



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



AKILLI ŞEBEKELERDE FİYATLANDIRMA
VE ÜRETİME BAĞLI YÜK DENGESİNİN
İNCELENMESİ

Ahmet KARYEYEN

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet KARYEYEN tarafından hazırlanan “Akıllı Şebekelerde Fiyatlandırma ve Üretime Bağlı Yük Dengesinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 05/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Mustafa YAĞCI
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Bahadır AKBAL
(Aksaray Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet KARYEYEN

Tarih: 30.01.2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

AKILLI ŞEBEKELERDE FİYATLANDIRMA VE ÜRETİME BAĞLI YÜK DENGESİNİN İNCELENMESİ

Ahmet KARYEYEN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

2024, 83 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Prof. Dr. Ramazan AKKAYA

Doç. Dr. Mustafa YAĞCI

Doç. Dr. Bahadır AKBAL

Dr. Öğr. Üyesi Hakan TERZİOĞLU

Günümüzde elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması ve dünya üzerinde fosil yakıtların azalması sonucunda elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegrasyonu ve dağıtılmış enerji kaynaklarının çeşitliliği ile birlikte güç sistemlerinin verimli, güvenilir ve yönetilebilir olması gereklilikleri akıllı şebeke teknolojisi ile gerçekleştirilmektedir. Akıllı şebekelerde; müşterilerin değişen talepleri ve en uygun fiyata elektrik enerjisini kullanabilmesi isteğinin yanı sıra üretim sistemlerinin optimum koşullarda üretimini ayarlaması ve tedarikçilerin kârı, ortak bir koordinasyonla elektrik piyasası yük dengesi yönetimini gerektirir. Etkin bir yük dengesinin sağlanabilmesi için dinamik bir fiyatlandırma stratejisinden de yararlanmak gerekir. Bu tez çalışmasında, talep-arz dengesi ve elektrik enerjisi fiyatının ortak noktada bulunduğu bir Kapalı Çevrim Elektrik Güç Kontrol Sistemi (KÇEGKS) Modellemesi kullanılarak dinamik fiyatlandırmaya bağlı yük dengesinin kontrol edilmesi sağlanmıştır. Sistem modelinde elektrik piyasası talep-arz-fiyat dengesinin gerçekleştirilebilmesi için akıllı şebeke teknolojisi yapısına uygun olarak üç farklı kontrolör kullanılmıştır. Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK) yapıları, tez çalışması kapsamında farklı talep değişimi senaryolarına uygulanmıştır. Her bir talep değişimi senaryosu için kontrolörler ayrı ayrı kullanılarak seçilen kriterlere göre performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları aynı grafikler üzerinde gösterilerek kontrolörlerin avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı şebekeler, Elektrik enerjisi fiyatlandırması, Kapalı çevrim kontrol sistemi, Sinir ağı modeli referans kontrolör, Yük dengesi.

ABSTRACT

PhD THESIS

EXAMINATION OF PRICING AND GENERATION-RELATED LOAD BALANCE IN SMART GRIDS

Ahmet KARYEYEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

2024, 83 Pages

Jury

Advisor Assoc. Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Prof. Dr. Ramazan AKKAYA

Assoc. Prof. Dr. Mustafa YAĞCI

Assoc. Prof. Dr. Bahadır AKBAL

Asst. Prof. Dr. Hakan TERZİOĞLU

Today, as a result of the increasing need for electrical energy and the decrease in fossil fuels in the world, the use of renewable energy sources in electricity generation has become widespread. The integration of renewable energy sources into power systems and the diversity of distributed energy sources, as well as the requirements for power systems to be efficient, reliable and manageable, are realized with smart grid technology. In smart grids; In addition to customers' changing demands and the desire to use electrical energy at the most affordable price, generation systems' adjustment of generation under optimum conditions and suppliers' profits require electricity market load balance management with a common coordination. In order to ensure an effective load balance, it is necessary to benefit from a dynamic pricing strategy. In this thesis, the load balance based on dynamic pricing is controlled by using a Closed Loop Electrical Power Control System (KÇEGKS) Modeling, where the demand-supply balance and the electric energy price meet at a common point. In the system model, three different controllers were used in accordance with the smart grid technology structure to achieve the demand-supply-price balance in the electricity market. Classical PI controller, Fuzzy Logic PI controller and Neural Network Model Reference controller structures have been applied to different demand change scenarios within the scope of the thesis study. For each demand change scenario, controllers were used separately and performance comparisons were made according to the selected criteria. The obtained simulation results were shown on the same graphs and the advantages and disadvantages of the controllers were evaluated.

Keywords: Closed loop control system, Electric energy pricing, Load balancing, Neural network model reference controller, Smart grids.

ÖNSÖZ

Teknolojinin çok hızlı bir şekilde gelişmesi hayatımıza birçok avantajlar katıyor olsa da diğer taraftan enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. İnsanoğlunun alışlagelmiş olarak kullandığı fosil yakıtların azalması ya da artık ihtiyacı karşılayamaması toplumları ve bireyleri yeni enerji kaynak türlerini kullanmaya yöneltmiştir. Yeni ve çok çeşitli enerji kaynak türlerinden elektrik enerjisi üretmek ve kullanmak, mevcut sistemlerin de değişmesi ihtiyacını doğurmuştur. Hem teknolojik gelişmeler, hem kaynak çeşitliliği ve yayıldığı geniş coğrafya, hem de tüketici beklentileri elektrik şebekelerinde köklü bir değişim vizyonu olan Akıllı Şebeke Teknolojisini ortaya çıkarmıştır ve geliştirmeye devam etmektedir. Müşterilerin elektrik enerjisi taleplerinin değişkenliği ve ekonomik olarak en uygun şartlarda hizmet alma arzusu, diğer taraftan üretim sistemlerinin hem verimli ve güvenilir olma zorunluluğu hem de yüksek kâr beklentisi; ortak bir koordinasyon içerisinde optimize edilecek yük dengesi yönetimi gerektirmektedir. Bu tez çalışmasının amacı; yükün dengede tutulması ve değişen şartlara göre güncel fiyatlandırmanın yapılması için farklı kontrolör yapılarının ve optimizasyon metotlarının akıllı şebeke elektrik güç sistemi modeline uygulanmasıdır.

Tez çalışması süresince verdiği katkı ve desteklerden dolayı danışman hocam Doç.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA'ya, her zaman çalışma motivasyonumu artırma gayretinde olan ANNEM ve BABAMA, sabırla ve destekle hep yanımda olan EŞİME teşekkür ederim.

Ahmet KARYEYEN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Akıllı Şebekeler	11
3.1.1. Akıllı şebekenin tanımı	11
3.1.2. Akıllı şebekelerin faydaları.....	14
3.1.3. Akıllı şebeke teknolojileri.....	16
3.1.3.1. Akıllı şebekelerin özellikleri.....	16
3.1.3.2. Akıllı şebekelerin kapsamı.....	18
3.1.4. Akıllı enerji kaynakları	19
3.1.4.1. Yenilenebilir üretim	19
3.1.4.2. Enerji depolama	20
3.1.4.3. Elektrikli araçlar	22
3.1.4.4. Mikro şebekeler	23
3.1.5. Akıllı trafo merkezleri	24
3.1.6. Akıllı şebekelerde iletim ve dağıtım sistemleri	25
3.1.7. Akıllı sayaçlar ve gelişmiş ölçüm altyapısı	26
3.1.8. Tüketici talep yönetimi	27
3.2. PID/PI Kontrolör.....	28
3.3. Bulanık Mantık	30
3.4. Sinir Ağı Modeli Referans Kontrolör (SAMRK)	32
3.5. Kapalı Çevrim Elektrik Güç Kontrol Sistemi (KÇEGKS) Modellemesi	33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	39
4.1. Tek Üretim Kaynaklı Sistem İçin Uygulama	39
4.1.1. Senaryo 1 uygulaması	39
4.1.2. Senaryo 1 uygulamasında kullanılan kontrolörlerin yapısı	43
4.2. Farklı Üretim Kaynaklarının Olduğu Dağıtık Bir Sistem İçin Uygulamalar.....	48
4.2.1. Senaryo 2 uygulaması	49
4.2.2. Senaryo 3 uygulaması	53
4.2.3. Senaryo 4 uygulaması	56
4.2.4. Senaryo 5 uygulaması	59
4.2.5. Senaryo 6 uygulaması	63
4.2.6. Senaryo 7 uygulaması	66

4.2.7. Senaryo 2’den Senaryo 7’ye kadar olan uygulamalarda kullanılan kontrolörlerin yapısı.....	69
4.3. Sonuçların Değerlendirilmesi	73
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR	78



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_{maks}	: Üretim sisteminin maksimum kurulu gücü
D	: Enerji talebi
$e(t)$	: Enerji denge hatası, hata sinyali
$\Delta e(t)$	: Enerji denge hatası türevi
$G(s)$	: Üretim modeli transfer fonksiyonu
K_p	: Oransal katsayı
K_i	: Bütünsel katsayı
K_d	: Türevsel katsayı
N	: Üretim hacmi
P	: Fiyat, fiyat cevabı
P_H	: Yüksek fiyat
P_L	: Düşük fiyat
P_0	: Ortalama enerji üretim maliyeti
P_{OPT}	: Optimal fiyat
Q	: İdeal fiyat noktası
S	: Enerji arzı
$S_d(p)$	: p birim enerji fiyatı için üretim kapasitesi fonksiyonu
$S(s)$	: Kaynağın fiyata karşılık enerji cevabı transfer fonksiyonu
τ	: Üretim kaynağının zaman sabiti
T	: Kaynağın sıfır üretimden maksimum üretime ulaşma ortalama zamanı
$U(t)$	: Çıkış sinyali

Kısaltmalar

AC	: Alternatif akım
AMI	: Gelişmiş ölçüm altyapısı
BES	: Batarya enerji depolama
CAES	: Basınçlı hava enerji depolaması
DC	: Doğru akım
DMS	: Dağıtım yönetim sistemleri
DR	: Talep yanıtı
DRM	: Talep yanıtı yönetimi
DSM	: Talep tarafı yönetimi
EPRI	: Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü
FACTS	: Esnek AC iletim sistemleri
FES	: Flywheel enerji depolaması
HEV	: Hibrit elektrikli araçlar
HVDC	: Yüksek gerilim DC
KÇEGKS	: Kapalı çevrim elektrik güç kontrol sistemi
NETL	: Ulusal Enerji Teknolojisi Laboratuvarı
PEV	: Prizden şarjlı elektrikli araçlar
PHEV	: Prizden şarjlı hibrit elektrikli araçlar
PI	: Oransal-bütünsel
PID	: Oransal-bütünsel-türevsel
PV	: Fotovoltaik
SAMRK	: Sinir ağı modeli referans kontrolör
SCADA	: Merkezi denetim ve veri toplama
SMES	: Süper iletken manyetik enerji depolama

1. GİRİŞ

Son yıllarda yaşanan teknolojik ve sosyal gelişmeler sonucu toplumların ve bireylerin elektrik enerjisine olan ihtiyaçları her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyaç ise daha fazla elektrik enerjisi üretilmesi ve buna bağlı olarak daha fazla kaynağa ihtiyaç duyulması anlamına gelmektedir. Dünya üzerinde fosil yakıtların azalması sonucunda fosil yakıtlara dayalı elektrik üretimi de yerini yenilenebilir enerjilere bırakmaya başlamıştır. Yenilenebilir enerjilerin elektrik güç sistemlerine dâhil olması sonucu dağıtık enerji sistemleri ve bu sistemlerin kontrolü günümüzün çalışma alanları arasında yerini almıştır. Elbette birçok yenilenebilir enerji kaynağının sisteme dâhil olması ve elektriğin kullanımının çeşitlenmesi sonucu geleneksel güç sistemleri artık yetersiz kalmaktadır. Gelişen teknolojik imkânların da katkısıyla güç sistemleri daha verimli, daha güvenli ve daha yönetilebilir olmak zorundadır. Bu nedenle Akıllı Şebekeler kavramı günümüzde geleneksel güç sistemlerinin yerini almaktadır.

Şebeke bileşenlerinin düşük maliyetli, birbiriyle uyumlu, tepki süresi hızlı, ekolojik sistemlere duyarlı, esnek kullanımlı ve gerçek-zamanlı çalışabilen bileşenler olmaları istenir. Aslında geleneksel şebekelerin hem regülasyon hem de teknolojik ve uygulama noktasında çok daha geliştirilmiş haline akıllı şebeke denilmektedir. Akıllı şebeke her bir müşteriyi ve düğümü kontrol eden ve gözlemleyen, güç istasyonu ile kullanıcı arasında iki-yollu elektrik ve bilgi akışı sağlayan, tamamen otomatik bir güç dağıtım ağıdır (Anonymous, 2003). Akıllı şebeke; mevcut elektrik şebekesi içerisinde, gelişmiş otomasyonlara ve bilgi teknolojisi altyapısına sahip, elektrik ve haberleşme altyapılarının bir birlikteliği olarak da tanımlanabilir (Hadjisaid ve Sabonnadiere, 2012; Borlase, 2013).

Elektrik güç sistemlerinde yük dengesinin sağlanması; talebin tahmini konusundaki zorluklar nedeniyle önemli bir sorundur. Çünkü yük tahmininde oluşabilecek herhangi hata ya da yapılan üretim tahminlerindeki sapmaların kabul edilebilir ve tolere edilebilir sınırların dışında olması durumu elektrik güç sistemindeki tedarikçi tarafına çok daha yüksek maliyetler oluşturabilir. Tedarikçi tarafında oluşabilecek bu yüksek maliyetler doğal olarak elektriğin kullanıcı tarafında da büyük maliyetlere sebep olacaktır. Bu sorunla alakalı yapılacak çalışmalarda, elektrik güç sistemlerinde yük dengesi ve fiyatlandırma yöntemleri ile güç sistemlerinin en verimli şekilde çalıştırılması ve buna bağlı olarak hem tedarikçinin kârı hem de müşterinin en

uygun fiyata elektrik enerjisini kullanması sağlanmalıdır. Günümüzde akıllı şebeke teknolojisi ile birlikte müşterilerin de sisteme dâhil edilerek ve talepleri göz önünde bulundurularak, müşteri ve tedarikçiyi iyi bir koordinasyon döngüsünün içinde tutmak gerekmektedir.

Etkin bir yük dengesi yönetiminin hem tüketiciler hem de dağıtım şirketi için çok sayıda faydası bulunur. Tüketicilerin ve dağıtım şirketlerinin ortak amacı, enerji maliyetlerini düşürmek için bir şebekenin günlük yük dağılımının daha homojen olması ve tepe-yük miktarlarının düşürülmesinin sağlanmasıdır. Genel olarak verimliliği artırmak için asıl amaçlanan; maksimum yükü azaltmak ve talep-tedarikçi dengesinin sağlanabilmesi için dinamik bir fiyatlandırmadan da yararlanabilmektir. Uygun bir yük dengesi ve dinamik fiyatlandırma stratejisi; güç sistemlerinde kararlılığı ve sürekliliği artırır. Ayrıca güç şebekesinin üretim maliyetini düşürür ve esnek elektrik kullanımlarını makul bir şekilde planlayarak müşterilerin elektrik harcamalarını da azaltır. Doğru bir dinamik fiyatlandırma stratejisinin tasarımında; rastgele talep, müşterilerin tercihindeki bilgi eksikliği ve fiyat değişimlerine karşı tepkilerden dolayı yük dengesi hatalarının kaçınılmaz olması sebebiyle bu argümanların her biri göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tez çalışmasında; akıllı şebeke teknolojisi ile elektrik fiyatlandırmasından yararlanılarak yük dengesinin kontrol edilmesi sağlanmıştır. Tez çalışması kapsamında akıllı şebeke teknolojisiyle yük dengesi oluşturulmuş ve talep-tedarik-fiyat dengesi için kontrolörler kullanılmıştır. Kontrolörler kullanıldığında, dengede oluşturulacak optimizasyon hem müşteriler açısından hem de tedarikçiler açısından ekonomiklik meydana getirecektir. Elektrik güç sistemi daha verimli çalıştırılacaktır.

Bu çalışmada içerik olarak; akıllı şebeke teknolojisinin ayrıntıları incelenmiş, konuyla ilgili literatür ve kaynak araştırmaları yapılmış, talep-arz-fiyat dengesinin sağlanması için kullanılan Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve Sinir Ağı Modeli Referans kontrolörün (SAMRK) yapılarından ve bu kontrolörlerin kullanıldığı elektrik güç sisteminin modellemesinden bahsedilmiştir.

Sistem modelinde aynı parametreler ile farklı kontrolör yapıları ayrı ayrı kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması suretiyle kontrolörlerin avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir. MATLAB/Simulink programı kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması, elektrik güç sistemi modeline uygulanan farklı talep

değişim senaryolarının her biri için yapılmıştır. Senaryolar, tek tip üretim kaynaklı sistemleri ve de farklı tipte üretim kaynaklarının bulunduğu dağıtık sistemleri içermektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrik güç sistemlerinde; akıllı şebekelerin öneminden ve sisteme katkılarından birçok bilimsel çalışmada bahsedilmiştir. Bu bağlamda, akıllı şebekelerin istenilen optimizasyonları sağlayabilmesi için çeşitli yöntemler ve uygulamalar kullanılmıştır. Bu çalışmalarından bazıları şunlardır:

Niknam ve diğ. (2012) makalelerinde belirsiz koşullarda yenilenebilir akıllı şebekelerin enerji ve işletme yönetimi için ihtimallere dayalı bir yaklaşım önermektedir. Bu çerçevede, nokta tahmin yöntemi ve kendinden uyarlamalı yerçekimi arama algoritması kullanarak optimizasyon gerçekleştirmişlerdir.

Akcanca ve Taşkın (2013) yayınladıkları bildirilerinde Akıllı Şebeke Teknolojisi ile Türkiye Elektrik Sistemini karşılaştırmıştır. Akıllı Şebekenin avantaj, dezavantaj ve Türkiye şartlarına uygunluğu değerlendirilmiştir.

Akçin ve diğ. (2013) hazırladıkları makalede Akıllı Şebekelerde dağıtık üretim kontrolü ile ilgili geniş alanda yönetim üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada geleceğe yönelik projeksiyonlar sunmuşlardır.

Alagöz ve diğ. (2013) hazırladıkları makalelerinde akıllı şebeke güç sistemlerinde enerji talep ve üretiminin reel zamanlı olarak dengelenmesi için kapalı döngü PID (oransal-bütünsel-türev) denetleyici tabanlı elektrik fiyat kontrol yöntemi sunmuştur. Yapılan çalışmada tüketicilerin değişen enerji talepleri dinamik bir fiyatlandırma sayesinde dengeye getirilmiştir. Enerji dengesi ve fiyat dengesi uygun K_p , K_i ve K_d değerleri tespit edilerek PID denetleyici ile gerçekleştirilmiştir.

Çiçek (2013) hazırladığı yüksek lisans tezinde, akıllı şebekeler içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklarının güç üretirken ortaya çıkan belirsizlikleri sonucu meydana gelebilecek kesintileri sınırlamak amacıyla talep müdahalesi ve tedarik optimizasyonu içeren bir güç planlaması yapmıştır.

De Santis ve diğ. (2013) hazırladıkları makalede bir mikro şebekede talep tarafı ve akış yönetimi optimizasyonu uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan optimizasyona göre enerji akışları üzerinde karar verme işlemi genetik algoritma tabanlı bir bulanık mantık kontrolör ile sağlanmaktadır.

Kyriakarakos ve diğ. (2013) yaptıkları makalede, mikro şebekelerin artan talepleri karşılamakta zorlanması ve elektrik kesintilerine sebep olması problemine çözüm olarak belirli bir yatırım miktarı için en uygun çoklu üretim mikro şebekesini tasarlamak amacıyla kullanılan gri tahmin algoritmaları içeren bir akıllı talep tarafı yönetimi sistemi sunmuşlardır.

Dönmez (2014) yaptığı bildiride akıllı şebekeler ile elektrik üretim tesislerinin entegre olarak çalıştığı bir kontrol ve takip programı geliştirmiştir. Bu programın ilerleyen yıllarda rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi ile de çalıştırılabileceği ayrıca programdaki haberleşme protokollerinin dağınık enerji santrallerine uygunluğu anlatılmıştır.

Hu ve diğ. (2014) yayımladıkları makalelerinde talep tarafını yönlendiren bir fiyat sinyali kullanarak dağıtım sistemlerinde güç kaybı minimizasyonu elde etmek için yeni bir yöntem önermiştir. Güç kaybı minimizasyon çalışması için araç olarak bir bulanık mantık uyarlamalı parçacık sürüsü optimizasyonu kullanılmıştır.

Bicil (2015) hazırladığı doktora tezi çalışmasında Türkiye'deki elektrik fiyatları ve fiyatlandırma yapısının analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada ayrıca fiyatlandırma ile ilgili tahmin metotlarını karşılaştırmış ve konuya istatistiksel olarak yaklaşımda bulunmuştur.

Karabiber (2015) hazırladığı doktora tezi çalışmasında farklı güçlerdeki dağıtık enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonlarını, önerdiği doğru akım güç entegrasyon yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Bu yöntem ile doğru akım biçimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji dönüşümünden kaynaklı kayıplarının azaltıldığını ifade etmiştir.

Alagöz ve Kaygusuz (2016) hazırladıkları makalede, 2013 yılında yaptıkları çalışmanın devamı niteliğinde olan çalışmalar yapmışlardır. Değişen enerji taleplerinin dengeye gelmesi için yapılan dinamik fiyatlandırma, kapalı döngü PI (oransal-bütünsel) denetleyici ile sağlanmıştır. Her iki çalışmada da dinamik fiyatlandırmanın yük dengesine olumlu etkisi ortaya konulmuştur.

Athari ve Ardehali (2016) yaptıkları makale çalışmasında bir şebekeye bağlı hibrit yenilenebilir enerji sistemi için zamanla değişen elektrik fiyatlarının, enerji depolama bileşenlerinin performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan

çalışmada elektrik fiyatı, elektrik yükü, rüzgâr hızı, güneş ışınlamı ve ortam sıcaklığı parametreleri bir bulanık mantık kontrolör kullanılarak optimize edilmiştir.

Elma (2016) yaptığı doktora tezi çalışması kapsamında yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen bir akıllı ev için yeni bir ev enerji yönetim algoritması geliştirmiştir. Bu algoritmaya göre yüklerin kontrol edilirken tüketicinin konforunun da maksimumda tutulması sağlanmıştır.

Faia ve diğ. (2016) yayımlanan makalelerinde elektrik piyasasında fiyatın tahminini gerçekleştirmek için bulanık mantıkla birleştirilmiş bir kümeleme metodu önermişlerdir.

Pereira ve diğ. (2016) yaptıkları makale çalışmasında bulanık mantık eksiltici küme yaklaşımı kullanan yeni bir talep yanıt modeli önermişlerdir. Bu model ile tüketicilerin tüketim ihtiyaçlarını ve olası ekonomik faydalarını sağlamak için uygun yük şekli veya yeniden planlama optimize edilmiştir.

Aslan ve diğ. (2017) tarafından hazırlanan makale çalışmasında güneş enerjisi santrallerinin akıllı şebekelere entegrasyonu incelenerek akıllı şebekelerin güneş enerjisi santrallerinin dezavantajlarını nasıl giderebileceğine yönelik çözüm önerileri ortaya konulmuştur.

Ayan (2017) hazırladığı yüksek lisans tez çalışmasında Akıllı Şebekelerde Talep Tarafı yönetimini incelemiş ve kullanıcı olarak meskenlerde talep tarafı yönetimine uygun olarak enerji verimliliği adına neler yapılabileceğine dair öneri ve yöntemler sunmuştur.

Baloğlu (2017) hazırladığı doktora tezinde, akıllı şebekeler ile talep tarafı yönetimi modellerinde talep bilgilerinin eksiksiz incelenmeye çalışılması yerine, talep analizinin eksik bilgiyle yapılmasının karmaşıklığın fazla olduğu durumlarda daha pratik olduğu düşüncesiyle eksik bilgiden ya da haberleşme gecikmelerinden çok fazla etkilenmeyen bir yöntem önermiştir.

Cebeci (2017) Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü bünyesinde hazırladığı Uzmanlık Tezinde Türkiye'deki güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyelini değerlendirmiş ve örnek bir güneş enerjisi santralının finansal analizini yapmıştır.

Karamanlı (2017) hazırladığı Yüksek Lisans tezinde tahmin hatası sınırlaması yöntemiyle yenilenebilir enerji kaynakları içeren akıllı şebekelerde optimal programlama ile talep müdahalesi konusunda bir metot önermiştir.

Keleş (2017) doktora tez çalışması kapsamında, dağıtık üretim şartları ve akıllı şebekelerin farklı enerji fiyatlandırma tarifeleri altında yük yönetimini gerçekleştirmek için bir yerel yük atma yöntemi önermiştir.

Keshtkar ve Arzanpour (2017) yayımlanan makalelerinde, konutlardaki ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri için uyarlanabilir bir otonom enerji yönetim sistemi önermektedirler. Bu sistem kapsamında bir uyarlamalı bulanık mantık modeli geliştirmişlerdir.

Panapakidis ve diğ. (2017) yaptıkları makale çalışmasında yük eğrilerini kümeler halinde gruplandırmak için Bulanık C-Ortalamalar algoritması kullanmışlardır. Bu algoritma ile yük yönetimi için yeni bir talep tarafı yönetimi stratejisi önerilmektedir.

Akkaş ve diğ. (2018) yaptıkları makalede yenilenebilir enerji santrallerinin Akıllı Şebeke güç sistemine etkisi ve buna bağlı olarak sanal güç santrali olarak tanımladığı modelleme önerisini ve sanal santralin işletimini içeren bir çalışma ortaya koymuştur.

Aksakal ve diğ. (2018) yaptıkları makalede talep tarafı yönetimi kapsamında Türkiye’de bir okulun elektrik talebini incelemiş ve okulun elektrik kullanımının pik yaptığı anları elektriğin daha az kullanıldığı anlara kaydırmak suretiyle üretim tüketim dengesi çalışması yapmıştır. Benzer durumların kamu binaları için de uygulanabilirliği yorumlanmıştır.

Baghaee ve diğ. (2018) hazırladıkları makalelerinde Güç Sistemi ağlarındaki yük akış problemi ile ilgili yapay sinir ağları tabanlı bir algoritma önermiş ve diğer yük akış metotları ile verimlilik açısından karşılaştırma yapmıştır.

Eissa (2018) makalesinde farklı kaynaklardan oluşan akıllı şebeke güç sisteminde gerçek zamanlı talep cevap programı geliştirmiştir. Bu programa göre gerçek zamanlı olarak müşterilerin elektrik taleplerinin uygun bir şekilde yönetimi ve verimli bir şekilde kaynaklara dağıtılması incelenmiştir.

He ve diğ. (2018) makalelerinde Üretim Tüketim Dengesi için dinamik fiyatlandırma ile ilgili çalışma yapmışlardır. İlgili makalede kapalı döngü fiyatlandırma algoritması adına bir algoritmayı ortaya koyarak değişen şartlara uygun anlık elektrik fiyatlamasının hem tedarikçi hem de müşteri açısından yüksek kârlılık meydana getirdiğini göstermişlerdir.

Hertrampf ve diğ. (2018) tarafından gerçekleştirilen makale çalışmasında yerel bir bölgenin akıllı şebeke sisteminde veri işleme gereklilikleri ve mimarisi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Önerdikleri veri işleme ve akış algoritmasını diğer uygulamalar ile kıyaslamışlardır.

Kakran ve Chanana (2018) hazırladıkları makalede dağıtık elektrik üretiminin akıllı şebeke güç sistemlerine dâhil olması konusu ile ilgili bir derleme çalışması yapmışlardır. Çalışmada özellikle talep ile üretimin dengelenmesinin aynı zamanda fiyatlandırma ile de olması gerektiği ve hem müşterilerin hem de tedarikçilerin maksimum kazancı elde etmesi yönünde çalışmalara devam edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Lu ve diğ. (2018) hazırladıkları makalede, akıllı şebekelerde hem hizmet sağlayıcının kârını hem de müşterilerin maliyetlerini dikkate alan elektrik piyasası enerji yönetimi için dinamik bir fiyatlandırma algoritması önermektedirler. Dinamik fiyatlandırma, sonlu Markov karar süreci olarak formüle edilen bir yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

Mansiri ve diğ. (2018) yaptıkları makale çalışmasında Tayland'daki bir okul için pil depolama gücü yönetimi ve talep tarafı güç yönetimi için geliştirilmiş bulanık mantık tabanlı bir algoritma sunmaktadırlar.

Ünsal Çelimli (2018) hazırladığı doktora tezinde, kontrol gereksinimlerini karşılayabilen haberleşme teknolojileri ve yenilenebilir elektrik kaynaklarının akıllı şebekelere entegrasyonunu inceleyerek mikro şebeke sistemi modellemesi gerçekleştirmiş ve Matlab/Simulink ile simülasyonunu yapmıştır.

Al-Mousa ve Faza (2019) yayımlanan makalelerinde müşterilerin dinamik fiyatlandırmaya daha doğru yanıt verebilmesi için bulanık mantık tabanlı müşteri yanıt tahmin modeli geliştirmişlerdir.

Dinçer ve diğ. (2019) editörlüğünde ve yürütücülüğünde Türkiye Bilimler Akademisi tarafından Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Raporu adında bir doküman yayımlanmıştır. Rapor, Türkiye Bilimler Akademisi bünyesinde gerçekleştirilen çalıştayda sunulan bildirilerin derlenmesiyle hazırlanmıştır.

Kaygusuz (2019) yaptığı makale çalışmasında dinamik fiyat sinyali yayını yoluyla kapalı döngü elastik talep kontrol şemasına dayalı bir kontrol teorik enerji piyasası yönetimi yaklaşımı sunmaktadır.

Khalid ve diğ. (2019) makalelerinde Akıllı evlerde optimum enerji yönetimi için bazı cihazların kontrolünde Bulanık Mantık yapısından yararlanarak enerji tüketiminde ve maliyette önemli bir azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Tsao ve diğ. (2019) makalelerinde dinamik elektrik fiyatlandırmasında bulanık mantık programlama yaklaşımından yararlanarak sürdürülebilir bir akıllı şebekede maliyetlerin azaltıldığını göstermişlerdir.

Yapıcı (2019) hazırladığı doktora tezinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının akıllı şebekelere entegrasyonu için kartal stratejisi ile geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu algoritması adıyla yeni bir sezgisel algoritma önermiştir. Önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar başka algoritmalar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Shewale ve diğ. (2020) yaptıkları makale çalışmasında akıllı şebekelerin özelliklerini, avantajlarını ve mimarilerini anlatmıştır. Ayrıca akıllı şebekelerde kullanılan optimizasyon tekniklerine genel bir bakış yapılarak algoritmalar sınıflandırılmıştır.

Tao ve Gao (2020) makalelerinde dağıtık enerji kaynaklarının ve depolama cihazlarının akıllı şebekelere entegrasyonu ile ilgili gerçek zamanlı fiyatlandırma kullanılan bir oyun algoritması önermişlerdir.

Alquthami ve diğ. (2021) yaptıkları makale çalışmasında Akıllı Şebekelerde genetik algoritma yöntemi kullanarak yük kaydırma programı geliştirmişlerdir. Ayrıca buna bağlı olarak teşvik tabanlı bir dinamik fiyatlandırma metodunu ortaya koymuşlardır.

Gaba ve Chanana (2021) makalelerinde akıllı şebekelerde dinamik fiyatlandırma ile enerji yönetimi problemi optimizasyonu için yakınsamalı ayrıştırma algoritması kullanmışlardır.

Albogamy ve diğ. (2022) yayımlanan makalelerinde akıllı şebeke güç sistemlerinde gerçek zamanlı kapalı döngü yük dengelenmesi için parçaçık sürüsü optimizasyonu tabanlı süper büküm kayan mod kontrolörü kullanarak dinamik enerji fiyatlandırması yapmışlardır.

Pluemer (2022) hazırladığı yüksek lisans tezinde Stackelberg oyunu algoritması kullanarak çok sayıda kaynak ve çok sayıda tüketiciden oluşan bir talep yanıt yönetimi modeli önermektedir.

Wen ve diğ. (2022) hazırladıkları makale çalışmasında akıllı şebekelerde talep tarafı yönetimi için dinamik fiyat tabanlı bir talep tepkisi modeli geliştirmişlerdir. Modele göre enerji hizmet sağlayıcıları ile elektrik tüketicilerinin memnuniyetsizliklerini en aza indirmek ve aralarındaki etkileşimi sağlamak için oyun teorisi modeli kullanılmıştır.

Karyeyen ve Çetinkaya (2023a) makalelerinde akıllı şebekelerde ani talep değişimi durumlarında enerji dengesinin sağlanması için Bulanık Mantık PI kontrolör kullanmışlardır.

