) açığa çıkarılmıştır [82].

Bu tez çalışmasının 3. bölümünde kullanıcıların alt amaç fonksiyonlarının yanında, servis sağlayıcının (utility provider) da alt amaç fonksiyonları ele alınmıştır. Literatürde akıllı şebekelerde talep katılımını kontrol etmeyi hedefleyen çalışmalara bakıldığında, bu çalışmalardan hiçbirinin hem alt amaç fonksiyon sayısı bakımından, hem de dahil edilen imkanların fazlalığı bakımından bu tezdeki kadar kapsamlı olmadığı görülmektedir [83]. Talep tarafı yönetiminde yapılmış olan ilk çok amaçlı çalışma

Mohsenian-Rad ve ark. tarafından yapılmıştır [84]. Bu çalışmada, kullanıcıların maliyeti ile, servis sağlayıcının amaçlarından biri olan gün içerisindeki tepe-ortalama güç talebi oranı (peak-to-average power ratio - PAR) ortaklaşa minimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada kullanıcı maliyetini ve PAR'ın minimizasyonu için kaydırılabilir cihazlardan faydalanılmaktadır. Akıllı şebekelerde büyük ölçekli optimizasyon problemlerinin çözümü için bir yöntem sunan Chen ve ark. [85], çalışmalarında sundukları yöntem ile kullanıcı maliyetini ve yine servis sağlayıcının amaç fonksiyonlarından biri olan gün içerisindeki yük talebindeki değişimi ortaklaşa minimize etmektedirler. Bunu yaparken, hane içi bataryalardan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmaktadırlar. Kullanıcı mahremiyetini de göz önünde bulunduran ilk çalışma Chen ve ark. tarafından yapılan çalışmadır [65]. Burada kullanıcı maliyeti ve kullanıcı mahremiyeti, hane içi bataryalar ve kaydırılabilir cihazlar kullanılarak çevrimiçi bir biçimde optimize edilmektedir. Bu çalışmada servis sağlayıcıya ait herhangi bir amaç fonksiyonu göz önüne alınmamış olduğu gibi, yenilenebilir enerji kaynağı da kullanılmamıştır. Salinas ve ark. tarafından yayımlanan çalışmada ise [86], kullanıcı maliyeti ile kullanıcı konforu (utility) göz önünde bulundurulmuş, optimizasyon çerçevesi oluşturulurken kaydırılabilir cihazlar da ele alınmıştır. Ancak bu çalışmada da servis sağlayıcıya ait amaç fonksiyonları ve hane içi batarya, yenilenebilir enerji kaynağı gibi imkanlar göz önüne alınmamıştır. Joo ve ark. [87] çalışmalarında kullanıcı maliyeti ve kullanıcı mahremiyetinin yanı sıra servis sağlayıcının maliyetini de ortaklaşa optimize etmişlerdir. Cihazların çizelgelendiği bu çalışmada kaydırılabilir cihazlar göz önünde bulundurulmuş, ancak batarya ve yenilenebilir enerji göz önünde bulundurulmamıştır. Kullanıcı mahremiyetinin de ele alınmadığı bu çalışmada, optimizasyon problemi Lagrange analizi (Lagrange decomposition) ile çözdürülmüştür. Liu ve ark. [88] tarafından yapılan çalışma, bu literatür taramasındaki en kapsamlı çok amaçlı optimizasyon çalışmasıdır. Bu çalışmada; kullanıcı maliyeti, kullanıcı memnuniyeti (utility), ve servis sağlayıcının minimum PAR amacı ortaklaşa optimize edilmiştir. Bu çalışmada kaydırılabilir cihazlar da göz önünde bulundurulmuştur. Ancak, bahsi geçen çalışmada bile bu tezde ele alınan hane içi bataryalar, yenilenebilir enerji kaynakları ve de en önemlisi kullanıcı mahremiyeti alt amaç fonksiyonu kapsam dışı kalmıştır. Daha sonrasında, Shadmand ve ark. [89], servis sağlayıcının maliyeti minimum olacak şekilde kullanıcı memnuniyetini (utility) maksimize etmeye çalışmıştır. Merkezi bir bataryanın ve yenilenebilir enerji kaynağının varsayıldığı bu çalışmada, problem oyun teoretik bir şekilde çözülmeye çalışılmıştır. Kullanıcı maliyeti ve kullanıcı mahremiyeti göz önünde bulundurulmadığı gibi kaydırılabilir cihazlar da bu çalışmada kullanılmamıştır. Anvari-Moghaddam ve ark. [90] kullanıcı maliyetini ve kullanıcı konforunu, kaydırılabilir cihazların ve hane içi bataryaların olduğu bir senaryoda ortaklaşa ele almıştır. Servis sağlayıcının amaçlarının ve kullanıcı mahremiyetinin ele alınmadığı bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da göz önünde bulundurulmamıştır.

Bir başka çalışmalarında [91] yenilenebilir enerjiyi de göz önünde bulundurmalarına rağmen, Anvari-Moghaddam ve ark. bu çalışmada da kullanıcı mahremiyeti ile servis sağlayıcıların amaçlarını dikkate almamışlardır. Yang ve ark. [66] ile Moon ve ark. [56] çalışmalarında kullanıcı maliyetini ve mahremiyetini ortaklaşa optimize etmişlerdir. Hane içi bataryaların varsayıldığı bu çalışmalarda, yenilenebilir enerji kaynakları ya da kaydırılabilir cihazlar kullanılmadığı gibi, servis sağlayıcıya ait amaçlar da göz önüne alınmamıştır. Tan ve ark. [59] ile Sun ve ark. [54] ek olarak kaydırılabilir cihazları da kullanarak daha iyi kullanıcı maliyeti ve mahremiyeti elde etmeye çalışmışlardır. Ancak bu çalışmalar da servis sağlayıcıyla ilgili amaç fonksiyonlarını ve yenilenebilir enerjiyi dikkate almamışlardır. Shafie-kah ve ark. [92] çalışmalarında kullanıcı ve servis sağlayıcı maliyetini ve konforunu ortaklaşa optimize etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada da kullanıcı mahremiyeti dikkate alınmamıştır. Lu ve ark. [93] kullanıcı maliyetini ve konforunu ortaklaşa optimize eden bir optimizasyon altyapısı ortaya koymuşlardır. Işıkman ve ark. [61] çalışmalarında kullanıcı mahremiyetini ve konforunu ortaklaşa optimize ederken, hane içi bataryaları, yenilenebilir enerji kaynağını ve kaydırılabilir cihazları da göz önünde bulundurmuşlardır. Ancak servis sağlayıcıya ait amaç fonksiyonları bu çalışmada ele alınmamıştır. Lokeshgupta ve ark. [94] yayımladıkları makalede kullanıcı maliyetini ve servis sağlayıcının amaçlarından olan yük talebindeki değişimi cihazları çizergeleyerek ortaklaşa optimize etmektedirler. Kullanıcı maliyeti ve konforunun ele alınmadığı bu çalışmada, hane içi batarya ve yenilenebilir enerji gibi imkanlar da göz önünde bulundurulmamıştır. Ruzbahani ve ark. [95] çalışmalarında kullanıcı maliyeti ve konforunun yanı sıra servis sağlayıcının PAR amacını da göz önünde bulundurmuşlardır. Kullanıcı mahremiyeti ve yük talebindeki değişimin ele alınmadığı çalışmaya, yenilenebilir enerji kaynakları ve hane içi bataryalar da eklenmemiştir. Moon ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında [57] ise kullanıcı maliyeti, mahremiyeti ve konforu, cihazlar çizergeleterek ortaklaşa optimize edilmiş; ancak servis sağlayıcının amaçları, hane içi bataryalar ve yenilenebilir enerji göz ardı edilmiştir. Son olarak da Li ve ark. [96] çalışmalarında kullanıcı maliyetini, kullanıcı konforunu ve servis sağlayıcının PAR amaç fonksiyonunu ortaklaşa optimize ederken, yenilenebilir enerji kaynaklarını ve kaydırılabilir cihazları kullanmışlardır. Bu çalışmada da, hane içi bataryalar ve kullanıcı mahremiyeti çalışılmamıştır. Literatürdeki çok amaçlı optimizasyon çalışmalarının her biri talep katılımının belirli bir yönünü çalışırken, hiçbiri kullanıcının ve servis sağlayıcının tüm amaç fonksiyonlarını ortaklaşa ele almamıştır. Bu tezin 3. bölümündeki çalışma bu amaç fonksiyonlarının hepsini ele alırken, aynı zamanda hane içi bataryaları, yenilenebilir enerji kaynaklarını ve kaydırılabilir cihazları da göz önünde bulundurarak bu konuda literatürde daha önce ele alınmamış kapsamlı bir analiz sunmaktadır.

2. AKILLI ŞEBEKELERDE YÜK ŞEKİLLEME TABANLI MAHREMİYET KORUMA STRATEJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

2.1 Çalışmanın Amacı

Literatürde Girişimsel Olmayan Cihaz Yüğü İzleme (Nonintrusive Appliance Load Monitoring - NIALM) tekniklerine karşı kullanıcı mahremiyetini sağlayabilmek için bir çok buluşsal (heuristic) yük şekilleme yöntemi öne sürülmüştür (Bkz: Bölüm 1.3 Literatür Araştırması). Ancak, bu yöntemlerin optimal performanslarını birbirleri ile karşılaştıran bir çalışma veya bu karşılaştırmayı mümkün kılacak bir matematiksel model öne sürülmemiştir. Bu bölümdeki amaç, literatürde sıklıkla referans verilen yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma tekniklerinin adil bir şekilde karşılaştırılabileceği bir matematiksel model oluşturmak, ve bu model ile bahsi geçen tekniklerin tarafsız bir şekilde performanslarının karşılaştırılabilmesini sağlamaktır.

2.2 Problem Formülasyonu

Amacımız, temel talep katılımı (demand response) gereksinimlerini karşılayan, kullanıcı maliyeti ve kullanıcı konforunun (utility) yanı sıra kullanıcı mahremiyetini de ele alan bir model oluşturmaktır. Bunun için, temel bir matematiksel model oluşturulup, ilgili mahremiyet koruma teknikleri bu modele uygun bir şekilde modellenerek optimizasyon problemi çözdürülmekte, ve böylece her bir mahremiyet koruma tekniği için optimal sonuçlar elde edilmektedir.

2.2.1 Temel matematiksel model

Matematiksel programlama çerçevesi Şekil 2.1’de verilmektedir. Modelde kullanılan sembollerin ve kısıtların açıklamaları ilerleyen paragraflarda ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Temel matematiksel model, doğrusal (linear) bir biçimde oluşturulmuştur. Böylece, modelin simpleks gibi yöntemlerle çözülebilir olması sağlanmaktadır.

Şekil 2.1’deki formülasyonda, s indeksi senaryoları temsil etmektedir. Her bir senaryo, yenilenebilir enerji kaynağının bir günlük örnek enerji üretimini temsil eder. Gerçek hayatta yenilenebilir enerji kaynağının gün içerisindeki zaman dilimlerinde ne kadar

güç sağlayabileceği önceden bilinmemektedir. Ancak, bu çalışmada her bir mahremiyet stratejisinin optimal çevrimdışı değerlerini bulmak hedeflenmiştir. Bu yüzden yenilenebilir enerjiden kaynaklanan belirsizliği matematiksel modele katabilmek için farklı senaryolar ve bu senaryoların gerçekleşme ihtimalleri modelde kullanılmıştır. Bu yönetime literatürde olasılıksal optimizasyon (stochastic optimization) denmektedir. Her bir senaryonun gerçekleşme ihtimali ρ_s ile belirtilmiştir. Dolayısıyla, Şekil 2.1'deki modelde aslında her bir amaç fonksiyonunun senaryolar üzerinden beklenen değeri (expected value) minimize edilmektedir.

Amaç fonksiyonumuz (2.4) Q_s değişkeninin beklenen değerini minimize etmeye çalışmaktadır. Bu değişkenin neyi temsil ettiği ise (2.6)'dan anlaşılmaktadır. Q_s değişkeni, $G_i(s)$ alt amaç fonksiyonlarının kendi optimal değerlerinden ($G_i(s)^*$) orantısız sapmaları tarafından alttan sınırlandırılmıştır. Bu tip formülasyon literatürde min-max optimizasyon olarak geçmektedir. Çok amaçlı optimizasyonda sıklıkla kullanılan bu yöntem, tek bir optimale gitmeyen (çelişen alt amaç fonksiyonlarına sahip) problemlerde, Pareto verimli (Pareto efficient) sonuçlar elde etmek için kullanılır. Alt amaç fonksiyonlarımız; kullanıcının enerji maliyetini minimize etmek, kullanıcının cihazlarının çalışma zamanlarının değişmesinden kaynaklanan rahatsızlığı minimize etmek ve kullanıcının mahremiyetini maksimize etmektir. Burada mahremiyetin yanında maliyet ve konforu da ele almamızın nedeni, maliyet ve konfor amaçlarının talep tarafı yönetiminin (demand side management) temel amaçları olmasıdır. Talep tarafı yönetimi, kullanıcılara çeşitli teşvikler (gün içerisinde değişen enerji fiyatları gibi) sunarak gün içerisindeki maksimum talebi azaltmaya çalışır. Teşviklerden yararlanmak isteyen kullanıcılar cihaz kullanımlarını buna uygun olarak çizelgeleyerek maliyetlerini düşürmekte, ancak cihazlarını istedikleri zamanda çalıştıramadıkları için konforlarında belli bir düşüş olmaktadır. Bu çalışmada, bu iki çelişen amaca ek olarak kullanıcıların mahremiyeti eklenmiştir. Bu amaçlar matematiksel olarak aşağıdaki gibi modellenmiştir:

1. Elektrik kullanım maliyetini minimize et: $G_1(s) = \sum_{t=1}^T c_t \cdot p_{s,t}^c$.
2. Cihazların operasyonlarını geç tamamlamalarından kaynaklanan rahatsızlığı minimize et: $G_2(s) = \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A \phi_{a,t} \cdot p_{a,s,t}^{ca}$. Burada, her bir cihazın her zaman dilimindeki elektrik kullanımı, zamana bağlı olarak geometrik artan bir ceza katsayısı ile ($\phi_{a,t}$) çarpılmaktadır. Bu ceza katsayısı bir değişken değil bir parametre olduğu için, formülasyonun doğrusallığını ihlal etmemektedir.
3. Ölçülen yükte bulunan cihazlar ile ilgili bilgiyi saklayarak mahremiyeti maksimize et: $G_3(s) = \sum_{t=1}^T F(t,s)$. Burada $F(t,s)$, t anında ve s senaryosunda ölçülen yükteki cihaz elektrik kullanım izlerini temsil eder. Bu fonksiyon her bir

mahremiyet koruma stratejisi için ayrı ayrı formüle edilmiştir. Böylece, temel matematiksel modelin her bir strateji için kullanılabilmesi sağlanmıştır.

Bu üç amaç fonksiyonunu ortaklaşa optimize etmek için (2.1)'deki gibi üçünün toplamını tek bir amaç fonksiyonu olarak ifade etmek sağlıklı bir yaklaşım değildir. Bunun nedeni, her bir alt amaç fonksiyonunun birimlerinin, minimum-maksimum değerlerinin ve karakteristiklerinin farklı olmasıdır. Bu nedenle (2.1)'deki gibi bir amaç fonksiyonunun optimal değeri herhangi bir eniyilik ölçütü (optimality criteria) sağlamamaktadır.

$$\sum_{s=1}^S \rho_s (\gamma_1 \cdot G_1(s) + \gamma_2 \cdot G_2(s) + \gamma_3 \cdot G_3(s)) \quad (2.1)$$

Mahremiyet stratejilerinin yanı sıra bu üç alt amaç fonksiyonunun da birbirleri üzerindeki etkilerini inceleyebilmek ve bunları adil bir şekilde karşılaştırabilmek için hedef programlama (goal programming) anlayışı [97] benimsenmiştir. Her bir alt amaç fonksiyonunu bir katsayıyla çarpıp toplamak yerine, amaç fonksiyonlarının tekil optimal değerlerinden ($G_i(s)^*$) sapmaları katsayılandırılmıştır (Bkz: (2.2)). Böylece, kullanıcının bu alt amaç fonksiyonlarından birini diğerinden daha önemli hale getirmesi modellenebilmektedir.

$$\frac{G_i(s) - G_i(s)^*}{G_i(s)^*} \quad (2.2)$$

Daha önce bahsedildiği gibi, bu bölümde çalışılan 3 amaç fonksiyonu birbirleri ile çelişen fonksiyonlar olduğu için, (2.2) ifadesinin her bir alt amaç için toplamını minimize etmek genel optimumu vermeyecektir. Ancak minimaks formülasyonu 2.3 kullanılarak elde edilecek sonuçların Pareto verimli olması sağlanabilmektedir.

$$\text{Minimize} \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot \max_{i \in \{1,2,3\}} \left\{ \gamma_i \cdot \frac{G_i(s) - G_i(s)^*}{G_i(s)^*} \right\} \quad (2.3)$$

(2.3)'teki ifadenin doğrusallaştırılabilmesi için, (2.4)'teki gibi bir Q_s değişkeni tanımlanmış, ve (2.5) kısıtı formülasyona eklenmiştir.

Şekil 2.1'deki optimizasyon probleminin çözülebilmesi için, öncelikle $G_i(s)^*$ değerlerinin 3 alt amaç fonksiyonu için bulunması gerekmektedir. Bunun için, öncelikle her bir $G_i(s)$ 'nin optimal değeri Şekil 2.1'deki (2.6)-(2.16) kısıtları kullanılarak bulunmakta, daha sonra bu bulunan değerler $G_i(s)^*$ olarak Şekil 2.1'deki formülasyona eklenmektedir. (2.6) kısıtı her bir cihaz için, o cihazın çalışma süreleri dışında kullandığı enerji

miktarının 0 olmasını dikte eder. (2.7) kısıtı cihazların çektiği güç miktarının o cihazın çekmesi gereken maksimum güçten fazla olmasını engeller. (2.8) kısıtı cihazların operasyonlarını tamamlamaları için harcamaları gereken enerjiyi kullanmalarını sağlar. (2.9) kısıtı güç dengesi kısıtıdır. Bu kısıt, şebekeden çekilen gücün, cihazlarca harcanan güç ile batarya tarafından çekilen gücün toplamından, batarya tarafından salınan güç ile yenilenebilir enerji kaynağınca sağlanan gücün farkı kadar olmasını sağlar. Burada η^c ve η^d , bataryanın şarj/deşarj verimliliğini temsil etmektedir. (2.10) ve (2.11) kısıtları bataryanın şarjının minimum ve maksimum kapasitesi ($[0, E_b^{max}]$) aralığında kalmasını sağlar. Bataryanın ne kadar güç çekebileceği ya da güç salabileceği ise (2.12) ve (2.13) ile sınırlandırılmıştır. (2.14) kısıtı günün başlangıcında ve sonunda bataryada aynı miktarda enerji kalmasını sağlamaktadır. Modelimiz bir günlük bir süreyi kapsadığı için, bu kısıt bataryanın bir sonraki gün için de kullanılabilirliğini korumasını sağlar. (2.15) kısıtı evin şebekeden çekebileceği maksimum gücü sınırlar. (2.16) ise güç değişkenlerinin pozitif olmasını sağlar.

Bir sonraki bölümde, literatürde sıkça bahsi geçen buluşsal yük şekilleme tekniklerinin matematiksel olarak ($F(t,s)$) nasıl modellendiği anlatılmaktadır. Bu teknikler, ilgili çalışmalarda [43–46, 54, 65] algoritma olarak sunulmuş ve çeşitli simülasyonlar sonucu performansları birbirleri ile sınırlı bir kapsamda karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ise, bu teknikleri matematiksel olarak modelleyerek optimal çevrimdışı performanslarının adil bir zeminde karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Hane içi bataryalar, kaydırılabilir cihazlar ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi imkanlar da modelde göz önünde bulundurulmaktadır. Yenilenebilir enerjiden kaynaklanan belirsizlik ise olasılıksal optimizasyon teknikleri kullanılarak modellenmektedir.

2.2.2 En İyi Gayret (Best Effort) stratejisi

En İyi Gayret (Best Effort) stratejisi, Kalogridis ve arkadaşları [43] tarafından öne sürülmüş buluşsal bir yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma metodudur. Adından da anlaşılacağı üzere, bu metot her zaman aralığında evin çektiği gücün, evin bir önceki zaman aralığında çektiği güce mümkün olduğunca yakın olmasını sağlamaya çalışır. Bunu, zaman-kaydırılabilir (time-shiftable) veya güç-kaydırılabilir (power-shiftable) cihazların operasyonlarını zaman ve güç ekseninde kaydırarak, ve evlerde kullanıldığını varsaydığı hane içi bataryaları (household batteries) kullanarak yapar. İdeal koşullarda (batarya kapasitesinin her zaman için yeterli düzeyde olduğu varsayımıyla), bu tekniği kullanan bir evin şebekeden çektiği güç gün boyunca sabit bir değer olacaktır. Dolayısıyla, akıllı sayaç tarafından ölçülen verilerde cihaz operasyonları ile ilgili hiçbir bilgi olmayacaktır. Batarya kapasitesinin sınırlı olduğu durumlarda ise, bu teknik batarya kapasitesinin aşılması ya da bataryanın tamamen boşalması durumunda

Minimize

$$\sum_{s=1}^S \rho_s Q_s \quad (2.4)$$

Subject to:

$$\gamma_i \cdot \frac{G_i(s) - G_i(s)^*}{G_i(s)^*} \leq Q_s, \quad \forall s, i \in \{1, 2, 3\} \quad (2.5)$$

$$p_{a,s,t}^{ca} = 0, \quad \forall a, \forall s, \forall t \notin [\alpha_a, \beta_a] \quad (2.6)$$

$$p_{a,s,t}^{ca} \leq P_a^{max}, \quad \forall a, s, t \quad (2.7)$$

$$\Delta T \cdot \sum_{t=1}^T p_{a,s,t}^{ca} = E_a, \quad \forall a, s \quad (2.8)$$

$$p_{s,t}^c = \sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca} + p_{s,t}^{cb} / \eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d - P_{s,t}^g, \quad \forall t, s \quad (2.9)$$

$$E^{bi} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{cb} - \sum_{t=0}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{db} \leq E^{bmax}, \quad \forall \tau, s \quad (2.10)$$

$$E^{bi} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{cb} - \sum_{t=0}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{db} \geq 0, \quad \forall \tau, s \quad (2.11)$$

$$p_{s,t}^{cb} \leq R^{cbmax}, \quad \forall t, s \quad (2.12)$$

$$p_{s,t}^{db} \leq R^{dbmax}, \quad \forall t, s \quad (2.13)$$

$$\sum_{t=1}^T p_{s,t}^{cb} = \sum_{t=1}^T p_{s,t}^{db}, \quad \forall s \quad (2.14)$$

$$p_{s,t}^c \leq P^{max}, \quad \forall t, s \quad (2.15)$$

$$p_{s,t}^c, p_{a,s,t}^{ca}, p_{s,t}^{cb}, p_{s,t}^{db} \geq 0 \quad (2.16)$$

Şekil 2.1: Temel matematiksel model.

cihazlar için gerekli enerjinin bir kısmını yenilenebilir enerjiden sağlarken, bir kısmını ise şebekeden çekmek zorunda kalacaktır. Böylece o an çalışan cihazlarla ilgili bir kısım bilgi akıllı sayaç verilerinden elde edilebilecektir.

Bu metodu matematiksel olarak modelleyebilmek için, $F(t, s)$ fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$F(t, s) = \left| p_{s,t}^c - p_{s,(t-1)}^c \right| \quad (2.17)$$

(2.17)'deki ifade mutlak değer içerdiği için doğrusal değildir. Bu ifadeyi doğrusallaştırmak için, iki tane negatif olmayan kukla değişken (dummy variable) $d_{s,t}^1$ ve $d_{s,t}^2$

tanımlanmıştır. Temel matematiksel modele (2.18) ve (2.19) kısıtları eklenerek En İyi Gayret tekniği modellenmiştir.

$$F(t, s) = d_{s,t}^1 + d_{s,t}^2 \quad (2.18)$$

$$d_{s,t}^1 - d_{s,t}^2 = p_{s,t}^c - p_{s,(t-1)}^c \quad \forall s, \forall t > 1 \quad (2.19)$$

En İyi Gayret metodunun başka bir versiyonunda, her zaman aralığında şebekeden çekilen güç miktarının daha önce belirlenmiş bir hedef değere mümkün olduğunca yakın olması sağlanmaktadır. Bu yöntemden bu çalışmada En İyi Gayret - 2 (EİG-2) olarak bahsedeceğiz. (2.17)'de tanımlamış olduğumuz metottan da EİG olarak bahsedeceğiz. EİG-2 yöntemi de EİG yöntemi gibi hane içi bataryaları, yenilenebilir enerji kaynağını ve kaydırılabilir cihazları kullanarak her zaman aralığında şebekeden çekilen güç ile hedeflenen değer (L_s) arasındaki farkı minimize etmeyi hedefler. Bunu modelleyebilmek için $F(t, s)$ değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$F(t, s) = |p_{s,t}^c - L_s| \quad (2.20)$$

(2.20)'deki L_s şebekeden çekilmesi hedeflenen sabit güç miktarını temsil etmektedir. Her bir senaryoda yenilenebilir enerji kaynağından gelen enerji miktarı farklı olduğu için L_s de s 'ye göre değişen bir vektör olarak tanımlanmıştır. Her bir s için L_s değeri, cihazların toplam kullanması gereken toplam enerjiden ($\sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$) o senaryoda yenilenebilir enerji kaynağının ürettiği toplam enerjinin ($\sum_{t=1}^T P_{s,t}^g$) çıkartılıp, toplam zaman aralığı sayısına (T) bölünmesi ile elde edilmiştir. (2.17)'deki fonksiyonu doğrusallaştırmak için yapılan işlemin aynısı (2.20) için de yapılabilir. Bunu yapmak için, $F(t, s)$ ifadesi (2.18) ile değiştirilmiş ve (2.21) kısıtı temel matematiksel modele eklenmiştir.

$$d_{s,t}^1 - d_{s,t}^2 = p_{s,t}^c - L_s \quad \forall s, t \quad (2.21)$$

2.2.3 Katlanılır Sapma (Tolerable Deviation) stratejisi

Ge ve arkadaşları tarafından öne sürülen [45] Katlanılır Sapma (Tolerable Deviation) stratejisi, şebekeden çekilen güçte meydana gelen küçük değişimlerin NIALM tekniklerinin performansını artırmadığı hipotezi üzerine kurulmuştur. Çekilen güçteki küçük (Örneğin; 50W veya daha az) değişikliklere tahammül edilen bu stratejide, gün içinde

şebekeden çekilen güç miktarı ($p_{s,t}^c$) belli hedef seviyelerin ($[L_s - v, L_s + v]$) arasında tutulmaya çalışılmaktadır. Buradaki v , metodun hedef seviyeden sapabileceği maksimum güç miktarını gösterir. [45] çalışmasında, hedeflenen değer L_s bir sabit olmadığı için, bizim formülasyonumuzda da bir karar değişkeni olarak tanımlanmaktadır. Böylece, mahremiyet için en uygun olan hedef seviye L_s de bulunabilmektedir.

Katlanılır Sapma (KS) stratejisini matematiksel olarak modellemek için, ikilik bir değişken $z_{s,t}^s$ tanımlanmıştır. Bu değişken her t zaman aralığı ve her s senaryosu için yalnızca 0 veya 1 değerlerini alabilen bir ikilik (binary) vektördür. Sonrasında $F(t, s)$ (2.22)'deki gibi tanımlanmış ve (2.23) ile (2.24) kısıtları temel matematiksel modele eklenmiştir.

$$F(t, s) = z_{s,t} \quad (2.22)$$

$$p_{s,t}^c - L_s \leq v + M \cdot z_{s,t} \quad \forall s, t \quad (2.23)$$

$$-p_{s,t}^c + L_s \leq v + M \cdot z_{s,t} \quad \forall s, t \quad (2.24)$$

Bu modelde $z_{s,t}$ 'nin 0 olması, şebekeden çekilen gücün $[L_s - v, L_s + v]$ aralığında olduğunu göstermektedir. $F(t, s)$ 'nin $z_{s,t}$ 'ye eşit olması, tüm senaryolar ve zaman aralıkları için $p_{s,t}^c$ 'nin $[L_s - v, L_s + v]$ aralığından sapma sayısını minimize etmemizi sağlar. $z_{s,t}$ 0 olduğu ($p_{s,t}^c$ $[L_s - v, L_s + v]$ aralığında olduğu) sürece $p_{s,t}^c$ 'nin aldığı değer katlanılabilir değer aralığında olduğu için minimizasyona etki etmez. Bu da tam olarak [45]'de önerilen metoda karşılık gelmektedir. (2.23) ile (2.24) kısıtlarındaki M büyük bir sayıyı temsil eder. Bu sayıyı $|p_{s,t}^c - L_s| - v$ 'nin alabileceği en büyük değerden daha büyük seçmek gerekmektedir. $p_{s,t}^c$ değeri (2.15)'te P^{max} ile üstten sınırlandırıldığı için, M değeri de P^{max} 'a eşit olacak şekilde seçilebilir.

Yine referans [45]'de bahsedildiği gibi, tek bir hedef seviye L_s kullanmak yerine, birden fazla hedef seviyeye sahip olmak ve bu hedef seviyelerden sapma sayılarını minimize etmek de mahremiyeti sağlamakta etkili bir yöntem olabilir. Bunun nedeni, NIALM metodlarının ekseriyetle şebekeden çekilen güçteki değişimler ile tetiklenmesi ve bu değişim miktarlarını bir cihazın açılış-kapanışı ile eşleştirmeye çalışmasıdır. KS metodu $[L_s - v, L_s + v]$ aralığından çıktığında normal cihaz çalışmalarını ele verebilir. Ancak birden çok hedef seviye tanımlanırsa, algoritma bir seviyede kalamadığı takdirde başka bir seviyeye atlayarak yine cihaz çalışma izlerini saklayabilir. Bu çalışmada bu stratejiye Katlanılır Sapma - 2 (KS-2) adı verilmiş ve bu strateji de matematiksel olarak modellenmiştir. Bunun için, ikinci bir ikilik değişken $y_{s,t}$ tanımlanmıştır. Modelde $y_{s,t}$, s senaryosunda ve t zaman aralığında yeni bir hedef seviyeye geçilip geçilmediğini göstermektedir. KS-2'yi gerçeklemek için $F(t, s)$ (2.25)'teki gibi

tanımlanmış ve (2.26), (2.27), (2.28) ve (2.29) kısıtları temel matematiksel modele eklenmiştir.

$$F(t, s) = z_{s,t} + y_{s,t} \quad (2.25)$$

$$p_{s,t}^c - L_{s,t} \leq v + M \cdot z_{s,t} \quad \forall s, t \quad (2.26)$$

$$-p_{s,t}^c + L_{s,t} \leq v + M \cdot z_{s,t} \quad \forall s, t \quad (2.27)$$

$$L_{s,t} - L_{s,(t-1)} \leq M \cdot y_{s,t} \quad \forall s, t > 1 \quad (2.28)$$

$$-L_{s,t} + L_{s,(t-1)} \leq M \cdot y_{s,t} \quad \forall s, t > 1 \quad (2.29)$$

Burada yine M büyük bir sayıyı temsil etmektedir. KS'deki katlanılır olmayan sapma sayısını minimize etmenin yanında, hedef yük değerindeki değişim sayısı da minimize edilmeye çalışılmıştır. Eğer hedef yük değeri değişir ise (diğer bir deyişle $|L_{s,t} - L_{s,(t-1)}| \geq 0$ ise) $y_{s,t}$ değeri 1 olmaktadır. $F(t, s)$ de $z_{s,t} + y_{s,t}$ olarak tanımlandığı için, hem katlanılır olmayan sapmalar hem de hedef yükün kendisinin değişme sayısı minimize edilmiş olmaktadır.

2.2.4 Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme (Non Intrusive Load Leveling) stratejisi

McLaughlin ve arkadaşları [44] tarafından öne sürülen bu buluşsal metotta, EİG stratejisinde olduğu gibi ardışık zaman aralıklarında şebekeden çekilen güç miktarları arasındaki fark sabit tutulmaya çalışılır. Ancak, bu hedef tutturulamadığında başka bir hedef yük seviyesine geçilir ve yine ardışık zaman aralıklarında şebekeden çekilen güç miktarı, bu sefer geçilen yeni seviyede, sabit tutulmaya çalışılır. Bu metodu modelleyebilmek için, $F(t, s)$ değişkeni (2.22)'deki gibi tanımlanmış ve (2.30) ile (2.31) kısıtları temel matematiksel modele eklenmiştir.

$$p_{s,t}^c - p_{s,(t-1)}^c \leq M \cdot z_{s,t} \quad \forall s, t \quad (2.30)$$

$$-p_{s,t}^c + p_{s,(t-1)}^c \leq M \cdot z_{s,t} \quad \forall s, t \quad (2.31)$$

2.2.5 Basamaklandırma (Stepping) stratejisi

Yang ve arkadaşları [46] tarafından öne sürülen bu buluşsal yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma metodunda, şebekeden çekilen güç sadece önceden belirlenmiş olan ayrık (discrete) güç seviyelerinden birine eşit olabilmektedir. Bunu gerçekleştire-

rebilmek için basamaklandırma stratejisi diğer metotlarda olduğu gibi hane içi bataryalardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından ve zaman ya da güç kaydırılabilir cihazlardan yararlanır. Bu metottaki ayrık güç seviyeleri arasındaki fark sabit (κ) olduğu için, bu strateji literatürde basamaklandırma (stepping) stratejisi olarak geçmektedir. Basamaklandırma yöntemini matematiksel olarak modelleyebilmek için, iki adet ikilik karar değişkeni (binary decision variable) $r_{s,t}^1$ ve $r_{s,t}^2$ tanımlanmıştır. $r_{s,t}^1$ ve $r_{s,t}^2$ değişkenleri sırasıyla yeni güç seviyesinin bir basamak yukarıda veya bir basamak aşağıda olduğunu gösterir. İki değişkenin de 0 olması durumunda hedef güç seviyesi bir önceki zaman dilimi ile aynı demektir. İki değişkenin de aynı anda 1 olması $F(t, s)$ 'nin $r_{s,t}^1 + r_{s,t}^2$ ifadesini içerecek şekilde tanımlanması nedeni ile engellenmiş olmaktadır. Sonuç olarak basamaklandırma yöntemi, $F(t, s)$ 'nin (2.32)'deki gibi tanımlanması ve (2.33) ile (2.34) kısıtlarının temel matematiksel modele eklenmesi ile modellenmiştir.

$$F(t, s) = r_{s,t}^1 + r_{s,t}^2 + \varepsilon \cdot (d_{s,t}^1 + d_{s,t}^2) \quad (2.32)$$

$$L_{s,t} - L_{s,(t-1)} = \kappa \cdot (r_{s,t}^1 - r_{s,t}^2) \quad \forall s, t > 1 \quad (2.33)$$

$$d_{s,t}^1 - d_{s,t}^2 = p_{s,t}^c - L_{s,t} \quad \forall s, t \quad (2.34)$$

Burada asıl amacımız $p_{s,t}^c$ 'nin o anki hedef seviye $L_{s,t}$ 'den sapmasını ($|p_{s,t}^c - L_{s,t}|$) minimize etmektir. Bunu modellemek için daha önceki metotlarda da uygulandığı gibi (2.32)'de $d_{s,t}^1$ ve $d_{s,t}^2$ değişkenleri tanımlanarak $|p_{s,t}^c - L_{s,t}|$ ifadesi doğrusallaştırılmıştır. Ancak bu stratejide, KS stratejisinde olduğu gibi, hedef seviyenin değişim sayısı da minimize edilmelidir. Aksi takdirde optimal sonuç $|p_{s,t}^c - L_{s,t}|$ 'in 0 olduğu, ancak hedef güç değerinin ($L_{s,t}$) şebekeden çekilen güç ($p_{s,t}^c$) her değiştiğinde değiştiği zikzaklı bir sonuç verecektir. Her ne kadar çekilen güç ayrık değerlere sahip olacak olsa da, NIALM metotları bu sonuçtaki değişimleri cihaz kullanımları ile rahatça eşleştirebilir. Bu nedenle $F(t, s)$ 'ye $r_{s,t}^1 + r_{s,t}^2$ ifadesi eklenmiş, ve hiyerarşik olarak $d_{s,t}^1 + d_{s,t}^2$ 'den öncelikli olması için, $d_{s,t}^1 + d_{s,t}^2$ ifadesi ε katsayısıyla ($\varepsilon \ll 1$) çarpılmıştır. Son olarak, (2.33) kısıtı iki ardışık zaman aralığındaki hedef değerlerin ($L_{s,t}$ ve $L_{s,(t-1)}$) arasındaki farkın 0, κ ya da $-\kappa$ olmasını garanti etmektedir.

2.2.6 L2 normu minimize etme stratejisi

Sun ve arkadaşları [54], mahremiyeti maksimize etmek için, şebekeden çekilen güç miktarının ($p_{s,t}^c$) belli bir hedef değere (L_s) olan uzaklığını minimize etmeyi önermiştir. Bu bağlamda $p_{s,t}^c$ ve L_s her s için t boyutlu öklit uzayında birer nokta olarak temsil edilebilmektedir. Bahsi geçen çalışmada da bu iki nokta arasındaki öklit uzaklığı (ya da L2

norm) minimize edilecek ölçüt olarak kabul edilmiştir. Bunu matematiksel modelimize uyarlamak için, $F(t, s)$ (2.35)'teki gibi tanımlanmıştır:

$$F(t, s) = \left\| \frac{p_{s,t}^c - \bar{L}_s}{\bar{L}_s} \right\|_2 \quad (2.35)$$

Burada, \bar{L}_s her s senaryosu için şebekeden çekilen ortalama güç miktarını temsil etmektedir ve (2.35)'te normalizasyon amacı ile eklenmiştir. (2.35)'teki norm fonksiyonu 2. dereceden olduğu için doğrusal değildir. Ancak yine de karesel programlamaya (quadratic programming) uygun bir şekilde tanımlanırsa, diğer yöntemlerdeki gibi CPLEX aracılığıyla çözülebilmektedir. Bunun için, $F(t, s)$ fonksiyonu (2.36) ile değiştirilmiş ve (2.37) kısıtı eklenerek problem karesel programlama problemi olarak tanımlanmıştır.

$$F(t, s) = \lambda_s \quad (2.36)$$

$$\sum_{t=1}^T \left(\frac{p_{s,t}^c - \bar{L}_s}{\bar{L}_s} \right)^2 \leq (\lambda_s)^2 \quad \forall s, t \quad (2.37)$$

2.2.7 Cihaz L1 normunu minimize etme stratejisi

Chen ve diğerleri [65] çalışmalarında, ölçüm verisi üzerinde mahremiyeti temsil edebilecek 3 farklı benzerlik ölçütü tanımlamışlardır. Bu benzerlik ölçütlerinin arasından, mahremiyet performansı olarak en iyi olanının cihazların farklı zaman aralıklarında harcadıkları güç miktarındaki değişimin minimize edilmesi olduğu sonucuna varmışlardır. Bunu matematiksel olarak modelleyebilmek için, $F(t, s)$ aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$F(t, s) = \sum_{a=1}^A \left(\max_{\tau} \{p_{a,s,\tau}^{ca}\} - p_{a,s,t}^{ca} \right) \quad (2.38)$$

(2.38) minimize edildiğinde hem cihazın harcadığı maksimum güç miktarı, hem de bu maksimum güçten sapma minimize edilmektedir. Bunu doğrusal olarak programlamak için, bir kukla değişken ($z_{a,s}$) tanımlanmış olup, $F(t, s)$ (2.39)'daki gibi tanımlanmış ve (2.40) kısıtı temel matematiksel modele eklenmiştir.

$$F(t, s) = \sum_{a=1}^A (z_{a,s} - p_{a,s,t}^{ca}) \quad (2.39)$$

$$z_{a,s} \geq p_{a,s,t}^{ca} \quad \forall a, s, t \quad (2.40)$$

2.2.8 Mahremiyeti ele almama

Yukarıda bahsedilen tüm buluşsal mahremiyet koruma stratejilerinin performanslarının karşılaştırılabileceği bir referans hattı (baseline) olması için, bir stratejide de mahremiyetin hiç ele alınmadığı varsayılmıştır. Bu strateji de $F(t, s)$ 'nin 0'a eşitlenmesi ile elde edilebilir. Temel matematiksel modele (2.41) kısıtı eklenerek bu strateji modellenmiştir.

$$F(t, s) = 0 \quad \forall s, t \quad (2.41)$$

2.3 Sistem Modeli

Bu çalışmada, akıllı elektrik sayacı tarafından güç kullanımı ölçülen ve ölçüm verileri 5 dakikada bir raporlanan bir ev varsayılmıştır. Buna ek olarak, servis sağlayıcı (utility company) tarafından ölçüm sıklığına uygun olacak şekilde 5 dakikada bir değişen elektrik fiyatlarının bir gün öncesinden kullanıcıya bildirildiği varsayılmıştır. Bu tarz gün içerisinde değişen elektrik fiyatlandırması literatürde time-of-use fiyatlandırma olarak geçmekte ve idealde tüketicilere gerçek zamanlı olarak iletilmektedir. Ancak bu çalışmada amacımız mahremiyet koruma stratejilerinin optimal çevrimdışı performanslarını karşılaştırmak olduğu için, bu fiyatlandırma verisinin önceden verilmiş olduğu farzedilmiştir.

Simülasyonu yapılan evin bir adet fotovoltaiik enerji kaynağına ve enerji depolama sistemine (batarya) sahip olduğu varsayılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde, yenilenebilir fotovoltaiik enerji sisteminin, hane içi bataryanın, cihaz çalışma verilerinin, elektrik fiyatlandırmasının nasıl modellendiği daha ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

2.3.1 Yenilenebilir enerji kaynağı modelleme

Daha önce bahsedildiği gibi, yenilenebilir enerji kaynağının ürettiği enerjideki belirsizlik, örnek senaryolar ve bu senaryoların gerçekleşme olasılığı hesaplanarak modellenmiştir. Bunun için, Monte Carlo simülasyonu tekniği kullanılmıştır. Gün içerisinde-

deki güneş ışınması iki doruklu (bimodal) dağılım ile temsil edilebilmektedir [98]. İki doruklu dağılımı oluşturacak her tek doruklu dağılım için de (2.42)'deki gibi bir Beta olasılık dağılım fonksiyonu kullanılmıştır.

$$f_b(r) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\rho+\zeta)}{\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)} r^{\rho-1} (1-r)^{\zeta-1}, & 0 \leq r \leq 1; \rho, \zeta \geq 0 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.42)$$

(2.42)'de, $f_b(r)$ güneş ışınmasının (kW/m^2) olasılık dağılım fonksiyonunu temsil ederken, $\Gamma(\cdot)$ ise Gamma fonksiyonunu temsil etmektedir. ρ ve ζ parametreleri, güneş ışınmasının gün içerisindeki ortalama değerinden (mean - μ) ve değişiminden (variance - σ^2) elde edilmektedir:

$$\zeta = (1 - \mu) \left(\frac{\mu(1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (2.43)$$

$$\rho = \frac{\mu \zeta}{1 - \mu} \quad (2.44)$$

Güneş ışınmasının elektrik gücüne çevriminde kullanılan fonksiyon ise aşağıdaki gibidir:

$$f_{pv}(r) = \eta \times S \times r \quad (2.45)$$

Bu çalışmada solar panel alanı $S = 40m^2$, solar panellerin verimliliği de $\eta = 0.186$ alınmıştır [98]. Yukarıda bahsi geçen denklemler kullanılarak, ρ ve ζ değerleri her zaman aralığı için hesaplanmış, ve daha sonra her birinin uzunluğu T olacak şekilde 4000 örnek günlük güneş ışınması verisi elde edilmiştir. Daha sonra, bu veriler (2.45) kullanılarak solar güç üretimi verisine dönüştürülmüştür. Son olarak, k-ortalamlar kümesi (k-means clustering) tekniği ile, elde edilmiş olan örnek güç üretim verisinden 10 senaryo ve bu senaryoların gerçekleşme olasılığı elde edilmiş, bunlar matematiksel modele girdi olarak verilmiştir.

Burada, üretilen 4000 örnek verinin her birinin senaryo olarak kullanılmamasının nedeni, bunun s indexinin büyüklüğü 400 kat artıracak olması ve problemin çözülme süresinin de bununla orantılı olarak artacak olmasıdır. Direkt olarak 10 örnek veri üretmek yerine 4000 örnek veri üretilip bunların k-ortalamlar kümesi ile 10'a düşürülmesinin nedeni ise Monte Carlo metodudur. Monte Carlo metodu, rastgele bir değişkenden alınan örnek sayısı arttıkça, alınan örneklerin dağılımının o rastgele değişkenin dağılımına yaklaştığı varsayımına dayanır. Bu yüzden, önce 4000 örnek veri

ürettilip daha sonra bu örnekler k-ortalamlar kümesi senaryo indirme tekniği ile 10'a indirilmiştir.

