

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEĞİŞKEN ÜRETİM VE DEĞİŞKEN TALEP
KOŞULLARINDA AKILLI ŞEBEKELERDE ENERJİ
DENGELEME**

BARIŞ BAYKANT ALAGÖZ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2015

Tezin Başlığı : Değişken Üretim ve Değişken Talep Koşullarında Akıllı Şebekelerde Enerji Dengeleme

Tezi Hazırlayan : Barış Baykant ALAGÖZ

Sınav Tarihi : 27.01.2015

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. M. Salih MAMIŐ

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Hafız ALİSOY

Namık Kemal Üniversitesi

Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Nusret TAN

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Alaattin ESEN

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Değişken Üretim ve Değişken Talep Koşullarında Akıllı Şebekelerde Enerji Dengeleme” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Barış Baykant ALAGÖZ

ÖZET

Doktora Tezi

DEĞİŞKEN ÜRETİM VE DEĞİŞKEN TALEP KOŞULLARINDA AKILLI ŞEBEKELERDE ENERJİ DENGELEME

Bariş Baykant Alagöz

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

130 + xiii sayfa

2015

Danışman: Doç. Dr. Asım Kaygusuz

Teknolojik ve sosyal gelişimle birlikte bireyin gündelik yaşamında enerjiye olan bağımlılığı artmıştır. Verimsiz enerji tüketiminin çevresel etkilerinin görülmeye başlanmış olması ve fosil yakıta dayalı enerji rezervlerinin azalması yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık enerji üretimini zorunlu hale getirmiştir. Geleneksel enerji sisteminin bu ihtiyaçlara cevap vermekte yetersiz kaldığı görülmüş ve gelişen teknolojik imkânların kullanılması ile daha verimli, daha güvenli, daha yönetilebilir bir enerji şebekesinin kurulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda yapılan disiplinler arası çalışmalar “Akıllı Şebekeler” başlığı altında toplanmaktadır. Pasif tüketicilerin, enerji üretimi ve paylaşımı yapabilen aktif kullanıcılara dönüşmesi hedeflenmektedir. Akıllı şebeke paradigmasının, enerji sistemlerinin dijital çağını başlatması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında, akıllı şebeke uygulamalarının en temel problemlerinden biri olan belirsiz üretim ve tüketim koşullarında enerji dengeleme problemine çözüm aranmıştır. Bu amaçla, hiyerarşik ağ yapısına sahip akıllı şebeke mimarisinin teorik analizleri yapılmış, yüksek üretim ve tüketim belirsizliği durumunda ağ mimarisine sahip şebekenin avantajları değerlendirilmiştir. Buna müteakip, ağ yapısına sahip akıllı şebeke mimarisinde, dinamik fiyatlandırma ile kapalı çevrim üretim kontrolünün enerji dengelemesi sağlanabileceği gösterilmiştir. Kapalı çevrim akıllı şebeke enerji marketi yönetimi için simülasyon ortamı geliştirilmiş, dinamik üretim ve talep modelleri önerilmiş ve enerji dengeleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması, hiyerarşik ağ mimarisine sahip enerji şebekesinin değişken üretim ve tüketim koşulları için yönetim kolaylığı sağladığını ve bu koşullarda uygulanabilecek kapalı çevrim dinamik enerji fiyatlandırmasının enerji dengeleme problemine çözüm olabileceğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Akıllı şebekeler, ağ topolojisi, enerji dengeleme, kapalı çevrim enerji market yönetimi

ABSTRACT

Ph.D.Thesis

ENERGY BALANCING IN SMART GRIDS UNDER VARYING GENERATION AND DEMAND CONDITIONS

Bariş Baykant Alagöz

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric-Electronics Engineering

130 + xiii pages

2015

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Asım Kaygusuz

Due to technological and social developments, energy dependence of people increased in daily life. Observing negative effects of inefficient energy consumption on environment and running out of fossil based energy resources made distributed energy generation based on renewable sources mandatory. It was understood that conventional energy infrastructure cannot meet these requirements and therefore more efficient, more reliable and more manageable energy grid is proposed to build by using recent technology developments. Recent interdisciplinary works on this issue are collected within the scope of “Smart Grid”. Static consumers are aimed to turn into active users, who generate and share their energies. Smart grid paradigm is expected to initiate digital era of energy systems.

In this thesis, a solution for the most fundamental problem of smart grid applications, which is the problem of energy balancing under uncertain generation and demand conditions, was investigated. For this propose, we present theoretical analyses on smart grid architectures with hierarchical tree topology and discuss its advantages for the case of generation and demand uncertainties. Subsequently, we demonstrate that energy balance in smart grids with hierarchical tree architecture can be maintained by using closed loop generation control employing dynamic energy pricing. We developed simulation environment for smart grid closed loop energy market management, proposed dynamic generation and demand models and carried out energy balancing simulations.

This thesis demonstrates that energy grids with hierarchical tree architecture facilitate management of energy balance under variable generation and demand conditions, and the closed loop dynamic pricing can be a solution for energy balancing problems.

KEYWORDS: Smart grids, tree topology, energy balancing, closed loop energy market management

TEŐEKKÖR

Bu alıőmamda desteğini esirgemeyen danıőmanım Do. Dr. Asım KAYGUSUZ'a, güncel bir konu olan Akıllı Şebekeler konusunda yoğun bir alıőma temposu iine girmeme vesile olan Akıllı Şebekeler alıőma grubundaki arkadaőlara, Türkiye enerji sektr konusundaki faydalı sohbetlerinden dolayı Murat AKÇİN'e, PowerWorld simülatörü kullanımı konusunda desteği için Burhan BARAN'a, ihtiyaç duyduğum yayınlara ulaőmamda desteklerini esirgemeyen Arő. Gör. Cemal KELEŞ ve Arő. Gör. Dr. Serkan ALAGÖZ'e teőekkr ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1. Akıllı Şebeke Çalışmalarına Genel Bir Bakış	5
2.2. Akıllı Şebekelerde Enerji Denge Durumu Tespiti	15
2.3. Kapalı Çevrim PID Kontrol Sistemleri	18
2.4. Ağaç Topolojisi	20
2.5. Zamanla Değişen Elektrik Fiyatlandırması	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM	27
3.1. Üretken-Tüketicilerin Bulunduğu Hiyerarşik Ağaç Mimarisine Sahip Akıllı Şebekelerin Analizi	27
3.1.1. Üretken Tüketici Modeli	27
3.1.2. Hiyerarşik Ağaç Mimarisine Sahip Şebekelerin Özellikleri	30
3.1.3. Enerji Dengeleme Analizi İçin Temel Tanımlar	33
3.1.4. Konu İle İlgili Analizler ve Teoremler	37
3.1.5. Simülasyon Sonuçları	48
3.2. Kapalı Çevrim Kesir Dereceli PI Kontrol ile Enerji Dengeleme Uygulaması	60
3.2.1. Akıllı Şebekelerde Arz-talep Fiyat İlişkisine Dayalı Enerji Dengeleme	60
3.2.2. Kapalı Çevrim Dinamik Enerji Fiyatlandırma ile Üretim Kontrolü Simülasyonu	65
3.2.3. Düğüm Noktasında Talep ve Üretim Çevrimli Dinamik Fiyat Kontrolü İle Enerji Dengeleme	81
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	94
4.1. Hiyerarşik Ağaç Yapısı Mimarisine Sahip Akıllı Şebekeler	94

4.2.	Düğüm Noktalarında Enerji Dengelemesinin Kapalı Çevrim Dinamik Fiyat Regülasyonu ile Sağlanması.....	103
4.3.	Hiyerarşik Ağaç Mimarisine Sahip Akıllı Şebekede Enerji İletimi ve Dinamik Fiyat Stratejileri.....	106
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ.....	110
5.1.	Gelecek Çalışmalara Dönük Öneriler.....	111
6.	KAYNAKLAR.....	115
	EK 1.....	122
	EK 2.....	123
	EK 3.....	125
	EK 4.....	127
	ÖZGEÇMİŞ.....	128

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Günümüz akıllı şebeke uygulamaları dört teknoloji katmanı üstünde inşa olmaktadır [2,30,39]. Bu teknoloji katmanlarının sağlayacağı akıllı şebeke uygulamaları ve başlıca hedefleri görülmektedir	6
Şekil 2.2	NIST tarafından önerilen akıllı şebeke kavramsal modeli [20,39]	9
Şekil 2.3	Jeneratörle beslenen bir AC şebekede aktif güç-frekans karakteristiği	17
Şekil 2.4	Birim negatif geri beslemeli kapalı çevrim PID kontrol sistemi	18
Şekil 2.5	(a) Ağaç topolojisi, noktadan noktaya tek bir iletim yolu ve düğümler arasında aile ilişkisi tanımlar. (b) Burada, ağaç topolojisinin ölçeklenebilirliği ve gelişebilirliği örneklenmiştir. Dal kopması ile iki ayrı ağaç yapısının oluşması ve D düğümüne yeni düğümlerin {E,F,G} eklenmesi ile ağaç yapının gelişimi görülmektedir	22
Şekil 2.6	Talep taraflı yük yönetim uygulamalarının toplam güç profiline etkileri [18]	25
Şekil 2.7	İyon-iyon bileşmesi ile negatif ve pozitif iyonların yok olması	13
Şekil 3.1	(a) Doğada ağaç mimarisine benzer dağıtım ağına sahip canlı, (b) Teknolojide ağaç topolojisine sahip iletişim ağı ...	28
Şekil 3.2	(a) Üretken tüketicilerin fonksiyonel modeli (b) Üretken tüketicilerin sadeleştirilmiş eşdeğer devre modeli (c) Üretken tüketicilerin sembolik gösterimi	29
Şekil 3.3	Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip üretken tüketicilerden oluşan bir şebekenin şematik gösterimi	31
Şekil 3.4	Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip şebeke parçasının yapısal gösterimi	32
Şekil 3.5	Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip enerji dağıtım sistemi	34
Şekil 3.6	Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip şebekenin coğrafi alana dağılımının şematik gösterimi	35
Şekil 3.7	İki düğümlü sistemde enerji dengeleme	38
Şekil 3.8	Başlangıçta ideal denge durumunda bulunan ağaç mimarisine sahip bir dağıtım şebekesinde birinci katmanın birinci düğümünde talep yönünde bir enerji dengesizliğinin oluşması durumunda, bu talebin birinci katman yedinci düğüme bağlı bir kaynak tarafından üçüncü katmandaki bir düğüm noktası üstünden dengelenmesini gösteren enerji akış şeması	42
Şekil 3.9	Denge katmanına bağlı olarak toplam kayıp oranları	44
Şekil 3.10	(a) Şebekenin yeterlilik oranları, (b) Şebekenin enerji güvenilirliği, (c) Enerji güvenilirlik indeksi (GE: Güvenilirlik eşiği ve IED: İdeal enerji dengesi)	50
Şekil 3.11	(a) Şebekenin yeterlilik oranları, (b) Şebekenin enerji güvenilirliği, (c) Enerji güvenilirlik indeksi (GE: Güvenilirlik eşiği ve IED: İdeal enerji dengesi)	52
Şekil 3.12	Rastgele üretken tüketici kullanıcıların 24 saatlik üretim ve	53

	tüketim profilleri (kWh)	
Şekil 3.13	Birinci katman yeterlilik oranı profilleri	54
Şekil 3.14	İkinci katman yeterlilik oranı profilleri	54
Şekil 3.15	Üçüncü katman (kök düğümü) ortalama yeterlilik oranı ve karesel enerji yeterlilik hatası profili	55
Şekil 3.16	Rastgele üretken tüketici kullanıcıların 24 saatlik üretim ve tüketim profilleri (kWh)	56
Şekil 3.17	Birinci katman yeterlilik oranları profilleri	57
Şekil 3.18	İkinci katman yeterlilik oranları profilleri	57
Şekil 3.19	Üçüncü katman (kök düğümü) ortalama yeterlilik oranı ve karesel enerji yeterlilik hatası profilleri	58
Şekil 3.20	Düşük üretim koşullarında 1000 kW gücünde dengeleyici güç istasyonu yardımı ile enerji dengelemesi	58
Şekil 3.21	EÜ modu olasılığına bağlı olarak farklı katmanlardaki birinci düğümlerde lineer enerji hatası ve ihtiyaç duyulabilecek şebeke dengeleyici güç istasyonlarının kapasitesinin $\Delta E_1'$ 'a bağlı belirlenmesi	60
Şekil 3.22	Enerji arz-talep eğrisi ve kapalı çevrim kontrolör hatası	62
Şekil 3.23	Dinamik enerji fiyatlaması ile kapalı çevrim üretim kontrolü	63
Şekil 3.24	(a) Kapalı çevrim dinamik fiyat kontrolü için akıllı şebeke teknoloji altyapısı. (b) Enerji denge hatası kestirimi süreci ve L_e gecikmesi (c) Fiyat yayın süreci ve L_p gecikmesi	64
Şekil 3.25	Dinamik enerji fiyatlaması ile kapalı çevrim esnek talep kontrolü	65
Şekil 3.26	Birinci simülasyon senaryosu için tek tip enerji kaynaklı kapalı çevrim üretim kontrol sistemi modeli	69
Şekil 3.27	Birim basamak gerçek talep artışı karşısında kapalı çevrim PI kontrol sisteminin cevapları	71
Şekil 3.28	Birim basamak gerçek talep artışı karşısında kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sisteminin farklı λ değerleri için cevapları	72
Şekil 3.29	Birim basamak talep artışı karşısında kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sisteminin enerji market yönetimi performans ölçütlerinin λ 'ya bağlı değişimi	73
Şekil 3.30	(a) İkinci simülasyon senaryosu için çok kaynaklı kapalı çevrim üretim kontrol sistemi modeli, (b) Rüzgar ve güneş enerji değişken üretim kapasitesi	74
Şekil 3.31	Çok kaynaklı akıllı şebeke sisteminin kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrolörler ile enerji dengeleme simülasyonu sonuçları	76
Şekil 3.32	Şekil 3.31'de elde edilen simülasyon sonucunun saat 16:00'deki tepe talebi ve saat 21:00'deki dip talebi için kesir dereceli PI kontrolörlerin fiyat cevapları	77
Şekil 3.33	Şekil 3.31'de elde edilen simülasyon sonucunun saat 16:00'deki tepe talebi ve saat 21:00'deki dip talebi sonucunda sistemin S/D oranları	78
Şekil 3.34	Çok kaynaklı kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sisteminin enerji market yönetimi performans ölçütlerinin λ 'ya bağlı değişimi	79

Şekil 3.35	Simülasyon süresince kaynakların sisteme sağladığı, (a) enerji miktarları ve (b) kurulu kapasite kullanım oranları ($G_j / C_{\max, j}$)	80
Şekil 3.36	Kapalı çevrim fiyat kontrolü ile enerji dengeleme simülasyonu gerçekleştirilen hiyerarşik ağaç yapısına sahip şebeke kesiti.....	81
Şekil 3.37	Dinamik enerji fiyatlaması ile sağlanan talep taraflı yük yönetiminde ihtiyaç duyulan teknolojiler ve akıllı ev konsepti [68]. Bu model, Şekil 3.2(a)'da elektriksel şeması verilen üretken tüketici modeli için pratik bir örnek teşkil eder. Akıllı sayaç da çalışan program ile dinamik fiyat yayınına göre talep yönetimini gerçekleştirilir	82
Şekil 3.38	Parçalı doğrusal talep esnekliğine sahip fiyat-talep karakteristiği	83
Şekil 3.39	(a) Talep ve üretim geri beslemelerine sahip çift çevrimli enerji market modeli, (b) Bu market modelinin analizi için geliştirilen simülasyon modeli.....	85
Şekil 3.40	(a) Enerji üretim cevabı, (b) Esnek enerji talep cevabı, (c) Enerji fiyat cevabı	87
Şekil 3.41	a) Farklı talep esneklik oranları için S / D oranları, (b) Saat 21:00'de talep dibinden dönüşte S / D oranlarına yakın bir bakış	88
Şekil 3.42	Talep esnekliğine sahip enerji marketi simülasyonunda performans ölçütlerinin T_e 'ya bağlı değişimi	89
Şekil 3.43	Talep esnekliğine sahip enerji marketi simülasyonunda farklı T_e ve λ değerleri için dinamik enerji fiyatlaması	90
Şekil 3.44	Talep esnekliğine sahip enerji marketi simülasyonunda farklı T_e ve λ değerleri için S / D oranları	91
Şekil 3.45	Simülasyon süresince, kaynakların sisteme sağladığı (a) enerji miktarları (MW) ve (b) kurulu kapasite kullanım oranları ($G_j / C_{\max, j}$)	92
Şekil 3.46	Bir üst katmandan transmisyon ile gelen enerjini fiyatının güneş enerji fiyatına ($P_{0,1} = 0.5$ Unit/MWh) çekildiği durumda kaynakların sisteme sağladığı enerji miktarları	93
Şekil 4.1	Hiyerarşik ağaç yapısına sahip şebekelerde enerji alış yerişinin en yakın denge düğümü üzerinden tek bir yol üzerinden sağlanabilmesi	97
Şekil 4.2	Hiyerarşik ağaç yapısına sahip AC şebeke kesitinin PowerWorld güç akış simülasyon sonuçları, (a) İdeal dengeli durum, (b) Bara 8'de üretim yetersizliğinin üst katmandan karşılanması, (c) Bara 8'de üretim yetersizliğinin Bara 5'dan sağlanması ve Bara 2'de (üçüncü katmanda) enerji dengesine ulaşılması, (d) Bara 5'de oluşan fazla üretimin daha üst katmanlara gönderilmesi, (e) Bara 5'de oluşan fazla üretimin, Bara 6 ve Bara 7 de artan talebe yönlendirilmesi ve tekrar sistemin Bara 2'de enerji dengesine ulaşılması	100
Şekil 4.3	(a) Hiyerarşik ağaç yapısına sahip AC şebekede enerji alış yerişinin aile ilişkisi ve çevrimsizlik özelliğinin doğal bir	

	sonucu olarak en yakın düğümden tek bir yol üstünden karşılanması. (b) Karmaşık topoloji durumunda AC şebekede enerji alış verişi	101
Şekil 4.4	Simülasyonda seri direnç 0.01 Ohm/km ve şönt iletkenliği 10-6 Ohm/km alınması durumunda sonuçlar	103
Şekil 4.5	N_1^r kök düğümü etki alanı bütün sistemi kapsamaktadır. N_1^2 ve N_2^2 düğümlerinin etki alanları velisi olduğu alt düğümlerin oluşturduğu alt kümelerdir. N_1^2 'nin etki alanı içinde kısa mesafeli enerji iletimi (iletim 1'de iki düğüm mesafesi). N_1^2 etki alanındaki N_1^1 düğümünden, N_2^2 etki alanındaki N_6^1 düğümüne uzun mesafeli iletim (iletim 2.'de dört düğüm mesafesi)	107
Şekil 4.6	Dinamik fiyat sinyali p 'nin belirli zaman aralıkları ($\Delta t > L_e + L_p$) ile güncellenmesi sonucu, toplam talep (D) ve toplam üretim (S) durumlarının değişimi gösterilmiştir. Kesir dereceli PI kontrolör, talep ve üretimi eşitlemek için dinamik fiyatı Δt periyotla günceller	108
Şekil 4.7	(a) Global dengeleme ve global fiyatlama yaklaşımı (b) Yerel dengeleme ve yerel fiyatlama yaklaşımı	109
Şekil 5.1	Karmaşık topoloji (a), kırılan bağlantılarla (kesikli çizgiler) elde edilen ağaç topoloji 1 (b) ve ağaç topoloji 2 (c) dönüşür, (d) Ağaç topolojisinin izomorfizm (eşbiçimlilik) özelliğinin bir sonucu olarak ağaç topolojisi 1, hiyerarşik olarak düzenlenebilir	112
Şekil 5.2	(a) Anahtarlamalı bağlantılara sahip karmaşık topolojide, mantıksal ağaç topolojisinin uygun anahtarlama ile oluşturulması, (b) Kırılan bir bağlantı sonucu (kesikli çizgi) şebekenin iki ayrık ağaç yapısına dönüşmesi, (c) Tekrar uygun anahtarlar (A_5) kapatılarak ağaç yapısının onarımı ...	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Akıllı şebeke konusunda Avrupa'da çalışılan proje, platform ve girişimlerden örnekler [1]	13
Çizelge 2.2	Akıllı şebeke çalışmalarına konu olan yaklaşımlar ve mimariler [1]	14
Çizelge 2.3	Akıllı şebeke konusunda bazı tanımlama ve standardizasyonlar [2,20,39,71]	15
Çizelge 3.1	Simülasyonda kullanılan çoklu enerji üretim sistemi modelleri	74
Çizelge 3.2	Simülasyonda kullanılan çok kaynaklı enerji üretim sistemi modelleri	84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Wi-Fi	Wireless local area network-WLAN
LAN	Local area network
WiMAX	Worldwide interoperability for microwave access
GSM/GPRS	Global system for mobile communications /General packet radio service
TCP/IP	Transmission control protocol/Internet protocol
NIST	Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisler Enstitüsü
IEC	Uluslararası Elektrik Komisyonu
AC	Alternatif akım
PID	Oran entegral türev
PI	Oran entegral
PI^λ	Oran λ dereceli entegral
CFE	Sürekli kesir genişletme
s^α	s-domeninde kesir dereceli türev
ET	Enerji tüketici
EÜ	Enerji üretici
GE	Güvenilirlik eşiği
IED	İdeal enerji dengesi
ÜTO	Üretim Tüketim Oranı
OEF	Ortalama Enerji Fiyatı
FDF	Fiyat Değişkenlik Faktörü
OEYH	Ortalama Enerji Yetersizlik Hatası
ST	Sanal talep
t	Zaman
f_o	Nominal AC şebeke frekansına
f'	Ölçülen AC şebeke frekansı anlık değeri
P_o	Nominal şebeke frekansını sağlayan denge durumu aktif gücü
P'	Aktif güç anlık değeri
K''	Frekans düşme sabiti
Δf	Frekans sapması anlık değeri
η	Hata ölçekleme katsayısı
e	Kapalı çevrim üretim kontrolü için lineer denge hatası
$C(s)$	Kontrolör transfer fonksiyonu
$P(s)$	Kontrol edilen sistemin transfer fonksiyonu
$r(t)$	Kapalı çevrim kontrol sistemi giriş işareti (referans işaret)
$q(t)$	Kapalı çevrim kontrol sistemi çıkış işareti
$u(t)$	Kontrol işareti
k_p	Oransal kazanç
k_i	Entegral alıcı kazancı
k_d	Türev alıcı kazancı
λ	Entegral alıcının kesir derecesi
μ	Türev alıcının kesir
${}_a D_t^\alpha$	α kesir dereceli türev ve entegral operatörü

$\Gamma(.)$	Gamma fonksiyonunu
$Aile(A)$	Hiyerarşik ağaç topolojisinde A düğümün ailesi.(A düğümünden türeyen düğümlerin kümesi)
N_i^j	j . katman i . düğüm
Y_i^j	j . katman i . düğümde enerji yeterlilik oranı
ε_i^j	j . katman i . düğümde karesel enerji yeterlilik hatası
ΔE_i^j	j . katman i . düğümde doğrusal enerji denge hatası
G_i^j	j . katman i . düğümde düğümün enerji üretimi
C_i^j	j . katman i . düğümde enerji talebi
α_g^j	j . katman için üretim yanlı iletim kaybı oranı
α_c^j	j . katman için talep yanlı iletim kaybı oranı
w_g^j	j . katman için üretim yanlı kayıp çarpanı
w_c^j	j . katman için talep yanlı kayıp çarpanı
R_e	Şebekenin enerji güvenilirliği
r	Kök düğüm katmanı ($j = r$)
α_j	j . katmanda enerji dengelemesinde toplam kayıp oranı
e_u	ET durumunda düğümler doğrusal enerji denge hatasının beklenen değerleri
e_v	EÜ durumunda düğümler doğrusal enerji denge hatasının beklenen değerleri
$ ET $	Enerji tüketicileri kümesinin eleman sayısı
$ EÜ $	Enerji üreticileri kümesinin eleman sayısı
$\delta, \delta_u, \delta_v$	İstenildiği kadar küçük seçilebilen pozitif sayılar
$E_{EÜ}$	Hanelerin maksimum enerji üretimi
E_{ET}	Hanelerin maksimum enerji tüketimi
$P_{EÜ}$	Üretici durumda (EÜ) bulunma olasılığı
P_{DN}	Denge noktası üretici olasılığı
S	Kapalı çevrim toplam enerji arzı
D	Kapalı çevrim toplam enerji talebi
Q	Denge noktası fiyatı (Serbest piyasa optimal enerji fiyatı)
L_e	Enerji denge hatası kestirimi gecikmesi
L_p	Dinamik fiyat yayın gecikmesi
e_d	Kapalı çevrim esnek talep kontrolü için lineer denge hatası
$S_d(p)$	Enerji üretim-fiyat fonksiyonu
a_i	$S_d(p)$ fonksiyonu polinom katsayıları
d	$S_d(p)$ fonksiyonu polinom derecesi
$S(s)$	Enerji üretim sistemi transfer fonksiyonu
τ	Zaman sabiti
p	Dinamik enerji fiyatı
p_0	Enerji üretim maliyeti
C_{\max}	Maksimum üretim kapasitesi

$G(s)$	Dinamik enerji üretim modeli
λ_{\min}	Entegral alıcı kesir derecesi (λ) için minimum değer
λ_{\max}	Entegral alıcı kesir derecesi (λ) için maksimum değer
$\Delta\lambda$	Entegral alıcı kesir derecesi (λ) için birim adım
S/D	Üretim Tüketim Oranı
D_r	Gerçek talep
D_s	Sanal talep (ST)
φ	Sanal talep oranı
$E[.]$	Beklenen değer
$\sigma(.)$	Varyans
D_L	Esnek talebin minimum değeri
D_H	Esnek talebin maksimum değeri
T_e	Talep esneklik katsayısı
$D(p)$	Enerji talep-fiyat fonksiyonu
p_L	Esnek talep düşük fiyat eşiği
p_H	Esnek talep yüksek fiyat eşiği
$D(s)$	Dinamik esnek talep modeli
γ	Tüketici fiyat çarpanı
p_T	Enerji tüketim fiyatı
ρ	Hiyerarşik ağaç yapısı mimarisine sahip şebekede düğüm noktası sayısı
E_T	Hiyerarşik ağaç yapısı mimarisine sahip şebekenin toplam enerji iletim kapasitesi
c_i	Hiyerarşik ağaç yapısı mimarisine sahip şebekenin i . bağlantısının enerji iletim kapasitesi
Δt	Dinamik enerji fiyatı güncelleme periyodu
p_i^j	j . katman i . düğümde dinamik enerji fiyatı
A_i	Hiyerarşik ağaç yapısı mimarisine sahip şebekenin i . bağlantısının anahtar değeri

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki hızlı artış, fosil yakıta dayalı enerji rezervlerinin azalmış olması, sağlanan teknolojik ve sosyal gelişim sonucunda bireyin gündelik yaşamında enerjiye olan bağımlılığının artmış olması, yoğun sanayileşmenin ve verimsiz enerji tüketiminin çevresel etkilerinin görülmeye başlanmış olması gibi etmenler, akıllı enerji dağıtım ve yönetimini gündeme getirmiştir [1]. Bu bağlamda, elektrik enerjisinin üretim aşamasından itibaren, iletim, dağıtım ve tüketimi de kapsayan bütün süreçlerin gelişen teknolojinin yardımı ile daha verimli, daha güvenli, daha çevre dostu ve daha yönetilebilir olması yönünde yapılan çalışmalar “Akıllı Şebekeler” başlığı altında ele alınmaya başlamıştır. Geleneksel elektrik şebekelerin, bugünün ihtiyaçlarına ve beklentilerine cevap vermede yetersiz kalmaya başlaması nedeni ile gündeme gelen “akıllı şebeke” kavramı, günümüzde elektrik şebekelerinin tam otomasyonu ve yüksek verimliliğini hedeflerken; haberleşmeden bilgi teknolojilerine, kontrol sistemlerinden yarı iletken teknolojilerine kadar birçok teknolojiyi bir araya getiren disiplinler arası bir çalışma alanına dönüşmüştür [2]. Akıllı şebeke çalışmaları pratikte, mevcut şebekenin teknolojik gelişmelerin desteği ile daha optimal ve sürdürülebilir bir şebekeye dönüştürülmesi çabaları olarak görülmektedir [1]. Son yıllarda akıllı şebekelere olan ihtiyaç gündelik hayatta daha görünür hale gelmiştir. Bu nedenle haberleşme, bilgi teknolojileri, kontrol sistemleri ve yarı-iletken teknolojileri gibi birçok sahada akıllı şebeke uygulamalarına dönük çalışmalar ivme kazanmıştır [1-36].

Günümüzde, akıllı şebeke kavramsal şemsiyesi altında çalışma sürdüren bir çok paydaş, konuyu farklı çerçevelerden ele almaktadır. Akademik çevreler, konuyu “Haberleşme, güç elektroniği ve depolama teknolojilerini kullanan güç sistemlerinin, enerji üretim ve tüketiminin her düzeyde dengelenebilmesi” problemi olarak görmekte iken [1,37], ticari araştırma-geliştirme faaliyetleri ve endüstriyel girişimlerin ilgi odağında akıllı sayaçlar, ev veya ofis otomasyonu gibi teknolojiler ağırlık kazanmaktadır. Politik çevreler tarafından konu, enerji fiyatı istikrarı ve enerji verimliliği, sürdürülebilirliği ve güvenilirliği açısından ele alınırken, çevre duyarlılığı olan örgütler ve kurumlar, akıllı şebeke uygulamalarını çevre duyarlı enerji üretimi ve tüketimi için bir fırsat olarak görmektedir. Bu

bağlamda, karbon salınımının düşürülmesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimin yaygınlaştırılmasında akıllı şebekelere önemli görevler yüklemektedirler. Böylesine geniş bir paydaş kümesinin oluşturduğu sinerji, çok kısa bir zaman dilimi içinde akıllı şebekeler başlığını akademik çalışmaların yoğunlaştığı, ticari araştırma-geliştirme faaliyetlerinin teşvik edildiği, endüstrinin ilgi duymaya başladığı, kamu kuruluşları ve sivil teşebbüslerin ajandalarında ağırlıklı yer tutmaya başlayan disiplinler arası işbirliklerine ihtiyaç duyan popüler bir konu haline getirmiştir. Bunun bir sonucu olarak akıllı ev ve ofis sistemleri, akıllı sayaçlar, güneş ve rüzgar enerji sistemlerinin hane düzeyinde kullanımı ile gündelik hayatta akıllı şebeke uygulamalarının izleri görünür olmaya başlamıştır. Akıllı şebeke konusunda sağlanan gelişmeler, ortaya atılan fikirler ve mimariler özellikle Amerika ve Avrupa Birliğinde başlatılan projeler çerçevesinde biçimlenmiştir [1]. Ancak ülkelerin ihtiyaçlarına göre farklılaşan çerçeveler içinde sağlanan gelişimler, akıllı şebekeler kavramsal şemsiyesi altında toplanmaktadır. Gerek çeşitli teknolojilerin entegre olduğu otomasyon uygulamalarını içeren bir teknolojik atılım, gerekse optimal dengeleme ve verimlilik problemi olarak değerlendirilsin, günümüzde akıllı şebeke çalışmaları, büyük değişkenlik gösterebilen ve zengin bir çeşitliliğe doğru evrilen üretim ve tüketim araçlarının bir şebeke üzerinde entegrasyonu ve optimal yönetimi problemlerine odaklanmıştır. Bu perspektif ile gelişen akıllı şebeke altyapısının, mevcut sistemler üzerine, güncel ve fonksiyonel teknoloji katmanlarının eklenmesi ile zaman içinde gelişmesi öngörülmektedir. Enerji şebekesine eklemlenen bu teknoloji katmanları ile sistemin daha sürdürülebilir, entegre, interaktif, optimize, esnek, erişilebilir, güvenilir ve ekonomik olması yanında şebeke durumlarının öngörülebilir, kontrol edilebilir ve yönetilebilir karakterde olması hedeflenmiştir [1]. Bu bağlamda, günümüz akıllı şebeke uygulamalarının enerji sistemleri katmanı üstüne entegre olan şu üç teknoloji katmanını kapsamaması gerektiği konusunda bir fikir birliği oluşmuş durumdadır: dağıtık zeka, haberleşme, kontrol ve otomasyon sistemleri [1]. Dolayısı ile yakın gelecekte akıllı şebeke altyapısının merkezi olmayan (decentralized) bir şebeke düzeni içinde farklı teknolojik katmanların bir bileşkesi olarak ortaya çıkması beklenmektedir [2,20,23,24].

Biraz daha geniş bir zaman penceresinden bakıldığında, akıllı şebeke çalışmalarının, enerji sistemlerinin dijital çağını başlatan bir girişim olduğu

görülür. Benzer bir dönüşüm, bilgi sistemlerinde geçen yüzyılın sonlarında yaşanmıştır. Bilişimde yaşanan dijital devrim, sunmuş olduğu bilgiyi üretme, kullanma ve paylaşma imkânları ile alışkanlıklarımızı köklü değiştirmiş ve insanlığın gelişiminde bir dönüm noktası olan bilgi çağını açmıştır. İnsanlığın enerji konusundaki dijital dönüşümü de, akıllı şebeke çalışmaları ile başlamıştır. Akıllı şebeke çalışmaları ile başlayan bu serüvenin insanoğluna bilgi teknolojilerinde yaşanan atılıma benzer bir gelişimi sunması muhtemeldir. Bu gelişimin doğal bir sonucu, enerji tüketicilerinin, enerji üretebilir ve bu üretimlerini istedikleri an bir enerji ağı üzerinde paylaşabilir duruma gelmesi beklenmektedir [8-11,13]. Bunun başarılabilmesi için, enerjiye olan klasik bakış açımızı değiştirmeliyiz; üretim, tüketim ve iletim konularını yeni kavramlar ve yaklaşımlar ışığında yeniden yorumlamalıyız. Yeni kavramların ve yaklaşımların ortaya çıkaracağı yeni problemlere çözüm arayışlarına girilmeli ve zaman içinde çözümler bulunarak akıllı şebekenin gelişimi sağlanmalıdır.

Bu tez çalışmasında, geleceğin akıllı şebeke mimarilerinde enerji dengeleme probleminin çözümü için teorik bir çalışma yapılmıştır. Gerek mimari gerekse kontrol ve otomasyon bağlamında yüksek belirsizlik gösteren şebeke koşulları için enerji dengeleme problemi ele alınmıştır. Bu bağlamda, hiyerarşik ağaç topolojisinin çevrimsizlik (acyclic), ölçeklenebilirlik (scalability) ve aile ilişkisi tanımlama (family relations) özelliklerinin yüksek belirsizlik gösteren bir enerji şebekesine sağlayabileceği yönetsel kolaylıklar araştırılmıştır. Bu amaçla, ağaç topolojisi, enerji dağıtım probleminde uygulanmış ve şebekenin enerji denge durumları yüksek belirsizlik koşullarında değerlendirilmiştir. Rastgele üretken-tüketicilerden (prosumer [13]) oluşan bir sistem varsayımı altında enerji dengelemesi için numerik analizler yapılmıştır. Bu çalışma ile üretken-tüketicilerin entegre olduğu bir hiyerarşik ağaç mimarisine sahip bir şebekede, enerji dengeleme probleminin analizine dönük teorik bir altyapı oluşturulmuştur.

Daha sonra, enerji dengelemesinin otomatik olarak sürdürülebilmesi amacı ile kapalı çevrim enerji fiyat kontrolü uygulaması incelenmiştir. Bu amaçla, kapalı çevrim üretim kontrol sistemi kurulmuş ve kesir dereceli kontrolörün, dinamik fiyat kontrolü ile arz-talep eğrisinde, sistemi arz ve talebin eşitlendiği denge noktası olan optimal fiyat noktasına taşıyabildiği gösterilmiştir. Bu bağlamda, Matlab Simulink'de akıllı şebekeler için kapalı çevrim enerji marketi kontrol

simülasyon ortamı tasarlanmıştır. Akıllı şebeke için serbest enerji piyasasına uygun enerji üretim ve esnek talep modelleri geliştirilmiş ve kesir dereceli PI kontrolör ile fiyat kontrol simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Önerilen bu kapalı çevrim üretim kontrol yaklaşımının, hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir akıllı şebekede düğüm noktalarında enerji dengelemesi için kullanımı incelemiş ve yöntemin avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Özetle bu tez çalışmasında, akıllı şebeke sistemlerinin en temel ve zor problemlerinden biri olan yüksek üretim ve tüketim belirsizliği gösterebilen bir enerji dağıtım şebekesinde, enerji dengeleme probleminin çözümüne dönük yaklaşımlar sunulmuştur. Sonuç bölümünde, gelecek çalışmalar için fiziksel ağaç topolojisinin zayıflıklarını gideren, dinamik ağaç topolojisi tanıtılmıştır. Buna göre karmaşık topolojiye sahip bir şebeke üzerinde, mantıksal ağaç topolojisinin uygun anahtarlamalar ile oluşturulabileceği gösterilmiştir. Bu konuda daha detaylı analizler açık bir problem olarak başka tez çalışmalarına bırakılmıştır.

2. KAYNAKÇA ÖZETLERİ

2.1. Akıllı Şebeke Çalışmalarına Genel Bir Bakış

Akıllı şebekenin güncel ve pratiğe dönük bir tanımı, Fan et al. tarafından şöyle ifade edilmiştir: “Akıllı şebeke, kendisine bağlanan bütün kullanıcıların işlevlerini entegre eden ve ileri düzey bilgi, kontrol ve haberleşme teknolojilerini, enerji tedarikini verimli, ucuz, güvenilir ve şeffaf (erişilebilir) kılmak için kullanan zeki bir elektrik ağıdır” [38].

Akıllı şebeke çalışmalarının çıkış noktası elektrik üretim, iletim, dağıtım ve tüketim süreçlerinin daha verimli, yönetilebilir, güvenilir ve çevre dostu kılınması yönündeki ihtiyacın artmış olmasıdır. Bu hedefe ulaşmak için, yarı iletken teknolojilerinde, haberleşme ve kontrol sahalarında son dönemlerde elde edilen gelişmeler, mevcut elektrik şebekelerinin akıllı, gözlenebilir ve yönetilebilir sistemlere dönüştürülmesi için seferber edilmeye başlanmıştır. Bu bölümde giderek disiplinler arası bir çalışma sahasına dönüşen akıllı şebekeler konusunda kabul gören yaklaşımlar, tasarım ve sistemler kısaca özetlenmektedir.

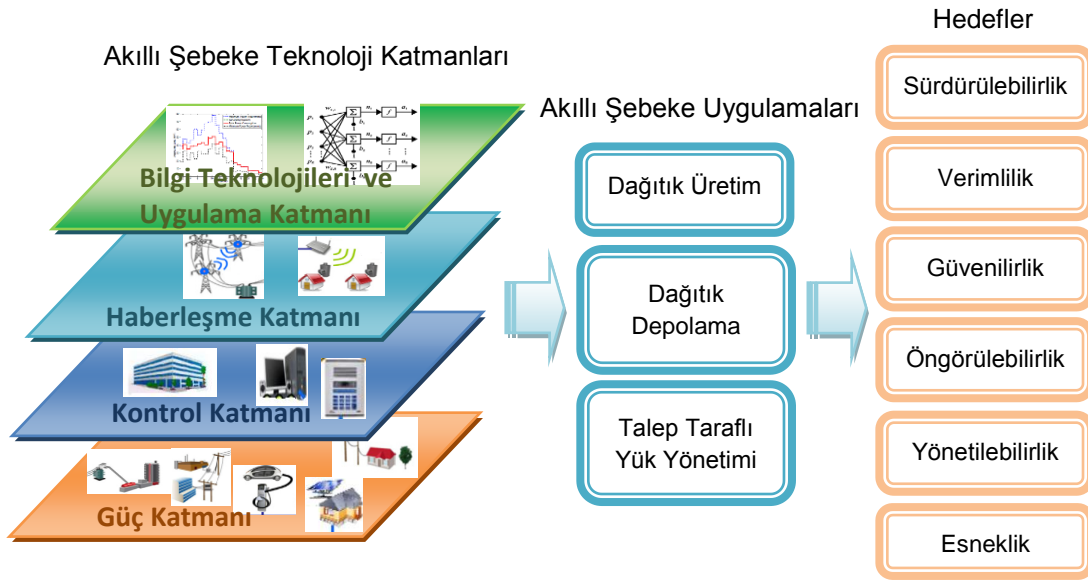
Günümüzde, Şekil 2.1’de gösterildiği üzere, akıllı şebeke uygulamalarının şu dört temel teknoloji katmanı üstünde inşa olması öngörülmektedir[2,30,39]:

(i) *Bilgi teknolojileri ve uygulama katmanı*: Yapay zeka ve optimizasyon uygulamaları [31,40-43], ajan tabanlı (agent based applications) uygulamalar [15,30,36,44] analiz ve tahmin algoritmaları gibi bilgi teknolojileri dayalı uygulamalar bu teknoloji katmanda yer alır [39,45,46]. Bu uygulamalar ve algoritmalar, yeterli işlem gücüne sahip donanımlara ihtiyaç duyar. Dağıtık bilgi teknolojileri uygulamaları mikro-kontrolör veya mikro-bilgisayar’a sahip donanım [47,48] üzerinde çalışabilirken, merkezi olarak çalışan geniş alan (bulut mimarisi) uygulamaları [43,49,50], işlem gücü yüksek uygulama sunucuları ve veri tabanları üzerinde çalışmaya ihtiyaç duymaktadır.

(ii) *Haberleşme teknolojileri katmanı*: Güç ve kontrol katmanları sistem bileşenlerinin iletişimini ve bu bileşenlere uzaktan erişimi sağlayan veri haberleşmesi teknolojilerini kapsar. Bu amaçla kullanılması planlanan güncel haberleşme teknolojileri şunlardır: güç hattı modemleri (power line modem) [6,51], Wi-Fi teknolojileri (kablosuz LAN) [52], WiMAX teknolojisi [53], GSM/GPRS haberleşme teknolojileri [54,55], ZigBee haberleşme teknolojisi [50],

TCP/IP protokolü tabanlı veri haberleşmesi, bulut mimarileri ve internet servis sağlayıcı hizmetleri [56,39].

(iii) *Kontrol teknolojileri katmanı*: Bu katman, güç sistemlerinin kararlılığını ve yönetimini sağlayan kontrol uygulamalarını ve yöntemlerini içerir [14,45,57,58]. Akıllı şebeke uygulamaları, yoğun bir şekilde dağıtık kontrol uygulamalarına ihtiyaç duymaktadır [30,44,45,48,59,60]. Şebekeyi oluşturan güç sistem bileşenlerinin optimal durum ve marjlarda çalışmasının sağlanması, sistem kararlılığının korunması, enerji verimliliği ve güvenilirliğinin artırılması için dağıtık kontrol uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan bütün sistemin global ölçekte yönetimi için geniş alan sistem izleme ve kontrol yöntemleri önerilmiştir [49,61]. Geleceğin dünyası için tümleşik çözümler sunabilme avantajı nedeni ile bulut sensörler ve kontrol mimarileri çalışılmakta olan konular arasında yer almaktadır [43,50].



Şekil 2.1. Günümüz akıllı şebeke uygulamaları dört teknoloji katmanı üstünde inşa olmaktadır [2,30,39]. Bu teknoloji katmanlarının sağlayacağı akıllı şebeke uygulamaları ve başlıca hedefleri görülmektedir

(iv) *Güç teknolojileri katmanı*: Bu katman şebekeyi oluşturan enerji üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemlerinin tamamını kapsar [1,5,19,37,58,62,63]. Günümüzün geleneksel elektrik şebeke yapısı dağıtık yenilenebilir enerji kaynaklarının [16,30,58] ve dağıtık depolama sistemlerinin [16,17] sisteme entegrasyonu, elektrikli araçların [63-65] ve mikro şebeke uygulamalarının

[34,66,67] yaygınlaşması ile değişmeye başlamıştır. Üretken-tüketici (prosumer) kavramının klasik şebekelerde çok daha köklü dönüşüme yol açması beklenmektedir [5,8,40,68,69].

Bu teknoloji katmanları üzerinde, hayata geçen günümüz akıllı şebeke uygulamaları, üç temel başlık altında toplanmıştır:

(i) *Dağıtık üretim (distributed generation) uygulamaları*: Akıllı şebeke çalışmaları ile sağlanan gelişmeler, küçük ölçekli yerel enerji üretiminden yüksek güçlü enerji santrallerine kadar çok geniş bir yelpazeye yayılan enerji kaynaklarının aynı şebeke üstünde entegrasyonunu ve kontrolünü mümkün kılmaktadır [8,11,12,30]. Merkezi üretimin aksine dağıtık üretim perspektifi enerji üretiminin şebekenin içine dağıtılmasını amaçlar [11,30]. Dağıtık üretim uygulamaları enerji verimliliği ile güvenilirliğinin artırılması yanında yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması içinde büyük öneme sahiptir. Dağıtık üretim, yerel üretim ve yerel tüketimi mümkün kılar. Böylece iletim kayıplarının düşürülmesine katkı sağlayarak enerji verimliliği artırılır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretimin hane düzeyine kadar yaygınlaştırılmasına imkân verir. Böylece hanelerin yenilenebilir enerji üretim sürecine doğrudan katılmalarını ve talebi karşılamada yenilenebilir enerjilerin payının artmasını sağlar. Bu durum enerji üretim ve tüketim süreçlerinin olumsuz çevresel etkilerini azaltır. Klasik şebekelerde statik tüketici durumunda olan abonelerin, dağıtık üretim uygulamalarının yaygınlaşması ile üretken-tüketiciler haline dönüşmeleri beklenmektedir [13,14]. Bu dönüşüm şebekenin her bir kesitinin, şebekenin kalan kısmına olan bağımlılığını azaltır ve şebekenin kendi kendine yetebilir mikro şebekeler ağına dönüşmesini sağlar. Şebekeye dağıtılmış merkezi olmayan enerji üretimi, kesinti ve arıza durumlarında mikro şebekenin talebini yerel üretiminden besleyebilir. Bu yaklaşım sistemin enerji güvenilirliğini artırır ve sisteme belirli ölçülerde kendini iyileştirebilme (self-healing) kabiliyeti kazandırır.

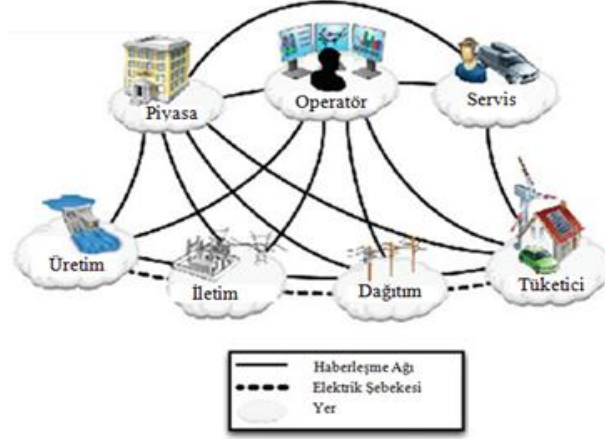
(ii) *Dağıtık depolama (distributed storage) uygulamaları*: İhtiyaç fazlası enerjinin depolama ile ihtiyaç duyulan başka zaman dilimlerine ötelenebilmesi enerji yönetimi ve güvenilirliği için önemli avantajlar sağlamaktadır. Dağıtık depolama ile enerji üretim fazlasının şebekeye dağılmış depolama sistemlerinde depolanması ve gerektiğinde enerji talebini karşılamak üzere kullanılabilmesi hedeflenir [15]. Yüksek hacimli merkezi enerji depolama sistemlerinin yüksek

maliyetler getirmesi nedeni ile küçük hacimli dağıtık depolamanın hem maliyet hem de verimlilik açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür [15,16]. Özellikle, üretim sürekliliği gösteremeyen yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin ve yaygın kullanımı için hane tipi küçük ölçekli enerji depolama sistemlerinden geniş ölçekli depolama sistemlerine kadar geniş bir yelpazeye sahip enerji depolama sistemlerinin şebekeye dağıtılması gerekmektedir [16,17]. Enerji depolama sistemleri, özellikle enerji süreksizliğine sahip enerji kaynaklarından elde edilen ihtiyaç fazlası enerji üretiminin, bu kaynakların veriminin düştüğü zaman dilimlerine ötelenebilmesine imkân verir. Böylece, enerji yönetiminde ve enerji dengesinin sürdürülmesinde önemli kolaylıklar sağlar. Diğer taraftan, kısa süreli anlık talep artışlarını dengelemede enerji yedeği olarak hizmet verebilirler [17]. Enerji kesintisi gibi durumlarda ise kritik yükleri beslemeye imkân sağlar. Böylece, enerji sisteminin kendini-iyileştirebilme (self-healing) özelliğini artırır.

(iii) *Talep taraflı yük yönetimi (demand side load management) uygulamaları:* Talebin değişen şebeke koşullarına göre ayarlanabilmesini sağlar. Talep taraflı yük yönetimi uygulamaları şebeke esnekliğini artırır ve tüketici talebinin bir parametre olarak yönetilebilir olmasına imkân verir. Talep taraflı yük yönetimi, sistemin enerji dengelemesini kolaylaştıran, enerji verimliliğini ve güvenilirliğini artıran yük yönetimi uygulamalarını kapsar. Enerji talebinin, arzu edilen marjlar içinde tutulabilmesi, gerekli durumlarda azaltılabildiği veya artırılabilmesi enerji yönetimi ve dengelemesi açısından avantajlar sağlar. Örneğin, tüketicilerin enerji talepleri yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli olduğu saatlere kaydırılabilir. Talep tepe tıraşlaması (peak shaving) gibi uygulamalar talep taraflı yük yönetimi ile gerçekleştirilebilmektedir. Değişken enerji fiyatlandırması talep taraflı yük yönetimi ile uygulanır ve enerji fiyatlarının tüketiciler lehine düşürülebilmesini sağlar [18]. Yük kaydırma, yük atma gibi aktif talep yönetim uygulamaları haneler ölçeğinde akıllı sayaçlar [19] yardımı ile gerçekleştirilebilir. Bu uygulamalar, enerji üretim belirsizliği veya talep dalgalanması olan şebekelerde enerji dengelemesinde önemli bir rol oynar.

Ticari akıllı şebeke çalışmalarının çerçevesi, Birleşmiş Milletler Ticaret Departmanı çatısı altında kurulmuş bir standardizasyon organizasyonu olan NIST (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) tarafından ilan edilen uluslararası standartlar ile biçimlenmektedir [20]. NIST standartlarını oluştururken, IEEE

(Elektrik Elektronik Mühendisler Enstitüsü) ve IEC'nin (Uluslararası Elektrik Komisyonu) görüş ve tavsiyelerini değerlendirmektedir. NIST tarafından önerilmiş olan akıllı şebeke modeli Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2. NIST tarafından önerilen akıllı şebeke kavramsal modeli [20,39]

Nüfus artışı ve teknolojik gelişmelere paralel olarak enerjiye duyulan ihtiyaç ve bağımlılık her geçen gün artmaktadır. Artan enerji talebi ve tüketimi, sınırlı kaynakların daha verimli ve çevre dostu kullanımını gündeme getirmiştir. Ekolojik dengelerin korunmasını amaçlayan sürdürülebilir gelişim stratejileri enerjinin üretim, iletim ve tüketim süreçlerinin daha verimli, güvenilir ve çevre dostu olmasını zaruri hale getirmiştir. Son yüzyılda, fosil yakıtlarına dayalı enerji üretiminin yüksek karbon salınımına yol açması, hava kalitesinin düşmesi yanında, sera etkisi ve küresel ısınma gibi küresel riskleri gündeme getirmiştir. Bununla birlikte, fosil kaynakların yakın gelecekte tükenebileceği ön görülmekte ve alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması gündeme alınmıştır. Gerek çevresel etkilerinin düşük olması, gerekse kolay erişilebilir olması nedeni ile yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimi, küresel enerji problemine gelecek vaat eden bir çözüm olarak görülmüştür. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimi akıllı şebeke uygulamaları ile desteklenmektedir. Bu bağlamda üretim süreksizliği ve belirsizliği gösterebilen yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgar, biokütle vb.) mikro ve makro ölçekte şebekeye dağıtık entegrasyonunu ve etkin yönetimini sağlayacak çözümlerin bulunmasına akıllı şebeke çalışmalarında birincil öncelik verilmektedir.

