

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

**AKILLI ŞEBEKELERDE GERÇEK ZAMANLI DİNAMİK ENERJİ
FİYATLANDIRMA YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zehva YALÇINÖZ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

KASIM 2022

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

**AKILLI ŞEBEKELERDE GERÇEK ZAMANLI DİNAMİK ENERJİ
FİYATLANDIRMA YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Zehva YALÇINÖZ
(36193615079)**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

KASIM 2022

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ'a,

Bilgi ve tecrübeleri ile yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV, Sayın Prof. Dr. Nusret TAN, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Furkan Nur DENİZ başta olmak üzere İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü tüm hocalarıma,

Özveriyle yardımını hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan İnönü Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Barış Baykant ALAGÖZ'e, Cumhuriyet Üniversitesi Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ŞEKER'e,

Çalışmalarında ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince benden her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen canım babam Bahadır YALÇINÖZ'e, canım annem Songül YALÇINÖZ'e ve sevgili aileme,

Çalışmalarında her zaman bana manevi destek olan arkadaşım Sayın Muhammed Şamil GÜRKAN'a, Sayın Arş. Gör. Sevgi GÜRSUL'a en içten duygularıyla

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Akıllı Şebekelerde Gerçek Zamanlı Dinamik Enerji Fiyatlandırma Yöntemleri” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Zehva YALÇINÖZ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Kaynak Taraması.....	6
1.2 Tezin Amaç ve Kapsamı.....	14
2. KONU İLE İLGİLİ KURAMSAL TEMELLER	16
2.1 Klasik ve Akıllı Şebeke Kavramlarına Genel Bakış	16
2.2 Akıllı Şebeke Kazanımı.....	17
2.3 Akıllı Şebeke Bileşenleri	22
2.4 Talep Tarafı Yönetim	24
2.4.1 Talep yanıtı (TY).....	26
2.5 Enerji Fiyatlandırma Tarifeleri.....	27
2.5.1 Tek zamanlı (sabit fiyatlı) tarife	28
2.5.2 Üç zamanlı tarife	28
2.5.3 Dinamik fiyatlandırma planları	28
2.5.3.1 Kullanım süresi planı (ToU).....	28
2.5.3.2 Kritik tepe fiyatlandırma (CPP) planı.....	29
2.5.3.3 Gerçek zamanlı fiyatlandırma (RTP) planı	30
2.6 Türkiye Elektrik Piyasasına Genel Bakış	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM	34
3.1 Materyal.....	34
3.1.1 Birinci dereceli sistemlerin davranışları	34
3.1.2 İkinci dereceli sistemlerin davranışları.....	37
3.1.3 Kontrolör yapı taşları.....	39
3.2 Yöntem	41
3.2.1 Ziegler-Nichols PID parametreleri ayarlama yöntemi	41
3.2.2 Kutup yerleştirme yöntemi	44
3.2.3 Optimizasyon algoritmaları ile kontrol parametrelerinin belirlenmesi	44
3.2.3.1 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO).....	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	48
4.1 Akıllı Şebekelerde Kutup Yerleştirme Metodu Kullanarak Dinamik Fiyatlandırma Kontrolü.....	56
4.1.1 Doğal frekans değişiminin fiyatlandırma üzerindeki etkisi.....	56
4.1.2 Sönüm oranının değişiminin fiyatlandırma üzerindeki etkisi	63
4.2 Ziegler-Nichols Metodu ile Kapalı Döngü Fiyat Sinyallerinin Kontrolü	68
4.2.1 Termik sisteme verilen gecikme ile kontrolör parametrelerinin hesaplanması..	71

4.2.2 Güneş ve hidrolik sistemlerine verilen gecikme ile kontrolör parametrelerinin hesaplanması.....	78
4.2.3 Rüzgar sistemine verilen gecikme ile kontrolör parametrelerinin hesaplanması	86
4.3 PSO Algoritması ile Elde Edilen Enerji Fiyat Sinyalleri	91
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKÇA.....	103
EKLER	111
ÖZGEÇMİŞ	112



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Akıllı şebeke ile klasik şebeke mimarisinin karşılaştırılması	20
Çizelge 2.2: FDTY programlarının karşılaştırılması.	32
Çizelge 3.1: Basamak yanıtı Ziegler-Nichols yöntemi.	42
Çizelge 3.2: Ziegler-Nichols frekans yanıtı parametre belirleme tablosu.....	43
Çizelge 4.1: 50 GW kurulu güce sahip üretim simülasyon parametreleri 1.	52
Çizelge 4.2: 50 GW kurulu güce sahip üretim simülasyon parametreleri 2.	53
Çizelge 4.3: Doğal frekans değişimi ile bulunan PID kontrolör değerleri ($\zeta = 0.6, \tau = 0.31$ saat).	58
Çizelge 4.4: Doğal frekans değişimi ile bulunan PID kontrolör değerleri ($\zeta = 0.6, \tau = 0.084$ saat).	61
Çizelge 4.5: Doğal frekans değişimi ile bulunan PID kontrolör değerleri ($\zeta = 0.6, \tau = 0.052$ saat).	61
Çizelge 4.6: PID kontrolör için hesaplanan parametreler ve denklemin kök değerleri.	64
Çizelge 4.6 (devam): PID kontrolör için hesaplanan parametreler ve denklemin kök değerleri.	65
Çizelge 4.7: Termik santrali transfer fonksiyonuna ait Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan kontrolör değerleri.	75
Çizelge 4.8: Hidrolik ve güneş santrali transfer fonksiyonuna ait Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan kontrolör değerleri.	81
Çizelge 4.9: Rüzgar santrali transfer fonksiyonuna ait Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan kontrolör değerleri.	88
Çizelge 4.10: PSO algoritması için gerekli parametre değerleri.	94
Çizelge 4.11: PSO ile elde edilen sistem kontrolör parametreleri.	95
Çizelge 4.12: PSO ile elde edilen gecikmesiz sistem PID kontrolör parametre değerleri. .	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Akıllı şebeke altyapı katmanları.	4
Şekil 1.2: Fiyat modeli blok diyagramı.	10
Şekil 2.1: Klasik şebeke mimarisi örneği.	16
Şekil 2.2: Akıllı şebeke donanım ve teknoloji katmanları.	19
Şekil 2.3: NIST akıllı şebeke mimarisi.	22
Şekil 2.4: Akıllı şebeke teknolojileri.	24
Şekil 2.5: TTYE stratejileri, a) yük kayması, b) vadi doldurma, c) tepe kesme, d) talep tasarrufu, e) stratejik talep büyümesi.	24
Şekil 2.6: Akıllı şebekelerde TTYE için hiyerarşik model.	25
Şekil 2.7: TY grupları.	26
Şekil 2.8: ToU fiyatlandırma planı.	29
Şekil 2.9: CPP fiyatlandırma planı.	30
Şekil 2.10: RTP fiyatlandırma planı.	31
Şekil 3.1: 1. derece sistemlerin basit blok diyagramı ile gösterimi.	34
Şekil 3.2: Denklem 3.1 ile gösterilen sistemin birim impuls cevabı.	35
Şekil 3.3: (a), (b) üç parametreye (K, L, T) sahip sistemin basamak yanıt grafiği.	36
Şekil 3.4: 2. dereceden sistemin birim basamak cevap eğrileri.	38
Şekil 3.5: Geçici ve kalıcı hal cevap birim basamak yanıt eğrisi.	38
Şekil 3.6: Geri beslemeli blok şeması.	39
Şekil 3.7: S şekilli tepki eğrisi.	42
Şekil 3.8: Genel PSO akış diyagramı.	47
Şekil 4.1: Denge fiyatı noktası ve arz (üretim)-talep grafiği.	48
Şekil 4.2: Dinamik enerji fiyatlandırması için kapalı çevrim PID blok diyagramı simülasyon modeli.	50
Şekil 4.3: 24 Saatlik değişken talep eğrisi senaryosu.	54
Şekil 4.4: 24 Saatlik toplam üretim eğrisi senaryosu.	54
Şekil 4.5: Toplam üretim ve talep eğrisi.	55
Şekil 4.6: Çok kaynaklı üretim profilleri; a) termik santral, b) hidroelektrik santral, c) rüzgar santrali ve d) güneş santrali.	56
Şekil 4.7: ω_n değişimi ile elde edilen dinamik fiyat sinyalleri; a) $\omega_n = 1 \text{ rad/sa}$, b) $\omega_n = 4 \text{ rad/sa}$, c) $\omega_n = 16 \text{ rad/sa}$ ($\zeta = 0.6, \tau = 0.31 \text{ saat}$).	59
Şekil 4.8: $\omega_n = 4 \text{ rad/sa}$ olduğu durum için dinamik fiyat eğrisinin geçici hal cevabı ($\tau = 0.31 \text{ saat}$).	60
Şekil 4.9: $\omega_n = 4 \text{ rad/sa}$ kutup yerleştirme ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyalleri; a-b) $\tau = 0.084$ saat yakınlaştırılmış sinyal ve geçici hal cevabı c-d) $\tau = 0.052$ saat yakınlaştırılmış sinyal ve geçici hal cevabı.	62
Şekil 4.10: ζ değişim durumlarına göre hesaplanan kök konumları.	65
Şekil 4.11: $\zeta = 0$ durumu dinamik fiyat sinyali.	66
Şekil 4.12: $\zeta = 0.5$ durumu dinamik fiyat sinyali.	67
Şekil 4.13: $\zeta = 1$ durumu dinamik fiyat sinyali.	67
Şekil 4.14: $\zeta = 2$ durumu dinamik fiyat sinyali.	68
Şekil 4.15: Termik santral için kritik frekans değeri.	72
Şekil 4.16: Termik santrali transfer fonksiyonuna ait bode diyagramı.	73
Şekil 4.17: Termik santrali transfer fonksiyonuna ait nyquist diyagramı.	74
Şekil 4.18: Termik santral 0.1 saat gecikmeli üretim.	76
Şekil 4.19: 1. transfer fonksiyonu için elde edilen PID kontrolörlü dinamik enerji fiyat eğrisi.	76

Şekil 4.20: 1. transfer fonksiyonu için elde edilen PD kontrolörlü dinamik enerji fiyat eğrisi.	77
Şekil 4.21: 1. transfer fonksiyonu için elde edilen PI kontrolörlü dinamik enerji fiyat eğrisi.	77
Şekil 4.22: Termik sistem için talebin karşılanma oranı.	78
Şekil 4.23: Güneş ve hidrolik santral için kritik frekans değerinin matlab çözümü.	79
Şekil 4.24: Güneş ve hidrolik santrallerinin transfer fonksiyonuna ait bode diyagramı.	80
Şekil 4.25: Güneş ve hidrolik santrallerinin transfer fonksiyonuna ait nyquist diyagramı.	80
Şekil 4.26: Hidroelektrik santral 0.1 saat gecikmeli üretim.	82
Şekil 4.27: Hidrolik sistem için talebin karşılanma oranı.	82
Şekil 4.28: 2. transfer fonksiyonu PID kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.	83
Şekil 4.29: 2. transfer fonksiyonu PI kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.	84
Şekil 4.30: 2. transfer fonksiyonu PD kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.	84
Şekil 4.31: Hidrolik ve güneş sisteminde PD kontrolör ile talebin karşılanmama grafiği.	85
Şekil 4.32: PD kontrolör kullanılması durumunda oluşan enerji yetersizliği grafiği.	85
Şekil 4.33: Rüzgar santral için kritik frekans değerinin matlab çözümü.	86
Şekil 4.34: Rüzgar santrallerinin transfer fonksiyonuna ait bode diyagramı.	87
Şekil 4.35: Rüzgar santrallerinin transfer fonksiyonuna ait nyquist diyagramı.	87
Şekil 4.36: Rüzgar santrali 0.1 saat gecikmeli üretim.	89
Şekil 4.37: 3. transfer fonksiyonu PID kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.	89
Şekil 4.38: 3. transfer fonksiyonu PI kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.	90
Şekil 4.39: 3. transfer fonksiyonu PD kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.	90
Şekil 4.40: Rüzgar santrali için talebin karşılanma oranı.	91
Şekil 4.41: PSO akış diyagramı.	93
Şekil 4.42: PSO fiyat analizi matlab/simulink modeli.	94
Şekil 4.43: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı fiyat eğrisi (PI kontrolör).	95
Şekil 4.44: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı fiyat eğrisi (PD kontrolör).	96
Şekil 4.45: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı talebin karşılanma oranı (PD kontrolör).	97
Şekil 4.46: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı fiyat eğrisi (PID kontrolör).	98
Şekil 4.47: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı talebin karşılanma oranı (PID kontrolör).	98
Şekil 4.48: Kutup yerleştirme yöntemi ve PSO değerlerinin karşılaştırılması.	99
Şekil 4.49: Gecikmesiz sistemde talebin karşılanma oranının PSO ile karşılaştırılması.	100

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

APSO	: Anti parçacık sürü optimizasyonu
BPM	: Dengeleme güç piyasası
CPP	: Kritik tepe fiyatlandırma
DAM	: Gün öncesi piyasası
FDTY	: Fiyata dayalı talep yanıtı
FOPD	: Kesir dereceli oransal-türev
FOPI	: Kesir dereceli oransal-integral
FOPID	: Kesir dereceli oransal-integral-türev
IDM	: Gün içi piyasası
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisler Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineer)
NIST	: Ulusal standartlar ve teknoloji enstitüsü
PD	: Oransal-türev
PI	: Oransal-integral
PID	: Oransal-İntegral-Türev
PSH	: Pompa depolamalı hidroelektrik
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
RTP	: Gerçek zamanlı fiyatlandırma
ToU	: Kullanım süresi
TTY	: Talep tarafı yönetim
TTYT	: Talep tarafı yük yönetimi
TY	: Talep yanıtı
YEK	: Yenilenebilir enerji kaynakları
YSA	: Yapay sinir ağı
YT	: Yük tahmini
C_{max}	: Maksimum kurulu enerji kapasitesi
D_s	: Sanal talep
G_i	: i. kaynak türünün zaman içerisindeki üretimi
K_c	: Kritik kazanç
P_{cr}	: Sürekli salınım periyodu
$S_T(s)$: Enerji kaynaklarından yapılan toplam üretim
$S_d(p)$: Enerji üretim modeli/Enerji satış eğilimi
T_c	: Kritik periyot

T_d	: Türev zaman sabiti
T_i	: İntegral zaman sabiti
V_0^i	: Başlangıç hız
X_t^{gbest}	: En iyi global değişken
$X_t^{i,pbest}$: En iyi yerel konum
X_0^i	: Başlangıç konum
a_i	: Polinom katsayıları
c_1, c_2	: Öğrenme faktörleri
k_d	: Türev kazancı
k_i	: İntegral kazancı
k_p	: Oransal kazanç
p_0	: Üretim maliyeti
t_d	: Gecikme zamanı
t_r	: Yükselme zamanı
τ_i	: i. üretim kaynağının zaman sabiti
ω_c	: Kesim frekansı
ω_n	: Doğal frekans
$C(s)$: Çıkış sinyali
D	: Toplam talep
$G(s)$: Kapalı döngü transfer fonksiyonu
L	: Sistem gecikmesi (ölü zaman)
N	: Enerji miktarı
$P(s)$: PID kontrolör genel transfer fonksiyonu
Q	: Fiyat denge noktası
$R(s)$: Giriş sinyali
S	: Toplam üretim/arz
$T(s)$: 2. dereceli sistemin transfer fonksiyonu
$V(t)$: Hız vektörü
$X(t)$: Pozisyon vektörü
d	: Polinom derecesi
e	: Denge hata fonksiyonu
$e(t)$: Kontrol hatası sinyali
p	: Enerji fiyatı/Kontrol fiyat sinyali
$r(t)$: Referans giriş sinyali

$u(t)$: Kontrol değişkeni sinyali
 w : Atalet ağırlığı
 $y(t)$: ıkış değer değişkeni sinyali
 β : Sanal talep oranı
 ζ : Sönüm oranı
 τ : Zaman sabiti



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKILLI ŞEBEKELERDE GERÇEK ZAMANLI DİNAMİK ENERJİ FİYATLANDIRMA YÖNTEMLERİ

ZEHVA YALÇINÖZ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

112+XII sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Günlük temel ihtiyaçların değişmesi ve kullanıcıların teknolojik gelişmelere uyum sağlama çabaları nedeniyle enerji talebi giderek artmakta ve bu durum mevcut şebeke yapılarını etkilemektedir. Artan enerji talebi ya yeni üretim tesislerinin kurulmasına ya da dış ülkelere olan enerji bağımlılığının artmasına sebep olmaktadır. Bu durumlar ekonomiyi olumsuz etkileyebileceği gibi, yeni santrallerde fosil yakıtların kullanılmasıyla küresel ısınmanın artmasına neden olan sera gazı miktarını da etkileyebilir. Bu sebeplerden dolayı akıllı şebeke kazanımı kavramı ortaya çıkmıştır. Akıllı şebekeye entegrasyonu daha kolay olan yenilenebilir enerji kaynakları ise mevcut duruma alternatif oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı üretimi ve değişken talep dalgalanmalarına karşı enerjide verim sağlamak adına dinamik enerji fiyatlandırma işlemleri talep tarafı yük yönetimi başlığıyla önemli gelişmelerin önünü açmaktadır.

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsiz üretimini ve kullanıcı tüketimini kontrol etmek için kapalı döngü kontrol tekniği kullanılmıştır. Bu şekilde gerçek zamanlı bir enerji fiyatlandırma yaklaşımı önerilmiştir. Bu amaçla ilk olarak I. derece sistem modeli oluşturulmuş, ardından kutup yerleştirme ve Ziegler-Nichols frekans yanıt yöntemleri kullanılarak kontrolör parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu kontrolör parametreleri, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile elde edilen kontrolör parametreleri ile karşılaştırılmış ve uygun olan parametreler seçilmiştir. Seçilen bu parametreler kullanılarak birinci dereceden sistem için enerji fiyat sinyalleri elde edilmiştir. Gerçek zamanlı dinamik enerji fiyatlandırmanın, hem esnek talep kontrolüne hem de dalgalı üretime anında yanıt vermek için etkili olduğunun kanısına varılmıştır. Simülasyon sonuçları, kontrolör kullanılarak gerçekleştirilen dinamik enerji fiyatlandırma işlemlerinin enerjide denge oluşturarak verim sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kontrolör tabanlı dinamik enerji fiyatlandırma, enerji dengesi, yenilenebilir enerji entegrasyonu, parçacık sürü optimizasyonu.

ABSTRACT

Master Thesis

REAL-TIME DYNAMIC ENERGY PRICING METHODS IN SMART GRIDS

ZEHVA YALÇINÖZ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

112+XII sayfa

2022

Supervisor: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

The energy demand is gradually increasing due to the change in the daily essential needs and efforts of the users to adapt to technological developments and this situation affects the existing grid structures. Increasing energy demand causes either the establishment of new production facilities or an increase in foreign dependency on energy. These situations may adversely affect the economy and may also affect the amount of greenhouse gases that cause global warming to increase with the use of fossil fuels in new power plants. For these reasons, the concept of smart grid gain has emerged. Renewable energy sources, which are easier to integrate into the smart grid, are an alternative to the current situation. In order to provide energy efficiency against fluctuating production of renewable energy resources and variable fluctuations in demand, the dynamic processes of energy prices lead to important developments under the title of demand side load management.

In this study, closed-loop control techniques were utilized to control the uncertain production of renewable energy sources and user consumption. In this way, a real-time energy pricing approach was proposed. For this purpose, a first-order system was established, and then the controller parameters were calculated using the Ziegler-Nichols frequency response and the pole placement methods. These calculated controller parameters were compared with the controller parameters, which were obtained with Particle Swarm Optimization (PSO), and the appropriate ones were selected parameters. Energy price signals were obtained by using these selected parameters for the first-order system. It has been concluded that real-time dynamic energy pricing is effective for both flexible demand control and immediate response to fluctuating production. The simulation results demonstrate that the dynamic energy price processes using the controller provide efficiency by constructing an energy balance.