2.3.2 Hane içi batarya modelleme

Halihazırda piyasadaki hane içi bataryalar, $1kWh$ kapasiteden başlamakta olup $33kWh$ 'e kadar kapasitesi olan modeller bulunabilmektedir [99]. Bu çalışmada, karşılaştırması yapılan stratejilerde sıklıkla varsayılan $2kWh$ kapasiteli bir bataryanın olduğu farzedilmiştir. Bataryanın şarj ve deşarj verimliliği %90 kabul edilmiştir. Şarj ve deşarj verimliliği, temel matematiksel modelde (2.8) kısıtında $p_{s,t}^{cb}$ 'nin η^c 'ye bölünmesi ve $p_{s,t}^{db}$ 'nin η^d ile çarpılması ile modellenmiştir. η^c ve η^d 0.9 olarak alınmıştır. Böylece, hane içi bataryanın gidiş-dönüş (round trip) verimliliği $0.9 \cdot 0.9 = 0.81$ olarak kabul edilmiştir, ki bu değer piyasadaki hane içi bataryaların verimliliği ile tutarlıdır [99].

2.3.3 Cihaz modelleme

Bu çalışmada, hane içindeki elektrikli cihazlar üç sınıfa ayrılmıştır [100]:

- Zaman kaydırılabilir cihazlar,
- Güç kaydırılabilir cihazlar,
- Kaydırılmaz cihazlar.

Zaman kaydırılabilir cihazlar, operasyonları zaman ekseninde kaydırılabilen cihazlardır. Bu cihazların operasyonu duraklatılabileceği gibi, başlangıç zamanlarının da belli bir operasyon aralığı içerisinde ertelenebileceği varsayılmıştır. Bu tarz elektrikli cihazlara örnek olarak çamaşır makinesi ve bulaşık makinesi gösterilebilir. Güç kaydırılabilir cihazlar ise, zaman ekseninde kaydırılabilmelerinin yanında, kullandıkları güç miktarı operasyon esnasında değiştirilebilen cihazlardır. Bu tarz cihazlara merkezi su ısıtıcıları, kombi ısıtıcılar ve şarjlı elektrikli arabalar (plug-in electric vehicle) örnek gösterilebilir. Kaydırılmaz cihazlar kullanıcıların istediğinde (on-demand) çalıştırdığı veya güvenlik/sağlık nedeniyle çalışmasına müdahale edilemeyen cihazlardır. Bu cihazlar çalıştığında ölçülen güçte ortaya çıkacak olan izleri; kaydırılabilir cihazlar, yenilenebilir enerji kaynağı ve hane içi bataryalar kullanılarak gizlenebilir. Bu çalışmada kullanılan cihazlar, cihazların sınıfları ve güç kullanım verileri Çizelge 2.1'de [100] verilmiştir.

Çizelge 2.1: Hane içi elektrikli cihazların güç tüketimleri [100].

Cihaz	Kayırlabilirlik	Enerji (kWh)	Çalışma Süresi (saat)	Güç (kW)	Zaman aralığı (saat)
Çamaşır Makinesi	Zaman	0.7	3:30	0.2	9:00-20:00
Çam. Kurutma Mak.	Zaman	4.2	2:00	2.1	9:00-22:00
Bulaşık Makinesi	Zaman	1.4	2:00	0.7	14:00-19:00
Elektrikli Araba	Güç	9.9	9:00	1.1	18:00-08:00
Su Isıtıcı	Güç	13.75	2:30	5.5	00:00-08:00
Mekan Isıtıcı-Gündüz	Güç	3	1:00	3	15:00-18:00
Mekan Isıtıcı-Gece	Güç	3	1:00	3	03:00-08:00
Ütü	Zaman	1	0.5	2	09:00-24:00
Elk. Süpürge	Zaman	0.3	00:10	1.8	09:00-22:00
Tlf. Şarj Aleti	Zaman	0.01	2:00	0.005	18:00-08:00
Tablet Şarj Aleti	Zaman	0.06	5:00	0.012	18:00-08:00
Fırın	–	5.25	1:30	3.5	–
Ocak	–	2.4	2:00	1.2	–
Buzdolabı	–	2.16	24:00	0.03	–
Derin Dondurucu	–	0.48	24:00	0.02	–
Kettle	–	0.5	00:15	2	–
Saç Kur. Mak.	–	0.5	00:15	2	–
Işıklandırma	–	1.5	5:00	0.3	–
TV	–	0.8	4:00	0.2	–
PC/Laptop	–	0.6	3:00	0.2	–

2.3.4 Elektrik fiyatlandırılması modeli

Time of Use (ToU) elektrik fiyatlandırma modeli, piyasada ve literatürde sıkça kullanılan bir fiyatlandırma tarifesidir. Bu modelde, elektrik fiyatı gün içerisindeki zamana göre değişiklik gösterir. Bu çalışmada, ToU elektrik fiyatlandırma verisinin kullanıcıya bir gün öncesinde sunulduğu varsayılmıştır. Halihazırda Amerika Birleşik Devletleri'nin New York eyaletinin elektrik dağıtım şirketi *nyiso.com* websitesinde günlük ToU elektrik fiyatlandırmasını 5 dakika çözünürlük ile yayımlamaktadır [101]. Bu çalışmada da bahsi geçen elektrik dağıtım şirketinin 07/04/2016 tarihli elektrik fiyatlandırma verisi kullanılmıştır.

2.3.5 Kullanıcı konforunun modellenmesi

Mohsenian-Rad ve arkadaşları [102] çalışmalarında kullanıcı memnuniyetsizliğini, her bir cihaz tarafından gerçekleştirilen elektrik kullanımını bir ceza katsayısı ile çarpmak sureti ile modellemişlerdir. Bu çalışmadaki kullanıcı memnuniyetsizliği modeli de buradan esinlenmektedir. Her bir cihaza ait her zaman aralığındaki enerji kullanımı, zaman ile geometrik oranda artan bir ceza katsayısı ile çarpılır ise, bu cezayı minimize etmeye çalışan bir optimizasyon problemi bahsi geçen cihazların çalışmasını bir an önce bitirmesini sağlayacak bir çözümlenmeyi çıktı olarak verecektir. Bu da cihazların geç çalışmasından kaynaklanan kullanıcı rahatsızlığını minimize edecektir. Ceza katsayısını bir değişken yapmak yerine önceden hesaplayıp probleme katsayı olarak vermek, problemin doğrusallığını korumasını sağlayacaktır. Bu nedenle, her a cihazının t zaman aralığında harcayacağı güç $p_{a,s,t}^{ca}$ ile çarpılacak olan $\phi_{a,t}$ katsayısı, (2.46)'daki gibi tanımlanmıştır.

$$\phi_{a,t} = \frac{(\delta_a)^{\beta_a - t}}{E_a} \quad \forall a, \forall t \in [\alpha_a, \beta_a]. \quad (2.46)$$

Burada, δ_a , 1'den küçük bir pozitif sayı olarak seçilmektedir. Böylece, $\phi_{a,t}$, t 'ye bağlı olarak geometrik bir şekilde artmaktadır.

2.4 Mahremiyet Ölçütleri

Literatürde mahremiyeti sayısal bir değer olarak temsil edebilmek için bir çok farklı mahremiyet ölçütü tanımlanmış ve öne sürülmüştür [43–46, 65]. Öne sürülen bu mahremiyet ölçütlerinden, karşılaştırmasını yaptığımız En İyi Gayret, Katlanılır Sapma,

Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme, Basamaklandırma ve L2 Normu Minimize Etme stratejilerinde kullanılan 3 ölçüt bu çalışmada da benimsenmiştir. Bu ölçütler; Değişiklik Sayısı (Number of Changes), Determinasyon Katsayısı (Coefficient of Determination) ve Göreceli Entropi (Relative Entropy)'dir. Bu ölçütlerin neler olduğu aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır. Bu bölümlerde, ölçütlerin matematiksel ifadesinde tek bir dil kullanmak amacıyla, evin asıl güç kullanımı $p_A(t)$, evin ölçülen güç kullanımı ise $p(t)$ olarak ifade edilmiştir. $\Delta p_A(t)$ ve $\Delta p(t)$ ise, sırasıyla $(p_A(t) - p_A(t - 1))$ ve $(p(t) - p(t - 1))$ anlamına gelmektedir.

2.4.1 Değişiklik Sayısı (Number of Changes) - DS

NIALM metotlarının çoğu, ölçülen yükteki ($p(t)$) değişiklikler ile tetiklenmekte, ölçülen yükteki bu değişimi cihazların kendine özgü güç izleri ile karşılaştırmaktadır. Bu nedenle, bir mahremiyet koruma stratejisinin sonucunda ortaya çıkan $p(t)$ 'deki değişim sayısı ne kadar az ise mahremiyet performansının o kadar yüksek olduğu iddia edilebilmektedir [44, 103]. İdeal bir mahremiyet koruma stratejisinde gün içerisinde sabit kalan bir $p(t)$ elde edilmesi beklenmektedir. Bu ölçüte göre de ideal mahremiyet koruyan bir evin $p(t)$ değerindeki değişim sayısı 0 olmaktadır. Dolayısıyla, bu ölçütün minimum değeri 0 iken, maksimum değeri T 'dir ($T =$ ölçüm yapılan zaman aralığı sayısı). Şu not edilmelidir ki, bu ölçütün minimum değeri ideal mahremiyeti kusursuz bir şekilde temsil ederken, değer arttıkça mahremiyet performansını ne kadar isabetli tayin ettiği şaibelidir. Diğer bir deyişle, DS değeri 0 olan bir sonucun DS değeri $T/2$ olan bir sonuca göre mahremiyetinin daha iyi olduğu açıktır. Ancak DS değeri $T/2$ olan bir sonucun DS değeri T olan bir sonuca göre mahremiyetinin daha iyi olduğunu ispat etmek oldukça güçtür. Bununla beraber, NIALM metotlarının tetiklenme prensibinden dolayı, DS göz önünde bulundurulması gereken bir ölçüttür. Ölçülen güç $p(t)$ 'deki değişiklik sayısı:

$$DS = \sum_{t=2}^T I_{|\Delta p(t)| > c_0} \quad (2.47)$$

ile temsil edilebilir. Burada, I gösterge fonksiyonunu (Indicator Function) temsil etmektedir. Eğer $|\Delta p(t)| > c_0$ ise gösterge fonksiyonu 1 değerini almakta, değil ise 0 değerini almaktadır. c_0 , ölçülen güçteki kayda değer değişim miktarını temsil eder. Ölçülen güçteki c_0 'dan büyük olan her değişim, DS'ye +1 olarak eklenmektedir. Bu çalışmada, $c_0 = 20W$ olarak alınmıştır [46]. Daha önce bahsedildiği gibi, bir metotun DS değerinin diğerlerine göre daha düşük olması, diğerlerine kıyasla o metodun daha iyi bir mahremiyet performansına sahip olduğunu ima etmektedir.

2.4.2 Determinasyon Katsayısı (Coefficient of Determination) - DK

Aslen istatistiki bir ölçüt olan Determinasyon Katsayısı (DK), bağımlı bir değişkenin oransal olarak ne kadarının bağımsız değişkenler kullanılarak saptanabileceğini gösteren bir katsayıdır. Literatürde R^2 ya da r^2 olarak da ifade edilen DK, regresyon analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada ele alınan mahremiyet koruma stratejileri tarafından da bir mahremiyet performans ölçütü olarak ele alınmıştır [43, 65]. İyi bir mahremiyet koruma stratejisinin, $\Delta p(t)$ 'den $\Delta p_A(t)$ 'nin çıkarım miktarını düşürmesi gerektiği hipotezine dayanan bu ölçütü hesaplamak için, öncelikle $p_A(t)$ 'nin doğrusal en küçük kareler uyumu (Linear Least Squares fit) değeri $\Delta \hat{p}_A(t) = \varphi + \chi \Delta p(t), \forall t$ olarak hesaplanmıştır. Daha sonra artık kareler toplamı (residual sum of squares) $SS_{res} = \sum_t (\Delta \hat{p}_A(t) - \Delta p_A(t))^2$ ve regresyon kareler toplamı (regression sum of squares) $SS_{reg} = \sum_t (\Delta \hat{p}_A(t) - \overline{\Delta p_A(t)})^2$ hesaplanmıştır. Son olarak, DK değeri aşağıdaki formül kullanılarak elde edilmektedir:

$$DK = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{res} + SS_{reg}} \quad (2.48)$$

DK değeri 0 ile 1 arasında değişen bir ölçüttür. İdeal bir mahremiyet koruma stratejisinin DK'sı 0 çıkarken, $p_A(t)$ ile $p(t)$ arasındaki benzerlik arttıkça DK değeri 1'e yaklaşmaktadır.

2.4.3 Göreceli Entropi (Relative Entropy) - GE

Göreceli Entropi (GE), aslen bilgi kuramında (information theory) kullanılan bir kavram olup, literatürdeki mahremiyet koruma çalışmalarında da performans metriği olarak kullanılmaktadır [43, 44]. Bilgi kuramsal olarak bir rastgele değişkenin diğerinden uzaklığını temsil etmektedir. Literatürde Kullback–Leibler uzaklığı olarak da geçen GE'nin hesaplanması için tanımı gereği iki adet rasgele değişkene ya da başka bir deyişle iki adet olasılık dağılımına ihtiyaç bulunmaktadır. Bunun için, bu çalışmada $\Delta p(t)$ ve $\Delta p_A(t)$ 'den iki adet deneysel (empirical) olasılık dağılımı $p_p(c)$ ve $p_{p_A}(c)$ elde edilmiştir. $p_p(c)$ ve $p_{p_A}(c)$ 'yi elde etmek için ise, $\Delta p(t)$ ve $\Delta p_A(t)$ değerleri ayrıştırılarak her ayrı değer için görülme sıklığı normalize edilmiş ve olasılık olarak $p_p(c)$ ve $p_{p_A}(c)$ 'ye işlenmiştir. Bu çalışmada, ayrıştırma için basamak büyüklüğü 2kW olarak seçilmiştir. $p_p(c)$ ve $p_{p_A}(c)$ hesaplandıktan sonra ise GE değeri aşağıdaki formül ile elde edilmiştir:

$$GE = D(p||p_A) = \sum_{c \in \mathcal{C}} p_p(c) \log\left(\frac{p_p(c)}{p_{p_A}(c)}\right) \quad (2.49)$$

GE değeri ne kadar yüksek çıkarsa, $\Delta p(t)$ ve $\Delta p_A(t)$ arasındaki uzaklık teorik olarak o kadar yüksek demektir. Yani, yüksek bir GE değeri yüksek bir mahremiyet performansını ima etmektedir. GE bilgi kuramsal bir ölçüt olduğu için ümit verici bir mahremiyet göstergesi olsa da, iki olumsuz yönü bulunmaktadır. Birincisi, logaritma fonksiyonunun alt ve üst sınırlarının $-\infty$ ve ∞ 'a gitmesidir. Bu da ideal durumda GE'nin sayısal bir değerinin hesaplanmasını zor hale getirmektedir. İkinci olumsuz husus ise, GE'nin yine içerisindeki logaritmik ifadeden dolayı simetrik bir fonksiyon olmamasıdır, diğer bir deyişle $D(p||p_A) \neq D(p_A||p)$ olmasıdır. Bu durumda, $D(p||p_A)$ 'nin mi yoksa $D(p_A||p)$ 'nin mi ölçüt olarak kullanılması gerektiği bir tartışma konusudur. Yine de, karşılaştırmasını yaptığımız çalışmalarda bu ölçüt kullanılmış olduğu için, sonuçlar karşılaştırırken bu ölçütten de yararlanılmıştır.

2.4.4 Birleşik Mahremiyet ölçütü - BM

Mahremiyet performansını ölçerken yukarıda bahsedilen üç ölçütten de yararlanabilmek için, bu çalışmada bir birleşik mahremiyet (BM) ölçütü tanımlanmıştır:

$$BM = \frac{(DS) \times (DK)}{GE} \quad (2.50)$$

Düşük bir BM değeri daha iyi bir mahremiyet performansını ima ederken, yüksek bir BM değeri daha kötü bir mahremiyet koruma performansını işaret etmektedir. İdeal bir mahremiyet koruma performansı BM'yi 0 yaparken (Örnek: sabit bir $p(t)$ DS'yi 0 yapar), mahremiyet performansının en kötü olduğu durumda ($p(t)$ $p_A(t)$ 'ye eşit olduğunda), GE 0 olacağı için BM ∞ 'a gidecektir. Bu da BM ölçütü ile mahremiyeti isabetli bir şekilde ifade edebileceğimizi göstermektedir.

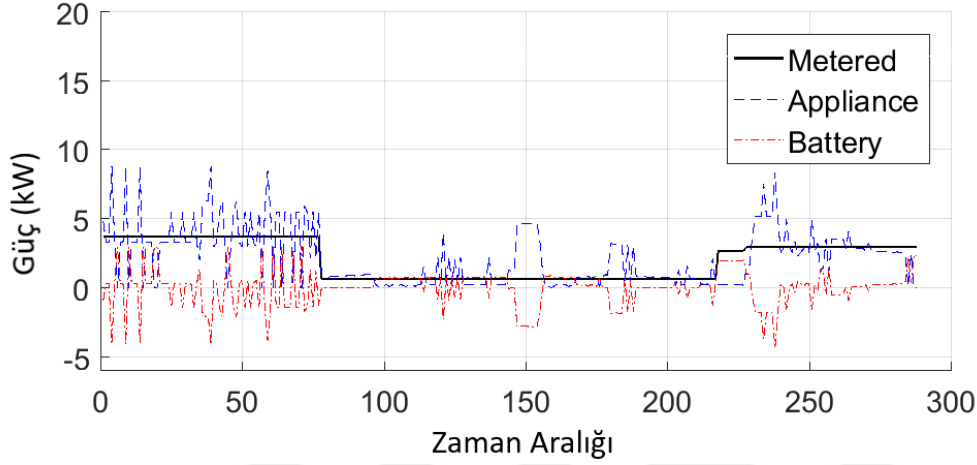
2.5 Karşılaştırmalı Analiz

Bölüm 2.2'de verilen temel matematiksel program üzerinde, 2.2.2-2.2.8 bölümlerinde verilen En İyi Gayret, Katlanılır Sapma, Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme, Basamaklandırma, L2 Normu Minimize Etme, L1 Normu Minimize Etme ve Sıfır Mahremiyet stratejileri, Bölüm 2.3'te özellikleri belirtilen bir hane için optimize edilmiştir. Sonuçlar, farklı alt amaç ağırlıkları ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$) için alınarak, stratejilerin talep katılımının diğer amaçlarını (maliyeti azaltma, rahatsızlığı azaltma) nasıl etkilediği de gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.2: Alt amaçların farklı ağırlıklarına göre stratejilerin çok amaçlı optimum sonuçları [Maliyet, Rahatsızlık, Değişim Sayısı (DS), Determinasyon Katsayısı (DK), Göreceli Entropi (GE)].

Strateji	Alt amaç Ağırlıkları ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$)			
	(1,1,1)	(10,1,1)	(1,1,10)	(1,10,1)
EİG	[15.12 3.26 3 0.016 2.45]	[13.91 6.63 9.99 0.006 1]	[15.81 3.33 4 0.009 2.07]	[15.58 2.73 7.30 0.126 0.26]
EİG-2	[13.80 2.98 73.60 0.489 0.14]	[12.72 4.09 79.89 0.571 0.19]	[14.52 3.13 40.52 0.537 0.16]	[14.63 2.65 54.98 0.191 0.22]
KS	[13.46 2.90 41.07 0.603 0.55]	[12.44 3.50 49.79 0.600 0.59]	[13.70 2.96 36.62 0.581 0.58]	[13.94 2.63 42.25 0.571 0.50]
KS-2	[15.07 3.54 3.80 0.062 0.62]	[13.75 5.90 7.82 0.086 0.79]	[15.39 4.51 10.06 0.009 0.88]	[15.80 2.74 4.54 0.010 0.64]
GOYD	[15.31 4.19 3.09 0.021 1.46]	[14.17 5.32 5 0.051 1.57]	[15.59 4.77 3.95 0.009 1.22]	[15.90 2.85 3.91 0.010 1.05]
Basamak	[15.12 3.26 3 0.003 2.33]	[13.91 6.58 9.99 0.009 1.09]	[15.80 3.35 4 0.006 2.17]	[15.58 2.73 7.79 0.125 0.26]
L1	[15.42 3.33 95.18 0.002 0.32]	[12.64 3.93 89.92 0.025 0.27]	[15.78 4.87 98.18 0.009 0.35]	[16.05 2.87 93.76 0.004 0.32]
L2	[14.47 3.12 212.8 0.157 0.08]	[13.08 4.86 204.8 0.228 0.07]	[15.41 3.32 159.2 0.179 0.13]	[15.86 2.68 118 0.287 0.21]
SM	[12.81 2.76 63.01 0.498 0.18]	[12.35 3.30 61.82 0.604 0.31]	[12.81 2.76 63.01 0.498 0.18]	[13.25 2.62 58.53 0.413 0.20]

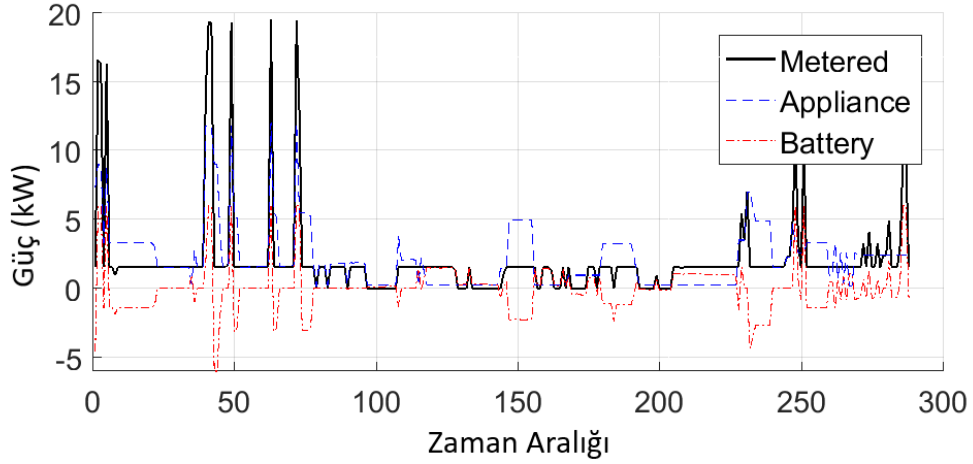
Temel matematiksel model ve stratejiler, GAMS Tümlşik Geliştirme Ortamı (sürüm 29) kullanılarak programlanmış, bütün stratejiler CPLEX çözücüsü (sürüm 12.6.2) kullanılarak çözdürülmüştür. Parametreleri ".gdx" uzantılı dosyalar olarak GAMS ortamına aktarmak için MATLAB R2016b Tümlşik Geliştirme Ortamı kullanılmıştır. Yine GAMS'ten çıkan sonuçları görselleştirmek ve düzenlemek için MATLAB R2016b kullanılmıştır. Bahsi geçen programlar, 4 çekirdekli i7 işlemciye ve 16GB RAM'e sahip bir bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır.



Şekil 2.2: En İyi Gayret Stratejisinin (EİG) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

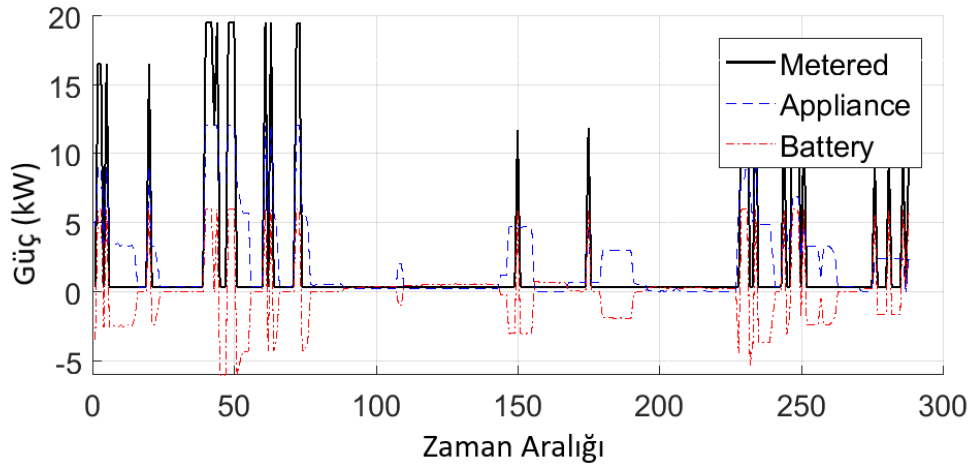
Nümerik sonuçlar Çizelge 2.2 - 2.5'te sunulmuştur. Çizelge 2.2'de her strateji için 4 adet sütun bulunmaktadır. Her bir sütun, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ değerlerinin farklı bir kombinasyonunu temsil etmektedir. Örneğin; (1, 1, 1) sütunu $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ katsayılarının hepsinin 1 olduğu durumu temsil eder. Bu durumda kullanıcı mahremiyeti, kullanıcı refahı ve kullanıcı mahremiyeti aynı öneme sahiptir. Diğer 3 sütunda ise γ_1, γ_2 ve γ_3 katsayıları sırasıyla 10 yapılarak alt amaç fonksiyonlarından biri diğerlerine göre daha önemli hale getirilmiştir. Her bir stratejinin her bir sütundaki sonuçları 5li bir vektör olarak verilmiştir ([Maliyet, Rahatsızlık, Değişim Sayısı (DS), Determinasyon Katsayısı (DK), Göreceli Entropi (GE)]). Böylece, stratejilerin her bir alt amaç fonksiyonu için performansı (maliyet, rahatlık ve farklı ölçütlere göre mahremiyet) ayrı ayrı incelenebilmektedir.

Çizelge 2.3'te ise her bir stratejinin performansı *tekil* alt amaç fonksiyonları için verilmiştir. Burada amaç, mahremiyet koruma stratejilerinin sadece mahremiyet gözetildiğinde performanslarının karşılaştırılabilmesidir. Aynı zamanda, Çizelge 2.3'te sadece maliyetin ve sadece rahatlığın ele alındığı durumlarda tüm stratejilerin benzer sonuçlar vermesi, elde ettiğimiz sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir. Çünkü mahremiye-



Şekil 2.3: En İyi Gayret Stratejisi-2'nin (EİG-2) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

tin ağırlığının olmadığı durumlarda, mahremiyet koruma stratejilerinin hepsinin benzer çıktılar vermesi beklenir.



Şekil 2.4: Katlanılır Sapma (KS) stratejisinin sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

Çizelge 2.4'te, Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'teki ağırlık kombinasyonları için Birleşik Mahremiyet (BM) ölçütü sonuçları verilmiştir. Bu tablonun sunulmasının nedeni, Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te 3 farklı mahremiyet ölçüsü olması ve karşılaştırılan stratejilerin bazı ölçütlere göre daha iyi sonuçlar verirken bazı ölçütlere göre daha kötü sonuçlar vermesidir. BM ölçütü kullanılarak, hangi stratejilerin diğerlerine göre daha etkin olduğu daha net bir şekilde görülebilmektedir.

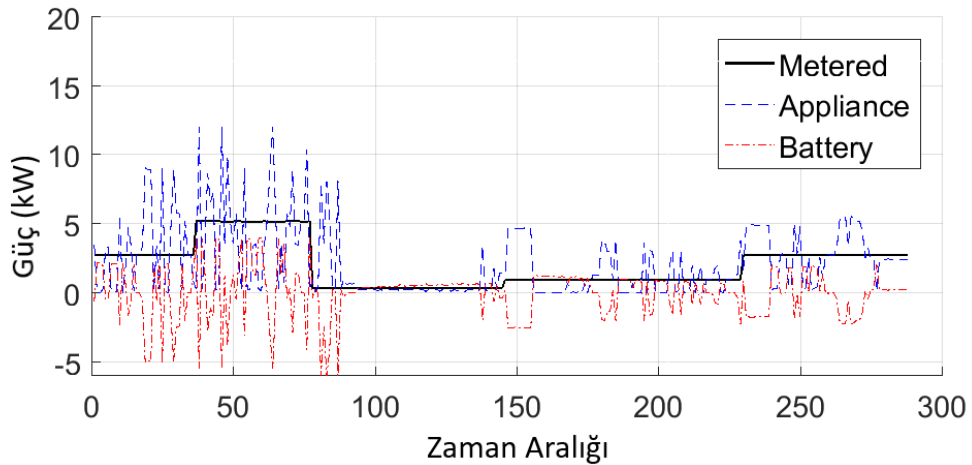
Çizelge 2.3: Alt amaçların farklı stratejilerde tekil optimum sonuçları [Maliyet, Rahatsızlık, Değişim Sayısı (DS), Determinasyon Katsayısı (DK), Göreceli Entropi (GE)].

Strateji	Alt amaç Ağırlıkları ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$)														
	(1,0,0)			(0,0,1)			(0,1,0)								
EİG	[12.03	6.24	60.22	0.434	0.40]	[16.02	4.64	4.80	0.011	1.79]	[16.40	2.59	79.84	0.005	0.25]
EİG-2	[12.03	6.24	60.22	0.434	0.40]	[15.93	4.79	60.28	0.019	0.31]	[16.40	2.59	79.84	0.005	0.25]
KS	[12.03	6.26	62.29	0.372	0.73]	[15.87	4.29	50.28	0.466	1.50]	[16.35	2.59	96.21	0.004	0.71]
KS-2	[12.03	6.19	62.83	0.274	0.42]	[15.59	5.16	2.49	0.006	1.15]	[16.30	2.59	93.75	0.003	0.45]
GOYD	[12.03	6.32	62.05	0.341	0.74]	[15.43	4.72	2.00	0.006	2.11]	[16.33	2.59	111.8	0.005	0.53]
Basamak	[12.03	6.23	63.03	0.270	0.44]	[16.10	4.93	4.61	0.014	1.70]	[16.25	2.59	91.41	0.073	0.40]
L1	[12.03	6.23	63.03	0.270	0.44]	[16.27	4.35	98.30	0.002	0.33]	[16.25	2.59	91.41	0.073	0.40]
L2	[12.03	6.33	60.42	0.446	0.38]	[16.08	4.52	5.39	0.251	0.31]	[16.35	2.59	92.48	0.006	0.49]
SM	[12.03	6.24	60.22	0.434	0.40]	[N/A]					[16.40	2.59	79.84	0.005	0.25]

Çizelge 2.4: Alt amaçların farklı ağırlıklarına göre stratejilerin Birleşik Mahremiyet (BM) ölçütü sonuçları.

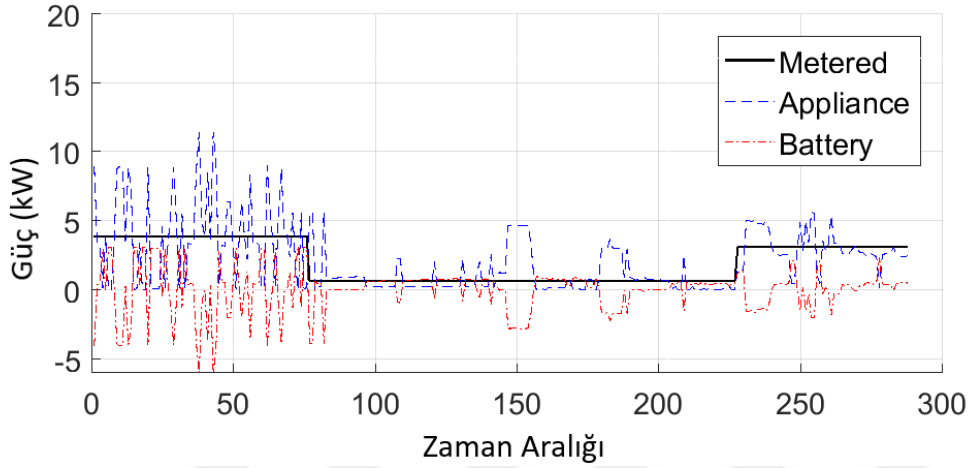
Strateji	Alt amaç Ağırlıkları ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$)						
	(1,1,1)	(10,1,1)	(1,1,10)	(1,10,1)	(1,0,0)	(0,0,1)	(0,1,0)
EİG	0.020	0.070	0.017	3.537	65.34	0.029	1.597
EİG-2	257.07	240.1	136.0	47.73	65.34	3.694	1.597
KS	45.03	50.63	36.68	48.25	31.74	15.62	0.542
KS-2	0.38	0.85	0.103	0.071	40.99	0.013	0.804
GOYD	0.044	0.162	0.029	0.037	28.59	0.0056	1.055
Basamak	0.0004	0.082	0.011	3.745	38.68	0.038	16.68
L1	0.595	8.33	2.52	38.68	38.68	0.596	16.68
L2	417.58	667.06	219.2	161.3	70.91	4.364	1.132
SM	174.32	120.45	3324	120.9	65.34	[N/A]	1,597

Her bir mahremiyet koruma stratejisinin örnek bir senaryodaki çıktıları Şekil 2.2-2.10'da verilmiştir. Her bir şekilde üç adet grafik bulunmaktadır. Grafiklerden biri akıllı sayaç tarafından ölçülen güç miktarını ($p_{s,t}^c$) temsil ederken, diğerleri sırasıyla cihazların gerçekte harcadıkları gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$) ve hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir. Bu grafiklerden, her bir mahremiyet koruma stratejisinin nasıl bir $p_{s,t}^c$ oluşturmaya çalıştığı gözlenebilmektedir. Grafiklerin x eksenini zaman dilimlerini temsil etmektedir. Matematiksel modelde ΔT 5 dakika olarak alındığı için, x eksenini 0'dan $T = 288$ 'e kadar gitmektedir. Grafiklerin y eksenini ise güç eksenini olup birimi kW 'tır. Batarya grafiklerinin 0'ın altına düştüğü durumlar, hane içi bataryanın deşarj olduğu zaman aralıklarını, 0'ın üstünde olduğu durumlar ise hane içi bataryanın şarj olduğu zaman aralıklarını göstermektedir.

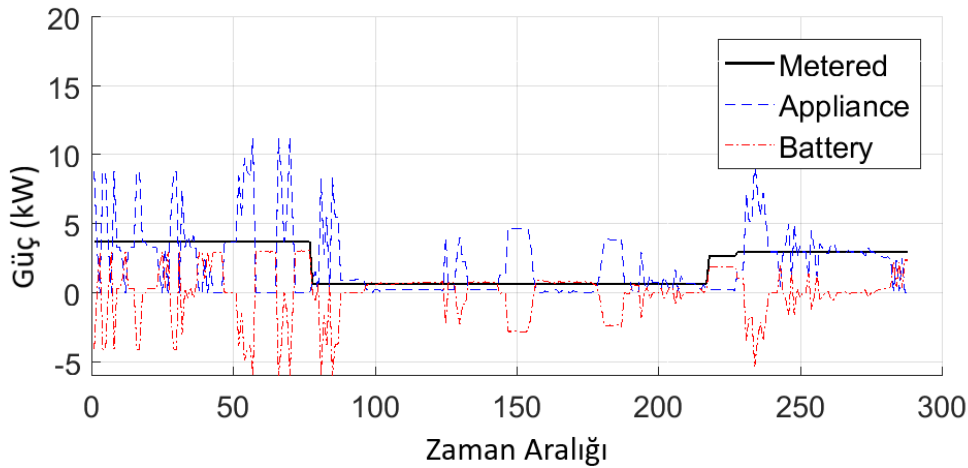


Şekil 2.5: Katlanılır Sapma-2'nin (KS-2) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektiği gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

Çizelge 2.2, Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'teki sonuçlar incelendiğinde, sıfırdan farklı mahremiyet ağırlıkları ($\gamma_3 > 0$) için *Basamaklandırma*, *GOYD*, *EİG* ve *KS-2* metodlarının diğerlerine göre üstün mahremiyet sonuçları verdikleri gözlenmiştir. Görsel olarak bu sonuçlar Şekil 2.2, Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de de görülebilmektedir. Bu 4 stratejinin çıktıları diğerlerine göre arka planda çalışan cihazları çok daha iyi saklamaktadır. Mahremiyetin en az diğer iki alt amaç kadar önemli olduğu durumlarda ($(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = (1, 1, 1)$ ve $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = (1, 1, 10)$), *Basamaklandırma* stratejisi bu çalışmada kullanılan ölçütlere göre en iyi mahremiyet performansını vermektedir.



Şekil 2.6: Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme (GOYD) sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektiği gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

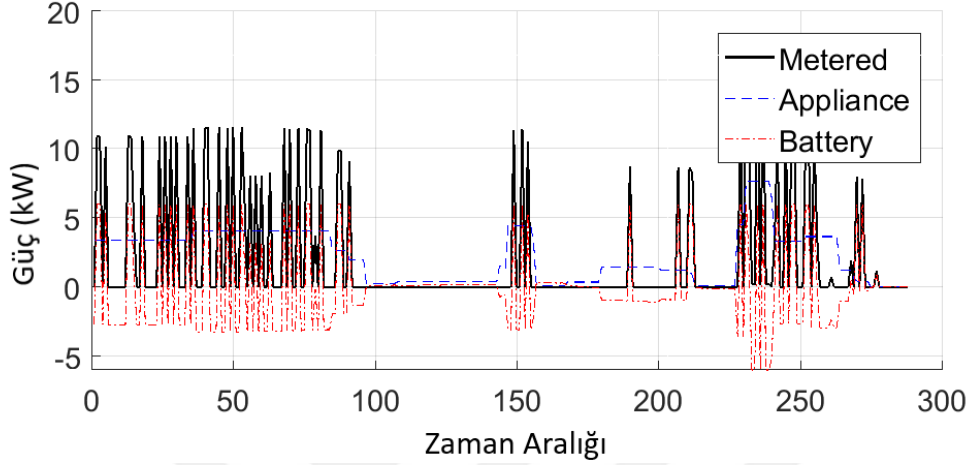


Şekil 2.7: Basamaklandırma stratejisinin sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektiği gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

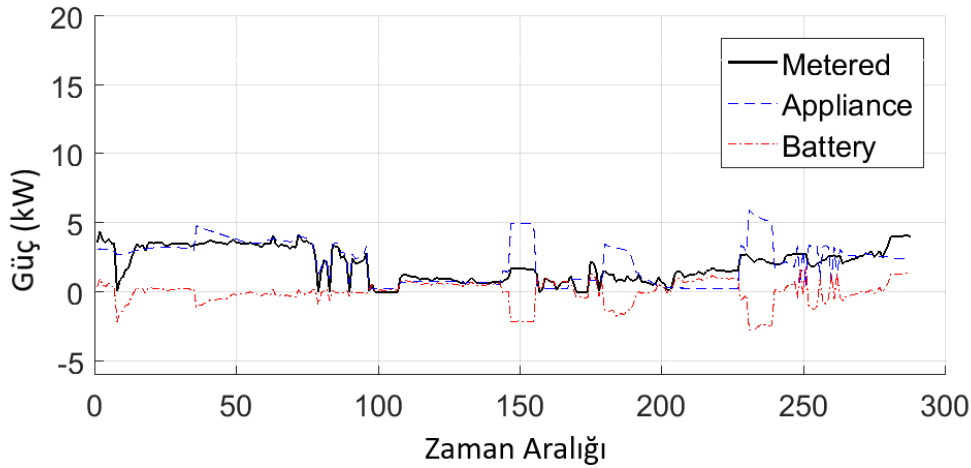
Çizelge 2.5: Farklı güneş paneli boyutlarına (m^2) göre stratejilerin optimum sonuçları [Maliyet, Rahatsızlık, Değişim Sayısı (DS), Determinasyon Katsayısı (DK), Göreceli Entropi (GE)].

Strateji	PV Modül Alanı (m^2)														
	0				40				80						
EİG	[16.87	4.38	3.10	0.003	1.99]	[15.47	3.76	2.91	0.008	2.01]	[14.80	3.57	3	0.013	1.56]
EİG-2	[14.89	3.86	74.50	0.245	0.43]	[14	3.63	62.68	0.197	0.25]	[13.74	3.56	49.32	0.174	0.30]
KS	[15.37	3.98	35.80	0.642	0.71]	[14.23	3.69	30.43	0.248	1.21]	[13.31	3.45	29.66	0.545	0.61]
KS-2	[17.08	4.48	4.40	0.010	1.25]	[16.03	4.34	4.13	0.017	1.21]	[15.68	4.29	4.11	0.037	1.04]
GOYD	[17.06	4.39	3.70	0.014	1.56]	[15.42	4.02	3.11	0.009	1.86]	[13.22	3.93	2.98	0.008	1.72]
Basamak	[16.87	4.30	4	0.005	1.88]	[15.46	3.68	3	0.005	2.77]	[14.79	3.75	3	0.006	1.50]
L1	[14.16	3.67	103.6	0.041	0.27]	[13.11	3.40	88.13	0.042	0.27]	[12.83	3.33	83.99	0.006	0.27]
L2	[15.74	4.08	221	0.095	0.02]	[14.73	3.82	203.3	0.129	0.06]	[14.32	3.71	183.8	0.142	0.13]

Mahremiyet koruma açısından en iyi sonuçları veren EİG, KS-2, GOYD ve Basamaklandırma stratejileri maliyet ve kullanıcı rahatlığı açısından karşılaştırıldığında, Çizelge 2.2’de görülebileceği gibi bu stratejiler maliyet açısından da birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Kullanıcı refahı konusunda ise EİG ve Basamaklandırma stratejileri diğerlerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.



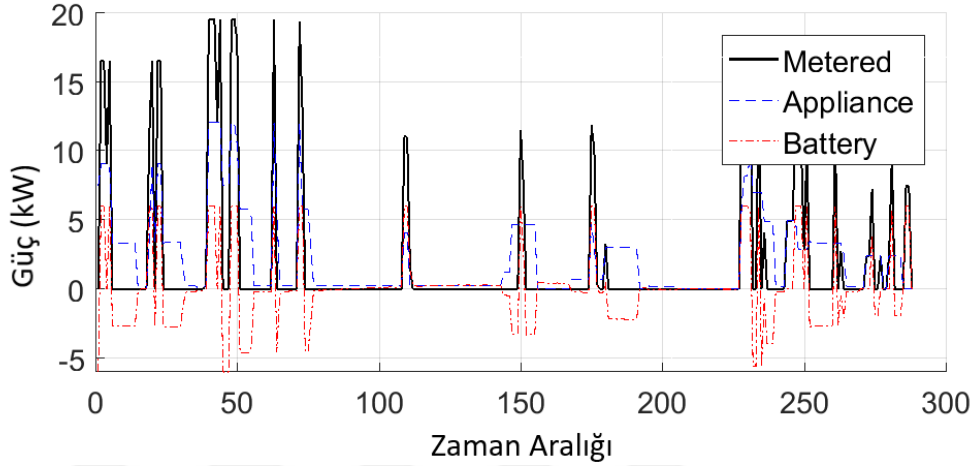
Şekil 2.8: Cihaz L1 Normunu Minimze Etme stratejisi sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektiği gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.



Şekil 2.9: L2 Normu Minimze Etme stratejisi sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektiği gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

Karşılaştırması yapılan mahremiyet stratejilerinin maliyet, rahatlık ve mahremiyet açısından performanslarının yanında optimal sonuca varma süreleri de kullanılabilirlik açısından önem taşımaktadır. EİG ve Basamaklandırma metotları çalışma süresi açısından da GOYD ve KS-2 stratejilerini geride bırakmaktadır. EİG ve Basamaklan-

dırma metotlarının sonuçları birkaç dakika içerisinde elde edilebilirken, GOYD ve KS-2 metotlarının sonuçları birkaç saat içerisinde alınabilmektedir. Dolayısıyla, EİG ve Basamaklandırma stratejilerinin çevrimiçi metot olarak uygulanmasının diğerlerine göre daha kolay olduğu söylenebilir, ki ilgili çalışmalarda da bu metotlar çevrimiçi olarak önerilmiştir [43, 46].

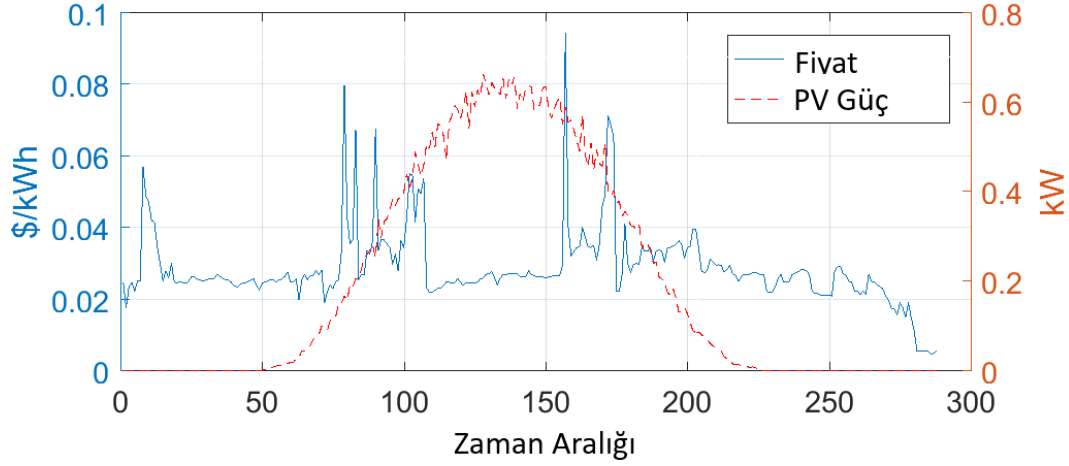


Şekil 2.10: Mahremiyeti ele almayan stratejinin sonuçları. Siyah düz çizgi ölçülen yükü ($p_{s,t}^c$), mavi kesikli çizgi cihazların aslında çektikleri gücü ($\sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca}$), kırmızı kesikli çizgi ise hane içi batarya tarafından telafi edilen güç miktarını ($p_{s,t}^{cb}/\eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d$) temsil etmektedir.