Bu noktada, tüketicilerin aynı zamanda enerji üreticileri durumunda olabildikleri üretken-tüketici abone modelinin yaygınlaştırıldığı, yerel üretim ve tüketim stratejisinin şebeke genelinde hakim kılındığı şebeke mimarilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu mimariler, dağıtık üretim, dağıtım depolama gibi güç sistemleri problemleri yanında, dağıtık kontrol, dağıtık ölçümleme (metering), optimal şebeke yönetimi ve enerji dengeleme gibi sistem yönetimi problemlerini gündeme getirmiştir. Bu problemlerin çözümü, şebekenin haberleşme ve kontrol sistemleri ile bütünleşerek çok katmanlı bir yapıya kavuşmasını gerektirmektedir. Böylece çok katmanlı teknolojiye sahip enerji şebeke mimarisinin temelde şu imkânları sunması hedeflenmektedir:

a) *Enerji verimliliği*: Enerji verimliliği üretim, tüketim ve iletim verimliliği olarak ele alınmalı ve bütün enerji süreçlerini kapsamalıdır. Yerel üretim yerel tüketim stratejisi iletim kayıplarını azaltıp verimliliği artırır [8]. Talep taraflı yük yönetimi, dağıtık üretim ve depolama uygulamaları ile enerji talebi yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli olduğu saatlere kaydırılabilecektir [40,62,68]. Böylece şebekeden sağlanan enerjiye olan bağımlılığı azalacaktır [66]. Bu durum iletim kayıplarını azaltması yanında, daha ucuz ve yakıt gerektirmeyen yenilenebilir enerji ile talebin daha ekonomik ve çevre dostu karşılanmasını mümkün kılacaktır.

b) *Enerji güvenilirliği*: Üretim ve tüketim belirsizliği olan bir ortamda, güvenilir bir şebekenin sürekli dengeli kalabilmesi ve enerji talebine her zaman cevap verebilir olması gerekmektedir [1,8,30]. Şebeke geneline yayılmış dağıtık üretim ve depolama uygulamalarının doğal bir sonucu olarak, arıza ve kesinti gibi durumlar daha lokalize kalmaktadır ve şebeke bu problemlerden daha az etkilenmektedir [58,70]. Kesinti ve şebeke hataları kısa vadede ciddi ekonomik ve sosyal problemlere yol açabilme potansiyeline sahiptir. Dağıtık üretim, dağıtık depolama ve talep esnekliği sağlayan talep taraflı yük yönetimi ile bu problemlerin ekonomi ve toplum üzerindeki olumsuz etkileri hafifletilecektir. Dağıtık üretim ve dağıtık depolama uygulamaları ile şebekenin kendini iyileştirebilme (self-healing) kapasitesi ve enerji güvenliği artırılabilir. Talep taraflı yük yönetimi, enerji arz yetersizliği durumunda talebin düşürülmesini sağlayarak enerjinin daha kritik öneme sahip yüklere yönlendirilmesini sağlanabilecek ve olağan üstü durum stratejilerinin hayata geçirilebilmesini

kolaylaştıracaktır. Dağıtık üretim ve depolama stratejileri, merkezi üretime göre doğal afet ve saldırı gibi olumsuz durumlarda, enerjiye erişimin sınırlanması riskini azalacaktır [58].

c) *Talep ve üretim esnekliği*: Talep ve üretim esnekliği şebekeyi yönetilebilir kılan en önemli faktörlerdir. Talebin ve üretimin ayarlanabilir olması, optimal enerji dengeleme uygulamalarının hayata geçirilebilmesini sağlayan en temel özelliktir. Bu özelliğe sahip esnek şebekelerde, üretim ve talep kontrolü yapılarak aşırı üretim, enerji yetersizliği, yüksek talep tepesi gibi olumsuz şebeke durumlarının önüne geçilebilir. Böylece kaynakların daha verimli kullanımı sağlanabilir. Akıllı şebekelerde talep taraflı yük yönetimi uygulamaları dinamik enerji fiyatlaması, yük kaydırma ve yük atma [21,68] gibi yöntemler yardımı ile gerçekleştirilir. Bu uygulamalar sonucunda elde edilen talep esnekliği, şebeke durum ve ihtiyaçlarına göre enerji talebinin ayarlanabilmesini sağlar. Sonuçta, talep ve üretim esnekliğini etkin ve verimli enerji yönetimine imkân verir. Aynı zamanda, bu özellik üretim belirsizliğine sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu ve yaygınlaşmasını kolaylaştırır [22].

d) *Gözlemlenebilirlik (observability), kontrol edilebilirlik (controllability) ve yönetilebilirlik (manageability)*: Haberleşme ve kontrol (otomasyon) teknolojileri akıllı şebeke durumlarının şebekenin her noktasında erişilebilir ve kontrol edilebilir olmasını sağlar [1]. Bu durum, dağıtık sensör ve kontrol uygulamaları sayesinde mümkün olur. Geniş alan yönetimini ile optimal şebeke koşulları sürdürülebilir [23]. Örneğin akıllı sayaçlar ile hane ölçeğinde lokal güç sisteminin durumlarına erişilebilir ve uzaktan yönetimi sağlanabilir. Dağıtım sistemi üzerinde şebeke ve abone operasyonları (açma, kapama, arıza tespiti, yedek sistemi hizmete alma gibi) uzaktan yürütülebilir. Şebeke kontrol ve yönetim merkezlerinden hata durumları gözlemlenebilir, yedek sistemler otomatik devreye alınıp çıkarılabilir. Arızalar ve hatalar gerçekleşmeden önce şebeke durumlarının ölçüm ve analizleri sonucu arıza tahmini yapılabilir ve erken uyarı ve ikaz sistemleri geliştirilebilir. Böylece gerekli tedbirler alınarak arıza ve hata durumları oluşmadan önlenir. Sadece şebeke yönetimi ve gözetimi (monitoring) otomasyonu değil, aynı zamanda abone işlemleri de uzaktan yönetilebilir veya otomatik olarak kontrol edilebilir. Abonelerin anlık durumları, tüketimleri veya lokal arızaları uzaktan gözlemlenebilir. Abone açma, kapama, tarifelendirme gibi

işlemler yanında abonenin lokal dağıtım sistemlerinin ve cihazlarının durumu uzaktan analiz edilebilir. Abone lokal dağıtımında gözlemlenen standart dışı durumlar ve arıza durumları abonelere raporlanıp tedbirlerin alınması sağlanabilir.

e) *Yapay zeka algoritmaları ile akıllı ve optimal şebeke yönetimi*: Yapay zeka algoritmaları akıllı şebeke çalışmalarının önemli bir bileşeni olarak görülmektedir [1]. Üretimden tüketime kadar olan bütün süreçlerin gözlemlenebilir ve yönetilebilir olduğu akıllı şebekelerde, yapay zeka ve optimizasyon algoritmaları, otonom olarak şebekenin her noktasındaki şebeke durumlarına erişip onları optimal değerlerinde tutabilir; böylece enerji verimliliği ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırabilir [44]. Bu algoritmalar, sistemin optimal şebeke durumlarında kalmasını sağlayabilir (güvenilirlik); şebeke durumlarını analiz ederek öngörülerde bulunup (öngörülebilirlik) arıza şartları oluşmadan önce gereken tedbirleri otomatik olarak alabilir.

Günümüzde akıllı şebekelerden beklentiler sadece enerji paylaşım problemi ile sınırlı kalmamıştır. Yakın geleceğin akıllı şebeke projeksiyonları, yalnız enerjinin değil, haberleşme teknolojisi katmanı üzerinden veri paylaşımının sağlanmasını öngörmektedir. Bu beklenti, enerji ve bilginin aynı altyapı üzerinden paylaşıldığı daha kompakt ve tümleşik, daha interaktif bir gelecek vaat etmektedir. Bugünün bilgi paylaşım yöntemleri, geleceğin enerji paylaşım stratejilerine ilham olacaktır. Geleneksel olarak merkezi üreticilerden tüketicilere doğru olan statik ve tek yönlü enerji iletimi stratejisi, akıllı şebeke uygulamaları ile enerji paketlerinin şebekenin herhangi bir noktasında üretilebildiği, depolanabildiği ve paylaşılabilirdiği bir mimariye doğru evrilecektir. Sayısal veri haberleşmesinde veri paketlerinin iletimi gibi geleceğin akıllı şebekelerinde enerji paketleri iletimi sağlanabilecektir. Akıllı evlerin, akıllı araçların ve akıllı cihazların tamamının akıllı şebekenin bir atomik bileşeni haline dönüşmesi olası görülmektedir. Bu tez çalışmada enerji şebekesinin bu gelişimini destekleyebilecek şebeke mimarisi olarak hiyerarşik ağaç mimarisi incelenmiş ve sağladığı avantajlar tartışılmıştır.

Çizelge 2.1. Akıllı şebeke konusunda Avrupa’da çalışılan proje, platform ve girişimlerden örnekler [1]

Proje, Platform ve Girişimler	Hedefleri ve İlgili Sahaları
Avrupa Teknoloji Platformu (European Technology Platform)	Bu platform enerji kaynakları konusunda, 21. yüzyıl Avrupa’sında ekolojik, sosyal ve politik konulardaki taleplere cevap vermeye çalışmaktadır. Akıllı şebekeler konusunda kullanıcı merkezli (user-centric) servisleri ve yeni teknolojileri hayata geçirmeyi hedeflemektedir. Tepe talep tıraşlaması, enerji üretiminde atık azaltımı ve akıllı enerji uygulamalarının geliştirilmesi için üreticileri cesaretlendirmektedir. Hata izolasyonu ile kesintinin azaltılması, enerji dengesinin daha verimli sağlanması gibi konularda çalışmalar yürütmektedir.
Avrupa Elektrik Şebekesi Girişimleri (European Electricity Grid Initiative)	Avrupa bölgesinde geleceğin elektrik şebekesinin geliştirilme çalışmalarına ivme kazandırmayı amaçlar. Dağıtık üretim ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması, ulusal şebekenin market tabanlı ağa entegrasyonu, güç kalitesinin artırılması, aktif kullanıcıların markete katılımının sağlanması ve verimliliğin artırılması konularında çalışmalar yürütmektedir.
Avrupa Enerji Araştırma Ajansı (European Energy Research Alliance)	Yenilenebilir kaynakların ve yük yönetimi uygulamalarının yaygınlaştırılmasını, şebeke karalılığı ve güç kalitesini iyileştirmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması gibi konularında çalışmalar yürütmektedir. Enerji talep ve üretim dengesinin market tabanlı çözümleri, üretim tarafında güneş ve rüzgar enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması, talep tarafında ısı pompaları, akıllı cihazlar ve elektrikli araçların yönetimi konularında çalışmaları desteklemektedir.
NIST (National Institute of Standards and Technology) IEEE (Institute of Electric Electronics Engineering)	Akıllı şebeke teknolojileri ve uygulamaları büyük oranda NIST ve IEEE tarafından standardize edilmektedir.

Akıllı şebekeler konusunda projeksiyonlar ve pratik uygulamalar, ağırlıklı olarak Amerika’da ve Avrupa Birliği’nde çalışılan projeler ile gelişimini sürdürmektedir [1]. Çizelge 2.1’de, sürdürülen proje, platform ve girişimlerden örnekler verilmiştir. Bu örnekler, günümüzün, akıllı şebeke vizyonunu özetler

niteliktedir. Ayrıca, akıllı şebeke alanında yaklaşımlar ve mimariler Çizelge 2.2’de özetlenmiştir. Bu tez çalışmasında, tartışılan akıllı şebeke mimarisi Çizelge 2.2’de özetlenen yaklaşımlar ile uyumludur. Günümüz akıllı şebeke teknolojileri ve pratik uygulamaları, akıllı şebeke mimarisinin bu yönde geliştiğine işaret etmektedir. Akıllı şebeke çalışmalarında küresel ölçekte kabul gören tanımlamalar ve standardizasyonlar NIST ve IEEE tarafından ortaya konmaktadır. Çizelge 2.3’de bazı dikkate değer tanımlama ve standardizasyon örnekleri listelenmiştir.

Çizelge 2.2. Akıllı şebeke çalışmalarına konu olan yaklaşımlar ve mimariler [1]

Yaklaşımı ve Mimari	Açıklama
Dağıtık enerji kaynaklarının toplamsal üretimi (<i>Üretimin toplamsallığı</i>)	Bu yaklaşımda, büyük ölçekli merkezi üretim ve kontrol yerine, çok kaynaklı, değişken ölçekli ve çok lokasyonlu bir üretim ağının güvenli bir şekilde yönetimi hedeflenmiştir. Bu amaçla, sanal güç istasyonu (Virtual Power Plant) yaklaşımı geliştirilmiştir. Sanal güç istasyonu, bütün dağıtık üretim kaynaklarının, bir küme olarak tek bir sanal güç istasyonu ile temsil edilmesini ve yönetimini sağlar. Dağıtık üretim kümesinin, toplamsal tek bir kaynağa indirgenmesi mümkün olur. Böylece, dağıtık üreticilerden gelen üretim sinyalinin toplamı, tek bir sanal güç istasyonu ile modellenilebilir hale getirilir.
Tüketim tarafında aktif talep oluşturulması ve toplamsal talep yönetimi (<i>Talebin toplamsallığı</i>)	Bu yaklaşımda, tüketicilerin aktif olarak talep yönetimine katılmaları amaçlanmaktadır. Şebekenin toplam enerji talebi, tüketicilerden gelen talep sinyalinin toplamı ile kestirilebilir olması amaçlanmaktadır.
Aktif dağıtım şebekesi	Aktif dağıtım şebekesi, şebeke durumlarının gözlemlenebilir ve yönetilebilir olması prensibine dayanır. Üretim ve talebin şebeke durumlarına göre ayarlanabilmesi ölçüm, haberleşme ve kontrol kabiliyetlerinin şebekeye entegrasyonu ile sağlanabilir. Örneğin, lokal voltaj ve güç kalitesi ölçümleri, frekans kontrol yöntemleri, akıllı sayaçlar, uzaktan kontrol aygıtları, talep taraflı yük yönetim sistemleri vs. aktif dağıtım şebekesi için geliştirilen çözümlerden bazılarıdır.

Çizelge 2.3. Akıllı şebeke konusunda bazı tanımlama ve standardizasyonlar [2,20,39,71]

Enstitü	Konu
NIST (National Institute of Standards and Technology)	Akıllı şebekelerdeki kontrol ve yönetim sistemleri ağırlıklı olarak NIST tarafından standardize edilmektedir. NIST, Şekil 2.2’de görülen akıllı şebeke kavramsal modelini önermiştir [20].
IEEE (Institute of Electric Electronics Engineering) standardizasyon çalışmaları	Akıllı şebeke mimarisi ile ilgili bazı standartlar: IEEE C37.118.1; ölçüm tanımlama ve sınır değerleri [72] IEEE 802.11 ; Kablosuz Ağlar (Wi-Fi) haberleşme teknolojileri [58] IEEE 802.16; WiMAX, GPS,GPRS haberleşme teknolojileri [58] IEEE 802.15.4; ZigBee haberleşme teknolojileri [50] IEEE 2030-2011; Haberleşme sistemlerinin bağlantılandırılması ve akıllı şebeke entegrasyonları [58] IEEE Std. 929–2000 ve IEEE Std. 1547–2003; Dağıtık enerji üretim entegrasyonu [71]

2.2. Akıllı Şebekelerde Enerji Denge Durumu Tespiti

Akıllı şebekeler, dijital algılayıcı (sensör) ağları ve akıllı sayaçlar ile donatılmış, uzaktan ölçümlenme ve kontrol kabiliyetine sahip, dijital zekanın ve uygulamalarının iki yönlü enerji iletimine müsaade edebildiği bir teknoloji olarak; diğer bir ifade ile “enerji interneti” (energy web) olarak görülmeye başlanmıştır [58]. Bunun doğal bir sonucu olarak geleneksel şebekelerde merkezden tüketiciye doğru olan tek yönlü, planlı ve kestirilebilir enerji akışının yerini, akıllı şebekelerde anlık ihtiyaca ve değişen koşullara göre iki yönde serbest (özgür) enerji akışı alacaktır. Dolayısı ile sistem klasik anlamda planlanması zor bir şebekeye doğru evirilecektir. Çünkü, enerji talepleri ile enerji üretim kapasitesi anlık değişkenlik ve belirsizlik gösterecektir. Akıllı şebekelerin böylesine anlık değişen şebeke koşullarına uyumlu cevaplar verebilmesi ve şebeke durumlarını optimal çalışma bölgelerinde tutabilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, üretim ve tüketim belirsizliği gösteren ve anlık üretim tüketim dalgalanmalarının olağan görüldüğü yeni nesil dijital elektrik şebekelerinde (akıllı şebekelerde) korunması

gereken en temel ve kritik şebeke durumu enerji dengesi olacaktır. Burada enerji dengelemesi, şebekede enerji üretiminin enerji talebini en verimli ve güvenilir şekilde karşılayabilmesi durumu olarak tanımlanabilir. Enerji dengesi, üretim fazlalığı oluşturacak yönde bozulursa, aşırı üretim ve verimsizlik ortaya çıkar. Ancak enerji dengesi üretim yetersizliği yönünde bozulursa, bu aşırı yüklenme [58] adı verilen, anlık talebin karşılanamamasına bağlı olarak enerji kesintilerine kadar giden, sonuçları itibarı ile kısa vadede ciddi ekonomik ve sosyal zararlara (hizmetlerin aksaması, sistemlerin çökmesi ve kapanması) yol açan bir duruma dönüşür. Bu nedenle sistemin enerji dengesinin, enerji yetersizliği yönünde bozulmasına kesinlikle izin verilmelidir. Enerji yetersizliği durumu, enerji güvenilirliğini ciddi ölçüde düşüren bir durumdur.

Akıllı şebekelerde enerji dengesinin izlenebilmesi için iki yöntem ön plana çıkmıştır. Bunlardan birincisi bilgi teknolojileri dayalı enerji denge durumu tahminidir. Bu yöntemde geniş alan yönetim merkezleri [49,61] dağıtık ölçümleme ve akıllı sayaçlar ile anlık tüketim ve üretim verilerine haberleşme ağları üzerinden erişip [31,58,73] yerel ve global ölçekte enerji denge durumu tahmini yapabilir. Denge hatası, toplam talebin toplam üretimden farkı ile tahmin edilir. Bu yöntemin doğruluğu, haberleşme ve ölçümleme sistemlerinin, güç sistemleri katmanında yaygınlığı ve erişebilirliği ile orantılıdır. Erişilemeyen ve veri toplanamayan güç üretim ve tüketim cihazları tahmin hatası getirir. Denge durum tahmininin doğruluğu yanında, tahmin için gereken sürede dengenin korunabilmesi de önem taşır. Denge hatası tahmin süresindeki artış, tahminin güncelliğini kaybetmesine ve dengeyi korumak için verilecek reaksiyon ve operasyonların gecikmesine yol açabilir. Tahmin süresi, erişilmesi gereken cihaz sayısı ve erişim hızına bağlı olarak değişir [30].

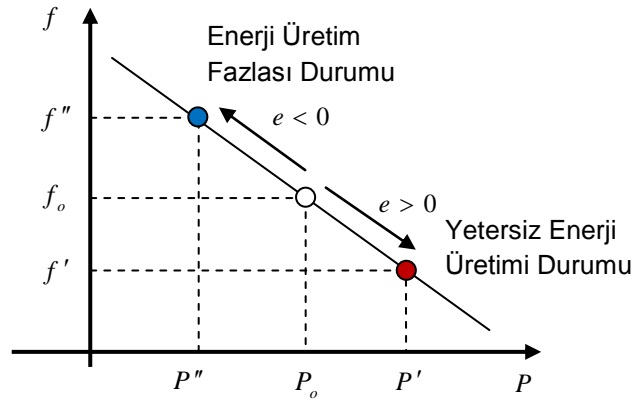
Diğer bir yöntemde, enerji denge durumunun doğrudan şebekenin elektriksel parametrelerinin ölçülmesi ile denge durumu kestirimine dayanır. Bu yöntem, bilgi teknolojilerine dayalı yöntemlere göre daha hızlı ve güvenilir denge hatası kestirimine imkân verebilir. Örneğin, alternatif akım (AC) dağıtım şebekeleri için aktif güç-frekans karakteristikleri kullanılabilir. Çünkü, şebekede oluşan aktif güç dengesizliği, AC işaretinin nominal frekansında sapmalar olarak kendini göstermektedir. Aktif güç frekans ilişkisi şu bağıntı ile karakterize edilmektedir [58,74].

$$f' = f_0 - K''(P' - P_0) \quad (2.1)$$

Bu bağıntıda, f_0 nominal AC şebeke frekansını ve P_0 ise denge durumu yükün aktif gücünü gösterir. Burada K'' düşme sabitidir ve güç talebinin değişmesi durumunda eğer yeterli güç sağlanmaz ise şebekenin AC frekansının Şekil 2.3'de temsil edildiği gibi düşmesini karakterize etmektedir. Şebeke nominal frekansı f_0 genellikle 50 veya 60 Hz'dir. Nominal çalışma frekansında anlık küçük sapmalar $\Delta f = f_0 - f'$ ile ifade edilebilirse, şebekenin herhangi bir noktasından ölçülen şebeke frekansı $f'(t)$ için, enerji denge hatası,

$$e(t) = \eta (P' - P_0) = \eta \Delta f(t) / K'' \quad (2.2)$$

bağıntısı ile tahmin edilebilir. Burada enerji denge hatasının, nominal güç talebinden sapma miktarı ile doğru orantılı olacağı $e \propto (P' - P_0)$ varsayılmıştır. η hata ölçekleme katsayısıdır ve hatanın genliğini ayarlamak için kullanılabilir. Kazanca ihtiyaç duyulmadığı durumlarda $\eta = 1$ alınmalıdır. Gerçek sistemlerde, aktif güç frekans ilişkisi bir çalışma noktası yakın civarında, Denklem (2.1) ile ifade edildiği gibi lineer kabul edilebilir. Şekil 2.3'de görüldüğü üzere, enerji denge hatasının negatif olduğu durum ($e < 0$), AC şebekelerde talep edilenden fazla güç üretildiğine işaret eder. Enerji üretimi azaltılabilir. Ancak, enerji denge hatasının pozitif olduğu durumda ($e > 0$), güç yetersizliği söz konusudur ve enerji üretimi artırılmalıdır.



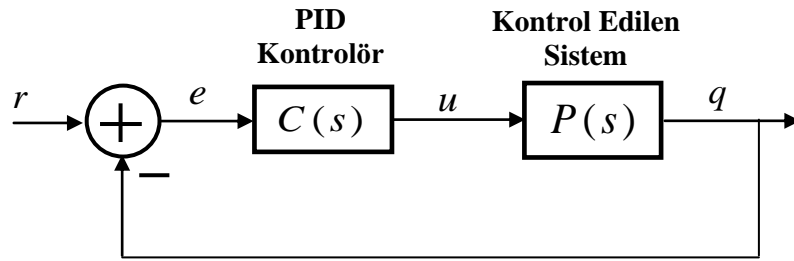
Şekil 2.3. Jeneratörle beslenen bir AC şebekede aktif güç-frekans karakteristiği

2.3. Kapalı Çevrim PID Kontrol Sistemleri

Tarihçesi, 1922'lere kadar uzanan PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolör, akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan en basit ve temel kapalı çevrim kontrolör yapısıdır [75]. Bir kazanç, bir türev ve bir de integral alıcı devreden oluşan temel PID kontrolör yapısının, kararlı çalışabilmesi ve istenen kontrol performansını verebilmesi için birçok akademik çalışma yürütülmüştür [76-79]. PID kontrolörün transfer fonksiyonu,

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (2.3)$$

denklemleri ile ifade edilmiştir [76-77]. Burada, k_p , k_i ve k_d PID kontrolörün kazanç katsayılarıdır. PID kontrolörler, genellikle Şekil 2.4'de görülen negatif geri beslemeli kapalı çevrim kontrol sisteminde kontrolör olarak kullanılır. Bu sistemde, kontrol edilen $P(s)$ sisteminin çıkışı olan $q(t)$ 'nin referans giriş işareti olan $r(t)$ 'yi takip etmesi hedeflenir. Burada, PID kontrolör'ün ürettiği kontrol işareti $u(t)$, negatif geri besleme hatası $e(t) = r(t) - q(t)$ 'nin arzu edilen bir şekilde zamanla sifıra gitmesini sağlar. Negatif geri besleme hatasının, zamana bağlı olarak asimptotik olarak sifıra gitmesi, diğer bir ifade ile $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ koşulunun sağlanması, sistemin kontrol edilebildiğini ve kontrol edilen sistem çıkışının referans işarete zamanla yakınsadığını gösterir.



Şekil 2.4. Birim negatif geri beslemeli kapalı çevrim PID kontrol sistemi

Kesir dereceli aritmetik, sıklıkla mühendislik ve bilimsel problemlerin çözümünde uygulanmaya başlamıştır. Son yıllarda, kontrol mühendisliği

sahasında, kesir dereceli PID kontrolör uygulamaları üzerinde çalışmalar yoğunlaşmış [80,81] ve kesir dereceli türev ve integral alıcının kontrol performansını iyileştirebildiği gösterilmiştir [82,83,84]. Kesir dereceli PID kontrolörün transfer fonksiyonu en genel formda,

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s^\lambda} + k_d s^\mu \quad (2.4)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir [80,81]. Bu denklemlerde, λ parametresi integral alıcının kesir derecesidir. μ parametresi, türev alıcının kesir derecesidir.

Kesir dereceli aritmetiğe temel teşkil etmiş olan, $\alpha \in R$ için kesir dereceli türev operatörü aşağıdaki formda tanımlanmıştır [83-86].

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \alpha > 0 \\ 1 & \alpha = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{(-\alpha)} & \alpha < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Burada, $\alpha < 0$ durumunda, a değerinden t kadar kesir dereceli integral işlemi tanımlanır. $\alpha > 0$ durumu ise kesir dereceli türevi tanımlar. Kesir dereceli türev işlemi için, yaygın olarak kabul gören Caputo tanımı,

$${}_a D_t^\alpha = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^n(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau, \quad n-1 \leq \alpha < n, \quad (2.6)$$

ile ifade edilmiştir [85,86]. Burada, $\Gamma(\cdot)$ gamma fonksiyonunu temsil eder. Caputo tanımının, sistem modelleme ve kontrol uygulamaları açısından en önemli özelliği, kesir dereceli türevin Laplace dönüşümünün,

$$\int_0^\infty e^{-st} {}_0 D_t^\alpha f(t) dt = s^\alpha F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{\alpha-k-1} f^{(k)}(0) \quad (2.7)$$

olarak elde edilebilmesidir. Bu denklem, $f(0) = f^{(1)}(0) = f^{(2)}(0) = f^{(3)}(0) = \dots = f^{(n-1)}(0) = 0$ koşulu altında, $L\{D^\alpha f(t)\} = s^\alpha F(s)$ ifadesinin geçerli olmasını sağlar [86].

Denklem (2.4) ile ifade edilebilen kesir dereceli PID kontrolör transfer fonksiyonu, bu özellikten istifade edilerek yazılmıştır.

Kesir dereceli PID kontrolörlerin, kontrol performansını iyileştirebilme avantajına rağmen bu kontrolörlerin pratik gerçekleştirilmesi ve ayarlanması, klasik PID yapılarına göre çok daha zordur. Bunun başlıca nedeni, “uzun süreli bellek” (long-term memory) etkisi olarak adlandırılan, Denklem (2.6) ile ifade edilen Caputo tanımından da görüldüğü üzere, türev işleminin, fonksiyonun zamanın sıfır anına kadar uzanan değerlerine olan bağımlılığıdır. Bu etkinin, s^α ’nın hesaplanmasında, zorluklar getirmesi nedeni ile s^α gibi kesir dereceli türev terimlerinin gerçekleştirilmesinde, nispeten daha kolay olan tamsayı dereceli yaklaşık modeller kullanılmıştır [87,88]. Bu tez çalışmasında, kesir dereceli PI kontrolörlerin simülasyon modelini elde etmek için sürekli kesir genişletme (Continued Fraction Expansion - CFE) yöntemi ile s^α terimlerinin 4. derece tamsayı yaklaşık eşdeğer modelleri kullanılmıştır. Buna göre s^α teriminin $-1 < \alpha < 1$ aralığında yaklaşık tamsayı eşdeğer modeli,

$$s^\alpha \cong \frac{(\alpha^4 + 10\alpha^3 + 35\alpha^2 + 50\alpha + 24)s^4 + (-4\alpha^4 - 20\alpha^3 + 40\alpha^2 + 320\alpha + 384)s^3 + (6\alpha^4 - 150\alpha^2 + 864)s^2 + (-4\alpha^4 + 20\alpha^3 + 40\alpha^2 - 320\alpha + 384)s + (\alpha^4 - 10\alpha^3 + 35\alpha^2 - 50\alpha + 24)}{(\alpha^4 - 10\alpha^3 + 35\alpha^2 - 50\alpha + 24)s^4 + (-4\alpha^4 + 20\alpha^3 + 40\alpha^2 - 320\alpha + 384)s^3 + (6\alpha^4 - 150\alpha^2 + 864)s^2 + (-4\alpha^4 - 20\alpha^3 + 40\alpha^2 + 320\alpha + 384)s + (\alpha^4 + 10\alpha^3 + 35\alpha^2 + 50\alpha + 24)} \quad (2.8)$$

olarak ifade edilmiştir [89-92]. Burada CFE yöntemi, s^α terimlerinin yeterli derecede yaklaşık eşdeğerlerini üretebilmesi nedeni ile tercih edilmiştir [91]. EK-4’de CFE metodu ile elde edilen s^α yaklaşık modelleri sunulmuştur.

2.4. Ağaç Topolojisi

Ağaç topolojisine dayalı elektrik devre analizleri Alman fizikçi Gustav Kirchhoff tarafından 1847’de sunulmuştur [93]. Ancak, ‘Ağaç’ kelimesi, ağaç topolojisine dair bazı yapısal tanımlamalar {kök (root), dallar (branch)} ve bunları bir teoreme kavuşturma çabası matematikçi Arthur Cayley tarafından gösterilmiştir [94]. Ağaç yapısının bağlantısal (connectivity) ve yapısal (structural) özellikleri matematikte, graf teorisi (Graph Theory) altında incelenmiştir [95]. Mühendislikte, graflar özellikle çok düğüm noktalı ve bağlantılı akış problemlerinde, akış diyagramlarına dayalı sistemlerin

analizlerinde yaygın uygulama sahası bulmuştur. Özellikle haberleşme sahasında ağaç topoloji temel ve önemli bir ağ mimarisi olarak kabul görmüş ve haberleşme sistemlerinin planlaması ve yönetiminde pratik çözümler sunmuştur [96].

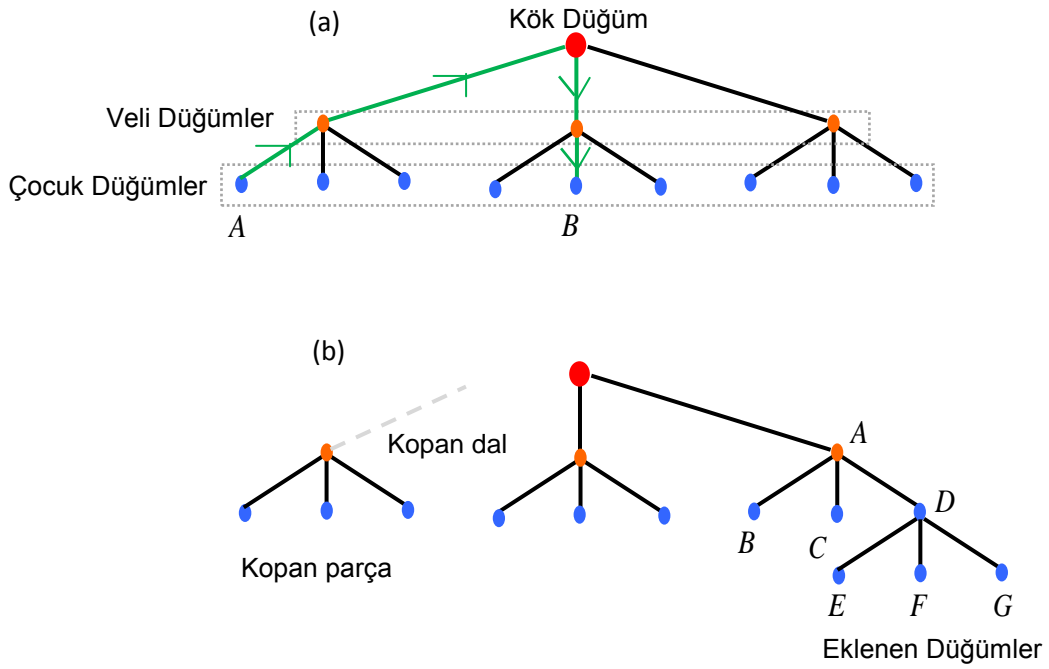
Ağaç topolojisinin temel özellikleri şöyle özetlenebilir:

(i) Çevrimsiz (acyclic) ve tamamen bağlantılı (fully connected) temel bir graf'dır. [95]. Diğer bir ifade ile, kapalı çevrim içermezler ve her düğüme mutlaka bir bağlantı ulaşır. Bu özellik, Şekil 2.5(a)'da görüldüğü üzere ağaç topolojisinde bir düğümden başka bir düğüme sadece tek bir yolla ulaşılabilmesini sağlar. Örneğin Düğüm A'dan B'ye 4 dal (3 düğüm) uzaklığında tek bir yol bulunur. Düğümden düğüme tek bir yol tanımlanması, ağaç mimarisine sahip sistemlerde, adresleme ve akış yönlendirme (routing) işlevlerini önemli ölçüde kolaylaştırır. Bu nedenle, çok miktarda kullanıcının bulunduğu veya noktadan-noktaya yoğun haberleşmenin olduğu durumlarda (LAN) yaygın kullanım bulur.

(ii) Ağaç yapısı ölçeklenebilir (scalable) ve gelişime açık bir topoloji sunar [97]. Ölçeklenebilirlik (scalability), sistemin veya işlevin artan sistem durumlarına cevap verebilme kabiliyetidir. Sistemlerin genişleme veya küçülme durumlarına uyumluluğu, yapısal ölçeklenebilirlik olarak da adlandırılabilir [98]. Bir ağaç yapısının parçalanması veya parçalanmış ağaç yapılarının birleştirilmesi bu yapının ağaç topolojisi özelliğini kaybettirmez ve sistemin bu topolojiye has işlevselliğini bozamaz. Diğer bir ifade ile Şekil 2.5(b)'de görüldüğü üzere yapıdan koparılan bir dala bağlı düğümler yine ağaç yapısı özelliği gösterir ya da yapıya eklenen bir dal ağaç yapısını kolaylıkla genişletebilir. Ağaç topolojisinin genişlemesi ve parçalanması kolaydır. Sistemin bir kesiti için tanımlanmış işlevler ve kavramlar diğer kesitler içinde geçelidir. Bu mimariye sahip sistemler kendini tekrar eden fraktal bir tarzda büyüme kabiliyeti sergileyebilirler. Bu özellikler ağaç yapısına sahip sistemleri modüler ve gelişime açık kılar.

(iii) Bir kök düğümünden itibaren başlayan büyüme, kök düğümüne, dal uzaklıklarına bağlı olarak ilişkisel katmanlar oluşturur. Bu katmanlar, yapının kronolojik gelişimin tarihçesini gösterebilir ve düğümler arasındaki dal uzaklıkları ilişkiler ailesi tanımlayabilir. Çevrimsizlik özelliğinden dolayı düğümden düğüme tek bir yolun bulunması yapı içinde düğümler arasındaki uzaklıkların tekil olarak tanımlanabilmesine imkân sağlar. Bu tekillik, ağaç topolojisinin düğümleri arasında, dal uzaklıkları ile ifade edilebilen mesafe ilişkilerinin

tanımlanabilmesine imkân verir. Bu sistem yönetimini ve analizini basitleştiren önemli bir özelliktir. Örneğin, ağaç topolojine sahip şebekelerde noktadan noktaya mesafeye bağımlı olan iletim kayıpları kolaylıkla ifade edilebilmektedir. Oysa ki, çevrimli (cyclic) topolojilerde, dal uzaklığına bağlı ilişkiler tekil tanımlanamaz. Bu nedenle çevrimli topolojilerde düğümler arasında uzaklıklar tekil değildir. Bu şebeke yönetimi ve analizlerini karmaşıklaştıran bir faktördür.



Şekil 2.5 (a) Ağaç topolojisi, noktadan noktaya tek bir iletim yolu ve düğümler arasında aile ilişkisi tanımlar. (b) Burada, ağaç topolojisinin ölçeklenebilirliği ve gelişebilirliği örneklenmiştir. Dal kopması ile iki ayrı ağaç yapısının oluşması ve D düğümüne yeni düğümlerin {E,F,G} eklenmesi ile ağaç yapısının gelişimi görülmektedir

(iv) Ağaç topolojisi aile ilişkileri (family relation) tanımlamaya elverişlidir. Ağaç topolojisinde kök düğümden itibaren her düğüm, kendinden türeyen bütün düğümlerin velisidir (parent). Alt düğümlere erişim, velisi olan düğümlerden sağlanabilir. Bu durum Şekil 2.5(b)'de gösterildiği üzere ağaç hiyerarşisinde, velisi olduğu düğüm ailesi ile tanımlanan bir erişim kümesi tanımlanabilmesine imkan sağlar. Örneğin, Şekil 2.5(b)'de düğüm A, $Aile(A)=\{B,C,D,E,F,G\}$ kümesi ile tanımlanan düğüm ailesinin velisidir. Diğer taraftan, düğüm D ise $Aile(D)=\{E,F,G\}$ kümesi ile tanımlanan düğüm ailesinin velisidir. B düğümüne

erişim velisi olan A düğümünden sağlanırken, G düğümüne erişim velileri olan D ve A düğümlerinden sağlanır. Çünkü, $Aile(A) \supset Aile(D)$. Aile ilişkileri özelliği gelecek bölümlerde tartışılacak olan ağaç topolojisine sahip akıllı şebeke sistem durumlarının lokalden globale her ölçekte gözlemlenebilirliğini sağlamıştır.

Çevrimsiz ve tamamen bağlantılı (connected) [95] akış sunan ağaç yapısı topolojisi, bilgisayar ağlarında ve veri madenciliğinde kullanım bulmuştur. Ağaç topolojisi, basit yıldız topolojilerinin hiyerarşik bir birleşimidir [99]. Noktadan noktaya tek bir yol olması, ağın yönetimini kolaylaştırır ve yapıyı modüler kılar. Ağda yapısal revizyona ihtiyaç duyulmadan, mevcut yapı üzerinde kolaylıkla kullanıcı eklenebilir ya da çıkarılabilir. Kesinti durumunda, arızanın tespiti kolaydır. Kesintiye maruz kalan kullanıcı grubunu analiz ederek, arızalı bağlantı kolaylıkla tespit edilebilir. Sistemin herhangi bir parçası kolaylıkla sistemden koparılıp, sistemin başka bir noktasına eklenilebilir. Bu avantajlarından dolayı, bilgisayar ağlarında kullanıcıların yoğunlaştığı kenar bölgelerde yaygın olarak ağaç yapısı topolojileri kullanılır. Ancak ağaç topolojisine sahip bir bilgisayar ağında, bir bağlantının kopmasının mutlaka en az bir kullanıcının iletişiminin kesilmesine yol açması, bu mimari için bir zayıflık olarak görülmektedir. Karmaşık (mesh) veya halka (ring) topolojileri bu anlamda daha avantajlıdır. Çünkü, bu topolojilerde bir bağlantının kopmuş olması mutlaka en az bir kullanıcının iletişiminin kesilmesi anlamına gelmez.

Veri madenciliği uygulamalarında, genellikle ağaç topolojisinin adresleme ve yönlendirme kolaylığından istifade edilmektedir. Ağaç topolojisinin sağladığı akrabalık ilişkileri, veri yapılarında, verilere erişimi ve verilerin tasniflerini kolaylaştırır. Bu veritabanlarında veri erişim hızını artırmak için önemlidir. Araştırma ağaçları (search trees), veri madenciliğinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. (Ek 1'de ağaç yapısına göre tasarımı yapılan bir veri yapısı örneği incelenmiştir.)

Bu tez çalışmasında, ağaç topolojisinin avantajları ve sağlayabileceği yönetsel kolaylıklar enerji akışı problemi açısından değerlendirilmiştir. Ağaç topolojine sahip enerji şebekesinde, dallar iletim hattını, düğümler ise yönlendirme noktalarını temsil edecektir. Ağaç topolojisinin aile ilişkileri ve noktadan noktaya tekil uzaklık tanımlama özellikleri şebekenin yönetimi ve analizi açısından önemli kolaylıklar sağlayabileceği görülmüştür.

2.5. Zamanla Değişen Elektrik Fiyatlandırması

Zamanla değişen elektrik fiyatlaması (time varying electricity pricing), talep taraflı yük yönetiminde ve dolayısı ile talep esnekliği oluşturulmasında çok önemli bir role sahiptir [18]. Gelişen koşullara göre değişebilen elektrik fiyatlaması, verimli elektrik enerjisi depolamasının teknolojik zorluklar içermesi ve masraflı olması nedeni ile üretilen elektriğin uygun fiyatlara çekilmesi ile kullanımını teşvik eder. Böylece enerji üretim verimliliğini artırır ve elektrik fiyatlarına düşen yönde etki eder [32]. Ayrıca üretim tüketim dengesinin korunmasında etkin bir şekilde kullanılır. Dinamik fiyatlamının başarısı, son kullanıcı olan tüketicilerin fiyat karşısında taleplerini ayarlayabilme kapasitelerine, diğer bir ifade ile şebekenin talep esnekliğine bağlıdır [33]. En popüler zamanla değişen fiyatlama yöntemleri şunlardır:

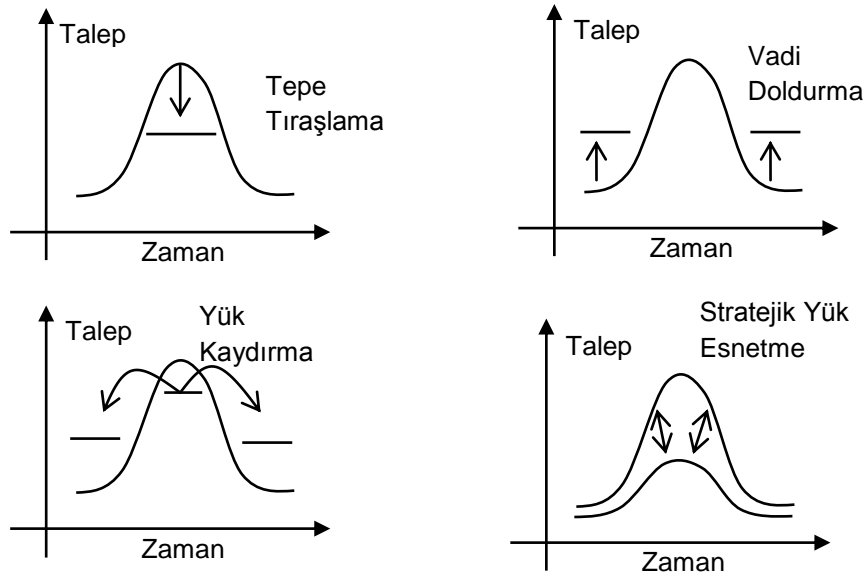
(i) Kullanma zamanı fiyatlaması (Time-of-use pricing): Bu yöntemde elektrik fiyatları zaman dilimlerine göre fiyatlandırılır ve bu fiyatlar önceden tüketiciye ilan edilir. Böylece, tüketicinin talep planlamasını yapabilmesi sağlanır. Geçmiş tüketim verileri ve bugünkü koşullar birlikte değerlendirilerek geleceğe dair talep ve üretim tahminlerinin mümkün olduğunca iyi yapılması doğru fiyatlama yapılabilmesi için önemlidir. Yaygın olarak mevsimsel olarak 24 saatlik elektrik tarifeleri belirlenir. Bu tarifelendirmede, zaman dilimlerine göre fiyatlar önceden belirlendiği için tüketiciler açısından, özellikle yük kaydırma (load shifting) işlemleri açısından kolaylık sağlar [33].

(ii) Kritik tepe fiyatlaması (Critical peak pricing): Bu yöntemde, talep tepesi oluşmadığı zamanlarda düşük bir elektrik fiyatlaması uygulanır. Ancak talebin çok yüksek düzeye ulaştığı kritik talep tepelerinde elektrik fiyatı yüksek tarifieden uygulanmaya başlanır [33]. Kritik tepe fiyatlamasının amacı, aşırı talep durumunda sistemin enerji dengesinin korunabilmesi için talebin makul düzeylere geriletilmesinin sağlanmasıdır.

(iii) Gerçek zamanlı fiyatlama (Real time pricing): Gerçek zamanlı fiyatlama dinamik fiyatlama olarak da adlandırılır. Elektrik fiyatı, anlık olarak o anki koşullara bağlı olarak belirlenir. Günümüzde, çoğunlukla saatlik olarak belirlenen dinamik elektrik fiyatlarına, gerçek zamanlı fiyat anlaşması yapan tüketici

birimleri cevap verebilmektedir. Ancak yakın gelecekte, akıllı şebeke talep taraflı yük yönetim uygulamalarının yaygınlaşması ile anlık fiyat değişim sinyallerine tüketiciler yeterince hızlı ve optimal cevap verebilecek akıllı sistemlere sahip olabileceklerdir. Talep tarafında dağıtık olarak çalışan bu sistemlerde, yapay zeka ve optimizasyon yöntemleri [31,40] veya ajan tabanlı uygulamalar [15,36] ile talep esnekliğinin optimal düzeyde sağlanmasına dönük çalışmalar sürmektedir. Dinamik fiyatlandırma, aynı zamanda üretim kapasitesinin yönetimi ve elastikiyeti içinde kullanılabilir [35]. Bu nedenle, optimal enerji dengesinin sürdürülmesinde, dinamik fiyatlandırma uygulamalarının önemli rolü olacaktır.

Zamanla değişen elektrik fiyatlandırması, günümüzde talep profillerinin düzleştirilmesinde öneme sahiptir [33]. Bu amaçla yapılan operasyonlar, talep taraflı yönetim uygulamaları olarak adlandırılmıştır. Talep profillerinin düzleştirilmesi için yapılan talep taraflı operasyonların başlıcaları, tepe tıraşlama, yük kaydırma, yük esnetme ve vadi doldurma operasyonları [18] Şekil 2.6'da temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Talep taraflı yük yönetim uygulamalarının toplam güç profiline etkileri [18]

Literatürde dinamik fiyatlandırma yöntemleri konusunda yapılan çalışmalarda, elektrik fiyatlandırması genellikle kar maksimizasyonu hedefleyen ekonomik argümanlara dayanan optimizasyon problemleri olarak görülmüştür. Örneğin, bir

çalışmada enerji perakendecilerinin karlarının (retailer profits) maksimizasyonunu hedefleyen ve lineer olmayan programlama tekniğini kullanan yük azaltma çözümleri önerilmiştir [35]. Diğer bir çalışmada, enerji fiyatlaması perakende enerji sağlayıcı firmaların karlılığını artırılması ve müşteri talep cevaplarının iyileştirilmesini hedefleyen ekonomik optimizasyon problemi olarak tanımlanmış ve Q-eğitim (Q-learning) yöntemini kullanan ajan tabanlı çözümler geliştirilmiştir [36]. Bu tez çalışmasında, kapalı çevrim üretim kontrolü yaklaşımı uygulanmış; enerji üretim ve talebinin dengelendiği optimal fiyat noktası takibini sağlayan market yönetimi tabanlı dinamik enerji fiyatlaması analiz edilmiştir. Konu, ekonomik karlılık probleminden ziyade akıllı şebeke enerji güvenilirliği için enerji dengesinin korunmasına dönük fiyat kontrol problemi olarak ele alınmıştır. Bu amaçla kesir dereceli PI kontrolör ile dinamik elektrik fiyatlamasının şebeke enerji dengesini korumak üzere oluşturulabileceği gösterilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Üretken-Tüketicilerin Bulunduğu Hiyerarşik Ağaç Mimarisine Sahip Akıllı Şebekelerin Analizi

Bu bölümde, üretim ve tüketim belirsizliği gösteren üretken tüketicilere sahip akıllı şebekelerin etkin yönetimi için hiyerarşik ağaç topolojisine sahip enerji dağıtım şebeke mimarisi incelenmiş ve bu şebeke mimarisi için enerji dengeleme problemi analizleri yapılmıştır. Yüksek düzeyde üretim ve tüketim belirsizliği koşullarında çalışabilmesi beklenen ağaç mimarisine sahip akıllı şebekenin rastgele üretken tüketici modelleri yardımı ile nümerik analizleri yapılmıştır.

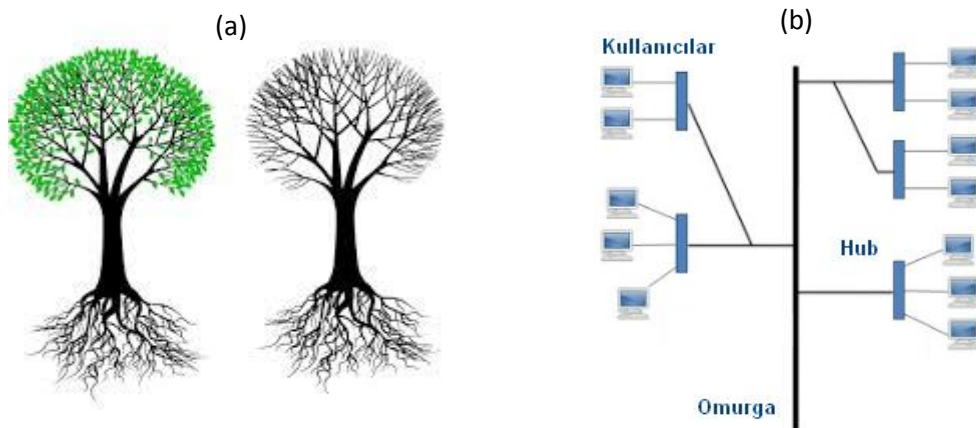
3.1.1. Üretken Tüketici Modeli

Üretken tüketici (prosumer) kavramı, şebekede tüketici durumda olan yapıların herhangi bir anda enerji üreticisi haline dönüşebildikleri durum için önerilmiştir [13]. Geleneksel elektrik şebekelerinde, üreticiler ile tüketiciler statiktir ve güç akış yönleri tek yönlüdür. Bu nedenle, genelde güç akış yönleri anlık olarak rastgele değişimler göstermez. Enerji akış yönleri, yüksek güçlü üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine doğrudur. Bu nedenle şebeke planlaması, belirlenmiş bir üretim kapasitesi ve öngörülmuş yük miktarları için sistemin belirli bir vadeye kadar hizmet verebilmesi için yapılabilir. Şebeke esnekliği zayıf olan bu türden statik enerji dağıtım şebekelerinde, belirsizlikler ve öngörülemediği değişimler bir sorun olarak görülür. Oysa ki geleceğin akıllı şebekeleri dinamik yapıdadır. Dolayısı ile değişen koşullara optimal şebeke cevaplarının zamanında verilebilmesi sistemin normal çalışma durumudur. Bu dinamizm ve elastikiyet, üretim kapasitesindeki veya talepteki anlık değişimlere cevap verebilmesini sağlar, böylece üretken tüketici abone modelinin sisteme entegrasyonuna imkân verir.

