



**AKILLI ŞEBEKELERDE HESAPSAL YÖNTEM
UYGULAMALARI**

Yük. Müh. Ulaş Baran BALOĞLU

Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yakup DEMİR

AĞUSTOS-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ŞEBEKELERDE HESAPSAL YÖNTEM UYGULAMALARI

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Ulaş Baran BALOĞLU

(061113205)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Temmuz 2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Ağustos 2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yakup DEMİR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (F.Ü)

Doç. Dr. Galip AYDIN (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Muhammet Ali ARSERİM (D.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Özal YILDIRIM (M.Ü)

AĞUSTOS-2017

ÖNSÖZ

Endüstri 4.0, siber fiziksel sistemlerle yeni bir sanayi devrimi başlatmıştır ve bu gelişime ayak uydurmanın yolu altyapı yatırımlarından geçmektedir. Yıllardır yavaş bir tempoda gelişim gösteren elektrik endüstrisi, akıllı şebekeler ile hızlı bir değişim içerisine girmiştir. Akıllı şebekelere geçiş, daha çevre dostu bir enerji kullanımı sağlayacağı ve verimliliği arttıracacağı için önemlidir. Akıllı şebeke altyapısına geçişte geç kalan ülkelerin sanayi şirketleri, diğer ülkelerdeki şirketlerle rekabet etmede ekonomik olarak zorlanacakları düşünülmektedir. Bu tez çalışması, bu amaç doğrultusunda ülkemizde yapılan akıllı şebeke çalışmalarına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Tez çalışmam süresince bana çok büyük katkıları olan; bilgisini, zamanını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Yakup DEMİR’e teşekkürü bir borç bilirim. Uzun yıllardır, sabırla akademik gelişimime katkıda bulunup, çalışmalarım konusunda bana her zaman cesaret vermiştir.

Tez çalışması süresince her zaman destek olan değerli dostlarım Sayın Doç. Dr. Bilal ALATAŞ ile Sayın Yrd. Doç. Dr. Özal YILDIRIM’a çok teşekkür ederim.

Son olarak, çalışmalarım boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Yasemin Burcu BALOĞLU’na ve bugünlere gelmemde en büyük destekçim olan annem Mübeyen POLAT’a bu vesileyle sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ulaş Baran BALOĞLU
ELAZIĞ – 2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLOLAR LİSTESİ	XI
KISALTMALAR	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması	3
1.2. Tezin Amacı ve Organizasyonu	9
1.3. Tezin Bilime Katkısı.....	11
2. AKILLI ŞEBEKE TANIMI, TEMEL ÖZELLİKLERİ VE STANDARTLARI	13
2.1. Akıllı Şebekenin Tanımı.....	15
2.2. Akıllı Bir Şebekenin Sahip Olması Gereken Temel Özellikler.....	18
2.3. Akıllı Şebeke Standartları.....	20
2.4. Dünyada Akıllı Şebeke Çalışmaları	24
2.5. Türkiye’de Akıllı Şebeke Çalışmaları	27
3. AKILLI ŞEBEKELERİN GEREKSİNİMLERİ VE BU GEREKSİNİMLER İÇİN KULLANILABİLECEK HESAPSAL YÖNTEMLER	28
3.1. Akıllı Sayaçlar	30
3.2. Talep Tarafı Yönetimi (DSM)	32
3.3. Enerji Depolanması	33
3.4. Elektrikli Arabaların Şebekeye Entegrasyonu.....	35
3.5. Güç Kalitesi	36
3.6. Fosil-Tabanlı Yakıtlar ve Çevresel Sorunlar	37
3.7. Yenilenebilir Üretim ve Sürdürülebilirlik	37
3.7.1. Rüzgar Enerjisi	38
3.7.2. PV Panel	38
3.7.3. Termal Güneş Enerjisi	39
3.7.4. Jeotermal Enerji	39
3.7.5. Biyogazlar ve Biyokütle	39
3.7.6. Dalga Gücü	39
3.7.7. Hidro-enerji	39
3.7.8. Yakıt Hücreleri	40
3.8. Kişisel Verilerin Korunması ve Siber Güvenlik.....	40
3.9. Hesapsal Yöntemler.....	41
3.9.1. Karar Sistemleri	42
3.9.2. Statik Yöntemler.....	43
3.9.3. Dinamik Programlama.....	43
3.9.4. Evrimsel Programlama	43
3.9.5. Akıllı Sistemler.....	43
4. TALEP TARAFA YÖNETİMİNDE PİSAGOR BULANIK MANTIK TABANLI OYUN TEORİSİ KULLANIMI	44
4.1. Önerilen DSM Sistemi	46
4.1.1. Oyun Teorisi	47

4.1.2. Fiyatlama Stratejileri	49
4.1.3. Pisagor Bulanık Kümeleri (PFS)	51
4.1.4. Problem Tanımı	53
4.2. Uygulama	57
4.2.1. Çok-Etmenli Sistem Mimarisi	59
4.2.2. Benzetim Ortamı	61
4.2.3. DSM Uygulaması Sonuçları ve Değerlendirme	65
5. AKILLI SAYAÇLARDA KİŞİSEL BİLGİ GÜVENLİĞİ İÇİN YENİ BİR ZAMAN-SERİLERİ VERİ BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ.....	68
5.1. Veri Birleştirme Yöntemi	69
5.2. Problem Tanımı	70
5.3. Önerilen Veri Birleştirme Yönteminde Kullanılan Algoritmalar	72
5.4. Zaman-Serileri Veri Birleştirme Yönteminin Benzetim Çalışması.....	74
5.4.1. Güvenlik Modeli.....	75
5.4.2. Holt-Winters Yöntemiyle Tahmin.....	75
5.4.3. STL Yöntemiyle Tahmin.....	76
5.4.4. Zaman-Serileri Veri Birleştirme Yöntemi Benzetim Çalışması Sonuçları ...	76
5.4.5. Hesapsal Maliyet Analizi ve Değerlendirmesi	80
6. PIYANGO ZAMANLAMA YÖNTEMİ KULLANARAK ELEKTRİKLİ ARABALAR İÇEREN BİR SİSTEMİN ŞARJ YÖNETİMİ	82
6.1. Problem Tanımı ve Farklı Zamanlama Yöntemleri.....	83
6.1.1. EA Şarj Problemi.....	83
6.1.2. Önerilen Piyango Zamanlama Tabanlı Yöntem	83
6.1.3. GA Tabanlı Zamanlama Yöntemi	86
6.1.4. Rasgele Zamanlama.....	88
6.2. Zamanlama Yöntemlerinin Kıyaslanması ve Değerlendirme	89
7. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ENTEGRASYON SORUNU İÇİN ARABADAN-ŞEBEKEYE (V2G) ENERJİ AKTARIMI.....	91
7.1. Arabadan-Şebekeye (V2G) Enerji Aktarımı	91
7.2. Örnek Bir Enerji Yönetim Sistemi	92
7.2.1. Matematiksel Model ve Hesaplama Yöntemi	94
7.3. V2G Benzetim Çalışması	96
7.3.1. Düşük Miktarda Yenilenebilir Enerji Kaynağı Kullanımı	99
7.3.2. Yüksek Miktarda Yenilenebilir Enerji Kaynağı Kullanımı.....	99
7.3.3. Çok Yüksek Miktarda Yenilenebilir Enerji Kaynağı Kullanımı	100
7.4. Ekonomik Açıdan İnceleme ve Değerlendirme.....	100
8. SONUÇLAR.....	103
9. ÖNERİLER.....	106
KAYNAKLAR.....	108
ÖZGEÇMİŞ	
EKLER	

ÖZET

Doktora Tezi

AKILLI ŞEBEKELERDE HESAPSAL YÖNTEM UYGULAMALARI

Ulaş Baran BALOĞLU

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2017, Sayfa: 131

Bu tezde, bilgi teknolojilerinde kullanılan farklı hesapsal yöntemler, elektrik şebekelerinin mevcut kavramsal modeliyle birleştirilerek akıllı şebekeler alanında karşılaşılan sorunlar üzerinde uygulanmıştır. Akıllı şebekelerde; hesapsal yöntemlerin etkin biçimde uygulanabileceği talep tarafı yönetimi, kişisel bilgi güvenliği ve elektrikli araba şarj problemi gibi alanlarda incelemeler yapılmıştır. Burada karşılaşılan sorunlar için yeni yöntemler geliştirilip sunulmuştur.

Literatürde bulunan talep tarafı yönetim modellerinin, elektrik şebekeleri gibi çok sayıda kullanıcının bulunduğu ve hesapsal karmaşıklığın arttığı ortamlarda ne kadar etkin olacağı tartışmalıdır. Karmaşıklığın fazla olduğu durumlarda bütün talep bilgilerinin eksiksiz incelenmeye çalışılması yerine, talep analizinin eksik bilgiyle yapılması karmaşıklığın fazla olduğu durumlarda daha pratik olur. Bu düşünceden hareketle, bu tezde geliştirilen yöntem eksik bilgiden ya da haberleşme gecikmelerinden çok fazla etkilenmez. Geliştirilen yöntem, eksik bilginin olduğu durumlardaki talebin etmen-tabanlı bir sistem tarafından işlenebilmesini sağlar. Bu çalışma, Pisagor bulanık kümelerini Bayes oyunlarındaki oyuncuların eylem mekanizmalarında kullanan literatürdeki ilk çalışmadır.

Bu tezde, akıllı sayaçlardan elde edilen okuma verilerinin güvenliğinin sağlanabilmesi için zaman-serileri veri birleştirme yöntemi de geliştirilmiştir. Bu yöntem, zamansal karmaşıklığı düşük bir güvenlik sağladığı için akıllı sayaçlar gibi sınırlı

donanıma sahip cihazlar için uygun ve farklı saldırı çeşitlerine karşı dayanıklı olmaktadır. Literatürde bulunan, diğer kişisel bilgi güvenliğini koruma amaçlı veri birleştirme yöntemlerinden farklı olarak, önerilen yöntemin veri birleştirme ve bilgi güvenliğini koruma maliyetleri düşüktür ve verinin yeniden oluşturulması işlemi kayıpsız bir biçimde gerçekleşmektedir. Bu sayede, altyapı kurulum maliyetlerini azaltmak mümkün olur.

Ayrıca, bu tez çalışmasında modern işletim sistemlerinde bulunan süreç zamanlaması algoritmalarından esinlenerek, elektrikli arabaların eş zamanlı şarj edilmeleri sırasında şebekede doğuracakları yüklenme sorununa çözüm olabilecek bir piyango tabanlı şarj yönetim sistemi geliştirilmiştir. Piyango-tabanlı zamanlama stratejisini, bu amaç doğrultusunda kullanan çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Geliştirilen yöntem, genetik algoritma tabanlı bir çözümden daha iyi bir performans göstermiştir ve toplam ayrılabilir enerji miktarını kısıtlayarak tepe-yük değerlerini azaltabilmesiyle yenilikçi bir katkı sağlamıştır.

Son olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılımı ile ortaya çıkan dalgalanma sorununa çözüm için kullanımı düşünülen arabadan şebekeye aktarım yöntemi incelenmiş ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak hem araç batarya ömrünün hem de sürücü davranışının dikkate alındığı bir benzetim çalışması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Şebeke, Elektrikli Arabalar, Hesapsal Yöntemler, Yenilenebilir Enerji Kaynakları.

SUMMARY

Ph.D. Thesis

APPLICATIONS OF COMPUTATIONAL METHODS IN SMART GRIDS

Ulaş Baran BALOĞLU

Fırat University

Institute of Science and Technology

Department of Electrical and Electronics Engineering

2017, Pages: 131

In this thesis study, different computational methods used in information technologies are combined with the current conceptual model of electric networks, and applied to problems encountered in the field of smart grids. New methods have been developed and effectively implemented for popular problems of smart grids such as demand-side management, preserving privacy and electric vehicle charging.

Demand-side management models in the literature are under discussion about how they can be effective when the computational complexity is increasing with the presence of a vast number of users as it happens in electric grids. Instead of trying to examine all demands completely, demand analysis can be done with incomplete information when the complexity is high. In this thesis study, a novel computational method is developed. This method is not too much affected by the incomplete information or communication delays. The proposed method makes an agent-based system to process incomplete information possible. It is the first study in the literature, which uses Pythagorean fuzzy sets in the action mechanisms of agents in Bayesian games.

A time-series data aggregation method has been developed to preserve the privacy of smart meter readings. The method developed in this thesis is suitable for devices with limited hardware such as smart meters due to its low computational complexity and resistance to different security attack types. Different than the other data aggregation

methods in the literature, the cost of data aggregation, and privacy preserving is low in this study. Furthermore, reconstruction of the data takes place in a lossless fashion. As a result, it helps to reduce infrastructure installation costs.

Inspired by the scheduling algorithms found in modern operating systems, a lottery-based scheduler model has been developed to solve the problem of peak loads in the grid during simultaneous charging of electric vehicles. There are not many studies using lottery-based scheduling strategy for this purpose. The proposed method shows better performance than a genetic algorithm-based solution and provided an innovative contribution by limiting the total energy allocation amount to decrease peak-load values.

Finally, the fluctuation problem arising from the integration of renewable energy sources to the grid has been examined and analyzed economically with the consideration of a vehicle to grid system. For this purpose, a simulation study was carried out. Different than the other studies in the literature, this simulation study takes into account both vehicle battery life and driver behavior.

Keywords: Smart Grid, Electric Vehicle, Computational Methods, Renewable Energy Sources.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Bilgisayar, telekomünikasyon ve elektrik endüstrilerinde zaman içerisinde yaşanan değişimler.	1
Şekil 2.1. Elektrik şebeke yapısının zaman içerisindeki gelişimi.	16
Şekil 2.2. Akıllı şebeke teknolojileri ve farklı endüstriler.	21
Şekil 2.3. NIST akıllı şebeke kavramsal modeli.	22
Şekil 3.1. Farklı bilim alanlarının akıllı şebeke çalışmalarında buluşmaları.	30
Şekil 3.2. Elektrik sayaçlarının zaman içerisindeki gelişimi.....	31
Şekil 3.3. Dünya genelinde gerçekleşmiş ve planlanmış akıllı sayaç kurulumları (2008-2018).	32
Şekil 3.4. Optimizasyon amaçlı kullanılabilen hesapsal yöntemler.	42
Şekil 4.1. Talep tarafı yönetimi içerisindeki haberleşme altyapısı.....	47
Şekil 4.2. Karar verme sürecinde PFS değerlerinin kullanımı.	52
Şekil 4.3. Pisagor üyelik dereceleri ve θ açısı.	53
Şekil 4.4. DSM akış diyagramı.	58
Şekil 4.5. Akıllı şebeke için bir çok-etmenli sistem mimarisi.....	60
Şekil 4.6. Rasmussen’ın bilgi-tabanlı davranış modeli.	61
Şekil 4.7. Benzetim ortamındaki cihazlar ve unsurlar.	63
Şekil 4.8. DSM kullanan ve kullanmayan şebekeler için birleştirilmiş yük değerlerinin zamana karşı gösterimi.	65
Şekil 4.9. DSM ile kullanılan farklı fiyatlandırma stratejileri için birleştirilmiş yük değerleri.	66
Şekil 5.1. Akıllı sayaç okumaları için kişisel bilgiyi koruyan veri birleştirme yöntemi.	70
Şekil 5.2. Bir günlük akıllı sayaç okuma verisi.....	77
Şekil 5.3. Sayaç okuma değerleri karıştırılmış zaman-serisi.....	77
Şekil 5.4. Gerçek değerler ve karıştırılmış değerler için güç spektrum yoğunlukları.	78
Şekil 5.5. Sıfır değeri eklenerek yapılan tahmin saldırısı.....	79
Şekil 5.6. Bir önceki değer eklenerek yapılan tahmin saldırısı.	79
Şekil 5.7. Karıştırılmış zaman-serisinin tamamının ele geçirildiği tahmin saldırısı.	80
Şekil 5.8. GKD değeri 10 olarak atanmışken veri birleştirme yöntemin hesapsal maliyeti.	81
Şekil 6.1. Akıllı şebekeler için EA şarj zamanlama modeli.....	85
Şekil 6.2. GA için akış diyagramı.	87

Şekil 6.3. Şarj istasyonu sayısının ortalama bekleme zamanı üzerine etkisi.	89
Şekil 6.4. EA sayısının ortalama bekleme zamanı üzerine etkisi.....	90
Şekil 7.1. Örnek bir enerji yönetim sistemi modeli.....	93
Şekil 7.2. Bir enerji yönetim sisteminin şematik gösterimi.	94
Şekil 7.3. Hesaplama yöntemi için akış diyagramı.	96
Şekil 7.4. Rüzgar türbini ve PV panellerinin bir günlük üretim profilleri.	97
Şekil 7.5. Örnek şebekenin bir günlük toplam üretim profili.....	98
Şekil 7.6. Düşük miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanıldığında V2G'nin şebeke üzerinde etkisi.....	99
Şekil 7.7. Yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanıldığında V2G'nin şebeke üzerinde etkisi.....	100
Şekil 7.8. Çok yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanıldığında V2G'nin şebeke üzerinde etkisi.....	101

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Gelişmekte olan ülkelerin elektrik enerjisi ihtiyaçlarındaki artış (2007-2050).	14
Tablo 2.2. Geleneksel şebekelerin akıllı şebekelerle karşılaştırılması.	17
Tablo 2.3. Dünyada yürütülen akıllı şebeke çalışmalarından bazıları.	26
Tablo 3.1. Akıllı şebeke teknolojileri için çözüm mimarisi.	29
Tablo 3.2. Farklı enerji depolama teknolojilerinin, maliyetleri ve uygulama alanları.	34
Tablo 3.3. EA tipleri ve genel özellikleri.....	35
Tablo 3.4. SAE konfigürasyonları ve şarj değerleri.	36
Tablo 4.1. Şebekelerde kullanılan farklı fiyatlandırma stratejileri ve özellikleri.....	50
Tablo 4.2. θ değerlerine göre talep sınıflandırmaları.	53
Tablo 4.3. Benzetim ortamında kullanılan parametre değerleri.	62
Tablo 4.4. Benzetimde kullanılan cihazların özellikleri.	63
Tablo 4.5. Müşteri etmeninin karar verme mekanizmasında kullanılan kurallar tablosunun bir parçası.....	64
Tablo 4.6. Tepe-yük değerlerindeki değişim karşılaştırması.....	66
Tablo 4.7. Farklı fiyatlandırma stratejileri için tepe-yük değerindeki değişim karşılaştırılması.....	67
Tablo 7.1 .Kullanılan kaynaklar ve toplam kapasite değerleri.	97
Tablo 7.2. EA'ların V2G katılımları için olasılık değeri aralıkları.....	98
Tablo 7.3. Farklı senaryolar için üretim miktarlarındaki azalma oranları.	98
Tablo 7.4. Fosil-yakıtlı üretimle V2G'nin maliyet karşılaştırması.....	101
Tablo 7.5. SOC değerlerinin V2G için anlamı.	102

KISALTMALAR

SS7	: Sinyalleme Sistemi No. 7 (Signalling System No. 7)
PBX	: Özel Santral (Private Branch Exchange)
IOT	: Nesnelerin İnternet'i (Internet of Things)
EA	: Elektrikli Araba
DSM	: Talep Tarafı Yönetimi (Demand-Side Management)
GA	: Genetik Algoritma
V2G	: Arabadan-Şebekeye (Vehicle-to-Grid)
PV	: FotoVoltaik
PFS	: Pisagor Bulanık Kümeleri (Pythagorean Fuzzy Sets)
NIST	: Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (National Institute of Standards and Technology)
AMR	: Otomatik Sayaç Okuma (Automatic Meter Reading)
AMI	: Otomatik Sayaç Altyapısı (Automatic Metering Infrastructure)
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
BEV	: Bataryayla Çalışan Elektrikli Araba (Battery Electric Vehicle)
PHEV	: Fişe Takılan Hibrit Elektrikli Araba (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
FCV	: Yakıt Hücresi Araba (Fuel Cell Vehicle)
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Cemiyeti (Society of Automotive Engineers)
HAN	: Ev Alan Ağı (Home Area Network)
WAN	: Geniş Alan Ağı (Wide Area Network)
TOU	: Kullanma Zamanı Fiyatlaması (Time-Of-Use pricing)
CPP	: Kritik Tepe Fiyatlaması (Critical Peak Pricing)
RTP	: Gerçek Zamanlı Fiyatlama (Real Time Pricing)
CNED	: Cournot-Nash Dengeleme Dağılımı
EGTA	: Ampirik Oyun Teorisi Analizi (Empirical Game-Theoretic Analysis)
MTH	: Mesaj Taşıma Hizmeti
FIPA	: Akıllı Fiziksel Etmenler için Esaslar (Foundation for Intelligent Physical Agents)
JADE	: Java Etmen Geliştirme Platformu (Java Agent Development Framework)
ACL	: Etmen Haberleşme Dili (Agent Communication Language)
GKD	: Gizlilik Koruma Düğümü (Privacy Preserving Node)
STL	: Loess Kullanan Mevsimlik Trend Dekompozisyonu (The Seasonal Trend Decomposition using Loess)
GA	: Genetik Algoritma
SOC	: Batarya şarj durumu (State of Charge)
POP	: V2G'ye katılma olasılığı (Probability Of Participation)
AR-GE	: Araştırma Geliştirme

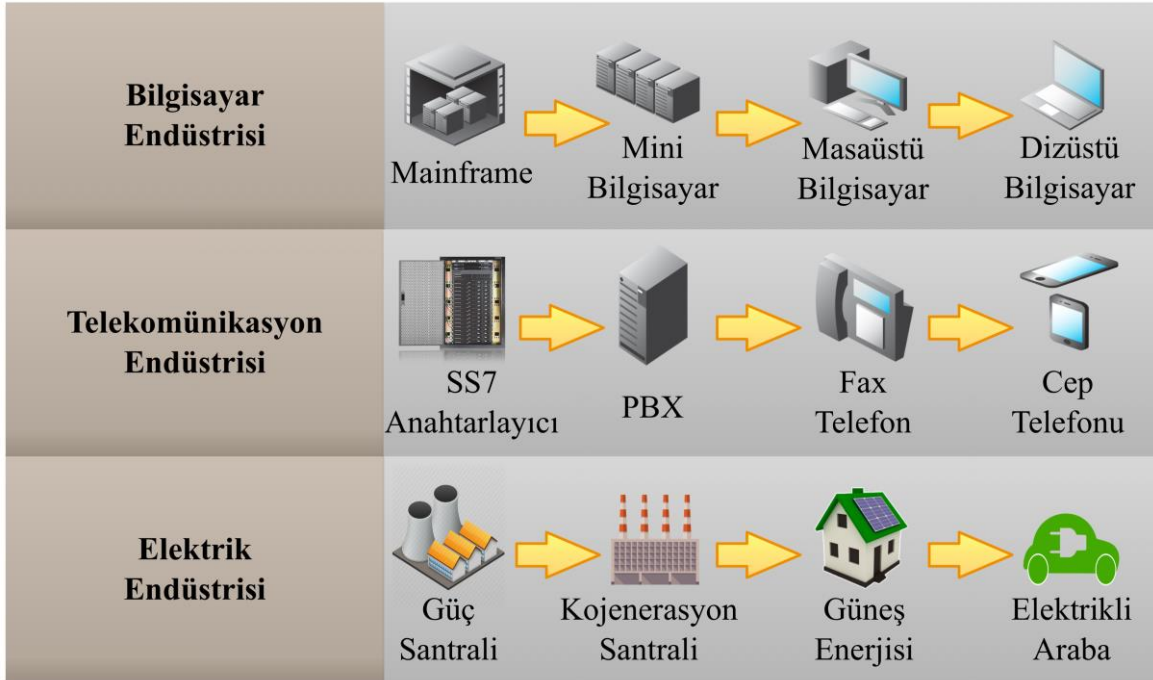
SEMBOLLER LİSTESİ

n	: Tüketici (müşteri) sayısı
$DŞ$	: Dağıtım Şirketi
ρ	: Uygun fiyatlamalar kümesi
ρ_{min}	: Asgari fiyatlama miktarı
ρ_{max}	: Azami fiyatlama miktarı
r	: Anlık fiyatlama bilgisi
L	: Yük değeri
ϖ	: Pozitif değerli bir sabit
χ	: Strateji parametresi
$r(x)$	: Üyeliğe bağlılığın gücü
$d(x)$	: Üyeliğe bağlılığın yönü
$A_Y(x)$	: x 'in üyeliği için destek miktarı
$A_N(x)$	: x 'in üye olmaması için destek miktarı
m	: Bir günlük zaman dilimi sayısı
τ	: Zaman dilimi süresi (dakika)
t_i	: i oyuncusunun günlük tüketim değerleri vektörü
Z	: Günlük tüketim değerleri matrisi
S_i	: i oyuncusunun strateji kümesi
Γ	: Strateji kümelerinin kümesi
G	: Bayes oyunu
N	: Oyuncular kümesi
Ω	: Doğal durumlar kümesi
A_i	: i oyuncusunun eylem kümesi
T_i	: i oyuncusunun tipi
P_i	: i oyuncusunun ortak olasılık fonksiyonu
U_i	: i oyuncusunun fayda fonksiyonu
R	: Reel sayılar
ξ	: Katsayı değeri
σ	: Standart sapma
μ	: Ortalama değer
z	: Gri seviye
a_t, b_t, s_t	: Yumuşatma parametreleri
p	: Periyot uzunluğu
α, β, γ	: Filtre parametreleri
P_G	: Şebekenin toplam üretimi
P_W	: Rüzgar enerjisi kaynaklı üretim
P_S	: Güneş enerjisi kaynaklı üretim
P_A	: Yardımcı kaynaklardan elde edilen üretim
P_C	: Tüketim
v	: Rüzgar hızı
v_{ci}	: Türbinin devreye girdiği rüzgar hızı
v_{co}	: Türbinin devreden çıktığı rüzgar hızı
v_R	: Anma gücündeki rüzgar hızı
k	: Pürüz giderme katsayısı
λ	: Ölçekleme katsayısı

1. GİRİŞ

Microsoft firması, ABD’de bulunan ofisinde istihdam etmek için dünyanın çeşitli bölgelerinde sınavlar yapmaktadır. 90’lı yılların ikinci yarısında Türkiye’de gerçekleştirdiği sınavlara giren adaylara, “Bir kalemi ya da kahve fincanını nasıl akıllı hale getirebiliriz?” şeklinde bir soru da sorulmaktaydı. Bu soru, esasında çağımızın önemli dehalarından Microsoft firmasının kurucusu Bill Gates’in, o yıllarda geleceğe ilişkin vizyonunu yansıtmaktadır. Nitekim, Microsoft ilerleyen dönemlerde, çeşitli akıllı cihazlar tasarlamış ve akıllı teknolojilere önemli yatırımlar yapmıştır.

Microsoft’un akıllı teknolojiler için öngörüsü çok daha eskiye dayansa da bu alanda en önemli ticari başarıyı, Bill Gates’in rakibi ve dostu olan Steve Jobs’ın kurduğu Apple firması yakalamıştır. Bu firma, geliştirdiği akıllı telefonlarla, dünyada teknoloji alanında önemli bir değişime öncülük etmiştir. Yaşanılan bu değişim, diğer bir çok değişimi de tetiklemiştir. Akıllı telefonlar, sadece teknolojik alanlarda değil sosyal alanlarda da değişimlerin yaşanmasına sebep olmuştur. Şekil 1.1’de bilgisayar, telekomünikasyon ve elektrik endüstrilerinde zaman içerisinde yaşanan değişimin bir gösterimi yapılmıştır [1].



Şekil 1.1. Bilgisayar, telekomünikasyon ve elektrik endüstrilerinde zaman içerisinde yaşanan değişimler.

Çağımızın bu iki önemli dehası, yıllar öncesinden teknolojinin gitmesi gerektiği yönün “akıllanma” olduğunu işaret etmiştir. Telefonlar, televizyonlar, arabalar, ev eşyaları ve diğer bir çok teknolojik ürün, artık ya çoktan akıllanmış durumdadır ya da bir akıllanma sürecinin içerisinde. İnsanlar hayatlarını sürdürebilmek için nasıl havaya, suya ve gıdaya muhtaç ise; bütün bu akıllı teknolojiler de var olabilmek için elektrik enerjisine muhtaçtır. Teknoloji her alanda akıllanırken, onun can damarı olan elektriği üreten, ileten ve dağıtan yapıların da akıllanması kaçınılmazdır. Akıllı teknolojiler, bu bağlamda sadece akıllı telefonlar gibi bazı elektronik cihazların hayatımıza girmelerine ve geliştirilmelerine neden olmamıştır. Doğal olarak, bu teknolojilerin var olabilmeleri için gereken elektrik şebekesinin de gelişmesi ihtiyacını doğurmuştur. Elektrikli araba şarj istasyonları, ev enerji yönetim sistemleri, yük kontrolü anahtarları, akıllı sayaçlar, voltaj düzenleyiciler ve akıllı telefon uygulamaları günümüzde şebekelerde kullanılması beklenen akıllı teknolojilere birkaç örnektir [2]. Hiç şüphesiz bu cihazların ve yeni teknolojilerin sayısı Nesnelerin İnternet’i (IOT, Internet of Things) ve Endüstri 4.0 alanlarında yaşanacak ilerlemelerle beraber daha da artacaktır.

Yıllarca yavaş bir tempoda seyreden elektrik endüstrisinin değişimi, artık hızlı bir tempo içerisine girmiştir. Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının; benzin, doğal gaz ve kömür gibi geleneksel enerji kaynaklarının yerlerini almaları planlanmaktadır. Ucuz ve doğaya dost enerji türlerinin, elektrik enerjisi üretiminde kullanılması ve fosil yakıtların kullanımının azaltılması, bütün ülkeler tarafından arzu edilmektedir. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla beraber, farklı güç dağıtım sistemlerinin bir arada şebekeye bağlanması; güç kalitesi ve güvenilirlik açısından yeni ve katı kurallara ihtiyaç duyulması sonucunu doğurmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, şebekelere bağlanmaları sonucu halen kullanılmakta olan eski dağıtım altyapılarında bir takım sorunlar açığa çıkmıştır. Bu sorunlardan bazıları aşağıda verilmiştir [1-3].

- İletim Hatları Problemi: Rüzgar enerjisi kullanımına uygun bölgeler, genel olarak mevcut iletim altyapısının zayıf olduğu bölgelerdir. Ayrıca, rüzgar enerjisinin dönemlik olarak artışlar ve azalmalar göstermesi; bu enerjinin kaynak olarak kullanıldığı yerlerde kapasite ve sistem planlaması açısından sorunlar yaşanmasına sebep olabilir.
- Dağıtım Sistemleri Problemi: Güneş enerjisinin, konutlar üzerinden sisteme enerji tedarik edebilmesi; dağıtım altyapısı ve şebekenin işleyişi açısından daha

önceden karşılaşılmamış problemleri açığa çıkartır. Şebekeyi kontrol etmek ve korumak için yeni stratejiler geliştirilmeli ve şebekenin altyapısı bu gelişmelere adapte olacak şekilde yenilenmelidir.

- Tahmin Edilebilirlik ve Planlama Problemi: Yenilenebilir enerji kaynakları, doğanın davranışını tahmin etme zorluklarından dolayı belirsizlikler içerir. Bu belirsizliklerin sorun oluşturmaması için yenilenebilir kaynaklarla birlikte, enerji depolama ünitelerinin de kullanılması gerekir. Ayrıca, depolama ünitelerinin hangi şartlarda kullanıma sokulacağıyla ilgili planlamalara ve hesapsal yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Çevreci ürünler, her ne kadar daha az enerji tüketimini amaç edinse de Elektrikli Araba (EA) gibi yeni nesil ulaşım araçlarının, elektrik enerjisinin tüketimini arttırması beklenmektedir. Bir EA kullanılarak yapılacak 50-60 km'lik bir seyahat için gereksinim duyulacak enerji miktarı, yaklaşık olarak 7-10 KWH değerindedir. EA'ların, şebekeye eş zamanlı bağlanarak şarj edilmeleri sonucu şebekede ciddi bir yüklenme olacaktır [3]. Bu sorununun üstesinden gelebilmek için elektrikli araba sahiplerinin tüketim davranışlarının, şebekelerde kullanılan sistemler tarafından tahmin edilebilmesi gerekecektir. Bu durum, yeni akıllı yöntemlerin geliştirilmesini ve altyapının iyileştirilmesini gerektirir.

Gerçekleşecek bütün bu değişimlere paralel olarak, dağıtım şebekesinin işlevi de değişmektedir. Artık, sistemdeki sabit bir yükün kullanıcı tarafından tüketildiği geleneksel yapılardan, kullanıcı ihtiyacına göre dinamik olarak yükünü belirleyen yapılara geçiş yapılmalıdır. Bu geçiş sırasında; tasarım, kontrol ve uygulama süreçlerinde çeşitli teknik zorlukların yaşanılması kaçınılmazdır. Bu teknik problemlerin üstesinden gelebilmek için, şebekelerin akıllanma süreçleri iyi tasarlanmalıdır. Ayrıca bu değişim ve gelişim süreçleri içerisinde hesapsal yöntemlerden en üst düzeyde faydalanılmalıdır.

Bu bölümde, ilk olarak literatür taramasıyla beraber tez çalışmasının amacı ve organizasyonu verilecektir, daha sonra tezin geri kalanında nelerin bulunduğu dair bir bakışla birlikte, tezin bilime katkısı sunularak birinci bölüm sona erecektir.

1.1. Literatür Taraması

Literatürde, akıllı şebekelere geçişte karşılaşılmakta olan problemlerin çözümü için hesapsal yöntemleri kullanan ya da yeni yöntemler öneren birçok çalışma mevcuttur. Bu problemlerden birine çözüm olarak önerilen talep tarafı yönetimi (DSM, Demand-side

Management), hesapsal yöntemlerin en fazla uygulandığı çalışma alanlarından biridir. Elektrik şebekesindeki arz ve talep sıklıkla değişirken, akıllı bir şebekenin bu değişime karşı sahip olduğu adaptasyon mekanizması, DSM olarak isimlendirilir. DSM, şebeke içerisindeki yük dağılımını dengelemeye çalışarak tepe-yüklerin oluşmasını engellemeyi amaçlar. Tepe-yüklerin oluşmasına engel olmak için yük kaydırma, tepe-yük kırpma, vadi doldurma, esnek yük şekli, stratejik koruma ve stratejik yük büyümesi gibi çeşitli temel teknikler bulunur [4-6]. Yük kaydırma; yükleri tepe-yük olduğu zamandan başka bir zamana kaydırarak, şebekede oluşmuş olan tepe-yük değerlerini azaltır. Tepe-yük kırpma ve vadi doldurma; en yüksek ve en düşük yük değerleri arasındaki farkı en düşük değere indirerek sorunu gidermeye çalışır. Diğer teknikler, tüketimi azaltmak gibi stratejik yöntemler ya da hesapsal yöntemlerden faydalanarak tepe-yük değerlerini azaltmayı hedefler.

DSM için yapılan çalışmaların bir kısmı, etmen-tabanlı hesapsal yöntemleri kullanarak yeni DSM modelleri geliştirmiştir [7-8]. Bazı araştırmacılar ise DSM modellerini oyun teorisinden faydalanarak kurgulamıştır [9–14]. Oyun teorisi ve çok-etmenli programlamanın yanı sıra, DSM yapılarını bilgisayar bilimindeki ağaç yapıları gibi diğer yöntemlerden faydalanarak da kurgulamak mümkündür [15]. DSM, elektrik şebekesi içerisinde iki-yönlü bir haberleşme altyapısı gerektirdiğinden geleneksel şebekeler üzerinde uygulanması mümkün olmayan bir yöntemdir. Akıllı şebekeler, iki-yönlü haberleşme altyapısına akıllı sayaçların geliştirilmesi ve kullanılmasıyla kavuşacaktır. Böylece, DSM gibi yapıların ve akıllı algoritmaların şebeke üzerine uygulanması mümkün olacaktır. Haberleşme altyapısına sahip olmak dışında akıllı şebekeler, sensör teknolojisi ve bilgi teknolojileri alanında geliştirilen yeni bir çok teknolojiye sahip olacaktır. Bütün bu teknolojiler bir araya getirilerek, yeni akıllı şebeke bileşenlerinin geliştirilmesi kaçınılmazdır [16-19].

DSM modellerinde kullanılan çok-etmenli programlama metodolojisi, akıllı şebeke alanında yapılan diğer çalışmalarda da sıklıkla kullanılır. [20]'de yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılımı için yeni bir çok-etmenli sistem önerilmiştir. Başka bir çalışmada ise EA'ların şebeke üzerindeki etkileri akıllı etmenler kullanılarak analiz edilmiştir [21]. Akıllı etmenler, DSM çalışmaları için yazılım çatısı kurmak amacıyla kullanılabilir [22], ya da etmenler kullanılarak bir açık arttırma mekanizması oluşturulup, DSM için enerji fiyatlaması yapılabilir [12,23-25]. Etmenlerin, akıllı şebeke çalışmalarındaki kullanımı sadece DSM modellemesi ve fiyatlama ile sınırlı değildir.

[26]'de risk tabanlı bir talep ayarlama yöntemi önerilmiştir. [27]'de ise sanal güç istasyonlarındaki enerji talebini tahmin etmek için etmenler kullanılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak, etmenlerle anomali tespiti için yapılmış araştırmalar da bulunur [28-29].

Akıllı şebekelere olan gereksinimi hızlandıran önemli sorunlardan birisi de, EA'ların bataryalarını eş zamanlı şarj ederken şebekenin karşılaştacağı yüksek yüklenme problemidir. Bu alanda, hesapsal yöntemleri kullanarak yapılmış çeşitli çalışmalar bulunur. Bu çalışmalardan biri, sorunu Genetik Algoritma (GA) kullanarak çözmeye çalışırken [30], bir diğer çalışma lineer programlama yöntemini kullanmıştır [31]. Bazı araştırmacılar, bu sorun için de çok-etmenli sistemleri kullanmayı düşünmüştür [32-33]. [32]'da çok-etmenli bir zamanlama stratejisi önerilmiş ve önerilen bu stratejinin üstünlüğü farklı zamanlama stratejileriyle kıyaslanarak gösterilmiştir. Benzer bir yaklaşıma sahip bir çalışmada [33], çok-etmenli sistemler evrimsel hesaplama yöntemleriyle bir arada kullanılmış ve dinamik koşullara tepki verebilen yeni bir çok-etmenli sistem geliştirilmiştir. Bu çalışmanın dezavantajı zamansal olarak maliyetin yüksek olmasıdır. Deneysel sonuçları elde etmek için, araştırmacılar üzerinde çalıştıkları popülasyonun boyutunu azaltmak zorunda kalmışlardır. Akıllı şebekeler için hesapsal yöntemler kullanılarak çözüm üretilirken, zamansal olarak maliyet hesaplamalarının üzerinde önemle durulması gerekir.

EA'ların eş zamanlı şarj problemi farklı açılardan ele alınabilir. Yapılan iki çalışmada, EA şarj istasyonları konumlandırılırken, uygun coğrafi koordinatlar bulunmaya çalışılmıştır [34-35]. Bir başka çalışmada ise koordine kümeleme algoritmaları kullanılarak, bir pilot kent içerisinde EA şarj istasyonlarının konulacağı yerler belirlenmiştir [34]. Parçacık sürü optimizasyonu yöntemi, şarj istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi için kullanılan bir başka hesapsal yöntemdir [35]. [36]'da şarj zamanlaması için piyango-tabanlı bir hesapsal yöntem önerilmiştir. Piyango-tabanlı zamanlama, bulanık kuyruk yapıları ya da GA ile oluşturulmuş çözümlerin birbirlerine göre farklı avantajları bulunur [37-38].

EA'lar her ne kadar şarj esnasında şebekeyi yükleyen bir sorun olarak görülseler de kimi araştırmacılar, bu arabaların sahip oldukları bataryalar sayesinde enerji depolama amaçlı kullanabileceklerini düşünmüştür. Tasarlanan geleceğin şebekeleri, sadece yenilenebilir enerji kaynaklarını bünyesine katmakla kalmayacak, EA bataryaları gibi farklı enerji kaynaklarından da faydalananı olacaktır. Bunun temel nedeni, trafiğe çıkan hibrit araba ve EA sayısının hızla artmasıdır. Elektrik motor satışlarının önümüzdeki 7 sene içerisinde yaklaşık bir milyar dolardan, üç milyar dolara çıkması beklenmektedir [39].

Öte taraftan, yapılan araştırmalara göre, bu arabaların ya da genel olarak trafikte olan arabaların %90'ı gün içerisinde park halinde bulunur [40]. Park halinde bulunan araba sayısının çok olması, bu arabaların bataryalarının kullanılarak dağıtık bir enerji depolama yapısı kurulması için araştırmacılara ilham vermektedir.

EA bataryaları kullanılarak şebekenin beslenmesi, Arabadan-Şebekeye (V2G, Vehicle-to-Grid) enerji aktarımı olarak adlandırılır. Literatürde, V2G konsepti üzerine yoğunlaşan çalışmaların sayısı artmaktadır. [41]'de EA bataryalarının şarj edilmesi ve boşaltılması incelenerek V2G'nin pratikte ne kadar mümkün olduğu incelenmiştir. Kimi araştırmacılar, iki-yönlü şarj kavramları üzerine çalışmalar yapmıştır [42-44]. [45]'de V2G'nin stokastik özellikleri, bir kuyruk problemi olarak ele alınmış ve V2G bir kuyruk yapısı olarak modellenmeye çalışılmıştır. [46]'da EA bataryaları kullanılarak bir ev enerji yönetim sistemi kurgulanırken, [47]'de ise rüzgar enerjisini depolamak için V2G kullanılmıştır. Bunların yanı sıra, V2G sisteminin ulusal elektrik şebekelerine katılmasını inceleyen az sayıda çalışma da vardır. Bu amaçla yapılan [48]'e göre %11'lik bir EA katılımı, 2030 senesine ait bir senaryoda Letonya elektrik şebekesi için 700 MW'lık bir ek kaynak oluşturacaktır. [49]'da, EA'lar dinamik olarak zamanlanarak V2G kapasite tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Özetle, V2G sisteminin, sağlıklı bir biçimde kurgulanabilmesi için iyi tahmin mekanizmalarına, akıllı kontrol yapılarına, dayanıklı araba bataryalarına ve her şeyden önemlisi bir akıllı şebekeye ihtiyaç duyulur. Bu açıdan bakıldığında, hesapsal yöntemlerin akıllı şebeke çalışmalarındaki önemi daha fazla ortaya çıkar.

Literatürde, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılımına odaklanmış bir çok çalışma bulunur. [50]'de hem V2G'nin hem de bunun tersi biçimde çalışan Şebekeden-Arabaya Aktarım (G2V) yapısının etkileri araştırılmış ve rüzgar türbinlerinin sadece gece saatlerinde üretim yapmalarının daha iyi olacağı sonucuna varılmıştır. [51]'de, EA'ların şebeke üzerindeki olumsuz etkisi, yeniden ağ yapılandırma tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. [52]'de çevresel faktörler detaylı bir biçimde incelenmiş ve V2G'nin karbon emisyonunun azaltılmasına olan etkileri araştırılmıştır. Çevresel faydaların yanı sıra V2G'nin sağladığı ekonomik faydalar da dikkat çekicidir. Bu amaç için yapılan [53]'de, V2G farklı motor türleri üzerinden ekonomik açıdan incelenmiştir. [54]'de ise V2G kullanımı için gereken ekonomik motivasyon, sağlayacağı hesaplı enerji depolama ve yedekleme imkanları üzerinden açıklanmaya çalışılmıştır. Bu araştırmalara karşı yönde iddialar barındıran az sayıda da olsa çalışma literatürde bulunmaktadır. Bunlardan dikkat çeken bir tanesinde, V2G'nin enerji dönüşümü kayıpları ve sürücü davranışları yüzünden

verimsiz bir sistem olacağı iddia edilmiştir [55]. Bu çalışmadaki aykırı fikirler, araştırmacılara V2G'nin potansiyel sorunlarına daha fazla dikkat etmeleri konusunda uyarıcı olabilir. Ancak, çalışmada bahsedilen olası sorunların çoğu, araba batarya teknolojisindeki gelişmeler ile ortadan kalkabilir ve V2G'nin sunduğu faydalar olumsuzlukların önüne rahatlıkla geçebilir. Bunun için, batarya teknolojilerinde yaşanan gelişmeler akıllı şebeke alanında araştırma yapan bilim insanları tarafından yakından takip edilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını veya dağıtık bir enerji kaynağı olarak EA'ları şebekeye dahil etmek çevre dostu yaklaşımlardır. Fakat bu kaynakların kullanımı sonucu birtakım sorunların ortaya çıkabileceği gerçeği göz ardı edilmemelidir. V2G, her zaman aynı kalan bir değerde elektrik enerjisi tedarik etmez. Benzer bir problem, rüzgar tribünleri ve foto-voltaik (PV) panellerle gerçekleştirilen üretimlerde de görülür [56]. V2G sistemlerinin, kullanıcı katılım motivasyonu dışında batarya ömrü, şarj süresi ve şarj seviyesi gibi sorunları da bulunur [44]. Sorunların aşılmasında, akıllı şebekelere ve bu şebekelerin barındırabileceği kontrol mekanizmalarına önemli görevler düşer. Hesapsal yöntemlere ise, kontrol mekanizmalarının geliştirilmesinde ihtiyaç duyulacaktır. Bu kaynakların dağıtık üretime ya da hibrit enerji sistemlerine entegrasyonu ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunur [57-59].

Akıllı şebekeler üzerinde yapılan çalışmaların önemli bir diğer kısmı, akıllı sayaçlar gibi akıllı şebeke bileşenlerini geliştirmeyi hedefler. Ancak, yeni teknolojilerin şebeke içerisinde kullanılmaya başlanması sonucu kişisel bilgi güvenliğiyle ilgili bir takım hassasiyetler ortaya çıkmıştır. Veri mühendisliği ve veri madenciliği kullanılarak büyük miktarlardaki veri, kısa zaman dilimlerinde analiz edilebilir. Enerji sektörü, bilgi teknolojileri alanında çalışan uzmanlarla işbirliği yaparak, akıllı bir şebeke içerisindeki bilgi güvenliğini sağlamak zorundadır [60]. Bir şebekede, güvenilirlik için güvenlik şarttır [61]. Gönderici doğrulaması ve tüketim bilgisinin güvenliğinin sağlanması, akıllı şebeke haberleşmesiyle karşımıza çıkan iki temel güvenlik sorunudur [62]. Akıllı şebeke uygulamaları ve hizmetleri, tüketicilerin kişisel bilgi güvenliklerini riske atmayacak bir biçimde tasarlanmalıdır [63]. Buna ek olarak sayaç okumaları, tüketicilerin hassas ev içi aktiviteleri ile ilgili bilgi ve örüntüler barındırdığı için paylaşılmamalı, güvenli depolanmalı ve üçüncü kurum ya da kuruluşlar tarafından kullanılmamalıdır [64]. Akıllı bir şebekedeki sayaç okumaları, bütün ev aletlerinin tüketimini takip edebildiği için bu veriler anonim olarak saklansa bile kişisel bilgi güvenliğini tehdit edebilir. O halde, akıllı

bir şebeke için geliştirilen hesapsal yöntemler kadar, bu yöntemlerin kullandığı verilerin ve haberleşme mekanizmalarının da güvenliğini sağlamak önemli bir konudur.

Akıllı sayaçlar, akıllı bir şebekenin en önemli bileşeni olarak görülür ve genellikle geleceğin güç ölçüm sistemleri olarak adlandırılırlar [65]. DSM gibi akıllı şebeke uygulamalarının hayata geçirilebilmesi için şebekede akıllı sayaçların kullanılması gerekir [66]. Kişisel bilgi güvenliğinin yeterince sağlanamaması, DSM sistemlerine katılımı azaltabilir ve bu sistemlerin gelecekteki başarısını tehlikeye sokar. Akıllı sayaçlar tarafından okunan bilgi, sadece akıllı şebeke uygulamaları tarafından kullanılabilir olmalı ve bunun dışındaki erişimlere kesinlikle müsaade edilmemelidir. Tüketicilerin kişisel bilgi güvenlikleri toplanan verinin birleştirilmesine dayanan bir güvenlik mimarisi ile korunabilir [67]. Bu tür mimariler için literatürde farklı hesapsal yaklaşımlar bulunur. Bu yaklaşımlar: güvenilir birleştirici, homomorfik kriptosistem, sır paylaşımı, kör imza, diferansiyel bilgi gizliliği ve güvenilen dağıtıcı olarak sınıflandırılabilir [68-71]. Birleştirme şemaları ise kendi arasında mesajların bitleştirilmesi ve matematiksel toplam işlemi şeklinde ikiye ayrılabilir [72]. Birleştirme kullanmayan teknikler çok kullanışlı değildir. Çünkü, bu tekniklerin uygulandığı yapılar hesaplama yetenekleri daha yüksek olan akıllı sayaçlara gereksinim duyarlar. Daha yüksek hesapsal maliyet daha fazla donanım gideri anlamına gelir. Böyle sistemleri kurmak, yenilemek ya da değiştirmek maliyetlidir. Bu nedenle, güvenilir bir birleştirme şeması kullanmak daha iyi bir çözüm olarak görülmektedir.