Çizelge 2.3'ten gözlemlenebileceği gibi, maliyetin en düşük olduğu sonuç sadece maliyetin optimize edildiği $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = (1, 0, 0)$ durumu iken, rahatsızlığın en düşük olduğu sonuç ise $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = (0, 1, 0)$ olduğu durumda elde edilmiştir. Stratejiler arasında ise en düşük maliyet ve rahatsızlık baz strateji olan Sıfır Mahremiyet'te (SM) elde edilmiştir. Bu sonuçlar bizlere kullanıcı maliyetinin, kullanıcı rahatlığının ve kullanıcı mahremiyetinin karşılıklı çelişen (mutually conflicting) amaç fonksiyonları olduklarını göstermektedir. Diğer bir deyişle, kullanıcılar maliyet, rahatlık ya da mahremiyet amaçlarını artırmak istediklerinde, kalan amaçlardan fedakarlık etmek zorundadırlar.

2.5.1 Yenilenebilir enerji kapasitesinin mahremiyete etkisi

Çizelge 2.5'te, güneş enerjisi sisteminin yüzey alanına göre mahremiyet koruma stratejilerinin performanslarının nasıl değiştiği incelenmiştir. Bölüm 2.3'te anlatıldığı gibi, yenilenebilir enerji kaynağının ürettiği enerji miktarı, güneş panellerinin yüzey alanı ile doğru orantılıdır. Çizelge 2.5'ten de gözlenebileceği üzere, güneş panellerinin yüzey alanı arttıkça tüm stratejilerde maliyet düşmektedir. Yüzey alanı arttıkça şebekeden çekilecek olan güç miktarı azalacağı için, bu beklenen bir sonuçtur. Ayrıca,



Şekil 2.11: New York şehri için konum tabanlı marjinal fiyatlandırma verisi (location based marginal pricing, $\$/kWh$) ve modellenen güneş enerjisi sisteminin gün içerisinde ürettiği güç miktarı (kW).

yüzey alanı arttıkça tüm stratejilerde kullanıcı rahatlığının da arttığı görülmektedir. Bu da bizlere, hane içi yenilenebilir enerji kaynağının, cihazların ne zaman çalışması gerektiği ile ilgili esnekliği arttırdığını göstermektedir. Son olarak, yüzey alanının artmasının, diğerlerine göre mahremiyet performansı öne çıkan EİG, Basamaklandırma, GOYD ve KS-2 stratejilerinde mahremiyet performansı olarak kayda değer bir katkı yaratmadığı; ancak mahremiyet performansı düşük olan EİG-2, KS, L1 ve L2 metotlarında mahremiyet performansında iyileştirme sağladığı gözlemlenebilmektedir.

2.6 Sonuç ve Tartışma

Akıllı şebeke konseptinin gerçekleştirilebilmesi için gereken en temel özelliklerden biri sık aralıklarla elektrik ölçüm verilerinin toplanmasıdır. Bu veriler sayesinde elektrik şebekesinin üretim maliyetini azaltan talep katılımı (demand response) ve talep tarafı yönetimi (demand side management) gibi hizmetler sunulabilmekte, kaçak kullanımın önüne geçilebilmekte, şebekede yaşanan arıza ve aksaklıklar neredeyse gerçek zamanlı olarak tespit edilebilmektedir. Dolayısıyla, akıllı sayaçlar vasıtasıyla sık aralıklarla elektrik ölçüm verilerini toplamak, enerji şebekesinin verimliliğini, dinamikliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Öte yandan, sıkça toplanan güç kullanım verilerinden, Girişimsel Olmayan Cihaz Yükü İzleme (Nonintrusive Appliance Load Monitoring - NIALM) metotları ile kullanıcıların hangi eşyaları kullandığı bilgisi elde edilebilmekte, bu da kullanıcıların mahremiyetini ihlal etmektedir. Kullanıcılara ait bu cihaz kullanım bilgileri; insanların günlük alışkanlıklarından cinsiyetlerine, evdeki insan sayısından evin hangi saatlerde boş ya da dolu olduğuna kadar bir çok bilgiyi çıkarmada kullanılabilir. Bu yüzden, literatürde akıllı şebekelerde mahremiyet koruma

ile ilgili birçok metot öne sürülmüştür. Literatürde eksik olan ise bu metotlardan hangisinin ya da hangilerinin daha iyi performans sunduğu, ve bu performans karşılaştırmasının yapılabileceği temel matematiksel bir modelin olmamasıdır.

Bu çalışmada, literatürdeki bahsi geçen bu eksikler tamamlanmıştır. Hem genel olarak yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma stratejilerinin optimum performanslarının elde edilebileceği matematiksel bir program altyapısı tanımlanmış, hem de talep tarafı yönetiminde halihazırda dikkate alınan maliyet ve refah amaçları probleme eklenerek mahremiyet koruma stratejilerinin bunlar üzerindeki etkileri göz önüne serilmiştir. Ayrıca, literatürde bahsi geçen farklı mahremiyet performans ölçütleri ele alınarak bunların ne kadar isabetli ölçütler oldukları irdelenmiştir. Birleşik Mahremiyet ölçütü tanımlanarak, mahremiyet performanslarının daha objektif bir biçimde ölçülebilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada literatüre olan katkıları özetlemek gerekirse:

1. Yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma stratejilerinin optimum sonuçlarının elde edilebileceği ortak bir matematiksel model oluşturulmuştur.
2. Literatürde sıklıkla referans verilen mahremiyet koruma metotları, geliştirilen matematiksel model kullanılarak simüle edilmiş, ve optimum performansları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken; hane içi bataryaların verimliliği, yenilenebilir enerji kaynağının belirsizliği ve farklı cihaz türleri ele alınarak bu stratejilerin gerçekçi bir model üzerinde çalışmaları sağlanmıştır.
3. Mahremiyetin yanında kullanıcı maliyeti ve kullanıcı refahı da optimize edilerek, mahremiyet stratejilerinin bu amaçlar üzerinde etkileri ortaya çıkarılmıştır. Matematiksel model, bu üç alt amaç fonksiyonunun (kullanıcı maliyeti, kullanıcı refahı ve kullanıcı mahremiyeti) adil bir şekilde ağırlıklandırılabilceği bir şekilde tasarlanmıştır.

Bu çalışma literatürdeki bir eksiği tamamlamış olmakla birlikte, daha sonraki çalışmalarımıza da bir temel oluşturmuştur. İlerleyen bölümlerde anlatılan çalışmalar yapılırken, bu çalışmada tasarlanan amaç programlama ve minimaks programlama tekniği; yenilenebilir enerji, hane içi batarya, ve cihaz modelleri temel olarak alınmış; modeli daha gerçekçi kılmak için belirlenen ek kısıtlar bu çalışmada tanımlanan temel matematiksel programın üzerine eklenmiştir.



3. AKILLI ŞEBEKELERDE TALEP TARAFIGI YÖNETİMİNİN BÜTÜNCÜL ANALİZİ

3.1 Çalışmanın Amacı

Bölüm 2’de, talep katılımı çerçevesinde tek bir hane için mahremiyetin optimize edilmesini sağlayan bir matematiksel altyapı oluşturulmuştur. Ancak, bir mikro şebekede (microgrid) ya da bir dağıtım şebekesinde (distribution grid) bunun nasıl gerçekleştirileceği, ve mahremiyetin talep katılımı çerçevesinde optimize edilmesinin dağıtım şebekesi operatörünü (distribution grid operator) ya da servis sağlayıcıyı (utility company) nasıl etkilediği çalışılmamıştır. Halihazırda literatürde de, akıllı şebekelerde hem arz tarafının hem de talep tarafının tüm amaç fonksiyonlarını bir arada ele alan kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır (Bkz: Bölüm 1.3 Literatür Araştırması). Bu bölümde, literatürdeki bu eksik doldurulmakta, servis sağlayıcının (SS) amaçları ile kullanıcının amaçları aynı anda optimize edilmektedir. Her bir alt amaç farklı ağırlığa sahip olduğunda geri kalan alt amaçların nasıl etkilendiği gözlemlenmektedir. Bu çalışma, hem arz hem talep tarafının amaçlarını aynı anda optimize ederken kullanıcı mahremiyetini de göz önünde bulunduran ilk çalışmadır.

Bölüm 2’deki çalışmadan farklı olarak, bu çalışmada farklı cihazlara ve farklı özelliklere sahip bir çok ($H = 100$) ev, bu evlere hizmet veren bir SS ve hem kullanıcıların hem de SS’nin amaçlarını optimize ederek optimal çizelgeyi iki tarafa da gönderen bir talep toptancısı (demand response aggregator) varsayılmıştır. Talep toptancısının (TT) minimize etmeye çalıştığı alt amaçlar; gün içerisindeki tepe güç talebi, gün içerisindeki toplam güç talebindeki değişim, kullanıcı maliyeti (elektrik faturası), kullanıcı konforu ve kullanıcı mahremiyetidir. Bu bölümde sunulan çalışma, bu 5 alt amaç fonksiyonunu ele alan literatürdeki ilk çalışmadır.

3.2 Kullanılan Semboller ve Açıklamaları

Bu bölümde kullanılan semboller ve açıklamaları, okuyucunun daha kolay takip edebilmesi açısından Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Çizelge 3.1’deki sembollerin alt indisleri, o sembollerin hangi değişkenlere bağlı olduklarını göstermektedir. Örneğin, $P_{a,h}^{max}$ ifadesi a indisine ve h indisine bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Sembollerin bağlı olabileceği indisler yine Çizelge 3.1’de kümeler ve indisler kısmında belirtilmiştir.

Çizelge 3.1: Semboller ve açıklamaları.

Sembol	Açıklama
Kümeler ve indisler	
h	ev indeksi $[1, 2, \dots, H]$
t, τ	zaman dilimi indeksi $[1, 2, \dots, T]$
a	cihaz indeksi $[1, 2, \dots, A]$
s	senaryo indeksi $[1, 2, \dots, S]$
i	amaç indeksi $[1, 2, \dots, 5]$
A^{pns}	güç kaydırılabilir olmayan cihazlar
Parametreler	
ρ_s	senaryo s 'in olasılığı
c_t	t zaman aralığındaki elektrik fiyatı (\$/kWh)
$\alpha_{a,h}$	h evindeki a cihazının operasyon penceresi başlangıcı
$\beta_{a,h}$	h evindeki a cihazının operasyon penceresi bitişi
$E_{a,h}$	a cihazının gerektirdiği enerji miktarı (kWh)
$P_{a,h}^{max}$	h evindeki a cihazının çekebileceği maks. güç (kW)
P^{max}	bir evin herhangi bir zaman aralığında çekebileceği maks. güç (kW)
$P_{h,s,t}^g$	s senaryosunda t aralığında güneş enerjisinden gelen güç (kW)
$\phi_{a,h,t}$	h evindeki a cihazının t zaman aralığında harcadığı gücün cezası
δ_a	a cihazının ceza katsayısı
γ_i	i amacının ağırlığı
G_i^*	i amaç fonksiyonunun (G_i) tekil optimal değeri
ΔT	bir zaman aralığının uzunluğu (dk.)
P^{max}	bir evin maks. güç çekme kapasitesi (kW)
E^{bi}	Bataryalarda saklanan ilk enerji miktarı (kWh)
E^{bmax}	bataryaların kapasitesi (kWh)
R^{cbmax}	bataryaların maks. şarj hızı (kW)
R^{dbmax}	bataryaların maks. deşarj hızı (kW)
η^c	bataryaların şarj verimliliği
η^d	bataryaların deşarj verimliliği
Değişkenler	
G_i	i amacının değeri
$P_{h,s,t}^c$	h evinde s senaryosunda t zaman aralığında ölçülen güç (kW)
$P_{a,h,s,t}^{ca}$	a cihazınca harcanan güç (kW)
$P_{h,s,t}^{cb}$	bataryaya şarj edilen güç (kW)
P_s^{cmax}	s senaryosunda gün içerisinde şebekeden çekilen tepe güç miktarı (kW)
$P_{h,s,t}^{db}$	bataryadan deşarj edilen güç (kW)
$v_{h,s,t}$	h evinin s senaryosunda t zaman aralığında yenilenebilir enerji kaynağından çektiği güç
$y_{a,h,s,t}$	ikilik değişken
$z_{a,h,s,t}$	ikilik değişken

tir. Sembollerdeki üst indisler ise benzer sembollerin birbirlerinden ayırt edilebilmesi için konulmuştur. Herhangi bir üssel değer ifade etmemektedir.

3.3 Problem Formülasyonu

Bu çalışmada, Bölüm 2'deki çalışmaya benzer bir biçimde, amaç fonksiyonlarını birleşik bir biçimde optimize edebilmek için minimaks amaç programlama (minimax goal programming) yöntemi benimsenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi, amaç programlamada öncelikle her bir amacın tekil optimal değerinin bulunması gerekmektedir. Her bir tekil optimal değer bulunduktan sonra ana problem, her bir alt amaç fonksiyonunun kendi optimal değerlerinden uzaklaşma miktarının toplamını minimize edecek şekilde kurulur. Dolayısıyla aşağıda öncelikle G_i^* değerlerini bulmak için kullanılan temel karışık tamsayı problemi (kısaca TP) tanımlanmıştır. Daha sonra da çok amaçlı optimizasyon için kullanılacak olan ana problem (kısaca AP) tanımlanmıştır.

3.3.1 Temel problem (TP)

G_i^* değerlerini bulmak için tasarlanan temel problem (TP) aşağıdaki gibi (3.1)-(3.17) arasında tanımlanmıştır. Bu formülasyonda ilk dikkat çeken objektif fonksiyonunun $i \in [1, 5]$ için tanımlanmış olmasıdır. Bu ifade TP'nin tüm i 'ler için aynı anda çözüleceğini göstermemekte, her bir i için ayrı ayrı çözüleceğini göstermektedir. Tüm alt amaç fonksiyonlarının ortaklaşa optimizasyonu, her bir alt amaç i için o amacın tekil optimali (G_i^*) bulunduktan sonra AP ile yapılmaktadır.

TP:

$$\text{minimize } G_i, \quad i \in [1, 5] \quad (3.1)$$

$$\text{subject to } p_{a,h,s,t}^{ca} = 0, \quad \forall a, h, s, \forall t \notin [\alpha_{a,h}, \beta_{a,h}] \quad (3.2)$$

$$p_{a,h,s,t}^{ca} \leq P_{a,h}^{max}, \quad \forall a, h, s, t \quad (3.3)$$

$$p_{a,h,s,t}^{ca} = y_{a,h,s,t} \cdot P_{a,h}^{max}, \quad \forall h, s, t, \forall a \in A^{pns} \quad (3.4)$$

$$\Delta T \cdot \sum_{t=1}^T p_{a,h,s,t}^{ca} = E_{a,h}, \quad \forall a, h, s \quad (3.5)$$

$$p_{a'',h,s,t}^{ca} \leq z_{a',h,s,t} \cdot P_{a'',h}^{max}, \quad \forall h, s, a' \prec a'' \quad (3.6)$$

$$E_{a',h} \cdot z_{a',h,s,\tau} \leq \Delta T \cdot \sum_{t=1}^{\tau} p_{a',h,s,t}^{ca}, \quad \forall h, s, \tau, a' \quad (3.7)$$

$$p_{h,s,t}^c = \sum_{a=1}^A p_{a,h,s,t}^{ca} + p_{h,s,t}^{cb} / \eta^c - p_{h,s,t}^{db} \cdot \eta^d - v_{h,s,t}, \forall h, s, t \quad (3.8)$$

$$v_{h,s,t} \leq P_{h,s,t}^g, \quad \forall h, s, t \quad (3.9)$$

$$E^{bi} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{h,s,t}^{cb} - \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{h,s,t}^{db} \leq E^{bmax}, \forall h, s, \tau \quad (3.10)$$

$$E^{bi} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{h,s,t}^{cb} - \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{h,s,t}^{db} \geq 0, \forall h, s, \tau \quad (3.11)$$

$$p_{h,s,t}^{cb} \leq R^{cbmax}, \quad \forall h, s, t \quad (3.12)$$

$$p_{h,s,t}^{db} \leq R^{dbmax}, \quad \forall h, s, t \quad (3.13)$$

$$\sum_{t=1}^T p_{h,s,t}^{cb} = \sum_{t=1}^T p_{h,s,t}^{db}, \quad \forall h, s \quad (3.14)$$

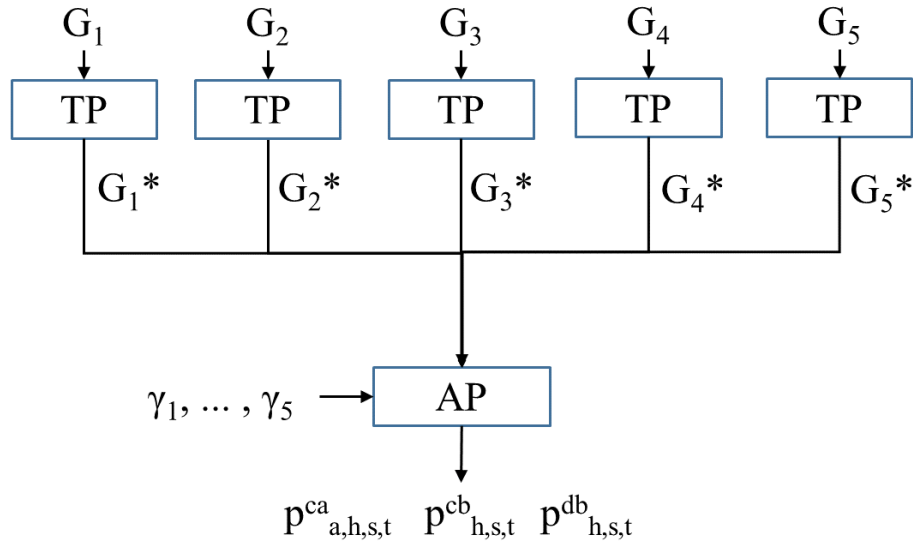
$$p_{h,s,t}^c \leq P^{max}, \quad \forall h, s, t \quad (3.15)$$

$$G_i, p_{h,s,t}^c, p_{a,h,s,t}^{ca}, p_{h,s,t}^{cb}, p_{h,s,t}^{db}, v_{h,s,t} \geq 0 \quad (3.16)$$

$$y_{a,h,s,t}, z_{a,h,s,t} \in \{0, 1\} \quad (3.17)$$

TP formülizasyonu, her bir amaç fonksiyonu G_i 'nin tekil optimal değerinin bulunması için kullanılmaktadır. Dolayısıyla, (3.1)'deki objektif fonksiyonu her bir amaç için farklı olarak tanımlanmakta, ve daha sonra AP'ye girdi olarak verilmektedir (Bkz: Şekil 3.1). (3.2) kısıtı, her h evindeki a cihazının t zaman aralığında çektiği güç miktarının, cihazın operasyon zaman penceresi olan $[\alpha_{a,h}, \beta_{a,h}]$ aralığı dışında 0 olmasını sağlamaktadır. (3.3) kısıtı, tüm cihazların çekebilecekleri maksimum güç miktarlarını belirler. Güç kaydırılabilir olmayan cihazlar için, (3.4) kısıtı cihazların çektikleri güç miktarının ya 0 ya da $P_{a,h}^{max}$ olmasını sağlar. Bu kısıtta kullanılan $y_{a,h,s,t}$ değeri bir ikilik değişkendir (binary variable). (3.5) kısıtı tüm cihazların çalışmalarını tamamlamaları için harcamaları gereken enerjiyi ($E_{a,h}$) harcamalarını sağlar.

Bazı cihazların çalışmaya başlaması, başka bir cihazın çalışmasını bitirmesine bağlı olabilir. Bu tarz cihazlara örnek olarak çamaşır makinesi ve çamaşır kurutma makinesi gösterilebilir. Çamaşır kurutma makinesinin çalışmaya başladığı ilk zaman aralığının, çamaşır makinesinin çalıştığı son zaman aralığından sonra olması gerekmektedir. Aksi halde optimizasyon sonucunda çıkan cihaz çalışma çizelgesi gerçek hayatta uygulanabilir bir çizelge olmamaktadır. Çalışma zamanları böyle ardışık olan cihazlar için (3.6) ve (3.7) kısıtları tanımlanmıştır. Bu kısıtlardaki a' ve a'' ardışık çalışması gereken iki cihazı temsil etmektedir. a' cihazının çalışması bitmeden a'' cihazının çalışmasını engellemek için, (3.6)'de a'' cihazının tüm güç harcamaları $z_{a',h,s,t}$ ikilik değişkeni ile çarpılmaktadır. Dolayısıyla, $z_{a',h,s,t}$ 1'e eşit olmadan a'' cihazı güç harcayamamaktadır. $z_{a',h,s,t}$ değişkeninin a' cihazı halen çalışıyor iken 0'a, çalışmayı bitirdikten sonraki t 'ler için 1'e eşit olması için ise, (3.7) kısıtı tanımlanmıştır. Bu kısıt, τ zaman aralığına kadar



Şekil 3.1: Temel problemin ve ana problemin optimal çözümü bulmak için kullanımı.

a' cihazının harcadığı enerji miktarı operasyonu tamamlaması için harcaması gereken enerji miktarı olan $E_{a',h}$ 'tan küçük olduğu sürece 0 olmaktadır. a' cihazının harcadığı enerji miktarı $(\Delta T \cdot \sum_{t=1}^{\tau} p_{a',h,s,t}^{ca})$ $E_{a',h}$ 'a eşit ya da $E_{a',h}$ 'tan büyük olduğu durumlarda ise, $z_{a',h,s,t}$ 0 da 1 de olsa bu kısıt sağlanmış olur. Dolayısıyla, a' cihazı operasyonunu bitirmek için gerekli enerjiyi harcadıktan sonra, a'' cihazı güç çekmekte serbesttir.

Temel problemdeki (3.8) kısıtı güç dengesi (power balance) kısıtıdır. her t zaman aralığında şebekeden çekilen (ve dolayısıyla akıllı sayaç tarafından ölçülen) güç miktarı $(p_{h,s,t}^c)$; o zaman aralığında cihazlar tarafından çekilen toplam güç $(\sum_{a=1}^A p_{a,h,s,t}^{ca})$ ile batarya tarafından depolanan $(p_{h,s,t}^{cb}/\eta^c)$ ya da batarya tarafından sağlanan $(-p_{h,s,t}^{db} \cdot \eta^d)$ gücün ve yenilenebilir enerji kaynağından çekilen gücün $(-v_{h,s,t})$ toplamına eşittir. Bu kısıtta, şebekeden çekilen güç miktarları pozitif, bataryadan ve yenilenebilir enerji kaynağından çekilen güç negatif olarak belirtilmiştir. Bunun nedeni, bataryadan ya da yenilenebilir enerji kaynağından çekilen enerjinin, şebekeden çekilen güç miktarını azaltmasıdır. Bu kısıtta bataryanın çektiği güç $(p_{h,s,t}^{cb})$ ve sağladığı güç $(-p_{h,s,t}^{db})$ sırasıyla $\eta^c < 1$ 'ye bölünmekte ve $\eta^d < 1$ ile çarpılmaktadır. Bunun nedeni, bataryanın şarj/deşarj verimliliğinin %100'den az olmasıdır. η^c ve η^d katsayıları kullanılarak, bataryanın şarj/deşarj sırasında boşa giden enerji daha gerçekçi bir şekilde modellenmiştir. $\eta^d < 1$ olduğu için, bataryaya depolanan enerjiden daha fazlası $(1/\eta^d)$ kadar şebekeden çekilmektedir. Aynı şekilde, bataryadan çekilen gücün η^d oranındaki miktarı cihazlar tarafından kullanılabilir.

(3.8) kısıtında $p_{h,s,t}^{cb}$ ve $p_{h,s,t}^{db}$ 'nin aynı anda 0'dan farklı olmasını da bataryanın verimliliğinin %100'den az olacak şekilde modellenmesi sağlamaktadır. Optimizasyon

problemi kullanıcı maliyetini düşürmeye çalıştığı için, mümkün olan en düşük $p_{h,s,t}^c$ ile bir çözüm bulmaya çalışmaktadır. $p_{h,s,t}^{cb}$ ve $p_{h,s,t}^{db}$ 'nin aynı anda 0'dan farklı olması (bataryanın aynı zaman aralığında hem şarj hem deşarj edilmesi), bataryanın verimsizliğinden dolayı şebekeden çekilmesi gereken gücü artıracacağı için, optimal sonuç bu durumları elimine etmektedir. Örneğin; $\eta^c = \eta^d = 0.9$ için, aynı t zaman aralığında $p_{h,s,t}^{cb} = 90W$ ve $p_{h,s,t}^{db} = 50W$ olması, şebekeden $p_{h,s,t}^{cb}/\eta^c - p_{h,s,t}^{db} \cdot \eta^d = (100 - 45) = 55W$ 'lık güç çekilmesini gerektirirken, bunun yerine aynı güç dengesini sağlayan $p_{h,s,t}^{cb} = 40W$ ve $p_{h,s,t}^{db} = 0W$ değerleri şebekeden $40W/0.9 = 44.4W$ 'lık güç çekilmesini gerektirmektedir. Bu da kullanıcı maliyetini azalttığı için, optimal sonuç $p_{h,s,t}^{cb} = 90W$ ve $p_{h,s,t}^{db} = 50W$ olan sonuç yerine $p_{h,s,t}^{cb} = 40W$ ve $p_{h,s,t}^{db} = 0W$ olan sonucu vermektedir. Böylece, hiçbir zaman aralığında hem $p_{h,s,t}^{cb}$ 'in hem $p_{h,s,t}^{db}$ 'nin 0'dan farklı değer aldığı bir sonuç elde edilmemektedir.

(3.9) kısıtı, (3.8) kısıtının tamamlayıcısı olarak tanımlanmıştır. (3.9) kısıtı, t zaman aralığında yenilenebilir enerji kaynağından çekilen gücün ($v_{h,s,t}$), yenilenebilir enerji kaynağı tarafından o zaman aralığında üretebileceği güçten ($P_{h,s,t}^g$) fazla olmamasını sağlamaktadır. (3.8) kısıtında $v_{h,s,t}$ yerine direkt $P_{h,s,t}^g$ parametresini kullanmamamızın nedeni, gün içerisinde güneş ışımalarının çok yüksek olduğu zaman dilimlerinde $P_{h,s,t}^g$ 'nin gereğinden fazla olabilmesidir. Bu durumda, (3.8) kısıtında $v_{h,s,t}$ yerine $P_{h,s,t}^g$ kullanmak, problemin olursuz (infeasible) olmasına yol açabilmektedir. Örneğin; bataryanın tamamen dolu olduğu ve $P_{h,s,t}^g$ 'nin cihazların ihtiyaç duyduğu toplam güçten fazla olduğu bir zaman aralığında, (3.8) kısıtındaki $p_{h,s,t}^c$ negatif olmak durumunda kalmaktadır. Şebekeden çekilen güç miktarı $p_{h,s,t}^c$ 0'dan büyük bir değişken olarak tanımlandığı için, bu durum çözücünün bir çözüm bulamamasına neden olmaktadır. (3.9) kısıtı, bu gibi uç durumların önüne geçmektedir.

Temel problemdeki (3.10) ve (3.11) kısıtları, herhangi bir τ zaman aralığında bataryada depolanan enerji miktarının 0 ile batarya kapasitesi olan E^{bmax} arasında olması sağlanmaktadır. Bunu sağlamak için, bataryadaki başlangıç enerjisi E^{bi} ile τ zaman aralığına kadar bataryaya şarj edilmiş enerji toplanıp, bu toplamdan τ zaman aralığına kadar bataryadan deşarj edilmiş enerji çıkarılmaktadır. Bulunan değer (3.10)'da E^{bmax} 'tan küçük olduğu, (3.11)'de 0'dan büyük olduğu garanti edilir. (3.10) ve (3.11) kısıtları her τ için doğru olacak şekilde tanımlandığından dolayı, gün boyu bataryadaki enerjinin 0 ile E^{bmax} arasında kalması sağlanmaktadır.

(3.12) ve (3.13) kısıtları, bataryanın maksimum şarj/deşarj limitlerini belirtir. (3.14) kısıtı ise, gün başında bataryadaki enerji miktarının gün sonunda bataryadaki enerji miktarıyla aynı olmasını sağlar. Böylece, bir sonraki gün de bataryada yük şekilleme için yeterli enerjinin kalması sağlanmaktadır. (3.15) kısıtı, evin çekebileceği maksimum güç miktarını belirlemektedir. Bu kısıt, kullanıcının amaç fonksiyonlarını minimize

etmek için bazı zaman aralıklarında şebekeden aşırı güç çekilmesini önler. (3.16) ve (3.17) kısıtları ise değişkenlerin alabilecekleri değerleri göstermektedir. Değişkenlerin hepsi 0'dan büyük olacak şekilde tanımlanmış olup, $y_{a,h,s,t}$ ve $z_{a,h,s,t}$ daha önce ilgili kısıtlarda açıklandığı gibi ikilik değişken olarak tanımlanmıştır. Bu da TP'nin karışık tamsayı doğrusal program (mixed integer-linear program - MIP) kapsamında olmasını sağlamaktadır.

3.3.2 Amaç fonksiyonları

Bölüm 2'deki çalışmada, kullanıcı maliyeti, kullanıcı mahremiyeti ve kullanıcı memnuniyeti olmak üzere 3 farklı amaç fonksiyonu üzerinde durulmuştu. Bu bölümde, bunlara ek olarak servis sağlayıcının (SS) iki amaç fonksiyonu daha tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonları, gün içerisinde şebekeden çekilen gücün maksimum değerini minimize etmek, ve gün içerisinde şebekeden çekilen gücün gün içerisindeki değişimini minimize etmektir.

SS'nin amaç fonksiyonlarının formülasyona eklenmesi, birinci bölümdeki çalışmadan farklı olarak, bu bölümde birden çok evin (örneğin; bir mahallenin veya bir mikro şebekenin) şebekeden çektiği elektriğin ele alınmasını gerektirmektedir. Böylece bu evlerin şebekeden çekilen toplam güç miktarı hesaplanabilmekte ve bunun maksimumunu ve değişimini minimize eden matematiksel modeller oluşturulabilmektedir. Kullanıcıların ve SS'nin amaç fonksiyonları takip eden bölümlerde tanımlanmıştır.

3.3.2.1 Kullanıcı maliyetini minimize etmek

Kullanıcı maliyeti, h evinin s senaryosunda t zaman aralığında şebekeden çektiği gücün ($p_{h,s,t}^c$) beklenen değerinin, o zaman aralığındaki enerji fiyatı (c_t) ile çarpımının tüm zaman aralıkları, tüm haneler ve tüm senaryolar için toplamı olarak tanımlanmıştır.

$$G_1 = \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T c_t \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot p_{h,s,t}^c \quad (3.18)$$

Burada s yenilenebilir enerji kaynağının farklı güç ürettiği senaryoları temsil etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynağının üreteceği güç miktarı daha öncesinden kesin olarak bilinmemek ile birlikte, üretilecek gücün beklenen değeri senaryolar (s) ve bu senaryoların olasılığı (ρ_s) ile temsil edilerek beklenen değeri elde edilebilmektedir. Şebekeden çekilecek güç miktarı $p_{h,s,t}^c$ de yenilenebilir enerji kaynağından gelecek

güç miktarına bağlı olduğu için, (3.18)'de $p_{h,s,t}^c$ 'nin senaryolara göre beklenen değeri $(\sum_{s=1}^S \rho_s \cdot p_{h,s,t}^c)$ hesaplanmaktadır.

Daha sonra amaç programlamada kullanılmak üzere, bu amaç fonksiyonunun tekil optimal değeri G_1^* 'i bulmak için, (3.18) TP'nin amaç fonksiyonu olarak kullanılmakta ve TP çözdürülerek G_1^* elde edilmektedir.

3.3.2.2 Kullanıcı mahremiyetini maksimize etmek

Kullanıcı mahremiyeti ile ilgili Bölüm 1'de yapılan çalışmalar sonucu, En İyi Gayret (EİG), Katlanılır Sapma-2 (KS-2), Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme (GOYD) ve Basamaklandırma algoritmalarının en iyi optimal mahremiyeti verdiği gösterilmişti. Bu çalışmada, $H = 100$ ev için mahremiyetler optimize edileceğinden, optimizasyon probleminin kabul edilebilir bir sürede sonuç vermesi için bu algoritmalar arasından en hızlı çözüm vereninin kullanılmasının daha yararlı olabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle; EİG, KS-2, GOYD ve Basamaklandırma algoritmalarının arasından, ikilik değişkenler ve büyük katsayılar içermediği için en hızlı sonucu veren EİG modeli bu çalışmada mahremiyet amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. EİG stratejisi bu çalışmada aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$G_2 = \sum_{h=1}^H \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot \left| p_{h,s,t}^c - p_{h,s,(t-1)}^c \right| \quad (3.19)$$

(3.19)'da, ardışık zaman aralıklarında (t ve $(t-1)$) şebekeden çekilen güç miktarı arasındaki mutlak farkların toplamı alınmaktadır. İlk amaç fonksiyonunda olduğu gibi, burada da şebekeden çekilen güç miktarı $p_{h,s,t}^c$ senaryo s 'ye bağlı bir karar değişkeni olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla, (3.19)'da ardışık zaman aralıklarında çekilen güç miktarlarındaki farkın beklenen değeri hesaplanmakta, bu değer tüm zaman aralıkları (t) ve tüm haneler (h) için toplanarak minimize etmeyi istediğimiz amaç fonksiyonu elde edilmektedir.

(3.19)'da not edilmesi gereken bir nokta da, doğrusal olmayan mutlak değer fonksiyonudur. (3.19)'u doğrusallaştırmak için, iki adet kukla değişken $d_{h,s,t}^1$ ve $d_{h,s,t}^2$ tanımlanmış, ve (3.19)'daki ifade aşağıdakiler ile değiştirilmiştir:

$$G_2 = \sum_{h=1}^H \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot (d_{h,s,t}^1 + d_{h,s,t}^2) \quad (3.20)$$

$$d_{h,s,t}^1 - d_{h,s,t}^2 = p_{h,s,t}^c - p_{h,s,(t-1)}^c \quad \forall h, s, t : t \geq 2 \quad (3.21)$$

Amaç fonksiyonu olarak (3.20)'yi kullanmak ve TP'ye (3.21) kısıtını eklemek, TP'yi (3.19) amaç fonksiyonu ile çözmek ile aynı sonucu vermektedir. Böylece, optimizasyon probleminin doğrusallığı korunmuş olmaktadır. Kullanıcı mahremiyetinin tekil optimal değeri olan G_2^* 'yi bulmak için, TP'nin amaç fonksiyonu (3.20) ile değiştirilmekte ve TP'ye (3.21) kısıtı eklenmektedir. Daha sonra TP çözdürülerek G_2^* elde edilmektedir. Bu değer daha sonra çok amaçlı optimizasyon problemi (Ana Problem - AP) çözdürmek için kullanılacaktır.

3.3.2.3 Kullanıcı memnuniyetsizliğini minimize etmek

Kullanıcının talep katılımı kapsamında cihazlarını normal çalışması gereken zamandan daha geç çalıştırması, kullanıcıya belirli bir rahatsızlık ya da memnuniyetsizlik verebilmektedir. Bu çalışmada da, kullanıcının cihazları talep toptancısı (TT) tarafından kullanıcının veya servis sağlayıcının amaç fonksiyonlarını optimize etmek için çizelgelenmektedir. Bu da kullanıcıya memnuniyetsizlik olarak geri dönmektedir. Dolayısıyla, amaç fonksiyonlarından birinin de kullanıcı memnuniyeti olması ve kullanıcının buna diğer amaç fonksiyonları gibi ağırlık verebilmesi, hem problemin gerçekçiliğini hem de uygulanabilirliğini artıran bir çözümdür. Kullanıcı memnuniyetsizliğini modellemek için, her bir cihazın her bir zaman aralığında çektiği güç miktarı, geometrik artan bir ceza katsayısı ($\phi_{a,h,t}$) ile çarpılmaktadır. Böylece, bu amaç fonksiyonu minimize edildiğinde, cihazlar çalışabilecekleri en erken zaman dilimlerinde çalışarak operasyonlarını en kısa sürede bitirmektedirler. Dolayısıyla, kullanıcı mahremiyetini minimize etme amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$G_3 = \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A \phi_{a,h,t} \cdot \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot p_{a,h,s,t}^{ca} \quad (3.22)$$

(3.22)'de yine daha önceki amaç fonksiyonlarında olduğu gibi, cihazların çektikleri güç miktarlarının beklenen değeri ($\sum_{s=1}^S \rho_s \cdot p_{a,h,s,t}^{ca}$) üzerinden amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Her bir beklenen değer t 'ye bağlı olarak geometrik artan $\phi_{a,h,t} = \frac{(\delta_a)^{t-\alpha_{a,h}}}{E_{a,h}}$, $\forall t \in [\alpha_{a,h}, \beta_{a,h}]$ ile çarpılmakta, ve bu değerler her bir ev h , her bir cihaz a ve her zaman aralığı t için toplanmaktadır. Kullanıcı memnuniyetsizliğinin tekil optimal değeri

olan G_3^* 'ü bulabilmek için, (3.22) TP'ye amaç fonksiyonu olarak verilmekte ve TP çözdürülmektedir. Elde edilen optimal sonuç daha sonra çok amaçlı model AP'de kullanılmak üzere G_3^* olarak kaydedilmektedir.

3.3.2.4 Gün içinde şebekeden çekilen gücün değişimini minimize etmek

Bu bölümde daha önce tanımlanmış olan 3 amaç fonksiyonu da kullanıcılara aitti. Bu amaç fonksiyonu ise, servis sağlayıcının (SS) amaçlarından biri olarak tanımlanmıştır. Gün içerisindeki toplam elektrik talebindeki değişim ne kadar az olursa, talep edilen elektriğin üretim maliyeti o kadar düşük olmaktadır. Gün içerisinde elektrik talebindeki büyük değişimler yedekte bekletilen (veya bekletilmek zorunda olunan) yüksek elektrik üretim maliyetli santrallerin sık sık kullanılmasına neden olmakta, bu da elektriğin üretiminin maliyetini artırmaktadır. Gün içerisinde üretilmesi gereken elektriğin mümkün olduğunca gün içerisinde dağılmış olması, üretim maliyetini ve operasyonel maliyetleri düşürmektedir. Dolayısıyla talebin gün içerisindeki değişimini minimize etmek SS'nin arzuladığı bir amaçtır.

Gün içerisinde toplam talepteki değişim aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$G_4 = \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot \left| \sum_{h=1}^H p_{h,s,t}^c - \sum_{h=1}^H p_{h,s,(t-1)}^c \right| \quad (3.23)$$

(3.23) formülasyonunda her bir t zaman aralığında tüm evler tarafından çekilen güç miktarı $\sum_{h=1}^H p_{h,s,t}^c$ ile bir önceki zaman aralığında tüm evlerden çekilen güç miktarı $\sum_{h=1}^H p_{h,s,(t-1)}^c$ arasındaki mutlak farkların beklenen değerleri hesaplanıp tüm t zaman aralıkları için toplanmıştır. Böylece, gün içerisindeki beklenen toplu talepteki değişimlerin toplamı elde edilmiştir. Daha önce kullanıcı maliyetini modellerken yapıldığı gibi, burada da doğrusal olmayan mutlak değer fonksiyonunu doğrusallaştırmak için, $d_{s,t}^3$ ve $d_{s,t}^4$ adında iki tane kukla değişken tanımlanmış, ve (3.23) yerine TP'nin amaç fonksiyonu (3.24) olarak tanımlanıp kısıtlara (3.25) eklenmiştir.

$$G_4 = \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot (d_{s,t}^3 + d_{s,t}^4) \quad (3.24)$$

$$d_{s,t}^3 - d_{s,t}^4 = \sum_{h=1}^H p_{h,s,t}^c - \sum_{h=1}^H p_{h,s,(t-1)}^c, \quad \forall s, t : t \geq 2 \quad (3.25)$$

Gün içerisindeki toplam talepteki değişimin tekil minimum değeri olan G_4^* 'ü bulabil-

mek için, (3.24) TP'ye amaç fonksiyonu olarak verilmekte, (3.25) kısıtlara eklenmekte ve TP çözdürülmektedir. Elde edilen optimal sonuç G_4^* olarak kaydedilmekte ve daha sonra çok amaçlı model AP'de amaç programlamayı gerçekleştirmekte kullanılmaktadır.

3.3.2.5 Gün içinde şebekeden çekilen maksimum gücü minimize etmek

Gün içerisindeki maksimum elektrik talebini minimize etmek de servis sağlayıcının (SS) amaçlarından biri olarak tanımlanmıştır. Gün içerisindeki elektrik talebinin pik değeri ne kadar yüksek olursa, bu yüksek güçteki elektriği üretmenin maliyeti de o kadar yüksek olmaktadır. Gün içerisinde üretilmesi gereken elektriğin mümkün olduğunca gün içerisinde dağılmış olması, üretim ve operasyonel maliyetleri düşürdüğü gibi, dağıtım şebekelerindeki kayıpları da azaltmaktadır. Dolayısıyla gün içerisindeki maksimum talebi minimize etmek SS'nin arzuladığı bir amaçtır. Aslında elektrik talebinin günün 24 saatine yayılması kullanıcılar için de fayda sağlamaktadır. Çünkü, yüksek elektrik talebi olan saatlerdeki yüksek üretim maliyetini SS kullanıcıya elektrik faturasında yansıtmaktadır. Time of Use (ToU) fiyatlandırma aslında tam olarak bunun için var olan bir fiyatlandırma sistemidir. Gün içerisinde çok elektrik kullanılan saatlerdeki elektrik fiyatları da yüksek olmaktadır. Ancak kullanıcılara faydası dolaylı olduğu için, bu amaç fonksiyonu temel olarak SS'nin bir amaç fonksiyonu olarak görülebilir.