Yük akış yönlerinin, mikro ya da makro ölçeklerde anlık ve rastgele değişkenlikler gösterebildiği şebeke koşullarında, şebeke durumlarının optimal marjları içinde kalabilmesi ve enerji arz-talep dengesinin (enerji dengesinin) sürekli korunması gerekmektedir. Aksi halde, bu durum nominal şebeke

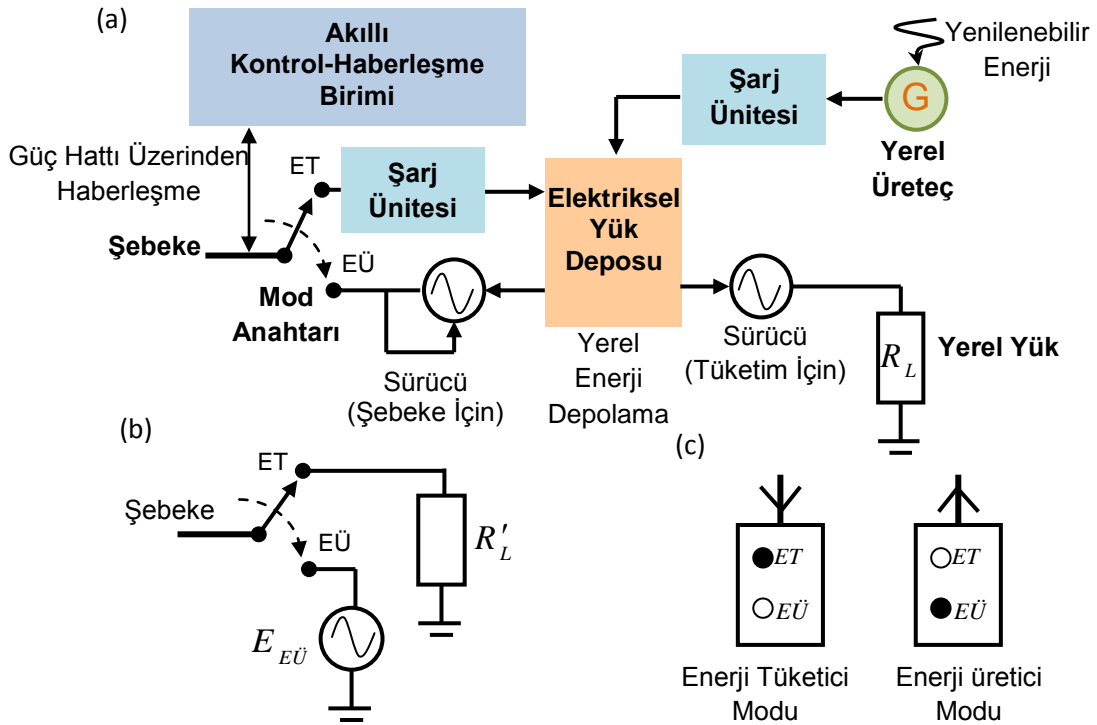
durumlarının çöküşüne, sistem hatalarının ve hasarlarının oluşumuna yol açabilir. Bu nedenle üretken tüketicilerin bulunduğu belirsizlik gösteren dinamik bir dağıtım şebekesinde, enerji dengesinin korunabilmesi için şebeke yapısının gözlemlenebilir ve yönetilebilir bir mimaride inşa edilmesi gerekmektedir. Diğer önemli bir husus, şebeke mimarisi aynı zamanda modüler bir yapıda olmalı, yani genişlemeye açık olmalıdır. Sisteme eklenen yeni yapıların ve yeni cihazların mevcut çalışma durumlarını olumsuz etkilememesi gerekmektedir.

Bu özelliklere sahip başarılı bir enerji dağıtım ağı mimarisini, hali hazırda doğada canlı metabolizmalarında görmek mümkündür. Canlıların dolaşım sistemleri, hem üretim hem de tüketim gerçekleştiren hücreler veya dokular arasındaki etkileşimleri ve paylaşımları ağaç mimarine benzer iletim ve taşıma kanalları vasıtası ile gerçekleştirebilmiştir. Ağaç yapısı mimarisinin teknolojiye uygulaması veri haberleşmesinde gerçekleşmiştir. TCP/IP tabanlı lokal alan ağlarında, yönetim kolaylığı ve ölçeklenebilirlik özelliği nedeni ile ağaç topolojisi kullanmıştır. Şekil 3.1’de doğadan ve lokal alan ağ teknolojiden ağaç yapısı mimarileri için örnekler görülmektedir. Bu örnekler, hiyerarşik ağaç mimarisine sahip şebeke yapısının, üretken tüketicilerin bulunduğu dinamik bir şebekenin ihtiyaçlarına cevap verebilme potansiyeline sahip bir dağıtım mimarisi sunabileceği hususunda bu tez çalışmasına ilham kaynağı olmuştur. Bu çalışması, ağaç topolojinin enerji denge durumlarını hiyerarşik olarak her katmanda gözlemlenebilir kıldığı göstermiştir.



Şekil 3.1. (a) Doğada ağaç mimarisine benzer dağıtım ağına sahip canlı, (b) Teknolojide ağaç topolojisine sahip iletişim ağı

Şekil 3.2’de en genel formda üreten tüketicilerin elektriksel işlevleri, basitleştirilmiş eşdeğer devre şeması ve şematik sembolü gösterilmiştir. Bu modele göre üretken tüketici abonelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim sistemlerine, enerji depolama sistemlerine (elektriksel yük deposu), şarj ünitelerine ve sürücü devrelere sahip olduğu varsayılmaktadır. Kontrol ve haberleşme işlevleri, bir akıllı kontrol-haberleşme birimi tarafından yürütülmelidir. Bu birim günümüzde akıllı sayaçlar olarak gündeme gelmiştir. Akıllı sayaçların kontrol-haberleşme işlevlerini yerine getirebilmesi için programlanabilir, data haberleşmesi gerçekleştirebilir, güç sisteminde ölçümlere ve kontrol işlemleri yapabilir donanım ve kabiliyetlere sahip tasarlanmaları gerekmektedir. Yalnız abone verileri ve durumlarına erişim değil, aynı zamanda talep taraflı yük yönetimi uygulamaları, dağıtık kontrol, optimizasyon ve yapay zeka uygulamaları akıllı sayaçlar ile hayata geçirilebilecektir. Şekil 3.2’de görülen kullanıcı mod anahtarı, abonenin tüketici (enerji talep eden) ya da üretici (enerji sağlayan) durumdan birinde bulunmasını sağlamaktadır ve akıllı kontrol-haberleşme birimi tarafından yönetilmektedir.



Şekil 3.2. (a) Üretken tüketicilerin fonksiyonel modeli (b) Üretken tüketicilerin sadeleştirilmiş eşdeğer devre modeli (c) Üretken tüketicilerin sembolik gösterimi

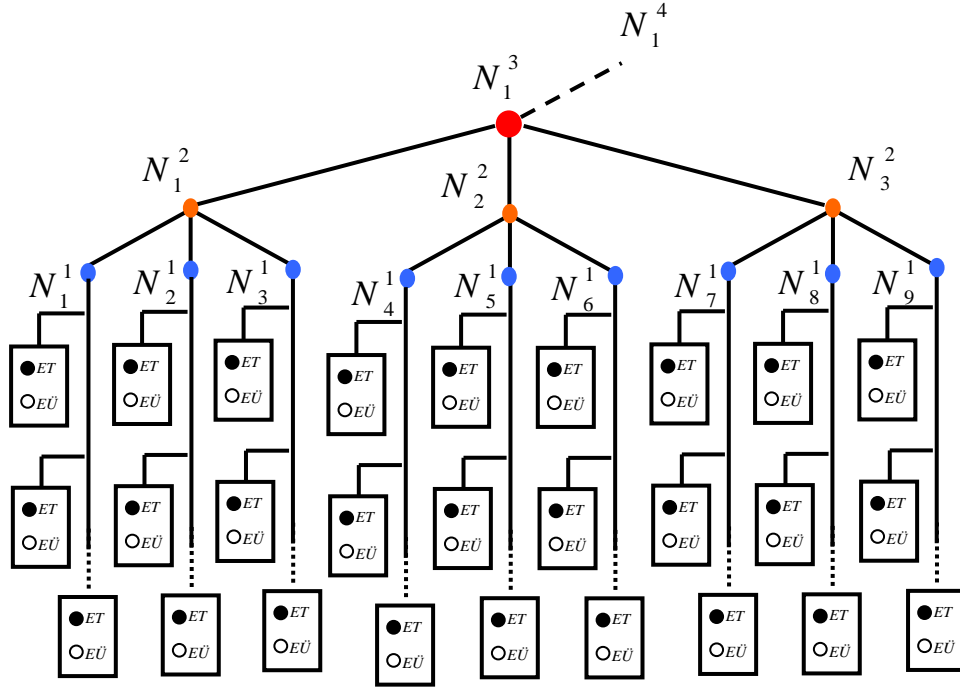
3.1.2. Hiyerarşik Ağaç Mimarisine Sahip Şebekelerin Özellikleri

Ağaç topolojisinin çevrimsizlik, ölçeklenebilirlik ve aile ilişkisi tanımlama gibi temel özellikleri hiyerarşik ağaç mimarisine uygun inşa edilen enerji dağıtım şebekelerinin üretken tüketicilerin bulunduğu dinamik şebeke koşullarında yönetimini ve işleyişini kolaylaştırmaktadır. Bu mimari esin kaynağını biyolojik sistemlerden almıştır. Ağaç mimarisi yüksek karmaşığa sahip, gelişime açık, değişen koşullara belli ölçülerde adapte olabilme kabiliyeti sergileyebilen biyolojik yapılarda metabolizmanın dengesinin korunmasında önemli rol oynamaktadır. Metabolik enerji dengesi canlılığın devamı için sürdürülmesi gereken bir faaliyettir [25]. Doğada, sağlıklı biyolojik yapılarda gerçekleştirilen sürekli ve verimli enerji paylaşımı, ağaç yapısına benzer metabolik ağlarda başarı ile yürütülmektedir. Böylece, metabolizmanın her zaman dengeli durumda kalabilmesi sağlanmaktadır. Biyolojik sistemlerde, üretim ve tüketim mekanizmaları tümleşik olabilmektedir ve yapı içerisine dağıtık durumdadır. Ancak, bu yapılar ağaç topolojisine benzer kanallar ya da damarlar ağı vasıtası ile hiyerarşik bir düzen içinde irtibatlıdır. Doğada hiyerarşik dallanmalara sahip ağaç mimarisinin, metabolizmanın denge durumunu koruyabilmesinde ve bir düzen içinde yönetilebilmesinde başarılı olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, akıllı enerji dağıtım şebekesi için önerilen hiyerarşik ağaç mimarisinin temsili gösterimi Şekil 3.3'de sunulmuştur. Burada 9 adet birinci katman düğümü $\{N_1^1, N_2^1, N_3^1, \dots, N_9^1\}$ 3 adet ikinci katman düğümü $\{N_1^2, N_2^2, N_3^2\}$ ile bir adet üçüncü katman düğümüne $\{N_1^3\}$ irtibatlanmıştır. Bu yapının daha üst katman düğümlerine N_1^4 ile bağlandığı gösterilmiştir. Enerji denge analizlerinde, her düğüm noktası için enerji yeterlilik oranı (Y_i^j), karesel enerji yeterlilik hatası (ε_i^j), doğrusal enerji denge hatası (ΔE_i^j), düğümün enerji üretimi (G_i^j) ve talebi (C_i^j) parametreleri tanımlanmıştır. Burada j katman indeksi ve i düğüm indisidir. Bütün üretici ve tüketici sistemler, taban düğümü adı verilen birinci katman düğümlerine ($j = 1$) bağlıdır.

Düğüm noktaları sadece enerji iletimini yöneten yönlendirici birim olarak işler. Düğüm noktalarının, enerji üretmediği veya işlevsel olarak enerji tüketmediği varsayılır. Ancak, sistemde enerji iletim kayıpları ile modellenen

enerji kayıpları söz konusudur. Bu yapıda, düğümlerin işlevini sayısal veri haberleşme ağlarında yönlendiricilerin (router) veri akışını ağ üzerinde yönlendirmesi işlevine benzetebiliriz. Enerji akış trafiği düğüm noktaları ile yönetilir. Dolayısı ile düğümler arasındaki bağlantı miktarı, sistemin enerji iletim kapasitesini belirler. Ağaç topolojisinin taban katmanlarına doğru artan hiyerarşik bağlantı düzeni, enerji iletiminin yakın düğümler arasında daha kısa mesafeler ve daha az iletim kayıpları ile gerçekleşmesini sağlar.

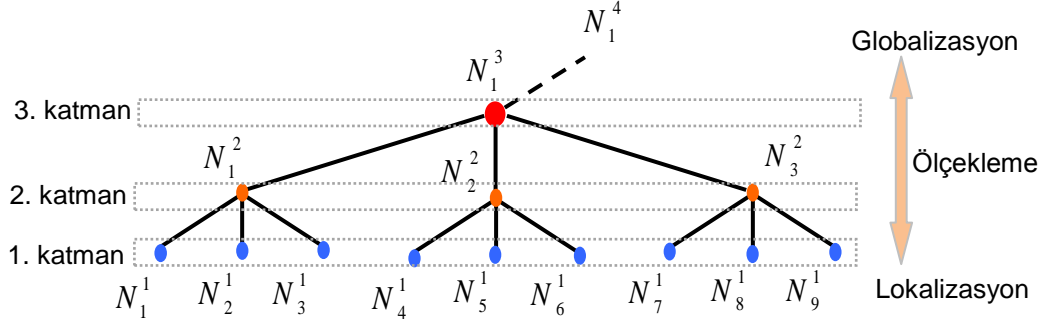


Şekil 3.3. Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip üretken tüketicilerden oluşan bir şebekenin şematik gösterimi

Akıllı şebeke uygulamaları için hiyerarşik ağaç mimarisi şu avantajları sağlayabilmektedir:

(i) Hiyerarşik ağaç yapısı, ağaç topolojisinin çevrimsizlik, ölçeklenebilirlik ve aile ilişkileri tanımlayabilme özelliklerinin bir sonucu olarak enerji akışı için tanımlanan parametre ve fonksiyonlarda toplamsallık ilkesine uygunluk görülür. Bunun sonucu olarak, Şekil 3.4’de görüleceği üzere ağaç yapısı hiyerarşik katmanlarda yatayda üniform bir düzen sunarken, dikeyde ise hiyerarşik bir düzen içinde aşağı yönde parametrelerde *lokalizasyon* (yerel özellikler ve durumlar), yukarı yönde ise parametrelerde *globalizasyon* (global -toplamsal- özellikler ve

durumlar) etkisi görülür. Ayrıca hiyerarşik ağaç yapısı dikey ve yatay yönlerde modülerdir. Şebekenin büyümesi mevcut yapıları ve durumları olumsuz etkilemeden sağlanabilir.



Şekil 3.4. Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip şebeke parçasının yapısal gösterimi

(ii) Hiyerarşik ağaç yapısının dikeyde aşağı yönde görülen lokalizasyon özelliği yerel yönetim, yerel üretim ve tüketim mekanizmasının hayata geçirilmesi için yerel durumların erişilebilirliğini ve yönetilebilirliğini artırır. Diğer bir ifade ile taban düğümlerine doğru yerel durum ve parametrelerin gözlemlenebilirliği ve kontrol edilebilirliği artar. Bunun temel nedeni, hiyerarşide aşağı doğru inildikçe, ağaç topolojisinin aile ilişkisinin bir sonucu olarak velisi olduğu alt düğümlerin sayısının azalmasıdır. Yani, taban düğümlerine doğru enerji akış yönetimi, ölçümler ve kontrol operasyonları daha lokalize gerçekleşir. Bu özellik, akıllı şebekelerin dağıtık üretim ve dağıtık tüketim uygulamalarını desteklenmesi açısından önemli avantajlar sağlar. Yerel enerji üretimi ve tüketimi perspektifine uygun mimari sunması itibarı ile iletim kayıplarını düşürür ve enerji dağıtım verimliliğini artırır.

(iii) Ağaç hiyerarşisinde yukarı yönde durum ve parametrelerde globalizasyon (toplamsallık) özelliği görülür. Üst düğüm katmanlarında ölçülen durum ve parametrelerde, velisi olduğu alt düğüm kümesinin durum ve parametrelerinin toplamsal etkileri görülür. Bu durum Çizelge 2.2’de bahsi geçen üretimin toplamsallığı ve talebin toplamsallığı modellemesi için kolaylık sağlar. Hiyerarşinin en üst katmanında yer alan kök düğümünde ölçülen parametreler, bütün şebeke durumlarını kapsar ve şebekenin global durumunu gösterir. Diğer taraftan globalizasyon özelliği, üretim ve tüketimde yüksek belirsizlik gösteren bir

sistemde, Çokça Sayıların Güçlü Yasasının (Strong Law of Large Numbers) [100] bir sonucu olarak sistem durumlarının beklenen değerlerindeki belirsizliği azaltır. (Bu konu detaylı olarak Bölüm 3.1.4’de incelenmiştir) Parametrik globalizasyonun sonucu olarak taban katmanından yukarı katmanlara doğru sistem parametrelerinin beklenen değerlerindeki belirsizlik görelî olarak azalır ve böylece şebekenin yönetiminde, global kontrol ve dengeleme operasyonlarında kolaylıklar sağlanır.

3.1.3. Enerji Dengelemesi Analizi İçin Temel Tanımlar

Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji dağıtım sisteminin de, j . katmanda bulunan bir düğüme bağlı, p adet enerji üretici (EÜ) durumda düğüm ve k adet enerji tüketici (ET) durumda düğüm olduğunu varsayalım. Bu j . katman düğümü için toplam enerji üretim durumu,

$$G^j = \sum_{i=1}^p (1 - \alpha_g^j) G_i^{j-1}, \quad (3.1)$$

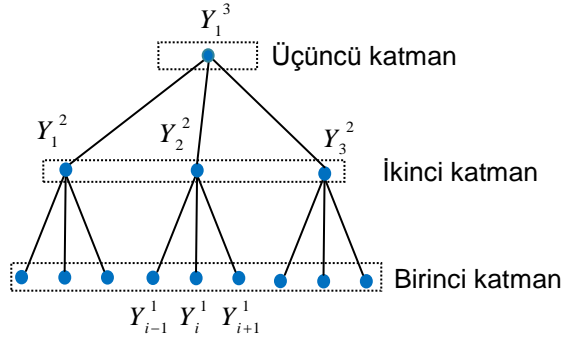
ve toplam enerji tüketim durumu,

$$C^j = \sum_{i=1}^k (1 + \alpha_c^j) C_i^{j-1}. \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir. Denklem (3.1) ve (3.2) hiyerarşik ağaç mimarisine sahip enerji şebekesinin, Çizelge 2.2’de açıklanan üretim toplamsallığı ve talep toplamsallığı özelliğini desteklediğini açıkça göstermektedir. Burada α_g^j üretim yanlı iletim kayıp oranı ve α_c^j talep yanlı iletim kayıp oranıdır. Bu analizin sonuçlarının üretim ve tüketim yönünde dengeli olabilmesi için normalize kayıp oranı $\alpha_c^j = \alpha_g^j / (1 - \alpha_g^j)$ ile belirlenir. (Bakınız Bölüm 3.1.4) Düğümler arası enerji akışı durumunda, iletim kayıplarının etkisini, üretim yanlı kayıp çarpanı $w_g^j = 1 - \alpha_g^j$ ve talep yanlı kayıp çarpanı $w_c^j = 1 + \alpha_c^j$ ile ifade edelim. Dengeli sistem için, normalize edilmiş kayıp çarpanı için $w_c^j = 1 / w_g^j$ yazılabilir. Bu durumda, bir j . katman düğüme ait enerji yeterlilik oranı,

$$Y_i^j = \frac{G^{j-1}}{C^{j-1}} = \frac{\sum_{i=1}^p w_g^j G_i^{j-1}}{\sum_{i=1}^k w_c^j C_i^{j-1}} \quad (3.3)$$

ile ifade edilebilir. Şekil 3.5’de üç katmanlı hiyerarşik ağaç mimarisine sahip bir şebeke modelinde düğümlerin yeterlilik oranları görülmektedir.



Şekil 3.5. Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip enerji dağıtım sistemi

Her bir düğüm noktası için enerji yeterlilik oranı, düğüme bağlı alt seviye düğümlerin veya sistemlerin toplam enerji üretiminin toplam tüketimlerine oranı ile tanımlanmıştır. Birinci düzey düğümler diğer adı ile taban düğümler için enerji yeterlilik oranı, $Y_i^1 = G_i^0 / C_i^0$, ile ifade edilir. Burada, i . taban düğüme bağlı bütün üretken tüketici abonelerin, toplam enerji üretimi G_i^0 ve toplam tüketimleri C_i^0 ile temsil etmektedir. Enerji yeterlilik oranına göre düğümlerin enerji denge durumları şöyle ifade edilebilir,

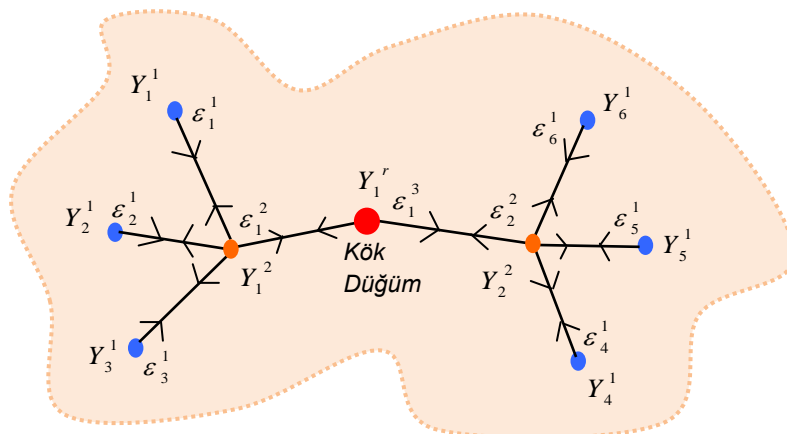
- (i) $Y_i^j = 1$ ise düğüm enerji dengeli durumdadır. Düğümden üretilen toplam enerji, düğümün toplam tüketimini karşılamıştır.
- (ii) $Y_i^j < 1$ ise düğüm enerji yetersiz durumdadır. Düğümden üretilen toplam enerji, toplam tüketimi karşılamamaktadır. Bağlantılı olunan üst katman düğümden enerji alınmasına ihtiyaç vardır.

(iii) $Y_i^j > 1$ ise düğümde enerji fazlalığı vardır ve sistem enerji yeterli durumdadır. Düğümde üretilen toplam enerji, toplam tüketimi aşmıştır. Enerji fazlalığı vardır ve bu fazlalık üst düğüme gönderilebilir.

Şekil 3.6'da hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji dağıtım şebekesinin coğrafi alana yayılımı ve düğüm noktalarında önemli denge durum parametreleri temsili olarak gösterilmiştir. Enerji yeterlilik durumunun karesel hata ile tanımlanması optimizasyon yöntemlerinin uygulanması açısından avantajlıdır. Bir j . katmanında k . düğümün karesel enerji yeterlilik hatası (ε_k^j),

$$\varepsilon_k^j = \sum_{\forall i} (Y_i^j - 1)^2 \quad (3.4)$$

ile ifade edilebilir. Sistemin ideal enerji dengeli olması, her düğüm noktası için karesel enerji yeterlilik hatasının sıfır olması ile sağlanabilir. İdeal denge durumu koşulu, aritmetik olarak $\varepsilon_i^j = 0, \forall i \wedge \forall j$ koşulu ile ifade edilebilir. Bu koşul, bütün düğümlerin enerji dengeli durumda olduğunu ve bu nedenle düğümler arasında enerji alış verişinin söz konusu olmadığı durumu ifade eder. Böylece, iletim kayıplarını minimize eden ideal denge durumuna ulaşılmış olunur. İdeal denge durumu, akıllı şebeke uygulamaları açısından bütün yerel mikro şebekelerin (microgrid), kendi kendini idame ettirir durumda yani ada operasyonunda (islanded operation) çalışması haline karşılık gelir.



Şekil 3.6. Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip şebekenin coğrafi alana dağılımının şematik gösterimi

Şebekenin enerji güvenilirlik indeksi ($0 \leq R_e \leq 1$), yeterlilik oranına bağlı olarak şöyle ifade edilebilir:

$$R_e = \begin{cases} Y_1^r, & Y_1^r < 1 \\ 1, & Y_1^r \geq 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Burada Y_1^r , hiyerarşinin en üst katman düğüm noktasının (kök düğüm noktası) enerji yeterlilik durumunu temsil eder. Ağaç mimarisine sahip şebekenin globalizasyon özelliğinden dolayı kök düğüm noktası için tanımlanan enerji yeterlilik durumu şebekenin global yani toplamda enerji yeterlilik durumunu gösterir. Burada, enerji güvenilirlik indeksinin değeri bir ($R_e = 1$) ise kök düğüm enerji dengeli veya yeterlidir. Sonuçta, enerji yeterli bir şebeke enerji güvenilir olarak kabul edilir. Enerji yetersiz durumda, enerji güvenilirlik indeksi $0 \leq R_e < 1$ aralığında değer alır ve doğrudan enerji yeterlilik durumunu gösterir. Enerji dağıtım sisteminin her katmanda enerji dengeli olması durumunda,

$$\varepsilon = \varepsilon^1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^3 + \dots = \sum_{\forall j} \sum_{\forall i} (Y_i^j - 1)^2 = 0. \quad (3.6)$$

koşulu sağlanır. Bu denklemde, $Y_i^j = C_i^j / G_i^j$ parametrelerinin belirlenmesi problemi, tekil çözümü olmayan ters problem (ill-posed inverse problem) tanımlar. İlgilendiğimiz çözüm, enerji dağıtım açısından en ideal çözüm olan enerji iletim kayıplarını minimize eden çözüm kümesidir. Bu nedenle, her katmandaki bütün düğüm noktalarının enerji dengeli olduğu ideal denge durumuna $\varepsilon_i^1 = 0$, $\varepsilon_i^2 = 0$, ..., $\varepsilon_i^j = 0$ karşılık gelen çözüm dikkate alınmalıdır. Bu çözüm ağaç mimarisinin doğal bir özelliği olarak, bütün birinci derece düğümlerin enerji dengeli olması koşuluna $Y_i^1 = 1$ indirgenir. Çünkü hiyerarşik ağaç mimarisine sahip bir sistemde bütün taban düğümleri enerji dengeli ise üst katmanlardaki bütün düğümlerde enerji dengeli olmak durumundadır. (yukarı yönlü denge yayılımı teoremi Bölüm 3.1.4'de gösterilmiştir). Yukarı yönlü denge yayılımı teoremi uyarınca, $\forall i$ için $Y_i^1 = 1$ ise $j > 1$ için $Y_i^j = 1$ olur ve Denklem (3.6)'yı sağlayan, enerji sistemleri için en iyi çözüm $\{Y_i^1 = 1: \forall i\}$ elde edilir.

Eğer başlangıç koşullarında sistem enerji dengesiz ise ($\varepsilon(0) \neq 0$), enerji dengeleme problemi zamana bağlı olarak, $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon \rightarrow 0$ olarak ifade edilmelidir.

Bir q düğümünde enerji dengesini sağlamak için ($\varepsilon_q^j = 0$) gereken enerji miktarı (lineer enerji hatası) ΔE_q^j olsun. Bu miktar,

$$\varepsilon_q^j = \left(\frac{G_q^j + \Delta E_q^j}{C_q^j} - 1 \right) = 0, \quad (3.7)$$

denklemini çözülerek lineer enerji hatası,

$$\Delta E_q^j = \sum_{i=1}^k (1 + \alpha_c^j) C_i^{j-1} - \sum_{i=1}^p (1 - \alpha_g^j) G_i^{j-1} = \sum_{i=1}^k w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1}^p w_g^j G_i^{j-1} \quad (3.8)$$

elde edilebilir. Lineer enerji hatası ΔE_q^j , enerji dengesini sağlamak için bir üst düğüm ile yapılması gereken enerji alışveriş miktarını göstermektedir. Bu nedenle her düğüm noktası, lineer enerji hatasını sıfır yapacak ($\Delta E_q^j = 0$) yönde davranır. Enerji fazlılığı durumunda ($\Delta E_q^j < 0$) bir üst düğüme enerji gönderilir veya enerji eksikliği durumunda ($\Delta E_q^j > 0$) bir üst düğümden enerji talep edilir.

3.1.4. Konu İle İlgili Analizler ve Teoremler

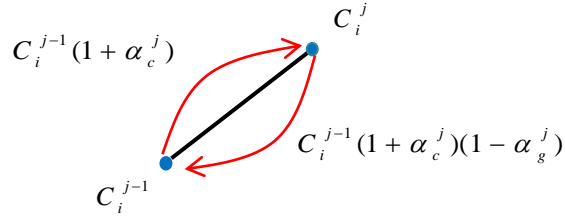
(a) *Yönlü iletim kayıp oranının normalizasyonu:*

Yönlü iletim kayıp oranlarının normalizasyonu enerji dengelemesi için gereklidir. Hiyerarşik düzende, kaynaktan yüke giden yönde iletim kaybı için üretim yanlı kayıp oranı $1 > \alpha_g^k > 0$ aralığında tanımlanmıştır. Yükten kaynağa giden yönde iletim kaybı için ise talep yanlı kayıp oranı $1 > \alpha_c^k > 0$ aralığında tanımlanmıştır. Bu iki yönde enerji akışın birbirine eşitlenmesi durumuna yönlü kayıp oranı normalizasyonu adı verilmiştir. Sistemin dengeli olabilmesi için yönlü kayıp oranını normalize edilmesi gerekmektedir. Bunun için Şekil 3.7.'de görülen iki düğümlü sistem için enerji dengeleyemeye çalışalım. Burada C_i^j 'ye iletilen talep $C_i^{j-1}(1 + \alpha_c^j)$ karşılanması durumunda denge durumu için

$C_i^{j-1}(1 + \alpha_c^j)(1 - \alpha_g^j) = C_i^{j-1}$ koşulunun sağlanması gerekmektedir. Bu denklem çözümlerse, normalize kayıp oranları

$$\alpha_c^j = \alpha_g^j / (1 - \alpha_g^j) \quad (3.9)$$

ile ifade edilir. Bu bağıntı, denge durumunda talebin yeterli üretim ile karşılanabilmesini sağlar.



Şekil 3.7. İki düğümlü sistemde enerji dengeleme

Dengeli sistem için, normalize talep yanlı kayıp çarpanı Denklem (3.9) uyarınca $w_c^j = 1 / w_g^j$ ile ifade edilir.

(b) Yukarı yönlü denge yayılımı teoremi:

Lemma 1: Bir hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji şebekesinin herhangi bir katmanın herhangi bir düğümünde, $\Delta E_q^j = 0$ koşulu sağlanıyorsa, bu düğüm enerji yeterlidir ($Y_q^j = 1$) ve enerji dengelidir ($\varepsilon_q^j = 0$).

İspat:

$\Delta E_q^j = 0$ koşulu Denklem (3.8)'de yazalım.

$$\Delta E_q^j = \sum_{i=1}^k w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1}^p w_g^j G_i^{j-1} = 0 \quad (3.10)$$

Burada gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\sum_{i=1}^k w_c^j C_i^{j-1} = \sum_{i=1}^p w_g^j G_i^{j-1} \Rightarrow \frac{\sum_{i=1}^k w_c^j C_i^{j-1}}{\sum_{i=1}^p w_g^j G_i^{j-1}} = 1 = Y_q^j \quad (3.11)$$

$Y_q^j = 1$ elde edilir. Diğer bir ifade ile sistem enerji yeterlidir. Bu durumda, yeterlilik hatası $\varepsilon_q^j = (1 - Y_q^j) = 0$ yani düğüm enerji dengelidir.

Lemma 2 (Denge Hatalarının Toplamsallığı): Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji dağıtım şebekesinde bir üst düğümün doğrusal enerji hatası, bağlı bulunduğu alt düğümlerin doğrusal enerji hatalarının toplamı ile ifade edilebilir.

$$\Delta E_q^{j+1} = \sum_{d \in ET} w_c^{j+1} \Delta E_d^j + \sum_{s \in EÜ} w_g^{j+1} \Delta E_s^j \quad (3.12)$$

İspat:

Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji dağıtım şebekesinde katman içinde düğümler arasında bağlantı olmadığı için her düğüm bağlı olduğu bir üst katman düğümüne enerji talebini veya enerji fazlasını iletir. Bu durumda, bir üst düğüm ile bağlantılı olduğu alt düğümler arasında iletilebilecek enerji miktarları için iki durum söz konusudur:

(i) Enerji tüketicisi (ET) durumunda olan alt düğümlerin talep edeceği enerji,

$$\Delta E_q^j = \left(\sum_{i=1} w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1} w_g^j G_i^{j-1} \right) \geq 0 \text{ olacaktır.}$$

İletim kayıpları dikkate alınır, bir üst katmandan sağlanması gereken enerji miktarı için,

$$w_c^{j+1} \left(\sum_{i=1} w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1} w_g^j G_i^{j-1} \right) \quad (3.13)$$

yazılır.

(ii) Enerji üretici (EÜ) durumunda olan alt düğümlerin gönderebileceği enerji

$$\text{miktarı, } \Delta E_q^j = \left(\sum_{i=1} w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1} w_g^j G_i^{j-1} \right) < 0 \text{ olacaktır.}$$

İletim kayıpları dikkate alınır, bir üst katmana ulaşan toplam enerji miktarı için,

$$w_g^{j+1} \left(\sum_{i=1} w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1} w_g^j G_i^{j-1} \right) \quad (3.14)$$

yazılır.

Bir üst düğüme bağlı bütün alt düğümlerin göndereceği ve talep edeceği enerjiler toplamı, üst düğümün doğrusal enerji hatasını oluşturur. Diğer bir ifade ile, bir üst düğümün doğrusal enerji hatası, bağlı bulunan alt düğümlerin toplam üretim veya taleplerinin kayıplı toplamıdır. Üst düğümün enerji hatası,

$$\Delta E_q^{j+1} = \sum_{d \in ET} w_c^{j+1} \left(\sum_{i=1} w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1} w_g^j G_i^{j-1} \right) + \sum_{s \in EÜ} w_g^{j+1} \left(\sum_{i=1} w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1} w_g^j G_i^{j-1} \right) \quad (3.15)$$

ile ifade edilir. Bu ifadede, ET durumunda olan düğümlerin doğrusal enerji hatası

için $\Delta E_d^j = \sum_{i=1}^k w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1}^p w_g^j G_i^{j-1}$ kullanılır ve EÜ durumunda düğümlerin

doğrusal enerji hatası için $\Delta E_s^j = \sum_{i=1}^k w_c^j C_i^{j-1} - \sum_{i=1}^p w_g^j G_i^{j-1}$ kullanılır, gerekli

düzenlemeler yapılırsa, üst katmanın doğrusal enerji hatası için Denklem (3.12),

$$\Delta E_q^{j+1} = \sum_{d \in ET} w_c^{j+1} \Delta E_d^j + \sum_{s \in EÜ} w_g^{j+1} \Delta E_s^j \text{ elde edilir.}$$

Teorem (Yukarı Yönlü Denge Yayılımı Teoremi): Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji dağıtım şebekesinde, herhangi bir j katmanında bütün düğümler enerji dengeli ise ($\forall i$ için $Y_i^j = 1$), bu katmandan sonraki bütün katmanlar enerji dengelidir. Diğer bir ifade ile $\forall i$ için $Y_i^j = 1$ ise bir üst katmanın bütün düğüm noktaları için, $\forall q$, $Y_q^{j+1} = 1$, daha üst katmanlar için $\forall h$, $Y_h^{j+2} = 1$, ve böylece üst katmanlara doğru devam eder. Bu durumda, son katman olan kök katmanı için $Y_1^r = 1$ koşulu sağlanır. Bu olaya “yukarı yönlü denge durumu yayılımı” adı verilmiştir.

İspat:

Bir j katmandaki bütün düğümler enerji dengeli ise Lemma 1’in gereği olarak, doğrusal enerji hatası bütün düğümler için sıfırdır, $\forall i$ için $\Delta E_i^j = 0$.

*Lemma 2 uyarınca bir üst katmandaki bütün düğümler için doğrusal enerji hatası,

$$\forall q \text{ için } \Delta E_q^{j+1} = \sum_{d \in ET} w_c^{j+1} \Delta E_d^j + \sum_{s \in E\dot{U}} w_g^{j+1} \Delta E_s^j \quad (3.16)$$

yazılır.

Katman j deki bütün düğümlerin doğrusal hatası sıfır ise, tüketici durumda olan düğümlerin hatası $\Delta E_d^j = 0$ ve üretici durumda olan düğüm hatası $\Delta E_s^j = 0$ 'dır.

Bu durum Denklem (3.16) de uygulanırsa, $\forall q$ için $\Delta E_q^{j+1} = 0$ elde edilir.

*Lemma 2 uyarınca bir sonraki katman ($j + 2$) için aynı analiz yapılırsa, doğrusal enerji hatası için,

$$\forall h \text{ için } \Delta E_h^{j+2} = \sum_{d \in ET} w_c^{j+2} \Delta E_d^{j+1} + \sum_{s \in E\dot{U}} w_g^{j+2} \Delta E_s^{j+1} \quad (3.17)$$

yazılır. Burada, $\forall q$ için $\Delta E_q^{j+1} = 0$ dikkat alınırsa, $\Delta E_d^{j+1} = 0$ ve $\Delta E_s^{j+1} = 0$

olduğu görülür. Bu durumda $\forall h$ için $\Delta E_h^{j+2} = 0$ elde edilir.

*Bu analiz böyle devam ettirilirse, $n > j + 2$ sağlayan herhangi bir üst katman için Lemma 2 uyarınca,

$$\forall l \text{ için } \Delta E_l^n = \sum_{d \in ET} w_c^n \Delta E_d^{n-1} + \sum_{s \in E\dot{U}} w_g^n \Delta E_s^{n-1} \quad (3.18)$$

yazılır. Daha alt katman için $\Delta E_d^{n-1} = 0$ ve $\Delta E_s^{n-1} = 0$ geçeli olacağı için, $\forall l$ için

$\Delta E_l^n = 0$ elde edilecektir. Bu analiz kök düğüme kadar geçerlidir. Nihayet,

hiyerarşinin en üst düğümü olan kök düğüm için analiz yapılırsa, Lemma 2 uyarınca,

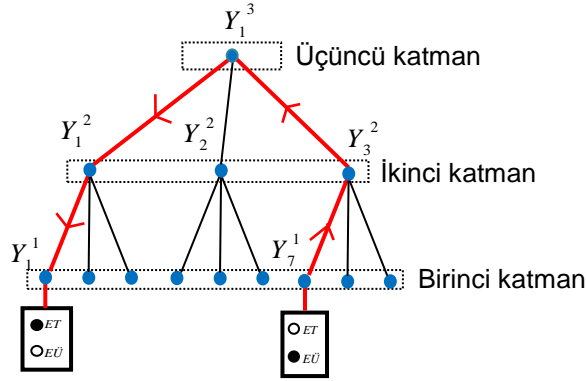
$$\Delta E_1^r = \sum_{d \in ET} w_c^r \Delta E_d^{r-1} + \sum_{s \in E\dot{U}} w_g^r \Delta E_s^{r-1} \quad (3.19)$$

yazılır. Burada, $\Delta E_d^{r-1} = 0$ ve $\Delta E_s^{r-1} = 0$ olacağı için $\Delta E_1^r = 0$ olduğu görülür. Bu

olaya, yukarı yönlü denge durumu yayılımı adı verilir.

(c) Ağaç Topolojisine sahip bir şebekede iletim kaybı analizi ve ideal denge durumu:

Başlangıçta dengeli olan ağaç yapısına sahip bir şebekede taban düğümüne bağlı bir tüketicinin enerji talebinin 3. katman üzerinden sağlanması durumunda iletim kayıplarını analiz edelim. Bu senaryo temsili olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Başlangıçta ideal denge durumunda bulunan ağaç mimarisine sahip bir dağıtım şebekesinde birinci katmanın birinci düğümünde talep yönünde bir enerji dengesizliğinin oluşması durumunda, bu talebin birinci katman yedinci düğümüne bağlı bir kaynak tarafından üçüncü katmandaki bir düğüm noktası üstünden dengelenmesini gösteren enerji akış şeması

Başlangıçta sistemin dengeli olduğunu varsayalım. Şekil 3.8’deki şemayı basitleştirmek için denge durumunu sürdüren kullanıcılar gösterilmemiştir. Denge durumunda iken birinci katmanın birinci düğümüne bağlı bir sistemde ΔC_1^0 kadar talep artışı olduğunu ve bu artışın ikinci katman aracılığı ile karşılanamadığını varsayalım. Bu durum üçüncü katman kök düğümünde, enerji dengesizliğine yol açar ve enerji yetersizlik durumunun $Y_1^3 < 1$ oluşmasına neden olur. Bu dengesizliği gidermek üzere taban katmanında 7. düğümüne bağlı bir üreticinin talebe cevap verdiğini varsayalım. Üçüncü katmanda iletim kaybının dikkate alındığı talep miktarı $w_c^1 w_c^2 w_c^3 C_1^0$ olacaktır. Kök düğümüne, taban katmanın 7. düğümünden gelen enerji miktarı, üretim yönlü kayıplar dikkate alınırca $w_g^1 w_g^2 w_g^3 G_7^0$ olacaktır. Şebekenin tekrar enerji dengeli olabilmesi için ($\Delta E_1^3 = 0$), üçüncü katmanda doğrusal enerji hatası için,

$$\Delta E_1^3 = w_c^1 w_c^2 w_c^3 C_1^0 - w_g^1 w_g^2 w_g^3 G_7^0 = 0 \quad (3.20)$$

yazılır. Sistemin üretimin talebi karşıladığı durum ($\Delta E_1^3 = 0$) için çözümü,

$$w_g^1 w_g^2 w_g^3 G_7^0 = w_c^1 w_c^2 w_c^3 C_1^0 \quad (3.21)$$

elde edilir. Bu durumda, taban katmanında 7. düğüme bağlı üreticinin sağlaması gereken üretim miktarı,

$$G_7^0 = \frac{w_c^1 w_c^2 w_c^3}{w_g^1 w_g^2 w_g^3} C_1^0 \quad (3.22)$$

olarak elde edilir. Denklem (3.22), $G_7^0 = (1 + \alpha_3) C_1^0$ formunda ifade edilirse, üçüncü katmanda denge sağlanması durumunda toplam talep yanlı iletim kayıp oranı,

$$\alpha_3 = \frac{w_c^1 w_c^2 w_c^3}{w_g^1 w_g^2 w_g^3} - 1 \quad (3.23)$$

elde edilir. Eğer bu analiz, herhangi bir j . katmanda dengeleme için genelleştirilirse, toplam talep yanlı iletim kayıp oranı kayıp oranı en genel formda,

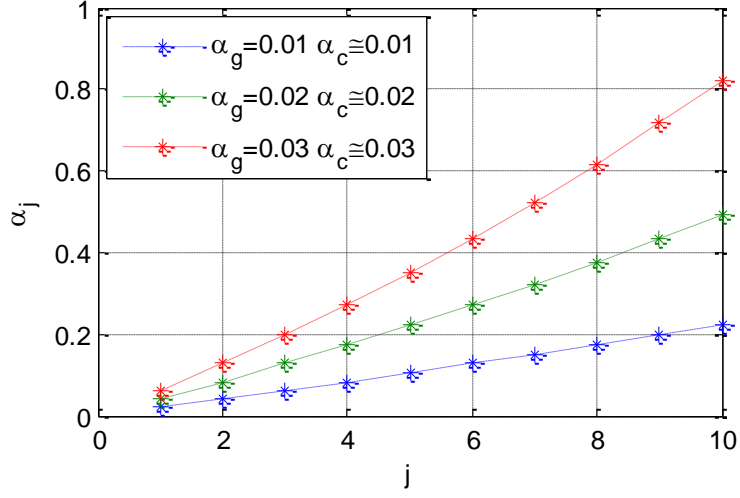
$$\alpha_j = \frac{\prod_{k=1}^j w_c^k}{\prod_{k=1}^j w_g^k} - 1 \quad (3.24)$$

ile ifade elde edilir. Burada, üretim kayıp çarpanı $w_g^k = 1 - \alpha_g^k$ ve tüketim kayıp çarpanı $w_c^k = 1 + \alpha_c^k$ kullanılırsa, toplam kayıp oranı için,

$$\alpha_j = \frac{\prod_{k=1}^j (1 + \alpha_c^k)}{\prod_{k=1}^j (1 - \alpha_g^k)} - 1 \quad (3.25)$$

elde edilir. Burada, üretim yanlı kayıp oranı $1 > \alpha_g^k > 0$ ve tüketim yanlı kayıp oranı $1 > \alpha_c^k > 0$ olduğu dikkate alınırsa, enerji dengesi ne kadar üst katmanda sağlanırsa, enerji kaybının Denklem (3.25) uyarınca artacağı açıkça görülür. Benzer analiz üretim yanlı kayıp oranı için yapılabilir. Şekil 3.9'de denge

katmanına bağılı olarak toplam kayıp oranları üç farklı yönlü kayıp oranı değeri için çizilmiştir.



Şekil 3.9. Denge katmanına bağılı olarak toplam kayıp oranları

Teorem (Minimum Kayıp Oranı): Ağaç yapısına sahip bir enerji şebekesinde yönlü iletim kayıp oranlarının $1 > \alpha_g^k > 0$ ve $1 > \alpha_c^k > 0$ aralığında değer aldığı durumda, Denklem (3.25) ile ifade edilen toplam iletim yanlı kayıp oranının (α_j) minimal değeri, taban katmanında enerji dengelemesine karşılık gelen durum olan $j = 1$ için yazılan,

$$\alpha_1 = \frac{(1 + \alpha_c^1)}{(1 - \alpha_g^1)} - 1 \quad (3.26)$$

denklemini ile ifade olur.

İspat: Denklem (3.25) ile ifade edilen toplam kayıp oranı α_j 'nin, parametrelerin $1 > \alpha_g^k > 0$ ve $1 > \alpha_c^k > 0$ aralığındaki değerleri için monoton aratan bir fonksiyon olduğunu gösterelim. Bunun için tüme varım ispat yöntemini kullanalım:

(i) $\alpha_1 < \alpha_2$ olduğunu gösterelim. Denklem (3.25) uyarınca,

$$\alpha_2 = \frac{(1 + \alpha_c^2)(1 + \alpha_c^1)}{(1 - \alpha_g^2)(1 - \alpha_g^1)} - 1 \quad (3.27)$$

ifade edilir. Denklem (3.26) dikkate alındığında, $\frac{(1 + \alpha_c^1)}{(1 - \alpha_g^1)} = \alpha_1 + 1$ elde edilir. Bu

eşitlik Denklem (3.27)'de kullanılırsa, aşağıdaki ifade elde edilir,

$$\alpha_2 = \frac{(1 + \alpha_c^2)}{(1 - \alpha_g^2)}(\alpha_1 + 1) - 1 = \frac{(1 + \alpha_c^2)}{(1 - \alpha_g^2)}\alpha_1 + \frac{(1 + \alpha_c^2)}{(1 - \alpha_g^2)} - 1 \quad (3.28)$$

Parametrelerin $1 > \alpha_g^k > 0$ ve $1 > \alpha_c^k > 0$, $k = 1, 2, 3, \dots$ aralıklarında değer aldığı

dikkate alınır, $\frac{(1 + \alpha_c^2)}{(1 - \alpha_g^2)} > 1$, olduğu kolayca görülür. Bu koşul, Denklem (3.28)

değerlendirilirse, $\alpha_2 = \frac{(1 + \alpha_c^2)}{(1 - \alpha_g^2)}\alpha_1 + \frac{(1 + \alpha_c^2)}{(1 - \alpha_g^2)} - 1 > \alpha_1$ olduğu kolaylıkla

görülebilir.

(ii) $\alpha_2 < \alpha_3$ olduğunu gösterelim. Denklem (3.25) uyarınca,

$$\alpha_3 = \frac{(1 + \alpha_c^3)(1 + \alpha_c^2)(1 + \alpha_c^1)}{(1 + \alpha_g^3)(1 - \alpha_g^2)(1 - \alpha_g^1)} - 1 \quad (3.29)$$

ifade edilir. Denklem (3.27) dikkate alınır, $\frac{(1 + \alpha_c^2)(1 + \alpha_c^1)}{(1 - \alpha_g^2)(1 - \alpha_g^1)} = \alpha_2 + 1$ olur. Bu

Denklem (3.29)'de kullanılırsa aşağıdaki ifade bulunur,

$$\alpha_3 = \frac{(1 + \alpha_c^3)}{(1 - \alpha_g^3)}(\alpha_2 + 1) - 1 = \frac{(1 + \alpha_c^3)}{(1 - \alpha_g^3)}\alpha_2 + \frac{(1 + \alpha_c^3)}{(1 - \alpha_g^3)} - 1 \quad (3.30)$$

Parametrelerin $1 > \alpha_g^k > 0$ ve $1 > \alpha_c^k > 0$ aralığındaki değeri için $\frac{(1 + \alpha_c^3)}{(1 - \alpha_g^3)} > 1$

olur, bu eşitsizlik Denklem (3.30)'de kullanılırsa,

$$\alpha_3 = \frac{(1 + \alpha_c^3)}{(1 - \alpha_g^3)}\alpha_2 + \frac{(1 + \alpha_c^3)}{(1 - \alpha_g^3)} - 1 > \alpha_2 \text{ olduğu görülür.}$$

(iii) $\alpha_{n-1} < \alpha_n$ için doğru olduğunu varsayıp, $\alpha_n < \alpha_{n+1}$ doğruluğunu gösterelim.