Karyeyen ve Çetinkaya (2023b) hazırladıkları bildiride akıllı elektrik şebekelerinde talep-arz-fiyat dengesini sağlamak için farklı kontrolör yapıları kullanarak performans karşılaştırması yapmışlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Akıllı Şebekeler

3.1.1. Akıllı şebekenin tanımı

Elektrik enerjisi, ilk kullanılmaya başladığında merkezi istasyonlar vasıtasıyla yakınlardaki müşterilere hizmet verebiliyordu. Dolayısıyla hem üretim hem de dağıtım tamamen yerel olduğu gibi iletim kavramı henüz yoktu. İlerleyen yıllarda ise elektrik enerjisinin sunduğu kolaylıklar talebin artmasına ve buna bağlı olarak çok uzun mesafelere elektriğin iletimine başlanmasına neden oldu. Günümüzde halen geçerli olan en temel anlamdaki şebeke işletim yapısı şu şekildedir: Elektrik; santraller tarafından üretilip trafolarla yüksek gerilim seviyesine yükseltilir. Birbirine bağlı iletim hatlarıyla uzun mesafelere iletimi yapılır. Dağıtım trafo merkezlerinde gerilim seviyesi düşürülerek daha kısa mesafelerdeki son kullanıcılara elektriği güvenli ve kullanıma uygun gerilim seviyesinde dağıtan yerel trafolardan oluşan ağ yapısına aktarılır ve son kullanıcılara dağıtılır. Şebekelerin temel işletme mantığı her ne kadar benzer olsa da kullanılan uygulamalar ve sektör yapıları zaman içerisinde büyük değişimlere uğradı. Sektör; artık milyonlarca insanın elektrik enerjisini kullandığı ve çok büyük parasal karşılığın olduğu bir yapıya dönüştü. Bu yapı artık kontrol edilmesi gereken ama kontrol edilmesi de zorlaşan bir hale dönüştü. Günümüzde akıllı şebekeler diye adlandırılan kontrol edici ve düzenleyici yapılar halen gelişmeye devam etmektedir.

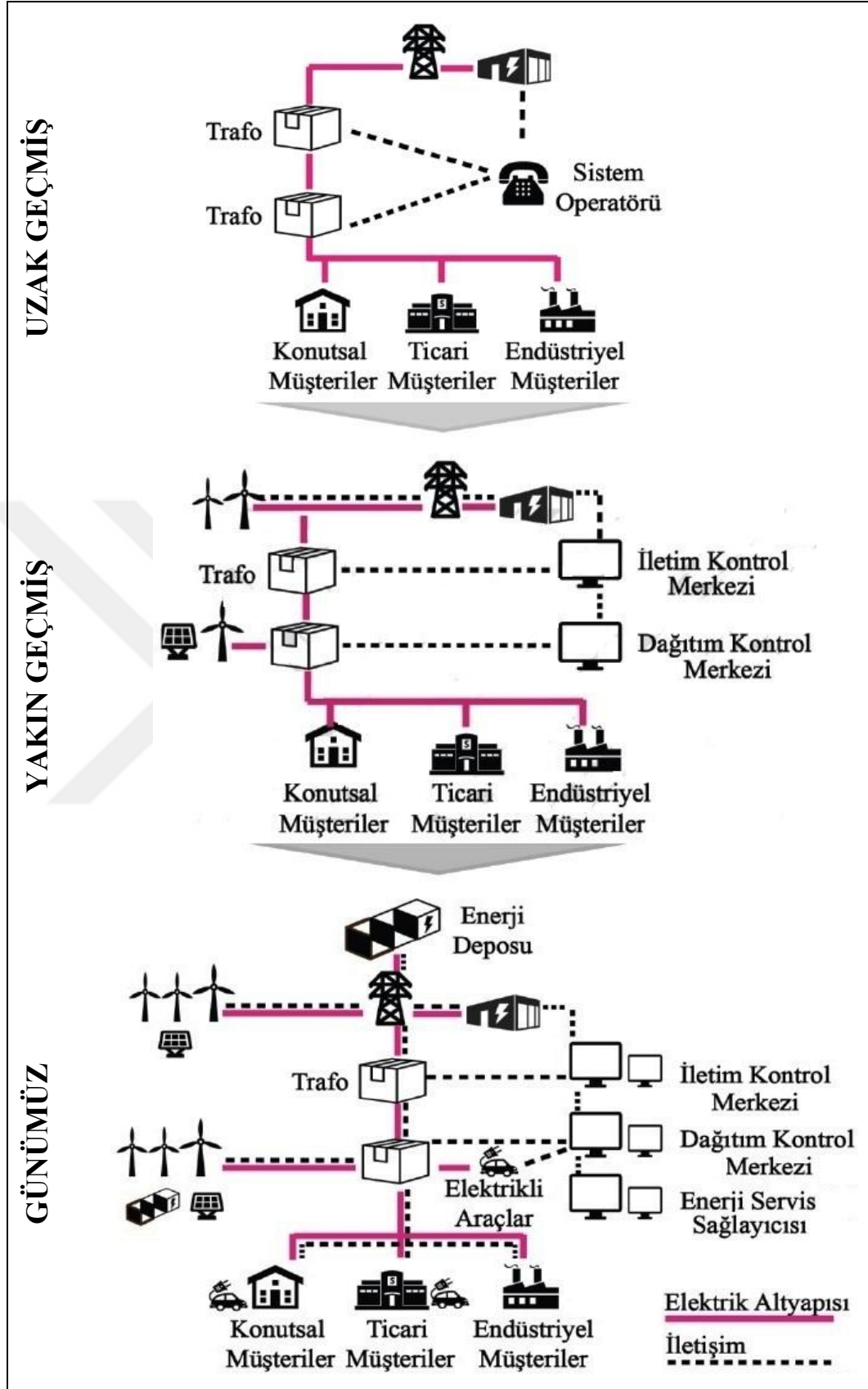
Akıllı Şebeke kavramının farklı ülkelere ve bölgelere göre ya da elektrik sektörü içerisindeki paydaşlarının beklenti ve yararlandığı faydalara göre birçok tanımı ve yorumu yapılabilir. Avrupa Teknoloji Platformuna göre akıllı şebekeler, kendisine bağlı tüm üreticilerin ve tüketicilerin eylemlerini akılcıca entegre edebilen verimli, sürdürülebilir, ekonomik ve güvenli elektrik arzı sağlayan bir elektrik ağıdır (Borlase, 2013). Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığına göre ise; akıllı şebeke her bir müşteriyi ve düğümü kontrol eden ve gözlemleyen, güç istasyonu ile kullanıcı arasında iki-yollu elektrik ve bilgi akışı sağlayan, tamamen otomatik bir güç dağıtım ağıdır (Anonymous, 2003). Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute - EPRI) ise akıllı şebekeleri, elektrik dağıtım sisteminin birbirine bağlı

şebekelerin çalışmasını izlemesi, koruması ve otomatik olarak optimize etmesi için modernizasyonu olarak tanımlar (Anonymous, 2009).

Akıllı Şebeke, yukarıda belirtilen tanımlarda da ifade edildiği üzere üretim, iletim ve dağıtım altyapılarıyla beraber tüm elektrik paydaşlarını kapsayan, mevcut şebeke yapısını modernize eden bir elektrik şebekesi kavramıdır. Burada modernize etme kavramını da tek seferlik bir çözüm olarak değil de uzun vadeli bir perspektiften bakarak elektrik enerjisi bileşenlerinin hem stratejik hem de operasyonel süreçlerini kendi kendine etkinleştirebilen bir değişiklik olarak düşünmek gerekir. Daha geniş anlamda, akıllı şebeke hazır bir ürün veya satın alınıp ertesi gün kullanmaya başlanacak bir sistem ya da cihaz değildir. Zaman içerisinde bir dizi teknolojiye bakış açısındaki değişikliklerdir. Elektrik enerji tesislerinin sermaye harcamalarında, işletme ve bakım maliyetlerinde, müşteri ve toplumsal faydalarda net olarak kârlılık ya da tasarruf sağlayan entegre bir teknolojiler setidir.

Sonuç olarak akıllı şebeke, elektrik ve iletişim altyapılarının, mevcut elektrik şebekesi içerisinde gelişmiş süreç otomasyonunu ve bilgi teknolojileri ile entegrasyonunu ifade etmektedir. Elektrik enerjisi talebini, güvenliğini ve benzeri karşılaşılan çevresel zorlukları ele alma şeklindeki önemli bir değişikliği temsil etmektedir (Borlase, 2013).

Geleneksel şebeke yapısı sınırlı boyutta gelişmeler yaşasa da uzun yıllar boyunca çok değişmeden kalmıştır. Şekil 3.1’de şebeke yapısının geçmişten günümüze gelişimi temsili olarak verilmiştir (Anonymous, 2011; Baloğlu, 2017). Şekilde de görüldüğü üzere yakın geçmişte şebeke yapısı içerisinde iletim kontrol merkezleri, yenilenebilir kaynaklar ve daha gelişmiş bir haberleşme altyapısı eklenmiştir. Günümüzde ise, daha fazla yenilenebilir enerji kaynağının kullanıldığı, enerji depolama ünitelerinin yer aldığı, elektrikli araba şarj istasyonlarının da bulunduğu ve haberleşme mekanizmasının bütün şebekeyi kapsayacak biçimde üst düzeyde ve çok yönlü olarak sağlandığı bir şebeke yapısı oluşmuştur (Baloğlu, 2017).



Şekil 3.1. Elektrik şebeke yapısının temsili olarak zaman içerisindeki gelişimi

Çizelge 3.1’de ise yedi farklı açıdan geleneksel şebeke yapısı ile akıllı şebeke yapısının karşılaştırılması tablo halinde verilmiştir (Elma, 2016).

Çizelge 3.1. Geleneksel şebekelerin akıllı şebekeler ile karşılaştırılması

GELENEKSEL ŞEBEKELER	AKILLI ŞEBEKELER
Tüketiciler tükettikleri enerji ve maliyetinin kontrol edilmesinde yeterince etkili değildir.	Detaylı fiyat bilgilendirmesi bulunur. Alım-satım fiyatları ve opsiyonların seçimi imkanı sunulur.
Üretimin büyük kısmı merkezidir, dağıtık üretim ve depolama kısıtlıdır.	Çeşitli dağıtık üretim kaynakları merkezi üretime ek olarak bulunur.
Sınırlı bir toptan satış pazarı mevcuttur.	Farklı üretim seçeneklerini teknolojik gelişmelerle dikkate alabilir ve yeni elektrik pazarlarının gelişimine açıktır.
Güç kalitesinden çok enerji kesintilerine odaklanır.	Güç kalitesi, fiyat seçeneklerinde ve kalite çeşitliliğinde bir önceliktir.
Akıllı sistem yönetim ve kontrol sistemleri sınırlıdır veya yoktur.	Akıllı yönetim uygulamalarıyla tüketim azaltılmakta ve verimlilik artmaktadır.
Arızada varlıkların korunmasına odaklanır.	Arıza öncesi için önlemler alınır, arızanın etkileri minimize edilir ve sistemin çabuk toparlanması sağlanır.
Doğal afetler ve zararlı etkilere karşı savunmasızdır.	Zararlı saldırı ve tehlikelerin etkilerini azaltır ve sistemin çabuk toparlanmasını sağlar.

3.1.2. Akıllı şebekelerin faydaları

Akıllı şebekeler, hem elektrik üreticileri hem de son tüketiciler için geniş kapsamlı faydalar sağlayan kurumsal çapta çözümler ortaya koymaktadır. Akıllı şebeke teknolojilerini benimseyen üreticiler; azalan sermaye ve işletme maliyetleri, iyileştirilmiş güç kalitesi, artan müşteri memnuniyeti ve olumlu bir çevresel etki gibi önemli faydalar elde edebilir. Akıllı şebekelerin kullanımı, yalnızca kolaylaştırıcı çözümlere değil aynı zamanda Çizelge 3.2’de de özetlendiği gibi iş ve işletme kaygılarını da kapsayan ve üreticiye, tüketiciye, ekonomiye ve çevreye anlamlı, ölçülebilir ve sürdürülebilir faydalar sağlayan entegre çözümlere dayanmalıdır (Borlase, 2013).

Çizelge 3.2. Akıllı şebekenin faydaları

İşletme Verimliliği		Enerji Verimliliği
-Dağıtık üretimi entegre eder		-Sistem ve hat kayıplarını azaltır
-Ağ tasarımını optimize eder		-Talep tarafı yönetimi tekliflerini etkinleştirir
-Uzaktan izleme ve tanılamayı etkinleştirir		-Yük ve VAr yönetimini iyileştirir
-Varlık ve kaynak kullanımını iyileştirir		-Devletin enerji verimliliği politikaları ile uyum sağlar
	AKILLI ŞEBEKE	
Müşteri Memnuniyeti		Çevresel Verimlilik
-Kesinti sıklığını ve süresini azaltır		-Talep tarafı yönetimi ve pik taşıma yoluyla Sera gazı emisyonunu azaltır
-Güç kalitesini yükseltir		-Yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre eder
-Enerji maliyetlerini azaltmak için tüketicileri yetkilendirir		-Karbon/Sera gazı mevzuatı ile uyum sağlar
-Üretici ile geliştirilmiş iletişim kurar		-Elektrikli araçların geniş çapta benimsenmesini sağlar

Güç akışını gerçek zamanlı olarak izlemek, dağıtım verimliliğini optimize etmek, fazla arzı ortadan kaldırmak, gerilim kontrolünü iyileştirmek, şebeke güvenilirliğini ve işletme verimliliğini artırmak için dağıtım ağında daha fazla zekâ kullanılmalıdır. Bu durum sınırlı kaynakları koruyup toplam elektrik maliyetini düşürürken genel enerji tüketimini ve ilgili emisyonları da azaltacaktır. Yük ve talep dağıtımını yöneten akıllı cihazlar ve ev otomasyon sistemleri de tüketicilerin enerji kullanımlarını yönetmelerine ve yaşam tarzlarından ödün vermeden paradan tasarruf etmelerine yardımcı olacaktır. Bahsedilen hususların hepsi aynı zamanda inşa edilmesi gereken enerji santrallerinin ve iletim hatlarının sayısının azaltılmasına yardımcı olur (Borlase, 2013).

Akıllı şebekenin tüketicilere ekonomik, sosyal, çevresel ve benzeri faydaları sağlaması gereklidir. Çünkü tüketiciler müşteridir ve sonuç olarak şebekeyi finanse etmektedir. Bir akıllı şebeke, elektrik şebeke yatırımlarını karşılayabilecek ölçüde önemli faydalar sağlar. Tüketiciler azaltılmış faturalardan ve çok daha fazla kontrolden yararlanabilir. Hatta elektriği en ucuz olduğu zamanlarda kullanırken talep ya da fiyatlar yüksek olduğunda elektrik ve diğer hizmetleri üreterek şebekeye geri satma yeteneğine

sahip olabilecektir. Aslında dolaylı da olsa en değerli faydanın, elektriğin çevreye ve halk sağlığına olan gizli maliyetlerinin ciddi bir şekilde azaltıldığı da düşünülebilir.

Akıllı şebeke, müşterilere gerçek zamanlı bilgi ve fiyatlandırma sunarak hem genel enerji tüketiminde hem de pik elektrik kullanımında önemli düşüşler sağlar. Çok sayıda araştırma, müşterilere gerçek zamanlı enerji kullanım bilgisi vermenin tüketimi %5 ila %15 oranında azalttığını bulmuştur. Ev alan ağlarına bağlı programlanabilir termostatlar ve akıllı cihazlar gibi fiyatlandırma teşvikleri ve otomatik ev enerji yönetimi araçları eklemek, bu tasarrufları ikiye katlayabilir (Faruqui ve Sergici, 2009).

Akıllı şebeke, dinamik fiyatlar da dâhil olmak üzere gerekli sinyalleri konutlara, küçük ve orta ölçekli işletmelere göndermeyi mümkün kılarak talep yanıt programlarındaki potansiyel katılımcıları büyük ölçüde genişletir. Dinamik fiyatlandırma, en yüksek güç talebini azaltmak için özellikle değerlidir. Bu zirve düşüşlerinin ekonomik faydaları, tüketimlerini değiştirmeyen tüketiciler tarafından bile geniş ölçüde paylaşılmaktadır. Pik talebinin sadece %5'ini kaydırmak, hem en pahalı pik enerji santrallerini çalıştırılmadığı gibi hem de yeni pik santrallerinin inşa edilmesine gerek olmadığı için fiyatları herkes için önemli ölçüde düşürmektedir (Penner, 2010).

Akıllı şebeke, yenilenebilir enerji kaynaklarının, kesintili, sevk edilemeyen, hava etkilerine bağlı, tahmin edilmesi zor olan ve benzeri olarak sayılabilecek güçlüklerine karşılık bunları idare edebilen ve yönetebilen bir sistemdir. Bu üretimi yönetmek, kesintili arzı esnek taleple dengelemek, çok yönlü güç düşüşlerini yönetmek ve güç kalitesini korumak gerçek zamanlı sistem bilgileri vasıtasıyla yapılabilir. Akıllı şebeke teknolojileri, elektrikli arabaların elektrik gücünün ucuz ve temiz olduğu anda şarj olan akıllı yükler olarak yönetilmesini sağlar. Bu yönetim, sürücü ihtiyaçları ile şebeke operatörü ihtiyaçları arasındaki uyum için kontrol sinyalleri ile sağlanır.

3.1.3. Akıllı şebeke teknolojileri

3.1.3.1. Akıllı şebekelerin özellikleri

Geleneksel şebekeler, akıllı şebeke düşünülerek değil de dönemsel şartlara göre uygun maliyetli ve hızlı bir şekilde elektrik enerjisine erişilebilmesi için tasarlanmıştır. Elbette akıllı şebekenin ihtiyaçları farklıdır ve mevcut şebekenin yapılandırılma süreci

devam etmektedir. Bu yapılandırma, mevcut şebekede iyileştirmeler ve genişletmeler, inceleme ve bakım faaliyetleri, dağıtık üretim ve depolama tesisleri, geniş çapta iki yönlü iletişim sisteminin geliştirilmesi ve uygulamaya başlanması dâhil olmak üzere birçok konuyu içermektedir. İletim hatları, dağıtım fiderleri, anahtarlar, kesiciler ve transformatörlerden oluşan elektrik dağıtım sistemi; üretim, iletim ve dağıtım altyapısının temel bileşenleri olmaya devam edecektir. Bu bileşenlerin doğal tasarımında da bazı değişiklikler yapılabilir ancak akıllı şebekeleri akıllı yapan kısım, iletim ve dağıtım sistemlerindeki izleme, kontrol ve korumadaki yeniliklerdir.

Üretim açısından bakıldığında akıllı şebekeler; geleneksel olarak yapıldığı gibi sadece tedarik sevkini değil, aynı zamanda talep kaynaklarının tamamlayıcı bir sevkini de içermektedir. Akıllı şebekenin sağladığı tüketici talep yönetimi ve bu yeni dağıtım modeli, elektrik sisteminin optimizasyonunu önemli ölçüde iyileştirebilir, yeni pazarlar ve yeni tüketici katılım fırsatları oluşturabilir. Akıllı şebekelerin, şebekedeki tüketici talebi ve alternatif enerji kaynaklarını sevk etme yeteneği de elektriğin toptan satış fiyatı üzerinde aşağı yönlü bir baskı oluşturabilecektir. İletim açısından bakıldığında ise, artan miktarlarda güç alışverişi ve ticaret, şebekeye daha fazla sorumluluklar yüklemektedir. Bu sorumluluklar ise, şebeke sıkışıklığını azaltmak, şebeke istikrarını ve güvenliğini sağlamak, iletim varlıklarının ve düşük maliyetli üretim kaynaklarının kullanımını optimize etmektir. Üretim, iletim ve tüketimi dengede tutmak için şebekelerin daha esnek hale gelmesi ve daha etkin bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Dağıtım sistemi açısından ise izleme ve kontrol gereksinimlerinin artışı ve entegre akıllı şebeke mimarisi, daha akıllı dağıtım saha cihazları ile kurumsal uygulamalar arasındaki veri alışverişinden faydalanmaktadır. Yaygın olarak dağıtılmış üretim ve tüketici talebine yanıt programlarının ortaya çıkışı, üreticiler üzerinde de önemli bir etki meydana getirmektedir. Akıllı şebekede üretici müşteriler, belirlenen kural ve çizelgelere göre şebekeye elektrik üretebilmekte veya şebekeden elektrik tüketebilmektedir. Bu durum, tüketicilerin artık saf tüketiciler değil, zaman zaman ileri geri değişen enerji satıcıları veya alıcıları olduğu anlamına gelmektedir (Borlase, 2013).

Yenilenebilir kaynakları ve mikro şebekeleri barındıracak şekilde şebeke altyapısının genişletilmesi; üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde tam dijital kontrol uygulamak için bilgi teknolojisinin yaygınlaşması; yeni uygulamaların geliştirilmesi şeklindeki hedeflerin sisteme entegre edilme çabası olarak akıllı şebekelerin ortaya çıktığı düşünülebilir. 2008 yılı Haziran ayında Amerika Birleşik Devletleri Enerji

Bakanlığının Ulusal Enerji Teknolojisi Laboratuvarı (NETL) tarafından, akıllı şebekenin işlevlerini tanımlayan yedi temel özelliği belirleyen bir paydaş toplantısı düzenlenmiştir. Paydaşlar, akıllı şebekenin aşağıdaki yedi temel özelliği etrafında birleşmiştir (Borlase, 2013):

- Tüketicilerin talep yanıt sistemine aktif katılımını sağlama
- Tüm üretim ve depolama seçeneklerini barındırma
- Yeni ürünleri, hizmetleri ve pazarları etkinleştirme
- Yirmi birinci yüzyıl ihtiyaçları için güç kalitesi sağlanması
- Varlıkları optimize etme ve verimli çalıştırma
- Güç kesintisi olaylarına karşı kendi kendini iyileştirme
- Fiziksel ve siber saldırılara karşı esnek çalışma

Akıllı şebekeleri tanımlayan bu yedi özelliğin bileşenleri olarak şebekeler; akıllılık, verimlilik, kalite odaklılık, uyumluluk, dayanıklılık, esneklik, teşvik edicilik ve çevrecilik gibi özelliklere sahip olmalıdır.

3.1.3.2. Akıllı şebekelerin kapsamı

Akıllı şebeke, sahip olunan varlıkları optimize eden yani sahip olunan altyapıdan daha fazla performans çıkarmaya ve eklenecek altyapıyı daha iyi planlamaya olanak tanıyan teknoloji çözümlerini kapsamaktadır. Sistem düzeyinde önemli bir iyileştirme elde etmek için paydaşlar ve yatırımcılar arasında olması gereken işbirliği akıllı şebekelerin gerçek zamanlı enerji bilgilerini doğrudan taraflara aktarabilmesi ile güçlenmektedir. Akıllı şebeke, üreticilere sermaye, işletme ve bakım gibi mali tasarruflar sağladığı gibi müşterilere de maliyet tasarrufu ve gelişmiş ölçüm altyapısı gibi hizmetleri temin etmektedir.

Farklı akıllı şebeke bileşenleri arasındaki birlikte çalışabilirlik çok önemlidir. Bileşenleri elektrik altyapı düzeyi, akıllı altyapı düzeyi ve akıllı şebeke çözüm düzeyi olmak üzere üç düzeyde tanımlayan bir çerçeve kullanılabilir. Çizelge 3.3'te bu çerçeve verilmiştir (Baloğlu, 2017).

Çizelge 3.3. Akıllı şebeke teknolojilerinin çerçevesi ve kapsamı

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

3.1.4. Akıllı enerji kaynakları

3.1.4.1. Yenilenebilir üretim

Çevresel faktörler, dünya üzerinde fosil yakıtların azalmaya başlaması ve artan enerji maliyetleri sonucunda günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Bilhassa enerjiyi temin etme açısından dışa bağımlı olan ülkeler yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak mümkün olduğunca elektrik üretimini buradan sağlamayı ve bağımlılığını azaltmayı hedeflemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en bilinen ve yaygın olanları güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisidir. Diğer bazı yenilenebilir enerji kaynakları da şu şekilde sıralanabilir:

- PV panel
- Güneş termal enerji
- Rüzgâr enerjisi
- Biyokütle ve Biyogaz
- Jeotermal enerji
- Dalga gücü ve Gel-git gücü
- Hidroenerji

- Yakıt pilleri

Yenilenebilir enerji santralleri tarafından elektrik üretimi ve üretilen elektriğin şebekeye entegre edilmesi yenilenebilir üretim santrallerinin kendine özgü özelliklerinden dolayı bazı teknik sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Elbette bu teknik sorunlar çok değerli ve anlamlı olan yenilenebilir enerjinin şebekeye entegrasyonuna engel olmamalıdır. Bu konu da zaten günümüzün popüler çalışma alanlarından birisidir ve insanoğlu yenilenebilir enerji kaynaklarından ve yenilenebilir üretimden en üst seviyede yararlanmaya çalışmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel olarak daha temiz enerji sağlaması, güç üretme sürecinde doğal kaynakları tüketmemesi, her yerde ve farklı büyüklüklerde kurulup kullanılabilir olması gibi özellikleri sayesinde yenilenebilir üretim daha değerli hale gelmektedir.

Elektrik endüstrisinin başlangıç yıllarında güç üretimi; büyük işletme tesislerine, kasabalara ve şehirlere kurulan bir dizi küçük üretim merkezlerinden oluşmaktaydı. Güvenilir elektrik arzına olan talep arttıkça ve endüstri geliştikçe daha büyük üretim merkezlerine ve birbirine bağlı güç sistemlerine olan ihtiyaç da arttı. Daha sonra güç sistemi verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik artan gereklilik; müşteri yüklerine daha yakın olan, daha küçük ölçekli, özellikle yenilenebilir nitelikte olan üretim tesislerinin inşa edilmesine sebep oldu. Dağıtılmış enerji kaynakları olarak adlandırılan bu üretim tesisleri, şebeke ölçeğindeki üretim kaynaklarından daha küçük üretim kapasitelerine sahip dağıtım düzeyindeki enerji kaynaklarıdır. Doğal gazla çalışan mikro türbinler, büyük piller, küçük ila kamu ölçeğindeki PV ve rüzgâr vb. yenilenebilir üretim, yakıt pilleri dağıtılmış enerji kaynaklarına örnek olarak gösterilebilir. Akıllı şebeke teknolojileri, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi dağıtılmış enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırmada ve dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini hafifletmede önemli bir rol oynamaktadır (Borlase, 2013).

3.1.4.2. Enerji depolama

Enerji depolama uygulamaları, elektrik enerjisi sektöründeki büyük hacimli enerjiler göz önüne alındığında, esas olarak teknolojik ve ekonomik sınırlamalar nedeniyle, güç sistemlerinde yakın zamana kadar kesintisiz güç kaynakları haricinde

yaygın olarak kullanılmamıştır. Bununla birlikte, depolanacak enerji miktarlarının yönetiminin daha kolay olduğu elektronik ve iletişim gibi alanlarda ise daha yaygın olarak uygulanmıştır.

Enerji depolama, akıllı şebekelerin daha verimli ve daha esnek çalışma yeteneğine sahip olmasını sağlarken, dağıtık enerji kaynaklarının ve elektrikli araçların güç dağıtım şebekesine entegre edilmesini de kolaylaştırır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında üretim miktarının değişken olması ve öngörülmekte zorluklar yaşanması, enerjinin ekonomik ve güvenli bir şekilde depolanabilmesi ile giderilebilecek bir problem olarak düşünülebilir. Elektrik enerjisinin depolanması, ihtiyaç halinde depolanan enerjinin güç sistemine gönderilerek sistemi rahatlatma ve üretim talebini azaltma gibi katkılar sağlar.

Uygulamada, bir güç sisteminde üretim ve yük arasında her zaman bir uyumsuzluk vardır. Bu uyumsuzluk, frekans değişimlerine neden olur. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının eklenmesiyle de frekansın değişkenliği daha da artar. Sistem operatörleri, frekansın mümkün olduğunca sabit olabilmesi için uygun üretim birimlerinin çıkışını değiştirerek üretim ve yükü dengelemeye çalışır. Buna frekans regülasyonu denir. Tüm sistemin istenen yük için güç sağlayabilmesine ek olarak, üretim birimleri her zaman üretim rezervi olarak bilinen fazladan üretim miktarına sahiptir. Bu rezerv, frekans düzenleme amaçları için yeterli gücü sağlamaya ve güç kesintilerini önlemek için sistemdeki en büyük üretici birimin açmasını desteklemeye yetecek kadar olmalıdır. Geçmişte, hızlı yanıt vermeleri nedeniyle frekans regülasyonu sağlamak için termik jeneratörler veya hidro tesisler kullanılmıştır. Ancak, günümüzde frekans regülasyonu sağlayan enerji depolama, üretim varlıklarının daha iyi optimize edilmesini sağlar. Enerji depolama sistemleri hemen devreye alınabilir ancak kullanım süresi sınırlıdır. Yani sahip olduğu enerji kapasitesi kadar kullanılabildiğinden, elektrik kesintilerini önlemek için ek üretim birimleri enerji depolama sistemlerinin rezervi bitmeden devreye alınmalıdır. Merkezi enerji depolama uygulamaları, genellikle iletim sistemi seviyesindeki gerilimlere bağlı büyük MW boyutundaki tesislerden oluşur. Bu uygulamalar tipik olarak kısa süreler boyunca yan hizmetler sağlamak ve yenilenebilir üretim entegrasyonu için kullanılır. Dağıtılmış enerji depolama uygulamaları ise dağıtım trafo merkezlerinde, fiderlerde veya müşteri tesislerinde, dağıtım sistemi seviyesindeki gerilimlere bağlı kW ve daha küçük MW boyutlu

tesislerden oluşur. Akıllı şebekelerde, elektrik şebekesine bağlı enerji depolama sistemlerinin en yaygın örneklerinden bazıları şunlardır (Borlase, 2013):

- Batarya enerji depolama (BES)
- Süper iletken manyetik enerji depolama (SMES)
- Flywheel enerji depolaması (FES)
- Basınçlı hava enerji depolaması (CAES)
- Ultra kapasitörler
- Pompalı hidrolik
- Termal enerji depolama

3.1.4.3. Elektrikli araçlar

Akıllı şebeke ve enerji depolama teknolojisindeki gelişmeler elektrikli araçların akıllı şebekeye dâhil olmasını sağlamıştır. Günümüzde enerji depolama teknolojisi ile birlikte şebekeye bağlı olmayan bir şekilde çalışan prizden şarjlı elektrikli araçlar (PEV), elektrik şebekesinden elektrik depolayabilen ve kullanabilen araçlar olarak tanımlanır. Elektrikli araçların hareket enerjisi kaynağı, pillerinde depoladıkları elektrik enerjisidir.

Hibrit elektrikli araçlar (HEV) ise, içten yanmalı yakıttan veya pillerde depolanan enerjiden hareket gücü sağlamak için geleneksel motorları ve elektrikli aktarma organlarını birleştirir. Geleneksel hibrit elektrikli araçlarda, tüm itici enerji içten yanmalı motor tarafından sağlanır ve pil çalışma sırasında sınırlı enerji desteği sağlar. Bu araçlar şebeke ile etkileşime girmez. Bunun aksine, prizden şarjlı hibrit elektrikli araçlar (PHEV) ise pillerini elektrik şebekesinden şarj etme özelliğine sahip olan PEV'lerdir. Buna göre PHEV'ler, sıvı yakıtın veya şebeke elektriğinin araç için nihai enerji kaynağı olmasını sağlar. Elektrikli araçların kullanılmasının sağladığı faydalar şu şekilde özetlenebilir (Bradley ve Frank, 2009):

- Azaltılmış petrol tüketimi
- Daha düşük sera gazı ve çevre kirleticisi emisyonlar
- Daha düşük yakıt maliyetleri

3.1.4.4. Mikro şebekeler

Bir mikro şebeke, şebekeye bağlı veya şebekenin olası arızası esnasında yerel yüklere güç sağlayabilecek şekilde çalışabilen, birbirine bağlı yüklerden ve dağıtılmış enerji kaynaklarından oluşan entegre bir enerji sistemidir. Mikro şebekelerin amacı; endüstriyel tesislerde, ticari binalarda, askeri veya üniversite yerleşkelerinde vb. daha iyi enerji güvenilirliğini ve verimliliğini sağlamaktır. Bir mikro şebeke, yerel üretimi entegre etmek veya iletim şebekesinin yetersiz hizmet verdiği alanlarda şebekeyi rahatlatmak isteyen üreticiler için iletim hatlarının inşasına veya güçlendirilmesine alternatif bir çözüm olabilmektedir. Mikro şebekenin kullanılmasında, ölçeği ve konumu önemlidir. Mikro şebekeler düşük gerilim veya orta gerilim seviyesinde inşa edilmektedir. Bir mikro şebekenin temel özellikleri şunlardır (Borlase, 2013):

- İç talebin önemli bir kısmına yeterli ve sürekli enerji sağlayabilmek.
- Kendi iç kontrol ve optimizasyon stratejisine sahip olmak.
- Minimum hizmet kesintisi ile şebekenin olası arızası esnasında ya da isteyerek yerel yüklere güç sağlayabilecek şekilde çalışabilmek ve yeniden şebekeye bağlanabilmek.
- Şebeke veya enerji piyasası için hizmet ya da optimizasyon sağlayabilmek ve esnek kontrollü yapıda olabilmek.
- Çeşitli gerilim seviyelerine (genellikle 1–20 kV) uygulanabilmek.
- Depolama kapasitesine sahip olmak.