Kişisel bilgi güvenliği için kullanılan veri karıştırma işlemi, gerçek sayaç değerlerini ya da tüketicilerin günlük tüketim davranışlarını gizlemek için veriye gürültü ekleme işlemidir [73]. Bu işlem, kullanıcıların kişisel bilgilerini ya yerel olarak kullanıcı verileri iletilmeden önce bu verilere rasgele değerler katarak ya da merkezi bir birleştirici kullanarak korur [74]. Karıştırılmış zaman serisi verisi akıllı sayaçlar ile iletilerek, gerçek kullanım verisi korunabilir. Gürültü ekleme, k-anonimliği, veri sıkıştırma ve geometrik dönüşüm gibi farklı veri karıştırma teknikleri vardır [75]. Bu yöntemlerin dışında, diferansiyel gizlilik yöntemi kullanılarak dağıtık bir gürültü oluşturulabilir [76]. Ancak, bu yöntem zaman serisi verilerindeki korelasyonlar ve yüksek dalgalanmalar nedeniyle etkin bir gizlilik elde etme konusunda dezavantajlara sahiptir [77]. Bayes Kestirim ve Temel Bileşenler Analizi yöntemleri de, gürültü üretiminde ve veriyi yeniden oluşturmada kullanılabilir [78]. Bu yöntemlerle ilgili temel problem, gürültünün veriden çıkartılmasının zor bir işlem olması ve bu işlemin veri kayıplarına neden olabilmesidir. Verinin

şifrelenerek gönderilmesi için homomorfik sır paylaşımı gibi yöntemler de kullanılabilir. Homomorfik şifreleme, şifre çözme sırrını bilmeden bir mesaj kümesindeki verileri kullanarak şifrenin çözülmesini sağlar [79]. Semantik olarak güvenli olmayan homomorfik şemalar, şebekede güvenlik sorunlarına neden olabilir [80]. Akıllı şebekelerde veri iletilirken ya da veri saklanırken, kişisel bilgi güvenliğinin sağlanması amacıyla yapılan çalışmalarda da hesapsal yöntemlere ihtiyaç duyulur. Farklı hesapsal yöntemlerden en uygun olanlarını belirlemek, sadece donanımsal açıdan maliyeti indirmekle kalmaz bütün yapının güvenliğinin de artmasını sağlar.

1.2. Tezin Amacı ve Organizasyonu

Elektrik şebekelerinin, önümüzdeki yıllarda elektromekanik olarak kontrol edilen sistemler olmaktan tamamen çıkarak elektronik olarak kontrol edilen yapılara dönüşmesi beklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları gibi şebeke yapısını besleyen kaynakların çeşitliliğinin artmasının yanı sıra, EA örneğinde olduğu gibi şebeke yapısından beslenen unsurlar da çeşitlenmektedir. Üretim ve tüketim taraflarında yaşanacak köklü değişimler, doğal olarak şebekenin kendisinde de bir değişime ihtiyaç duyulmasına neden olur. Elektrik şebekelerinin, enerji tüketimindeki değişime ayak uydurabilmek için verimliliklerinin artırılması gerekir. Bunun için şebekenin unsurları yenilenmeli ve bu unsurlar teknolojik gelişimlerden faydalananak akıllı davranış sergileyen yapılar haline getirilmelidir. Bu tez çalışmasında da, bir elektrik şebekesini daha akıllı, çevreci ve ekonomik hale getirebilmek için bilgi sistemlerinin ve hesapsal yöntemlerin kullanılması amaçlanmıştır.

Şebekeler için hesapsal yöntemler kullanılarak tasarlanan akıllı uygulamaların iki önemli katkısı olacaktır. Bunlardan birincisi, kısa süreli bir elektriksel kesintinin yaratabileceği büyük maddi kayıpların önüne geçebilecek akıllı mekanizmaların kurgulanmasıdır. 2016 yılının son aylarında, Türkiye’de hava sıcaklıklarının aşırı düşmesi sonucu ısınma amaçlı doğalgaz tüketimi belirli bir zaman dilimi için artmıştır. Bu nedenle, doğalgazdan elektrik üreten santrallere verilen doğalgaz miktarı azaltılmış ve bu santraller üretim yapamayacak hale gelmiştir. Bunun sonucunda, ülke genelinde elektrik arzı azalmıştır ve İstanbul ilinde uzun süren elektrik kesintileri yaşanmıştır. İstanbul Organize Sanayi bölgesindeki bir günlük kesintinin maliyeti 100 milyon dolar olarak ifade edilmektedir. Bu değerden, oluşan zararın ekonomik açıdan önemi daha kolay anlaşılır.

2015 yılında yaşanan büyük bir kesinti sonucu metro seferleri yapılamamış, baz istasyonları enerjisiz kalarak cep telefonu şebekelerinde kesintiler olmuştur. Bu kesinti sırasında, ülke genelinde çok sayıda sorun yaşanmış ve gündelik yaşam felce uğramıştır. Hesapsal yöntemler kullanılarak geliştirilen akıllı şebeke uygulamaları, talep planlamasının daha doğru biçimde yapılmasına ve talebin yönetilebilmesine olanak sağlayarak, elektrik şebekelerini daha dayanıklı ve sağlam yapılar haline getirebilir.

Hesapsal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen akıllı şebeke uygulamalarının bir diğer avantajı yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırabilmeleridir. Bu katılım, hem maddi kazanımlar sağlar hem de dolaylı yoldan doğaya zarar veren CO₂ salınımının azaltılmasına katkıda bulunur. Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmalar, EA üretiminde yaşanan gelişmelere paralel bir biçimde yürümektedir. Bir elektrik şebekesi, eğer akıllı yapılarla ve hesapsal yöntemlerle desteklenerek akıllı şebekeye dönüştürülmezse; böyle bir şebekede EA'ların yaygınlaşması da zorlaşacaktır. Benzer biçimde, akıllı şebeke yapısına geçememiş ülkelerin, Endüstri 4.0'a adapte olabilmeleri de çok zor olacaktır. Ülkemizin, sanayide yaşanan bu köklü değişimi kaçırmaması hayati düzeyde önem taşır. Sadece bu açıdan değerlendirilse bile, akıllı şebeke ve hesapsal yöntem çalışmalarının ne kadar önemli olduğu kolaylıkla görülebilir. Tezin ilerleyen bölümlerinin organizasyonu aşağıda verilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde; akıllı şebekeler hakkında temel bilgiler verilmiştir. Bu bölüm içerisinde, akıllı bir şebekenin sahip olması gereken temel özellikler ve akıllı şebeke standartları anlatılarak, akıllı şebekeler ile geleneksel şebekeler arasındaki farklılıklar vurgulanmıştır. Dünyada ve ülkemizde akıllı şebekeler alanında yapılan çalışmalar, bu bölümün son kısmında yer almaktadır.

Üçüncü bölümde; ilk olarak akıllı şebekelerin gereksinimleri ve akıllı şebekeye geçiş için yapılan çalışmalarda sıklıkla karşılaşılan sorunlar anlatılmıştır. Sonra, bu geçiş yardımcı olabilecek ya da geçiş sırasında karşılaşılabilecek olası sorunlar için kullanılabilecek hesapsal yöntemlerden bazıları tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde; akıllı şebeke alanındaki araştırma konularından biri olan DSM için Pisagor bulanık kümeleri (Pythagorean fuzzy sets, PFS) ve Bayes oyun teorisi kullanan yenilikçi bir yöntem verilmiştir. PFS'yi, etmen eylem mekanizmasında kullanan bu yöntemin, Bayes oyun teorisi için matematiksel tanımlaması yapılmıştır. Bu yöntemin, DSM amacıyla kullanımı sonucu elde edilen sonuçlar bölümün son kısmında sunulmuştur.

Beşinci bölümde; akıllı sayaçlardan elde edilen okuma verilerinin güvenliğinin sağlanabilmesi için zaman-serileri veri birleştirme yöntemi tanıtılmıştır. Bu yöntem, veri karıştırma tekniklerinden faydalananak zamansal karmaşıklığı düşük bir güvenlik sağlayabildiği için akıllı sayaçlar gibi sınırlı donanıma sahip cihazlar için uygundur. Bölümün sonunda, bu yöntemin, kişisel verileri koruma kabiliyeti ve saldırılara karşı dayanıklılığı çeşitli tahmin yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Altıncı bölümde; EA'ların eş zamanlı şarj edilmeleri sırasında şebekede doğuracakları yüklenme sorunu için bir piyango tabanlı şarj yönetim sistemi önerilmiştir. Modern işletim sistemlerinde bulunan süreç zamanlama algoritmalarından esinlenerek kurgulanan bu yöntemin başarımı, genetik algoritma kullanan ve rasgele zamanlama kullanan alternatif yöntemlerle kıyaslanarak analiz edilmiştir.

Yedinci bölümde; yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu için bir V2G modeli benzetimi yapılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, V2G ve yardımcı kaynaklardan oluşan bir hibrit enerji yönetim modeli üzerinden, araba bataryalarının mevcut şarj durumları ve araç sahiplerinin sisteme katılma isteği gibi farklı parametrelerle V2G katılımı incelenmiştir.

Sekizinci bölümde, tez çalışması süresince elde edilen sonuçlar tartışılmış ve dokuzuncu bölümde de ileriye dönük düşünceler sunulmuştur.

1.3. Tezin Bilime Katkısı

Akıllı şebekeler, son yıllarda popülerliği hızla artmakta olan ve stratejik önemi nedeniyle çok sayıda ülke tarafından öncelik ve önem verilen bir araştırma konusudur. Farklılaşan tüketim ve üretim profilleri sonucu, geleneksel şebeke yapısında birtakım yetersizlikler ortaya çıkmıştır. Akıllı şebekeler, bu yetersizlikler sonrasında bir ihtiyaç olarak ortaya çıkar. Fakat geleneksel şebekelerden akıllı şebekelere geçiş kolay bir işlem değildir ve beraberinde bazı sorunları getirir. Bu tez çalışması ile akıllı şebekelere geçiş sürecinde yaşanabilecek sorunların çözümü için hesapsal yöntemlerin kullanımı amaçlanmıştır. Bu tezde kullanılması önerilen hesapsal yöntemler, yaygın bir biçimde karşılaşılan bazı akıllı şebeke sorunlarına çözüm olabilir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, önerilen DSM yapılarının büyük bir kısmında daha çok yöntemin kurgulanmasına ağırlık verildiği, fakat tüketici davranışının gerçek hayata yakın bir biçimde modellenmeye çalışılmadığı görülmüştür. Hatta önerilen

modellerin bir çoğu, eksik veriyle baş edebilmek için çözüm yollarına sahip değildir [12,20,22-25]. Doğal olarak, bir sistem içerisindeki talebin en baştan tamamen bilindiği varsayımına dayanan ya da çeşitli öngörü mekanizmalarıyla talebi tahmin etmeye çalışan çözümler karşımıza çıkar. Talebin en başından bilinmesi varsayımı gerçekçi bir yaklaşım değildir, öngörü mekanizmaları ise zamansal karmaşıklığı yüksek olan ve tam olarak güvenilir olmayan yaklaşımlardır. Tez çalışmasında önerilen model, diğer modellerden farklı olarak tahmin edilemeyen tüketici davranışları da dikkate alır. PFS ve Bayes oyun teorisi yöntemi, bu modele esneklik kazandırmak için kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem, eksik bilginin olduğu durumlardaki talebin etmen-tabanlı bir sistem tarafından işlenebilmesini mümkün kılar. Bu yöntem, PFS'yi Bayes oyunlardaki oyuncuların eylem mekanizmalarında kullanan literatürdeki ilk çalışmadır.

Hem DSM modellerinde hem de akıllı şebeke için geliştirilen bütün alt sistemler ve çözümlerde, sistem performansının yüksek olması ve sistem içerisinde bilgi güvenliğinin korunması çok önemlidir. Tez çalışmasında önerilen zaman-serileri veri birleştirme yöntemi, şifreleme ve karıştırma tekniklerini bir arada kullanarak zamansal karmaşıklığı yüksek olmayan, kayıpsız bir sayaç verisi aktarımı gerçekleştirir. Literatürde bulunan, diğer kişisel bilgi güvenliğini koruma amaçlı veri birleştirme yöntemlerinden farklı olarak, bu çalışmadaki veri birleştirme ve bilgi güvenliğini koruma maliyetleri oldukça düşüktür. Bu durumun temel faydası, altyapı kurulum maliyetlerini azaltmasıdır. Bu faydanın yanında, karıştırılmış verilerin yeniden oluşturulması için veri dağılımına ya da veri modeline gereksinim duyulmaz ve literatürdeki diğer çalışmaların aksine, verinin yeniden oluşturulması işlemi kayıpsız bir biçimde gerçekleşir.

EA'ların kullanımının yaygınlaşması, akıllı şebekeler alanını yakından ilgilendiren bir konudur. Bu arabaların bataryalarının eş zamanlı şarj edilmeye çalışılması şebeke için bir sorun oluştururken, bataryaların bir depolama unsuru olarak kullanılmaya çalışılması şebekenin karşılaştığı bazı sorunlara alternatif bir çözüm sunabilir. Tez çalışmasında, modern işletim sistemlerinde kullanılan hesapsal yöntemlerden biri olan piyango-tabanlı zamanlama yönteminden faydalanılarak bir EA şarj yönetimi sistemi önerilmiştir. Bu yöntem, performans açısından genetik algoritma tabanlı bir çözümden de, rasgele zamanlama algoritmasından da daha iyi sonuç vermektedir. Literatürde, piyango-tabanlı zamanlama stratejisini bu amaç doğrultusunda kullanan çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu az sayıdaki çalışmadan farklı olarak, önerilen bu yöntem toplam

ayrılabilir enerji miktarını kısıtlayarak tepe-yük değerlerinin azaltılabilmesiyle literatüre katkıda bulunur.

Son olarak tez çalışmasında, hibrit bir enerji yönetim sisteminde yardımcı bir kaynak olarak kullanılan V2G yapısı farklı senaryolarda ekonomik açıdan analiz edilmiştir. Batarya ömrünü dikkate alan akıllı stratejilerin potansiyeli değerlendirilerek literatüre katkıda bulunulmuştur. Bu katkılara ek olarak, sürücü davranışı da benzetim çalışması içerisinde kullanılmıştır.



2. AKILLI ŞEBEKE TANIMI, TEMEL ÖZELLİKLERİ VE STANDARTLARI

Elektrik şebekeleri, ilk olarak sınırlı coğrafi alanları besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Zaman içerisinde kullanımda olan şebeke sayısının artmasıyla, bu sınırlı olacak biçimde belirlenmiş coğrafi alanlar birbirlerine bağlanmaya başlandı. Bu bağlantının doğal bir sonucu olarak, birbirlerine bağlı elektriksel sistemlerinin çalışma prensiplerinin nasıl olacağı ve temel elemanlarının neler olacağı araştırılmıştır. 1960'lı yıllara varılmadan, bu prensipler belirlenerek şebekeler üzerinde uygulanmaya başlanmıştır. Prensip belirlenirken, bilgisayarlar ve haberleşme ağları günümüzdeki kadar yaygın kullanılmıyordu ve teknolojik açıdan daha ilkel durumdaydı. Günümüzde, bilgisayarlar bir iletim şebekesinin her katmanında yoğun bir biçimde kullanılan, planlama ve optimizasyon amaçlarına, teçhizatın hızlı kontrolüne ve saha verilerinin işlenmesine hizmet etmektedir. Bilgi teknolojilerindeki bütün bu ilerlemeye rağmen, elektrik şebekeleri üzerinde bu gelişmelerin tatbik edilmesi istenilen bir seviyeye ulaşmamıştır [81,82]. Elektrik şebekeleri, dünyadaki en eski altyapılardan biridir ve teknolojide yaşanan onca değişime rağmen hala bir çok ülkede büyük değişimlere uğramadan kullanılmaktadır.

Modern bir elektrik şebekesindeki yapıların; operatör kontrolünü en aza indirmesi, sorunlara daha hızlı tepki vermesi, şebeke koşullarına göre çalışmalarını optimize edebilmesi ve farklı enerji kaynaklarını koordine ederek kullanabilmesi istenir. Kısaca bu yapılardan istenilen, onların daha akıllı olmasıdır. Akıllı yapılar, daha az maliyetle ve daha güvenilir bir biçimde, farklı yöntemlerle elde edilen elektrik enerjisinin şebekeye aktarımını sağlayabilir [83-85].

Tablo 2.1'de, gelişmekte olan ülkelerin elektrik enerjisine olan ihtiyaçlarındaki artış gösterilmiştir [86,87]. Sürekli artan bu enerji ihtiyacı ve buna bağlı olarak enerji fiyatlarındaki pahalılaşma nedeniyle Avrupa, ABD ve başta Hindistan olmak üzere uzak doğu ülkeleri, geleceğin şebekeleri nasıl olmalı konusu üzerine yoğun çalışmalar yapmaktadır [88-90]. ABD kongresinden, son on yılda elektrik iletimi ve kullanımıyla ilgili yeni düzenlemeler ardı ardına geçerken; Avrupa Birliği ülkeleri, Avrupa Teknoloji Platformu (ETP) projesi bünyesinde, 2020 yılında Avrupa'da elektrik şebekelerinin nasıl olacağını tasarlamaktadır.

Tablo 2.1. Gelişmekte olan ülkelerin elektrik enerjisi ihtiyaçlarındaki artış (2007-2050).

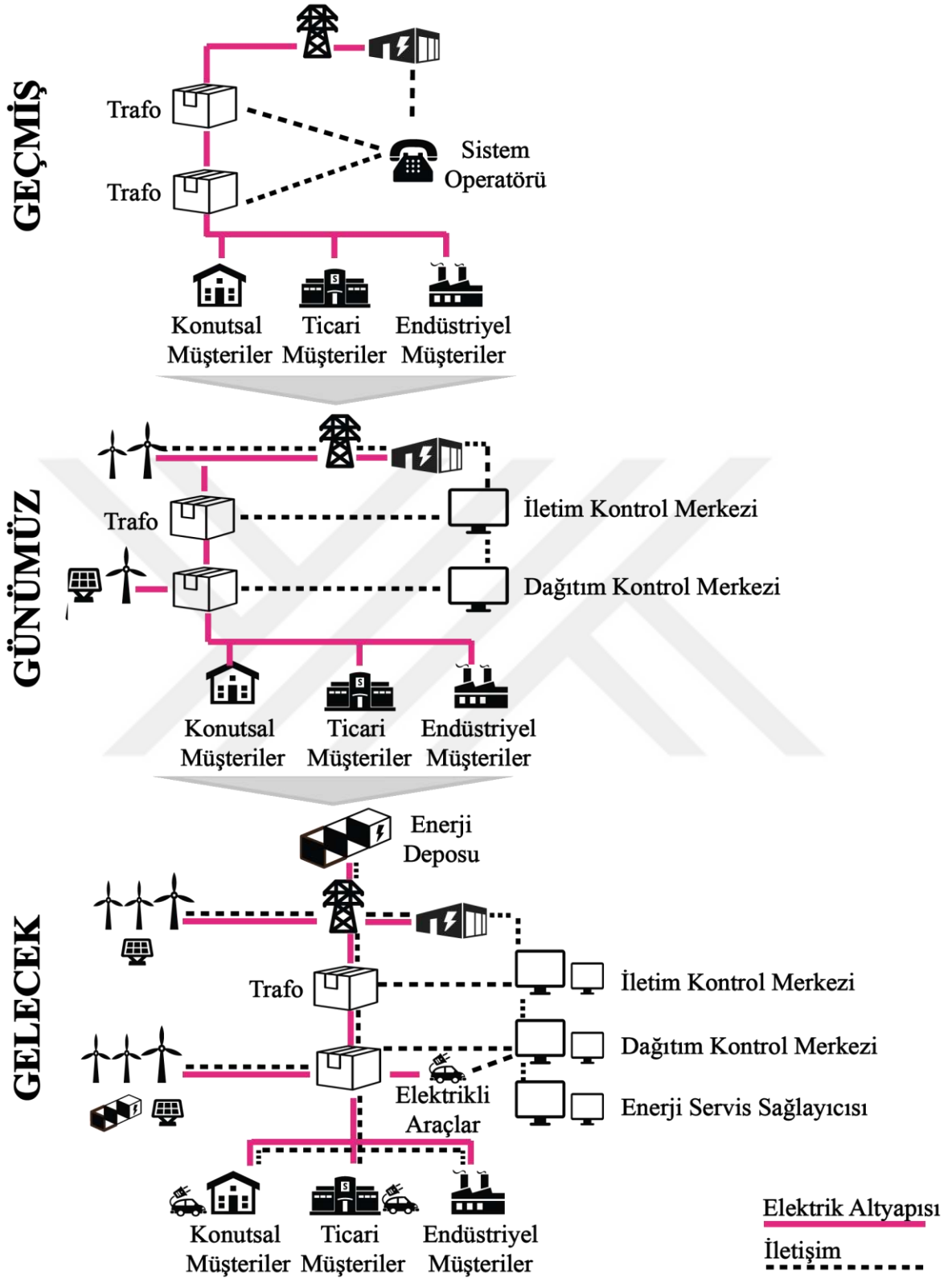
Bölge	2007 Senesi Elektrik Enerjisi İhtiyacı (TWh)	2050 Senesi Elektrik Enerjisi İhtiyacı (TWh)	2007-2050 Yüzde Büyümesi (%)
Dünya	16,999	36,948	117
Geçiş İçerisinde Olan Ekonomiler	1149	2348	104
Çin	2856	9500	233
Hindistan	567	3453	509
Diğer Gelişen Devletler (Asya)	853	2822	231
Afrika	521	1691	225
Latin Amerika	808	2062	155
Ortadoğu	594	2537	327

Ülkeleri, elektrik şebekelerinde iyileştirmeler yapmaya teşvik eden nedenlerden biri, onların yenilenebilir enerji kaynaklarını daha fazla kullanma isteğidir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin çoğunda, şebekede kullanılan enerjinin asgari olarak belirli bir yüzdesinin yenilebilir olması konusunda düzenlemeler ve çalışmalar yapılmaktadır. Şebeke çalışmalarına teşvik eden bir diğer neden ise elektrik kesintileridir. Bu kesintilerin yarattığı özellikle ekonomik açıdan olumsuz durumları engellemek ya da azaltabilmek için ülkeler daha dayanıklı bir şebeke yapısına sahip olmayı arzu ederler. Şebeke dayanıklılığı konusundaki en tipik örnek, bir F-15 savaş uçağı pilotunun yaşadığı problem ve sonrasındaki gelişmeler üzerinden verilmektedir. Bu pilot, beraber uçuş yaptığı arkadaşının oluşturduğu hava akımı yüzünden uçağının sağ kanadında problem yaşar ve sağ kanadını %90 oranında kaybeder. Kontrolü ve simetrisi kaybedildiği için düşebilecek olan uçağını zorlukla da olsa yere indirir. Bu olay üzerine, pilotajın uçağı düşmekten nasıl kurtarabildiği hava tünelleri kullanılarak test edilir. İlerleyen yıllarda, NASA ve Boeing tarafından hataya-uyabilen akıllı bir uçuş kontrol sistemi geliştirilir. Uçuş kontrol sistemi, yapay sinir ağlarını kullanarak uçuş sırasında meydana gelebilecek beklenmeyen hataların üstesinden gelmeyi amaçlar [91]. Bu örnek, teknolojik gelişmeleri kullanarak kendi kendini onarabilen bir şebeke geliştirilmesi konusunda araştırmacılara ilham verir.

2.1. Akıllı Şebekenin Tanımı

Elektrik şebekelerini akıllandırmak için yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmalarda ortak nokta, geleceğin elektrik şebekesinin bileşenlerini benzer bir biçimde tanımlıyor olmalarıdır. Genellikle şebeke bileşenlerinin düşük maliyetli, birbiriyle uyumlu, tepki süresi hızlı, ekolojik sistemlere duyarlı, esnek kullanımlı ve gerçek-zamanlı çalışabilen bileşenler olmaları istenir. Bu beklentileri kullanarak bir akıllı şebeke tanımlaması yapılabilir ya da geleceğin şebekesine dair beklentiler kullanılarak bir tanım geliştirilebilir. Akıllı şebeke, geleneksel şebekenin regülasyon, teknoloji ve uygulama bakımından geliştirilmiş halidir. ABD Enerji Bakanlığı, akıllı bir şebekeyi şu şekilde tanımlar: Akıllı şebeke her bir müşteriye ve düğümü kontrol eden ve gözlemleyen, güç istasyonu ile kullanıcı arasında iki-yollu elektrik ve bilgi akışı sağlayan, tamamen otomatik bir güç dağıtım ağıdır [92]. Dolayısıyla, akıllı şebeke mevcut şebekenin akıllanmasından ibaret bir yapıymış gibi düşünülmemelidir ya da başka bir ifadeyle geleneksel şebekeler akılsız değildir. Bu tarz bir isimlendirmenin yapılmasının nedeni, geleceğin şebekesini tasarlamak için bir vizyon ortaya koymaktır.

Geleneksel şebeke yapısı, ufak tefek gelişmeler yaşansa da uzun yıllar boyunca çok değişmeden kalmıştır. Şekil 2.1’de şebeke yapısının geçmişten günümüze nasıl bir gelişim geçirdiğinin ve geleceğin akıllı şebekesinin nasıl olacağının bir gösterimi verilmiştir [86]. Geçmişte, bir şebeke yapısının en üst katmanında üretim merkezleri bulunurdu ve müşteriler bu yapı içerisinde en alt katmanda yer alırdı. Ayrıca, kısıtlı bir haberleşme mekanizması bulunurdu. Bu mekanizma, sadece sorumlu şirketle üretim ve dağıtım birimleri arasındaki haberleşmeyi sağlardı. Doğal olarak, bu sistem tek-yönlü bir yapıdaydı ve böyle bir sistemde gerçek zamanlı bir izleme yapmak mümkün değildi. Günümüzde, şebeke yapısı içerisinde iletim kontrol merkezleri, yenilenebilir kaynaklar ve daha gelişmiş bir haberleşme altyapısı eklenmiştir. Müşteriler gene en alt katmanda yer alır ve şebekeyle aralarında haberleşme sağlayacak bir altyapı bulunmaz. Gelecekte ise, daha fazla yenilenebilir kaynağın kullanıldığı, enerji depolama ünitelerinin yer aldığı ve EA şarj istasyonlarının da bulunduğu bir şebeke yapısının oluşması düşünülmektedir. Bu yapının haberleşme altyapısı, elektrik altyapısına paralel biçimde her bileşen için mevcut olacak ve bütün şebekeyi kapsayacaktır.



Şekil 2.1. Elektrik şebeke yapısının zaman içerisindeki gelişimi.

Şebeke yapısının zaman içerisindeki gelişimi, şebeke yapısında bundan sonraki gelişmelerin bilgi ve haberleşme alanlarında olacağını gösterir. Haberleşme alanında yaşanan gelişmeler, akıllı teknolojilerin şebekeler üzerine uygulanabilmesine imkan tanır. Bu açıdan bakılırsa akıllı şebeke; mevcut elektrik şebekesi içerisinde, gelişmiş otomasyonlara ve bilgi teknolojisi altyapısına sahip, elektrik ve haberleşme altyapılarının bir birlikteliği olarak da tanımlanabilir [93,94]. Kimi araştırmacılar, geleneksel şebekelerin çeşitli yazılımlar ve otomasyonlar kullandığını, bu nedenle de “akılsız” olmadıklarını savunurlar [94]. Geleneksel şebeke yapısı tabi ki “akılsız” değildir, burada önemli olan akıllı şebekenin geleneksel şebekeyi çok büyük ölçüde değişime uğratmasıdır. Akıllı bir şebeke yapısının geleneksel bir şebekeden nasıl farklılaştığını göstermek amacıyla Tablo 2.2’de, şebekeler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır [94-97].

Tablo 2.2. Geleneksel şebekelerin akıllı şebekelerle karşılaştırılması.

Geleneksel Şebekeler	Akıllı Şebekeler
Elektromekanik	Dijital/Mikroişlemciler
Tek-yönlü haberleşme ya da yerel iki yönlü haberleşme	Entegre çift-yönlü haberleşme
Merkezi üretim yaygın	Çok sayıda dağıtık üretim kaynağı
Hiyerarşik yapı	Ağ yapısı
Az sayıda algılayıcı	Çok sayıda algılayıcı
Elle onarım	Kendi kendine iyileşebilen otomatik onarım
Kısıtlı koruma, gözlem ve kontrol sistemleri, çökmeler ve kesintiler	Adaptif koruma, kendi kendini gözlemleme ve izole edebilme
Kesintiler üzerine yoğunlaşma	Güç kalitesi üzerine yoğunlaşma
Fiziksel saldırılara açık	Siber saldırılara açık
Elle kontrol/test	Uzaktan erişimli kontrol/test
Kısıtlı kontrol	Yaygın kontrol
Müşteriler için az seçenek	Müşteriler için çok seçenek
Müşteri katılımı kısıtlı	Müşteriler aktif, DSM gibi sistemlerin parçası
Kısıtlı şebeke zekası	Derinliğe sahip şebeke zekası

Bu karşılaştırma tablosu incelendiğinde, akıllı şebekelerin geleneksel şebekelerden gelişmiş algılayıcıları, kontrol teknolojileri, haberleşme mekanizmaları, hesapsal yöntem

ve akıllı ölçüm aygıtları kullanmaları gibi özellikler bakımından ayrıldığı görülür [98]. Bu özellikleri sayesinde akıllı bir şebeke, geleneksel şebekeye göre daha etkin, güvenilir, yenilenebilir ve esnek bir yapıdadır. Akıllı şebeke, satın alınıp kurulumu yapılacak tek bir ürün ya da mevcut şebekeyi tek bir dokunuşla değiştirecek bir yöntem olarak düşünülmemelidir. Aksine, çok fazla sayıda ve yapıları karmaşık olan bileşenler içerir. Akıllı şebekeler, geleneksel şebekelerden farklı olarak aşağıdaki bileşenlere sahiptir [94]:

- Hızlı ve doğru tepki verebilen akıllı sayaçlar. Bu sayaçlar, DSM yapılarında, uzaktan sistem gözlemlenmede ve tüketim göre fiyatlandırma yapan yöntemlerde kullanılırlar.
- Şebekenin her noktasıyla, gerçek zamanlı veri alışverişi yapılmasını sağlayan açık mimarili, yaygın standartlara uygun iki-yollu haberleşme mekanizması.
- Hızlı bir biçimde arıza tespiti yapabilen ve kendi kendine iyileşebilmeyi sağlayacak biçimde müdahalelerde bulunan gelişmiş kontrol sistemleri.
- Gelişmiş ara-yüzlere, karar vermeye yardımcı yapılara, analitik yeteneklere ve kullanıcı dostu görselleştirmelere sahip bir yazılım mimarisi. Bu mimari, şebeke operatörleri ve yöneticilerinin bilgi-işlem çalışanlarıyla etkin bir biçimde işbirliği yapabilmelerini sağlar.

2.2. Akıllı Bir Şebekenin Sahip Olması Gereken Temel Özellikler

Akıllı şebekeler üzerine yapılan çalışmaların temelinde, mevcut şebekelerin hızla gelişen teknolojiye faydalandırılması düşüncesi yatar. Araştırmacılar, genellikle akıllı şebekeler nasıl olmalı, hangi bileşenleri barındırmalı ve nasıl tasarlanmalı sorularına cevap arar. Bu cevaplara göre; bir şebekenin akıllı sayılabilmesi için sahip olması gereken bazı özellikler aşağıda verilmiştir [98,99]:

1. Sayısal Yapı: Hızlı ve güvenilir ölçüm yapabilmek, kontrol ve hesaplama görevlerini gerçekleştirmek, şebekeyi korumak, iletişim sağlayabilmek ve kolay bakım yapabilmek için, bütün yapının sayısal bir platform üzerine kurgulanması gerekir.
2. Esnek Yapı: Bir şebeke; gelişmelere çabuk adapte olmalı, değişik coğrafi bölgelere uygulanabilmeli ve farklı kontrol stratejileri ile denetlenebilmelidir. Ayrıca, şebeke içerisindeki yazılım ve donanım bileşenleri tak-çalıştır yükseltme imkanına sahip olmalıdır.

3. Dayanıklılık: Bir şebeke, değişen iklimsel koşullarından ya da doğal afetler gibi dış etkenlerden etkilenmeden, herhangi bir kesinti olmadan çalışmasını sürdürebilmelidir. Bu tür problemlerle karşılaşılnca, en kısa sürede bir çözüm üretebilmelidir.
4. Akıllı Yapı: Akıllı teknolojiler ve hesapsal yöntemler, bir şebeke içerisinde gömülü olarak kullanılmalıdır. Sistem, kararlı bir yapı oluşturabilmek için çeşitli analizleri kendisi yapabilmeli; olası arızalarda kendisi için çözüm bulabilmelidir.
5. Kendi Kendini Onarabilme: Bir şebeke, gerçek zamanlı olarak kendi durumunu gözlemleyebilmeli ve çevrim-içi hesapsal yöntemler kullanarak hatalara karşı önlem alabilmelidir.
6. Çevreci Yapı: Akıllı bir şebekenin sadece verimlilik üzerinden çevre dostu olması yeterli değildir. Geri dönüşümlü bileşenler ve yenilenebilir enerji kaynakları da kullanılmalıdır. Yenilikçi teknolojilerin bir kısmının amacı, daha düşük karbon salınımı olmalıdır.
7. Ölçeklenebilirlik: Tüketim taleplerinin aşırı değişken olduğu bir dünyada, şebekelerin ölçeklenebilir olması gerekir. Ölçeklenebilirlik, kesintiye uğramadan kapasite arttırmayı ya da azaltmayı mümkün kılar.

Akıllı şebekenin sahip olduğu en önemli özelliklerden biri, elektrik enerjisinin üretiminden son kullanıcıya dağıtımına kadar şebekenin herhangi bir noktasında meydana gelebilecek bütün olaylara karşı bir stratejisinin olmasıdır [100]. Bu şebekelerde, sürprizler ve beklenmedik olaylar yaşanmaz. Akıllı şebekeye, güvenilirlik ve etkinlik kazandıran bu önemli özelliği hesapsal yöntemler kullanılarak geliştirilen mekanizmalarla elde edilir. Akıllı şebekede, aşağıdaki işlemler için çeşitli hesapsal uygulamalar kullanılır [1]:

- DSM
- Koşula bağlı varlık yönetimi ve bakımı
- Tüketici yük kontrolü
- Çıkış benzetimi
- Dağıtım sisteminin gerçek zamanlı analizi
- Acil durumlar için kurtarma araçları
- Arıza tespiti
- Besleme hattı gözlemleyicileri
- Entegre gerilim kontrolü

- Akıllı cihazların katılımı
- Yük tahmini
- Çok seviyeli besleme hattı konfigürasyonu
- Ağ yönetimi ve ağ optimizasyonu
- Güç kalitesi uygulamaları

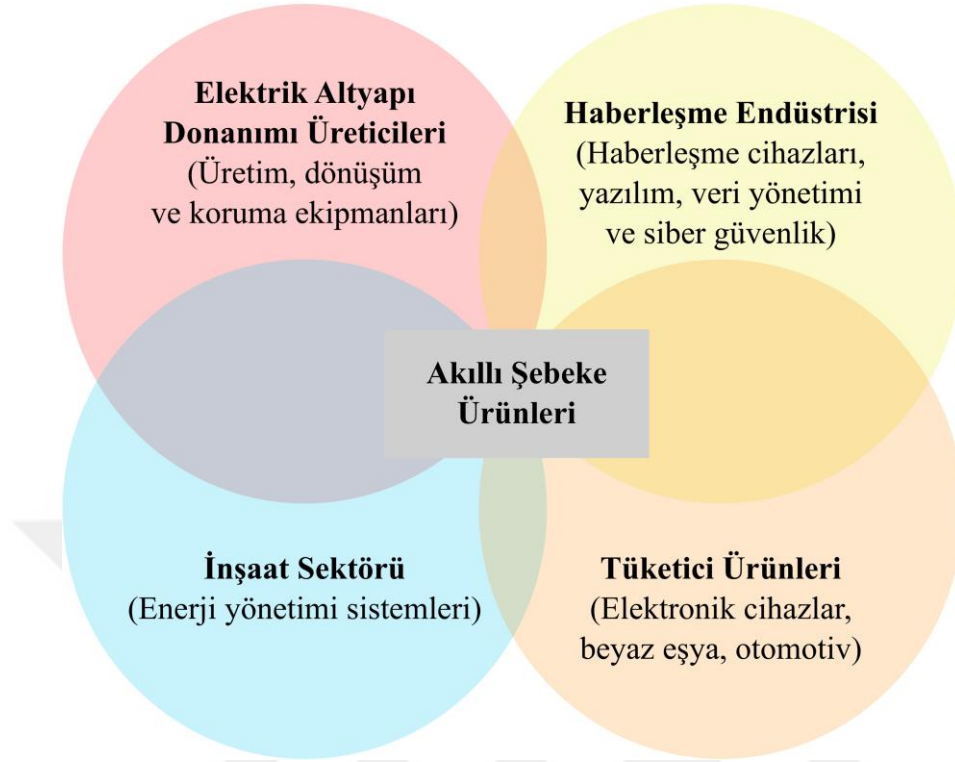
2.3. Akıllı Şebeke Standartları

Standartlar olmadan, teknolojinin her alanında yaşanan gelişimlerin, sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi mümkün olmamaktadır. Akıllı şebekeler gibi büyük altyapı sistemleri kurgulanırken, bu yapıya uygun standartların da geliştirilmesi gerekir. Standartlar, yeni teknolojilerin geliştirme maliyetlerini düşürür. Teknolojilerin geriye dönük uyumlu çalışmalarını, daha güvenli olmalarını ve sorunsuz bir biçimde yaygın olarak kullanılabilmelerini sağlar. Akıllı şebeke yazılımları ve donanımları, farklı endüstri kolları tarafından geliştirildiği için daha önce bir arada çalışmamış bu endüstrilerin ortak standartlar geliştirip kullanmaları gerekir. Akıllı şebekeler içerisinde çok sayıda farklı teknolojilerin kullanıldığı, çeşitli senaryolar düşünülerek görülebilir. Örneğin, akıllı şebekenin, dağıtım sistemlerindeki kontrol üniteleri ve evlerdeki sayaçlarla irtibat kurduğu bir senaryo kurgulamak mümkündür. Başka bir senaryoda bir akıllı şebeke; akıllı ev aletleri, ev kontrol sistemleri ve şebekeyle haberleşebilir ya da EA'larla etkileşimde bulunabilir. Benzer çok sayıda yeni senaryo rahatlıkla kurgulanabilir. Bu senaryoların sorunsuz gerçekleşebilmesi için bir çok endüstrinin birlikte tanımlamalar yapması, protokoller ve standartlar geliştirmesi gerekir [86]. Şekil 2.2'de farklı endüstrilerin, akıllı şebeke teknolojileri çatısı altında buluşmalarının bir gösterimi verilmiştir.

Akıllı şebekeler, çok sayıda yeni teknoloji içerdiği için, yüzlerce yeni standardın geliştirilmesine neden olmuştur. Bu standartlar geliştirilirken öncelikli alanlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir [86]:

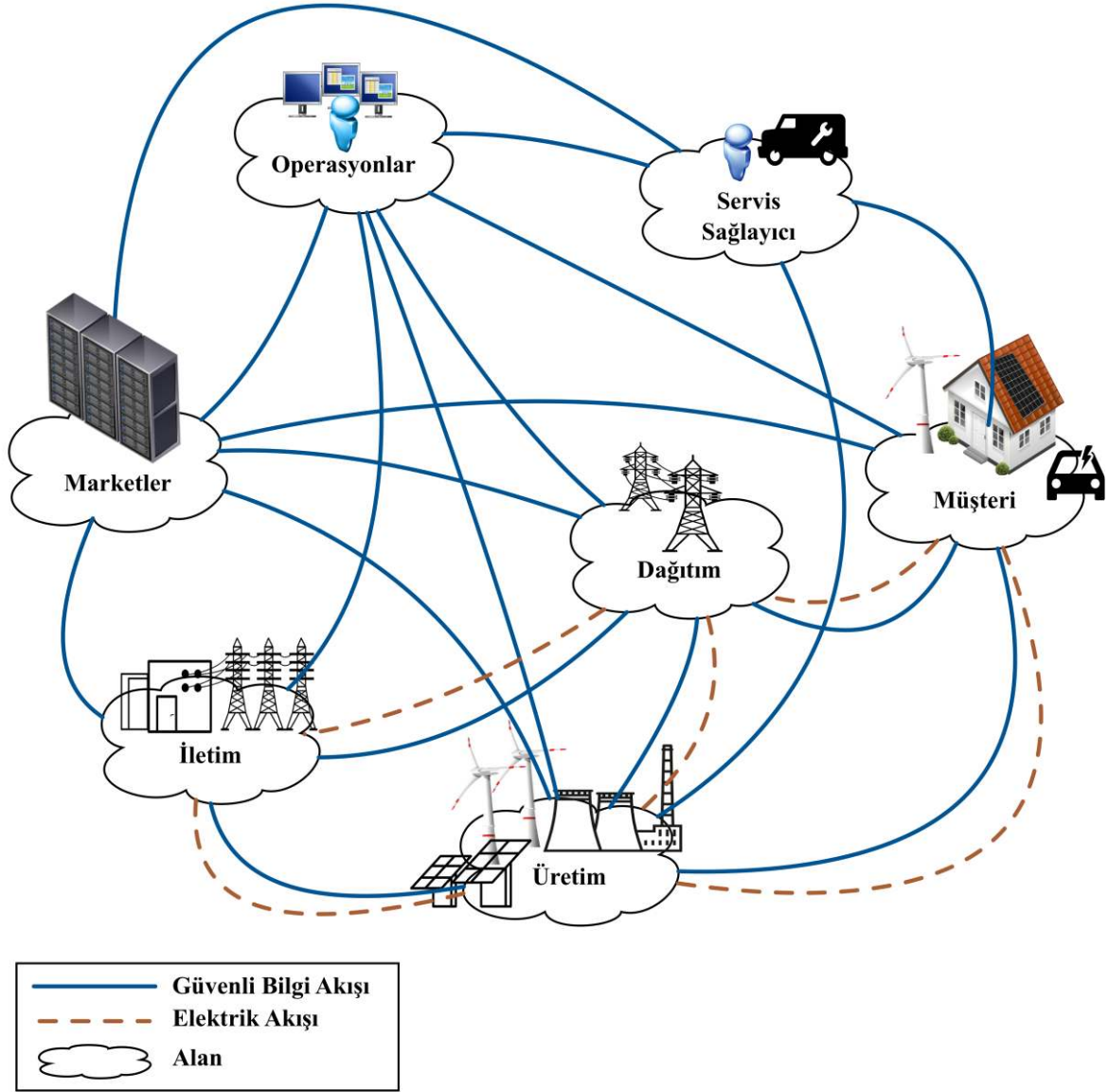
- Akıllı sayaç altyapısı
- DSM ve enerji verimliliği uygulamaları için ara-yüzler
- Fazör ölçüm üniteleri ve diğer algılayıcılar
- Dağıtım şebekesi otomasyonu
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılımı
- Akıllı şebekelerde veri haberleşmesi

➤ Siber güvenlik



Şekil 2.2. Akıllı şebeke teknolojileri ve farklı endüstriler.

Akıllı şebeke standartlarını geliştirmekte olan uluslararası kuruluşlar, işbirliği içerisinde çalışıp farklı yerel ihtiyaçlara cevap verebilen uluslararası standartları oluşturur. Bu kuruluşlar arasında en çok ABD’den National Institute of Standards and Technology (NIST) kurumu öne çıkar. NIST, dünyadaki yaklaşık 600 şirket ve organizasyonla birlikte akıllı şebeke standart çalışmaları yapar. Şekil 2.3’de NIST tarafından önerilmiş ve yaygın kabul görmüş akıllı şebeke kavramsal modeli verilmiştir [101]. Çoğu geliştirici tarafından baz alınan bu modelde, güvenli bir haberleşme ağının örgü topolojisi gibi bütün bileşenleri kapsadığı dikkat çeker. Ayrıca, bir diğer dikkat çeken durum tüketicilerin aynı zamanda üretici vasfını kazanmalarındır. Bu durum yabancı literatürde “prosumer” olarak adlandırılmıştır. Bu isimlendirmeye karşılık olarak, Türkçe’de “üreten-tüketici” tanımlamasını kullanabiliriz. Tüketiciden, üreten-tüketiciye doğru geçişin birinci aşaması tüketicilerin akıllanmasıdır. Akıllı tüketiciler, zaman içerisinde önce aktif bir tüketiciye daha sonra da bir ortağa dönüşür. Bu gelişimin son aşaması ise onların üreten-tüketici durumuna gelmeleridir [1]. Artık tüketiciler, yenilenebilir kaynaklarla ürettikleri enerjiyi kendi ihtiyaçları için kullanabilir, depolayabilir ya da şebekenin kullanımına sunabilir.



Şekil 2.3. NIST akıllı şebeke kavramsal modeli.

NIST içerisinde, akıllı şebeke standartları geliştirmek için çok sayıda alt çalışma grubu bulunur. Bu çalışma grupları, akıllı şebekelerde ilerlemelerin hangi alanlarda olacağı konusunda bir fikir verir. Alt çalışma gruplarından bazıları aşağıda verilmiştir:

- Şebeke mimarisi
- Siber güvenlik
- Test ve sertifikasyon
- İletim ve dağıtım
- Endüstriden şebekeye (I2G)
- Binadan şebekeye (B2G)
- Evden şebekeye (H2G)

- V2G
- Ticari politikalar
- Sayaç güncelleme standartları
- Akıllı şebekede internet adresinin (IP) rolü
- Akıllı şebekeler için kablosuz haberleşme

Dünyada NIST'in dışında akıllı şebeke standartlarını belirleyen önemli uluslararası kuruluşlar da vardır. Bunlardan bazıları: International Electrotechnical Commission (IEC), American National Standards Institute (ANSI), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Internet Engineering Task Force (IETF), GridWise Architecture Council (GWAC) ve World Wide Web Consortium (W3C)'dur. ABD'den North American Electric Reliability Corporation (NERC) ve Almanya'dan BSI gibi kuruluşlar ağırlıklı olarak şebeke güvenliği konularında standartlar geliştirmektedir. Avrupa'nın akıllı şebekelerde standart geliştiren diğer çalışma grupları içerisinde Avrupa Komisyonu Akıllı Şebeke Koordinasyon Grubu (SG-CG), European Committee for Standardization (CEN), European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) ve European Telecommunications Standards Institute (ETSI) bulunur. Güney Kore ve Çin gibi son yıllarda atılım yapan ülkeler, kendi standart geliştirme kuruluşlarına sahiptir. Bütün bu uluslararası kuruluşlar tarafından geliştirilmiş önemli standartlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

- IEC 62351 Güvenli Enerji Otomasyonu. Enerji otomasyonu ağlarındaki güvenlik gereksinimleri için hazırlanmıştır. Diğer IEC protokollerini de kullanarak yetkilendirme ve erişim kontrolü gibi işlemler için geliştirilmiş standartları içerir.
- IEC 15118 Güvenli Şarj. EA şarj ünitelerinin altyapısı için geliştirilmiştir.
- RFC 6272 Akıllı Şebeke için Internet Protokolleri. IETF tarafından hazırlanan OSI'yi (Open Systems Interconnect) referans modelini kullanan bir haberleşme protokolleri kümesidir.
- IEC 61850 Güç Uygulamaları için Haberleşme Ağları ve Sistemleri. Yüksek gerilim düşürücü merkezdeki haberleşme sistemleri için tasarlanmıştır.
- ANSI C12.19 Şebeke Endüstriyel Son Kullanıcı Cihazları Veri Tabloları. Akıllı sayaçlarda kullanılan veri tablolarını standart bir hale getirmek için bir ortak model geliştirilmesini hedeflemektedir.

2.4. Dünyada Akıllı Şebeke Çalışmaları

Dünyanın farklı bir çok bölgesinde, hem yerel paydaşlarla hem de uluslararası işbirlikleriyle yapılan projelerde, akıllı şebeke konuları son yıllarda sıklıkla yer alır. Hem enerji alanında hem de teknolojiye yaşanan gelişmeler akıllı şebeke proje çalışmalarına verilen önemi arttırmıştır. Projeler, birbirinden farklı coğrafi bölgelerde yapılsalar bile temelde benzer sorunların üstesinden gelmeyi hedefler. Projelerdeki ortak amaçlar; şebeke altyapısının güçlendirilmesi, yenilebilir kaynak kullanımının artırılması, merkezi olmayan yapılara geçiş, şebeke içi haberleşme mekanizmalarının geliştirilmesi, akıllı sistemlerin oluşturulması, akıllı şehirler için altyapı kurgulanması ve şebekelerin EA gibi yeni teknolojilere uyumluluğunun sağlanmasıdır.

Akıllı şehirler için ön şartın akıllı şebekeler olduğunu düşünen çok sayıda ülke, pilot bölgeler belirleyip akıllı şebeke çalışmaları yapmaktadır. Yokohama, Amsterdam, Miami, Jeju Adası ve Colorado'da bu tür projelerin gerçekleştirildiği pilot bölgeler bulunur [102]. Bu projelerde genel olarak akıllı sayaçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılımı, EA'ların şebeke üzerindeki etkileri ve şebeke bileşenlerinin yenilenmesi gibi konular araştırılmıştır [103]. Akıllı bir şehirde, trafik denetiminden yerel hizmetlere bir çok mekanizma akıllı sistemler ile kurgulanır. Bu sistemlerin sağlıklı çalışabilmesi için ilk olarak elektrik şebekesinin akıllı yapılarla donatılması gerekir.