Denklem (3.25) uyarınca,

$$\alpha_{n+1} = \frac{(1 + \alpha_c^{n+1})(1 + \alpha_c^n) \dots (1 + \alpha_c^3)(1 + \alpha_c^2)(1 + \alpha_c^1)}{(1 + \alpha_g^{n+1})(1 + \alpha_g^n) \dots (1 + \alpha_g^3)(1 - \alpha_g^2)(1 - \alpha_g^1)} - 1 \quad (3.31)$$

ifade edilir. Denklem (3.25), α_n için yazılıp, gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\frac{(1 + \alpha_c^n) \dots (1 + \alpha_c^3)(1 + \alpha_c^2)(1 + \alpha_c^1)}{(1 + \alpha_g^n) \dots (1 + \alpha_g^3)(1 - \alpha_g^2)(1 - \alpha_g^1)} = \alpha_{n+1} + 1 \text{ olur. Bu Denklem (3.31)'de}$$

kullanılırsa,

$$\alpha_{n+1} = \frac{(1 + \alpha_c^{n+1})}{(1 - \alpha_g^{n+1})} (\alpha_n + 1) - 1 = \frac{(1 + \alpha_c^{n+1})}{(1 - \alpha_g^{n+1})} \alpha_n + \frac{(1 + \alpha_c^{n+1})}{(1 - \alpha_g^{n+1})} - 1 \quad (3.32)$$

Parametrelerin $1 > \alpha_g^k > 0$ ve $1 > \alpha_c^k > 0$ aralığındaki değeri için $\frac{(1 + \alpha_c^{n+1})}{(1 - \alpha_g^{n+1})} > 1$,

koşulu Denklem (3.32)'de kullanılırsa, $\alpha_{n+1} = \frac{(1 + \alpha_c^{n+1})}{(1 - \alpha_g^{n+1})} \alpha_n + \frac{(1 + \alpha_c^{n+1})}{(1 - \alpha_g^{n+1})} - 1 > \alpha_n$

olduğu gösterilir. Böylece, tüme varım ile toplam kayıp oranı α_j , parametrelerin $1 > \alpha_g^k > 0$ ve $1 > \alpha_c^k > 0$ aralığındaki değerleri için monoton artan bir fonksiyon olduğunu ispatlanır. Monoton artan fonksiyonların, sınırlı bir parametre aralığında minimum değeri, aralığın başlangıç değeridir. $j = 1, 2, 3 \dots$ katman indeksine bağlı monoton artan bir fonksiyonun minimum değeri $j = 1$ için elde edilecektir. O

halde toplam talep yanlı kayıp oranının minimum değeri için $\alpha_1 = \frac{(1 + \alpha_c^k)}{(1 - \alpha_g^k)} - 1$

elde edilir.

Tanım (İdeal denge durumu): İletim kayıplarını minimize eden enerji denge durumuna ideal denge durumu adı verilmiştir. Minimum kayıp oranı teoremi ve yukarı yönlü denge yayılımı teoremi uyarınca; hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir şebeke için ideal denge durumunun taban katmanında sağlanan enerji denge durumu olduğu görülür. Bu tespite göre, ideal denge durumu için koşul, $\forall i$ için $\Delta E_i^1 = 0$ olarak ifade edilir. İdeal denge durumu koşullarında, birim enerji iletimi için toplam talep yanlı kayıp oranı Denklem (3.26) ile ifade edilebilir.

(d) *Hiyerarşik Ağaç Yapısına Sahip Sistemlerde Parametre Globalizasyonunun Parametrik Belirsizliği Azaltma Etkisi:*

Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir sistemde taban katmanında doğrusal enerji hatalarının tüketici durumda düğümler (ET) için e_u beklenen değerli ve üretici düğümler (EÜ) için e_v beklenen değerli rastgele bir dağılım gösterdiğini varsayalım. Bu rastgele dağılım aynı zamanda üretim ve tüketim belirsizliğini karakterize eder. Amacımız hiyerarşinin üst katman düğümlerinde parametre globalizasyonu (toplamsallığı) nedeni ile doğrusal enerji hatasının beklenen değerindeki belirsizliğin azaldığını görebilmektir. Bu nedenle, çokça sayıların güçlü yasasına (strong law of large numbers) başvuracağız. Bu yasa, pratikte rastgele örneklerin miktarı arttıkça beklenen değer hesabındaki kesinliğin artacağını önermektedir. (Ek-3’de bu teoreme ilişkin açıklama sunulmuştur)

Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir sistemin kök düğümünün doğrusal denge hatasını Denklem (3.19) göre $\Delta E_1^r = \sum_{d \in ET} w_c^r \Delta E_d^{r-1} + \sum_{s \in EÜ} w_g^r \Delta E_s^{r-1}$ ile ifade edilir. Burada bir alt düğümün enerji tüketici ve enerji üretici durumları ayrıştırılıp düzenlenirse,

$$\Delta E_1^r = \sum_{d \in ET} w_c^r \sum_{h \in ET} w_c^{r-1} \Delta E_h^{r-2} + \sum_{s \in EÜ} w_g^r \sum_{k \in EÜ} w_g^{r-1} \Delta E_k^{r-2} \quad (3.33)$$

ile ifade edebilir. Her katmanın yönlü iletim kayıpları eşit ve ağaç yapısının simetrik ve düzenli olduğu varsayılmıştır. Katman hiyerarşisinde aşağı yönde gidildikçe işleme katılan düğüm sayısı arttığı için $d \in h \in ET$ ve $s \in k \in EÜ$ dikkate alınır ve gerekli düzenleme yapılırsa,

$$\Delta E_1^r = w_c^r w_c^{r-1} \sum_{h \in ET} \Delta E_h^{r-2} + w_g^r w_g^{r-1} \sum_{k \in EÜ} \Delta E_k^{r-2} \quad (3.34)$$

yazılabilir. Bu işlem birinci katmana kadar devam ettirilirse,

$$\Delta E_1^r = w_c^r w_c^{r-1} \dots w_c^3 w_c^2 \sum_{u \in ET} \Delta E_u^1 + w_g^r w_g^{r-1} \dots w_g^3 w_g^2 \sum_{v \in EÜ} \Delta E_v^1 \quad (3.35)$$

bulunur. Denklem (3.35) ile kök düğümünde doğrusal enerji hatası durumundaki belirsizliğin, taban katmanındaki üretici ve tüketici düğümlerin doğrusal enerji hata durumlarındaki belirsizliğin toplamlarına bağlı olduğunu görülür. Doğrusal

hatanın beklenen değerleri ET durumundaki düğümler için $m_u = E[\sum_{u \in ET} \Delta E_u^1]$ ve EÜ durumundaki düğümler için $m_v = E[\sum_{v \in EÜ} \Delta E_v^1]$ olsun. ET ve EÜ kümelerinin eleman sayıları, $|ET|$ ve $|EÜ|$ ile gösterilsin. Kök düğümdeki denge hatasındaki belirsizlik miktarları için $|\sum_{u \in ET} \Delta E_u^1 - m_u|$ ve $|\sum_{v \in EÜ} \Delta E_v^1 - m_v|$ yazılabilir. Çokça sayıların güçlü yasanına [100,101] göre,

$$\frac{|\sum_{u \in ET} \Delta E_u^1 - m_u|}{|ET|} < \delta_u \quad \text{ve} \quad \frac{|\sum_{v \in EÜ} \Delta E_v^1 - m_v|}{|EÜ|} < \delta_v \quad (3.36)$$

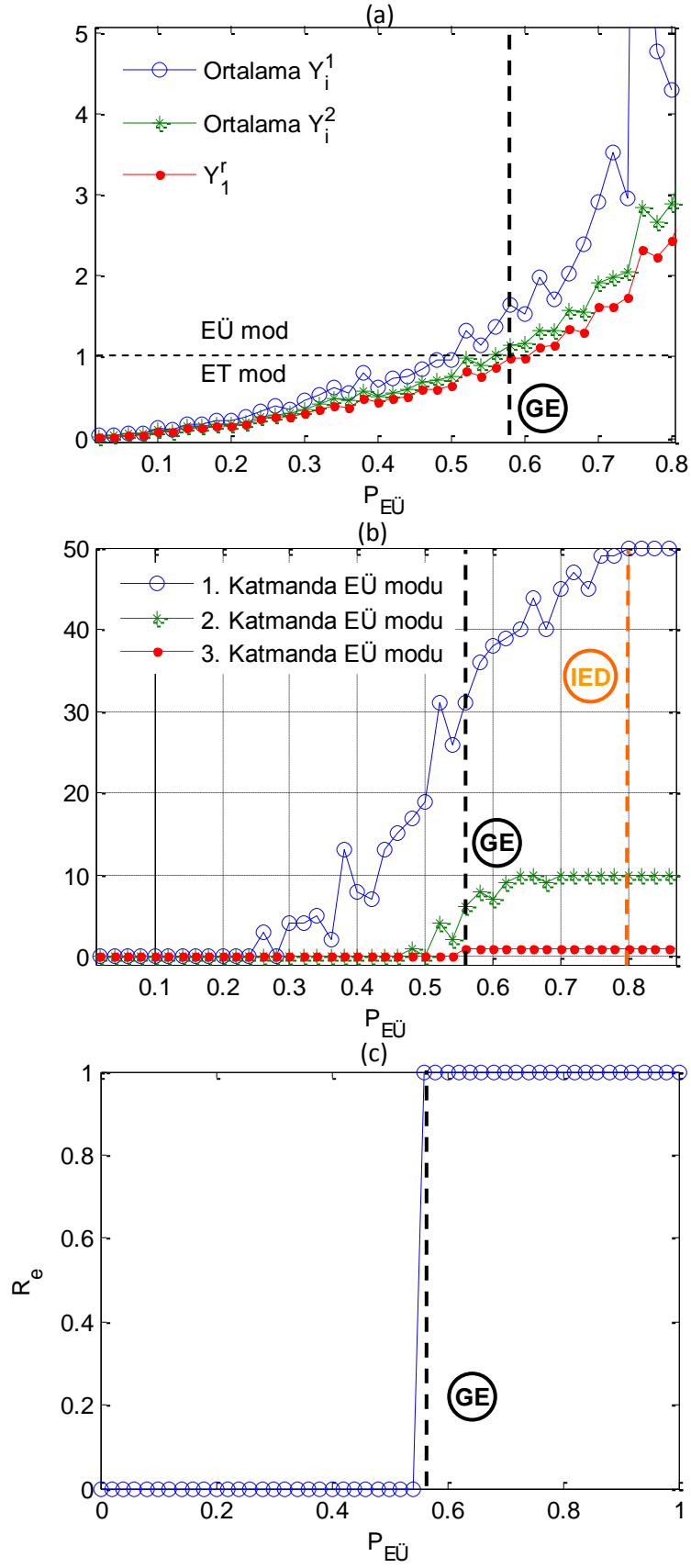
sağlayan bir $\delta_u, \delta_v > 0$ sayısı her zaman bulunabilir. O halde, düğüm sayıları $|ET|$ ve $|EÜ|$ arttırarak, belirsizliğin ortalama değeri δ_u ve δ_v istenildiği kadar küçülebilir. İdeal durumda, çok fazla üretici ve tüketici için ($|ET| \rightarrow \infty$ ve $|EÜ| \rightarrow \infty$) belirsizliklerin ortalaması sifıra yakınsar. Pratikte ise hiyerarşide yukarı yönde gidildikçe daha fazla düğümün durumu, toplamsal duruma katıldığı için lineer enerji hatası parametresindeki ortalama belirsizlik toplama katılan düğüm sayısının artması nedeni ile azalır. Diğer bir ifade ile Denklem (3.36) parametrik globalizasyonun (toplamsallığın) arttığı durumda hata belirsizliğinin azalacağına işaret eder. Bu sonuç şebekenin enerji denge durumu hakkında üst katmanlarda belirsizliğin azalmasına bağlı olarak şebeke yönetiminde ve global durum tespitinde avantajlar sağlar.

3.1.5. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde abonelerin rastgele üretici veya tüketici durumlarından birinde olabildikleri hiyerarşik ağaç mimarisine sahip bir akıllı enerji dağıtım şebekenin nümerik analizi sunulmuştur. Parametrik belirsizlik içeren sistemlerin analizlerinde deterministik süreçler yetersiz kalabildiği için simülasyonlar stokastik (rastsal) üretken tüketici modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Rastgele üretken tüketiciler, $[0,1]$ arasında düzgün (uniform) dağılıma sahip rastgele sayı üretici (Rnd) kullanılarak,

$$Mode_i = \begin{cases} E\ddot{U}, & Rnd \leq P_{E\ddot{U}} \\ ET, & Rnd > P_{E\ddot{U}} \end{cases} \quad (3.37)$$

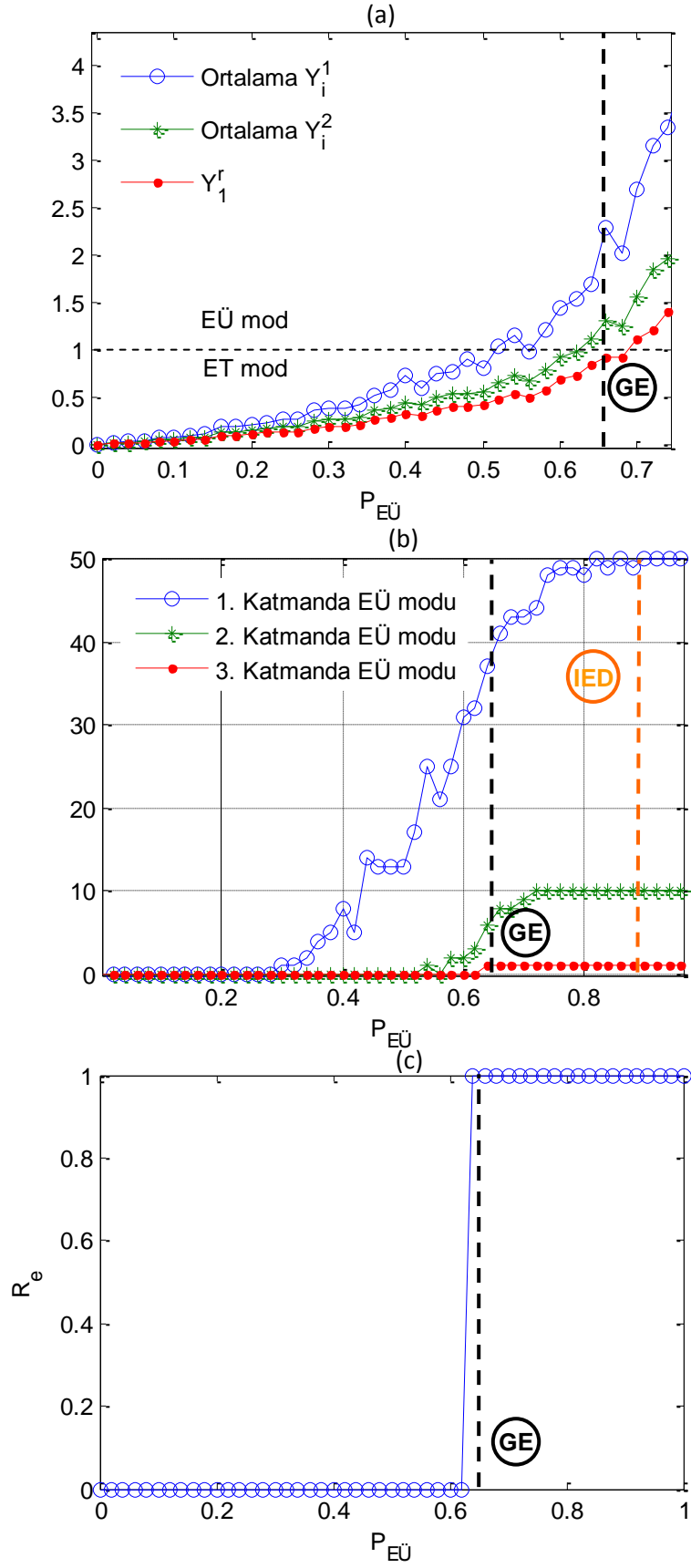
formülü ile tanımlanmıştır. Burada $P_{E\ddot{U}}$ abonenin enerji üretici olma olasılığıdır. Rastgele üretken tüketicilerin enerji üretim ve tüketim miktarları da rastgele sayı üretici kullanılarak $Rnd \cdot E_{E\ddot{U}}$ ve $Rnd \cdot E_{ET}$ ile modellenmiştir. Burada $E_{E\ddot{U}}$ ve E_{ET} abonelerin enerji üretim ve tüketim limitlerini temsil etmektedir. Analizlerde bir ailenin ortalama günlük enerji tüketim limiti $E_{ET} = 5$ kWh alınmıştır. Ayrıca hane düzeyinde rüzgar ve güneş enerjilerine dayalı $E_{E\ddot{U}} = 5.6$ kWh'a kadar hibrit enerji üretimi yapılabildiği varsayılmıştır. Simülasyonda 1000 adet rasgele üretken tüketici (prosumer) abonenin 50 adet birinci düzey ve 10 adet ikinci düzey düğüm vasıtası ile bir adet üçüncü düzey kök düğüme bağlandığı hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji ağının analizi yapılmıştır. Bu şebeke konfigürasyonu [1000 50 10 1] vektörü ile temsil edilmektedir. Taban (birinci) düğüm katmanında $\alpha_g^1 = 0.060$ ve $\alpha_c^1 = 0.064$, ikinci düzey katmanında $\alpha_g^2 = 0.065$ ve $\alpha_c^2 = 0.069$ ve kök (üçüncü) katmanda $\alpha_g^3 = 0.067$ ve $\alpha_c^3 = 0.072$ normalize iletim kayıp oranları öngörülmüştür. Kullanıcıların Denklem (3.37)'ye göre üretici veya tüketici durumlarından rastgele birinde bulunabildiği sistemde, enerji dengeleme koşulları incelenmiştir. Şekil 3.10'da simülasyon sonucunda elde edilen ortalama yeterlilik oranları (Şekil 3.10(a)), katmanlarda üretken duruma geçen düğüm sayıları (Şekil 3.10(b)) ve sistemin enerji güvenilirlik değerleri (Şekil 3.10(c)) EÜ durumu olasılığına ($P_{E\ddot{U}}$) bağlı olarak görülmektedir. Bu enerji dağıtım sisteminde, abonelerinin üretici durumunda bulunma olasılığının 0.58 üzerine çıktığı durumda ($P_{E\ddot{U}} \geq 0.58$) bütün sistemin enerji dengeli duruma ulaşabildiği görülmüştür. Şekilde bu enerji üretici olasılığı, güvenilirlik eşiği olarak GE etiketi ile gösterilmiştir. Ancak, enerji iletim kaybını minimize eden ideal enerji dengesi (IED) durumuna üretici olasılığının $P_{E\ddot{U}} \geq 0.74$ olduğu durumda ulaşılabilirdiği görülmüştür. Bu koşullarda her düğüm kendi kendine yeter durumda yani ada operasyonunda (islanded operation) çalışabilmekte ve düğümler arası enerji alışverişi olmamaktadır.



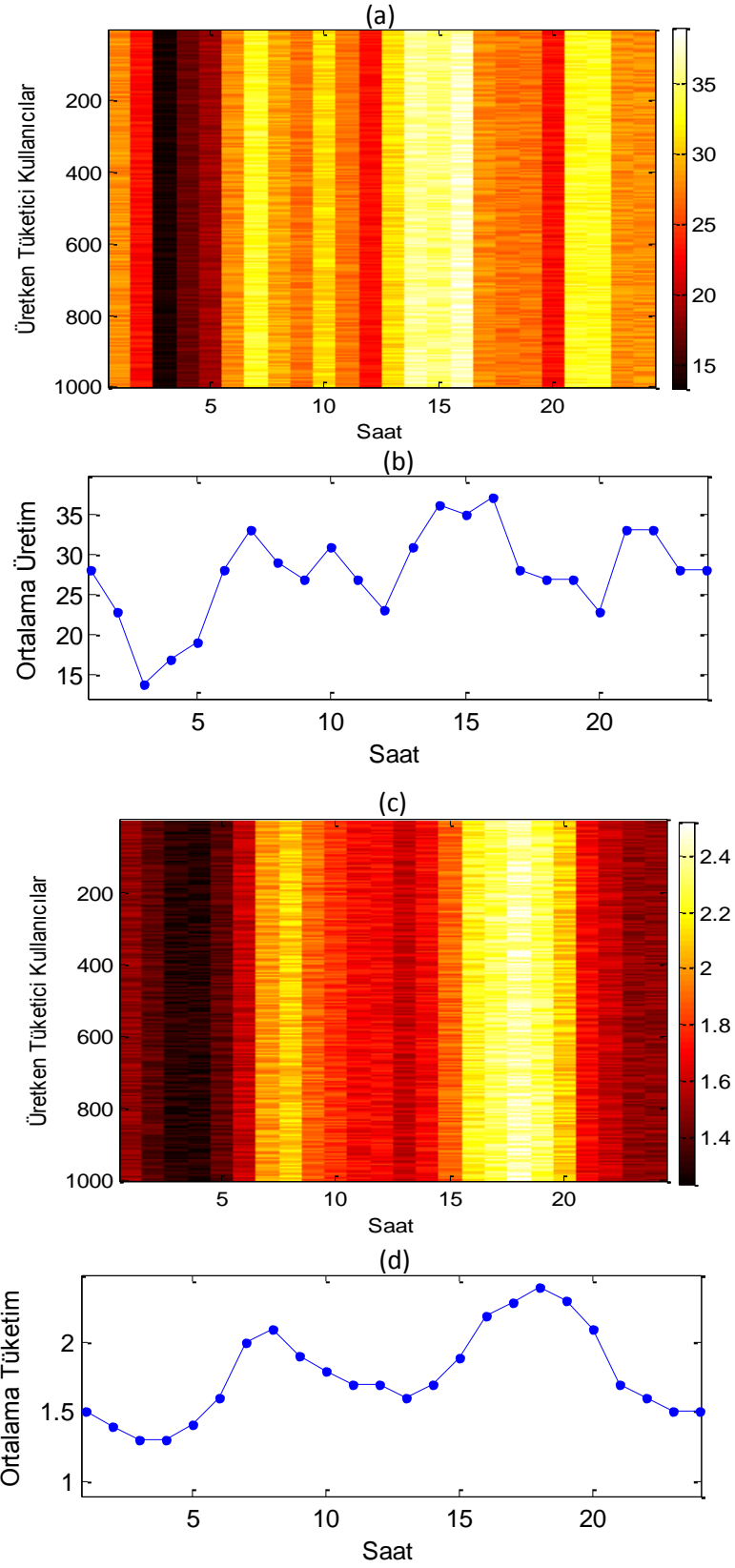
Şekil 3.10. (a) Şebekenin yeterlilik oranları, (b) Şebekenin enerji güvenilirliği, (c) Enerji güvenilirlik indeksi (GE: Güvenilirlik eşiği ve IED: İdeal enerji dengesi)

İletim kayıplarının hiyerarşik ağaç yapısına sahip şebekeye etkisini gözlemlemek için taban düğüm katmanında $\alpha_g^1 = 0.120$ ve $\alpha_c^1 = 0.136$, ikinci düzey katmanında $\alpha_g^2 = 0.125$ ve $\alpha_c^2 = 0.143$ ve kök katmanında $\alpha_g^3 = 0.130$ ve $\alpha_c^3 = 0.149$ iletim kayıpları kullanılmıştır. Şekil 3.11’de bu koşullar için simülasyon sonuçları verilmiştir. İletim kayıp oranlarının yaklaşık iki katına çıkarılması durumunda sistem enerji dengeli durumuna daha yüksek üretici olasılıklarında, yaklaşık $P_{E\dot{U}} \geq 0.64$ durumunda ulaşılabilmektedir. İletim kayıplarını minimize eden olan ideal denge durumunun ise $P_{E\dot{U}} \geq 0.91$ durumunda elde edilebildiği görülmüştür. Bu sonuçlar, iletim kayıplarının yüksek olması durumunda enerji dengelemesi için üretken tüketicilerin daha yüksek olasılıklar ile üretici durumunda bulunmaları gerektiğini göstermiştir. Bu nedenle, ağaç yapısında inşa edilecek bir şebekenin enerji güvenilir olabilmesi için iletim kayıplarının mümkün olduğunca düşük tutulmasının önemi açıkça görülmüştür.

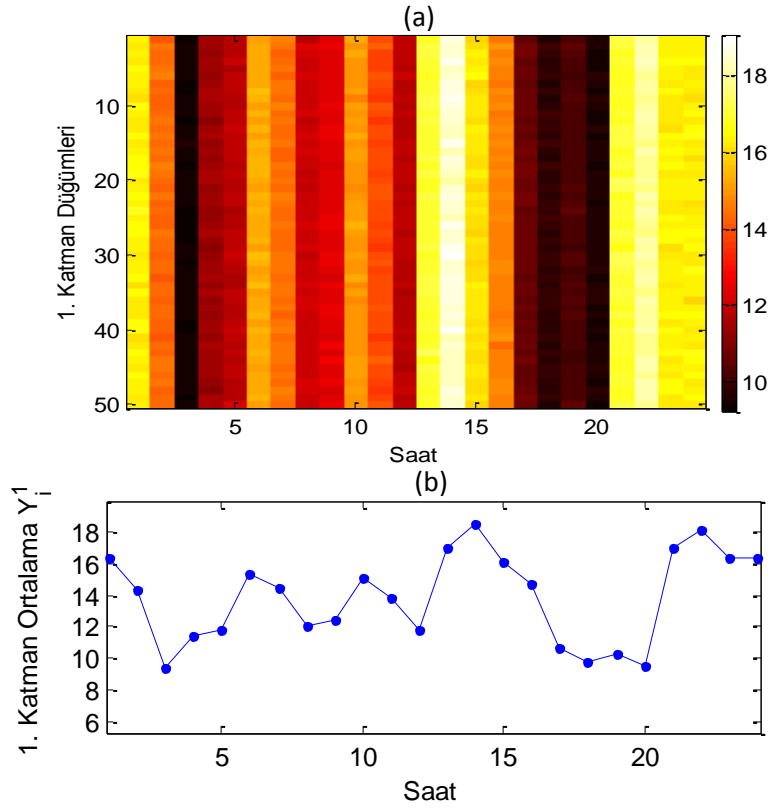
Bunun yanında, 24 saatlik talep ve üretim profillerini dikkate alan [1000 50 10 1] konfigürasyonunda hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir şebekenin simülasyonu yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Bu simülasyonlarda, üretken tüketicilerin 24 saatlik üretim ve tüketim profilleri İtalya’nın rüzgar ve güneş enerjisi potansiyeli bakımından verimli Liguria bölgesinde kurulmuş olan Capo Vado sitesi verilerinden alınmıştır [102]. Bu verilere rastgele bir $0 < \eta < 1$ sayısı için $(1 \pm \eta)$ çarpanı ile belirsizlik kazandırılması ile her kullanıcı için farklı üretim ve tüketim profilleri elde edilmiştir. Şekil 3.12(a)-(b) ve (c)-(d)’de 1000 adet rastgele üretken tüketici kullanıcı modeli için elde edilen rastgele talep ve üretim profilleri gösterilmiştir. Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de bu simülasyonda elde edilen, birinci ve ikinci katman düğümlerinde enerji yeterlilik oranlarının dağılımı gösterilmiştir. Şekil 3.15(a) ve (b)’de kök düğümünde ortalama enerji yeterlilik oranı ve karesel enerji yeterlilik hatalarının saatlik değişimi gösterilmiştir. Bu simülasyon sonuçları abonelerin üretimlerinin taleplerinden fazla olduğu durumda bütün birinci ve ikinci derece düğümlerde sistemin enerji yeterli ($Y_i^1 > 1$ ve $Y_i^2 > 1$) olduğunu, dolayısı ile enerji dağıtım sisteminin enerji güvenilir durumda olduğunu göstermiştir. Bu şebekede ciddi bir üretim fazlalığı söz konusudur ve üretim düşürülebilir durumdadır.



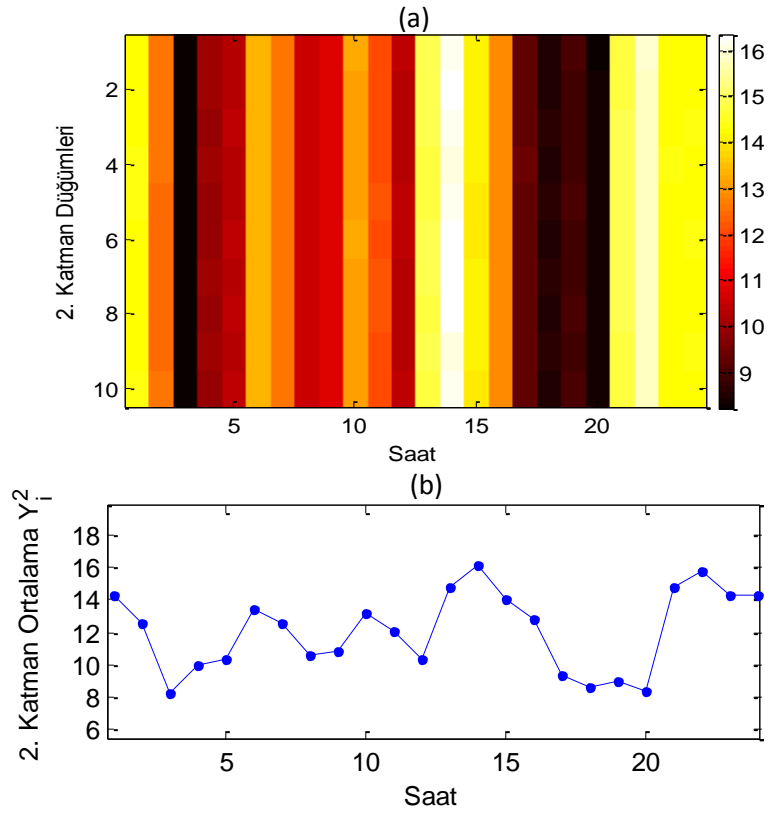
Şekil 3.11. (a) Şebekenin yeterlilik oranları, (b) Şebekenin enerji güvenilirliği, (c) Enerji güvenilirlik indeksi (GE: Güvenilirlik eşiği ve IED: İdeal enerji dengesi)



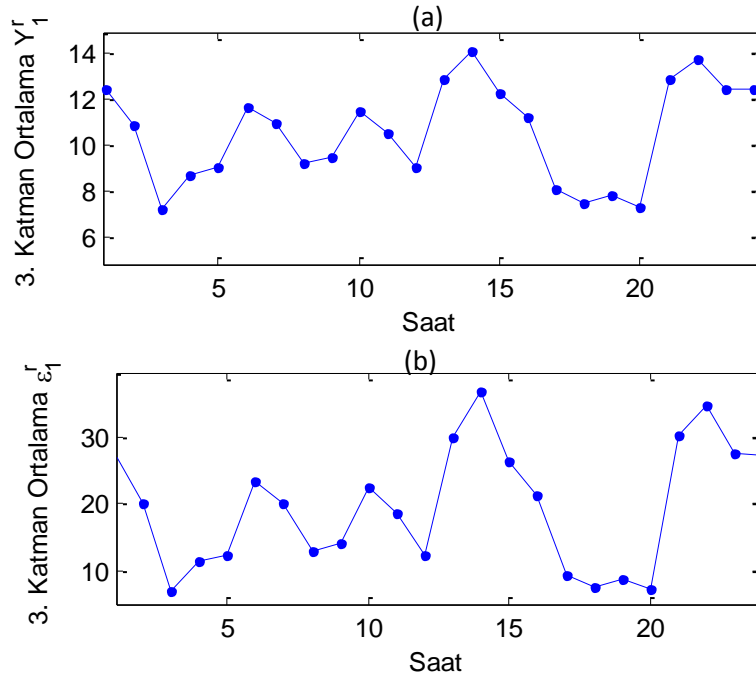
Şekil 3.12. Rastgele üretken tüketici kullanıcıların 24 saatlik üretim ve tüketim profilleri (kWh)



Şekil 3.13. Birinci katman yeterlilik oranı profilleri

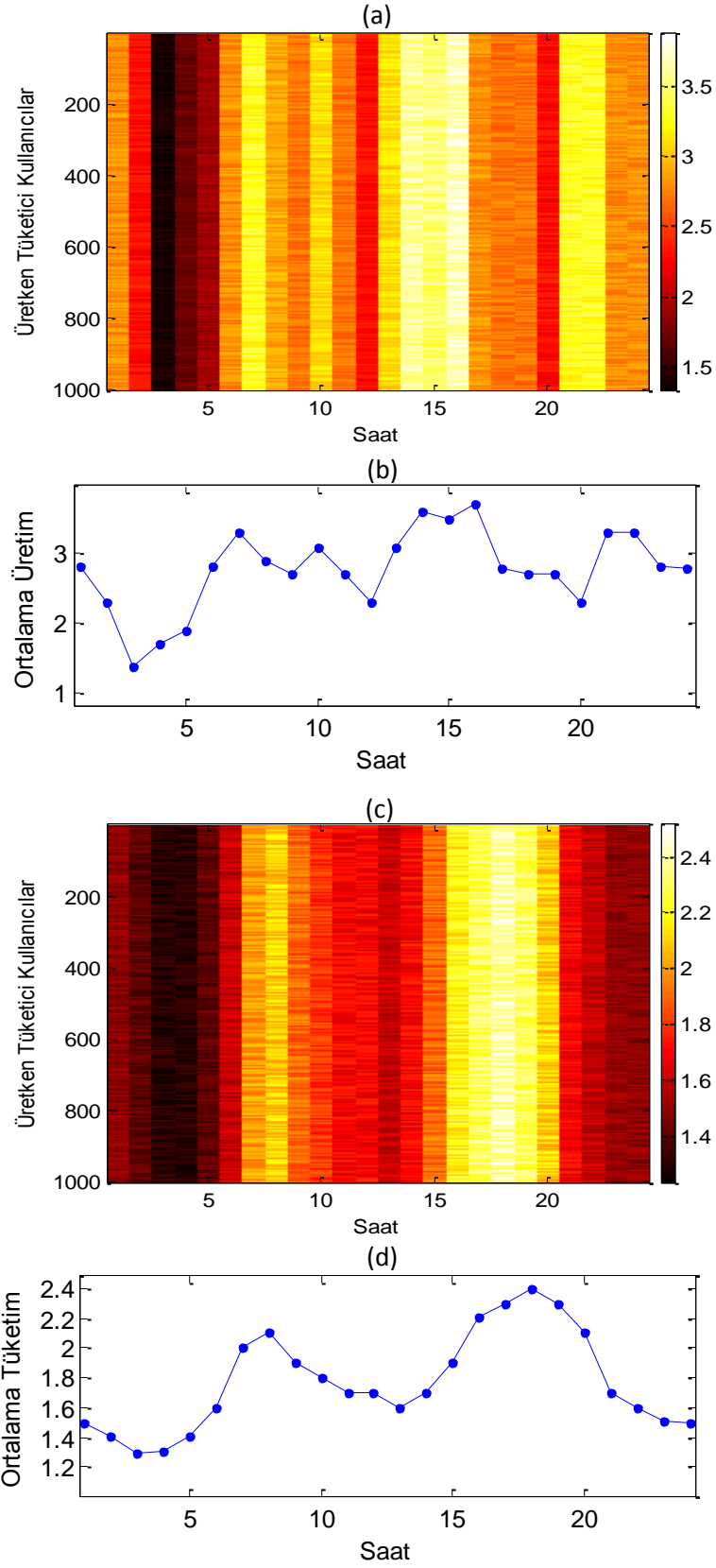


Şekil 3.14. İkinci katman yeterlilik oranı profilleri

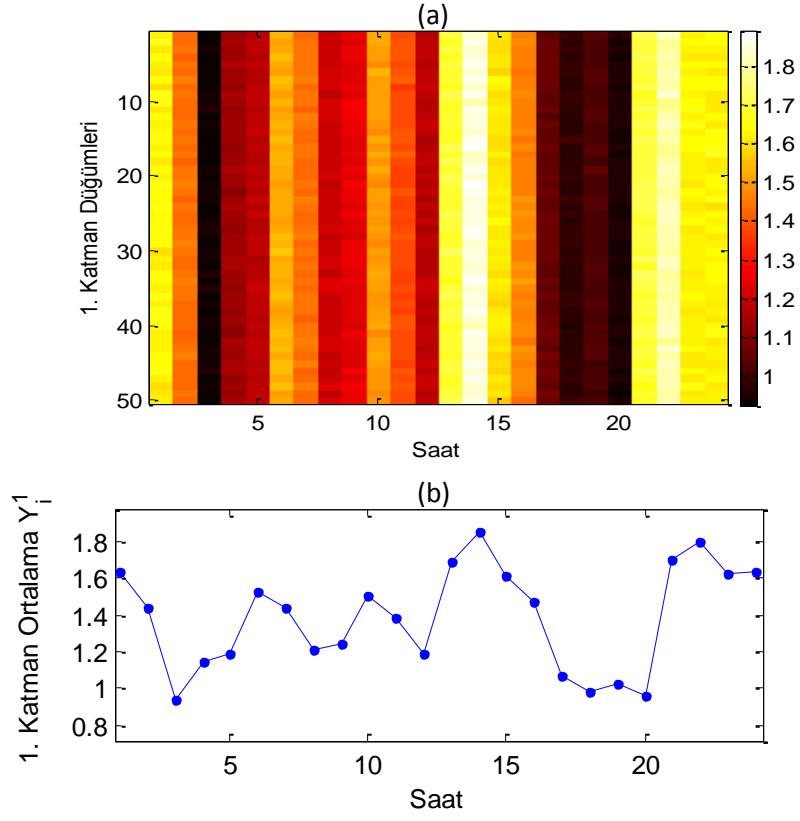


Şekil 3.15. Üçüncü katman (kök düğümü) ortalama yeterlilik oranı ve karesel enerji yeterlilik hatası profili

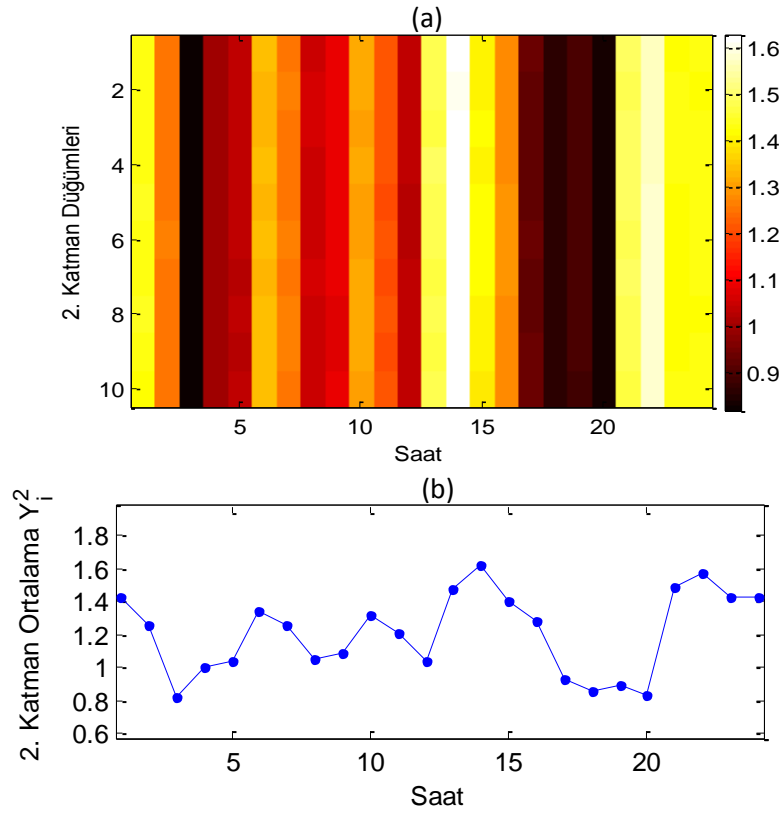
Enerji üretiminin 1/10 düzeyine düşürüldüğü durum için simülasyon sonuçları Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da sunulmuştur. Şekil 3.19(a)’da kök düğümünde şebekenin enerji yetersiz olduğu ($Y_r^1 < 1$) saatler görülmektedir. Bu yetersizliğin giderilmesi için birinci katmanın birinci düğümüne 1000 kWh üretim kapasitesine sahip sürekli enerji üretimi yapabilen yerel bir kaynak bağlanmıştır. Bu üretim profili pratikte 24 saat kararlı üretim karakteristiğine sahip hidroelektrik veya termal enerji santral ile sağlanabilir. Simülasyon sonucunda elde edilen birinci, ikinci katman düğümleri ortalama yeterlilik oranları ve kök düğüm enerji yeterlilik durumu Şekil 3.20’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlarda sistem 24 saat boyunca enerji yeterli ($Y_r^1 \geq 1$) durumunu sürdürebildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, Lund’un [28] yüksek üretim belirsizliği gösteren yenilenebilir kaynaklara dayalı üretim koşullarında, şebeke kararlılığının garanti edilebilmesi için şebeke dengeleyici güç istasyonlarına ihtiyaç duyulacağı görüşünü desteklemektedir.



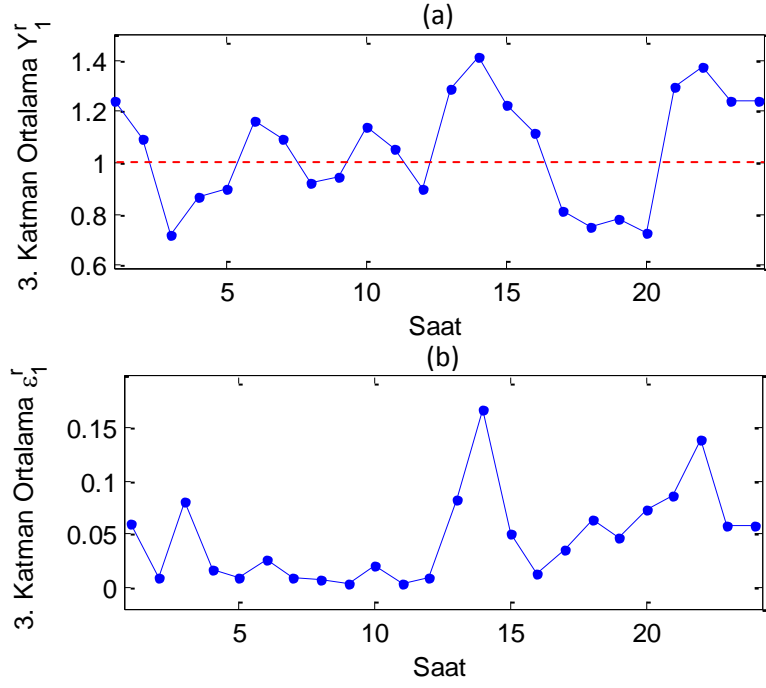
Şekil 3.16. Rastgele üretken tüketici kullanıcıların 24 saatlik üretim ve tüketim profilleri (kWh)



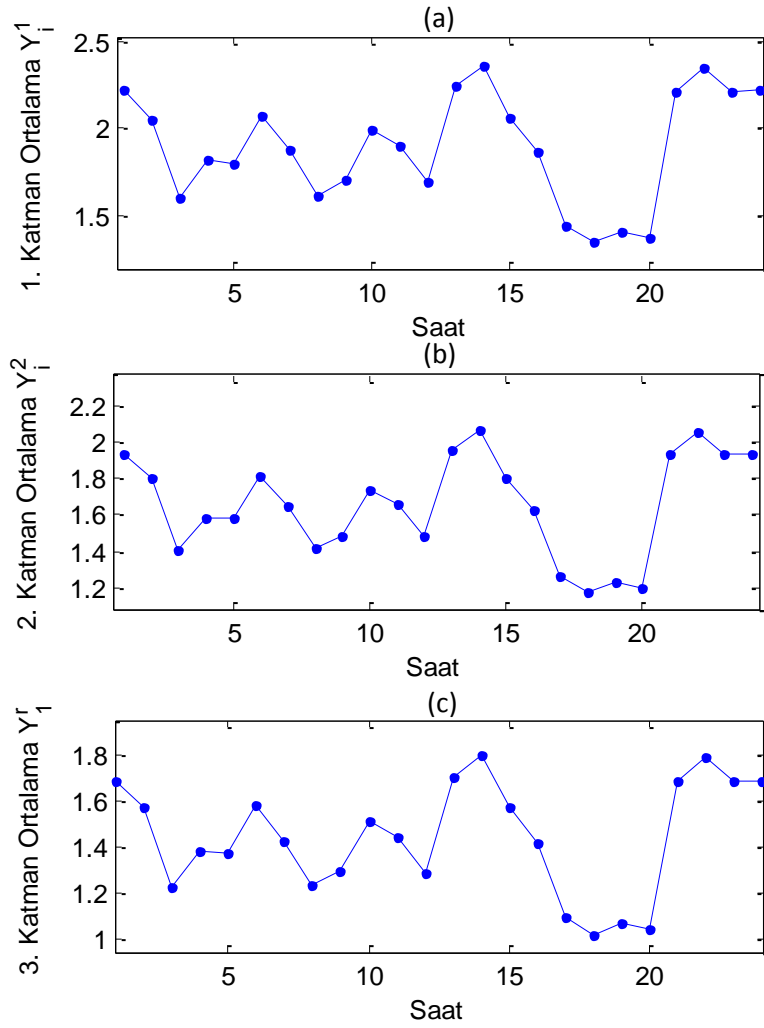
Şekil 3.17 Birinci katman yeterlilik oranları profilleri



Şekil 3.18. İkinci katman yeterlilik oranları profilleri



Şekil 3.19. Üçüncü katman (kök düğümü) ortalama yeterlilik oranı ve karesel enerji yeterlilik hatası profilleri



Şekil 3.20. Düşük üretim koşullarında 1000 kW gücünde dengeleyici güç istasyonu yardımı ile enerji dengelemesi

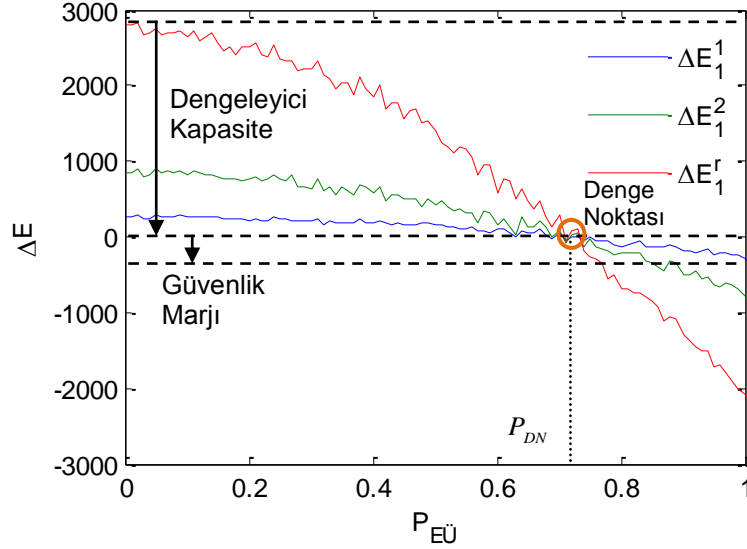
Enerji talebine kıyasla daha yüksek güneş ve rüzgar enerji üretiminin söz konusu olduğu şebeke koşullarında dengeleyici güç istasyonlarına olan gereksinim, dağıtık enerji depolama sistemlerinin kullanımı ile azaltabilmektedir. Çünkü depolama sistemleri, ihtiyaç fazlası yenilenebilir enerji üretimini, yenilenebilir kaynakların verimsiz çalıştığı ve düşük üretim sergilediği zaman dilimlerine ötelenmesini sağlayabilmektedirler. Bu zamansal öteleme, şebeke dengeleyici güç istasyonlarına olan ihtiyacı azaltmaktadır.

Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir şebekede, dengeleyici güç istasyonlarının maksimum kapasitesinin belirlenmesi amacı ile [900 9 3 1] konfigürasyonuna sahip bir şebeke üzerinde simülasyon yapılmış ve her katmanın birinci düğümlerine ait enerji yetersizlik hataları, üretken tüketici abonelerin EÜ olasılıklarına bağlı olarak Şekil 3.21’de çizilmiştir. Bu simülasyonda, iletim kayıpları nedeni ile sistemin yaklaşık $P_{EÜ} \cong 0.70$ civarında dengelenebildiği ve enerji güvenilir duruma ulaştığı görülmüştür. Abonelerin tamamen ET olduğu durumda sistemin çalışabilmesi için gereken dengeleyici güç istasyonu gücü, grafikte “dengeleyici kapasite” olarak işaretlenmiş olan $\Delta E_1^r(P_{EÜ} = 0)$ düzeyidir. Ayrıca, güç istasyonun cevap süresi nedeni ile bir miktar üretim fazlası güvenlik marjı olarak hesaba katılmalıdır. Böylece, güvenlik marjı içinde anlık güç değişimlerine cevap vermede gecikilmesi durumunda dahi sistemin enerji güvenilirliğinin korunması sağlanır. %20’lik güvenlik marjı dikkate alındığı durumda, şebeke dengeleyici güç istasyonlarının maksimum kurulu kapasitesi $\Delta E_1^r(0) + 0.2\Delta E_1^r(0)$ olarak belirlenebilir. Bu ölçekte kurulu kapasiteye sahip şebeke dengeleyici güç istasyonunun, yüksek belirsizlik gösteren üretken tüketicilerin herhangi bir EÜ modu olasılığı için anlık üretim kapasitesi, kök düğümün enerji hatasına bağlı olarak Denklem (3.38) ile belirlenebilir.

$$G_i^1 = \begin{cases} \Delta E_1^r(P_{EÜ}) + 0.2\Delta E_1^r(P_{EÜ}) & , P_{EÜ} \leq P_{DN} \\ 0 & , P_{EÜ} > P_{DN} \end{cases} \quad (3.38)$$

Burada, P_{DN} denge noktası üretici olasılığıdır ve Şekil 3.21’de görüldüğü gibi, $\Delta E_1^r = 0$ olduğu, diğer bir ifade ile bütün doğrusal enerji hatalarının kesiştiği

noktanın EÜ durumu olasılığıdır. Denge noktasında sağlanan bu kesişim, yukarı yönlü denge yayılımı teoreminin sonuçlarının simülasyonda gözlemlenebildiği noktadır.



Şekil 3.21. EÜ modu olasılığına bağlı olarak farklı katmanlardaki birinci düğümlerde lineer enerji hatası ve ihtiyaç duyulabilecek şebeke dengeleyici güç istasyonlarının kapasitesinin ΔE_1^r 'a bağlı belirlenmesi

3.2. Kapalı Çevrim Kesir Dereceli PI Kontrol ile Enerji Dengeleme Uygulaması

3.2.1. Akıllı Şebekelerde Arz-talep Fiyat İlişkisine Dayalı Enerji Dengeleme

Bu bölümde, hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir sistemde enerji dengeleme probleminin çözümü için arz-talep fiyat ilişkisine dayalı market yönetimi stratejisi incelenmiştir. Bölüm 3.1.3'de hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir sistemin enerji dağıtımını açısından en iyi çözümünün, enerji iletim kayıplarını minimize eden ideal denge durumu olan $Y_i^j = 1$ çözümü olduğu gösterilmiştir. Ancak, yukarı yönlü denge yayılımı teoreminin bir sonucu olarak sadece taban düğümlerinin enerji dengeli olmasının ($\forall i$ için $Y_i^1 = 1$) şebekenin ideal denge durumuna kavuşması için yeter koşul olduğu görülmüştü. Taban düğümlerinde yeterlilik

oranın $Y_i^1 = 1$ olması için Denklem (3.3) uyarınca ($Y_i^1 = \frac{G_i^0}{C_i^0}$), bu düğümlerde toplam üretim ve tüketimin $C_i^0 - G_i^0 = 0$ koşulunu sağlanması gerektiği görülür. Bu aynı zamanda taban düğümlerinde lineer enerji hatasının sıfır ($\Delta E_i^1 = 0$) olmasını gerektirir. Bu denge durumu, arz-talep eğrisinde toplam enerji arzının ($S = G_i^0$) ve toplam enerji talebinin ($D = C_i^0$) eşitlenmesini ifade eder.

Bu bölümde, şebeke düğüm noktalarında enerji dengelenmelerini kontrol teorisi yardımı ile sağlamak için arz-talep eğrilerine dayalı market yönetim stratejisi incelenmiştir. Şekil 3.22'de ekonomi biliminde market yönetimi için yaygın olarak kullanılan arz-talep eğrisi temsili olarak gösterilmiştir. Literatürde, elektrik arz ve talebinin dönemsel tahminleri için arz talep eğrisine dayalı elektrik piyasası modellemeleri yapılmış ve değişken elektrik fiyatlaması için değerlendirilmiştir [103].