Gün içerisinde şebekeden çekilen maksimum güç, matematiksel olarak (3.26)'daki gibi temsil edilebilir. Ancak, (3.26)'daki max fonksiyonu doğrusal bir fonksiyon olmadığı için, TP'de bu ifadeyi daha farklı bir şekilde modellemek gerekmektedir.

$$G_5 = \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot \max_t \left\{ \sum_{h=1}^H p_{h,s,t}^c \right\} \quad (3.26)$$

(3.26)'yı doğrusallaştırmak için, bu denklem (3.27) ile değiştirilip, kısıt olarak da probleme (3.28) eklenebilmektedir. (3.27)'deki p_s^{cmax} değişkeni bir karar değişkeni değil, bir kukla değişkendir. (3.28)'de p_s^{cmax} her bir t zaman aralığındaki toplam talep miktarları ile alttan sınırlandırılmaktadır. (3.27)'de de p_s^{cmax} değeri minimize edilmeye çalışıldığı için, optimal G_5 bize toplam talep miktarlarının maksimumunu vermektedir. Diğer amaç fonksiyonlarında olduğu gibi, burada da senaryolara göre p_s^{cmax} değeri değişebileceği için, (3.27)'de maksimum talebin beklenen değeri minimize edilmektedir.

$$G_5 = \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot p_s^{cmax} \quad (3.27)$$

$$p_s^{cmax} \geq \sum_{h=1}^H p_{h,s,t}^c, \quad \forall t, s \quad (3.28)$$

3.3.3 Çok amaçlı optimizasyon modeli: Ana problem (AP)

Ana Problemi (AP) oluştururken, Bölüm 2’de de yararlanmış olduğumuz minimaks amaç programlama (minimax goal programming) tekniği benimsenmiştir. Amaç programlama stratejisinin kullanılma nedeni, bu bölümdeki 5 farklı alt amaç fonksiyonunun farklı birimlere, farklı minimum-maksimum değerlere ve farklı karakteristiklere sahip olmalarıdır. Örneğin; kullanıcı maliyeti \$ cinsinden iken diğer 4 alt amaç fonksiyonu kW cinsinden hesaplanmaktadır. Kullanıcı maliyeti (G_1) alt amaç fonksiyonunun minimum ve maksimum değerleri (gün içerisindeki elektrik fiyatları sınırlı olduğu için) sınırlı iken, kullanıcı mahremiyeti (G_2), kullanıcı memnuniyeti (G_3) ve şebekeden çekilen gücün değişimi (G_4) alt amaç fonksiyonlarının maksimum değerleri çok büyük olabilmektedir. Yine fonksiyon karakteristiği olarak G_1 zaman aralığına (t) göre bakıldığında ayrı bir fonksiyon iken, G_2 ve G_4 yarı doğrusal, G_3 ise eksponansiyel bir fonksiyon olarak birbirinden ayrılmaktadır. Bu nedenle, bu alt amaç fonksiyonlarını ortaklaşa optimize ederken, bir normalizasyon uygulamadan amaç fonksiyonumuzu (3.29) gibi tanımlar isek, fonksiyon değerleri daha yüksek olan alt amaç fonksiyonlarına daha çok ağırlık vermiş oluruz.

$$\text{minimize } G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 \quad (3.29)$$

(3.29)’daki amaç fonksiyonuna her bir alt amaç için (3.30)’daki gibi ağırlıklar (γ_i) verilse bile, alt amaç fonksiyonlarının adil bir biçimde optimize edilebilmesi için bu ağırlıklara verilmesi gereken değerlerin hesaplanabilmesini sağlayan evrensel bir metot bulunmamaktadır.

$$\text{minimize } \gamma_1 \cdot G_1 + \gamma_2 \cdot G_2 + \gamma_3 \cdot G_3 + \gamma_4 \cdot G_4 + \gamma_5 \cdot G_5 \quad (3.30)$$

Amaç programlamanın özelliği, her bir alt amaç fonksiyonunun kendi tekil optimal (singular optimal) değerinden (G_i^*) sapmasını minimize etmesidir. Böylece, alt amaç fonksiyonlarının birimi, maksimum ve minimum değerleri, karakteristiği gibi özelliklerden bağımsız olarak bu alt amaç fonksiyonları adil bir şekilde ortaklaşa optimize

edilebilmektedir. Bu bölümde tanımlanan çok amaçlı problemin amaç programlama metodu ile tanımlanmış hali (3.31)'de verilmiştir. Bir alt amaç fonksiyonu diğerine göre önceliklendirilmek istendiğinde, ilgili alt amaç fonksiyonunun γ_i değeri diğerlerine göre yüksek bir değer seçilerek önceliklendirme yapılabilmektedir.

$$\text{minimize } \gamma_i \cdot \frac{G_i - G_i^*}{G_i^*}, \quad i \in [1,5] \quad (3.31)$$

Alt amaç fonksiyonlarının adil bir biçimde önceliklendirilmesinin yanı sıra, optimizasyon probleminin çözümünün o ağırlıklar için belirli bir optimallik garantisini vermesi gerekmektedir. (3.31)'deki formülasyon her ne kadar önceliklendirmeyi adil bir biçimde yapsa da, alt amaç fonksiyonlarının sapmalarının toplamını minimize ettiği için, verdiği sonuç hakkında herhangi bir garanti sunmamaktadır. Bu problemdeki alt amaç fonksiyonlarının bazıları kullanıcılara, bazıları da servis sağlayıcıya ait olduğu için, elde edilecek optimum sonucun sosyal optimum (socially optimum) olması, yani en az bir alt amacı daha kötü hale getirmeden başka bir amacın daha iyi yapılamayacağı bir sonuç vermesi, elde edilen sonucun iki taraf için de kabul edilebilir olmasını sağlayacaktır. Bu tür sonuçlara Pareto optimum da denmektedir. Her bir ağırlık kombinasyonu ($[\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5]$) için Pareto optimum bir sonuç elde edebilmek için, amaç fonksiyonunu tanımlarken amaç programlamanın yanı sıra aşağıdaki gibi minimaks formülasyonu benimsenmiştir.

AP:

$$\text{minimize } Z \quad (3.32)$$

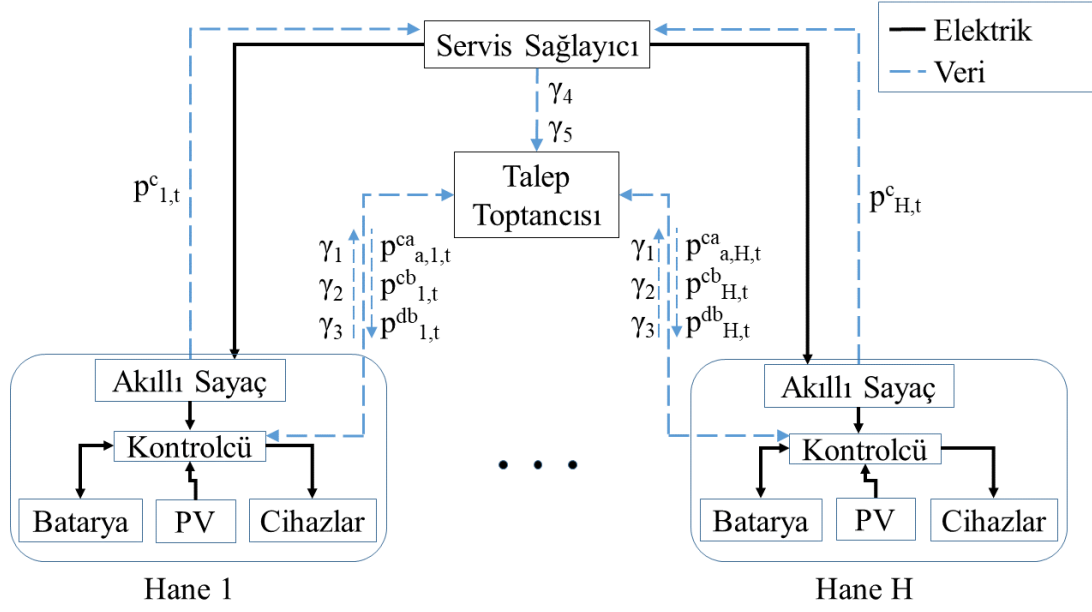
$$\text{subject to } Z \geq \gamma_i \cdot \frac{G_i - G_i^*}{G_i^*}, \quad \forall i \quad (3.33)$$

$$d_{h,s,t}^1, d_{h,s,t}^2, d_{s,t}^3, d_{s,t}^4, p_s^{cmax} \geq 0, \quad \forall h,s,t \quad (3.34)$$

subject to constraints (3.2)-(3.17), (3.18), (3.20), (3.21), (3.22), (3.24), (3.25), (3.27), (3.28)

3.4 Sistem Modeli

Bu bölümdeki çalışmada, $H = 100$ tane ev, bu evlere elektrik hizmeti sağlayan bir servis sağlayıcı, ve talep katılımını sağlayan bir aracı (talep toptancısı - TT) olduğu varsayılmıştır. Bu talep toptancısı, evlerden ve servis sağlayıcıdan her amaç fonksiyonu için ağırlıkları (γ_i) toplayarak, hem servis sağlayıcı için hem de kullanıcılar için ortak bir optimal çizelge bulmakta ve bu çizelgeleri evlerdeki kontrolcülere göndermek-



Şekil 3.2: Varsayılan sistem modeli.

tedir. Kullanıcıların amaç fonksiyonlarının ağırlıkları ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$) kullanıcılardan, servis sağlayıcının ağırlıkları (γ_4, γ_5) servis sağlayıcıdan gelmektedir. Talep toptancısının optimizasyon problemini (AP) çözdükten sonra bulduğu optimal ($p_{a,h,s,t}^{ca}, p_{h,s,t}^{cb}, p_{h,s,t}^{db}$) değerleri evlerdeki kontrolcülere gönderilerek, kontrolcülerin bu değerlere göre evdeki cihazları ve bataryayı çalıştırması sağlanmaktadır.

Çalışmada kullanılan diğer parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Çizelge 3.2’de R^{cbmax} ve R^{dbmax} değerleri, bataryanın maksimum şarj/deşarj güç değerlerini temsil etmektedir. η^c ve η^d değerleri ise, bataryanın şarj/deşarj verimliliğini temsil etmektedir. η^c ve η^d ’nin 0.9 olması, hanelerde var olduğu farz edilen bataryaların şarj veyadeşarj ettikleri gücün %10’unun bu işlemler sırasında kayıp olduğunu belirtmektedir. δ_a değeri, geometrik artan $\phi_{a,h,t}$ değerini hesaplamak için kullandığımız bir katsayı olup, η_{pv} ise hanelerde var olduğu varsayılan yenilenebilir enerji sistemlerinin güneş ışınımını elektriğe dönüştürme verimini temsil etmektedir.

Çizelge 3.2: Sistem parametreleri ([98, 104]).

Parametre	Değer	Birim
R^{cbmax}, R^{dbmax}	0.8	kW
P^{max}	30	kW
η^c, η^d	0.9	—
δ_a	2	—
η_{pv}	0.19	—

Bu çalışmada, $H = 100$ evin 3 farklı tipte evlerden oluştuğu varsayılmıştır. Böylece, problemin gerçekçiliğinin artırılması hedeflenmiştir. Evlerin birbirinden ayrılan özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Büyük Evlerde 25 elektrikli cihaz olduğu varsayılmıştır. Bu cihazlardan birinin de HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) olduğu varsayılmıştır. Büyük Evler geniş ailelerin yaşadığı müstakil evler olarak tasarlanmıştır. Bu evlerin çatılarında da PV yenilenebilir enerji sistemlerinin olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, her büyük evde $2kWh$ kapasiteli bir batarya [20] ve 1 adet de plug-in elektrikli otomobil olduğu varsayılmıştır. Orta Evler, yine içlerinde bir ailenin yaşadığı apartman daireleri olarak tasarlanmıştır. Orta Evlerde de Büyük Evlerde olan cihazların çoğu bulunmaktadır. Toplam 21 elektrikli cihaza sahip bu evlerde, Büyük Evlere göre daha küçük kapasiteli bir hane içi batarya bulunmaktadır. Orta Evler'in kendilerine ait bir çatıları olmadığı için, kendi PV yenilenebilir enerji sistemlerine sahip olmadıkları varsayılmıştır. Yine Orta Evlerin kendi evlerine bağlı garajları olmadığı için plug-in elektrikli arabalarının olmadığı varsayılmıştır. Küçük Ev olarak tanımlanan evler ise hem müstakil olmayan, hem de içerisinde 1-2 kişinin yaşadığı evler olarak tasarlanmıştır. Bu evlerde kullanılan cihaz sayısı diğerlerine göre az olmakla birlikte, bu evlerde yük şekilleme için cihazlar dışında kullanılabilecek bir imkan (batarya, yenilenebilir enerji kaynağı, plug-in elektrikli araba) bulunmadığı varsayılmıştır.

Çizelge 3.3: Farklı tipteki evlerin özellikleri.

Özellik	Büyük Ev	Orta Ev	Küçük Ev
Evdeki cihaz sayısı	25	21	12
Evin batarya kapasitesi (E^{bmax})	$2kWh$	$1kWh$	N/A
PV panel büyüklüğü ($\$_{pv}$)	$40m^2$	N/A	N/A
Evdeki şarjlı otomobil sayısı	1	0	0

Sistem dahilindeki evlerde bulunan yenilenebilir enerji kaynağının nasıl modellenildiği, servis sağlayıcının fiyatları nasıl belirlediği ve ne zaman kullanıcılara gönderdiği, cihazların çizelgelenebilirlik özelliklerine göre sınıflandırılması ve geometrik artan memnuniyetsizlik katsayısının ($\phi_{a,h,t}$) nasıl hesaplandığı aşağıdaki bölümlerde sırayla açıklanmıştır.

3.4.1 Yenilenebilir enerji kaynağı modeli

Güneş ışınımının gün içerisindeki dağılımı daha önce de bahsedildiği gibi iki doruklu (bimodal) olasılık dağılım fonksiyonu kullanılarak temsil edilebilmektedir. Bu fonksiyonu oluşturan her bir tek doruklu dağılım için ise Beta dağılımı kullanılmaktadır [98]. Beta fonksiyonu (3.35)'teki gibi formülize edilmektedir.

$$f_b(r) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\rho+\zeta)}{\Gamma(\rho)\Gamma(\zeta)} r^{\rho-1} (1-r)^{\zeta-1}, & 0 \leq r \leq 1; \rho, \zeta \geq 0 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.35)$$

(3.35)'teki ρ ve ζ değerleri yerine sırasıyla [98]'de verilen güneş ışınımının gün içerisindeki ortalama değeri (μ) ve değişintisi (σ^2) kullanılmaktadır. $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonunu ve $f_b(r)$ güneş ışınımının olasılık yoğunluk fonksiyonunu temsil etmektedir (kW/m^2). Bu dağılımı PV enerji sistemi tarafından üretilen elektriğe dönüştüren fonksiyon ise (3.36)'da verilmiştir.

$$f_{pv}(r) = \eta_{pv} \cdot \xi_{pv} \cdot r \quad (3.36)$$

(3.36)'da verilen ξ_{pv} PV sistemindeki güneş panellerinin toplam alanını (m^2), η_{pv} ise güneş panellerinin verimliliğini (%) temsil etmektedir. İki doruklu dağılımı kullanarak gerçekçi güneş ışınımı değerleri elde edebilmek için, Monte Carlo simülasyonu tekniği uygulanmıştır. 4000 adet örnek güneş ışınımı dağılımı elde edilmiş [98], ve bu dağılımlar (3.36)'daki dönüşüm fonksiyonu ile elektrik gücüne çevrilmiştir. Elde edilen örneklerin her birini bir senaryo kabul edip optimizasyon problemini (AP) $s = 4000$ ile çözdürmek uzun zaman alacağı için, bu değerler daha kabul edilebilir bir değer olan 10'a k-ortalamar kümesi tekniği [65] ile düşürülmüştür. Elde edilen her bir senaryonun olasılığı (ρ_s), o senaryoya karşılık gelen kümedeki örnek sayısının toplam örnek sayısına (4000) bölünmesi ile elde edilmiştir. Senaryo küçültme (scenario reduction) tekniği kullanılarak, optimizasyon probleminin her bir zaman aralığında (ΔT) çözülebilecek şekilde boyutlandırılması sağlanmıştır [105].

3.4.2 Fiyat modeli

Time of Use (ToU) fiyatlandırma tekniği servis sağlayıcılar tarafından sıkça kullanılan bir fiyatlandırma tekniğidir. ToU fiyatlandırmada, elektrik fiyatları günün hangi saatinde kullanıldığına göre değişmektedir. Halihazırda New York City gibi şehirlerin servis sağlayıcıları web sitelerinde [101] ToU fiyatlandırma bilgilerini bir gün önceden paylaşmaktadır. Bu çalışmada da, kullanıcıların ToU elektrik fiyatlandırma bilgilerini bir gün öncesinden servis sağlayıcıdan aldıkları varsayılmıştır. Fiyatlandırma için [101] web sitesindeki 9/14/2018 tarihli fiyatlandırma verisi kullanılmıştır. Bu veride elektrik fiyatları gün içerisinde 5'er dakikalık dilimlerle değişebilmektedir. Buna paralel olarak, bu çalışmada da ΔT 5 dakika olarak alınmış ve gün içerisindeki toplam zaman aralığı sayısı $T = 288$ olarak belirlenmiştir.

3.4.3 Cihaz modeli

Bu çalışmada, cihazlar üç farklı kategoride ele alınmıştır [100]. Bunlar zaman- kaydırılabilir (time-shiftable), zaman ve güç kaydırılabilir (time-and-power-shiftable) ve kaydırılmaz (non-shiftable) cihazlardır. Zaman-kaydırılabilir cihazların çalıştığı zaman aralıklarının çizelgelendirilebildiği, ancak kullanacakları güç miktarının sabit olduğu varsayılmıştır. Zaman ve güç kaydırılabilir cihazların hem çalışacakları zaman aralıklarının hem de çalıştıkları zaman aralıklarında şebekeden çekecekleri güç miktarının şekillenebileceği varsayılmıştır. Hem zaman hem güç şekillenebilir cihazlara örnek olarak HVAC ve plug-in elektrikli araçlar örnek gösterilebilir. Üçüncü ve son kategori cihazlar olan kaydırılmaz cihazlar ise zaman veya güç ekseninde çizelgelenemeyen cihazlardır. Bu cihazlara anlık kullanılan (on-demand) cihazlar (TV, kettle gibi) ile sürekli çalışan cihazlar (buzdolabı, CCTV güvenlik sistemi gibi) örnek gösterilebilir.

Bu bölümdeki çalışmada kullanılan cihazlar, bu cihazların şekillenebilirlik bilgileri ile çalışma zamanları ve güç kullanımları ile ilgili bilgiler [100]'den alınmıştır. Her evdeki cihazların aynı anda çalışmaması için, [100]'den alınan cihaz çalışma zaman aralıklarına bir X rastgele değişkeni eklenmiştir. Bu ayrık rastgele değişkenin olasılık dağılım fonksiyonu $F(x) = 1/25, x \in \{-12, \dots, 12\}$ olarak belirlenmiştir. Böylece, her bir h evindeki a cihazının çalışması gereken operasyon pencerelerinin $(\alpha_{a,h}, \beta_{a,h})$ birbirinden farklı olması sağlanmıştır. Bu hem problemin gerçekçiliğini artırmakta, hem de 1'den fazla evin optimizasyon probleminde kullanılmasının bir anlamı olmasını sağlamaktadır. Eğer $H = 100$ evdeki tüm cihazların çalışması gereken zaman aralıkları $(\alpha_{a,h}, \beta_{a,h})$ aynı olsaydı, sistemde 1 ev yerine 100 ev kullanmanın optimizasyon probleminin boyutunu büyütme dışında sonuca bir katkısı olmazdı.

3.4.4 Kullanıcı memnuniyetsizliği modeli

Hanelerdeki elektrikli cihazların çalışmaları gereken zamandan daha geç çalışmaları kullanıcılar da belli bir memnuniyetsizliğe neden olmaktadır. Kullanıcıların cihazlarının geç çalışmasından kaynaklı bu rahatsızlıklarını matematiksel olarak modellemek için, t 'ye bağlı olarak geometrik artan bir $\phi_{a,h,t}$ ceza katsayısı tanımlanmış ve her cihazın güç kullanımı bu $\phi_{a,h,t}$ katsayısıyla çarpılarak kullanıcı memnuniyetsizliği modellenmiştir. Burada bahsi geçen $\phi_{a,h,t}$ katsayısının nasıl modellendiği verilmiştir. $\phi_{a,h,t}$ katsayısının geometrik artan bir parametre şeklinde modellenmesi fikri [102] çalışmasından alınmıştır. İlgili parametre (3.37)'deki gibi modellenmiştir.

$$\phi_{a,h,t} = \frac{(\delta_a)^{t-\alpha_{a,h}}}{E_{a,h}} \quad \forall a, h, \forall t \in [\alpha_{a,h}, \beta_{a,h}] \quad (3.37)$$

(3.37)'deki δ_a 1'den büyük bir sayı olarak tanımlanmıştır. Böylece, $\phi_{a,h,t}$ değeri t 'nin $\alpha_{a,h}$ 'tan büyük olduğu her değer için eksponansiyel olarak artmaktadır. $\phi_{a,h,t}$ değeri $E_{a,h}$ ile normalize edilerek farklı cihazların ceza katsayılarının birbirlerine yakın değerler olması sağlanmıştır.

3.5 Nümerik Analiz

Bu bölümde ele alınan 5 farklı amaç fonksiyonunun optimizasyonunun birbirleri üzerindeki etkisini araştırmak için, Şekil 3.1'de belirtildiği gibi öncelikle temel problem (TP) her bir alt amaç fonksiyonu $G_i, i \in [1, \dots, 5]$ için çözdürülerek her biri için G_i^* tekil optimal değerler elde edilmiştir. Daha sonra, Bu G_i^* değerleri ana probleme (AP) parametre olarak verilerek AP farklı γ_i kombinasyonları için çözdürülmüş ve optimal sonucun verdiği G_i değerleri kaydedilmiştir.

TP ve AP, GAMS IDE ortamı kullanılarak kodlanmış ve GAMS IDE'nin içerisinde halihazırda bulunan CPLEX 12.6.2 çözücüsü ile çözdürülmüştür. Çözücünün üzerinde koştuğu sistem 4 çekirdekli i7 işlemci ve 16 GB RAM'e sahip bir bilgisayardır. TP ve AP karışık tamsayı program (mixed integer program) olarak modellendiği için, her bir problem örneği (instance) CPLEX ile optimal değerine ulaşabilmektedir.

3.5.1 Problemin büyüklüğü ve çözüm zamanı

TP ve AP'nin her bir çözümü; tüm senaryolar, evler, cihazlar ve zaman dilimleri için $p_{a,h,s,t}^{ca}$, $p_{h,s,t}^{cb}$ ve $p_{h,s,t}^{db}$ değerlerini hesaplamaktadır. Varsayılan mikro şebekede $H = 100$ hane, her hanede ortalama $A = 19$ cihaz, gün içerisinde $T = 288$ zaman aralığı ve $S = 10$ senaryo bulunmaktadır. Bu yüzden, $p_{a,h,s,t}^{ca}$ değişkeni $A \cdot H \cdot S \cdot T = 5,472,000$ adet sınırlı değişkenden oluşmaktadır. Benzer bir biçimde, $p_{h,s,t}^{cb}$ ve $p_{h,s,t}^{db}$ değişkenlerinin her biri 288,000 değişkenden oluşmaktadır. Ancak, $p_{a,h,s,t}^{ca}$ değeri her t için tanımlı değildir. Bunun nedeni, cihaz güç kullanım değerlerinin belirli zaman aralıkları $[\alpha_{a,h}, \beta_{a,h}]$ için tanımlı olmasıdır. Dolayısıyla, $p_{a,h,s,t}^{ca}$ 'nin boyutu $S \cdot \sum_{a,h} (\beta_{a,h} - \alpha_{a,h} + 1) = 1,496,000$ 'ya düşmektedir. Benzer bir şekilde, $p_{h,s,t}^{cb}$ ve $p_{h,s,t}^{db}$ aynı anda 0'dan farklı olamadıkları için, bu iki değişken toplam 288,000 sınırlı değişkenden oluşmaktadır. Bu da toplamda her bir optimizasyon probleminin 1,784,000 değişkenden oluştuğunu göstermektedir. Parametrik olarak da toplam problem boyutu (3.38)'deki gibi temsil edilebilmektedir.

$$S \cdot \left(\sum_{a,h} (\beta_{a,h} - \alpha_{a,h} + 1) + H \cdot T \right) \quad (3.38)$$

CPLEX'in TP'yi çözdürmesi daha önce bilgileri verilen sistem üzerinde ortalama 5-10 saniye sürmektedir. AP'nin çözülmesi ise yine aynı sistem üzerinde γ_i değerlerinin kombinasyonuna bağlı olarak 30 saniye ile 1 dakika arasında vakit almaktadır. AP'nin çözdürülmesi için öncelikle TP'nin her bir G_i için çözdürülmesi gerektiğinden, toplam çözüm süresi yaklaşık 60-90 saniyedir. Sistem modelinde her bir zaman aralığı 5 dakika uzunluğunda alındığı için, bu çözüm süresi her bir zaman aralığı için dinamik bir çözüm elde edilmesine de olanak tanımaktadır.

3.5.2 Amaç fonksiyonları arasındaki ilişkilerin karakterizasyonu

Bu bölümde, AP farklı γ_i kombinasyonları için çözdürülmüş, ve bu çözümlerin sonucunda her bir amaç fonksiyonunun optimalinden yüzde sapması $(100 \cdot (G_i - G_i^*) / G_i^*)$ hesaplanmıştır. Çeşitli γ_i kombinasyonları için elde edilen yüzde sapma değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Her bir alt amaç fonksiyonuna karşılık gelen γ_i değeri 0'dan ∞ 'a sonsuz farklı değer alabileceği, ve her bir γ_i kombinasyonu için farklı bir Pareto optimal sonuç bulunabileceği için, tüm γ_i kombinasyonları için AP'yi çözdürmek etkili bir yöntem değildir. Bunun yerine, γ_i değerleri için "Yüksek" ve "Düşük" olmak üzere iki farklı öncelik seviyesi tanımlanmıştır. Bu öncelik kombinasyonlarına göre AP çözümleri alınmış ve sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Böylece, 5 farklı amaç fonksiyonundan hangilerini önceliklendirmenin diğerleri üzerinde nasıl etkilerinin olduğu gözlemlenebilmektedir.

Çizelge 3.4'teki her bir satır AP'nin bir çözümünün sonuçlarını göstermektedir. "Öncelikler" sütunu, G_1, \dots, G_5 alt amaçlarının hangilerinin yüksek, hangilerinin düşük önceliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bir G_i amaç fonksiyonunun yüksek (Y) önceliğe sahip olması, ona karşılık gelen γ_i değerinin 10 olduğunu, düşük (D) olması ise karşılık gelen γ_i değerinin 1 olduğunu göstermektedir. Amaç programlama ve minimaks tekniklerini birlikte kullandığımız için, burada (yüksek,düşük) γ_i değerlerinin (10,1) olması ile (100,10) ya da (1,0.1) olması arasında hiçbir fark olmamaktadır. Örneğin; i ve j objektifleri için $\gamma_i = 10$ ve $\gamma_j = 1$ olacak şekilde AP çözdürüldüğünde, optimal çözümde G_i alt amaç fonksiyonunun kendi tekil optimumundan yüzdesel sapması, G_j alt amaç fonksiyonunun kendi tekil optimumundan yüzdesel sapmasına göre 10 kat cezalandırılmaktadır. $\gamma_i = 100$ ve $\gamma_j = 10$ olduğunda da G_i alt amaç fonksiyonunun kendi tekil optimumundan yüzdesel sapması G_j alt amaç fonksiyonunun kendi tekil optimumundan yüzdesel sapmasına göre 10 kat cezalandırılmaktadır. Dolayısıyla, AP bu iki durum için de aynı yüzde sapmaları $(100 \cdot (G_i - G_i^*) / G_i^*)$ vermektedir. Çizelge 3.4'teki "Tekil optimalden yüzde sapmalar" sütununda ise, "Öncelikler" sütunundaki öncelik kombinasyonu ile çözülen AP'nin sonucunda G_i alt amaç fonksiyonlarının her birinin tekil optimallerinden (G_i^*) yüzde sapma değerleri verilmiştir. Bu sütundaki değerler,

incelenmelerinin daha kolay olması açısından onda birlik değerlerine yuvarlanmıştır.

Çizelge 3.4'ün yanı sıra, Şekil 3.3-3.7'de alt amaç fonksiyonlarının önceliklendirilmelerinin birbirleri üzerinde olan etkilerini göstermektedir. Şekil 3.3-3.7'deki sonuçların Çizelge 3.4'tekilerden farkı, her bir grafikte bir alt amaç fonksiyonu hariç diğerlerinin öncelik değerleri (γ_i) sabit tutulmakta, ve sadece bir alt amaç fonksiyonunun öncelik değeri değiştirilmektedir. Böylece, bahsi geçen alt amaç fonksiyonunun düşükten yükseğe doğru öncelik değeri değiştirilirken diğer alt amaç fonksiyonlarının optimal değerlerinin nasıl etkilendiği görülebilmektedir.

Çizelge 3.4'teki değerlerin onda birlik basamaklarına yuvarlanmış olmaları, bazı öncelik kombinasyonları için sonuçların aynıymış gibi görünmesine neden olabilmektedir. Her bir öncelik kombinasyonu için sonuçların farklı olduğunu ve Pareto optimalliklerinin sabit olduğunu gösterebilmek için, Çizelge 3.4'te verilen değerlerinden $\varepsilon < 0.05$ kadar daha büyük olan sayıların yanına "+" konulmuştur. Yanlarında "+" bulunan sayılar, aslında yazılan değerden $\varepsilon < 0.05$ kadar daha büyüktürler.

Şekil 3.3-3.7'de sırasıyla her alt amaç fonksiyonunun farklı öncelik değerleri için tüm alt amaç fonksiyonlarının tekil optimal değerlerinden (G_i^*) sapmaları çizdirilmiştir. Şekil 3.3'te, kullanıcı maliyetinin önceliği (γ_1) 0.1'den 20'ye kadar çeşitli ağırlıklar alırken, diğer alt amaç fonksiyonlarının öncelikleri $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = 1$ olarak sabit tutulmuştur. Böylece, kullanıcı maliyetinin önemi arttıkça diğer alt amaç fonksiyonlarının nasıl etkilendiği görülebilmektedir. AP'de kullanılan minimaks formülasyonundan dolayı, Şekil 3.3-3.7'de bazı alt amaç fonksiyonlarının sapmaları aynı çıkabilmektedir. Bunun nedeni, minimaks formülasyonunda, tüm alt amaç fonksiyonlarının sapmalarının maksimumunun minimize edilmesidir. Bundan dolayı, alt amaç fonksiyonlarının bir ya da birkaçının sapma miktarı bu maksimum sapma miktarına eşit olabilmektedir.

Yine Şekil 3.3-3.7'de gözlemlenebileceği üzere, bazı amaç fonksiyonlarının sapmaları ise her durumda bu maksimuma erişememektedir. Bunun nedeni, bu alt amaç fonksiyonlarının maksimumlarının sınırlı olmasıdır. Özellikle kullanıcı maliyeti (G_1) ve kullanıcı memnuniyeti (G_3) değerleri belli üst değerlere sahiplerdir. Çünkü, gün içerisinde elektrik fiyatındaki değişimler sınırlı olduğu için kullanıcı maliyetindeki artış da sınırlı olmaktadır. Aynı şekilde, cihazların belli bir çalışma zaman pencereleri ($\alpha_{a,h}, \beta_{a,h}$) olduğu için, cihazların ne kadar geç çalışabileceklerinin ve dolayısıyla kullanıcıda oluşacak memnuniyetsizliğinin de bir üst sınırı bulunmaktadır. Bu üst sınırlar, G_2 , G_4 ve G_5 'in üst sınırlarına göre daha kısıtlı üst sınırlar olduğu için Şekil 3.3-3.7'deki sapmaları da belli bir öncelik değerinden sonra diğerlerinden ayrılmaktadır.

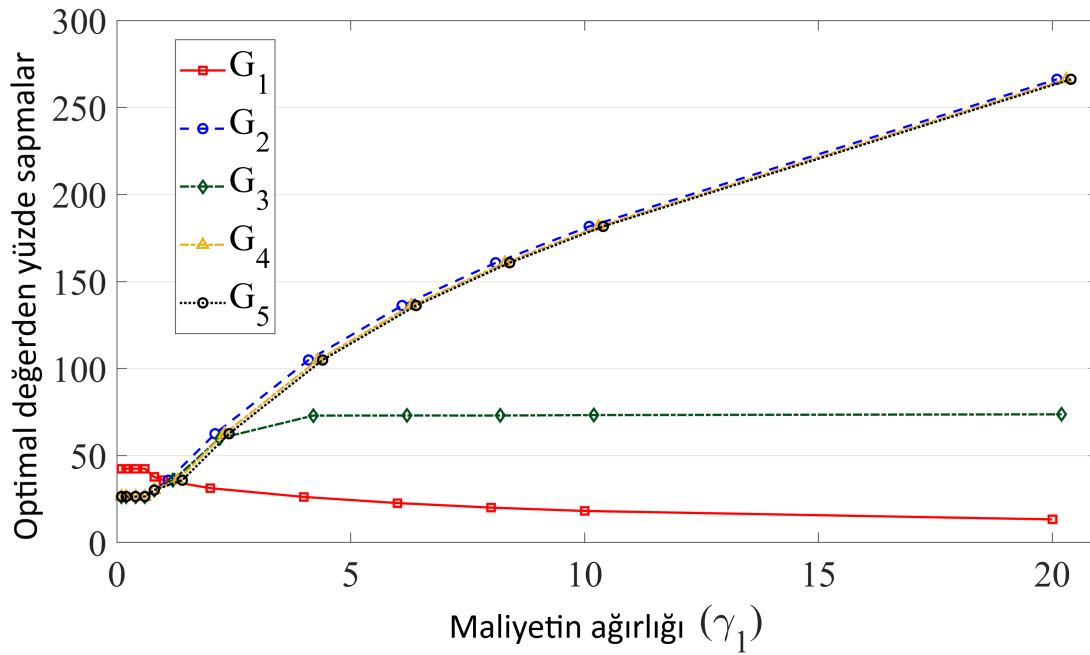
Çizelge 3.4'ün birinci ve sonuncu satırlarına bakıldığında aynı sonuçların elde edildiği

Çizelge 3.4: Çeşitli öncelik kombinasyonları için alt amaç fonksiyonlarının tekil optimal değerlerinden (G_i^*) yüzde sapmaları.

#	Öncelikler					Tekil optimallerden yüzde sapmalar				
	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
1	A	A	A	A	A	35.8 ⁺	35.8 ⁺	35.8 ⁺	35.8 ⁺	35.8 ⁺
2	A	A	A	A	Y	40.5	41.1	41.1	41.1	4.1
3	A	A	A	Y	A	40.7	48.4	48.4	4.8	48.4
4	A	A	A	Y	Y	40.7 ⁺	48.4 ⁺	48.4 ⁺	4.8 ⁺	4.8
5	A	A	Y	A	A	50.8	108.9	10.9	108.9	108.9
6	A	A	Y	A	Y	40.5	156.6	15.7	156.6	15.7
7	A	A	Y	Y	A	40.2	201.0	20.1	20.1	201.0
8	A	A	Y	Y	Y	40.2 ⁺	201.0 ⁺	20.1 ⁺	20.1 ⁺	20.1
9	A	Y	A	A	A	40.6	4.1	40.6	40.6	40.6
10	A	Y	A	A	Y	43.0	9.1	86.2	90.8	9.1
11	A	Y	A	Y	A	42.7	12.1	99.5	12.1	121.1
12	A	Y	A	Y	Y	42.7 ⁺	12.1 ⁺	100.9	12.1 ⁺	12.1
13	A	Y	Y	A	A	42.4	24.4	24.4	243.9	243.9
14	A	Y	Y	A	Y	42.4	24.4	24.4	243.9	24.4
15	A	Y	Y	Y	A	42.5	26.4	26.4	26.4	264.4
16	A	Y	Y	Y	Y	42.5 ⁺	26.4 ⁺	26.4 ⁺	26.4 ⁺	26.4
17	Y	A	A	A	A	18.2	181.7	69.3	181.7	181.7
18	Y	A	A	A	Y	19.7	197.5	57.5	197.5	19.7
19	Y	A	A	Y	A	31.7	317.4	55.2	31.7	317.4
20	Y	A	A	Y	Y	31.7 ⁺	317.4 ⁺	55.8	31.7 ⁺	31.7
21	Y	A	Y	A	A	20.8	208.0	20.8	208.0	208.0
22	Y	A	Y	A	Y	22.0	220.5	22.0	220.5	22.0
23	Y	A	Y	Y	A	32.7	326.8	32.7	32.7	326.8
24	Y	A	Y	Y	Y	32.7 ⁺	326.8 ⁺	32.7 ⁺	32.7 ⁺	32.7
25	Y	Y	A	A	A	33.3	33.3	70.4	333.0	333.0
26	Y	Y	A	A	Y	33.4	33.4	69.6	333.8	33.4
27	Y	Y	A	Y	A	35.1	35.1	66.2	35.1	350.8
28	Y	Y	A	Y	Y	35.1 ⁺	35.1 ⁺	66.4	35.1 ⁺	35.1
29	Y	Y	Y	A	A	34.5	34.5	34.5	344.6	344.6
30	Y	Y	Y	A	Y	34.5 ⁺	34.5 ⁺	34.5 ⁺	344.5	34.5
31	Y	Y	Y	Y	A	35.8	35.8	35.8	35.8	358.2
32	Y	Y	Y	Y	Y	35.8 ⁺	35.8 ⁺	35.8 ⁺	35.8 ⁺	35.8 ⁺

görülmektedir. Bunun nedeni, AP’de amaç programlama kullanarak alt amaç fonksiyonlarının (G_1, \dots, G_5) adil bir şekilde önceliklendirilmesinin sağlanmış olmasıdır. Bu yüzden, γ_i değerlerinin ne verildiğinden daha çok, bu değerlerin birbirlerine oranı önemli olmaktadır. Bundan dolayı, $\gamma_i = 1$ iken elde edilen sonuçlar ile $\gamma_i = 10$ iken elde edilen sonuçların aynı çıkması beklenen bir durumdur. Bu sonuçların aynı çıkması, AP’nin gerçekten de tüm alt amaç fonksiyonlarını adil bir biçimde optimize ettiğini göstermektedir.

Yine Çizelge 3.4'te birinci ve sonuncu satırlarda, her alt amaç fonksiyonu için sapma miktarlarının birbirlerine eşit çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni, AP'yi formülize ederken her bir alt amaç fonksiyonunun kendi tekil optimallerinden oransal sapmalarının maksimumunu minimize etmemiz, bir diğer tabirle minimaks tekniğini kullanmamızdır. Böylece, optimizasyon probleminin sonucunda alt amaçların sapmalarının maksimumunu minimize edilmektedir. Dolayısıyla, Çizelge 3.4'ün birinci ve sonuncu satırlarında verilen sapmaların aynı çıkmaları beklenen bir sonuçtur ve bu sapma miktarının Pareto sınırı (Pareto frontier) olduğunun bir göstergesidir. Bir diğer deyişle, alt amaç fonksiyonlarından hiçbiri, sapma değerini diğer alt amaçların sapmasını artırmadan %35.8'den daha aşağıya çekememektedir.



Şekil 3.3: Kullanıcı maliyetinin öncelik katsayısı γ_1 'in artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.

Çizelge 3.4'te verilen 2, 3, 5, 9 ve 17 numaralı satırlar, sırasıyla G_1 , G_2 , G_3 , G_4 ve G_5 'e geri kalan alt amaç fonksiyonlarına göre daha yüksek öncelik verilen durumlardaki sapma miktarlarını göstermektedir. 2 numaralı satıra bakıldığında, yüksek önceliklendirilen G_5 alt amaç fonksiyonunun tekil optimal değerinden sadece %4.1 saparken, diğer amaç fonksiyonlarının tekil optimallerinden %40.5 – 41.1 saptıkları gözlenmektedir. Bu sonuç bizlere göstermektedir ki, gün içerisindeki pik talep değerinde (G_5), eşit öncelikli durumdaki sapma değerine göre (%31.7) iyileştirme sağlanabilmektedir. Bunun için, diğer amaç fonksiyonlarındaki sapmaların eşit öncelikli durumdaki sapma değerlerinden (%4.7 – 5.3) daha fazla olmaları gerekmektedir. Bir diğer deyişle, G_1, \dots, G_4 'ten görece düşük bir fedakarlıkta bulunularak gün içerisindeki pik yük talebi ciddi bir biçimde düşürülebilmektedir. Benzer sonuçlar 3 ve 9 numaralı

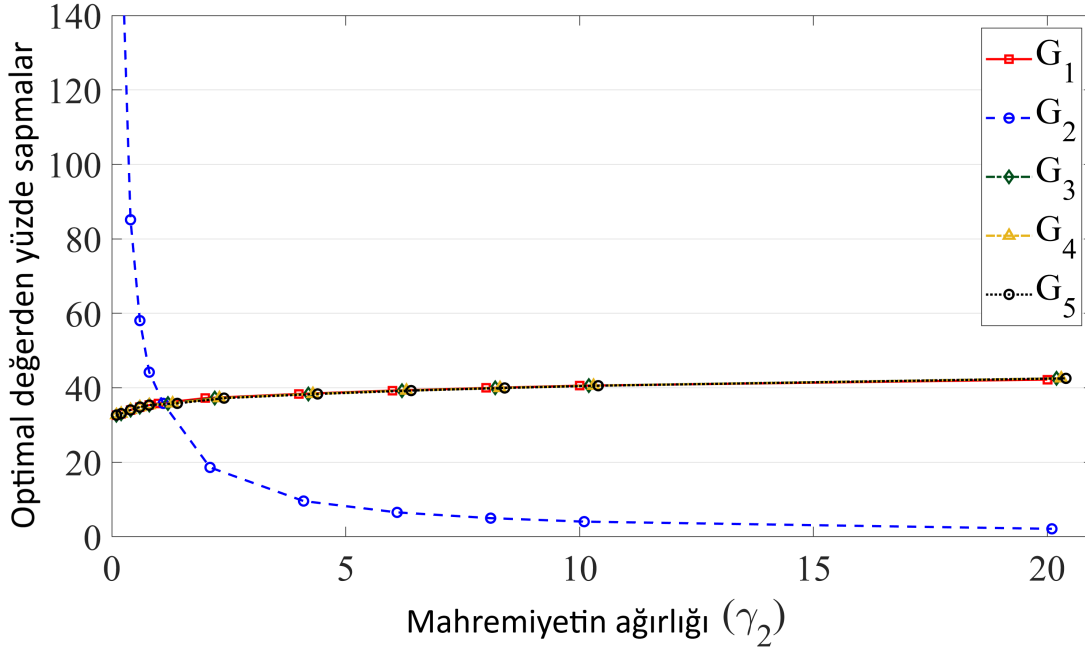
satırlarda da gözlemlenebilmektedir. 3 numaralı satırda, G_4 'teki sapma miktarı tekil optimalinden sadece %4.8 fazla olacak şekilde elde edilebilirken, bu sonucun elde edilmesi için G_1 , G_2 , G_3 ve G_5 'ten sırasıyla %4.9, %12.6, %12.6 ve %12.6 fedakarlık edilmesi gerekmektedir. Yine Çizelge 3.4'teki 9 numaralı satırda kullanıcı mahremiyeti tekil optimal değerinin %4.1 fazlasına çekilebilmekte, bunun için diğer amaç fonksiyonlarında %4.8'lik bir fedakarlık yapılması gerekmektedir. G_2 , G_4 ve G_5 'in bu gibi birbirine benzer karakteristik özellikler göstermesi matematiksel modellerinin benzerliğinden dolayı tesadüf olmadığı gibi, analizin devamında bu üç amaç fonksiyonunun birbirlerine pozitif etki etmeleri gibi ilginç gözlemlere de yer verilmektedir.

Tek bir amaç fonksiyonunun diğerlerinden fazla önceliklendirildiği durumların analize devam edecek olursak, Çizelge 3.4'teki 5 numaralı satırda kullanıcı memnuniyetini önceliklendirmenin diğer alt amaç fonksiyonlarına etkisi G_2 , G_4 ve G_5 'in önceliklendirildiği durumlara göre fazla olmaktadır. Bu da, kullanıcı memnuniyetinin diğer alt amaç fonksiyonları ile daha çelişkili bir alt amaç fonksiyonu olduğunu göstermektedir. 5 numaralı satırda G_1 'deki sapmanın görece kısıtlı olmasının nedeni ise yine daha önce bahsedildiği gibi kullanıcı maliyetinin fiyatlandırma tarifesiyle dolaylı belli bir değerin üzerine çıkmamasıdır. Yine de, 5 numaralı satırdaki kullanıcı maliyeti sapmasının (%50.8) diğer durumlardaki sapmalarından fazla olması, maliyetin de kullanıcı memnuniyeti ile güçlü bir tezat oluşturduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.4'teki 4 numaralı satırda, servis sağlayıcıya ait G_4 ve G_5 alt amaç fonksiyonları birlikte önceliklendirilmiştir. Her iki alt amaç fonksiyonunun da tekil optimallerinden sadece %4.8 saptığı bu sonuçta, kullanıcıya ait amaç fonksiyonları ise eşit öncelikli durumdaki optimallerinden en fazla %12.6 sapmaktadır. Bu da, servis sağlayıcıya ait amaç fonksiyonlarının kullanıcı amaç fonksiyonlarından sınırlı bir fedakarlık karşılığında ciddi bir şekilde iyileştirilebildiğini göstermektedir.