Gelişmiş ülkelerde yürütülen akıllı şebeke çalışmaları, gelişmekte olan ülkelere göre daha ileri bir seviyededir. Dünyadaki yerel akıllı şebeke çalışmalarından bazıları Tablo 2.3'de verilmiştir [86,94,104]. Bu tablo ve yürütülmekte olan diğer projeler göz önüne alınırsa, ülkelerin günümüzde öncelikli amaçları altyapının iyileştirilmesidir. Altyapı çalışmalarıyla birlikte, akıllı sayaçlar mevcut şebeke yapısına dahil edilmeye çalışılmaktadır. Bu iki çalışma, hedeflerine ulaştıktan sonra, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim faaliyetlerine daha fazla katılması ve kullanılan şebekenin daha çevreci bir yapı olması doğrultusunda hedefler bulunur. Yürütülen çalışmaların varacağı son aşamada, mevcut şebekenin tamamen akıllı bir şebekeye dönüştürülmesi amaçlanır. Bir çok ülke, bu son aşama için 2020-2030 gibi yakın geleceği kendisine takvim olarak belirlemiştir ve bu doğrultuda ulusal ya da uluslararası proje çalışmalarıyla akıllı şebeke projelerini desteklemektedir.



Tablo 2.3. Dünyada yürütülen akıllı şebeke çalışmalarından bazıları.

Ülke	Akıllı Şebeke Çalışmaları
Çin	Çin, akıllı şebekelere önemli bir yatırım yapmıştır ve uzun dönemde altyapıyı iyileştirmeyi hedefler. Akıllı şebekelerle, enerji tüketimini azaltmayı, şebeke verimliliğini ve yenilebilir kaynak kullanımını arttırmayı amaçlar. 2020 yılına kadar yapılan akıllı şebeke yatırımlarının 96 milyar dolara ulaşması bekleniyor. Akıllı şebekeye geçişin tamamlanması için hedeflenen yıl 2030'dur.
ABD	2009 senesinde 4.5 milyar dolar şebeke yenilenmesine ayrıldı. Bu paranın, 3.48 milyar doları kendini kanıtlamış teknolojilerin şebekeye hızlı katılımına harcandı. Geri kalan kısmı, yerel akıllı şebeke uygulamalarına ve enerji depolama teknolojilerine harcandı. 7.25 milyar dolarlık bir bütçe iletim altyapısı projelerine ayrıldı.
İtalya	Telegestore projesinin başarısı üzerine 2011 yılında yeni projeler geliştirilmeye başlanmıştır. Mevcut şebekeye akıllı şebeke özelliklerinin kazandırılması ve güney İtalya şebekesinin iyileştirilmesi için 200 milyon Euro tutarında bir bütçe ayrılmıştır.
Japonya	Japonya 2020 yılına kadar güneş enerjisi sistemleri bulunduran bir akıllı şebeke altyapısı geliştirmek için 100 milyon dolarlık bir yatırım yapmıştır. Bunun yanında, farklı akıllı şebeke projeleri yerel akıllı ölçüm sistemleri geliştirilmek için yürütülmektedir.
Güney Kore	Kore hükümeti, sanayi işbirliğiyle Jeju adasındaki bir pilot programa 65 milyon dolar katkıda bulunmuştur. Bu pilot projede, 6000 ev için tam bir akıllı şebeke sistemi tasarlanmıştır. Kore, 2030 yılında bütün şebekesini akıllı şebekeye dönüştürmeyi planlamaktadır.
İspanya	2008 yılında bütün dağıtım şirketlerine, sayaçlarını akıllı sayaçlar ile değiştirme zorunluluğu getirilmiştir.
Almanya	E-Energy fonu, enerji sistemleri üzerine çeşitli projeleri desteklemektedir. 2022 yılına kadar nükleer üretimin sonlanması ve yerine yenilenebilir kaynak kullanılması hedeflenmiştir.
Avustralya	Yenilenebilir kaynaklar ve akıllı şebeke projelerine önem veren Avustralya hükümeti "Akıllı Şebeke, Akıllı Şehir" projesi için 100 milyon AUD tutarında bir bütçe ayırmıştır. Akıllı sayaç kullanımı, ülke içerisinde teşvik edilerek arttırılmıştır.
Birleşik Krallık	OFGEM dağıtım ağlarını şebekeye bağlamak için yaratıcı yöntemler geliştirilmesini teşvik etmektedir.
Fransa	Gelişmiş bir iletişim protokolü olan Linky tabanlı 300000 akıllı sayacın şebekede kullanılması için bir pilot proje çalışması yapılmıştır. Bütün sayaçların, akıllı sayaçlarla değiştirilmesi planlanmaktadır.
Brezilya	Akıllı sayaçların kullanımı ve güvenli ağlar kurulumu üzerine dağıtım şirketleri çeşitli çalışmalar yürütmektedir.

2.5. Türkiye’de Akıllı Şebeke Çalışmaları

Doğu-batı ve kuzey-güney enerji koridorlarının tam ortasında yer alan, ekonomisi çok hızlı büyüyen bir ülke olan Türkiye’nin, en önemli ekonomik sorunu olarak cari açık gösterilmektedir. Cari açığa neden olan faktörlerin başında ise enerji harcamaları gelir. Türkiye, son on yılın verilerine göre elektrik enerjisine ve doğalgaza olan toplam ihtiyacın büyüme hızında, Çin’den sonra ikinci sırada yer alır [105]. Son 15 yıllık hızlı büyüme evresi, ülkenin enerjiye olan ihtiyacındaki artışın en önemli nedenidir. Petrol ve doğalgaz rezervlerine sahip olunmadığı için, talep artışı ithalatı, ithalat da cari açığı arttırmaktadır. Devam etmekte olan büyümenin, cari açığı daha fazla arttırmaması için Türkiye’nin akıllı şebeke alanında yaşanan gelişimlere hızlı bir biçimde adapte olması gerekir. Bu amaç doğrultusunda, hem kamu hem de özel sektör stratejik planları arasında enerji konusu önemli bir yer tutar. Hükümet tarafından yakın bir tarihte açıklanan 2023 vizyonunda, akıllı şebekeler ve enerji alanlarında çeşitli projelere yer verilmiştir. 2023 yılına kadar, akıllı şebekeler için iletim hattı alanının 60717 km’ye, üretim kapasitesinin de 158460 MW’a çıkarılması planlanmıştır. Toplam enerji üretiminin %30’nun yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi ve rüzgar enerjisi katkısının 20 bin MW’a çıkarılması diğer öncelikli hedefler arasındadır.

Nükleer enerji konusu, ülke gündeminde daha ön planda yer alsa da Türkiye aslında yenilenebilir enerji kaynaklarına önemli yatırımlar yapan bir ülkedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı’nın (International Renewable Energy Agency, IRENA) kurucu üyesi olan Türkiye, 2000 hektarlık bir alana kurulacak olan Dünya’nın en büyük PV güneş enerjisi tesisini, Konya ili Karapınar bölgesinde 2018 yılında devreye almayı planlanmaktadır. Bu tesis için, toplam 1 milyar dolarlık bir yatırım yapılmıştır ve 300 milyon dolarlık bir ek yatırım güneş enerjisi paneli üretim tesisi kurmak için aynı bölge seçilmiştir. Tesis devreye alındığında yıllık 500 bin MW enerji üretilip, 600 binin üzerinde evin günlük enerji ihtiyacını karşılayabilecek bir potansiyele sahip olacaktır. Benzer projelerin, rüzgar enerjisi alanında gerçekleştirilmesi kamu otoriteleri tarafından planlanmaktadır. Türkiye, yeni rüzgar türbini pazarında dünyanın en büyük 10. ülkesi konumundadır. 2015 yılsonu itibarıyla, kurulu rüzgar enerjisi santrallerinin gücü 4 bin 694 MW değerindedir ve buna ilave 48 bin MW’lık bir rüzgar enerjisi potansiyeli bulunur.

Rüzgar ve güneş enerjisi alanında yapılan çalışmalar haricinde, jeotermal enerji potansiyeli açısından Türkiye dünyada 7. Sırada yer alır [105]. Paris Antlaşması’nın bir

gereği olan CO₂ salınımının azaltılması için temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımların daha da arttırılması planlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları ve çeşitlilikleri arttırılarak, sera gazı salınımının ve küresel ısınmanın önüne geçilebilir. Fakat bütün bu çalışmaların istenilen düzeyde verimli bir katkı sağlayabilmesi için, akıllı şebeke alanında yatırımların hız kesmeden sürdürölmesi gerekir. Hem Avrupa Birliği ölkeleriyle şebeke teknolojisi açısından uyumluluk sağlamak hem de enerji alanında yaşanan bir takım sorunların üstesinden gelebilmek için akıllı şebeke teknolojileri geliştirmeyi amaçlayan projelerin sayısının zaman içerisinde arttırılması gerekir [106-108].



3. AKILLI ŞEBEKELERİN GEREKSİNİMLERİ VE BU GEREKSİNİMLER İÇİN KULLANILABİLECEK HESAPSAL YÖNTEMLER

Thomas Edison'un elektrik üretimi ve tüketimini ticari bir faaliyete dönüştürmesinden günümüze, elektrik enerjisine olan ihtiyaç sürekli olarak artmıştır. Geleneksel şebeke yapısı, zaman içerisinde bu kesintisiz artış karşısında dayanıksız bir yapıya dönüşmüş ve bazı sorunlar ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu sorunlar arasında en önemlileri iletim kayıpları, yüksek tepe-yük değerlerinin şebeke tarafından karşılanamaması, kontrolü zor yapının kesintilere neden olması ve şebekenin pratik bir depolama yeteneğinin olmamasıdır. Elektrik şebekesi altyapısında modernleşme ve yenilik ihtiyacı, akıllı şehirlerin kurgulanabilmesi için ihtiyaç olmaktan çıkarak bir zorunluluk haline gelir. Yukarıda bahsedilen sorunlara ek olarak aşağıda verilen ihtiyaçlar da geleneksel şebekelerin artık yenilenmesi gerektiğini vurgulamaktadır [1,109]:

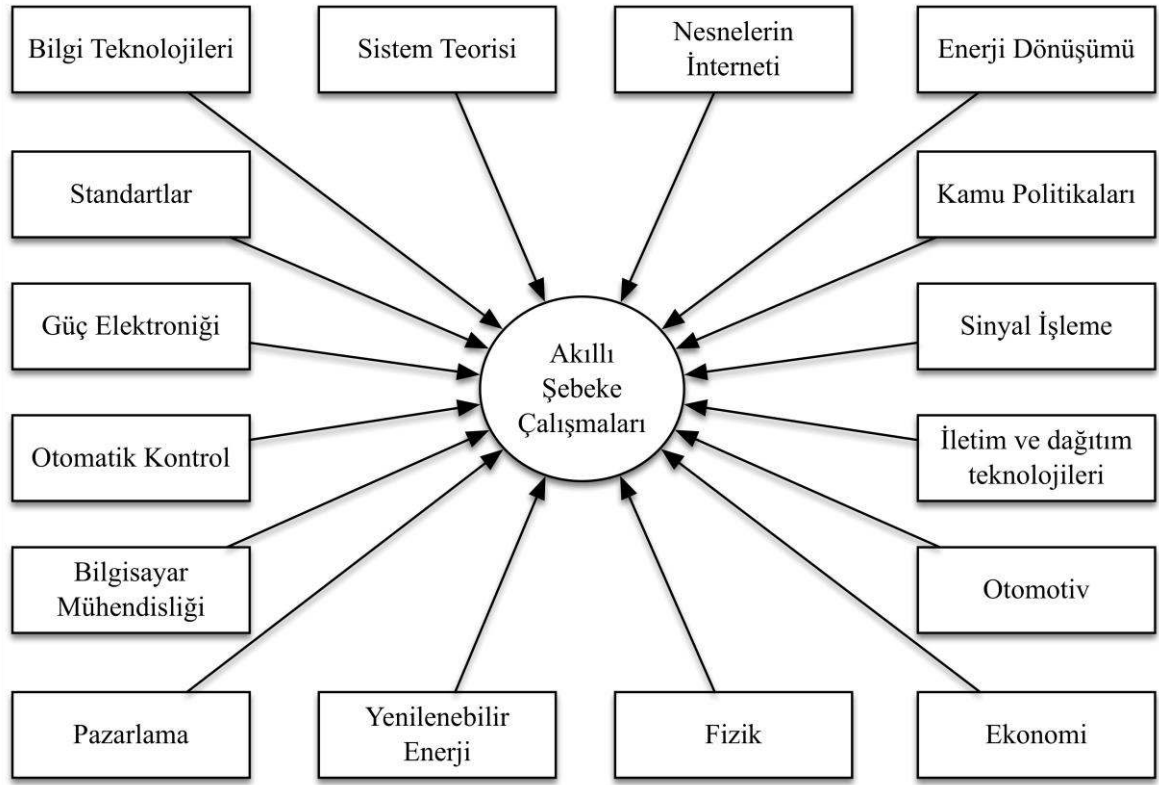
- Artan nüfusa bağlı olarak enerji talebinin de artması
- Hindistan gibi gelişmekte olan ve nüfusu yoğun ülkelerde yaşayan insanların, daha iyi ve yaygın bir hizmet almayı beklemeleri
- Elektronik cihaz kullanımının yaygınlaşması, cihaz çeşitliliğinin artması
- Alternatif enerji kaynaklarında yaşanan hızlı gelişimler, bu kaynakların entegrasyonunda yaşanan zorluklar
- EA gibi çok sayıda aracın şebekeye sıklıkla bağlanması ve şebekeden ayrılmasının getireceği karmaşıklık
- Çevresel kirliliğin azaltılması yönünde oluşan talepler
- Endüstri 4.0'la beraber sanayi üretiminde elektrik enerjisine ihtiyaç duyan bileşenlerin sayısının hızla artması

Akıllı şebekeler için çözüm geliştirilirken, farklı mimari katmanlar arasındaki etkileşimin bir gösterimi Tablo 3.1'de yapılmıştır [94]. Çözüm mimarisinde, akıllı şebeke çözümleri, akıllı altyapı ve elektrik altyapısı şeklinde üç temel bölüm bulunur. Mimaride yer alan ara katmanlar, akıllı şebekelerdeki farklı çalışma alanları ve bu alanlar arasında yapılabilecek işbirlikleri konusunda bir fikir verir. Ayrıca, katmanlar geleneksel şebekelerin zayıf ve geliştirilmesi gereken noktalarının neler olduğunu da gösterir.

Tablo 3.1. Akıllı şebeke teknolojileri için çözüm mimarisi.

Akıllı Şebeke Çözümleri	Hizmet Sağlayıcı Uygulamaları				
	Operasyonel Etkinlik	Güvenilirlik ve Güvenlik	Enerji Verimliliği	Alternatif Enerji	Tüketici Katılımı
Akıllı Altyapı	Mühendislik Sistemleri ve Operasyonel Sistemler				
	Veri Ambarları ve İşlemleri				
	Kablolu/Kablosuz Haberleşme Altyapısı				
	Akıllı Algılayıcılar, Kontrolörler ve Sayaçlar				
Elektrik Altyapısı	İletim ve Dağıtım Altyapısı				
	Alternatif Enerji Kaynakları, Enerji Depolama ve Elektrikli Arabalar				
	Tüketici Ev Ağları				

Tablo 3.1’de verilen mimari incelenirse, akıllı şebekelerde mühendislik yapmak için farklı disiplinlerin bir araya gelmesi gerektiği rahatlıkla görülebilir. Örneğin, veri ambarları ve işlemleri katmanında; veri birleştirme, veri işleme, veri analizi, veri madenciliği ya da büyük veri gibi bilgisayar mühendislerinin ya da bilgi teknolojisi araştırmacılarının uzman olduğu konular bulunur. Öte yandan kablolu/kablosuz haberleşme altyapısı konularını, ağırlıklı olarak elektrik-elektronik mühendisleri ya da fizikçiler araştırır. O halde, akıllı altyapı bileşenleri geliştirmek için bu alanlardaki bilim insanlarının işbirliği yapması gerektiği görülür. Benzer biçimde, akıllı şebeke çözümleri ya da projeleri için alt katmanlarda bulunan çok sayıda bilim dalını içeren bir ortak çalışmanın yapılması gerekir. Akıllı şebeke çalışmalarında yolları kesişen çok sayıda çalışma alanı ve bilim dalı Kezunovic [94] tarafından Şekil 3.1’deki gibi verilmiştir.



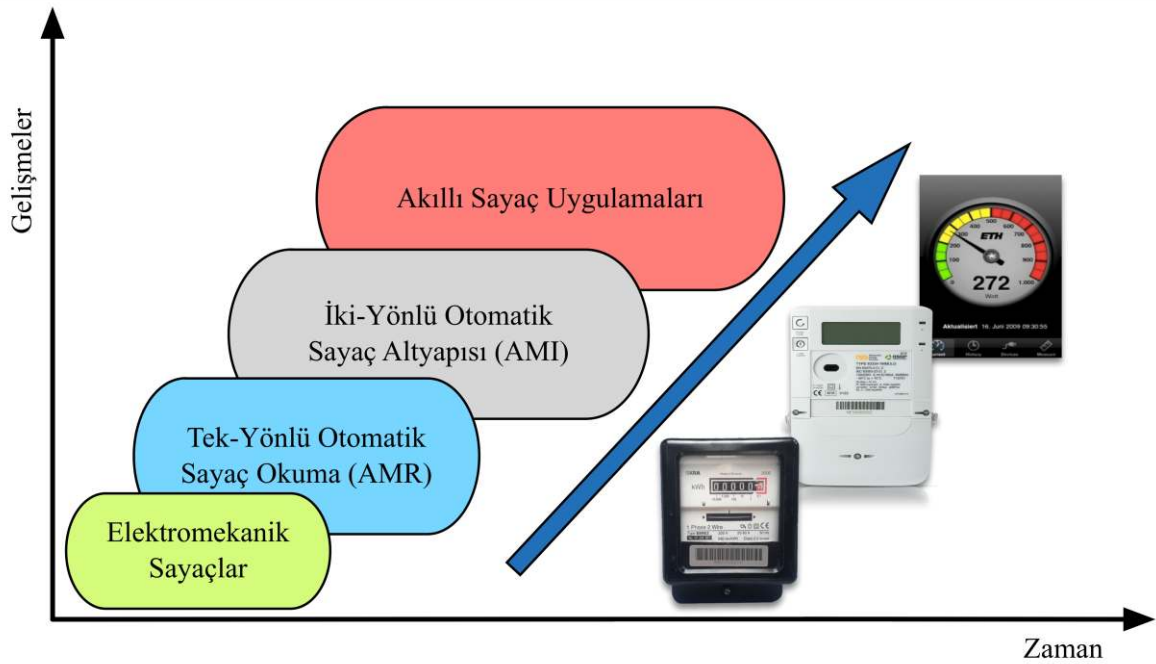
Şekil 3.1. Farklı bilim alanlarının akıllı şebeke çalışmalarında buluşmaları.

Bu bölümün geri kalan kısmında, akıllı şebekelere geçişteki gereksinimler nedeniyle ortaya çıkmış olan araştırma alanları ve bu alanlarda çözüm geliştirmek için kullanılabilecek hesapsal yöntemler sunulmaktadır.

3.1. Akıllı Sayaçlar

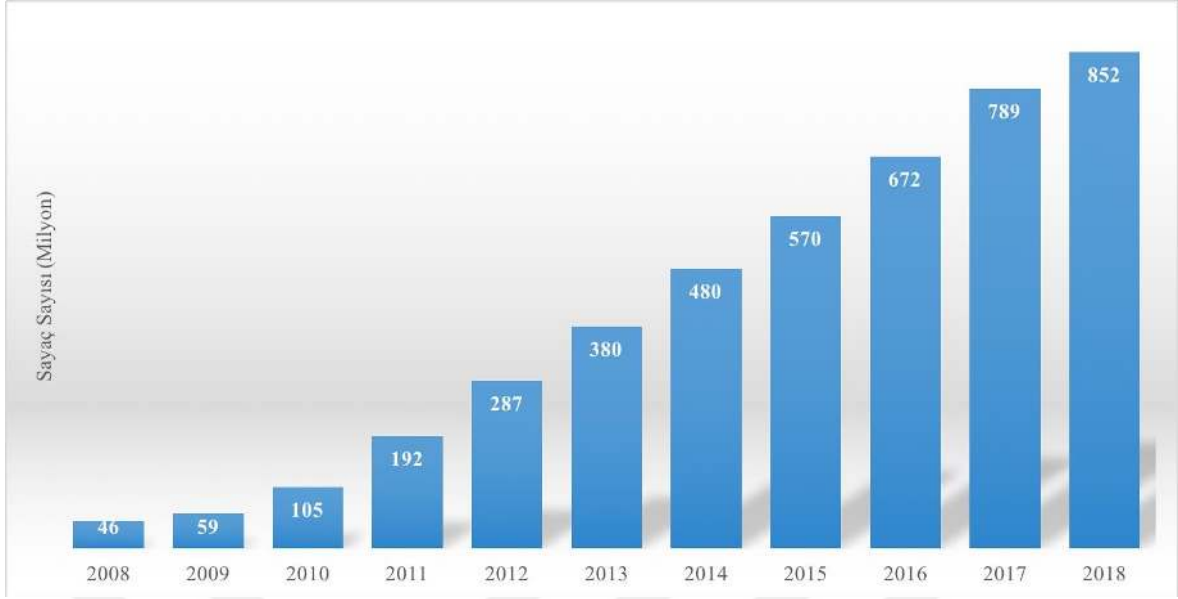
Elektrik sayaçları, akıllı şebekeye giden yolda temel yapıtaşlarından birisidir. Klasik anlamda bir elektrik sayacı, belirlenmiş bir zaman dilimine ilişkin elektrik enerjisini ölçmeye yarar. Sayaç bu fonksiyonelliğiyle, geleneksel bir şebeke için yeterli olsa da akıllı şebekelerde elektrik sayacından beklenenler bundan çok daha fazladır. Elektriğin keşfinden, 1990'lı yıllara kadar elektrik sayaçları herhangi bir haberleşme mekanizmasına sahip değildi ve şebekelerde genel olarak manuel okuma yapılan elektro-mekanik sayaçlar kullanılmaktaydı. Sayaç okuma işi yapan görevliler, sayaçların bulunduğu yerleri dolaşarak tüketim değerlerini tespit ediyordu ve bu değerlere göre faturalandırma yapılmıyordu. Teknolojide yaşanan gelişmeler, akıllı şebekelerin doğmasına neden oldukları gibi elektrik sayaçlarının zaman içerisinde gelişmesine de neden olmuştur. Bu gelişmeler,

tek-yönlü haberleşme sağlayan Otomatik Sayaç Okuma (AMR, Automatic Meter Reading) cihazlarının kullanılmasıyla başlar. AMR cihazları, sadece sayaç okuma işini kolaylaştırmıştır. Üzerlerinde akıllı bir şebekenin ihtiyaç duyduğu uygulamaları gerçekleştirmek mümkün değildir. Gelişimin bir sonraki aşamasında, iki yönlü iletişim sağlayabilen Otomatik Sayaç Altyapısı (AMI, Automatic Metering Infrastructure) ortaya çıkmıştır. AMI ile beraber, artık sayaçlar ayda bir okunan cihazlar olmaktan çıkmış, çok daha kısa periyodlarla okuma yapılabilen ve uzaktan iletişim kurulabilen cihazlar haline gelmiştir. İlerleyen dönemde, okuma işinin yanı sıra bütün akıllı şebeke işlemlerini gerçekleştirebilen teknolojik olarak çok gelişmiş akıllı sayaçların kullanıma girmesi beklenmektedir. Elektrik sayaçlarının zaman içerisinde geçirdiği gelişim Şekil 3.2’de gösterilmiştir [96].



Şekil 3.2. Elektrik sayaçlarının zaman içerisindeki gelişimi.

Elektrik sayaçlarında yaşanan bütün bu değişim dikkate alınırsa, akıllı sayaçlar, tüketiciler ve şebeke arasındaki iki-yönlü bilgi alışverişini gerçekleştirebilen araçlar olarak tanımlanabilir. Akıllı sayaçların kullanımı, dünya genelinde Şekil 3.3’de görüldüğü üzere hızla yaygınlaşmaktadır [110]. Gelişmiş ülkelerin büyük bir kısmı, en geç 2020 yılında şebekede bulunan bütün sayaçları akıllı sayaçlarla değiştirmeyi planlamaktadır ve bu ülkelerde sayaç değişimi parça parça yapılmaktadır.



Şekil 3.3. Dünya genelinde gerçekleşmiş ve planlanmış akıllı sayaç kurulumları (2008-2018).

Akıllı sayaçlar kullanılarak, şebeke için haberleşme altyapısının kurulması zor bir işlemdir. Bu haberleşme altyapısının; dayanıklı, kesintisiz ve güvenli olması gerekir. Akıllı sayaçlar ve haberleşme altyapısı konusu, akıllı şebekeler için önemli araştırma alanlarından bir tanesidir ve özellikle haberleşme mekanizmaları üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Hücresel ağlar, algılayıcı ağlar, ZigBee, BPL (Broadband over Power Lines), WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), WLAN (Wireless Local Area Network), bilişsel radyo ağı ve McWill ağı bu altyapı için kullanılan haberleşme teknolojilerinden en yaygın olanlarıdır [111-112]. Bu teknolojilerin hızlı, güvenilir, şifrelenmiş ve korumalı bir haberleşme sağlaması gerekir; aksi takdirde akıllı şebekelerde güvenlikle ilgili sorunlara yol açabilirler. Bir diğer önemli konu, akıllı sayaçların kullanımıyla birlikte hayatımıza girecek olan veri güvenliği ve kişisel bilgi gizliliği ile ilgili sorunlardır. Son olarak, bant genişliği ve ağ trafiği gibi konular üzerinde de kapsamlı çalışmalar yapılması gerekir.

3.2. Talep Tarafı Yönetimi (DSM)

Bir havayolu şirketinin, ikram menüsünden sadece bir adet zeytini çıkartarak, yılda milyonlarca dolar kar elde edebileceği şeklinde hesaplamaların yapılmasının nedeni ölçek ekonomisi kavramıdır. Benzer bir mantıkla hareket edilirse, elektrik şebekesindeki

müşterilerin, tüketimlerinde yapacakları küçük değişiklikler, genel toplamda önemli kazanımlara neden olabilir. Geleceğin elektrik şebekesinde, üreticilerle tüketiciler arasında iki-yönlü bir haberleşme altyapısı olması düşünülür ve NIST referans akıllı şebeke modeli de bu durumu vurgular. Bu altyapıdan faydalanarak, bir takım ödüller ya da teşviklerle enerji tüketiminin azaltılmasına ya da bu tüketimin yönetilmesine DSM denir. Bir başka tanımlamayla DSM, enerji tüketiminin müşterilerin sayaçları kullanılarak kontrol edilmesidir. Bu yapıda esas olan, enerji kullanım miktarının azaltılması değildir, talebin doğru bir şekilde analiz edilmesiyle tüketimin en uygun biçimde dengelenmesidir.

Elektrik talebi konutlar, endüstriyel alanlar ve kurumsal müşteriler gibi tüketicilerin toplam elektrik ihtiyacıdır. Eğer bu tüketiciler, günün belirli bir zaman diliminde ya da haftanın belirli bir gününde her zamankinden fazla bir tüketimi eş zamanlı olarak gerçekleştirirlerse, şebekede tepe-yük adı verilen istenilmeyen bir duruma neden olurlar. Örneğin, yaz aylarında hava sıcaklığındaki artışla klima kullanımının ve dolayısıyla elektrik tüketiminin artması, bu tür problemler için tipik bir örnektir. Eğer şebeke, bu artan tüketimi karşılayacak kapasiteye sahip değilse, bu durum kesinti oluşmasına neden olabilir ya da şebeke kesinti oluşmasını engellemek için farklı bir kaynaktan yüksek maliyetle satın alınan elektrik enerjisi kullanılabilir. Her iki senaryo da, bir dağıtım şirketi tarafından istenilen bir durum değildir. DSM'nin temel amacı, bu durumun yaşanmasına engel olmaktır. Bunu gerçekleştirmenin iki yolu vardır: Tüketim miktarlarının azaltılması teşvik edilmelidir ya da tüketim akıllı bir biçimde kaydırılarak dengelenmelidir. Etkin bir DSM, müşterilerini bazı tüketimlerini ertelemek için teşvik edebilir. DSM yapısı, şebekedeki tepe-yük miktarlarını azaltarak sadece kesintilerin önlenmesi gibi anlık bir fayda sağladığı gibi, yeni elektrik üretim tesislerinin yapılması zorunluluğunu da azaltabileceği için, pahalı olan bu altyapı maliyetlerini erteleyebilir. Akıllı şebekede, sıklıkla değişen tüketim ihtiyaçlarını karşılamaya dönük DSM gibi mekanizmaların bulunması gerekir.

3.3. Enerji Depolanması

Aşırı yüklenme, güç kalitesi bozulmaları, gerilim desteği ve üretim belirsizlikleri gibi sorunlar yüzünden zaman içerisinde elektrik enerjisinin depolanması ihtiyacı doğmuştur. Enerji depolanması denilince, ilk olarak evlerde kullanılan kesintisiz güç kaynakları (Uninterruptible Power Supply, UPS) akla gelir. Bu cihazlar, bir ofisin ya da bir binanın enerji ihtiyacını belki karşılayabilir, fakat şebekelerde enerji depolanmakla

kastedilen şey daha farklıdır. Şebekede enerji depolama için çok daha gelişmiş teknolojilere ihtiyaç duyulur. Üretimde meydana gelecek herhangi bir arızada, enerji depolama üniteleri birer sigorta vazifesi görürler. Bu yüzden, enerjinin depolanması sadece kesintileri önlemekle kalmaz, çok sayıda maddi fayda da sağlar. Tepe-yüklerin giderilmesi, güç kalitesinin iyileştirilmesi, ek üretim maliyetlerinin önlenmesi ve yenilenebilir kaynakların neden olduğu sorunların azaltılması bu faydaların başında gelir.

Enerji depolanması için günümüzde pompalanmış hidro-elektrik, gelişmiş piller, yakıt hücreleri (hidrojen), süper kapasitörler ve yüksek hızlı süper volan (flywheel) gibi seçenekler bulunur [93,97]. Tablo 3.2’de farklı depolama teknolojilerinin maliyetleri ve uygulama alanları verilmiştir [93,94,96,97]. Bu teknolojiler arasından, kullanım yeri ve amacına göre bir tercih yapılır.

Tablo 3.2. Farklı enerji depolama teknolojilerinin, maliyetleri ve uygulama alanları.

Depolama Teknolojisi	Enerji Verimliliği (%)	Güç-ilişkili Maliyet (\$/kW)	Enerji-ilişkili Maliyet (\$/kWh)	Güç kapasite Maliyeti (\$/kW)	Depolama Maliyeti	Uygulama Alanı
Pompalanmış hidro-elektrik	70-80	600-2000	0-20	5-100	Düşük	Enerji
CAES	40-50	425-480	3-10	2-50	Düşük	Enerji
Lead-acid pil	65-80	200-580	175-250	50-400	Düşük	Güç
Ni-Cd pil	60-90	600-1500	500-1500	400-2400	Yüksek	Güç ve Enerji
NaS pil	70-89	259-810	245	300-500	Ortalama	Güç ve Enerji
Li-ion pil	70-85	-	900-1300	600-2500	Düşük	Güç
Vanadium redox (VRB)	80-85	1250-1800	175-1000	150-1000	Ortalama	Güç ve Enerji
ZnBr	70-85	640-1500	200-400	150-1000	Ortalama	Güç ve Enerji
Yüksek-hızlı flywheel	85-95	350	500-25000	300-25000	Yüksek	Güç
Süper kapasitör	80-95	300	20000-82000	300-2000	Yüksek	Güç ve Enerji
Yakıt hücresi (hidrojen)	-	1100-2600	2-15	425-725	Düşük	Güç ve Enerji
SMES	90	300	2000	1000-10000	Yüksek	Güç

3.4. Elektrikli Arabaların Şebekeye Entegrasyonu

Akıllı telefonlardan sonra en büyük teknolojik gelişmenin ve ticari rekabetin yaşanacağı teknoloji alanı kuşkusuz EA'lar olacaktır. Ülkemizde özel çağrılı projelerle ve teşviklerle desteklenmeye çalışılan bu alana, diğer ülkeler büyük yatırımlar yapmaktadır. Arabalar, günlük hayatın vazgeçilmez bir parçasıdır ve dünyadaki enerji tüketiminde en önde yer alırlar. Başlangıçta, içten yanmalı motorlara pil desteğiyle, hibrit olarak başlayan araba teknolojilerindeki gelişim, zaman içerisinde tamamen elektrikle çalışan arabaların üretilmesine doğru yol almıştır. Günümüzde EA'lar, bataryayla çalışan EA'lar (Battery Electric Vehicle, BEV), fişe takılan hibrit EA'lar (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) ve yakıt hücresi arabalar (Fuel Cell Vehicle, FCV) olarak üç ana grupta toplanırlar. Bataryayla çalışan EA'larda, pil ana güç kaynağıyken, yakıt hücresi arabalarda, elektrik motoru katı yakıt hücresi kullanılarak beslenir. Fişe takılan hibrit EA'lar, diğerlerinden farklı olarak birden fazla enerji kaynağını kullanırlar. Bu üç farklı EA tipinin genel özellikleri Tablo 3.3'de gösterilmiştir [113-118].

Tablo 3.3. EA tipleri ve genel özellikleri.

EA Tipi	İtiş	Enerji Sistemi	Avantajlar ve Dezavantajlar
BEV	- Elektrik motoru	- Batarya - Ultra kapasitör	+ Sıfır emisyon + Yüksek enerji verimliliği + Kullanıma hazır - Yüksek ilk maliyet - Seyahat mesafesi
PHEV	- Elektrik motoru - İçten yanmalı motor	- Batarya - Ultra kapasitör - İçten yanmalı motor başlangıç üretici	+ Çok düşük emisyon + Yakıt tasarrufu + Kullanıma hazır + Uzun seyahat mesafesi - Fosil yakıtlara bağımlılık - Üretim maliyetleri
FCV	- Elektrik motoru	- Yakıt hücreleri - Batarya ya da ultra kapasitör	+ Aşırı düşük emisyon + Yüksek enerji verimliliği + Ortalama seyahat mesafesi - Üretim aşamasında - Yüksek maliyet - Pahalı yakıt hücreleri

EA'ların kullanımının yaygınlaşması, çevresel açıdan bakıldığında olumlu sonuçlar doğursa da, bu kullanımın elektrik şebekesi açısından hem olumlu hem de olumsuz sonuçları olacaktır. Arabaların, şarj esnasında çekecekleri enerji miktarı, kullanılan şarj

istasyonuna bağılı olarak değişiklik gösterebilir. Tablo 3.4’de Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Cemiyeti, SAE) standartlarına göre belirlenmiş olan şarj tipine bağılı yük bilgileri verilmiştir [119]. Bu yük bilgileri incelenirse, EA’ların tipik bir ev kullanıcısının elektrik enerjisi tüketimini iki katına çıkarması beklenebilir. Bu tüketim artışı, şebekelerde aşırı yüklenmeye ve tepe-yük noktalarının oluşmasına neden olacaktır. Trafığe çıkan EA sayısının zamanla artması, bu yüklenmenin ilerleyen dönemde bir şebekenin kaldıramayacağı değerlere gidebilmesi riskini doğurur. Bu sorunla baş edebilmek için akıllı sistemlere ve hesapsal yöntemlere ihtiyaç duyulması kaçınılmazdır.

Tablo 3.4. SAE konfigürasyonları ve şarj değerleri.

şarj Tipi	Gerilim (V)	Tepe-Yük Akımı (A)	Güç (kW)	Ortalama şarj Süresi (Saat)
AC Seviye I	120	12 16	1.4 1.9	7 - 17
AC Seviye II	240	32 80	7.68 19.20	3 - 7
AC Seviye III	-	-	-	Geliştirme Aşamasında
DC Seviye I	200 - 450	80	36	0.35 – 1.20
DC Seviye II	200 - 450	200	45	0.15 – 0.30 (%0’dan %80’e)
DC Seviye III	200 - 600	400	240	<0.15 (%0’dan %80’e)

EA’ların şebekeye entegrasyonu, sadece tepe-yük sorunu ya da şarj sorunu olarak görülmemelidir. Araştırmacılar, EA sayısı arttıkça bu araçlarda bulunan bataryaların bir yedek depolama oluşturabileceği konusunda umutludur ve bu yönde çalışmalar yapılmaktadır. V2G sistemlerinin temel hedefi, şebekeyi ihtiyaç oluştuğu zaman park halindeyken boşta duran araba bataryalarıyla beslemektir.

3.5. Güç Kalitesi

Bir şebeke için güç kalitesi, bileşenlere zarar vermeden ya da onların çalışmalarını engelleyecek sorunlar çıkarmadan çalışabilme yeteneği olarak tanımlanır [120]. Güç kalitesi, geleneksel şebekeler için önemlidir, fakat akıllı şebekelerde çok daha fazla önem kazanır. Modern, gelişmiş elektronik ekipmanlar güç kalitesindeki bozulmalardan kolayca etkilenebilir. Akıllı şebekenin kendisi de ileri düzey teknolojik donanımlara sahip olacağından, güç kalitesindeki bozulmalar şebekenin tamamına etki edebilecek sorunları doğurabilir.

3.6. Fosil-Tabanlı Yakıtlar ve Çevresel Sorunlar

Fosil-tabanlı yakıtların rezervlerinin azalması günümüzde önemli bir sorundur. Ancak, bu yakıtların kullanımının neden olduğu küresel ısınma ve CO₂ salınımı gibi çevresel sorunlar, son dönemde daha fazla ön plana çıkmaktadır.

3.7. Yenilenebilir Üretim ve Sürdürülebilirlik

Küresel ısınma sorununa bağlı olarak yaşanan iklimsel değişimler, nükleer santrallerin yarattığı bazı riskler ve artan enerji maliyetleri yüzünden yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimi ve enerji üretiminde sürdürülebilirlik popüler çalışma konuları haline gelmiştir. Ülkemiz gibi enerji açısından dışarıya bağımlı bir çok ülke, yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak bu dışarıya bağımlılığı azaltmayı arzular. Bölüm 2.5.'de bahsedildiği gibi Türkiye'de kamu teşvikleriyle, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen üretimin, toplam üretim içerisindeki yüzdesi arttırılmaya çalışılmaktadır. Avrupa Birliği ülkeleri ise 2020 yılındaki enerji tüketiminin, asgari %20'sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesini zorunlu kılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından en fazla bilinenleri, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisidir. Fakat bu kaynaklar, kendi doğaları gereği şebekeye katılırken bazı sorunlara neden olur. İyi bir planlamayla, mühendislikle ve doğru hesapsal yöntemlerin kullanımıyla bu sorunlarla baş edebilmek mümkündür. Bu kaynakların mimari tasarımı yapılırken, bağlantı noktalarının çok iyi belirlenmesi, güvenlik ve güvenilirlik açısından iyi bir sistem planlamasının yapılması gerekir. Ayrıca, kullanımlarından kaynaklanan dalgalanmaların ve güç kalitesi bozulmalarının önüne geçmek için iyi bir yük kestirim yöntemi ve akıllı yazılımlar bulunmalıdır. Bu sayede, yatırım maliyetlerinin geri dönüşü hızlandırılabilir ve birim üretim başına düşen maliyet azaltılabilir. Dikkat edilmesi gereken bir başka nokta, dalgalanmaları gidermek için destek kaynak kullanımıyla ilgilidir. Bu destek kaynakların, düşük verimlilikte kullanılması beklenenden daha fazla çevre kirliliğine neden olabilir. Bu kaynaklar kullanılırken, çok iyi bir sistem planlaması yapılmalıdır.

Sürdürülebilir enerji, enerji üretilirken kullanılan doğal kaynakların yok olmayıp, zaman içerisinde kendilerini yenileyebilmesine denir. Sürdürülebilirlik, yeşil enerji ya da çevreci enerji üretimi için üzerinde durulması gereken önemli bir kavramdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, sadece doğa dostu değildir aynı zamanda sürdürülebilirlik özelliğine

sahiptir. Bu kaynaklar, fosil-tabanlı yakıtlar gibi hem zaman içerisinde azalmazlar hem de tüketilirken doğaya zarar vermezler. Akıllı şebekenin, gelecek açısından önemli olmasının bir diğer nedeni yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye katılmalarını ve yönetilmelerini kolaylaştırmasıdır.

3.7.1. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi, kullanımı en hızlı yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi, doğaya zararlı bir gaz çıkışı yapmadığı ve çok çevreci bir enerji türü olduğu için çok tercih edilir. Rüzgar türbinleri, rüzgar enerjisini uygun bir maliyetle elektrik enerjisine dönüştürür. Bütün bu avantajlarına rağmen, rüzgar türbinlerinin sahip olduğu bazı dezavantajlar da bulunur. Örneğin, üretim yapabilmeleri için, uygun bir rüzgar miktarına ihtiyaç duyulur. Belirli bir rüzgar miktarının altında üretim yapamazlar ve üretime geçtiklerinde türbinlerin çıktısı kontrol edilemez. Bu durum, şebekenin bazen yeterince beslenememesine bazen de aşırı beslenmesine neden olabilir.

Rüzgar türbinleri günümüzde özellikle Japonya’da denizlerin kıyı şeritlerine kurulmaktadır. Bu kurulumlar, her ne kadar daha maliyetli olsa da daha kuvvetli ve uzun süreli bir rüzgara sahip olmaları açısından avantajlıdır.

3.7.2. PV Panel

Fotovoltaik (PV, photovoltaic) paneller, ilk olarak 1839 yılında bir Fransız fizikçi tarafından bulunmuştur. Tek bir panel ya da paneller dizisi kullanılarak güvenli bir biçimde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretilmesini sağlar. Günümüzde bu panellerin verimliliğinin artırılması, çok çalışılan bir konudur. Farklı materyaller geliştirilerek, birim başına soğurabildikleri enerji miktarları arttırılmaya çalışır. PV panellerin farklı uygulama alanları bulunur. Bu paneller kullanılarak; panel tarlaları oluşturulup büyük çaplı bir üretim yapılabilir, tek bir evin enerji ihtiyacı karşılanabilir ya da bir arabaya enerji aktarılabilir. PV panellerin en büyük sorunu, rüzgar türbinleri gibi üretimlerinin süreklilik göstermemesidir [94].

3.7.3. Termal Güneş Enerjisi

Termal güneş enerjisi, güneş enerjisini ısı enerjisine çeviren teknolojiye denir. Su ısıtılmasında ya da ortam ısıtılmasında kullanılır.

3.7.4. Jeotermal Enerji

Yeraltı sıcak su ve buhar kaynakları kullanılarak enerji üretilmesidir. Klasik buhar türbinleri, yerin altından pompalanan sıcak suyu kullanırlar, sonrasında kullanılan su yeraltına geri gönderilir. Farklı büyüklüklerde jeotermal enerji santralleri kurmak mümkündür. Ancak, ilk kurulum ve keşif maliyetlerinin yüksekliği ve saha güvenliği sağlamanın zorluğu açısından kullanımları çok yaygınlaşmamıştır.

3.7.5. Biyogazlar ve Biyokütle

Ağaçların, bakterilerin, alglerin ya da diğer organik malzemelerin kullanılmasıyla elde edilen elektrik üretimidir. Yapılan bir dönüşüm sonrası, ısı ya da elektrik elde edilir. Öte yandan, bu üretim sırasında gaz salınımı yapılarak hava kirletilir.

3.7.6. Dalga Gücü

Denizlerdeki ya da okyanuslardaki dalgaların ve gelgitlerin kullanılarak elektrik enerjisinin üretilmesidir. Kurulumu hem zahmetli hem de maliyetlidir. Dalga gücüyle yapılan üretimin çıktısı güvenilir değildir ve değişkendir. Avrupa’da ve ABD’de az sayıda kullanımı bulunmaktadır [94].

3.7.7. Hidro-enerji

Hidro-enerji, en yaygın yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bazı çevresel sorunlar nedeniyle eleştirilse de genellikle maliyet açısından uygun olmaları yüzünden tercih edilir. Ülkemizde çok sayıda hidroelektrik santrali bulunur.

3.7.8. Yakıt Hücreleri

Yakıt hücreleri, akıllı şebekelerde özellikle depolama amacıyla kullanılması düşünülen bir enerji kaynağıdır. Hidrojenden, doğal gazdan ya da başka bir kaynaktan yakıt hücreleri elde edilebilir. Neredeyse yok sayılabilecek düşüklükte bir CO₂ emisyonuna sahiptir. Yüksek verimliliğe sahip olmaları ve düşük emisyon değerleri nedeniyle kullanımları yaygınlaşmaktadır.

3.8. Kişisel Verilerin Korunması ve Siber Güvenlik

Akıllı şebekeler, yeni teknolojilerle şebekeyi geliştirirken bir taraftan da daha önce şebekelerde hiç karşılaşılmamış olan güvenlik sorunlarının doğmasına neden olabilirler. Özellikle haberleşme sistemlerindeki olası açıklar, tüketicilerin kişisel verilerinin ele geçirilmesine ya da şebekenin çalışmasını engelleyebilecek siber saldırılara neden olabilir. Bir ülkenin, elektrik şebekesi altyapısına yapılacak bir siber saldırı, sadece kesintilere sebep olmaz; çok önemli fiziksel zararlara ve maddi kayıplara da neden olabilir. Bu yüzden, akıllı şebeke tasarlanırken kesinlikle güvenlik en ön planda yer almalıdır.

Siber güvenlik, sistemdeki bilgisayar terminallerinden gelebilecek tehditlere karşı sistem güvenliğinin sağlanması ve sistemdeki bilgisayar-tabanlı yapıların zarara uğramalarının engellenmesidir [121]. Akıllı şebekede, siber saldırılara karşı güncel güvenlik standartlarına uygun biçimde tasarlanan savunma mekanizmaları bulunmalıdır. Güvenlik açısından değerlendirilirse, bir şebeke aşağıdaki yeteneklere sahip olmalıdır:

- Hata kurtarma
- Kendi kendini onarabilme
- Açıkları tespit edebilme
- Yetkisiz girişleri ve zararlı yazılımları tespit edebilme
- Saldırılara karşı kendini koruma
- Olay günlüğü tutma
- Sistem yöneticilerini otomatik uyarma

Akıllı şebekelerde, akıllı sayaçların, akıllı ev aletlerinin ve uygulamaların kullanılmasıyla beraber kişisel verilerin güvenliğiyle ilgili önemli tehditler ortaya çıkar. Akıllı şebekeler, bir hanenin elektrik tüketimiyle ilgili çok detaylı veriye sahip olabildikleri

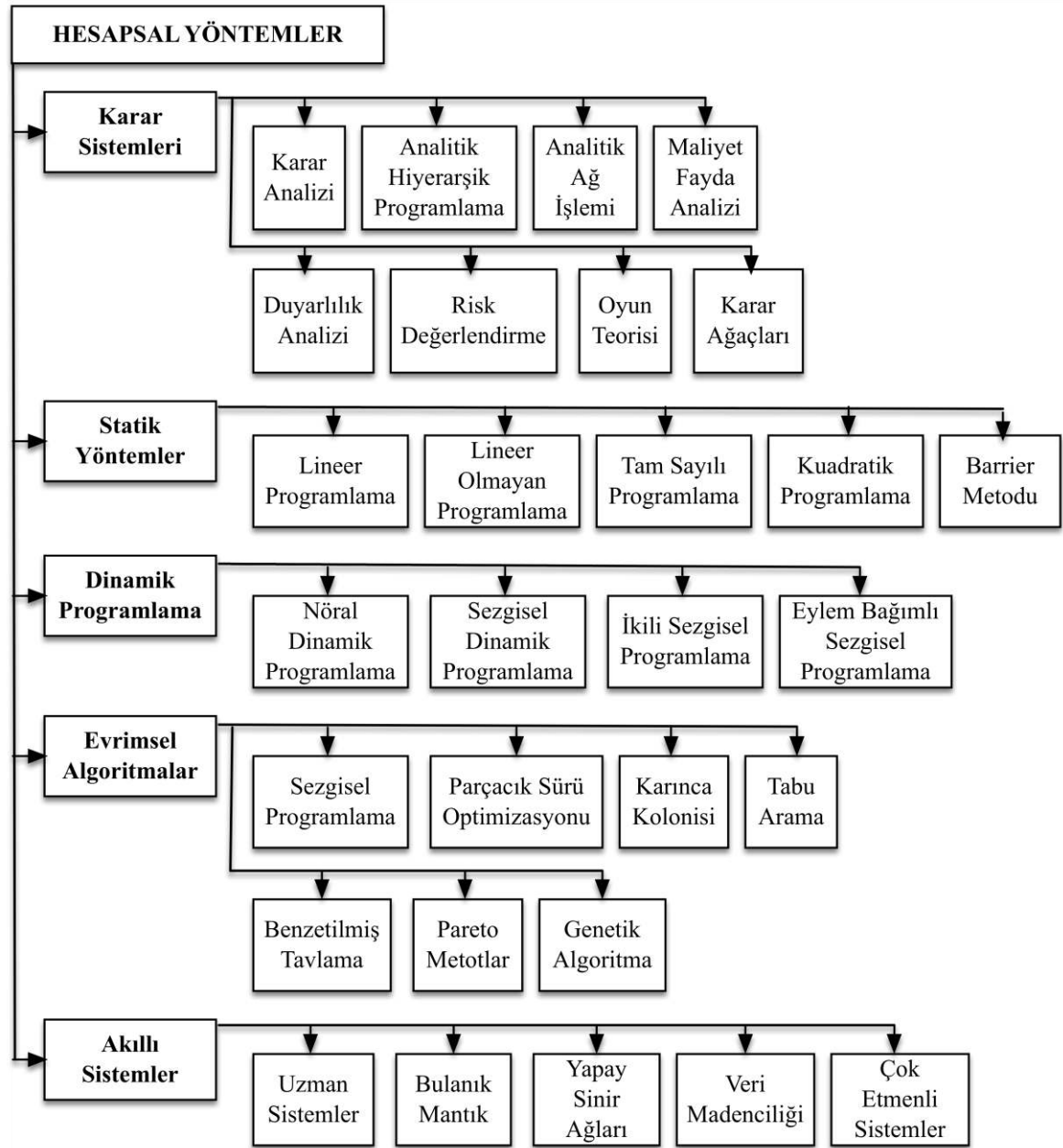
için, bu verilerin kötü niyetli kişilerin eline geçmemesine dikkat edilmesi gerekir. Kişisel bilgi verileriyle ilgili karşılaşılan bazı riskler aşağıdaki gibidir [2]:

- Kimlik bilgisi hırsızlığı
- Davranışların ve özel alışkanlıkların belirlenmesi
- Kullanılan ev aletlerinin tespiti
- Gerçek zamanlı izinsiz izleme
- Ev aktivitelerinin belirlenmesi
- Haneye izinsiz girişler için açık bulunması
- Kullanıcı profilinin çıkarılması
- EA'lar ile seyahat bilgilerinin saptanması
- Uyku saatleri ve içe gitme zamanları gibi özel bilgilerinin elde edilmesi

3.9. Hesapsal Yöntemler

Akıllı bir şebekeyi oluştururken, mevcut sistemlerin işleyiş mekanizmalarıyla beraber; bilgi sistemlerinin ve hesapsal yöntemlerin de kullanılması gerekir. Akıllı şebekelerde karşılaşılan sorunların karmaşıklığı ve bu zm alanlarının büyüklüğü göz önüne alındığında, tek bir hesapsal yöntemin zm arayışlarında yetersiz kalabileceği rahatlıkla görülecektir. Bu nedenle, farklı hesapsal yöntemleri iyi tanımak, onlardan akıllı şebekelerde kullanıma uygun olanları belirlemek ve bu yöntemleri, akıllı şebeke standartlarına uygun biçimde yapı içerisindeki diğer bileşenlerle bir arada kullanmak çok önemlidir.