Market yönetiminde arz talep eğrileri üzerinde arz ile talebin eşitlendiği ($D(p) = S(p)$) fiyat, serbest piyasa için en iyi (optimal) fiyat noktası (Q) olarak adlandırılmıştır. Bu yaklaşım, enerji marketlerine uygulandığı zaman optimal enerji fiyat noktasına erişilmesi (Q), aynı zamanda şebekede enerji dengesinin sağlanması anlamına gelmektedir. Diğer bir ifade ile düğüm noktalarında enerji dengesi, enerji fiyatının, sistemi enerji arz ve talebinin eşitlendiği Q noktasına sürmesi ile otomatik olarak sağlanabilir. Bu ilgili düğümde, sistemi $\Delta E_i^1 = 0$ durumuna getirir. Bu yaklaşım, düğümlerde, kapalı çevrim fiyat kontrolü ile arz talep dengelemesinin otomatik olarak sağlanabileceğini gösterir. Kapalı çevrim kontrol hatası,

$$e = D - S \quad (3.39)$$

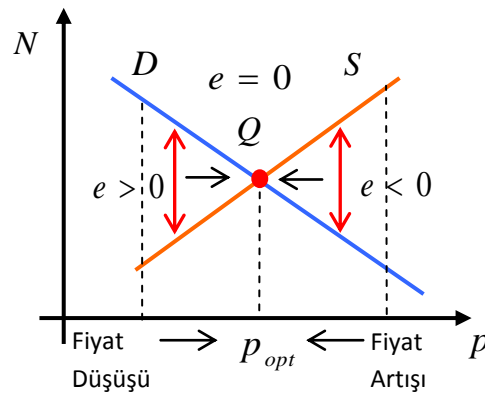
ile ifade edilirse, talep ve üretim elastikiyetinin sağlandığı bir serbest enerji piyasasında, kapalı çevrim kontrolör yardımı ile yapılan dinamik enerji fiyatlaması (fiyat regülasyonu), şebekenin enerji dengelemesini otomatik olarak gerçekleştirebilir. Burada, e kontrol hatası, düğümün lineer denge hatasına karşılık gelmektedir. Şekil 3.22'de, böyle bir sistemde, kontrolör hatasının

durumuna göre fiyatın değişim yönleri arz talep eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Şöyle ki,

(i) $e > 0$ durumunda, talep fazladır. Asimptotik kararlı ve sürekli hal hatası sıfır olan kapalı çevrim kontrol yapısı, fiyatı artırmak sureti ile üretimin artırılmasını ve talebin daraltılmasını sağlar. Böylece, kontrol hatasının asimptotik olarak sıfıra götürülmesi sureti ile ($\lim_{t \rightarrow \infty} e \rightarrow 0$) sistemi denge noktasına otomatik olarak taşır.

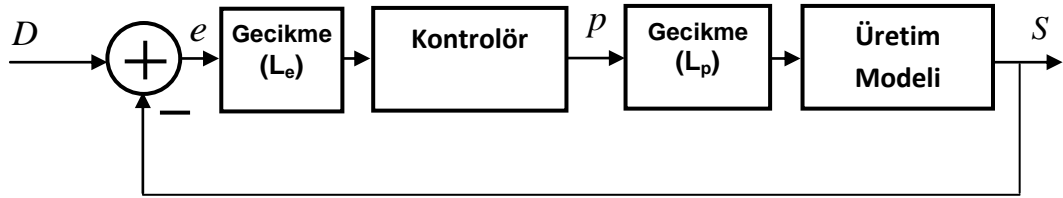
(ii) $e < 0$ durumunda ise, arz fazladır. Asimptotik kararlı ve sürekli hal hatası sıfır olan kapalı çevrim kontrol yapısı, fiyatı düşürmek sureti ile üretimi düşürür ve talebi artırır. Böylece, hatayı asimptotik olarak sıfıra götürmek sureti ile ($\lim_{t \rightarrow \infty} e \rightarrow 0$) sistemi denge noktasına taşır.

Her iki durumda, kapalı çevrim kontrol hata işareti zamanla sıfıra yerleşir ve sistemi enerji arz-talep denge noktasına, yani market yönetimi açısından optimal fiyat noktasına ulaştırır. Bu yaklaşım, kontrol teorisinde elde edilen gelişmelerin ve imkânların, üretim ve talep elastikiyetine sahip bir şebekede dinamik enerji fiyatlaması yardımı ile enerji dengesinin otomatik olarak sürdürülebilmesi amacı ile kullanımına imkân sağlar. Diğer yandan, sağlanan denge durumu fiyatı, serbest enerji piyasası açısından optimal enerji fiyatı olacaktır. Bu sistemde kontrolör enerji fiyatını sürekli $e(t) \rightarrow 0$ yönünde sürerek, sistemin optimal enerji fiyatında tutulmasını sağlar.



Şekil 3.22. Enerji arz-talep eğrisi ve kapalı çevrim kontrolör hatası

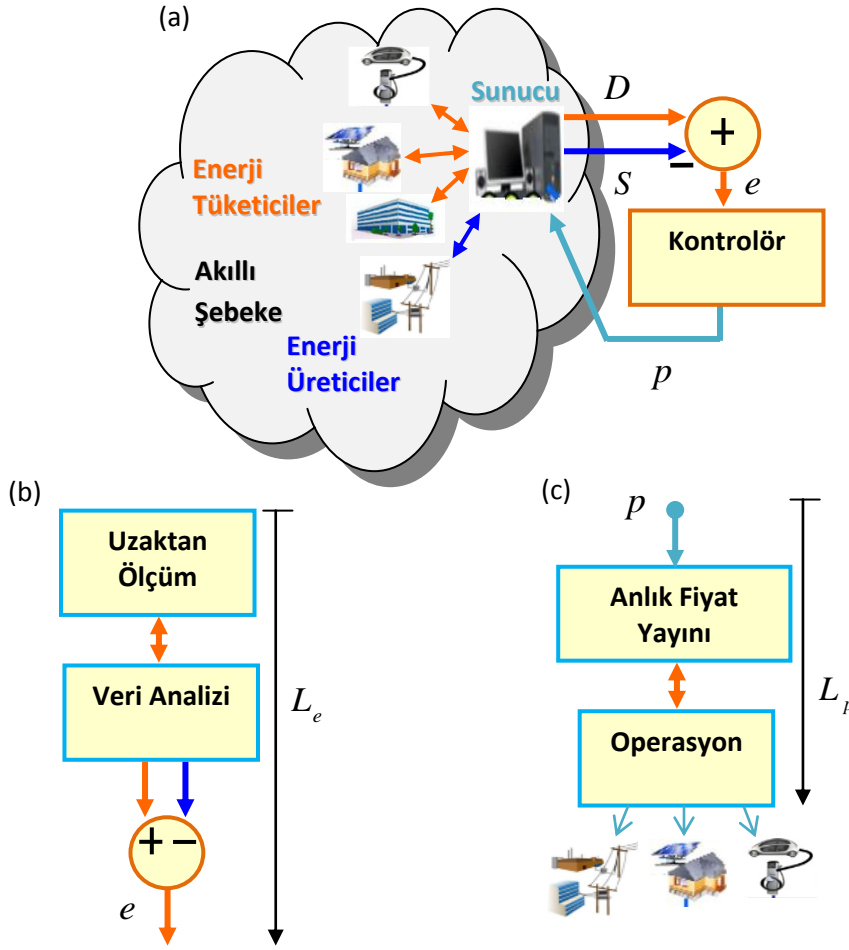
Kapalı çevrim dinamik enerji fiyatlaması için yeterince üretim esnekliğine sahip bir akıllı şebeke sisteminde, enerji üretiminin talebe göre yönetimine imkân verebilecek kapalı çevrim kontrol sistemi modeli Şekil 3.23’de sunulmuştur. Şekil 3.24(a)’de bu modelin uygulanabilmesi için ihtiyaç duyulan akıllı şebeke teknoloji altyapısı temsili olarak gösterilmiştir. Burada, enerji üretici ve tüketici birimler bulut mimarisine sahip bir haberleşme ağı üstünden fiyat sunucusuna erişim sağlarlar. Öncelikle, akıllı sayaçlar yardımı ile üretici ve tüketicilerin arz ve talepleri sunucu tarafından toplanır ve şebekenin anlık enerji denge hatası $e(t)$ kestirilir. Bu hata değerine göre kontrolör hatayı sıfıra götüren yönde dinamik enerji fiyatını günceller. Bu güncel fiyat tekrar sunucu üzerinden, üretici ve tüketicilerin akıllı sayaçlarına iletilir. Akıllı sayaçlar üzerinde çalışan yapay zeka ve optimizasyon algoritmaları ile fiyata uygun talep ve üretim cevapları verilir. Enerji tüketici durumunda olan birimlerde talep fiyata göre ayarlanır ve enerji üretici durumunda olan birimlerde ise enerji arzı fiyata göre ayarlanır. Bu yaklaşımda, kontrol performansı açısından önemi olan akıllı şebeke teknolojik altyapısına bağımlı iki sistem gecikmesi Şekil 3.24(b) ve (c)’de tanımlanmıştır:



Şekil 3.23. Dinamik enerji fiyatlaması ile kapalı çevrim üretim kontrolü

(i) Enerji denge hatası kestirimi gecikmesi (L_e): Şekil 3.24.(b)’de görüldüğü üzere bilgi teknolojilerine dayalı denge hatası kestirim yöntemi için sistem gecikmesi, akıllı sayaçlardan tüketim ve üretim bilgisinin toplanması ile başlayan ve verilerin toplanıp analiz edildikten sonra enerji denge hatasının kestirilmesine kadar geçen süreyi kapsar. Haberleşme sisteminin iletişim hızına, sunucuların veri işleme hızına, toplam erişim sağlanması gereken sayaç sayısına bağlı olarak bu süre değişkenlik gösterir. Günümüz akıllı şebeke teknolojik altyapı için bu sürenin 90–100 saniyeyi aşmayacak düzeyde tasarlanması mümkündür. AC şebekeler için kullanılacak diğer bir denge hatası kestirimi yöntemi ise doğrudan şebeke

parametrelerinin ölçülmesinden istifade eden nominal frekans sapma analizidir. Bu yöntem, doğrudan ölçülemeye dayalı olduğu için bilgi teknolojilerine dayalı denge hatası kestirim yöntemden daha hızlı ve doğru sonuçlar verebilir. Denklem (2.2) ile ifade edilmiş olan bu denge hatası kestirim yöntemi, 3-5 saniye gecikme süresi ile ölçümün yapıldığı nokta için anlık enerji denge hatası kestirimi sağlayabilmesi beklenebilir.



Şekil 3.24. (a) Kapalı çevrim dinamik fiyat kontrolü için akıllı şebeke teknolojik altyapısı, (b) Enerji denge hatası kestirimi süreci ve L_e gecikmesi, (c) Fiyat yayını süreci ve L_p gecikmesi

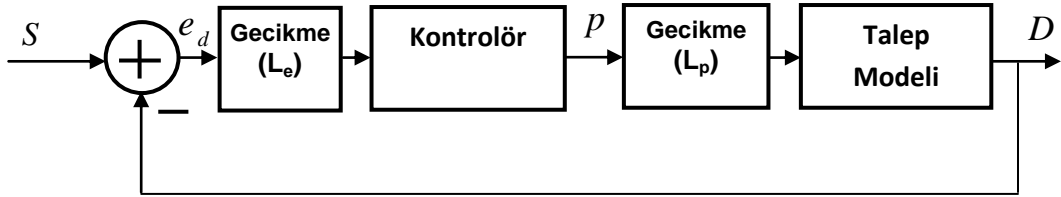
(ii) Dinamik fiyat yayını gecikmesi (L_p): Bu gecikme, Şekil 3.24(c)'de özetlendiği üzere kontrolörün anlık fiyatı belirlemesi ile başlayan, fiyatın akıllı sayaçlara iletilmesi ve bu fiyata göre kullanıcı akıllı sayacında çalışan algoritmaların ve talep taraflı yük yönetimi uygulamalarının uygun elektriksel

operasyonları başlatmasına kadar olan sistem gecikmelerini kapsar. Bu süreç, denge hatası kestiriminde olduğu gibi yoğun veri toplama aktivesi içermediği için nispeten daha çabuk gerçekleştirilebilir. Akıllı şebeke teknolojik altyapının, bu süreci 30 saniyede tamamlanabilecek düzeyde tasarlanması yeterli olacaktır.

Kapalı çevrim dinamik enerji fiyatlamasının diğer bir uygulaması yeterince tüketim esnekliğini gösterebilen bir akıllı şebekede enerji talebinin anlık üretime göre ayarlanmasıdır. Bu amaçla, kullanabilecek kontrol sistemi modeli Şekil 3.25’de sunulmuştur. Bu modele göre kapalı çevrim kontrol hatası,

$$e_d = S - D \quad (3.40)$$

ile ifade edilmiştir. Bu model, yeterince talep esnekliğine sahip bir akıllı şebekede akıllı sayaçlar vasıtası ile geniş alan (wide area) talep taraflı yük yönetimine imkan sağlar. Bu tez çalışmasında, kapalı çevrim üretim kontrolüne dayalı yaklaşım için analizleri yapılmıştır. Şekil 3.25’de görülen kapalı çevrim talep taraflı yük kontrolü uygulaması gelecek çalışma konusu olarak bırakılmıştır.



Şekil 3.25. Dinamik enerji fiyatlaması ile kapalı çevrim esnek talep kontrolü

3.2.2 Kapalı Çevrim Dinamik Enerji Fiyatlama ile Üretim Kontrolü Simülasyonu

Bu bölümde, akıllı şebeke altyapısına sahip bir enerji dağıtım sistemi için kapalı çevrim kesir dereceli PI kontörler ile üretim kontrolü simülasyonları incelenmiştir.

Bir enerji kaynağı için fiyat-üretim modellemesi, enerji üretim miktarı ile enerji fiyatı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu varsayımı altında,

$$S_d(p) = \sum_{i=0}^d a_i p^i, \quad (3.41)$$

denklemleri ile modellenmiştir. Burada, $S_d(p)$ bir p birim enerji fiyatı için toplam üretim kapasitesini temsil eder. Denklemlerde, a_i polinom katsayılarını ve d polinom derecesi göstermektedir. Bu model, enerji fiyatı arttıkça enerji arzının artan karlılık nedeni ile lineer olmayan bir karakterde artacağını öngörmektedir. Pratikte, $S_d(p)$ fonksiyonu enerji marketlerin fiyat–arz verilerine polinomsal eğri uydurma ile elde edilebilir. Simülasyonlarda geçici hal analizleri (transient analysis) yapılabilmesi için enerji kapasitesinin zamanla değişiminin modellenmesi, yani dinamik bir sistem modeli olması gerekmektedir. Enerji üretim modelinin zamanla değişimi, τ zaman sabitine sahip bir birinci derece kapasitif sistem modeli yardımı ile,

$$S(s) = S_d(p) \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.42)$$

ile ifade edilmiştir. Buna göre, bir p enerji fiyatına karşılık gelen enerji üretim kapasitesine τ zaman sabiti ile ulaşılabilecektir. Burada, τ zaman sabiti, üretim sisteminin zamansal gecikmesini veya tepki süresini modellemek için önerilmiştir. Yaklaşık 5τ sürede sistemin sıfır üretimden hedeflenen $S_d(p)$ kapasitesine ulaşacağı varsayılabilir.

Enerji üretim modelinin daha gerçekçi olabilmesi için şu iki faktör modele dahil edilmiştir:

- (i) Enerji üretimi, enerji fiyatının bir p_0 taban maliyetine ulaşması ile başlar. Çünkü, serbest piyasada enerji üretim maliyetinin altına düşen fiyatta üreticiler enerji üretimi gerçekleştirmezler.
- (ii) Enerji üretimi, sistemin kurulu gücü adı verilen bir maksimum üretim kapasitesi ile sınırlıdır. Daha yüksek üretim için yatırım yapılarak kurulu gücün artırılması gerekmektedir. Simülasyonlarda, bir üretici modeli için maksimum üretim kapasitesi, kurulu gücünü temsil eden C_{\max} ile sınırlandırılmıştır.

Bu iki faktörü dikkate alan fiyat–üretim dinamik sistem modeli, Denklem (3.42) dikkate alınarak şöyle ifade edilmiştir.

$$G(s) = \begin{cases} 0 & p < p_0 \\ S(s) & p \geq p_0 \vee S(s) \leq C_{\max} \\ C_{\max} & S_d(p) > C_{\max} \end{cases}, \quad (3.43)$$

Birden çok enerji kaynağının olduğu hibrit üretim koşulları için fiyat üretim sistem modeli,

$$S_T(s) = \sum_{j=1}^m G_j(s), \quad (3.44)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $G_j(s)$, j . kaynak için üretim modelidir ve Denklem (3.43) ile modellenmiştir. Toplam kaynak tipi sayısı m ile gösterilmiştir.

Bu üretim modeli, simülasyonda fiyatın zamanla değişmesine bağlı olarak $S_d(p)$ 'nin zamanla değişmesi nedeni ile zamanla değişen sistem modeli tanımlar. Bu durum, üretim modelinin zamansal davranışını daha gerçekçi kılmasına rağmen, sistemin kontrolünü ve kontrolör tasarımını zorlaştıran bir faktördür. Bu nedenle, kontrolörün tasarımı bir sezgisel iyileme yöntemi (heuristic optimization technique) olan deneme-yanılma (set and trail) tekniği ile gerçekleştirilebilmiştir. Sezgisel yöntemler, problemin analitik çözümün çok zor olduğu durumlarda, yeterince iyi çözümleri makul sürelerde elde edebilmek için sıklıkla başvurulan yöntemlerdir. Bu yöntemler, çözümün optimalliğini garanti edememelerine rağmen genelde yeterince iyi çözümleri bulmada etkilidirler. Bu çalışmada, kesir dereceli PI kontrolörün ($C(s) = k_p + k_i s^{-\lambda}$) katsayılarının belirlenmesi için kullanılan iki aşamalı sezgisel iyileme yöntemi aşağıda özetlenmiştir:

Aşama 1: Öncelikle, $\lambda = 1$ için elde edilen PI kontrolörün k_p ve k_i parametreleri deneme-yanılma yöntemi ile yeterince uygun bir birim basamak cevabı için elde edilir.

Aşama 2: Aşama 1'de elde edilen k_p ve k_i katsayıları için kesir derece λ , belli bir $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ aralığında $\Delta\lambda$ adımı ile değiştirilerek birim basamak cevapları elde edilir. Bu cevaplar içinden, istenen dinamik fiyat stratejisine uygun birim basamak cevabı seçilerek uygun bir λ değeri belirlenir.

Yenilenebilir kaynakların üretimde rol aldığı enerji marketlerinin yönetimi için önemli performans ölçütleri aşağıda özetlenmiştir [30].

(i) *Üretim Tüketim Oranı* (ÜTO): Anlık üretimin anlık tüketime oranıdır ve aritmetik olarak S/D ile ifade edilmiştir [29]. Bu oran, aynı zamanda hiyerarşik ağaç yapısı analizinde Denklem (3.3) ile ifade edilmiş olan enerji yeterlilik orana karşılık gelmektedir. Bu oranın birden küçük ($S/D < 1$) olduğu durumlar, sistemde enerji yetersizliğinin olduğuna işaret eder. Bu durumlarda kapalı çevrim kontrol hatası birden büyüktür ($e > 0$). Kapalı çevrim üretim kontrolünde enerji yetersizlik durumlarının olasılığını azaltmak için sanal talep (ST) adı verilen talep fazlalığı oluşturularak üretimin gerçek talepten biraz daha fazla olması sağlanmıştır. Böylece, bu üretim fazlalığı ile sağlanan marj içinde kalan talep veya üretim dalgalanmalarının şebeke için bir enerji yetersizlik durumu $S/D < 1$ oluşturması engellenmiştir. Üretim fazlalığı ile sağlanan güvenlik marjının, hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir şebekede önemi Şekil 3.21’de değerlendirilmiştir. Sanal talep dikkate alındığında toplam talep $D = D_r + D_s$ olarak tanımlanmıştır. Burada, D_r gerçek toplam taleptir. D_s ise sanal talebi temsil eder ve $D_s = \varphi D_r$ ile ifade edilmiştir. Bu tez çalışmasında, simülasyonlarda %20 sanal talep oranı yani $\varphi = 0.2$ kullanılmıştır. Bu durum gerçek talepten %20 daha fazla talebi karşılayabilecek bir üretim fazlası sağlamıştır. Böylece talebin ya da üretimin %20’lik bir bant içinde salınmasının enerji yetersizlik durumu oluşturması önlenmiş ve sistemin enerji güvenilirliği iyileştirilmiştir. Üretim tüketim oranının birden büyük olduğu $S/D > 1$ durumları ihtiyaç fazlası enerji üretimine işaret eder. Üretim fazlalığının yüksek olması enerji verimliliğini azaltan bir faktördür.

(ii) *Ortalama Enerji Fiyatı* (OEF): Bu parametre enerji fiyatının ortalama değeridir ve fiyatın beklenen değeri $E[p]$ ile gösterilmiştir. Enerji marketlerinde ortalama enerji fiyatlarının düşük tutulması hedeflenir ve düşük fiyat ile enerji dengelemesi enerji marketi yönetimi başarısına işaret eder.

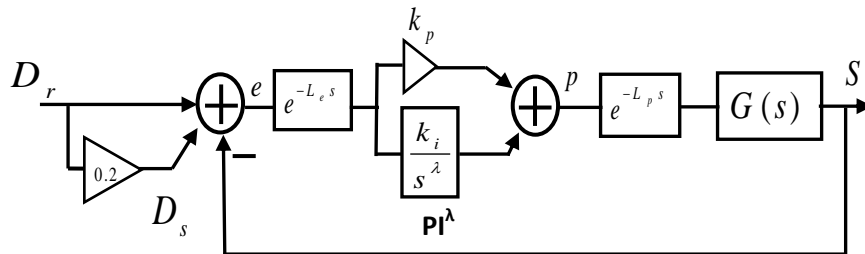
(iii) *Fiyat Değişkenlik Faktörü* (FDF): Bu parametre istatistiki değişkenlik ölçütü olan fiyat standart sapmasının fiyatın beklenen değerine oranı ($\sigma(p)/E[p]$) ile tanımlanmıştır. Bu oranın yüksek olması, fiyat değişkenliğinin veya dalgalanmasının yüksek olması anlamına gelir ve enerji market yönetimi için

istenmeyen bir durumdur. Başarılı bir enerji market yönetimi için daha az değişken ve daha istikrarlı fiyatlama ile enerji dengesinin sağlanması arzu edilir. Bu nedenle, enerji fiyatı kontrolünde bu parametrenin düşük olması hedeflenir.

(iv) *Ortalama Enerji Yetersizlik Hatası (OEYH)*: Bu ölçüt hata işaretinin pozitif olduğu ($e(t) > 0$) anların ortalamasını verir. Bir enerji şebekesi için enerji yetersizlik durumu en kötü dengesizlik durumudur. Çünkü enerji yetersizlik durumunun yol açacağı kesinti ve servis aksamalarının hem sosyal hem de ekonomik zararları kısa vadede görülebilmektedir. Dolayısı ile akıllı şebeke sistemleri tasarlanırken enerji yetersizlik hatasına karşı mümkün olduğunca dayanıklı olması amaçlanmalıdır. Diğer durum olan ihtiyaç fazlası üretim durumu ($e < 0$) tolere edilebilir. Çünkü kısa vadede olumsuz etkileri görülmez. Orta vadede enerji verimliliğinin düşmesine yol açar. Bu nedenle ST uygulaması ile enerji yetersizlik durumu riskini azaltabilmek için makul düzeyde bir ihtiyaç fazlası üretime izin verilmelidir. Sonuçta, enerji verimliliğinin biraz düşmesi karşılığında, akıllı şebekenin güvenilirliği artırılır ve sosyal riskler azaltılır.

Bu bölümde akıllı şebekelerde kapalı çevrim üretim kontrolü ile enerji dengelemesi konusunda iki simülasyon senaryosu incelenmiştir. Birinci senaryoda, sistemin tek tip enerji üretici modeli için basamak talep artışına karşılık sistemin cevabı analiz edilmiştir. İkinci senaryoda, çok kaynaklı bir enerji sisteminin 24 saatlik talep profiline cevabı değerlendirilmiştir. Bu senaryoda, kötü hal analizi için rastgele üretim belirsizliği, sert talep tepesi ve dipleri uygulanmış ve sistemin performansı değerlendirilmiştir.

Birinci simülasyon senaryosu için kullanılan simülasyon modeli Şekil 3.26'da görülmektedir.



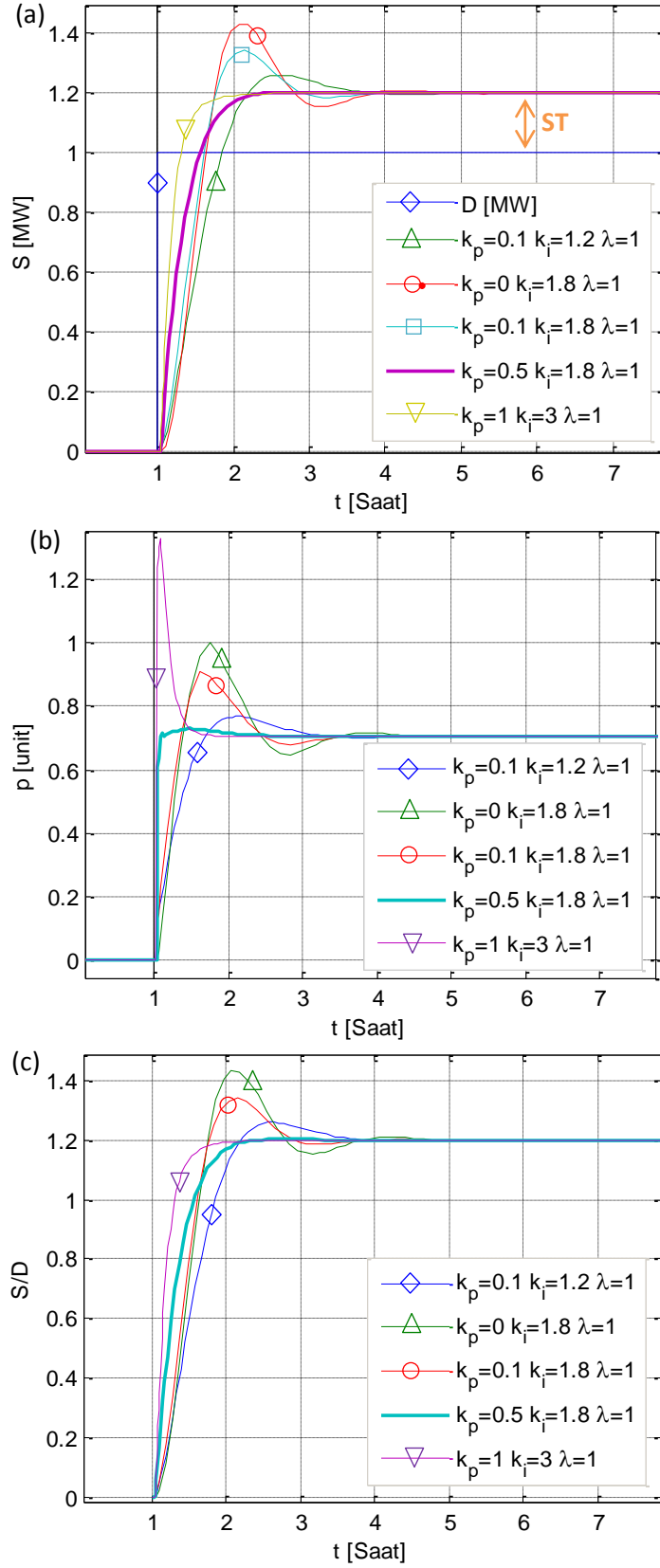
Şekil 3.26. Birinci simülasyon senaryosu için tek tip enerji kaynaklı kapalı çevrim üretim kontrol sistemi modeli

Simülasyonlarda akıllı şebeke enerji hatası tahmin gecikmesi $L_e = 108$ saniye alınmıştır. Bu süre bilgi teknolojilerine dayalı enerji denge hatası kestirimi için makul bir gecikmedir. Frekans sapmasına dayalı denge hatası gecikmesi kestirimi için ise fazlası ile kâfi gelebilecek bir süresidir. Fiyat yayını gecikmesi için $L_p = 36$ saniye öngörülmüştür ve bu süre bulut mimarisine sahip bir haberleşme ağı üstünden fiyat sinyalinin yayılımı için makul bir gecikme süresi olarak kabul edilebilir. Üretici modeli için birim enerji üretim maliyeti $p_0 = 0.1$ unit (birim fiyat) ve maksimum kurulu güç kapasitesi $C_{\max} = 10$ MW varsayılmıştır. Birim fiyat üretim kapasitesi ilişkisinin $S_d(p) = 0.001 p^2 + 1.7 p$ olduğu varsayılmış ve üretim sisteminin zaman sabiti $\tau = 0.31$ saat alınmıştır. Bu zaman sabiti, yaklaşık olarak termal enerji türbinlerinin cevap sürelerine uygun bir cevap sağlar. Böylece, fiyatla değişen üretim modeli,

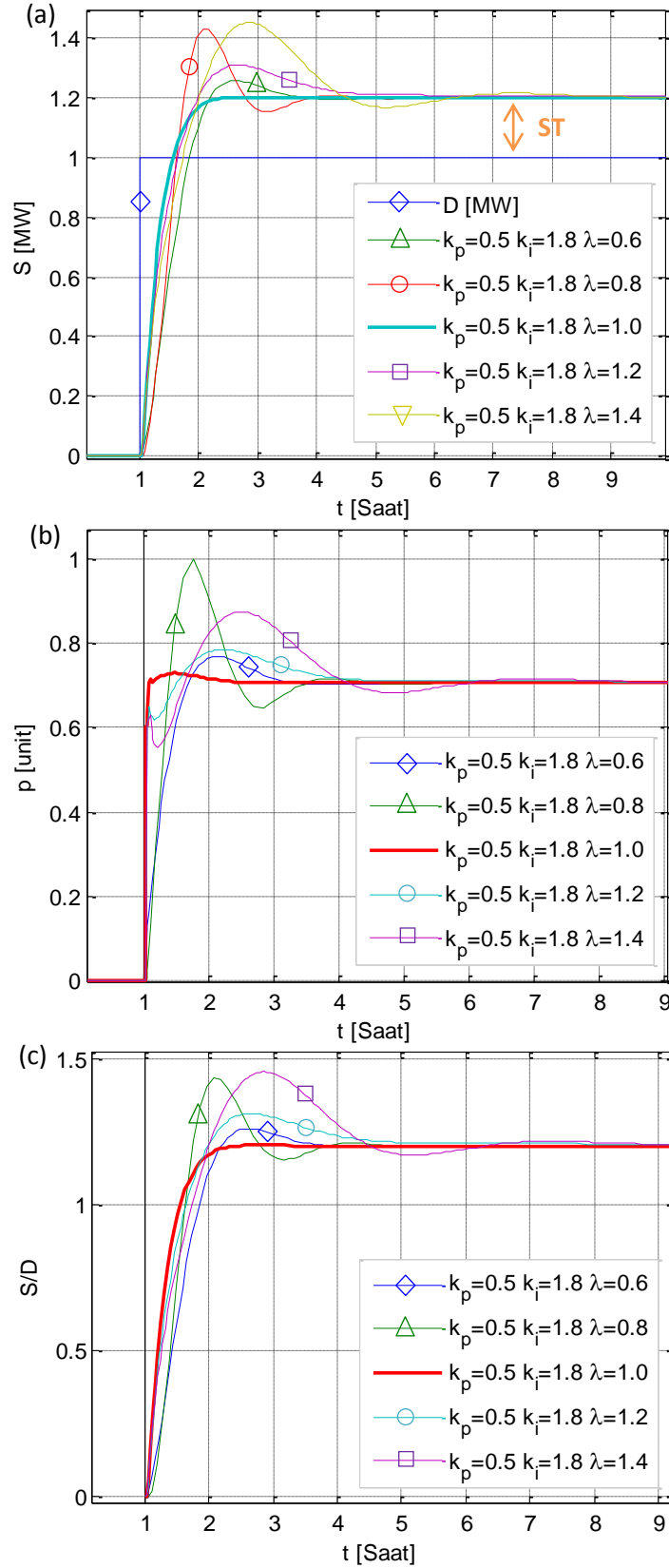
$$S(s) = (0.001 p^2 + 1.7 p) \frac{1}{0.31 s + 1} \quad (3.45)$$

olarak elde edilmiştir. Simülasyonlarda, sanal talep (ST) olarak $D_s = 0.2 D_r$ kullanılmış ve %20'lik bir fazla üretim güvenlik marjı sağlanmış ve sistemin enerji güvenilirliği iyileştirilmiştir.

Şekil 3.27'de $\lambda = 1$ için deneme-yanılma yöntemi ile elde edilen uygun PI kontrolör tasarımlarının birim basamak talep cevapları sunulmuştur. Görüldüğü üzere seçilen bütün tasarımlarda farklı dinamik fiyat cevapları için kapalı çevrim üretim kontrolü gerçekleştirebilmiş ve üretimin sanal talebinde dahil olduğu toplam talep değerine yerleşmesi sağlanmıştır. Burada, akıllı şebeke enerji dengeleme problemi açısından en iyi cevaplar, enerji yetersizlik durumu ($S/D > 1$) riskinin ve fiyat değişkenliğinin mümkün olduğunca az olduğu tasarımlar olmalıdır. ($k_p = 0.5, k_i = 1.8, \lambda = 1$) tasarımının bu bağlamda iyi bir tasarım olduğu görülmüştür. Yerleşme hızı makul derecede hızlı iken fiyat dalgalanması ya da fiyat tepesi oldukça düşüktür. Böylece, 1 MW'lık gerçek basamak talep artışı karşısında, daha az fiyat değişkenliği ve enerji yetersizlik riski ile sistemi dengeli dengeleyen uygun bir PI kontrolör belirlenmiştir.

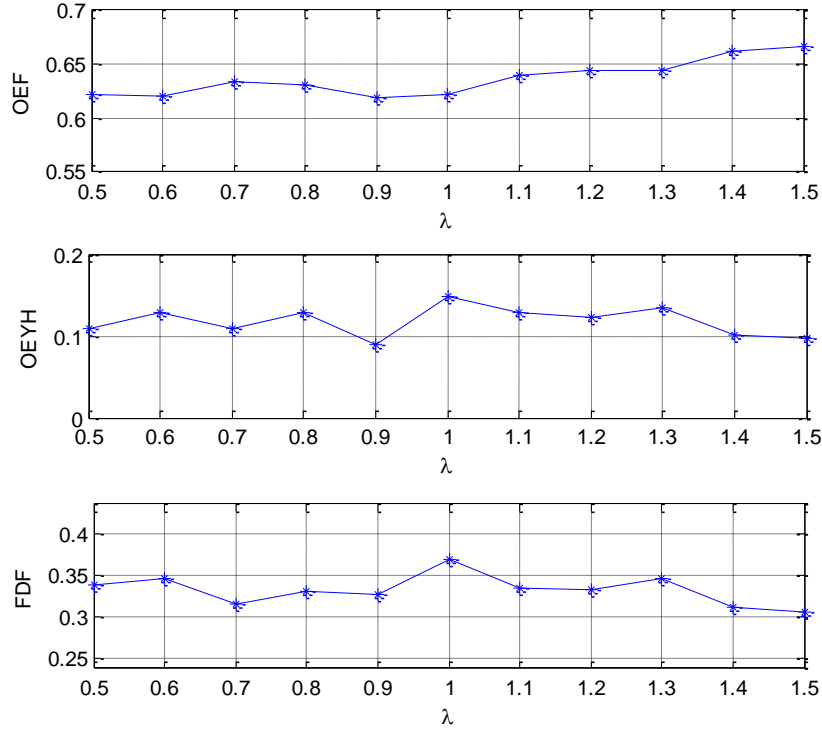


Şekil 3.27. Birim basamak gerçek talep artışı karşısında kapalı çevrim PI kontrol sisteminin cevapları



Şekil 3.28. Birim basamak gerçek talep artışı karşısında kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sisteminin farklı λ değerleri için cevapları

İkinci aşamada, integral alıcının kesir derecesi $0.5 < \lambda < 1.5$ aralığında değiştirilerek, λ 'nin sistem cevabına etkileri incelenmiştir. Şekil 3.28'de bu simülasyonlarda elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Şekil 3.29'da λ 'nin değişimine karşılık performans ölçütlerinin değişimi görülmektedir. Bu karakteristiklerin değerlendirilmesi ile hedeflenen dinamik fiyatlandırma ve enerji güvenilirliği stratejisine uygun bir λ 'nin belirlenmesi mümkün olabilmektedir.



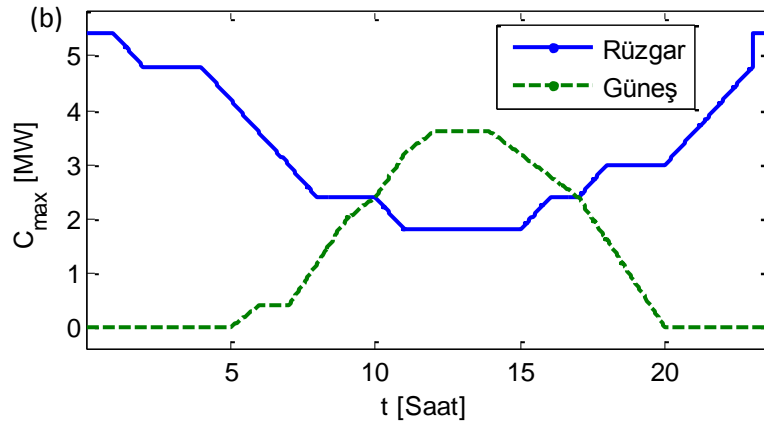
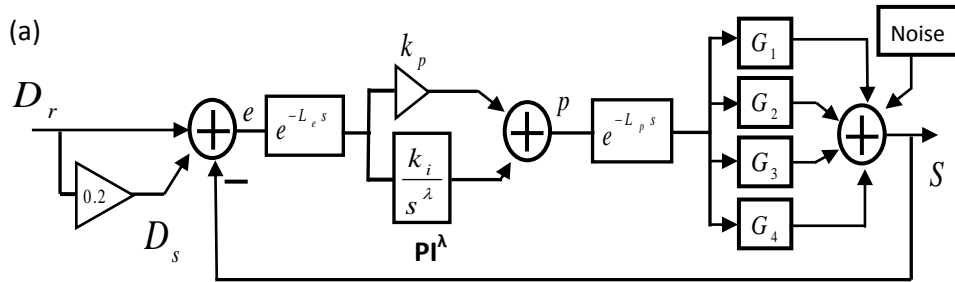
Şekil 3.29. Birim basamak talep artışı karşısında kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sisteminin enerji market yönetimi performans ölçütlerinin λ 'ya bağlı değişimi

İkinci simülasyon senaryosunda, üretim belirsizliği ve dalgalanması gösteren yenilenebilir enerji kaynaklarının da bulunduğu çok kaynaklı bir akıllı şebeke enerji dağıtım sisteminde, dalgalı bir 24 saatlik talep profili karşısında kapalı çevrim üretim kontrol sisteminin enerji dengeleme kabiliyeti incelenmiştir. Çizelge 3.1'de toplam 60 MW kurulu güce sahip çok kaynaklı üretim sisteminin model parametreleri görülmektedir. Simülasyonlarda, güç üretim kararlılığı gösteren termal enerji kaynakları (doğalgaz, kömür) ve hidroelektrik kaynaklarının gün boyunca sabit güç sağlayabilmeleri nedeni ile maksimum üretim kapasiteleri (C_{\max}) yani kurulu güç kapasiteleri 24 saat boyunca sabit

alınmıştır. Ancak, rüzgar ve güneş enerjilerinin üretim kapasiteleri dış etkenlere bağlı olarak saatlik değişkenlik gösterebilmektedir. Bu özellik, simülasyonlarda rüzgar ve güneş enerji kaynakları için zamanla değişen maksimum üretim kapasitesi ($C_{\max}(t)$) tanımlaması ile sağlanmıştır. Şekil 3.30(a)'da çok kaynaklı simülasyon modeli ve Şekil 3.30(b)'de üretim dalgalanması gösteren yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim profilleri görülmektedir.

Çizelge 3.1. Simülasyonda kullanılan çoklu enerji üretim sistemi modelleri

j	Enerji Kaynakları	$C_{\max, j}$ (MW)	$P_{0, j}$ (Unit/ MW)	Fiyata bağlı dinamik üretim modeli (S_j)
1	Termal enerji	20	0.1	$(0.01 p^2 + 2.5 p) / (0.31 s + 1)$
2	Hidroelektrik	30	0.2	$(0.01 p^2 + 2.5 p) / (0.052 s + 1)$
3	Rüzgar enerjisi	6	0.15	$(0.01 p^2 + 2.5 p) / (0.084 s + 1)$
4	Güneş enerjisi	4	0.5	$(0.01 p^2 + 2.5 p) / (0.052 s + 1)$



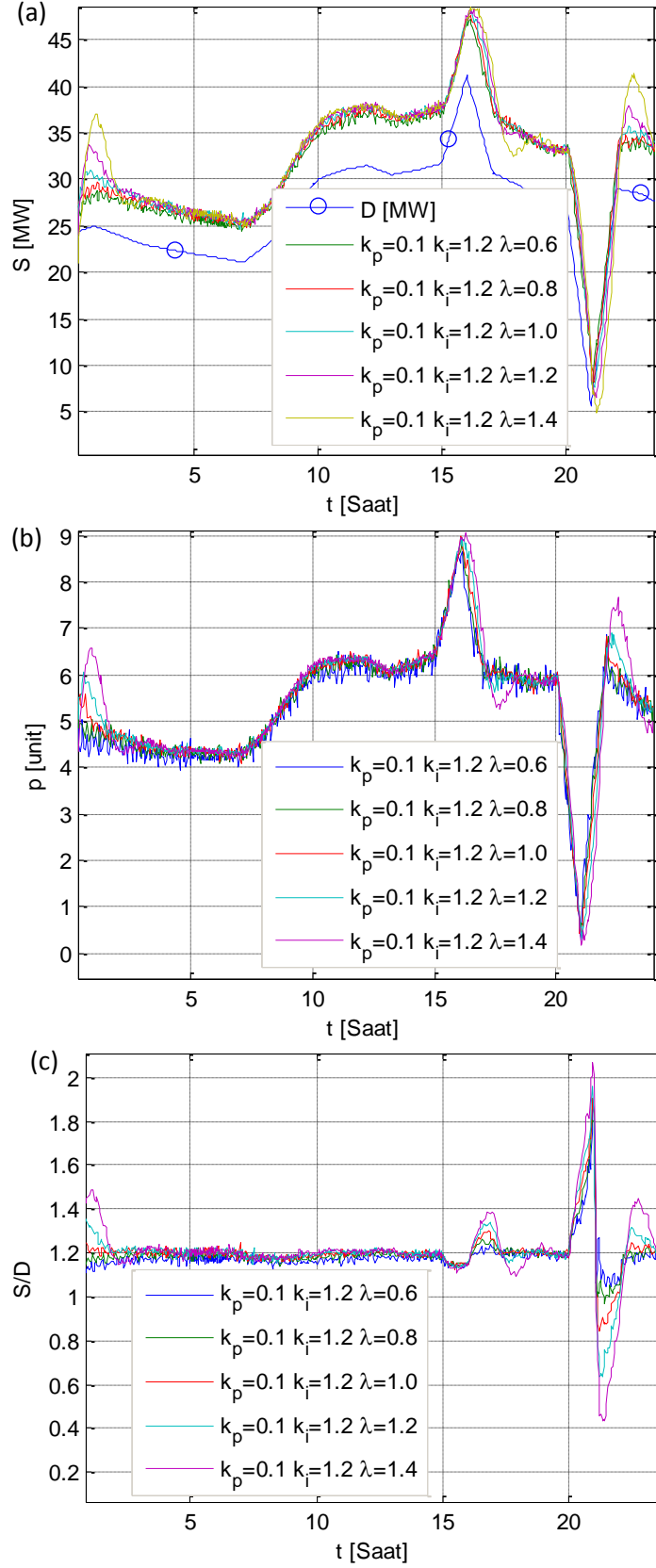
Şekil 3.30. (a) İkinci simülasyon senaryosu için çok kaynaklı kapalı çevrim üretim kontrol sistemi modeli, (b) Rüzgar ve güneş enerji değişken üretim kapasitesi

Şekil 3.31’de farklı λ değerleri için elde edilen simülasyon sonuçları, 24 saatlik profil olarak sunulmuştur. Bu simülasyonlarda ortalama değeri sıfır ve varyansı 0.05 olan rastgele gürültü işareti toplam üretime eklenerek bir miktar anlık üretim belirsizliği oluşturulmuştur. Bu belirsizlik market simülasyonunu, gerçek koşullara daha yakın kılmıştır. Simülasyon sonuçları seçilen kesir dereceli PI kontrolör tasarımlarının başarılı bir enerji dengelemesi gerçekleştirebildiğini göstermiştir.

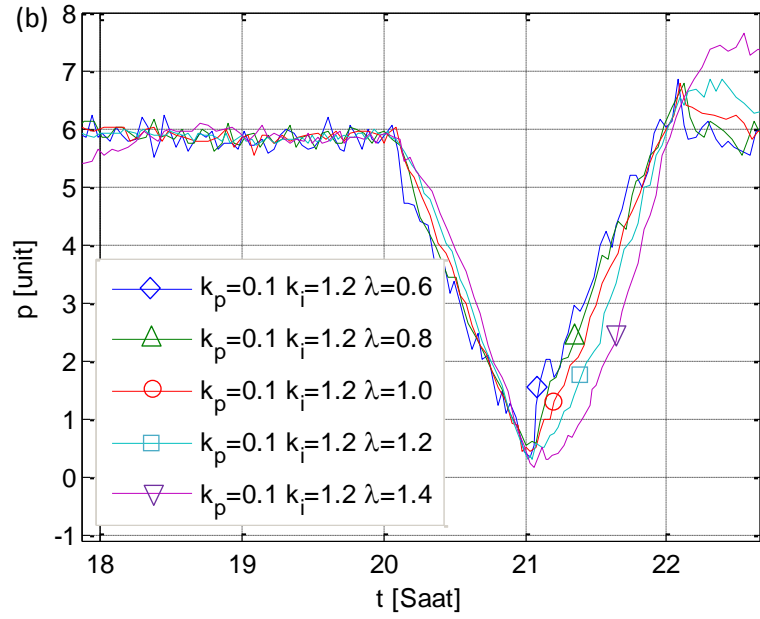
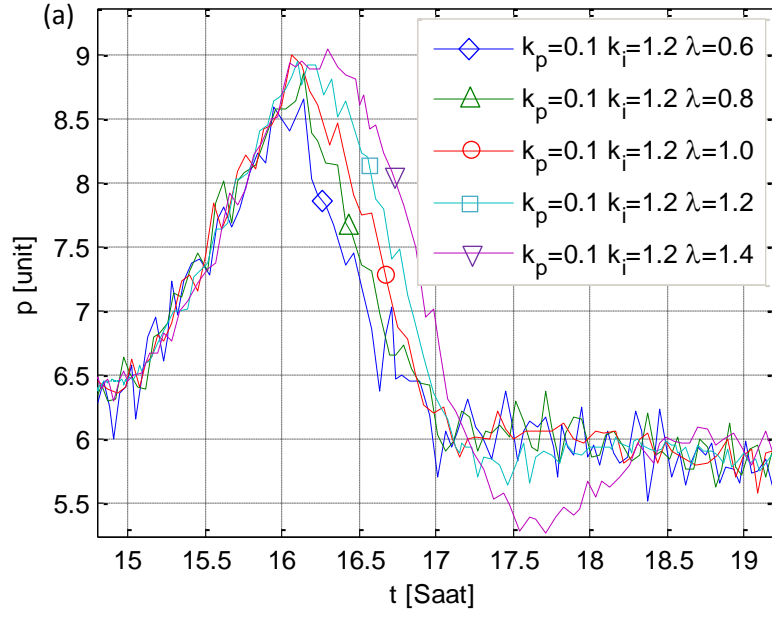
Şekil 3.31’de görülen saat 16:00 ve 21:00’de gerçekleştirilen hızlı talep artışı ve hızlı talep düşüşü ile kötü hal analizi yapılmıştır. Enerji dengeleme problemi açısından hızlı talep artışları ve düşüşleri üstesinden gelinmesinin zor olduğu koşullardandır. Şekil 3.32’de, kesir dereceli PI kontrolörün talepteki bu sert değişimlere dinamik enerji fiyatını regüle ederek cevap verdiği ve enerji dengesini korumaya çalıştığı görülmektedir.

Şekil 3.33’de saat 16:00 ve 21:00’daki sert talep değişimleri için kontrol sisteminin S/D oranı görülmektedir. Burada, kesir dereceli PI kontrolörün, Şekil 3.32’de görülen dinamik fiyat regülasyonları ile sistemin enerji dengesini koruyabildiği görülmüştür. Ancak, $\lambda > 0.8$ için saat 21:00’deki sert talep düşmesinde kısa süreli enerji yetersizlik durumu ($S/D < 1$) oluşabildiği görülmüştür. Bu durum enerji kesintilerine yol açabileceği için istenmeyen bir durumdur.

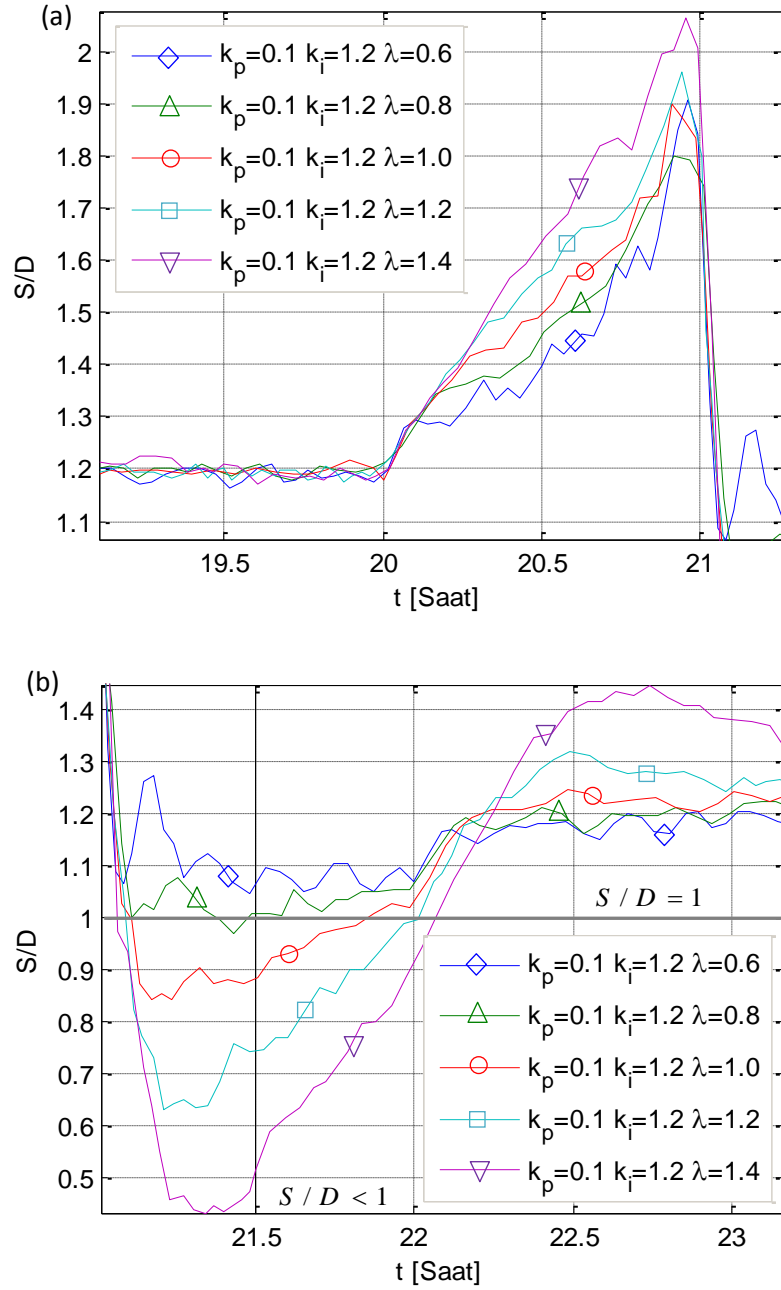
Şekil 3.34’de kesir dereceli PI kontrol sisteminin enerji market yönetimi performans ölçütlerinin λ ’ya bağlı değişimi görülmektedir. Bu ölçütler dikkate alınarak tercih edilen bir enerji market yönetim strateji, uygun bir λ değeri seçilerek hayata geçirilebilir. Bu simülasyon senaryosunda, $\lambda = 0.6$ ’nın hem düşük ortalama enerji fiyatı hem de makul enerji güvenilirliği ve düşük fiyat değişkenliği sunması bakımından, ikinci simülasyon senaryosu için en uygun kesirli derece PI kontrolör adayı olarak seçilebilir.