Keywords: Controller-based dynamic energy pricing, energy balance, renewable energy integration, particle swarm optimization.

1. GİRİŞ

Günümüz koşullarının getirdiği yaşam standartlarında olan zorluklar insanoğlunu, çağlar boyunca ısınma-soğutma, aydınlatma, ulaşım sektöründen turizm ve birçok sektörlere kadar hayatının her aşamasında enerjiye bağımlı hale getirmiştir. Enerji, insanoğlunun bu kadar hayati ihtiyaçlarını karşılamanın yanı sıra bir ülke için de sosyal, kültürel, çevresel ve ekonomik açıdan gelişmesinde de çok önemli bir faktör olmuştur.

Elektrik şebekeleri ekonomik, sosyal ve toplumsal kalkınmanın temel zeminini oluşturmaktadır. Elektrik kullanımları ve ekonomik gelişme arasındaki bağlantı 4 temel grup ile incelenmektedir. Bu gruplar nedensellik üzerine yapılan çalışmalar olup; i) nedenselliğin olmadığı, ii) ekonomik gelişmeden elektrik kullanımına tek yönlü nedenselliğin olduğu, iii) elektrik kullanımından ekonomik gelişmeye tek yönlü nedenselliğin olduğu ve iv) ekonomik gelişme ile elektrik kullanımı arasında çift yönlü nedenselliğin olduğu araştırma gruplarıdır (Apergis ve Payne, 2009; Öztürk, 2010). Enerjinin sağlıklı bir şekilde üretimi, iletimi ve dağıtılmasından sorumlu şebekelerin tüm bunları hızlı, az kayıpla ve kontrollü şekilde yapması gerekmektedir (Sun vd., 2011). Dünya genelinde ve Türkiye’de birbirine bağlanan uzun iletim hatlarından oluşan Enterkonnekte şebeke hatlarının herhangi bir kısmında meydana gelebilecek olan arıza tüm hattı etkileyeceği gibi ülke genelinde hatta diğer ülkelerde bile arıza oluşturabilmektedir. 31.03.2015 yılında Türkiye’de meydana gelen elektrik kesintisi (Anonim, 2015) ülke genelinde sıkıntılar oluştururken, Amerika Birleşik devletlerinde 2003 yılında meydana gelen elektrik kesintisi sebebiyle Kanada’da birçok kişi elektriksiz kalmıştır (Tanrıöven vd., 2011). Geleneksel elektrik şebekeleri (klasik şebekeler) en genel tanımıyla; çeşitli enerji üretim tesislerinde üretilen elektriğin voltaj seviyesinin artırılarak iletilmesini, daha sonrasında kontrollü bir şekilde bu gerilim seviyesinin düşürülerek gerekli seviyelere indirildikten sonra dağıtılmasını ve son kullanıcıya ulaşmasını sağlayan sistemlerdir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Bu şebekelerde enerji, nükleer veya fosil yakıt (kömür, petrol ve doğalgaz) olarak adlandırılan kaynaklar ile üretilmektedir (Erol-Kantarıcı ve Mouftah, 2011). Klasik şebekelere günümüz bazında bakıldığında yetersizlikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir ;

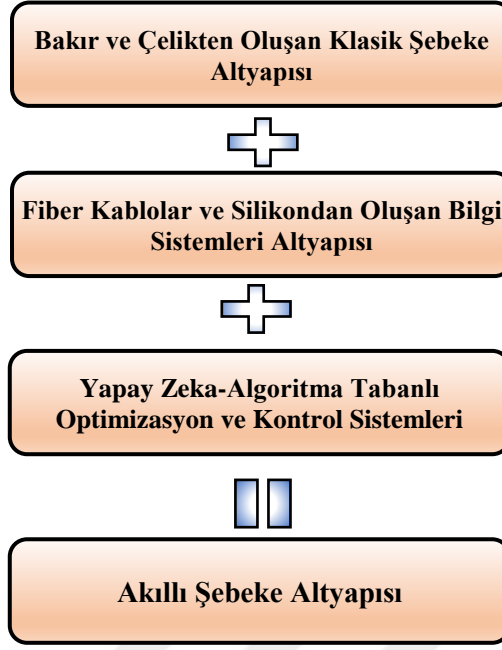
- Reaktif güç denetimlerinde çift yönlü enerji iletiminden dolayı sıkıntıların yaşanması,
- Çeşitli harmoniklerin oluşması ve bu harmoniklerin arzu edilen sınırları aşması,
- Anahtarlama olaylarından dolayı oluşan şebeke kararlılık sınırlarının değişmesi ve anlık devreye girme durumlarından etkilenip sınır değerlerini aşması,
- Aktif ve reaktif güç seviyelerinde değişimlerin meydana gelmesi,
- Şebeke kullanıcıları arasında çift yönlü ve gerçek zamanlı bilgi akışının olmaması (Mahmood vd., 2015),
- Sera gazı emisyonlarını artırması ve enerji depolamaya imkan sağlamaması (Güngör vd., 2011),
- Son olarak istenilen anda tüketicinin sistemi kontrol edemeyip zorluklar yaşaması gibi sebepler bu yetersizlikler arasında sıralanabilmektedir (Eldem, 2017; Tanrıöven vd., 2011).

Klasik şebekelerin bugünün ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmasından dolayı ortaya çıkan “Akıllı Şebeke” kavramı her geçen gün önem kazanmaktadır (Alagöz, 2015b). Akıllı şebekeler; üretici ve tüketici arasında tam otomasyonun sağlanması amacıyla kontrol sistemlerinin, akıllı sayaç ve bütünleştirilmiş haberleşme teknolojilerinin klasik şebekelere eklenerek, şebekelerin anlık olarak izlenmesini, gözlemlenmesini, güncellenmesini ve en önemlisi tüketicinin de üretken tüketici vasfıyla üretime katılarak şebeke içinde aktif olarak yer almasını sağlayan, kullanıcı güvenliğini ön planda tutan ağıdır (Alagöz ve Kaygusuz, 2014; Anonim, 2014; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Hâlihazırda bulunan klasik şebeke altyapısıyla üretime çok katılmayan tüketiciler, akıllı şebeke sistemiyle enerjiyi üretip satış eylemlerini gerçekleştirebilecek, dolayısıyla şebekede aktif rol sahibi olacaklardır (Alagöz, 2015b). Akıllı şebeke ağ içinde kalite, hız, kontrol yöntemleri ve verimlilik gibi kavramları birleştirmesinden dolayı elektrik şebekeleri ve onun tüm teknolojileri için kaçınılmaz bir eğilimdir (Cecati vd., 2011). Bu sebeplerden dolayı çoğu ülke kendi ulusal sınırları içerisinde akıllı şebeke kavramını geliştirmek için çeşitli yöntemler denemekte ve yollar aramaktadırlar. Ayrıca akıllı şebekeler geleneksel şebekelerin öngörülen çeşitli zorlu işlevlerini otomasyon sistemleri, yapay zeka ve çeşitli algoritmaları kullandığı için önemli ölçüde kolaylaştıran, geliştiren pratik bir uygulamadır (Sun vd., 2011).

Akıllı enerji sistemlerinin gündeme gelmesindeki en önemli faktörlerin başında gündelik yaşamda enerjiye olan ihtiyacın artmış olması, randımanlı enerji tüketiminin olmaması ve buna bağlı olarak oluşan çevresel faktörlerin zararları, nüfustaki hızlı artış ve fosil yakıtların gitgide azalması gibi sebepler gösterilebilir (Alagöz, 2015b; Alagoz vd., 2013; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Akıllı şebekelerin klasik şebekelere göre bir takım avantajları vardır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Eldem, 2017; Khattak vd., 2020):

- Klasik şebekelerde anlık kesinti, tüketim verileri gibi durumlar insan kaynaklı olarak başka birine ihtiyaç duyularak gerçekleşirken, akıllı şebekelerde bu durum ortadan kalkar ve enerji tüketimi uzaktan otonom ve anlık olarak gözlemlenebilir,
- Enerji iletimi ve dağıtımını hususunda meydana gelebilecek bir sıkıntı acil durumlar için uzaktan, önceden tespit edilerek kontrol altına alınabilir,
- Dağıtık üretimin sisteme dahil edilmesiyle enerji verimi sağlanır ve akıllı şebekeler dağıtık üretim sayesinde çevreye dost bir teknoloji sağlar,
- Kullanıcılar dinamik fiyatlandırma ile enerji satın alıp ve sisteme enerji satabileceğinden dolayı enerjide tasarruf sağlanabilir, böylece enerjide tüketim verimliliği sağlanır,
- Akıllı ev teknolojileri ve elektrikli araç projeleri daha hızlı bir şekilde hayata geçirilebilir,
- Dış kaynaklardan dolayı oluşacak siber saldırılara karşı koruma sağlanır,
- İşletme maliyetini en aza indirmeyi amaçlar ve enerji hırsızlığını en aza indirir,
- Çift yönlü iletişimiyle beraber üst düzey teknoloji kullanılabilir. Bu sayede tüketici topluluğu gün içerisinde kendi enerji talebini tek hareketle yönetip üretici firmaların fazla yük üretiminin önüne geçilmiş olacaktır.

Akıllı şebeke sistemlerinin altyapısı geleneksel şebeke sistemlerine silikon ve fiber gibi altyapı donanımlarının yanında yapay zeka ve algoritmalarının eklenmesi olarak tanımlanırsa bunun temsili olarak çizimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Bu katmanların birleşmesiyle oluşan Akıllı Şebeke kavramı, yukarıda maddeler halinde verildiği üzere klasik şebekelere göre kat kat daha avantajlıdır.



Şekil 1.1: Akıllı şebeke altyapı katmanları.

İnsanların artan enerji ihtiyaçları, klasik şebekelerin buna imkan sağlamaması ve yenilenemeyen kaynakların zararlı çevresel faktörleri göz önüne alındığında enerji yönelimi sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynaklara doğru olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) yeryüzünde doğal olarak elde edilebilen, enerji yetersizliğine alternatif çözüm oluşturabilen kaynaklardır. Doğanın kendini yenilemesiyle eksilmeyen YEK dış ülkelere olan bağımlılığı ve en önemlisi karbondioksit salınımlarını azaltmasından dolayı kullanım alanı geniştir. Günümüzde mevcut durumda kullanılan ve enerji ihtiyacını büyük oranda karşılamaya yarayan petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil yakıtların çevresel zararları ve bu gibi kaynakların hızlı bir şekilde tüketilmesi düşünüldüğünde YEK'e yönelim bu ölçüde çok önemlidir. Fosil kaynakların hızlıca tüketimi göz önüne alındığında ileride kaynak yetersizliğinin oluşması ve bu durumda enerji fiyatlarının yükselmesine sebep olacağı kaçınılmaz bir sondur. Ayrıca fosil yakıtların yaygın kullanımından dolayı oluşan sera gazı salınımıyla dünyamız, ortaya çıkan iklim değişikliği ve bunun sonucu küresel ısınmadan dolayı çok büyük bir tehdit altında olacaktır (Tuttokmağı ve Kaygusuz, 2017). Bu yüzden şebeke sistemlerine YEK'in entegrasyonu hızlandırılmalı, bu kaynakların kullanımı çoğaltılmalıdır. Fakat elektrik şebekelerine sürdürülebilir kaynakların entegrasyonu, bu kaynakların aralıklı ve rastgele üretimlerinden dolayı ve depolama üniteleriyle birlikte kurulmaları gerektiğinden bir hayli zordur (Kallel vd., 2014). Akıllı şebeke uygulamaları YEK'in şebekelere dahil edilmesine olanak sağlamaktadır. İlerleyen zamanlarda artan enerji

fiyatları, karbon gazı ve sera etkisi sebebiyle elektrik üretimi daha fazla yenilenebilir kaynaklar üzerinden olacaktır (Alagoz vd., 2013). Bu kaynakların kullanımı tüketiciyi üretken tüketici vasfı ile şebekeye dahil etmektedir. YEK'in kullanılması şebekeye olan bağımlılığı yani tüketicilerin üretken sıfatlarının olmasından dolayı enerji talebini azaltarak enerji fiyatlarının düşmesinde büyük rol oynamaktadır.

Özetlemek gerekirse YEK'in kullanımının avantajları şu şekilde sıralanabilir; YEK fosil yakıtların çevresel zararlarını azaltır, dış ülkelere bağımlılığı azaltır, kurulduğu konumlara göre enerji güç kalitesini ve güvenliğini artırabilirken (Tuttokmağ, ve Kaygusuz, 2019) tüketicilerin aktif olarak şebekeye katılımlarını kolaylaştırır. Tüketiciler üretime katılacaklarından dolayı enerji talep anındaki ani yükselmeleri azaltarak enerji verimliliğini korur ve enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca YEK'in sisteme dahil edilmesiyle mevcut sistemden dolayı enerji iletim ve dağıtım esnasında meydana gelen kayıplar ve maliyetler azaltılır. Bu gibi sebepler daha fazla artırılabilirken kısaca YEK'in tüm kullanıcılar açısından ekonomik ve çevresel olarak sayısız katkısı vardır (Tuttokmağ, 2019). En önemli sonuç şudur ki YEK'in kullanımına imkan verecek olan akıllı şebeke tüketicilerin direkt şebekeye üretken vasıflarıyla katılacak olmalarını sağlayarak kullanıcı maliyetlerini minimum seviyelere çekip elektrik fiyatlarını düşürecektir. Böylelikle enerji talebi ve üretimi dengelenecek, gerçek zamanlı dinamik fiyatlandırma yapılabilecektir.

Enerji arzı ile tüketimin denge noktasında oluşan dinamik enerji fiyatlandırması akıllı şebeke sistemi içerisinde önemli bir başlıktır. Günümüzde enerji fiyatlandırması çeşitli tarifeler üzerinden yapılmaktadır. En çok kullanılan tarifelerin başında 3 zamanlı tarife gelmekte olup, fiyatlandırmanın gün içerisinde değişen saat aralıklarında değiştiği, gündüz-gece olarak 3 kısıma ayrıldığı tarife sistemidir. Dinamik fiyatlandırma sistemi ile değişen talep ve üretim seviyelerine bağlı olarak fiyatlandırma sistemi çeşitli dönemlere ayrılmayacak olup en uygun seviyede kalacaktır. Dinamik fiyatlandırma akıllı şebeke sistemlerinde enerji arzıyla beraber talepte de esneklik sağlayacaktır. Bunun ise enerji istikrarını kapalı çevrim fiyat kontrolü ile otonom olarak sağlamakta olduğu görülmüştür (Alagoz vd., 2013; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Bu esneklik sayesinde enerji üretiminde aralıklı üretime sebep olan güneş, rüzgar gibi yenilenebilir kaynakların kullanımına olanak sağlanmaktadır. (Khan vd., 2016)

Akıllı şebekelerin mevcut hedeflerinin dinamik enerji fiyatlandırması açısından en önemli kazanımı YEK'in şebekeye entegrasyonudur. Depolama üniteleriyle kurulması gereken bu sistemlerde fazla olan enerjinin kaybının önüne geçilmek istenmektedir.

Depolanan enerji fazlalığı ile enerji talebinin en yoğun olduğu zamanlarda, depolanan enerjinin kullanılmasıyla enerji yetersizliği önlenmiş olacaktır (Khan vd., 2016). Genel olarak talep yanıtı (TY) olarak isimlendirilen bu eylemler enerjinin otonom bir şekilde yönetilmesine sebep olup enerjide verim sağlayacaklardır. TY ve talep tarafı yönetimin (TTY) bir başlığı olan dinamik enerji fiyatlandırmasıyla elde edilen kazanımlar şu şekilde sıralanabilir; kaynak kullanımı ve tüketici talepleri optimize edilecek, enerjide istikrar sağlanacak, üretim maliyetlerini en aza indirmeyi hedefleyip yeni tesis kurulması zorunluluğunun önüne geçilecek, tüketicilere kendi kullanımlarını kontrol ve optimize etme avantajı sağlanacak ve son olarak üretken tüketici vasfını alıp gerekirse tüketicilerin şebekeye enerji satmalarına imkan sağlayacaktır (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2022).

1.1 Kaynak Taraması

Dinamik enerji fiyatlandırması farklı talep seviyelerine göre farklı zaman dilimlerinde tepe yükünü azaltıp, fiyatı düşürmeye yarayan TTY tekniğidir. Yoğun saat dilimlerindeki yükü yoğun olmayan saat dilimlerine kaydırarak, yoğun saatlerdeki üretim maliyetlerinden dolayı artacak olan fiyatın uygun talep yanıtlarıyla düşürülmesini amaçlar (Dutta ve Mitra, 2017). Literatürde dinamik enerji fiyatı konusuyla ilgili birçok yayın olsa bile hala bazı eksik yönler bulunmaktadır. Çalışmalardaki dinamik elektrik fiyatlandırması genellikle uzun veya orta vadeli enerji tahmin modelleri üzerinden olmakla birlikte genellikle üretici kar modellerini ve parametrelerini en üst seviyeye çıkaracak şekilde hedeflenen optimizasyon meseleleri olmaktadır (Alagoz vd., 2013). Dinamik enerji fiyatlandırmasıyla ilgili yapılan çalışmaların bazıları şunlardır;

Yalçınöz ve Kaygusuz (2022) bu çalışma ile dinamik enerji fiyatı türleri olan; ToU (Kullanım Süresi), CPP (Kritik Tepe Fiyatlandırması) ve RTP (Gerçek Zamanlı Fiyatlandırma) hakkında olan genel bilgileri ayrıntılı şemalarla vermişlerdir. Tüketici davranışlarının enerji fiyatı üzerindeki rolü belirtilmiştir. Verilen karşılaştırmalı tablo ile dinamik enerji fiyatı türlerinin nihai sonucu olarak avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2022).

Zhang ve diğ. (2022), önerdikleri çok yönlü optimizasyon ile şebeke sistemindeki kullanıcılar arasında talep yanıtı ve dinamik enerji fiyat cevaplarını dikkate alarak, sistem ekonomisini ve güvenilirliğini iyileştirmeye yarayan model geliştirmişlerdir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak dinamik fiyat kontrol stratejisi geliştirilerek farklı kullanıcılar arasında enerji çizelgeleme yöntemi ile kullanıcıların yararına ve tercihlerine dayalı yöntem

geliştirilmiştir. Sonrasında esnek ve iki boyutlu ele alınan TY ile karşılıklı olarak mekansal-zamansal olarak kullanıcılar arasında fiyat katılımları formülize edilmiştir. Tüm bu veriler kullanılarak geliştirilen optimizasyon algoritması ile çoklu enerji piyasasında enerji fiyat dengesi ve koordineli çalışma sağlanmıştır (D. Zhang vd., 2022).

Yalçınöz ve Kaygusuz (2021) bu çalışmalarında, akıllı şebekelerde dinamik enerji fiyatlandırmayı kontrol yöntemi kullanarak kutup yerleştirme metodu ile gerçekleştirmişlerdir. Doğal frekansın değişimi ile katsayılarını hesapladıkları PID (Oransal-İntegral-Türev) kontrolör tasarım sistemini kullanarak, dinamik fiyatlandırma yapmışlardır. Enerji arz-talep senaryosu ile Matlab/Simulink ortamında modellenen sistemin anlık olarak fiyatı düzenlediği ve değişen talep verilerine karşılık fiyat sinyalinin istikrarı sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca sisteme ani tepe ve dip talep verisi işleyerek sistem test edilmiş ve fiyat sinyalinin kararlılığı ispat edilmiştir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021).