Mikro şebekelerin; şebeke istikrarını ve güvenliğini artırması, elektriksel kayıpları azaltması, hem tüketiciler hem de dağıtım sistemi birimleri için harcamaları azaltması gibi bilhassa yenilenebilir enerji yerel olarak üretilip tüketildiğinde belirgin faydaları görülür. Mikro şebekelerin kullanılmasındaki yararlar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Mikro şebekeler fiyatlandırma mekanizmalarına dâhil olarak tüketicilerin ana şebekeden ya da yerel kaynaklardan en uygun fiyata elektrik enerjisine erişebilmesini sağlar.
- Dinamik fiyatlandırma ve talep tarafı yönetim sistemleri ile birlikte kullanılarak tepe yüklerini azaltır ya da değiştirir.

- Mikro şebekeler yenilenebilir enerji üretim sistemine sahip kullanıcıların aynı zamanda ürettiği elektriği elektrik şirketine geri satabilmesine olanak sağlar.
- Yerel üretim sayesinde elektriğin uzun mesafelere iletilme ihtiyacını ortadan kaldırarak enerji kayıplarını azaltır.
- Mevcut altyapının üzerinde talep olan ya da elektrik altyapısı hiç bulunmayan yerlerde, mikro şebeke iletim altyapısının geliştirilmesi ya da yeniden kurulması maliyetlerinden daha ucuza çalışabilen bir alternatif olur.
- Mikro şebekeler, yük yönetim sistemleri ile birlikte kullanılarak elektriğin gerilim regülasyonuna yardımcı olur. Genel şebeke istikrarını ve güvenilirliğini geliştirir.
- Mikro şebekeler, yerelde yenilenebilir enerji kaynakları ile kullanıldığında çevresel faydalar sağlar.

3.1.5. Akıllı trafo merkezleri

Elektrik şebekelerinde trafo merkezleri, gerilimin transformatörler kullanılarak yükseltildiği veya alçaltıldığı; elektrik üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin temel birimleridir. Bir trafo merkezi, iletim ve dağıtım sistemleri için bağlantı noktası ve şalt sahası olma, gerilim dönüşümünü gerçekleştirme, diğer trafo merkezleri ve kontrol merkezleri ile iletişim kurma ve izleme noktası olma, güç hatlarının korunması gibi genel fonksiyonlara sahiptir. Ayrıca trafo merkezleri ve fiderler; elektrik hizmet ağının verimli ve güvenli çalışması için gerekli olan ve güç sisteminin saha donanımını korumak, izlemek ve kontrol etmek için kullanılan, gerilim, akım, aktif güç, reaktif güç, devre kesici durumu ve anahtar konumu gibi kritik gerçek zamanlı verilerin de kaynak noktasıdır. Benzer şekilde saha cihazlarından gerçek zamanlı olmayan veriler de toplanarak SCADA sistemlerine aktarılır ve kayıt altına alınır. SCADA sistemlerindeki veriler, elektrik sisteminin işleyiş ve yönetimini daha verimli ve güvenilir hale getirmek için gereklidir.

Akıllı bir şebeke bünyesindeki trafo merkezleri, klasik koruma ve otomasyon fonksiyonlarının ötesinde, iletim ve dağıtım sistemlerinin güvenilirliğini, güvenliğini ve yanıt verebilirliğini geliştirmek için enerji yönetimi ve dağıtım yönetim sistemi ile işlev ve karar mekanizmaları açısından koordineli çalışır. Akıllı trafo merkezleri büyük ölçekli ve modern teknolojilerin elektrik şebekesine entegrasyonu noktasında; sürekli

enerji sağlayamayan yenilenebilir ve dağıtılmış enerji kaynaklarının sisteme yüksek katılımı, klasik yollarla kolayca çözilemeyen güç kalitesi problemi, üretim ve talebin dinamik fiyatlandırmaya bağlı olarak değişkenliği ve esnekliği gibi işletmesel zorluklara karşı çözümler üretilmesine katkıda bulunur.

Akıllı şebeke teknolojilerinin geniş çapta kullanılmasıyla birlikte; akıllı sayaçlar, gelişmiş izleme koruma ve yönetim otomasyonları, elektrikli araç şarj cihazları, yenilenebilir üretim kaynakları, enerji depolama, akıllı sensörler vb. cihaz ve sistemlerin gerçek zamanlı yönetimi çok büyük zorluklar ortaya çıkaracaktır. Tüm bu zorlukları etkili ve istikrarlı bir şekilde yönetmek için akıllı trafo merkezleri düzeltici eylemler içermektedir.

3.1.6. Akıllı şebekelerde iletim ve dağıtım sistemleri

İletim sistemleri, elektrik tesislerinde yüksek seviyede enerji taşıma kapasitesine sahip güç iletim sistemleridir. Elektrik şebekelerinde herhangi bir anda üretilen güç miktarıyla tüketilen güç miktarının eşit olması gerekliliği yani üretim tüketim dengesi durumu çok önemlidir ve bu dengenin odak noktasında iletim sistemleri bulunmaktadır.

İletim sistemindeki akım miktarı, iletim operatörü tarafından hesaplandıktan sonra daha fazla veya daha az yani sistemde aşırı bir yüklenme ya da tam tersi yetersiz bir kullanımda olabilir. Bu koşullara göre durumu optimize edebileceği ölçüde elektrik sisteminin tepkisini değiştirebilen bir iletim kontrolü ve optimum durumları hesaplayan ölçüm cihazları ve yazılımlar gerekmektedir. Belirli bir hat, düğüm ya da hattın bir bölgesinde aktif veya reaktif güç akışı üzerinde kontrol sağlayabilen FACTS (esnek AC iletim sistemleri) cihazları ve HVDC (yüksek gerilim DC) cihazları normal çalışma koşullarının yanı sıra tepki hızlarına bağlı olarak arızayı önleyebilmektedirler. Akıllı şebekelerde üretim, iletim ve tüketimi dengede tutabilmek için şebekeleri daha esnek hale getiren ve daha iyi kontrol edebilen HVDC ve FACTS teknolojilerine sahip bir güç elektroniği yapısı, ilgili şebekeye mümkün olan en iyi şekilde uyarlanabilen farklı çözümlerle geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Uzun mesafelerde güç iletimi için kayıpları azaltma konusunda HVDC en iyi sonucu vermektedir.

Dağıtım kuruluşları, sahip oldukları varlıkları daha verimli kullanmak ve işletme maliyetlerini azaltmak için dağıtım yönetim sistemleri (DMS) geliştirmiştir. Dağıtım

şebekesinde; dağıtık üretim kaynaklarının ve bireysel tüketicilerin gerçek zamanlı fiyatlandırmaya bağlı talep yanıt yönetimlerine verdikleri tüketim cevaplarının oluşturduğu belirsizlikler, klasik dağıtım yönetim sistemlerindeki bazı uygulamaları etkisiz bırakmaktadır. Akıllı şebekelerde bu sorun; talep yanıt yönetiminin ve tüketici davranışlarının etkisinin yük modelleme ve yük tahmin algoritmaları kullanılarak modellenmesiyle veya tahmin edilmesiyle yani dağıtım yönetim sistemi ve talep yanıt yönetim sisteminin birlikte hareket etmesiyle giderilmektedir.

3.1.7. Akıllı sayaçlar ve gelişmiş ölçüm altyapısı

Akıllı sayaçlar, elektrik sektörü tarafından akıllı şebekelerin temeli olarak kabul edilmektedir. Gelişmiş ölçüm altyapısı (AMI) olarak ifade edilen yapı ise adından da anlaşılacağı üzere bir iletişim altyapısı, akıllı şebekelerde ihtiyaç duyulan ölçümleri yaparak ilgili taraflar arasında veri alışverişi sağlayan bir akıllı sayaç, hem de yazılım uygulamalarını kapsayan bir teknolojidir. Tipik bir akıllı sayaç, elektrik tesisi ile iki yönlü iletişim kurabildiği gibi gerilim ve kesintiler gibi güç kalitesi bilgilerini kaydedebilme fonksiyonuna da sahiptir. Ayrıca verileri dakika düzeyinde kayıt altına alarak kullanılan yardımcı programlara iletir. Gerekli zaman gücü kesebilen bir anahtar olma özelliği de akıllı bir sayacın önemli işlevlerinden birisidir.

Gelişmiş ölçüm altyapısı teknolojisi ile tüketiciler; fiyat ve enerji kullanım bilgilerini daha sıklıkla alabildiklerinden enerji kullanım maliyetlerinin ve verimliliğin farkında olurlar. Böylece talep yönetimi programlarının da işlevi artar. Ayrıca daha doğru sayaç okuma ve faturalama ile müşteri şikâyetlerinde azalma meydana gelir. Diğer taraftan elektrik tesisine sürekli olarak gelen sayaç verileri sayesinde planlama ve bakım ile ilgili uzun vadeli kararların yanı sıra gerçek zamanlı işletmesel kararlar almak için kullanılabilecek müşteri bilgileri de sağlanmaktadır.

AMI teknolojisinin diğer bir faydası ise sayacın kurcalanması, hırsızlık tespiti vb. bilgilerin bildiriminin yapılmasının yanı sıra kesintilere ait tespit verilerinin sağlanmasıdır. Diğer yönetim sistemleriyle entegre bir şekilde çalışabilen bu teknoloji, maliyetlerin azaltılmasında da önemli katkılarda bulunmaktadır.

3.1.8. Tüketici talep yönetimi

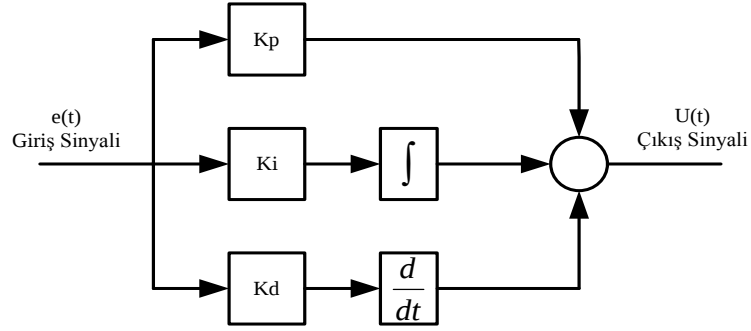
Tüketici talep yönetimi, elektrik hizmet sağlayıcıları tarafından müşterilerin toplam enerji kullanımını azaltması veya enerji kullanım modellerini değiştirmesi için yönlendirilmesidir. Enerji verimliliği, enerji tasarrufu, talep tarafı yönetimi (DSM), talep yanıtı (DR) ve talep yanıtı yönetimi (DRM); tüketici talep yönetimi kapsamında yaygın olarak kullanılan terimlerdir. Elektrik hizmet sağlayıcıları için elektrik arzı ve talebiyle ilgili karşılaştıkları en büyük zorluk, sistemdeki yükün sabit olmaması ve gün içinde çeşitli zamanlarda sistemdeki yükü karşılamak için üretimi verimli bir şekilde dağıtmaya çalışması gerekliliğidir. Üreticiler, tipik olarak kömürle çalışan santraller, gaz türbinleri, hidroelektrik enerji veya açık piyasadan satın alınan enerji gibi farklı maliyetlere sahip çeşitli üretim kaynaklarına sahiptir. Bundan dolayı şebekeye elektrik sağlamanın maliyeti, zaman içerisindeki yük değişimlerine bağlı olarak elektrik arzında meydana gelen değişikliklere göre farklılık gösterir. Zirve bir enerji talebine karşılık arzdaki büyük değişiklikler esnasında, gerekli enerji şebekesi ihtiyaçlarını karşılamak için daha yüksek maliyetlere sahip gaz türbinleri ve benzeri üretim kaynakları kullanılır. Talebin en düşük olduğu dönemlerde ise; nükleer, hidroelektrik ve kömürle çalışan elektrik santralleri gibi daha düşük maliyetli birimler, birincil üretim kaynaklarıdır. Tüketici sahasında kurulan dağıtık üretim, şebeke üzerindeki yük talebini azaltmak için başka bir etkili alternatiftir. Dağıtık üretim; güneş enerjisi panelleri, rüzgâr türbinleri, yakıt hücreleri ve mikro türbinler vb. gibi müşteri tesislerinde üretilen her türlü üretimi kapsamaktadır. Bir tüketici sahasındaki enerji depolama cihazları şebekeden şarj edilmek suretiyle güç alabilir ve kritik zamanlarda şebekeye geri güç sağlayabilir (Borlase, 2013).

Elektrik yüklerinin değişen özelliklerini karşılamak için enerji üretim türleri üç temel kategoride kullanılır. Bunlar, temel yük birimleri, ara birimler ve tepe yük birimleridir. Temel yük kapasitesi olarak adlandırılan birimler, sürekli olarak aynı seviyede çalışan üretimi temsil eder. Temel yük üretimi, tipik olarak nükleer, kömür veya çok verimli gazla çalışan tesisleri içerir. Bu kaynaklardan elde edilen üretim yılın her saati kullanılmaktadır. Ara birimler ise; ara yük üniteleri, duyarlı yük üniteleri ya da yükü takip eden üniteler olarak da tanımlanır. Bu üretim santralleri, genellikle yük değişikliklerine temel yük birimlerinden daha duyarlıdır ve tüketicilerin talep ettiği elektrik yükünü dakika veya saat ölçeğinde şebekeye sağlamaya yardımcı olur. Duyarlı

ve yük takipli üretim kapasitesi, genellikle kombine çevrimli doğal gaz santralleri ve hidroelektrik üretim tarafından sağlanır. Ara üretim birimlerine şebekede her zaman ihtiyaç duyulmaz. Ancak ihtiyaç duyulduğu zamanlarda da her zaman tam kapasitede olmazlar. Tepe yük birimleri ise, şebekede talebin en yüksek olduğu saatlerde sisteme yardımcı olur. Duyarlı ve yükü takip eden ünitelere benzer şekilde, tepe yük üniteleri de yılda daha az saat çalışır. Tüketici talep yönetimi mekanizmasına tüketici açısından bakılırsa; tüketiciler teşviklere, bilgilere ve fiyatlara cevap olarak taleplerini değiştirmeye istekli olabilmektedir. İleri teknolojinin sonucu olarak ev içinde basit bir ekranda izlenebilen, en yoğun saatleri veya en yüksek fiyatları gösteren cihazlar sayesinde tüketiciler taleplerini değiştirebilmektedir. Bu cihazlar elbette tüketicilerin konfor alanını da göz önünde bulundurarak üzerlerindeki etkiyi en aza indirecek şekilde şebeke ihtiyaçları veya farklı elektrik fiyatlandırmalarına göre güç tüketimini otomatik olarak ayarlayabilmektedir. Tüketici yükleri, kritik yükler ve kritik olmayan yükler olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Kritik yükler olarak adlandırılan yük tipi, herhangi bir anda şebekeden ayrıldığında ciddi sorunlar yaşanabilecek ve isteğe bağlı olarak kullanılmayan yüklerdir. Bunlara örnek olarak; kritik iletişim altyapıları, hastaneler, güvenlik sistemleri ve acil durum müdahale alanları vb. gösterilebilir. Kritik olmayan yükler ise, şebekeden bağlantısı kesilse bile önemli sonuçlar doğurmayacak veya isteğe bağlı olarak kullanılan yüklerdir. Konutlarda kullanılan yıkayıcılar, kurutucular, su ısıtıcıları, dekoratif aydınlatmalar ve belli ölçüde klimalar kritik olmayan yüklere örnek olarak verilebilir (Borlase, 2013).

3.2. PID/PI Kontrolör

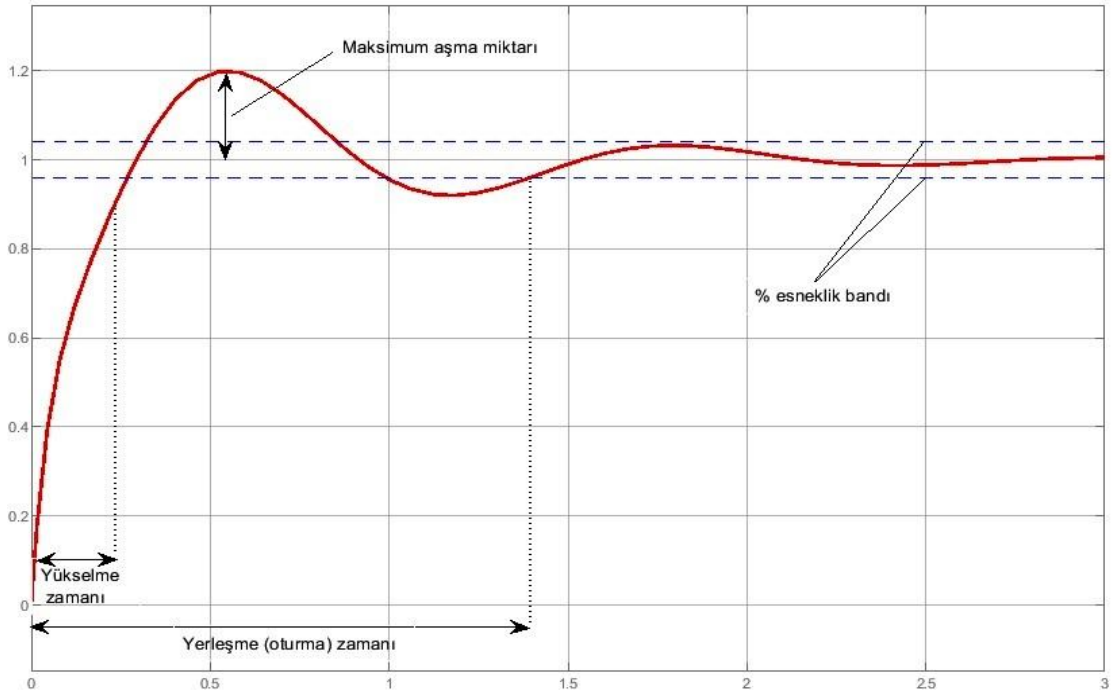
Bir sistemin istenilen şekilde çalışmasının sağlanmasında kontrol sistemleri ve kontrolörler kullanılır. Kontrolörler, sistemin girişlerine göre elde edilmek istenen çıkışın uygun yazılım ya da donanımla sağlandığı yapı olarak ifade edilebilir. Tek giriş ve çıkışa sahip kapalı çevrim bir sistemin kontrolünde PID/PI yapılı klasik kontrolörler sıklıkla tercih edilmektedir (Uyar, 2019). Oransal (P), bütünsel (I) ve türevsel (D) parametrelerin bir arada kullanıldığı kontrolörlere PID kontrolör denilirken sadece oransal (P) ve bütünsel (I) parametrelerin kullanılmasıyla da PI kontrolör yapısı elde edilir. Klasik bir PID kontrolörün yapısı Şekil 3.2’de, kontrolöre ait $U(t)$ çıkış sinyali ise Denklem 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Klasik bir PID kontrolörün yapısı

$$U(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int e(t) \cdot dt + Kd \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Kp ile ifade edilen kazanç oransal katsayı, Ki ile ifade edilen kazanç ise bütünsel katsayı denilmektedir. Benzer şekilde Kd ise türevsel katsayı olarak ifade edilir. En basit haliyle bir klasik PI kontrolör, kapalı çevrim bir sistemde girişine uygulanan $e(t)$ hata sinyalini uygun Kp ve Ki katsayı değerleri seçilerek sıfıra doğru yaklaştırır. Böylelikle zamana bağlı olarak hata sıfırlanır ve kontrol sağlanmış olur.



Şekil 3.3. Birim adım girdisine verilen sistem cevabı örneği ve tanımlamalar

Kontrol sistemlerinin geçici ve kalıcı durum tepkileri ile ilgili tanımlamalar genellikle birim adım girdisine verilen cevaba göre ifade edilir. Şekil 3.3'te birim adım girdisine verilen örnek bir cevaba göre tanımlamalar gösterilmiştir. Cevabın kalıcı durum değerinin maksimum seviyede aşıldığı miktara maksimum aşma miktarı denir. Kalıcı durum değerinin %10'undan %90'ına ulaşmasına kadar geçen süreye yükselme zamanı, kalıcı durum değerinin belirli bir esneklik yüzdesi aralığında sönümlenmesine kadar geçen süreye ise yerleşme (oturma) zamanı denilmektedir (Uyar, 2019).

Kalıcı durum hatası bir kontrol sisteminde girdiye karşılık sistemin cevabını belirleyen ölçütlerden birisidir. Kalıcı durum cevabı ile girdi arasındaki fark, kalıcı durum hatası olarak ifade edilmektedir.

3.3. Bulanık Mantık

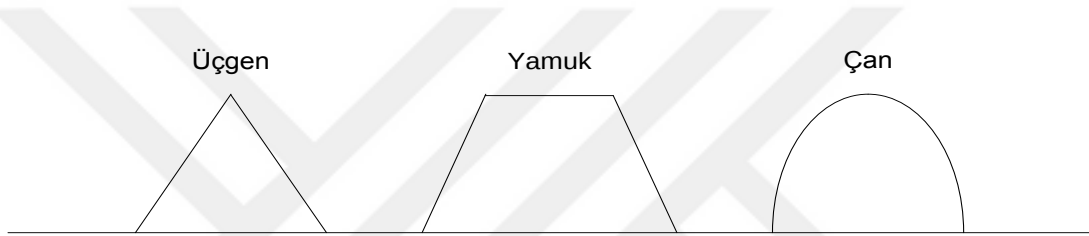
Günlük hayatta rastgele kullanılan birçok terim genellikle bulanık bir yapıya sahiptir. Bir şeyi tanımlarken, bir olayı açıklarken, komut verirken ve daha birçok durumda kullanılan sözel veya sayısal ifadeler bulanıklık içermektedir. Bu terimlere örnek olarak; yaşlı, genç, uzun, kısa, sıcak, soğuk, ılık, çok, az, biraz, fazla, çok az, çok fazla gibi daha pek çok sözel terim gösterilebilir. Genel olarak bir olayı anlatıp, bir durum karşısında karar verirken bu tür kesinlik ifade etmeyen terimler kullanılır. Bütün bunlar insan beyninin belirsiz ve kesinlik içermeyen durumlarda nasıl davrandığına ve olayları nasıl değerlendirip, tanımlayıp, komut verdiğine dair birer örnektir (Karyeyen, 2009).

Bulanık mantığın ve bu mantık kurallarını kullanan bulanık küme teorisinin Zadeh (1965) tarafından geliştirilip makalesinde yayınlanmasından sonra belirsizlik içeren sistemlerin incelenmesi yeni bir boyut kazanmıştır. Özellikle Zadeh'in (1965) ilk makalesinden sonra bulanık mantığın belirsizlik içeren sistemlere uygulanabilirliğini açıklayan sonraki makaleleri ile bulanık küme kavramı ilerleyen yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Kontrol sistemleri bulanık mantığın en fazla uygulandığı alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulanık mantık ve bulanık küme işlemleri kullanılarak makinelerin insanlar gibi kararlar vermesi sağlanabilmektedir.

Bulanık mantık konusunun temel elemanı olan bulanık kümeler, üyelik fonksiyonları ile karakterize edilirler. Aslında üyelik fonksiyonları da birer bulanık

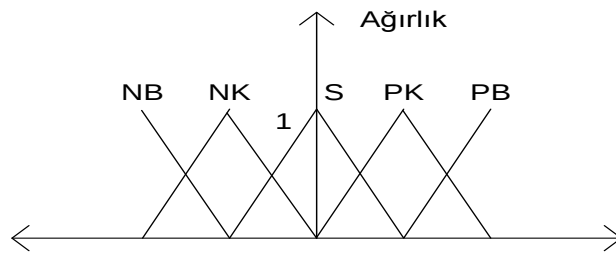
sayıdır. Bulanık bir küme, değişik üyelik yani ait olma derecelerine sahip elemanları olan bir küme türüdür. Böyle bir küme, elemanlarının her birine 0 ile 1 arasında üyelik değeri atayabilen bir üyelik fonksiyonu ile karakterize edilebilir. Kümeye dâhil olmayan elemanların üyelik değerleri 0, kümeye tam dâhil olan elemanların üyelik değerleri ise 1'dir. Kümeye dâhil olup olmadıkları belirsiz olan elemanlara ise belirsizlik durumuna göre 0 ile 1 arasında değerler atanmaktadır.

Üyelik fonksiyonları pratiksel olarak yapılan yorumlamaların yaklaşık olarak ifade edilebildiği matematiksel fonksiyonlardır. Üyelik fonksiyonları biçimsel olarak kontrol edilen sürecin özelliklerine göre değişik şekiller alabilir. En çok kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 3.4'te gösterildiği üzere üçgen, çan ve yamuktur.



Şekil 3.4. Çeşitli biçimde üyelik fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları sadece Şekil 3.4'teki biçimlerle sınırlı olmayıp çok çeşitli fonksiyonlar kullanılabilir. Kullanılan bu fonksiyonların şekli sistemin çalışmasını iyi veya kötü yönde etkileyebilmektedir. Şekil 3.5'te üyelik işlevlerine örnek olarak NB, NK, S, PK, PB olmak üzere 5 ayrı etiket tanımlanmıştır.



Şekil 3.5. Beş ayrı etiketli üyelik fonksiyonları örneği

Bulanık mantık kontrolü dört ana aşamadan oluşur:

- Giriş sinyalinin bulanıklaştırılması,
- Kural tabanı,

- Karar verme mantığı,
- Çıkış sinyalinin durulaştırılması.

Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması aşamasında giriş değerlerinin seçilen üyelik fonksiyonlarındaki karşılığı bize bulanık değerini verir. Bu aşamada gerçek sayılar olan giriş değişkenleri ölçülerek üzerlerinde bir ölçek değişikliği yapılmış olur. Yani bulanık kümelerle dönüştürülürler.

Girişler üzerinden muhakeme ve bir sonuca varma EĞER-O HALDE (IF-THEN) türünden kuralların kullanımı ile gerçekleştirilir. Çıkarım amaçları ile kullanılan temel bulanık mantık kuralları aşağıda verilmiştir.

a and b	$\min(a\text{'nın üyelik ağırlığı} ; b\text{'nin üyelik ağırlığı})$
a or b	$\max(a\text{'nın üyelik ağırlığı} ; b\text{'nin üyelik ağırlığı})$
not a	$(1-a)\text{'nın üyelik ağırlığı}$

İnsanlar sahip oldukları deneyim ve önsezileri ile karşılaştıkları durumlarla ilgili kişisel verilere sahip olurlar. Aslında bulanık mantık kuramı da makinelere ve sistemlere insanların sahip oldukları bu verileri işleyebilme ve insan gibi hareket etme yeteneği vermektedir.

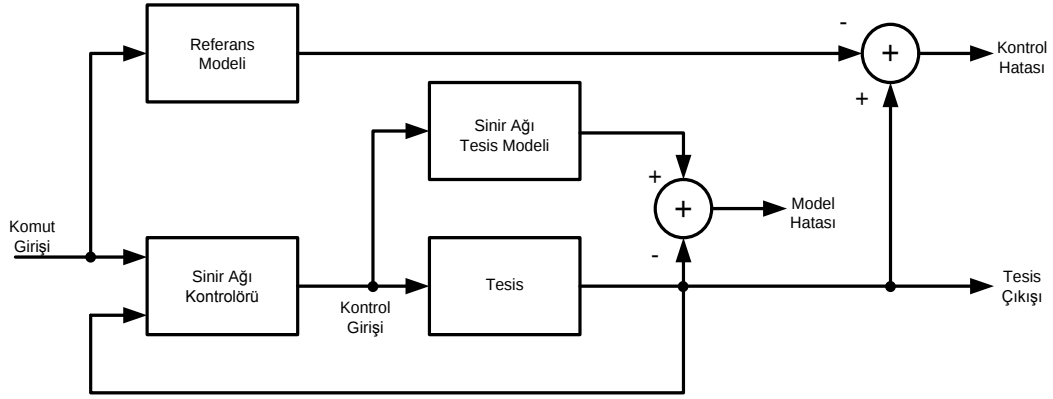
Bulanık mantık sisteminin çıkışının bir gerçek değer olması gerekir. Bu yüzden durulama aşaması olarak adlandırılan bulanık küme çıkışlarının yeniden ölçek değişikliği yapılarak gerçek sayılara dönüştürülmesi işlemi yapılır.

3.4. Sinir Ağı Modeli Referans Kontrolör (SAMRK)

Sinir ağı yapılı kontrolör uygulamaları optimizasyon gerektiren işlemlerde aktif olarak kullanılabilen yöntemlerdendir ve literatürde bir çok farklı problemin çözümü için kullanıldığı görülmektedir. Sinir ağı yapılı kontrolör uygulamalarının çok çeşitli türleri vardır ve sinir ağı modeli referans kontrolörü (SAMRK) bunlardan birisidir.

Sinir ağı modeli referans kontrolör (SAMRK) mimarisinde; Şekil 3.6'da da gösterildiği gibi bir tesis modeli ağı ve bir kontrolör ağı olmak üzere iki sinir ağı kullanılmaktadır. Sistemde öncelikle tesis modeli tanımlanır. Daha sonra da tesis modeli çıktısının referans modeli çıktısını takip etmesini sağlamak için kontrolör yapısı eğitilir. Yani bir SAMRK tasarlanırken; tesis davranışını taklit edecek şekilde tanımlanan sinir

ağı tesis modeli ve belirlenmiş bir referans modelini kullanarak sinir ağı kontrolörünün eğitimi yapılmaktadır (Anonymous, 2023).



Şekil 3.6. Sinir ağı modeli referans kontrolör (SAMRK) mimarisi

Matlab Simulink Deep Learning Toolbox yazılımı içerisinde uygulandıkları haliyle hem sinir ağı tesis modelinin ve hem de sinir ağı kontrolörünün iki katmanı vardır ve gizli katman aşamasındaki nöron sayıları ayarlanabilmektedir (Anonymous, 2023).

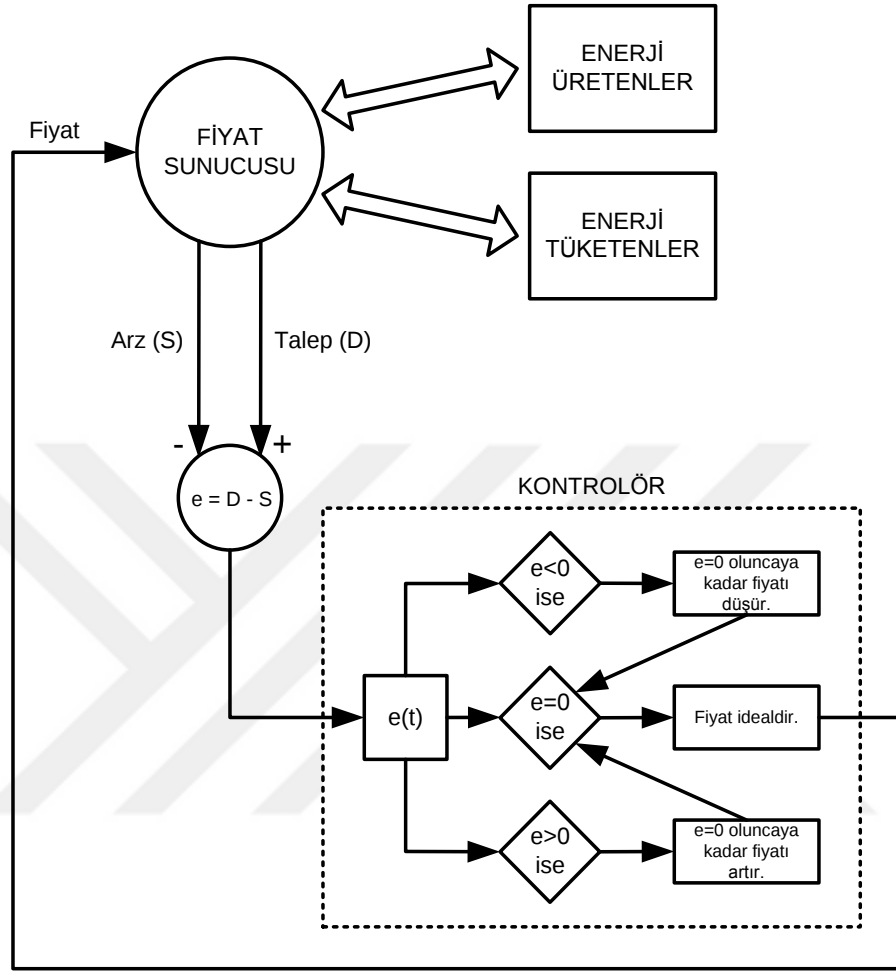
SAMRK tasarımı; maksimum ve minimum değerleri, örnekleme zaman aralıkları ve iterasyon sayıları belirlenen rastgele girdiler modele uygulanarak eğitim verileri oluşturulur. Verilerin bir kısmı eğitim için, bir kısmı da sistemi doğrulama ve test için kullanılır. Elbette tanımlama sürecinde elde edilen tesis tepkisiyle kullanılan rastgele referans girdilerinin ilişkili olması gerekir.

Bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde de anlatıldığı üzere modellemesi yapılan bir elektrik güç kontrol sisteminde gerçekleştirilen uygulamalarda, Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanılmıştır.

3.5. Kapalı Çevrim Elektrik Güç Kontrol Sistemi (KÇEGKS) Modellemesi

Akıllı şebeke uygulamalarının elektrik güç sistemlerindeki temel fonksiyonu; enerji üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemleri ile bu sistemleri kontrol eden kontrolör yapılarının koordinasyonunu ve iletişimini sağlamaktır. Bu fonksiyon güç sisteminin hem yönetilebilir hem de gözlemlenebilir olmasını sağlar. Burada temel

mantık veri haberleşmesinin tesis edilmesidir. Veri haberleşmesi de günümüzde akıllı sayaç ve benzeri uygulamalar sayesinde yapılabilmektedir.

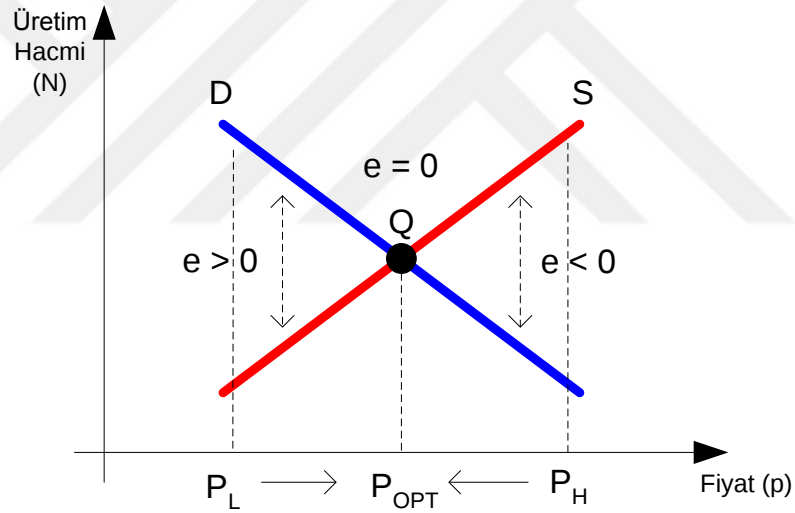


Şekil 3.7. İhtiyaç duyulan temsili akıllı şebeke teknoloji algoritması

Şekil 3.7’de ihtiyaç duyulan akıllı şebeke teknoloji algoritması temsili olarak verilmiştir. Verilen yapıya göre enerji üreten ve enerji tüketen birimler fiyat sunucusu ile iletişim kurarlar. Üretici ve tüketicilerin akıllı sayaçlar vasıtasıyla arz ve talep bilgileri sunucu tarafından toplanır ve sistemin anlık enerji denge hatası $e(t)$ olarak adlandırılan talep arz farkı hesaplanır. Kontrolör ise bu hatayı sıfır değerine götürecek dinamik enerji fiyatını belirleme görevini yapar. Dinamik fiyat bilgisi tekrar sunucuya oradan da üretici ve tüketicilere iletilir. Bu döngü sayesinde arz ve talepler yeniden güncellenir ve arz talep dengesi dinamik fiyatlandırma ile sağlanmış olur.

Temel olarak ekonomide bir arz-talep-fiyat mantığı vardır. Bu mantık, serbest bir elektrik marketi için Şekil 3.8’deki grafik gibi düşünülebilir (Alagöz ve diğ., 2013).

N değeri literatürde 10-100 GW arasında değişmektedir. Elektrik güç şebekesindeki düğüm noktaları için ya da dağıtık bir enerji sistemi marketi için grafiğe göre belli bir üretim hacmine sahip yapıda; talebin fiyat artışıyla birlikte azalacağı, üretimin (arz) ise fiyat artışıyla birlikte artacağı bilinmektedir. Şekil 3.8'deki grafikte, enerji talebi “D”, enerji arzı “S”, düşük fiyat “ P_L ”, yüksek fiyat ise “ P_H ” ile gösterilmiştir. Fiyatın düşük ya da yüksek olduğu anlardaki enerji talebi ile enerji arzı arasındaki fark ise ($e = D - S$) daha önce enerji denge hatası $e(t)$ olarak ifade edilmişti. Buna göre arz ve talep eğrilerinin ortak noktada bulunduğu yani eşitlendiği fiyat noktası da (P_{OPT}) aynı zamanda enerji denge hatasının $e(t)$ sıfır olduğu ideal fiyat noktasıdır. İdeal fiyat noktası grafikte “Q” ile gösterilmiştir. Bir başka deyişle Q noktasında elektrik piyasasındaki optimum fiyat sağlanmıştır ve optimum fiyat esnasında “ $D(p) = S(p)$ ” eşitliği sağlanarak “ $e(t)=0$ ” olur. Yani sistemde enerji dengesi sağlanmıştır.



Şekil 3.8. Enerji arz-talep eğrisi ve optimal fiyat noktası

Enerji denge hatası (e) kavramı ile ilgili şu yorumlar yapılabilir:

- $e > 0$ durumunda sistemde talep arza göre fazladır. Fiyatı artırmak suretiyle üretimin artırılması ve talebin azaltılması gerekir.
- $e = 0$ durumunda sistemde talep ve arz dengededir. Fiyat, ideal fiyat noktasındadır. İstenilen durumdur.
- $e < 0$ durumunda sistemde arz talebe göre fazladır. Fiyatı düşürmek suretiyle üretimin azaltılması ve talebin artırılması gereklidir.

Asimptotik kararlı ve sürekli hal hatası sıfır olan bir kapalı çevrim kontrol yapısı, hatayı sıfıra götürür ($\lim_{t \rightarrow \infty} e \rightarrow 0$) ve bu durum prensip olarak otomatik kontrol sistemi yardımı ile enerji dengelenmesinin sağlanabileceğine işaret eder (Alagöz ve Kaygusuz, 2014). a ve c durumlarında kapalı çevrim kontrol hata işaretinin zamanla sıfıra yerleşmesi sistemi de enerji arz-talep denge noktasına yani market yönetimi açısından optimal fiyat noktasına (Q) ulaştırır (Alagöz, 2015). Bu yapı için *kapalı çevrim elektrik güç kontrol sistemi (KÇEGKS) modellemesi* gereklidir.

Enerji üreten bir kaynak için; enerji fiyatı ile enerji üretim miktarı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu varsayılır. Bu ilişki Denklem 3.2 ile modellenenir.

$$S_d(p) = \sum_{i=0}^d a_i p^i \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'ye göre; “d” polinom derecesini, “p” enerji fiyatını, “a” polinom katsayılarını ve $S_d(p)$ fonksiyonu ise p birim enerji fiyatı için üretim kapasitesini temsil etmektedir. Bu denkleme göre enerji fiyatının artmasıyla birlikte enerji arzının da artan kârlılık sebebiyle artacağı ifade edilmektedir (Alagöz, 2015). Enerji üretim kapasitesinin zamanla değişimini belirten dinamik sistem modellemesi ise “ τ ” zaman sabitine sahip bir birinci dereceden transfer fonksiyonudur. “S(s)” transfer fonksiyonu kaynağın fiyata karşılık enerji cevabını karakterize eder (Alagöz ve Kaygusuz, 2014). Denklem 3.3'te bu transfer fonksiyonu verilmiştir.

$$S(s) = S_d(p) \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'e göre; bir “p” enerji fiyatına karşılık gelen enerji üretimine yani “ $S_d(p)$ ” kapasitesine yaklaşık “ 5τ ” zaman sonra ulaşılacağı kabul edilir. Denklem 3.4'te ise sistem üretim modellemesi ile ilgili sınırlamalar belirtilmiştir (Alagöz ve Kaygusuz, 2016).

$$G(s) = \begin{cases} 0 & p < p_0 \\ S(s) & p \geq p_0 \text{ ve } S(s) \leq C_{maks} \\ C_{maks} & S(s) > C_{maks} \end{cases} \quad (3.4)$$

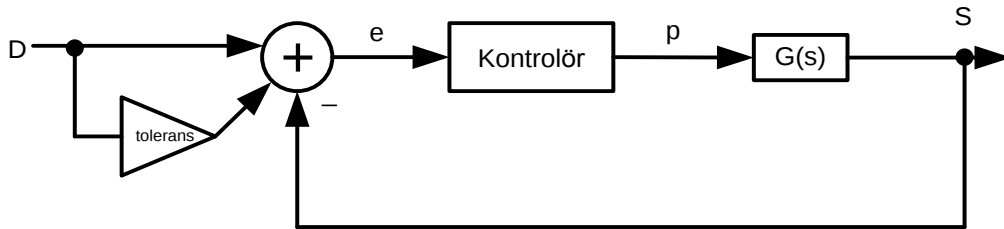
Denklem 3.4’te verilen “ C_{maks} ” ifadesi üretim sisteminin maksimum kurulu gücünü, “ P_0 ” ifadesi ise taban fiyatını ya da ortalama enerji üretim maliyetini ifade etmektedir. Denklem 3.4’e göre; sistem üretim modellemesinin iki sınırı vardır. Bunlar; Enerji üretiminin maksimum kurulu güç ile sınırlı olması ve taban maliyetin altına düşen fiyatlarda üretim yapılmaması olarak öngörülmüştür. Denklem 3.5’te ise modellemenin farklı üretim kaynaklarının olduğu bir dağıtık sistem için kullanılması belirtilmiştir (Alagöz ve Kaygusuz, 2016). Burada “ m ” ifadesi kaynak tipi adedini ifade etmektedir.

$$S_{Toplam}(S) = \sum_{j=1}^m G_j(s) \quad (3.5)$$

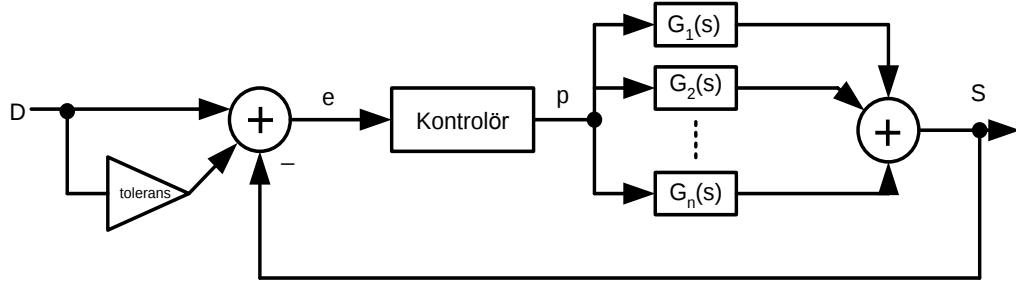
Denklem 3.6’da ise “ T ” parametresine göre üretim kaynağının “ τ ” zaman sabitinin hesaplanması gösterilmiştir. “ T ” parametresi, ilgili üretim kaynağının sıfır üretimden maksimum üretime (C_{maks}) ulaşması için gerekli ortalama zamanı belirtmektedir (Alagöz ve diğ., 2013).

$$\tau_j = (1 - e^{-1}).T_j \quad (3.6)$$

Verilen denklemler çerçevesinde bu çalışmadaki farklı talep senaryolarında kullanılan KÇEGKS modellemesine ait blok diyagramlar Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. KÇEGKS blok diyagramı (tek üretim kaynaklı sistem)



Şekil 3.10. KÇEGKS blok diyagramı (farklı üretim kaynaklarının olduğu dağıtık bir sistem)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde Şekil 3.9’da ve Şekil 3.10’da verilen KÇEGKS blok diyagramları kullanılarak MATLAB/Simulink programı ile simülasyon uygulamaları yapılmıştır. Senaryo 1 olarak ifade edilen uygulama tek üretim kaynaklı bir sistem için; Senaryo 2, Senaryo 3, Senaryo 4, Senaryo 5, Senaryo 6 ve Senaryo 7 olarak ifade edilen uygulamalar ise farklı tipte üretim kaynaklarının olduğu dağıtık bir sistem için gerçekleştirilen uygulamalardır. Uygulamalarda KÇEGKS ayrı ayrı kullanılan farklı kontrolör yapıları ile kontrol edilmektedir. KÇEGKS’de anlık e hatası, bu çalışma için %2,5 olarak belirlenen tolerans üretim miktarı ile birlikte hesaplanarak kontrolörler vasıtasıyla optimize edilmektedir. Optimizasyon ile birlikte elde edilen p değerine göre üretim kaynakları, kapasiteleri dâhilinde talebe karşılık arzı (üretim) ayarlayarak sistemin yük dengesini sağlamaktadır. Senaryo 1 ve Senaryo 2 uygulamalarında kontrolör olarak Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve Sinir Ağı Modeli Referans Kontrolör (SAMRK) ayrı ayrı kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır. Senaryo 3, Senaryo 4, Senaryo 5, Senaryo 6 ve Senaryo 7 uygulamalarında ise sadece Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK’nın performans karşılaştırması yapılmıştır.

4.1. Tek Üretim Kaynaklı Sistem İçin Uygulama

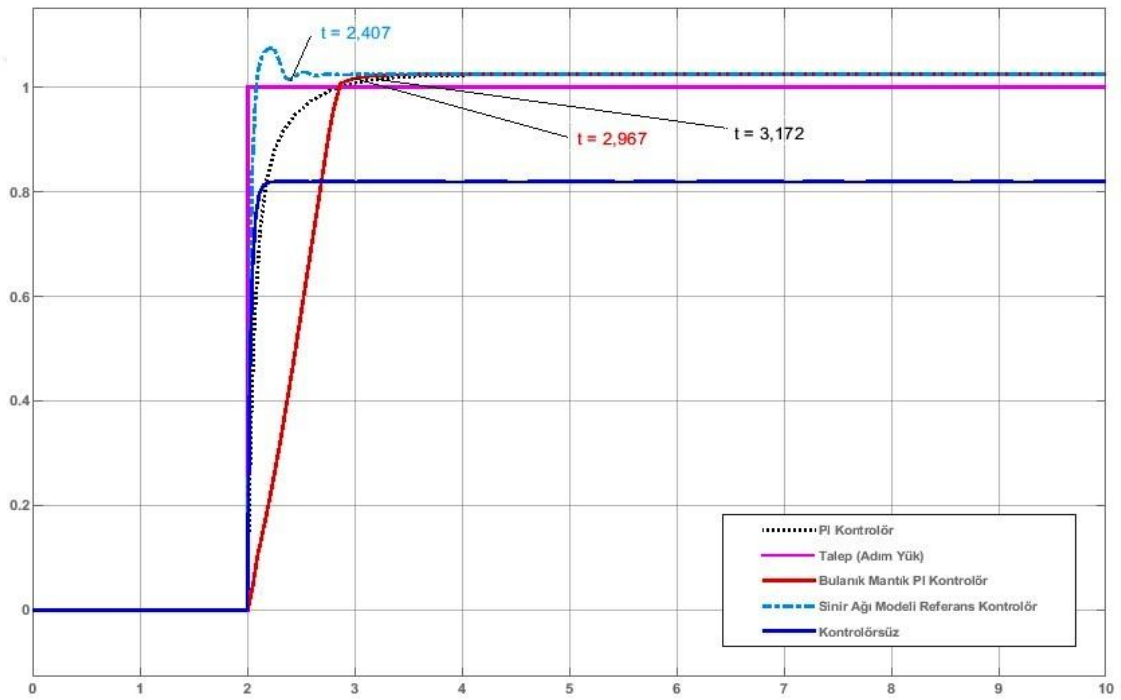
4.1.1. Senaryo 1 uygulaması

Bu senaryoda maksimum kurulu gücü $C_{maks} = 10$ MW ve $T = 15$ dk olan bir doğal gaz santralinin 10 saatlik durumu değerlendirilmiştir. Senaryoya göre; Şekil 4.1’de gösterildiği gibi sistemde talep sıfır iken 2. saat itibarıyla 1 MW’lık sabit bir talep (adım yük) ortaya çıkmıştır. 2. saat itibarıyla talebe karşılık sistemin üretim değişimi incelenmiştir. Tolerans üretim değeri 0,025 MW (%2,5) olarak alınmıştır. Çizelge 4.1’de senaryoya ait sistem parametreleri verilmiştir (Karyeyen ve Çetinkaya, 2023).

Çizelge 4.1. Senaryo 1 için sistem parametreleri

Üretim kaynağı tipi	C_{maks} (MW)	T (dk)	τ (saat)	Üretim Modeli $G(s)$
Doğal Gaz	10	15	0,158	$(0,018p^2 + 4p) / (0,158s + 1)$

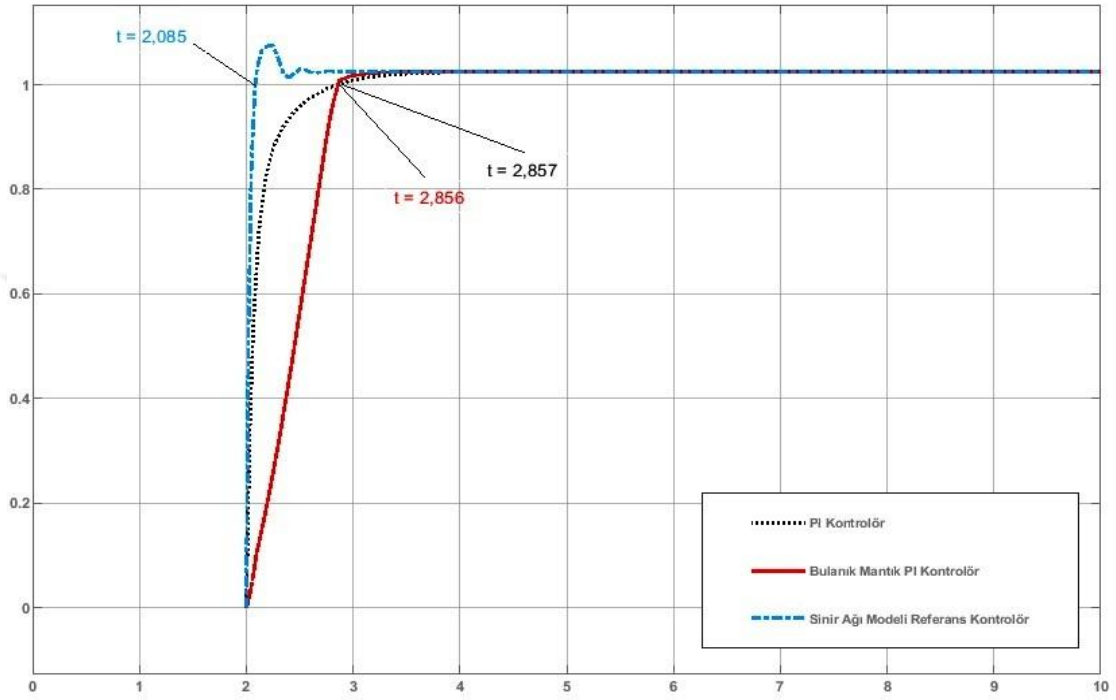
Senaryoda kontrolör yapısı olarak klasik PI kontrolör ($K_p = 0,5$ ve $K_i = 1,8$) kullanıldığında (Alagöz ve Kaygusuz, 2016) elde edilen sonuçlar, Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında elde edilen sonuçlar ve SAMRK kullanıldığında elde edilen sonuçlar Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te aynı grafikler üzerinde verilmiştir. Böylece aynı senaryoda kullanılan 3 farklı kontrolör yapısının performansları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. 2. saat itibarıyla ortaya çıkan talep (adım yük) ve talebe karşılık klasik PI kontrolör, bulanık mantık PI kontrolör, SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları ile kontrolör kullanılmadığı durumda elde edilen üretim cevabı

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere 2. saat itibarıyla ortaya çıkan talep ve %2,5'lük tolerans üretim ile birlikte, üretim miktarı belli bir süre sonra 1,025 seviyesine ulaşmıştır. Yeniden sabit üretim seviyesine ulaşma süreleri ise buradaki sistem performanslarını göstermektedir. Klasik PI kontrolör kullanıldığında sistemin $\pm\%1$ 'lik esneklik ile oturma zamanı $t = 3,172$ iken, Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında aynı sistemin $\pm\%1$ 'lik esneklik ile oturma zamanı $t = 2,967$, SAMRK kullanıldığında ise $t = 2,407$ olmuştur. Bu performans kriterinde SAMRK'nın daha başarılı olduğu net

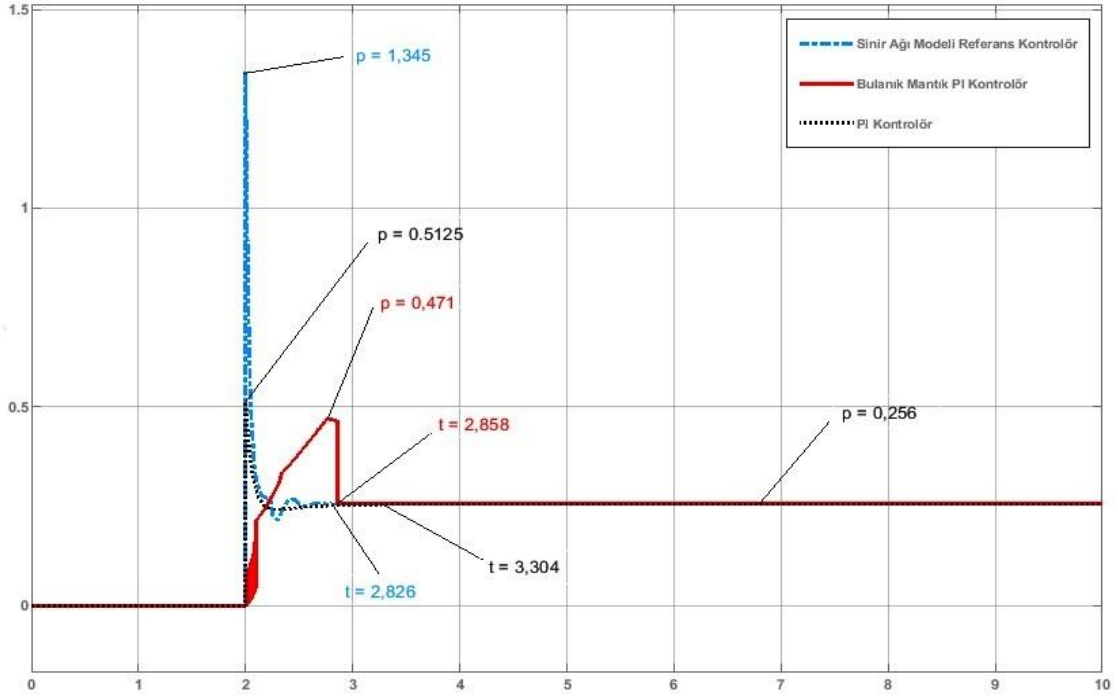
olarak gözlemlenmektedir. Ayrıca senaryoda kontrolör kullanılmadığı durumda elde edilen üretim cevabı da Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Kontrolör kullanılmadığı durumda e hatasının sıfırlanmamasına ve fiyat değerinin olması gereken seviyelere çıkmamasına bağlı olarak üretimin de yeterince artırılmadığı görülmektedir. Böylece kontrolörlerin sistemdeki görevi daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2. Klasik PI kontrolör kullanıldığında, bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz(üretim)/talep oranları

Sistemin arz/talep oranı şu açıdan önemlidir. Bu oranın 1’den küçük olduğu anlarda talebe göre daha az üretim yapıldığı ve dolayısıyla elektrik güç sisteminin kesintiye uğradığı anlaşılmaktadır. Zaten senaryoda %2,5’luk tolerans üretim bu yüzden uygulanmaktadır. Sistem dengeye oturuncaya kadar ortaya çıkan salınımlarda bu tolerans değeri arz/talep oranını 1 seviyesinin üzerinde tutmaktadır. Ancak bu tolerans değerinin gereğinden daha büyük olması da doğru bir yaklaşım değildir. Çünkü gereğinden büyük tolerans gereğinden fazla üretim anlamına gelecek ve bu da sistemin ekonomikliğini olumsuz etkileyecektir. Senaryo gereği uygulanan ani talep sonucunda, 2. saat sonrası kısa süreli olarak bu oran 1’in altında kalmaktadır. Buradaki performans ölçütü ise talebin oluştuğu an ile arz/talep oranının 1 seviyesini geçtiği an arasında geçen sürenin kısa olmasıdır. Şekil 4.2’de de görüldüğü üzere Klasik PI kontrolör kullanıldığında $t = 2$ ile $t = 2,857$ süreleri arasında gerçekleşen bu durum, Bulanık

Mantık PI kontrolör kullanıldığında $t = 2$ ile $t = 2,856$ süreleri arasında, SAMRK kullanıldığında ise $t = 2$ ile $t = 2,085$ süreleri arasında gerçekleşmektedir. Bu performans ölçütünde de SAMRK'nın, hem Bulanık Mantık PI kontrolöre hem de klasik PI kontrolöre göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.3. Klasik PI kontrolör kullanıldığında, bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin fiyat cevapları

Klasik PI kontrolör kullanıldığında, Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında meydana gelen fiyat (p) cevapları Şekil 4.3'te birlikte görülmektedir. 2. saat itibariyle talebin ani artışına bağlı olarak e hatası artmakta ve e hatasını düşürmek için yani talebi karşılayacak arzı bir an önce üretmek için sistem fiyatı artırmaktadır. Talebe karşılık arz istenilen seviyeye geldiğinde yani e hatası yeniden optimize edildiğinde ise fiyat değişkeni de belirli bir seviyede kalmaktadır. Anlık aşırı fiyat yükselmeleri her ne kadar maliyeti artırsa da aslında uygun fiyata bir an önce ulaşılmasını sağlamaktadır. Uygun ve stabil fiyat değeri de uzun vadede kârlılık anlamı taşımaktadır. Elbette en ideal olanı anlık fiyat yükselmelerinin de makul olmasıdır. Ancak verilen senaryoda, sıfır üretimden ani bir talep karşısında çok hızlı üretime geçilmesi sebebiyle fiyat tepe noktaları da kaçınılmazdır. Bu bakış açısıyla bakıldığında fiyat (p) cevapları ile alakalı 2 ölçütten bahsedilebilir: Bunlardan birincisi

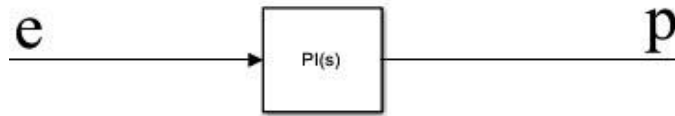
anlık aşırı fiyat yükselme tepe noktasının düşük olmasıdır. İkincisi ise sistemin stabil fiyat değerine erişim zamanının kısa olmasıdır.

Stabil fiyat değerine erişim zamanı açısından Şekil 4.3 incelendiğinde; Klasik PI kontrolör kullanıldığında $t = 3,304$ anında, Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında $t = 2,858$ anında, SAMRK kullanıldığında ise $t = 2,826$ anında bu değere ulaşıldığı görülmektedir. Bu performans ölçütüne göre yine SAMRK daha başarılıdır.

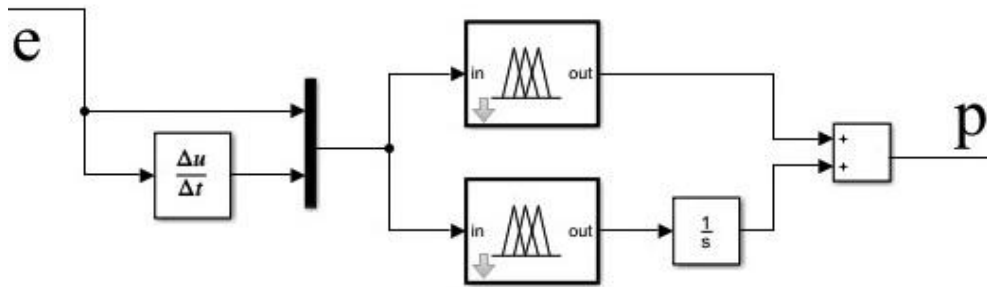
Anlık aşırı fiyat yükselmelerine bağlı tepe noktaları da Şekil 4.3'te işaretlendiği üzere; Klasik PI kontrolör için $p = 0,5125$ iken, Bulanık Mantık PI kontrolör için $p = 0,471$, SAMRK için ise $p = 1,345$ 'tir. Anlık aşırı fiyat yükselme tepe noktasının düşüklüğü ölçütüne göre Bulanık Mantık PI kontrolör diğer kontrolör yapılarına göre daha iyi performans göstermektedir.