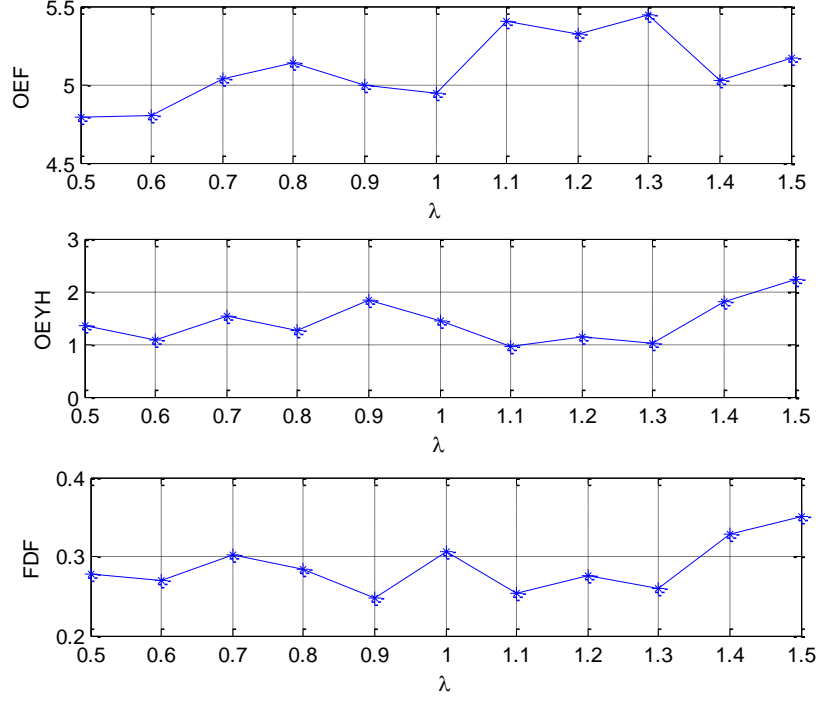
Şekil 3.31. Çok kaynaklı akıllı şebeke sisteminin kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrolörler ile enerji dengeleme simülasyonu sonuçları



Şekil 3.32. Şekil 3.31’de elde edilen simülasyon sonucunun saat 16:00’deki tepe talebi ve saat 21:00’deki dip talebi için kesir dereceli PI kontrolörlerin fiyat cevapları

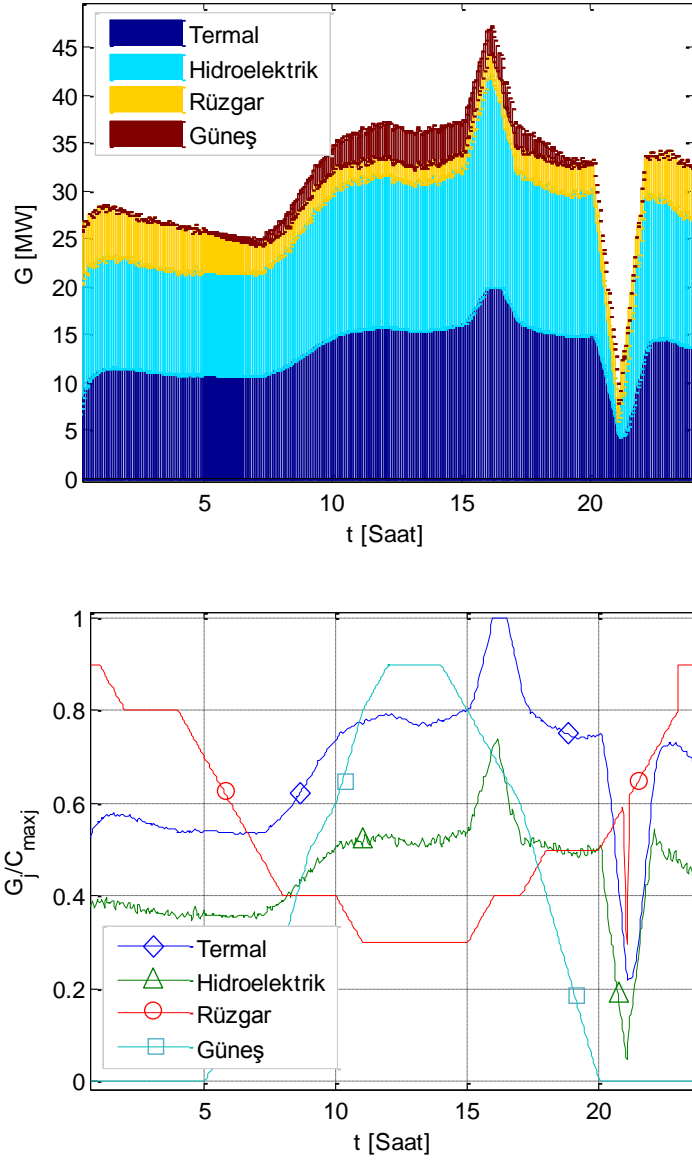


Şekil 3.33. Şekil 3.31’de elde edilen simülasyon sonucunun saat 16:00’deki tepe talebi ve saat 21:00’deki dip talebi sonucunda sistemin S / D oranları



Şekil 3.34. Çok kaynaklı kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sisteminin enerji market yönetimi performans ölçütlerinin λ 'ya bağlı değişimi

Şekil 3.35'de simülasyon süresince, kaynakların sisteme sağladığı enerji miktarlarının ve kurulu kapasite kullanım oranları ($G_j / C_{\max, j}$) saatlik dağılımları görülmektedir. Üretim kapasitesi saatlik değişim gösterebilen rüzgar ve güneş enerjilerinin verimli olduğu saatlerde yüksek kapasite ile kullanıldığı görülmüştür. Saat 16:00'da oluşan talep artışına önemli oranda hidroelektrik kaynaklar cevap vermiştir. Bunun temel nedeni, Çizelge 3.1'de görüldüğü üzere hidroelektrik kaynağın diğer kaynaklara göre zaman sabitinin düşük ve kurulu kapasitesinin nispeten yüksek tanımlanmasıdır. Bu nedenle, anlık ve yeterince güçlü cevap gereken anlarda hidroelektrik kaynaklar ağırlıklı olarak cevap vermeye çalışmış ve enerji dengesini korumuştur. Şekil 3.35(b)'de hidroelektrik kapasite kullanım oranı karakteristiğinde görülen gürültü işareti, simülasyona gürültü (noise) olarak eklenen rastgele üretim belirsizliklerine önemli oranda hidroelektrik santralleri ile cevap verilebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.35 Simülasyon süresince kaynakların sisteme sağladığı, (a) enerji miktarları ve (b) kurulu kapasite kullanım oranları ($G_j / C_{max,j}$)

Bu bölümde sunulan simülasyon sonuçlarında şu durumlar gözlemlenmiştir:

(i) Akıllı şebeke dağıtım sisteminde enerji dengesinin, kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sistemi tarafından dinamik enerji fiyatlaması yardımı ile sağlanabileceği görülmüştür.

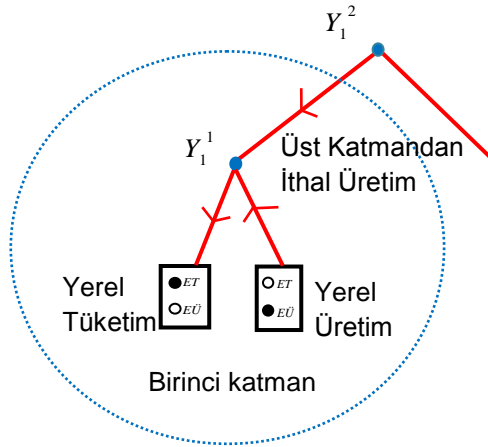
(ii) Enerji market yönetimi açısından dinamik enerji fiyatlaması ile yapılan kapalı çevrim enerji üretim kontrolünün enerji dengesinin sağlandığı optimal fiyat

noktası civarında sistemi çalıştırabildiği görülmüştür. Yöntemin bu özelliği, fiyat optimalliğini hedefleyen enerji marketi yönetimini de mümkün kılmaktadır.

(ii) Kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrol sisteminin market yönetimini otonom bir yapıya kavuşturabildiği görülmüştür. Böylece, karar süreçlerinin ve market operasyonlarının daha hızlı ve objektif yürütülmesini sağlanabilir. Arzu edilen enerji market yönetim stratejileri (fiyat politikası, güvenilirlik önceliği...gibi) kontrolör parametrelerinin uygun ayarlanması ile kontrolör tarafından otomatik olarak uygulamaya geçirilebilir.

3.2.3. Düğüm Noktasında Talep ve Üretim Çevrimli Dinamik Fiyat Kontrolü İle Enerji Dengeleme

Bu bölümde, Şekil 3.36'de temsil edilen hiyerarşik ağaç mimarisi kesitinde görülen taban düğümü için market yönetim simülasyon modeli geliştirilmiş ve dinamik fiyat uygulaması ile enerji dengesinin sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu amaçla, bir önceki bölümde önerilen simülasyon modeline talep esnekliğine sahip fiyat-talep modeli eklenmiştir. Böylece, ağaç mimarisine sahip bir akıllı şebeke sisteminin taban düğümüne bağlı olan fiyatla değişen tüketim araçları modellenmiştir.



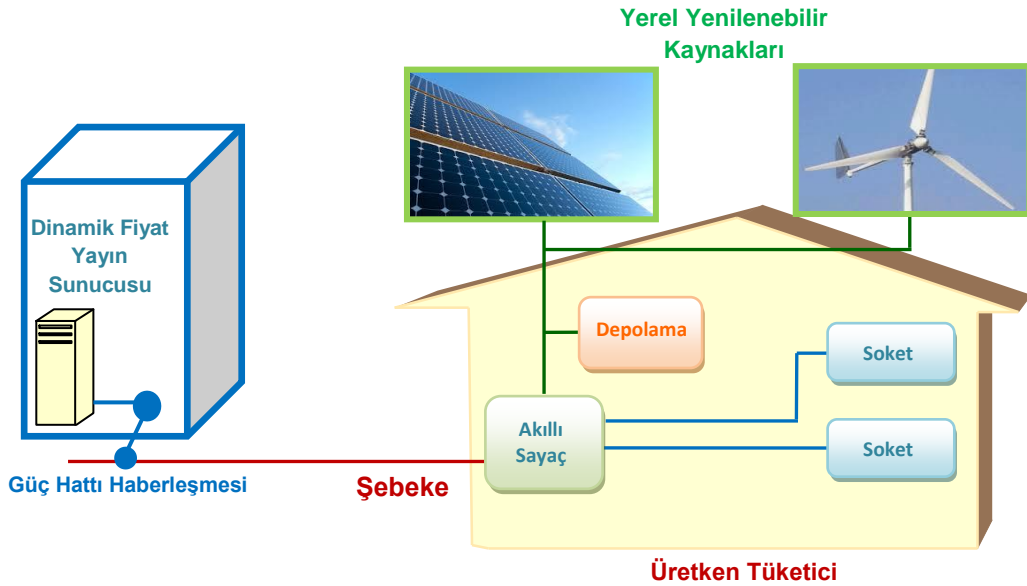
Şekil 3.36 Kapalı çevrim fiyat kontrolü ile enerji dengeleme simülasyonu gerçekleştirilen hiyerarşik ağaç yapısına sahip şebeke kesiti

Talep esnekliği, akıllı şebekenin talep taraflı yük yönetim uygulamalarının önemli bir sonucudur. Teknolojik imkânlar ile sağlanan talep esnekliğinin, üretim

belirsizliği gösteren yenilenebilir enerji kaynakların yaygınlaşmasında önemli kolaylıklar sağlayabildiği rapor edilmiştir [104]. Şekil 3.37’de akıllı şebeke yük yönetimi uygulamaları için ihtiyaç duyulan akıllı şebeke teknolojik altyapısı görülmektedir. Literatürde, enerji marketi ile ilgili modellerde esneklik (elastikiyet) parametresi lineer veya log-lineer denklemlerde bir çarpan ile karakterize edilebilmiştir [105]. Bu yaklaşıma uygun olarak, bu tez çalışmasında talep esneklik katsayısı (T_e), talebin düşebileceği minimum değerin (D_L), talebin ulaşabileceği maksimum değere (D_H) oranı olarak tanımlanmıştır.

$$T_e = \frac{D_L}{D_H} \quad (3.46)$$

Burada, T_e katsayısı $1 \geq T_e \geq 0$ arasında değişir. $T_e = 1$ durumu hiç talep esnekliği olmadığı duruma ve $T_e = 0$ ise tam talep esnekliği durumuna işaret eder. Diğer bir ifade ile $T_e = 0$ durumu, D_H ’ın sonlu olduğu durumda, talebin sıfıra kadar düşebileceği anlamına gelir.

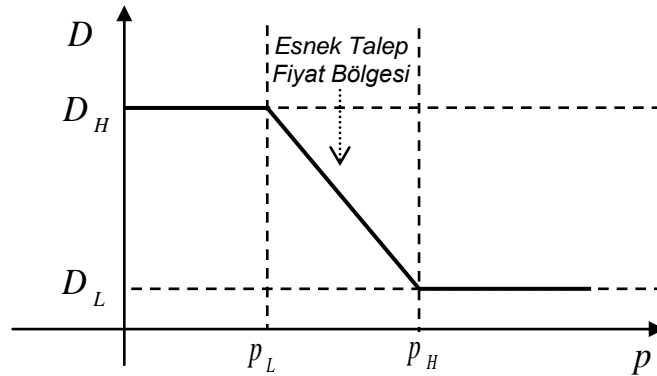


Şekil 3.37. Dinamik enerji fiyatlaması ile sağlanan talep taraflı yük yönetiminde ihtiyaç duyulan teknolojiler ve akıllı ev konsepti [68]. Bu model, Şekil 3.2(a)’da elektriksel şeması verilen üretken tüketici modeli için pratik bir örnek teşkil eder. Akıllı sayaç da çalışan program ile dinamik fiyat yayınına göre talep yönetimini gerçekleştirilir

Doğrusal talep modellemesi, genelde bölgesel ve mevsimsel talep tahmini uygulamaları (demand prediction) için geliştirilmiştir [105]. Bu tez çalışmada ise sadece üretim kontrol simülasyonunda kullanılmak üzere enerji fiyatına bağlı olan talep esnekliğini modellemeyi amaçladık. Bu nedenle, fiyata bağlı olan elastikiyet dikkate alınarak doğrusal limitli talep modeli parçalı doğrusal formda şöyle tanımlanmıştır:

$$D(p) = \begin{cases} D_H & p < p_L \\ \frac{(D_H - T_e D_H)}{(p_L - p_H)} (p - p_L) + D_H & p_L \leq p \leq p_H \\ T_e D_H & p > p_H \end{cases} \quad (3.47)$$

Burada, p_L düşük fiyat eşiğidir ve bu fiyatlarda sistem maksimum talep (D_H) ile çalışır. Bu fiyattan daha düşük fiyatlarda sistem maksimum talep değerinde çalışır. Diğer tarafta p_H yüksek fiyat eşiğidir ve bu fiyatlarda sistem minimum talep (D_L) ile çalışır. Bu fiyatın üstünde sistem talep düşebileceği minimal değer olan $D_L = T_e D_H$ değerinde kalır. Bu iki fiyat eşiği arasındaki fiyat bölgesinde, doğrusal talep esnekliğine uygun talep değişimi sağlanır ve talep esnekliği p_L ve p_H fiyatları ile sınırlanan fiyat bölgesinde tanımlanır. Şekil 3.38'de parçalı doğrusal talep modeli karakteristiği temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Parçalı doğrusal talep esnekliğine sahip fiyat-talep karakteristiği

Talep sisteminin zamansal davranışı üretim sisteminin zamansal davranışında olduğu gibi baskın bir τ zaman sabitine tabidir ve birinci derece dinamik sistem modeli yardımı ile şöyle modellenmiştir:

$$D(s) = D(p) \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.48)$$

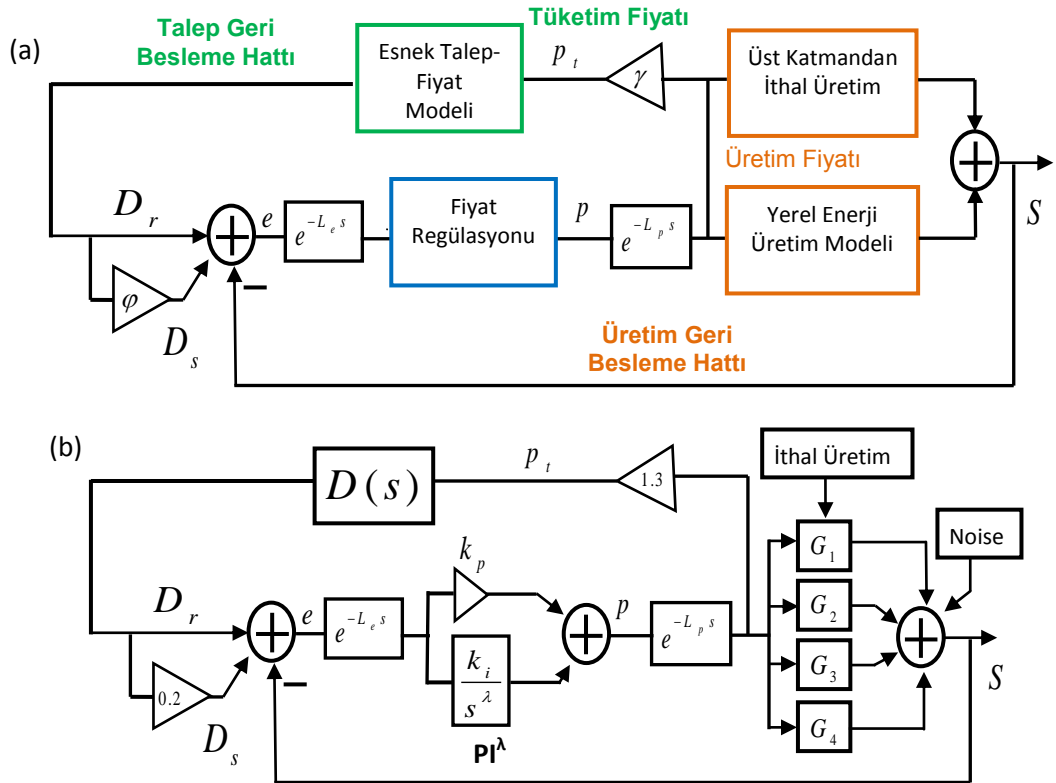
Denklem (3.47) ile ifade edilen limitli esnek talep karakteristiğinin dinamik fiyatla değişimi, Denklem (3.48)'de verilen modelin zamanla değişen bir sistem modeli olmasını sağlamıştır. Bu özellik modeli daha gerçekçi kılarken kontrol problemini zorlaştıran bir faktördür.

Şekil 3.30(a)'da verilmiş olan üretim kontrol simülasyon modeline Denklem (3.48) ile ifade edilen esnek talep modeli fiyat üzerinden alınan ikinci bir geri besleme ile bağlanmıştır. Şekil 3.39(a)'da görüldüğü üzere akıllı şebeke market yönetimi kontrol simülasyon modeli, biri esnek talep kontrolü için diğeri de üretim kontrolü için olmak üzere iki geri beslemeye sahip bir kontrol sistemi modeline dönüşmüştür. Ayrıca, hiyerarşik ağaç yapısı enerji akışına uygun olarak üretim geri besleme hattında iki farklı kaynak tipinden sağlanan enerji ile talep karşılanmıştır. Bunlardan birincisi, yerel dağıtık üretim modelidir ve tercihen rüzgâr, güneş ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanır. Diğeri ise bu düğüme bir üst düğümden enerji fiyatına bağlı olarak enerji naklidir. Ancak, üst düğümden sağlanan enerjinin, uzak mesafelerden transmisyon kayıpları ile iletimi ve iletim şirketlerinin masrafları nedeni ile çoğunlukla yerel enerji fiyatından biraz daha pahalı olması beklenmelidir. Talep geri besleme için enerji tüketim fiyatı, üretici fiyatına bağlı olarak $p_T = \gamma p$ ile tanımlanmıştır. Burada tüketici fiyat çarpanı ($\gamma > 1$) ile yerel dağıtım şirketlerinin ve servislerinin masrafları ve karları simülasyona yansıtılır. Simülasyon çalışmasında, $\gamma = 1.3$ alındı ve enerji üretim fiyatının %30'na karşılık gelen miktarın dağıtım şirketleri için hizmet ücreti olarak ayrıldığı varsayılmıştır. Bu yaklaşıma uygun geliştirilen ve 3.39(b)'de gösterilen simülasyon modeli ile taban düğümünde dinamik enerji fiyatlaması kontrolü ile enerji dengeleme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu modelde, gerek kontrol sisteminin çift çevrim içermesi gerekse zamanla değişen üretim ve talep modellemeleri kontrol problemini zorlaştıran temel faktörlerdir. Bu simülasyon senaryosu için, $k_p = 0.1$ ve $k_i = 1.2$, $\lambda = 1.2$ ile elde edilen kesir dereceli PI tasarımının simülasyonlarda yeterince iyi kontrol performansı sergileyebildiği görülmüştür. Simülasyonda kullanılan çoklu kaynak üretim

modelleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Burada yenilenebilir enerji kaynakları (hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerji sistemleri) ile yerel üretim sağlanmıştır. Üst katmandan sağlanacak enerji için zaman sabiti düşük ve birim enerji fiyatı yüksek üretim modeli ile transmisyona üst katman düğümünden sağlanan enerjinin doğası simülasyona kaynak modeli yardımı ile yansıtılmıştır.

Çizelge 3.2. Simülasyonda kullanılan çok kaynaklı enerji üretim sistemi modelleri

j	Enerji Kaynakları	$C_{\max, j}$ (MW)	$P_{0, j}$ (Unit/MW)	Fiyata bağlı dinamik üretim modeli (S_j)
1	Üst katmandan sağlanan enerji	20	4	$(0.01 p^2 + 0.5 p) / (0.02 s + 1)$
2	Hidroelektrik	30	0.2	$(0.01 p^2 + 2.5 p) / (0.052 s + 1)$
3	Rüzgar enerjisi	6	0.15	$(0.01 p^2 + 2.5 p) / (0.084 s + 1)$
4	Güneş enerjisi	4	0.5	$(0.01 p^2 + 2.5 p) / (0.052 s + 1)$



Şekil 3.39. (a) Talep ve üretim geri beslemelerine sahip çift çevrimli enerji market modeli, (b) Bu market modelinin analizi için geliştirilen simülasyon modeli

Kötü hal analizi için bir önceki bölümde kullanılan talep profili (Şekil 3.31(a)) baz alınmış ve talep esnekliği bu profil üzerinde sağlanmıştır. Saat 16:00 ve 21:00'de sert talep tepesi ve dibi veren bu talep profili, Denklem (3.47)'de maksimum talep (D_H) olarak alınmış ve farklı talep esneklik oranları için simülasyonlar yapılmıştır. Tüketici fiyatı için düşük fiyat eşiği $p_L = 5$ ve yüksek fiyat eşiği $p_H = 7$ varsayılmıştır. Tüketim sistemlerinin bu fiyat aralığında maksimum talepten, $D_L = T_e D_H$ ile belirlenen bir minimum talebe kadar T_e katsayısına bağlı olarak doğrusal esneklik gösterebildiği varsayılmıştır. Buna göre simülasyonlarda doğrusal parçalı esnek talep modeli,

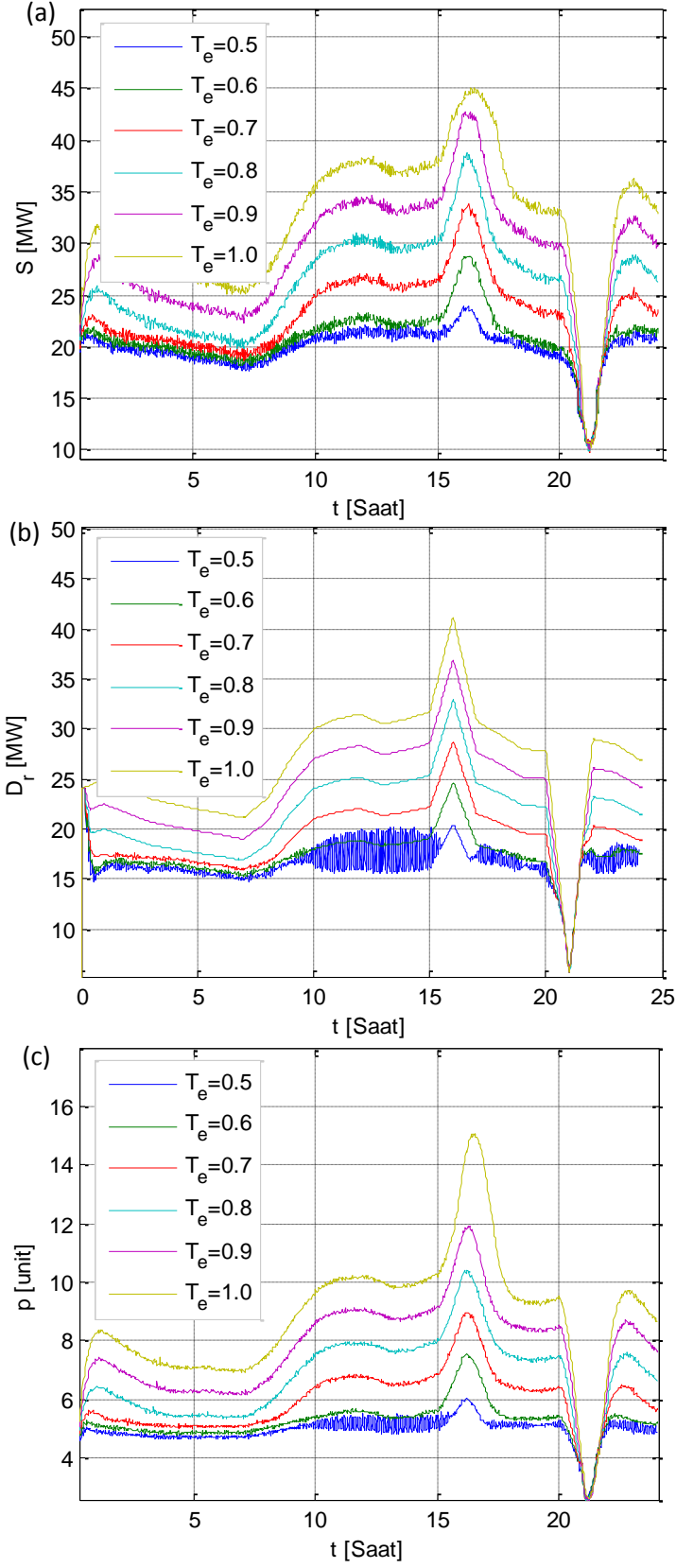
$$D(p) = \begin{cases} D_H & p < 5 \\ -\frac{(D_H - T_e D_H)}{2}(p - 5) + D_H & 5 \leq p \leq 7 \\ T_e D_H & p > 7 \end{cases} \quad (3.49)$$

ile karakterize edilmiştir. Denklem (3.49)'a bağlı olarak fiyat-talep dinamik sistem modeli olarak,

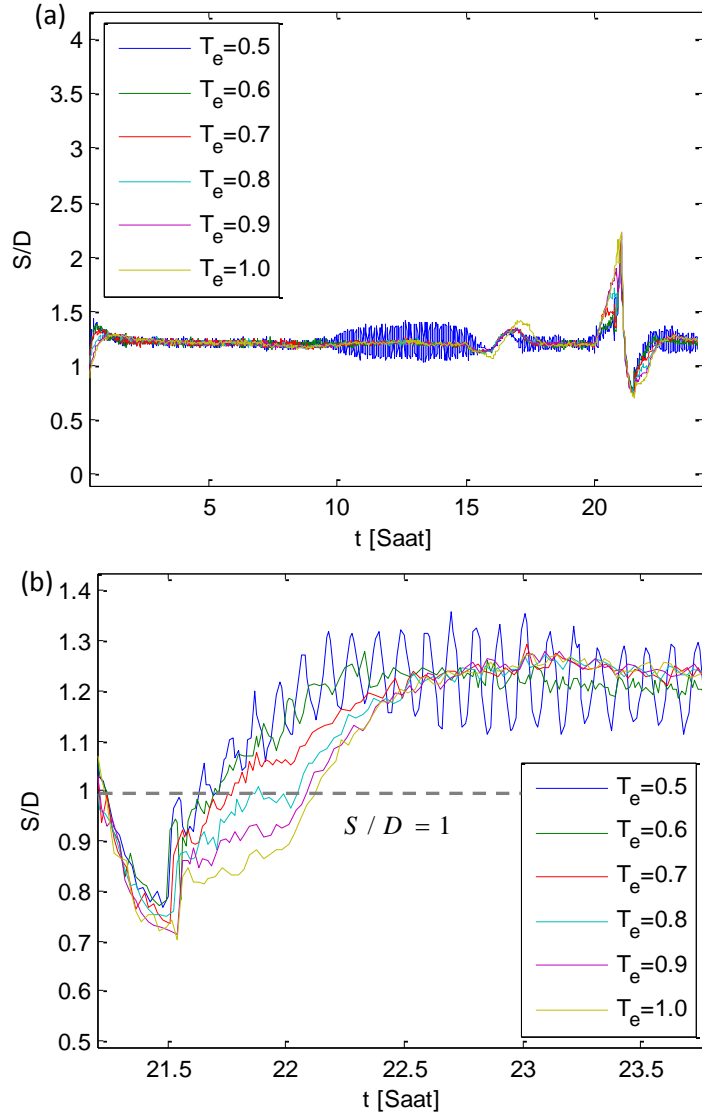
$$D(s) = D(p) \frac{1}{0.01 s + 1} \quad (3.50)$$

kullanılmıştır.

Sistemin farklı talep esnekliğine sahip durumları için simülasyon sonuçları Şekil 3.40'da sunulmuştur. Şekil 3.40(a)'da üretim profilinin talep esnekliği arttıkça düzleştiği ve talep değerlerinin düştüğü görülmektedir. Şekil 3.40(b)'de talep esnekliği nedeni ile talebin azalması ve tepe tıraşlama etkisi açıkça görülmüştür. Ancak, talep esnekliği arttığı zaman, özellikle $T_e = 0.5$ 'e olduğunda belirgin bir fiyat-talep kararsızlığının oluşmaya başladığı görülmüştür. Talep esnekliğinin artışının belli bir değere kadar avantaj sağlayabildiği, daha fazla talep esnekliğinin, belli bir noktadan sonra bu simülasyon örneğinde görüldüğü üzere kontrol sisteminin kontrol performansını düşürebildiği gözlemlenmiştir. Bu durum simülasyonlarda düşük T_e değerlerinde fiyat ve esnek talep cevaplarında görülmeye başlanan kararsız değişimler olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 3.40. (a) Enerji üretim cevabı, (b) Esnek enerji talep cevabı, (c) Enerji fiyat cevabı

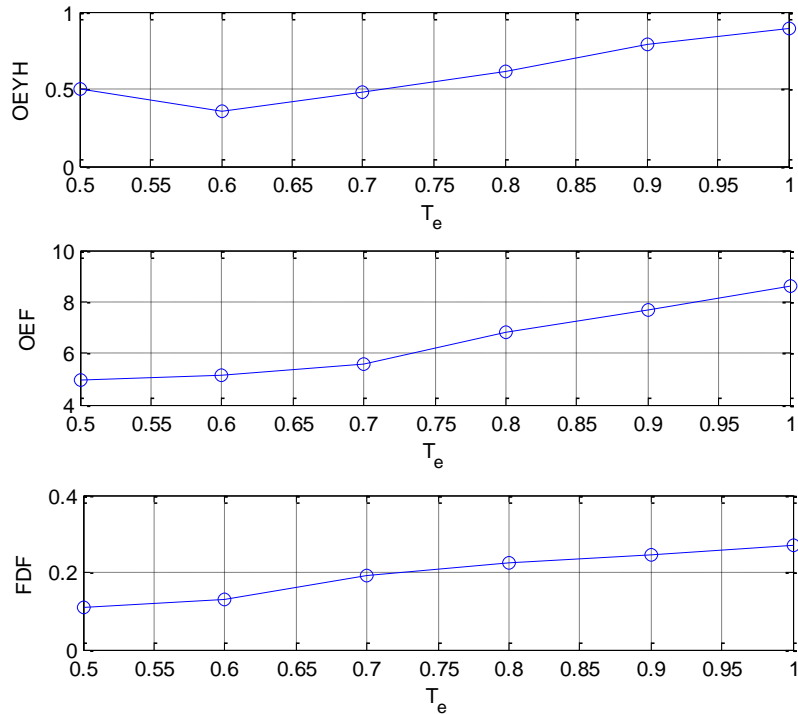


Şekil 3.41. (a) Farklı talep esneklik oranları için S/D oranları, (b) Saat 21:00'de talep dibinden dönüşte S/D oranlarına yakın bir bakış

Şekil 3.41'de simülasyon boyunca elde edilen S/D karakteristikleri sunulmuştur. Kontrol sisteminin, saat 16:00'daki fiyat tepesinin üstesinden başarı ile geldiği görülmüştür. Sert talep artışına rağmen uygun üretim cevabı verilebilmiş ve enerji yetersizlik durumu ($S/D < 1$) ortaya çıkmamıştır. Ancak, saat 21:00'de görülen sert talep dibi için, sistem üretimi düşürdüktan sonra tekrar hızla tırmanan talebe cevap vermede biraz gecikebildiği ve kısa süreli enerji yetersizlik durumu ($S/D \approx 0.8 < 1$) oluşabildiği görülmüştür. Bu durum, sert talep diplerinin sert talep tepelerine göre dinamik fiyat regülasyonu açısından

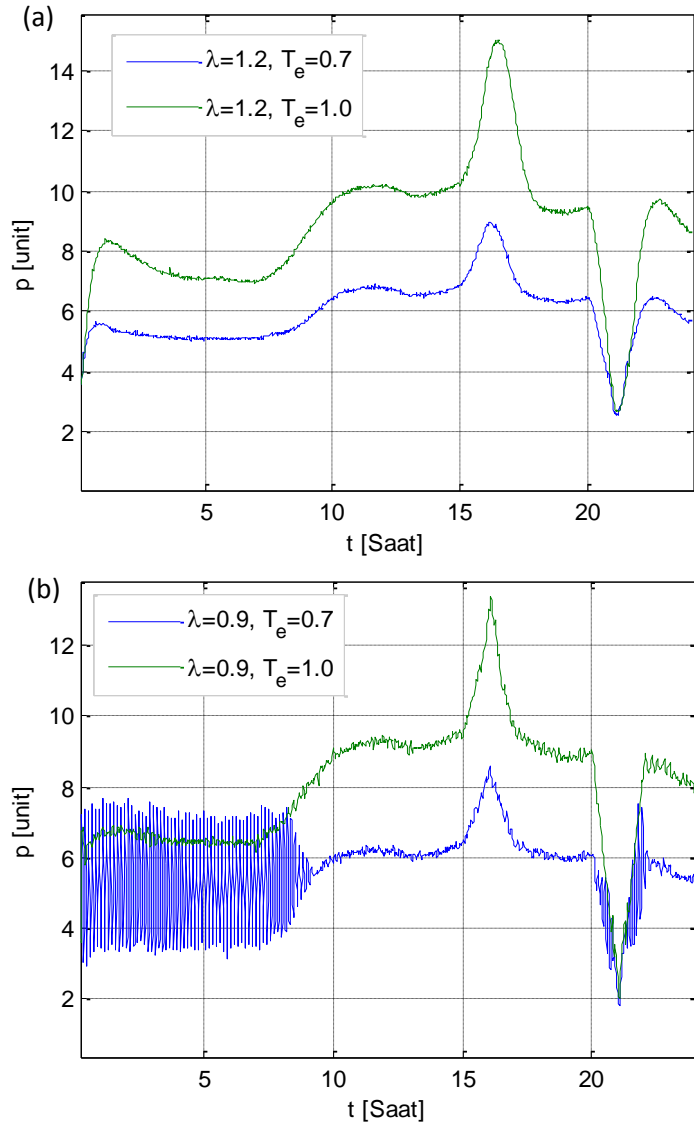
daha sorunlu bir durum oluşturduğunu göstermiştir. Hızlı talep düşüşünü hızlı bir talep çıkışının takip ettiği durumda üreticilerin yeterince hızlı cevap veremeyebileceği görülmüştür. Bunun temel nedeni fiyat-üretim karakteristiklerinin polinom eğrilerine yakınsayan doğrusal olmayan yapısıdır. Yüksek fiyat bölgesinde, yüksek karlılık nedeni ile üretim artışı çok daha hızlı sağlanabilirken, düşük fiyat bölgesinde üretim artışı düşük karlılık nedeni ile daha yavaş sağlanmaktadır. Bu davranışsal asimetri, dip noktasından çıkışta düşük enerji fiyatı bölgesinde düşük karlılık nedeni ile üreticilerin daha az istekli davranmalarına yol açar. Bu durum, üretim cevaplarının düşük fiyat bölgelerinde daha yavaş gelişmesine neden olur.

Şekil 3.42’de bu simülasyonlarda market yönetim performans ölçütlerinin T_e ’ye bağlı değişimi gösterilmiştir. Bu karakteristiklerde talep esneklik artışının belli bir noktaya kadar market yönetim performansını iyileştirebilmektedir. Sistemin $T_e \cong 0.5$ civarında market yönetimde iyileşme trendini kaybetmeye başladığı görülmüştür. Bunun temel nedeni, artan talep esnekliğinin talep cevaplarının kararsızlaşmasına yol açmasıdır.

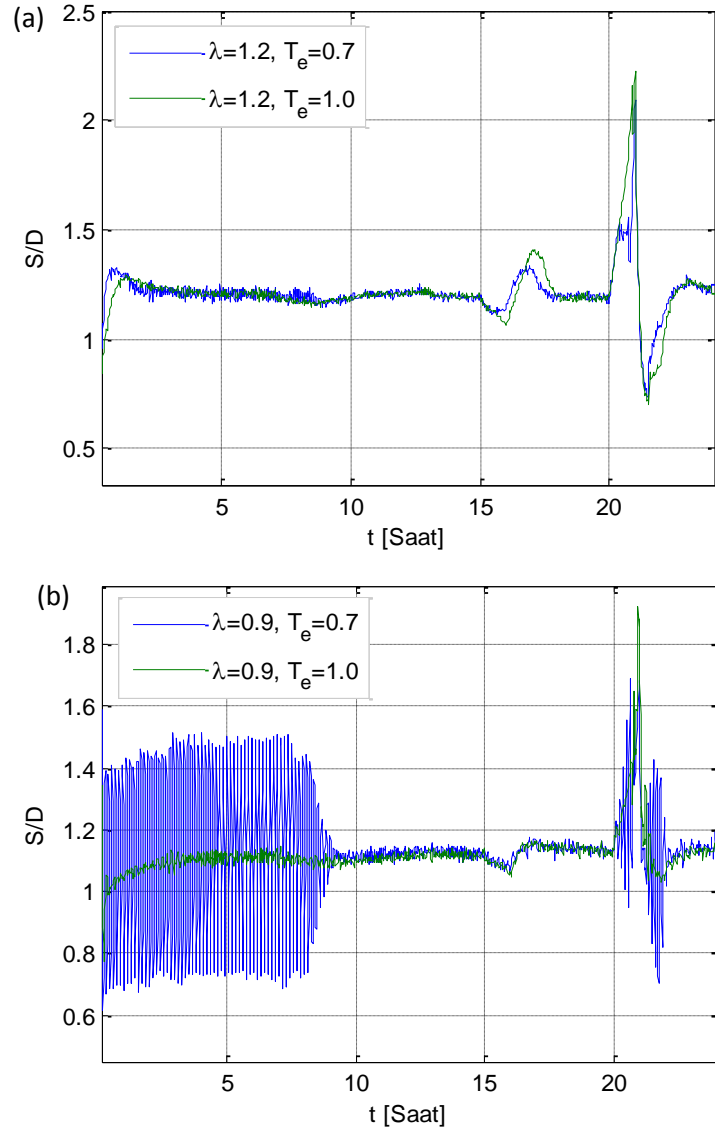


Şekil 3.42. Talep esnekliğine sahip enerji marketi simülasyonunda performans ölçütlerinin T_e ’ye bağlı değişimi

Şekil 3.43 ve Şekil 4.44’de, talep esnekliğine sahip bir piyasada kesir derece λ ’nın dinamik fiyat regülasyonuna ve S/D oranına etkileri incelenmiştir. Bu karakteristiklerde, $\lambda = 1.2$ ve $\lambda = 0.9$ durumlarında talep esnekliği göstermeyen market ($T_e = 1$) ve belirli düzeyde talep esnekliği sergileyebilen market ($T_e = 0.7$) koşulları kıyaslanmıştır. Görüldüğü üzere, talep esnekliğinin artması düşük λ değerleri için fiyat kararsızlığı riskini getirmektedir. Bu nedenle, yüksek talep esnekliği sergileyebilen marketlerin yönetiminde λ ’nın için yüksek değerleri tercih edilmelidir.



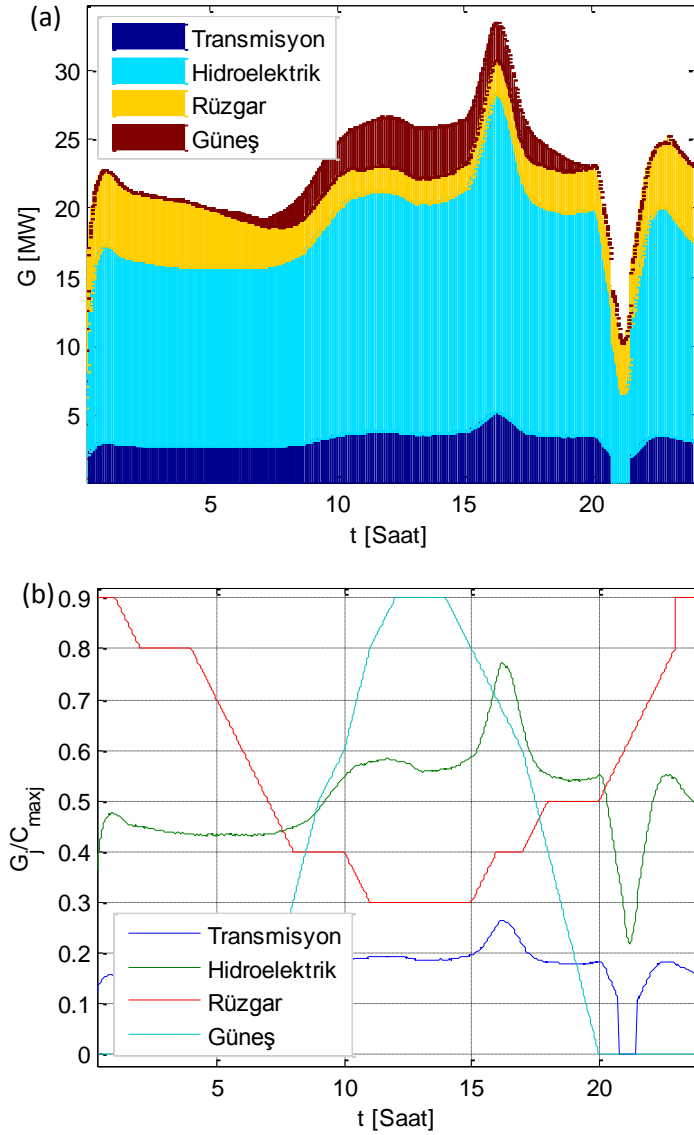
Şekil 3.43. Talep esnekliğine sahip enerji marketi simülasyonunda farklı T_e ve λ değerleri için dinamik enerji fiyatlaması



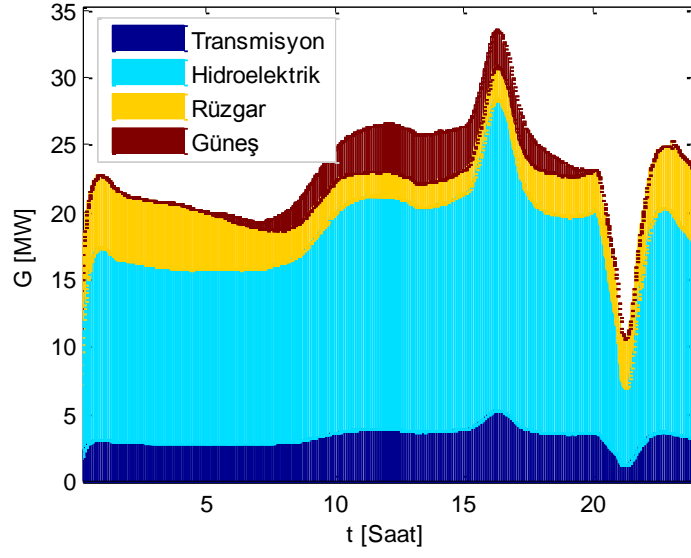
Şekil 3.44. Talep esnekliğine sahip enerji marketi simülasyonunda farklı T_e ve λ değerleri için S/D oranları

Şekil 3.45 simülasyon süresince kaynakların sisteme sağladığı enerji miktarları ve kurulu kapasite kullanım oranlarının ($G_j / C_{\max, j}$) dağılımını gösterilmiştir. Görüldüğü üzere yüksek enerji fiyatları nedeni ile transmisyondan yani bir üst katman düğümünden mümkün olduğunca az enerji kullanılmıştır. Saat 21:00'deki talep dibinde ise enerji alımı tamamen kesilmiştir. Fiyat uygunluğu sunularak enerji talebinin büyük oranda yerel yenilenebilir kaynaklardan temini sağlanmıştır. Transmisyondan (üst katmandan) alınan enerji fiyatının yerel kaynakların fiyatına düşürüldüğü durum için simülasyon sonucu Şekil 3.46'da

verilmiştir. Beklenebileceği üzere, üst katmandan alınan enerjinin fiyatının düşürülmesi bu katmandan enerji alımının daha kesintisiz olmasına yol açmıştır.



Şekil 3.45. Simülasyon süresince, kaynakların sisteme sağladığı (a) enerji miktarları (MW) ve (b) kurulu kapasite kullanım oranları (G_j / C_{max_j})



Şekil 3.46. Bir üst katmandan transmisyon ile gelen enerjini fiyatının güneş enerji fiyatına ($P_{0,1} = 0.5$ Unit/MWh) çekildiği durumda kaynakların sisteme sağladığı enerji miktarları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Hiyerarşik Ağaç Yapısı Mimarisine Sahip Akıllı Şebekeler

Bu çalışmada, ağaç topolojisinin akıllı şebekelere uygulanması için bir çerçeve çizilmiş ve ihtiyaç duyulan teorik alt yapı oluşturulmuştur. Bu topolojinin yüksek üretim ve tüketim belirsizliği gösteren üretken tüketicilerin olduğu koşullarda enerji dengeleme problemi açısından avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Bu amaca dönük olarak sistem modelleri geliştirilmiş ve nümerik analizler sunulmuştur.

Hiyerarşik ağaç mimarisine sahip akıllı şebekede enerji denge durumu analizi ve yönetimi için düğüm noktalarında tanımlanan enerji yeterlilik oranı, karesel enerji yeterlilik hatası ve lineer enerji hatası durumlarına $\{ Y_i^j, \varepsilon_i^j, \Delta E_q^j \}$ dayalı analizlerin yeterli olduğu görülmüştür. Sistemin enerji güvenilirliği, enerji yeterlilik oranına bağlı olarak Denklem (3.5) ile tanımlanmış ve şebekeden doğrudan gözlemlenebilir bir parametre haline gelmiştir. Ağaç topolojisine göre inşa olmuş bir akıllı şebekede sistemin enerji dengeli durum için enerji üretim ve tüketim değerlerinin bulunmasının çözümü tekil olmayan ters problem (ill-posed inverse problem) olduğu görülmüştür. Çözüm kümesi içinden en optimal çözümün, yukarı yönlü denge durumu yayılımı teoreminin bir sonucu olarak $\{ Y_i^1 = 1 : \forall i \}$ olduğu görülmüştür. Bu çözüm, şebeke yönetimi açısından sadece taban düğümlerinde yani lokal şebekelerde üretim ve tüketimin dengelemesi durumu olan ada operasyonuna (islanded operation) karşılık gelmektedir.

Teorik çalışmalarda herhangi bir katmandaki bütün düğümlerin enerji dengeli olması durumunda, denge durumunun hiyerarşinin daha üst katmanlardaki düğümlere yayılacağı yukarı yönlü denge yayılımı teoremi ile ispatlanmıştır. Bu özellik hiyerarşik ağaç mimarisinin sahip şebekenin analizi ve yönetimi açısından önemli bir kolaylar sağlar. Bu bağlamda ağaç mimarisine sahip şebekenin karmaşıklığından ve ölçeğinden bağımsız olarak bir katmandaki bütün düğümlerin enerji dengeli olduğunu görmek, şebekenin enerji dengeli olduğunu göstermek için yeterlidir. Ayrıca iletim kayıplarını minimize eden en verimli denge durumunun taban düğümlerinde yani lokal şebekede sağlanan enerji denge durumu olduğu gösterilmiştir. Bu denge durumuna, ideal denge durumu adı

verilmiştir. Artan iletim kayıpları nedeni ile şebekenin enerji dengesinin düğüm hiyerarşinin üst katmalarında sağlanmasının, enerji verimliliği azaltan bir faktör olduğu görülmüştür.