Barbaros ve diğ. (2021), bu çalışmalarında pompa depolamalı hidroelektrik (Pumped-storage hydroelectricity-PSH) projesinin Türkiye’de Gökçekaya seçilerek PSH imkânının olabirliğini ve potansiyel faydalarını incelemişlerdir. Dünya genelinde enerji depolama aracı olarak kullanılan PSH projesinin fiyatlandırma stratejilerinin depolama konusundaki neticelerini ön plana çıkarmak adına yazarlar 24 saatlik fiyatlara dayanan ve Türkiye’de PSH uygulamasının kar maksimizasyonunu belirlemek için bu çalışmayı yapmışlardır. Tüm değerlendirmeler gerçek zamanlı elektrik fiyatları, üretim ve tüketim verileri üzerinden yapılmıştır. 4 ayrı senaryo üzerinden sonuçlar alınmıştır. Sonuçlara göre PSH projesinin özel sektör tarafından dikkat çekecek kadar karlı olmadığı vurgulanmıştır (Barbaros vd., 2021).

Khattat ve diğ. (2020) bu çalışmalarında, blokzincir temelli hyperledger (akıllı sözleşmeleri içerisinde barındıran defter) adlı bir uygulama ve platform sunmuşlardır. Bu uygulamanın temel yapısı ile çalışmalarının 2 temel amacı vardır. Birincisi akıllı sözleşmelere dayalı açık kaynaklı blokzincir uygulamasıyla enerji arz ve talebine dayalı olarak geliştirdikleri akıllı sözleşmeler ile enerji fiyatında ve kullanımında teklif verme sürecini otomatikleştirmek, ikincisi tüketici topluluğuna enerji arz ve talebine dayalı olarak dinamik enerji fiyatlandırmasına olanak sağlayarak blokzincir uygulamalarının temel amacı olan gizliliği korumaktır. Akıllı sözleşmeler ile genel olarak üretici topluluklarının ürettiği ve YEK tarafından üretilen elektriğin birim başına fiyat düzenlenmesiyle dinamik bir yapıda olması sağlanabilir. Ayrıca akıllı sözleşmeler vasıtasıyla enerji alım satımı yapılabilmektedir. Yazarlar hyperledger platformu yapısında kullandıkları akıllı sözleşmeler

ile enerji fiyatlandırmasının bir çalışmasını küçük bir alana yönelik sunmuşlardır. Akıllı sözleşmeler burada dinamik elektrik fiyatlandırmasının yapılabilmesi için tüketicilerin kendi üretim ve tüketim verilerini güncelleyebildiği, gerekli izinlerin alındığı ve tüketicilerin konularına ulaşılabilirdiği ana bir platform oluşturmaktadır (Khattak vd., 2020).

Khan ve diğ. (2020), TY programlarından biri olan dinamik fiyatlandırma çalışmalarında arz ve talep arasındaki enerji dengesini sürekli olarak korumak, kontrol etmek ve YEK'in üretiminden dolayı kaynaklanan dalgalı üretimi idare etmek amacıyla dinamik fiyat kontrolü tabanlı kapalı çevrim süper büküm kayan kipli kontrol (Super Twisting Sliding Mode Controller-STSMC) yöntemini kullanmışlardır. STSMC yöntemi kalite ve doğruluk nedeniyle tahmin edilen ve ölçüm sonuç verilerinin arasındaki bozulmanın ayarlanmasında kullanılmıştır. YEK'in entegre edildiği bir mikro şebekede, talep tarafı yük yönetimi (TTY) ile tüketici topluluğunun taleplerinin kontrol edildiği ve STSMC yöntemi ile fiyat düzenlenmesinin yapıldığını gösterebilmek adına çalışmalarını sayısal örnek ile güçlendirmişlerdir. Simülasyon senaryoları Matlab/Simulink'te geliştirilmiş olmakla birlikte YEK'in entegre edildiği mikro şebeke için fiyat tabanlı esnek kontrol tekniği ile üretimin anlık olarak gözlemlenebildiği doğrulanmıştır. Tasarlanan sistemde oransal integral (proportional Integral- PI) , Kesir dereceli oransal integral (Fractional order proportional integral-FOPID), Kesir dereceli oransal integral türev (Fractional order proportional integral derivative -FOPID) ve Kesir dereceli oransal türev (Fractional order proportional derivative-FOPD) kontrolörlere dayalı modellerin sonuçları kıyaslanmıştır (Khan vd., 2020).

Hassan ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada dinamik enerji fiyatının enerjide verim sağlayacağını savunmuş fakat dinamik ve gerçek zamanlı yapılan fiyatlandırmanın akıllı ev kullanıcılarının özel hayatları için ayrıca tehdit oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Bu amaçla dinamik enerji fiyatlandırmasında güçlü bir koruma stratejisi geliştirmişlerdir. Kullandıkları diferansiyel algoritma sayesinde kullanıcıların yaşam tarzlarını ve gizliliklerini veri setleri ile karşılaştırmalı olarak kullanılan algoritma ile korumayı başaran yazarlar ayrıca TTY için tepe yükünü de azaltabilmişlerdir (Hassan vd., 2020).

Kaygusuz (2019) bu çalışmasında, dinamik fiyat sinyalinin yayınlanması vasıtasıyla kapalı çevrim kontrol şemasına dayanan dinamik enerji fiyatlandırması yapmıştır. Enerji fiyatını düzenlemek için şebekedeki toplam talep PI denetleyici kontrol yapısını kullanarak yönetilmiştir. YEK'in sisteme eklenmesi ile mikro şebekelerde yönetim-talep senaryosu hazırlanmış, bu senaryo Matlab/Simulink programı kullanılarak geliştirilip mikro şebekenin esnekliğini temsil etmek amacıyla fiyat talep yanıtı kullanılmıştır. Ayrıca Kaygusuz, TTY

için esnek talep kontrol sisteminin sayısal analiz ile kullanımının gelecekteki akıllı şebekelerde, PI kontrol sisteminin katsayılarının ayarlanması ile birçok avantaj sunabileceğinden bahsetmiştir. Simülasyon sonuçlarının daha gerçekçi olması için modele, sistem gecikmeleri ve üretim belirsizlikleri eklenerek üretimdeki dalgalanmaları izlemek konusunda gerçeğe yakın performans sergilenmiştir. Dinamik fiyatlandırmanın YEK'in üretimini takip etmek ve esnek talebi kontrol etmek için faydalı olduğunun kanısına varılmıştır (Kaygusuz, 2019).

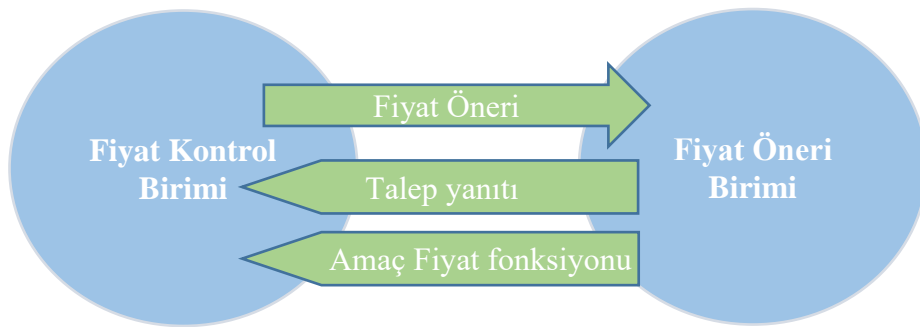
Dursun ve Siano (2019) yaptığı çalışmada, Türkiye'de bir kesim kullanıcıları kapsayan sistem için yapay sinir ağı (YSA) kullanarak kısa vadeli olmak üzere dinamik enerji fiyatlandırması modeli oluşturmuşlardır. Model genelinde İstanbul'da bulunan bir konut için ısı geçirenlik değerleri (U değerleri), hava durumu değerleri ve yük profili değişken değerleri kullanılarak enerji fiyatı tahmin edilmektedir. YSA modelini 4 aşamada tamamlanacak şekilde oluşturmuşlardır. Bu aşamalar; tüketici profillerinin belirlenmesi, akıllı sayaç verilerinin toplanması, modelin kullanılacağı yapının diğer verilerinin belirlenmesi ve son olarak tüm bu aşamalara bağlı olarak YSA modelinin oluşturulmasıdır. Dinamik fiyatlandırma modeli için İstanbul'da ikamet eden 4 kişilik bir ailenin günlük elektrik tüketimleri baz alınmıştır. Analizler sonucunda gerçek veriler ile model verilerinin sonuçları karşılıklı olarak verilmiştir. Mutlak yüzde hatası hesaplanmış ve modelin iyileştirilmesi gerektiği savunulmuştur (Dursun ve Siano, 2019).

Ahmed ve Amer (2019); üreticiler ve tüketiciler arasında yeni bir donanım inşa ederek talep cevabı ve dinamik fiyatlandırmayı birleştirmişlerdir. Gerçek zamanlı fiyatlandırma modelini Arduino'ya bağlı Raspberry Pi 3 tabanlı akıllı sayaç ile gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen sistem ile tüketiciler enerjide verim sağlamak adına taleplerini değiştirmeye teşvik edilmiştir. Ayrıca sisteme dahil olan tüketiciler, akıllı sayaca bağlanarak dinamik fiyatlandırma sistemiyle elektrik kullanımlarını yönetmiştir (Ahmed ve Amer, 2019).

Yan ve diğ. (2018), akıllı şebekelerde fiyat kontrolü sağlamak için yapılan fiyata dayalı talep yanıtı (FDTY) ile ilgili çalışmaların avantaj ve dezavantajlarını incelemişlerdir. FDTY programlarının deneysel sonuçları değerlendirilmiş olup geleceğe yönelik fikirlerini bildirmişlerdir. RTP, ToU ve CPP ayrıntılı olarak incelenmiştir. FDTY programlarının geleceğe yönelik endişelerinden bahsedilen çalışmada çeşitli ülkelerde yapılan deneyler ve analiz sonuçlarına ayrıntılı olarak yer verilmiştir (Yan vd., 2018).

Anand ve Ramasubbu (2018), otonom kontrolü sağlanan bir mikro şebeke için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile gerçek zamanlı fiyatlandırma stratejisi sunmuşlardır. YEK'in kullanımı ve kullanılmaması durumları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bir mikro şebekedeki dinamik dağılım sunulmuş olup, enerji yönetim sistemi modülü kullanılarak hem üretim hem de fiyatlandırma ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Rüzgar türbini ve fotovoltaik güç üretim profillerinin kullanımıyla fiyat analizi yapılmıştır. Ayrıca anti-yırtıcı parçacık sürü optimizasyonu (APSO) ile ekonomik emisyon dağıtımını yenilenebilir kaynaklar ile analiz edilmiş, parçacık sürü optimizasyonuna (PSO) göre %7.24 oranında daha ekonomik performans gösterdiği kanıtlanmıştır (Anand ve Ramasubbu, 2018).

Mahmud ve Sant (2017) bu çalışmalarında, stokastik optimizasyon tekniği ve modelini kullanmışlardır. Oluşturulan model ile daha çok tüketici avantajları ve kar oranları göz önüne alınmıştır. Faturaları azaltmak amacıyla gerçek zamanlı fiyatlandırma algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma eşzamanlı stokastik yaklaşım algoritması olup bu algoritma ile aynı zamanda üreticilerinde tasarruf edeceği sistem hazırlanmıştır. Bu algoritma gerçek tüketim verilerinin taban değerleri dikkate alınarak RTP ile hazırlanmıştır. Hazırlanan algoritmaların genel blok şeması Şekil 1.2'deki gibi olup fiyat öneri birimi ile fiyat kontrol birimi arasında gerçekleşmektedir. Fiyat öneri birimi için geliştirilen algoritma ile tepe yükünün genel ortalamasını en aza indirmek için kontrol biriminde tekrarlamalı algoritmalar kullanılır ve tüketicilere yardımcı olunur. Ayrıca üreticilerden gelen fiyat yanıtlarını tüketiciler değiştirmek isterlerse fiyat öneri birimine yanıt vererek fiyat kontrol biriminden rastgele gelen fiyat önerisinin önüne geçerler (Mahmud vd., 2016). Geliştirilen algoritma 14 bina için 30 dakikalık veriler alınarak oluşturulmuştur. Fiyat kontrol üniteleriyle yarım saatlik zaman aralıklarıyla taban tüketim verileri baz alınarak ne kadar yük kaydırılacağı önerilmiştir. Tüm tüketicilerden gelen verilere dayalı çalışan algoritma ile önerilen fiyatlandırma senaryosunda enerji fiyatının düştüğü ve enerji tasarrufunun sağlandığı gözlemlenmiştir (Mahmud ve Sant, 2017).



Şekil 1.2: Fiyat modeli blok diyagramı.

Alagöz ve Kaygusuz (2016) yaptıkları bu çalışmalarında, önceden kapalı çevrim PID kontrolör kullanarak gerçekleştirdikleri dinamik fiyatlandırma çalışmalarını (Alagoz vd., 2013) geliştirmişler ve FOPI kontrolör kullanmışlardır. Tasarım operasyonu çok kaynaklı 60 GW gücünde akıllı şebeke sistemi için fiyat yayın ve sistem gecikmeleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiş olup Matlab/Simulinkte modellenmiştir. Simülasyon sonuçlarını daha gerçekçi yapmak adına üretime gürültü verilmiş olup YEK'den dolayı oluşabilecek üretim dalgalanmaları dikkate alınmıştır. PI kontrolörün fiyat sinyalinin düzenlemedeki performansı test edilmiş, piyasa enerji yönetimindeki katkıları sonuçlar üzerinden tartışılmıştır. Kesir derecesi araştırması sayesinde çalışma genişletilmiştir. Üretim verilerinin belirsizliğinin eklenmesi, fiyat sinyal çıktısında oluşan gecikmeler vb. durumlar sistemi gerçek sistem ile yakın duruma getirmektedir. Sistem için kullanılan simülasyon modelleri, enerji denge kontrol sinyali ve fiyat sinyalleri göz önünde bulundurularak geliştirilmiş olup, arz ve talep verileri simülasyon ile kontrol edilmiştir. Böylece enerji denge kontrol sinyalinin 0'a eşit olduğu en uygun yerde alınan sinyal dinamik fiyat sinyalinin en kararlı olduğu an olmuştur. Kesir derecesinde kullanılan λ integratörünün değişimi ile çeşitli fiyat sinyallerinin alındığı ve λ 'nın fiyat sinyallerini daha optimal yapabilmek için kullanılabileceği görülmüştür (Alagoz ve Kaygusuz, 2016).

Khan ve diğ. (2016) bu çalışmalarında, akıllı şebekeler için dinamik fiyatlandırma modelleri, yük tahmini (YT) ve TTY teknikleri kullanarak fiyatlandırma için karşılaştırmalı incelemeler yapmışlardır. TY araçları içerisinde olan dinamik fiyat şemaları; RTP, ToU ve CPP ayrıntılı olarak yapılan çalışmalarla birlikte verilmiştir. YT modelleri için bulanık mantık ve YSA sistemlerinin yapıları da incelenmiştir. Yazarlar bu çalışmayla RTP sisteminin, ToU ve CPP'ye kıyasla daha verimli olduğunu ve tüketicilere daha faydalı olduğunu savunmuşlardır (Khan vd., 2016).

Datta ve Datta (2016); akıllı sayaç verilerini piyasa verileriyle birlikte kullanarak önceden yapılan fiyat tahminlerini düzeltmeye çalışmışlardır. Ani fiyat tahminlerini yönetmek için algoritma tabanlı sınıflandırıcı ve yapay sinir ağı modellerini geliştirmiş olup bu modelleri eğitmek için 2011-2014 Avusturalya enerji piyasası operatörü verilerini kullanmışlardır. Algoritmalar istatistiksel yazılımlar ile uygulanmıştır. Sayaç verilerinin sisteme dahil edilmesiyle piyasadaki ekonomik yükün % 0.5 oranında iyileştiği görülmüştür (Datta ve Datta, 2016).

Sinha ve Kumar (2016), dinamik fiyatlandırmanın önemi üzerine yapılmış olan bu çalışmada yazarlar sabit oranlı tarifelerde uygulanan sistemin üretim maliyetlerini tam

yansıtmadığı dolayısıyla kullanıcılara dinamik fiyatlandırma ve alt katmanlarını önermişlerdir. Tüketiciler aylık enerji kullanımlarına göre 6 sınıfa ayrılmış ve ev içi yük yönetimine ve kullanımına göre daha sonrasında 3 sınıfa (ağır, orta ve düşük kullanım) düşürülmüştür. Enerji kullanımının bir algoritma ve ToU tarifesine göre azalacağını ve planlanacağını savunan yazarlar bu kullanıma göre faturalarında düşeceğini belirtmişlerdir (Sinha ve Kumar, 2016).

Jia ve Tong (2016), dinamik fiyatlandırmanın RTP programı içerisinde olan gün öncesi saatlik fiyatlandırma ele alınarak, üretici ve tüketiciler arasındaki belirsizlikleri ortadan kaldırmak adına bir teori geliştirmişlerdir. Bu teoriye göre YEK'in sisteme entegrasi göz önüne alınarak enerji fiyatlandırması optimize edilmiştir (Jia ve Tong, 2016) .

Danxi ve diğ. (2017) ve Duan (2016), çalışmalarında FDTY modelleri sunmuşlardır. Gerçek zamanlı enerji fiyat modellerine göre düzenlenen çalışmalarda TY ile kazanımlar sağlanmıştır (Danxi vd., 2017; Duan, 2016).

Avinash ve Vadhera (2015) bu makalede, sisteme entegre edilen rüzgar enerjisini; yoğunluk, kesinti, yük talebi gibi sistem değişikliklerini dikkate alarak, IEEE 24 baralı test sisteminde, %26.3 rüzgar enerjisi katkısı ile farklı sistem şartlarında 2 aşamalı stokastik optimizasyonla elektrik fiyatındaki değişimleri vermeyi amaçlamıştır. Fiyatlar gün öncesi ve dengeleme aşamalarında ikili değişkene bağlı olduğundan birimleri programlamak için stokastik programlama kullanılmıştır. Rüzgar 7. ve 8. baralara bağlanarak bu baralarda fiyat değişiminin minimum ölçüde arttığı belirtilmiştir (Avinash ve Vadhera, 2015).

Alagöz ve Kaygusuz (2014) bu çalışmada, bir anda sert şekilde değer değiştiren enerji talebine göre sistemin kararlılığını koruduğunu kesir dereceli PI kontrolör kullanarak göstermişlerdir. Kapalı çevrim kesir dereceli PI kontrolör denetimiyle ve artarak değişen kesir derecesinde sistemin istikrarını koruduğu ve enerji dengesini sağladığı görülmüştür. Bu konudaki avantajlar tartışılmış olup gelecek dönem içerisinde sistem için neler yapılabileceği önerilmiştir (Alagöz ve Kaygusuz, 2014).

Song ve Qu (2014); gerçek zamanlı fiyatlandırma modeli üzerindeki yakınsama problemlerini çözmek için yeni algoritma geliştirmişlerdir. Gerçek zamanlı fiyatlandırma modelinin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Samadi ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptıkları algoritmayı geliştirip (Samadi vd., 2010), büyük ölçekli alan için kullanmışlardır ve kar maksimizasyonu sağlayabilmişlerdir. Bu algoritma TTY esasları üzerine fayda maksimizasyonuna dayalıdır. Optimizasyon problemini çözmek için gradyan projeksiyon

yöntemi kullanılmış olup farklı kullanıcıların türlü fiyatlandırma senaryolarını dikkate alarak oluşturulan analitik modeller artan kullanıcı sayısı ile dahi iyi sonuç vermiştir (Song ve Qu, 2014).

Zahedi (2014) bu çalışmada, günümüzde kullanılan mevcut şebekenin akıllı şebekelere karşı eksik yönlerinden ve akıllı şebekelerin getireceği yeniliklerden bahsetmiştir. Tüketici topluluğuna ev ortamında tüketim miktarlarını görüp, yönetebilecekleri akıllı ekran uygulamasından bahseden yazar, akıllı ekran ile tüketicilerin enerji yönetiminde söz sahibi olup enerji fiyatlarını düşürebileceğini yaptığı çalışma ile kanıtlamıştır. Yazar çalışmada karşılaştırdığı 3 farklı fiyat modeliyle tüketicinin enerjiyi kullanma durumunu ve buna bağlı ne kadar ücretlendirme olacağı durumuyla alakalı kullanıcılara seçim hakkı tanımaktadır (Zahedi, 2014).