Kullanıcı mahremiyetinin diğer alt amaç fonksiyonlarında büyük artışlara neden olmadan geliştirilebileceği Şekil 3.3'te de görülebilmektedir. Kullanıcı mahremiyetinin ağırlığı (γ_2) arttıkça G_2 'de ciddi bir düşüş elde edilirken, geri kalan alt amaç fonksiyonlarındaki artış tekil optimallerinden %40 civarında daha fazla olacak şekilde sınırlanmaktadır. Bu da Çizelge 3.4'teki 9 numaralı satır ile uyumlu olup, kullanıcı mahremiyetinin diğer alt amaçlardan sınırlı bir fedakarlıkla sağlanabileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.4 ve Şekil 3.3–3.7'de dikkat çeken bir diğer olgu da G_1 , G_2 , G_3 , G_4 , ve G_5 'teki sapmaların minimum ve maksimum değerlerinin birbirlerinden farklı olmasıdır. Bu alt amaç fonksiyonlarının minimum ve maksimum sapma değerleri sırasıyla 13.3 – 54.1%, 2.1 – 326.8%, 7.4 – 100.9%, 2.9 – 344.5%, ve 2.6 – 358.2% olarak karşımıza çıkmaktadır. G_1 ve G_3 'teki diğer alt amaç fonksiyonlarına göre sınırlı olan

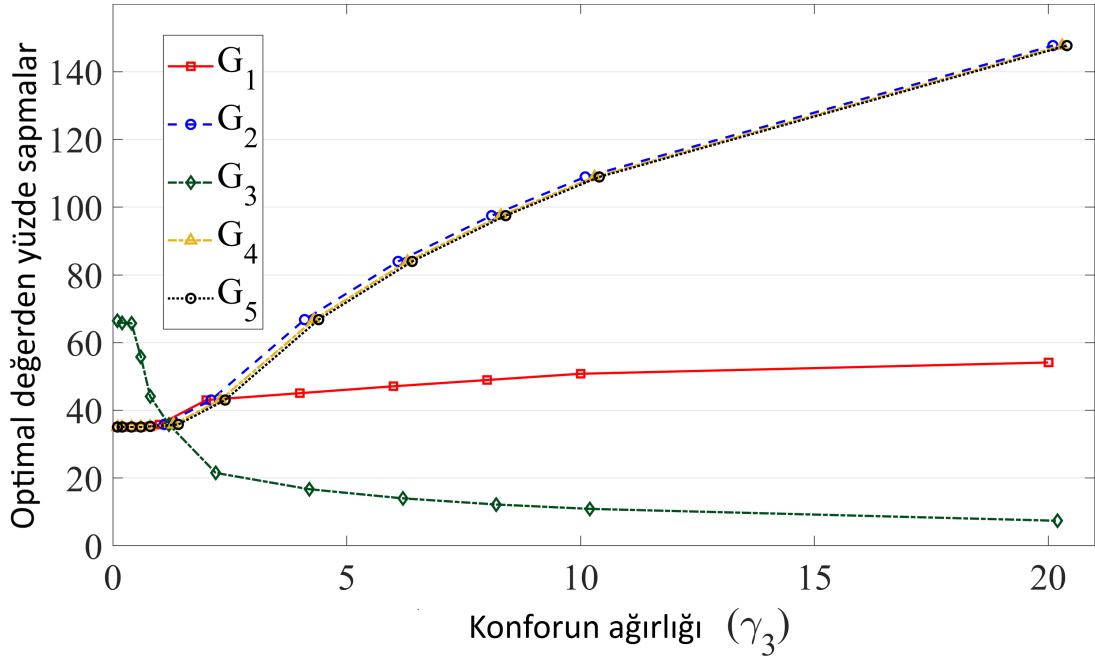


Şekil 3.4: Kullanıcı mahremiyeti öncelik katsayısı γ_2 'nin artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.

maksimum sapma değerleri, Şekil 3.3, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gözlemlenen G_1 ve G_3 'teki sınırlı sapmayı da açıklamaktadır. Şekil 3.4'te kullanıcı mahremiyeti hariç tüm alt amaç fonksiyonlarının aynı oranda sapmasının nedeni, %40.6 civarında olan sapmanın G_1 ve G_3 'ün maksimum sapabilecekleri yüzdenin altında olmasıdır.

Şekil 3.3'te kullanıcı maliyetinin önceliğinin artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Burada tüm ağırlık katsayılarının 1 olduğu duruma kadar (Şekil 3.3'te $\gamma_1 = 1$ olduğu nokta) kullanıcı maliyetindeki düşüş ile diğer alt amaç fonksiyonlarındaki artış oranlı iken, γ_1 artmaya devam ettikçe maliyetteki azalma sınırlı olmaktadır. Buna karşılık, G_2 , G_4 ve G_5 'teki artış oransal olarak maliyetteki kazançtan daha fazla olmaktadır. Kullanıcı rahatsızlığındaki (G_3) artış daha önce açıklanan sebeplerden dolayı sınırlı olmakla birlikte, diğer alt amaç fonksiyonlarındaki orantısız artış, kullanıcı maliyetinin diğer alt amaç fonksiyonlarına göre fazla önceliklendirilmesinin hem kullanıcıya hem de servis sağlayıcıya diğer alt amaçlar bakımından daha fazla zarar verebileceğini göstermektedir. Örnek vermek gerekirse, Şekil 3.3'te γ_1 'in 20 olduğu durumda, kullanıcı maliyeti tekil optimal değerinden 13.3% saparken, kullanıcı mahremiyeti ve servis sağlayıcının alt amaç fonksiyonları tekil optimal değerlerinden 266.2% saptmaktadır.

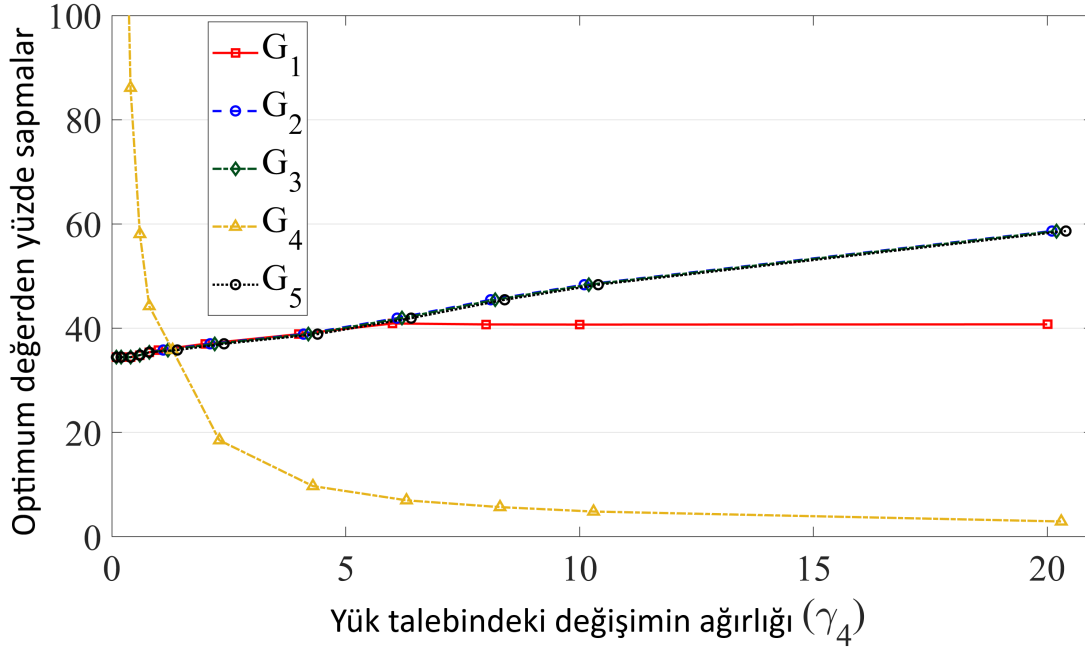
Şekil 3.4'te, kullanıcı mahremiyetinin öncelik katsayısı γ_2 artırıldıkça geri kalan alt amaç fonksiyonlarının tekil optimallerinden ne kadar saptığı gözlenmektedir. Burada not edilmesi gereken bir detay, Şekil 3.4'te G_2 ile birlikte G_1 , G_3 , G_4 ve G_5 'in de



Şekil 3.5: Kullanıcı memnuniyeti öncelik katsayısı γ_3 'ün artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.

minimize edildiği, yalnızca γ_2 'nin değeri arttıkça G_2 'ye verilen önemin diğer alt amaç fonksiyonlarına göre daha fazla olduğudur. Eğer G_1 , G_3 , G_4 ve G_5 de ortaklaşa optimize edilmeseydi, Şekil 3.4'te bu alt amaç fonksiyonlarındaki sapma şüphesiz daha fazla olurdu. Bu grafikte G_1 , G_3 , G_4 ve G_5 'teki sapmaların sınırlı olması, bizlere kullanıcı mahremiyetinin diğer alt amaç fonksiyonlarından sınırlı bir fedakarlık yapılarak oldukça iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bu şekilde gösterilen sonuçlar Çizelge 3.4'teki 9 numaralı satırla da uyum göstermektedir. Şekil 3.4'te γ_2 'nin 10'a eşit olduğu sonuç ile Çizelge 3.4'teki 9 numaralı satır aynı γ_i değerlerine sahip olduğu için aynı sonuçları vermiştir. Çizelge 3.4'ten çıkarılabilecek ekstra bir yorum, γ_2 'yi geri kalan γ_i 'nin 10 katından fazla bir değer seçmenin kullanıcı mahremiyeti açısından fazla bir kazanç getirmediği gibi, geri kalan alt amaç fonksiyonlarında da daha kötü sonuç elde edilmesine neden olduğudur.

Şekil 3.5'te kullanıcı memnuniyetinin önemi artırıldıkça tüm alt amaç fonksiyonlarının optimal değerlerinin nasıl değiştiği gözlemlenebilmektedir. Kullanıcı memnuniyetinin önemi arttıkça, kullanıcı maliyeti (G_1) hariç diğer alt amaç fonksiyonlarının tekil optimal değerlerinden ciddi şekilde saptıkları gözlemlenebilmektedir. γ_3 10 iken kullanıcı memnuniyeti tekil optimalinden sadece %10 sapsa da; kullanıcı mahremiyeti, çekilen güçteki değişim ve çekilen gücün pik değerinde tekil optimal değerlerden sapma 147.7% civarında olmaktadır. γ_3 arttıkça kullanıcı maliyetindeki (G_1) sapmanın sınırlı olmasının nedeni, daha önce bahsedildiği gibi G_1 alt amaç fonksiyonunun üst sınırının G_2 , G_4 ve G_5 'e göre daha düşük bir değer olmasıdır.

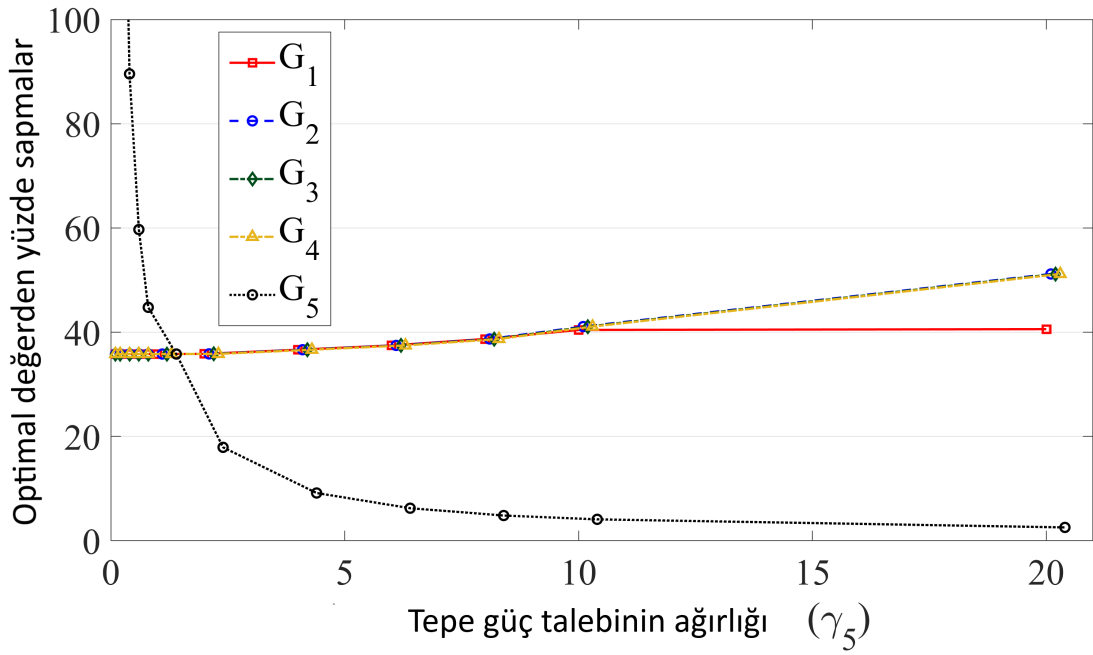


Şekil 3.6: Gün içerisinde şebekeden çekilen toplam güçteki değişimin öncelik katsayısı γ_4 'ün artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.

Şekil 3.6'da şebekeden çekilen toplam gücün gün içerisindeki değişim miktarının minimize edilmesi (G_4) alt amacının öncelik katsayısı γ_4 artırıldıkça tüm alt amaç fonksiyonlarının tekil optimal değerlerinden yüzde sapma miktarları görülebilmektedir. Bu grafikte görüldüğü üzere, G_4 'ün önceliğinin artırılması G_4 'ün sapma miktarında ciddi bir iyileşme sağlarken, kalan alt amaç fonksiyonlarının sapmalarındaki artış nispeten sınırlı olmaktadır. Örneğin; çekilen yükteki değişimin tekil optimal değerinden %7 saptığı durumda, geri kalan amaç fonksiyonları eşit öncelikli optimal değerlerinden %6.1 saptamaktadır. Bu da göstermektedir ki, diğer amaç fonksiyonlarından nispeten küçük bir fedakarlık ile şebekeden çekilen güç miktarındaki değişimler ciddi bir biçimde azaltılabilmektedir.

Şekil 3.7'de G_5 'in de G_4 'e benzer bir karakteristik gösterdiği görülebilmektedir. Yine geri kalan alt amaç fonksiyonlarının sapmalarında sınırlı bir artış ile şebekeden çekilen yükün maksimum değeri tekil optimaline yaklaştırılabilmektedir. Rakamsal bir örnek vermek gerekirse, G_5 'in yüzde sapması diğer alt amaçların eşit öncelikli optimal değerlerinden %5.3 ödün vermesi karşılığında tekil optimal değerine %4.1 kadar yaklaştırılabilmektedir. Bu durum Çizelge 3.4'teki 2 numaralı satırdan da gözlemlenebilmektedir.

Kullanıcıların amaç fonksiyonlarının servis sağlayıcının amaç fonksiyonlarına göre yüksek önceliğe sahip olmasının, ya da bu durumun tam tersinin alt amaç fonksiyonlarını nasıl etkilediği de Çizelge 3.4 incelenerek görülebilmektedir. Çizelge 3.4'teki 4



Şekil 3.7: Gün içerisinde şebekeden çekilen maksimum gücün öncelik katsayısı γ_5 'in artırılmasının diğer alt amaç fonksiyonları üzerindeki etkisi.

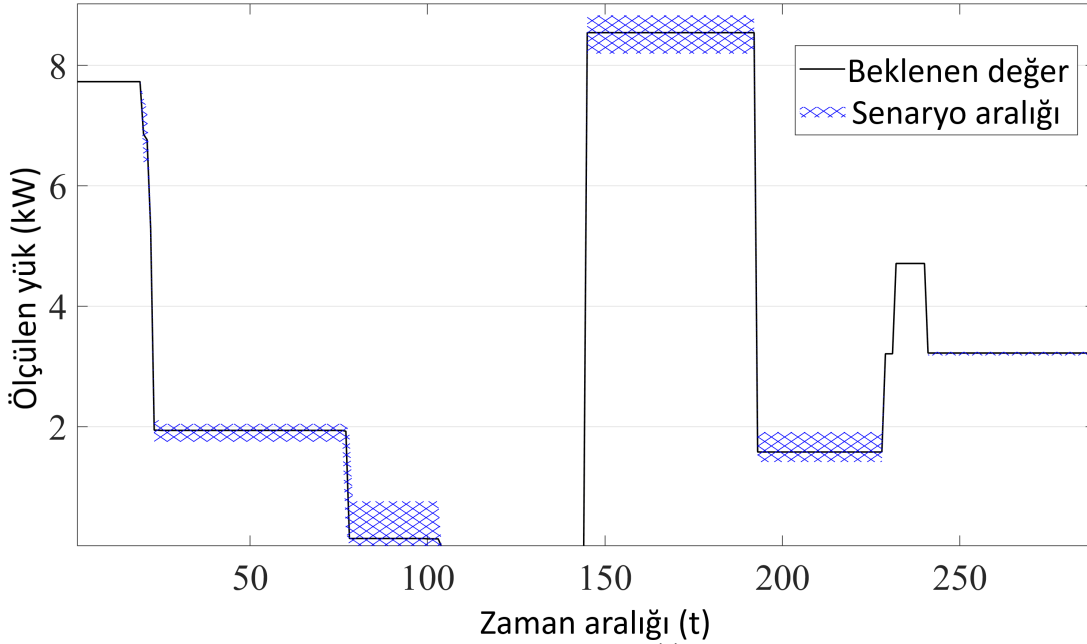
numaralı satırda, servis sağlayıcının amaç fonksiyonları yüksek, kullanıcıların amaç fonksiyonları ise alçak önceliklendirilmiştir. Sonuçtaki sapma yüzdeleri göstermektedir ki, kullanıcı amaç fonksiyonlarından (G_1, G_2, G_3) en fazla %48.4 sapılarak, servis sağlayıcının amaç fonksiyonları tekil optimallerine %4.8 yaklaşabilmektedir. Tam tersi durum incelendiğinde, Çizelge 3.4'teki 29 numaralı satır bizlere göstermektedir ki, kullanıcıların alt amaçlarını servis sağlayıcının alt amaçlarından yüksek önceliklendirmek servis sağlayıcının amaçlarını tekil optimallerinden %344.6 uzaklaştırdığı gibi, kullanıcının amaç fonksiyonlarında da eşit öncelikli optimal değerlerine göre önemli bir gelişim sağlamamaktadır (%35.8 – %34.5 = %1.3).

3.5.3 Stokastik modellemenin optimal sonuçlara etkisi

Daha önce sistem modeli bölümünde anlatıldığı gibi, bu bölümdeki çalışmada yenilenebilir güneş enerjisi sisteminden gelecek olan elektrik gücündeki belirsizlik stokastik programlama tekniği kullanılarak modellenmiştir. Bunun için, güneş enerjisi sisteminin üreteceği farklı enerji senaryoları (s) ve bu senaryoların gerçekleşme olasılıkları (ρ_s) Monte Carlo simülasyonu ve k-ortalama kümesi teknikleri ile üretilmiştir. Alt amaç fonksiyonları (G_1, \dots, G_5) da bu senaryolar ve senaryoların gerçekleşme olasılıkları üzerinden beklenen değer olarak tanımlanmıştır. Böylece, TP ve AP'nin her bir çözümünde, alt amaç fonksiyonlarının beklenen değerleri üzerinden optimizasyon yapılmaktadır. Bu ve benzeri yöntemlerle önceden bilinmeyen parametreler modelle-

nebildiği gibi, optimizasyon beklenen değerler üzerinden yapıldığı için bilinmezliğe sahip olan parametrenin mümkün olan tüm durumları için çözümdeki hata oranını minimize edecek sonuçlar elde edilmektedir.

Şekil 3.8’de, eşit öncelikli ($\gamma_i = 1, \forall i$) durum için AP’nin sonucu ile, her bir senaryo için AP’nin senaryosuz versiyonunun çözdürülmesi sonucu elde edilen optimal sonuçların aralığı çizdirilmiştir. Şekil 3.8’deki siyah çizgi, eşit öncelikli durumda bir gün boyunca şebekeden çekilmesi beklenen yükü göstermektedir. Mavi ile taralı alan ise, senaryoya göre değişen optimal çözümlerin gün içerisinde şebekeden çektikleri güç miktarlarını göstermektedir. Bu şekilde görülmektedir ki, stokastik programlama sonucu elde edilen sonuç (siyah çizgi), farklı senaryolar ile değişen optimal çözümlerin içerisinde yer almakta, böylece farklı senaryoların gerçekleşmesi durumunda optimal çözüm ile AP’nin hesapladığı optimal çözümün arasındaki hatayı minimize etmektedir.

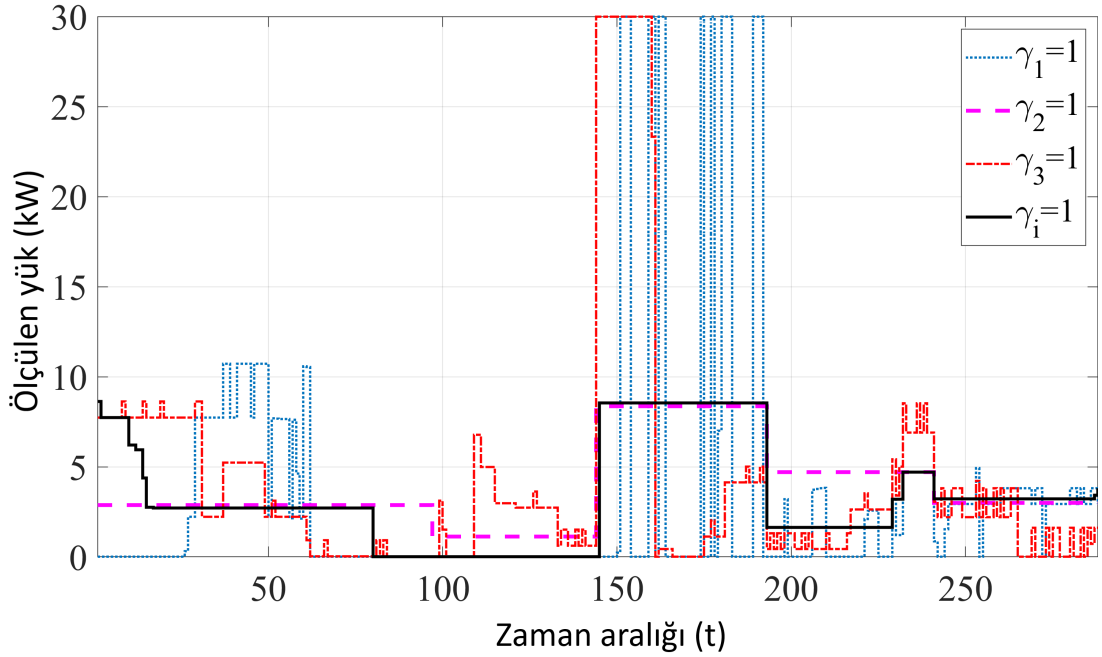


Şekil 3.8: Eşit öncelikli ($\gamma_i = 1, \forall i$) optimal sonuçta bir hanenin gün içerisinde şebekeden çektiği güç miktarı: beklenen değer vs. senaryolara göre dağılım.

3.5.4 Optimal çizelgelerin zamansal karakteristikleri

Buraya kadar gösterilen sonuçlar hep alt amaç fonksiyonlarının (G_i) değerleri ve bunların tekil optimallerinden hangi durumda ne kadar saptığı ile ilgili oldu. Burada ise, çeşitli öncelik durumlarındaki optimal sonuçlarda elde ettiğimiz çizelgelerin (schedule) cihaz bazında, ev bazında ve şebeke bazında gün içerisinde nasıl bir elektrik kullanımına neden olduğu görsellerle sunulmaktadır.

Şekil 3.9’da, kullanıcı alt amaç fonksiyonları (G_1, G_2, G_3) TP kullanılarak tekil olarak optimize edildiğinde şebekeden çekilen güç ile, tüm alt amaç fonksiyonlarının eşit bir biçimde önceliklendirilerek ($\gamma_i = 1, \forall i$) ortaklaşa optimize edildiği durumda şebekeden çekilen gücün gün içerisindeki değişimi çizdirilmiştir. Sadece kullanıcı maliyetinin minimize edildiği durumda ($\gamma_1 = 1$), elektrik kullanımları fiyatın düşük olduğu zaman aralıklarında pik yaparken, maliyetin yüksek olduğu zaman aralıklarında ise aniden düşmektedir. Bu da, servis sağlayıcının gün içerisindeki elektrik üretim planlamasını zorlaştıracak bir durum teşkil etmektedir. Kullanıcı mahremiyetinin tekil olarak optimize edildiği durumda ($\gamma_2 = 1$), hanenin şebekeden çektiği güç miktarı gün boyunca mümkün olduğunca düz olacak şekilde ortaya çıkmıştır. Bu da, hanede kullanılan cihazların verilerinin elde edilmesini zorlaştıracaktır. Kullanıcı rahatlığının tekil olarak optimize edildiği ($\gamma_3 = 1$) durumda ise, cihazlar çalışma pencereleri içerisinde mümkün olan en kısa zamanda çalışıp operasyonlarını bitirmişlerdir. Bu nedenle, Şekil 3.9’daki elektrik kullanımları arasında cihazlarla ilgili en çok fikir veren çizelge bu çizelge olmaktadır. Son olarak, Şekil 3.9’da tüm alt amaç fonksiyonlarının ortaklaşa optimize edildiği durumda ($\gamma_i = 1, \forall i$), hanenin elektrik kullanımının hem cihaz bilgilerini ifşa etmeyecek şekilde düz olduğu, hem maliyetin düşük olduğu zaman aralıklarında daha fazla güç çekerek bu zaman aralıklarını değerlendirdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 3.9: Örnek bir hanenin gün içerisinde çektiği güç: Sadece maliyetin optimize edildiği ($\gamma_1 = 1$) durum, sadece mahremiyetin optimize edildiği ($\gamma_2 = 1$) durum, sadece konforun optimize edildiği ($\gamma_3 = 1$) durum ve tüm alt amaç fonksiyonlarının eşit önceliğe ($\gamma_i = 1, \forall i$) sahip olduğu durum.

Şekil 3.9’da, kullanıcı alt amaç fonksiyonlarının tekil optimizasyonları sonucunda ve

tüm alt amaç fonksiyonlarının ortaklaşa optimizasyonu sonucunda hanenin gün çektiği güç grafikleri gösterilmişti. Benzer durumda şebekeden çekilen toplam gücün nasıl değiştiği ile ilgili bir fikir vermesi için, Şekil 3.10'da tüm alt amaç fonksiyonlarının tekel optimize edildiği durumlarda şebekeden çekilen toplam güç miktarları ile, hepsinin aynı önceliğe ($\gamma_i = 1, \forall i$) sahip olduğu durumda şebekeden çekilen toplam güç çizdirilerek optimum sonuçların şebekede nasıl farklı etkiler gösterdiği ortaya çıkarılmıştır. Şekil 3.10'da $\gamma_1 = 1$ olduğu durumda, haneler agresif bir biçimde maliyetlerini minimize edecek şekilde güç kullanımlarını çizelgeledikleri için, gün içerisindeki güç talebi sık sık değişmekte ve güç talebinin tepe değerinin $3MW$ civarında olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 3.10'da $\gamma_2 = 1$ olduğu durumda ise, tüm haneler kendi elektrik kullanımlarındaki değişimi minimize ettikleri için, toplam elektrik talebine de bu durumun olumlu olarak yansdığı görülmektedir. $\gamma_1 = 1$ olan duruma göre hem gün içerisinde talepteki değişimin azaldığı, hem de gün içerisinde talepteki tepe değerin azaldığı (yaklaşık $0.75MW$) gözlemlenebilmektedir.

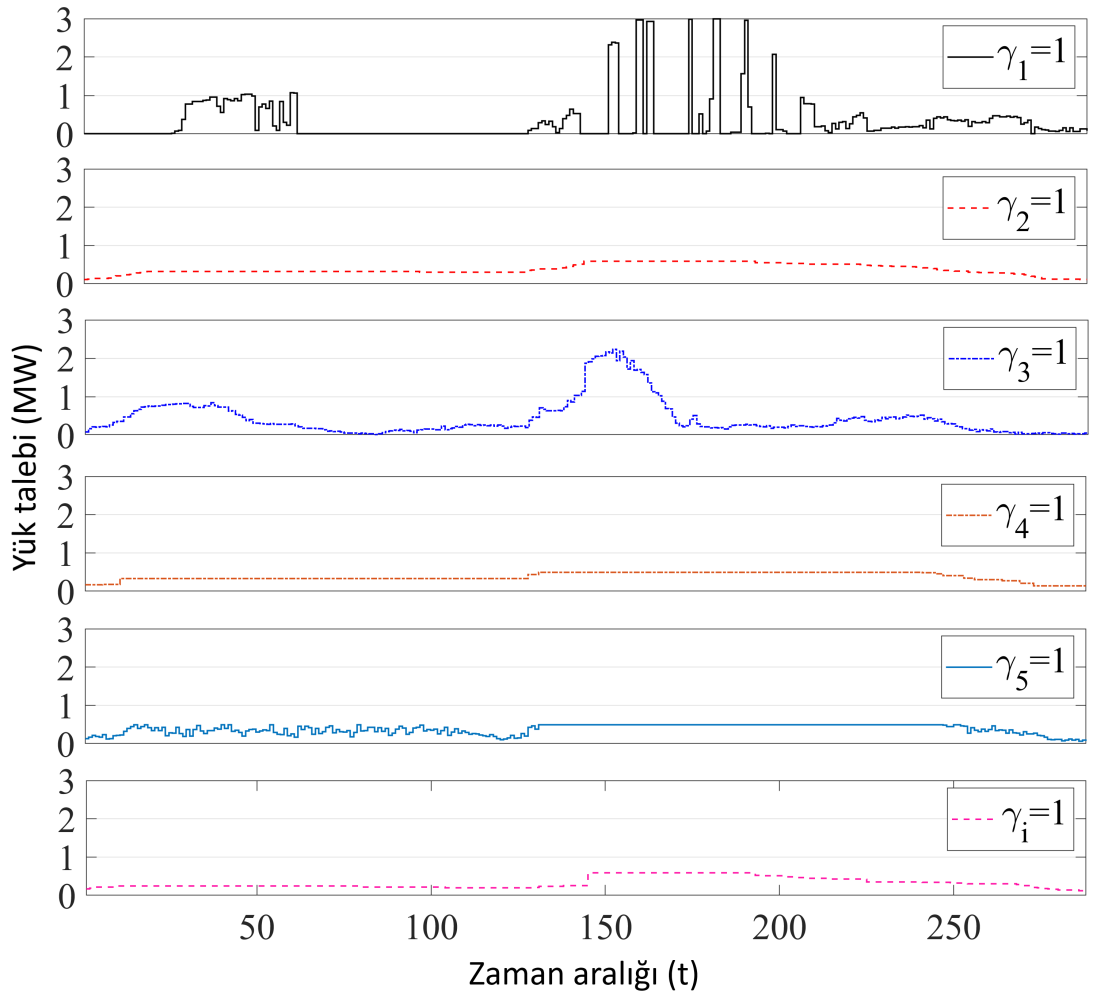
Şekil 3.10'da $\gamma_3 = 1$ olduğu durumda, tüm hanelerdeki cihazlar operasyonlarına mümkün olduğunca erken başlayıp erken bitirmeye, böylece kullanıcı memnuniyetsizliğini minimize etmeye çalışmaktadır. Bu yüzden bu durumda cihaz kullanımına bağlı olarak toplam talepte gün içerisinde tepe değerler oluşmakta ve gün içerisinde toplam talepteki değişim $\gamma_2 = 1$ olan duruma göre daha fazla olmaktadır.

Şekil 3.10'da $\gamma_4 = 1$ olan duruma bakıldığında, toplam talepteki değişimin diğer tüm durumlardan daha az olduğu görülebilmektedir. Bu durumda toplam talepteki değişim minimize edildiği için bu beklenen bir durumdur. Ayrıca, bu durumda toplam talepteki tepe değerin de düşük çıktığı gözlemlenebilmektedir. Dolayısıyla, bu durumdan çıkarılabilecek bir yorum toplam talepteki değişimi minimize etmeye çalışmanın toplam talebin tepe değerini de düşürebileceğidir. Bu yorum yine kullanıcı mahremiyetinin (G_2) minimize edildiği durum için de söylenebilir. Hanelerin her birinin kendi talebini düzleştirmeye çalışması, gün içerisinde şebekeden çekilen toplam güçteki değişimi ve tepe değerini de düşürmektedir.

Şekil 3.10'da $\gamma_5 = 1$ olan durumda ise toplam talepteki tepe değerinin diğer durumlara göre en düşük olduğu (yaklaşık $0.6MW$), ancak özellikle günün ilk saatlerinde toplam talepte istenmeyen dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Burada sadece G_5 optimize edildiği için, gün içerisindeki talep değişiminin $\gamma_4 = 1$ olan durumdan, hatta $\gamma_2 = 1$ olduğu durumdan daha kötü çıkması beklenen bir durumdur. Buradan servis sağlayıcı için çıkarılabilecek bir sonuç, toplam talepteki değişimin minimize edilmesi tepe değeri de düşürmekte iken, tepe değerini düşürmenin tersi etkiyi yapmamasıdır. Bu yüzden, servis sağlayıcı tarafında sadece tepe değeri düşürmek sağlıklı bir taktik olmayıp,

tepe değeri ile birlikte talepteki değişim miktarı da mutlaka hesaba katılmalıdır.

Şekil 3.10'da tüm alt amaç fonksiyonlarının eşit öncelikli ($\gamma_i = 1, \forall i$) ortaklaşa optimize edildiği durumda ise, toplam elektrik talebinin servis sağlayıcının arzuladığı şekle yakın bir sonuç verdiği görülebilmektedir. Bu durumdaki tepe değeri $\gamma_5 = 1$ durumundaki kadar düşük, değişim miktarı $\gamma_4 = 1$ olan durumdaki kadar az olmasa da, kullanıcın alt amaç fonksiyonlarının da sağlandığı düşünöldüğünde tüm alt amaç fonksiyonlarının ortaklaşa optimize edilmesinin servis sağlayıcı açısından yararlı olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir.



Şekil 3.10: Şebekeden gün içerisinde çekilen toplam güç: Sadece maliyetin optimize edildiği ($\gamma_1 = 1$) durum, sadece mahremiyetin optimize edildiği ($\gamma_2 = 1$) durum, sadece konforun optimize edildiği ($\gamma_3 = 1$) durum, sadece toplam talepteki değişimin minimize edildiği ($\gamma_4 = 1$) durum, sadece toplam talepteki tepe değerin minimize edildiği ($\gamma_5 = 1$) durum ve tüm alt amaç fonksiyonlarının eşit önceliğe ($\gamma_i = 1, \forall i$) sahip olduğu durum.

3.5.5 Ev türünün optimal sonuçlara etkisi

Daha önce sistem modelinde bahsedildiği gibi, bu çalışmada 3 farklı ev tipinin olduğu varsayılmıştır. 1. tip ev büyük bir ailenin yaşadığı müstakil evleri temsil etmekte iken, 2. tip ev yine içinde bir ailenin yaşadığı apartman dairesi ve 3. tip ev de tek bir kişinin ya da bir çiftin yaşadığı bir apartman dairesi olarak tasarlanmıştır. Evlerdeki cihazların sayısı ve evlerdeki ek imkanlar (hane içi batarya, yenilenebilir enerji kaynağı vb.) da evlerin tiplerine göre farklılık gösterecek şekilde seçilmiştir.

Bu bölüme kadar verilen sonuçlarda $H = 100$ ev; 34 adet 1. tip ev, 33 adet 2. tip ev ve 33 adet 3. tip ev olmak üzere karışık bir şekilde tanımlanmıştır. Böylece sonuçların gerçek hayata daha yakın olması planlanmıştır. Bu bölümde ise, AP sadece 1. tip evden oluşan bir şebeke için, sadece 2. tip evden oluşan bir şebeke için ve sadece 3. tip evden oluşan bir şebeke için ayrı ayrı çözdürülmüş, böylece farklı imkanlara sahip ev tiplerinin optimal mahremiyet değerlerinin nasıl değiştikleri gözlemlenmiştir.

Farklı ev tipleri için bazı AP sonuçları Çizelge 3.5'te verilmiştir. Burada odak noktası ev tiplerine göre mahremiyetin ne kadar korunabildiği olduğu için, Çizelge 3.4'teki 32 durum için ayrı ayrı sonuçlar alınmamış, bunun yerine mahremiyetin diğer alt amaçlara göre daha düşük önceliğe sahip olduğu ve aynı önceliğe sahip olduğu durumlar için çözümler çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 3.5'teki "Öncelikler" sütunu, AP çözdürülürken alt amaç fonksiyonlarına verilen ağırlıkları temsil etmektedir. "Y" yüksek önceliğe sahip anlamına gelmekte olup, ilgili alt amaç fonksiyonunun ağırlığının 10 olduğunu; "A" ise alçak önceliğe sahip anlamına gelmekte olup, ilgili alt amaç fonksiyonunun ağırlığının 1 olduğunu göstermektedir. Çizelge 3.5'teki 2 farklı öncelik kombinasyonu için, 1. tip 2. tip ve 3. tip evlerin mahremiyet alt amaç fonksiyonlarının tekil optimallerinden yüzde sapmaları ile geri kalan alt amaç fonksiyonlarının (Z ile temsil edilmiştir) optimallerinden yüzde sapmaları ilgili sütunlarda verilmiştir.

1. tip ev için, tüm alt amaç fonksiyonları aynı önceliğe sahip olduğunda, mahremiyetin düşük önceliğe sahip olduğu duruma göre G_2 'de %197.7'lik bir iyileşme sağlanabilmektedir. Bu iyileşmenin elde edilmesi için, geri kalan alt amaç fonksiyonlarından %9.8'lik bir fedakarlık gerekmektedir. Benzer bir biçimde, 2. tip evde geri kalan alt amaç fonksiyonlarından %10'luk bir fedakarlık ile mahremiyette %125.5'lik bir iyileşme sağlanabilmekte, 3. tip evde ise diğer alt amaç fonksiyonlarından %2.8'lik bir fedakarlık ile mahremiyette %121.8'lik bir iyileşme sağlanabilmektedir.

Çizelge 3.5: Farklı ev tiplerinin optimal mahremiyet ve genel amaç fonksiyonu performansları.

Öncelikler					1. Tip (Büyük) Ev		2. Tip (Orta) Ev		3. Tip (Küçük) Ev	
G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	%G ₂	%Z	%G ₂	%Z	%G ₂	%Z
Y	A	Y	Y	Y	230.5	23	150.5	15	138.4	13.8
Y	Y	Y	Y	Y	32.8	32.8	25	25	16.6	16.6
Değişim (%)					197.7	-9.8	125.5	-10	121.8	-2.8

Çizelge 3.5'te ev tiplerine göre yüzde sapmalardaki değişiklikler incelendiğinde, evin boyutu ve dolayısıyla evdeki yük şekilleme imkanları arttıkça mahremiyette elde edilebilecek iyileşme de (121.8%, 125.5%, 197.7%) artmaktadır. Bunun yanı sıra, ev boyutu arttıkça Çizelge 3.5'teki iki durumda da tüm alt amaç fonksiyonlarının optimal değerlerinden sapmalarının arttığı gözlemlenmektedir. Bu da, şebekedeki evlerin büyüklüğü ve evlerdeki cihaz sayıları arttıkça, tüm alt amaç fonksiyonlarının ortaklaşa ulaşacağı optimal değer için daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu da evler büyüdükçe alt amaç fonksiyonlarının birbirleri ile daha çok çakışmaya başladıklarını göstermektedir. Bu analizden çıkarılabilecek bir sonuç, küçük evlerden oluşan şebekelerde daha iyi bir ortaklaşa optimum bulunabileceği, ancak mahremiyete öncelik vermenin büyük evlerden oluşan şebekelerde daha kritik olabileceğidir.

3.6 Sonuç ve Tartışma

Bölüm 2'de, talep katılımı (demand response) bağlamında kullanıcıların cihazlarını çizelgelediği bir sistem varsayılarak, bu sistem kullanıcı maliyetini ve kullanıcı rahatlığının yanında kullanıcı mahremiyeti de ele alan bir şekilde bir matematiksel çerçeve olarak modellenmişti. Bu model çerçevesinde literatürde sıklıkla referans verilen mahremiyet şekilleme metotları modellenmiş ve adil bir biçimde bu metotların mahremiyet performansları karşılaştırılmıştı.

Bu bölümde ise, Bölüm 2'deki sisteme benzer olmakla birlikte daha kapsamlı bir kurgu üzerinden çalışılmıştır. Bölüm 2'deki sisteme ek olarak, burada birden çok kullanıcının ve bunlara servis sağlayan bir servis sağlayıcının var olduğu varsayılmıştır. Birden fazla tarafın olduğu bu sistemde, optimal çizelgeyi hesaplayacak bir talep toptancısının var olduğu varsayılmıştır. Bu sistem üzerinde, Bölüm 3'te üzerinde çalışılan kullanıcı maliyeti, kullanıcı mahremiyeti ve kullanıcı memnuniyeti alt amaçlarının yanı sıra, servis sağlayıcının alt amaçları olan gün içerisindeki elektrik talebindeki toplam değişim ve gün içerisindeki elektrik talebindeki tepe değer de matematiksel olarak modellenmiştir. Sistemde birden çok hanenin var olduğu varsayıldığı için, sistemin gerçekçiliğini artırma amacıyla bazı tedbirler alınmıştır. Bunlardan ilki, 3 farklı ev tipi tanımlanıp bunların sahip olduğu cihazları ve yük şekillemede kullanılabilecek imkanlarını birbirinden farklı tanımlamak olmuştur. Bir diğer tedbir de bu evlerdeki cihaz çalışma zaman pencerelerinin birbirlerinden rastgele bir biçimde farklı olmalarının sağlanması olmuştur.

Matematiksel çerçeveyi oluştururken Bölüm 2'dekine benzer bir biçimde minimaks amaç programlama teknikleri kullanılmıştır. Böylece, bu bölümde ele alınan 5 farklı amaç fonksiyonu ortaklaşa optimize edildiğinde adil bir biçimde önceliklendirilmesi

sağlanmıştır. Daha sonra da, her bir alt amaç fonksiyonunun farklı önceliğe sahip olduğu durumlar için tüm alt amaç fonksiyonlarının tekil optimal değerlerinden yüzde sapmaları hesaplanmış, böylece bu alt amaçların birinin ya da birkaçının diğerlerine göre öncelikleri artırıldığında her bir alt amaç fonksiyonunun ortaklaşa optimal çözümdeki değerinin nasıl etkilendiği ortaya çıkarılmıştır.

Varsayılan sistem üzerinde ve kurulan matematiksel model çerçevesinde alınan optimal çözümler sonucunda, kullanıcıların ve servis sağlayıcıların alt amaçlarını optimize etmeye çalışırken nelere dikkat etmeleri gerektiği ile ilgili bir çok sezgisel bilgi de ortaya çıkarılmıştır. Bu bilgilere örnek olarak, kullanıcıların En İyi Gayret metodu ile mahremiyetlerini maksimize etmeye çalışmalarının servis sağlayıcının alt amaç fonksiyonlarına da olumlu katkıda bulunduğu; diğer alt amaçlardan çok sınırlı bir miktar fedakarlık edilerek kullanıcı mahremiyetinde ciddi kazanımlar elde edilebildiği; talep toptancısının sadece tepe değerini düşürecek şekilde optimizasyon problemini kurgulamasının (sadece γ 'in ağırlığını yüksek tutmasının) servis sağlayıcının diğer alt amaç fonksiyonuna (gün içerisindeki elektrik talebindeki değişimi minimize etmek) olumsuz etkisi olduğu sayılabilir.

Bu çalışmada literatüre olan katkıları özetlemek gerekirse:

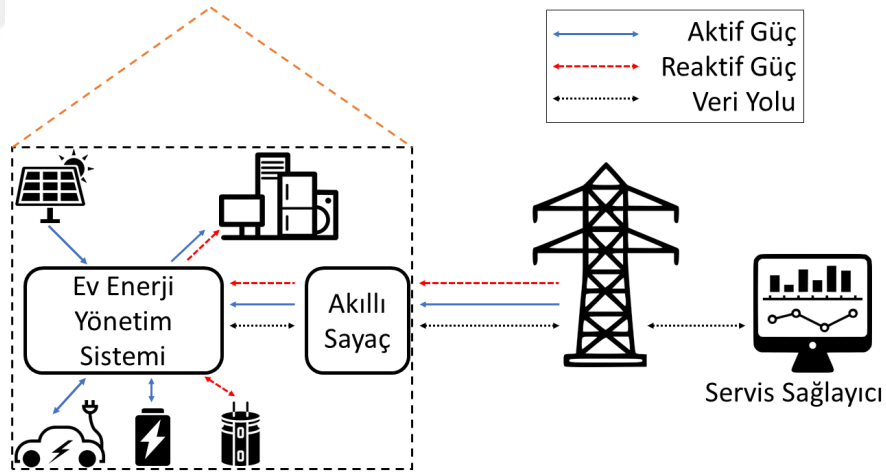
1. Talep katılımı çerçevesinde kullanıcı alt amaç fonksiyonlarının yanı sıra servis sağlayıcının alt amaç fonksiyonlarının da birlikte optimize edildiği ilk çalışmadır. Daha önce hem arz hem talep tarafının amaçlarını ortaklaşa optimize etmeye çalışan çalışmalar olsa da, bunların hiçbirisi hem bu çalışmadaki kadar çok alt amaç fonksiyonunu bir arada toplamamış, hem de geçmiş çalışmaların hiçbirinde mahremiyet bu alt amaç fonksiyonları arasında yer almamıştır.
2. Talep katılımı çerçevesinde kullanıcı ve servis sağlayıcının alt amaç fonksiyonlarını adil bir biçimde ortaklaşa optimize edecek, ve bu alt amaç fonksiyonlarının birbirleri üzerindeki etkilerini incelemeye olanak verecek bir matematiksel programlama çerçevesi sunulmuştur. Bunun için temel program ve ana program adında iki farklı optimizasyon problemi oluşturulup sonuçlar bu iki program kullanılarak minimaks amaç programlama tekniği ile elde edilmiştir.
3. Daha önce literatürde bir arada ele alınmamış olan bu 5 alt amaç fonksiyonunu farklı ağırlıklar ile adil bir şekilde ortaklaşa optimize edilerek, bu alt amaç fonksiyonlarının birbirlerine göre önceliklendirilmelerinin bu fonksiyonların değerlerini nasıl etkilediği ortaya çıkarılmış, talep katılımı kapsamında kullanıcıların ve servis sağlayıcıların yararına olacak operasyonel çıkarımlar elde edilmiştir.