Üretim cevabındaki zamansal gecikmelerinin ya da anlık hızlı talep dalgalanmalarının kısa süreli enerji yetersizlik durumlarına yol açmaması için bir miktar talep fazlası üretimin gerekliliği simülasyonlarda görülmüştür. Bu fazla üretim, enerji üretim verimliliğini biraz düşürmesine rağmen bir enerji güvenlik marjı oluşturarak şebekenin enerji güvenilirliğini önemli ölçüde iyileştirebildiği görülmüştür. Enerji yetersizliğinin, kesintilere neden olması ve sık tekrarlanan güç kesintilerinin kısa vadede sosyal ve ekonomik zararlarının görülmeye başlaması nedeni ile enerji güvenilirliğinin, enerji üretim verimliliğinden daha öncelikli bir olgu olarak kabul edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bir miktar üretim fazlasının, üretim ve talep belirsizliği gösteren şebekelerde enerji güvenilirliğini artırmak için önemli bir etken olduğu anlaşılmıştır. Bu bağlamda, enerji talebine bağlı olarak bir miktar üretim fazlası oluşturabilmek için anlık gerçek talep değerlerine göre hesaplanan sanal talep tanımlanmıştır. Kapalı çevrim market yönetimi simülasyonların da, sanal talep uygulamasının talep ve üretim değişkenliği ve belirsizliği gösteren sistemlerde enerji güvenilirliğini sağlamadaki önemi gösterilmiştir.

Rastgele üretken tüketicilerin bulunması nedeni yüksek üretim tüketim belirsizliği gösteren şebeke koşulları için yapılan skotastik analizlerde, iletim kayıplarının bir sonucu olarak şebekenin enerji güvenilir duruma kavuşabilmesi için üretici durumu olasılığının 0.5'in üzerine çıktığı görülmüştür. Bu durum, üretim belirsizliği içeren bir şebekede, iletim kayıplarının mümkün olduğu ölçüde düşürülmesinin gerekliliğine işaret etmektedir. İletim kayıpları arttıkça, üretken tüketicilerin şebekenin dengeli durumunu koruyabilmesi için daha yüksek olasılıklarla üretici durumda bulunması gerekmektedir. Enerji yeterli bir şebekede üretken tüketicilerin üretici durumda kalma olasılıklarının pratik seviyelere düşmesi ve yenilebilir kaynakların sebep olduğu üretim dalgalılığının tolere edebilmesi için sürekli üretim karakteristiğine sahip hızlı cevap verebilen şebeke dengeleyici güç istasyonlarının kurulması gerektiği görülmüştür. Şebeke dengeleyici güç istasyonlarının kurulu kapasiteleri, yenilebilir enerji kaynaklarının yol açtığı üretim dalgalanmalarını tolere edebilecek güçte planlamalıdır. Böylece,

yenilenebilir kaynakların üretim belirsizliğinden kaynaklanan kesinti riskleri önemli ölçüde azaltılabilir.

Dağıtık enerji depolama sistemleri, enerji talebine kıyasla çok yüksek güneş ve rüzgar enerji üretim potansiyelinin söz konusu olduğu şebekelerde, dengeleyici güç istasyonlarına olan gereksinimi azaltabilmektedir. Bunun temel nedeni, dağıtık depolama sistemlerinin ihtiyaç fazlası yenilenebilir enerji üretimini, yenilenebilir kaynakların verimsiz çalıştığı ve düşük üretim sergilediği zaman dilimlerine öteleyebilmesidir.

Ağaç topolojisinin çevrimsizlik özelliği ve akraba ilişkileri tanımlayabilme kapasitesi, hiyerarşik ağaç yapısına sahip enerji şebekesinde noktadan noktaya enerji alışverişlerinin (energy dispatches) en yakın tek bir yol üzerinden gerçekleşmesini mümkün kılar. Bu konuda analiz şöyle yapılabilir:

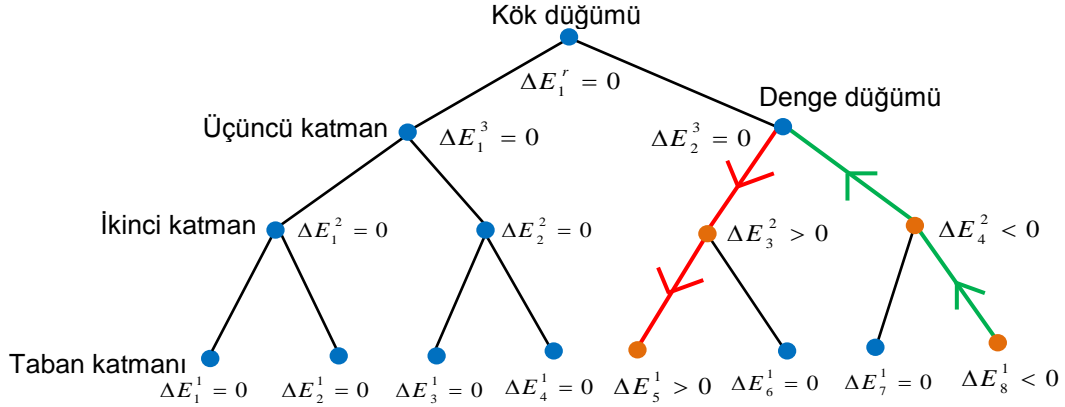
(i) Lemma 2 ile ifade edilen denge hatalarının toplamsallığı uyarınca, enerji denge hatası durumu ($\Delta E_i^j \neq 0$) hiyerarşide yukarı yönde düğümler boyunca yayılır.

Talep yanlı denge hatası pozitifdir değerlidir ($\Delta E_i^j = w_c C > 0$, burada toplam talep yanlı kayıp çarpanı kayıp $w_c = \prod_{j=1} w_c^j$) ve üretim yanlı denge hatası

negatifdir ($\Delta E_g^j = -w_g G < 0$, burada toplam üretim yanlı kayıp çarpanı kayıp $w_g = \prod_{j=1} w_g^j$).

(ii) Hiyerarşi içinde yukarı yönde yayılan talep yanlı ve üretim yanlı denge hatalarının bulunduğu ilk düğüm, tüketici ile üretici arasında enerji alışverişinin gerçekleşebildiği en yakın denge düğümüdür. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere denge düğümünde talep yanlı hata ile üretim yanlı hata buluşur ve enerji alışverişi gerçekleşir. Enerji dengesi sağlanırsa, ($\Delta E_q^j = \Delta E_i^j + \Delta E_g^j = 0$) yukarı yönde hata yayılımı durur ve sistem tekrar enerji dengeli duruma denge düğümünün bulunduğu katmanda kavuşur. Eğer hala denge sağlanmaz ise ($\Delta E_q^j = \Delta E_i^j + \Delta E_g^j \neq 0$), eksik kalan talep veya artan arz durumu denge hatası sıfırlanana kadar yukarı yönlü yayılımına devam eder. Üst düğüm noktalarında başka talepler veya arzlar ile buluşur. Böylece hiyerarşik ağaç mimarisi, enerji talebinin öncelikli olarak en yakın üretici düğümlerden sağlanmasını garanti eder. Bu iletim kayıplarını minimize eden enerji yönlendirme problemine doğal

(yapısal) olarak çözüm olur. Karmaşık (mesh) topolojiye sahip şebekelerde ise iletim kayıplarını minimize eden optimal enerji alış verişi problemi, kapalı çevrimler ve noktadan noktaya birden fazla yol bulunması nedeni ile düğüm sayısı arttıkça karmaşıklığı hızla artan bir optimizasyon probleminin çözümüne dönüştürür. Dolayısı ile karmaşık topolojiye sahip şebekelerde, kaynakların yönetimi ve optimal enerji akış ve dengeleme problemlerinin çözümleri zorlaşır.

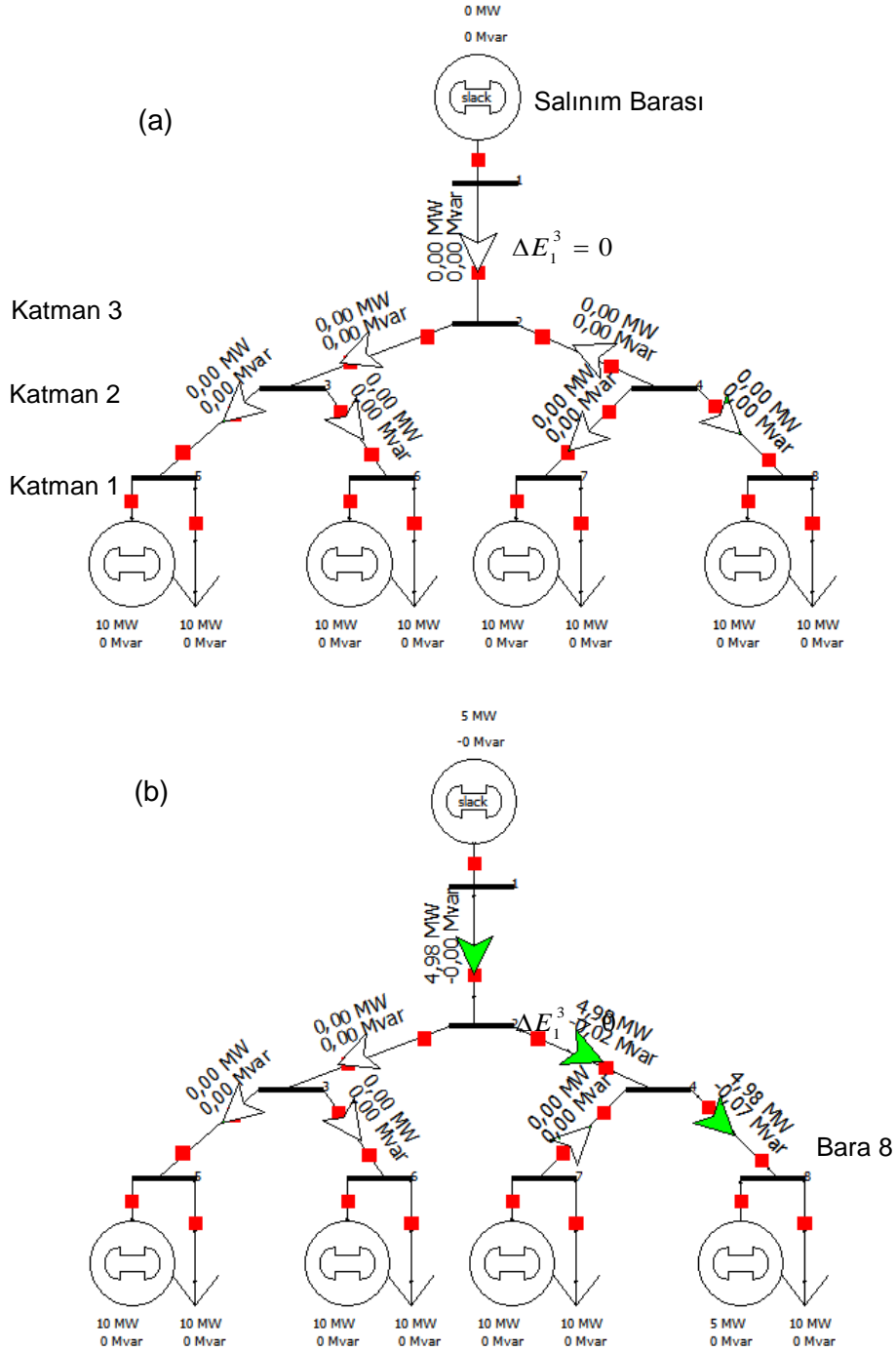


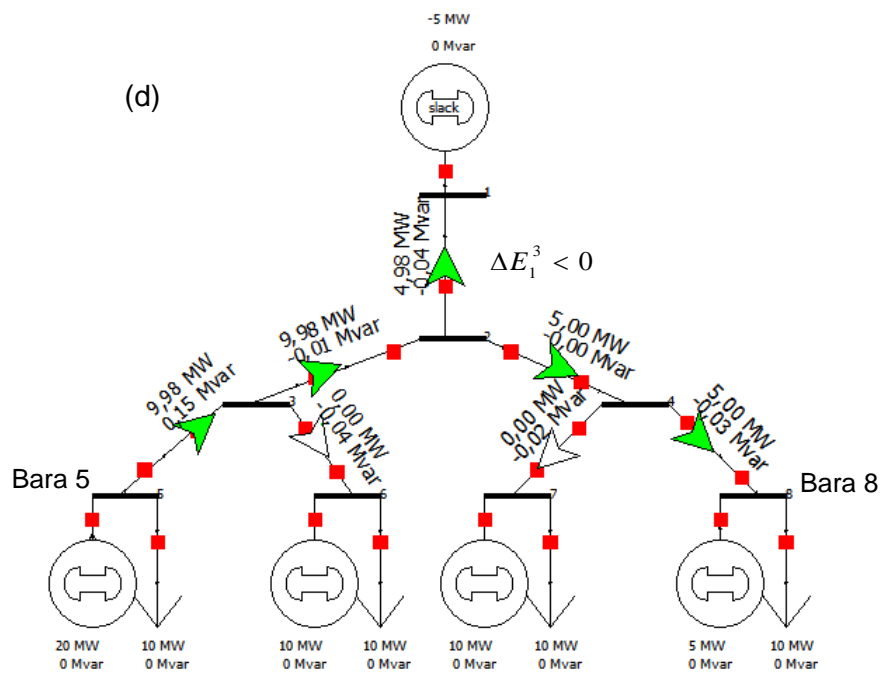
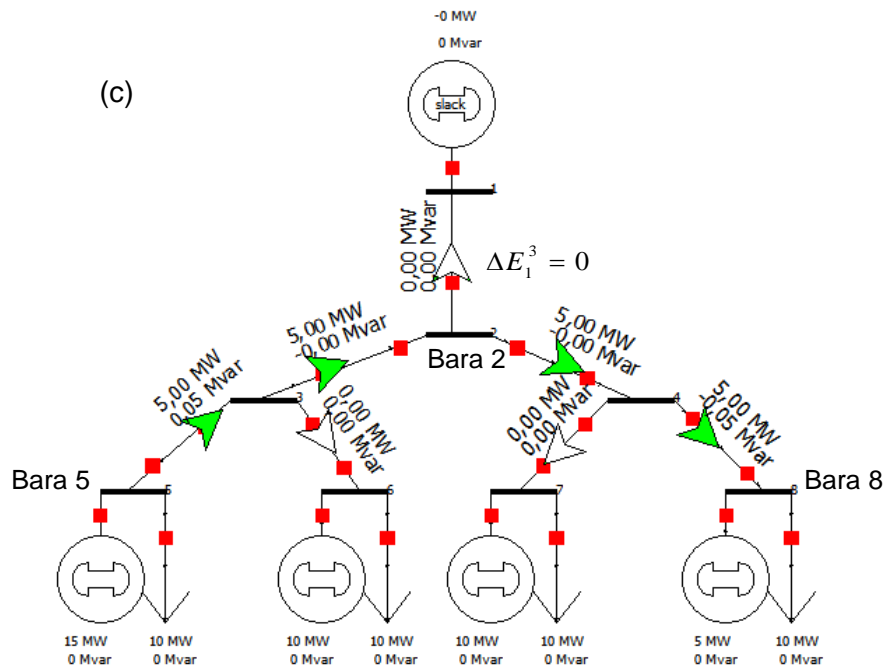
Şekil 4.1. Hiyerarşik ağaç yapısına sahip şebekelerde enerji alış verişinin en yakın denge düğümü üzerinden tek bir yol üzerinden sağlanabilmesi

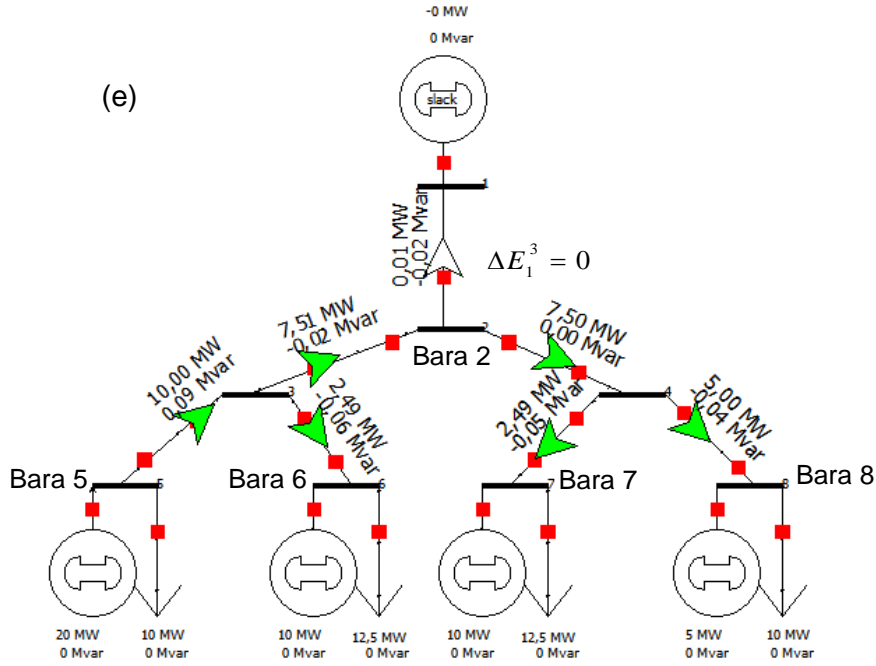
Şekil 4.1'de tabandan köke doğru [8 4 2 1] düğüm konfigürasyonunda hiyerarşik ağaç yapısına sahip enerji dağıtım sisteminin denge hata durumlarının yayılımı ve en yakın üst düğümde dengelemeyi sağlayan enerji alış verişi temsili olarak gösterilmiştir. Şebeke başlangıçta enerji dengeli iken ($\Delta E_i^j = 0$), $\Delta E_5^1 > 0$ ile talep yanlı olarak denge bozulmuştur. Bu duruma, $\Delta E_8^1 < 0$ sağlanması ile üretim yanlı cevap geldiğini varsayalım. Yukarı düğümlere doğru yayılan bu üretim ve talep yanlı denge hataları, $\Delta E_2^3 = 0$ 'da buluşmuş ve sistemi tekrar enerji dengeli duruma getirmiştir. Hiyerarşik ağaç yapısına sahip sistemlerde, enerji akış yönlendirmeleri Şekil 4.1'de sunulan örnek sistemde gösterildiği gibi düğüm denge hatası haritalaması yardımı ile kolaylıkla analiz edilebilir. Bu analizler, karmaşık topolojilerde kapalı çevrimler ve düzensiz hiyerarşik düzen nedeni ile zorluklar içerir.

Enerji alış verişi konusunda elde edilen bulguları, Şekil 4.2'de görülen ağaç topolojisine sahip AC şebeke kesitinin PowerWorld güç akışı analizleri desteklemiştir. Şekil 4.2(a)'da sistemin ideal dengeli durumu görülmektedir. Bu

durumda, taban düğümlerinde (katman 1) üretim ve tüketim yerel olarak dengelenmiş ve şebeke üzerinde güç akışı söz konusu olmamıştır. Burada, salınım (slack) barası bu güç sistemi kesitinin bağlandığı daha üst düğümleri temsil etmektedir. Salınım barası'ndan çekilen güç, aynı zamanda üçüncü katman birinci düğümün enerji denge hatasını ΔE_1^3 göstermektedir. Bu düğüm, daha alt katman düğümlerinden oluşan şebeke parçasının velisi durumundadır.

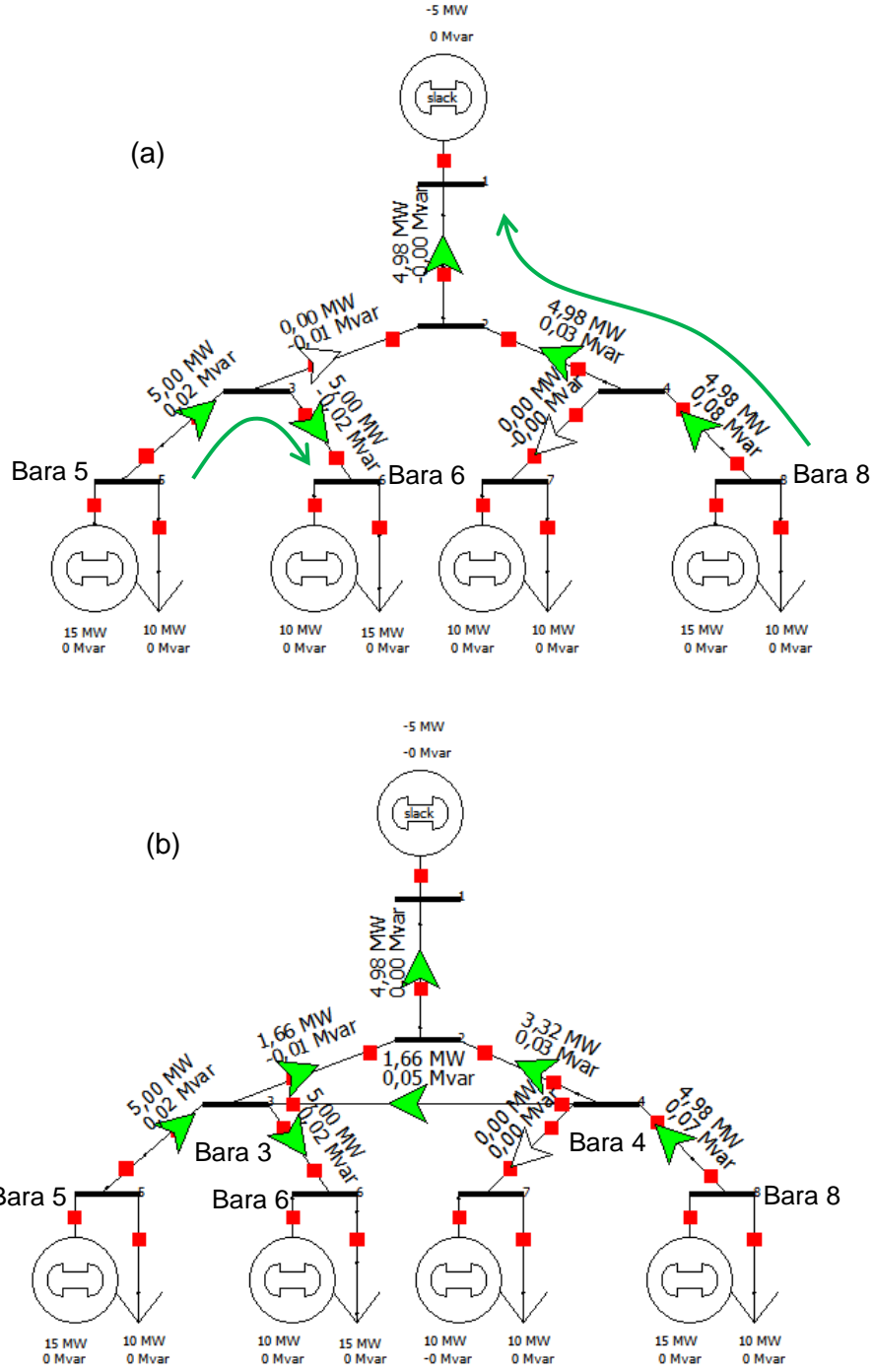






Şekil 4.2. Hiyerarşik ağaç yapısına sahip AC şebeke kesitinin PowerWorld güç akış simülasyonu sonuçları, (a) İdeal dengeli durum, (b) Bara 8’de üretim yetersizliğinin üst katmandan karşılanması, (c) Bara 8’de üretim yetersizliğinin Bara 5’den sağlanması ve Bara 2’de (üçüncü katmanda) enerji dengesine ulaşılması, (d) Bara 5’de oluşan fazla üretimin daha üst katmanlara gönderilmesi, (e) Bara 5’de oluşan fazla üretimin, Bara 6 ve Bara 7 de artan talebe yönleneşi ve tekrar sistemin Bara 2’de enerji dengesine ulaşılması

Şekil 4.2(b)’de Bara 8’de artan talebin, diğer taban düğümlerinde yerel denge durumlarını olumsuz etkilemeden doğrudan üst katmanlardan karşılandığı görülmüştür. Şekil 4.2(c)’de ise bu enerji yetersizliğinin doğrudan Bara 5’de sağlanan fazla üretimle noktadan noktaya en yakın tek bir yol üzerinden karşılanması görülmektedir. Böylece, şebeke kesiti tekrar üçüncü katmanda enerji denge durumuna ulaşabilmiştir. Şekil 4.2(d) Bara 5’deki üreticilerin üretimlerini daha fazla artırması durumunda, dengenin üretim yanlı bozulduğu ve ihtiyaç fazlası enerjinin üst katmanlara yollandığı görülmüştür. Şekil 4.2(e)’de bu enerji fazlasının, Bara 6 ve Bara 7 de sağlanan talep artışları ile karşılanması ve sistemin tekrar üçüncü katmanda enerji dengeli duruma gelmesi görülmektedir.

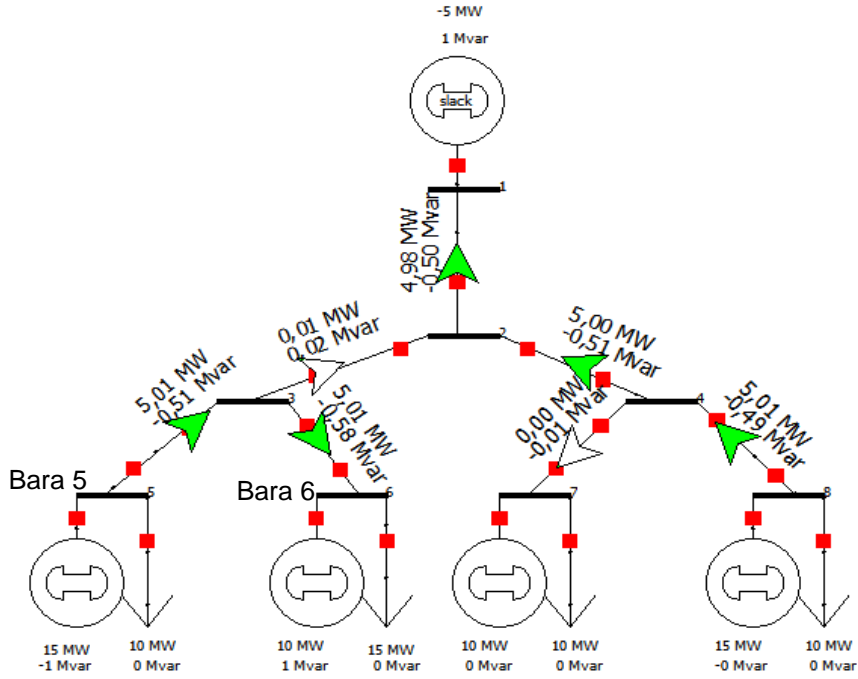


Şekil 4.3. (a) Hiyerarşik ağaç yapısına sahip AC şebekede enerji alış verişinin aile ilişkisi ve çevrimsizlik özelliğinin doğal bir sonucu olarak en yakın düğümden tek bir yol üstünden karşılanması, (b) Karmaşık topoloji durumunda AC şebekede enerji alış verişi

Şekil 4.3(a)'de sunulan yük akışı simülasyonu AC şebekede enerji alış verişinin aile ilişkisi ve çevrimsizlik özelliğinin doğal bir sonucu olarak en yakın

düğünden tek bir yol üstünden karşılanmasını teyit etmektedir. Bara 6'da artan talebin en yakın kaynak olan Bara 5'den karşılandığı ve Bara 8'de artan talebin, Bara 5 ve Bara 6 arasında devam eden enerji alışverişini olumsuz etkilemeden doğrudan üst katmanlardan karşılandığı görülmüştür. En yakın komşu olan Bara 5'den yollanan enerji yeterli olduğu için Bara 8'in sağladığı fazla enerji burada kullanılmamış ve daha üst katmanlara ihraç edilmiştir. Şekil 4.3(b)'de karmaşık topolojiye sahip AC şebekenin güç akışı karşılaştırma amacı ile sunulmuştur. Burada, Şekil 4.3(a)'da görülen ağaç topolojisini, karmaşık topolojiye çevirmek için aynı sistem üzerinde Bara 3 ile Bara 4 arasına iletim hattı bağlanmıştır. Görüldüğü üzere, Bara 6'nın enerji ihtiyacı yalnız en yakın komşu bara olan Bara 5'den değil, ihtiyaç olmadığı halde bir kısmı uzak bara olan Bara 8'den de karşılanmaya başlamıştır. Bara 5, yakın komşu Bara 6 dışında üst katmanlara da enerji iletime başlamıştır. Ağaç topolojisini bozup sistemi karmaşık topolojiye çeviren ek bağlantı, ağaç topolojisinin talebi en yakın komşudan ve tek bir yol üzerinden sağlama özelliğini bozmuş ve iletim kayıplarının artmasına yol açmıştır. Bu sonuçlar, ağaç topolojinin, yapısal olarak sağlandığı noktadan noktaya en yakın mesafeden enerji alış veriş yönlendirme özelliğinin, karmaşık topolojide kaybolduğunu açıkça göstermiştir. Karmaşık topolojiye sahip şebeke olası bütün yolları enerji iletimi için kullanma eğilimi göstermektedir. Bu durum karmaşık topolojiler için enerji akış ve şebeke yönetimini zorlaştıran bir etmendir.

Bu simülasyonlarda, aktif güç akış yönelimlerini, iletim hatlarının materyal özelliklerinden bağımsız olarak izleyebilmek için hatların seri direnç ve şönt iletkenliği değerleri sıfır alınmıştır. Böylelikle, ağaç topolojisinin sağladığı davranışsal enerji akış eğilimleri, şebekenin materyal özelliklerinden kaynaklanan eğilimlerinden arındırılarak incelenebilmiştir. Seri direnç çoğunlukla iletken malzemenin türü ve kalitesine bağımlı bir parametredir. Hattın kaçak akımlarını temsil eden şönt iletkenliği ise iletim hattının izolasyon malzemelerinin kalitesine ve özelliklerine bağlı olarak değişir. Pratikte kaçak akımlar, hat ile taşınan akıma nazaran ihmal edilebilecek düzeyde küçüktür. Seri direnç hat reaktansının onda biri düzeyindedir. Şekil 4.4'de görülen simülasyonda seri direnç 0.01 Ohm/km ve şönt iletkenliği 10^{-6} Ohm/km alınmıştır. Yaklaşık 0.01 MW düzeyinde oluşan iletim kayıplarının, sistemin davranışını ciddi ölçüde değiştirdiği görülmüştür.



Şekil 4.4. Simülasyonda seri direnç 0.01 Ohm/km ve şönt iletkenliği 10^{-6} Ohm/km alınması durumunda sonuçlar

Yapılan klasik AC şebeke simülasyonlarında baralar pasif düğüm noktaları olarak vazife görmüşlerdir. Yeni nesil akıllı şebekelerinde düğüm noktaları anahtarlama ve kontrol sistemlerini içeren daha akıllı ve aktif yapılar ile gerçekleştirilmesi beklenebilir. Bu yapılar, aktif akış yönlendirme, denge hatası izleme, yerel fiyat yayını gibi birçok işlevi yürütebilir.

4.2 Düğüm Noktalarında Enerji Dengelemesinin Kapalı Çevrim Dinamik Fiyat Regülasyonu ile Sağlanması

Önceki bölümlerde Matlab Simulink ortamında geliştirilmiş kapalı çevrim enerji market kontrol simülasyonlarda, ağaç yapısı mimarisine sahip akıllı şebekelerin düğüm noktalarında enerji dengelemesinde dinamik enerji fiyatlamasının uygulandığı kapalı çevrim üretim kontrolünden faydalanılabileceği görülmüştür. Bu simülasyonlarda enerji üretim ve tüketiminin fiyatla değişimini karakterize etmek için fiyatla değişen dinamik üretim ve esnek talep modelleri

geliştirilmiştir. Talep ile üretim arasındaki fark olarak tanımlanan doğrusal denge hatasının zamanla sifira yakınsaması için kesir dereceli PI kontrolör kullanılmıştır. Bu kontrolörün yeterince iyi enerji fiyatı regülasyonu gerçekleştirebildiği ve arz-talep eğrisi üstünde sistemi arz-talep denge noktasına yani serbest piyasa optimal fiyat noktasına taşıyabildiği görülmüştür. Böylece, kararlı ve sürekli hal hatası sıfır olan kapalı çevrim üretim kontrolü yöntemi ile şebekenin enerji fiyat optimalliğini sağlayan enerji denge durumuna ulaşılabileceği anlaşılmıştır.

Simülasyon çalışmalarında, gerçek koşullara daha yakın modelleme için akıllı şebeke haberleşme ve bilişim teknoloji katmanlarından kaynaklanan gecikmeler dikkate alınmıştır. Ayrıca, toplam üretime bir miktar rastgele gürültü eklenerek üretim belirsizliği oluşturulmuştur. Zaman gecikmelerinin ve üretim belirsizliğinin olduğu durumda türev alıcının kontrol performansını çok düşürdüğü ve kararsız cevaplara neden olabildiği görülmüştür. Bu nedenle kontrolörde türev alıcı tercih edilmemiştir. Kontrolör tasarımını zorlaştıran diğer bir faktörler, talep esnekliği olması durumunda sistemin çift kapalı çevrime sahip olması ve çevrimler üzerinde fiyatla değişen yani zamanla değişen üretim ve esnek talep modellerinin bulunmasıdır. Kesir dereceli PI kontrolörün, bu zor koşullarda başarılı bir performans sergileyebildiği görülmüştür. Kontrol tekniği açısından ciddi zorluklar içeren böyle bir sistemde kesir dereceli PI kontrolörün tasarımı için önerilen iki aşamalı sezgisel iyileme yönteminin yeterince iyi sonuç verebildiği görülmüştür. Bu yöntemde, birinci aşamada, deneme yanılma ile uygun PI kontrolör katsayıları belirlenmiş, ikinci aşamada ise seçilen PI kontrolör tasarımı için entegral alıcının kesir derecesi belli aralıkta taranmak sureti ile kesir dereceli PI kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Entegral alıcının kesir derecesi kontrol performansını iyileştirmek için kullanılmıştır.

Entegral alıcının kesir derecesi λ 'nın enerji marketi performans ölçütleri olan üretim tüketim oranı (S / D), ortalama enerji fiyatı (OEF), fiyat değişkenlik faktörü (FDF) ve ortalama enerji yetersizlik hatasını (OEYH) ayarlamakta kullanılabileceği görülmüştür. Simülasyonlarda λ parametresi uygun seçilerek, ortalama enerji yetersizlik hatasının azaltılabileceği, enerji marketi yönetimi için önemli olan düşük enerji fiyatı ve düşük fiyat değişkenliğinin (fiyat kararlılığının) elde edilebileceği görülmüştür.

Kapalı çevrim kontrol esnasında, lineer enerji denge hatasının pozitif olduğu anlarda enerji yetersizlik durumu (S/D) olduğu gözlemlenmiştir. Enerji yetersizlik durumu, kesintiye yol açabilmesi nedeni ile kaçınılması gereken önemli bir risk faktörüdür. Enerji yetersizlik riskini azaltmak için, yeterli miktarda üretim fazlası sağlamayı amaçlayan sanal talep uygulaması incelenmiş ve sanal talebe karşılık gelen üretim fazlalığı bandı içinde kalan üretim veya talep dalgalanmalarının enerji yetersizlik durumuna yol açmasını önlenemediği görülmüştür. Sanal talep, üretim fazlalığı nedeni ile enerji verimliliğini azaltan bir faktördür. Ancak, akıllı şebekeler için çok daha önemli olan enerji güvenilirliğinin ve sürekliliğinin sağlanması bakımından önemi anlaşılmıştır. Özellikle, yüksek üretim ve talep belirsizliğine haiz koşullarında çalışması beklenen akıllı şebekelerde, kâfi derece sanal talep uygulanmasının mutlaka yapılması gerektiği görülmüştür.

Akıllı şebekelerin talep taraflı yük yönetim uygulamalarının sağlayacağı talep esnekliği market kontrol simülasyonunda modellenmiştir. Talep esnekliği için parçalı doğrusal fiyat-talep ilişkisi öngörülmüştür. Bu durumda, kapalı çevrim dinamik fiyat kontrolü iki çevrime sahip olmuştur. Birinci çevrim, tüketici fiyatına bağlı talep esnekliği sağlayan talep geri besleme çevrimi, diğeri ise kontrolörün enerji fiyatlamasına doğrudan üretim ile cevap veren üretim geri besleme çevrimidir. Fiyatla değişen dinamik sistem modellerine sahip bu iki çevrim kontrol problemini zorlaştırmıştır. Simülasyonlarda, talep esneklik katsayısı (T_e) ayarlanarak, talep esnekliği arttırıldıkça, maket yönetim performans ölçütlerinin belli bir noktaya kadar iyileştirilebildiği gözlemlenmiştir. Bu kritik noktadan sonra, talep geri besleme çevriminden kaynaklanan talep kararsızlığının, fiyat kararsızlığına yol açarak, kontrol performansını düşürmeye başladığı görülmüştür.

Lokal enerji talebinin, çoğunlukla lokal yenilenebilir kaynaklardan sağlanabilmesi için lokal şebekede bu kaynakların enerji üretim fiyatlarının, başka düğümlerden ithal edilen enerji fiyatından çok daha ucuz olması sağlanmalıdır. Bu durumda, enerji talebinin büyük oranda yerel yenilenebilir kaynaklardan sağlanabileceği gözlemlenmiştir. Pratikte, enerji depolamanın maliyetli olması dolayısı ile üretimi gerçekleştirilen güneş ve rüzgar enerjisi dışarıdan alınan enerjiden daha ucuz olmak durumundadır. Çünkü, dışarıdan ithal edilen enerjinin fiyatı iletim kayıpları ve transmisyon şirketlerinin masrafları dolayısı ile yerel

yenilenebilir kaynaklardan sağlanan üretime kıyasla daha yüksek olacaktır. Bu fiyat politikasına uygun senaryonun simülasyonu yapılmış ve dışarıdan enerji alımının sadece ihtiyaç durumunda gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

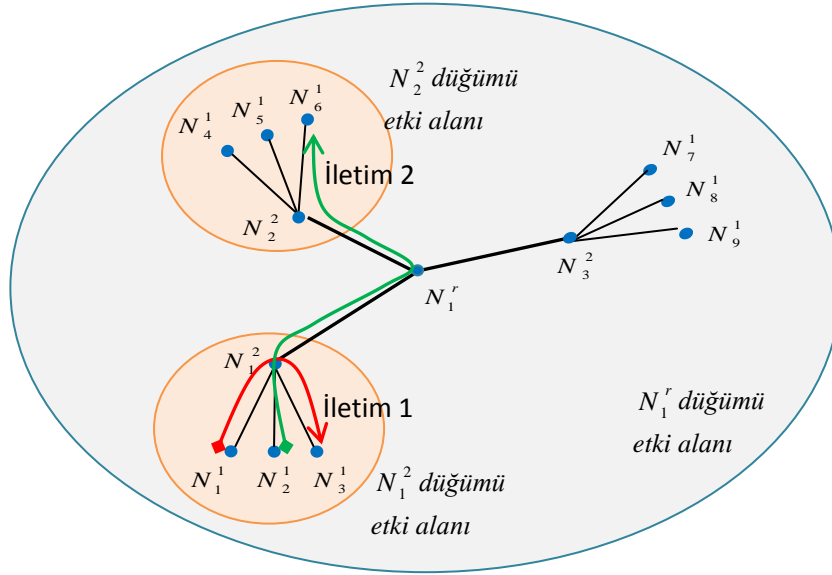
Ayrıca, fiyat-üretim karakteristiklerinin lineer olmaması nedeni ile üretim cevaplarında fiyat bölgelerine bağlı olarak davranışsal farklılıklar gözlemlenmiştir. Düşük fiyat bölgesinde, düşük karlılık nedeni ile üreticiler talep artışına daha az tepkiseldir. Yüksek fiyat bölgesinde ise üreticiler yüksek karlılık nedeni ile talep artışları karşısında daha rekabetçi ve tepkiseldir. Bu davranışsal asimetri, talep tepelerinde hızlı üretim cevabı sağlayarak avantaj sağlar iken talep diplerinde düşük enerji fiyatı ve dolayısı ile düşük karlılık nedeni ile üretim cevabının daha yavaş gelişmesine yol açmıştır. Bunun sonucu olarak, dinamik fiyatlandırma ile kapalı çevrim üretim kontrolünde, talep dip karakteristiklerinde enerji yetersizlik durumu riskinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

4.3. Hiyerarşik Ağaç Mimarisine Sahip Akıllı Şebekede Enerji İletimi ve Dinamik Fiyat Stratejileri

Bu çalışmada, değişken üretici ve tüketicilerin şebekeye taban düğümlerinden bağlandığı ve taban düğümlerinin üstünde hiyerarşik olarak kök düğümüne kadar sadece yönlendirici düğümler ağının bulunduğu ağaç topolojisine sahip bir şebeke yapısı incelenmiştir. Bu şebeke, ağaç topolojisine uygun olarak noktadan noktaya tek bir yol tanımıştır. İki düğüm arasındaki enerji iletimi çift yönlü (full duplex) olmak zorundadır. Böylece, şebeke içinde enerji alış-verişi (energy dispatches) ve yerel enerji dengeleme uygulamaları mümkün olabilecektir.

Ağaç topolojisinde toplam bağlantı sayısı toplam düğüm sayısından (ρ) bir eksiktir. Bu bağlantı miktarı şebekede toplamda $E_T = \sum_{i=1}^{\rho-1} c_i$ kadar enerji iletim kapasitesi sağlar. Bağlantı kapasitesi, ağaç hiyerarşide taban düğümlerine doğru artan düğüm sayısına bağlı olarak artar. Bu durum düğüm aileleri içinde noktadan noktaya iletim mesafelerini kısaltır ve yerel enerji dengelemesini destekler. Bir düğümün velisi olduğu bütün alt düğümler, kendi aralarında bu düğümü kök kabul eden şebeke kesiti içinde enerji alış-verişi yaparlar. Bu aile ilişkisi, düğümlerin etki alanlarının (domainlerin) tanımlanmasına imkân sağlar. Şekil 4.5’de hiyerarşik

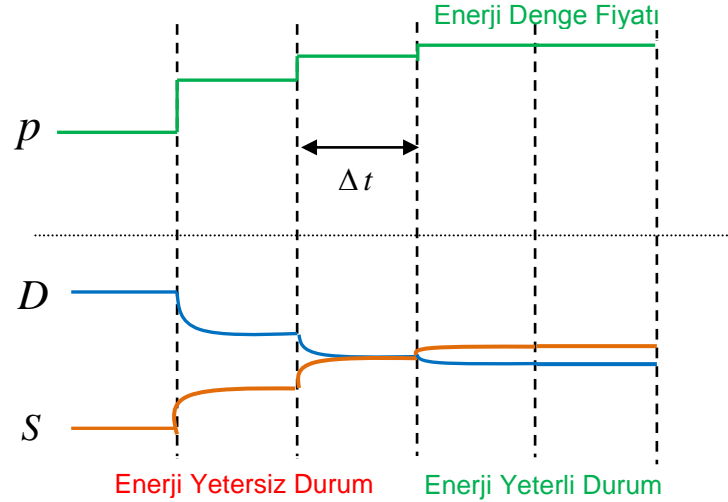
ağaç mimarisine sahip örnek bir şebeke için, düğüm etki alanları, uzun ve kısa mesafeli iletimler temsili olarak gösterilmiştir. Şebekede, dinamik enerji fiyatlaması ile enerji dengeleme yöntemi uygulandığında, akıllı şebeke güç sistemleri katmanı içinde enerji iletimi yanında dinamik fiyat sinyalinin haberleşme sistemleri katmanı üzerinden yayını gerekmektedir. Burada, dinamik fiyat sinyalinin güncellenmesi, üretici ve tüketicileri şebekeyi denge durumunda tutma yönünde senkronize eden tetikleme işareti gibi görülebilir.



Şekil 4.5. N_1^r kök düğümü etki alanı bütün sistemi kapsamaktadır. N_1^2 ve N_2^2 düğümlerinin etki alanları velisi olduğu alt düğümlerin oluşturduğu alt kümelerdir. N_1^2 'nin etki alanı içinde kısa mesafeli enerji iletimi (iletim 1'de iki düğüm mesafesi). N_1^2 etki alanındaki N_1^1 düğümünden, N_2^2 etki alanındaki N_6^1 düğümüne uzun mesafeli iletim (iletim 2.'de dört düğüm mesafesi)

Fiyatın her değişimi, Şekil 4.6'de temsili olarak gösterildiği gibi hem talep tarafında hem de üretim tarafında cevap bulur. Sonuçta, esnek talep ve üretimde durum değişimine yol açar. Market simülasyonlarında görüldüğü üzere, fiyatın azalan yönde değişimi, esnek talebi artan ve serbest enerji üretimini azalan yönde değişimini tetikler. Fiyatın artan yönde değişimi ise esnek talebi azalan yönde ve üretiminde ise artan yönde değişimini tetikler. Dinamik fiyat sinyalinin etkisini, senkron dijital devrelerinde kullanılan saat işaretinin (clock) etkisine benzetebiliriz. Dijital sistemlerde saat işaretinin değişimi flip-flopları tetikleyerek, sistemin senkronize ve doğru durumlarda çalışmasını temin ederler. Yükselen kenar tetiklemeli dijital devrelerde, saat işaretinin her sıfır durumundan bir

durumuna değişimi dijital sistem durumlarının değişimini sağlar. Sistemin doğru durumlarda senkronize çalışabilmesi için saat işaretinin dijital sistemin her bileşenine ulaşması gerekmektedir. Benzer yaklaşımla, akıllı şebekede enerji dengesinin başarı ile sürdürülebilmesi için dinamik fiyat işaretinin bütün üretken tüketicilere ulaşması önemlidir.



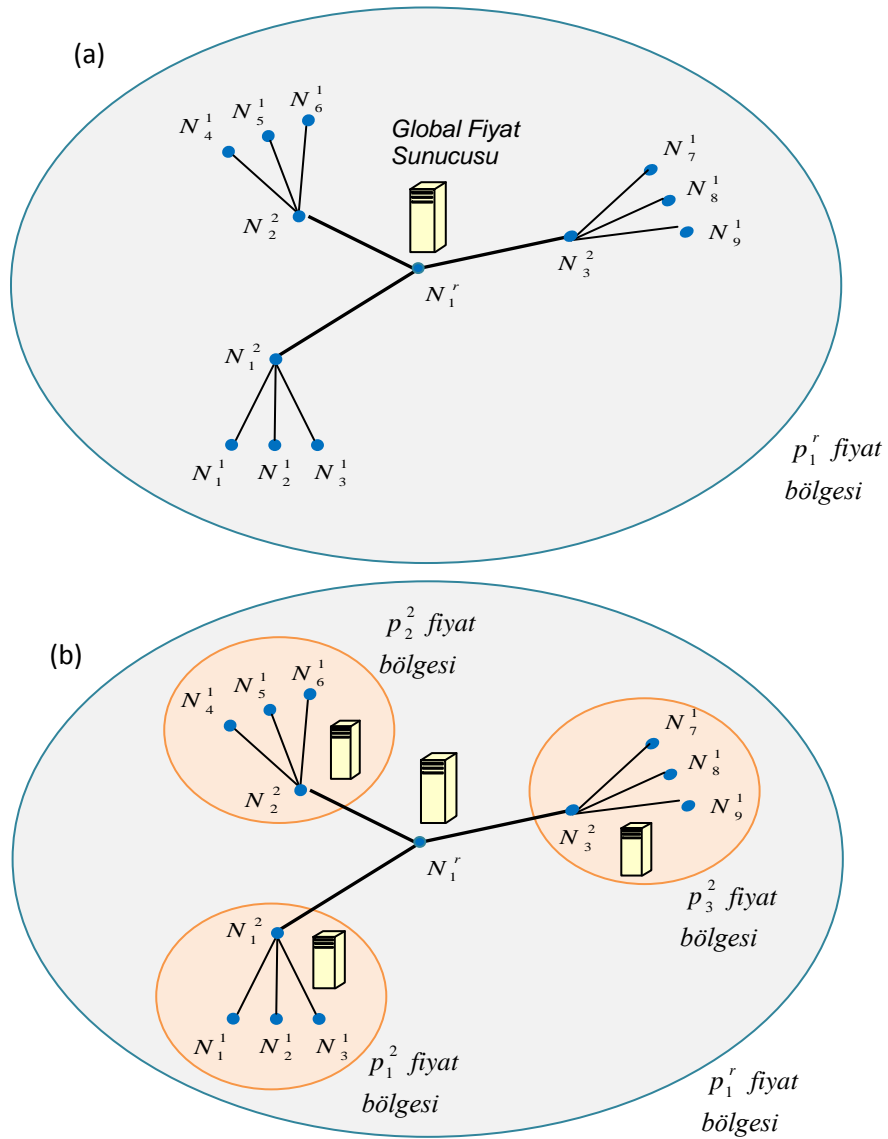
Şekil 4.6. Dinamik fiyat sinyali p 'nin belirli zaman aralıkları ($\Delta t > L_e + L_p$) ile güncellenmesi sonucu, toplam talep (D) ve toplam üretim (S) durumlarının değişimi gösterilmiştir. Kesir dereceli PI kontrolör, talep ve üretimi eşitlemek için dinamik fiyatı Δt periyotla günceller

Ağaç topolojine sahip şebekede enerji fiyatlaması ve dengelemesi iki şekilde uygulanabilir:

(i) *Global dengeleme ve global fiyatlama yaklaşımı*: Bu yaklaşımda, kök düğümde konumlandırılan tek bir merkezinden kapalı çevrim fiyat kontrol sistemi çalıştırılır ve belirlenen fiyat işareti global fiyat olarak bütün şebekeye iletilir. Kök düğümünün etki alanındaki bütün üretken tüketiciler bu fiyat sinyaline tepki verir ve kök düğümünün enerji dengeli duruma ulaştırılması sağlar. Bu yaklaşım, bütün taban düğümlerinin enerji dengesine ulaşıldığı ideal denge durumunu garanti etmez. Global fiyat bölgesi ve fiyat sunucusu Şekil 4.7(a)'da temsili olarak gösterilmiştir.

(ii) *Yerel dengeleme ve yerel fiyatlama yaklaşımı*: Bu yaklaşımda, bütün düğümlerde kapalı çevrim fiyat kontrolörü dağıtık olarak çalışır. Her düğüm, kendi fiyat sinyalini etki alanındaki bir alt düğüme iletir. Taban düğümlerindeki fiyat kontrolü, yerel enerji fiyatını oluşturur ve kendine bağlı üretken tüketicileri

yerel enerji dengesini sağlamak üzere tetikler. Enerji eksiği durumunda, fiyat sinyaline göre bir üst düğümde enerji talep edilir. Bir önceki bölümde, taban düğümünde kapalı çevrim dinamik fiyat kontrol uygulaması simülasyonu incelenmişti. Bu yöntemin avantajı, yerel fiyatlandırma ve yerel dengeleme ile sistemin iletim kayıplarının minimize olduğu ideal denge durumuna sürüklenebilmesidir. Ancak, her düğüm için bir kontrol merkezi oluşturulması yani dağıtık kontrol uygulamasına ihtiyaç duyar. Şekil 4.7(b)'de ikinci katman düğümleri için yerel fiyat bölgeleri ve yerel fiyat sunucuları temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7. (a) Global dengeleme ve global fiyatlandırma yaklaşımı (b) Yerel dengeleme ve yerel fiyatlandırma yaklaşımı

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında hiyerarşik ağaç yapısına sahip şebeke mimarisinin akıllı şebeke enerji yönetimi ve dengelemesi bakımından önemli avantajlar sunabildiği görülmüştür.

Bu avantajlar şöyle özetlenebilir:

Ağaç topolojinin çevrimsizlik, ölçeklenebilirlik ve aile ilişkisi tanımlama özelliklerinin doğal bir sonucu olarak, hiyerarşik ağaç mimarisine sahip şebekelerin durumlarını global ve lokal ölçeklerde doğrudan şebeke üzerinden gözlemlemek mümkündür. Hiyerarşinin üst katmanlarından global değerler gözlenebilirken (parametrik globalizasyon), alt katmanlarda lokal değerler gözlenebilmektedir (parametrik lokalizasyon). Bu özellik, ağaç yapısına sahip şebeke üstünde tanımlanmış olan sistem durumlarına, hiyerarşik bir düzen içinde bulunan düğüm noktalarından yapılan ölçümler ile her ölçekte erişilebilir kılmıştır. Bu özellik, global ve lokal düzeyde durumların gözlenebilirliğini ve kontrol edilebilirliğini artırmış ve enerji dengeleme problemini oldukça basitleştirmiştir.