Kong (2014) yaptığı bu çalışmada, akıllı şebeke ağında tüketim planlanması ve diğer yöntemler ile yapılmış olup literatürde bulunan dinamik enerji fiyatlandırması için üst düzey iletişim performansının olmadığını ileri sürmüştür. Çalışmada, ilk olarak bu durumdan dolayı kaynaklanan dinamik enerji fiyatlandırmasında arzu edilen yükün güç değerinin elde edilmesi aşamasında yaşanan iletim hatası ve ağ gecikmesi durumları incelenmiştir. İletim hatalarının kullanıcıların güncel fiyat alamamalarına sebep olduğu belirtilmiş ve bu doğrultuda çalışma yapılmıştır. İletimden dolayı kaynaklanan bu durumun fiyat güncelleme aşamasına minimum sınır ve adım boyutuna üst sınır getirdiği tespit edilmiştir. Bu durum için fiyat güncelleme sınırı ve adım boyutunu tespit etmek adına bir algoritma önerilmiştir. Algoritma çeşitli simülasyon örnekleriyle test edilmiş ve ağ gecikmesi durumunun fiyat düzenlemede sınırlı durumu oluşturduğu kanıtlanmıştır (Kong, 2014).

Alagöz ve diğ. (2013) bu çalışmada, akıllı şebeke ağında enerjinin arz ve talebinin otomatik olarak, eş zamanlı ve güvenilir şekilde dengelenmesi için kapalı döngü PID kontrolör kullanmıştır. Şebekedeki kullanıcıların değişen taleplerine anında yanıt verebilmek için anlık düzenleme koşulu ile dinamik fiyatlandırma yapılmıştır. Akıllı ve otonom şebekede, çeşitli kaynakların da kullanımını katılarak talep ve üretimin eşitlenmesi amacıyla kullanılan PID kontrolör, tüketicilerin şebekeden talep ettikleri enerji ve tedarikçilerin ürettikleri enerjiyi eşitlemek için enerji denge hata sinyali sağlamak ve buna bağlı olarak fiyatı düzenlemektedir. Araştırmaya göre yazarlar enerjinin birim fiyatının artmasına bağlı olarak üretici topluluğunun şebekedeki tüketicilere satış yapmak için tahsis edilen enerji üretim hacminin daha fazla kâr fırsatı sağlamak amacıyla artacağını varsaymış ve ayrıca üretim hacmini gerçek talepten yüksek tutmayı sağlamak amacıyla aynı

simülasyon modeline sanal talep ekleyerek gerçek enerji talebi için bir ön gerilim sağlanmıştır. Sonuç olarak ise bu makalede PID denetleyici kullanılarak enerji fiyatı sistemli ve otonom olarak düzenlenmiştir. PID katsayılarının rastgele ayarlanması, keskin talep dalgalanmasına karşı istenilen fiyat cevabının anında alınmasına yardımcı olacağı kanıtlanmıştır. PID kontrolörün hem şebeke tüketicilerinin değişen taleplerine anında cevap verdiğini hem de bu doğrultuda yapılan üretimin dengesiyle başa çıkarak enerji dengesini koruduğunu ve birim enerji fiyatlandırmanın gerçek zamanlı ayarlanabileceğini elde edilen simülasyon sonuçları ile ispat etmişlerdir (Alagoz vd., 2013).

Rafiei ve Bakhshai (2012), yaptıkları bu derleme çalışmalarında artan enerji fiyatları, enerjide oluşan verimsizlik, sera gazları etkilerini göz önüne alarak önceden yapılan çalışmalar gözden geçirilmiş ve enerji verimliliğinin en uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Dağıtık üretim, enerji depolama ve TTY ayrı ayrı incelenmiş olup bu 3 başlığın birleştirilerek enerjide daha fazla verim sağlanacağı vurgulanmıştır. Enerji veriminin sağlanması amacıyla birkaç çalışma özetlenmiş, çalışmaların sonuçları tartışılmıştır (Rafiei ve Bakhshai, 2012).

1.2 Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında anlık olarak değişebilen enerji talebine yönelik YEK'den oluşan üretim sistemi kurularak, enerji dengesinin kontrollü bir şekilde sağlanması amacıyla enerji fiyat dengelenmesi yöntemleri incelenmiştir. Akıllı şebekelerde otonom kontrolü sağlanabilen ve güvenli bir şekilde enerji elde etme yöntemlerinden biri olan, dinamik enerji fiyatlandırılması yapılarak fiyat dengelenmesi sağlanmıştır. Fiyat kontrolünün en optimal olduğu nokta, enerji arz ve enerji talebi arasındaki farkın 0'a eşit olduğu nokta olarak belirtilmiş ve değişen talep koşullarına karşı sistem dengesinin korunduğu görülmüştür. Dinamik fiyat yöntemlerini incelemek adına kapalı çevrim kontrol sistemi üretim ve tüketim verileri sağlanarak kurulmuştur. Sistem Matlab/Simulink'te kontrol sistemi olarak tasarlanmış ve denge fiyatını belirlemek adına çeşitli yöntemler denenmiştir. Öncelikle sistemin transfer fonksiyonu belirlenmiştir. Sistemde enerji üretim ve tüketim verileri Türkiye verilerine uygun olarak geliştirilmiştir. Bu aşamadan sonra ilk olarak kontrol teknikleri kullanılarak sistem için gerekli parametrelerin matematiksel hesapları yapılmıştır. Bu teknikler kutup yerleştirme metodu ve Ziegler-Nichols katsayı hesaplama yöntemleridir. Kutup yerleştirme metodunda sönüm oranı (ζ) ve doğal frekansın değişimi ile sistem katsayıları hesaplanmıştır. Ziegler-Nichols yöntemiyle sistemdeki üretim kaynaklarına

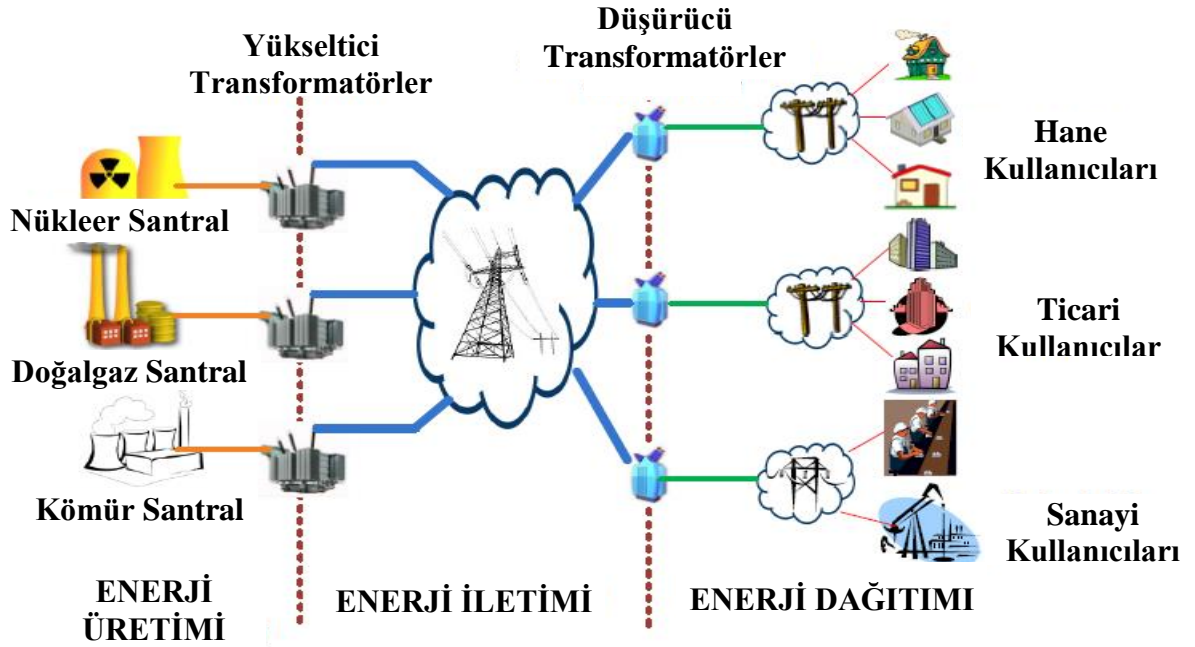
sırasıyla gecikme verilerek PID, PI, PD (Oransal-Türev) katsayıları hesaplanmıştır. Sonrasında hesaplanan bu katsayılar MATLAB/Simulink programıyla sisteme girilip fiyat cevap eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen fiyat eğrileri karşılaştırılmış olup sistem için en uygun katsayılar ile elde edilen sistem belirtilmiştir. Sonrasında sistem katsayılarının doğruluğunu kanıtlamak adına optimizasyon yöntemi olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) sisteme uygulanmış olup çıkan sistem katsayılarının hesaplanan katsayılara yakın olduğu bulunmuş ve fiyat eğrileri tekrardan elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kapsamında YEK'in sisteme entegrasyonu ile değişken talep kontrol altına alınarak, dinamik enerji fiyatlandırma yöntemlerinin değişken talebi ve dalgalı üretimi kontrol etmek için faydalı bir yöntem olduğunun kanısına varılmıştır.



2. KONU İLE İLGİLİ KURAMSAL TEMELLER

2.1 Klasik ve Akıllı Şebeke Kavramlarına Genel Bakış

Enerji üretim santrallerinde üretilen elektriğin kullanıcılara iletimini ve dağıtımını sağlayan bütün enerji tesislerine elektrik şebekesi adı verilmektedir. Nikola Tesla'nın 1800'lü yılların son çeyrek dönemi içerisinde kurduğu ve bugün hale kullanılmaya devam eden elektrik güç sistemleri, klasik şebeke yapısı, günümüz bazında bakıldığında enerji ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bu şebeke sistemi o zamanın standartları gereği en başta küçük bir alan için tasarlanmışken, günümüzde artan enerji ihtiyaçları ve yüksek enerji tüketimleri sebebiyle son yıllarda çalışmalar hız kazanmış, şebeke sistemi geliştirilmiştir. Günümüzde kullanılan klasik şebekeler ise enerji üretim tesislerinde üretilen enerjiyi, gerilimin seviyesinin artırılarak yüksek gerilimli iletim hatlarıyla tüketici kullanım alanlarına ulaştırılan, trafo merkezlerinde gerilim seviyelerinin düşürülerek dağıtılmasını sağlayan sistemlerdir (Tur, 2019; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Klasik şebeke; enerji üretim, iletim, dağıtım ve kontrol aşamalarından tümünü veya bir bölüm işlemleri kısmen gerçekleştirebilmektedir. Bu şebeke yapısı ise Şekil 2.1'de verildiği gibidir (Fang vd., 2012).



Şekil 2.1: Klasik şebeke mimarisi örneği.

Günümüz elektrik şebekesi her ne kadar kendini geliştiren ve ilerleyen teknoloji ile iyileştirmiş olsa da hala 1900'lü yıllarındaki ilk yapısını muhafaza etmektedir. Klasik

elektrik şebekelerinde birkaç noktada merkezi kontrol olup güç akışı tek yönlüdür. Klasik şebekeler olumsuz hava koşulları ve doğal afetlerden etkilenip, bir direk devrilmesiyle bir alanın elektriksiz kalmasına sebep olmaktadır. Yakın zamanda Zonguldak-Ereğli ilçesinde bir direğin devrilmesiyle ilçeye bağlı birkaç köyde elektrik kesintileri yaşanmıştır (Kabatepe ve Cerrah, 2022). Klasik şebekelerde güç dengesi çok önemli olduğundan YEK'in sisteme entegrasyonu zordur. Çünkü YEK'in üretimleri belirsizdir, entegre edilmesi güç sistemlerinde kararsızlık (gerilim dalgalanması, frekans bozulmaları, harmonikler vb.) oluşturur. Ayrıca tek yönlü güç akışının mevcut olduğu şebeke YEK'in kullanımına izin vermez. Bu durumun sebebi ise YEK'in çift yönlü güç akışlarının olmasıdır. YEK'in birçok avantajı varken şebeke sistemine entegrasyonunun olamaması klasik şebekelerin eksikliğini göstermektedir. Yenilenebilir kaynaklar şebekeye sağlayacağı avantajların birkaç tanesi kısaca şöyledir; bakır kayıplarını azaltır, herhangi bir arıza durumunda şebekeye kıyasla daha az bir güç devrede olacağı için müdahale etmek daha kolaydır, çevreye zararı olan ve CO₂ emisyonu oluşturan fosil yakıt kullanımı azalacağı için sürdürülebilir ve temiz enerji elde edilir (Boztepe, 2019).

2.2 Akıllı Şebeke Kazanımı

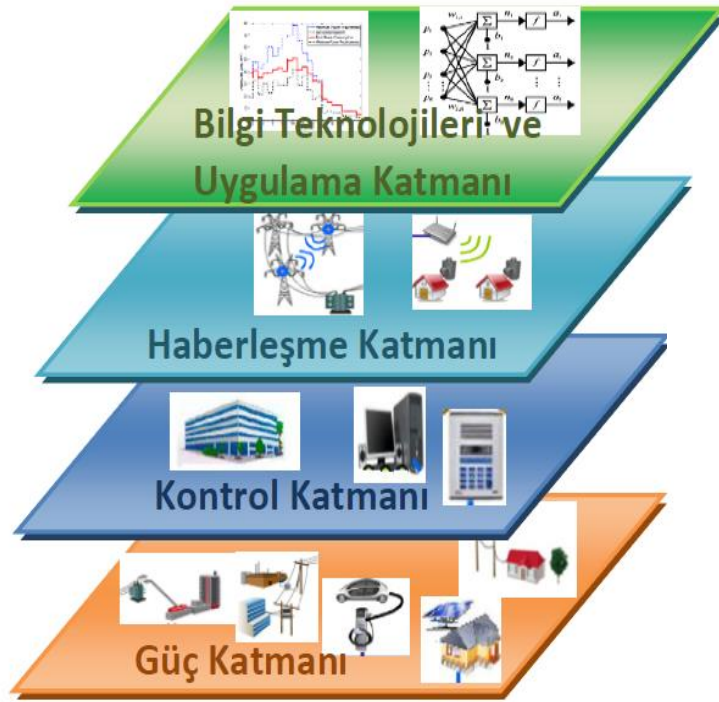
Mevcut şebeke sistemi her geçen gün artan enerji ihtiyaçları ve artan nüfus dolayısıyla birkaç yıl sonrası için yetersiz kalacaktır. Bunun en önemli sebebi ise enerji talebinin çok yüksek seviyelere geleceği ve bunu karşılayacak üretimin olmayışındır. Enerji tüketiminde önlenemeyen artıştan dolayı ülke genelinde kesinti ve arızaların artacak olması nedeniyle enerji verimliliği göz önüne alındığından çalışmalar YEK'e doğru sürmektedir. Bu durum ise akıllı şebeke kavramını gündeme getirmiştir. Akıllı şebeke kavramı ilk olarak Khoi Vu ve arkadaşları tarafından 1997'de tanıtılmıştır (Khan vd., 2016; Vu vd., 1997). Akıllı şebekeler; enerji idaresinin veya diğer bir ifadeyle üretim ve tüketim verilerinin çift yönlü akışının olduğu, gerçek zamanlı olarak sistemin kontrol edildiği, üretici, tüketici ve üretken tüketicilerin aktif olarak şebekeye dahil olduğu üst düzey algoritma ve otomasyonlara sahip olan enerji ağıdır. Klasik şebekelerde yaşanan en önemli problemlerin başında enerji iletim ve dağıtım aşamasında kayıpların yaşanması ve enerji verimsizliği gelmektedir. Akıllı şebekeler, üretilen enerjinin ilk tüketiciden son tüketiciye kadar verimli bir şekilde ulaşmasını sağlar (Khattak vd., 2020). Akıllı şebekeler, klasik şebeke sistemlerinin bütün gerekliliklerini bünyesinde barındıran ve bu gereklilikleri yüksek oranda geliştiren bilgi ve teknoloji bütünüdür. Ayrıca akıllı şebekeler, üretilen ve tüketilen enerjinin

verimliliğini korumasının yanı sıra enerji arz ve talebinin izlenmesini, analiz edilmesini, kontrol ve otomasyonunun yapılmasını sağlayarak temiz ve güvenilir enerji kavramını oluşturur. Akıllı şebekelerde amaç en başta tüketici güvenilirliği ve rahatı olup, enerji hırsızlığını (kaçak enerji), elektrik maliyetlerini ve kayıplarını en alt noktaya indirerek güvenli bir ağ sunmaktadır. Tüm bunların yanında akıllı şebekeler YEK'in sisteme entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.

Enerji kavramı genel olarak düşünüldüğünde insanoğlunun geçmişten bugüne her alanda kullandığı, hayatının vazgeçilmez bir unsuru olup, toplumun refah seviyesini, ülkenin ekonomik kalkınmasını belirleyen en önemli kavramdır (Arslan ve Ertuğrul, 2022; Çetintaş ve Bicil, 2015; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Böylece enerji çevreye zararı en aza indirilecek şekilde üretilmeli ve tüketim aşamasında da aynı bilinç ile olmalı ve enerjiyi verimli şekilde kullanmalıyız. Fosil yakıtlar enerji ihtiyacımızı yüzyıllardır karşılamıştır. Yıllarca kullanılan bu kaynakların yakın gelecekte tükenme ihtimali ve çevresel zararları göz önünde bulundurulmalıdır (Emeksiz ve Fındık, 2021). Günümüz genelinde kullanılan fosil yakıtlardan dolayı sera etkisi oluşmaktadır. Sera etkisinin yoğunlaşmasının sebeplerinin başında karbondioksit gazı (CO₂) oranının artması gelmektedir. CO₂ gazı, fosil yakıt kullanımının artması, sanayi ve santrallerin çoğalması, orman alanlarının azalması ve dünya nüfusunun çoğalmasına bağlı olarak artar. Sera etkisinin artmasıyla beraber küresel ısınma oluşmaktadır. Bu küresel ısınmadan dolayı oluşan küresel iklim değişikliğini, ancak enerjiyi doğru, verimli, yenilenebilir ve temiz kaynakların kullanılması ile aşabiliriz. Bu durum ilerleyen zamanlarda eğer YEK daha fazla kullanılmazsa çok büyük problemlerin yaşanmasına sebep olabilir. Yenilenebilir enerji en temel tanımı ile, enerji yetersizliği ve birtakım problemlere alternatif çözüm oluşturabilecek, doğada eksilmeyen, kendini gün aşırı yenileyen kaynaklardır. Ülkemiz YEK bakımından oldukça zengin bir ülkedir. Türkiye Cumhuriyeti henüz YEK'i kullanmak ve kullanmaya teşvik etmek konusunda yenidir. Enerji bakımından dış ülkelere olan bağımlılığımızı kendi enerji altyapımızı ve gerekli finans yatırımları sağlayarak oluşturabiliriz. Bu konuda çalışmalara başlanmış olup; 2023 yılından itibaren sürdürülebilir ve temiz enerji kaynak kullanımının %30 seviyesinin üstüne çıkması amaçlanmaktadır (Karataş Ulusoy, 2019).