4. AKILLI ŞEBEKELERDE AKTİF VE REAKTİF GÜÇ ŞEKİLLEME TABANLI MAHREMİYET KORUMA

4.1 Çalışmanın Amacı

Akıllı şebekelerde talep tarafı yönetimini etkin bir şekilde gerçekleştirebilmek için akıllı sayaçlar ile sık aralıklarla ve isabetli bir biçimde ölçüm yapabilmek önem arz etmektedir. Günümüzdeki sensör teknolojileri, elektrik kullanımının dalga şekli ölçüğünde ölçülebilmesine olanak vermektedir. Akıllı sayaçlar, gerilimin ve akımın dalga şeklini algılayarak bu bilgilerden elektrik kullanımını hesaplamaktadır. Dolayısıyla, günümüz akıllı sayaçları kullanıcıların tükettiği aktif gücü (real power) ve reaktif gücü (reactive power) hesaplayabilmekte ve raporlayabilmektedir. Servis sağlayıcılar da (utility company) aktif güç tüketim bilgilerini faturalandırma amacı ile kullanmakta, reaktif güç bilgilerini de şebekenin etkinliğini gözlemlemek için kullanmaktadır.



Şekil 4.1: Öne sürülen akıllı ölçüm modeli.

Literatürde akıllı şebekelerde mahremiyet konusunda yapılmış tüm çalışmalar, akıllı sayacın gönderdiği aktif güç bilgisinin saklanması üzerine yoğunlaşmaktadır. Halbuki, Girişimsel Olmayan Cihaz Yüğü İzleme (Nonintrusive Appliance Load Monitoring - NIALM) metotları sadece aktif güç verisi üzerinden çalışmamaktadır. Aslında, Girişimsel Olmayan Cihaz Yüğü İzleme (GOCYİ) metotlarının aktif güçteki değişimden sonra baktıkları ilk veri reaktif güçteki değişim verisidir. Çünkü, hane içi elektrikli cihazların çoğu endüktif (inductive) bileşenlere sahip olup aynı zamanda reaktif güç

de harcamaktadırlar. Dolayısıyla, cihazların hanenin reaktif gücünde sebep oldukları değişiklikler de GOCYİ metotlarında cihazların tespitinde kullanılabilirler.

Bu çalışmada, daha önce yapılmış olan (Bkz: Bölüm 2) akıllı şebekelerde mahremiyeti koruyan talep katılımı modeli reaktif güç için genişletilmiş, ve optimal sonuçlar bulunarak aslında reaktif gücün de mahremiyeti koruma açısından büyük önem taşıdığı [106] gösterilmiştir.

4.2 Problem Formülasyonu

Bu çalışmada, akıllı elektrik sayacı ile dakikalık ölçümü yapılan, bir yenilenebilir (fotovoltaik) enerji sistemine sahip, zaman ve güç kaydırılabilir cihazlara sahip, bataryanın yanında bir de kontrol edilebilir kapasitöre sahip bir ev varsayılmıştır (Bkz: Şekil 4.1). Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, servis sağlayıcının gün içerisinde değişen elektrik fiyatı verisini bir gün öncesinden kullanıcılara sağladığı varsayılmıştır.

4.2.1 Güneş enerjisi modeli

Güneş ışınması, daha önceki çalışmalarda olduğu gibi iki doruklu dağılımla temsil edilmiştir. Her bir tek doruklu dağılım beta fonksiyonu olarak yazılmıştır (4.1).

$$f_b(x) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, & 0 \leq x \leq 1; \alpha, \beta \geq 0 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.1)$$

Güneş ışınmasının üretilen güneş enerjisine çevrimi de (4.2)'deki dönüşüm fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

$$f_{pv}(x) = \eta_{pv} \cdot \xi_{pv} \cdot x \quad (4.2)$$

Yukarıda verilen dağılım fonksiyonları Monte Carlo simülasyonu için kullanılmış, üretilen senaryolar k-ortalamlar kümesi yöntemi ile 10 senaryoya düşürülmüştür.

4.2.2 Amaç fonksiyonları

Bu çalışmadaki amaç fonksiyonları, aktif güç tabanlı veri sızıntısını minimize etmek, reaktif güç tabanlı veri sızıntısını minimize etmek, kullanıcı maliyetini minimize etmek ve kullanıcı rahatsızlığını minimize etmek olmak üzere 4 tanedir.

4.2.2.1 Aktif ve reaktif güçteki veri sızıntısını minimize etmek

Aktif güçteki ve reaktif güçteki verileri minimize etmek için, daha önceki çalışmalarda performansının yüksek olduğu gözlemlenen en iyi gayret (EİG) formülasyonu benimsenmiştir. En iyi gayret formülasyonu reaktif gücü de içerecek şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F \triangleq \sum_{s=1}^S \sum_{t=2}^T \rho_s \cdot \left(\left| p_{s,t}^c - p_{s,(t-1)}^c \right| + \left| q_{s,t}^c - q_{s,(t-1)}^c \right| \right) \quad (4.3)$$

Aktif gücü ve reaktif gücü ayrı ayrı saklamanın mahremiyeti nasıl etkilediğini araştırabilmek için, (4.3)'teki ifade ikiye ayrılmıştır. Böylece, bu iki ifadeye ayrı ayrı katsayılar verilip çeşitli ağırlıklar için mahremiyetin nasıl değiştiği gözlemlenebilir:

$$G_1 = \sum_{s=1}^S \sum_{t=2}^T \rho_s \cdot \left| p_{s,t}^c - p_{s,(t-1)}^c \right| \quad (4.4)$$

$$G_2 = \sum_{s=1}^S \sum_{t=2}^T \rho_s \cdot \left| q_{s,t}^c - q_{s,(t-1)}^c \right| \quad (4.5)$$

(4.4)'teki amaç fonksiyonunu minimize etmek aktif gücün saklanması, (4.5)'teki amaç fonksiyonunu minimize etmek de reaktif gücün saklanması sağlar. Mutlak değerden dolayı doğrusal olmayan bu ifadeler, daha önceki çalışmalarda olduğu gibi matematiksel formülasyonda kukla değişkenler (dummy variable) tanımlanarak doğrusallaştırılmıştır.

$$G_1 = \sum_{s=1}^S \sum_{t=2}^T [d_{s,t}^1 + d_{s,t}^2] \quad (4.6)$$

$$d_{s,t}^1 - d_{s,t}^2 = p_{s,t}^c - p_{s,(t-1)}^c, \quad \forall s, t \geq 2 \quad (4.7)$$

$$G_2 = \sum_{s=1}^S \sum_{t=2}^T [d_{s,t}^3 + d_{s,t}^4] \quad (4.8)$$

$$d_{s,t}^3 - d_{s,t}^4 = q_{s,t}^c - q_{s,(t-1)}^c, \quad \forall s, t \geq 2 \quad (4.9)$$

4.2.2.2 Kullanıcı maliyetini minimize etmek

Daha önceki çalışmalarda kullanıcı maliyeti ölçülen aktif güç ($p_{s,t}^c$) ile t anındaki aktif güç fiyatının (c_t^p) çarpımlarının toplamı cinsinden formülize edilmişti. Günümüzde bireysel aboneler reaktif güç için faturalandırılmasalar da, hane kullanıcılarının sebep olduğu reaktif güç kullanımı şebekenin güç dağıtımının etkinliğini azaltmakta ve bu da dolaylı yoldan faturalarına yansımaktadır. Bu dolaylı yansımaya modele katmak için ölçülen reaktif güce ($q_{s,t}^c$) zamanla değişmeyen sabit bir maliyet c^q tanımlanmıştır. Dolayısıyla, kullanıcı maliyetini minimize etme amaç fonksiyonu (4.10)'daki gibi tanımlanmıştır.

$$G_3 = \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot \sum_{t=1}^T (c_t^p \cdot p_{s,t}^c + c^q \cdot q_{s,t}^c) \quad (4.10)$$

Burada reaktif güce bir maliyet atamak problemin gerçekçiliğini artırdığı gibi, aynı zamanda optimal çözümün sadece reaktif gücü düzleştirmek için gereksiz yere reaktif güç üretmeye çalışmasını engellemektedir.

4.2.2.3 Kullanıcı rahatsızlığını minimize etmek

Kullanıcıların cihazlarını zaman ekseninde ya da güç ekseninde kaydırmak, bu cihazların istenen zamanda çalışmalarını engelleyeceği için belli bir rahatsızlığa neden olmaktadır. Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, her bir cihazın aktif güç kullanımının ($p_{a,s,t}^{ca}$) geometrik artan bir ceza katsayısı ($\phi_{a,t}$) ile çarpılması ile rahatsızlık modellenmiştir.

$$G_4 = \sum_{a=1}^A \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \rho_s \cdot \phi_{a,t} \cdot p_{a,s,t}^{ca} \quad (4.11)$$

(4.11)'de dikkat çeken bir durum, cihazların kullandığı reaktif gücün ($q_{a,s,t}^{ca}$), formülasyonda bulunmamasıdır. Bunun nedeni, hane içindeki bütün cihazların reaktif güç kullanımının aktif güç kullanımına bağlı olmasıdır. Bu nedenle ayrıyeten $q_{a,s,t}^{ca}$ 'ye bir ceza katsayısı atamaya gerek bulunmamaktadır. Eğer hane içerisinde kullanılan cihazlar arasında tamamen reaktif (purely reactive) yük çeken cihazlar olsaydı, o zaman benzer bir ceza katsayısının $q_{a,s,t}^{ca}$ için de tanımlanması gerekirdi.

4.2.3 Kısıtlar

Bu çalışmadaki kısıtlar üç kategoriye ayrılabilir: cihaz güç kısıtları, güç dengesi kısıtları ve batarya/kapasitör kısıtları. Bu üç kategoride de, bu tezde anlatılmış olan önceki çalışmalara göre reaktif gücün ele alınmasından kaynaklı yeni kısıtlar mevcuttur.

4.2.3.1 Cihaz güç kısıtları

(4.12) kısıtı her cihazın çektiği aktif gücün çalışma penceresi dışındaki zaman aralıklarında 0 olmasını sağlar. Bu kısıtın reaktif güç için eşleniğine ihtiyaç olmaması, ev içindeki tüm cihazların reaktif güç kullanımlarının aktif güç kullanımlarına bağlı olmasından ileri gelmektedir. Dolayısıyla, bir cihazın çektiği aktif gücün 0 olduğu her durumda çektiği reaktif güç de 0 olmaktadır. (4.13) kısıtı güç-kaydırılabilir cihazların çektikleri güçlerin o cihazların güç limitleri arasında olmasını sağlamaktadır. (4.14) kısıtı güç-kaydırılabilir olmayan cihazların çektikleri gücün ya 0 ya da P_a^{max} olmasını sağlar. (4.15) kısıtı tüm cihazların tam olarak harcaması gerektiği kadar enerji harcamasını sağlar. Cihazların harcadıkları enerji aktif güç ile hesaplandığı için burada $p_{a,s,t}^{ca}$ bulunmamaktadır. (4.16) kısıtı her cihazın harcadığı aktif güç ile reaktif güç oranının, o cihazın güç faktörü (power factor) ile orantılı olmasını sağlar.

$$p_{a,s,t}^{ca} = 0, \quad \forall a, s, \forall t \notin [\alpha_a, \beta_a] \quad (4.12)$$

$$P_a^{min} \leq p_{a,s,t}^{ca} \leq P_a^{max}, \quad \forall a, s, t \quad (4.13)$$

$$p_{a,s,t}^{ca} = y_{a,s,t} \cdot P_a^{max}, \quad \forall s, t, \forall a \in A^{pns} \quad (4.14)$$

$$\Delta T \cdot \sum_{t=1}^T p_{a,s,t}^{ca} = E_a, \quad \forall a, s \quad (4.15)$$

$$q_{a,s,t}^{ca} = \tan(\arccos(PF_a)) \cdot p_{a,s,t}^{ca}, \quad \forall a, s, t \quad (4.16)$$

4.2.3.2 Güç dengesi kısıtları

(4.17) ve (4.18) kısıtları aktif güç dengesini sağlayan kısıtlardır. (4.19) ise reaktif güç dengesini sağlayan kısıttır. Evin çekebileceği maksimum aktif gücün değeri (4.20) kısıtı ile belirtilmiştir.

$$p_{s,t}^c = \sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca} + p_{s,t}^{cb} / \eta^{cp} - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^{dp} - v_{s,t}, \quad \forall s,t \quad (4.17)$$

$$v_{s,t} \leq P_{s,t}^g, \quad \forall s,t \quad (4.18)$$

$$q_{s,t}^c = \sum_{a=1}^A q_{a,s,t}^{ca} + q_{s,t}^{cb} / \eta^{cq} - q_{s,t}^{db} \cdot \eta^{dq}, \quad \forall s,t \quad (4.19)$$

$$p_{s,t}^c \leq P^{max}, \quad \forall s,t \quad (4.20)$$

4.2.3.3 Batarya ve kapasitör kısıtları

(4.21) ve (4.22) kısıtları her bir τ zaman aralığında hane içi batarya ve kapasitörün kapasitelerinin aşılmamasını sağlamaktadır. (4.23) ve (4.24) kısıtları, hane içi bataryanın şarj ve deşarj hızlarını kısıtlar. Benzer bir şekilde, (4.26) ve (4.27) kısıtları hane içi kapasitörün şarj ve deşarj hızlarını kısıtlamaktadır. (4.25) ve (4.28) kısıtları gün sonunda bataryada ve kapasitörde bulunan aktif ve reaktif enerji miktarlarının gün başlangıcındaki değerlere eşit olmasını sağlar.

$$0 \leq E^{bi} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{cb} - \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{db} \leq E^{bmax}, \quad \forall s, \tau \quad (4.21)$$

$$0 \leq E^{ci} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot q_{s,t}^{cb} - \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot q_{s,t}^{db} \leq E^{cmax}, \quad \forall s, \tau \quad (4.22)$$

$$p_{s,t}^{cb} \leq R^{cbmax}, \quad \forall s,t \quad (4.23)$$

$$p_{s,t}^{db} \leq R^{dbmax}, \quad \forall s,t \quad (4.24)$$

$$\sum_{t=1}^T p_{s,t}^{cb} = \sum_{t=1}^T p_{s,t}^{db}, \quad \forall s \quad (4.25)$$

$$q_{s,t}^{cc} \leq R^{ccmax}, \quad \forall s,t \quad (4.26)$$

$$q_{s,t}^{dc} \leq R^{dcmax}, \quad \forall s,t \quad (4.27)$$

$$\sum_{t=1}^T q_{s,t}^{cb} = \sum_{t=1}^T q_{s,t}^{db}, \quad \forall s \quad (4.28)$$

4.2.3.4 Çok amaçlı optimizasyon modeli

Oluşturulan çok amaçlı optimizasyon problemini adil bir biçimde çözdürebilmek için, daha önceki çalışmalarda kullanılan minimaks amaç programlama (minimax goal programming) tekniği benimsenmiştir. Böylece, aktif gücün saklanması yanında reaktif

gücün de saklanması'nın önemini gözlemlemekle birlikte, bunların kullanıcı maliyeti ve kullanıcı rahatlığını nasıl etkilediği de gözlenebilmektedir. Minimaks amaç programlama (4.29)'daki gibi formülize edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} \quad Z & (4.29) \\
 & \text{subject to} \quad Z \geq \gamma_i \cdot \frac{G_i - G_i^*}{G_i^*}, \quad \forall i \\
 & \text{subject to constraints (4.6) – (4.28)}
 \end{aligned}$$

4.3 Karşılaştırmalı Analiz

(4.29)'daki optimizasyon problemi GAMS IDE ve CPLEX çözücüsü kullanılarak, 4 çekirdekli i7 işlemciye ve 32GB RAM'e sahip bir sistem üzerinde çözdürülmüştür. Cihazların çektikleri aktif ve reaktif güç verileri Ampds2 veri setinden [107] alınmıştır. Ampds2 veri setinde 10'dan fazla cihazın 2 yıl boyunca dakikada bir ölçülen gerçek ve reaktif güç verileri bulunmaktadır. Ayrıca, bu veri setinde evin genel elektrik kullanımı, su ve doğalgaz kullanımları da dakikalık olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada, bir günlük örnek elektrik kullanımı olarak 19 Aralık 2012 gününde ölçülen veriler alınmıştır. Bunun nedeni, bahsi geçen günde elektrik ölçümü yapılan tüm cihazların çalışmış olmasıdır. Böylece tüm cihazlar için eksiksiz bir veri elde edilmiştir.

Bu çalışmada; sadece aktif güç şekillenmenin, sadece reaktif güç şekillenmenin ve hem gerçek hem reaktif gücü şekillenmenin mahremiyet üzerinde etkilerini karşılaştırabilmek için mahremiyet metriği olarak bir bilgi kuramı (information theory) ölçütü olan karşılıklı bilgi (mutual information) benimsenmiştir. Bunun nedeni, karşılıklı bilgi ölçütünün literatürdeki yük şekilleme tabanlı mahremiyet çalışmalarında sıklıkla kullanılan bir metrik olmasıdır [51, 54–56, 62, 64, 67, 69, 108, 109]. Karşılıklı bilgi ölçütü rastgele değişkenler üzerinden tanımlanmış olduğu için, bu çalışmada ölçüt olarak deneysel karşılıklı bilgi (empirical mutual information) hesaplanmıştır. Cihazların gerçek aktif güç kullanımı ve evin ölçülen aktif güç kullanımı arasındaki karşılıklı bilgi ile, cihazların gerçek reaktif güç kullanımı ve ölçülen reaktif güç kullanımı arasındaki karşılıklı bilgi hesaplandığı gibi; her bir cihazın aktif/reaktif güç kullanımı ve evin ölçülen aktif/reaktif güç kullanımı arasındaki karşılıklı bilgi de hesaplanmıştır.

Sonuçları farklı varyasyonlarda gözlemlemek için, 6 farklı vaka (case) varsayılmış ve optimizasyon problemi bu 6 durum için ayrı ayrı çözdürülmüştür. Sonuçlar hesaplanan karşılıklı bilgi değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Vaka 0 hiç bir yük şekillenmenin olmadığı durumu temsil ederken; vaka 1 sadece aktif gücün şekillendiği durumu, vaka 2 sadece reaktif gücün şekillendiği durumu, vaka 3 hem aktif gücün hem reaktif gücün şekillendiği durumu temsil eder. Vaka 4 aktif gücün saklanması yanında, kullanıcının maliyetinin ve rahatlığının da eşit derecede önemli olduğu durumu temsil etmektedir. Vaka 5 reaktif gücün saklanması ve aynı zamanda maliyetin ve rahatlığın da optimize edildiği durumu gösterir. Vaka 6 da aktif ve reaktif gücün saklanması kullanıcı maliyeti ve konforu ile birlikte optimize edildiği durumu temsil eder. Bu vakalar, γ_i değerlerinin Çizelge 4.1'deki gibi ayarlanması ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.1: Vakalar ve karşılık gelen γ_i değerleri.

Vaka #	Ağırlıklar			
	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	1	1	0	0
4	1	0	1	1
5	0	1	1	1
6	1	1	1	1

4.3.1 Reaktif gücün şekillenmesinin mahremiyete etkisi

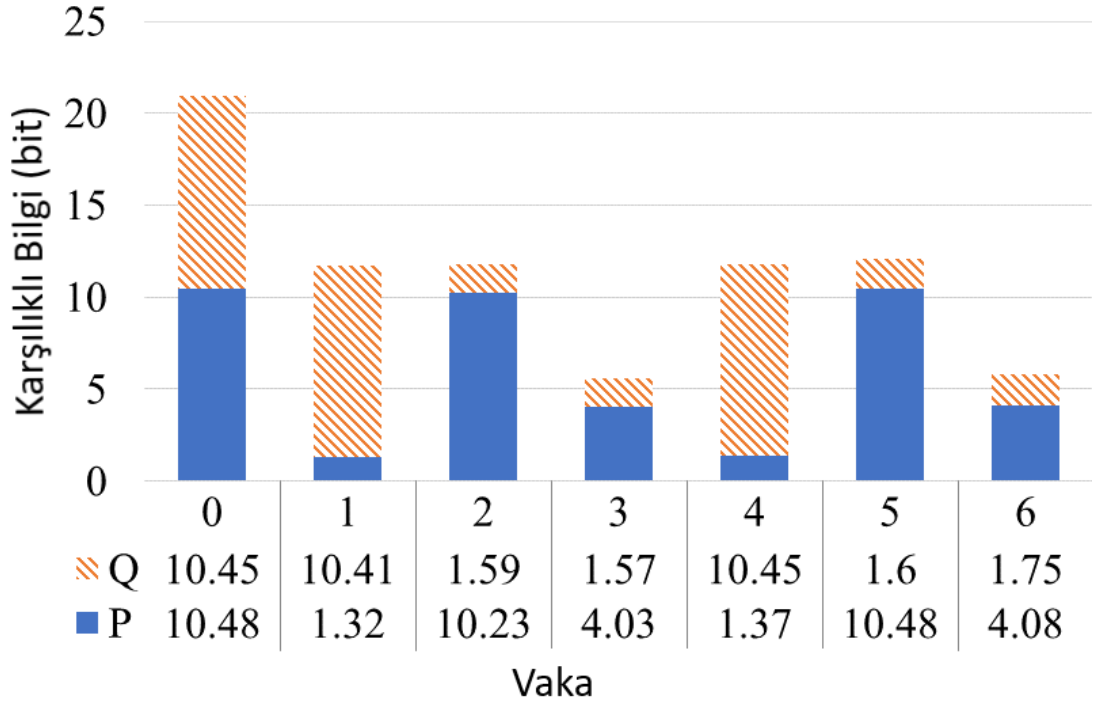
Aktif gücün yanında reaktif gücün de şekillenmesinin mahremiyete sağladığı katkıları gözlemleyebilmek için, vaka 0 – 6 çözdürülmüş ve bu 7 durum için deneysel karşılıklı bilgi hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir. Hangi durumda ölçülen aktif ve reaktif yük ile kullanılan aktif v reaktif yük arasındaki bilginin ne kadar olduğunu görsel olarak temsil etmesi için, Şekil 4.2'de sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Şekil 4.3'te, vaka 0 – 3 için optimizasyon problemlerinin çözdürülmesi sonucu ortaya çıkan aktif ve reaktif güçler zaman ekseninde çizdirilmiştir. Şekil 4.3-b ve 4.3-c göstermektedir ki sadece aktif güç ya da sadece reaktif güç şekillendirildiğinde, şekillendirilmeyen taraftan halen cihazların çalışmaları ile ilgili izleri sızmaktadır. Bu durum, sayısal olarak Şekil 4.2'den de gözlenebilmektedir. Şekil 4.3-d ise bizlere göstermektedir ki, tekil optimal şekillerinden ufak ödünler vererek, aktif ve reaktif güç verileri ortaklaşa olarak şekillendirilebilmektedir.

Çizelge 4.3, farklı durumlar için, ölçülen (aktif ve reaktif) güç verileri ile her bir cihazın kullandığı (aktif ve reaktif) güç arasındaki ortalama deneysel karşılıklı bilgi miktarlarını göstermektedir. Bu tablodan da anlaşılmaktadır ki, aktif ve reaktif gücü

Çizelge 4.2: Ölçülen aktif/reaktif güç ile cihazlar tarafından harcanan aktif/reaktif güç arasındaki karşılıklı bilgi miktarları.

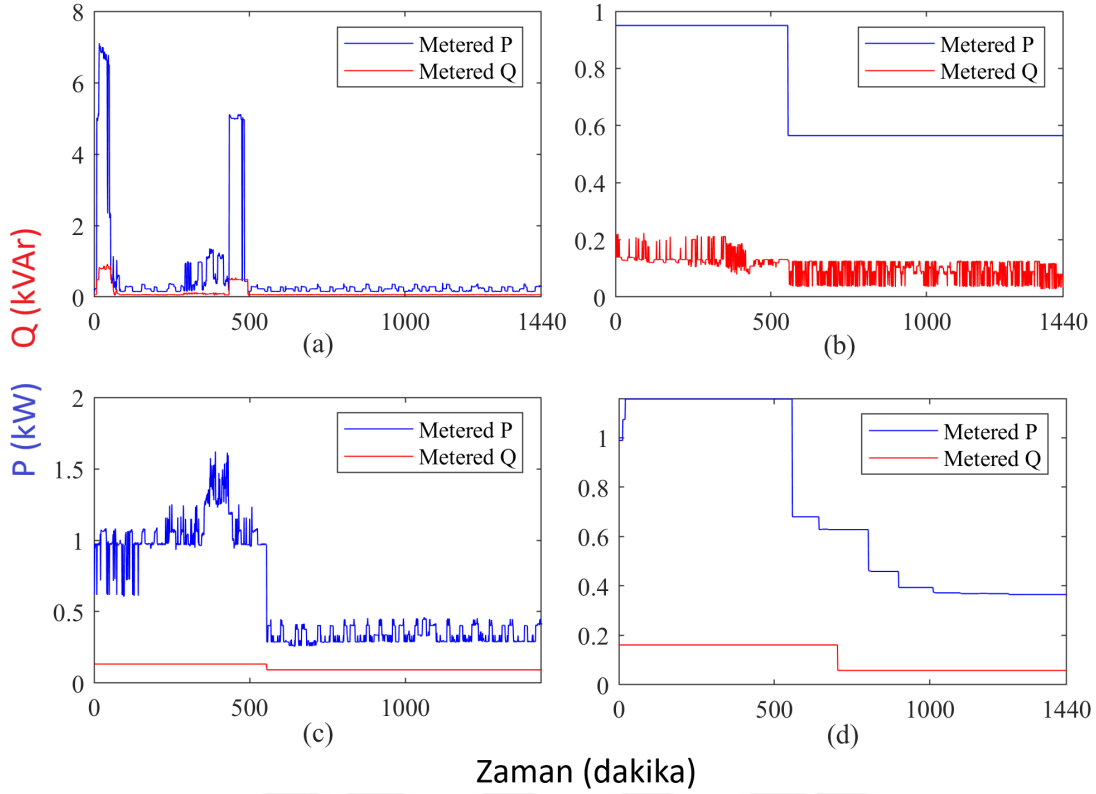
Vaka	Karşılıklı Bilgi (bit)			
	#	aktif güç	reaktif güç	toplam
0		10.48	10.45	20.93
1		1.32	10.41	11.73
2		10.23	1.59	11.82
3		4.03	1.57	5.60
4		1.37	10.45	11.82
5		10.48	1.60	12.08
6		4.08	1.75	5.83



Şekil 4.2: Farklı vakalar için ölçülen/asıl aktif güçler arasındaki ve ölçülen/asıl reaktif güçler arasındaki karşılıklı bilgi.

birlikte şekillemek optimal mahremiyet performansını artırmaktadır. Aktif ve reaktif gücü birlikte şekillemek (vaka 3), sadece aktif gücü şekillemeye (vaka 1) ya da sadece reaktif gücü şekillemeye (vaka 2) göre, optimal sonuçlardaki deneysel karşılıklı bilgi miktarını en az %50 azaltmaktadır. Tüm amaç fonksiyonları ortaklaşa optimize edildiğinde bile (vaka 6), vaka 1 ve 2'ye göre karşılıklı bilgideki azalma %50'den fazla olmaktadır.

Şekil 4.4 farklı durumlar için ölçülen aktif güç ve reaktif güçteki değişimleri $\Delta P - \Delta Q$ düzleminde göstermektedir. Vaka 1'de, ΔP 'nin neredeyse her zaman 0 olduğu

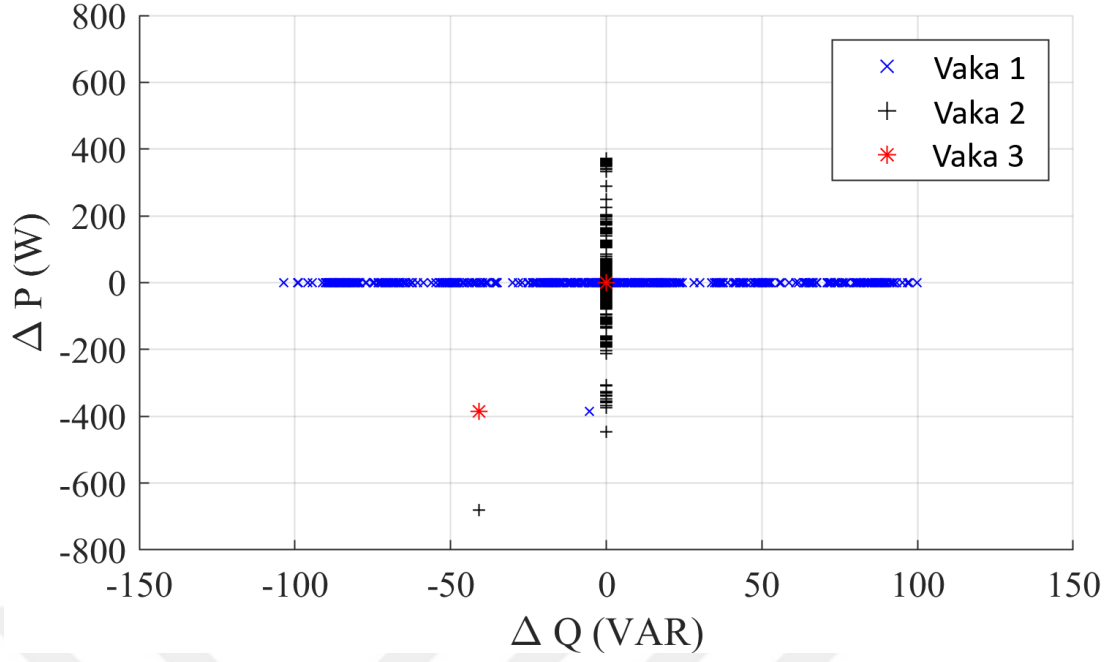


Şekil 4.3: Evin ölçülen aktif ve reaktif gücü. a: orijinal veri (vaka 0). b: aktif güç şekilleme (vaka 1), c: reaktif güç şekilleme (vaka 2), d: aktif ve reaktif güç şekilleme (vaka 3).

Çizelge 4.3: Ölçülen aktif/reaktif güç ile cihazların aktif/reaktif güç kullanımları arasındaki ortalama deneysel karşılıklı bilgi.

Vaka	Ortalama karşılıklı bilgi (bit/cihaz)			
	#	aktif	reaktif	toplam
0		3.07	2.79	5.86
1		0.44	3.29	3.73
2		3.47	0.44	3.91
3		1.32	0.45	1.77
4		0.52	3.34	3.86
5		3.53	0.47	4.00
6		1.33	0.47	1.80

gözlemlenmektedir. Bu da, vaka 1’de aktif güçte neredeyse hiç bilgi olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, vaka 1’de aktif güce bakılarak cihaz çalışmaları ile ilgili bir bilgi çıkarmak neredeyse olanaksızdır. Ancak, ΔQ ekseninde halen ciddi değişiklikler gözlemlenebilmektedir. Bu da, vaka 1’de ölçülen reaktif güçteki değişimlere bakılarak cihazlar ile ilgili çıkarımlar yapılabileceğini gösterir. Benzer bir biçimde, vaka 2’de ΔQ neredeyse her zaman 0’dır, ancak ΔP değeri $\pm 400W$ arasında değişmektedir. Vaka 3’te



Şekil 4.4: Farklı durumlarda ölçülen aktif ve reaktif güçteki değişim miktarları.

ise, $(\Delta P, \Delta Q)$ ikilisi neredeyse tüm zaman aralıkları için $(0, 0)$ civarındadır. Bu da hem ölçülen aktif güçte hem de ölçülen reaktif güçte cihazlarla ilgili verilerin gizlendiğini göstermektedir. Böylece Şekil 4.4, hem aktif hem de reaktif gücün saklanması ne kadar önemli olduğunu gözler önüne sermektedir.

4.3.2 Aktif ve reaktif gücü aynı anda şekillenmenin diğer amaç fonksiyonlarına olan etkisi

Bu bölümde, daha önce tanımlanmış olan vaka 4, 5 ve 6 birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Vaka 6, aktif ve reaktif güç bazlı mahremiyetin kullanıcı maliyeti ve rahatlığı ile birlikte optimize edildiği durumu temsil ederken; vaka 4 sadece aktif güç tabanlı mahremiyet ile maliyet ve rahatlığın, vaka 5 ise sadece reaktif güç tabanlı mahremiyet ile maliyet ve rahatlığın birlikte optimize edildiği durumları temsil eder.

Çizelge 4.4'ten görülebileceği üzere, aktif ve reaktif gücü aynı anda şekilleme (vaka 6), sadece aktif gücü ya da sadece reaktif gücü şekillemeye göre kullanıcı maliyeti ve rahatlığı açısından daha kötü performans vermektedir. Mahremiyet amaçlı aktif ve reaktif yük şekilleme, kullanıcı maliyeti ve rahatlığı ile çelişen amaç fonksiyonları olduklarından bu beklenen bir sonuçtur. Ancak, mahremiyet performansında elde edilen %50'den büyük artışın yanında, maliyetteki %8 ve rahatsızlıktaki %18 artış göze alınabilecek bir bedel olarak yorumlanabilir.

Çizelge 4.4: Aktif ve reaktif güç şekillenmenin diğer kullanıcı amaç fonksiyonlarına etkisi.

Vaka #	Amaç fonksiyonu değeri (tekil optimalden % sapma)	
	maliyet	rahatsızlık
4	46.58 (51.7%)	2977 (72%)
5	46.08 (50.1%)	3237 (87%)
6	48.48 (57.9%)	3293 (90%)

4.4 Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, literatürde daha önce sunulmuş çalışmalarda üzerinde durulmamış olan, ancak aslen girişimsel olmayan cihaz yük izleme yöntemlerinde sıkça kullanılan, reaktif güç verisi üzerinde durulmuştur. Bu verideki cihaz izlerinin gizlenmesinin, kullanıcı mahremiyeti açısından ne kadar önemli olduğu matematiksel modeller ve sayısal mahremiyet performansı değerleri kullanılarak gösterilmiştir. Sonuçlar, sadece ölçülen aktif gücün ya da sadece ölçülen reaktif gücün şekillenmesinin kullanıcı mahremiyetini aslında koruyamadığını, bu iki değer birlikte şekillenmesi gerektiğini göstermiştir. Çalışmanın sonuçlarını özetlemek gerekirse:

1. Aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) birlikte şekillendirildiğinde, optimal sonuçta karşılıklı bilgide %50'den fazla azalış gözlenmiştir. Bir diğer deyişle, P ve Q tekil olarak şekillendirildiğinde, optimal sonuçlar P ve Q 'nun birlikte şekillendirildiği optimal sonuca göre iki kattan daha fazla karşılıklı bilgiye sahip olmaktadır.
2. Aktif ve reaktif gücü şekillendirmek kullanıcı maliyetinin ve rahatsızlığının tekil optimal değerlerinden %57.9 ve %90 sapmasına neden olmuştur. Ancak, P ve Q 'nun tekil şekillendirildiği durumlara göre maliyet ve rahatsızlığın optimalden sapmasındaki artış %8'den az olarak gözlemlenmiştir.

Bu bölümde sunulmuş olan mahremiyet çalışmasının bir sonraki aşaması olarak, güneş enerjisi sistemlerinin reaktif gücü şekillemede kullanılması üzerinde çalışılabilir. Halihazırda güneş enerjisi sistemleri %100 aktif güç sağlayacak şekilde şartnamelerce kısıtlanmaktadır. Ancak bu sistemler eve reaktif güç sağlayacak şekilde de kontrol edilebilir. Böylece, ekstra bir kapasitöre gerek kalmadan reaktif güç de şekillenebilir. Bir sonraki bölümde, elektriğin yanında suyun ve doğalgazın da akıllı sayaçlarca ölçüldüğü durumda yük şekilleme ve mahremiyet koruma üzerine yapılan çalışmalar sunulmuştur.

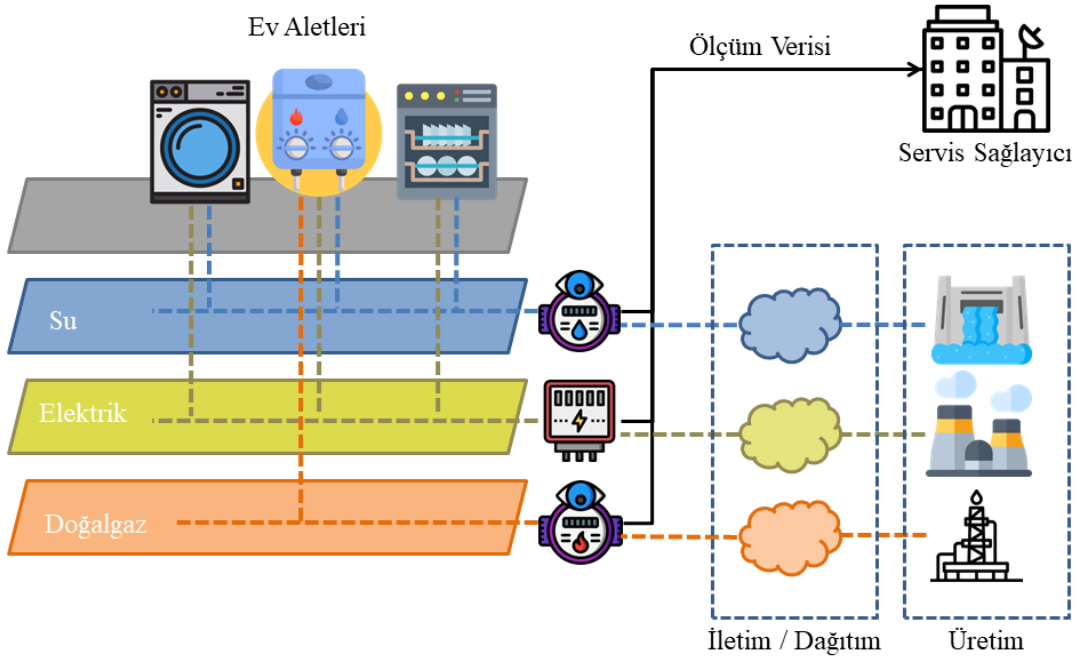
5. BÜTÜNCÜL MAHREMİYET: YENİ NESİL ŞEBEKELERDE AKILLI ELEKTRİK, SU VE DOĞALGAZ ÖLÇÜMÜNE KARŞI MAHREMİYETİN KORUNMASI

5.1 Çalışmanın Amacı

Dünyadaki doğal kaynakların gün geçtikçe azalması, elektriğin yanında su ve doğalgaz gibi farklı kaynakların da yüksek sıklıkta ve isabetle ölçülmesini gerekli kılmaktadır. Bu nedenle özellikle su ve doğalgazın nadir olduğu ülkelerde akıllı su ve doğalgaz sayaçları kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik ölçüm verisi üzerinden evlerde kullanılan cihazların tespit edilmesini sağlayan Nontintrusive Appliance Load Monitoring metotları, su ve doğalgaz verisi üzerinde de kullanılabilir. Bu da, literatürde daha önce çalışılmamış bir mahremiyet problemini ortaya çıkarmaktadır. Su ve doğalgaz gibi kaynakların akıllı sayaçlarla ölçülmesi sadece mahremiyetinin korunması gereken yeni veri setleri oluşturmakla kalmamakta, aynı zamanda halihazırda elektrik kullanım verisi üzerinde tasarlanan mahremiyet koruma metotlarının da etkinliğini azaltmaktadır. Bunun nedeni, bir çok cihazın elektrik ile birlikte diğer kaynakları da eşzamanlı olarak kullanmasıdır. Bundan dolayı, bu cihazların elektrik kullanım verileri mükemmel bir biçimde saklanmış olsa bile, kullandıkları diğer kaynakların ölçüm verilerinden bu cihazların çalışma çizelgeleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada amaç, yeni ortaya çıkan bu mahremiyet tehditini tanımlamak, bütüncül bir mahremiyet koruma stratejisini matematiksel olarak modellemek ve bu bütüncül stratejinin sonuçlarını tekil sonuçlarla karşılaştırarak bütüncül bir anlayışın gerekliliğini ortaya koymaktır [110].

5.2 Akıllı Kaynak Ölçümü ve Mahremiyet

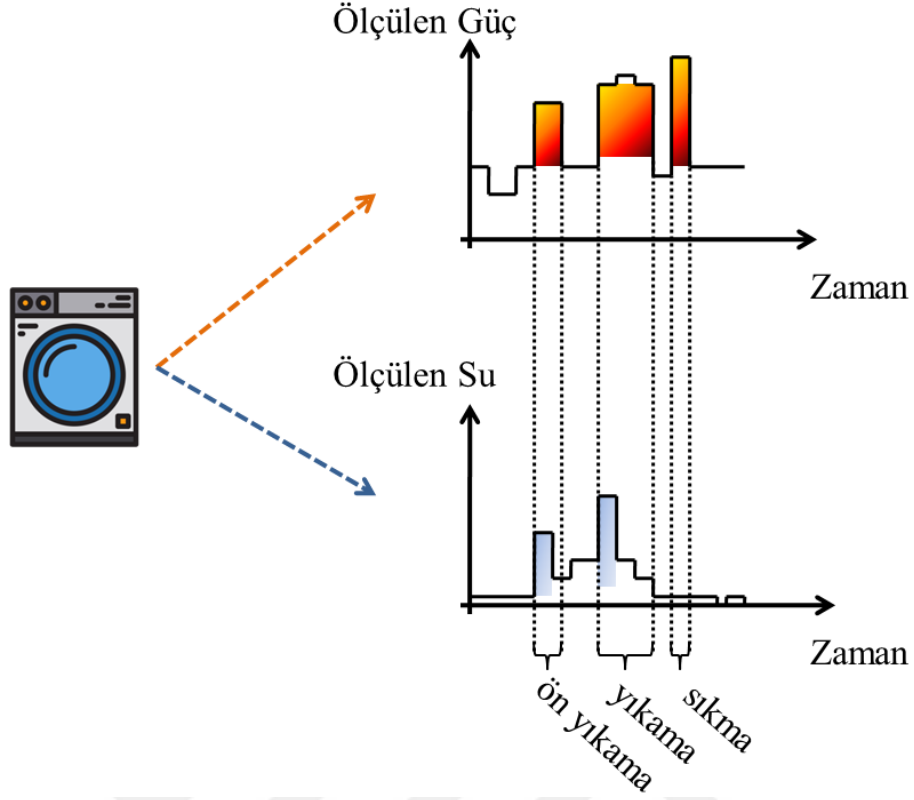
Elektrik talebinin her geçen gün artması ve elektrik kullanım alanlarının yanında elektrik üretim yöntemlerinin de çeşitlenmesi ve dağıtıklaşması (distributed generation), eski elektrik şebekesi altyapısının akıllı hale getirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bilgi teknolojilerinin eklenmesi ile bileşenleri arasında iki yönlü veri iletiminin mümkün olduğu bu yeni elektrik üretim, iletim ve dağıtım ağına akıllı şebeke (smart grid) denmektedir. İleri ölçüm altyapısı ve bu altyapının önemli bir bileşeni olan akıllı sayaçlar da (smart meter), akıllı şebeke konseptinin yapıtaşlarından biri olarak ortaya çıkmıştır. Elektrik kullanım verisini sık aralıklarla ve isabetli bir şekilde ölçen akıllı sayaçlar;



Şekil 5.1: Akıllı elektrik, su ve doğalgaz ölçümü.

elektriği üreten, ileten ve dağıtan servis sağlayıcılarına (utility company) bu verileri anlık bir biçimde göndererek servis sağlayıcıların etkinliğini bir çok yönden artırmasını sağlamaktadır. Talep tahmini (demand forecasting), fiyatlandırma, kaçak kullanım tespiti, elektrik kesintisi tespiti gibi uygulamalar akıllı ölçüm sayesinde etkinliği artan uygulamalar arasında gösterilebilir.

Akıllı ölçüm getirdiği avantajların yanında, kullanıcıların mahremiyeti ile ilgili sorunlar da yaratmaktadır. Girişimsel Olmayan Cihaz Yükleme İzleme (Nonintrusive Appliance Load Monitoring - NIALM) yöntemleri ile, akıllı ölçüm verileri cihaz kullanım verilerine dönüştürülebilmektedir. Bu da, kullanıcıların özel hayatıyla ilgili bir çok çıkarım yapılabilmesine olanak tanımaktadır. NIALM metotları kullanılarak çıkarılabilecek mahrem bilgiler arasında evde kaç kişinin yaşadığı, evin hangi saatlerde boş olduğu, evde yaşayanların demografisi gibi bilgiler sayılabilir. Bu bilgiler en masum hali ile kişisel veri olup kişiye özel pazarlama ve reklam amaçlı kullanılabilmekte, ancak bu ve benzeri verilerin kullanımının kullanıcıların izni dahilinde olması gerekmektedir. Daha kötü niyetli kişiler tarafından ise bu veriler suç işlemek amaçlı bile kullanılabilir potansiyeline sahiptir. Dolayısıyla, akıllı elektrik ölçüm verilerinin mahremiyetinin sağlanması literatürde çokça çalışılmış ve bununla ilgili çeşitli metotlar öne sürülmüştür.



Şekil 5.2: Birden fazla kaynağı eşzamanlı kullanan cihazlara örnek olarak çamaşır makinesi.