4.1.2. Senaryo 1 uygulamasında kullanılan kontrolörlerin yapısı

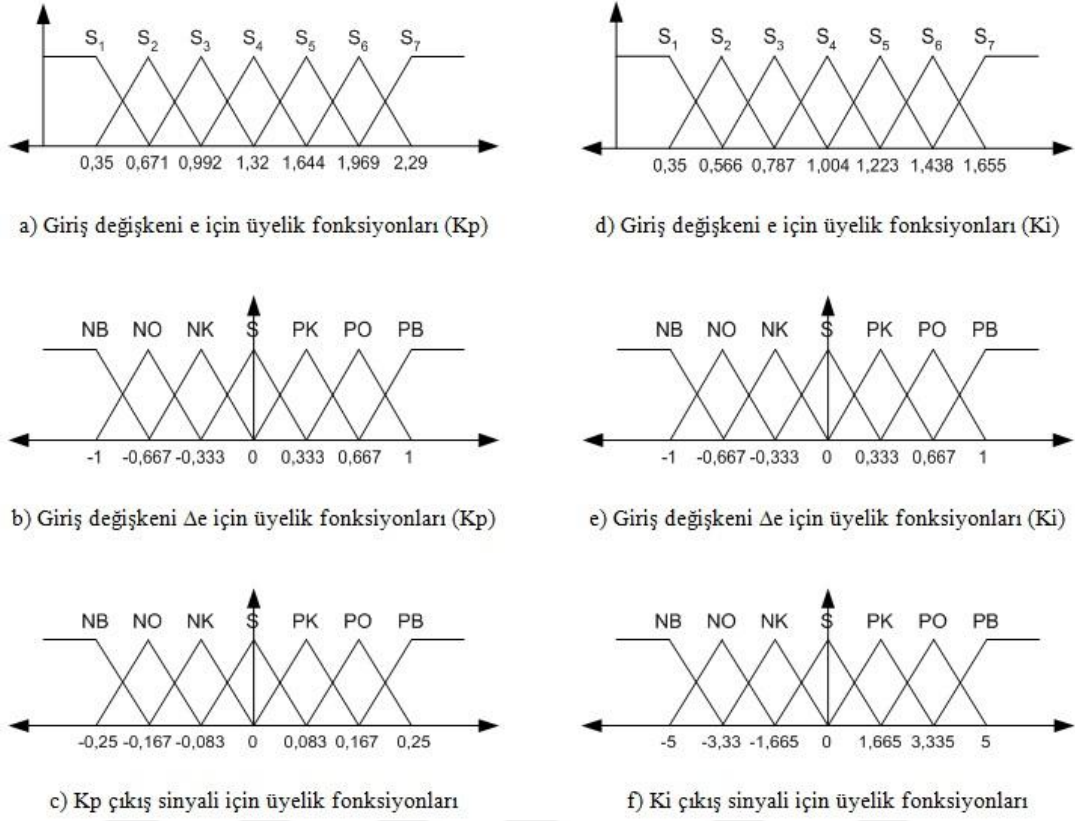
Senaryo 1 uygulamasında $K_p = 0,5$ ve $K_i = 1,8$ parametreleri ile kullanılan Klasik PI kontrolörün yapısı Şekil 4.4'te verilmiştir. Kullanılan Bulanık Mantık PI kontrolörün yapısı ve parametreleri ise Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.4. Klasik PI kontrolör modeli



Şekil 4.5. Bulanık mantık PI kontrolör modeli

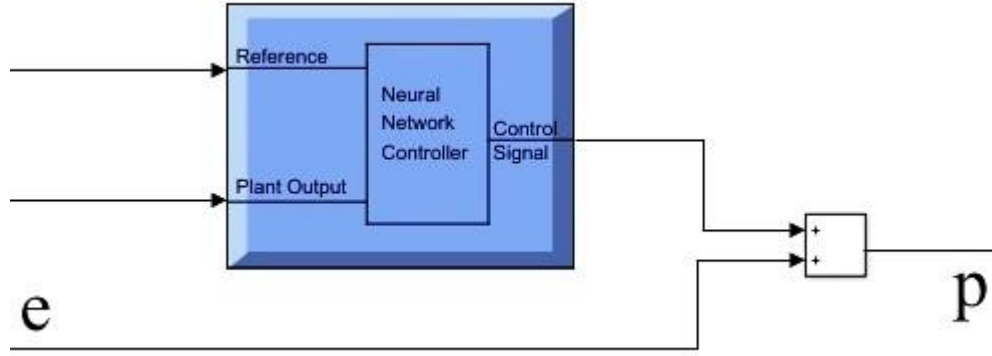


Şekil 4.6. Üyelik fonksiyonları

		Δe						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
e	S_1	PB	PB	PO	PO	PK	PK	S
	S_2	PB	PO	PO	PK	PK	S	NK
	S_3	PO	PO	PK	PK	S	NK	NK
	S_4	PO	PK	PK	S	NK	NK	NO
	S_5	PK	PK	S	NK	NK	NO	NO
	S_6	PK	S	NK	NK	NO	NO	NB
	S_7	S	NK	NK	NO	NO	NB	NB

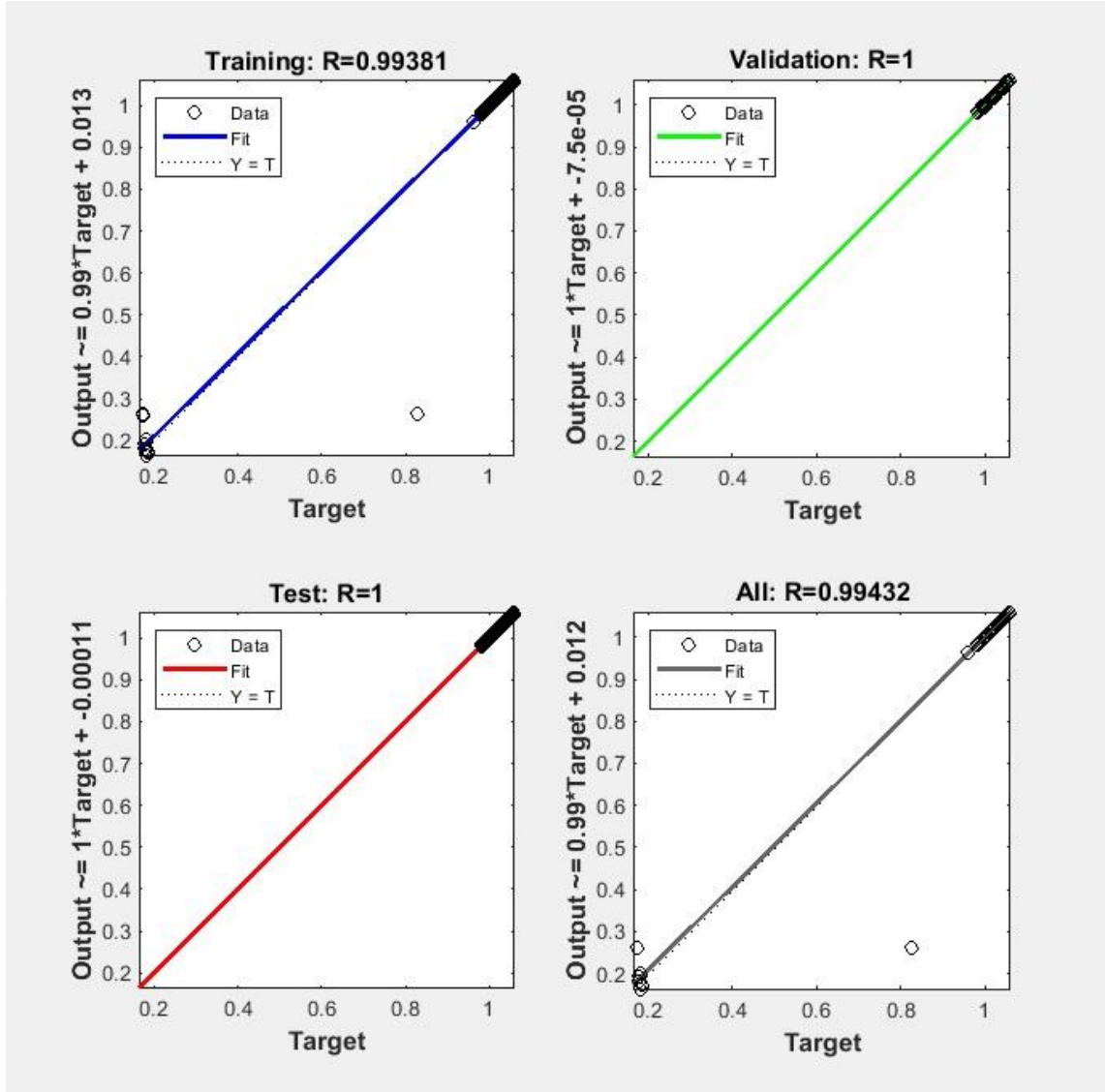
Şekil 4.7. K_p ve K_i çıkış sinyallerine ait bulanık mantık kuralları tablosu

Senaryo 1 uygulamasında kullanılan SAMRK'nın yapısı Şekil 4.8'de verilmiştir.



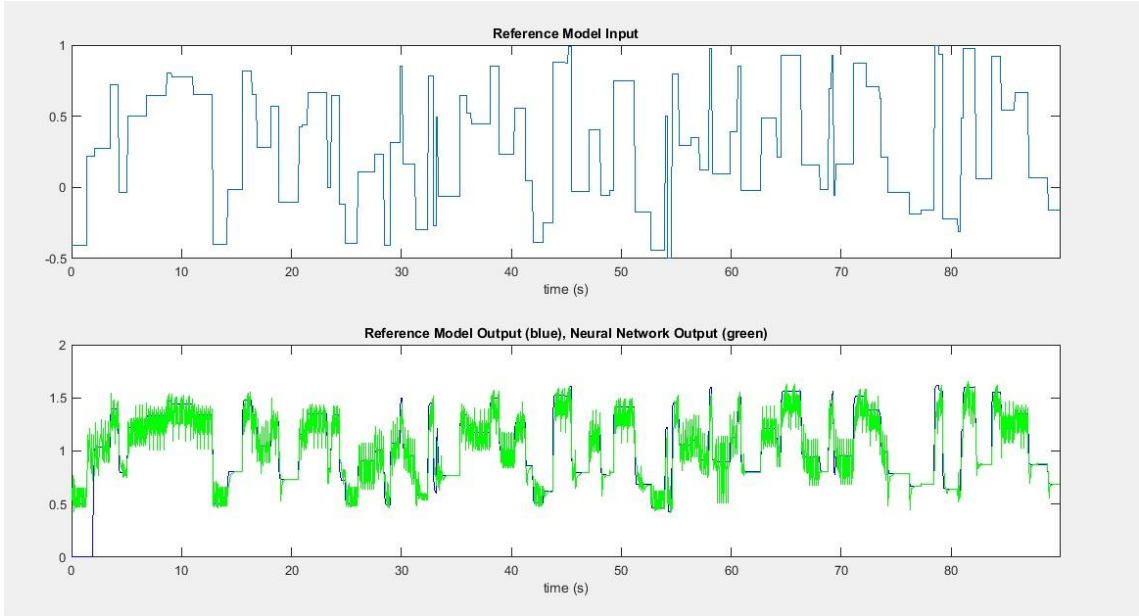
Şekil 4.8. Sinir ağı modeli referans kontrolör (SAMRK) yapısı

Matlab/Simulink programı içerisindeki kütüphaneden Deep Learning Toolbox içerisinde bulunan Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör bloğu (Neural Network Model Reference Controller) kullanılarak önce tesis modeli tanımlaması/eğitimi yapılmıştır. Uygun giriş değerleri verilerek elde edilen regresyon sonuçları ekranı Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Tanımlama verilerinin %50'si eğitim, %25'i doğrulama, %25'i ise test verileri olarak kullanılmıştır.

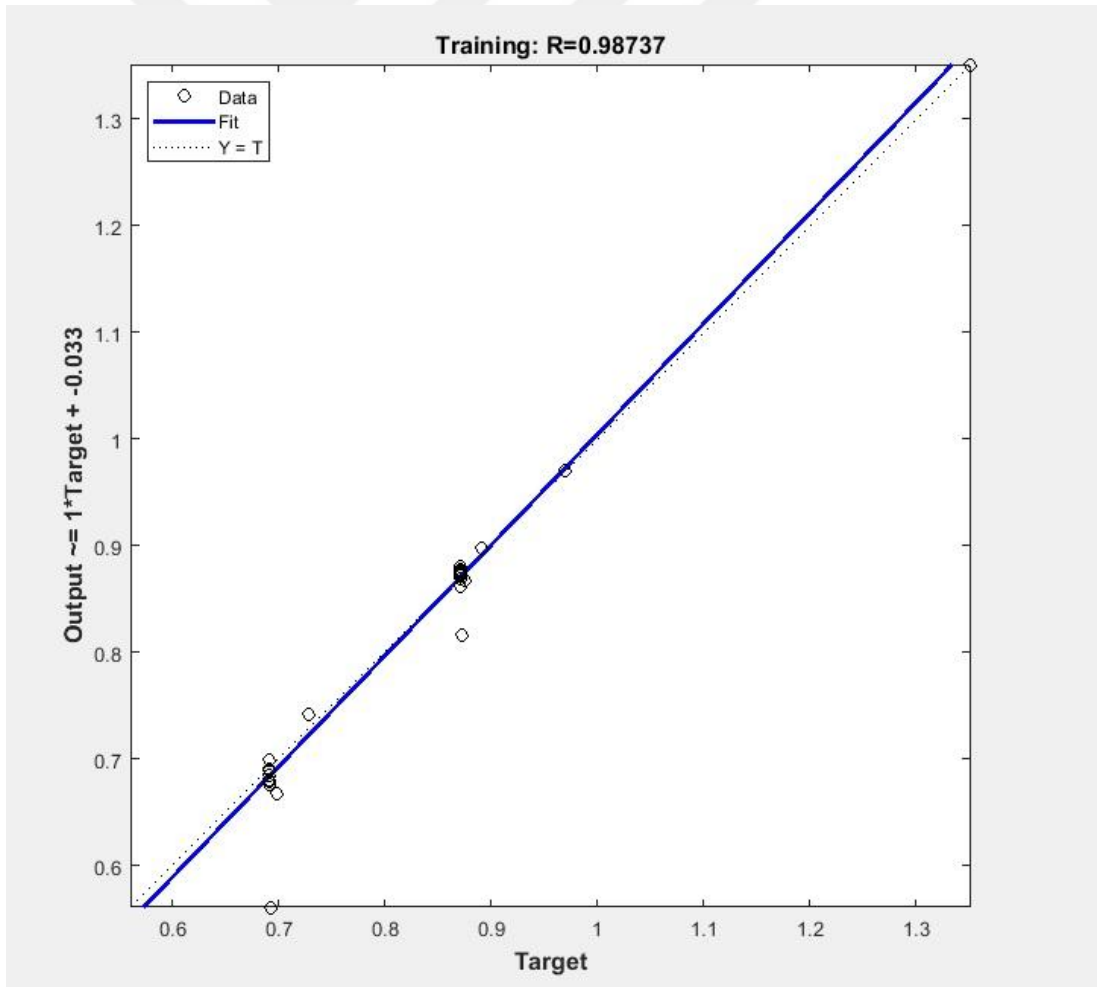


Şekil 4.9. Tesis modeli tanımlaması sonrası elde edilen regresyon sonuçları ekranı

Tesis modeli tanımlaması/eğitimi sonrası SAMRK'nın uygun referans modeli giriş değerleri kullanılarak eğitimi yapılmıştır. Sistemin ürettiği rastgele referans modeli girişlerine göre elde edilen çıkış sonuçları ekranı Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Yeşil renkte gösterilen sinir ağı tesis modeli çıktısının mavi renkte gösterilen referans modeli çıktısını takip ettiği görülmektedir. Elde edilen regresyon sonuçları ekranı ise Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Referans modeli girişlerine göre elde edilen çıkış sonuçları ekranı



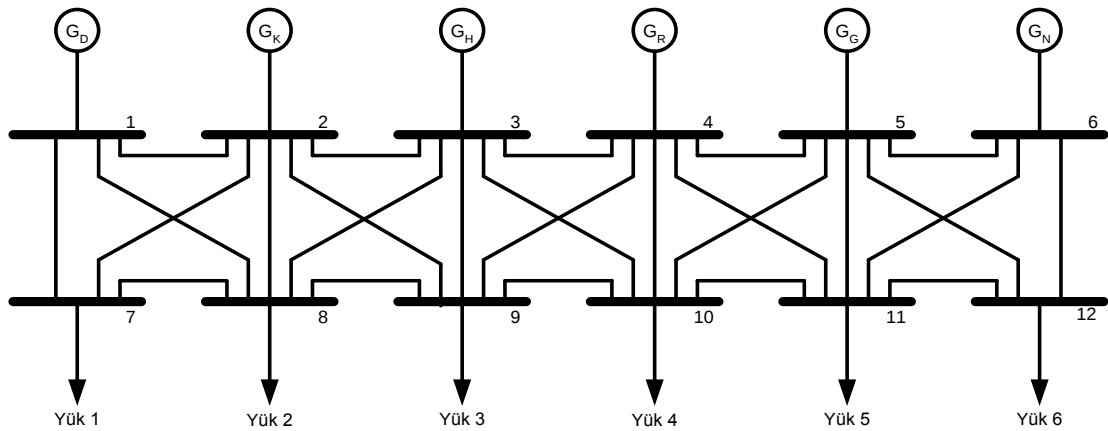
Şekil 4.11. SAMRK'nın eğitimi sonrası elde edilen regresyon sonuçları ekranı

4.2. Farklı Üretim Kaynaklarının Olduğu Dağıtık Bir Sistem İçin Uygulamalar

Tez çalışmasının bu bölümünde, sistem parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiş olan farklı tipteki üretim kaynaklarının bulunduğu ve toplam kurulu gücü 105000 MW olan dağıtık bir sistem yapısının 24 saatlik durumu, farklı talep değişim senaryolarına göre Şekil 3.10’da verilen KÇEGKS blok diyagramı kullanılarak değerlendirilmiştir. Senaryo 2 olarak ifade edilen uygulama stabil bir talep değişimini içerirken diğer senaryolar anlık sert talep artışları ve anlık sert talep düşüşleri gibi olası zor koşulları içermektedir. Senaryolarda farklı kontrolör yapıları ayrı ayrı kullanıldığında MATLAB/Simulink programında elde edilen simülasyon sonuçları yine aynı grafikler üzerinde gösterilerek aynı senaryolarda kullanılan farklı kontrolör yapılarının performansları karşılaştırılmıştır. Bütün senaryo uygulamalarında tolerans üretim %2,5 alınmış olup sistemin tek hat şeması Şekil 4.12’de verilmiştir.

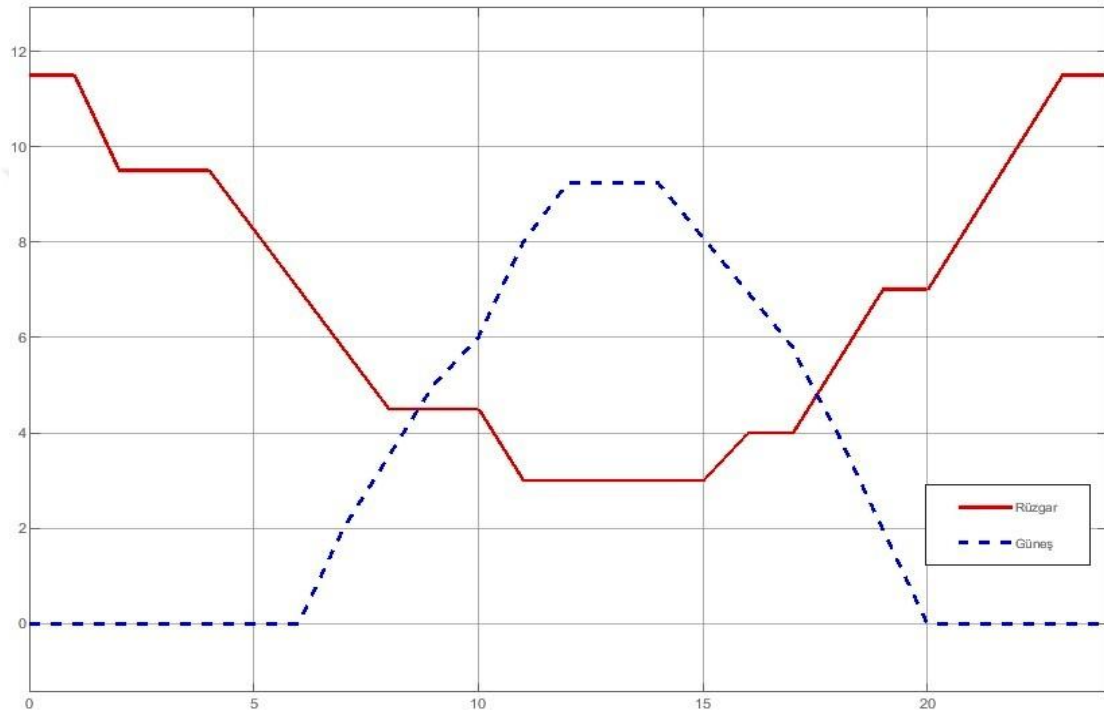
Çizelge 4.2. Kullanılan sistem parametreleri

Üretim kaynağı tipi	C_{maks} (MW)	T (dk)	τ (saat)	Üretim Modeli $G(s)$
Doğal Gaz	26250	15	0,158	$(0,018p^2 + 4p) / (0,158s + 1)$
Kömür	21000	90	0,948	$(0,045p^2 + 4p) / (0,948s + 1)$
Hidroelektrik	31500	5	0,053	$(0,013p^2 + 4p) / (0,053s + 1)$
Rüzgâr	11550	8	0,084	$(0,011p^2 + 3p) / (0,084s + 1)$
Güneş	9450	5	0,053	$(0,008p^2 + 2p) / (0,053s + 1)$
Nükleer	5250	5	0,053	$(0,015p^2 + 5p) / (0,053s + 1)$
Toplam	105000			



Şekil 4.12. Sistemin tek hat şeması

Çizelge 4.2 incelendiğinde, doğal gaz, kömür, hidroelektrik, rüzgâr, güneş ve nükleer olmak üzere 6 farklı üretim kaynağının maksimum kurulu güçleri ve sistem parametreleri görülmektedir (Karyeyen ve Çetinkaya, 2023). Ancak üretim kaynaklarından rüzgâr santralleri ve güneş santralleri yapıları gereği Çizelge 4.2’de ifade edilen maksimum güce günün her saati ulaşamamaktadır. Bu nedenle rüzgâr ve güneş santrallerinin enerji kapasite değişimleri simülasyon uygulamalarında Şekil 4.13’te verildiği gibi kabul edilerek kullanılmıştır.



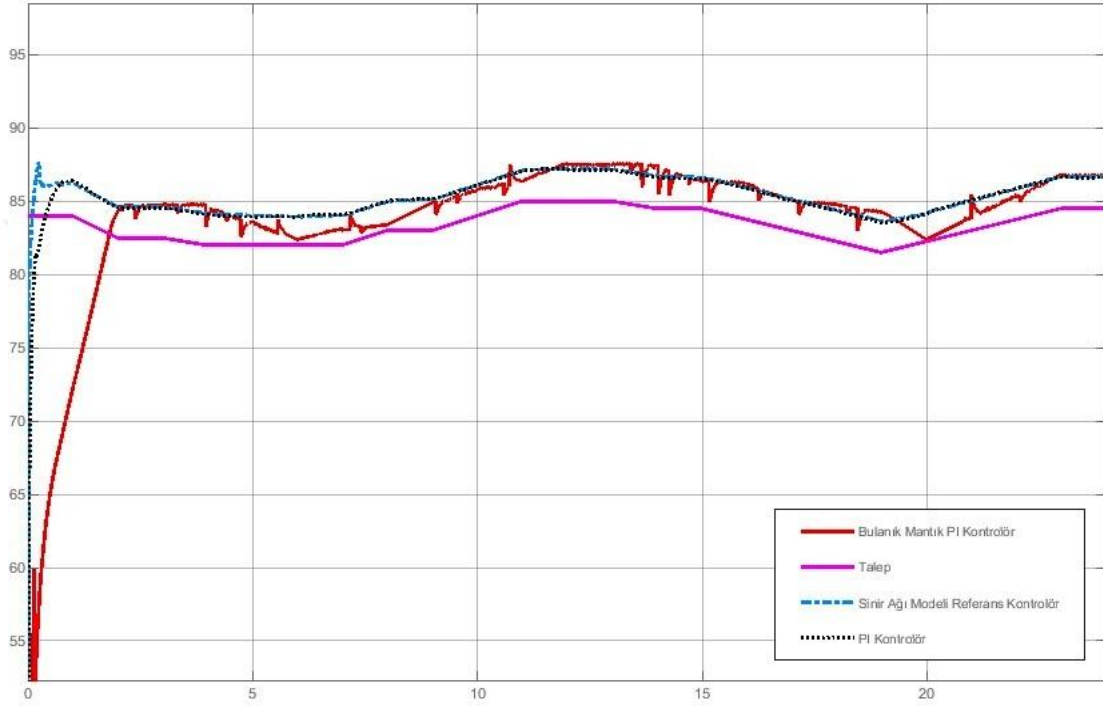
Şekil 4.13. Rüzgâr ve güneş santrallerinin gün içerisindeki maksimum enerji kapasitesi değişimleri (GW)

4.2.1. Senaryo 2 uygulaması

Bu senaryoda, parametreleri Çizelge 4.2’de verilen sistem yapısının 24 saatlik durumu, Şekil 4.14’te verilen ve genel olarak stabil seyreden bir talep değişimine göre değerlendirilmiştir. Senaryoya göre Şekil 3.10’da verilen KÇEGKS blok diyagramında kontrolör olarak Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen sistem cevapları bir arada gösterilerek kontrolörlerin performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Sisteme uygulanan talep değişimi ve bu talep değişimine karşılık sistemin farklı kontrolörler kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları Şekil 4.14’te verilmiştir. Her

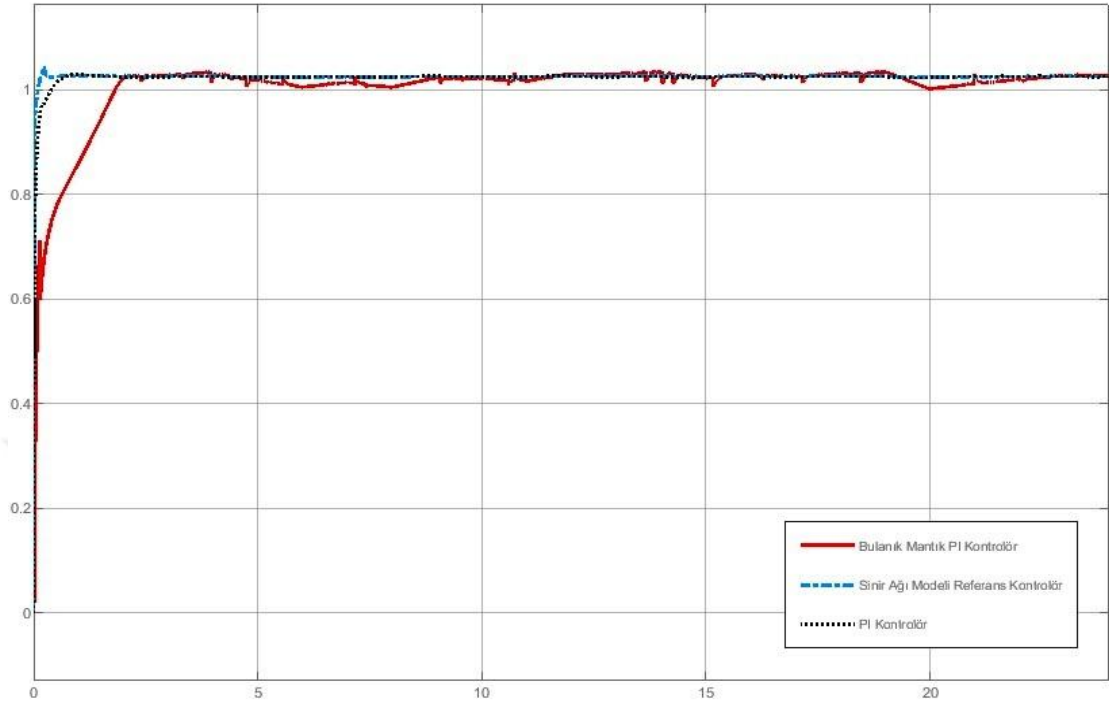
bir kontrolör ile yapılan simülasyon uygulamasında üretim miktarları, %2,5'luk tolerans üretime bağlı kalarak değişmektedir. Talebin düşmeye başladığı süreçlerde üretimin de düştüğü, talebin artmaya başladığı süreçlerde ise üretimin de arttığı görülmektedir. Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında üretim cevabının talebe göre kendini ayarlamasında zaman gecikmeleri olduğu, SAMRK'nın ise performans açısından en başarılı olduğu Şekil 4.14'te gözlemlenmektedir.



Şekil 4.14. Senaryo 2'ye göre sisteme uygulanan talep değişimi ve bu talebe karşılık sistemin farklı kontrolörler kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları (GW)

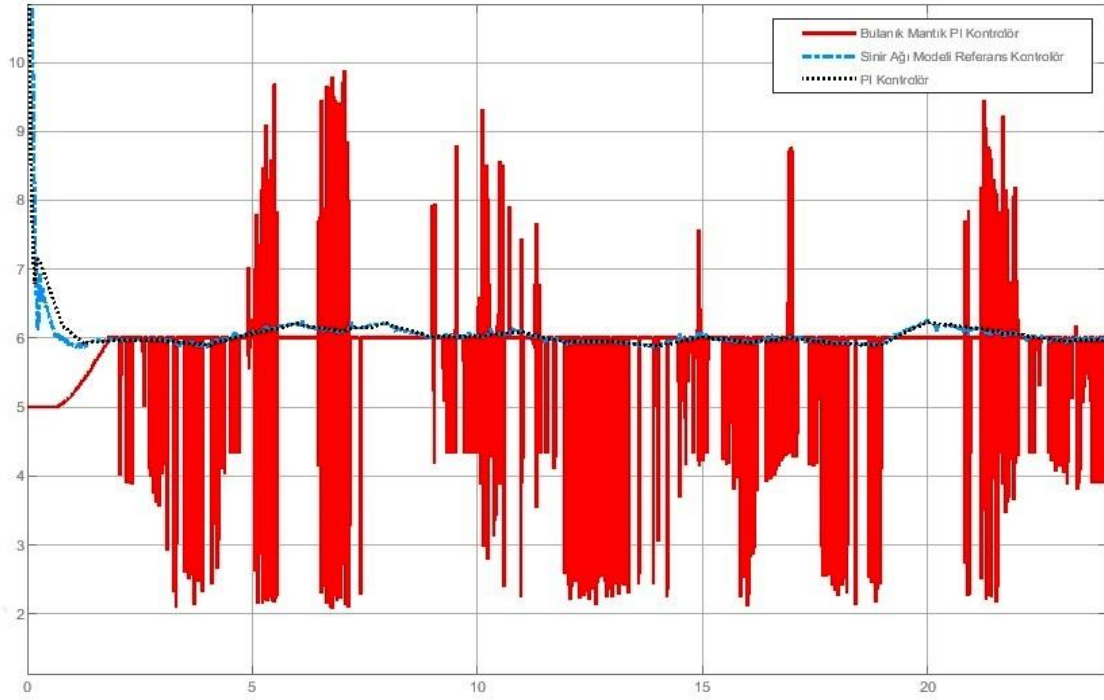
Sistemde arz/talep oranının 1'den büyük olmasının önemi bir önceki bölümde anlatılmıştı. Farklı kontrolörler kullanıldığında sistemin arz/talep oranı grafikleri Şekil 4.15'te bir arada verilmiştir. Genel olarak stabil seyreden bir talep stabil seyreden üretim cevapları oluşturduğundan bu senaryodaki arz/talep oranları da yaklaşık olarak 1,025 seviyelerinde stabile yakın bir şekildedir. Ancak Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında üretim cevabının talebe göre kendini ayarlamasında zaman gecikmelerinin olmasına bağlı olarak, Bulanık Mantık PI kontrolörün arz/talep oranı eğrisinde 1,025 seviyesinin altında ve üstünde kaldığı periyotlar görülmektedir. Bu durum bir dezavantaj olmakla birlikte sistemin genel çalışma performansını etkileyecek büyüklükte değildir. Çünkü Bulanık Mantık PI kontrolör yapısı hiçbir şekilde arz/talep

oranını 1 seviyesinin altına düşürmemiştir. SAMRK'nın stabil olma ve hız bakımından diğer kontrolör yapılarına göre daha başarılı olduğu Şekil 4.15'te gözlemlenmektedir.



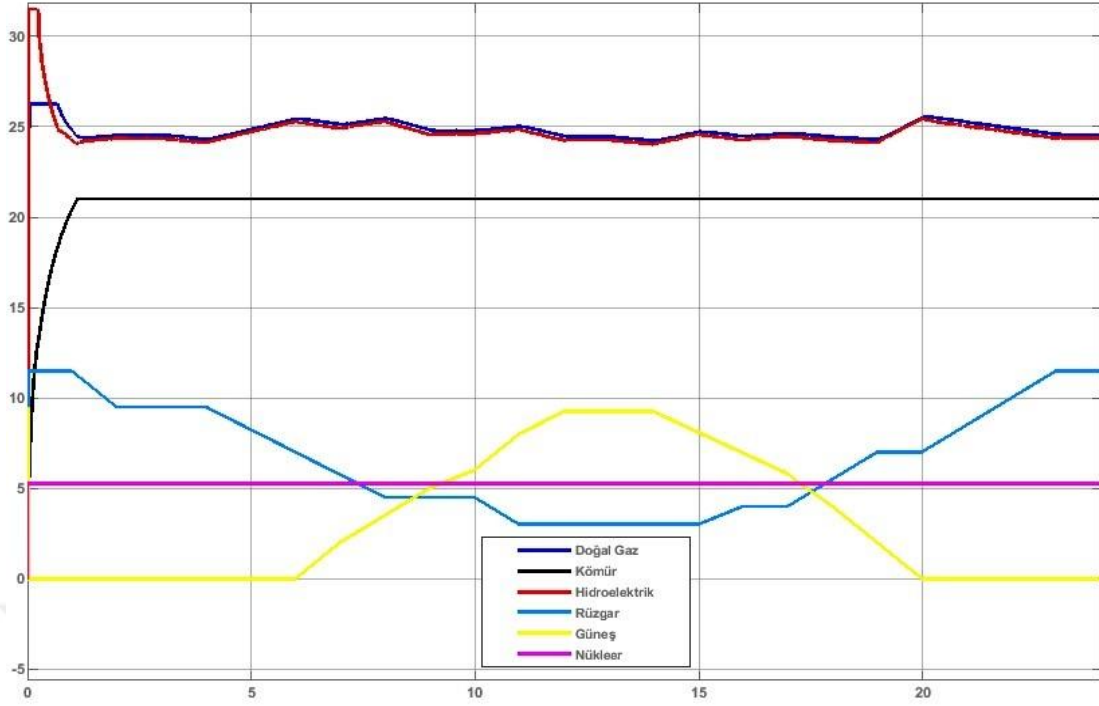
Şekil 4.15. Senaryo 2'ye göre farklı kontrolörler kullanıldığında sistemin arz(üretim)/talep oranları

Farklı kontrolörler kullanıldığında sistemde meydana gelen fiyat (p) cevapları Şekil 4.16'da bir arada görülmektedir. Her bir kontrolör için fiyat cevapları yaklaşık ortalama 6 birim civarındadır. Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında meydana gelen fiyat cevabında yukarı ve aşağı yönlü osilasyonlar görülmektedir. Diğer iki kontrolör yapısı kullanıldığında ise birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Genel ortalama değer açısından değerlendirilecek olursa Bulanık Mantık PI kontrolörün daha iyi bir fiyat sonucu verdiği ancak fiyatın stabil devam etmesi açısından değerlendirilecek olursa da SAMRK'nın daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.16. Senaryo 2'ye göre farklı kontrolörler kullanıldığında sistemin fiyat cevapları

Şekil 4.17'de ise sistemde kontrolör olarak SAMRK kullanıldığı durumda, sistemin üretim cevabının farklı tipte olan üretim kaynaklarındaki dağılımları görülmektedir. Buna göre uygulamanın her anında kömür üretim kaynağı 21000 MW'lık kapasitesinin, nükleer üretim kaynağı ise 5250 MW'lık kapasitesinin tamamını kullanmıştır. Benzer biçimde rüzgâr üretim kaynağı ve güneş üretim kaynağı, Şekil 4.13'te belirtilen günlük maksimum kapasite değişimleri nispetinde kapasitelerinin tamamını kullanmıştır. Doğal gaz ve hidroelektrik üretim kaynakları ise diğer üretim kaynaklarına göre daha yüksek üretim kapasitesine sahip olduklarından 24 saatlik periyotun her bir aşamasında dengeli bir biçimde mevcut üretim kapasitelerinden ihtiyaç kadar üretim yapmışlardır.