Klasik şebeke yapısının ilk kurulduğu zamanlara kıyasla olan kısmi değişikliği ve bundan sonraki süreçlerde yaşanacak olan değişiklikler bilgi sistemleri ve haberleşme teknolojileri üzerinde olacaktır. Haberleşme sistem ve altyapısının kurulması ve geleneksel sistemlere uygulanması akıllı şebeke sistemlerine geçiş için imkan sağlar. Akıllı şebeke

altyapısı sistem katmanları Şekil 2.2’de verildiği gibi 4 esas teknoloji katmanı üzerinde olacağı öngörülmektedir. Bilgi ve Teknoloji katmanında optimizasyon algoritmaları, yapay zeka uygulamaları, ileriye yönelik tahmin programlarının bulunması akıllı şebeke kavramının tam otomasyonunu ve uzaktan kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Haberleşme katmanı sistem üzerinde bulunan tüm katmanlar arasında uzaktan ulaşmayı sağlayan veri haberleşme sistem ve teknolojilerini içerir. Kontrol katmanı sistemlerin kararlılık ve idaresini sağlayan katman iken, güç katmanı enerji yönetimi ve idaresinin de sağlandığı üretimden başlayıp tüketim aşamasına kadar tüm sistemleri kapsar (Alagöz, 2015a; Baloğlu, 2017).



Şekil 2.2: Akıllı şebeke donanım ve teknoloji katmanları.

İlk kullanıcıdan (müşteri, üretici ve tüketici) son kullanıcıya kadar tüm katılımcıların enerji yönetiminde aktif rol sahibi oldukları, çift yönlü bilgi akışıyla sistemin anlık olarak izlendiği, kontrol edildiği, bilgi ve iletişim teknolojilerinin mevcut ağa dahil olmasıyla oluşan akıllı şebeke kazanımı ile klasik şebekeler karşılaştırıldığında akıllı şebekelerin birçok üstünlüğü görülmektedir. Genel olarak bu karşılaştırma Çizelge 2.1 ile verilmektedir (Ali, 2013; Baloğlu, 2017; Farhangi, 2010).

Çizelge 2.1: Akıllı şebeke ile klasik şebeke mimarisinin karşılaştırılması.

Klasik Şebeke	Akıllı Şebeke
Elektromanyetik bileşenler	Dijital/Mikroişlemci bileşenler
Tek yönlü veya yerel iki yönlü haberleşme	Küresel ve entegre iki yönlü iletişim
Merkezi üretim içerir	Dağıtık üretim içerir
Hiyerarşik yapı	Ağ yapısı
Merkezi manuel onarım/Sınırlı kontrol	Kendi kendini onaran sistem/Aktif kontrol
Sınırlı güvenlik	Yaygın güvenlik
Tüketici aktifliği kısıtlı	Tüketiciler aktif olup sistemin parçasıdır
Algoritma tabanlı değil	Algoritma-yapay zeka altyapısına sahip

Akıllı şebeke yapısı Çizelge 2.1’den de anlaşılacağı üzere klasik şebekelere göre daha otomasyonlu, güvenilir, temiz üretimin olduğu şebekelerdir. Klasik şebekelerde yaşanan kesintilerin ve olumsuz durumların %90’ının dağıtım şebekeleri kaynaklı olduğu düşünüldüğünde akıllı şebekelere doğru yönelim ile ilk olarak dağıtım sistemleri kontrol altına alınmalıdır. Artan enerji talebine uygun, TTY ve teknolojilerini şebekeye tanıtarak dağıtım şebekeleri daha modern olabilir (Ali, 2013).

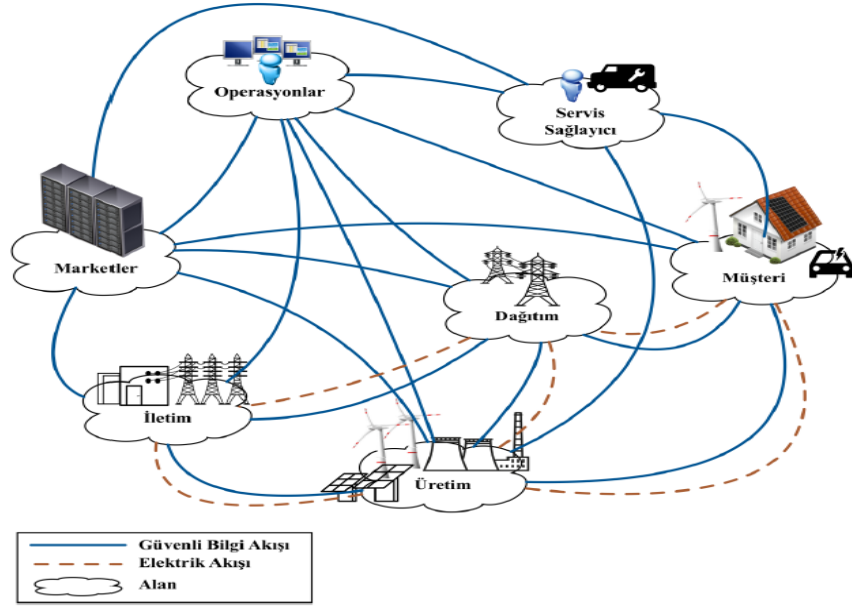
Akıllı şebekelerin gündeme gelmesi düşünüldüğünde mevcut şebekelerden kaynaklanan eksikliklerin tamamlanması mevzuu göz önüne alınmalıdır. Bu eksikliklere genel hatlarıyla bakıldığında bir akıllı şebekenin nasıl olması gerektiğinin konusu çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Alagöz, 2015a; Baloğlu, 2017; Cunjiang vd., 2012). Akıllı şebekelerin özellikleri aşağıdaki gibidir:

- **Sağlamlık:** Şebeke doğal afet ve dışarıdan kaynaklanan siber ve fiziksel saldırılara karşı sürekli olarak güç sağlayabilir.

- **Kendini Onarabilme:** Şebeke mevcut durumunu, kendisi kontrol edip, çevrimiçi olarak izleyip, değerlendirebilir. Otomatik olarak arıza teşhisiyle birlikte arıza izolasyonu sağlayıp kendini onarabilir. Şebeke kullanıcılarının en az hasar ile bu durumdan çıkmasını sağlar.
- **Uyumluluk:** YEK'in sisteme entegrasyonuna destek verir. Dağıtık üretim imkanlarını benimseyebilir, tüketicilerin şebekede aktif olmalarını sağlayabilir. Değişen hava koşullarına karşı kısa sürede uyum sağlayabilir.
- **Ekonomik Olma:** YEK'in aktif olarak kullanımlarına fırsat vererek, temiz ve kaliteli enerji sağlarken, güç kayıplarını azaltır. Verimi artırarak işletme maliyetlerini düşürür.
- **Bütünleşebilirlik:** Akıllı şebekeler içerdiği model ve birleşik yapılarla şebeke bilgilerini sisteme dahil edip, paylaşım sağlayabilir.
- **Gözlemlenebilir, Otomasyon Sağlanabilir, Yönetilir Olma:** İçerdiği haberleşme katmanı ve bilgi teknoloji sistemleriyle akıllı şebekeler, şebekenin tüm noktasına ulaşabilir ve herhangi bir arıza durumunda uzaktan otomasyonu ile müdahale edilebilir şebekelerdir. En uygun şebeke koşullarını sıkıntısız bir şekilde yönetebilir. Yapay zeka ve optimizasyon algoritmaları ile üretimden tüketim aşamasına kadar tüm sisteme anlık erişim sağlanıp, elde edilen verilerin optimal durumda kalması sağlanabilir.
- **Haberleşme-İletişim:** Şebekede bulunan tüm kullanıcılar istedikleri zaman şebekenin verimliliğini sürdürmesi açısından haberleşebilir durumdadır.
- **Çevre Dostu Olma:** Fosil kaynaklarının kullanımlarının azalması durumları ile karbon emisyonları minimum düzeye incek kadar azaltılır, çevreye daha az zarar verir.
- **Sayısal Yapı:** Şebeke içerisinde bütün işlemlerin; güvenilir ve pratik ölçüm, otomasyon işlemlerini gerçekleştirmek, iletişim kurmak ve şebekeyi korumak, gibi tüm aktivitelerin sayısal bir altyapı ile hazırlanması gerekmektedir.

2.3 Akıllı Şebeke Bileşenleri

Akıllı şebeke ihtiyaçları kapsamında farklı gereksinimlere yanıt verebilmek adına çeşitli kuruluşlar ve organizasyonlar var olup, bu kuruluşlar arasında, Birleşmiş Milletler altında kurulmuş olan ve en çok göz önünde olan teşkilat NIST (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) kurumudur. Akıllı şebeke kapsamında yapılan çalışmalar bu kurum tarafından yayınlanan standartlar ile düzenlenmektedir. Şekilde NIST aracılığıyla önerilmiş ve çoğu çalışmada kullanılmış akıllı şebeke kavramsal modeli sunulmuştur (Alagöz, 2015a; Baloğlu, 2017; NIST, 2010).



Şekil 2.3: NIST akıllı şebeke mimarisi.

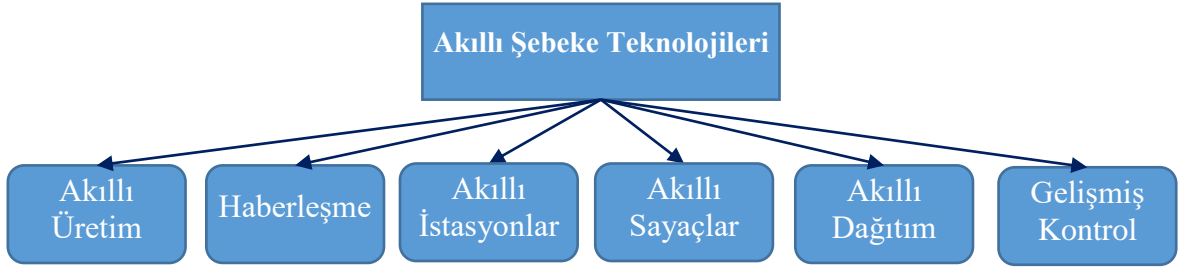
Şekil 2.3'te verilen modele göre tüm saha birbiri ile bağlantılıdır ve 7 çalışma alanına bölünmüştür. Bu alanlar sırasıyla aşağıda verildiği gibidir (Atıcı, 2021; Tuttokmağı, 2019);

- a- **Akıllı Üretim:** İleri teknoloji uygulamaları ile enerji akışının sağlandığı, yenilenebilir ve kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlardan etkin şekilde faydalanılarak, birbirleriyle iletişim halinde oldukları enerji üretim tesisleridir. YEK'in kullanımı son derece önemli olup enerji depolama sistemlerinin önü açılacak ve enerji verimliliği artacaktır. Klasik şebekelere göre akıllı üretim ile YEK'in dahil edilmesi üretimi esnek hale getirecektir. Akıllı üretim sadece tesis bazlı düşünülmemelidir. Üreticilerin yanında tüketicilerde yenilenebilir kaynaklardan yaptıkları üretimi şebekeye satabilir ve üretken tüketici adıyla şebekede önemli olabilmektedir. Şebeke geri bildirimleri sayesinde enerji

üretiminin en optimal duruma getirilmesi sayesinde enerji verimi, voltaj seviyesi, frekans değeri ve güç faktörü ayarlama-düzeltilme işlemleri akıllı üretim hedeflerindedir.

- b- Akıllı İletim:** İleri seviye enerji iletim sistemlerinin eskiyen mevcut şebekenin trafo ve iletim hatlarına eklenerek, arz ve talep dengesinin sağlanmasının hedeflenmesiyle enerji kararlılığının sağlanacağı akıllı sistemleridir. Akıllı iletim şebeke sistemi birbiriyle ilişkili 3 temel unsurdan oluşmaktadır. Bunlar; akıllı kontrol merkezleri, akıllı güç iletim ağları ve akıllı trafo merkezleridir (F. Li vd., 2010). Akıllı iletim teknolojisi ile şebeke esnekliğini artırmak mümkün olacaktır.
- c- Akıllı Dağıtım:** Akıllı dağıtım mekanizması eski sistem verilerine dayanarak ileriye yönelik tahminde de bulunan, dengeli bir sistemdir. Akıllı şebeke sistemi karmaşık yapıya sahip olduğundan, klasik şebekeye eklenecek olan bilgi-teknoloji, haberleşme katmanları sayesinde izleme sistemleriyle güç akış sırasında meydana gelebilecek sıkıntılar akıllı dağıtımın sayesinde üstesinden gelinebilecektir.
- d- Kullanıcılar:** Üreticiden son tüketiciye kadar, üretken tüketicisinde içinde bulunduğu tüm müşterileri kapsamaktadır.
- e- Operasyon Alanları:** Şebeke durumunu göz önüne alarak gerekli ölçümlerin yapıldığı, analizlerin yapılarak şebeke durumunu gösteren, şebekenin sorunsuz şekilde çalışmasını sağlayan teçhizat ve algoritmalarından oluşan alandır.
- f- Piyasa ve Servis Sağlayıcıları:** Servis ve piyasa sağlayıcıları herhangi bir arıza durumunda online olarak tüketicilerin müdahale edemeyecekleri en üst durumlar için, kullanıcılar, piyasa, üretim aşamalarıyla doğrudan bağlantılı sistem sağlayıcılarıdır.

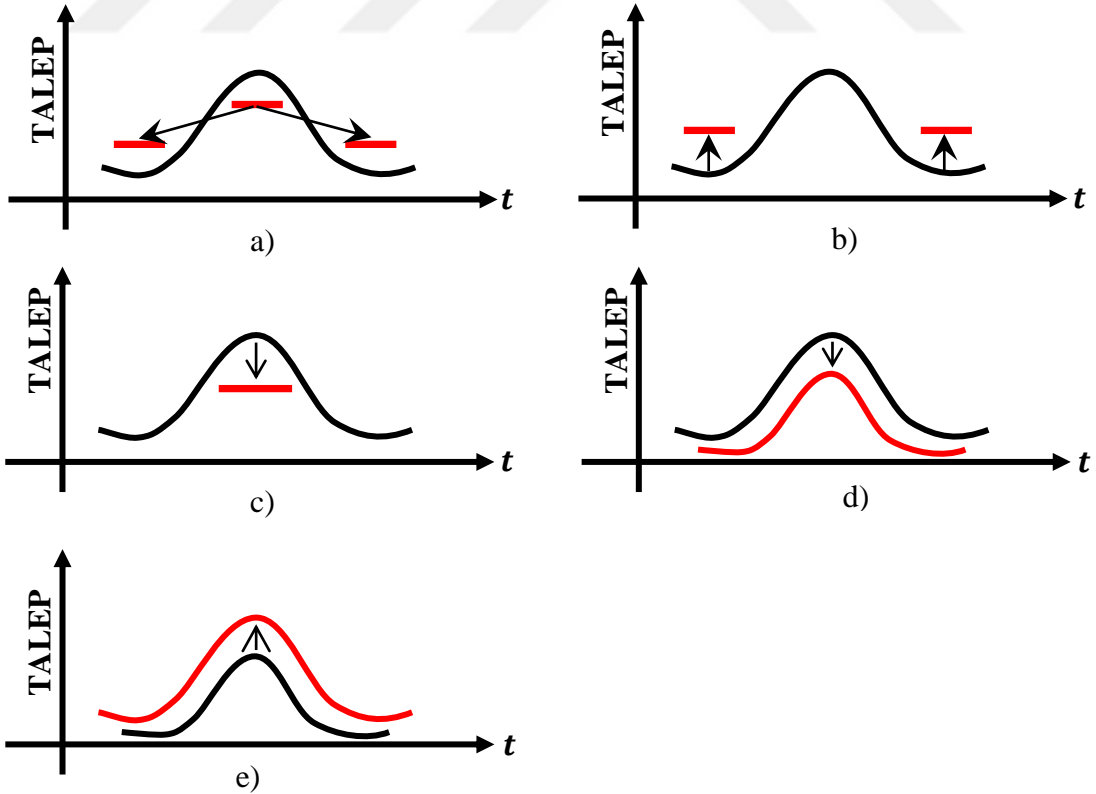
Bu kavram modeli dışında akıllı şebeke teknolojilerini bir arada toplayacak olursak bu teknolojiler Şekil 2.4'teki gibi gösterilebilir (Atıcı, 2021; Khan vd., 2016).



Şekil 2.4: Akıllı şebeke teknolojileri.

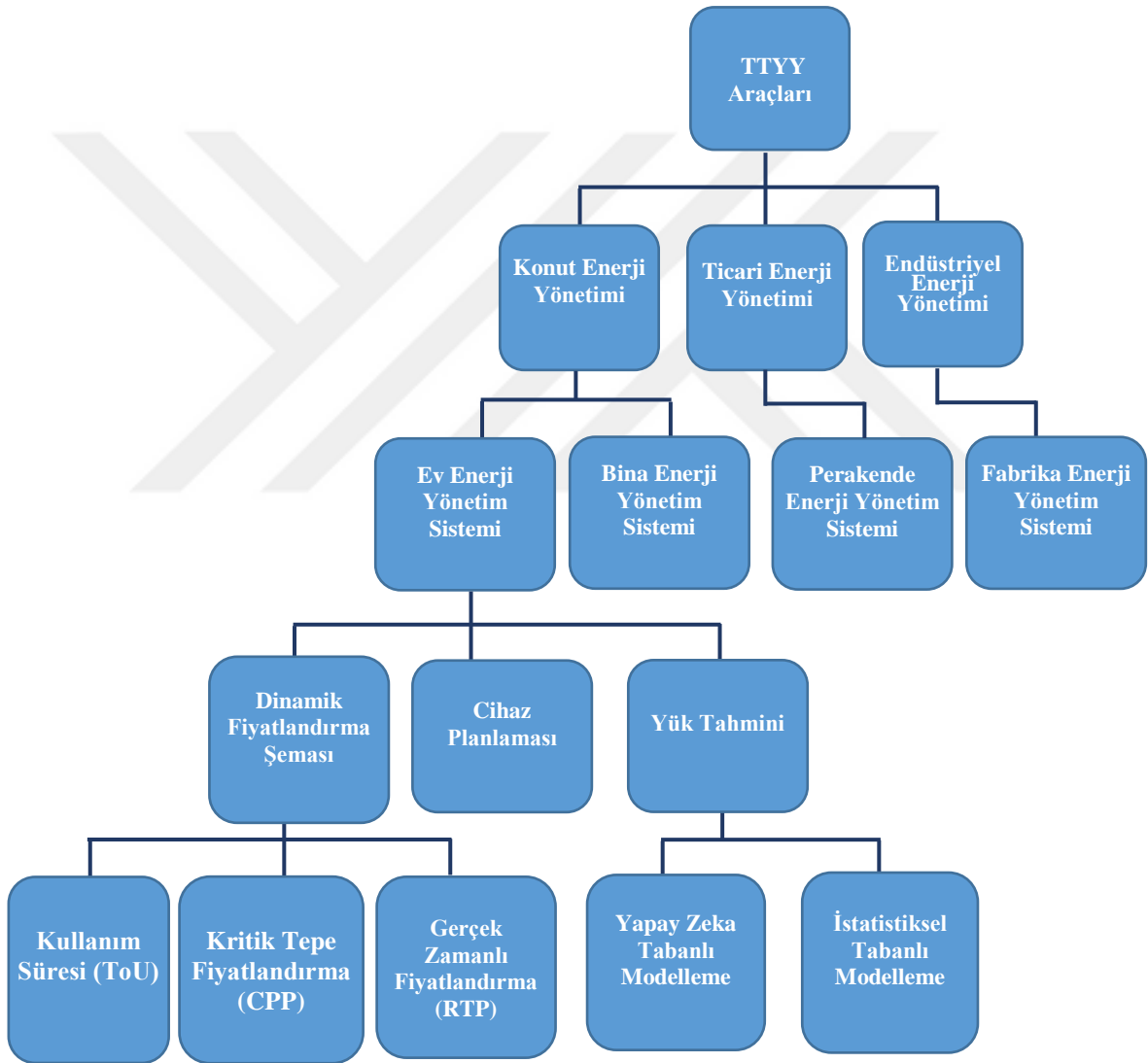
2.4 Talep Tarafı Yönetim

Talep tarafı yönetim (TTY) teknikleri tüm kullanıcıların özellikle tüketici topluluğunun şebeke içinde yük kullanma profillerini şebekenin faydasına olacak şekilde değiştirmesi işlemleri olarak adlandırılır. TTY tekniği ile TTY birbine benzer kavramlardır. Sistemi daha verimli yapmak adına yapılan bu işlemler enerji ve şebekede verimi artırmaya yöneliktir (Palensky ve Dietrich, 2011). Tüketiciler tarafından şebekede yapılan eylemler Şekil 2.5’de verildiği gibi yük kayması, vadi doldurma, tepe kesme, stratejik talep büyümesi ve talep tasarrufudur (Gellings, 1985; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021; Zehir ve Bağrıyanık, 2013)



Şekil 2.5: TTY stratejileri, a) yük kayması, b) vadi doldurma, c) tepe kesme, d) talep tasarrufu, e) stratejik talep büyümesi.