Hesapsal yöntemler arasında, en yaygın kullanılanları optimizasyon yöntemleridir. Klasik optimizasyon yöntemleri, kullanışlı yöntemler olsalar da akıllı şebeke fonksiyonlarını gerçekleştirmede yetersiz kalırlar. Optimizasyon amaçlı kullanabilen hesapsal yöntemler ve bu yöntemlere ait kategoriler şekil 3.4'de gösterilmiştir [95]. Bu yöntemleri, farklı başlıklar ve kategoriler altında sınıflandırmak mümkündür. Aynı şekilde, yöntem ağacına başka hesapsal yöntemler de eklenebilir. Tek bir yöntemin zm için yetersiz kaldığı durumlarda, bu yöntemler bir araya getirilerek hibrit zm yöntemleri de retiler.



Şekil 3.4. Optimizasyon amaçlı kullanılabilen hesapsal yöntemler.

3.9.1. Karar Sistemleri

Karar sistemleri, rasyonel çıkarımlar yaparak belirsizlik problemlerini çözmeye çalışır. Oyun teorisi, duyarlılık analizi, analitik ağ işlemi, karar ağaçları ve maliyet-fayda analizi gibi yöntemler karar sistemleri oluşturmak için kullanılırlar [95].

3.9.2. Statik Yöntemler

Optimizasyon problemleri için, matematik tekniklerinden yardım alarak çözüm arayan yöntemlerdir. Lineer programlama, lineer olmayan programlama, tam sayılı programlama, kuadratik programlama ve Barrier metodu gibi farklı statik yöntemler bulunur [122-125]. Bunların arasından, çözüm aranan problemin sınırlamalarına ve hedeflerine göre en uygun olanı tercih edilip kullanılır.

3.9.3. Dinamik Programlama

Dinamik programlama, genellikle sıralı ve çok aşamalı karar verme problemlerinin çözümünde kullanılır [126]. Bir problem alt problemlere ayrıştırılır ve bu alt problemler çözülerek problemin çözümü inşa edilir. Bu yöntem sayesinde, çok değişkenli bir problemin çözümüne tek değişkenli problemler çözülerek ulaşılabilir [95].

3.9.4. Evrimsel Programlama

Doğadaki çözüm yöntemlerini ele alınarak geliştirilmiştir. Genel olarak çözümü zor ve karmaşık optimizasyon problemleri için kullanılırlar. Bu kategorideki yöntemlerin en yaygın bilinenleri: GA'lar, sezgisel programlama, parçacık sürü optimizasyonu, karınca kolonisi, tabu arama ve benzetilmiş tavlama'dır [127-132]. Ancak literatürde, farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş çok sayıda evrimsel hesaplama yöntemi bulunur.

3.9.5. Akıllı Sistemler

Akıllı sistemler, problemlere insana benzer çözümler üretebilecek şekilde tasarlanmış sistemleri içerir. Bu sistemler, tecrübe gibi uzman bilgisine ve belirsiz çıkarım yapma yeteneğine sahip olmalıdır [95]. Zorlu ortamlarda bile bir çözüm bulmaları beklenir. Uzman sistemler, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve veri madenciliği bu türde yöntemlerdir [133-135].

4. TALEP TARAFI YÖNETİMİNDE PİSAGOR BULANIK MANTIK TABANLI OYUN TEORİSİ KULLANIMI

Bir çok ülkede, elektrik iletimi ve dağıtımını işlerini yapan kurumlar özelleştirilmiştir ya da bu kurumların özelleştirilmesi planlanmaktadır [136]. İster kamu idaresinde bulunsun ister özel sektör tarafından işletilsin, kurumların bazı amaçları müşterektir. Bunlar; maliyetleri azaltmak, yeni teknolojileri daha etkin kullanmak ve çevreci yeşil teknolojiler geliştirmektir. Bu kurumların özelleştirilmeleri, pazarı özgürleştirip regülasyonları yeniden tanımladığı için; ülkeler de elektrik şebekelerini yeniden tanımlama ihtiyacı duymaya başlamıştır [137]. Bu duruma paralel biçimde, tüketicilerin son yıllarda EA'lar ve akıllı ev aygıtları gibi yeni ürünlere sahip olmasıyla, elektrik enerjisi tüketim davranışı hızla değişmektedir. Bütün bu değişimler, şebeke içerisinde farklı mekanizmaları kurgulanma ihtiyacını arttırır.

Bir şebekede, arzulan tüketim biçimi 24-saatlik bir zaman dilimi içerisinde homojen olarak dağılmış olanıdır. Tüketim esnasında tepe-yüklenmeler ya hiç oluşmamalıdır ya da asgari sayıda oluşmalıdır. DSM sistemleri, bu amacı gerçekleştirmeye çalışan yapılardır. Buradan yola çıkılarak DSM, müşterilerin sayaçları üzerinden enerji tüketiminin kontrol edilmesi olarak tanımlanabilir. DSM'nin bir elektrik şebekesinde uygulanabilmesi için, akıllı sayaçların ve akıllı yönetim sistemlerinin şebekede bulunması gerekir. Akıllı sayaçlar, DSM sistemlerinin en önemli bileşenidir. Çünkü, merkezi ya da dağıtık bütün ortamlarda müşteriler ile dağıtım şirketi arasındaki iki-yönlü haberleşme akıllı sayaçlar kullanılarak sağlanır. Bu haberleşme mekanizması sayesinde, tüketim verileri toplanarak talep belirlenir. Talep bilgisi, DSM gibi akıllı sistemlerin kurgulanması için gereklidir.

DSM, sadece işletme ve ekonomi bilimleri için önemli bir araştırma alanı değildir. En az onlar kadar, karşılıklı işlemlerin gerçekleştiği bilgi teknolojileri alanı için de önemlidir. Bir çok endüstride, daha duyarlı bir akıllı sistem geliştirmek için talebin doğru biçimde analiz edilmesi gerekir. Fonksiyonel bir talep analizi için en önemli zorluk, sistem içerisinde eksik bilginin bulunmasıdır. Bu eksiklik, davranışsal belirsizliğin bir çıktısı olarak sistemde oluşabilir ya da talep verisinin gerçek zamanlı işlenmesindeki zorluklardan doğabilir. Artan enerji talebi ve EA'ların artan kullanımı sonucu şebekelerdeki talep, kolay tahmin edilemez bir duruma gelecektir. Bu belirsizlik yüzünden, şebekeler için akıllı talep yönetim sistemlerinin geliştirilmesi bir zorunluluk haline gelir. Ancak, bu konuda önerilen

çoğu çözüm eksik veriler nedeniyle genel olarak çok kullanışlı yapılar değildir. Bilgi eksikliğinin bulunduğu ortamlarda talep analizi zor bir işlemdir. Bu kısımda önerilen Pisagor bulanık mantık tabanlı yaklaşım, bu tür bilgi eksikliğinin bulunduğu ortamlardaki talebin analizinde kullanılabilir. Bu analiz işlemi için ilk olarak, bir Bayes oyunu çok sayıda sonlu oyuncu içerecek biçimde tanımlanır. Daha sonra, bu ortamdaki oyuncuların karar mekanizmalarında Pisagor bulanık tabanlı bir hesapsal yöntem kullanılır. Literatürdeki geleneksel yöntemlerin aksine, önerilen bu hesapsal yöntem bir sistemdeki talebi tahmin etmeye ya da öngörmeye çalışmaz. Bunun yerine, giriş verisinin yetersiz olduğu ya da hesaplama maliyetinin yüksek olduğu durumlardaki talebi analiz etmeye çalışır. Tezin bu kısmında önerilen yöntem, eksik bilginin bulunduğu başka ortamlarda da kullanılarak yeni çözümler üretilebilir.

DSM yapısını kurgulamak için etmen-tabanlı bir metodoloji kullanılmıştır. Sistemdeki akıllı etmenlerin, eksik bilgi üzerine kurgulanmış kişisel strateji kümeleri bulunur. Literatürdeki çoğu DSM, toplanan talep verisinin tam ve sonlanmış olduğunu kabul eder. Oysa gerçek hayatta çoğu zaman bu mümkün olmaz ve talep bilgisi dinamik olarak bir zaman periyodu içerisinde bile farklılık gösterir. Önerilen yapı, Bayes oyun teorisi prensipleri üzerinden kurgulanmıştır. Bu oyunda, strateji kümeleri Yager tarafından önerilen PFS kullanılarak oluşturulur [138,139]. PFS, bulanık kümelerin standart olmayan bir genelleştirmesidir ve karar verme problemlerini çözmek için uygundur [140,141]. Zhang, PFS'nin seçme ve çok kriterli karar verme problemlerinde etkin bir yaklaşım olduğunu göstermiştir [142,143]. PFS kullanılmasının temel nedeni, talep analizine başlanıldığı noktada veri içerisinde var olan belirsizliğin fazlalığı ve sonrasında çeşitli işlem zorlukları nedeniyle ortaya çıkan veri eksikliğidir. Ağ trafiği, ağdaki gecikme ya da işlemleri gerçekleştiren bilgisayarların performansı bu zorluklara neden olabilir.

DSM yapılarında tüketimi yönetebilmek için sadece talep analizi yapılması yeterli olmaz. Bir çok hizmet ve servis için talep, fiyatlama ve trend gibi faktörlere bağlı bir inceleme yapılmalıdır. Fiyatlama, bir talebi arttırmak ya da azaltmak için bir teşvik mekanizması olarak kullanılabilir. Tek başına fiyatlama verisinin kullanılması, DSM için yeterli değildir. Çünkü, fiyatlamayla sadece talep kontrol altında tutulabilir. Daha etkin bir çözüm için uygun bir talep analizinin yapılması gerekir. Bu kavramlardan yola çıkarak talep problemi, tüketiciyi temsil eden bir yapının ya da akıllı bir etmenin, bir ekonomik kısıda bağlı olarak kendi fayda fonksiyonunu maksimize etmesi olarak tanımlanabilir [144]. Oyun teorisinden ve PFS'den faydalanan etmen-tabanlı yaklaşımda, enerji

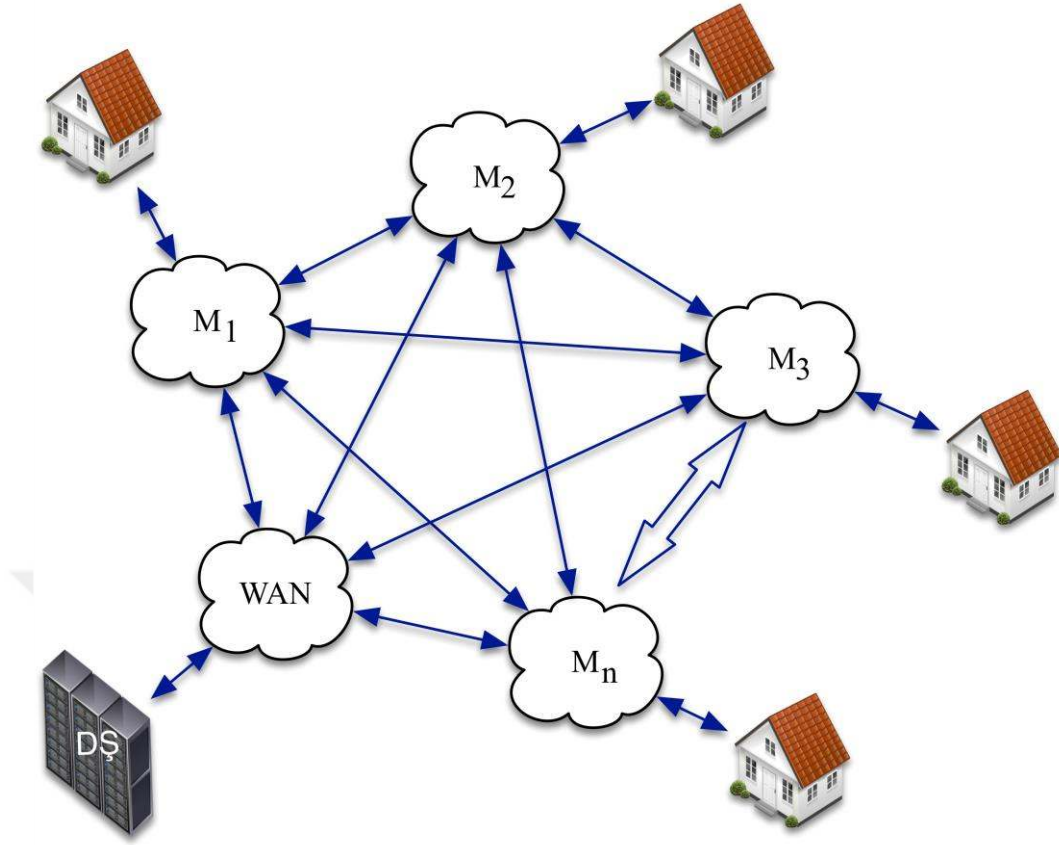
fiyatlaması ekonomik kısıt olarak kullanılmış ve bir ödeme mekanizmasıyla tüketicilerin DSM sistemine katılımları teşvik edilmiştir.

4.1. Önerilen DSM Sistemi

Bir DSM, tüketicilerden veri toplayabilmeli, topladığı bu verileri değerlendirebilmeli ve son olarak yapı içerisindeki tüketicileri bilgilendirebilmelidir. Tüketiciler, DSM tarafından sağlanan bilgiyi kullanıp kendi aralarında belirledikleri ortak bir hedefe ulaşmaya çalışır. Bu nedenle, DSM sistemlerinde hem tüketiciler arasında hem de tüketicilerle dağıtım şirketi arasında iki-yönlü bir haberleşme mekanizması bulunması gerekir. Dağıtım şirketi, şebekenin toplam yük durumuna göre enerji fiyatlarını günceller ve sonrasında güncellenmiş fiyat bilgisini tüketicilere iletir.

Şekil 4.1’de bir DSM içerisindeki haberleşme altyapısı gösterilmiştir. Bu sistemde, n adet tüketici ya da müşteri bulunuyor olsun. Bu tüketiciler, şekilde $M_1...M_n$ olarak gösterilmiştir. Sistemde bulunan dağıtım şirketi ise $DŞ$ olarak gösterilmiştir. Şekildeki iki yönlü oklar, hem tüketicilerin kendi aralarında yaptıkları veri alışverişlerini hem de tüketicilerle dağıtım şirketi arasındaki veri alışverişlerini gösterir. Bu sistemde, güncel enerji fiyatı bilgisi ve tüketim verileri taraflar arasında sürekli iletilmektedir. Tüketiciler, sistemde kendi ev alan ağlarına (HAN, Home Area Network) sahiptir ve kullandıkları akıllı sayaçlar, enerji yönetim yapıları vb. cihazları bu ağa bağlıdır. Dağıtım şirketi, geniş alan ağını (WAN, Wide Area Network) kullanarak sisteme bağlanır.

Etkin bir DSM’nin hem tüketiciler hem de dağıtım şirketi için çok sayıda faydası bulunur. Çünkü, tüketicilerle ve dağıtım şirketi ortak bir amaç için buluşabilirler. Bu ortak amaç, enerji maliyetlerini düşürmek için bir şebekenin günlük yük dağılımının daha homojen olması ve tepe-yük miktarlarının düşürülmesidir. Buradan yola çıkılırsa, oyun teorisinin dinamik fiyatlamayla beraber kullanılması şebeke içerisinde bir denge mekanizması kurgulanmasını sağlayabilir. Bu mekanizma, dağıtım şirketinin fiyatlama stratejisini ödedikleri fatura bedellerini azaltmak isteyen müşterilerin stratejileriyle birleştirebilir.



Şekil 4.1. Talep tarafı yönetimi içerisindeki haberleşme altyapısı.

4.1.1. Oyun Teorisi

Oyun teorisi, akıllı etmenlerin stratejik davranışlarını analiz eden bir hesapsal yöntemdir [145]. Bir oyun; genel olarak oyuncuların, oyuncuların strateji kümelerinden ve stratejileri gerçekleştirmek için yapılan eylemlerden meydana gelir. Sonlu sayıda oyuncu, ortak bir amaca ulaşmak için oyun içerisinde kendi stratejisini belirler. Her yeni oyun adımında, oyundaki oyuncuların stratejileri de değişir. Oyunda, hiçbir oyuncunun kendi stratejisini değiştiremediği bir noktaya gelinirse, bu denge noktası Nash dengesi olarak adlandırılır. Nash dengesi, sistemdeki bütün oyuncuların amaçlarına ulaştığını gösterir. Başka bir ifadeyle, oyuncular arasındaki uzlaşma noktasıdır ve problem için en uygun çözüm noktasıdır [145-147]. Bu dengenin varlığı, uzlaşmayı gösterdiği için oyun teorisi çalışmalarında önemlidir. Fakat, bir oyunda Nash dengesinin varlığı ispat edilse bile, zamansal olarak hesaplanması mümkün olmayabilir ya da çok maliyetli olabilir. Böyle durumlarda, diğer hesapsal yöntemlerden yardım alınarak hibrit bir çözüm tasarlanabilir.

Oyun teorisi, evrensel bir yöntemdir ve ekonomiden biyolojiye farklı alanlarda uygulamaları bulunur. Akıllı şebekeler, sahip olacakları yüksek teknoloji ve hizmetler sayesinde, tasarım ve analiz aşamalarında oyun teorisi yönteminden faydalanabilirler [148]. Oyun teorisinde, farklı oyun türleri bulunur ve bu oyunlar değişik noktalardan ele alınıp sınıflandırılabilir. Bir oyundaki aşamalar, bilgi seviyesi ya da oyuncular arasındaki uzlaşmalar, sınıflandırma için kullanılabilir [146,149]. Oyundaki aşamalara göre, oyunları statik, dinamik ya da rastsal oyunlar olarak; bilgi seviyesine göre tam bilgi oyunu ya da eksik bilgi oyunu olarak sınıflandırılabilir [146]. Bir başka sınıflandırma şekli uzlaşmaya göre yapılır ve oyunlar; işbirliği olmayan (non-cooperative) ve işbirliği olan (cooperative) şeklinde sınıflandırılır [149]. Akıllı şebeke çalışmalarında, daha çok işbirliği olan ve olmayan oyunlar, tıkanıklık oyunu ve Bayes oyunu kullanılır.

İşbirliği olmayan oyunlar, oyuncuların kesişen faydalar için kendi stratejilerini belirlediği oyunlardır. Bu oyunlarda, bir haberleşme mekanizması bulunur, fakat oyuncuların stratejileriyle ilgili bilgi diğer oyuncularla paylaşılmaz. Bu tür oyunların, statik ve dinamik olmak üzere iki tipi bulunur. Dinamik oyunlarda, oyuncular oyun içerisinde birden fazla sayıda eylemde bulunabilirler. Statik oyunlarda ise her oyuncu sadece bir defa eylemde bulunarak oyunu tamamlar. İşbirliği olan oyunlar, işbirliği olmayan oyunlardan farklı olarak oyuncuların birbirleriyle haberleştiği ve fayda miktarlarını arttırabilmek için birbirleriyle uzlaştığı oyunlardır.

Tıkanıklık oyunu (congestion game), özel bir oyun türüdür ve Nash dengesine ulaşabildiği için son dönemlerde popülerliği artmıştır [150-151]. Bu oyunda, biri oyuncular için diğeri ise kaynaklar için ayrılmış iki adet küme bulunur. Oyundaki her oyuncunun, oyun sırasında kaynakların paylaşımı için kullanılan, kendine ait bir sonlu strateji kümesi olur. Kaynak kullanımının bir maliyeti olduğu için, her bir oyuncu o maliyeti en aza düşürecek şekilde en iyi stratejiyi bulmaya çalışır. Oyunun sonunda, bütün strateji kümeleri birleştirilerek bir çözüm kümesi oluşturulur. Tıkanıklık oyunları, kendi içinde ağırlıklandırma yapılmış ve yapılmamış olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

Son olarak, Bayes oyunu özel bir oyun türüdür ve temel farklılığı oyundaki akıllı etmenlerin eksik bilgiye sahip olabilmeleridir. Örneğin, bir oyuncu diğer oyuncunun kazançları konusunda bilgi sahibi olmayabilir. Bayes oyununda, oyuncuların kanılarını tanımlamak karmaşık bir işlemdir. Diğer oyun türlerinde, bir oyuncunun kanısı diğer bütün oyuncuların kanıları kullanılarak tanımlanır. Bayes oyununda ise bir oyuncu tarafından diğer oyuncuların kanılarının sadece bir kısmı bilinir. Bu sebeple bu tür oyunlarda, her

oyuncu diğer oyuncuların olası eylemleri için öznel olasılık değerleri belirler ve oyun adımlarındaki hesaplamalar bu eksik bilgiler kullanılarak yapılır.

4.1.2. Fiyatlama Stratejileri

Tüketiciler, akıllı sayaçlar gibi teknolojik yönden gelişen şebeke elemanları sayesinde, elektrik tüketimleri hakkında anlık olarak bilgi alabilirler ve enerji yönetimi çabalarını güçlendirecek biçimde aktif katılımı bulunabilirler. Dağıtım şirketleri de, müşterilerinin daha etkin enerji tüketicileri olmasını teşvik edecek fiyatlama seçenekleri sunacaklardır. Dağıtım şirketlerinin, müşterilerinin tüketim davranışlarını dengelemek için elektrik fiyatlarında sundukları esneklik ile müşterilerinin konfor algıları arasında hassas bir çizgi bulunur. Yeterince müşteri katılımı sağlayamayan bir DSM istenilen faydayı da veremez. Fiyat-konfor dengesini, uzman bilgisiyle belirlemeye çalışmak doğru bir yaklaşım değildir. Etkin bir çözüm için fiyatlamayı belirleyebilen hesapsal yöntemlerin kullanılması gerekir.

Şebekelerde, çeşitli fiyatlama stratejileri kullanılır. Yaygın olarak kullanılan fiyatlama stratejileri; sabit fiyatlama (flat pricing), kullanma zamanı fiyatlaması (time-of-use pricing, TOU), kritik tepe fiyatlaması (critical peak pricing, CPP) ve gerçek zamanlı fiyatlamadır (real time pricing, RTP) [152]. Sabit fiyatlamada, dağıtım şirketi bütün zaman dilimleri için sabit bir fiyat belirler. Sabit fiyat belirlendikten sonra, yeni bir fiyat belirlemesi yapılmadıkça aynı değerde kalır. Kritik tepe fiyatlamasında, farklı zaman dilimleri için değişen fiyatlamalar kullanılır. CPP, bu açıdan bakıldığında dinamik fiyatlamaya benzer. Ancak, dinamik fiyatlamada CPP'den farklı olarak fiyat sabitlemesi yapılmaz ve her bir zaman dilimi için fiyatlaması ayrıca hesaplanır. Dinamik fiyatlamasının en büyük faydası, bir dağıtım şirketine fiyatlaması kararını pazar koşullarını iyi bildiği bir noktada yapabilme imkanı vermesidir. Bu sayede, dağıtım şirketi kendi stratejisini daha etkin bir biçimde kullanarak fiyatları ayarlayabilir. Gerçek zamanlı fiyatlaması, bir dinamik fiyatlaması yöntemidir. Gerçek zaman olarak kabul edilen bir zaman dilimi için anlık olarak fiyat belirlenmesi yapılır. Tablo 4.1'de şebekelerde kullanılan farklı fiyatlaması stratejileri ve bu stratejilerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Şebekelerde kullanılan farklı fiyatlandırma stratejileri ve özellikleri.

Strateji Adı	Özellikleri
Sabit Fiyatlandırma	Elektrik fiyatları, kullanıma bağlı olarak ya da kullanımın yapıldığı zamana bağlı olarak bir değişim göstermez.
TOU	Elektrik fiyatları, belirli zaman dilimleri için farklı olacak şekilde belirlenir. Anlaşılması kolay ve tahmin edilebilir bir stratejidir. Genel olarak, belirlenmiş zaman dilimlerinde, elektrik fiyatları %100 oranında artırılır.
CPP	Fiyatlar tepe-yük noktalarının varlığına göre değişiklik gösterir. Dağıtım şirketi, belirli bir zaman dilimi için tepe-yük fiyatlarının nasıl olacağıyla ilgili müşterilerini bilgilendirir. Tepe-yük zamanlarında, %500'e varan oranlarda fiyat artışları olabilir.
RTP	Elektrik fiyatları dinamik olarak değişim gösterir. Talep ve saatlik üretim maliyetleri dikkate alınarak yeni bir fiyat belirlenir. Belirsizliği azaltmak için, bir gün sonrasında kullanılacak şekilde de uygulanabilir. Uygulanması, diğer fiyatlandırma stratejilerine göre daha karmaşık ve zordur.

Sabit fiyatlandırma, DSM gibi teşvik-tabanlı algoritmalar kullanan yapılar için uygun bir fiyatlandırma stratejisi değildir. Bu yüzden, yöntem geliştirilirken dinamik bir fiyatlandırma kullanılması tercih edilmiştir. DSM içerisinde, dinamik fiyatlandırma yapabilmek için bütün zaman dilimlerindeki tüketim verilerine ayrı ayrı ihtiyaç duyulur. Tüketimin fazla olduğu zaman dilimleri için cezalandırma; düşük olduğu zaman dilimleri içinse ödüllendirme yapılır. Önerilen modelde, ödüllendirmeler için bir sınırlama bulunur. Sınırlamalar sayesinde, fiyatlandırmanın hiçbir zaman üretim maliyetinin altına düşmemesi sağlanır. Benzer bir mantıkla, cezalandırma miktarları hiçbir zaman kabul edilemeyecek yükseklikte bir fiyatlamaya neden olmaz. Bu türden istenilmeyen fiyatlamaların oluşmasını engellemek için, bir uygun fiyatlamalar kümesi ρ aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\rho = [\rho_{min}, \rho_{max}] \quad (4.1)$$

Uygun fiyatlamalar kümesi, dağıtım şirketi tarafından seçilen fiyatlandırma aralığını belirler. Bu kümesi kullanılarak tanımlanan fiyatlandırma fonksiyonu, alttan ve üstten bağlı bir fonksiyondur. Dinamik fiyatlandırma fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$F(\rho, L) = \begin{cases} \rho_{min}, & L \leq L_{min} \\ r\chi \frac{\varpi + L}{\varpi}, & L_{min} < L < L_{max} \\ \rho_{max}, & L \geq L_{max} \end{cases} \quad (4.2)$$

Burada, $r \in \rho$ dağıtım şirketi tarafından belirlenen fiyatlama bilgisini gösterir, L şebekedeki yük değerleridir, ϖ pozitif değerli bir sabittir ve χ dağıtım şirketinin fiyatlama stratejisi parametresidir. Dinamik fiyatlama, şebekedeki yüklerin bir artan fonksiyonudur. Dağıtım şirketi, ödül ve ceza miktarlarını kontrol etmek için fiyatlama stratejisi parametresini kullanır.

4.1.3. Pisagor Bulanık Kümeleri (PFS)

PFS, standart olmayan bir bulanık küme sınıfıdır [138,139]. PFS içerisinde, her $x \in X$ için üyelik dereceleri $r(x)$ ve $d(x)$ değerleri ile belirlenir. Bu değerlerden $r(x)$ üyeliğe bağlılığın gücünü, $d(x)$ ise üyeliğe bağlılığın yönünü tanımlar. Bu değerler, $A_Y(x)$ ve $A_N(x)$ olarak adlandırılan ve sırasıyla üye olmak ve olmamak için destek miktarlarını gösteren üyelik dereceleriyle ilişkilidir. Üyelik dereceleri, aşağıdaki eşitlikleri sağlar:

$$A_Y(x) = r(x) \cdot \cos(\theta(x)) \quad (4.3)$$

$$A_N(x) = r(x) \cdot \sin(\theta(x)) \quad (4.4)$$

$$\theta(x) = (1 - d(x)) \pi / 2 \quad (4.5)$$

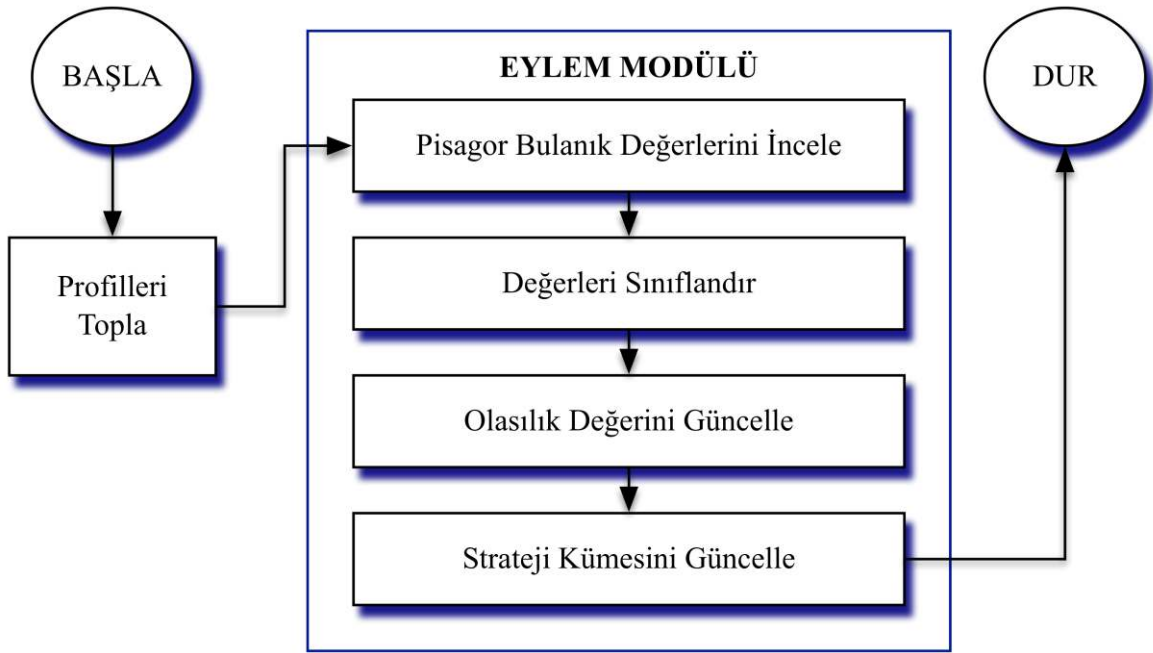
Pisagor teoremi kullanılırsa, PFS üyelik derecelerinin aşağıdaki özelliğe sahip olduğu sonucu çıkarılır:

$$A_Y^2(x) + A_N^2(x) = r^2(x) \quad (4.6)$$

Bir $r(x) \in [0,1]$ değerinin büyük değerlere sahip olması, x noktasındaki üyelik için üyeliğe daha güçlü bir bağlılık anlamına gelir. Bunun tersine, küçük değerler için daha fazla belirsizlik olduğu anlamı çıkar.

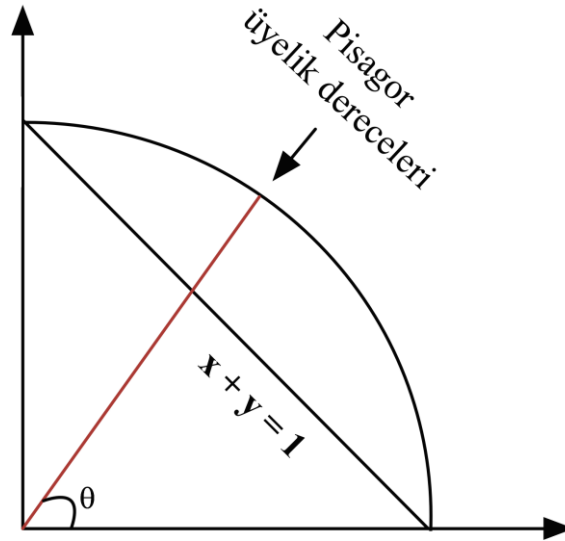
Bir Bayes oyununda, PFS üyelik dereceleri bir oyuncunun ya da tüketicin talep için isteğini gösterecek biçimde kullanılabilir. Bu talep isteğinin bulanık olması normaldir. Çünkü, bir oyuncu talep konusundaki kararını sonradan değiştirmek isteyebilir. Eldeki

bütün bulanık talep bilgisi toplanıp sınıflandırılarak, oyun esnasında bir oyuncunun kararı şekillendirilir. PFS değerleri, sınıflandırma sonucu varılan karar işlemindeki eksik talep bilgisinin etkilerini sınırlandırmaya yarar. PFS değerleri kullanılarak oluşturulan karar verme süreci, Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Eylem modülü içerisinde toplanan profillerde yer alan PFS değerleri incelenerek oyuncular için bir karar verme mekanizması oluşturulur. Olasılık değerleri toplanan profillere göre değişir ve bu değişim oyuncunun strateji kümesinin güncellenmesinde kullanılır.



Şekil 4.2. Karar verme sürecinde PFS değerlerinin kullanımı.

Geleneksel bulanık kümeleme yönteminde, bir girdi birden fazla kümeye ait olabilir. Bunun sonucu olarak, kümeleme yönteminin bulanıklıkla baş etmesi gerekir. PFS ise kümeleme ve sınıflandırma işlemleri için çok daha uygun bir yöntemdir. PFS içinde bulunan θ değerleri, her iki üyelik derecesi hakkında bilgiyi Şekil 4.3’de gösterildiği gibi açısal olarak sağlar. Açı değerleri ve Tablo 4.2’de verilmiş kurallar kullanılarak, talep bilgisi beş farklı talep sınıf oluşturacak biçimde sınıflandırılır.



Şekil 4.3. Pisagor üyelik dereceleri ve θ açısı.

Tablo 4.2. θ değerlerine göre talep sınıflandırmaları.

Talep Sınıfı	θ Değerleri
Çok Yüksek Talep (ÇYT)	$72 < \theta \leq 90$
Yüksek Talep (YT)	$54 < \theta \leq 72$
Ortalama Talep (OT)	$36 < \theta \leq 54$
Düşük Talep (DT)	$18 < \theta \leq 36$
Çok Düşük Talep (ÇDT)	$0 \leq \theta \leq 18$

4.1.4. Problem Tanımı

Bu kısımda, DSM için problem tanımlaması Bayes oyun teorisi yöntemi kullanılarak matematiksel olarak yapılacaktır. Bir DSM için problem, yüklerin belirli bir zaman aralığında en uygun biçimde dengelenmesi olarak tanımlanır. Burada, enerji tüketiminin azaltılması hedeflenmez, tüketim esnasında yükün dengeli bir biçimde dağılması hedeflenir. Bu hedef doğrultusunda bir DSM, akıllı biçimde teşvik mekanizmalarını kullanarak, tüketimi farklı zaman dilimlerine kaydırmaya ve dengede tutmaya çalışır.

Bir akıllı şebekede bulunan oyuncu (tüketici) sayısı n olsun. Her oyuncu için, günlük toplam tüketim değeri aşağıdaki eşitliği sağlayacak şekilde m adet τ -dakikalık zaman dilimine bölünebilir.

$$m\tau = 1440 \quad (4.7)$$

Bu durumda, herhangi bir i oyuncusunun günlük tüketim değerleri aşağıdaki vektör ile ifade edilir,

$$t_i = [t_i^1, \dots, t_i^m], \quad 1 \leq i \leq n \quad (4.8)$$

Her i oyuncusunun sahip olduğu t_i vektörü, m adet zaman dilimine bölünerek bir zaman dilimindeki tüketim değeri ifade edilir. Bir oyuncu, ilk olarak bir zaman dilimi için bir fiyatlandırma bilgisi alır ve daha sonra o zaman dilimi için yapacağı tüketimini ayarlar. Günlük tüketim bilgileri kullanılarak, bir oyuncunun tüketim değerleri matrisi Z oluşturulur. Bu matrisin satırları günleri, sütunları ise zaman dilimlerini gösterir. Matris içerisindeki değerler, satırla belirlenmiş günün sütunla belirlenmiş saat dilimi için tüketimi verir. Literatürdeki çalışmalarda, tüketim genellikle günlük olarak ele alınmıştır. Daha uzun bir zaman periyodu tercih edilmesinin nedeni, geç saatlerde olan bazı tüketimlerin sonraki güne kaydırılma olasılığıdır. Sadece bir günü baz alan çalışmalarda, bu değerler sonuca doğru biçimde yansıtılmamış olur. Dağıtım şirketinin oyun içerisinde bir oyuncu olarak kabul edilmesiyle toplam oyuncu sayısı $n+1$ olur. (4.9)'da oyuncuların strateji kümelerinin tanımlaması verilmiştir.

$$S_i, \quad 1 \leq i \leq n+1 \quad (4.9)$$

Bütün oyuncuların stratejileri, Γ kümesi içerisinde toplanır,

$$\Gamma = (S_1, S_2, \dots, S_n, S_{n+1}) \quad (4.10)$$

Dağıtım şirketi için, amaç anlık tüketimi ortalama tüketime yakın tutmaktır. Seçilen zaman periyodundaki herhangi bir gün için ortalama tüketim

$$\frac{1}{m} \left[\sum_{n=1}^n \sum_{k=1}^m t_i^k \right], \quad 1 \leq i \leq n \quad (4.11)$$

gibi tanımlanır. Burada t_i^k : i oyuncusunun k zaman dilimindeki tüketimini gösterir. Sonlu (n-oyunculu) bir Bayes oyunu, (4.12)'deki gibi bir G tanımlama grubu ile ifade edilir,

$$G = (N, \Omega, (A_i)_{i \in N}, (T_i)_{i \in N}, (S_i)_{i \in N}, (P_i)_{i \in N}), 1 \leq i \leq n \quad (4.12)$$

Burada, N : oyuncuların oluşan sonlu kümeyi gösterir. Ω : doğal durumları gösteren sonlu kümedir. Her bir $i \in N$ için A_i $[0,1]$ oyuncunun eylem kümesini ve T_i ise oyuncunun tipini gösterir. Oyuncu tipi, bir oyuncunun özel bilgi ve tercihlerinin tamamını ifade eden bir tanımlamadır. Son olarak, P_i $[0,1]$ bir oyuncu için ortak olasılık fonksiyonudur.

Oyundaki fayda fonksiyonu U_i , bir kartezyen çarpım ile belirlenir ve R reel sayıları göstermek üzere (4.13)'deki gibi tanımlanır,

$$U_i = A_i \times T_i \rightarrow R \quad (4.13)$$

Her i elemanı için, eğer k' her $k \in N - \{i\}$ için $k'_j = k_j$ şartını sağlayan bir alternatif profil ise $U_i(k) \geq U_i(k')$ şartı da sağlanır, bu durumda k profili bir Nash dengesidir. Eğer $k_i(A_i) > 0$ şartı sağlanırsa k profili güçlü bir ϵ dengesidir, bu durum aynı zamanda A_i eyleminin en iyi eylem olduğunu da gösterir [153]. Oyundaki bazı oyuncular eylem 1'i, geri kalanın ise eylem 0'ı seçtiği durumu düşünülün. Eylem 1'i seçen oyuncular en iyi eylemlerini seçmektedir ve diğer oyuncular hala kazançlarını artırma şansına sahiptir. Bayes oyununda, bir oyuncunun kazancı, diğer oyuncuların eylemlerinin oranına kısmen bağlıdır ancak yine de ölçülebilir. Bir oyuncunun stratejisi, o oyuncunun oyun esnasında verebileceği en iyi tepkidir. Bir i oyuncusu için saf strateji, ölçülebilir bir fonksiyondur. Saf strateji, her oyuncunun kendi eyleminin diğer oyuncuların stratejilerine karşı en iyi eylem olduğunu bilmesi anlamına gelir. Çok sayıda oyuncuya sahip sonlu bir Bayes oyununda saf bir strateji dengesi bulunduğu, saflaştırma ve simetrik dengeleme dağılımı aşağıda verilen ön savlardan yararlanılarak gösterilebilir.

Ön Sav 1. Oyunun herhangi bir noktasında, eğer Y_i dağılımı parçalanamazsa ve rasgele değişkenler $\{\psi_j : i \neq j\}$ ve $\xi_i \equiv (Y_i, T_i)$ karşılıklı bağımsız bir küme oluşturuyorsa, bu durumda her denge bir saflaştırmaya sahiptir [154].

Ön Sav 1'den elde edilen hipotezlere göre, her oyuncu için saf stratejilerde bir denge bulunur. Bayes oyunu, rakiplerinin eylemleri tüm oyuncular için aynı olan büyük sayılarda oyuncu ile oluşturulabilir. Böylece oyun, Cournot-Nash Dengeleme Dağılımı (CNED) gibi simetrik hale getirilmiş olur.

Ön Sav 2. Dağılmış büyük anonim bir oyun için, simetrik bir CNED bulunur [154].

Çok büyük sayıda oyuncuya sahip oyunlar, farklı akıllı etmen tiplerini analiz etmek açısından önemlidir. Farklı eylem senaryoları için, böyle bir oyunun daha küçük kısımları araştırılabilir. Bir sayılabilir kümenin, sayılabilir koleksiyonundaki oyuncuların sayısı da sayılabilir olduğu için, büyük anonim oyunlardaki oyuncuların homojen oldukları söylenebilir.

Teorem 1. Eğer büyük anonim sonlu bir Bayes oyununda eylem alanı sayılabilir bir kümeysen, bu oyun için saf bir strateji dengesi bulunur.

Önceki çalışmalardaki teoremleri birleştirmek [155-157], büyük anonim sonlu Bayes oyununda bir dengenin varlığına götürür.

Ön Sav 3. $k_i \subseteq \Omega$ olsun. Eğer $\eta^*(k_1, k_2) := (\eta_1^*(k_1), \eta_2^*(k_2))$ bir Bayes dengesi ise, (k_1, k_2) olay çifti, bir işbirliği olayları çifti olarak adlandırılır [158].

Ön Sav 4. Herhangi bir mükemmel Bayes dengesi η^* için, beklenen toplam katkı miktarı kesinlikle tek bir i oyuncusunun katkı miktarından daha fazladır [159].

Oyunun tamamlandığı noktada, oyuncular dengedeysen diğer oyuncuların eylemlerini bilirler. İşbirliği, özellikle eksik bilgi içeren tekrarlı oyunlarda önemlidir ve Ön Sav 3 ve 4'de belirtildiği gibi işbirliği daha iyi bir katkının oluşmasını sağlar.

Bayes oyununun başlangıcında, ilk olarak her i oyuncusu oyunu analiz eder. Oyuncuların, başlangıç analizlerini sistem hakkında bir ön bilgiye sahip olarak yaptıkları varsayılır. Bu varsayım, başlangıç sorunlarının ve iletişim gecikmelerinin üstesinden gelmesine yardımcı olur. Bayes oyununda mekanizma, oyuncuların eylemlerine karar vermek için kullandıkları mesaj kaynaklarıdır. Mesajlar, oyunculara kazanç bilgisini sağlarlar. Bir eylem gerçekleştirirken oyuncular, diğer oyuncuların tipleri hakkında bilgi sahibi değildir ve kanıları kendi olasılık fonksiyonları tarafından belirlenir. Diğer oyuncuların olasılık dağılımlarındaki muhtemel değişimler her zaman dikkate alınmalıdır çünkü bu olasılık değerleri oyun tekrar ettikçe değişebilir. Oyunun sonunda, bir çözüm elde edilir ve oyuncular oyunu geline denge noktasına göre analiz ederler.

Oyun içerisinde her bir zaman dilimi için, bazı tüketiciler ya da oyuncular dinamik olarak sağlanan fiyatlamaya bilgisine karşı bir eylem gerçekleştirir. Bu eylemler, dağıtım

şirketi tarafından şebekenin davranışına bakılarak öğrenilir ve değişen tüketim değerleri için yeni bir fiyatlandırma dinamik olarak yapılır. Oyun, bütün zaman dilimlerine dinamik olarak ayarlanmış birim fiyat bilgisi kullanılarak ilerler ve oyun içerisinde sürekli olarak oyuncuların kanıları güncellenir. Etmen-tabanlı bir sistem kullanılarak bu tür oyunlar kurgulanabilir. Bu sistemde, etmenler (ya da oyuncular) ilk olarak bir profil seçerler ve strateji kümelerini oluştururlar. PFS, karar verme aşamasında kullanılır. Seçilmiş profiller için benzetimle kazanç verisi hesaplanır. Baskın bir stratejinin olmadığı bir durumda, saf stratejilerin karışımı bir denge inşa eder. Son olarak, ampirik analiz kullanılarak oyun modeli güncellenir.

4.2. Uygulama

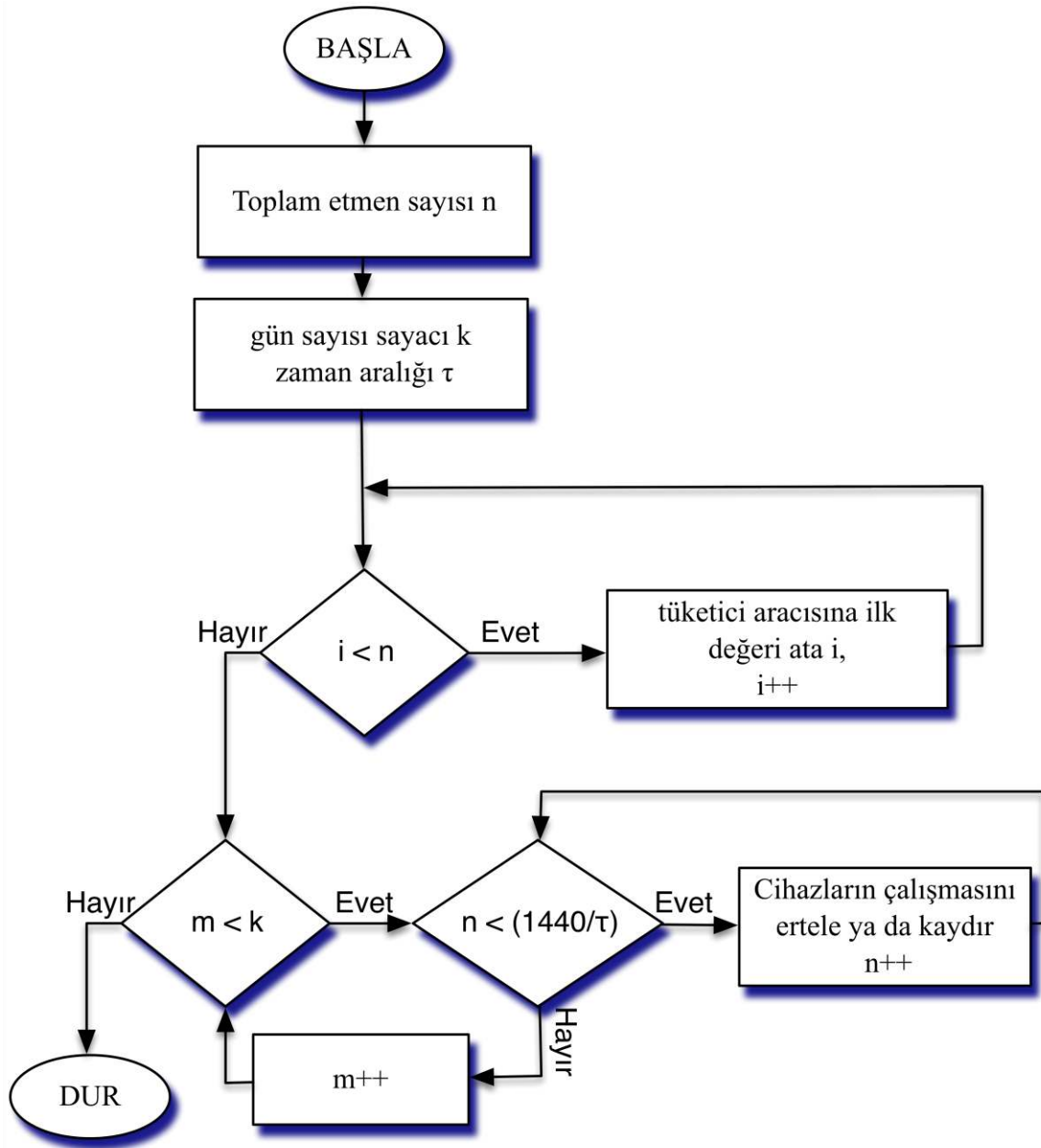
DSM, tek bir hesaplamayla çözüm bulunabilen bir yapı değildir ve karmaşıklığa sahiptir. Uygulanabilir bir çözüm için kapsamlı hesaplamaların yapılması gerekir. Bu yapıya yazılım çözümleri geliştirmek için çok-etmenli sistemler dışında başka yöntemler de kullanılmıştır.