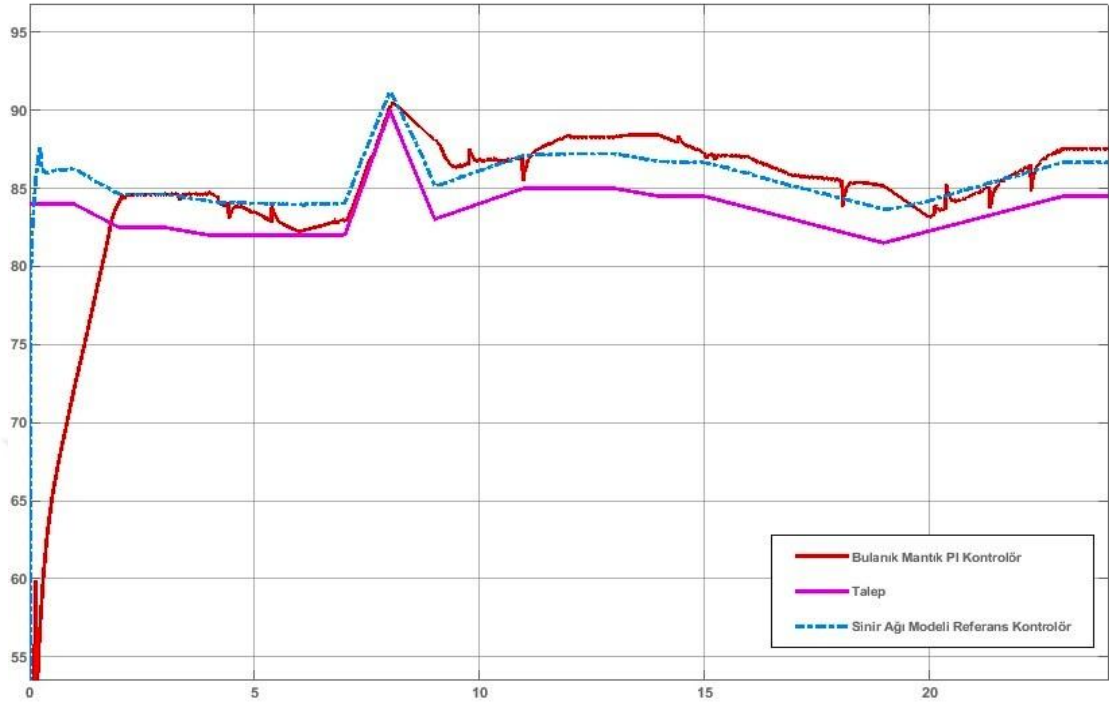
Şekil 4.17. Senaryo 2'ye göre SAMRK kullanıldığında farklı üretim kaynaklarının sistemin üretim cevabına katkıları (GW)

4.2.2. Senaryo 3 uygulaması

Bu senaryoda ise parametreleri Çizelge 4.2'de verilen sistem yapısının 24 saatlik durumu, Şekil 4.18'de verilen talep değişimine göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.18'de görüldüğü üzere bu senaryodaki talep değişiminin Senaryo 2'de verilen talep değişiminden farkı, 8. saatte 8 GW'lık ani bir talep artışının olmasıdır. Senaryoya göre Şekil 3.10'da verilen KÇEGKS blok diyagramında kontrolör olarak Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen sistem cevapları yine bir arada gösterilmiştir.

Sisteme uygulanan talep değişimi ve bu talep değişimine karşılık sistemin Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları Şekil 4.18'de verilmiştir. Her iki kontrolör ile yapılan simülasyon uygulamasında da üretim miktarları yine %2,5'luk tolerans üretime bağlı kalarak değişmiştir. Ancak Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında üretim cevabındaki zaman gecikmesinin yanı sıra ani talep artışı sona erdikten sonra sistemin bir miktar daha yüksek bir üretim seviyesine konumlandığı görülmektedir. SAMRK'nın hem hız hem de sistemin istenilen

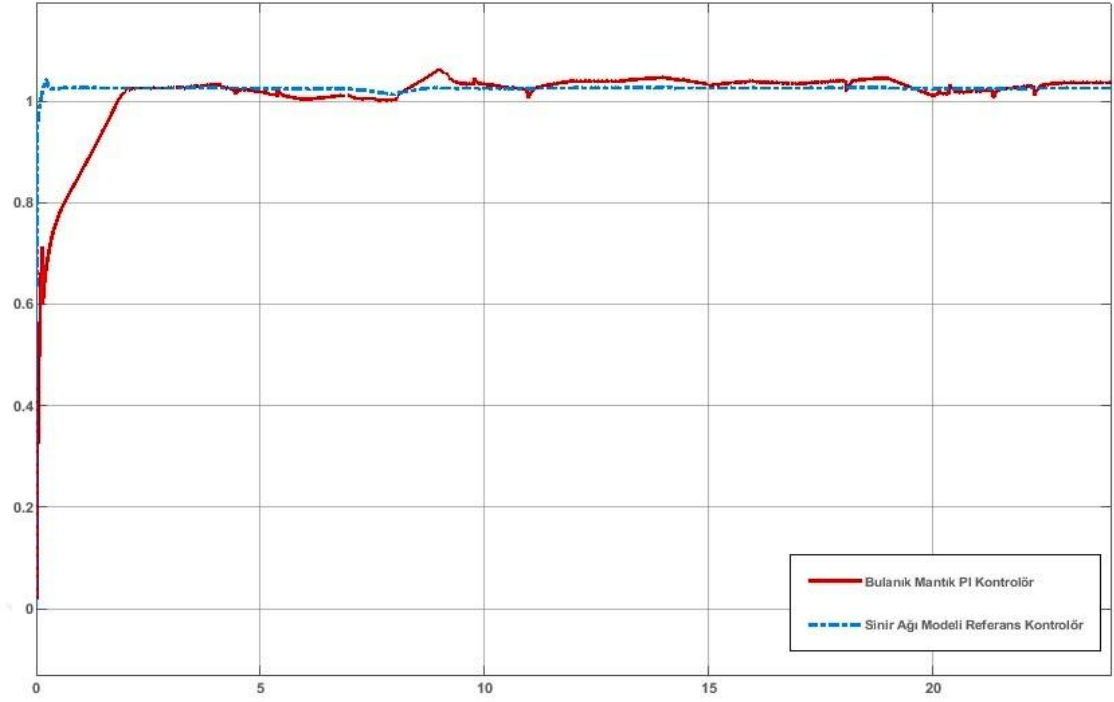
üretim seviyesine konumlanması açısından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir.



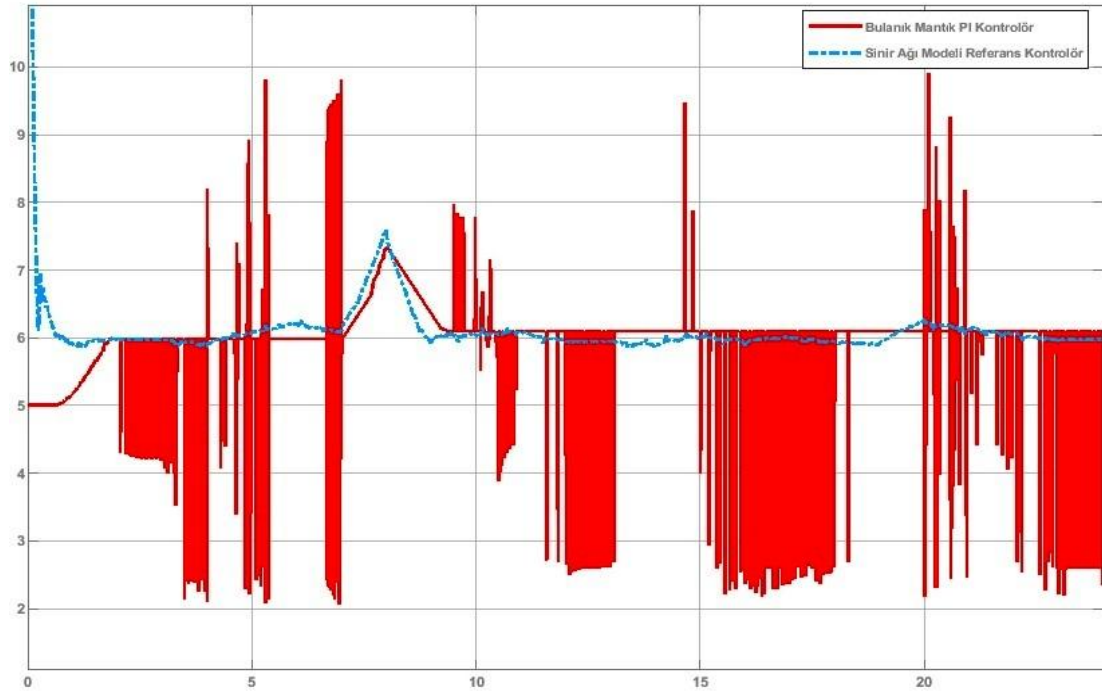
Şekil 4.18. Senaryo 3'e göre sisteme uygulanan talep değişimi, bu talebe karşılık sistemin bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları (GW)

Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz/talep oranı grafikleri Şekil 4.19'da bir arada verilmiştir. Senaryo 2'den farklı olarak, Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında ani talep artışının gerçekleştiği zaman aralığında üretim cevabında meydana gelen süre gecikmesi ile birlikte arz-talep farkının azalması neticesinde arz/talep oranının 1 seviyesine yaklaştığı ancak bu seviyenin altına düşmediği görülmektedir. SAMRK kullanıldığında ise ani talep artışının olduğu zaman aralığında arz/talep oranının düşmesi durumu çok az miktarda gerçekleşmiştir. Ayrıca ani talep artışı sona erdikten sonra da SAMRK için arz/talep oranının 1,025 seviyesinde stabil kaldığı görülmektedir.

Her iki kontrolör yapısı için sistemde meydana gelen fiyat (p) cevapları Şekil 4.20'de bir arada verilmiştir. Senaryo 2'den farklı olarak ani talep artışının olduğu zaman aralığındaki fiyat değişimi, Şekil 4.20'de görülmektedir.



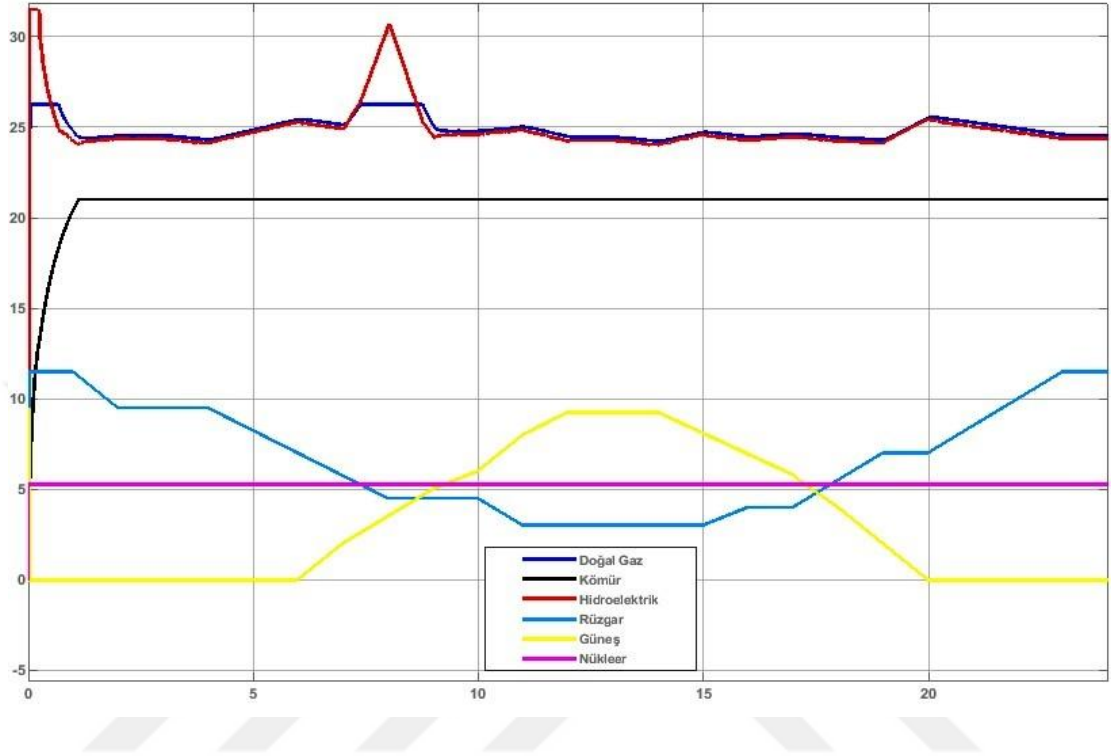
Şekil 4.19. Senaryo 3'e göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz(üretim)/talep oranları



Şekil 4.20. Senaryo 3'e göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin fiyat cevapları

Şekil 4.21'de ise sistemde kontrolör olarak SAMRK kullanıldığı durumda, sistemin üretim cevabının farklı tipte olan üretim kaynaklarındaki dağılımları

görülmektedir. Senaryo 2’den farklı olarak ani talep artışının olduğu zaman aralığında; kömür, rüzgâr, güneş ve nükleer üretim kaynakları gibi doğal gaz üretim kaynağı da kapasitesinin tamamını kullanarak üretim yapmaktadır.



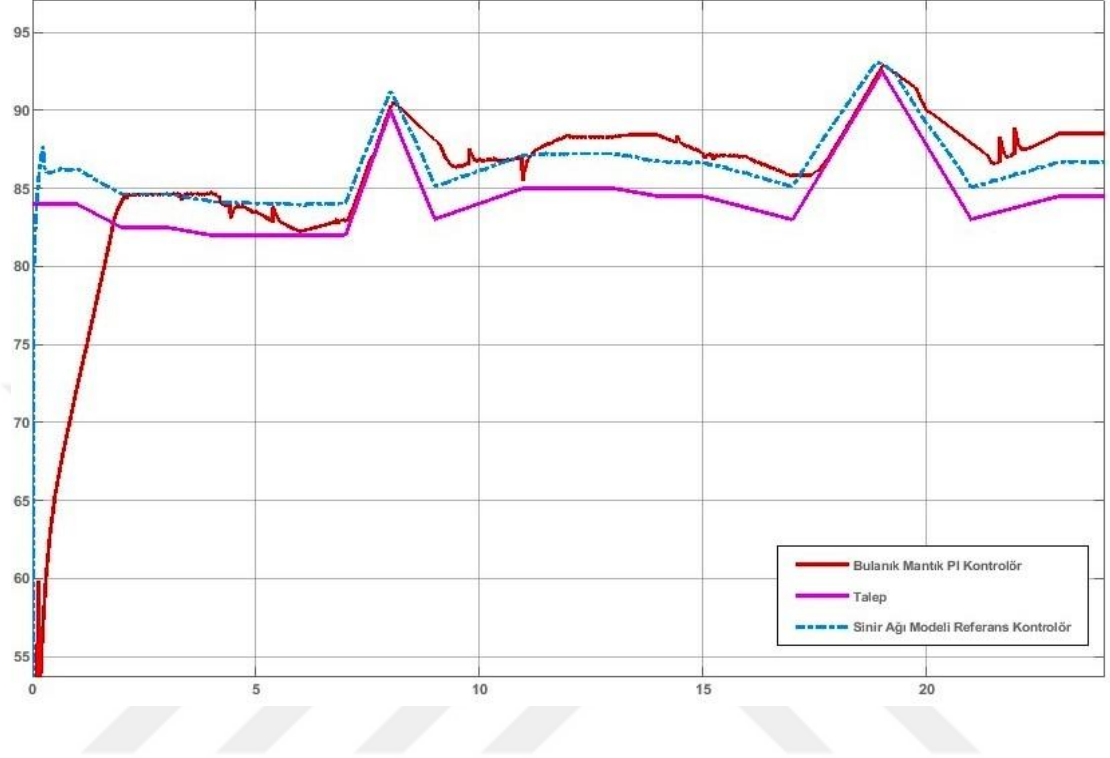
Şekil 4.21. Senaryo 3’e göre SAMRK kullanıldığında farklı üretim kaynaklarının sistemin üretim cevabına katkıları (GW)

4.2.3. Senaryo 4 uygulaması

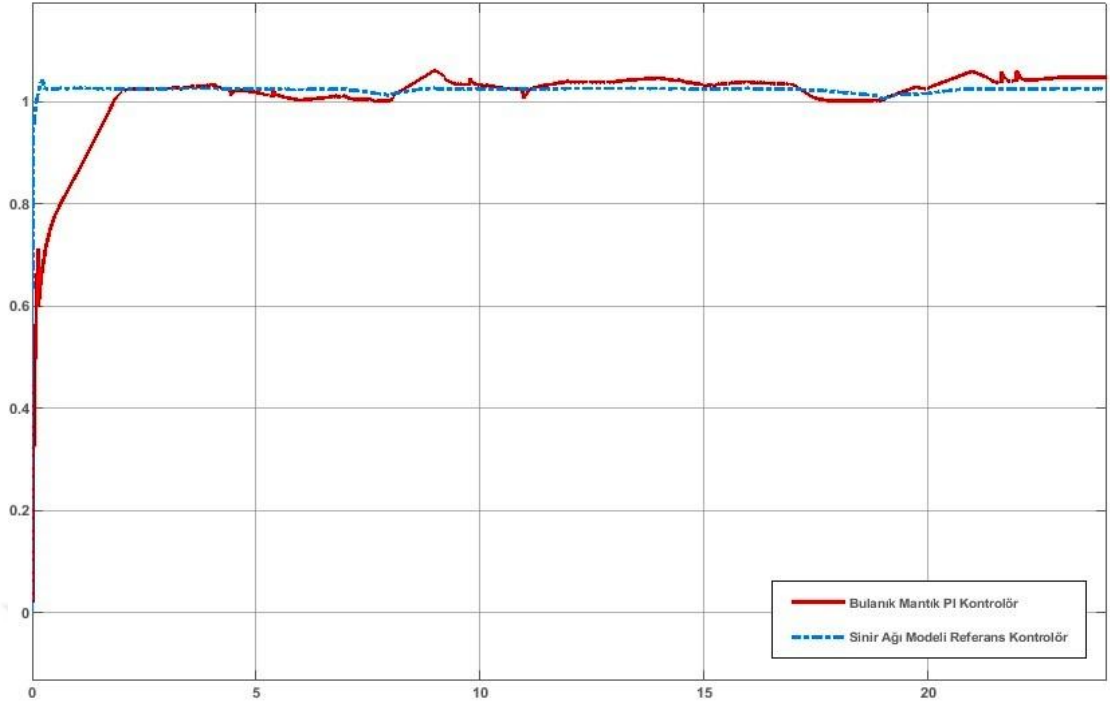
Bu senaryoda ise parametreleri Çizelge 4.2’de verilen sistem yapısının 24 saatlik durumu, Şekil 4.22’de verilen talep değişimine göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.22’de görüldüğü üzere bu senaryodaki talep değişiminin Senaryo 3’te verilen talep değişiminden farkı, 8. saatteki 8 GW’lık ani talep artışına ilave olarak 19. saatte 9,5 GW’lık yeni bir ani talep artışı daha olmasıdır. Senaryoya göre Şekil 3.10’da verilen KÇEGKS blok diyagramında kontrolör olarak Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen sistem cevapları yine bir arada gösterilmiştir.

Sisteme uygulanan talep değişimi ve bu talep değişimine karşılık sistemin Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları Şekil 4.22’de verilmiştir. Her iki kontrolör yapısı için Şekil 4.23’te sistemin arz/talep oranı grafikleri, Şekil 4.24’te ise sistemde meydana gelen fiyat (p) cevapları

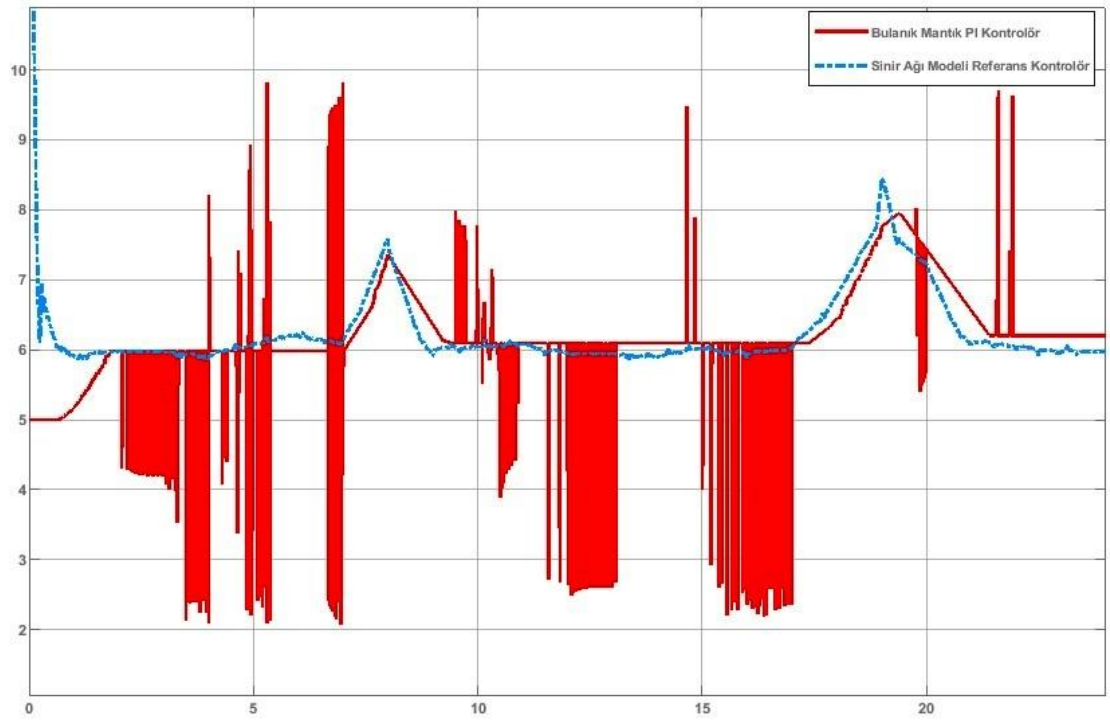
gösterilmektedir. Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelendiğinde, birinci ani talep artışında gerçekleşen ve Senaryo 3 uygulamasında belirtilen durumların benzerinin ikinci ani talep artışında da gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.22. Senaryo 4'e göre sisteme uygulanan talep değişimi, bu talebe karşılık sistemin bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları (GW)

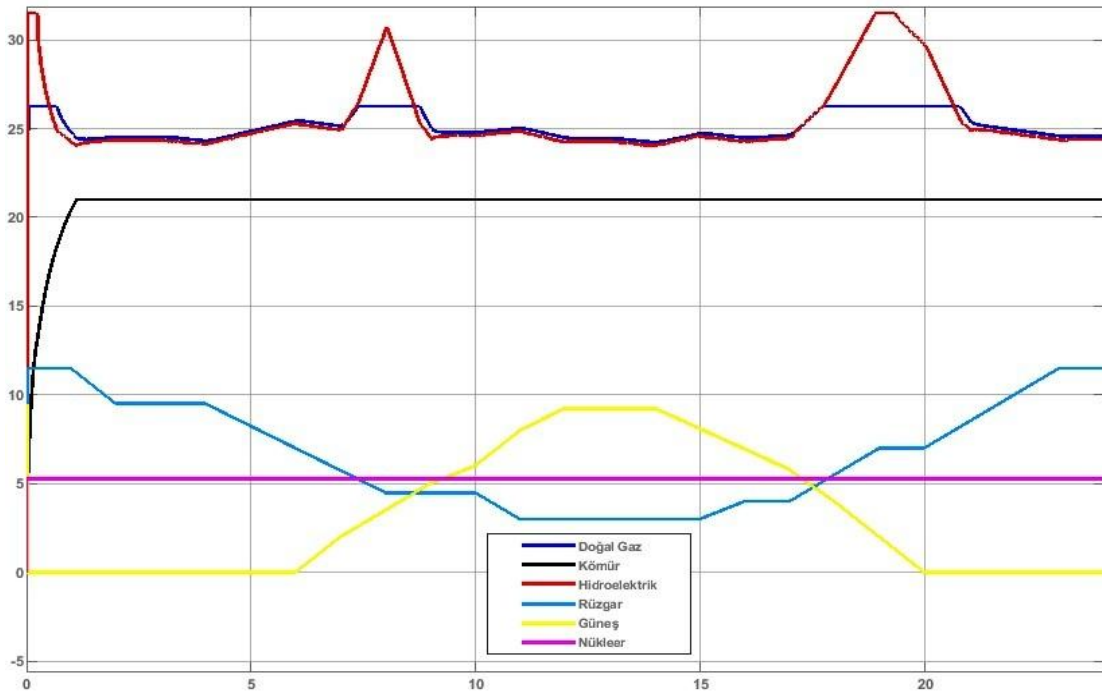


Şekil 4.23. Senaryo 4'e göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz(üretim)/talep oranları



Şekil 4.24. Senaryo 4'e göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin fiyat cevapları

Şekil 4.25'te ise sistemde kontrolör olarak SAMRK kullanıldığı durumda, sistemin üretim cevabının farklı tipte olan üretim kaynaklarındaki dağılımları görülmektedir. 8. saatteki birinci ani talep artışının ve 19. saatteki ikinci ani talep artışının gerçekleştiği zaman aralıkları haricindeki süreçlerde; kömür, rüzgâr, güneş ve nükleer üretim kaynakları tam kapasite üretim yaparken doğal gaz ve hidroelektrik üretim kaynakları ihtiyaç kadar üretim yapmaktadır. 8. saatteki birinci ani talep artışının gerçekleştiği zaman aralığında ise doğal gaz üretim kaynağı da tam kapasiteye ulaşmıştır. 19. saatteki ikinci ani talep artışının gerçekleştiği zaman aralığında ise hidroelektrik üretim kaynağının da kısa süreliğine de olsa tam kapasiteye ulaşması ile güç sisteminin maksimum üretimi yaptığı görülmektedir. Sonuç olarak bu senaryoya göre 19. saatteki ikinci ani talep artış miktarı güç sisteminin karşılayamayacağı seviyede olsaydı, güç sistemi bu zaman aralığında yetersiz kalacaktı ve enerji kesintisi durumuyla karşılaşılacaktı.



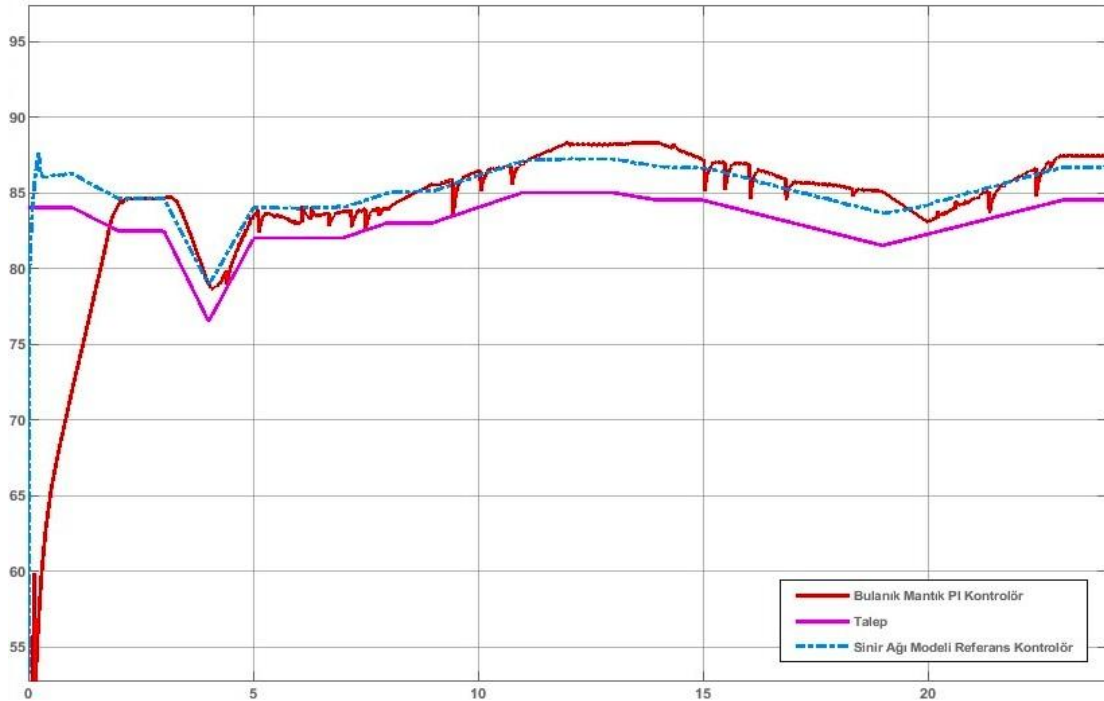
Şekil 4.25. Senaryo 4'e göre SAMRK kullanıldığında farklı üretim kaynaklarının sistemin üretim cevabına katkıları (GW)

4.2.4. Senaryo 5 uygulaması

Bu senaryoda ise parametreleri Çizelge 4.2'de verilen sistem yapısının 24 saatlik durumu, Şekil 4.26'da verilen talep değişimine göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.26'da

görüldüğü üzere bu senaryodaki talep değişiminin Senaryo 2’de verilen talep değişiminden farkı, 4. saatte 6 GW’lık ani bir talep düşüşünün olmasıdır. Senaryoya göre Şekil 3.10’da verilen KÇEGKS blok diyagramında kontrolör olarak Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen sistem cevapları yine bir arada gösterilmiştir.