Bir güç sisteminin yönetilmesi ve işletilmesi için yük tahmini çok önemlidir. İlerleyen zamanların akıllı şebekelerinde TTYE için yük tahmini ve dinamik enerji fiyatlandırma yöntemleri önemli rol oynayacaktır. TTYE esas olarak kullanıcı tarafını kontrol ederek mevcut üretime güvenmektedir. Ayrıca TTYE enerji kararlılığını korumak için önemli bir araçtır. TTYE Şekil 2.6'da gösterildiği gibi enerji yönetim tekniklerini 3 kategoriye ayırmıştır. Bunlar konut, ticari ve endüstriyel enerji yönetim sistemleridir. Bu enerji yönetim sistemleri sayesinde toplam maliyet azalabilecek ve yük tepeden ortalama değere kadar düşürülebilecektir (Akçin vd., 2013; Khan vd., 2016).



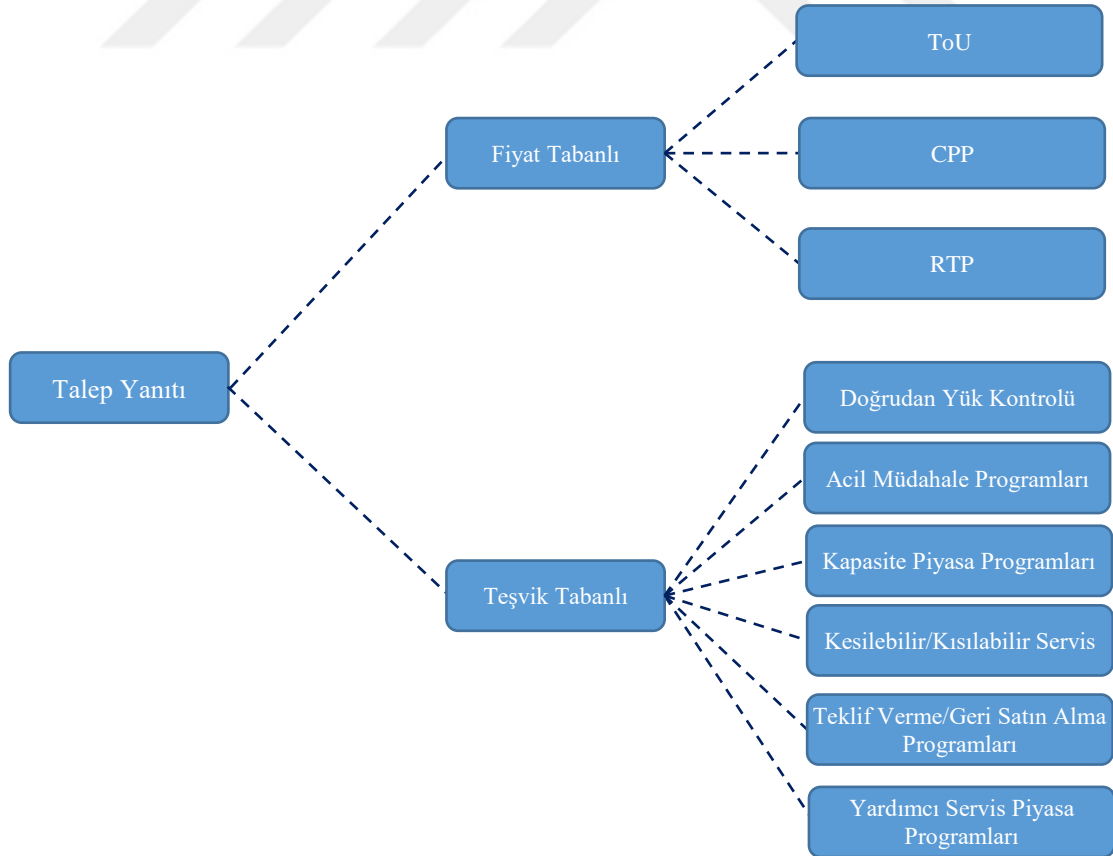
Şekil 2.6: Akıllı şebekelerde TTYE için hiyerarşik model.

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi kullanıcı tarafında dinamik fiyatlandırma, cihaz planlama ve yük tahmini gibi teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler TTYE uygulamaları arasında gelecek vaat etmektedir (Khan vd., 2016). Akıllı şebekenin TTYE için iki esas

hedefi vardır. Bunlar YEK ve enerji depolama kapasitesidir. Akıllı şebekeler YEK'in sisteme entegrasyonunu kolaylaştırır. YEK anlık yükselen talebi karşılamak için uygun çözüm yoludur (Anees, 2012). Enerji depolama ise akıllı şebekelerde tepe yük yönetimine katkı sağlamak için birçok yolla gerçekleştirilir.

2.4.1 Talep yanıtı (TY)

Kullanıcıların alışmış oldukları tüketim davranışlarını değiştirmeyi ve tepe yüklerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır (Huang vd., 2019; Nazar vd., 2012). Tüketicilerin enerji taleplerini farklı zaman dilimlerine aktaran, kritik zamanda devreye girerek yük azaltmalarını sağlayan TY, YEK'den dolayı oluşan dalgalı üretim ve talep dalgalanmalarına karşı fiyat sinyallerini kullanmaktadır. Şekil 2.7'de görüldüğü üzere TY, fiyat tabanlı ve teşvik tabanlı olarak gruplara ayrılmaktadır. FDTY dinamik fiyat tarifelerini içermektedir ve bu grup genel olarak tüketicilerin tercihlerini değiştirmeye yöneliktir (Yan vd., 2018). Teşvik tabanlı talep yanıtı enerji piyasasının daha fazla gelişmesi için bir takım işlemleri içermektedir. Doğrudan yük kontrolü, teklif verme ve satın alma gibi işlemler Şekil 2.7'de görülmektedir (Khan vd., 2016; Nazar vd., 2012; Yan vd., 2018).



Şekil 2.7: TY grupları.

2.5 Enerji Fiyatlandırma Tarifeleri

Elektrik faturası, enerjinin üretiminden tüketimine kadar her aşamada tüketilen enerjinin kWh başına birim fiyat ile çarpılmasıyla elde edilir (Dursun ve Siano, 2019). Elektrik enerjisinin fiyatlandırılmasına yönelik olan birtakım geleneksel tarife türleri vardır. Bunlar; basit tarife, sabit oranlı tarife, blok oranlı tarife, iki parçalı tarife, maksimum talep tarifesi ve güç faktörü tarifesidir (Mehta ve Mehta, 2005). Enerji fiyatlandırma tarifeleri statik fiyatlandırma ve dinamik fiyatlandırma tarifeleri olarak iki bölümde incelenmektedir. Statik fiyatlandırma tarifelerine göre tüketicilerin değişen yük taleplerine karşılık fiyat değişmezken, dinamik fiyat tarifelerinde talep yoğunluğuna göre fiyat değişmektedir (Dutta ve Mitra, 2017). Elektrik tarifelerini daha kolay anlamak için bu tarifeleri tek zamanlı tarife, üç zamanlı tarife, dinamik fiyat tarifeleri olmak üzere 3 kategoride toplayabiliriz. Bu geleneksel tarife yapıları karmaşık yapıda olmasından ve eski zamanlara dayanmasından dolayı akıllı şebeke yapısına pek fazla uyum sağlayamaz. Bu sebeplerden dolayı modern sistem ihtiyaçlarına yönelik verimli, zamana dayanan fiyatlandırma planları oluşturulmuştur. Talep yanıtı alt kategorilerinden biri olan FDTY, kullanıcıların elektrik tüketimlerini kontrol etmek için kontrol sinyali olarak enerji fiyatını kullanır. Elektrik fiyat sinyalini kontrol olarak kullanmanın amaçları genel olarak enerji tüketimini azaltmak ve tepe yükün bir kısmını yoğun olmayan zamanlara kaydırmaktır. Mevcut FDTY programları sırasıyla verilmiştir (Yan vd., 2018). Bu fiyatlandırma planları RTP, ToU fiyatlandırması ve CPP'dir. Dinamik fiyatlandırma Şekil 2.6 ve 2.7'de görüldüğü gibi TTYE içerisinde etkin rol oynamaktadır (Chakraborty vd., 2014; Khan vd., 2016). Talep yanıtı kullanıcıların durağan olmayan elektrik fiyatlarına karşı verdiği yanıttır. Talep yanıtı hem manuel hem de otomatik şekilde gerçekleştirilir. Talep yanıtı elektrik maliyetlerini düşürebilir (Yan vd., 2018). Böylece talep yanıtı ile tüketiciler enerji tüketimlerini, arz ve talebi eşitlemek amacıyla değiştirirler (Keleş, 2017). Talep yanıtı ve TTYE içerisinde olan zamana bağlı fiyatlandırma programları elektriğin kullanım zamanlarını tercihe bırakmaktadır. Aşağıda verilen fiyatlandırma şemaları hem üretici hem de tüketici açısından avantajlıdır. Çünkü bu fiyatlandırma şemaları ile yük kontrol edilebilecek ve bu fiyatlandırma şemaları akıllı şebeke için TTYE uygulamasına yardım edeceklerdir.

2.5.1 Tek zamanlı (sabit fiyatlı) tarife

Tüketicilerin elektrik tüketimlerinin kWh başına günün her saatinde aynı fiyat birimine denk geldiği enerji fiyat tarifesidir (Anonim, 2022). Tüketim seviyeleri değişse dahi fiyat sabit kalmaktadır. Bu tarife kapsamında tüketiciler değişen üretim maliyetlerinden kaynaklı fiyat değişikliğine maruz kalmazlar (Dutta ve Mitra, 2017).

2.5.2 Üç zamanlı tarife

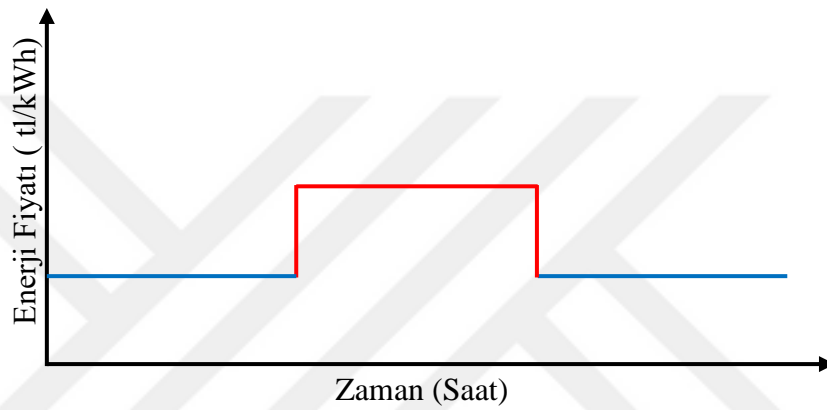
Tüketicilerin elektrik tüketimlerinin kWh başına günün farklı zaman dilimlerine göre farklı fiyat birimine denk geldiği enerji fiyat tarifesidir. Zaman dilimleri üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; gündüz zaman dilimi (06:00- 17:00), puant zaman dilimi (17:00- 22:00), gece zaman dilimidir (22:00- 06:00). Üç zamanlı tarife ile tüketiciler, kendi güç tüketim profillerini düzenleyip, enerji tüketim fiyatının pahalı olduğu zaman diliminden daha ucuz olduğu zamana kaydırabilirler. Tüketiciler mevcut durumda seçim yapıp sabit fiyat tarifesini veya üç zamanlı fiyat tarifesini seçebilir. Üç zamanlı fiyat tarifesinde en yoğun olmayan dönem gece dönemi olup, bu zaman diliminde enerji fiyatı gündüz veya puant dönemine göre daha ucuzdur. Bu tarifenin en temel amacı tüketicileri tüketimlerin en az olduğu bölgeye yönlendirilmesini sağlamaktır.

2.5.3 Dinamik fiyatlandırma planları

2.5.3.1 Kullanım süresi planı (ToU)

Kullanım süresi (ToU), enerji tüketiminin farklı zaman dilimlerinde farklı fiyat tarifesi sunduğu dinamik fiyatlandırma türüdür (Gyamfi vd., 2013). Bu farklı zaman dilimleri enerji kullanımına göre talebin yoğun olduğu saatler, orta yoğun olduğu saatler ve yoğun olmadığı saatler olarak 3 gruba ayrılmaktadır. Yoğun olmayan saatlerde enerji kullanımı, yoğun saatlere kıyasla daha az ücrete tabi tutulmaktadır. Bu fiyatlar Şekil 2.8’de verildiği gibidir (Gyamfi vd., 2013). Yoğun saatlerde tesislerin daha sık kullanımını tetikleyen yüksek enerji talebinden dolayı fiyat daha fazla olmaktadır (Nazar vd., 2012). Pik talep yükü en yoğun saatteki en fazla tüketimi ifade etmektedir. Pik yükünü bu yoğun saatlerde karşılamak için birtakım önlemler alınmalıdır. Bu önlemler; YEK’in destek olduğu yeni üretim tesislerinin açılması, iletim, dağıtım hizmetlerinin şebeke içerisinde genişletilmesi ve teknik kayıpların en aza indirilmeye çalışılması gibi durumlardır. Tüketiciler yoğun olan saatlerdeki enerji taleplerini yoğun olmayan zamana erteleyerek ve kendi yenilenebilir üretimlerini yapıp (rüzgar ve güneş enerjisi), yoğun saatlerde bu enerjiyi

şebekeye satarak kar marjı sağlayabilirler (Jose ve Pahwa, 2010). ToU fiyatlandırma planı için yoğun saat tarifeleri önceden belirlenerek tüketici topluluğuna öncesinden tüketim planı hazırlamak için fırsat sunmaktadır. ToU fiyatlandırma planının amacı enerji üretim maliyetlerini ve pik yükünü azaltmak için talep anını yoğun olmayan zamana kaydırmayı teşvik etmektir. Böylelikle akıllı şebeke kavramıyla sisteme entegre edilebilecek YEK devreye alınıp, tüketici topluluğu yeterince bu konularda eğitilirse elektrik faturalarında ciddi bir azalma sağlanabilir (Khan vd., 2016). ToU fiyatları tüketicilerin kendilerini hazırlaması adına aylar öncesinden belirlenerek, tüketici yorgunluğu oluşturmamaktadır (Shao ve Zhang, 2010).



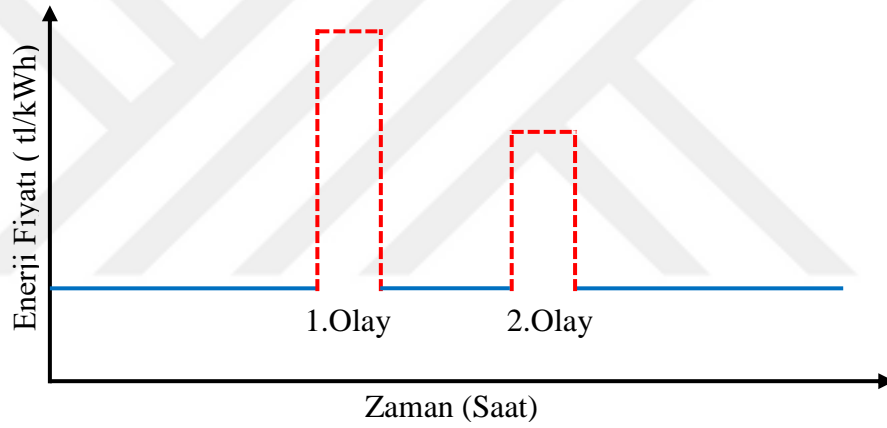
Şekil 2.8: ToU fiyatlandırma planı.

Şekil 2.8’de belirtilen düz çizgi fiyatın değişmediğini belirli aralıklarda sabit kaldığını vurgulamaktadır.

2.5.3.2 Kritik tepe fiyatlandırma (CPP) planı

Kritik tepe fiyatlandırması (CPP), ToU fiyatlandırma planının değiştirilmiş hali olup, yıl içerisinde enerji talebinin yılın geri kalan günlerine kıyasla fazlasıyla yüksek olduğu zaman dilimlerini (en soğuk kış ve en sıcak yaz günleri) kapsamaktadır. Bu dönemlerde CPP yüksek fiyat sunmaktadır (Gyamfi vd., 2013). ToU fiyat tarifesi önceden belirlendiği için üretim maliyetlerinin ve tüketimin arttığı yılın zamanını ayırt edemez. Enerji üretim maliyeti ToU fiyat şemasının üzerine çıktığı zaman tüketiciye günlük fiyat uygulanır. Ekonomik açıdan zararlı olan bu durumu önlemek için kritik tepe fiyatlandırma ortaya çıkmıştır. CPP tarifesi şebeke tarafından belirlenen kritik dönemi kapsar ve bu dönemde enerji fiyatı yüksektir (Gyamfi vd., 2013; Yan vd., 2018). En yüksek fiyat günün en yoğun zaman dilimlerini kapsarken geri kalan zamanda tüketiciler indirimli enerji fiyatından yararlanmaktadırlar. Güçlü fiyat sinyali veren CPP aşırı güç tüketimini azaltmaktadır (Dutta ve Mitra, 2017).

Şekil 2.9’da verildiği gibi fiyatın belli dönemler dışında değişken olması ve süre dışında ToU fiyat planına benzemektedir. Noktalı çizgi ile gösterilen kısımlar şebeke tüketimine göre fiyatın sabit olmadığını ve hem yatay hem de dikey yönde değişikliklerin olabileceğini göstermektedir (Gyamfi vd., 2013). CPP yükün pik yaptığı süre boyunca enerji fiyatını çok yüksek tutar ve yük tüketiminin yük tahmininin üzerine çıkacağı kritik günün 1 gün öncesinden ilan edilerek, tüketicileri yükü azaltmaya teşvik eder ve fiyatı en aza indirmeyi amaçlar. ToU fiyatlandırma planıyla da birlikte kullanılabilen CPP için tüketici kritik güne uygun talep yanıtı verebilirse kendi faturalarını en uygun seviyeye indirebilir (Khan vd., 2016). Yıl içerisinde birkaç defa tekrarlanan CPP, ToU fiyatlandırma planına göre tüketiciyi biraz daha yormaktadır ve her iki fiyatlandırma planında da tüketici eylemlerine bağlı olarak fiyatlar düşebilecektir (Park vd., 2015). CPP fiyatlandırma planı genellikle ToU fiyatlandırma planına göre daha yüksek fiyat sunmaktadır (Yan vd., 2018).

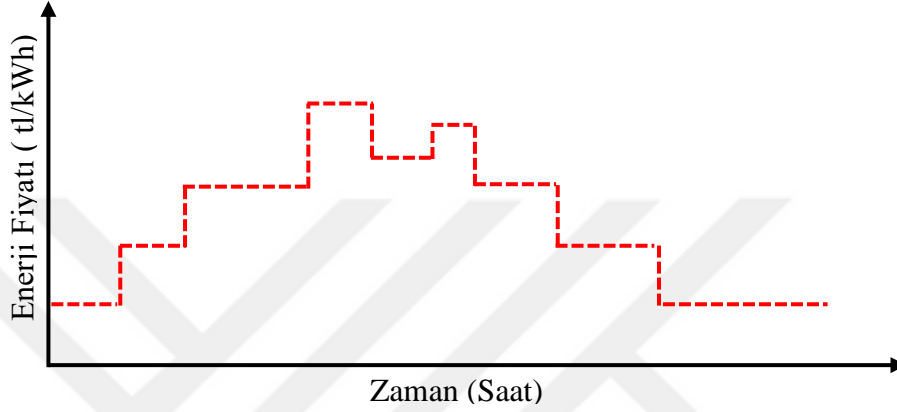


Şekil 2.9: CPP fiyatlandırma planı.