Uygulamada, her bir tüketicinin günlük enerji tüketim miktarı toplam k adet τ -dakikalık aralığa bölünür. Tüketici etmeni, ilgili zaman aralığından kısa bir süre önce şebekeden fiyatlandırma bilgisini alır ve o zaman aralığı için yapacağı tüketimiyle ilgili bir eylemde bulunarak ya da bulunmayarak bu fiyatlamaya karşılık verir. Bu eylem için karar mekanizması PFS kullanılarak oluşturulur.

Literatürdeki diğer çalışmalar, yük ve tüketimi sadece 24 saatlik bir zaman diliminde incelemiştir. Bu tür incelemeler, bir günlük yükü gözlemlemek için yeterli değildir, çünkü tüketiciler özellikle akşam saatlerindeki yüklerini ertesi güne kaydırmayı tercih edebilirler. Bu sorunun üstesinden gelmek için bir kayan pencere modeli kullanılmıştır. Enerji tüketim verisi, bir $k-(1440/\tau)$ boyutlu Z matrisi içerisinde tutulmuştur. (4.14)'de gösterimi yapılan bu matriste satırlar günleri, sütunlar ise zaman dilimlerini gösterir.

$$Z = \begin{bmatrix} C_{10} & \cdots & C_{1(\frac{1440}{\tau})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{k0} & \cdots & C_{k(\frac{1440}{\tau})} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Matris içindeki her bir eleman, o zaman dilimi için bir Bayes oyunudur. Zaman dilimleri, çoğu DSM için 1 saat olarak seçilir. Bu seçim sonucu, her bir gün için toplam 24 adet oyun kurgulanır. Önerilen modelin güçlü tarafı, bir önceki kısımda anlatıldığı üzere eksik bilginin bulunduğu ortamlara uygulanabilmesidir. Bu özellik sayesinde, yüksek olan hesaplama maliyetleriyle baş edebilir. DSM yapısına ait akış diyagramı Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. DSM akış diyagramı.

4.2.1. Çok-Etmenli Sistem Mimarisi

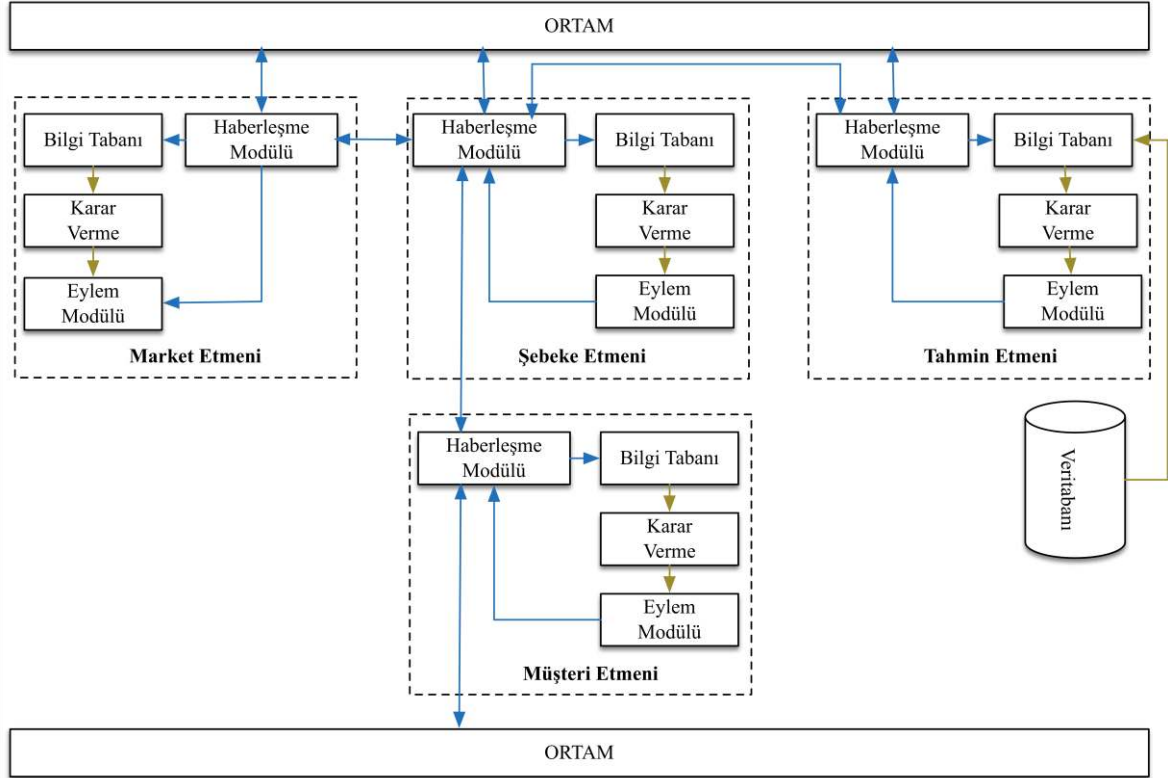
Akıllı bir etmen-tabanlı sistem, karmaşık problemleri daha küçük problemlere ayırıştırır ve etmen adı verilen bağımsız varlıklar, bu alt problemleri parçacıklı biçimde çözmeye çalışır. Bir etmen, onun karakterini oluşturan davranışlara sahiptir. Bütün etmenlerin özerklik, öngörülebilirlik, sosyal yetenekler ve tepkisellik gibi sahip olduğu bazı temel özellikler bulunur. Bir etmen ortamında, etmenler diğer etmenlerle etkileşim kurar ve ortamdan bilgi toplar.

Akıllı sistemler, merkezi bir yapıda ya da dağıtık bir yapıda olabilirler. Merkezi yapılarda, bir birleştirici rasyonel kararları verir. Dağıtık bir yapıda ise karar verme, koordine edilen bir süreçtir. Her ne kadar, çok-etmenli sistemler doğal olarak dağıtık yapılara daha uygun olsalar da merkezi yapılarda da kullanılabilirler. Bugüne kadar, çeşitli alanlardaki hem merkezi hem de dağıtık olan karmaşık problemler, etmen-tabanlı yapılar kullanılarak modellenenmiştir. Bir oyun-teorik sistemi temsil etmek için de akıllı bir etmen-tabanlı yapı kullanılabilir. Bu metodoloji, ampirik oyun teorisi analizi (EGTA) [160] olarak adlandırılır ve literatürde, evrimsel hesaplama karşı güçlü bir alternatif olarak kabul görür.

Akıllı şebeke ortamında, dağıtım şebekesi ve tüketiciler tarafından oluşturulan karmaşık bir yapı bulunur. NIST referans modeline göre akıllı şebeke; müşteri, market, servis sağlayıcılar, toplu üretim, işletme, iletim ve dağıtım alanlarına sahiptir [101]. Bu alanlar, aktiviteler ve davranışlar çok etmenli bir sistem kullanılarak modellenenbilir. Bu modelleme için dört farklı tipte etmen kullanılabilir. Bu etmenler; dağıtım şirketi etmeni, market etmeni, tüketici etmeni ve tahmin etmenidir. Dağıtım şirketi etmeni, elektrik enerjisini satar ve fiyatlamasını yapar. Market etmeni, elektrik arzı ile ilgili bilgi sunar. Tüketici etmeni, elektrik enerjisi talebini oluşturur. Tahmin etmeni, talep tahmini için çeşitli kaynaklardan gelen verileri depolar ve işler. Sistemde yük dengeleme işlemi yapabilmek için, etmenlerin enerji tüketimlerini başka bir zaman dilimine kaydıracak akıllı stratejilerinin bulunması gerekir.

Akıllı şebeke için bir çok-etmenli sistem mimarisi Şekil 4.5’de sunulmuştur. Sistem içerisindeki her etmenin kendine has hedefleri ve farklı sorumlulukları bulunur. Bunların dışında etmenlerin oluşturulması ve yok edilmesi için bir etmen yönetim bulunması gerekir. Sistemde en az bir adet dağıtım şirketi etmeni, market etmeni ve tahmin etmeni bulunur. Etmenlerin, talebi analiz edebilmek için aralarında mesajlaşmaları gerekir. Bu

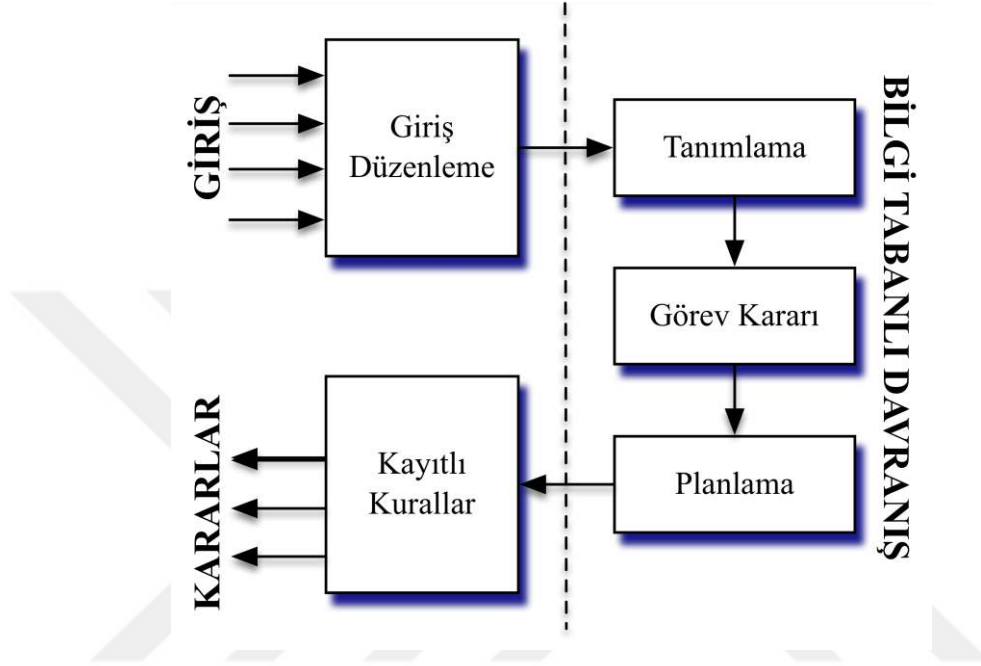
işlemler için etmen haberleşmesini sağlayan Mesaj Taşıma Hizmeti (MTH) kullanılır. Bu haberleşme modülü, Foundation for Intelligent Physical Agents (Akıllı Fiziksel Etmenler için Esaslar, FIPA) standartlarına uygun bir biçimde oluşturulur. MTH kullanılarak, ortamdan yeni birim fiyatlaması gibi önemli bilgiler alınır.



Şekil 4.5. Akıllı şebeke için bir çok-etmenli sistem mimarisi.

Ortamda bulunan etmenlerin, ufak farklılıkları bulunmakla beraber iç yapıları birbirlerine benzer. Örneğin, tahmin etmeni kendi haberleşme modülünü kullanarak bir depolama birimine erişebilir. Market ve dağıtım şirketi etmenleri işbirliği içerisinde çalışırlar. Bu etmenlerin, bir fiyatlama yönetim stratejileri bulunur ve bu hedefe ulaşmaya çalışırlar. Müşteri etmeni, Tablo 4.2’deki sınıflardan türetilen kurallar kümesine sahiptir ve bu sayede bir oyuna cevap verebilir. Bir etmen, olaylara tepki verirken eylem modülünü kullanır. Eylem modülü, farklı etmen mimarilerinin standart olan bileşenlerinden biridir. Bu modül etmenlerin davranışlarını temsil eder. Her davranış farklı bir algoritmaya dayanır ve bir etmenin karakteristik özelliklerini oluşturur. Gömülü zekayı oluşturabilmek için gerekli olan bilgi tabanı modülü, bir etmenin karar-verme modülüne bilgi sağlamak için kullanılır. Bu etmen-tabanlı mimaride, Şekil 4.6’da gösterimi yapılan Rasmussen’in bilgi-

tabanlı davranış modeli kullanılır [161]. Bu davranış modelinde, bütün eylemler harici olarak formülleştirilmiştir ve dış ortamdan gelen girdilere bağımlıdır. Etmen-tabanlı mimarideki son kısım, MTH kullanılan haberleşme modülüdür ve etmen koordinasyonu için gerekir.



Şekil 4.6. Rasmussen'in bilgi-tabanlı davranış modeli.

Etmen-tabanlı programlama kullanarak farklı ortamların gerçeğe yakın benzetimleri elde edilebilir. Bu yapıların modellenmesi ve sonrasında programa dönüştürülmesi için çeşitli açık kaynak yazılım kütüphaneleri kullanılabilir. Uygulamada, etmen platformu olarak açık kaynaklı Java Etmen Geliştirme Platformu (Java Agent Development Framework, JADE) [162] kullanılmıştır. JADE kütüphanesi bir çok önemli özelliğe sahiptir. Bu kütüphane, FIPA standartlarına uyumludur ve Etmen Haberleşme Dili (Agent Communication Language, ACL) kullanır. Ayrıca, JADE farklı etmen modellerini destekleyebilir ve farklı etmenler arasında kullanılmak üzere bir haberleşme altyapısı sağlar. DSM yapısının benzetimi yapılırken JAVA programlama dili ve JADE kullanılmıştır.

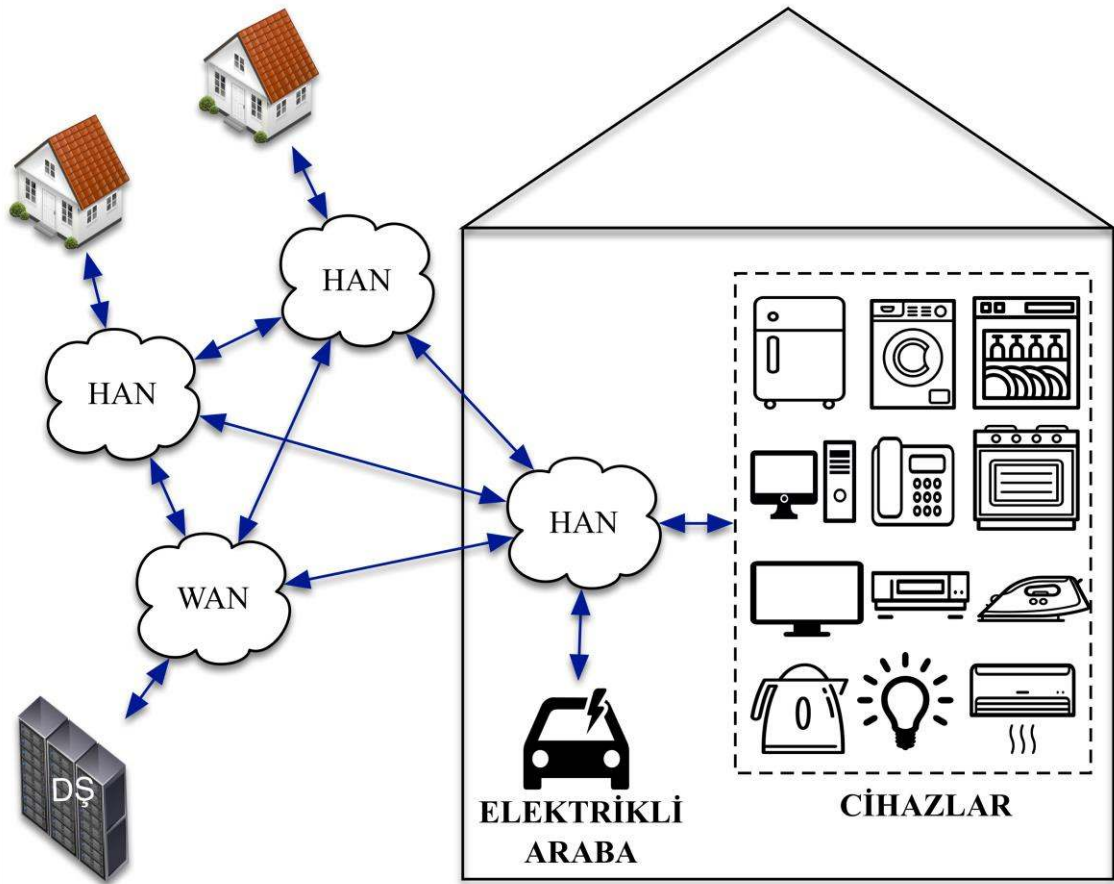
4.2.2. Benzetim Ortamı

DSM yapısını test etmek için kurgulanan benzetim ortamında 1000 etmen bulunmaktadır. Ortam içerisinde tanımlanan tüm etmenler, bir ana bilgisayarda JADE içerisinde bulunur. Tablo 4.3’de bu ortam için kullanılan parametre değerleri verilmiştir. Benzetim içerisindeki yapı; yükü dengeleme, fiyat stratejileri ve Bayes oyun adımları gibi konular açısından incelenmiştir.

Tablo 4.3. Benzetim ortamında kullanılan parametre değerleri.

Etmen Sayısı (n)	Gün Sayısı (k)	Zaman Aralığı (τ)
1000	30	30

Ortamda bulunan müşteri etmenlerinin ya da tüketicilerin iki farklı tipte tüketim ihtiyacı bulunur. Bunlardan birincisi, zamansal açıdan kaydırılamaz ihtiyaçlardan kaynaklanan tüketimlerdir. Örneğin, tüketiciler aydınlatmalarını başka bir zaman dilimine kaydırmazlar ya da faturalarını azaltmak için televizyon izleme davranışlarından vazgeçmezler. İkinci tüketim ihtiyacı tipi, zamansal açıdan kaydırılabilir ihtiyaçlardır. Bir tüketici, EA’sını acil bir durum söz konusu değilse başka bir zaman diliminde şarj edebilir ya da bulaşık makinası gibi bazı beyaz eşyaların çalıştırılmasını farklı bir zaman diliminde yapabilir. Şekil 4.7’de benzetim ortamındaki cihazlar ve unsurlar gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Benzetim ortamındaki cihazlar ve unsurlar.

Benzetimde kullanılan cihazların özellikleri Tablo 4.4’de verilmiştir. Tüketim profilleri, bu tablodaki cihazlar seçilerek oluşturulmuştur. Bu profiller oluşturulurken, aydınlatmanın çoğunlukla akşam saatlerinde gerekli olması ya da ev eğlence cihazlarının günün erken saatlerinde sık kullanılmaması gibi varsayımlardan faydalanılmıştır. Benzetim ortamındaki her bir hane ya da tüketici oyun içerisinde bir oyuncudur ve bu oyuncular birbirlerinden bağımsız davranır. Sanal popülasyonun tüketim davranışı, önceden belirlenmiş tüketim verisine göre şekillenir. Hanedeki her bir cihaz için bir kullanım zaman aralığı belirlenir ve bunun sonucunda o hane için birleştirilmiş yük değerleri hesaplanır.

Tablo 4.4. Benzetimde kullanılan cihazların özellikleri.

Cihaz Tipi	Tüketim (kWh)	Çalışma Süresi (saat)	Ertelenebilme (Evet/Hayır)	Durdurulabilme (Evet/Hayır)
Buzdolabı	0.15	24	Hayır	Evet
Bulaşık Makinası	2.50	2	Evet	Evet
Çamaşır Makinası	2.50	2	Evet	Evet
Fırın	2.00	2	Evet	Hayır

Elektrikli Araba	9.70	2	Evet	Evet
Televizyon	0.20	10	Hayır	Hayır
Ütü	1.80	1	Evet	Hayır
Su Isıtıcısı	1.50	1	Evet	Hayır
Uydu Alıcı	0.05	10	Hayır	Hayır
Telefon	0.01	24	Hayır	Hayır
Masaüstü Bilgisayar	0.45	6	Evet	Hayır
Klima	2.00	10	Hayır	Evet
Aydınlatma	0.40	7	Hayır	Evet

Tablo 4.4’deki “Ertelenebilme” sütunu, cihaz kullanımının başka bir zaman dilimine ertelenip ertelenemeyeceğini belirtir. “Durdurulabilme” sütunu ise bazı akıllı ev cihazlarında bulunan çalışma esnasında çalışmayı durdurabilme özelliğini gösterir. Örneğin, bulaşık makinası çalışma esnasında durdurulup tekrar çalıştırılabilen bir cihazdır ve bu durdurma ve tekrar çalışma işini kendisi de akıllanarak elektrik fiyatlamasına göre belirleyebilir. Bütün bu özelliklerden, talebin kaydırılması işleminde faydalanılır.

Müşteri etmenleri, toplam 5⁴ kurala sahip bir kural kümesine sahiptir. Bu kurallar Tablo 4.2’de yer alan 5 adet sınıftan, cihazların sahip olduğu 2 özellikten ve talep durumlarından türetilmiştir. Karar verme mekanizmasında kullanılan bu kural kümesinin bir parçası Tablo 4.5’de verilmiştir. Bu tabloda, DT düşük talebi, ve YT ise yüksek talebi sembolize eder. Örneğin, ertelenebilme özelliğine sahip cihazlardan ve durdurulabilme özelliğine sahip cihazlardan gelen talepler düşüken, bir müşteri etmeni kendi θ değerini değiştirmemeyi tercih eder. Bu örnekte görüleceği üzere, bu müşteri etmeni diğer etmenlerin taleplerini sınıflandırarak ortamı daha iyi bir biçimde incelemektedir.

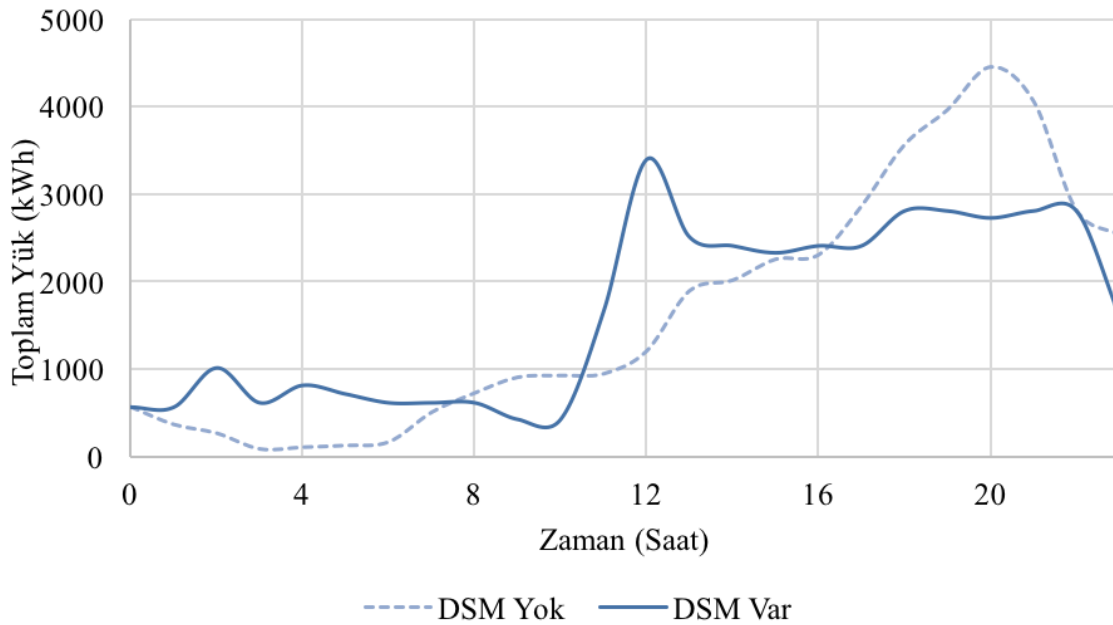
Tablo 4.5. Müşteri etmeninin karar verme mekanizmasında kullanılan kurallar tablosunun bir parçası.

Kural	GİRİŞ				ÇIKIŞ
	Diğer Etmenlerin Talepleri	Etmenin Toplam Talebi	Ertelenebilir Tüketim Talepleri	Durdurulabilir Tüketim Talepleri	θ Değeri
1	DT	DT	DT	DT	Değişim Yok
2	DT	DT	DT	YT	Artış
3	DT	DT	YT	DT	Artış
4	DT	DT	YT	YT	Artış
5	DT	YT	DT	DT	Değişim Yok
6	DT	YT	DT	YT	Artış
7	DT	YT	YT	DT	Artış
8	DT	YT	YT	YT	Artış

4.2.3. DSM Uygulaması Sonuçları ve Değerlendirme

Önerilen DSM uygulaması için iki farklı kurulum üzerinde benzetim çalışması yapılmıştır. Bu kurulumlardan ilkinde, akıllı şebeke yeteneği olmayan bir şebeke yapısıyla içerisinde DSM bulunan bir şebeke yapısının karşılaştırılması yapılmıştır. İkinci çalışmada ise farklı fiyatlandırma stratejilerinin kullanımı üzerinden bir karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 4.8’de, DSM bulunduran ve bulundurmayan şebekelerin farklı zaman dilimleri içerisindeki birleştirilmiş yük değerlerinin bir gösterimi yapılmıştır. Şekildeki zaman aralıkları, bir gün içerisindeki 24 saati temsil eder. Bu benzetim çalışmasında, DŞ’nin fiyatlandırma strateji parametresini (0, 1] aralığından seçtiği varsayılmıştır ve seçilen bu parametre simülasyon süresince aynı kalmıştır. Her bir zaman aralığı için, dinamik fiyatlandırma değeri (4.2)’de verilen tanıma göre hesaplanmıştır. Yük, her zaman dilimi için ayrı olarak hesaplanmıştır ve çalışmada τ parametresi 30 olarak seçilmiştir.

DSM bulunduran şebekede, tüketicilerin zorunlu olmayan tüketim ihtiyaçlarının bir kısmını daha uygun zaman dilimlerine öteledikleri görülmektedir. Bu öteleme işlemi, oyun stratejilerine göre yapılmıştır. Ek olarak, DSM ile tepe yük miktarında yüzde 25 civarında bir azalma gözlenmiştir. Tablo 4.6’da görüldüğü üzere, akşam saatlerinde yoğunlaşan yüklenme azalmış ve yük dağılımı daha dengeli bir hale gelmiştir. Bu dengeli dağılım, oyuncuların koordinasyonu ile oluşan dağıtık yapay zekanın bir sonucudur.

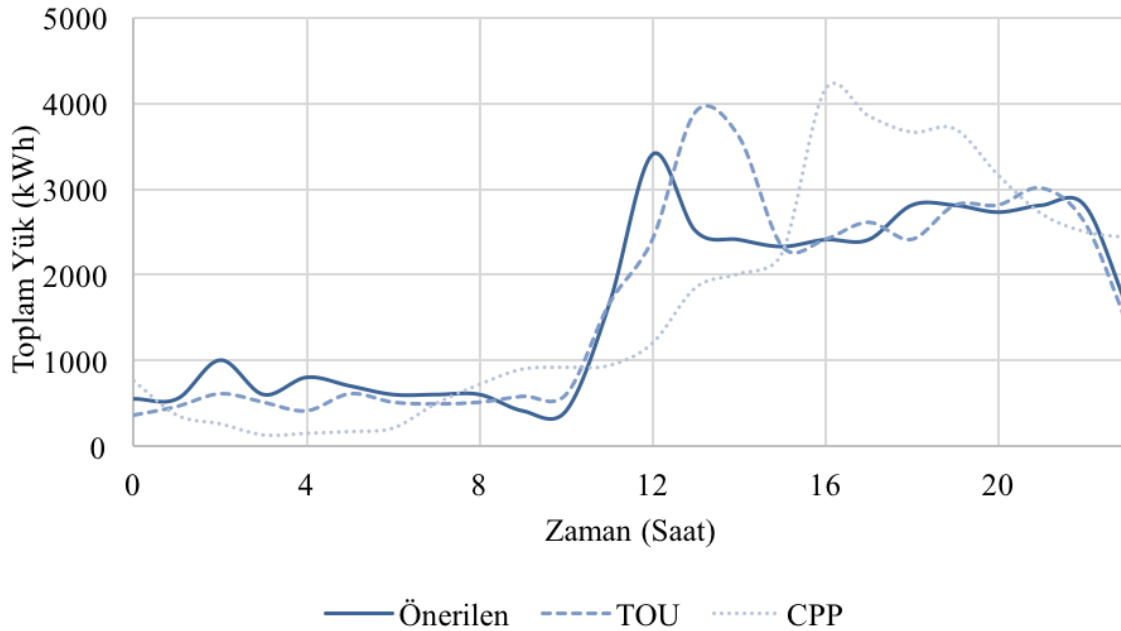


Şekil 4.8. DSM kullanan ve kullanmayan şebekeler için birleştirilmiş yük değerlerinin zamana karşı gösterimi.

Tablo 4.6. Tepe-yük değerlerindeki değişim karşılaştırması.

DSM Durumu	Zaman Aralığı	Tepe Yük Değeri (kWh)	Karşılaştırma (%)
DSM Yok	0-8	720	16.17%
	9-16	2300	51.68%
	16-24	4450	100.00% Referans
DSM Var	0-8	1010	22.69%
	9-16	3400	76.40%
	16-24	2810	63.14%

Diğer benzetim çalışmasında farklı fiyatlandırma stratejileri kullanımının DSM üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Şekil 4.9’da bu fiyatlandırma stratejileri sonucu elde edilen birleştirilmiş yük değerleri verilmiştir. İncelenen bütün fiyatlandırma stratejileri, akşam saatlerinde gerçekleşen yoğun tüketim değerlerini azaltmayı başarmıştır. Ancak, bazı fiyatlandırma stratejileri için bu azalma miktarı düşüktür ve bu stratejiler kullanıldığında istenildiği gibi bir dengeli dağılım yapılmadığı gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmasında karşılaşılan bu durum, ortamdaki oyuncuların CPP stratejisine geç adapte olmalarının bir sonucu olabilir. Önerilen dinamik fiyatlandırma stratejisi, diğer stratejilere göre akşam saatlerindeki aşırı yüklenmeyi daha iyi azaltabilmiş ve yükü zaman dilimlerine daha eşit bir biçimde dağıtabilmiştir. Farklı fiyatlandırma stratejileri sonucu tepe-yük değerlerinde oluşan değişime ait karşılaştırmalar Tablo 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.9. DSM ile kullanılan farklı fiyatlandırma stratejileri için birleştirilmiş yük değerleri.

Tablo 4.7. Farklı fiyatlama stratejileri için tepe-yük değerindeki değişim karşılaştırılması.

Fiyatlama Stratejisi	Zaman Aralığı	Tepe Yük Değeri (kWh)	Karşılaştırma (%)
CPP	0-8	760	18.26%
	9-16	4160	100.00% Referans
	16-24	3850	92.54%
TOU	0-8	610	14.66%
	9-16	3900	93.75%
	16-24	3010	72.35%
Önerilen	0-8	1010	24.27%
	9-16	3400	81.73%
	16-24	2810	67.54%

DSM, bir şebekede akıllı karar mekanizmalarının geliştirilmesi için çok önemli olan bir yapıdır. Bu bölümde, eksik veri olduğu durumlarda talep analizi yapabilmek için Pisagor bulanık tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Çok sayıda oyuncuya sahip bir Bayes oyunu, elektrik şebekesi gibi bir talep analiz ortamını modellemek için kullanılabilir. Talep analizi yapılan bir sistemde, belirsizlik ve çok sayıdaki katılımcı verisinin hızlı bir biçimde işlenmesi gibi zorluklar bulunur. PFS, bir etmenin karar mekanizmasını kurgulamak için önemlidir, kullanılması sonucu belirsizlik durumundaki etmen davranışı başarıyla temsil edilmiş olur. Eksik bilgiyle baş edebilmek için yöntem, Bayes oyun konsepti içerisinde kullanılmıştır.

Benzetim sonuçları enerji fiyatlarını ve anlık tüketim miktarlarını yönetmenin, elektrik şebekesindeki katılımcıların tüketim davranışları üzerine etkide bulunduğunu gösterir. Literatürde DSM için geliştirilmiş başka etmen tabanlı sistemler de bulunur [20-25]. Bu çalışmanın temel farkı, oluşturulan etmen mimarisi ve etmenlerin eylem mekanizmalarına PFS'nin entegrasyonudur. İki farklı senaryo için benzetim sonuçları, önerilen yapıda talebin geleneksel bir şebekeden daha iyi yönetildiğini göstermiştir.

5. AKILLI SAYAÇLARDA KİŞİSEL BİLGİ GÜVENLİĞİ İÇİN YENİ BİR ZAMAN-SERİLERİ VERİ BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ

Elektrik şebekelerinde, akıllı sayaç altyapılarının kullanılmaya başlanması sonrası özellikle kişisel bilginin korunmasıyla ilgili bazı kaygılar oluşmuştur. Hassas verileri daha iyi korumak amacıyla çeşitli veri karıştırma ve veri birleştirme çözümleri önerilmiştir. Bu çözümlerle ilgili temel sorun ya da çelişki, gizlilikle karmaşıklık arasındaki dengedir. Basit bir rasgele gürültü şeması gizliliği yeterince koruyamazken, daha gelişmiş veri karıştırma tekniklerinde ise akıllı sayaçların donanım maliyetleri artar. Doğru bir hesapsal yöntem kullanımı, hem güvenlik hem de maliyet açısından fayda sağlayacaktır. Bu nedenle, akıllı şebeke sayaç altyapısına uygun, etkin ve dinamik bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu yöntem, kişisel bilgi güvenliğini korumayı sağlayan bir zaman-serisi veri birleştirme yöntemidir. Hem akıllı sayaçlardaki kişisel bilgi güvenliğinin sağlanması hem de altyapı maliyetleri azaltmak için donanım gereksinimlerinin düşük tutulması amaçlanmıştır.

Akıllı sayaç altyapıları için kişisel bilginin korunması, önemli bir araştırma konusudur. Çünkü, sayaç okumaları bir hane içerisindeki faaliyetlerin takip edilmesi için kullanılabilir [67]. Sayaç ölçümleri, doğal olarak hassas bir veridir ve güvenli bir biçimde işlenip saklanmalıdır. Aksi takdirde, veri madenciliği gibi hesapsal yöntemler kullanılarak bu verilerden bilgi çıkarılabilir. Hiçbir tüketici, hane içindeki aktivitelerinin ya da sahip olduğu bir cihazın çalışma davranışının, başka kişiler tarafından gözlemlenebilmesini istemez. Bir akıllı sayaç altyapısında, sayaç ölçüm değerleri belirli aralıklarla dağıtım şirketine iletilir ve tipik olarak bu süre 15 dakikadır [68]. Bu iletim esnasında ve sonrasında depolandıkları yerde sayaç okuma verilerinin güvenliği sağlanmalıdır.

Mevcut araştırmaların birçoğu, bant genişliği ve hesaplama ile ilgili sınırlı kaynakların bulunduğu akıllı şebekeler için uygulanabilir olmayan, zamansal maliyeti yüksek hesapsal yöntemler kullanır [163]. Daha önce yürütülen bir çalışmada, kişisel bilgiyi korumak için içerisinde Gizlilik Koruma Düğümü (Privacy Preserving Node, GKD) yapıları bulunduran bir yöntem geliştirilmiş, fakat GKD sayısının hesaplanması işi NP-zor bir problem olmuştur [67]. Bu sorunun çözmek için, şemaya bir görev zamanlayıcısı katmanı eklenilip minimum GKD hesaplamasına olan ihtiyaç ortadan kaldırılmıştır. Ek olarak, GKD sayısının azlığından kaynaklanan sorunlar önlenmiş ve yapı daha ölçeklenebilir bir hale getirilmiştir. Literatürdeki çalışmaların aksine, sayaç ölçüm

cihazının yapacağı hesaplamalar da asgari seviyede tutularak donanım maliyetlerinin fazla artmaması sağlanmıştır. Önerilen yöntem, sadece birleştiricideki bilginin güvenliğini sağlamakla kalmayıp, şifre çözme işlemini birden fazla düğüme dağıtarak mimarinin dayanıklılığını da artırır.

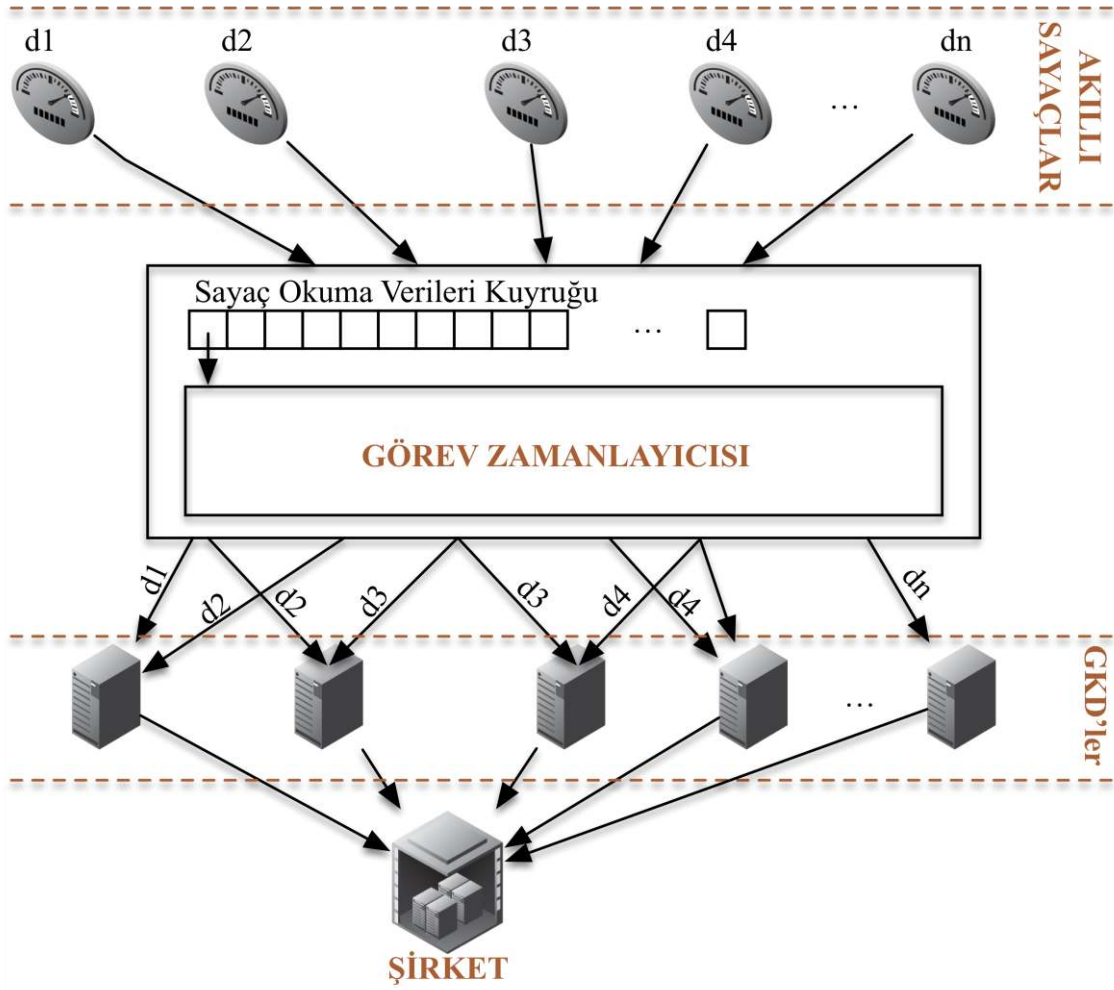
Dağıtım şirketinde bir harici toplayıcı yapı bulunmalıdır ve bu yapı sayaç ölçümlerini bir zaman-serisi formunda bir araya getirmelidir. Bu bölümde önerilen yöntem, bu zaman-serisini veri birleştirme yöntemi ve veri karıştırma tekniklerinin güçlü yönlerini kullanarak zamansal karmaşıklığı arttırmayacak şekilde işlemektedir. Bu nedenle, akıllı sayaçlar gibi sınırlı donanıma sahip cihazlar için uygundur. Bölümün sonunda, Holt-Winters ve STL tahmin yöntemleri kullanılarak önerilen veri birleştirme yönteminin kişisel verileri koruma yeteneği analiz edilmiştir. Sonuçlar, yöntemin hem filtreleme hem de gerçek değer saldırılarına karşı dayanıklı olduğunu gösterir.

5.1. Veri Birleştirme Yöntemi

Önerilen veri birleştirme yönteminin mimarisi, Şekil 5.1’de gösterildiği üzere dört katmandan oluşur. Birinci katmanda, akıllı sayaçlar bulunur. Bu akıllı sayaçlara ait okuma verileri, zaman-serileri olarak bir araya getirilir ve değerlere gürültü katılarak iletilir. İkinci katmanda, veri birleştirmesinden ve sayaç okuma verilerinin en az iki farklı GKD’ye iletilmesinden sorumlu bir görev zamanlayıcısı yapısı bulunur. Önceden şifrelenmiş veriler, bu katmanda bitleştirilerek birleştirilir. Sayaç okuma verileri üçüncü katmanda bulunan GKD’ler tarafından işlenir, bu verilerin şifreleri çözülür ve yeniden oluşturulurlar. Son katman, sayaç okuma verilerinin kullanıldığı ya da depolandığı hizmetleri ve şirket içerisinde bulunan diğer hizmetleri temsil eder.

Bazı çalışmalar, bütün sayaç ölçüm verilerini toplar ve bir araya getirdiği bu verileri şifreler [68-80]. Bu yaklaşımdaki en önemli sorun, olası donanımsal hatalara karşı dayanıksız oluşudur. Bir sayaçtaki arıza ya da ölçüm hatası, bütün toplama şemasını işlevsiz kılar. Bu yüzden, ortak şifreleme kullanan bu çalışmaların, bilgi güvenliğinin yanında hata toleransı bakımından da mükemmel olmaları gerekir. Bu bölümde önerilen birleştirme şeması, sistemdeki olası hatalara ve arızalara karşı dayanıklıdır. Birleştirilmiş sayaç okuma verileri, dağıtık bir koordinasyon servisi tarafından birden fazla GKD’ye gönderildiğinden, bir donanım arızası durumunda bile sayaç okuma verilerini kurtarabilmek mümkündür. Ayrıca, görev zamanlayıcısı ara katmanında işlemlere yanıt

vermeyen, arızalı GKD'ler kolayca algılanabilir ve otomatik olarak sistemin dışına çıkarılabilir. Sistemin geri kalanı bu durumdan etkilenmez.



Şekil 5.1. Akıllı sayaç okumaları için kişisel bilgiyi koruyan veri birleştirme yöntemi.

5.2. Problem Tanımı

Önerilen yöntem, bir tüketicinin sayaç okuma verilerini karıştırarak, kişisel verilerin saldırganlar tarafından yüksek doğrulukla tahmin edilememesini ve trendin bir profil oluşturmak için kullanılamamasını sağlar. Akıllı şebeke içerisinde N tane akıllı sayaç ($d_1, d_2 \dots d_N$) bulunuyor olsun. Her sayaç, önceden belirlenmiş zaman aralığı t için sayaç okumaları gerçekleştirir. Zaman aralığı 15 dakika olarak belirlenirse, bir gün içerisinde 96 adet değer okuması yapılır. Akıllı sayaç okuma verileri

$$\vec{d}_1, \vec{d}_2, \vec{d}_3, \dots \vec{d}_n \quad (5.1)$$

şeklinde gösterilir. Karıştırılmış veri, sayaç okuma verisine iletim işleminden önce gürültü eklenerek oluşturulur. Sayaç okumalarına eklenecek gürültü verisi, bir katsayılar serisi ile çarpılır. Bunun nedeni, ölçeklenmiş gürültü miktarının kişisel bilgi güvenliğini daha iyi sağlamasıdır. Verilen bir d_N serisi için, sıfır ortalamaya ve $E[p_t] = 0$ değerine sahip bir karıştırma serisi p_t kullanıldığında, gürültü eklemeli karıştırma x_t serisi ile tanımlanır. Bu serinin elemanları, $t \geq 1$ iken d_t ve p_t değerlerinin toplanmasıyla elde edilir [164]. Dalgacık karıştırmada, dalgacık katsayıları Gauss gürültüsüyle çarpılır. Başka katsayılar, farklı şemaları oluşturmak için kullanılabilir. Karıştırılmış bir zaman serisi,

$$x_t = d_t + \xi_t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}}, t \geq 1 \quad (5.2)$$

gibidir. Burada, ξ_t : seçilen katsayıyı, μ : ortalama değeri, σ : standart sapmayı ve z : gri seviyeyi gösterir. Gauss gürültüsü, zamandan bağımsızdır ve bu gürültünün üretimi sayaç okuma verileri ile ilişkilendirilmez. Karıştırılmış akıllı sayaç okumaları,

$$\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3, \dots \vec{x}_n \quad (5.3)$$

ile ifade edilir. Veri karıştırma problemi, akıllı sayaç okumalarının veya bu okumalara ait eğilimlerinin istatistiksel modellerle tahmin edilmesini engelleyecek şekilde, okuma verilerinin karıştırılması problemi olarak tanımlanabilir. $\mathcal{R}$ fonksiyonu kullanılarak karıştırılmış veri yeniden inşa edilirken, kestirim hatası $\kappa^{(t)}$ bütün $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3, \dots \vec{x}_n$ vektörleri için sıfır değerinde olmalıdır.

$$\vec{d}_t = \mathcal{R}(\vec{x}_t) + \kappa^{(t)}, t = 1, 2, 3 \quad (5.4)$$

$$f(\vec{d}) = f_p(\vec{x}) + f_n(\vec{x}) + f_\kappa(\vec{x}) \quad (5.5)$$

İletilen sayaç okuma verisi içerisinde hem karıştırılmış, hem de karıştırılmamış zaman-serisi verisi bulunur. Ölçekleme işlemi, bilgi gizliliğini daha da arttıracığı için (5.5) ifadesi,

$$f(\vec{d}) = f_p(\vec{x}) + \mu f_n(\vec{x}) + f_k(\vec{x}) \quad (5.6)$$

olarak yeniden yazılır. Ölçekleme katsayısı, rasgele bir değer olarak belirlenir. Önerilen yöntemde, sayaç okuma verileri ayırık değerler olarak iletilir ve bir saldırganın eline geçirdiği veriden gürültüyü ayıklayarak doğru bir çıkarım yapabilmesi mümkün değildir. Bunun için saldırganın, hem şifrelenmiş gürültü verisini hem de karıştırılmış veriyi ele geçirmesi ve bu verileri tanımlayabilmesi gerekir.

Bir diğer önemli konu herhangi bir dağıtım şirketinin, tüketicilerini gerçek tüketim miktarından daha az veya daha fazla bir değere göre ücretlendirmek istememesidir. Sayaç ölçüm verilerinin, herhangi bir kayıp olmaksızın iletilmesi gerekir. Sadece bir karıştırma tekniği kullanılması, güvenliği risk altına sokmadan bu şartı karşılayamaz. Güvenlik açısından, bu bölümde önerilen yöntemde olduğu gibi parçalı bir gönderim mekanizmasının kullanılması daha anlamlı hale gelir. Tanımlamalar üzerinden yola çıkılarak önerilen yöntem için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Saldırganların, akıllı sayaçların içindeki donanıma erişemediği varsayılmıştır. Yöntem, iletilen verinin güvenliğinin sağlanmasıyla ilgilenir.
- Akıllı sayaçlar tarafından iletilen bütün bilgilere, saldırganların erişilebildiği varsayılmıştır. Akıllı sayaçların haberleşme mekanizmasında güvenli bir bölge bulunmaz.
- Her bir akıllı sayacın, diğer akıllı sayaçlarla etkileşime girmeden bağımsız olarak çalıştığı varsayılmıştır. Bu varsayım yöntemi daha dayanıklı yapar. Çünkü, bir sayacın arızalanması yöntemin çalışmasını engellemez.
- Son olarak GKD'lerin, yan hizmetlerin ve operasyonların güvenli bir alanda olduğu varsayılmıştır. Sayaç okuma verileri, saklandıkları ortamda da şifrelenebilirler fakat depolama kısmındaki veri koruma mekanizmaları için farklı hesapsal yöntemler kullanılır.