Akıllı ölçüm ile ilgili meydana gelen yeni gelişmeler ise bu mahremiyet metodlarının tekrar gözden geçirilmesi gerekliliğini ortaya koyacaktır. Bu gelişmeler, elektrik dışında hanenin kullandığı diğer kaynakların da akıllı ölçüme tabi olmaya başlamasıdır [111, 112]. Dünya çapında akıllı ölçüm yapan cihazların sayısı artarken, özellikle su ve doğalgazda bu kaynakların sınırlı olduğu ülkelerde akıllı ölçüm uygulamasına geçilmeye başlanmıştır. Böylece, bu sınırlı kaynakların daha verimli kullanılması amaçlanmaktadır. Dünya çapında 2024 yılında 200 milyon akıllı sayacın (elektrik, su ve doğalgaz) kurulumunun yapılacağı öngörülmektedir [111]. Girişimsel Olmayan Cihaz Yüklü İzleme (NIALM) metodları, bu akıllı su ve doğalgaz sayaçları üzerinde de çalıştırılıp, su ve doğalgaz kullanan aletler ve son kullanımlar da açığa çıkarılabilir [113]. Dolayısıyla, akıllı ölçüm yapılan su ve doğalgaz gibi diğer kaynakların da mahremiyet açısından korunması gerekmektedir. Buna ek olarak, akıllı ölçümü yapılan kaynakları tekil bir biçimde gizlemek, birden fazla kaynağı eşzamanlı kullanan cihazları gizlemek için yeterli olmayacaktır. Bu yüzden, akıllı ölçümü yapılan tüm kaynakları bütüncül bir şekilde gizleme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Akıllı kaynak ölçümünün oluşturduğu tehditin önemini kavrayabilmek için, akıllı su ve akıllı doğalgaz sayaçlarının kabiliyetlerindeki gelişmeleri de gözlemlemek gerekmektedir. Örneğin, akıllı su sayacı veya akıllı doğalgaz sayacı günde sadece bir kere ölçüm

verisini gönderiyor ise bu mahremiyet açısından önemli bir tehdit içermeyebilir. Ya da su ve doğalgaz ölçümü elektrik ölçümü kadar hassas yapılamıyorsa yine mahremiyet konusunda elektrikteki kadar büyük bir sorun teşkil etmeyebilir. Bu yüzden, bir sonraki bölümde akıllı su ve doğalgaz ölçümündeki son gelişmeler incelenmiştir.

5.3 Akıllı Kaynak Ölçümü Teknolojisindeki Gelişmeler

Klasik su sayaçlarının ölçüm verileri hanenin bulunduğu yere göre minimum ayda bir manuel olarak toplanırken, ölçüm hassasiyeti de m^3 seviyesinde olmaktadır. Yine doğalgaz sayaçlarının ölçümleri en az ayda bir aralıklarla olmakta ve ölçüm hassasiyeti m^3 seviyesinde olmaktadır. Aslında bu klasik sayaçlar metreküpün binde birine kadar (dm^3) hassasiyete sahip olsalar da, okumalar manuel yapıldığı için m^3 seviyesinde olan kullanımlar dikkate alınmaktadır. Doğal kaynaklar kısıtlandıkça, hem bu değerlerden daha yüksek hassasiyete sahip sensörler, hem de bu hassas ölçümleri daha sık servis sağlayıcıya gönderen akıllı sayaçlar üretilmeye başlanmıştır.

Piyasada halihazırda dahili ileri ölçüm altyapısına (Advanced Metering Infrastructure) sahip akıllı su sayaçları bulunmaktadır. Literatürde de su ölçümünü daha hassas bir biçimde yapabilen bir çok yeni sensör tanıtılmıştır [113–116]. Akış metreleri (flow meters) 1 Hz’lik bir ölçüm frekansına ve 0.0014 litrelik bir ölçüm hassasiyetine sahiptir. Basınç sensörlerinin ölçüm frekansı 2 kHz’e kadar çıkabilmektedir. İvmeölçerler de saniyede 100 ölçüm alabilmekte ve 0.015 litrelik değişimleri ölçebilmektedirler. Literatürdeki en hassas ölçüm yapan sensör tipi ultrasonik sensör olup, 2 MHz ölçüm frekansına ve 1.8 ml’lik bir hassasiyete sahiptir.

Doğalgazın ölçümü ise suyun ölçümüne göre biraz daha güç bir süreçtir. Bunun nedeni, gazların hacimlerinin ısıya ve basınca göre çok daha değişken olmasıdır. Dolayısıyla, gaz sayaçlarının otomatik olarak içlerinde ısı ve basınç sensörleri de olmaktadır. Yine de, akıllı doğalgaz sayaçları piyasada halihazırda bulunmakta, ve bu sensörlerle ilgili de literatürde çalışılmaktadır [117, 118]. Geleneksel doğalgaz sayaçları genelde diyaf-ram ve rotary tipi gaz ölçerler olup, bunların hassasiyetleri genelde ft^3 ’ler seviyesindedir ve isabetlilik oranları $\pm\%0.25 - 1$ arasındadır. Özel bir düzenek ve yüksek çözünürlüklü bir kodlayıcı kullanarak, bu hassasiyet $0.005 ft^3$ ’lere kadar indirilebilmektedir [117]. Orifis (orifice) gibi diferansiyel basınç ölçerler $\pm\%0.25 - 2$ isabetliliğe sahiptir. Ultrasonik akım ölçerle ve Coriolis metreler daha yüksek hassasiyetlere sahiptir [112].

Akıllı su ve doğalgaz ölçüm teknolojilerindeki ve bunların evlere yerleştirilmesindeki nispeten yavaş ilerleme, literatürde akıllı elektrik sayaçlarına göre akıllı su ölçümünün ve doğalgaz ölçümünün fazla ilgi görmemesine neden olmuştur. Ancak, günümüzde akıllı su ve doğalgaz sayacı kurulumundaki hareketlilik artık bu kaynakların akıllı öl-

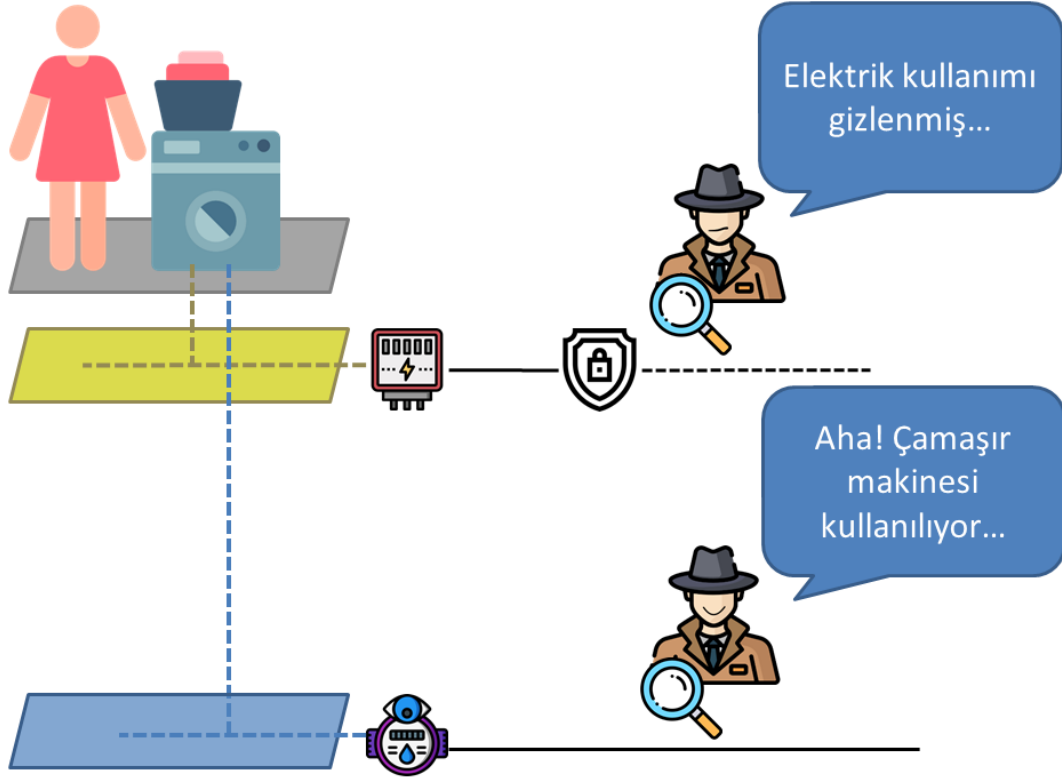
çümünün de mahremiyet açısından ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Akıllı doğalgaz sayaçları gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin birçoğunda kurulmaya başlanmıştır. Örnek vermek gerekirse, Birleşik Krallık akıllı doğalgaz sayacı dönüşümüne başlamış olup, 2020 yılı sonu itibarı ile evlerin %100'ünde akıllı doğalgaz sayaçlarının yerleştirilmiş olmasını hedeflemektedir [119]. Akıllı su sayaçları da dünya çapında kurulmaya devam etmekte olup, özellikle yine gelişmiş ve tatlı su kaynakları kısıtlı olan Avustralya, Yeni Zelanda, Hindistan, Güney Afrika gibi ülkelerde; ve yine akıllı ölçümde dünyada önde gelen İtalya ve İskandinav ülkelerinde hızla devam etmektedir. Dünya çapında 2026 itibarı ile 400 milyon akıllı su sayacının kurulmuş olması beklenmektedir [115].

5.4 Su, Doğalgaz ve Girişimsel Olmayan Cihaz Yükü İzleme

Literatürde akıllı su ve doğalgaz ölçüm verilerinin mahremiyeti ile ilgili bir çalışma bulunmasa da, bu verilerden cihazları ve son kullanımları ayırt etme ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Girişimsel olmayan cihaz su izleme (nonintrusive appliance water monitoring) ve girişimsel olmayan cihaz doğalgaz izleme (nonintrusive appliance natural gas monitoring) olarak geçen bu çalışmalarda, karar ağaçları (decision trees) ve kümeleme (clustering) gibi makine öğrenme yöntemleri kullanılarak bu kaynakları kullanan cihazlar ya da son kullanımlar tespit edilebilmektedir. Bunlara ek olarak, literatürde girişimsel olmayan cihaz doğalgaz izleme tekniği olarak zaman dizisi ayrıştırma (time series disaggregation) [120], bulanık c-ortalama kümeleme (fuzzy c-means clustering) [121], ve kenar algılama (edge detection) [122] yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle, toplu doğalgaz ölçüm verisinden cihaz kullanımları çıkarılabilmekte ve kullanıcılar hane sayısına, çalışma durumuna, sosyal sınıfına ve yıllık gelirine göre profillendirilebilmektedir [121].

5.5 Bütüncül Mahremiyet

Akıllı şebekelerde halihazırda kullanılan mahremiyet koruma teknikleri, akıllı ölçümü yapılan su ve doğalgaz gibi diğer kaynaklar için de uyarlanabilir. Ancak, akıllı ölçümü yapılan kaynakların mahremiyetlerinin ayrı ayrı ele alınması, bu kaynakları eşzamanlı kullanan cihazların verilerinin gizlenmesi açısından problem oluşturabilir. Örneğin; Şekil 5.3'teki gibi bir evin elektrik kullanımı mükemmel bir şekilde gizlense bile, çamaşır makinesi gibi çalışması sırasında elektriği ve suyu aynı anda kullanan cihazlar akıllı su sayacından elde edilen veriler analiz edilerek çıkarılabilir. Dolayısıyla, yeni nesil akıllı evlerde mahremiyet konusunun daha bütüncül bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu kavram bu çalışmada *bütüncül mahremiyet* olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5.3: Eğer cihaz birden fazla akıllı ölçülen kaynağı aynı anda kullanıyorsa, sadece elektrik verilerini gizlemek mahremiyet için yeterli olmayabilir.

Örneğin, bir yük şekilleme algoritması ile cihazların elektrik kullanım zamanlarının değiştirildiğini ve hane içi batarya gibi yardımcı elemanlar ile elektrik kullanımının gizlendiğini varsayalım. Ancak, bu cihazlardan bazıları aynı zamanda su ve doğalgaz da kullandığı için, su ve doğalgaz ölçüm verilerinden cihazların hangi cihazlar olduğu ve ne zamanlar çalıştırıldığı çıkarılabilecektir. Bu mahremiyet tehdidine en duyarlı olan cihazlar, kombiler (elektrik, su ve doğalgazı aynı anda kullanır), ısıtma-havalandırma-iklimlendirme cihazları (HVAC - heating, ventilation and air conditioning), çamaşır ve bulaşık makineleri (elektrik ve suyu aynı anda kullanır) gibi cihazlardır.

5.6 Bütüncül Mahremiyetin Gerekliği

Bütüncül mahremiyet anlayışının gerekliliğini gösterebilmek için, yalnızca elektrik kullanımının şekillendirildiği durum ile hem elektrik, hem su, hem de doğalgaz kullanımının ortaklaşa şekillendirilebileceği ve bu iki stratejinin optimum mahremiyet koruma performanslarının karşılaştırılabileceği ortak bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaca binaen, yük şekilleme tabanlı bütüncül bir mahremiyet koruma stratejisinin optimum değerini bulabilecek bir matematiksel model ((5.1) - (5.42)) oluşturulmuştur. Daha sonra, bir vaka analizi ile bütüncül mahremiyetin cihaz izlerini gizlemekte ne

kadar etkili ve gerekli olduğu tarafsız bir şekilde analiz edilmiştir.

(5.1) - (5.42)'deki optimizasyon problemi kısaca EWG (Electricity-Water-Gas'in kısaltılmışı) olarak adlandırılmıştır. Daha önceki bölümlerde kullandığımız minimaks amaç programlama tekniği burada da kullanılmıştır. Böylece, elektrik yükünü saklana, su yükünü saklama ve gaz yükünü saklama aynı öncelik (γ) ile optimize edilebilmektedir. Ayrıca, yine önceki bölümlerde olduğu gibi, mahremiyetin talep katılımı kapsamında sağlandığı varsayılarak, kullanıcıların maliyetleri ve konforu da alt amaç fonksiyonu olarak EWG modeline eklenmiştir. Böylece, elektriğin yanında suyu ve gazı da şekillenmenin kullanıcıyı maliyet olarak ve konfor olarak nasıl etkilediği de gözlenebilmektedir.

EWG modelini gerçekçi bir veri seti ile çözdürebilmek için, Ampds2 veri setinden [107] veri setinden yararlanılmıştır. Bu veri setinde, bir evdeki cihazların çektikleri aktif ve reaktif güç verilerinin yanı sıra, doğalgaz ve su kullanımları da cihaz ya da son kullanım seviyesinde ölçülmektedir. Bu çalışmada, daha önceki çalışmalardaki gibi Ampds2 veri setindeki cihazlar zaman-kaydırılabilir, zaman ve güç kaydırılabilir ve kaydırılmaz cihazlar olarak üç gruba ayrılmıştır. Zaman kaydırılabilir cihazların bu özelliği, cihazların $[\alpha_a, \beta_a]$ aralıkları buna göre seçilerek ayarlanmıştır. Güç kaydırılabilir olmayan cihazların ise çektikleri gücün sabit olması EWG modelindeki (5.19) kısıtı ile sağlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağının ürettiği elektrik miktarı, daha önceki çalışmalardaki gibi iki doruklu dağılım ile türetilmiştir. Monte Carlo simülasyonu tekniği ile türetilen bu dağılımlardan k-ortalamlar kümesi yöntemi ile 10 senaryo s ve bu senaryoların olasılıkları ρ_s türetilmiştir.

5.6.1 Matematiksel model

EWG optimizasyon modeli, (5.1) - (5.42)'de sunulmaktadır. Modeldeki (5.1) ve (5.2) problemin minimaks amaç programlama problemi olduğunu göstermektedir. (5.3) ve (5.4) aktif ve reaktif güç kullanımının maliyetini minimize eden alt amaç fonksiyonlarını temsil etmektedir. (5.5) ve (5.6) kısıtları aktif gücün en iyi gayret yöntemi ile şekillendirilmesini, (5.7) ve (5.8) kısıtları da reaktif gücün en iyi gayret yöntemi ile şekillendirilmesini sağlar. (5.9) kısıtı daha önceki çalışmalarda olduğu gibi kullanıcı rahatsızlığının minimize edilmesini (konforunun maksimize edilmesini) sağlamaktadır. (5.10) ve (5.11) kısıtları yine en iyi gayret metodu ile doğalgaz kullanımını gizlemeyi, (5.12) ve (5.13) kısıtları ise yine en iyi gayret metodu ile su kullanımını gizlemeyi sağlar. (5.14) kısıtı cihazların belirlenmiş olan çalışma zamanları içerisinde çalışmalarını sağlarken, (5.16) kısıtı güç kaydırılabilir olmayan cihazların çektikleri yükün herhangi bir zaman aralığında ya 0 ya da P_a^{max} olmasını sağlar. (5.17) kısıtı

tüm cihazların operasyonlarını tamamlamaları için harcamaları gereken enerjiyi harcamalarını sağlarken, (5.18) kısıtı da cihazların çalışmaları esnasında harcadıkları aktif ve reaktif güç oranının sabit (o cihazın güç faktörü) olmasını sağlar. Benzer şekilde, elektrik ile birlikte su ve doğalgaz kullanan cihazlar için, (5.19) ve (5.20) kısıtları harcanan elektrik ile harcanan su veya doğalgazın orantılı olmasını sağlar. (5.21) ve (5.22) kısıtları da ardışık cihazların (Örneğin; çamaşır makinesi ve kurutma makinesi) çalışma zamanlarının birbirlerinden ayrık ve ardışık olmasını sağlar. (5.23) - (5.27) kısıtları aktif güç, reaktif güç, gaz ve su kullanımlarının denge kısıtlarıdır. (5.28) - (5.30) kısıtları ise, bataryanın, kapasitörün ve ev içinde var olduğu varsayılan su deposunun gün içerisinde limitlerini aşmamasını sağlayan kısıtlardır. Yine (5.31) - (5.39) kısıtları, batarya, kapasitör ve su deposunun dolma-boşalma kısıtları ve günün başlangıcında ve sonunda aynı doluluk oranlarına sahip olma kısıtlarıdır. (5.40) hanenin maksimum çekebileceği anlık güç miktarını kısıtlamaktadır.

EWG:

$$\text{minimize } Z \quad (5.1)$$

$$\text{subject to } Z \geq \gamma_i \cdot \frac{G_i - G_i^*}{G_i^*}, \quad \forall i \quad (5.2)$$

$$G_1 = \sum_{t=1}^T c_t^p \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot p_{s,t}^c \quad (5.3)$$

$$G_2 = \sum_{t=1}^T c^q \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot q_{s,t}^c \quad (5.4)$$

$$G_3 = \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot (d_{s,t}^1 + d_{s,t}^2) \quad (5.5)$$

$$d_{s,t}^1 - d_{s,t}^2 = p_{s,t}^c - p_{s,(t-1)}^c \quad \forall s, t : t \geq 2 \quad (5.6)$$

$$G_4 = \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot (d_{s,t}^3 + d_{s,t}^4) \quad (5.7)$$

$$d_{s,t}^3 - d_{s,t}^4 = q_{s,t}^c - q_{s,(t-1)}^c \quad \forall s, t : t \geq 2 \quad (5.8)$$

$$G_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^A \phi_{a,t} \cdot \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot p_{a,s,t}^{ca} \quad (5.9)$$

$$G_6 = \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot (d_{s,t}^5 + d_{s,t}^6) \quad (5.10)$$

$$d_{s,t}^5 - d_{s,t}^6 = g_{s,t}^c - g_{s,(t-1)}^c \quad \forall s, t : t \geq 2 \quad (5.11)$$

$$G_7 = \sum_{t=2}^T \sum_{s=1}^S \rho_s \cdot (d_{s,t}^7 + d_{s,t}^8) \quad (5.12)$$

$$d_{s,t}^7 - d_{s,t}^8 = w_{s,t}^c - w_{s,(t-1)}^c \quad \forall s, t : t \geq 2 \quad (5.13)$$

$$p_{a,s,t}^{ca} = 0, \quad \forall a, s, \forall t \notin [\alpha_a, \beta_a] \quad (5.14)$$

$$p_{a,s,t}^{ca} \leq P_a^{max}, \quad \forall a, s, t \quad (5.15)$$

$$p_{a,s,t}^{ca} = y_{a,s,t} \cdot P_a^{max}, \quad \forall s, t, \forall a \in A^{pns} \quad (5.16)$$

$$\Delta T \cdot \sum_{t=1}^T p_{a,s,t}^{ca} = E_a, \quad \forall a, s \quad (5.17)$$

$$q_{a,s,t}^{ca} = \tan(\arccos(PF_a)) \cdot p_{a,s,t}^{ca}, \quad \forall a, s, t \quad (5.18)$$

$$g_{a,s,t}^{ca} = GP_a \cdot p_{a,s,t}^{ca}, \quad \forall a, s, t \quad (5.19)$$

$$w_{a,s,t}^{ca} = WP_a \cdot p_{a,s,t}^{ca}, \quad \forall a, s, t \quad (5.20)$$

$$p_{a',s,t}^{ca} \leq z_{a',s,t} \cdot P_{a'}^{max}, \quad \forall s, a' \prec a'' \quad (5.21)$$

$$E_{a'} \cdot z_{a',s,\tau} \leq \sum_{t=1}^{\tau} p_{a',s,t}^{ca}, \quad \forall s, \tau, a' \quad (5.22)$$

$$p_{s,t}^c = \sum_{a=1}^A p_{a,s,t}^{ca} + p_{s,t}^{cb} / \eta^c - p_{s,t}^{db} \cdot \eta^d - v_{s,t}, \forall s, t \quad (5.23)$$

$$v_{s,t} \leq P_{s,t}^g, \quad \forall s, t \quad (5.24)$$

$$q_{s,t}^c = \sum_{a=1}^A q_{a,s,t}^{ca} + q_{s,t}^{cb} / \eta^{cq} - q_{s,t}^{db} \cdot \eta^{dq}, \quad \forall s, t \quad (5.25)$$

$$g_{s,t}^c = \sum_{a=1}^A g_{a,s,t}^{ca}, \quad \forall s, t \quad (5.26)$$

$$w_{s,t}^c = \sum_{a=1}^A w_{a,s,t}^{ca} + w_{s,t}^{ct} / \eta^{cw} - w_{s,t}^{dt} \cdot \eta^{dw}, \quad \forall s, t \quad (5.27)$$

$$0 \leq E^{bi} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{cb} - \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot p_{s,t}^{db} \leq E^{bmax}, \forall s, \tau \quad (5.28)$$

$$0 \leq E^{ci} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot q_{s,t}^{cb} - \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot q_{s,t}^{db} \leq E^{cmax}, \forall s, \tau \quad (5.29)$$

$$0 \leq W^{ti} + \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot w_{s,t}^{ct} - \sum_{t=1}^{\tau} \Delta T \cdot w_{s,t}^{dt} \leq W^{tmax}, \forall s, \tau \quad (5.30)$$

$$p_{s,t}^{cb} \leq R^{cbmax}, \quad \forall s,t \quad (5.31)$$

$$p_{s,t}^{db} \leq R^{dbmax}, \quad \forall s,t \quad (5.32)$$

$$\sum_{t=1}^T p_{s,t}^{cb} = \sum_{t=1}^T p_{s,t}^{db}, \quad \forall s \quad (5.33)$$

$$q_{s,t}^{cc} \leq R^{ccmax}, \quad \forall s,t \quad (5.34)$$

$$q_{s,t}^{dc} \leq R^{dcmax}, \quad \forall s,t \quad (5.35)$$

$$\sum_{t=1}^T q_{s,t}^{cb} = \sum_{t=1}^T q_{s,t}^{db}, \quad \forall s \quad (5.36)$$

$$w_{s,t}^{ct} \leq R^{ctmax}, \quad \forall s,t \quad (5.37)$$

$$w_{s,t}^{dt} \leq R^{dtmax}, \quad \forall s,t \quad (5.38)$$

$$\sum_{t=1}^T w_{s,t}^{ct} = \sum_{t=1}^T w_{s,t}^{dt}, \quad \forall s \quad (5.39)$$

$$p_{s,t}^c \leq P^{max}, \quad \forall s,t \quad (5.40)$$

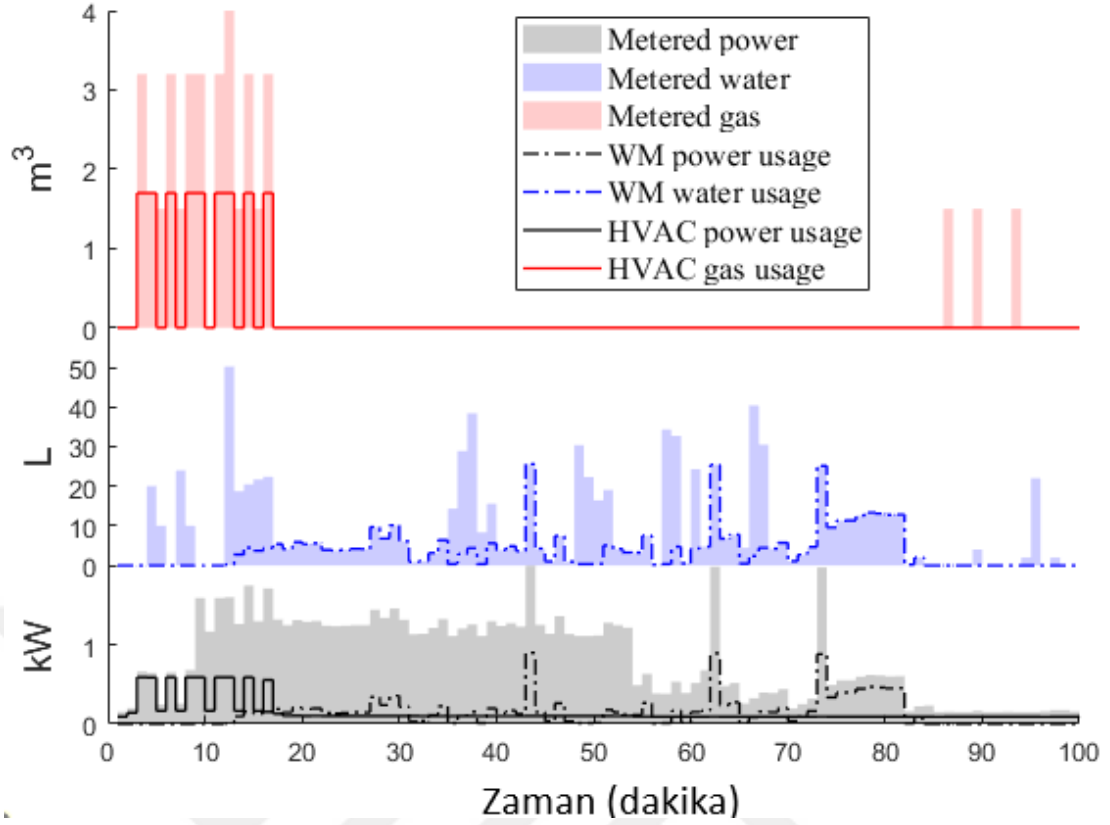
$$\text{tüm değişkenler} \geq 0 \quad (5.41)$$

$$y_{a,s,t}, z_{a,s,t} \in \{0, 1\} \quad (5.42)$$

5.6.2 Yük şekillemesiz durum (Vaka 0)

İlk durumda, hiçbir yük şekilleme metodu uygulanmadığında örnek iki cihazın (HVAC ve çamaşır makinesi) elektrik, su ve gaz kullanımları ile akıllı sayaçlarca ölçülen elektrik, su ve gaz kullanımları arasındaki ilişki incelenmiştir. Diğer durumlar ile nesnel bir biçimde karşılaştırma yapılabilmesi için, bahsi geçen değerler arasındaki karşılıklı bilgi (mutual information) hesaplanmıştır.

Şekil 5.4'te de görüldüğü gibi, HVAC'in gaz kullanımı ve elektrik kullanımı arasında, ve çamaşır makinesinin su kullanımı ve elektrik kullanımı arasında benzerlikler göze çarpmaktadır. Ayrıca, ölçülen elektrik, gaz ve su verisinde bu cihazların izleri görülebilmektedir. Karşılıklı bilgi değerlerine bakıldığında, HVAC'in harcadığı elektrik ile ölçülen elektrik arasındaki karşılıklı bilgi 1.91 *bit*, HVAC'in harcadığı doğalgaz ile ölçülen doğalgaz arasındaki karşılıklı bilgi ise 1.61 *bit* olarak ölçülmüştür. Çamaşır makinesinin elektrik kullanımı ile ölçülen elektrik kullanımı arasındaki karşılıklı bilgi 0.59 *bit* iken, su kullanımı ile ölçülen su kullanımı arasındaki karşılıklı bilgi 0.56 *bit* olarak hesaplanmıştır.

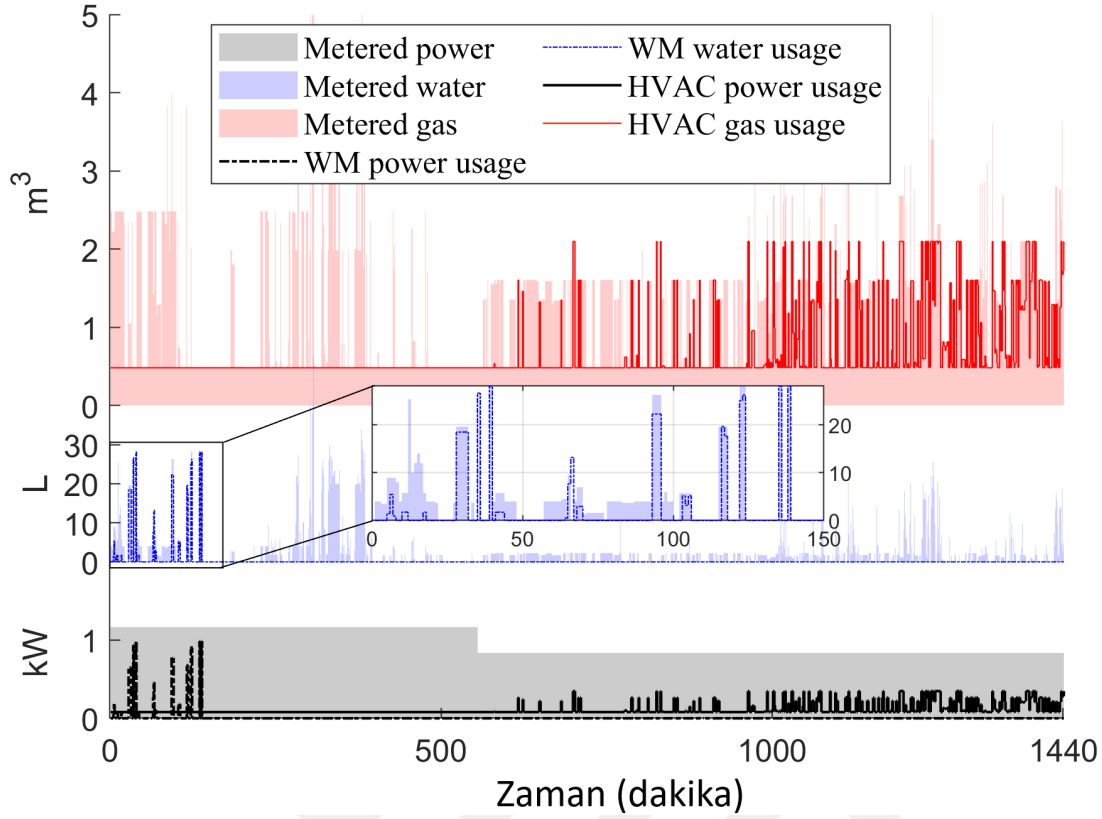


Şekil 5.4: Akıllı ölçülen dakikalık elektrik, su ve doğalgaz verileri ile HVAC ve çamaşır makinesi cihazlarının elektrik, su ve doğalgaz kullanımları.

5.6.3 Sadece elektrik yükü şekilleme (Vaka 1)

Matematiksel model bölümünde verilen model kullanılarak, su ve doğalgaz mahremiyetinin katsayısı 0 olacak şekilde ($\gamma_6 = \gamma_7 = 0$) optimizasyon problemi çözdürüldüğünde sonuçlar Şekil 5.5'teki gibi alınmıştır. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, HVAC'in ve çamaşır makinesinin elektrik kullanımları tamamen gizlenmiş olsa da, su ve doğalgaz ölçüm verisi ile bu cihazların kullandıkları su ve doğalgaz arasındaki korelasyon hala devam etmektedir.

Karşılıklı bilgi verilerine bakıldığında da, ölçülen elektrik ile cihaz kullanımı arasındaki karşılıklı bilginin azaldığı görülmektedir. Ölçülen elektrik ile HVAC'in kullandığı elektrik arasındaki karşılıklı bilgi 0.23 *bit*'e düşerken, çamaşır makinesinin kullandığı elektrik ile olan karşılıklı bilgi de 0.03 *bit*'e düşmüştür. Ancak, HVAC'in kullandığı doğalgaz ile ölçülen doğalgaz arasındaki bilgi 1.82 *bit* olarak, çamaşır makinesinin kullandığı su ile ölçülen su arasındaki bilgi 0.49 *bit* olarak ölçülmüştür. Bu da halen doğalgaz ve su ölçümlerinin mahremiyeti etkileyecek şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



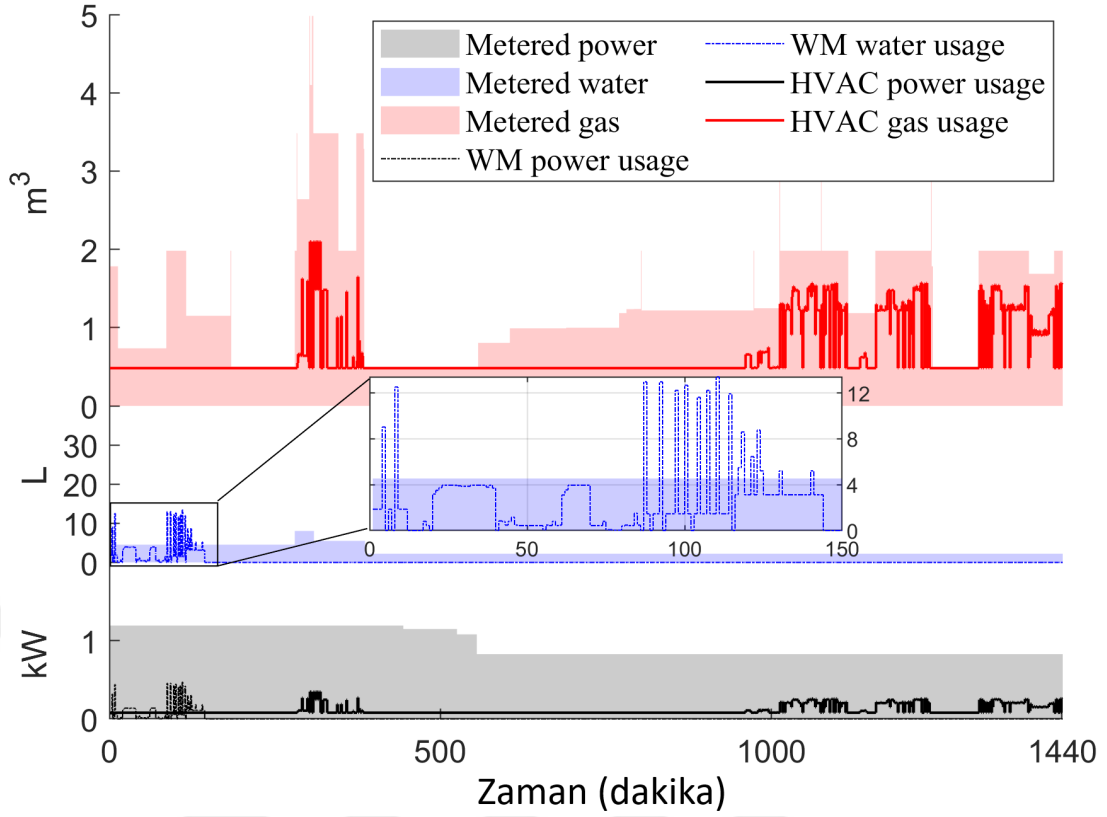
Şekil 5.5: Sadece ölçülen elektrik şekillendiğindeki elektrik, su ve doğalgaz verileri ile HVAC ve çamaşır makinesi cihazlarının elektrik, su ve doğalgaz kullanımları.

5.6.4 Elektrik, su ve doğalgazın aynı anda şekillenmesi (Vaka 2)

Son durum olarak, tüm kaynakların mahremiyetlerinin katsayıları 1 olacak şekilde ($\gamma_i = 1, \forall i$) optimizasyon problemi (EWG) çözdürülmüş, ve sonuçlar Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.6'dan anlaşılacağı üzere, HVAC'in ve çamaşır makinesinin artık sadece elektrik kullanımları değil, su ve doğalgaz kullanımları da akıllı sayaçlardan gizlenmiştir. Matematiksel modelde bir doğalgaz deposu tanımlanmadığı için, doğalgazın gizlenme performansı suyunki kadar yüksek olmamıştır. Ancak yine de, HVAC'in açılma-kapanma olayları akıllı sayaç tarafından gözlenememektedir.

Sayısal olarak bakıldığında da, bu bütüncül anlayışın cihazların tüm bilgilerini saklamada etkili olduğu görülebilmektedir. HVAC cihazı için, elektrik ve doğalgaz karşılıklı bilgileri 0.49 *bit* ve 0.58 *bit* olarak hesaplanmıştır. Vaka 0'a göre (1.91 *bit* ve 1.61 *bit*), karşılıklı bilgi verilerinde gözle görülür bir düşüş elde edilmiştir. Çamaşır makinesi için de benzer bir performans elde edilmiştir. Vaka 0'da 0.59 *bit* ve 0.56 *bit* olan karşılıklı bilgi sayıları, bu durumda 0.17 *bit* ve 0.01 *bit* olarak elde edilmiştir.

Vaka 2'yi vaka 1 ile karşılaştırdığımızda; vaka 1'de elektrik ölçüm verileri ile cihaz elektrik kullanımları arasındaki karşılıklı bilginin vaka 2'ye göre biraz daha düşük



Şekil 5.6: Tüm kaynaklar şekillendiğindeki elektrik, su ve doğalgaz verileri ile HVAC ve çamaşır makinesi cihazlarının elektrik, su ve doğalgaz kullanımları.

olduğu gözlemlenmektedir. HVAC elektrik karşılıklı bilgisi vaka 1’de 0.23 *bit* iken vaka 2’de 0.49 *bit* olarak hesaplanmıştır. Yine çamaşır makinesinin elektrik karşılıklı bilgisi vaka 1’de 0.03 *bit* iken, vaka 2’de 0.17 *bit* olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, bu farklı kaynakların mahremiyetini sağlayan amaç fonksiyonlarının birbirleri ile çatışan amaç fonksiyonları olduğunu göstermektedir.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar, bütüncül mahremiyet koruma anlayışının ne kadar gerekli olduğunu göstermektedir. Akıllı su ve doğalgaz ölçümü konusundaki güncel trendler, akıllı elektrik ölçümünün 10 yıl önceki hali ile benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla, bu kaynakların ölçümünde ortaya çıkan mahremiyet sorunları ve bunların çözümleri ile ilgili önümüzdeki 10 yılda bir çok çalışma yapılması beklenmektedir. Ayrıca, yeni akıllı ölçülen kaynakların probleme eklenmesi problemi daha zorlu hale getirmekte ve bu bölümde anlatıldığı gibi bütüncül teknikleri zorunlu hale getirmektedir. Bu bölümde anlatılan bütüncül mahremiyet konseptinin ileride yapılacak bir çok araştırmaya ilham olması beklenmektedir.

5.7 Sonuç ve Tartışma

Bu bölümde sunulmuş olan çalışma, literatürde henüz adreslenmemiş bir problemi ortaya atan bir çalışmadır. Bahsi geçen problem, akıllı sayaçların elektriğin yanında başka kaynaklar için de yaygınlaşmaya başlıyor olmasıdır. Bu konu ile ilgili yapılan literatür taraması, özellikle su ve doğalgazın ileride daha sık ve daha isabetli ölçümler alıp bu ölçümleri servis sağlayıcıya sunacağını göstermektedir. Halihazırda bu kaynakların sınırlı olduğu (Hindistan, Yeni Zelanda, Güney Afrika gibi) ülkelerde akıllı su ve akıllı doğalgaz sayaçları kurulmaya başlanmıştır. Akıllı ölçüm sayesinde bu kaynakların kullanımının daha iyi analiz edilmesi ve böylece bu kaynakların daha etkin kullanılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, akıllı ölçüm ile bu kaynaklarda meydana gelen sızıntı, kayıp ya da kaçak kullanımın da önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Ancak, yine literatür araştırmaları göstermektedir ki, halihazırdaki Girişimsel Olmayan Cihaz Yüğü İzleme (NIALM) metotları, su ve doğalgaz için de kullanılabilmekte ve böylece su ve doğalgaz kullanımları cihaz ya da son kullanım tiplerine göre ayrıştırılabilmektedir. Bu durum aynı akıllı elektrik ölçümünde olduğu gibi kullanıcıların mahremiyetine karşı bir tehdit oluşturmaktadır. Ayrıca, diğer kaynakların da akıllı ölçümü elektriğin yanında bu kaynaklardan birini daha kullanan cihazlar için elektrik yükünü şekillenmenin etkisini sınırlamaktadır. Bu yüzden; elektriğin, suyun, doğalgazın ve diğer akıllı ölçüme tabi kaynakların mahremiyet açısından bütüncül bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada, daha önceki bölümlerde elde ettiğimiz talep katılımı ve yük şekilleme tecrübesi; elektriğin, suyun ve doğalgazın birlikte şekillendirildiği bir matematiksel model oluşturmak için kullanılmıştır. Böylece, ölçülen elektriğin mümkün olan en iyi şekilde şekillenmesi durumunda su ve gaz kullanımının nasıl değiştiği, ve bu üç kaynaktaki karşılıklı bilgi miktarının sadece elektriğin şekillendiği durumda ve üç kaynağın da şekillendiği durumda nasıl değiştiği gözlemlenebilmektedir. Bu çalışmanın literatüre olan katkılarını özetlemek gerekirse:

- Bu çalışma literatürde akıllı su ve akıllı doğalgaz ölçümünde mahremiyeti konu alan ilk çalışmadır.
- Bu çalışmada, talep katılımı çerçevesinde kullanıcının maliyetinin ve konforunun yanında tüm akıllı ölçüme tabi kaynaklarının mahremiyetini optimize edebileceği bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu modelde gerçekçi batarya, cihaz ve yenilenebilir enerji modelleri kullanılmıştır.
- Öne sürülen model ile yapılan vaka analizleri sonucunda, akıllı ölçüme tabi olan kaynakların mahremiyetinin, birden fazla kaynağı aynı anda kullanan cihazlar-

dan dolayı, eşzamanlı olarak sağlanması gerektiği (bütüncül mahremiyet) ortaya konmuştur.

Elektrik, su ve doğalgaz gibi doğal kaynakların yanı sıra, son zamanlarda evlerde en az bunlar kadar sık kullanılmaya başlanan bir hizmet de internettir. İnternet trafiği miktarı ile evde kullanılan cihazların çalışmaları arasında doğrudan bir korelasyon bulunmasa da, internet trafiği de kullanıcı mahremiyeti açısından çeşitli problemler yaratma potansiyeline sahiptir:

- İnternet trafiğinin kendisi, akıllı sayaç verilerinde olduğu gibi hane halkı ile ilgili mahrem bilgilerin çıkarımlarının yapılmasında kullanılabilir. Örneğin, internet trafiği dinlenerek (sniffing) evde kaç kişinin yaşadığı (MAC adreslerinden), evin hangi saatlerde boş olduğu (HTTP trafiğinden) gibi mahrem veriler elde edilebilir.
- Nesnelerin interneti (internet of things - IoT) özelliğine sahip bazı cihazlar internet üzerinden haberleşirken özel protokoller kullandığı için, bu cihazların kullandıkları protokoller dinlenen internet paketleri arasından filtrelenerek bu cihazların kullanımı ortaya çıkarılabilir. Ya da, bu IoT cihazların internet trafiği elektrik, su ve doğalgaz ölçümleri ile ortaklaşa analiz edilerek ölçülen elektrik, su veya doğalgaz tüketiminin belirli bir cihaza ait olup olmadığı çıkarımı yapılabilir, ve NIALM metotlarının etkinliği artırılabilir.

Bahsi geçen nedenlerden dolayı, bütüncül bir mahremiyet koruma stratejisi internet trafiğini de mahremiyet açısından ele almalıdır. İnternet trafiğinin yarattığı tehditi bertaraf etmek için, kimlik gizleme (spoofing) yöntemleri kullanılarak sahte IP trafiği türetilir. Böylece, gerçek IoT cihazlarının internet trafiği gizlenebilir, ya da evde kimse yokken bile evde internet kullanıcısı varmış gibi gösterilebilir. Bu yöntemler bu tezin konusu olan yük şekilleme ile doğrudan alakalı olmadığı için bu fikirler gelecekte yapılabilecek bir araştırma konusu olarak sunulmuştur.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, öncelikle akıllı şebekelerde yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma stratejileri birleşik bir stokastik optimizasyon çerçevesi altında optimize edilerek ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Daha sonra, yük şekilleme tabanlı mahremiyet korumanın servis sağlayıcıların amaçlarını nasıl etkiledikleri yine ortaklaşa bir optimizasyon problemi çerçevesinde incelenmiş ve analiz edilmiştir. Sonrasında, talep katılımı kapsamında aktif gücün yanında reaktif gücün de şekillenmesinin kullanıcı mahremiyetini nasıl geliştirdiği yine bir matematiksel model oluşturulup optimize edilerek gösterilmiştir. Son olarak da, elektriğin yanında su ve doğalgaz gibi akıllı ölçüme tabi kaynakların da şekillenmesi gerektiği, ve hatta mahremiyetin sağlanması için bu kaynakların bütüncül bir anlayışla eşzamanlı olarak şekillenmesinin gerektiği, hem elektrik kullanımını hem su kullanımını hem de doğalgaz kullanımını çizelgeleyebilen bir matematiksel model kullanılarak gösterilmiştir.