2.5.3.3 Gerçek zamanlı fiyatlandırma (RTP) planı

RTP dinamik fiyatlandırma planı kullanıcıların gerçek üretim maliyetlerine en yakın ücret ile faturalandığı ve maliyeti en iyi yansıtan fiyat şemasıdır. RTP fiyatlandırma planı altında elektrik fiyatları toptan satış fiyatlarına göre değişmektedir (Khan vd., 2016) . RTP 2 yolla yapılmaktadır. Birincisi saatlik fiyatlandırmadır ve bu plana göre her saat başı elektrik fiyatı bir sonraki saat için açıklanır. İkinci gerçek zamanlı fiyatlandırma gün öncesi RTP planıdır. Bu fiyatlandırmaya göre talep ve üretim verilerinin tahmin edilmesiyle bir sonraki günün enerji fiyatları bir gün öncesinde 24 saatlik fiyat şemasıyla duyurulur. Tüketicilerin anlık kullanımları değiştiğinden dolayı gün öncesi fiyatlandırma RTP planında daha etkin olmaktadır (Khan vd., 2016). RTP planının fayda sağlayabilmesi için tüketicilere

bu konuda yeterli eğitim verilip, enerji tüketiminde tasarruf için tüketiciler teşvik edilmelidir. RTP diğer fiyat şemalarına göre üreticiden tüketiciye kadar tüm kullanıcılara faydalı olan, talebin kontrol ve otomasyon sistemlerinin kullanılarak optimize edildiği en iyi fiyatlandırma şemasıdır (Palensky ve Dietrich, 2011). Şekil 2.10’da verildiği gibi RTP uygulamasında enerji fiyatı bölgesel değişen talebe göre değişmektedir ve değişken fiyat noktalı çizgilerle gösterilmektedir (Gyamfi vd., 2013).



Şekil 2.10: RTP fiyatlandırma planı.

FDTY programları içerisinde olan RTP, CPP ve ToU hem üreticiler hemde tüketiciler bir takım avantajlar sağlamakla birlikte her bir planın kendi içerisinde birtakım dezavantajları vardır. Genel hatlarıyla bu dinamik fiyat planlarının avantaj ve dezavantajları Çizelde 2.2’de ayrıntılarıyla verilmiştir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2022; Yan vd., 2018). ToU fiyatlandırma kapsamında yapılan çalışmalar genellikle tepe kaymasını sağlayarak talep yanıtı değiştirmek üzerine yapılmıştır ve arz ile talep arasında denge sağlanmaya çalışılmıştır (Pallonetto vd., 2016; J. Wang vd., 2010; Xu vd., 2015; Yan vd., 2015). CPP fiyatlandırması üzerine yapılan çalışmalarda, talep verilerini kontrol etmek adına ve talep yanıtı değişikliklerine uygun olarak çeşitli modeller oluşturulmuş veya optimizasyon yöntemleri kullanılarak tüketici davranışlarının fiyat üzerinde etkileri incelenmiştir (Boonchuay vd., 2017; Cui vd., 2015; Herter ve Wayland, 2010; Kii vd., 2014; Q. Zhang vd., 2009). Bu tez çalışması ve literatür taramasında verilen çalışmalara ek olarak RTP üzerine yapılan çalışmalarda diğer fiyatlandırma yöntemlerinde olduğu gibi kullanıcı davranışlarını TY sinyalleri ile değiştirip kar marjı sağlamaya yöneliktir. Genel olarak yapılan çalışmalarda RTP kullanımlarının avantaj ve dezavantajları oluşturulan modeller ile belirtilerek RTP’nin kullanılabilirliği araştırmak üzerine olmuştur (Boom ve Schwenen, 2021; Pahle vd., 2016; Roozbehani vd., 2012).

Çizelge 2.1: FDTY programlarının karşılaştırılması.

FDTY Programları	Avantaj	Dezavantaj
ToU	<p>Tüketici ve üreticiler için takip edilmesi ve uygulanması kolaydır. Günlük katılım oranı istikrarlı ve yüksektir. Yoğun saatlerde enerji talebini azaltır. Tüketim yorgunluğuna sebep olmaz. Dönemlere ayrılan fiyat uygulamasında kendi içerisinde fiyatta istikrar vardır ve bu fiyat kendi dönem içerisinde değişmez.</p>	<p>Tüketicilerin tüketimlerini anlık olarak değiştirmelerinden dolayı yoğun olmayan saatlerde talep artışı gösterir.</p>
CPP	<p>Takip edilmesi kolaydır. Tepe yük değerinin değiştirilmesinde etkindir. Olay odaklı tarife sistemi olmasından dolayı tüketici katılımı yüksektir. CPP değerleri gün öncesinden tüketicilere iletilir ve olayların çözümünü hızlandırır.</p>	<p>CPP de uygulanan tepe değeri diğer akıllı fiyatlandırma programlarına kıyasla daha yüksektir. Enerji verimi sağlamada, üretim maliyetlerini düşürmede, karbon emisyonunu azaltmada etkili değildir. Günlük olarak uygulanmaz.</p>
RTP	<p>Enerji verimliliği sağlar. Tüketici topluluğu kendini RTP programına ve aşamalarına adapte olursa çok iyi yanıt verir. Enerji üretim maliyetlerini diğer FDTY programlarına göre daha iyi yansıtmaktadır.</p>	<p>Sürekli değişen enerji fiyatlarından dolayı tüketici yorgunluğu oluşturmaktadır. Hâlihazır sistem üzerinden akıllı sayaç uygulamaları olmadan ilk başta uygulamak zordur. Yeterli donanım desteği olmak zorundadır.</p>

2.6 Türkiye Elektrik Piyasasına Genel Bakış

Türkiye toptan elektrik piyasası gün öncesi piyasası (Day Ahead Market, DAM), gün içi piyasası (Intra Day Market, IDM) ve dengeleme güç piyasası (Balancing Power Market, BPM) olmak üzere 3 ayrı piyasadandır. DAM ve IDM, Elektrik piyasaları işletme anonim şirketi (EPIAŞ) tarafından, BPM ise Türkiye elektrik iletim anonim şirketi (TEİAŞ) aracılığıyla işletilmektedir. Elektrik ticareti kullanıcılar arasında ikili anlaşmalarla yürütülmekteyken fiyatlar saatlik olarak belirlenmektedir (Barbaros vd., 2021). Elektrik fiyatlarının belirlenmesinde arz ve talep arasındaki denge çok önemli bir faktördür. Enerji arzının talebi karşılama veya karşılayamama durumlarına ve petrol, doğalgaz ve kömür gibi kaynakların maliyetlerinde oluşan değişikliklere göre enerji fiyatı değişmektedir. DAM için bir gün öncesinden belirlenen arz ve talep verilerinin belirli zaman dilimlerine ayrılarak gün içerisinde değişen her saat için piyasa takas fiyatının arz ve talep miktarıyla karşılaştırılmasıyla oluşturulduğu piyasadır (Yıldız, 2015). IDM, diğer fiyat piyasalarıyla eş zamanlı olarak ikisi arasında denge görevi kuracak olup YEK'lerden kaynaklı üretim belirsizlikleri ile tesis arıza durumlarında devreye girip kullanıcıların gün içerisinde yaşayabilecekleri olumsuzlukları ortadan kaldıracak enerji piyasası türüdür (EPIAŞ, 2016; Yıldız, 2015). Son olarak BPM, katılımcılar için tüketim seviyelerini değiştirme için fiyat teklifi sunan, operatör kullanıcılarına gerçek zamanlı olarak denge sağlanması için birkaç dakikalık süre içinde devreye alınması sağlanan yedek kapasite miktarını içerir (EPDK, 2013).

Türkiye yeni tarife kapsamında 01.01.2022 itibariyle kademeli elektrik faturasına geçmiş bulunmaktadır. Bu kapsamda bu tarife içeriğiyle mesken, sanayi ve kamu ve özel sektörlerde elektrik tüketimi belirli bir miktarda ayrı bir ücret ve üstünde ayrı bir ücret ile ayrı ayrı kısımlarla incelenmektedir. Son olarak değişen tarife 01.07.2022 tarihiyle güncellenmiş ve örneğin mesken (hane) kullanımında aylık 240 kWh'e kadar tüm vergi ve KDV dahil olarak 1.44 TL/kWh, aylık 240 kWh üstü için ise 2.16 TL/kWh olarak her bir kWh tüketim için birim olarak çarpılmaktadır. Bu bilgiler enerji piyasası düzenleme kurumu (EPDK) sayfasında alınmıştır. Enerji fiyatlarının en optimal şekilde belirlenmesi enerji piyasası içerisinde önem arz etmektedir. Kullanıcıların tamamına hesaplanan fiyatların iletim, dağıtım ve birtakım vergilerinde ilave edilerek tutarlı bir şekilde yansıtılması çok önemlidir (Zeng vd., 2008). Bu tarifenin bazı kullanıcıları belli sınırlar içerisinde tasarrufa iteceği düşünülebilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

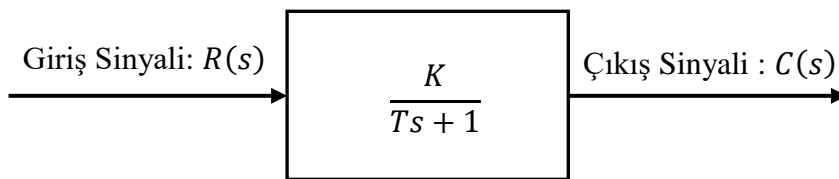
3.1 Materyal

Bir kontrol problemini çözerken öncelikli amaç sorunun ne olduğunu tespit etmektir. Kontrol sistemlerinin amacı, sistem çıkışlarını tasarlanan kontrol ölçütleri ile değişen giriş sinyalleri doğrultusunda önceden tespit edebilmektir (Golnaraghi ve Kuo, 2010). Kontrol yöntemleri kullanılarak tasarlanan sistemlerin belirli görevleri hızlı ve doğru şekilde, en az bozulmayla yapması istenmektedir. Sistemin çalışma performansını etkileyecek ölçütlerin bilinmesi, sistemde doğru şekilde kullanılması çok önemlidir. Genellikle sistemlerin kararlı yapıda olması istenmektedir. Bir kontrol sisteminin dinamikleri, bozulmaları ve süreci o sistemin temel yapısını oluşturmaktadır. Sistemler kendine özgü giriş sinyalleri için, zaman cevabı, frekans cevabı, transfer fonksiyonu gibi birçok şekilde ifade edilmektedir (Aström ve Hagglund, 1995).

Literatürde bir sistemin tasarımında kullanılacak çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında en çok kullanılan yöntemler; kapalı çevrim Ziegler-Nichols yöntemi (Ziegler ve Nichols, 1942), açık çevrim Cohen-Coon (Cohen ve Coon, 1952) yöntemleridir. Her iki yöntemde tasarlanan sistemin kontrol parametrelerini bulmak için kolay ve elverişli yöntemlerdir. Bu iki yöntem dışında kutup yerleştirme yöntemi ile kutuplar tasarlanan sistem için en ideal olacak şekilde seçilerek sistem parametreleri belirlenebilir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Bu yöntemleri incelemeden önce tez çalışması için seçilen birinci derece transfer fonksiyonunun sistem davranışlarını incelemek gerekir (Çakmak, 2011; Ogata, 2002).

3.1.1 Birinci dereceli sistemlerin davranışları

Birinci dereceli bir sistem genel olarak basitleştirilmiş blok diyagram gösterimi ile Şekil 3.1'de verilmiştir (Ogata, 2002). Bu sistemler zaman gecikmesi olan ve olmayan sistemler olarak 2 gruba ayrılmaktadır.



Şekil 3.1: 1. derece sistemlerin basit blok diyagramı ile gösterimi.

Şekil 3.1 ile gösterilen zaman gecikmesi olmayan sistem için giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki ilişki, aşağıda denklem (3.1)'de verildiği gibidir:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (3.1)$$

Bu sistem için T zaman sabitidir.

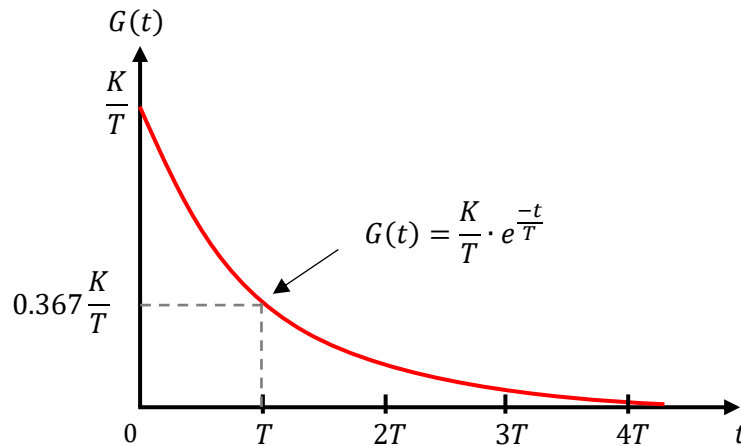
Zaman gecikmeli 1. derece sistem ise denklem (3.2) ile verildiği gibi ifade edilmektedir (Çakmak, 2011).

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \cdot e^{-Ls} \quad (3.2)$$

Bu sistem için ise T zaman sabiti (zaman gecikmesi) ve L ise sistem gecikmesi (ölü zaman) olarak adlandırılır. Sisteme verilen bir giriş sinyali T ve L kadar çıkış sinyali üzerinde zaman gecikmesi yapmaktadır (Çakmak, 2011). K durağan kazanç olarak ifade edilmektedir (Özkan, 2006).

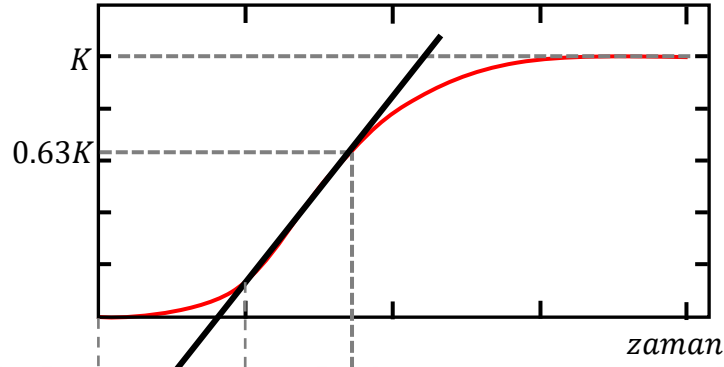
Birinci dereceye sahip zaman gecikmesi olmayan sistemin s frekans bölgesindeki ifadesinden t zaman bölgesindeki ifadenin elde edilmesi için ters laplace dönüşüm kuralları uygulanırsa bu sistem aşağıda denklem (3.3)'teki gibi üstel bir fonksiyona dönüşmektedir. Ayrıca birinci dereceden denklem (3.3) ile ifade edilen sistemin zaman ekseninde birim impuls cevabı Şekil 3.2 ile gösterilmektedir. Değişen t parametresine karşılık üstel olarak azalmaktadır (Ogata, 2002).

$$G(t) = \frac{K}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.3)$$

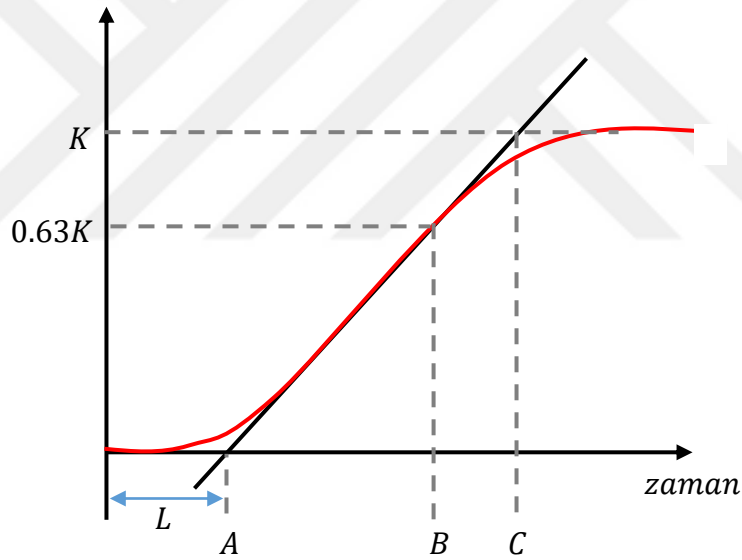


Şekil 3.2: Denklem 3.1 ile gösterilen sistemin birim impuls cevabı.

Birinci dereceden bir sistem, ölü sistem gecikmesi olarak adlandırılan L zaman gecikmesine sahip ise basamak yanıtı cevabı olarak grafiği Şekil 3.3 ile verildiği gibidir. Şekil 3.3 ile verilen a ve b görselleri basamak cevabı için T ifadesini bulmanın ayrı iki yolunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.3: (a), (b) üç parametreye (K, L, T) sahip sistemin basamak yanıt grafiği.

Şekil 3.3 (b)'de görüldüğü gibi, en büyük eğimli adım yanıtının teğet doğru ile kesiştiği yer L 'yi verir. T noktasını belirlemenin birkaç yolu vardır. Bunlardan ilki C ve A noktaları arasındaki mesafe olup, C noktası teğetin K değeri ile kesiştiği yerdedir. İkinci yol ise B ve A noktaları arasındaki mesafe olup, B noktası adım yanıtının $0.63K$ değerine ulaştığı zamandır. B noktasına göre yapılan yöntem daha doğru sonuç verirken diğer yöntemde çok büyük bir T değeri çıkmaktadır (Aström ve Hagglund, 1995). Bir kontrol sistemi içerisinde T ve L parametreleri kontrol ayarları için çok önemli olup; tüm sistemin

zaman sabiti T ve sistemin ölü zaman gecikmesi L arasındaki bağıntıya göre sistemin kontrol edilebilirlik durumu analiz edilebilmektedir. Bu analizler doğrultusunda T zaman sabiti, L zaman gecikmesinden çok çok büyük ise sistem, çeşitli kontrolörler vasıtasıyla tek döngü ile kontrol edilebilirken, tam tersi durumda sistem karmaşık kontrolör döngüleri ile daha zor bir şekilde kontrol edilir. Birinci mertebeli sistemlerde bir sistemin kontrol edilebilme zorluğunu ifade etmek için $L/(L + T)$ oranı kullanılır. Bu oran ifadesine kontrol edilebilirlik oranı denmektedir ve sistemlerde kontrol edilebilirlik oranı çok önemlidir (Aström ve Hagglund, 1995; Çakmak, 2011). Kontrol edilebilirlik oranı $0 \leq L/(L + T) \leq 1$ ile ifade edilip, bu oranın 1'e yaklaşımıyla bir sistemin kontrol edilmesinin daha zor olduğu bulunmuştur. Ayrıca kontrol edilebilirlik oranı 1 olan sistemlerde kontrol süreci zor ve ölü zaman bölgesine denk gelmektedir (Aström ve Hagglund, 1995).

3.1.2 İkinci dereceli sistemlerin davranışları

İki kutba sahip kapalı çevrim transfer fonksiyonun olduğu sistemlere denmektedir. 2. dereceden sistemlerin kapalı döngü transfer fonksiyonu denklem (3.4)'te verildiği gibi yazılmaktadır ve bu forma 2. derece sistemin standart formu denmektedir (Ogata, 2002).