5.3. Önerilen Veri Birleştirme Yönteminde Kullanılan Algoritmalar

Gürültülü verilerin iletimi için Shamir'in Sır Paylaşım (Shamir's Secret Sharing) algoritması kullanılmıştır [165]. Polinom enterpolasyonu temelli bu algoritmaya göre, veri

ilk olarak sır payı adı verilen parçalara ayrılır ve verinin iletimi parçalar halinde yapılır. Algoritmada katsayılar, tanımlayıcı indeksleri ile beraber verilen payların herhangi bir altkümesi için Lagrange enterpolasyonu kullanılarak bulunabilir. GKD yapıları, gürültülü veriyi yeniden oluşturmak için sır payların bilgisine ihtiyaç duyarlar. Shamir'in algoritması yerine farklı güvenlik şemalarını da bu işlem için kullanmak mümkündür. Önerilen yöntemde NTRU [166-167], Paillier kriptosistemi [168-169] ya da diferansiyel gizlilik [170] gibi başka kriptosistemler de kullanılabilir. Shamir'in algoritması sadece düşük karmaşıklığı ve basitliğinden dolayı tercih edilmiştir.

Karmaşıklığı bir miktar azaltmak için, önceden belirlenmiş bir eşik değerinden daha düşük olan katsayılar için ölçüm verisine gürültü eklenmemektedir. Bu durum, yalnızca önemli olmayan bir sayıda gerçek değer tespiti için neden olabilir. Ancak, serinin genel eğilimi korunmaya devam eder. Mimaride yer alan görev zamanlayıcısı, karıştırılmış veri ve gürültü bilgisinin parçaları dışında herhangi bir bilgi edinemez. Bu yapı, akıllı sayaçlar ve yapı içerisinde bulunan GKD'lerle haberleşir ve aşağıda verilen Görev-Atama Algoritması'nı kullanarak GKD'leri yönetir.

Veri Karıştırma Algoritması

Girdi: Sayaç okuma verileri d , karıştırılmış seri x , katsayılar serisi k , zaman aralığı sayısı t , eşik değeri Ψ

```

1: while ( $t \geq 0$ ) do
2:   if ( $k < \Psi$ ) then
3:      $p = 0$ ;
4:   else
5:     gürültü değeri hesapla  $p$ ;
6:      $x = d + p$ ;
7:     Şifrele( $p$ );
8:     İlet( $p$ );
9:   endif
10:  İlet( $x$ );
11:   $t--$ ;
12: end while

```

Görev zamanlayıcısı ara katmanında ZooKeeper gibi dağıtık bir koordinasyon hizmeti kullanılabilir. Bu katman sayaç okuma veri kuyruğuna veri geldiği zaman, birleştirilmiş sayaç okuma verilerini müsait durumda olan GKD'lere iletir. Sayaç okuma verileri birleştirildikten sonra tüketimle ilgili herhangi bir bilgi edinmek mümkün değildir. Görev zamanlayıcısı ara katmanına aktarılabilecek sayaç okuma verileri için bir kuyruk (queue) yapısı kullanılmıştır. Yeni sayaç okumaları, bu kuyruk yapısının sonuna eklenir.

GKD'lere iletilecek sayaç okuma verisi kuyruğun başından seçilir. Benzetim çalışmasında görev zamanlayıcısı ara katmanı için GKD'lere ait bilgileri depolayan bir liste yapısı kullanılmıştır. Bu liste içerisinde, yapıda bulunan GKD'ler sıralı ikililer olarak tutulur. Sıralı ikilinin ilk elemanı, GKD tanımlayıcısıdır. İkinci eleman ise müsait durumda olan GKD'lerin işlem gücünü hesaplamak için kullanılan tahsis sayacıdır. GKD kendisine atanan işlemi tamamlayınca, görev zamanlayıcısına bir mesaj göndererek tahsis sayacının değeri bir birim arttırılır. Görev zamanlayıcısı tarafından GKD'ye yeni bir görev atandığı zaman tahsis sayacının değeri bir birim azaltılır. Tahsis sayacı sıfır değerine geldiği zaman, o GKD'ye yeni bir görev atanmaz. Bu durum, hem arızalı GKD'leri sorunsuzca yapıdan çıkarmaya yarar, hem de aşırı yüklenmiş bir GKD'ye yeni bir görev atanması sonucu oluşabilecek veri kayıplarını engeller.

Görev-Atama Algoritması

Girdi: Sayaç okuma veri kuyruğu Q

```

1: while (Q is not empty) do
2:   if (front == NIL) then
3:     return error endif
4:   Data *aggregate = front;
5:   aggregate.append(aggregate->next);
6:   front = aggregate->next;
7:   ilkGKD = *GKDPointer;
8:   while (firstGKD->tahsis-sayaci != NIL) do
9:     GKDPointer++;
10:    ilkGKD = *GKDPointer;
11:  end while
12:  GKDPointer++;
13:  ikinciGKD = *GKDPointer;
14:  while (ikinciGKD->tahsis-sayaci != NIL) do
15:    GKDPointer++;
16:    ikinciGKD = *GKDPointer;
17:  end while
18:  İlet(aggregate, ilkGKD, ikinciGKD);
19:  Delete aggregate;
20: end while

```

5.4. Zaman-Serileri Veri Birleştirme Yönteminin Benzetim Çalışması

Zaman-serileri veri birleştirme yöntemini test etmek için oluşturulan farklı senaryolar, bir benzetim çalışması altında incelenmiştir. Gürültü katılmış zaman serilerini yeniden oluşturmak için farklı iki istatistiksel tahmin yöntemi kullanılmıştır. Saldırılardan,

sunuculardaki açıklardan ya da kötü niyetli kullanıcılardan kaynaklanan güvenlik sorunlarıyla ele geçirilebilecek sayaç okuma verilerinin, kişisel kullanıcı bilgilerini ne kadar açığa çıkardığını gözlemlemek için istatistiksel tahmin yöntemlerinin kullanımı tercih edilmiştir. Bu kısımda ilk olarak güvenlik modeli verilecek, daha sonra istatistiksel tahmin yöntemlerinin ayrıntıları ve veri birleştirme yönteminin farklı senaryolar üzerinde denenmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilecektir.

5.4.1. Güvenlik Modeli

Veri birleştirme yöntemi, dürüst-ama-meraklı (honest-but-curious) bir güvenlik modeline sahiptir. Bu modelde, bir yapı içerisinde bulunan tüm varlıklar güvenlik protokolünü dürüstçe takip eder ve kendi çıkışlarının ötesinde bir şey öğrenmezler. Fakat bu varlıklardan bazıları, örneğin görev zamanlayıcısı gibi başka varlıkların verileri hakkında meraklı olabilir. Bu modele göre bir protokolün güvenli olabilmesi için bütün varlıkların yalnızca çıkış bilgisine sahip olması ve protokolün sonunda yeni bir bilgi sahibi olmaması gerekir. Aksi takdirde model güvensiz olur. Görev zamanlayıcısının da içerisinde bulunduğu katman merkezde yer aldığı için saldırılarla karşılaşabilir. Bu katmanda, verinin güvenli tutulması gerekir. Son olarak, akıllı sayaçlar ile görev zamanlayıcı arasındaki veri iletişiminin de saldırılara açık olduğu düşünülerek yapı analiz edilmiştir.

5.4.2. Holt-Winters Yöntemiyle Tahmin

Holt-Winters Yöntemi, mevsimselliği göstermek için geliştirilmiş olan bir istatistiksel tahmin yöntemidir [171]. Bu yöntemin, çarpmalı model ve toplamalı model olmak üzere iki çeşidi bulunur. Genellikle üstel düzeltme işlemlerinde ve zaman-serilerinin tahmininde kullanılır. Benzetim çalışmasında kullanımı tercih edilen, toplamalı Holt-Winters Yöntemi

$$\hat{y}_{t+h} = a_t + hb_t + s_{t-p+1+(h-1) \bmod p} \quad (5.7)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada; yumuşatma parametreleri a_t , b_t ve s_t

$$a_t = \alpha(y_t + s_{t-p}) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \quad (5.8)$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (5.9)$$

$$s_t = \gamma(y_t - a_t) + (1 - \gamma)s_{t-p} \quad (5.10)$$

ile hesaplanır. Bu bağıntılarda; p : periyot uzunluğunu gösterir. α , β , ve γ : kestirim işleminde karar verici olan filtre parametreleridir. Burada, α için düşük değerler seçilirse, bir önceki verinin önemi artırılmış olur. Bu parametreye yüksek değerler atanırsa, mevcut veri daha önemli hale getirilir. Diğer trend parametrelerinden β değeri, 0'a yakın tutulursa ağırlık trende verilmiş olur. Bu değer 1 civarında belirlenirse seviye değişimleri daha önemli hale gelir. Son olarak, yüksek γ değerleri tahminleri değişimlere daha hassas hale getirir.

5.4.3. STL Yöntemiyle Tahmin

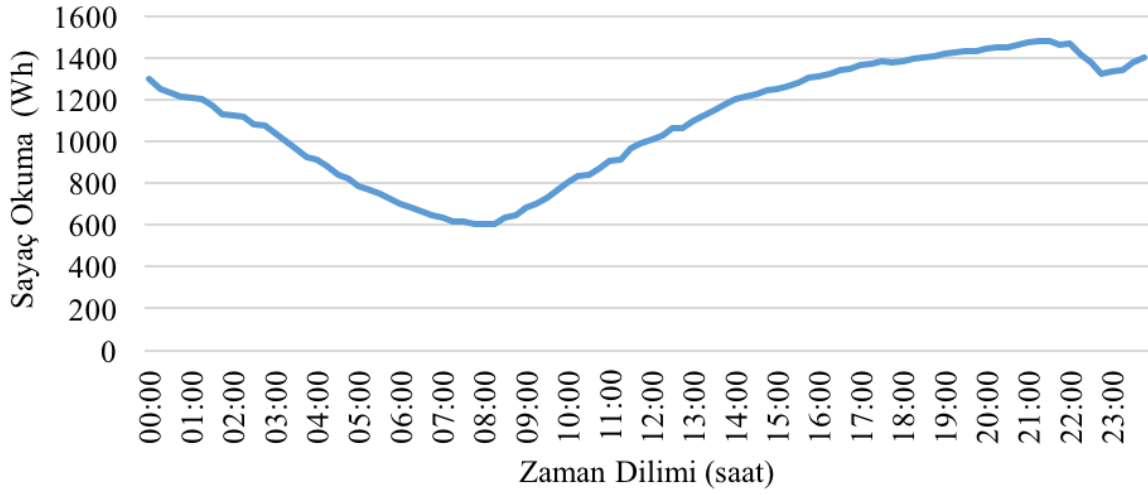
Loess Kullanan Mevsimlik Trend Dekompozisyonu (The Seasonal Trend Decomposition using Loess, STL) yöntemi, Robert B. Cleveland, William S. Cleveland, Jean E. McRae ve Irma Terpenning tarafından geliştirilmiştir [172]. Bu yöntem, bir zaman-serisini trend, mevsimsellik ve kalan olarak üç bileşene ayırır. Burada Loess yönteminin de kullanılmasının nedeni çıkışın yumuşatılmasıdır. Bu yöntem basit, hızlı ve güçlüdür; eksik değerleri bulunan zaman-serilerini bile ayrıştırabilir. Bu yöntemle, bir zaman-serisi

$$y_i = t_i + s_i + r_i \quad (5.11)$$

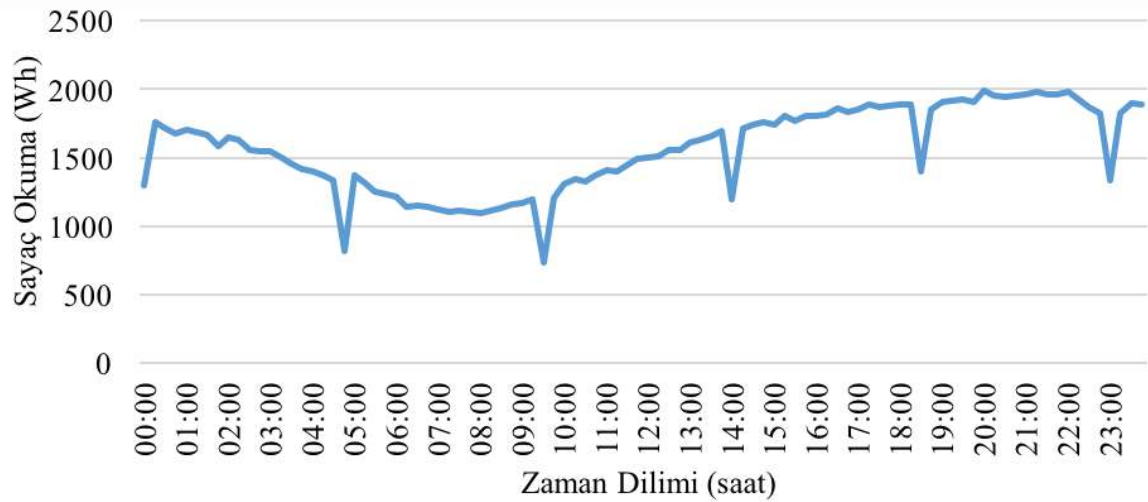
gibi parçalanır. Burada; t : trendi, s : mevsimselliği, r : kalanı ve i : karşılık gelen indeksi gösterir. Bu yöntem, iç içe durumda iki özyinelemeli fonksiyon bulundurur. Mevsimsellik ve trend iç döngüde güncellenirken, çalışma sırası dıştaki döngüye geçtiğinde ağırlıklar hesaplanır.

5.4.4. Zaman-Serileri Veri Birleştirme Yöntemi Benzetim Çalışması Sonuçları

Veri birleştirme yöntemi farklı senaryolarda analiz edilmeden önce, sentetik olarak bir günlük akıllı sayaç okuma verisi hazırlanmıştır. Ek_A’da bulunan veri kümesinin Şekil 5.2’de gösterimi yapılmıştır. Sayaç okuma verisi önerilen veri birleştirme yöntemine göre karıştırılarak yeni bir zaman-serisi elde edilmiştir. Bu karıştırma sonrası elde edilen yeni zaman-serisi Şekil 5.3’de gösterilmektedir.



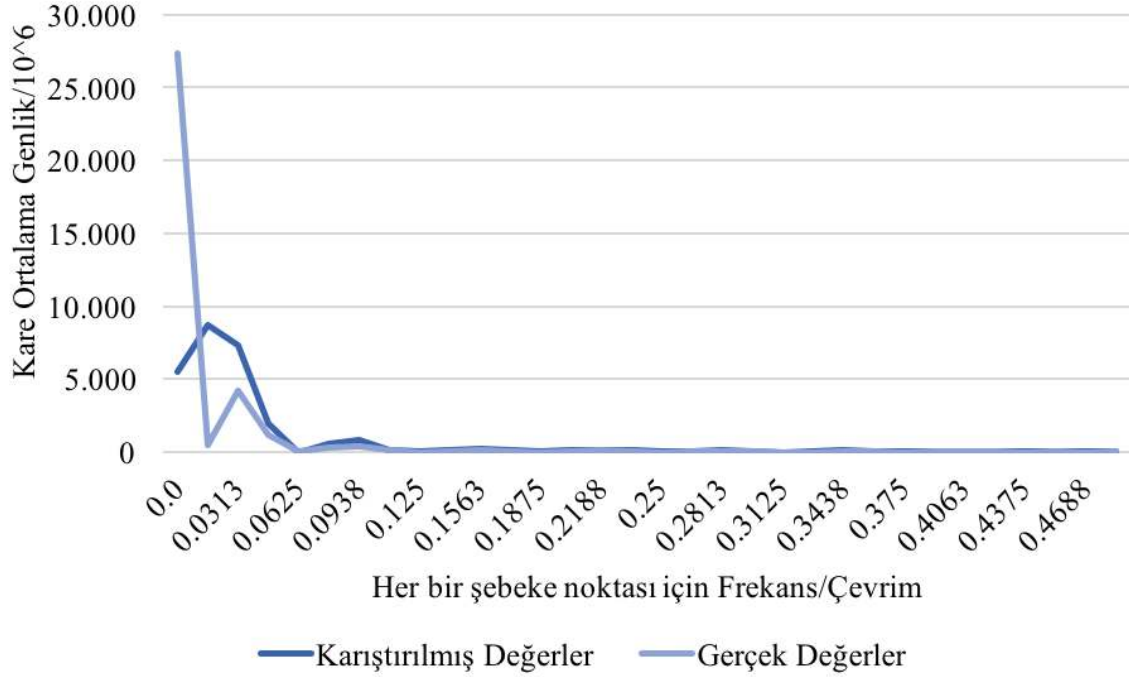
Şekil 5.2. Bir günlük akıllı sayaç okuma verisi.



Şekil 5.3. Sayaç okuma değerleri karıştırılmış zaman-serisi.

Şekil 5.4’de hem gerçek değerler hem de karıştırılmış değerler için güç spektrum yoğunlukları gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere karıştırılmış veriler sadece gerçek

verilerin tahsis edildiği frekanslarda tahsis edilmiştir. Başka bir ifadeyle, her iki zaman-serisinin spektrumları benzerdir. Bu durum, karıştırılmış verinin ve gerçek verinin birbirlerinden ayırt edilmesi imkansız hale geldiğini gösterir.



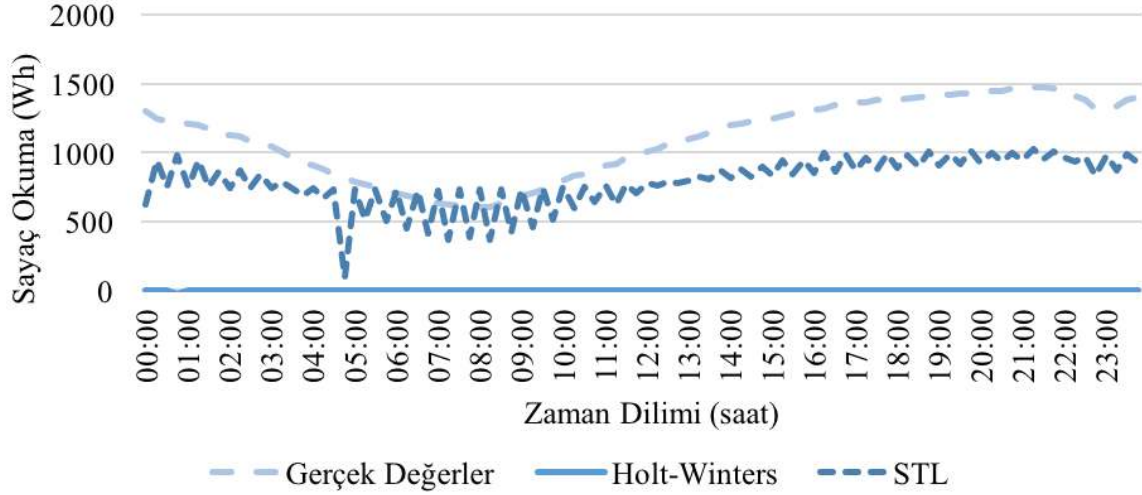
Şekil 5.4. Gerçek değerler ve karıştırılmış değerler için güç spektrum yoğunlukları.

İlk iki senaryoda, sistem içinde bulunan bir saldırganın kişisel bilgileri ihlal edebilecek çıkarım saldırıları gerçekleştirebildiği ve bu saldırılar sonucunda karıştırılmış verilerin %50'sinin ele geçirildiği varsayılmıştır. Holt-Winters ve STL yöntemleri kullanılarak bu ele geçirilen veriler üzerinden tüketim davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

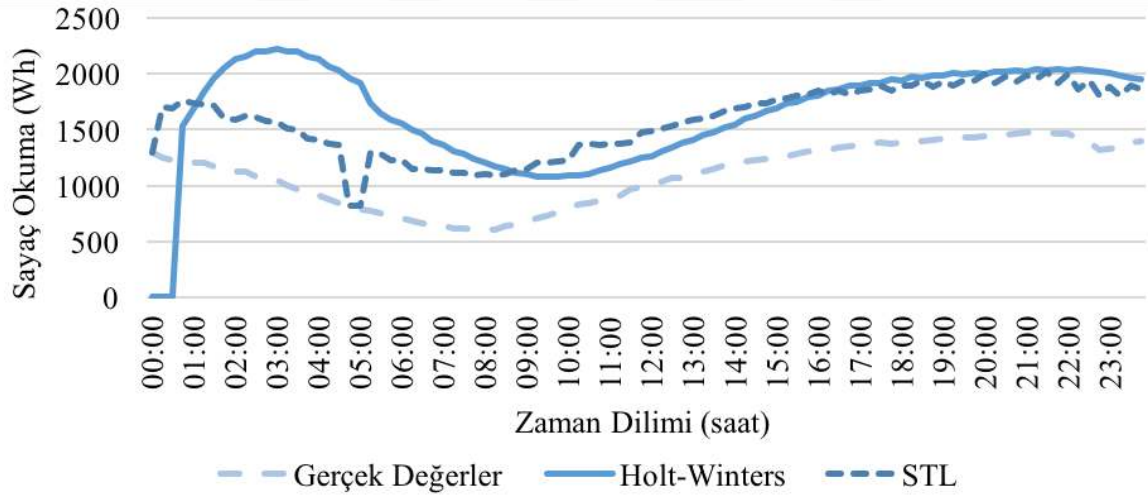
Saldırganın elinde verinin sadece %50'si bulunduğu için, bu veriyi ön işlemeye tabi tutarak bilinmeyen kısımlarını doldurması gerekir. Burada, bilinmeyen veri parçaları iki farklı yöntem kullanılarak doldurulmuştur. İlk olarak, bilinmeyen veri değerleri yerine 0 değeri yerleştirilmiştir. İkinci durumda ise bilinmeyen veri değerlerinin yerine elde edilen bir önceki veri değeri yerleştirilmiştir.

Her iki senaryo sonucunda elde edilen benzetim sonuçları, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'de gösterilmiştir. Holt-Winters yöntemi eklemeli olarak kullanıldığı için, 0 eklemeli durumda herhangi bir tahminde bulunamamıştır. STL ile yapılan tahminler de başarısız olmuştur ve genel eğilimi bile yansıtamamıştır. İkinci durumda, tahmin yöntemleri ilk duruma göre bir miktar daha iyi bir performans göstermiştir. Fakat, gerçek veri değerlerini yakalamayı

başaramamıştır. Sadece tek bir noktada, gerçek bir değeri yakalanabilmiştir. Bu değer in yakalanmasının nedeni, küçük katsayı değerlerine sahip zaman-serisinin bazı elemanlarının hesaplama maliyetini düşürmek amacıyla karıştırılmamasıdır.



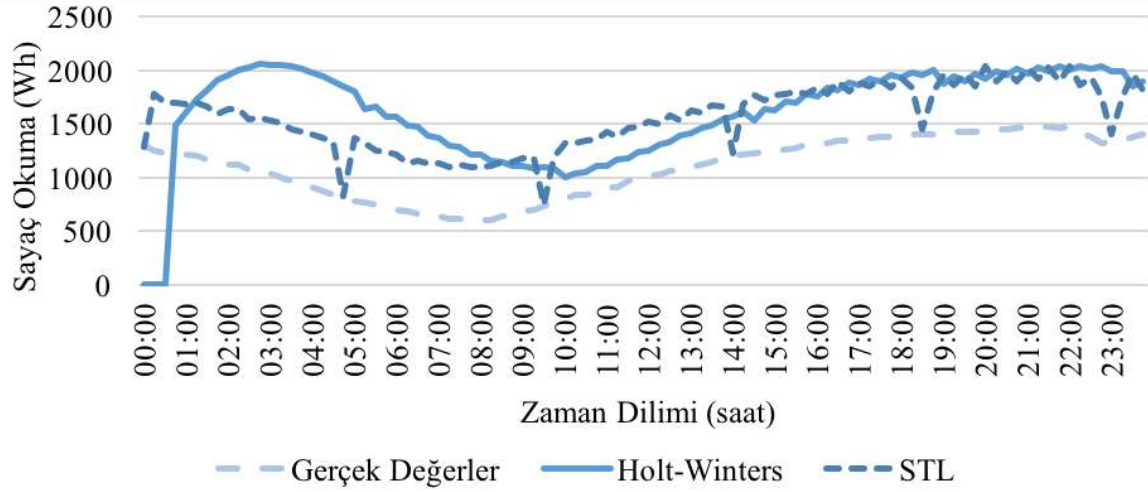
Şekil 5.5. Sıfır değeri eklenerek yapılan tahmin saldırısı.



Şekil 5.6. Bir önceki değer eklenerek yapılan tahmin saldırısı.

Üçüncü senaryoda, en kötü durum analiz edilmiştir. Bu senaryoda, saldırganın karıştırılmış verinin tamamını elde ettiği varsayılmıştır. Her ne kadar STL yönteminin performansı bu senaryoda artmış olsa bile, yöntemlerin hiçbiri Şekil 5.7'de gösterildiği üzere gerçek değerleri elde etmeyi başaramamıştır. STL yöntemi, az sayıda gerçek değer yakalayabilmiştir. Holt-Winters yönteminin performansında çok fazla bir iyileşme olmamıştır. Ancak Holt-Winters yöntemi, diğer senaryolara göre sadece daha yumuşatılmış bir çıktı üretebilmiştir. Hesapsal yöntemlerin parametrelerinde yapılacak

iyileştirmeler ya da farklı yöntemlerin birleşimi kullanılarak oluşturulan hibrit yöntemlerle, bir saldırgan burada verilenlerden bir miktar daha iyi bir sonuç elde edebilir. Bu durumda bile, saldırganın gerçek veri değerlerini yakalaması zordur. Bunun temel nedeni, veri karıştırma yönteminin ürettiği karıştırılmış verinin ve gerçek verinin spektral bir benzerliğe sahip olmasıdır.



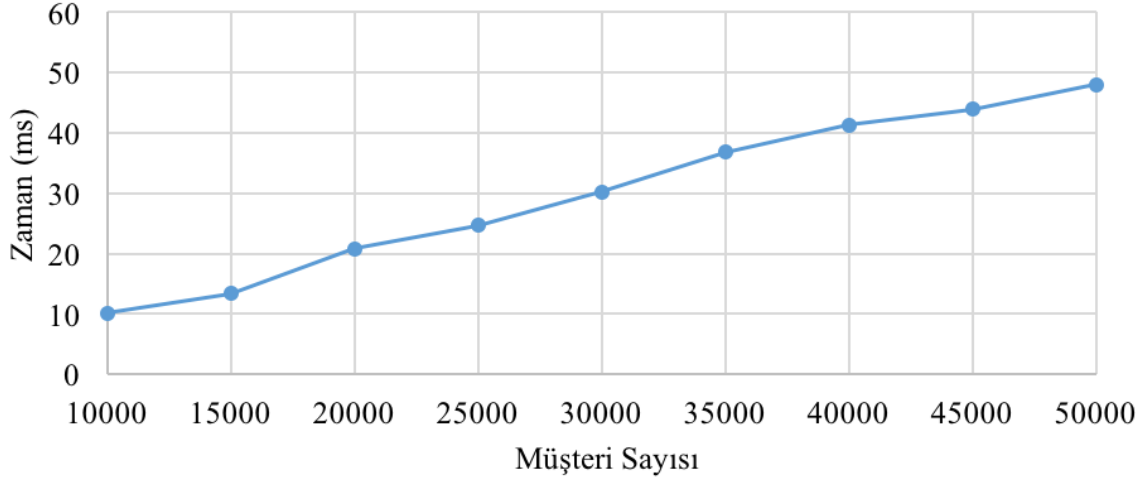
Şekil 5.7. Karıştırılmış zaman-serisinin tamamının ele geçirildiği tahmin saldırısı.

5.4.5. Hesapsal Maliyet Analizi ve Değerlendirmesi

Veri birleştirme yönteminde bulunan hesapsal işlemler; veri toplama, görev zamanlayıcısı atamaları, veri karıştırma ve Shamir'in algoritmasına dayanan şifreleme-şifre çözme işlemlerinden oluşur. Shamir'in algoritmasına [165] dayanan şifreleme-şifre çözme işlemleri karmaşık değildir ve yöntem sıklıkla şifreleme ve şifre çözme işlemleri talep etmemektedir. Bu sebepten, yapıda bulunan akıllı sayaçlar ve GKD bileşenleri yüksek hesaplama gücüne gereksinim duymazlar. Eğer talepte bir değişme olursa, GKD sayısını dinamik olarak artırmak ya da azaltmak kolay bir işlemdir. Bu durum, yapıyı ölçeklenebilir hale getirmektedir.

Veri birleştirme işlemleri ve görev zamanlayıcı atamaları da karmaşıklığı yüksek işlemler değildir. Şekil 5.8 incelenirse, kullanıcı sayısındaki artışın, hesaplama maliyetini yavaş bir biçimde arttırdığı görülmektedir. Bu sonuçlar elde edilirken kullanılan GKD'lerin sayısı 10 olarak belirlenmiştir. Daha yüksek bir GKD sayısı seçilirse, bu artış kolay gözlemlenemeyecek kadar düşük olacaktır. Bu durumda, kullanıcı sayısının ya da

başka bir ifadeyle yapıda bulunan akıllı sayaçların sayısının, karmaşıklık üzerinde çok az bir etkisi bulunmaktadır.



Şekil 5.8. GKD değeri 10 olarak atanmışken veri birleştirme yöntemin hesapsal maliyeti.

Bu bölümde önerilen veri birleştirme yöntemi hem filtreleme hem de gerçek değer saldırılarına karşı dayanıklıdır. Benzetim çalışmasında Holt-Winters ve STL tahmin yöntemleri, saldırganların sayaç okuma verilerini doğru bir şekilde elde edemediklerini göstermek için kullanılmıştır. Öte yandan sayaç verileri, bir karıştırma işlemi uygulanmış olsa bile kayıpsız olarak yeniden oluşturulabilmektedir.

Akıllı şebeke uygulamaları, işlemlerini sorunsuz biçimde gerçekleştirebilmek için herhangi bir performans kaybı ya da güvenlik zafiyeti yaşamamalıdır. Bu bölümde önerilen yöntemde, akıllı sayaçlar ve görev zamanlayıcı bileşeni sadece karmaşık olmayan hesaplamaları yapmak için kullanılır. Daha karmaşık yapıda işlemler ise ölçeklenebilir durumda olan işlem birimleri tarafından gerçekleştirilir. Hesapsal maliyet analizi, önerilen yöntemin işlem gücü açısından verimliliğini göstermektedir.

6. PİYANGO ZAMANLAMA YÖNTEMİ KULLANARAK ELEKTRİKLİ ARABALARI İÇEREN BİR SİSTEMİN ŞARJ YÖNETİMİ

Teknolojik gelişmeler, artan enerji maliyetleri ve düşük karbon salınımı politikaları gibi farklı nedenlerden dolayı, EA kullanımı yaygınlaşmaktadır. Araba üreticileri arasında, her sene daha gelişmiş bir EA çıkarma yarışı başlamıştır. EA'lar kullanılarak, Birleşik Krallıkta karbon salınımının %20 oranında, ABD'de ise %30 oranında düşürülmesi planlanmaktadır [7].

Bu yeni teknoloji, üzerinde araştırma yapılması gereken çeşitli sorunlar doğurmuştur. Bu sorunlardan en önemlisi araçlarda kullanılacak olan bataryalardır. Akıllı telefonlar için çok sayıda taşınabilir şarj teknolojisi, akıllı telefonların batarya sürelerine çözüm amacıyla geliştirilmiştir. Akıllı telefon sahipleri gibi, EA sahipleri de araçlarını sıklıkla şarj etmek zorundadır. Burada temel fark, klasik şebekenin bu çok sayıda EA'nın eş zamanlı şarjı için gereken yüksek miktarda yüklenmeleri karşılamaya henüz hazır olmamasıdır. Tipik bir EA'nın şarj için gereksinim duyduğu enerji talebi, tipik bir ev kullanıcısının günlük toplam kullanım miktarının yaklaşık olarak 3 katıdır [173-174]. Yüksek değerli yükler, klasik bir şebekede elektrik kesintilerine, gerilim çökmelerine ve tepe-yük oluşumlarına neden olabilir. Bu sorunlar, sağlıklı işleyen bir şebekede bulunmamalıdır.

Tepe-yük sorunuyla baş edebilmek için ya şebekelerin kapasite arttırması ya da araç bataryalarının daha az enerji tüketmeleri gerekir. Şebekenin kapasitesini arttırmak, daha maliyetli ve büyük olasılıkla da çevre dostu olmayan bir çözümdür. Bunun yanı sıra, bu tarz çözümler karşılaşılan sorunu sadece kısa vade için çözebilir, hızla yaygınlaşan EA sayısı düşünüldüğünde bu çözümün uzun vadede etkisiz kalacağı anlaşılır. Bir başka muhtemel çözüm olan daha etkin araba bataryaları geliştirmek, farklı bir araştırma alanı konusudur ve sonuçlarının çok hızlı pratiğe dönüşmesi beklenilmemektedir. Bu sorunla başa çıkmanın etkin yollarından biri, daha akıllı mekanizmaları ve hesapsal yöntemleri geliştirip şebeke yapısı içerisinde kullanmaktır. Bu yöntemler, arabaların şarj taleplerini kontrol altında tutmak ve yönetmek amacıyla kullanılabilirler.

Tezin bu bölümünde, akıllı şebekeler için EA'ların şarj mekanizmalarında kullanılabilecek bir zamanlama modeli anlatılacaktır. Bu zamanlama modeli, modern işletim sistemlerinde kullanılan hesapsal yöntemlerden biri olan piyango zamanlamadan

faýdalanır. Piyango zamanlama yöntemi kullanılarak EA'ların şarj talepleri yönetilmeye çalışılır ve bu esnada şebekeye yüklenmenin asgari seviyede tutulması hedeflenir.

6.1. Problem Tanımı ve Farklı Zamanlama Yöntemleri

Bu kısımda, üç farklı zamanlama yöntemi sunulmuş ve bu yöntemler birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu yöntemlerde EA şarj problemi, bir kaynak ayırma problemi olarak ele alınmıştır. Problem tanımlandıktan sonra, uygun bir hesapsal yaklaşımla çözülmeye çalışılmıştır.

6.1.1. EA Şarj Problemi

Bu problem, sistem kaynaklarını ortalama bekleme zamanını asgariye indirecek şekilde dağıtabilen, bir zamanlayıcı modeli bulma problemi olarak tanımlanabilir. Bu tanımda, zaman dilimleri genel olarak ayrık belirlenir. Her bir zaman dilimi için, şebeke kapasitesinin bir kısmı EA şarj işlemleri için ayrılır. Ayrılacak bu kapasite miktarı, şebekenin tedarik edebildiği kapasiteye göre dinamik olarak belirlenebileceği gibi baştan sabit bir kapasite miktarının ayrılması da mümkündür. Şebekenin bütün kapasitesinin şarj işlemi için kullanımı kesintilere neden olabilir. Bu nedenle, sadece belirli bir kısmının ayrılması daha doğru bir yaklaşımdır. Kapasite ayırma işleminin dinamik olarak yapıldığı bir durumda, şarj yönetimi bir DSM yapısı içerisine dahil edilebilir. Böylece gerçek zamanlı fiyatlandırma verisinden faydalanarak daha etkin bir çözüm sunulabilir.

Problemi tanımlamak için bazı temel varsayımlarda bulunulmuştur. Bunlardan ilki, bütün EA bataryalarının aynı hızda şarj edildiği varsayımdır. İkincisinde ise, bütün EA bataryalarının aynı kapasitede olduğu varsayımdır. Bu varsayımlar, sadece benzetim ortamının kurulumunu basitleştirmek için yapılmıştır ve çalışmanın çıktılarına önemli sayılacak bir etkileri bulunmamaktadır.

6.1.2. Önerilen Piyango Zamanlama Tabanlı Yöntem

Çok sayıda EA'nın şarj isteğinin yönetilmesi sorunu, modern işletim sistemlerindeki süreç zamanlama problemine benzerlik gösterir. Buradan yola çıkılırsa, bu sorunun çözümünde süreç zamanlama algoritmalarının uygulanabileceği düşünülebilir.

Piyango zamanlama, mevcut kaynakları tahsis etmek için piyango biletlerinin kullanıldığı rasgele çekilişler barındıran bir süreç zamanlama yöntemidir [175]. Bu yöntemden faydalanılarak bu çalışmada EA şarj yönetim modelinde kullanılmak üzere aşağıda verilen algoritma geliştirilmiştir. Kullanıcılar, bir kaynağa ancak piyangoyu kazandıklarında erişebilirler, aksi durumda kaynağa erişmek için beklerler. Bu yöntemde, bütün kullanıcıların eşit şansa sahiptir ve bu şans müşterilerin elinde olan biletlerin sayısı ile doğru orantılıdır. Arzu edilirse, farklı hesapsal yöntemler kullanılarak bir kullanıcı önceliklendirme işlemi de yapılabilir. Piyango zamanlama yöntemi geliştirilerek diğer bilimsel problemlere uygulanabilir ya da bilet seçimi işlemi için farklı hesapsal yöntemler uygulanabilir. Yöntemin en önemli avantajı paylaşılan kaynakları verimli bir şekilde yönetebilmesidir. Müşteri sayısının ya da bilet sayısının dinamik olarak değişmesi yöntemin çalışmasını etkilemez.

Piyango Zamanlama Tabanlı Algoritma

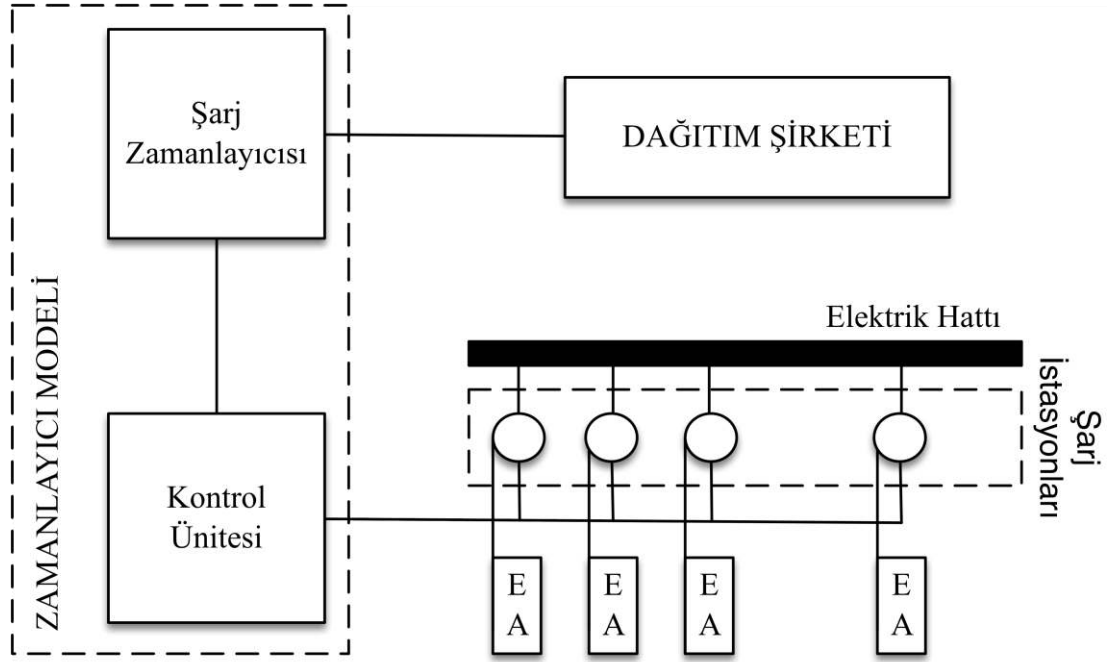
Girdi: Toplam ayrılan miktar a , Toplam bilet sayısı n , Şarj istasyonları sayısı m

Çıktı: Kazananlar dizisi W

```
1: int sayac = 0;
2: double toplamAyrilan = a;
3: int[] W = new int[m];
4: while (toplamAyrilan > 0) do
5:     int kazanan = RandomBiletSec(n);
6:     int kazananIstasyon = istasyonBul(kazanan);
7:     boolean tekrarKontrol(I, kazananIstasyon);
8:     if (tekrarKontrol) then
9:         W[--toplamAyrilan] = kazananIstasyon;
10:    endif
11: end while
12: return W;
```

Piyango zamanlama kullanılarak geliştirilen zamanlama yönteminin, dağıtım şirketi ve şarj istasyonlarında bekleyen EA'larla haberleşmesi gerekir. Piyango biletleri kaynak kullanım hakkını temsil eder. Rasgele olarak kazanan piyango biletleri seçilerek kullanılabilir kaynağın dağıtımı yapılır. Şekil 6.1'de, akıllı şebekeler için EA şarj zamanlama modelinin bir gösterimi yapılmıştır. Bu model, önerilen piyango zamanlamama tabanlı şarj yönteminin kullanılmasına uygun olacak bir şekilde tasarlanmıştır. Modelde bulunan şarj zamanlayıcısı, ilk olarak dağıtım şirketinden şebekeyle ilgili parametreleri alır. Daha sonra, şebeke parametrelerini kullanılarak şarj için ayrılacak maksimum kapasite

miktarı belirlenir. DSM yapısı, modelin bu kısmına entegre edilerek şebeke parametrelerinin dinamik olarak alınması sağlanabilir. Kontrol ünitesi, şarj istasyonlarında bekleyen EA'larla haberleşerek onların şarj taleplerini toplar. Şarj zamanlayıcısı, piyango zamanlama tabanlı yöntemi kullanarak, o tur için çekiliş kazanan EA'ları belirler. Kazanan arabalar şebekede EA şarjı için ayrılmış olan kaynağı kullanır.



Şekil 6.1. Akıllı şebekeler için EA şarj zamanlama modeli.

Bir şarj zamanlama işlemi, EA'ların şarj talebinde bulunarak rezervasyon yapmalarıyla başlar. Bu rezervasyon talepleri için standart bir iletişim mekanizması kullanılabileceği gibi özel bir haberleşme protokolü de geliştirilebilir. Bu şarj talepleri alındıktan sonra, şarj zamanlayıcısı piyango biletlerini hazırlar ve arabalara iletir. Arabalara iletilmesinden kastedilen şey, arabanın bağlı olduğu şarj istasyonudur. Hesapsal yöntem için araba donanımında bir değişiklik yapılması gerekmemektedir. Sadece, EA şarj istasyonlarının yöntemle uyumlu hale getirilmesi yeterlidir. Şarj istasyonlarına bağlanan bütün EA'ların dolaylı yoldan piyango biletleri olur. Bu biletler, tekdüze dağıtılır ve her kazanan bilete belli bir süre, örneğin bir saatlik şarj hakkı verilir. Bir bilet, piyangoda seçilir seçilmez etkinleşir ve şarj istasyonunda şarj işlemi başlar. EA'lar şarj işlemi tamamlandığında veya tüm biletlerini kullanmadan istasyondan ayrıldıklarında şarj

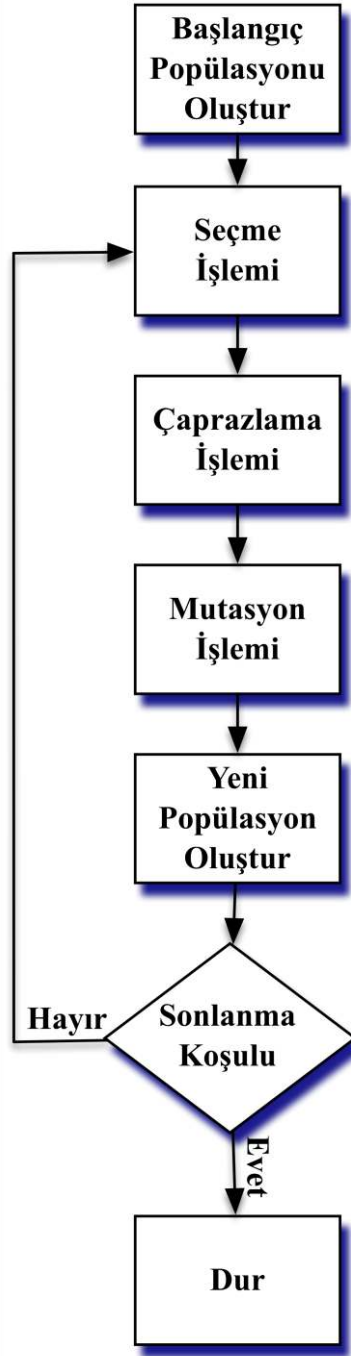
zamanlayıcısına sonlandırma mesajı gönderilir. Gerek duyulursa ayrılan arabaların bilet transferi yapmalarına imkan tanınabilir.

Önerilen modelde, kaynaksız kalma (açlık) sorunu bulunmaz. Bununla beraber, sadece piyangoyla şarj dağılımı yapmak, sağlıklı bir şarj işlemi için yeterli değildir. Her araç sahibi için, toplam bekleme süresi önemlidir ve bu süre mümkün mertebe düşük tutulmalıdır. Araba bataryalarının şarj başlama ve durma işlemlerinden olumsuz etkilenmemesi için piyangoyla kazanılan şarj hakkı çok düşük tutulmamalıdır. Sistemde belirli bir zamanın üzerinde bekleyen araçlara telafi biletleri dağıtılması yerinde olur.

$V=\{1,2,...,m\}$ kümesi şarj edilmek için bekleyen EA'ları gösteriyor olsun. $S=\{1,2,...,n\}$ kümesi de şarj istasyonlarını gösterebilir. V kümesinin altkümelerinden biri şarj istasyonlarındaki EA'ları tanımlar, bu altkümenin maksimum n sayıda elemanı bulunur. Bir EA'nın tamamen şarj olabilmesi için gereken süre k saat ise, 1-saatlik şarj kazanma hakkı olan bir yapıda her EA'ya başlangıçta k tane bilet verilir. Şebeke bütün kapasitesini EA şarjı için ayırmayacağı için, belli bir dönemde sadece şarj istasyonları kümesinin bir altkümesi etkindir. Bu altkümenin boyutu her şekilde kazanacak maksimum bilet sayısını belirlemeye yarar.

6.1.3. GA Tabanlı Zamanlama Yöntemi

Piyango zamanlama tabanlı yöntemi test etmek için GA tabanlı bir zamanlama yöntemi kullanılmıştır. Literatürde EA'ların şarj problemine çözüm geliştirmek için GA kullanan çalışmalar bulunmaktadır, bu yüzden karşılaştırma için GA tabanlı zamanlama yöntemi seçilmiştir. GA tabanlı zamanlama yönteminde, her kromozom, bir zaman dilimi için şarj istasyonlarının durumunu temsil eder. Bu kromozomdaki gen sayısı şarj istasyonlarının sayısına eşittir. Aktif durumda olan bir istasyonun değeri 1 ile temsil edilir, bu istasyonlara şarj etme hakkı verilir. Aktif olmayan istasyonlar kromozomda 0 değeriyle temsil edilir. Zaman dilimleri istenildiği gibi ayarlanabilir, hesaplama kolaylığı açısından 1 saat olarak belirlenmiştir. Piyango zamanlama tabanlı yöntemde olduğu gibi her zaman aralığı için, şebeke kapasitesinin sadece bir kısmı EA şarj işlemi için ayrılmıştır. Şekil 6.2'de tipik bir GA yapısı için akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.2. GA için akış diyagramı.

İki boyutlu bir kaynak ayırma tablosu problem için bir aday çözüm meydana getirir. Aday çözümün değerlendirilmesi için GA uygunluk fonksiyonu kullanılır. Ortalama bekleme süresi uygunluk değeri olarak kullanılmıştır. İlk olarak, aday çözümlerden bir popülasyon oluşturulur. Genetik operatörlerden seçme, çaprazlama ve mutasyon kullanılarak daha iyi nesiller üretilmeye çalışılır. GA yapısı gereği daha iyi yeni nesillerde bulunan aday çözümlerin, daha iyi uygunluk değerleri olur. Belli bir nesil sayısından sonra,

elde edilen aday çözümlerden en iyisi seçilerek şarj dağılımını belirlemede kullanılmıştır. GA kullanan yöntemlerin çalışma zamanları uzun sürdüğü için popülasyon ve iterasyon sayıları çok yüksek tutulmamıştır. Aşağıda, GA tabanlı zamanlama algoritması verilmiştir.

GA Tabanlı Zamanlama Algoritması

Girdi: Toplam ayrılan miktar a, Toplam istasyon sayısı k, popülasyon sayısı m, iterasyon sayısı i

Çıktı: En iyi popülasyon P

1: P = BaslangicPopulasyonuOlustur(m, a, k);

2: **while** (i > 0) **do**

3: P = Secme(P);

4: P = Çaprazlama(P);

5: P = Mutasyon(P);

6: P = YeniPopulasyon(P);

7: --i;

8: **end while**

9: **return** P;

6.1.4. Rasgele Zamanlama

Rasgele zamanlama yönteminin, karar verme mekanizmasının bir zekası bulunmamaktadır. Aşağıda algoritması verilen bu yöntem, diğer hesapsal yöntem kullanan modellerin verimliliğinin test edilmesi için kullanılmıştır. Yöntemde, her zaman dilimi için aktif hale getirilen şarj istasyonları altkütmesi rasgele olarak belirlenir. Aktif hale getirilmiş istasyonda bir EA bulunuyorsa, o EA için şarj işlemi başlatılır. Şarj işlemi başka bir koşula tabi değildir. Yöntemde kullanılan rasgelelik, tekdüze olacak şekilde belirlenmiştir.