İlk çalışmada, literatürdeki mahremiyet koruma çalışmalarının karşılaştırma amaçlı sıkça atıfta bulunduğu buluşsal yük şekilleme metotları ele alınmıştır. Bu metotlar, ortaklaşa bir stokastik programlama çerçevesinde modellenmiştir. Metotların optimal performansları çeşitli durumlar için elde edilmiş ve bu performanslar birbirleri ile farklı metrikler üzerinden karşılaştırılmıştır. Oluşturulan stokastik modelde, hane içerisindeki yenilenebilir enerji kaynağı, batarya ve farklı tipteki cihazlar da dikkate alınarak bu metotların mümkün olduğunca gerçekçi bir kurgu altında karşılaştırılmaları sağlanmıştır. Halihazırda talep katılımı kapsamında var olan maliyeti düşürme ve konforu artırma gibi kullanıcıya ait diğer amaç fonksiyonları da göz önünde bulundurulmuştur. Matematiksel modelin doğrusallığı korunarak model simpleks gibi metotlar ile çözülebilecek şekilde tasarlanmıştır. Varsayılan hanenin yenilenebilir enerji kaynağının üreteceği elektrikteki belirsizlikler stokastik programlama tekniği ile modele eklenmiştir. Yenilenebilir enerjinin üreteceği enerji iki doruklu olasılık dağılımı kullanılarak modellenmiş, problemin hem gerçekçi hem de çözülebilir boyutta olması için, sınırlı sayıda senaryo ve bu senaryolara karşılık gelen olasılıklar Monte Carlo simülasyonu ve k-ortalamlar kümesi yöntemleri ile elde edilmiştir. Gün içerisinde değişen elektrik fiyat verileri ABD'nin New York eyaletinin servis sağlayıcısının verilerinden yola çıkılarak oluşturulmuş ve böylece modelin gerçekçiliği korunmuştur. Hane içi bataryanın şarj/deşarj verimliliğinin %100'ün altında olduğu varsayılarak bataryanın daha gerçekçi modellenmesi sağlanmıştır. Hane içerisinde çalışan cihazlar

zaman-kaydırılabilir, zaman ve güç kaydırılabilir ve kaydırılmaz cihazlar olarak üçe ayrılmış ve her bir cihazın kısıtları o cihazın çizelgelenebilme özelliğine göre ayarlanmıştır. Bu da yine sistem modelinin gerçekçi bir model olmasını sağlamıştır.

Oluşturulan bu birleşik stokastik optimizasyon çerçevesi altında, literatürdeki popüler buluşsal metotlar ve bu metotlardan esinlenen benzer teknikler matematiksel olarak modellenerek hepsinin aynı çerçeve altında optimize edilebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, kullanıcı maliyeti ve kullanıcı konforu amaç fonksiyonları da tanımlanarak çok amaçlı bir problem elde edilmiş, böylece bu mahremiyet koruma stratejilerinin kullanıcının diğer amaç fonksiyonlarını da nasıl etkilediği gözlenmiştir. Maliyet, konfor ve mahremiyet amaç fonksiyonları doğrusal bir şekilde modellenerek optimizasyon çerçevesinin doğrusallığının korunması sağlanmıştır. Bu üç amaç fonksiyonunu ortaklaşa optimize edebilmek için, minimaks amaç programlama tekniği kullanılmış, böylece elde edilen sonuçların Pareto etkin olması sağlanmıştır. Öne sürülen model, GAMS tümleşik geliştirme ortamı kullanılarak kodlanmış, ve CPLEX çözücü ile çözdürülmüştür. Sonuçların analizi için MATLAB tümleşik geliştirme ortamı kullanılmıştır. Literatürdeki bu tekniklerin mahremiyet performanslarını adil bir biçimde karşılaştırabilmek için, ilgili çalışmalarda kullanılan mahremiyet metrikleri burada da kullanılmıştır. Değişiklik Sayısı, Determinasyon Katsayısı ve Göreceli Entropi metriklerinin yanı sıra, metotların performansları bu üç metriğin birleşiminden oluşan Birleşik Mahremiyet Ölçütü'ne göre de karşılaştırılmıştır. Metotlar; kullanıcı maliyetinin, kullanıcı konforunun ve kullanıcı mahremiyetinin eşit ağırlığa sahip olduğu durumun yanında, bu üç amaç fonksiyonunun birbirlerine göre daha fazla önceliklendirildikleri durumlar için de karşılaştırılmış, ve böylece bu alt amaç fonksiyonlarının birbirlerini nasıl etkiledikleri de gözlemlenmiştir. Mahremiyet performansı açısından En İyi Gayret, Katlanılır Sapma-2, Girişimsel Olmayan Yük Düzleştirme ve Basamaklandırma metotlarının diğerlerine göre daha üstün oldukları gözlemlenmiştir. Bu metotlar arasında ise modelinin sadeliği ve dolayısıyla çözüm süresinin kısalığı ile En İyi Gayret metodu öne çıkmıştır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynağının kapasitesinin yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma metotlarının performansını nasıl etkilediği de incelenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynağının kapasitesi arttıkça, metotların performansının arttığı, ve normalde düşük performans gösteren metotlar için bu performans artışının daha kayda değer olduğu gözlemlenmiştir.

İkinci çalışmada, talep katılımı kapsamında hanelerin maliyetlerinin ve konforlarının yanı sıra mahremiyetlerini de ele almalarının, servis sağlayıcının amaçlarını nasıl etkilediği ele alınmıştır. Bunun için, bir önceki çalışmada varsayılan 1 ev yerine $H = 100$ evin olduğu bir mikro şebeke varsayılmıştır. Ayrıca, bu mikro şebekeye elektrik sağlayan bir servis sağlayıcı ve hem servis sağlayıcının hem de kullanıcıların amaç fonksiyonlarını dikkate alan bir talep toptancısının var olduğu farz edilmiştir. Bu sistem

modeli altında, kullanıcının maliyet, konfor ve mahremiyet amaçları ile servis sağlayıcının tepe güç talebini düşürme ve gün içerisinde talepte yaşanan değişimi minimize etme amaç fonksiyonları ortaklaşa bir optimizasyon çerçevesi altında modellenmiştir. Bir önceki çalışmada olduğu gibi, burada da yenilenebilir enerji kaynağındaki belirsizlikler stokastik optimizasyon ile modellenmiştir. Zaman-kaydırılabilir, zaman ve güç kaydırılabilir ve kaydırılmaz cihazlar ile şarj/deşarj verimliliği %100'ün altında olan hane içi bataryalar yine bu çalışmada da modele eklenmiştir. Modelin gerçekçiliğini artırmak için, tüm evler tek tip olacak şekilde modellenmemiş, evler büyük, orta ve küçük olarak üç tipte modellenmiştir. Büyük, orta ve küçük evlerdeki cihaz sayıları ve batarya, şarjlı elektrikli araba, yenilenebilir enerji kaynağı gibi imkanlar farklılık gösterecek şekilde dizayn edilmiştir. Yine gerçekçiliği artırmak için, her bir evin cihaz çalışma saatleri rastgele düzgün dağılımlı sayılar kullanılarak rastgeleleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, ardışık çalışması gereken cihazlar (Örneğin; çamaşır makinesi ve kurutma makinesi) da göz önünde bulundurulmuş, modelde bu tarz cihazlar birbirlerinden ayrı zamanlarda çalışacak şekilde modellenmiştir.

Daha önce açıklanmış olan mikro şebeke göz önüne alınarak oluşturulan bu optimizasyon modeli; $H = 100$ ev, $S = 10$ senaryo, ev başına ortalama $A = 19$ cihaz, ve gün içerisinde 5 dakika uzunluğundaki $T = 288$ zaman aralığı için çözdürülmüştür. Model yine GAMS ve MATLAB tümleşik geliştirme ortamları kullanılarak kodlanmış ve modelin çözümü için CPLEX kütüphanesi kullanılmıştır. Modeldeki 5 amaç fonksiyonunun adil bir biçimde önceliklendirilebilmesi için, bu çalışmada da minimaks amaç programlama tekniği benimsenmiştir. Bunun yapılabilmesi için problem temel problem (TP) ve ana problem (AP) olarak ikiye ayrılmış, TP her bir amaç fonksiyonu için ayrı ayrı çözümlenerek tekil optimal değerler elde edilmiş, elde edilen bu değerler AP'ye parametre olarak verilmiştir. Bahsi geçen 5 amaç fonksiyonunun önceliklendirilmelerinin birbirlerini nasıl etkilediğini analiz edebilmek için, tüm bu alt amaç fonksiyonlarının önceliklerinin sırasıyla alçak ($\gamma_k = 1$) ve yüksek ($\gamma_k = 10$) olduğu toplam 32 kombinasyon için AP çözdürülmüş ve sonuçlar bir tablo halinde verilmiştir. Ayrıca, diğer tüm alt amaç fonksiyonlarının önceliklerinin 1 olduğu durumda ($\gamma_k = 1$) her bir alt amaç fonksiyonunun önceliği arttıkça diğerlerinin nasıl etkilendiğini gösteren sonuçlar alınmış ve bu sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuçlar bu 5 amaç fonksiyonu arasındaki girift ilişkiler ile ilgili çok ilginç içgörüler elde edilmesini sağlamıştır. Bu içgörülerden biri, En İyi Gayret tekniği ile mahremiyeti optimize etmeye çalışmanın servis sağlayıcıya ait alt amaç fonksiyonlarında da nispeten iyileşme sağladığıdır. Bunun nedeni, optimal sonuçta her evin kendi elektrik yükünü düzlemeye çalışması, sonuç olarak da toplam elektrik talebindeki değişim ve tepe değerinde düşüş olmasıdır. Bir diğer sonuç da diğer alt amaç fonksiyonlarından nispeten küçük bir taviz ile, kullanıcı mahremiyetinde ciddi kazançlar elde edilebildiğidir. Son olarak,

bu çalışmadaki analizlerden servis sağlayıcının sadece tepe değeri düşürecek şekilde değil, hem tepe değerini hem de değişimi düşürecek şekilde önceliklendirme yapması gerektiği sonucu elde edilmiştir. Bu bölümdeki çalışmada farklı tipteki evler için mahremiyetin önceliklendirilmesinin diğer alt amaç fonksiyonlarını nasıl etkilediği de incelenmiştir. Sonuçlar büyük tip evlerin mahremiyeti önemsemesinin orta ve küçük tip evlere göre mahremiyet açısından daha iyi sonuçlar gösterdiğini, ancak evdeki cihaz sayısının fazlalığından dolayı büyük tip evlerin maliyet ve konfor açısından daha dezavantajlı sonuçlar elde ettiklerini göstermiştir.

Üçüncü çalışmada, sadece aktif gücün değil, reaktif gücün de çizelgeleneceği bir akıllı ev modeli öne sürülmüştür. Bu evde önceki çalışmalardan farklı olarak, hane içi bataryanın yanısıra bir de hane içi kapasitörün varlığı farzedilmiştir. Bu hane içi kapasitörün yanında, hem aktif hem de reaktif güç harcayan çizelgelenebilir cihazlardan yararlanılarak ölçülen aktif gücün yanında ölçülen reaktif gücün de cihaz izlerinden arındırılması hedeflenmiştir. İlk çalışmadaki gibi tek bir ev üzerinden matematiksel model oluşturulmuştur. Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada çeşitli cihazların hem aktif hem reaktif güç kullanımlarının olduğu Ampds2 veri setinden faydalanılmıştır. Güneş enerjisi modeli ve cihaz tipleri daha önceki çalışmalardaki gibi modellenmiştir. Bu çalışmadaki hane içi kapasitör, bataryaya benzer bir biçimde %100 verimli olmayacak (ancak yine de bataryadan daha verimli olacak) şekilde modellenmiştir. Kullanıcının aktif güç kullanım maliyetinin yanında reaktif güç kullanımının da minimize edildiği bu çalışmada, aktif ve reaktif güç tabanlı mahremiyet amaç fonksiyonları ayrı ayrı tanımlanmış, böylece vaka analizi sırasında yalnızca aktif gücün, yalnızca reaktif gücün ve her ikisinin birden şekillendiği durumda mahremiyet, maliyet ve konforun nasıl değiştii incelenmiştir.

Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, alt amaç fonksiyonlarına farklı ağırlıkların verildiği 6 durum tanımlanmış, ve bu 6 durum için mahremiyet performansları incelenmiştir. Mahremiyet metriği olarak karşılıklı bilginin (mutual information) kullanıldığı bu çalışmada, hem ölçülen (aktif/reaktif) yük ile cihazlarca kullanılan toplam (aktif/reaktif) yük arasındaki karşılıklı bilgi, hem de yine akıllı sayaç tarafından ölçülen (aktif/reaktif) yük ile her bir cihazın çektiği (aktif/reaktif) yük arasındaki karşılıklı bilgi her bir durum için hesaplanmıştır. Optimizasyon problemini kodlama ve çözümü için GAMS yazılımının ve sonuçların analizi için MATLAB yazılımının kullanıldığı bu çalışmada, sadece aktif veya sadece reaktif yükü şekillenmenin mahremiyet açısından yetersiz olduğu, her iki yükün de eşzamanlı olarak şekillenmesi gerektiği gösterilmiştir. Aktif ve reaktif yükü aynı anda şekillenmenin, bu yüklerin tekil olarak şekillendiği durumlara göre sızdırdığı karşılıklı bilginin en az %50 daha az olduğu gösterilmiştir. Mahremiyette elde edilen bu büyük gelişmenin, kullanıcı maliyetine ekstra yaklaşık %8 ve kullanıcı rahatsızlığına da ekstra yaklaşık %18 olarak yansıdığı sonucu elde

edilmiştir.

Dördüncü çalışma, küresel çaptaki gelişmelerin elektriğin yanında su ve doğalgaz gibi kaynakların da akıllı ölçümünü zorunlu kıldığı, ve akıllı ölçümü yapılan su ve doğalgaz verisinden de cihaz ve son kullanım verilerinin elde edilebildiği çalışmaların yayınlanması üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada elektriğin yanında diğer akıllı ölçüme tabi olan kaynakların da mahremiyetin korunması adına şekillenmesi gerektiğini göstermek için, bu kaynakların üçünü birden şekillendirecek bir birleşik matematiksel model oluşturulmuştur. Bir önceki çalışmadaki gibi hem aktif hem reaktif gücün de şekillendirildiği bu çalışmada, yine önceki çalışmalardaki gibi kullanıcı maliyeti ve kullanıcı konforu da göz önünde bulundurulmuştur. Minimaks amaç programlama kullanılarak, farklı alt amaç fonksiyonlarına sahip bu modelin Pareto etkin sonuçlar elde etmesi sağlanmıştır. Hane içi batarya ve kapasitörün yanı sıra bu çalışmada hane içinde bir su deposu olduğu varsayılmıştır. Böylece elektrikte olduğu gibi suda da depolama imkanı sağlanarak su kullanımı daha rahat şekillendirilebilmiştir. Doğalgaz için benzer bir tank varsayılabilir olsa da, güvenlik açısından her evde bir doğalgaz tankı olması gerçekçi bulunmamış ve doğalgaz tankı olduğu varsayılmamıştır. Oluşturulan matematiksel model ile, optimal durumda batarya, kapasitör, yenilenebilir enerji kaynağı, su tankı ve kaydırılabilir cihazlar kullanılarak elektrik su ve doğalgaz aynı anda şekillendirilmiştir.

Hiç yük şekillenmenin olmadığı, sadece elektrik yükünün şekillendiği ve tüm kaynakların eşzamanlı şekillendiği durumlardaki sonuçları incelemek için 3 vaka tanımlanmış, ve matematiksel model bu vakalarda tanımlı öncelik katsayıları ile (γ) çözdürülmüştür. Mahremiyeti ölçmek için metrik olarak yine karşılıklı bilginin (mutual information) kullanıldığı bu çalışmada, birden fazla kaynağı aynı anda kullanan örnek iki cihaz (çamaşır makinesi ve HVAC) seçilmiş; tanımlanmış olan 3 vaka için bu cihazların (elektrik, su ve doğalgaz) tüketimleri ile akıllı sayaçlar tarafından ölçülen elektrik, su ve doğalgaz tüketimi arasındaki karşılıklı bilgi miktarları hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, sadece elektriğin şekillendirildiği durumda (vaka 1) vaka 0'a göre ölçülen elektrik ile bu cihazların kullandığı elektrik arasındaki karşılıklı bilgide ciddi bir düşüş elde edilse bile; çamaşır makinesi için ölçülen su tüketiminde, HVAC için ise ölçülen doğalgaz tüketiminde vaka 0'dakine yakın yüksek karşılıklı bilgi tespit edilmiştir. Tüm kaynakların şekillendirildiği vaka 2'de ise, hem elektrik kullanımlarında hem de su ve doğalgaz kullanımlarında düşük karşılıklı bilgi elde edilmiştir. Bu 3 vakadaki optimal sonuçlar görsel olarak da incelendiğinde, sadece elektriği şekillenmenin bu tarz birden çok kaynağı aynı anda kullanan cihazlar için yeterli olmadığı, tüm kaynakların aynı anda şekillenmesi gerektiği görülmüştür.

Bu tezde yük şekilleme tabanlı mahremiyet koruma yaklaşımları ve bunun diğer amaç fonksiyonlarına olan etkileri çeşitli durumlar için ayrıntılı bir biçimde analiz edilirken,

bir yandan da bu tezde yapılan çalışmaları daha ileri götürebilecek potansiyel araştırma konuları kendiliğinden ortaya çıkmıştır. Tezin bölümleri içerisinde de bahsedilen bu konulardan ilki, yenilenebilir enerji kaynağının aktif gücü şekillenmenin yanında reaktif gücü de şekillenecek şekilde konfigüre edilmesidir. Bilindiği gibi, güneş enerjisi sistemleri doğru akım üretmekte ve bu doğru akım bir evirici aracılığıyla hane içinde kullanılabilir alternatif akıma çevrilmektedir. Halihazırda yönetmelikler yenilenebilir enerji kaynaklarının güç faktörünün 1 olmasını (reaktif gücünün 0 olmasını) zorunlu kılmaktadır. Ancak evirici çıkışındaki alternatif akımın fazı bir kontrolcü ile kontrol edilerek evdeki cihazlar tarafından harcanan reaktif güç tazmin edilebilir. Böylece, hem evin reaktif gücü gizlenebilir, hem de reaktif güç sıfırlanarak şebekenin verimliliği artırılabilir. Bir diğer potansiyel araştırma konusu da internet ve mahremiyet konusudur. Tez içerisinde de bahsedildiği gibi, internet trafiği de elektrik, su ve doğalgaz gibi ölçülebilir ve bu veriden çeşitli çıkarımlar yapılabilir. Bu nedenle, ideal bir mahremiyet koruma stratejisinin elektrik trafiğinin gözlenerek elde edilebilecek mahrem verileri de engellemesi gerekmektedir. Bu hane içerisinden sahte internet trafiği üretilerek yapılabileceği gibi, bunun için çok daha farklı teknikler de öne sürülebilir. Bu nedenle, bütüncül mahremiyet kapsamında internet trafiğinin de değerlendirilmesi ileride çalışılabilir konular arasında bulunmaktadır.

Gelecek çalışmalar için değerlendirilebilecek konular arasında, mahremiyeti korumanın uzun vadede uygulanabilirliği (feasibility) gösterilebilir. Bu tezdeki tüm analizler 24 saat çerçevesinde yapılmış olup, yük şekilleme ile mahremiyeti korumanın uzun vadeli planlaması (yatırım maliyeti, bataryaların ömrü vb.) göz önünde bulundurulmamıştır. Uzun vadede mahremiyeti korumanın maliyetini çalışmak, bu tezdekilere ek çıkarımlar yapılabilmesine olanak sağlayacaktır. Bir diğer gelecek çalışma konusu, kullanıcının ve servis sağlayıcının alt amaç fonksiyonlarının bilevel optimizasyon ile çözülmesi ve bu çalışmada bulunan Pareto etkin sonuçlara ne kadar yaklaşıldığının analiz edilmesidir. Bilevel optimizasyon, sistemde bir talep toptancısı olması gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, mahremiyetin ve konforun kendisi birer maliyet olarak modellenip talep katılımı problemi tek bir amaç altında çözdürülebilir. Böylece çok amaçlı optimizasyon problemi tek amaçlı bir problem gibi çözülebilir. Son olarak, gelecek çalışmalarda mahremiyeti isabetli bir şekilde temsil edecek bir ölçüt bulmak ve kullanıcıların mahrem olarak gördükleri bilginin tespit edilip sadece o bilgilerin saklanması sağlamak göz önünde bulundurulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ritchie, H.** (2014). Energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy>. Erişim tarihi: 11/05/2019.
- [2] **Group, C.** (2020). Smart grid. *CLP*. <https://www.clp.com.hk/en/about-clp/power-transmission-and-distribution/smart-grid>. Erişim tarihi: 15/06/2020.
- [3] **Kement, C. E.** (2019). Load shaping based privacy protection in smart grids: An overview. *Proceedings of 5th International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS)*.
- [4] **Kim, Y., Ngai, E. C.-H., Srivastava, M. B.** (2011). Cooperative state estimation for preserving privacy of user behaviors in smart grid. *2011 IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm)*. IEEE.
- [5] **Sankar, L., Rajagopalan, S. R., Mohajer, S., Poor, H. V.** (2013). Smart meter privacy: A theoretical framework. *IEEE Trans. Smart Grid*, 4(2), 837–846.
- [6] **Tonyali, S., Cakmak, O., Akkaya, K., Mahmoud, M. M., Guvenc, I.** (2015). Secure data obfuscation scheme to enable privacy-preserving state estimation in smart grid ami networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 709–719.
- [7] **Barbosa, P., Brito, A., Almeida, H., Clauß, S.** (2014). Lightweight privacy for smart metering data by adding noise. *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing*.
- [8] **Dwork, C.** (2008). Differential privacy: A survey of results. *International conference on theory and applications of models of computation*. Springer.
- [9] **Ács, G., Castelluccia, C.** (2011). I have a dream!(differentially private smart metering). *International Workshop on Information Hiding*. Springer.

- [10] **Backes, M., Meiser, S.** *Differentially Private Smart Metering with Battery Recharging*, pages 194–212. Springer Berlin Heidelberg, (2014).
- [11] **Cao, H., Liu, S., Guan, Z., Wu, L., Wang, T.** (2017). Achieving differential privacy of data disclosure from non-intrusive load monitoring in smart grid. *International Symposium on Cyberspace Safety and Security*. Springer.
- [12] **Lou, X., Tan, R., Yau, D. K., Cheng, P.** (2017). Cost of differential privacy in demand reporting for smart grid economic dispatch. *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE.
- [13] **Barbosa, P., Brito, A., Almeida, H.** (2016). A technique to provide differential privacy for appliance usage in smart metering. *Information Sciences*, 370, 355–367.
- [14] **Yang, Z., Cheng, P., Chen, J.** (2017). Differential-privacy preserving optimal power flow in smart grid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(15), 3853–3861.
- [15] **Zhang, Z., Qin, Z., Zhu, L., Weng, J., Ren, K.** (2016). Cost-friendly differential privacy for smart meters: Exploiting the dual roles of the noise. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(2), 619–626.
- [16] **Zhao, J., Jung, T., Wang, Y., Li, X.** (2014). Achieving differential privacy of data disclosure in the smart grid. *IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE.
- [17] **Eibl, G., Engel, D.** (2017). Differential privacy for real smart metering data. *Computer Science-Research and Development*, 32(1-2), 173–182.
- [18] **Pal, R., Hui, P., Prasanna, V.** (2018). Privacy engineering for the smart micro-grid. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 31(5), 965–980.
- [19] **Sarathy, R., Muralidhar, K.** (2010). Some additional insights on applying differential privacy for numeric data. *International Conference on Privacy in Statistical Databases*. Springer.
- [20] **Giaconi, G., Gunduz, D., Poor, H. V.** (2018). Privacy-aware smart metering: Progress and challenges. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(6), 59–78.

- [21] **Shi, E., Chan, T. H., Rieffel, E., Chow, R., Song, D.** (2011). Privacy-preserving aggregation of time-series data. *Proc. NDSS*, volume 2. Citeseer.
- [22] **Rivest, R. L., Adleman, L., Dertouzos, M. L.** (1978). On data banks and privacy homomorphisms. *Foundations of secure computation*, 4(11), 169–180.
- [23] **Gentry, C.** (2009). Fully homomorphic encryption using ideal lattices. *Proceedings of the forty-first annual ACM symposium on Theory of computing*.
- [24] **Bae, M., Kim, K., Kim, H.** (2016). Preserving privacy and efficiency in data communication and aggregation for ami network. *Journal of Network and Computer Applications*, 59, 333–344.
- [25] **Balli, M. F., Uludag, S., Selcuk, A. A., Tavli, B.** (2017). Distributed multi-unit privacy assured bidding (pab) for smart grid demand response programs. *IEEE Transactions on Smart grid*, 9(5), 4119–4127.
- [26] **Baloglu, U. B., Demir, Y.** (2018). Lightweight privacy-preserving data aggregation scheme for smart grid metering infrastructure protection. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 22, 16–24.
- [27] **Chun, H., Ren, K., Jiang, W.** (2018). Privacy-preserving power usage and supply control in smart grid. *Computers & Security*, 77, 709–719.
- [28] **Deng, P., Yang, L.** (2012). A secure and privacy-preserving communication scheme for advanced metering infrastructure. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. IEEE.
- [29] **Jo, H. J., Kim, I. S., Lee, D. H.** (2015). Efficient and privacy-preserving metering protocols for smart grid systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(3), 1732–1742.
- [30] **Li, F., Luo, B., Liu, P.** (2010). Secure information aggregation for smart grids using homomorphic encryption. *2010 first IEEE international conference on smart grid communications*. IEEE.
- [31] **Li, F., Luo, B.** (2012). Preserving data integrity for smart grid data aggregation. *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. IEEE.

- [32] **Bohli, J.-M., Sorge, C., Ugus, O.** (2010). A privacy model for smart metering. *2010 IEEE International Conference on Communications Workshops*. IEEE.
- [33] **Garcia, F. D., Jacobs, B.** (2010). Privacy-friendly energy-metering via homomorphic encryption. *International Workshop on Security and Trust Management*. Springer.
- [34] **Li, F., Luo, B., Liu, P.** (2011). Secure and privacy-preserving information aggregation for smart grids. *Int. J. Secur. Netw.*, 6(1), 28–39.
- [35] **Tonyali, S., Akkaya, K., Saputro, N., Uluagac, A. S., Nojournian, M.** (2018). Privacy-preserving protocols for secure and reliable data aggregation in iot-enabled smart metering systems. *Future Generation Computer Systems*, 78, 547–557.
- [36] **Tonyali, S., Munoz, R., Akkaya, K., Ozgur, U.** (2018). A realistic performance evaluation of privacy-preserving protocols for smart grid ami networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 119, 24–41.
- [37] **Saputro, N., Akkaya, K.** (2012). Performance evaluation of smart grid data aggregation via homomorphic encryption. *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE.
- [38] **Abdallah, A., Shen, X.** (2015). Lightweight security and privacy preserving scheme for smart grid customer-side networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(3), 1064–1074.
- [39] **Efthymiou, C., Kalogridis, G.** (2010). Smart grid privacy via anonymization of smart metering data. *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. (SmartGridComm)*.
- [40] **Cárdenas, A., Amin, S., Schwartz, G.** (2012). Privacy-aware sampling for residential demand response programs. *Proceedings of 1st international ACM*, url: <http://www.eecs.berkeley.edu/schwartz/HiCons2012ASG.pdf>.
- [41] **Tudor, V., Almgren, M., Papatriantafidou, M.** (2013). Analysis of the impact of data granularity on privacy for the smart grid. *Proceedings of the 12th ACM workshop on Workshop on privacy in the electronic society*.

- [42] **Reinhardt, A., Englert, F., Christin, D.** (2013). Enhancing user privacy by preprocessing distributed smart meter data. *Proc. Sust. Internet ICT Sustainability (SustainIT)*.
- [43] **Kalogridis, G., Efthymiou, C., Denic, S. Z., Lewis, T. A., Cepeda, R.** (2010). Privacy for smart meters: Towards undetectable appliance load signatures. *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. (SmartGridComm)*.
- [44] **McLaughlin, S., McDaniel, P., Aiello, W.** (2011). Protecting consumer privacy from electric load monitoring. *Proc. ACM Conf. Comput. Commun. Security (CCS)*.
- [45] **Ge, B., Zhu, W.-T.** Preserving user privacy in the smart grid by hiding appliance load characteristics. *Cyberspace Safety and Security*, pages 67–80. Springer, (2013).
- [46] **Yang, W., Li, N., Qi, Y., Qardaji, W., McLaughlin, S., McDaniel, P.** (2012). Minimizing private data disclosures in the smart grid. *Proc. ACM Conf. Comput. Commun. Security (CCS)*.
- [47] **Egarter, D., Prokop, C., Elmenreich, W.** (2014). Load hiding of household's power demand. *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. (SmartGridComm)*.
- [48] **Chen, D., Irwin, D., Shenoy, P., Albrecht, J.** (2014). Combined heat and privacy: Preventing occupancy detection from smart meters. *Proc. IEEE Int. Conf. Perv. Comput. Commun. (PerCom)*.
- [49] **Chen, D., Kalra, S., Irwin, D., Shenoy, P., Albrecht, J.** (2015). Preventing occupancy detection from smart meters. *IEEE Trans. Smart Grid*, 6(5), 2426–2434.
- [50] **Reinhardt, A., Egarter, D., Konstantinou, G., Christin, D.** (2015). Worried about privacy? let your pv converter cover your electricity consumption fingerprints. *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. IEEE.
- [51] **Liu, Y. H., Lee, S.-H., Khisti, A.** (2017). Information-theoretic privacy in smart metering systems using cascaded rechargeable batteries. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(3), 314–318.

- [52] **Giaconi, G., Gündüz, D., Poor, H. V.** (2017). Smart meter privacy with renewable energy and an energy storage device. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 13(1), 129–142.
- [53] **Tan, O., Gunduz, D., Poor, H. V.** (2013). Increasing smart meter privacy through energy harvesting and storage devices. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(7), 1331–1341.
- [54] **Sun, Y., Lampe, L., Wong, V. W. S.** (2015). Combining electric vehicle and rechargeable battery for household load hiding. *Proc. IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun. (SmartGridComm)*.
- [55] **Sun, Y., Lampe, L., Wong, V. W.** (2017). Smart meter privacy: Exploiting the potential of household energy storage units. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1), 69–78.
- [56] **Moon, S., Jung, H. S., Lee, J. W.** (2015). On the usages of the battery in the smart grid: Reducing cost and enhancing privacy. *Proc. Int. Conf. Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*.
- [57] **Moon, S., Lee, J.-W.** (2018). Multi-residential demand response scheduling with multi-class appliances in smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 9(4), 2518–2528.
- [58] **Liu, E., Cheng, P.** (2017). Achieving privacy protection using distributed load scheduling: A randomized approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5), 2460–2473.
- [59] **Tan, O., Gunduz, D., Vilardebo, J. G.** (2015). Optimal privacy-cost trade-off in demand-side management with storage. *Proc. IEEE Int. Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*.
- [60] **Tan, O., Gómez-Vilardebó, J., Gündüz, D.** (2017). Privacy-cost trade-offs in demand-side management with storage. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 12(6), 1458–1469.
- [61] **Isikman, A. O., Altun, C., Uludag, S., Tavli, B.** (2016). Power scheduling in privacy enhanced microgrid networks with renewables and storage. *Proc. IEEE Ann. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*.
- [62] **Li, S., Khisti, A., Mahajan, A.** (2015). Structure of optimal privacy-preserving policies in smart-metered systems with a rechargeable battery.

- [63] **Li, S., Khisti, A., Mahajan, A.** (2016). Privacy-optimal strategies for smart metering systems with a rechargeable battery. *2016 American Control Conference (ACC)*. IEEE.
- [64] **Erdemir, E., Dragotti, P. L., Gündüz, D.** (2019). Privacy-cost trade-off in a smart meter system with a renewable energy source and a rechargeable battery. *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE.
- [65] **Chen, Z., Wu, L.** (2013). Residential appliance DR energy management with electric privacy protection by online stochastic optimization. *IEEE Trans. Smart Grid*, 4(4), 1861–1869.
- [66] **Yang, L., Chen, X., Zhang, J., Poor, H. V.** (2015). Cost-effective and privacy-preserving energy management for smart meters. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 6(1), 486–495.
- [67] **Koo, J., Lin, X., Bagchi, S.** (2017). Rl-blh: Learning-based battery control for cost savings and privacy preservation for smart meters. *2017 47th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*. IEEE.
- [68] **Hossain, M. B., Natgunanathan, I., Xiang, Y., Yang, L.-X., Huang, G.** (2019). Enhanced smart meter privacy protection using rechargeable batteries. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(4), 7079–7092.
- [69] **Natgunanathan, I., Hossain, M. B., Xiang, Y., Gao, L., Peng, D., Li, J.** (2019). Progressive average-based smart meter privacy enhancement using rechargeable batteries. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(6), 9816–9828.
- [70] **McDaniel, P., McLaughlin, S.** (2009). Security and privacy challenges in the smart grid. *IEEE Sec. Priv.*, 7(3), 75–77.
- [71] **Kumar, P., Lin, Y., Bai, G., Paverd, A., Dong, J. S., Martin, A.** (2019). Smart grid metering networks: A survey on security, privacy and open research issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2886–2927.

- [72] **Ferrag, M. A., Maglaras, L. A., Janicke, H., Jiang, J., Shu, L.** (2018). A systematic review of data protection and privacy preservation schemes for smart grid communications. *Sustainable cities and society*, 38, 806–835.
- [73] **Leszczyna, R.** (2018). Cybersecurity and privacy in standards for smart grids—a comprehensive survey. *Computer Standards & Interfaces*, 56, 62–73.
- [74] **Asghar, M. R., Dán, G., Miorandi, D., Chlamtac, I.** (2017). Smart meter data privacy: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2820–2835.
- [75] **Desai, S., Alhadad, R., Chilamkurti, N., Mahmood, A.** (2019). A survey of privacy preserving schemes in ioe enabled smart grid advanced metering infrastructure. *Cluster Computing*, 22(1), 43–69.
- [76] **Finster, S., Baumgart, I.** (2014). Privacy-aware smart metering: A survey. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 16(3), 1732–1745.
- [77] **Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., Tipper, D.** (2012). A survey on cyber security for smart grid communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 998–1010.
- [78] **Sultan, S.** (2019). Privacy-preserving metering in smart grid for billing, operational metering, and incentive-based schemes: A survey. *Computers & Security*, 84, 148–165.
- [79] **Komninos, N., Philippou, E., Pitsillides, A.** (2014). Survey in smart grid and smart home security: Issues, challenges and countermeasures. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4), 1933–1954.
- [80] **Jokar, P., Arianpoo, N., Leung, V. C.** (2016). A survey on security issues in smart grids. *Security and Communication Networks*, 9(3), 262–273.
- [81] **Giraldo, J., Sarkar, E., Cardenas, A. A., Maniatakos, M., Kantarcioglu, M.** (2017). Security and privacy in cyber-physical systems: A survey of surveys. *IEEE Design & Test*, 34(4), 7–17.
- [82] **Kement, C. E., Gultekin, H., Tavli, B., Girici, T., Uludag, S.** (2017). Comparative analysis of load-shaping-based privacy preservation strategies in a smart grid. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 13(6), 3226–3235.

- [83] **Kement, C. E., Gultekin, H., Tavli, B.** (2020). A holistic analysis of privacy aware smart grid demand response. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [84] **Mohsenian-Rad, A.-H., Wong, V. W., Jatskevich, J., Schober, R., Leon-Garcia, A.** (2010). Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 1(3), 320–331.
- [85] **Chen, S., Gooi, H. B.** (2011). Jump and shift method for multi-objective optimization. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(10), 4538–4548.
- [86] **Salinas, S., Li, M., Li, P.** (2013). Multi-objective optimal energy consumption scheduling in smart grids. *IEEE Trans. Smart Grid*, 4(1), 341–348.
- [87] **Joo, J.-Y., Ilić, M. D.** (2013). Multi-layered optimization of demand resources using Lagrange dual decomposition. *IEEE Trans. Smart Grid*, 4(4), 2081–2088.
- [88] **Liu, Y., Yuen, C., Huang, S., Hassan, N. U., Wang, X., Xie, S.** (2014). Peak-to-average ratio constrained demand-side management with consumer's preference in residential smart grid. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, 8(6), 1084–1097.
- [89] **Shadmand, M. B., Balog, R. S.** (2014). Multi-objective optimization and design of photovoltaic-wind hybrid system for community smart DC microgrid. *IEEE Trans. Smart Grid*, 5(5), 2635–2643.
- [90] **Anvari-Moghaddam, A., Monsef, H., Rahimi-Kian, A.** (2015). Optimal smart home energy management considering energy saving and a comfortable lifestyle. *IEEE Trans. Smart Grid*, 6(1), 324–332.
- [91] **Anvari-Moghaddam, A., Monsef, H., Rahimi-Kian, A.** (2015). Cost-effective and comfort-aware residential energy management under different pricing schemes and weather conditions. *Energy and Buildings*, 86, 782–793.
- [92] **Shafie-khah, M., Catalão, J. P.** (2015). A stochastic multi-layer agent-based model to study electricity market participants behavior. *IEEE Trans. Power Syst.*, 30(2), 867–881.
- [93] **Lu, H., Zhang, M., Fei, Z., Mao, K.** (2015). Multi-objective energy consumption scheduling in smart grid based on Tchebycheff decomposition. *IEEE Trans. Smart Grid*, 6(6), 2869–2883.

- [94] **Lokeshgupta, B., Sadhukhan, A., Sivasubramani, S.** (2017). Multi-objective optimization for demand side management in a smart grid environment. *Proc. IEEE Int. Conf. Power Syst. (ICPS)*.
- [95] **Ruzbahani, H. M., Karimipour, H.** (2018). Optimal incentive-based demand response management of smart households. *Proc. IEEE/IAS Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf. (I&CPS)*.
- [96] **Li, D., Chiu, W.-Y., Sun, H., Poor, H. V.** (2018). Multiobjective optimization for demand side management program in smart grid. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 14(4), 1482–1490.
- [97] **Tanino, T., Tanaka, T., Inuiguchi, M.** *Multi-objective programming and goal programming: theory and applications*. Springer, (2013).
- [98] **Mazidi, M., Zakariazadeh, A., Jadid, S., Siano, P.** (2014). Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid. *Energ. Convers. Manage.*, 86, 1118–1127.
- [99] **Muoio, D.** (2017). 10 home batteries that rival tesla’s powerwall 2. *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/rechargeable-battery-options-compete-tesla-2017-5>. Erişim tarihi: 05/08/2018.
- [100] **Saghezchi, F. B., Saghezchi, F. B., Nascimento, A., Rodriguez, J.** (2014). Game theory and pricing strategies for demand-side management in the smart grid. *Proc. Int. Symp. Commun. Syst. Netw. Digtl. Sign. Proc. (CSNDSP)*.
- [101] **ISO, N.** New york independent system operator, (2016). <https://www.nyiso.com>. Erişim tarihi: 02/05/2016.
- [102] **Mohsenian-Rad, A. H., Leon-Garcia, A.** (2010). Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *IEEE Trans. Smart Grid*, 1(2), 120–133.
- [103] **Hart, G. W.** (1992). Nonintrusive appliance load monitoring. *Proc. IEEE*, 80(12), 1870–1891.
- [104] **Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., Ding, Y.** (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Pro. Nat. Sci.*, 19(3), 291–312.
- [105] **Heitsch, H., Römisch, W.** (2003). Scenario reduction algorithms in stochastic programming. *Comput. Optim. Appl.*, 24(2-3), 187–206.

- [106] **Kement, C. E., Ilic, M., Gultekin, H., Cicek, C. T., Tavli, B.** (2020). Real and reactive power based optimal privacy protection in smart grid demand response. *arXiv*, pages arXiv–2004.
- [107] **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.
- [108] **Pröbstl, A., Park, S., Steinhorst, S., Chakraborty, S.** (2019). Cost/privacy co-optimization in smart energy grids. *2019 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. IEEE.
- [109] **Varodayan, D., Khisti, A.** (2011). Smart meter privacy using a rechargeable battery: Minimizing the rate of information leakage. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*.
- [110] **Kement, C. E., Tavli, B., Gultekin, H., Yanikomeroglu, H.** (2020). Holistic privacy for electricity, water, and natural gas metering in next generation smart homes. *arXiv preprint arXiv:2004.13363*.
- [111] **Analytics, I.** Smart meter market report 2019-2024. Technical report, IoT Analytics: Market Insights for the Internet of Things, (2019).
- [112] **Sun, Q., Li, H., Ma, Z., Wang, C., Campillo, J., Zhang, Q., Wallin, F., Guo, J.** (2015). A comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks. *IEEE Internet Things J.*, 3(4), 464–479.
- [113] **Schantz, C., Donnal, J., Sennett, B., Gillman, M., Muller, S., Leeb, S.** (2014). Water nonintrusive load monitoring. *IEEE Sensors J.*, 15(4), 2177–2185.
- [114] **Mudumbe, M. J., Abu-Mahfouz, A. M.** (2015). Smart water meter system for user-centric consumption measurement. *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Informat. (INDIN)*.
- [115] **Cominola, A., Giuliani, M., Piga, D., Castelletti, A., Rizzoli, A. E.** (2015). Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review. *Environ. Modell. Softw.*, 72, 198–214.
- [116] **Casale, A., Spadafina, L., Porcelli, A., Matrino, D., Sarcina, V.** (2016). A water meter reading middleware for smart consumption monito-

ring. *Proc. IEEE Workshop Environ. Energy Struct. Monitor. Syst. (EESMS)*.

- [117] **Tewolde, M., Longtin, J.** (2010). High-resolution meter reading system for gas utility meter. *Proc. IEEE SENSORS*.
- [118] **Dong, S., Duan, S., Yang, Q., Zhang, J., Li, G., Tao, R.** (2017). MEMS-based smart gas metering for internet of things. *IEEE Internet Things J.*, 4(5), 1296–1303.
- [119] **Nhede, N.** Smart gas metering systems market to generate \$9 billion by 2024. Technical report, Smart Energy International, (2018).
- [120] **Askari, S., Montazerin, N., Zarandi, M. F.** (2016). High-frequency modeling of natural gas networks from low-frequency nodal meter readings using time-series disaggregation. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 12(1), 136–147.
- [121] **Fernandes, M. P., Viegas, J. L., Vieira, S. M., Sousa, J. M.** (2016). Analysis of residential natural gas consumers using fuzzy c-means clustering. *Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. (FUZZ-IEEE)*.
- [122] **Yamagami, S., Nakamura, H., Meier, A.** (1996). Non-intrusive submetering of residential gas appliances. *Proc. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Cihan Emre Kement
Uyruğu : Türkiye
Doğum Tarihi ve Yeri : 15/07/1990 Samsun
E-posta : ckement@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Bilkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2014, ODTÜ, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Doktora** : 2020, TOBB ETÜ, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2011-2013	Türk Telekom Grup Ar&Ge Direktörlüğü	Ar&Ge Mühendisi
2013-2020	ASELSAN A.Ş.	Uzman Mühendis
2019-2020	Massachusetts Institute of Technology	Fulbright Misafir Araştırmacı

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **C. E. Kement**, H. Gultekin, B. Tavli, T. Girici, and S. Uludag, "Comparative analysis of load-shaping-based privacy preservation strategies in a smart grid." IEEE Transactions on Industrial Informatics 13.6 (2017): 3226-3235.
- **C. E. Kement**, "Load Shaping Based Privacy Protection in Smart Grids: An Overview." 5th International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS), 12-16 June 2019, Prague, pp. 294-302.

- **C. E. Kement**, H. Gultekin, and B. Tavli, "A Holistic Analysis of Privacy Aware Smart Grid Demand Response." IEEE Transactions on Industrial Electronics (2020).
- **C. E. Kement**, B. Tavli, H. Gultekin, and H. Yanikomeroglu, "Holistic Privacy for Electricity, Water, and Natural Gas Metering in Next Generation Smart Homes." IEEE Communications Magazine (accepted for publication, Feb. 2021).

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **C. E. Kement**, "Design and optimization of a rate adaptation algorithm for energy harvesting transmitters", Diss. Master's thesis, Middle East Technical University, 2014.
- Akman, A., Eker, O., Yargicoglu, B., **Kement, C. E.**, & Atalar, M. (2017), "Method and device for monitoring and measurement of Wi-Fi internet services", U.S. Patent No. 9,549,333, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.