Ağaç topolojisine sahip şebekenin analizleri, çevrimsizlik özelliğinin doğal bir sonucu olarak aile ilişkisi içinde toplamsal (kümülatif) aritmetiğe dayanır. Daha açık bir ifade ile Denklem (3.1) ve (3.2) hiyerarşik ağaç mimarisine sahip enerji şebekesinde, Çizelge 2.2'de bahsi geçen üretim toplamsallığı ve talep toplamsallığı özelliklerinin geçerli olduğunu gösterir. Böylece, toplam üretim yerel üretimlerin ağırlıklandırılmış toplamı ile ifade edilebilen tek bir üretim modeline ve toplam talep ise taleplerin ağırlıklandırılmış toplamı ile ifade olan tek bir talep modellenene indirgenebilmiştir. Bu özellik, şebeke yönetim açısından önemli kolaylıklar sunar.

Ağaç topolojisi akıllı şebekelere hem yapısal hem de fonksiyonel ölçeklenebilirlik özelliği kazandırır. Örneğin, ağaç topolojisine uygun yapılacak olan düğüm eklemeleri veya çıkarmaları, şebekenin yapısal özelliklerini değiştirmez ve parametrelerin tabi olduğu toplamsallık ilkesini bozmadır. Bu özellik, şebeke üzerinde yapılacak, şebeke büyümesi, şebeke küçülmesi, şebekenin bölünmesi veya birleştirilmesi operasyonlarını, özetle şebekenin yapısal değişebilirliğini kolaylaştıran bir faktördür.

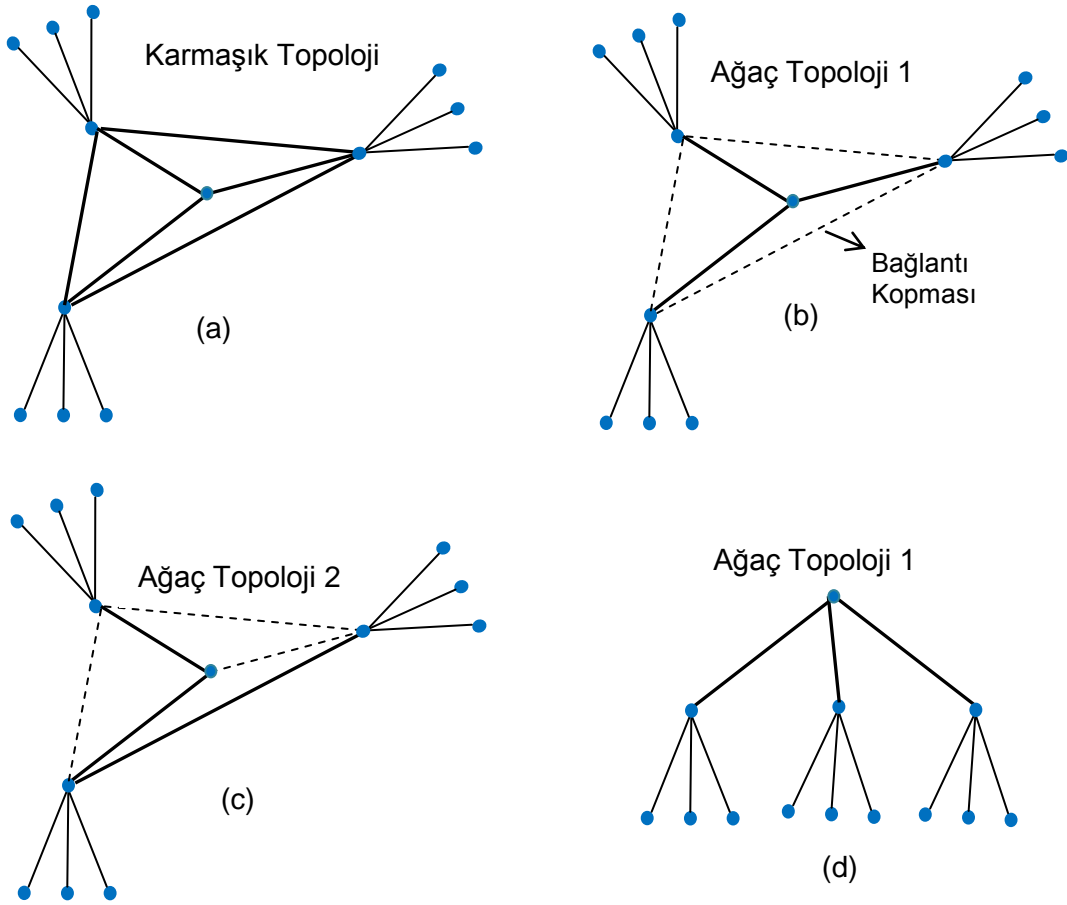
Ağaç topolojisine sahip bir şebeke mimarisinde, şebeke üstünde bir noktadan diğer bir noktaya tek bir yol olması, diğer bir ifade ile kapalı çevrimler içermemesi, şebeke üzerinde noktadan noktaya enerji iletiminin kontrolünü kolaylaştırır. Bu kolaylık, paket tabanlı haberleşme yöntemlerinde olduğu gibi, adreslemeye dayalı noktadan noktaya enerji paketleri (energy dispatches) iletimini mümkün kılabilir. Bu imkan, enerji iletim ve dağıtım için devrimsel bir gelişim olacaktır. Ağaç topolojisine sahip şebeke yapılarının, noktadan noktaya tek iletim yolu sunması, gelecekte dijital enerji şebekelerinin diğer bir ifade ile enerji internetlerinin (web of energy) [58] kurulmasında önemli bir rol oynayabilir.

Tez çalışmasının kontrol uygulamaları kısmında, talep ve üretim belirsizliği gösteren hiyerarşik ağaç mimarisine sahip akıllı şebekelerde enerji dengeleme problemi için kontrol teorisi temelinde kapalı çevrim serbest enerji piyasası yönetimine dayalı çözümler incelenmiştir. Dinamik enerji fiyatlaması ile kapalı çevrim üretim kontrolü yaklaşımının enerji dengesini otomatik olarak sürdürebildiği görülmüştür. İstenilen enerji fiyatı cevaplarının kesir dereceli PI kontrolör parametreleri ile ayarlanabileceği gösterilmiştir. Kesir dereceli entegral alıcının, PI kontrolör ile sağlanan enerji market yönetim performansını iyileştirebildiği görülmüştür. Kesir derecenin, sistemin kararlılığını artırdığı ve enerji yetersizlik durumu risklerini azaltabildiği görülmüştür. Enerji yetersizlik durumlarının önlenmesinde ve sistemin enerji güvenliğini artırmada sanal talep uygulamasının önemi görülmüştür. Simülasyonlarda, talep esnekliğinin artırılmasının belli bir noktaya kadar enerji market yönetimini iyileştirebildiği görülmüştür. Talep esnekliğinin ihtiyaç duyulandan fazla artırılmasının kapalı çevrim dinamik fiyat sinyalini karasızlaştırabileceği saptanmıştır.

5.1. Gelecek Çalışmalara Dönük Öneriler

Günümüz şebekeleri, fiziksel olarak karmaşık (mesh) topolojiye sahiptir. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi karmaşık topolojiye sahip bir sistem, bağlantı eksiltmeler ile çok çeşitli varyasyonlarda ağaç topolojisine dönüştürülebilir. Bir şebekenin fiziksel topolojisi karmaşık yapıda olsa da mantıksal topolojisi (logical topology) uygun anahtarlamalar ile ağaç yapısına dönüşebilir. (Bakınız Şekil 5.2(a)) Bu, çok önemli iki avantajı gündeme getirmektedir:

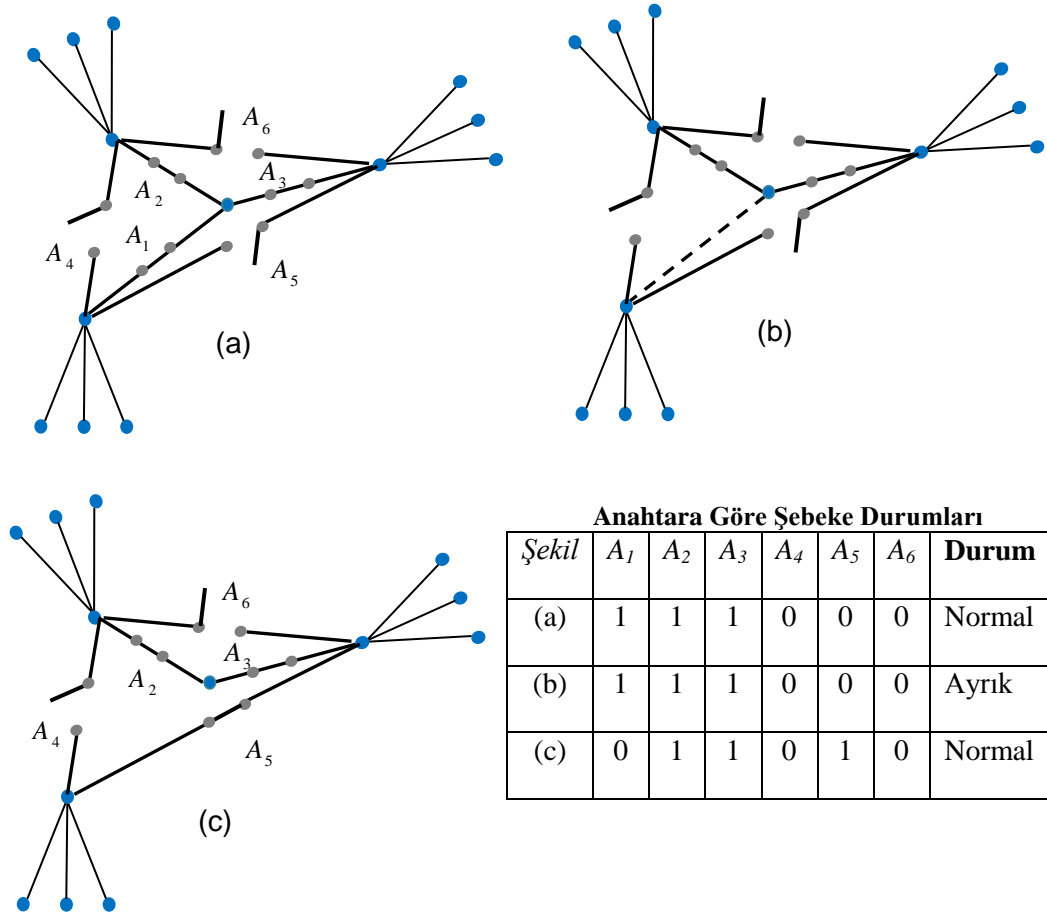
- (i) Karmaşık topolojiye sahip yapıdaki günümüz şebekelerinin kolaylıkla ağaç yapısına dönüştürülebilmesi,
- (ii) Fiziksel olarak karmaşık topolojiye sahip bir şebekede, transmisyon bağlantıları üzerinde uzaktan anahtarlama yapılabildiği durumda mantıksal olarak dinamik bir ağaç mimarisi dönüşebilir. Diğer bir ifade ile, koşullara göre değişim gösterebilen dinamik bir hiyerarşik ağaç şebekesi, anahtarlama bir karmaşık şebeke üstünde kurulabilir ve yönetilebilir.



Şekil 5.1. Karmaşık topoloji (a), kırılan bağlantılarla (kesikli çizgiler) elde edilen ağaç topoloji 1 (b) ve ağaç topoloji 2 (c) dönüşür, (d) Ağaç topolojisinin izomorfizm (eşbiçimlilik) özelliğinin bir sonucu olarak ağaç topolojisi 1, hiyerarşik olarak düzenlenebilir

Fiziksel olarak anahtarlama karmaşık topolojiye sahip bir şebeke üzerinde mantıksal olarak dinamik ağaç yapısı ile enerji akış yönetimi, statik ağaç yapısının birçok zayıflığının giderilmesini sağlar. Statik ağaç topolojilerinde yönetim

kolaylığı sağlayan çevrimsizlik özelliği, önemli bir dezavantajı beraberinde getirir. Eğer, iki düğüm arası bir bağlantı kopar ise Şekil 5.2(b)'de görüldüğü üzere kopan düğüm ve bütün alt düğümlerinin ana ağaç ile olan bağı kesilir ve iki bağımsız ağaç yapısı oluşuyor. Eğer dinamik ağaç yapısı uygulanırsa, bağlantı kopması durumunda uygun anahtarlama ile başka bir noktadan bağlantı sağlanır ve ağaç yapısının bütünlüğü korunabilir. (Bakınız Şekil 5.2(c)) Diğer taraftan, ağaç topolojisinin dinamik olarak değişebilmesi, şebekenin ağaç yapısının değişen koşullara göre optimize edilmesini sağlayabilir ve bu adaptasyon özelliği önemli yönetim kolaylıkları sunabilir. Dinamik ağaç topolojisine, bu tez çalışmasında kavramsal olarak değinilmiş, derinlemesine analizler ve simülasyon çalışmaları gelecek çalışmalara bırakılmıştır.



Şekil 5.2. (a) Anahtarlama bağlantılara sahip karmaşık topolojide, mantıksal ağaç topolojisinin uygun anahtarlama ile oluşturulması, (b) Kırılan bir bağlantı sonucu (kesikli çizgi) şebekenin iki ayrık ağaç yapısına dönüşmesi, (c) Tekrar uygun anahtarlar (A_5) kapatılarak ağaç yapısının onarımı

Dinamik ağaç topolojisi, kuramsal olarak karmaşık (mesh) topolojiler üstünde koşullara göre değişebilen mantıksal ağaç topolojilerinin kurulabilmesini sağlayabilmesi nedeni ile gelecek çalışmalarda araştırmaya değer bir konudur. Aynı zamanda karmaşık topolojiye sahip günümüz şebekelerine, hiyerarşik ağaç yapılarının bu tez çalışmasında ortaya konan özelliklerinin ve avantajlarının kazandırması bakımından ayrı bir öneme sahiptir.

Gelecek tez çalışmalarına bırakılan bir diğer araştırma konusu Şekil 3.25 ile sistem modeli tanımlanan dinamik fiyat ile kapalı çevrim talep kontrolüdür. Bu bağlamda, anlık değişkenlik gösteren üretim kapasitesine adapte olabilecek talep taraflı yük yönetimini amaçlayan yaklaşımın yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim için sunacağı avantajlar incelenmeye değer bir konudur.

6. KAYNAKLAR

- [1] M. Hashmi, S. Hanninen, K. Maki, *Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide*, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), 2011 IEEE PES Conference on, Medellin, (2011), pp.1-7
- [2] M. Akçin, B.B. Alagöz, C. Keleş, A. Karabiber, A. Kaygusuz, *A. Dağıtk Kontrol ile Akıllı Şebekelerde Geniş-Alan Yönetimi ve Geleceğe Dönük Projeksiyonlar*, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 17 (2013) 457-470.
- [3] Y. Cunjiang Z. Huaxun, Z. Lei, *Architecture Design For Smart Grid*, **Energy Procedia**, 17 (2012) 1524-1528.
- [4] C. Liu, Q. Zeng, Y. Liu, *A Dynamic Load Control Scheme for Smart Grid Systems*, **Energy Procedia**, 12 (2011) 200-205.
- [5] R.E. Brown, *Impact of Smart Grid on Distribution System Design*, IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, (2008), pp.1-4.
- [6] S. Galli, A. Scaglione, Z. Wang, *Power line communications and the smart grid*, First IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm), (2010), pp.303-308.
- [7] P. Yi, A. Iwayemi, C. Zhou, *Developing ZigBee deployment guideline under WiFi interference for smart grid applications*, **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2 (2011) 110-120.
- [8] B.B. Alagoz, A. Kaygusuz, A. Karabiber, *A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications*, **Energy**, 44 (2012) 167-177.
- [9] R.H. Katz, D.E. Culler, S. Sanders, S. Alspaugh, Y. Chen, S. Dawson-Haggerty, *An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view*, **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, 1 (2011) 7-22.
- [10] S.M. Amin, B.F. Wollenberg, *Toward a smart grid: power delivery for the 21st century*. **IEEE Power and Energy Magazine**, 3 (2005) 34-41.
- [11] A.A. Bayod-Rujula, *Future development of the electricity systems with distributed generation*, **Energy**, 34 (2009) 377-378.
- [12] A. Kaygusuz, O. Gül, B.B. Alagöz, *Yenilenebilir Dağıtk Üretim Koşullarının Güç Sistemlerinin Yük Akışına Etkilerinin Analizi*, **EMO Bilimsel Dergi**, 2:4 (2012) 77-85.
- [13] S. Grijalva, M.U. Tariq, *Prosumer-based smart grid architecture enables a flat, sustainable electricity industry*, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference, (2011), pp.1-6.
- [14] P. Jarventaustaa, S. Repo, A. Rautiainen, J. Partanen, *Smart grid power system control in distributed generation environment*, **Annual Reviews in Control**, 34 (2010) 277-286.
- [15] P. Vytelingum, T.D. Voice, S.D. Ramchurn, A. Rogers, N.R. Jennings, *Agent-based micro-storage management for the smart grid*, The ninth international conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'10), (2010), pp.39-46.
- [16] O.M. Toledo, D.O. Filho, A.S. Diniz, A.C., *Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14 (2010) 506-511.

- [17] A. Oudalov, R. Cherkaoui, A. Beguin, *Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application*, Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, (2007), pp.621-625.
- [18] A.P. Sanghvi, *Flexible strategies for load/demand management using dynamic pricing*, **IEEE Transactions on Power Systems**, 4:1 (1989) 83-93.
- [19] S.S.S.R. Depuru, L. Wang, V. Devabhaktuni, *Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15 (2011) 2736–2742.
- [20] Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0, U.S. National Institute of Standards and Technology Special Publication 1108. http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf (on-line access on 2009).
- [21] K. Spees, L.B. Lave, *Impacts of responsive load in PJM: load shifting and real time pricing*, **Energy Journal** 29 (2008) 101-122.
- [22] A. Pina, C. Silva, P. Ferrao, *The impact of demand side management strategies in the penetration of renewable electricity*, **Energy** 41 (2011) 128-137.
- [23] K. Friederich, P. Peter, *Wide-area control system for balance-energy provision by energy consumers*. 7th IFAC International Conference on Fieldbuses and Networks in Industrial and Embedded Systems, France, (2007), pp.337-346.
- [24] D. Rech, A. Harth, *Towards a Decentralised Hierarchical Architecture for Smart Grids*, Proceedings of the 2012 Joint EDBT/ICDT Workshops, New York, USA, (2012), pp. 111-115.
- [25] AB Daniel, L Shoudan, Q. Hong *Energy balance for analysis of complex metabolic networks*, **Biophysical Journal**, 83 (2002) 79-86.
- [26] C.A. Nwosu, M. Eng, M.U. Agu, *Power and energy balance in wind-solar hybrid power system*, **The Pacific Journal of Science and Technology**, 10 (2009) 110-116.
- [27] J.R. Pillai, K. Heussen, P.A. Østergaard, *Comparative analysis of hourly and dynamic power balancing models for validating future energy scenarios*, **Energy**, 36 (2011) 3233- 3243.
- [28] Lund H. *Large-scale integration of wind power into different energy systems*. **Energy**, 30 2005 2402-2412.
- [29] B.B. Alagoz, A. Kaygusuz, M. Akcin, S. Alagoz, *A closed-loop energy price controlling method for real-time energy balancing in a smart grid energy market*, **Energy**, 59 (2013) 95-104.
- [30] P.D. Martini, A. Wierman, S. Meyn, E. Biter, *Integrated Distributed Energy Resource Pricing and Control*, CIGRE US National Committee 2012 Grid of the Future Symposium, Paris, (2012), pp.1-5.
- [31] Wang G., Negrete-Pincetic M., Kowli A., Shafieepoorfard E., Meyn S., and Shanbhag U., “Dynamic Competitive Equilibria in Electricity Markets”, In A. Chakraborty and M. Illic (ed.), *Control and Optimization Theory for Electric Smart Grids*, Springer-Verlag, New York NY, (2012), p.35-62.
- [32] S. Borenstein, M. Jaske, A. Rosenfeld, *Dynamic Pricing, Advanced Metering, and Demand Response in Electricity Markets*, Center for the Study of Energy Markets, The Energy Foundation, University of California Energy Institute, California, 2002, pp.1-81

- [33] S.C. Breukers and R.M. Mourik, B.V. DuneWorks, *The end-users as starting point for designing dynamic pricing approaches to change household energy consumption behaviours*, Report for Netbeheer Nederland, Projectgroup Smart Grids (Pg SG), Arnhem,(2013), pp.1-88.
- [34] A. Demeo, M.L. Peterson, *Community smart grid utilizing dynamic demand response and tidal power for grid stabilization*, **Smart Grid Renew Energy**, 4 (2013) 465–72.
- [35] P. Faria, Z. Vale, *Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach*, **Energy**, 36 (2011) 5374- 5384.
- [36] S. Yousefi, M.P. Moghaddam, V.J. Majd, *Optimal real time pricing in an agent-based retail market using a comprehensive demand response model*, **Energy**, 36 (2011) 5716-5727.
- [37] M.H.J. Bollen, J. Zhong, F. Zavoda, J. Meyer, A. McEachern and F.C. Lopez, *Power Quality aspects of Smart Grid*, International conference on renewable Energies and Power Quality (CREPQ'10), Granada, Spain, (2010), pp.1-8.
- [38] Z. Fan, P. Kulkarni, S. Gormus, C. Efthymiou, G. Kalogridis, M. Sooriyabandara, Z. Zhu, S. Lambbotharan, and W. Hau Chin, *Smart Grid Communications: Overview of Research Challenges, Solutions, and Standardization Activities*, **IEEE Communication Surveys & Tutorials**, 15 (2013) 21-38.
- [39] J. Gao, Y. Xiao, J. Liu, W. Liang , C.L. Philip Chen, *A survey of communication/networking in Smart Grids*, **Future Generation Computer Systems**, 28 (2012) 391–404.
- [40] A. Molderink, V. Bakker, M.G.C. Bosman, J.L. Hurink and G.J.M. Smit, *Domestic energy management methodology for optimizing efficiency in Smart Grids*, IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, (2009), pp.1-7.
- [41] P. Samadi, A.H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V.W.S. Wong, J. Jatskevich, *Optimal Real-time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid*, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Gaithersburg, (2010), pp.415-420.
- [42] V.E. Gomez, A. Ramos, *Optimal energy management of an industrial consumer in liberalized markets*, **IEEE Transactions on Power System**, 18:2 (2003) 716–723.
- [43] K. Hongseok, K. Young-Jin, K. Yang, M. Thottan, *Cloud-based Demand Response for Smart Grid:Architecture and Distributed Algorithms*, IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Brussels, (2011), pp.398-403.
- [44] S.D. Ramchurn, P. Vytelingum, A. Rogers, N. Jennings, *Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid*, Proc. of 10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems – Innovative Applications Track (AAMAS 2011), Taipei, (2011), pp.5-12.
- [45] M.G. Kanabar, I. Voloh, D. McGinn, *A review of smart grid standards for protection, control, and monitoring applications*, 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas, (2012), pp.281-289.
- [46] A.H. Mohsenian-Rad, A. Leon-Garcia, *Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments*, **IEEE Transactions on Smart Grid**, 1 (2010) 120-133.

- [47] D.M. Han, J.H. Lim, *Design and implementation of smart home energy management systems based on ZigBee*, **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, 56:3 (2010) 1417-1425.
- [48] S.T. Mak, N. Farah, *Synchronizing SCADA and smart meters operation for advanced smart distribution grid applications*, Innovative Smart Grid Technologies Conference, Washington, USA, (2012), pp.1-7.
- [49] D. Karlsson, M. Hemmingsson, S. Lindahl, *Wide area system monitoring and control-Terminology, phenomena, and solution implementation strategies*, **IEEE Power Energy Mag.**, 2 (2004) 68-76.
- [50] N.C. Batista, R. Melício, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, *Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid*, **Energy**, 49 (2013) 306-315.
- [51] E. Kabalci, Y. Kabalci, I. Develi, *Modelling and analysis of a power line communication system with QPSK modem for renewable smart grids*, **Electrical Power and Energy Systems**, 34, (2012), pp. 19-28.
- [52] P.P. Parikh, M.G. Kanabar, T.S. Sidhu, *Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications*, IEEE power and energy society general meeting, Minneapolis, (2010), pp.1-7.
- [53] P. Rengaraju, C.H. Lung, A. Srinivasan, *Communication requirements and analysis of distribution networks using WiMAX technology for smart grids*, Eighth international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC), Limassol, (2012), pp.666–670.
- [54] P.K. Lee, L.L. Lai, *A practical approach to wireless GPRS on-line power quality monitoring system*, IEEE Power engineering society general meeting, Tampa, (2007), pp.1-7.
- [55] L. Kong, J. Jin, J. Cheng, *Introducing GPRS technology into remote monitoring system for prefabricated substations in china*, IEEE second international conference on mobile technology, applications and systems, Guangzhou, (2005), pp. 1-6.
- [56] W. Wang, Y. Xu, M. Khanna, *A survey on the communication architectures in smart grid*, **Computer Networks**, 55 (2011) 3604-3629.
- [57] E.F. Camacho, T. Samad, M. Garcia-Sanz, I. Hiskens, *Control for Renewable Energy and Smart Grids*, The Impact of Control Technology. T. Samad and A.M. Annaswamy. Editors, www.ieeecss.org (on-line access on 24 September, 2014).
- [58] K.S. Reddy, M. Kumar, T.K. Mallick, H. Sharon, S. Lokeswaran, *A review of Integration, Control, Communication and Metering (ICCM) of renewable energy based smart grid*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 38 (2014) 180-192.
- [59] I.H. Choi, J. H. Lee, *Development of smart controller with demand response for AMI connection*, in: International Conference on Control Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea, (2010), pp. 752–755.
- [60] E. Pouresmaeil, O.G. Bellmunt, D.M. Miracle, J.B. Jané, *Multi level converters control for renewable energy integration to the power grid*, **Energy**, 36:2 (2011) 950-963.
- [61] J. Liang, G.K.Venayagamoorthy, R.G. Harley, *Wide-Area Measurement Based Dynamic Stochastic Optimal Power Flow Control for Smart Grids With High Variability and Uncertainty*, **IEEE Transactions on Smart Grid**, 3 (2012) 59-69.

- [62] S. Gottwalt, W. Ketter, C. Block, J. Collins, C. Weinhardt, *Demand side management—A simulation of house hold behavior under variable prices*, **Energy Policy**, 39:12 (2011) 8163-8174.
- [63] P. Finn, C. Fitzpatrick and D. Connolly, *Demand side management of electric car charging: Benefits for consumer and grid*, **Energy**, 42 (2012) 358-363.
- [64] N.K. Clement, E. Haesen, J. Driesen, *The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid*, **IEEE Transactions on Power Systems**, 25 (2009) 371-380.
- [65] W. Su, H. Rahimi-Eichi, W. Zeng, M.Y. Chow, *A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment*, **IEEE Transaction on Industrial Informatics**, 8 (2012) 1-10.
- [66] A. Kaygusuz, C. Keles, B.B. Alagoz, A. Karabiber, *Renewable Energy Integration for Smart Sites*, **Energy and Buildings** 64 (2013) 456-462.
- [67] A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz and B.B. Alagoz, *An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids*. **Renewable Energy**, 52 (2013) 251-259.
- [68] C. Keles, A. Karabiber, M. Akcin, A. Kaygusuz, B.B. Alagoz, O. Gul, *A smart building power management concept: Smart socket applications with DC distribution*, **Electrical Power and Energy Systems** 64 (2015) 679-688.
- [69] N.G. Dlamini, F. Cromieres, *Implementing peak load reduction algorithms for household electrical appliances*, **Energy Policy**, 44 (2012) 280-290.
- [70] A.Y. Khrennikov, *New Intellectual Networks (SmartGrid) for detecting electrical equipment faults, defects and weaknesses*, **Smart Grid and Renewable Energy**, 3 (2012), 159-64.
- [71] V.K. Sood, D. Fischer, J.M. Eklund, T. Brown, *Developing a communication infrastructure for the Smart Grid*, IEEE Electrical Power & Energy Conference EPEC 2009, Montreal, 2009, pp.1-7.
- [72] K. Martin, *Synchrophasor Standards Development-IEEE C37.118 & IEC 61850*, Proceedings of the 44th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2011, pp.1-8.
- [73] L.C.M. Blasques, J.T. Pinho, *Metering systems and demand side management models applied to the hybrid renewable energy systems in MicroGrid configuration*. **Energy Policy**, 45 (2012) 721-729.
- [74] N.K. Loc, D.G. Jin, D.J. Won, *A study of active power and frequency response in microgrid*, PowerTech, 2011 IEEE, Trondheim, (2011), pp.1-6.
- [75] N. Minorsky, *Directional stability of automatically steered bodies*, **J. Am. Soc. Naval Eng.**, 42 (1922) 280–309.
- [76] Y. Song, M.O. Tade, T. Zhang, *Stabilization and algorithm of integrator plus dead-time process using PID controller*, **Journal of Process Control** 19 (2009) 1529-1537.
- [77] G.J. Silva, A. Datta, S.P. Bhattacharyya, *Stabilization of first-order systems with time delay using the PID controller*, American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001, Arlington, (2001), pp.4650-4655.
- [78] H.D. Tran, Z.H. Guan, X.K. Dang, X.M. Cheng and F.S. Yuan *A normalized PID controller in networked control systems with varying time delays*, **ISA Transactions**, 52 (2013) 592-599.

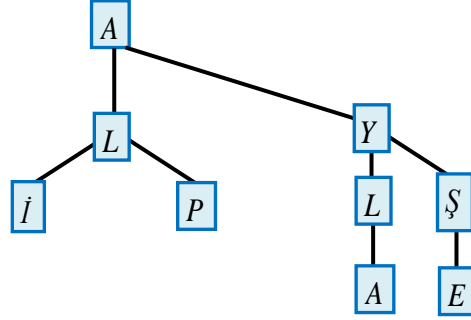
- [79] Y.M. Zhao, W.F. Xie and X.W. Tu, *Performance-based parameter tuning method of model-driven PID control systems*. **ISA Transactions**, 51 (2012) 393-399.
- [80] C.A. Monje, B.M. Vinagre, V. Feliu, Y.Q. Chen, *Tuning and auto-tuning of fractional order controllers for industry applications*, **Control Engineering Practice**, 16 (2009) 798-812.
- [81] I. Podlubny, *Fractional order systems and controller*, **IEEE Transaction on Automatic Control**, 44 (1999) 208-214.
- [82] M.A. Rahimian, M.S. Tavazoei, *Improving integral square error performance with implementable fractional-order PI controllers*, **Optimal Control Applications and Methods**, 35 (2014) 303-323.
- [83] I. Petras, *Stability of Fractional-order systems with rational orders: A Survey*, **Fractional Calculus and Applied Analysis**, 12 (2009) 269-297.
- [84] Xue D., Chen Y.Q., *A Comparative Introduction of Four Fractional Order Controllers*, Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, China, (2002), pp.3228-3235.
- [85] D. Sierociuk, I. Podlubny and I. Petras, *Experimental evidence of variable-order behavior of ladders and nested ladders*, **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 21 (2013) 459 - 466.
- [86] R. Caponetto, G. Dongola, L. Fortuna, and I. Petras, *Fractional Order Systems: Modeling and Control Applications*, World Scientific, Singapore, 2010.
- [87] B.M. Vinagre, I. Podlubny, A. Hernandez, V. Feliu, *Some approximations of fractional order operators used in control theory and applications*. **Fractional calculus & applied analysis**, 3 (2000) 231-248.
- [88] O. Valerio, *Ninteger v.2.3 Fractional control toolbox for MatLab*, User and programmer manual, (2005), <http://web.ist.utl.pt/duarte.valerio/ninteger/Manual.pdf> (on-line access on 10 May, 2014).
- [89] P.A. Derek, N. Tan, C. Yeroglu, G. Kavuran and A. Yuce, *Limit Cycles in Nonlinear Systems with Fractional Order Plants*, **Machines**, 2 (2014) 176-201.
- [90] B.T. Krishna, *Studies on fractional order differentiators and integrators: A survey*, **Signal Process**, 91 (2011) 386-426.
- [91] M.M. Ozyetkin, C. Yeroglu, N. Tan and M.E. Tagluk, *Design of PI and PID controllers for fractional order time delay systems*, In Proceedings of the 9th IFAC workshop on Time Delay Systems, Prague, (2010), pp.355-360.
- [92] M.M. Ozyetkin, N. Tan, *Integer order approximation of fractional order systems*, Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2010 IEEE 18th, Diyarbakir, (2010), pp.949-952.
- [93] G.R. Kirchhoff, *Über die Auflösung der Gleichungen auf welche man bei der Untersuchung der linearen Vertheilung galvanischer Ströme geführt wird* On the solution of equations to which one is led by the investigation of the linear distribution of galvanic currents, **Annalen der Physik und Chemie**, 72:12 (1847) 497-508.
- [94] A. Cayley, *On the theory of the analytical forms called trees*, **Philosophical Magazine**, 13 (1857) 172-176.
- [95] R. Diestel, *Graph Theory* (3rd ed.), Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [96] O. Bonaventure, *Computer Networking : Principles, Protocols and Practice*, The Saylor Foundation's Open Textbook Challenge, 2011,

- <http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2012/02/Computer-Networking-Principles-Bonaventure-1-30-31-OTC1.pdf> (on-line access on 18 September, 2014).
- [97] M. Chiang, M. Yang, *Towards Network X-tities From a Topological Point of View: Evolvability and Scalability*, Proc. 42nd Allerton Conference, Allerton, 2004, pp.1-10.
- [98] A.B. Bondi, *Characteristics of scalability and their impact on performance*, Proceedings of the 2nd international workshop on Software and performance - WOSP '00, Canada, (2000), pp.195-203.
- [99] S. Inc, *Networking Complete*. Third Edition, Sybex, San Francisco, 2002.
- [100] W.Feller, The Strong Law of Large Numbers, in *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, Vol. 1, 3rd ed. Wiley, New York, 1968, pp.243-245.
- [101] E.W. Weisstein, Strong Law of Large Numbers, From MathWorld--A Wolfram Web Resource, <http://mathworld.wolfram.com/StrongLawofLargeNumbers.html> (on-line access on 2014)
- [102] Dagdougui, R. Minciardi, A. Ouammi, M. Robba, R. Sacile, *Modelling and control of a hybrid renewable energy system to supply demand of a green-building*, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Canada,(2010), pp.1-8.
- [103] M. Buzoianu, A.E. Brockwell, D. Seppi. *A dynamic supply-demand model for electricity prices*. Carnegie Mellon University working paper, 2005, pp.1-18.
- [104] P. Finn, C. Fitzpatrick, D. Connolly, M. Leahy and L. Relihan, *Facilitation of renewable electricity using price based appliance control in Ireland's electricity market*, **Energy**, 36 (2011) 2952-2960.
- [105] J. Zarnikau, *Functional forms in energy demand modeling*, **Energy Economics** ,25 (2003) 603-613.
- [106] G. N. Frederickson, *A Data Structure for Dynamically Maintaining Rooted Trees*, Computer Science Technical Reports, Purdue e-Pubs, Purdue University, Paper 987, 1992, pp.1-22.
- [107] P. Burt and T. Adelson, *The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code*, **IEEE Trans. Communications**, 9:4 (1983) 532-540.
- [108] L.E. Maistrov, *Probability Theory: A Historical Approach*, trans. and ed. Samuel Kotz, Academic Press, New York, 1974, p. 202.

EK 1

Ağaç Topolojisinin Diğer Uygulama Sahalarından Örnekler

Ağaç Topolojisinin Aile İlişkisinin Veri Yapılarında Kullanımına Örnek

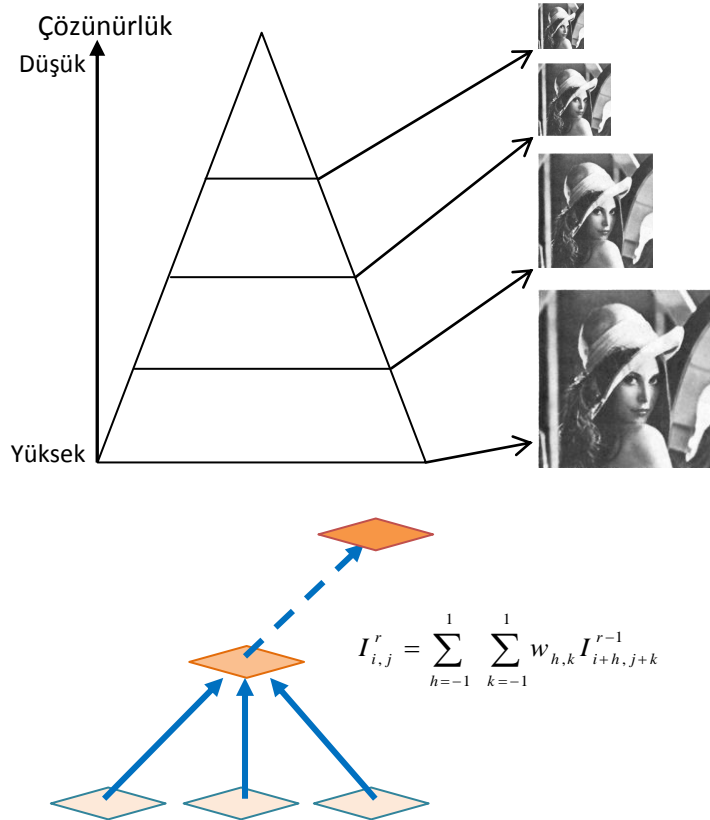


Aile ilişkisi veriler arasında ilişkiler tanımlamak için kullanılabilir [106]. Şekildeki veri yapısına göre, AL* ile başlayan kayıtlı isimler ALI ve ALP. Diğer tarafta AY* ile başlayan isim kayıtları AYŞE ve AYL A vardır. Bu veri yapısında, Y düğümü, LA ve ŞE düğümlerine erişim sağlar ve bunlarla bir aile ilişkisi kurmuştur.

EK 2

Hiyerarşik Ağaç Yapısının Parametrik Globalizasyon Özelliklerinin Görüntü Piramidi Uygulaması ile İlişkisi

Hiyerarşik ağaç yapısına sahip mimarilerin şebekelerin analizinde görülen, hiyerarşi içinde yukarı yönde gidildiğinde durum ve parametrelerin globalizasyonu özelliği, görüntü işleme çalışmalarında, görüntülerin farklı ölçeklerde versiyonlarını elde etmek için geliştirilen görüntü piramidi uygulamasında kullanılmıştır [107]. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere görüntü piramidinin her katmanı bir alt katmandaki lokal bir görüntü parçasına ait piksellerin ağırlıklandırılmış toplamı ile hiyerarşik ağaç topolojisine uygun olarak inşa edilmektedir.



Şekilde görüntü piramidi, görüntü ölçekleme etkisi ve hiyerarşik ağaç yapısına uygun hesaplama yöntemi temsili olarak gösterilmiştir.

Görüntü piramidinde, üst katmanlara doğru gidildikçe görüntüdeki detaylar kaybolur ve görüntünün düşük çözünürlüklü versiyonlarını elde edilir. Bu işlem görüntünün ölçeklenmesine yol açar. Elde edilen farklı çözünürlükteki (multi-resolution) versiyonlar, görüntü analizi, görüntü iyileştirme, görüntü birleştirme gibi alanlarda kullanım bulur. Görüntü piramidini oluşturulan görüntü katmanlarında yukarı yönde, görüntünün hem boyutu hem de çözünürlüğü düşer. Bu işlem görüntüde yerel özelliklerin ve detayların (texture) kaybolmasına yol açar ve dolayısı ile görüntüde bölgesel özellikler, diğer bir ifade ile global özellikler ön plana çıkar. Hiyerarşik ağaç yapısına sahip bir enerji şebekesinde, düğüm noktalarında gözlemlenen durumlar, aslında bir şebeke durum piramidi teşkil ederler ve ölçekleme özelliği gösterirler. Hiyerarşide alt katmanlara doğru gidildiğinde, görüntü piramidinde detayların ve lokal özelliklerin görünür olması gibi, şebekenin lokal durum ve özellikleri gözlemlenebilir. Hiyerarşide yukarı yönde gidildikçe, görüntü piramidinde detayların kaybolması, resme dair bölgesel veya global özelliklerin görünür olmasına benzer olarak, ağaç hiyerarşinde yukarı yönde gidildikçe, şebeke parametrelerinin ve durumlarının global veya toplamsal özellikleri gözlemlenir.

EK 3

Çokça Sayıların Güçlü Yasası (Strong Law of Large Numbers)

Çokça sayıların güçlü yasaı, bir rastgele değişken dizisi x_i nin beklen değeri μ_i olsun. Öyle bir $n = N$ indisi bulunabilir ki, $n > N$ için, her zaman

$\frac{|S_n - m_n|}{n} < \delta$ sağlayan bir $\delta > 0$ bulunabileceğini ifade eder. Burada,

$$S_n = \sum_{i=1}^n x_i \text{ ve}$$

$$m_n = E[S_n] = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots + \mu_n$$

Bu ifade rastgele değişken sayısı x_i arttikça, bu sayıların toplamı olan S_n dizisinin, S_n dizisinin beklenen değeri olan m_n dizisine o ölçüde yaklaşacağını söyler.

Diğer bir ifade ile ne kadar çok rastgele x_i sayısı toplama katılırsa, sonuçtaki belirsizlik o ölçüde azalır. İşleme katılan veri sayısının artırılması, toplamsal sistemlerde belirsizliği azaltan bir faktördür.

Bu kanunun özel bir durumu olan ortalamanın kanunu olarak da anılan çokça sayıların zayıf yasaı şöyle ifade edilmiştir: Beklenen değeri $E[x_i] = \mu$ ve varyansı σ^2 olan normal dağılıma sahip bir rastgele değişken dizisi x_i için,

$n \rightarrow \infty$ giderken, $P(|\frac{S_n}{n} - \mu| < \delta) = 1$ olarak verilmiştir. Burada, burada rastgele

dizinin ortalaması $A_n = \frac{S_n}{n}$ ve varyansı için, $\text{var}(A_n) = \frac{\sigma^2}{n}$ olarak ifade edilmiştir.

Bu teoremler ölçme bilimi açısından, parametre belirsizliğinin azaltmak için kullanılan önemli bir yöntemdir. Örneğin, bir popülasyondan alınan örnek sayısı arttikça, örneklerin ortalama değeri, popülasyonun gerçek ortalama değerine o ölçüde yakınsar ve daha kesin bilgiler sunar.

Belirsizliğin analizi hususunda Chebyshev eşitsizliği, bize şunu önermiştir [108].

$$P(|A_n - \mu| \geq \delta) < \frac{\text{var}(A_n)}{\delta^2} = \frac{\sigma^2}{n\delta^2}$$

Bu denklem örnek sayısı n sayısı arttıkça ortalama hesaplamasındaki belirsizliğin azalacağını açıkça göstermektedir. Eğer örnek sayısı sonsuza götürülürse, $n \rightarrow \infty$, $P(|A_n - \mu| \geq \delta) < 0$ yani $A_n = \mu$ elde edilir.

EK 4

Kesir dereci PI kontrolör modellemesinde kesir dereceli integral alıcı ($s^{-\alpha}$) için kullanılan CFE yöntemi [89] yaklaşık eşdeğer modelleri

α	CFE Approximation of $s^{-\alpha}$
-0.5	$s^{-0.5} \cong \frac{6.563 s^4 + 236.3 s^3 + 826.9 s^2 + 551.3 s + 59.06}{59.06 s^4 + 551.3 s^3 + 826.9 s^2 + 236.3 s + 6.563}$
-0.6	$s^{-0.6} \cong \frac{4.57 s^4 + 210.2 s^3 + 810.8 s^2 + 585.6 s + 68.89}{68.89 s^4 + 585.6 s^3 + 810.8 s^2 + 210.2 s + 4.57}$
-0.7	$s^{-0.7} \cong \frac{2.96 s^4 + 185.5 s^3 + 791.9 s^2 + 619.8 s + 79.82}{79.82 s^4 + 619.8 s^3 + 791.9 s^2 + 185.5 s + 2.96}$
-0.8	$s^{-0.8} \cong \frac{1.69 s^4 + 162.2 s^3 + 770.5 s^2 + 653.7 s + 91.93}{91.93 s^4 + 653.7 s^3 + 770.5 s^2 + 162.2 s + 1.69}$
-0.9	$s^{-0.9} \cong \frac{0.7161 s^4 + 140.4 s^3 + 746.4 s^2 + 687.2 s + 105.3}{105.3 s^4 + 687.2 s^3 + 746.4 s^2 + 140.4 s + 0.7161}$
-1.0	$s^{-1.0} = \frac{120 s^4 + 720 s^3 + 720 s^2 + 120 s}{120 s^3 + 720 s^2 + 720 s + 120} = \frac{1}{s}$
-1.1	$s^{-1.1} = s^{-1} \cdot s^{-0.1} \cong \frac{19.34 s^4 + 352.4 s^3 + 862.5 s^2 + 416.4 s + 29.36}{29.36 s^5 + 416.4 s^4 + 862.5 s^3 + 352.4 s^2 + 19.34 s}$
-1.2	$s^{-1.2} = s^{-1} \cdot s^{-0.2} \cong \frac{15.32 s^4 + 321.8 s^3 + 858 s^2 + 449.4 s + 35.48}{35.48 s^5 + 449.4 s^4 + 858 s^3 + 321.8 s^2 + 15.32 s}$
-1.3	$s^{-1.3} = s^{-1} \cdot s^{-0.3} \cong \frac{11.89 s^4 + 292.1 s^3 + 850.5 s^2 + 483 s + 42.43}{42.43 s^5 + 483 s^4 + 850.5 s^3 + 292.1 s^2 + 11.89 s}$
-1.4	$s^{-1.4} = s^{-1} \cdot s^{-0.4} \cong \frac{8.986 s^4 + 263.6 s^3 + 840.2 s^2 + 517 s + 50.27}{50.27 s^5 + 517 s^4 + 840.2 s^3 + 263.6 s^2 + 8.986 s}$
-1.5	$s^{-1.5} = s^{-1} \cdot s^{-0.5} \cong \frac{6.563 s^4 + 236.3 s^3 + 826.9 s^2 + 551.3 s + 59.06}{59.06 s^5 + 551.3 s^4 + 826.9 s^3 + 236.3 s^2 + 6.563 s}$

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Barış Baykant Alagöz

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya 1975

Adres: Malatya Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Çöşnük Mah., Necip Fazıl Kısakürek Cad., No:4/1 44320 Malatya/Türkiye

E-Posta: alagozb@yahoo.com, baykant.alagoz@inonu.edu.tr,
bbaykant.alagoz@csb.gov.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği,
1992-1998

Yüksek Lisans (Varsa): İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği,
2009-2011

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Alcatel Teletaş A.Ş., Entegre Devre Tasarım Mühendisi, 1998-2000
- Türk Telekom İstanbul Anadolu Yakası İl Müdürlüğü, Telekom Uzman Yardımcısı, 2003-2006
- Malatya Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisi, 2006-2011
- Malatya Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisi, 2011-

Yayın Listesi:

SCI'de taranan dergilerde Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği alanlarında yayınları

1. B.B. Alagoz, H.Z. Alisoy, S. Alagoz, F. Hansu, *A space charge motion simulation with FDTD method and application in negative corona electrostatic field analysis*, **Applied Mathematics and Computation** 218 (2012) 9007–9017.
2. A. Kaygusuz, C. Keleş, B.B. Alagöz, A. Karabiber, *Renewable Energy Integration for Smart Sites*, **Energy and Buildings** 64 (2013) 456–462.

3. B. B. Alagoz, A. Ates, C. Yeroglu, *Auto-tuning of PID controller according to fractional-order reference model approximation for DC rotor control*, **Mechatronics** 23 (2013) 789–797.
4. A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz, B.B. Alagoz, *An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids*, **Renewable Energy** 52 (2013) 251–259.
5. H.Z. Alisoy, S. Alagoz, G.T. Alisoy, B. B. Alagoz, *An Investigation of Ionic Flows in a Sphere-Plate Electrode Gap*, **Plasma Science and Technology** 15 (2013):1012-1019.
6. B. Senol, A. Ates, B.B. Alagoz, C. Yeroglu, *A numerical investigation for robust stability of fractional-order uncertain systems*, **ISA Transactions** 53 (2013) 189-198.
7. H.Z. Alisoy, S. Barlaz Us, B.B. Alagoz, *An FDTD based numerical analysis of microwave propagation properties in a skin-fat tissue layers*, **Optik - International Journal for Light and Electron Optics** 124 (2013) 5218–5224.
8. H.Z. Alisoy, B.B. Alagoz, S. Barlaz Us, F.N. Deniz, S. Alagoz, *Spatio-spectral analyses of electromagnetic wave energy absorption and heating effect*, **Optik - International Journal for Light and Electron Optics** 125 (2014) 4124–4130.
9. B.B. Alagoz, A. Ates, C. Yeroglu, B. Senol, *An experimental investigation for error-cube PID control*, **Transactions of the Institute of Measurement and Control** 01 (2014) 0142331214527476.
10. B.B. Alagoz, C. Keles, A. Kaygusuz, Y. Kaplan, A. Karabiber, *Power regulated DC/DC driver design by hierarchical control*, **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, 2014, (accepted).
11. C. Keles, A. Karabiber, M. Akcin, A. Kaygusuz, B.B. Alagoz, O. Gul, *A smart building power management concept: Smart socket applications with DC distribution*, **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 64 (2015) 679–688.
12. H.Z. Alisoy, B.B. Alagoz, G.H. Alisoy, S. Alagoz, *A numerical method for the analysis of polydisperse aerosol particles charging in a coaxial electrode system*, **Journal of Electrostatics**, 70 (2012) 111-116.
13. H.Z. Alisoy, B.B. Alagoz, G.H. Alisoy, *An analysis of corona field charging kinetics for polydisperse aerosol particles by considering concentration and mobility*, **Journal of Physics D Applied Physics** 43 (2010) 365205.
14. B.B. Alagoz, F.N. Deniz, C. Keles, N. Tan, *Disturbance rejection performance analyses of closed loop control systems by reference to disturbance ratio*, **ISA Transactions** (in press)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

1. B.B. Alagoz, A. Kaygusuz, A. Karabiber, *A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications*, **Energy**, 44 (2012) 167-177.
2. B.B. Alagoz, A. Kaygusuz, M. Akcin, S. Alagoz, *A closed-loop energy price controlling method for real-time energy balancing in a smart grid energy market*, **Energy** 59 (2013) 95-104
3. B.B. Alagöz, A. Kaygusuz, *Kapalı Çevrim Kesir Dereceli PI Kontrolör ile Dinamik Enerji Fiyatı Kontrolü ve Akıllı Şebekelerde Otomatik Enerji Arz-Talep*

Dengelemesi Uygulaması, Ulusal Otomatik Kontrol Konferansı TOK 2014, Kocaeli, 2014

4. B.B. Alagoz, A. Kaygusuz, *Dynamic Price Control by Closed-Loop Fractional Order PI Control System and Energy Balancing in Smart Grid Energy Markets*, **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, Invited paper for TOK 2014 special issue (In review).