Rastgele Zamanlama Algoritması

Girdi: Toplam ayrılan miktar a, Toplam istasyon sayısı k

Çıktı: Şarj hakkı kazanan istasyonlar dizisi I

1: int sayac = 0;

2: double toplamAyrilan = a;

3: int[] I = new int[toplamAyrilan];

4: **while** (toplamAyrilan > 0) **do**

5: int secilen = Random(k);

6: boolean tekrarKontrol(I, secilen);

7: **if** (tekrarKontrol) **then**

8: I[--toplamAyrilan] = secilen;

9: **endif**

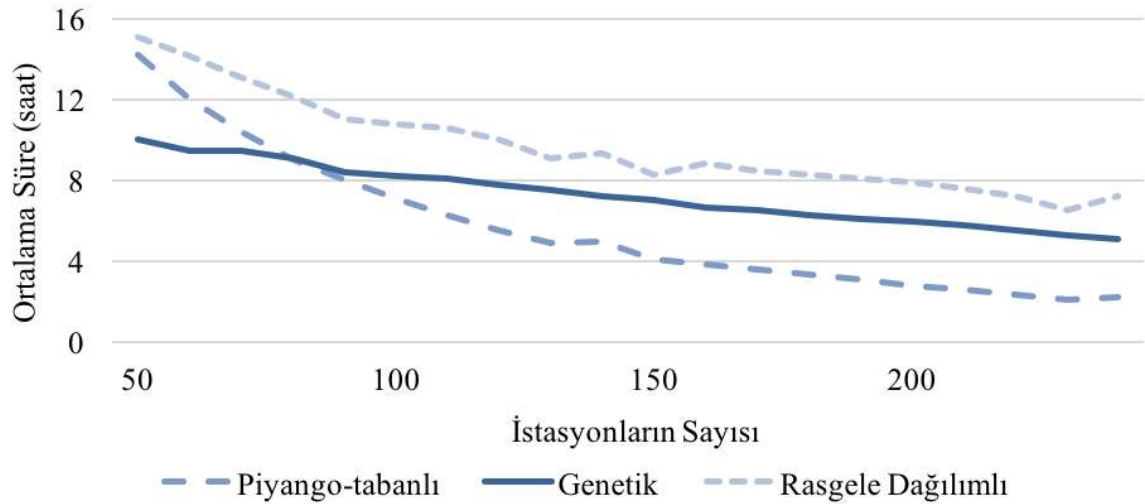
10: **end while**

11: return I;

6.2. Zamanlama Yöntemlerinin Kıyaslanması ve Değerlendirme

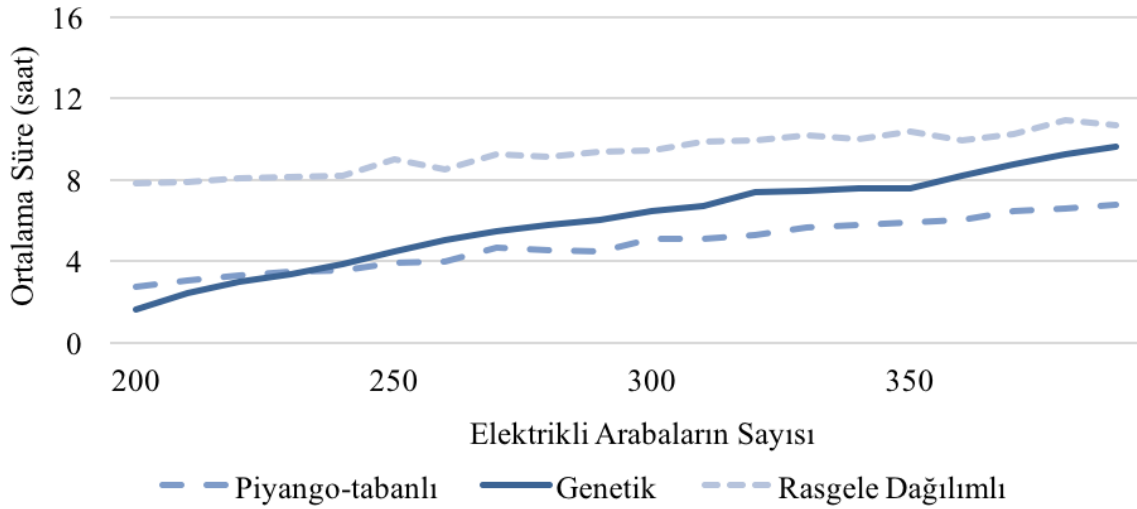
Piyango tabanlı zamanlama yöntemini diğer zamanlama yöntemleriyle karşılaştırmak için bir benzetim çalışması yapılmıştır. İlk olarak EA sayısı sabit tutulup farklı sayıda şarj istasyonu bulunduğu durumlarda piyango tabanlı zamanlama, GA tabanlı zamanlama ve rasgele zamanlama yöntemleri incelenmiştir. EA sayısı 200 olarak belirlenmiş ve bu araçlar şarj istasyonlarına olarak dağıtılmıştır. Piyango tabanlı zamanlama yöntemi için başlangıç bilet sayısı 4, GA için toplam nesil sayısı 20 olarak seçilmiştir. Ortalama bekleme zamanları, şarj kuyruğunda geçen toplam zamanın toplam EA sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

Şekil 6.3’de şarj istasyonu sayısının ortalama bekleme zamanı üzerine etkisi gösterilmiştir. Önerilen piyango tabanlı zamanlama yöntemi, hem rasgele zamanlayıcıdan hem de GA tabanlı zamanlayıcıdan daha iyi bir performans göstermiştir. Buna ek olarak, önerilen yöntemde ortalama bekleme zamanı boştaki istasyonların sayısı arttıkça hızlı bir biçimde azalmıştır. Her üç yöntemde de kaynakların artırılması ortalama bekleme zamanını azaltmıştır, fakat bu performans iyileşmesi önerilen yöntemde diğer yöntemlere göre daha hızlı bir biçimde gerçekleşmiştir.



Şekil 6.3. Şarj istasyonu sayısının ortalama bekleme zamanı üzerine etkisi.

İkinci durumda, istasyon sayısı 150 olarak sabit tutulup EA sayısı artarken yöntemlerin performansı incelenmiştir. Şekil 6.4’de görüldüğü üzere önerilen yöntem diğer yöntemlerden daha iyi performans göstererek ortalama bekleme süresini daha düşük değerlerde tutabilmiştir. Yöntemin sağladığı kazanç, daha fazla kaynak ya da daha az EA olduğu durumlarda daha fazladır. EA sayısı çok arttıkça bu kazanım farkı azalmaktadır.



Şekil 6.4. EA sayısının ortalama bekleme zamanı üzerine etkisi.

EA’ların eş zamanlı şarj edilmeleri sonucunda ortaya çıkması beklenen yük sorunu için farklı hesapsal yöntemler kullanılarak çözüm üretilebilir. Bu problem, modern işletim sistemlerindeki süreç zamanlama problemine çok benzediği için bir süreç zamanlama yöntemi olan piyango-tabanlı zamanlama yöntemi kullanılarak bir zamanlayıcı modeli oluşturuldu. Benzetim sonuçları, bu zamanlayıcının farklı hesapsal yöntemler kullanan zamanlayıcı modellerine göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Piyango tabanlı zamanlama yöntemi, hem rasgeleliğin basitliğinden faydalanır hem de rasgele bir zamanlayıcıya göre daha akıllı bir çözüm üretir.

Benzetim çalışmasında, GA’nın iterasyon sayısı arttırılarak daha iyi bir performans elde etmek mümkündür. Fakat, bu durumda piyango-tabanlı zamanlama yöntemi çalışma hızı ve düşük karmaşıklığıyla çok daha avantajlı bir konuma geçecektir. Piyango tabanlı zamanlama yönteminin bir diğer avantajı kaynak yönetim politikalarının diğer bileşenlerden bağımsız kurgulanmasını sağlamasıdır. Buradan yola çıkılırsa, geleneksel ya

da bulanık kuyruk yapılarını EA'ların kullanım durumundaki aciliğe göre bir önceliklendirme amacıyla kullanarak çözümünü daha da iyileştirmek mümkün olabilir.



7. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ENTEGRASYON SORUNU İÇİN ARABADAN-ŞEBEKEYE (V2G) ENERJİ AKTARIMI

Enerji ihtiyacı sürekli olarak artmaktadır ve arz tarafında ileride sorunların yaşanması ihtimali bulunur. Alternatif enerji kaynakları, arz miktarını arttırmak için kullanılabilirler. Fakat, bu kaynakların dalgalanma sorunu bulunur. Bir şebekenin hizmetini etkin bir biçimde sunabilmesi için alternatif enerji kaynaklarından sağlanan üretim miktarını tahmin edebilmesi gerekir. Hibrit yenilenebilir enerji uygulamaları, bu amaç için geliştirilen, çevre dostu enerji çözümlerinden bir tanesidir.

Fukushima nükleer santrali kazasından sonra, alternatif enerji kaynaklarına olan talep hızla artmıştır. Güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi, bu tür enerji kaynaklarından en çok bilinenleridir. Ancak bu kaynakların güvenilirlikleri ve maliyetleri ile ilgili sorunlar bulunur. Bu kaynaklar, mevsimsel koşullardan etkilenirler ve ilk kurulum maliyetleri yüksektir. Literatürdeki yöntemler, şebekede bu tür yenilenebilir enerji kaynakları ağırlıktayken, şebekenin davranışını fazla incelememiştir. Bu kısımda yapılan çalışmanın temel motivasyonu, bu enerji kaynaklarının şebekeye katılımını incelemek ve arabadan şebekeye aktarım (V2G) yönteminin bu kaynaklarla birlikte kullanılmasının sağlayabileceği faydaları araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, V2G ile farklı yenilenebilir enerji kaynaklarını bir araya getiren bir enerji yönetim sistemi modeli oluşturulmuştur. Bu model farklı durumlar için incelenerek bir şebekenin yenilenebilir enerji kaynaklarına bağımlı olduğu durumlarda V2G'nin sağlayabileceği katkılar gösterilmiştir.

7.1. Arabadan-Şebekeye (V2G) Enerji Aktarımı

V2G yöntemi, son yıllarda geliştirilmekte olan yeni bir yöntemdir. Bu yöntem, yüksek enerji taleplerini karşılamak ya da elektrik üretim maliyetlerini dengelemek gibi çok sayıda önemli mekanizmaya sahiptir. Tepe-yükler ve kesintiler gibi sorunlara yönelik kullanılabilen çevre dostu bir yöntemdir. Bununla beraber, ulaşımın bir EA'nın öncelikli amacı olduğunu ve EA sahiplerinin, V2G mekanizmasına katılmaya zorlanamayacağını akılda bulundurulması gerekir. EA'lar, dağıtık bir enerji depolama sistemi olarak da

kullanılabilir, ancak bu katkıyı yapabilmeleri için onları akıllı ve verimli bir şekilde yöneten bir sisteme ihtiyaç duyulur.

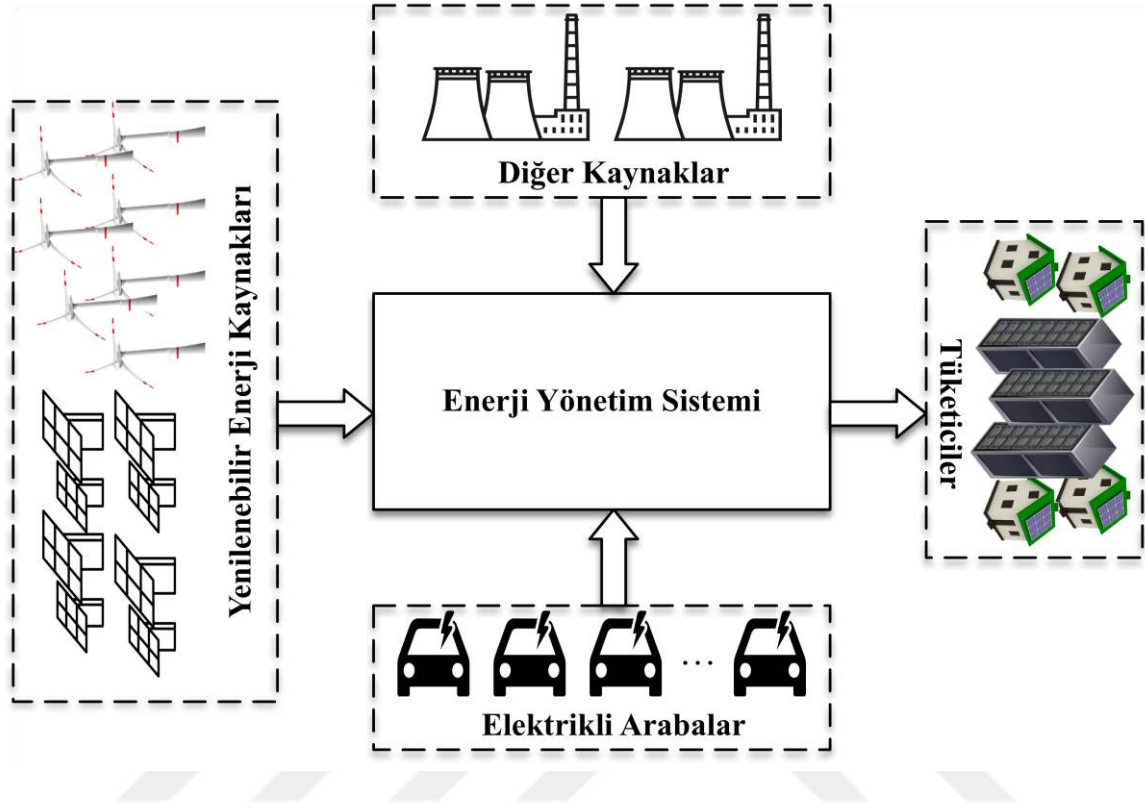
Birçok ülkede, trafiğe çıkan EA sayısı hızlı bir artış göstermektedir. Bu arabalar, yüksek kapasiteli bataryalarını şarj edebilmek için elektrik şebekesine bağlanmalıdır. Bu eş zamanlı bağlantının doğurabileceği muhtemel sorunlar daha önceki bölümlerde incelenmiştir. Bu arabaların genellikle gün içerisinde park edilmiş konumda bulunmaları, atıl durumda olan araba bataryalarından faydalanılması düşüncesini doğurmuştur. V2G, EA bataryalarını enerji depolamak için kullanan bir yöntemdir ve dağıtık bir enerji kaynağı oluşturma amacı taşır. Bu yöntem kullanılarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının güvenilirlik konusundaki sorunlarını işbirliği içinde çözebilmek mümkün gözükmektedir. V2G, hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin yardımcı bir parçası olabilir.

7.2. Örnek Bir Enerji Yönetim Sistemi

Enerji yönetim sistemi, enerji kaynaklarını birleştiren ve yöneten bir yapıdır. Bu sistem, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve EA'ların şebekeye sağlayabileceği enerjiyi en üst düzeye çıkarmaya çalışır. Ayrıca, arz ve talep miktarlarına bağlı olarak hangi EA'ların sisteme katılacağını belirler. Elektrik piyasası rekabetçi bir yapıda olduğu için, enerji yönetim sisteminin; kapasite tahmini, batarya durumu kontrolü ve batarya şarj durumu (state of charge, SOC) kontrolü gibi diğer rollere sahip olması gerekir. Enerji yönetim sistemleri, DSM gibi diğer yapılarla birleştirilerek akıllı bir şebekenin temelleri atılabilir.

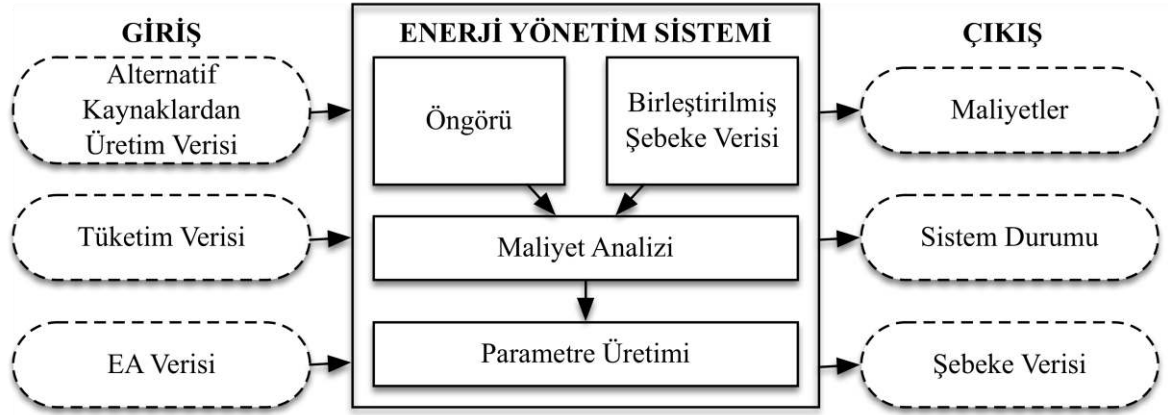
Şekil 7.1'de enerji yönetim sisteminin mimarisi gösterilmiştir. Bu mimaride dört farklı bileşen bulunur. Bu bileşenler; enerji yönetim sistemi, yardımcı kaynaklar, yenilenebilir kaynaklar ve tüketicilerdir. Bu sistemde, bir önceki bölümde anlatılan akıllı EA şarj zamanlama sistemleri gibi akıllı kontrol yöntemleri bulunur. Yardımcı kaynak olarak, fosil yakıt kullanan çözümler, nükleer santraller veya V2G sistemi kullanılabilir. Fosil yakıt kullanan çözümler, ekolojik açıdan pek arzu edilmezler ve bu kaynakların dünyadaki toplam rezervleri azalmaktadır. Nükleer santraller ise Fukushima kazasından sonra, güvenlik riskleri açısından sorgulanmaya başlamıştır. V2G, artan EA kullanımı nedeniyle gelecek vadeden bir çözüm olarak durmaktadır. Bu yapının; kesintilerin önüne geçilmesi, yüksek talebin dengelenmesi ya da üretim maliyetlerini kontrol edilmesi gibi önemli konularda başarılı olma potansiyeli bulunur. V2G'nin sistemdeki diğer bileşenlerle

haberleşebilmesi önemlidir. Bu yüzden, bu tarz bir sistem ancak NIST referans modeline uygun akıllı bir şebekede kurulabilir.



Şekil 7.1. Örnek bir enerji yönetim sistemi modeli.

Enerji yönetim sisteminin nasıl olması gerektiği şematik olarak Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Sistem, yürüttüğü işlemlerini üç aşama halinde gerçekleştirir. İlk olarak, birleştirilmiş şebeke verisi hesaplanır ve eğer gömülü öngörü mekanizması varsa tahminler yapılır. İkinci aşama, maliyet analizleriyle ilgilidir. Son olarak, V2G gibi akıllı mekanizmaları kontrol etmek için parametre üretimi yapılır. Enerji yönetim sisteminin amacı, hiçbir kesinti veya aşırı üretim olmadan şebekede dengeli bir durum sağlamaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sundukları üretimde, mevsimsel koşullara bağlı olarak dalgalanmaların oluşması bilinen bir sorundur. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları doğru bir tahmin mekanizmasının kullanılmasına gereksinim duyarlar. Tahmin mekanizmalarının kurgulanması, kolay bir iş değildir ve günümüzde kullanılan tahmin mekanizmaları ilave bazı problemlere neden olabilirler. Benzer biçimde, EA’ların V2G katılımları uygunluk durumuna bağlı olduğu için uygunluk olasılıklarını öngören bir tahmin mekanizmasının bulunması da gerekebilir.



Şekil 7.2. Bir enerji yönetim sisteminin şematik gösterimi.

7.2.1. Matematiksel Model ve Hesaplama Yöntemi

Şebekenin üretim kapasitesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve yardımcı kaynaklarının yaptığı üretimden tüketim değerinin düşülmesi ile belirlenir. Herhangi bir t zamanında, üretim miktarı

$$P_G^t = P_W^t + P_S^t + P_A^t - P_C^t \quad (7.1)$$

ile hesaplanır. Burada; P_G : şebekenin üretimini, P_W : rüzgar enerjisi kaynaklı üretimi, P_S : güneş enerjisi kaynaklı üretimi, P_A : yardımcı kaynaklardan elde edilen üretimi gösterir. Tüketimi, göstermek için P_C parametresi kullanılmıştır. Değişken bir üretim biçimi olan rüzgar enerjisini modellemek için farklı yöntemler bulunur. P_W , Weibull olasılık dağılımı kullanılarak elde edilebilir [176,177].

$$f(v; k, \lambda) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k}, \quad 0 \leq v \leq \infty \quad (7.2)$$

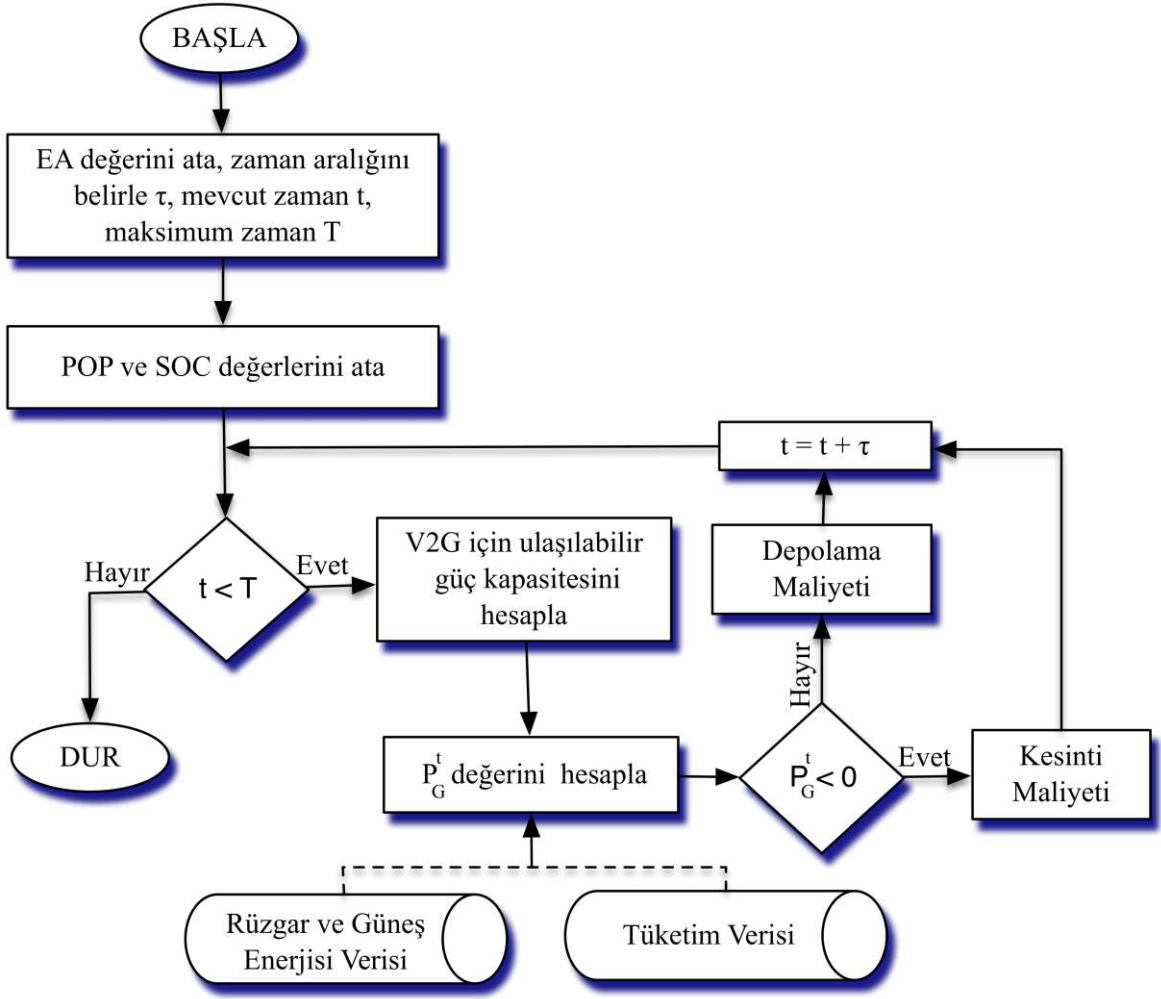
$$P_W = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci}, v \geq v_{co} \\ \frac{v-v_{ci}}{v_R-v_{ci}} P_{WR}, & v_{ci} \leq v \leq v_R \\ P_{WR}, & v_R \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (7.3)$$

Burada; v : rüzgar hızını, v_{ci} : türbinin devreye girdiği rüzgar hızını, v_{co} : türbinin devreden çıktığı rüzgar hızını, v_R : anma gücündeki rüzgar hızını gösterir. Diğer parametrelerden k : pürüz giderme katsayısıdır ve λ : ölçekleme amacıyla kullanılan bir katsayıdır. Ölçülmüş rüzgar enerjisi verileri, bir Weibull olasılık dağılımına yaklaşık olarak uydurulabilir. Güneş enerjisi kaynaklı üretim ve tüketim verisi için de çeşitli olasılık dağılımlarından faydalanılabilir. Dağılım yöntemleri yerine, bütün kaynakların ölçülmüş gerçek veri değerleri de kullanılabilir. Bunun için enerji yönetim sistemi içerisinde bir veri tabanı yönetim sisteminin bulunması gerekir.

Yardımcı kaynakların katkısı, seçilen kaynağa göre farklılık gösterir. Eğer V2G kullanılır ise bu yapı katılıma dayalı bir sistem olarak görülür ve arz kapasitesi iki faktöre bağlı olur. Bunlar; EA bataryalarının SOC durumu ve EA'nın V2G'ye katılma olasılığıdır (POP). POP değerini etkileyen birkaç durum bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, arabanın kullanım aciliyeti ve kullanım sıklığıdır. Diğerleri ise araç sahiplerinin sisteme katılım için motivasyonlarıdır. POP değerini arttırabilmek için enerji yönetim sistem içerisinde teşvik temelli mekanizmalar kullanılabilir. DSM sistemlerinde olduğu gibi yapılacak bir ödüllendirme katılım isteğini arttırabilir. Olasılık olarak [0-1] aralığında ifade edilen POP değerinden farklı olarak SOC değeri yüzde cinsinden ifade edilir (0: boş, 100: dolu).

$$SOC = \frac{\text{Kullanılabilir kapasite}}{\text{Maksimum kapasite}} \quad (7.4)$$

Matematiksel model kullanılarak oluşturulan hesaplama yönteminin akış diyagramı Şekil 7.3'de gösterilmiştir. Hesaplama yönteminde, V2G arzını belirlemek için ulaşılabilir güç kapasitesi yöntemiyle tahmin kullanılmıştır [178]. Bu yöntemde, ilk olarak bütün araçlar için aynı değere sahip olan bir katılım olasılığı belirlenir. Her araç için farklı bir olasılık değeri kullanılırsa hesapsal karmaşıklık çok artar. Ortak bir katılım olasılığı kullanılması sayesinde katılım dağılımı binom dağılımı olacak biçimde sadeleştirilebilir. Son olarak ulaşılabilir güç kapasitesi, araçların çeşitli gruplar halinde kümelenmesiyle hesaplanır. Hesaplama yönteminde, daha iyi bir kestirim yapabilmek için EA'ların SOC özellikleri de dikkate alınır.



Şekil 7.3. Hesaplama yöntemi için akış diyagramı.

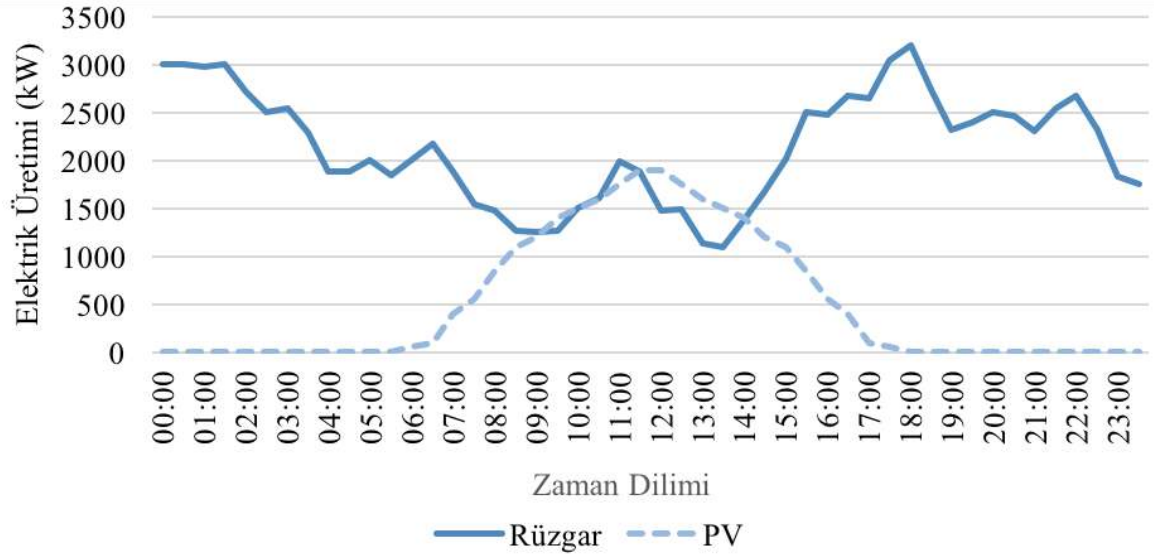
7.3. V2G Benzetim Çalışması

Benzetim çalışmasında, sahip oldukları belirsizlikler nedeniyle POP ve SOC değerleri rasgele değerler olarak düşünülmüştür. Her EA sahibine eşit dağılımlı olarak rasgele POP ve SOC değerleri atanmıştır. Bu değerler sayesinde araçların V2G'ye katılım durumları şekillendirilmiştir. Çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye farklı oranlarda katkı sundukları üç senaryo incelenmiştir. Enerji kaynaklarının üretim profilleri Tablo 7.1'deki toplam kapasite değerlerinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan veriler Ek_B'de sunulmuştur.

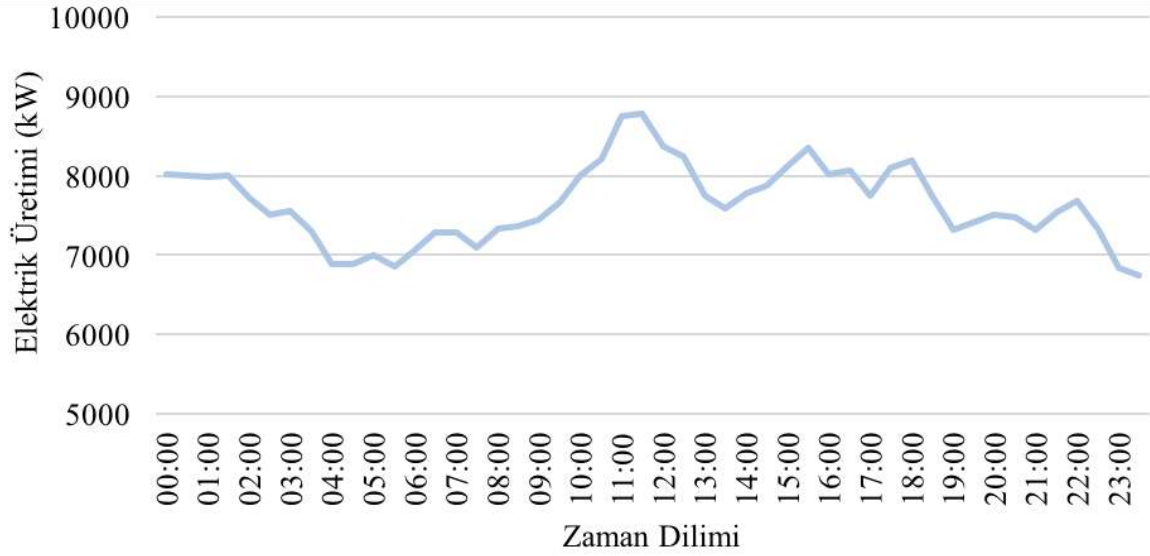
Tablo 7.1 .Kullanılan kaynaklar ve toplam kapasite değerleri.

Kaynak Türü	Kapasite (kW)	Ünite Sayısı	Toplam Kapasite (kW)
Elektrikli Araba	12	500	6000
Rüzgar Türbini	8	400	3200
PV Panel	2	1000	2000
Diğer	-	-	5000

Örnek olarak kullanılan şebekede, sadece rüzgar ve güneş enerjisi kaynakları kullanılarak üretim yapıldığı varsayılmıştır. Şekil 7.4'de bu kaynakların bir günlük üretim profilleri gösterilmektedir. PV panellerin üretimi gün ortası saatlerde en yüksek seviyeye ulaşmaktadır ve günün geri kalanında bazı zaman dilimlerinde üretim yapılmamaktadır. Benzer şekilde, rüzgar enerjisi kaynaklı üretim de sabit olmaya bir üretim davranışı sergiler. Bir şebekenin, sadece bu iki kaynağı kullanarak güvenilir bir enerji arzı yaratması mümkün değildir. Şekil 7.5'de ise şebekenin bir günlük toplam elektrik üretim kapasitesinin bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 7.4. Rüzgar türbini ve PV panellerinin bir günlük üretim profilleri.



Şekil 7.5. Örnek şebekenin bir günlük toplam üretim profili.

Literatürde birçok çalışmada, EA'ların V2G'ye katılım olasılıkları tek bir değer olarak belirlenmiştir. Bu tarz bir varsayım, gerçek hayatı doğru bir şekilde yansıtamadığı için her EA'ya ayrı bir katılım olasılığı atanmıştır. V2G katılım olasılıkları, Tablo 7.2'de verilen aralıklara ve senaryo tipine göre belirlenmiştir. Tablo 7.3'de verilen parametreler farklı senaryolar için yenilenebilir enerji kaynakların üretim miktarlarını belirlemede kullanılır.

Tablo 7.2. EA'ların V2G katılımları için olasılık değeri aralıkları.

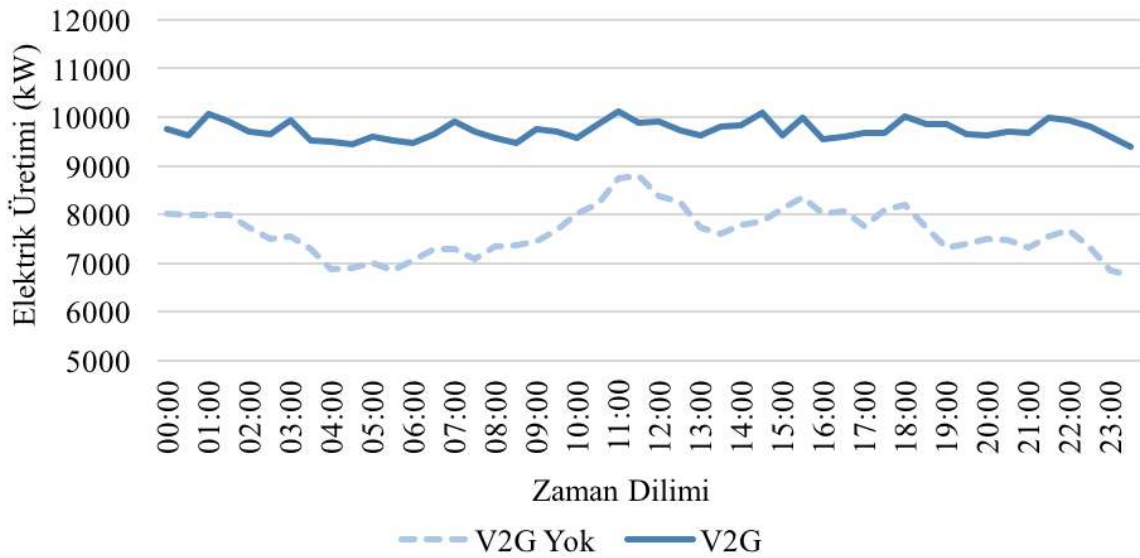
Senaryo	Minimum Oran	Maksimum Oran
Düşük miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı	0.60	0.80
Yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı	0.40	0.60
Çok yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı	0.20	0.40

Tablo 7.3. Farklı senaryolar için üretim miktarlarındaki azalma oranları.

Senaryo	Azalma Oranı (%)
Düşük miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı	80
Yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı	40
Çok yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı	0

7.3.1. Düşük Miktarda Yenilenebilir Enerji Kaynağı Kullanımı

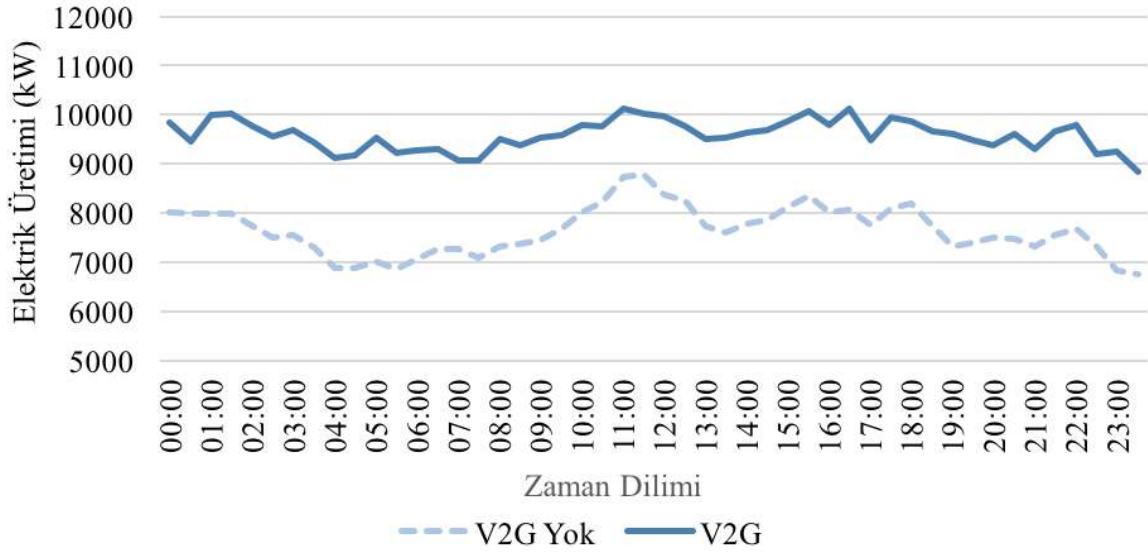
Bu senaryoda, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha sınırlı miktarda olduğu varsayılmıştır. Bu sınırlamanın nedeni mevsimsel koşullar sonucu ortaya çıkmış bir durum olabilir ya da geçici bir nedenle üretim miktarlarında azalma meydana gelmiş olabilir. Sonuç olarak, bu tarz bir senaryoda V2G arzı için azami ve sürekli bir talep ortaya çıkar. EA'ların V2G'ye katılım olasılıkları da bu amaca dönük olarak yüksek tutulmuştur. Şekil 7.6'da bu senaryoda V2G'nin şebeke üzerindeki etkisi gösterilmektedir. V2G kullanılması sonucu daha dengeli bir üretim profili elde edilmiştir.



Şekil 7.6. Düşük miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanıldığında V2G'nin şebeke üzerinde etkisi.

7.3.2. Yüksek Miktarda Yenilenebilir Enerji Kaynağı Kullanımı

Bu senaryoda yenilenebilir enerji kaynaklarının sağladığı üretimin bir önceki senaryoya göre daha yüksek miktarlarda olduğu düşünülmüştür. EA sahipleri, Tablo 7.2'ye göre V2G'ye katılmak için ortalama bir motivasyona sahiptirler. Şekil 7.7 incelenirse V2G'nin yine bir önceki senaryoda olduğu gibi şebekenin üretim profilini dengeleyebildiğini görülmektedir.



Şekil 7.7. Yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanıldığında V2G'nin şebeke üzerinde etkisi.

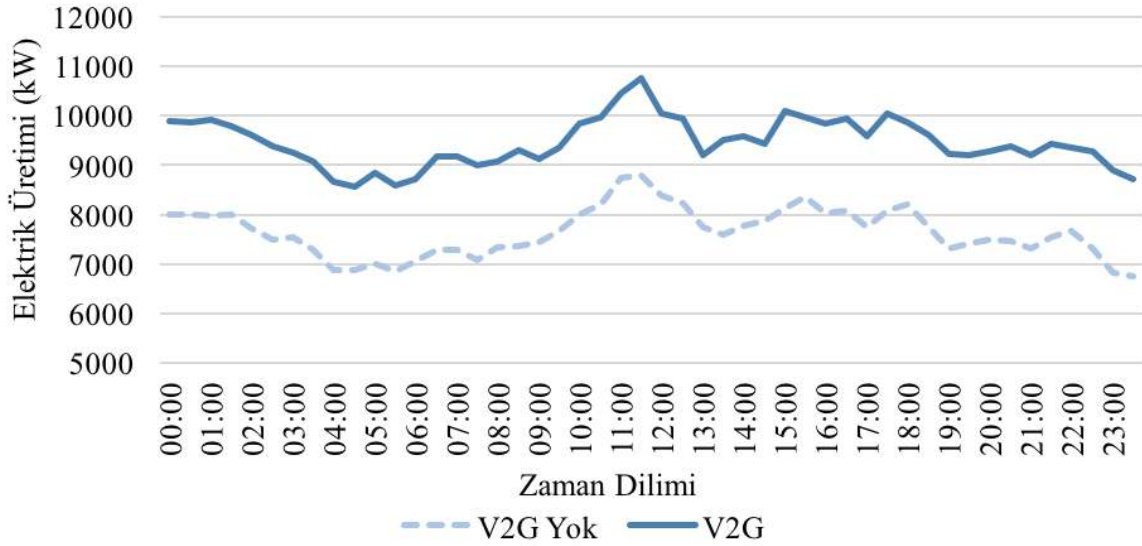
7.3.3. Çok Yüksek Miktarda Yenilenebilir Enerji Kaynağı Kullanımı

Üçüncü senaryoda, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin şebekeye katılımının çok yüksek olduğu varsayılmıştır. Böyle bir durumda arz fazlasını engellemek amacıyla, V2G katılım arzusu düşük düzeyde tutulmuş ve katılım olasılıkları buna uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 7.8'de gösterildiği gibi, düşük seviyeli de olsa V2G katılımı üretim miktarını daha da yukarı çekmiştir. Şebeke, yenilenebilir enerji kaynaklarının baskınlığından kaynaklanan dalgalı bir üretim profiline sahiptir. V2G'nin bu düşük katkısı sistemde hiç V2G katkısı olmaması durumuna çok benzemektedir.

7.4. Ekonomik Açıdan İnceleme ve Değerlendirme

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımlarının yaygınlaşmasıyla, V2G yönteminin şebeke güvenilirliği üzerine olan etkisini araştırmak daha fazla önem kazanmıştır. Yenilenebilir kaynakların üretimleri, genel olarak şebeke üretim profilinin dalgalı olmasına neden olur. V2G, hem bir şebekenin toplam üretim kapasitesini artırmak hem de üretim profilindeki dalgalanmaları dengelemek için önemli bir mekanizmadır. Bu durum, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı şebekeler için enerji yönetim stratejileri geliştirmeye ve V2G'ye yönelik daha ileri çalışmalar yapılması gerektiğini işaret eder. Şebekeyi dengelemede, yardımcı kaynak olarak fosil yakıtlı

çözümlerde kullanılabilirdi. Bu kısımda, her iki yardımcı kaynak ekonomik açıdan analiz edilmiştir.



Şekil 7.8. Çok yüksek miktarda yenilenebilir enerji kaynağı kullanıldığında V2G'nin şebeke üzerindeki etkisi.

Fosil yakıt kullanılarak yapılan üretim, çevreye zarar verdiği için genel olarak istenmemektedir. Fakat bir çok ülke açısından, kamu maliyesinin doğası gereği üretim maliyetleri fazlasıyla önem taşır. V2G ve fosil yakıtlı çözüm kıyaslanırken, ilk yatırım ve bakım maliyetleri ihmal edilmiştir. Bunun nedeni, ilk yatırım maliyeti hesaba katılmasının V2G'ye haksız bir avantaj sağlamasıdır. V2G'nin aslında ilk yatırım maliyetini oluşturan EA'lar, araba sahipleri tarafından satın alınır ve bakım maliyetleri de gene araba sahipleri tarafından üstlenir. Her iki üretim yönteminin masraf kalemleri Tablo 7.4'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.4. Fosil-yakıtlı üretimle V2G'nin maliyet karşılaştırması.

Maliyet	Fosil-yakıtlı Üretim	V2G
Elektrik	Yok	Var
Batarya	Yok	Var
Yakıt	Var	Yok
Karbon Vergisi	Var	Yok
Atık Maliyeti	Var	Yok
Yatırım Giderleri	Var	Var
Altyapı Maliyeti	Var	Var

V2G'nin en önemli masraf kalemleri batarya tabanlıdır. Bu sistemlerin arz miktarı batarya teknolojisi, batarya sağlığı ve SOC tarafından sınırlandırılmıştır. Gerilim kaynaklı olası problemleri önleyebilme için V2G sistemine katılan araçlarda SOC değeri yüzde 20'den daha fazla olmak zorundadır. Bugüne kadar üretilen EA'larla ilgili genel problem, araçların sürüş mesafelerinin fazla olmamasıdır. Hiçbir EA sahibi, arabasının bir V2G sistemi tarafından düşük SOC değerinde bırakılmasını ve seyahatine bu şekilde başlamayı istemez. Dolayısıyla, bir V2G sisteminde, SOC değerlerinin yüzde 50'den daha aşağı değerlere gelmesini önlemek gerekir. Ancak, bu kriter V2G'nin sisteme katkısını azaltabilir. Tablo 7.5'de V2G sistemi için SOC değerlerinin nasıl yorumlanması gerektiği özetlenmiştir.

Tablo 7.5. SOC değerlerinin V2G için anlamı.

SOC Değeri	Anlamı
< %20	Gerilim problemleri
< %50	İstenilmeyen sürüş durumu
> %50	Hem sürüş hem V2G için uygunluk

EA bataryaları günümüzde elektrokimyasal hücrelerden oluşur. Bataryalarda yaşlanma, ısınma, şarj ve deşarj işlemleri gibi nedenlerden dolayı bozulma olur. Sıklıkla yapılan şarj ve deşarj işlemleri bozulmayı hızlandırır. Bununla beraber, araç bataryası V2G sistemi olmasa da yaşlanır ve ömrü tükenir. V2G'nin batarya ömrü üzerindeki sadece etkileri dikkate alınmalıdır. Ayrıca, düşük ortalama SOC değerlerinde yapılan şarj ve deşarj işleminin batarya ömrünü uzattığı görülmüştür [179]. Sonuç olarak, akıllı bir enerji yönetim sisteminin, V2G'ye katılan araçları SOC değerlerini dikkate alarak yönetmesi gerekir.

Bu bölümde, V2G barındıran hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin ekonomik analizi yapılmış ve V2G entegrasyonunu incelenmiştir. V2G, hibrit bir yenilenebilir enerji sisteminin sağladığı faydaları arttırmak açısından umut vadeden önemli bir çevre dostu çözümdür. Rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları dış koşullara bağlı olarak sürekli bir üretim sağlayamazlar. V2G üretimdeki bu süreklilik sorununun giderilmesi amacıyla kullanılabilir. Ancak V2G sistemine katılan EA bataryalarının, sıklıkla ömürlerini azaltan şarj ve deşarj işlemlerine tabi olmaları gerekir. İlave batarya maliyetine rağmen, bir V2G sistemi fosil yakıtlı alternatiflerinden hem daha ekonomiktir ve hem de çevreye daha az zararlıdır. V2G sisteminin başarısını etkileyecek önemli bir

unsur da araç sahiplerinin katılımıdır. Motivasyonun düşük olduğu durumlarda, teşvik temelli bir mekanizma kullanılarak katılım arttırılabilir.



8. SONUÇLAR

Akıllı şebekeler günümüzde kullanılan ve geleneksel olarak adlandırılan elektrik şebekelerini, hem bileşenler hem altyapı açısından yeni bir seviyeye yükseltecektir. Bu dönüşüm aslında bir yandan gerçekleşmektedir ve tamamlanması için gelecekte uzun bir süreç vardır. İlerleyen yıllarda bu alanda yapılan teorik çalışmaların, teknolojinin ve regülasyonların el verdiği ölçüde pratiğe dönüşmesi beklenir. Teorik çalışmalarda ağırlıklı olarak bilgi sistemlerinden faydalanılması, hesaplama alanındaki bazı zorlukların ve karmaşıklığın elektrik şebekelerinde de yaşanmasına neden olabilir. Büyük miktarlardaki verinin hatasız, hızlı ve güvenli bir biçimde işlenebilmesi için etkin yöntemlerin geliştirilmesi ve elektrik şebekelerinde kullanılmaya uygun yapıların oluşturulması gerekir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen hesapsal yöntem çalışmaları aşağıda belirtilen üç farklı kategoriye ayrılmıştır:

1. Bilgi teknolojilerindeki hesapsal yöntemler, elektrik şebekeleri mevcut kavramsal modeliyle birleştirilerek, bu konuya ilişkin araştırmalar yapılmıştır.
2. Akıllı şebekeler üzerine literatür çalışması yapılarak; DSM ve EA eş zamanlı şarj problemi gibi hesapsal yöntemleri etkin biçimde uygulamanın mümkün olabileceği alanlar tespit edilmiş ve bu alanlarda karşılaşılan sorunların çözümüne dönük çalışmalar yapılmıştır.
3. Tez kapsamında önerilen yöntemlerin, benzetim ortamları kurgulanarak literatürde bulunan diğer yöntemlerle karşılaştırması yapılmıştır.