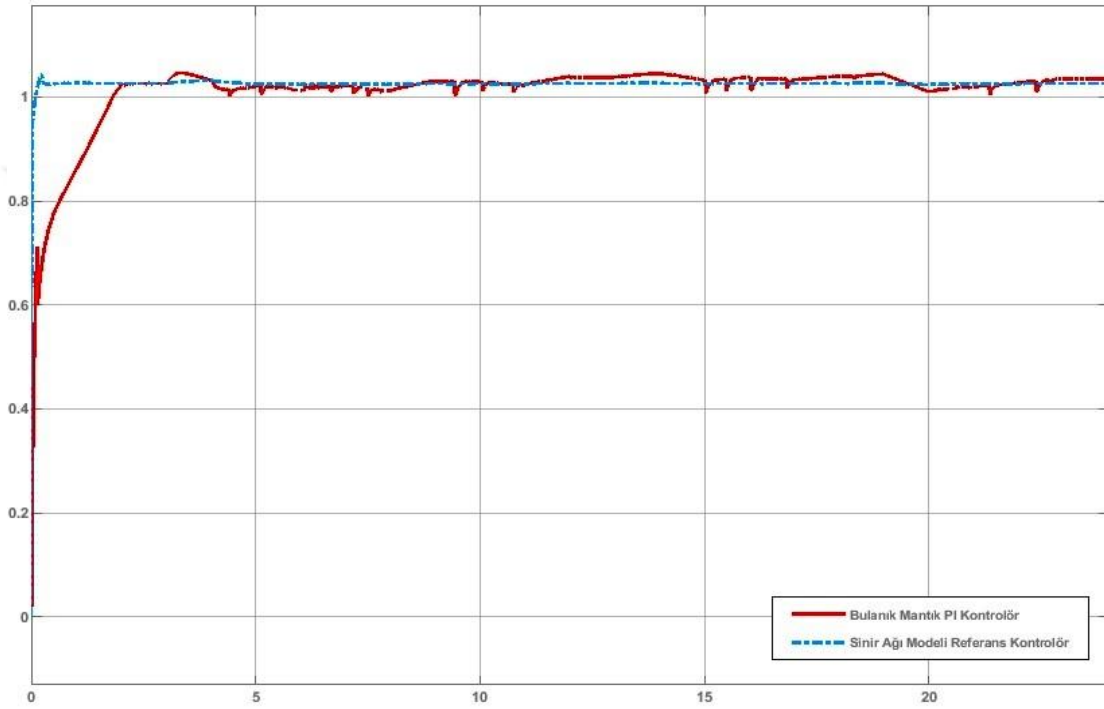
Sisteme uygulanan talep değişimi ve bu talep değişimine karşılık sistemin Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları Şekil 4.26’da verilmiştir. Her iki kontrolör ile yapılan simülasyon uygulamasında da üretim miktarları yine %2,5’luk tolerans üretime bağlı kalarak değişmiştir. Ancak Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında, üretim cevabındaki zaman gecikmeleri ve ani talep düşüşü sona erdiğinde sistemin konumlandığı üretim seviyesi farklılıkları Şekil 4.26’da görülmektedir. SAMRK’nın hem hız hem de sistemin istenilen üretim seviyesine konumlanması açısından yine daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.26. Senaryo 5’e göre sisteme uygulanan talep değişimi, bu talebe karşılık sistemin bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları (GW)

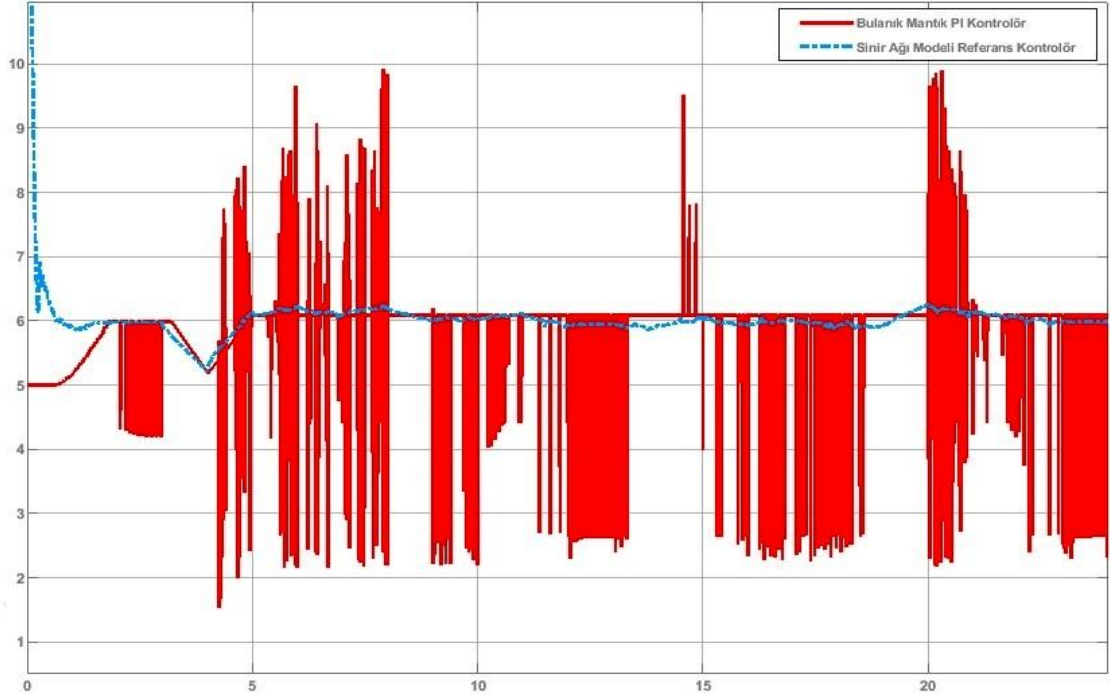
Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz/talep oranı grafikleri Şekil 4.27’de bir arada verilmiştir. Senaryo 2’den

farklı olarak, Bulanık Mantık PI kontrolör kullanıldığında ani talep düşüşünün gerçekleştiği zaman aralığında üretim cevabında meydana gelen süre gecikmesi ile birlikte arz-talep farkının artması neticesinde arz/talep oranının yükseldiği görülmektedir. SAMRK kullanıldığında ise ani talep düşüşünün olduğu zaman aralığında arz/talep oranının artması durumu çok az miktarda gerçekleşmiştir. Ayrıca ani talep düşüşü sona erdikten sonra da SAMRK için arz/talep oranının 1,025 seviyesinde stabil kaldığı görülmektedir.

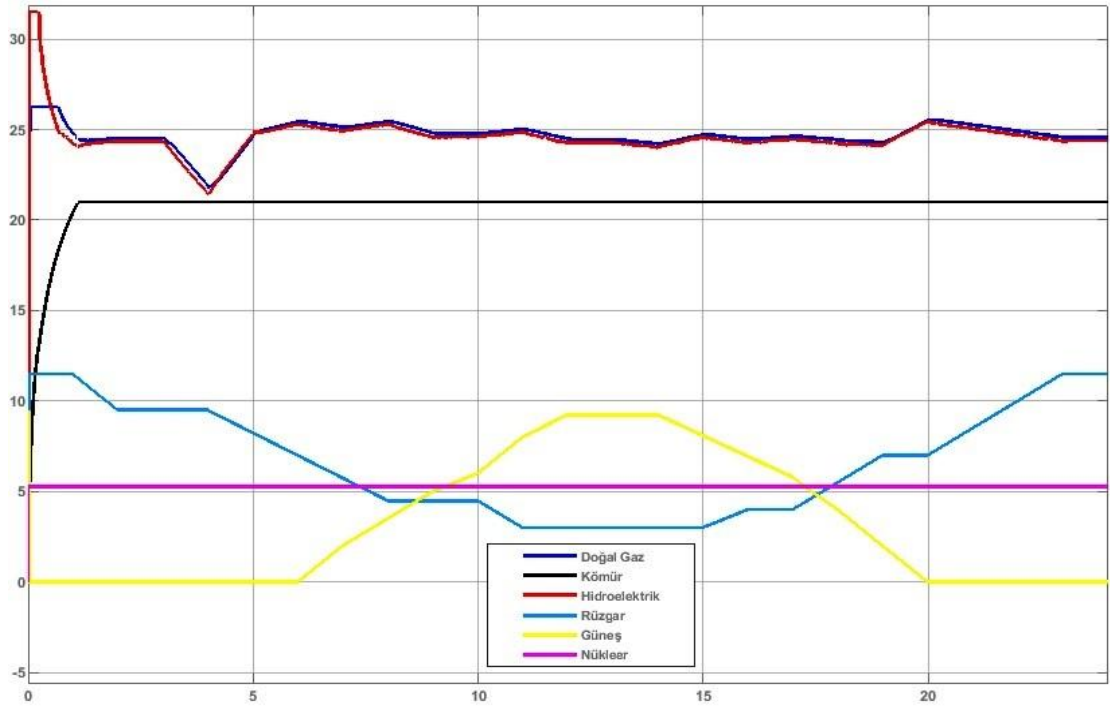


Şekil 4.27. Senaryo 5'e göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz(üretim)/talep oranları

Her iki kontrolör yapısı için sistemde meydana gelen fiyat (p) cevapları Şekil 4.28'de bir arada verilmiştir. Senaryo 2'den farklı olarak ani talep düşüşünün olduğu zaman aralığındaki fiyat değişimi, Şekil 4.28'de görülmektedir. Şekil 4.29'da ise sistemde kontrolör olarak SAMRK kullanıldığı durumda, sistemin üretim cevabının farklı tipte olan üretim kaynaklarındaki dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.28. Senaryo 5'e göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin fiyat cevapları

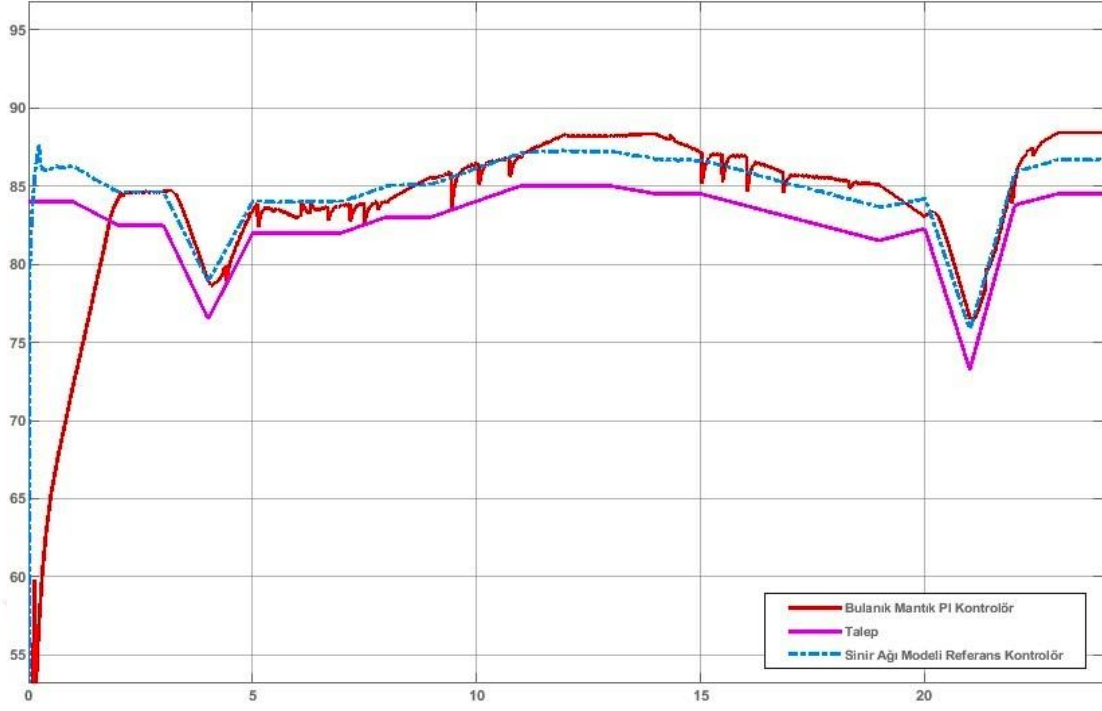


Şekil 4.29. Senaryo 5'e göre SAMRK kullanıldığında farklı üretim kaynaklarının sistemin üretim cevabına katkıları (GW)

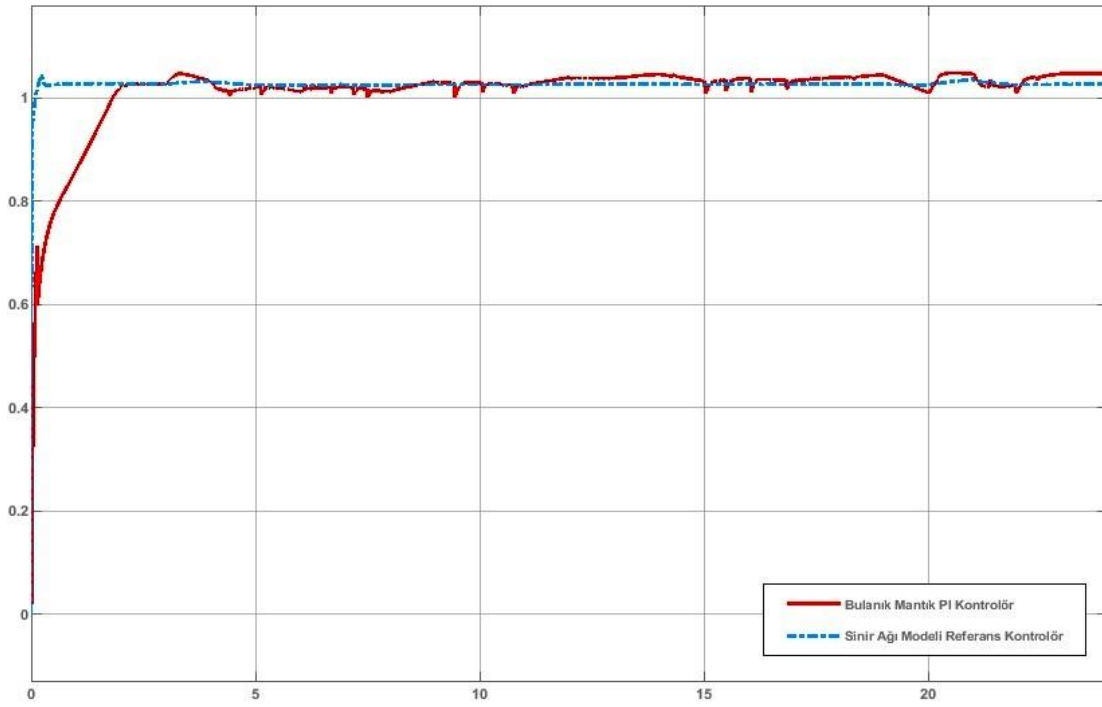
4.2.5. Senaryo 6 uygulaması

Bu senaryoda ise parametreleri Çizelge 4.2’de verilen sistem yapısının 24 saatlik durumu, Şekil 4.30’da verilen talep değişimine göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.30’da görüldüğü üzere bu senaryodaki talep değişiminin Senaryo 5’te verilen talep değişiminden farkı, 4. saatteki 6 GW’lık ani talep düşüşüne ilave olarak 21. saatte 9 GW’lık yeni bir ani talep düşüşü daha olmasıdır. Senaryoya göre Şekil 3.10’da verilen KÇEGKS blok diyagramında kontrolör olarak Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen sistem cevapları yine bir arada gösterilmiştir.

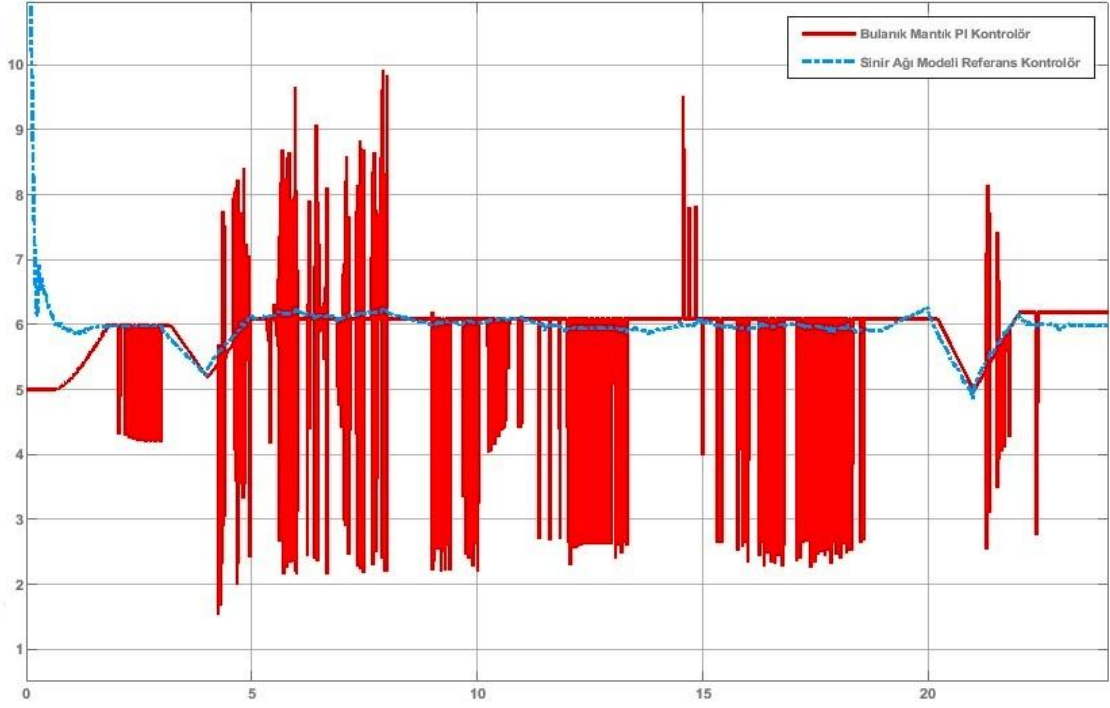
Sisteme uygulanan talep değişimi ve bu talep değişimine karşılık sistemin Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları Şekil 4.30’da verilmiştir. Her iki kontrolör yapısı için Şekil 4.31’de sistemin arz/talep oranı grafikleri, Şekil 4.32’de ise sistemde meydana gelen fiyat (p) cevapları gösterilmektedir. Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 incelendiğinde, birinci ani talep düşüşünde gerçekleşen ve Senaryo 5 uygulamasında belirtilen durumların benzerinin ikinci ani talep düşüşünde de gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.33’te ise sistemde kontrolör olarak SAMRK kullanıldığı durumda, sistemin üretim cevabının farklı tipte olan üretim kaynaklarındaki dağılımları görülmektedir.



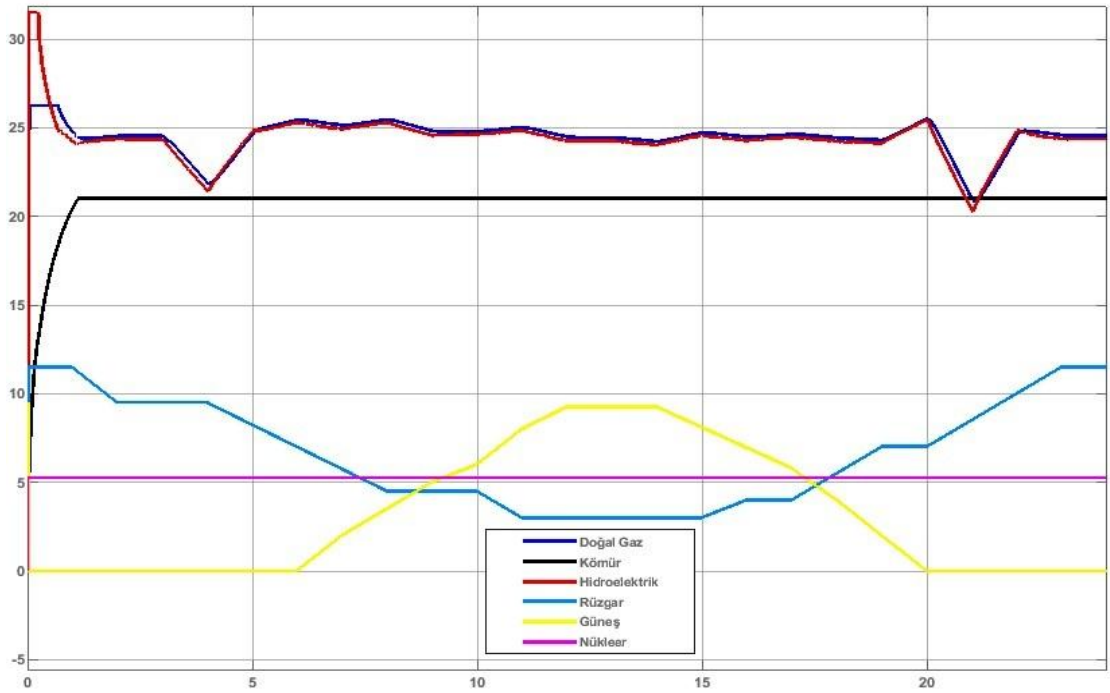
Şekil 4.30. Senaryo 6'ya göre sisteme uygulanan talep değişimi, bu talebe karşılık sistemin bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları (GW)



Şekil 4.31. Senaryo 6'ya göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz(üretim)/talep oranları



Şekil 4.32. Senaryo 6'ya göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin fiyat cevapları

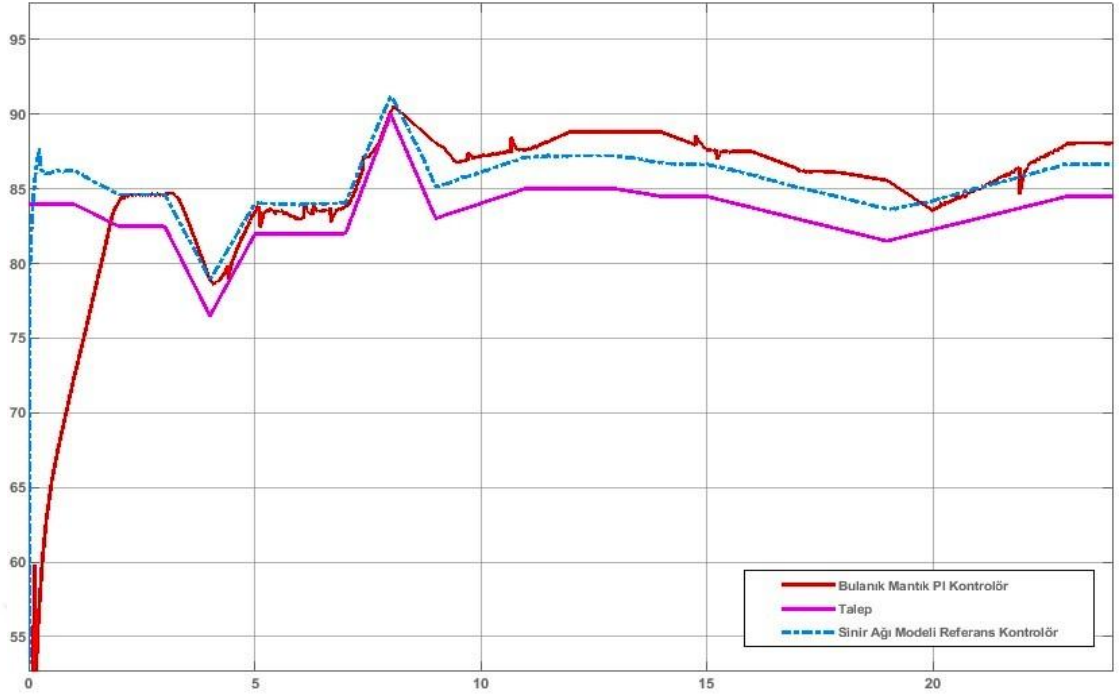


Şekil 4.33. Senaryo 6'ya göre SAMRK kullanıldığında farklı üretim kaynaklarının sistemin üretim cevabına katkıları (GW)

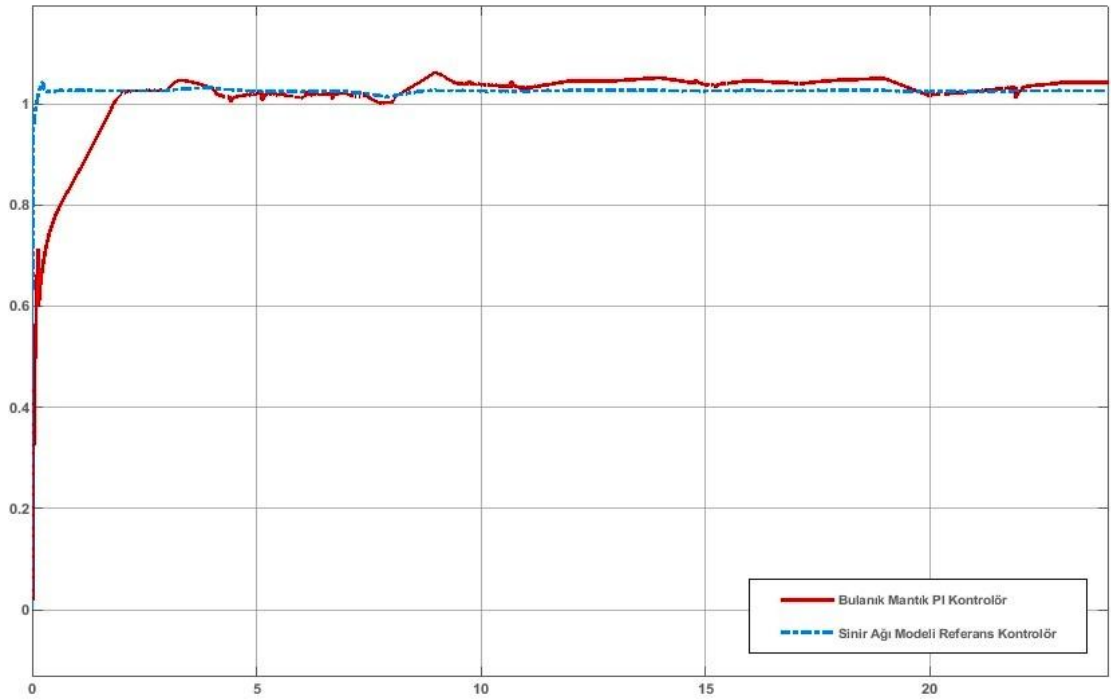
4.2.6. Senaryo 7 uygulaması

Bu senaryoda parametreleri Çizelge 4.2’de verilen sistem yapısının 24 saatlik durumu, Şekil 4.34’te verilen talep değişimine göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.34’teki talep değişiminde görüldüğü üzere, 4. saatte 6 GW’lık ani bir talep düşüşü, 8. saatte ise 8 GW’lık ani bir talep artışı durumuyla karşılaşmıştır. Senaryoya göre Şekil 3.10’da verilen KÇEGKS blok diyagramında kontrolör olarak Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK ayrı ayrı kullanıldığında elde edilen sistem cevapları yine bir arada gösterilmiştir.

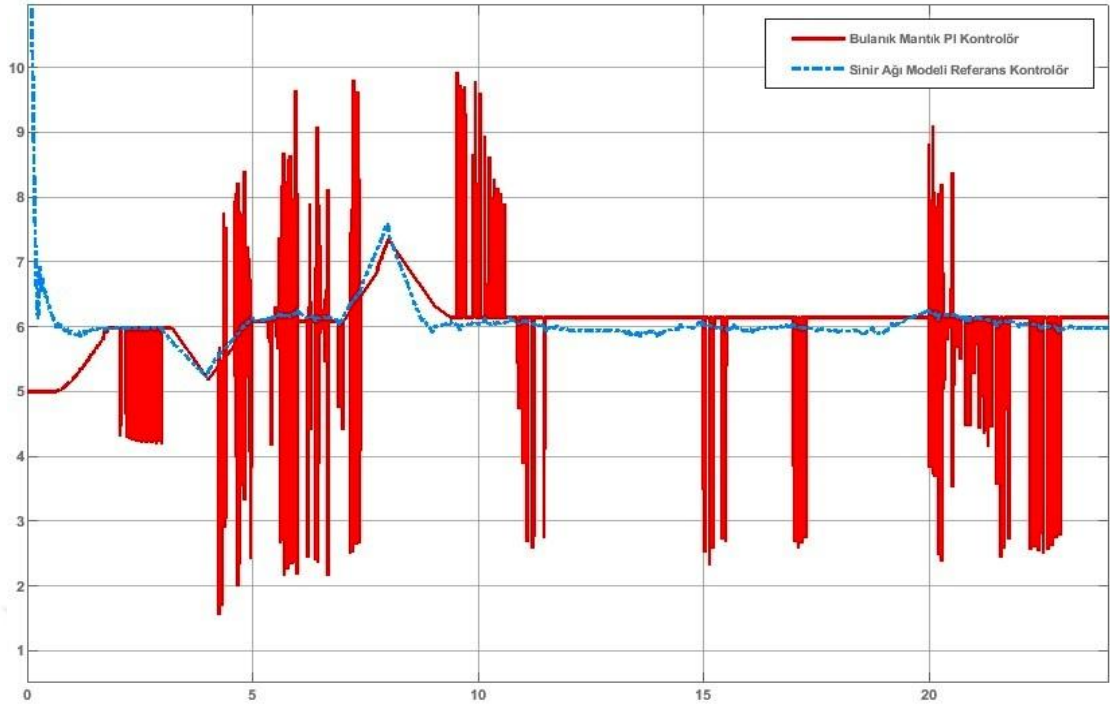
Sisteme uygulanan talep değişimi ve bu talep değişimine karşılık sistemin Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları Şekil 4.34’te verilmiştir. Her iki kontrolör yapısı için Şekil 4.35’te sistemin arz/talep oranı grafikleri, Şekil 4.36’da ise sistemde meydana gelen fiyat (p) cevapları gösterilmektedir. Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36 incelendiğinde, önceki senaryo uygulamalarındaki ani talep düşüşlerinde ve ani talep artışlarında gerçekleşen durumların benzerlerinin bu uygulamada da gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.37’de ise sistemde kontrolör olarak SAMRK kullanıldığı durumda, sistemin üretim cevabının farklı tipte olan üretim kaynaklarındaki dağılımları verilmiştir.



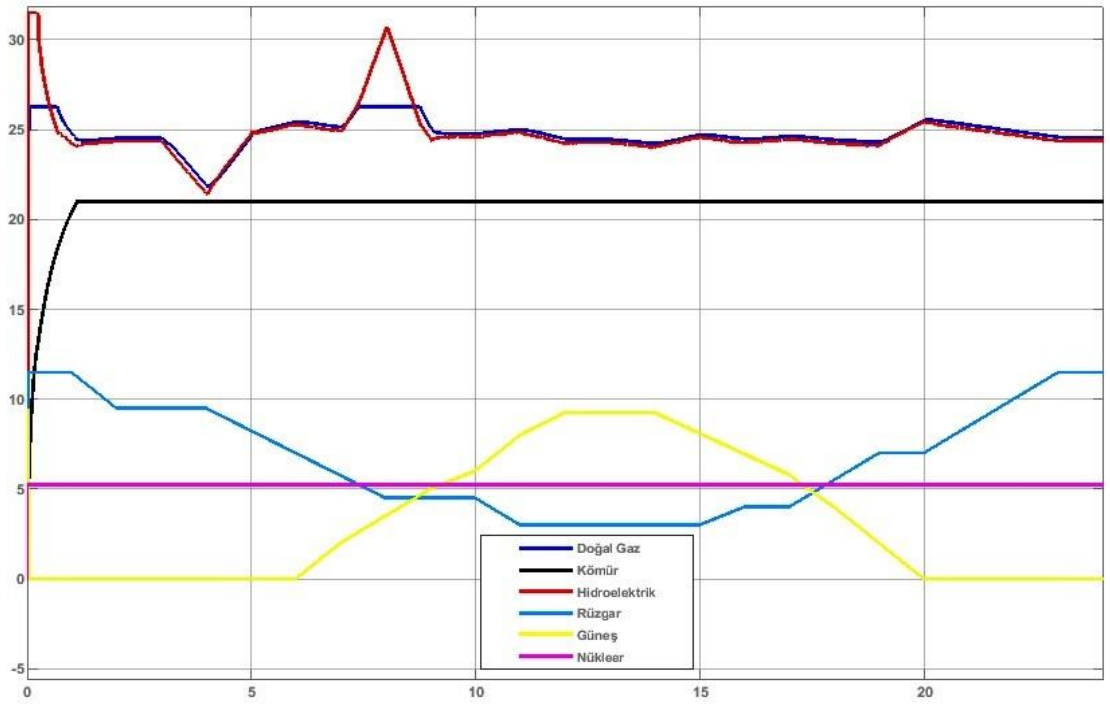
Şekil 4.34. Senaryo 7'ye göre sisteme uygulanan talep değişimi, bu talebe karşılık sistemin bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında ortaya çıkan üretim cevapları (GW)



Şekil 4.35. Senaryo 7'ye göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin arz(üretim)/talep oranları



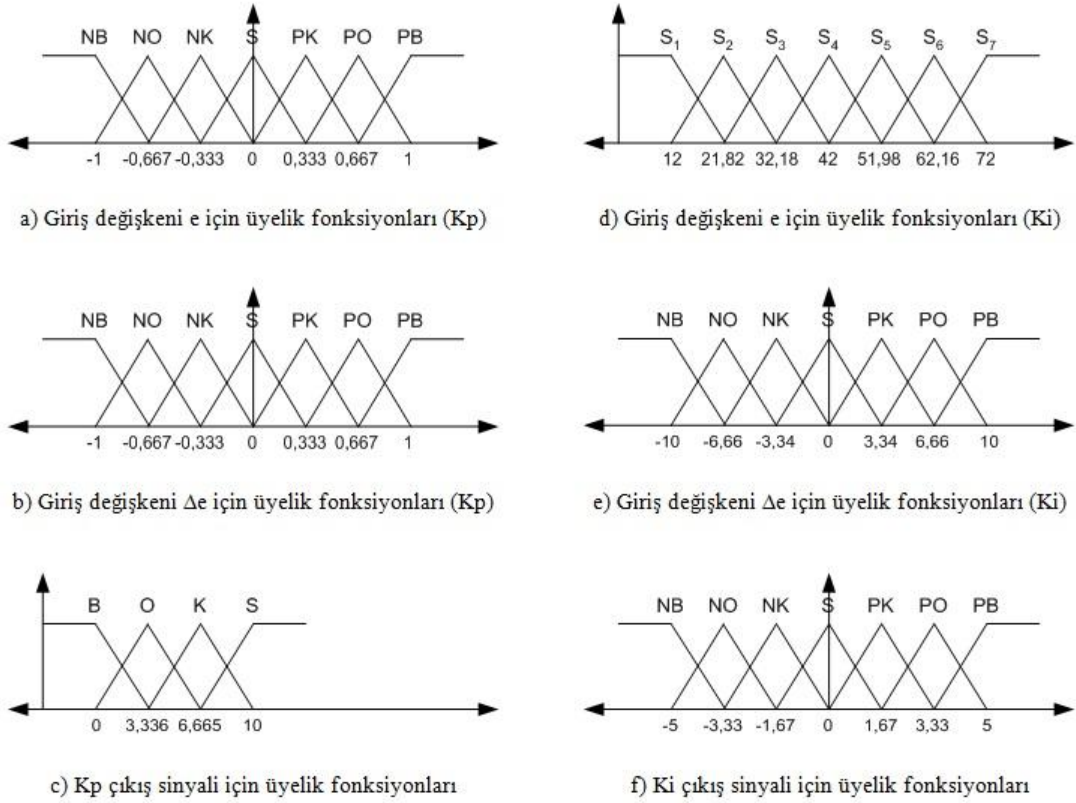
Şekil 4.36. Senaryo 7'ye göre bulanık mantık PI kontrolör kullanıldığında ve SAMRK kullanıldığında sistemin fiyat cevapları



Şekil 4.37. Senaryo 7'ye göre SAMRK kullanıldığında farklı üretim kaynaklarının sistemin üretim cevabına katkıları (GW)

4.2.7. Senaryo 2'den Senaryo 7'ye kadar olan uygulamalarda kullanılan kontrolörlerin yapısı

Senaryo 2 uygulamasında $K_p = 0,5$ ve $K_i = 1,8$ parametreleri ile kullanılan Klasik PI kontrolörün yapısı Şekil 4.4'te verilen model ile aynıdır. Senaryo 2'den Senaryo 7'ye kadar olan uygulamalarda kullanılan Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK yapıları ise sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.8'de verilen modeller ile aynıdır. Kullanılan Bulanık Mantık PI kontrolörün parametreleri ise Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.38. Üyelik fonksiyonları

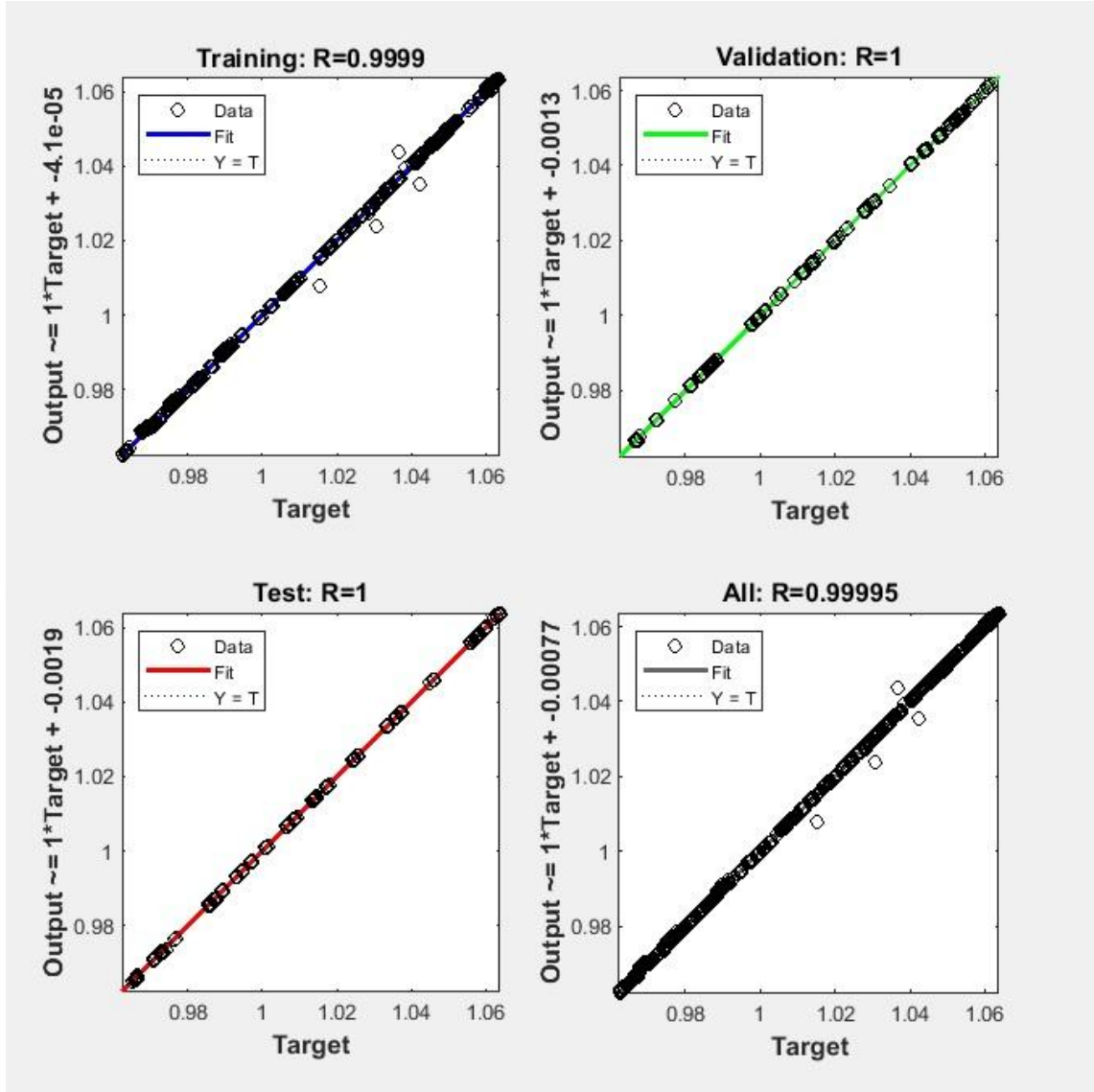
		Δe						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
e	NB	B	B	B	O	O	K	S
	NO	B	B	O	O	K	S	K
	NK	B	O	O	K	S	K	O
	S	O	O	K	S	K	O	O
	PK	O	K	S	K	O	O	B
	PO	K	S	K	O	O	B	B
	PB	S	K	O	O	B	B	B

Şekil 4.39. Kp çıkış sinyaline ait bulanık mantık kuralları tablosu

		Δe						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
e	S_1	PB	PB	PO	PO	PK	PK	S
	S_2	PB	PO	PO	PK	PK	S	NK
	S_3	PO	PO	PK	PK	S	NK	NK
	S_4	PO	PK	PK	S	NK	NK	NO
	S_5	PK	PK	S	NK	NK	NO	NO
	S_6	PK	S	NK	NK	NO	NO	NB
	S_7	S	NK	NK	NO	NO	NB	NB

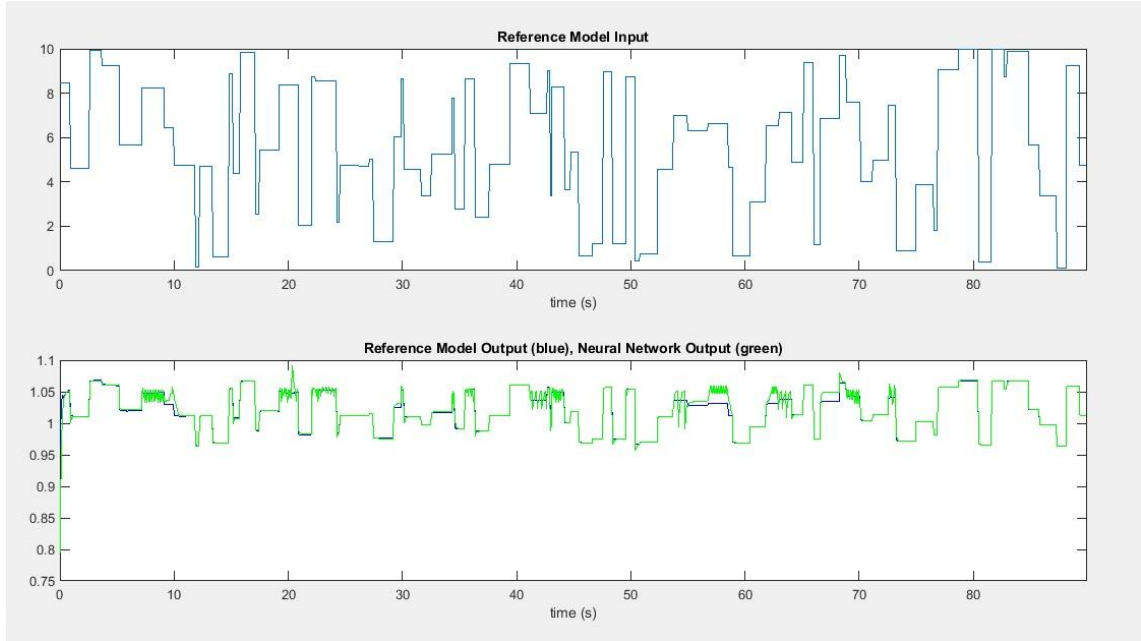
Şekil 4.40. Ki çıkış sinyaline ait bulanık mantık kuralları tablosu

Matlab/Simulink programı içerisindeki kütüphaneden Deep Learning Toolbox içerisinde bulunan Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör bloğu (Neural Network Model Reference Controller) kullanılarak önce tesis modeli tanımlaması/eğitimi yapılmıştır. Uygun giriş değerleri verilerek elde edilen regresyon sonuçları ekranı Şekil 4.41’de gösterilmiştir. Tanımlama verilerinin %50’si eğitim, %25’i doğrulama, %25’i ise test verileri olarak kullanılmıştır.

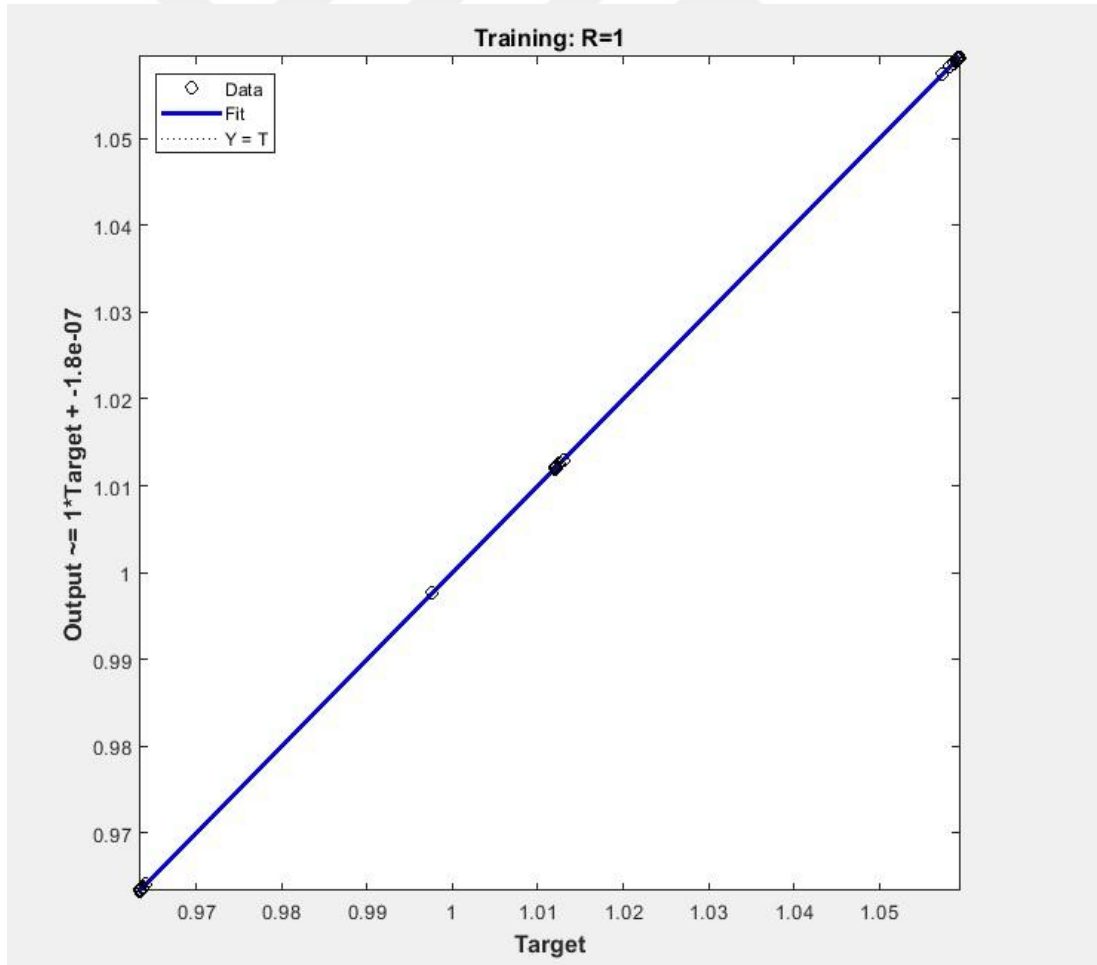


Şekil 4.41. Tesis modeli tanımlaması sonrası elde edilen regresyon sonuçları ekranı

Tesis modeli tanımlaması/eğitimi sonrası SAMRK'nın uygun referans modeli giriş değerleri kullanılarak eğitimi yapılmıştır. Sistemin ürettiği rastgele referans modeli girişlerine göre elde edilen çıkış sonuçları ekranı Şekil 4.42'de gösterilmiştir. Yeşil renkte gösterilen sinir ağı tesis modeli çıktısının mavi renkte gösterilen referans modeli çıktısını takip ettiği görülmektedir. Elde edilen regresyon sonuçları ekranı ise Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.42. Referans modeli girişlerine göre elde edilen çıkış sonuçları ekranı



Şekil 4.43. SAMRK'nın eğitimi sonrası elde edilen regresyon sonuçları ekranı

4.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyon uygulamalarının içeriği bir özet halinde Çizelge 4.3'te verilmiştir. Senaryo 1 uygulaması, Şekil 3.9'da verilen KÇEGKS blok diyagramında da görüldüğü gibi tek tip üretim kaynağının bulunduğu bir uygulamadır. Senaryo 1'de kullanılan sistem parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sistemde kontrolör olarak ise Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanılmıştır. Senaryo 1 uygulamasında ayrı ayrı kullanılan kontrolör yapılarının performansları karşılaştırıldığında ise SAMRK'nın daha başarılı olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

Senaryo 2'den Senaryo 7'ye kadar olan uygulamalar ise Şekil 3.10'da verilen KÇEGKS blok diyagramında da görüldüğü gibi farklı tipte üretim kaynaklarının bulunduğu dağıtık bir sistem yapısının incelendiği uygulamalardır. Bu uygulamalarda kullanılan sistem parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Senaryo 2 uygulamasında, sistemde kontrolör olarak Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanılmıştır. Stabil olarak seyreden bir talep değişimi içeren Senaryo 2 uygulamasında ayrı ayrı kullanılan kontrol yapılarının performansları karşılaştırıldığında ise hız bakımından SAMRK'nın daha başarılı olduğu görülmektedir. Stabil sistem cevapları verme açısından ise SAMRK ile Klasik PI kontrolörün birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.

Senaryo 3, Senaryo 4, Senaryo 5, Senaryo 6 ve Senaryo 7 uygulamalarında ise sistemde kontrolör olarak Bulanık Mantık PI kontrolör ve SAMRK kullanılmıştır. Bu uygulamalarda olası zor koşullar karşısında yani ani ve sert artışlar/düşüşler içeren talep değişimleri durumunda sistemde ayrı ayrı kullanılan kontrolörlerin performansları gözlemlenmiştir. SAMRK kullanıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçların karşılaştırılması Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, kullanılan kontrolör yapılarından belirtilen performans kriterlerine göre elde edilen sonuçlar, tez çalışmasının önceki bölümlerindeki şekillerde gösterildiği gibi bir arada sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Çalışmada gerçekleştirilen uygulamaların özeti

Uygulama adı	Kullanılan KÇEGKS blok diyagramı	Kullanılan sistem parametreleri	Kullanılan kontrolör yapıları	Uygulanan talep türü
Senaryo 1	Şekil 3.9	Çizelge 4.1	Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör, Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK)	Sabit adım yük
Senaryo 2	Şekil 3.10	Çizelge 4.2	Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör, Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK)	Stabil seyreden
Senaryo 3	Şekil 3.10	Çizelge 4.2	Bulanık Mantık PI kontrolör, Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK)	1 defa ani talep artışı içeren
Senaryo 4	Şekil 3.10	Çizelge 4.2	Bulanık Mantık PI kontrolör, Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK)	2 defa ani talep artışı içeren
Senaryo 5	Şekil 3.10	Çizelge 4.2	Bulanık Mantık PI kontrolör, Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK)	1 defa ani talep düşüşü içeren
Senaryo 6	Şekil 3.10	Çizelge 4.2	Bulanık Mantık PI kontrolör, Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK)	2 defa ani talep düşüşü içeren
Senaryo 7	Şekil 3.10	Çizelge 4.2	Bulanık Mantık PI kontrolör, Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK)	1 defa ani talep düşüşü, 1 defa ani talep artışı içeren

Çizelge 4.4. Çalışmada elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Performans Kriteri		S/D>1 olma zamanı (saat)	Yerleşme zamanı (saat)	Yükselme zamanı (saat)	Kalıcı durum hatası	Fiyat tepe değeri (birim)	Stabil fiyat değerine oturma zamanı (saat)	Stabil fiyat değeri (birim)
Senaryo 1	Klasik PI Kontrolör	2,857	3,172	0,345	1.10 ⁻⁶	0,5125	3,304	0,256
	Bulanık Mantık PI Kontrolör	2,856	2,967	0,676	27.10 ⁻⁶	0,471	2,858	
	SAMRK	2,085	2,407	0,061	4.10 ⁻⁶	1,345	2,826	
Performans Kriteri		Maksimum S/D oranı	Minimum S/D oranı	Stabil süreçteki maksimum fiyat değeri (birim)		Stabil süreçteki minimum fiyat değeri (birim)		Ani talep artışı/düşüşü sürecindeki tepe/dip fiyat değeri (birim)
Senaryo 2	Klasik PI Kontrolör	1,0262	1,0229	6,234		5,883		-
	Bulanık Mantık PI Kontrolör	1,0351	1,0015	9,873		2,085		-
	SAMRK	1,0272	1,0232	6,264		5,855		-
Senaryo 3	Bulanık Mantık PI Kontrolör	1,0617	1,0005	9,897		2,073		7,346
	SAMRK	1,0272	1,0128	6,264		5,855		7,596
Senaryo 4	Bulanık Mantık PI Kontrolör	1,0617	1,0005	9,815	2,073	7,346		
						7,947		
	SAMRK	1,0272	1,0054	6,262	5,855	7,596 8,457		
Senaryo 5	Bulanık Mantık PI Kontrolör	1,0457	1,0012	9,925	1,550	5,183		
	SAMRK	1,0329	1,0232	6,266	5,840	5,211		
Senaryo 6	Bulanık Mantık PI Kontrolör	1,0476	1,0012	9,925	1,550	5,183		
						4,983		
	SAMRK	1,0368	1,0232	6,266	5,840	5,211 4,863		
Senaryo 7	Bulanık Mantık PI Kontrolör	1,0617	1,0012	9,931	1,550	5,183		
						7,344		
	SAMRK	1,0329	1,0128	6,266	5,830	5,211 7,596		

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektrik güç sistemlerinde akıllı şebeke teknolojisi ile birlikte müşterilerin talepleri doğrultusunda enerji üretim kaynaklarının üretim miktarlarını ayarlayarak etkin bir yük dengesi yönetimini gerçekleştirmesi incelenmiştir. Yük dengesi oluşturulurken hem tedarikçinin kârı hem de müşterinin en cazip fiyata elektrik enerjisini kullanması gerekliliği bakış açısıyla elektrik fiyatlandırmasının optimizasyonu yapılmıştır.

Yük dengesi ve fiyatlandırma gerçekleştirilirken talep-arz dengesi ve elektrik enerjisi fiyatının ortak noktada bulunduğu bir KÇEGKS Modellemesi kullanılmıştır. Kullanılan modellemede müşterilerin değişen taleplerine karşılık üretim sistemlerinin verdiği dinamik fiyatlandırmaya bağlı üretim cevapları değerlendirilmiştir. KÇEGKS Modellemesi hem tek tip üretim kaynaklı sistemler hem de farklı tipte üretim kaynaklarının bulunduğu kompleks sistemler olarak kullanılmıştır.

Akıllı şebeke teknolojisi ruhuna uygun olarak kullanılan otomatik kontrol modellemesinde talep-arz-fiyat dengesi 3 farklı kontrolör yapısı ile sağlanmıştır. Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK) yapılarının değişen talep koşullarına göre kendini ayarladığı ve optimizasyonu sağladığı gözlemlenmiştir. Değişen talep koşullarını içeren 7 farklı talep senaryosunun kullanıldığı çalışmada aynı talep değişim senaryosu için farklı kontrolör yapıları ayrı ayrı uygulanmak suretiyle performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda seçilen performans kriterlerine göre kıyaslama yapılarak avantajlar ve dezavantajlar belirlenmiştir. Senaryo 1 olarak adlandırılan uygulamada tek tip üretim kaynaklı bir sistemde, Senaryo 2 olarak adlandırılan uygulamada ise farklı tipte üretim kaynaklarının bulunduğu bir sistemde Klasik PI kontrolör, Bulanık Mantık PI kontrolör ve Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK) kullanılmıştır. Senaryo 3, Senaryo 4, Senaryo 5, Senaryo 6 ve Senaryo 7 olarak adlandırılan uygulamalarda ise yine farklı tipte üretim kaynaklarının bulunduğu bir sistemde bu kez sadece Bulanık Mantık PI kontrolör ve Sinir Ağı Modeli Referans kontrolör (SAMRK) kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan senaryolar incelendiğinde, ani talep artışları ya da ani talep düşüşleri gibi olası zor koşullara karşı da talep-arz-fiyat dengesinin sağlandığı görülmektedir.

Sonuç olarak; akıllı şebeke elektrik güç sistemlerinde dinamik fiyatlandırma ile yük dengesinin sağlanması sistem kararlılığını artıran ve fiyat istikrarını oluşturan önemli bir unsurdur. Böylece elektrik güç sistemlerinin kararlılığının ve sürekliliğinin artırılmasının yanı sıra elektrik enerji piyasası yönetiminin de daha güvenilir ve daha akıllı olacağı görülmüştür.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik, bu çalışmada kullanılan KÇEGKS Modellemesine benzer bir yapının bir mikro şebekede deneysel olarak ta doğrulanması önerilebilir. Böylece uygulama esnasında oluşabilecek problemlerin gözlemlenerek incelenmesi sağlanmış olacaktır.



KAYNAKLAR

- Akcanca, M. A. ve Taşkın, S., 2013, Akıllı şebeke uygulanabilirliği açısından Türkiye elektrik enerji sisteminin incelenmesi, *Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, Ankara, 131-135.
- Akçin, M., Alagöz, B. B., Keleş, C., Karabiber, A. ve Kaygusuz A., 2013, Dağıtık kontrol ile akıllı şebekelerde geniş-alan yönetimi ve geleceğe dönük projeksiyonlar, *SAÜ. Fen Bil. Der.*, 17 (3), 457-470.
- Akkaş, Ö. P., Arıkan, Y. ve Çam, E., 2018, Elektrik piyasasında sanal güç santrali işletiminin optimizasyonu için modelleme önerisi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 10 (3), 12-19, DOI: <https://doi.org/10.29137/umagd.477839>
- Aksakal, A., Kılıçarslan, M., Lüy, M. and Çam, E., 2018, DSM recommendation for goverment offices: MNE application, *The Online Journal of Science and Technology*, 8 (1), 59-71.
- Alagoz, B. B., Kaygusuz, A., Akcin, M. and Alagoz, S., 2013, A closed-loop energy price controlling method for real-time energy balancing in a smart grid energy market, *Energy*, 59, 95-104, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.074>
- Alagöz, B. B. ve Kaygusuz, A., 2014, Kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrolör ile dinamik enerji fiyatı kontrolü ve akıllı şebekelerde otomatik enerji arz-talep dengelemesi uygulaması, *TOK 2014 Bildiri Kitabı*, Kocaeli, 535-539.
- Alagöz, B. B., 2015, Değişken üretim ve değişken talep koşullarında akıllı şebekelerde enerji dengeleme, Doktora Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya.
- Alagoz, B. B. and Kaygusuz, A., 2016, Dynamic energy pricing by closed-loop fractional-order PI control system and energy balancing in smart grid energy markets, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38 (5), 565-578, DOI: 10.1177/0142331215579949
- Albogamy, F. R., Zakria, M., Khan, T. A., Murawwat, S., Hafeez, G., Khan, I., Ali, F. and Khan, S., 2022, An optimal adaptive control strategy for energy balancing in smart microgrid using dynamic pricing, *IEEE Access*, 10, 37396-37411, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3164809
- Al-Mousa, A. and Faza, A., 2019, A fuzzy-based customer response prediction model for a day-ahead dynamic pricing system, *Sustainable Cities and Society*, 44, 265-274, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.014>
- Alquthami, T., Ghrayeb, A., Milyani, A. H., Awais, M. and Rasheed, M. B., 2021, An incentive based dynamic pricing in smart grid, *Sustainability*, 13, 6066, DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116066>

- Anonymous, 2003, Grid 2030: A national vision for electricity's second 100 years, Department of Energy Technical Report, United States.
- Anonymous, 2009, Report to NIST on the smart grid interoperability standards roadmap, Electric Power Research Institute, United States.
- Anonymous, 2011, Smart grids technology roadmap, International Energy Agency, Paris.
- Anonymous, 2023, Design Model-Reference Neural Controller in Simulink [online], R2023b, United States, <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-model-reference-neural-controller-in-simulink.html> [Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2023].
- Aslan, E., Beşli, N. ve Gümüşçü, A. 2017, İnşaat güneş enerjisi santrallerinin akıllı şebekelere entegrasyonu, *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 10 (2), 10-13.
- Athari, M. H. and Ardehali, M. M., 2016, Operational performance of energy storage as function of electricity prices for on-grid hybrid renewable energy system by optimized fuzzy logic controller, *Renewable Energy*, 85, 890-902, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.055>
- Ayan, O., 2017, Akıllı şebekeler kapsamında meskenlerde talep tarafı yönetimi ve enerji verimliliği, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Baghaee, H. R., Mirsalim, M., Gharehpetian, G. B. and Talebi, H. A., 2018, Generalized three phase robust load-flow for radial and meshed power systems with and without uncertainty in energy resources using dynamic radial basis functions neural networks, *Journal of Cleaner Production*, 174, 96-113, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.316>
- Baloğlu, U. B., 2017, Akıllı şebekelerde hesapsal yöntem uygulamaları, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Bicil, İ. M., 2015, Elektrik piyasasında fiyatlandırma ve Türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmini, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Balıkesir.
- Borlase, S., 2013, Smart Grids: Infrastructure, technology, and solutions, *CRC Press*, Pacific Northwest, 15-497.
- Bradley, T. H. and Frank, A. A., 2009, Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 115-128, DOI: 10.1016/j.rser.2007.05.03
- Cebeci, S., 2017, Türkiye' de güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyelinin değerlendirilmesi, Uzmanlık Tezi, *T.C. Kalkınma Bakanlığı İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü*, Ankara.

- Çiçek, N., 2013, Demand response and supply optimization in smart grids with renewable energy sources, Master of Science Thesis, *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- De Santis, E., Rizzi, A., Sadeghian, A. and Mascioli, F. M. F., 2013, Genetic optimization of a fuzzy control system for energy flow management in micro-grids, *IEEE*, 418-423.
- Dinçer, İ., 2019, Rüzgar enerjisi teknolojileri raporu, *Türkiye Bilimler Akademisi No:28, Ankara*.
- Dönmez, M., 2014, Akıllı şebekeler ve üretim ile entegre sistem işletimi, *ICSG İstanbul 2014*, İstanbul, 237-243.
- Eissa, M. M., 2018, First time real time incentive demand response program in smart grid with “i-Energy” management system with different resources, *Applied Energy*, 212, 607-621, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.043>
- Elma, O., 2016, Akıllı şebekeler için yeni bir ev enerji yönetim algoritmasının geliştirilmesi ve uygulanması, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Faia, R., Pinto, T. and Vale, Z., 2016, Dynamic fuzzy clustering method for decision support in electricity markets negotiation, *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*, 5 (1), 23-35.
- Faruqui, A. and Sergici, S., 2009, Household response to dynamic pricing of electricity- A survey of the experimental evidence, *The Brattle Group Report, United States*.
- Gaba, M. and Chanana, S., 2021, Comparative analysis of dynamic pricing schemes in distributed energy management of residential users in smart grid, *Journal of Energy Systems*, 5 (4), 336-364, DOI: 10.30521/jes.973307
- Hadjsaid, N. and Sabonnadiere, J. C., 2012, Smart grids, *Wiley-ISTE*, New Jersey, 1-31.
- He, J., Zhao, C., Cai, L., Cheng, P. and Shi, L., 2018, Practical closed-loop dynamic pricing in smart grid for supply and demand balancing, *Automatica*, 89, 92-102, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.11.011>
- Hertrampf, F., Apel, S. and Späthe, S., 2018, Requirements and architecture concept for a data processing system in local area smart grid, *Journal of Electrical Engineering*, 6, 1-10, DOI: 10.17265/2328-2223/2018.01.001
- Hu, W., Chen, Z., Bak-Jensen, B. and Hu, Y., 2014, Fuzzy adaptive particle swarm optimisation for power loss minimisation in distribution systems using optimal load response, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8 (1), 1-10, DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0745

- Kakran, S. and Chanana, S., 2018, Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 524-535, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.045>
- Karabiber, A., 2015, Akıllı şebeke uygulamalarında kullanılan muhtelif enerji kaynaklarının doğru akım üzerinden güç entegrasyonu, Doktora Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya.
- Karamanlı, C., 2017, Optimal scheduling in smart grids with prediction error probability limitation, Master of Science Thesis, *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Karyeyen, A., 2009, Çok bölgeli elektrik güç sistemlerinde optimum yük frekans kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Karyeyen, A. and Cetinkaya, N., 2023a, Ensuring energy balance for sudden demand changes in smart grids, *International Journal of Energy Studies*, 8 (1), 49-73, DOI: 10.58559/ijes.1266296
- Karyeyen, A. ve Çetinkaya, N., 2023b, Akıllı elektrik şebekelerinde yük dengesinin sağlanması, *7. Uluslararası Göbeklitepe Bilimsel Çalışmalar Kongresi*, Şanlıurfa, 358-372.
- Kaygusuz, A., 2019, Closed loop elastic demand control by dynamic energy pricing in smart grids, *Energy*, 176, 596-603, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.036>
- Keleş, C., 2017, Akıllı şebekelerde yenilenebilir enerji üretimine sahip akıllı evlerin enerji ve yük yönetimi, Doktora Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya.
- Keshtkar, A. and Arzanpour, S., 2017, An adaptive fuzzy logic system for residential energy management in smart grid environments, *Applied Energy*, 186, 68-81, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.028>
- Khalid, R., Javaid, N., Rahim, M. H., Aslam, S. and Sher, A., 2019, Fuzzy energy management controller and scheduler for smart homes, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 21, 103-118, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.11.010>
- Kyriakarakos, G., Piromalis, D. D., Dounis, A. I., Arvanitis, K. G. and Papadakis, G., 2013, Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids, *Applied Energy*, 103, 39-51, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.011>
- Lu, R., Hong, S. H. and Zhang, X., 2018, A dynamic pricing demand response algorithm for smart grid: Reinforcement learning approach, *Applied Energy*, 220, 220-230, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.072>

- Mansiri, K., Sukchai, S. and Sirisamphanwong, C., 2018, Fuzzy control algorithm for battery storage and demand side power management for economic operation of the smart grid system at Naresuan University, Thailand, *IEEE Access*, 6, 32440-32449, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2838581
- Nikham, T., Golestaneh, F. and Malekpour, A., 2012, Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm, *Energy*, 43, 427-437, DOI: 10.1016/j.energy.2012.03.064
- Panapakidis, I., Asimopoulos, N., Dagoumas, A. and Christoforidis, G. C., 2017, An improved fuzzy C-means algorithm for the implementation of demand side management measures, *Energies*, 10, 1407, DOI: 10.3390/en10091407
- Penner, P. F., 2010, Smart power: Climate change, the smart grid and the future of electric utilities, *Island Press, Washington DC*, 44.
- Pereira, R., Fagundes, A., Melicio, R., Mendes, V. M. F., Figueiredo, J., Martins, J. and Quadrado, J. C., 2016, A fuzzy clustering approach to a demand response model, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 81, 184-192, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.02.032>
- Pluemer, S. A., 2022, Prospect-Theoretic demand response management in smart grid systems, Master of Science Thesis, *University of New Mexico Computer Engineering Department*, New Mexico.
- Shewale, A., Mokhade, A., Funde, N. and Bokde, N. D., 2020, An overview of demand response in smart grid and optimization techniques for efficient residential appliance scheduling problem, *Energies*, 13, 4266, DOI: 10.3390/en13164266
- Tao, L. and Gao, Y., 2020, Real-time pricing for smart grid with distributed energy and storage: A noncooperative game method considering spatially and temporally coupled constraints, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 115, 105487, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105487>
- Tsao, Y., Thanh, V. and Lu, J., 2019, Multiobjective robust fuzzy stochastic approach for sustainable smart grid design, *Energy*, 176, 929-939, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.047>
- Uyar, O., 2019, Elektrikli bisikletler için akıllı güç destek ünitesi tasarımı ve gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Ünsal Çelimli, D. B., 2018, Controlling the distributed energy resources using smart grid communication technologies, Ph.D. Thesis, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

- Wen, L., Zhou, K., Feng, W. and Yang, S., 2022, Demand side management in smart grid: A dynamic-price-based demand response model, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1-10, DOI: 10.1109/TEM.2022.3158390
- Yapıcı, H., 2019, Yenilenebilir enerji kaynaklarının akıllı şebekelere entegrasyonu için yeni bir optimizasyon metodunun geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Zadeh, L. A., 1965, Fuzzy sets, *Information and Control*, 8, 338-353.