Talep analizi, akıllı karar mekanizmaları geliştirmek için hayati öneme sahip bir konudur. Akıllı şebekelerdeki DSM yapılarının işlevselliği, talep analizine dayanır. DSM yapıları için PFS yaklaşımından faydalanan etmen-tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem, literatürdeki diğer yöntemlerden farklı olarak eksik veri bulunduğu durumlarda da analiz yapılabilir. PFS, bir etmenin karar verme mekanizmasında önemli bir rol oynar ve belirsiz durumların başarılı bir biçimde etmen davranışına yansıtılmasını sağlar. Oyun teorisi yöntemlerinden biri olan Bayes oyunu kullanılarak, elektrik şebekesi gibi çok sayıda oyuncunun ya da tüketicinin bulunduğu bir ortam modellenmiş ve bu ortamda talep analizi yapılarak bir DSM yapısı kurgulanmıştır.

Benzetim sonuçları, bu tezde DSM için önerilen yöntemin akıllı bir şebekedeki günlük tüketimi daha dengeli bir biçimde dağıtabildiğini ve bunu yaparken Avalanche

etkisinden kaçabildiğini göstermiştir. Avalanche etkisi, DSM modellerinde genel olarak gözlemlenen bir sorundur. Eğer bir sistem, müşterileri tüketimi düşük fiyatlı zaman dilimlere kaydırmaya teşvik ederse, sistemde bulunan bütün müşteriler bu davranışı göstermek isteyebilir. Bu durumda, düşük fiyatlamalı zaman dilimlerinde çok büyük değerlerde tepe-yükler oluşur. PFS'nin karar verme mekanizmasında kullanımı, bu sorunun oluşmasını engellemektedir. Sonuçlar, dinamik enerji fiyatlamasının DSM'ye katılımı arttırabileceği yönündeki inancı destekler yönde olmuştur. DSM'ye katılımın artması, tepe-yüklerin azaltılması ve şebeke işletme maliyetlerini düşürülmesi gibi faydalar sağlar ve aynı zamanda düşük karbon salınlı bir ekonomiye geçiş için önemli bir adımdır. DSM sayesinde, Kyoto Protokolünün ve Paris Antlaşmasının hedeflediği emisyon azaltma politikalarının temel taşı olan tüketici enerji verimliliği güçlendirilmiş olur.

Akıllı şebeke çalışmaları için geliştirilen hesapsal yöntemlerin, bilgisayar ortamında test edilebilmesi için gerçeğe yakın bir yapının kurgulanması gerekir. Böyle bir yazılım çözümü geliştirirken, kullanabilecek çeşitli yazılım paradigmaları bulunur. Bunlardan çok-etmenli sistemler, farklı alanlardaki karmaşık dağıtık yapıların geliştirilmesinde daha önce başarıyla kullanılmıştır. Ayrıca, bir şebekenin gerçeğe yakın biçimde modellenmesinde de aynı başarıyı gösterebilir. Çok-etmenli sistemler, akıllı, dağıtık ve otonom olmaları bakımından akıllı şebekelere benzer ve akıllı şebekeler için yeni çözümler geliştirmek için yüksek bir potansiyele sahiptir. Çok-etmenli sistemler kullanılarak kurgulanan bir yapı içerisinde incelenen problemler, gerçek dünyadaki haliyle ele alınabilir ve bilgisayar ortamında da kolaylıkla modellenebilir. Bunun temel nedeni, akıllı şebeke yapısı gibi dağıtık programlamaya yatkın, etkileşimin yoğun olduğu dinamik ortamların, etmen mimarisi kullanımına müsait olmalarıdır. Yapılan çalışmanın, literatürdeki diğer etmen-tabanlı DSM çalışmalarından en büyük farkı kullanılan etmen mimarisidir ve PFS'nin etmenlerin eylem mekanizmalarına dahil edilerek kullanıldığı ilk çalışma olmasıdır.

Akıllı sayaçlar, hem DSM yapılarında hem de diğer akıllı şebeke mekanizmalarında önemli bir role sahiptir. Akıllı şebekeye geçişle beraber artacak olan sayaç okuma verileri ve diğer veriler; kullanılırken, iletilirken ya da saklanırken kişisel bilgilerin gizliliğinin sağlanması gerekir. Akıllı sayaç altyapılarında kullanılmak üzere tasarlanan zaman-serisi veri birleştirme yöntemi ya da benzer yöntemler bu amaca hizmet ederler. Literatürdeki, diğer veri birleştirme yöntemlerinden farklı olarak, bu tez çalışmasında önerilen yöntemde veri birleştirme ve bilgi güvenliğini koruma maliyetleri oldukça düşüktür. Donanım

maliyetlerini azaltmak amacıyla, yöntem içerisinde bir görev zamanlayıcısı yapısı tasarlanmıştır. Bu çalışmadaki bir diğer katkı, arıza durumlarına karşı yöntemin veri kaybını önleyecek biçim korumalı olması ve haberleşmeden kaynaklanan sorunları kolaylıkla tespit edebilmesidir. Son olarak, bu alanda yapılan diğer çalışmaların aksine, verinin yeniden oluşturulması işlemi de kayıpsız bir biçimde gerçekleşir. Güvenlik açısından filtreleme ve gerçek değer saldırılarına karşı başarılı olduğu benzetim çalışmalarında gözlemlenmiştir.

Akıllı sayaçlar gibi EA'lar da, akıllı şebeke alanında çok fazla öneme sahip konulardan birisidir. EA'ların özellikle eş zamanlı şarj edilmelerinin yaratabileceği sorun hakkında, çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu soruna dönük olarak, işletim sistemlerindeki süreç zamanlama ve kaynak kullanım mekanizmalarından esinlenerek piyango tabanlı bir zamanlama yöntemi geliştirilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen yöntemin diğer yöntemlere göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar, henüz teorik aşamadadır. Ancak, kısa ya da orta vadede bu sorunla karşılaşılacaktır ve teorik olarak yapılan bu çalışmaların hızlı bir biçimde pratiğe dönüştürülmesi gerekecektir.

EA'ların kullanımlarının yaygınlaşması, sadece sorunlar yaşanması açısından düşünülmemelidir. Bu arabaların, hem çevresel hem ekonomik açılardan çok sayıda faydası bulunur. Bütün bu faydaların yanında, arabaların sahip oldukları bataryalar araştırmacıların ilgisini çekmiş ve arabadan şebekeye aktarım düşüncesi doğmuştur. Yapılan incelemede, bir şebekede yenilenebilir enerji kaynaklarının katkısı az miktarlardayken, V2G'nin üretim profilini dengeleyebildiği görülmüştür. Yenilenebilir enerji kaynaklarına aşırı bağımlı şebekeler, üretim dalgalanmalarına maruz kalabilirler. V2G, bu sorunun üstesinden gelmek için bir dengeleme mekanizması olarak şebeke içerisinde kullanılabilir. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun kullanıldığı şebekeler için, enerji yönetim stratejileri geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılması gerektiği sonucunu verir. Arabaların bataryalarından faydalanarak enerji depolamak ve bunu şebekeye sunmak, yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunduğu bir şebekeyi daha istikrarlı ve dayanıklı hale getirebilir.

V2G kullanıldığında, güç kapasitesini tahmin etme ve güç kalitesini artırma konuları bir şebeke için önemli hale gelmektedir ve bu yönde de araştırmalar yapılmalıdır. Ayrıca, özellikle kullanıcı motivasyonunun düşük olduğu durumlarda teşvik temelli mekanizmalar kullanılarak V2G katılımı etkin bir şekilde yönetilmelidir. V2G

sistemlerinde araba bataryalarının sıklıkla şarj edilmesi ya da boşaltmasının batarya ömrünü azalttığı bilinmektedir. Ancak, ilave batarya maliyetine rağmen, V2G sistemi ekonomik açıdan analiz edildiğinde fosil yakıt kullanan bir alternatifte karşı daha iyi bir çözüm olduğu görülür.



9. ÖNERİLER

Bu tezde, farklı hesapsal yöntemlerin akıllı şebekeler alanında karşılaşılan sorunlara yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma, akıllı şebekeler için yeni yöntemler geliştirilmesine dönük olarak yapılacak diğer çalışmalara önemli katkılar sağlayacaktır. Akıllı şebeke, sadece yeni bir teknoloji ya da şebeke alanında basit bir ilerleme değildir. Burada yaşanan gelişmelerin ve değişimlerin, sosyal ve ekonomik bir çok alanda önemli etkileri olacaktır. İlerleyen yıllarda, akıllı şebekelerdeki güvenlik, veri analitiği, iletişim mekanizmaları ve gelişmiş sayaç sistemleri başta olmak üzere çok sayıda alanda yeni gelişmelerin ortaya çıkması beklenmektedir.

DSM için PFS kullanan etmen-tabanlı bir yöntem önerilmiş ve benzetimi yapılarak yöntem incelenmiştir. Talep yönetimi alanında yapılacak çalışmalar; talebi azaltan, talebin zamanlamasını değiştiren ya da tepe-yük değerlerini düşürebilen çözümlerle kendilerini sınırlandırmamalıdır. Bu alandaki gelişimler, yük kaydırmanın ötesine geçebilen ve verimliliği arttırılan çözümler üreterek sağlanabilir. Bunu başarmanın yolu, yenilenebilir enerji kaynaklarının akılcı bir biçimde şebekeye dahil edilmesinden geçer. Şebeke yükünün matematiksel ve hesapsal yöntemlerle modellenmesi, akıllı şebeke teknolojilerinin işletilmesinde ve yenilenebilir kaynaklarının şebekeye katılımında gittikçe önem kazanan bir konu haline gelecektir.

DSM ile ilgili gelecekte yapılabilecek bir başka çalışma konusu, talep yönetimine uyum sağlayan akıllı cihazların geliştirilmesidir. Örneğin, akıllı bir şebekede ısıtma ya da soğutma işlemleri için kullanılan cihazlar, dış ortam sıcaklığı ve kullanıcı konforunun yanında talep yönetimini de dikkate alarak akıllı bir karar verebilmelidir. Bu cihazların IOT uyumlu olmaları, akıllı olmaları ve ortam şartlarına göre davranış değiştirebilen bir yapıda olmaları için birçok bilim dalı ortaklaşa kullanılarak AR-GE yapılması gerekir. Beyaz eşya başta olmak üzere geliştirilecek ev aletleri, DSM sistemlerine uyumlu olacak şekilde üretilmeli ve akıllı olmalıdır. Enerji etiketlemesi yapılırken, sadece tüketim değeri ele alınmamalı, cihazların DSM'ye katılabilir olması da bu değerlendirmelerde bir ölçü olmalıdır.

Akıllı şebekeler alanında yapılacak çalışmalar, sadece ev kullanıcılarına dönük olacak biçimde düşünülmemelidir. Endüstriyel tüketicilerin de rekabet gücü açısından, sistemlerini geliştirirken ve planlarken akıllı şebekeyi destekleyen cihazları tercih etmeleri gerekecektir. Bu çalışmaları takip etmeyen, AR-GE yapmayan ve doğal olarak teknolojik

açından geride kalan şirketler, zaman içerisinde ticari yönden rakiplerinin gerisinde kalabilirler.

EA kullanımının yaygınlaşması, anlık tüketim değerlerinde ve bu tüketimi kontrol eden mekanizmalarda büyük değişikliklerin yaşanmasına yol açacaktır. Elektrik enerjisine olan talep çarpıcı bir biçimde artacak ve şebekelerde dalgalanmalar yaşanacaktır. Bu sorunla baş edebilmenin tek yolu akıllı şebekelere geçiştir. Güç kalitesi ve V2G konularında yapılacak olan çalışmalar, bu açıdan çok önem kazanır. Mühendislik çalışmaları haricinde EA'lar, maliyet yapıları ve dikey entegrasyon seviyesine göre sağlayabilecekleri faydalar gibi iktisadi açılardan da incelenmelidir.

Matlab-Simulink gibi yazılımlar, şebekenin şebeke elemanları açısından benzetim çalışmalarında faydalıdır. Fakat, gerçek bir kullanım modellemesi için çok-etmenli programlama kullanılarak yapılan çalışmalara ihtiyaç duyulur. Bu alanda, elektrik şebekeleri için özelleşmiş yazılım araçlarının geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Elektrik şebekeleri gibi çok sayıda bileşen bulunduran yapıların hesapsal açıdan karmaşıklığı yüksektir. Bu yapılar karmaşık olmalarının yanında, zaman içerisinde daha da büyüme ve gelişme eğilimi gösterirler. Bu durum dikkate alındığında, bu alanda geliştirilecek bilgisayar yazılımlarının, bulut bilişim sistemleri ya da paralel hesaplama yapabilen ızgaralar üzerinde çalışabilecek şekilde tasarlanmaları gerekir.

KAYNAKLAR

- [1] **Carvallo, A. and Cooper, J.**, 2011. The Advanced Smart Grid: Edge Power Driving Sustainability, Artech House, Massachusetts.
- [2] **Herold, R. and Hertzog C.**, 2015. Data Privacy for the Smart Grid, CRC Press, Florida.
- [3] **O'Neill, R.**, 2007. Smart grids sound transmission investments [In my View], *IEEE Power and Energy Magazine*, **5**, 104-102.
- [4] **Maharjan, I.K.**, 2010. Demand Side Management: Load Management, Load Profiling, Load Shifting, Residential and Industrial Consumer, Energy Audit, Reliability, Urban, Semi-Urban and Rural Setting, LAP (Lambert Acad. Publ.), Saarbrücken, Germany.
- [5] **Gellings, C.W. and Chamberlin, J.H.**, 1988. Demand-Side Management: Concepts and Methods, Fairmont Press, Liburn, Georgia.
- [6] **Kothari, D.P.**, 2003. Modern Power System Analysis, Tata McGraw-Hill, New Delhi, India.
- [7] **Ramchurn, S.D., Vytelingum, P., Rogers, A., Jennings, N.**, 2011. Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid, *In Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems – Innovative Applications Track (AA-MAS 2011)*, 5-12.
- [8] **Logenthiran, T., Srinivasan, D., Shun T.Z.**, 2011. Multi-agent system for demand side management in smart grid, *In 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 424-429.

- [9] **Zhu, Q., Han, Z., Basar, T.**, 2012. A differential game approach to distributed demand side management in smart grid, *In IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 3345-3350.
- [10] **Miorandi, D. and De Pellegrini, F.**, 2012. Demand-side management in smart grids: An evolutionary games perspective, *In 6th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS)*, 178-187.
- [11] **Mohsenian-Rad, A.H., Wong, V.W.S., Jatskevich, J., Schober, R., Leon-Garcia, A.**, 2010. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **1(3)**, 320-331.
- [12] **Yaagoubi, N. and Mouftah, H.T.**, 2015. User-aware game theoretic approach for demand management, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **6(2)**, 716-725.
- [13] **Baloglu, U.B. and Demir, Y.**, 2017. An agent-based Pythagorean fuzzy approach for demand analysis with incomplete information, *International Journal of Intelligent Systems*, doi:10.1002/int.21908.
- [14] **Baloglu, U.B. and Demir, Y.**, 2015. A bayesian game-theoretic demand response model for the smart grid, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, **4(2)**, 132-138.
- [15] **Alagoz, B.B., Kaygusuz, A., Karabiber, A.**, 2012. A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications, *Energy*, **44(1)**, 167-177.
- [16] **Martirano, L., Manganelli, M., Sbordon, D.**, 2015. Design and classification of smart metering systems for the energy diagnosis of buildings, *In 2015 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 1-7.

- [17] **Zhou, L., Xu, F., Ma, Y.**, 2010. Impact of smart metering on energy efficiency, *In International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, **6**, 3213-3218.
- [18] **Nakutis, Z., Saunoris, M., Jakavicius, D., Gecas, T., Rudaitis, K., Ramanauskas, R., Knyva, M.**, 2015. Analysis of smart power sockets implementation, *Elektronika ir Elektrotechnika*, **21(6)**, 24-28.
- [19] **Mlynek, P., Misurec, J., Fujdiak, R., Kolka, Z., Pospichal, L.**, 2015. Heterogeneous networks for smart metering – power line and radio communication, *Elektronika ir Elektrotechnika*, **21(2)**, 85-92.
- [20] **Karfopoulos, E., Tena, L., Torres, A., Salas, P., Jorda, J.G., Dimeas, A., Hatziaargyriou, N.**, 2015. A Multi-agent system providing demand response services from residential consumers, *Electric Power Systems Research*, **120**, 163-176.
- [21] **Fazal, R., Solanki, J., Solanki, S.K.**, 2012. Demand response using multi-agent system, *North American Power Symposium (NAPS)*, 1-6.
- [22] **Kumar Nunna, H.S.V.S., Doolla, S., Shukla A.**, 2013. Multi-agent application for demand response in microgrids, *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, 7629-7634.
- [23] **Lopes, F., Ilco, C., Sousa, J.**, 2013. Bilateral negotiation in energy markets: Strategies for promoting demand response, *10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1-6.
- [24] **Oh, H. and Thomas, R.J.**, 2008. Demand-side bidding agents: Modeling and simulation, *IEEE Transactions on Power Systems*, **23(3)**, 1050-1056.
- [25] **Al-Agtash, S.**, 2013. Electricity agents in smart grid markets, *Computers in Industry*, **64(3)**, 235-241.

- [26] **Kim, J.H., Lee, J., Joo, S.K.**, 2014. Risk-based allocation of demand response resources using conditional value-at risk (CVaR) assessment, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **9(3)**, 789-795.
- [27] **Hernandez, L., Baladron, L.C., Aguiar, J.M., Carro, B., Sanchez-Esguevillas, A., Lloret, J., Chinarro, D., Gomez-Sanz, J.J., Cook, D.**, 2013. A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants, *IEEE Communications Magazine*, **51(1)**, 106-113.
- [28] **Babar, M., Ahamed T.P., Alammam, E.A.**, 2015. The consumer rationality assumption in incentive based demand response program via reduction bidding, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 10(1), 64-74.
- [29] **Wlodarczyk, P., Sumper, A., Cruz, M.**, 2015. Voltage control of distribution grids with multi-microgrids using reactive power management, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, **15(1)**, 83-88.
- [30] **Lee, J., Kim, H., Park, G.**, 2012. A genetic scheduler for electric vehicle charging, *In Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC '12)*, 1843-1844.
- [31] **Jin, C., Tang, J., Ghosh, P.**, 2013. Optimizing electric vehicle charging: A customer's perspective, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **62(7)**, 2919-2927.
- [32] **Vandael, S., Boucké, N., Holvoet, T., Craemer, K.D., Deconinck, G.**, 2011. Decentralized coordination of plug-in hybrid vehicles for imbalance reduction in a smart grid, *In Proceedings of AAMAS*, 803-810.
- [33] **Hutterer, S., Affenzeller, M., Auinger, F.**, 2012. Evolutionary optimization of multi-agent control strategies for electric vehicle charging, *In Proceedings*

of the 14th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (GECCO '12), 3-10.

- [34] **Momtazpour, M., Butler, P., Hossain, M.S., Bozchalui, M.C., Ramakrishnan, N., Sharma, R.**, 2012. Coordinated clustering algorithms to support charging infrastructure design for electric vehicles, *In Proceedings of the ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing (UrbComp '12)*, 126-133.
- [35] **Zi-fa, L., Wei, Z., Xing, J., Ke, L.**, 2012. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on particle swarm optimization, *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 1-5.
- [36] **Vasirani, M. and Ossowski, S.**, 2012. Lottery-based resource allocation for plug-in electric vehicle charging, *In Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 3 (AAMAS '12), Vol. 3. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 1173-1174.
- [37] **Baloglu, U.B. and Demir, Y.**, 2017. A fuzzy queueing based model for controlling power demand of electric vehicle charging, *SYSTEM 2017 - Symposium for Young Scientists in Technology, Engineering and Mathematics*, Kaunas, Lithuania, April 28, 1853, 53-56.
- [38] **Baloglu, U.B. and Demir, Y.**, 2015. Lottery-based scheduler model for electric vehicle charging in the smart grid, *International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids*, **11(4)**, 283-290.
- [39] **Chen, J., Zhang, Y., Su, W.**, 2015. An anonymous authentication scheme for plug-in electric vehicles joining to charging/discharging station in vehicle-to-Grid (V2G) networks, *China Communications*, **12(3)**, 9-19.

- [40] **Kempton, W. and Tomic, J.**, 2005. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy, *J. Power Sources*, **144**(1), 280-294.
- [41] **EUROSOLAR - The European Association for Renewable Energy**, 2014. Investigation of electric vehicle grid support capability, *8th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2013)*, *Energy Procedia*, **46**, 220-226.
- [42] **Hofmann, M., Schäfer, M., Ackva, A.**, 2014. Bi-directional charging system for electric vehicles: A V2G concept for charging and discharging electric vehicles, *4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 1-5.
- [43] **Shumei, C., Xiaofei, L., Dewen, T., Qianfan, Z., Liwei, S.**, 2011. The construction and simulation of V2G system in micro-grid, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1-4.
- [44] **Hosseini, S.S., Badri, A., Parvania, M.**, 2012. The plug-in electric vehicles for power system applications: The vehicle to grid (V2G) concept, *IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, 1101-1106.
- [45] **Chukwu, U.C. and Mahajan, S.M.**, 2011. V2G electric power capacity estimation and ancillary service market evaluation, *IEEE PES General Meeting*, 1-8.
- [46] **Yan, J., Shamim, T., Chou, S.K., Li, H., Aziz, M., Oda, T., Kashiwagi, T.**, 2015. Clean, efficient and affordable energy for a sustainable future: Extended utilization of electric vehicles and their re-used batteries to support the building energy management system, *The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015)*, *Energy Procedia*, **75**, 1938-1943.

- [47] **Hassan, A.S., Marmaras, C.E., Xydas, E.S., Cipcigan, L.M., Jenkins, N.,** 2013. Integration of wind power using V2G as a flexible storage, *IET Conference on Power in Unity: A Whole System Approach*, 16-17 October, 1-5.
- [48] **Valtere, S., Udrene, L., Bazbauers, G.,** 2014. Role of vehicle-to-grid systems for electric load shifting and integration of intermittent sources in Latvian power system, *International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2014), Energy Procedia*, **72**, 156-162.
- [49] **Kumar, K.N., Sivaneasan, B., Cheah, P.H., So, P.L., Wang, D.Z.W.,** 2014. V2G capacity estimation using dynamic EV scheduling, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **5(2)**, 1051-1060.
- [50] **Jain, P. and Jain, T.,** 2014. Impacts of G2V and V2G power on electricity demand profile, *IEEE International in Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 17-19 December, 1-8.
- [51] **Li, G., Shi, D., Duan, X.,** 2013. Multiobjective distribution network reconfiguration considering the charging load of PHEV, *Elektronika ir Elektrotechnika*, **19(5)**, 21-26.
- [52] **Anglani, N., Fattori, F., Muliere, G.,** 2013. New proposal for the assessment of the impact of EVs, smart charging and V2G on the grid, *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 417-422.
- [53] **De Los Ríos, A., Goentzel, J., Nordstrom, K.E., Siegert, C.W.,** 2012. Economic analysis of vehicle-to-grid (V2G)-enabled fleets participating in the regulation service market, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 1-8.
- [54] **Kempton, W. and Tomić, J.,** 2005. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue, *Journal of Power Sources*, **144(1)**, 268-279.

- [55] **Dehaghani, E.S. and Williamson, S.S.**, 2012. On the inefficiency of vehicle-to-grid (V2G) power flow: Potential barriers and possible research directions, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1-5.
- [56] **Peihong, Y., Wenying, L., Yili, W.**, 2012. A survey on problems in smart grid with large capacity wind farm interconnected, *Energy Procedia*, 17(A), 776-782.
- [57] **Karabiber, A., Keles, C., Kaygusuz, A., Alagöz, B.B.**, 2013. An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids, *Renewable Energy*, **52**, 251-259.
- [58] **Kaygusuz, A., Gül, O., Alagöz, B.B.**, 2012. Yenilenebilir dağıtık üretim koşullarının güç sistemlerinin yük akışına etkilerinin analizi, *EMO Bilimsel Dergi*, **2(4)**, 77-85.
- [59] **Baloglu, U.B. and Demir, Y.**, 2017. Economic analysis of hybrid renewable energy systems with V2G integration considering battery life, *Energy Procedia*, **107**, 242-247.
- [60] **Baloglu, U.B. and Demir, Y.**, 2017. An Identity-Based Encryption scheme with performance optimization for privacy preservation in smart grid communication, *ICDT 2017 : The Twelfth International Conference on Digital Telecommunications*, April 23 - 27, Venice, Italy, 18-21.
- [61] **Hawk, C. and Kaushiva, A.**, 2014. Cybersecurity and the smarter grid, *The Electricity Journal*, **27(8)**, 84-95.
- [62] **Chim, T.W., Yiu, S.M., Hui L.C.K., Li V.O.K.**, 2012. Privacy-preserving advance power reservation, *IEEE Communications Magazine*, **50(8)**, 18-23.

- [63] **Mármol, F.G., Sorge, C., Ugus, O., Pérez, G.M.,** 2012. Do not snoop my habits: Preserving privacy in the smart grid, *IEEE Communications Magazine*, **50(5)**, 166-172.
- [64] **Yang, L., Xue, H., Fengjun L.,** 2014. Privacy-preserving data sharing in smart grid systems, *IEEE International Conference on Smart Grid Systems*, 878-883.
- [65] **Sharma, K. and Saini, L.M.,** 2015. Performance analysis of smart metering for smart grid: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **49**, 720-735.
- [66] **Siano, P.,** 2014. Demand response and smart grids - A survey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **30**, 461-478.
- [67] **Rottondi, C., Verticale, G., Capone, A.,** 2013. Privacy-preserving smart metering with multiple data consumers, *Computer Networks*, **57**, 1699-1713.
- [68] **Benhamouda, F., Joye, M., Libert, B.,** 2016. A new framework for privacy-preserving aggregation of time-series data, *ACM Transactions on Information and System Security*, **18(3)**, 21.
- [69] **Leontiadis, I., Elkhyaoui, K., Molva, R.,** 2014. Private and dynamic time-series data aggregation with trust relaxation, *In Proceedings of Cryptology and Network Security: 13th International Conference (CANS 2014)*, 305-320.
- [70] **Lu, R., Liang, X., Li, X., Lin, X., Shen, X.S.,** 2012. Eppa: An efficient and privacy-preserving aggregation scheme for secure smart grid communication, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, **23(9)**, 1621-1631.
- [71] **Chim, T., Yiu, S., Hui, L.C.K., Li, V.K.,** 2011. Pass: Privacy-preserving authentication scheme for smart grid network, *In IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 196-201.

- [72] **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.
- [73] **Laforet, F., Buchmann, E., Böhm, K.**, 2015. Individual privacy constraints on time-series data, *Information Systems*, **54**, 74-91.
- [74] **Erdogdu, M. A., Fawaz, N., Montanari, A.**, 2015. Privacy-utility trade-off for time-series with application to smart-meter data, *In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Workshop on Computational Sustainability (AAAI 2015 Workshop)*, 32-36.
- [75] **Hong, S.K., Gurjar, K., Kim, H.S., Moon, Y.S.**, 2013. A survey on privacy preserving time-series data mining, *In 3rd International Conference on Intelligent Computational Systems (ICICS'2013)*, 44-48.
- [76] **Bao, H. and Lu, R.**, 2015. A new differentially private data aggregation with fault tolerance for smart grid communications, *IEEE Internet of Things Journal*, **2(3)**, 248-258.
- [77] **Yang, X., Ren, X., Lin, J., Yu, W.**, 2016. On binary decomposition based privacy-preserving aggregation schemes in real-time monitoring systems, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, **27(10)**, 2967-2983.
- [78] **Huang, Z., Wenliang, D., Chen, B.**, 2005. Deriving private information from randomized data, *In Proceedings of International Conference on Management of Data (ACM SIGMOD)*, 37-48.
- [79] **Alharbi, K., Lin, X., Shao, J.**, 2014. A framework for privacy-preserving data sharing in the smart grid, *IEEE/CIC ICC 2014 Symposium on Privacy and Security in Communications*, 214-219.

- [80] **Gentry, C.**, 2009. Fully homomorphic encryption using ideal lattices, *STOC'09 ACM*, 169-178.
- [81] **Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., Timbus, A.V.**, 2006. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **53(5)**, 1398-1409.
- [82] **Overbye, T.J.**, 2009. Transmission system visualization for the smart grid, *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09, IEEE/PES*, 15-18 March, 1-2.
- [83] **Marken, P.E., Marczewski, J.J., D'Aquila, R., Hassink, P., Roedel, J.H., Bodo, R.L.**, 2009. VFT - a smart transmission technology that is compatible with the existing and future grid, *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09. IEEE/PES*, 15-18 March, 1-7.
- [84] **Ting, Y., Zhidong, Z., Jiaowen, W., Ang, L.**, 2010. Research on transmission data system of smart grid based on IPv6 diffServ model, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific*, 28-31 March, 1-4.
- [85] **Metke, A.R., Ekl, R.L.**, 2010. Security technology for smart grid networks, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **1(1)**, 99-107.
- [86] **IEA**, 2011. Technology roadmap smart grids, *International Energy Agency, OECD/IEA*.
- [87] **Fadaeenejad, M., Saberian, A.M., Fadaee, M., Radzi, M.A.M.**, 2014. The present and future of smart power grid in developing countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**, 828-834.
- [88] **Jiang, Z., Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z., Zhang, P.**, 2009. A vision of smart transmission grids, *Power & Energy Society General Meeting, PES '09 IEEE*, 26-30 July, 1-10.

- [89] **European Commission**, 2005. Towards smart power networks, *European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit*, Brussels.
- [90] **European Commission**, 2006. European SmartGrids technology platform, *European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit*, Brussels.
- [91] **He, H.**, 2010. Toward a smart grid: Integration of computational intelligence into power grid, *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 1-6.
- [92] **U.S. Department of Energy**, 2003. Grid 2030: A national vision for electricity's second 100 years, *Department of Energy Technical Report*.
- [93] **Hadjsaid, N. and Sabonnadiere, J.C.**, 2012. Smart Grids, Wiley-ISTE, New Jersey.
- [94] **Borlase, S.**, 2013. Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions, CRC Press, Pacific Northwest.
- [95] **Momoh, J.**, 2012. Smart Grid: Fundametantals of Design and Analysis, Wiley-IEEE Press, New Jersey.
- [96] **Farhangi, H.**, 2010. The path of the smart grid, *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18-28.
- [97] **Ali, A.B.M.S.**, 2013. Smart Grids Opportunities, Developments, and Trends, Springer-Verlag, London.
- [98] **Cunjiang Y., Huaxun Z., Lei Z.**, 2012. Architecture design for smart grid, *Energy Procedia*, 17(B), 1524-1528.

- [99] **Ipakchi, A. and Albuyeh, F.**, 2009. Grid of the future, *IEEE Power and Energy Magazine*, **7(2)**, 52-62.
- [100] **Fang X., Misra S., Xue G., Yang D.**, 2012. Smart grid - The new and improved power grid: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **14(4)**, 944-980.
- [101] **NIST**, 2014. NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, *Release 3.0*.
- [102] **GDSG0057VPT**, 2012. GlobalData: Smart grid technologies create foundation for smart city projects.
- [103] **Jin, Y.G. and Yoon Y.T.**, 2015. Methods for adding demand response capability to a thermostatically controlled load with an existing on-off controller, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **10(3)**, 755-765.
- [104] **Alvares, O., Ghanbari, A., Markendahl, J.**, 2014. A comparative study of smart grid development in developed and developing countries, *7th Annual CMI Conference: Mobile Communications in Developing Countries*, Aalborg University, Copenhagen, 17 - 18 November.
- [105] **Yigit, M.**, 2016. Natural Hub: The main priority is the promotion of East-West and North-South energy corridors through the delivery of Caspian Middle Eastern and Central Asian energy resources to European and World markets via Turkey, *The Turkish Perspective*, **40**, 28-39.
- [106] **Kaygusuz, A.**, 2016. Yeni Türkiye'nin enerjide çözüm yolu: Akıllı şebeke, *Yeni Türkiye Dergisi Bilim ve Teknoloji Özel Sayısı – II*, **89(2)**, 622-630.
- [107] **Colak, I., Sagiroglu, S., Fulli, G., Yesilbudak, M., Covrig, C.F.**, 2016. A survey on the critical issues in smart grid technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**, 396-405.

- [108] **Colak, I., Fulli, G., Sagirolu, S., Yesilbudak, M., Covrig, C.F.**, 2015. Smart grid projects in Europe: Current status, maturity and future scenarios, *Applied Energy*, **152**, 58-70.
- [109] **Wells, Q.**, 2013. Smart Grid Home, Cengage Learning, Delmar, New York.
- [110] <http://www.bnef.com>, Bloomberg New Energy Finance. Haziran 2016.
- [111] **Gao, J., Xiao, Y., Liu, J., Liang, W., Chen, C.L.P.**, 2012. A survey of communication/networking in Smart Grids, *Future Generation Computer Systems*, 28(2), 391-404.
- [112] **Wheeler, A.**, 2007. Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee, *IEEE Communications Magazine*, 45(4), 70-77.
- [113] **Haidar, A.M.A., Muttaqi, K.M., Sutanto, D.**, 2014. Technical challenges for electric power industries due to grid-integrated electric vehicles in low voltage distributions: A review, *Energy Conversion and Management*, 86, 689-700.
- [114] **Bayındır, K.Ç., Gözükcük, M.A., Teke, A.**, 2011. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units, *Energy Conversion Management*, **52**, 1305–1313.
- [115] **Chan, C.C.**, 2007. The state of the art of electric, hybrid and fuel cell vehicles, *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718.
- [116] **Offer, G.J., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R., Brandon, N.P.**, 2010. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system, *Energy Policy*, **38**, 24–29.

- [117] **Wu, D. and Williamson, S.S.**, 2007. Status review of power control strategies for fuel cell based hybrid electric vehicles, *In Proceedings of IEEE Canada Electrical Power Conference*, 218-223.
- [118] **Morais, H., Sousa, T., Vale, Z., Faria, P.**, 2014. Evaluation of the electric vehicle impact in the power demand curve in a smart grid environment, *Energy Conversion and Management*, **82**, 268-282.
- [119] http://www.sae.org/smartgrid/charging_speeds.pdf, SAE Charging Configurations and Ratings Terminology, Haziran 2016.
- [120] **Kueck, J.D., Kirby, B.J., Overholt, P.N., Markel, L.C.**, 2004. Measurement practices for reliability and power quality: A toolkit of reliability measurement practices, *US Department of Energy*.
- [121] **NETL**, 2007. A systems view of the modern grid, National Energy Technology Laboratory, *US Department of Energy*.
- [122] **Schrijver, A.**, 1998. Smart Grid Home, Cengage Learning, Theory of Linear and Integer Programming, John Wiley & Sons.
- [123] **Bazaraa, M.S. and Shetty, C.M.**, 1979. Nonlinear Programming Theory and Algorithms, John Wiley & Sons.
- [124] **Wolsey, L.A.**, 1998. Integer Programming, Wiley.
- [125] **Nocedal, J. and Wright, S.**, 1999. Numerical Optimization, New York, NY, Springer.
- [126] **Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., Stein, C.**, 2001. Introduction to Algorithms (2nd ed.), MIT Press & McGraw-Hill.

- [127] **Goldberg, D.**, 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Reading, MA, Addison-Wesley Professional.
- [128] **Pearl, J.**, 1984. Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving. Reading, MA, Addison-Wesley.
- [129] **Kennedy, J. and Eberhart, R.**, 1995. Particle swarm optimization, *In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV*, 1942-1948.
- [130] **Coloni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V.**, 1991. Distributed optimization by ant colonies, *Actes de la Première Conférence Européenne sur la vie Artificielle*, Paris, France, Elsevier Publishing, 134-142.
- [131] **Glover, F.**, 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers and Operations Research*, **13(5)**, 533-549.
- [132] **Khachatryan, A., Semenovskaya, S., Vainshtein, B.**, 1979. Statistical-Thermodynamic approach to determination of structure amplitude phases, *Sov. Phys. Crystallography*, **24(5)**, 519-524.
- [133] **Zadeh, L.A.**, 1965. Fuzzy sets, *Information and Control*, **8(3)**, 338-353.
- [134] **McCulloch, W. and Pitts, W.**, 1943. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, **5(4)**, 115-133.
- [135] **Witten, I.H., Frank, E., Hall, M.A.**, 2011. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (3 ed.), Elsevier.
- [136] **Ibars, C., Navarro, M., Giupponi, L.**, 2010. Distributed demand management in smart grid with a congestion game, *In Proceedings of IEEE First Int'l Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2010)*, 495-500.

- [137] **Vrba, P., Marik, V., Siano, P., Leitao, P., Zhabelova, G., Vyatkin, V., Strasser, T.**, 2014. A review of agent and service-oriented concepts applied to intelligent energy systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **10(3)**, 1890–1903.
- [138] **Yager, R.R.**, 2014. Pythagorean membership grades in multi-criteria decision making, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **22(4)**, 958-965.
- [139] **Yager, R.R.**, 2013. Pythagorean fuzzy subsets, *In IFSA/NAFIPS Joint World Congress*, 57–61.
- [140] **Garg, H.**, 2016. A new generalized Pythagorean fuzzy information aggregation using Einstein operations and its application to decision making, *Int. J. Intell. Syst.*, **31**, 886–920.
- [141] **Gou, X., Xu, Z., Ren, P.**, 2016. The properties of continuous Pythagorean fuzzy information, *Int. J. Intell. Syst.*, **31**, 401–424.
- [142] **Zhang, X.**, 2016. A novel approach based on similarity measure for Pythagorean fuzzy multiple criteria group decision making, *Int. J. Intell. Syst.*, **31**, 593–611.
- [143] **Zhang, X.**, 2016. Multicriteria Pythagorean fuzzy decision analysis: A hierarchical QUALIFLEX approach with the closeness index-based ranking methods, *Information Sciences*, **330**, 104-124.
- [144] **Barnett, W.A. and Serletis, A.**, 2009. Chapter 3 the differential approach to demand analysis and the Rotterdam Model, *In Daniel J. Slottje (ed.) Quantifying Consumer Preferences (Contributions to Economic Analysis, Volume 288)*, Emerald Group Publishing Limited, 61–81.
- [145] **Babaioff, M., Kleinberg, R., Papadimitriou, C.H.**, 2009. Congestion games with malicious players, *Games and Economic Behavior*, **67(1)**, 22-35.

- [146] **Liang, X. and Xiao, Y.**, 2013. Game theory for network security, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), 472-486.
- [147] **Jebalia, M., Letaifa, A.B., Hamdi, M., Tabbane, S.**, 2013. A comparative study on game theoretic approaches for resource allocation in cloud computing architectures, *2013 Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*, 336-341.
- [148] **Saad, W., Han, Z., Poor, H.V., Basar, T.**, 2012. Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications, *IEEE Signal Processing Magazine*, **29(5)**, 86-105.
- [149] **Fadlullah, Z.M., Nozaki, Y., Takeuchi, A., Kato, N.**, 2011. A survey of game theoretic approaches in smart grid, *In International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 1-4.
- [150] **Christodoulou, G. and Gairing, M.**, 2015. Price of stability in polynomial congestion games, *ACM Transactions on Economics and Computation*, 4(2), 1-17.
- [151] **Rosenthal, R.W.**, 1973. A class of games possessing pure-strategy Nash equilibria, *International Journal of Game Theory*, 2(1), 65-67.
- [152] **Samadi, P., Mohsenian-Rad, A.H., Schober, R., Wong, V.W.S., Jatskevich, J.**, 2010. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid, *In First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 415-420.
- [153] **Solan, E. and Vieille, N.**, 2001. Quitting games, *Math Oper Res*, **26(2)**, 265-285.

- [154] **Khan, M.A. and Sun, Y.**, 2002. Chapter 46 Non-cooperative games with many players, *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, Elsevier, **3**, 1761-1808.
- [155] **Khan, M.A and Sun Y.**, 1999. Non-cooperative games on hyperfinite Loeb spaces, *J Math Econ*, **31(4)**, 455–492.
- [156] **Yu, H. and Zhang, Z.**, 2007. Pure strategy equilibria in games with countable actions, *J Math Econ*, **43(2)**, 192–200.
- [157] **Fu, H., Xu, Y., Zhang, L.**, 2016. Pure-strategy Nash equilibria in large games: characterization and existence, *Int. J. of Game Theory*, **45(3)**, 685-697.
- [158] **Maor, C. and Solan, E.**, 2015. Cooperation under incomplete information on the discount factors, *Int. J. of Game Theory*, **44(2)**, 321-346.
- [159] **Bag, P.K. and Santanu, R.**, 2011. On sequential and simultaneous contributions under incomplete information, *Int. J. of Game Theory*, **40(1)**, 119-145.
- [160] **Wellman, M.P.**, 2006. Methods for empirical game-theoretic analysis, *In Proceedings of the 21st National Conference on Artificial Intelligence - Volume 2 (AAAI'06)*, Boston: AAAI Press, 1552-1555.
- [161] **Rasmussen, J.**, 1983. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, **13(3)**, 257-266.
- [162] <http://jade.tilab.com>, Jade Site Java Agent Development Framework. Haziran 2016.
- [163] **Jia, W., Zhu, H., Cao, Z., Dong, X., Xiao, C.**, 2014. Human-factor-aware privacy-preserving aggregation in smart grid, *IEEE Systems Journal*, **8(2)**, 598-607.

- [164] **Papadimitriou, S., Feifei, L., Kollios, G., Yu, P.S.,** 2007. Time series compressibility and privacy, *VLDB '07 Proceedings of the 33rd international conference on Very large data bases*, 459-470.
- [165] **Shamir, A.,** 1979. How to share a secret, *Communications of the ACM*, **22**, 612-613.
- [166] **Nitaj, A.,** 2014. Cryptanalysis of NTRU with two public keys, *International Journal of Network Security*, **16(2)**, 112–117.
- [167] **Abdallah, A. and Shen X.,** 2015. Lightweight security and privacy preserving scheme for smart grid customer-side networks, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **99**, 1-1.
- [168] **Paillier, P.,** 1999. Public-Key cryptosystems based on composite degree residuosity classes, *In Proceedings of Eurocrypt*, 223-238.
- [169] **Li, H., Lin, X., Yang, H., Liang, X., Lu, R., Shen, X.,** 2014. EPPDR: An efficient privacy-preserving demand response scheme with adaptive key evolution in smart grid, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, **25(8)**, 2053-2064.
- [170] **Dwork, C.,** 2006. Differential privacy, *Automata, languages and programming*, **4052**, 1-12.
- [171] **Winters, P.R.,** 1960. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages, *Management Science*, **6(3)**, 324-342.
- [172] **Cleveland, R.B., Cleveland W.S., McRae, J.E., Tepenning, I.,** 1990. STL: A seasonal-trend decomposition based on Loess, *Journal of Statistics*, **6(1)**, 3-33.
- [173] **Stein, S., Gerding, E., Robu, V., Jennings, N.R.,** 2012. A model-based online mechanism with pre-commitment and its application to electric vehicle

charging, *In Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS '12), Vol. 2. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 669-676.

- [174] **Ardakanian, O., Rosenberg, C., Keshav, S.**, 2012. Real-time distributed congestion control for electrical vehicle charging, *SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, **40(3)**, 38-42.
- [175] **Waldspurger, C. and Weihl, W.H.**, 1994. Lottery scheduling: Flexible proportional-share resource management, *In Proceedings of the 1st USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation*, 1-11.
- [176] **Jikeng, L., Xudong, W., Ling, Q.**, 2011. Reliability evaluation for the distribution system with distributed generation, *Euro. Trans. Electr. Power*, **21**, 895–909.
- [177] **Karki, R., Po, H., Billinton, R.**, 2006. A simplified wind power generation model for reliability evaluation, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **21(2)**, 533-540.
- [178] **Han, S., Han, S., Sezaki, K.**, 2011. Estimation of achievable power capacity from plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation: Case studies for market participation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **2(4)**, 632-641.
- [179] **Lunz, B., Yan, Z., Gerschler, J.B., Sauer, D.U.**, 2012. Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs, *Energy Policy*, **46(C)**, 511-519.

ÖZGEÇMİŞ
Ulaş Baran BALOĞLU

Munzur Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
62000, Tunceli

E-posta: ulasbaloglu@gmail.com

Doğum Yeri ve Tarihi: Pertek 1979

Lisans: Bilkent Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü (2002)

Yüksek Lisans: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği A.B.D.
(2006)

Yabancı Diller: İngilizce, İtalyanca, Almanca

Mesleki Deneyim: 2004 yılında Aselsan ve Biometri-CS şirketlerinde bilgisayar mühendisi olarak askeri projelerde görev aldı. 2005-2009 tarihleri arasında Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde Kuramsal Temeller anabilim dalında araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2009-2011 tarihleri arasında İnönü Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalıştı. Bir yıl kadar Fırat Kalkınma Ajansı'na bilgi sistemleri alanında danışmanlık yaptı. Haziran 2011 tarihinden itibaren Munzur Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek_A Bir günlük akıllı sayaç okuma verisi.

Satır No	Okuma Zamanı	Sayaç Ölçümü	Satır No	Okuma Zamanı	Sayaç Ölçümü	Satır No	Okuma Zamanı	Sayaç Ölçümü
1	00:00	1300	33	08:00	602	65	16:00	1312
2	00:15	1250	34	08:15	605	66	16:15	1322
3	00:30	1230	35	08:30	635	67	16:30	1344
4	00:45	1215	36	08:45	648	68	16:45	1350
5	01:00	1210	37	09:00	684	69	17:00	1365
6	01:15	1200	38	09:15	703	70	17:15	1370
7	01:30	1170	39	09:30	732	71	17:30	1386
8	00:45	1130	40	09:45	766	72	17:45	1375
9	02:00	1125	41	10:00	801	73	18:00	1386
10	02:15	1120	42	10:15	833	74	18:15	1398
11	02:30	1080	43	10:30	842	75	18:30	1402
12	02:45	1075	44	10:45	868	76	18:45	1408
13	03:00	1042	45	11:00	904	77	19:00	1422
14	03:15	1005	46	11:15	914	78	19:15	1425
15	03:30	965	47	11:30	965	79	19:30	1432
16	03:45	925	48	11:45	992	80	19:45	1431
17	04:00	910	49	12:00	1012	81	20:00	1442
18	04:15	880	50	12:15	1029	82	20:15	1448
19	04:30	840	51	12:30	1065	83	20:30	1450
20	04:45	820	52	12:45	1066	84	20:45	1464
21	05:00	785	53	13:00	1098	85	21:00	1475
22	05:15	770	54	13:15	1122	86	21:15	1478
23	05:30	748	55	13:30	1150	87	21:30	1480
24	05:45	724	56	13:45	1180	88	21:45	1465
25	06:00	702	57	14:00	1202	89	22:00	1470
26	06:15	684	58	14:15	1212	90	22:15	1414
27	06:30	666	59	14:30	1224	91	22:30	1380
28	06:45	645	60	14:45	1242	92	22:45	1321
29	07:00	635	61	15:00	1250	93	23:00	1333
30	07:15	619	62	15:15	1265	94	23:15	1340
31	07:30	616	63	15:30	1280	95	23:30	1380
32	07:45	604	64	15:45	1305	96	23:45	1400

Ek_B Enerji kaynakları üretim profillerinde kullanılan veriler.

Satır No	Zaman Dilimi	Rüzgar (kW)	PV (kW)	Genel (kW)	Satır No	Zaman Dilimi	Rüzgar (kW)	PV (kW)	Genel (kW)
1	00:00	3010	0	8010	25	12:00	1475	1900	8375
2	00:30	3000	0	8000	26	12:30	1490	1750	8240
3	01:00	2980	0	7980	27	13:00	1140	1600	7740
4	01:30	3000	0	8000	28	13:30	1095	1500	7595
5	02:00	2720	0	7720	29	14:00	1380	1400	7780
6	02:30	2500	0	7500	30	14:30	1670	1200	7870
7	03:00	2550	0	7550	31	15:00	2020	1100	8120
8	03:30	2300	0	7300	32	15:30	2500	850	8350
9	04:00	1880	0	6880	33	16:00	2475	550	8025
10	04:30	1890	0	6890	34	16:30	2670	400	8070
11	05:00	2000	0	7000	35	17:00	2650	100	7750
12	05:30	1850	0	6850	36	17:30	3040	50	8090
13	06:00	2010	50	7060	37	18:00	3200	0	8200
14	06:30	2180	100	7280	38	18:30	2740	0	7740
15	07:00	1880	400	7280	39	19:00	2315	0	7315
16	07:30	1540	550	7090	40	19:30	2405	0	7405
17	08:00	1480	850	7330	41	20:00	2500	0	7500
18	08:30	1270	1100	7370	42	20:30	2470	0	7470
19	09:00	1250	1200	7450	43	21:00	2310	0	7310
20	09:30	1270	1400	7670	44	21:30	2540	0	7540
21	10:00	1505	1500	8005	45	22:00	2680	0	7680
22	10:30	1615	1600	8215	46	22:30	2320	0	7320
23	11:00	1995	1750	8745	47	23:00	1840	0	6840
24	11:30	1885	1900	8785	48	23:30	1750	0	6750