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.4)$$

2. derece sistemin dinamik davranışını etkileyen 2 parametre vardır. Bunlar; ζ sönüm oranı ve ω_n sönümsüz doğal frekans değerleridir. 2. derece bir sistemin karakteristik denklemi;

$$\Delta(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (3.5)$$

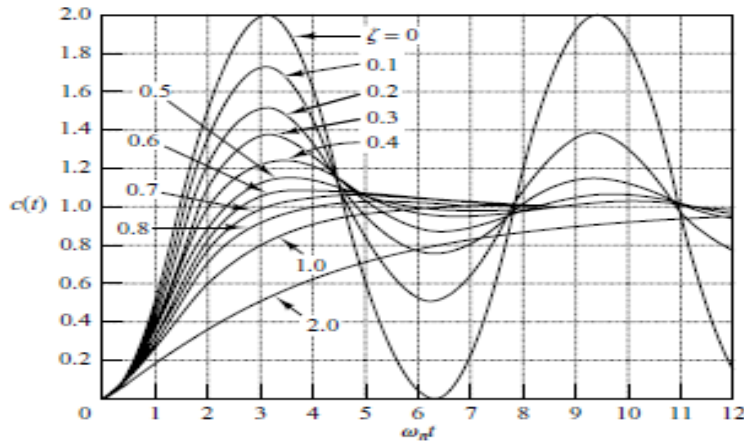
denklem (3.5) ile bulunmaktadır. Denklem kökleri s_1 ve s_2 ise denklem (3.6)'da verildiği gibi bulunup, ζ ve ω_n değerine göre değişmektedir.

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.6)$$

$2\zeta\omega_n$ değeri 2σ değerine eşit olup, σ değerine sönümlenme değeri denmektedir (Ogata, 2002).

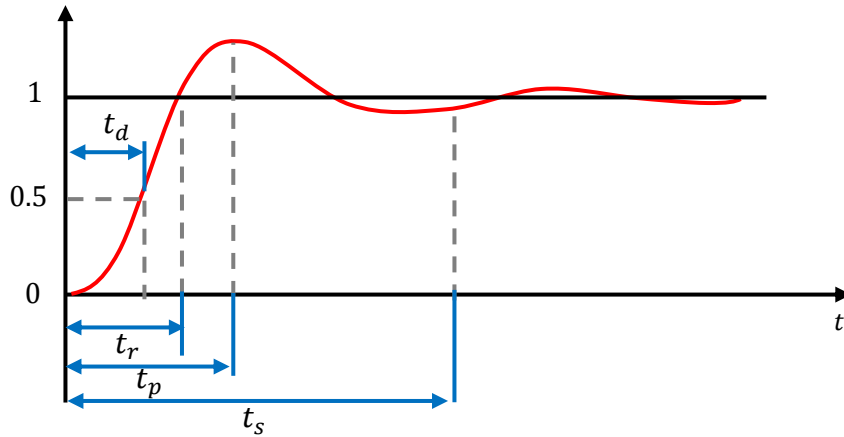
ζ sistemin yaptığı osilasyonun sönüm miktarını ifade etmektedir ve sistemlerin kararlılık analizinde etkisi büyüktür. ω_n sabit kalmak koşuluyla, ζ değerinin farklı değer almasıyla sistem kutuplarının yeri ve dolayısıyla sistemin osilasyon durumu değişmektedir.

$\zeta < 0$ ise kutuplar sağ yarı düzlemde olup, sistem kararsızdır ve negatif sönümlüdür. $\zeta = 0$ ise, kutuplar $j\omega$ ekseninde olup, sistem sönümsüzdür. $0 < \zeta < 1$ ise, kapalı döngü kutupları birbirinin eşleniğidir, kutuplar sol yarı düzlemde ve sistem az sönümlüdür. $\zeta = 1$ ise kutuplar birbirine eşit ve $-\omega_n$ değerine eşittir. Böyle sistemlere kritik sönümlü sistem denmektedir. Son olarak $\zeta > 1$ ise kutuplar ayrı ayrı değerde ve x ekseninin sol tarafı üzerinde olup, sistem aşırı sönümlüdür. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi sistemde ζ değeri 0.5 ile 0.8 değerleri arasında sistem daha kararlı olup, kritik veya aşırı sönümlü sistem cevabına göre daha hızlı sonuç verip son değere ulaşmaktadır (Ogata, 2002).



Şekil 3.4: 2. dereceden sistemin birim basamak cevap eğrileri.

Doğal frekans, sönümsüz bir sistemin salınım frekansıdır. Bir sistemde sabit ζ değeri olup, ω_n değişimiyle sistemin tepki süresi değişir, bir diğer ifadeyle ω_n değişimi sistemde yükselme zamanı t_r ve gecikme zamanı t_d nin değişmesine sebep olmaktadır. (Çakmak, 2011). Şekil 3.5'te bir sistemde geçici hal davranışlarına bağlı olan bu zamanlar gösterilmektedir (Ogata, 2002).

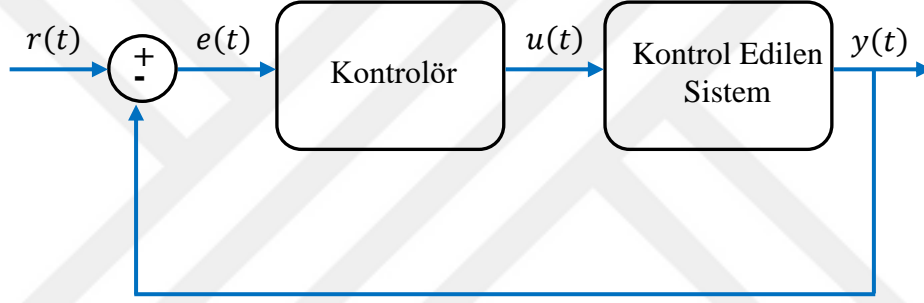


Şekil 3.5: Geçici ve kalıcı hal cevap birim basamak yanıt eğrisi.

3.1.3 Kontrolör yapı taşları

Kontrolör yapıları kontrol sistemlerini oluşturan en önemli yapı taşlarıdır. Kontrol sistemlerinde amaç; giriş sinyali ile tetiklenen bir sistemin hızlı yanıt vermesini ve çıkış sinyalinin bozucu etkenlere rağmen en az bozulmayla elde edilmesini sağlamaktır (Çakmak, 2011).

Bir kontrol sisteminde en temel haliyle sistem dinamiği olarak adlandırılan geri beslemeli blok şeması Şekil 3.6'da verilmiştir. Burada $r(t)$ referans girişi, $e(t)$ kontrol hatası, $u(t)$ sistem girişine uygulanan kontrol değişkeni ve $y(t)$ ise çıkış değer değişkenidir (Güzen, 2003). Kontrol hatası referans girişi ile çıkış değişkeni arasındaki farka eşit olup, negatif bir hata sinyali durumunda kontrolör çıkış değişken değerini azaltarak ve değeri en uygun durumda tutacaktır (Aström ve Haggund, 1995)



Şekil 3.6: Geri beslemeli blok şeması.

Genel olarak kontrolör yapıları sırasıyla Oransal (P), Oransal-İntegral (PI), Oransal-Türev (PD) ve Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolörlerdir. P Kontrolör devamlı kontrol modu olup oransal kazancı K_p 'dir. K_p yükselmeyi ifade edip oransal bant değişikliğinde kullanılmaktadır. K_p küçük değerlerde kararlı hal hatalarına sebep olurken çok büyük değerlerde sistemde kendi dinamiklerinden dolayı salınımlar görülmektedir. P kontrolörde kullanılan K_p kazancı kararlı hal hatalarını düzeltmek için kullanılır. İntegral kontrolör kararlı hal hatasını gidermek için kullanılır ve sistem kazancının bilinmesine gerek duyulmaz. P kontrolör ile birlikte kullanılır ve PI kontrolörler kararlı hal hatasının ($e_{ss} \neq 0$) sıfırdan farklı durumları için çıkış hatasını pozitif veya negatif olma durumuna göre sistem girişindeki hatayı toplayarak çıkışı artırıp azaltabilir. PI kontrolörler geçmiş hatalar üzerinde işlem yapıp sistem çıkışındaki büyük salınımları önlemek için ve kararlı hal hatasını çözmek için kullanılır. Türev kontrolör sistemde ileride oluşabilecek olası hataları çözmek için kullanılır. Bu kontrolör kararlılık için kullanılır. Hata sinyalinin anlık eğiminin

ölçümü ile yani hatanın türevini alarak aşımı önlemek amacıyla gerekli işlemleri yapar. P kontrolör ile kullanılır (PD) çünkü hatanın olmadığı durumlarda bu kontrolör çıkışı sıfır olmaktadır (Güzen, 2003). Bu üç kontrolör yapısının ($P - I - D$) birleşmesiyle oluşan oransal-integral-türev (PID) kontrolör ise kısaca 'P' kontrolörden dolayı şimdiki zaman, 'I' kontrolörden dolayı geçmiş zaman ve 'D' kontrolörden dolayı gelecek zaman hata tahminleri yaparak hatayı minimuma indirmeye çalışmaktadır (Aström ve Hagglund, 1995; Çakmak, 2011).

PID kontrolör içeren bir sistemin transfer fonksiyonu en ideal formda denklem (3.7)'de verildiği gibidir (Y. Li vd., 2006);

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.7)$$

Burada $U(s)$ kontrol sinyali ve $E(s)$ ise hata sinyalidir. K_p oransal kazanç, T_i integral zaman sabiti ve T_d türev zaman sabitidir. Kontrol sinyali ayrıca aşağıda verilen formda da verilir (Aström ve Hagglund, 1995; Ogata, 2002):

$$U(s) = E(s) \cdot \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklem (3.7) ve (3.8) ile verilen denklemler arasındaki bağıntılar aracılığıyla integral kazancı ; $K_i = K_p/T_i$ ve türev kazancı $K_d = K_p T_d$ formülleriyle bulunur. Yukarıda verilen 3 terimli fonksiyon şunları içermektedir (Y. Li vd., 2006);

- Oransal terim K_p , hata sinyaliyle orantılı olarak genel bir kontrol eylemi sağlamaktadır.
- İntegral terim K_i , düşük frekans yoluyla kararlı durum hatalarını azaltmaktadır.
- Türev terimi K_d , yüksek frekans yoluyla geçici yanıtı iyileştirmektedir.

En uygun sistem performansı için K_p , K_i (veya T_i) ve K_d (veya T_d) birlikte ayarlanmalıdır (Y. Li vd., 2006). PID kontrolör endüstriyel sistemlerde çokça kullanılmaktadır. Bu kontrolörün sık kullanılma sebebi ise genel olarak uygulanabilirliğinin kolay ve pratik olmasından dolayıdır. PID kontrolörler sistemin matematiksel modelinin bilinmediği durumlarda dahi kullanılmış olup, proses kontrol alanında da tatmin edici faydalar sağlamıştır (Ogata, 2002). PID kontrolörlü bir sistemde temel amaç sistem hedeflerine uygun bir şekilde kontrolör parametrelerinin ayarlanmasıdır. Bunun için

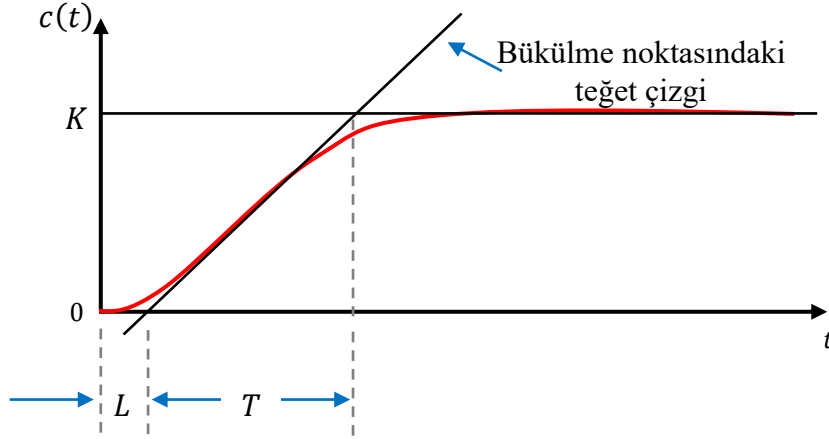
literatürde en çok kullanılan yöntemlerin başında Ziegler – Nichols (Ziegler ve Nichols, 1942) yöntemi gelmektedir. Bunun dışında Cohen ve Coon (Cohen ve Coon, 1952) açık çevrim sistemlerde kalıcı hal hatasını düzeltmek için yeni yöntem bulmuşlardır. Bundan sonraki bölümde PID parametrelerinin ayarlanması için tezde kullanılan Ziegler- Nichols ve kutup yerleştirme yöntemleri incelenecektir.

3.2 Yöntem

3.2.1 Ziegler-Nichols PID parametreleri ayarlama yöntemi

Bir tesisin veya sistemin matematiksel modeli türetilenirse kapalı çevrim ile o sistemin geçici ve kararlı durum özelliklerini karşılayacak kontrolörün parametrelerini belirlemek için tasarım tekniklerine ihtiyaç duyulur. Eğer matematiksel model çıkarılamayacak kadar karmaşık bir sistem varsa o zaman kontrolör parametrelerinin ayarlanması için deneysel yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Bir sistemin istenilen performansta çalışabilmesi için kontrol parametrelerinin seçilmesi sürecine kontrol ayarı denmektedir (Ogata, 2002). 1942 yılında J. G. Ziegler ve N. B. Nichols tarafından bulunan ve kontrol parametrelerinin optimum ayarlanmasında kullanılan yöntem günümüzde hala çok kullanılmaktadır. Ziegler ve Nichols kontrol parametre ayarlanmasında matematiksel modeli belli olan veya olmayan sistemler için geçici tepki özelliklerine dayalı olarak K_p , T_i ve T_d değerlerinin ayarlanması için bir takım kurallar önermişlerdir (Ziegler ve Nichols, 1942). Ziegler-Nichols kuralları tek seferde K_p , T_i ve T_d parametrelerinin son değerini vermemektedir. Bu değerler son ayara ulaşmak adına bir tahmin verir ve başlangıç noktası sağlar. Parametrelerin belirlenmesi için 2 farklı yaklaşım vardır. Bunlar basamak yanıtı ve frekans yanıtı yöntemleridir (Ogata, 2002).

İlk yöntem olan basamak yanıtı yöntemine göre; sistemin birim adım giriş tepkisi deneysel olarak elde edilir. Sistem karmaşık-eşlenik kök kutuplarını içermeyen bir sistem ise Şekil 3.7’de verildiği gibi birim basamak yanıtı S şeklinde bir grafik oluşturmaktadır. Bu yöntem bunun gibi çıkışa sahip sistemler için geçerli olup açık çevrim basamak cevabı bilgilerini kullanmaktadır. Sistem tek dereceden olup T zaman sabiti ve L ölü sistem gecikmesi ile karakterize edilirse, S şekilli eğrinin bükülme noktasından bir teğet çizilirse kesişme noktalarından, $c(t) = K$, T ve L değerleri elde edilir (Ogata, 2002).



Şekil 3.7: S şekilli tepki eğrisi.

Çizelge 3.1 ile basamak yanıtına dayalı Ziegler-Nichols parametrelerinin P, PI ve PID kontrolörlere göre hesabı verilmiştir.

Çizelge 3.1: Basamak yanıtı Ziegler-Nichols yöntemi.

Kontrolör Tipi	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Bu parametreler denklem (3.7) ile verilen transfer fonksiyonu temel alınarak hesaplanacak olup T_i ve T_d değerleri yerine koyulursa sistemin transfer fonksiyonu denklem (3.9) ile verilen formda elde edilmiş olacaktır (Ogata, 2002).

$$T_i = 2L, T_D = 0.5L \text{ ve } K_p = 1.2 \frac{T}{L};$$

$$G_{PID}(s) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) = 0.6T \cdot \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (3.9)$$

Böylece PID kontrolörün orjin noktasında bir kutbu ve $s = -1/L$ 'de çift sıfırları vardır (Ogata, 2002).

İkinci yöntem ise frekans yanıtı yöntemidir. Kapalı çevrim frekans yanıtı Nyquist eğrisinin özelliklerine ve verdiği cevaplara göre tasarlanmaktadır. Nyquist eğrisi üzerinde reel eksenin sıfırdan küçük (negatif reel eksen) kısmını ilk kestiği nokta kritik kazanç noktasını vermektedir. Kritik kazanç (K_c) değeri ve kesim frekansı (ω_c) değerinden istenilen kontrolörün parametreleri hesaplanmaktadır. Bu yöntemde öncelikle $T_i = \infty$ ve $T_d = 0$ olarak ayarlanır. Sadece K_p kontrol edilerek, sıfırdan çıkış değerinin sürekli salınım gösterdiği (kararlılık sınırı) K_c değerine kadar artırılır. Bu noktada K_c değerine karşılık gelen T_c kritik periyodu deneysel olarak belirlenir. Ziegler-Nichols frekans yanıtı parametre belirleme tablosuyla kontrolör parametreleri başlangıç değeri olarak belirlenebilir (Ogata, 2002). $T_c = 2\pi/\omega_c$ eşitliğine göre belirlenmektedir. Çizelge 3.2'de yöntem aracılığıyla K_c ve T_c değerlerinin kullanımı ile ayarlanabilen kontrolör parametreleri verilmektedir (Aström ve Hagglund, 1995; Ogata, 2002).

Çizelge 3.2: Ziegler-Nichols frekans yanıtı parametre belirleme tablosu.

Kontrol Tipi	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
P	$0.5 \cdot K_c$	∞	0	-	-
PI	$0.45 \cdot K_c$	$0.8 \cdot T_c$	-	$0.54 \cdot (K_c/T_c)$	-
PD	$0.8 \cdot K_c$	-	$0.125 \cdot T_c$	-	$0.1 \cdot K_c \cdot T_c$
PID	$0.6 \cdot K_c$	$0.5 \cdot T_c$	$0.125 \cdot T_c$	$1.2 \cdot (K_c/T_c)$	$0.075 \cdot K_c \cdot T_c$

$K_i = K_p/T_i$ ve $K_d = K_p T_d$ formülleri kullanılarak tablodaki K_i ve K_d değerlerinin matematiksel ifadeleri çıkarılmıştır. Sistemin PID transfer fonksiyonu denklem (3.7)'deki transfer fonksiyonu için $T_i = 0.5 \cdot T_c$, $T_d = 0.125 \cdot T_c$, $K_p = 0.6 \cdot K_c$ verilen değerler yerlerine konularak denklem (3.10) ve (3.11)'de verildiği üzere bulunmaktadır (Ogata, 2002).

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = 0.6 \cdot K_c \left(1 + \frac{1}{0.5 \cdot T_c s} + 0.125 \cdot T_c s \right) \quad (3.10)$$

$$G_{PID}(s) = 0.075K_c T_c \frac{\left(s + \frac{4}{T_c}\right)^2}{s} \quad (3.11)$$

Böylece denklem (3.11)'de verilen ifadeye göre PID kontrolörün orjin noktasında bir kutbu ve $s = -4/T_c$ de çift sıfırları vardır (Ogata, 2002).

Sistemin bilinen bir matematiksel modeli (transfer fonksiyonu) varsa o zaman K_c ve ω_c bulmak için root-locus (kök-konum) yöntemi kullanılır ve $j\omega$ eksenini ile root-locus'un kesişme noktasından bu değerler bulunur. Herhangi bir kesişme noktası yoksa bu yöntem uygulanamaz (Ogata, 2002).

3.2.2 Kutup yerleştirme yöntemi

Kutup yerleştirme metodu veya kutup atama yöntemi olarak adlandırılan yöntem temel tasarım yöntemlerinden biridir. Literatürde kutup yerleştirme yöntemi birçok farklı yöntem ile yapılmaktadır (Güzen, 2003; Ogata, 2002). Kutuplar istenilen yere yerleştirilerek sistem arzu edildiği gibi belli kriterlere göre hesaplanabilir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Bu tez çalışmasında en genel haliyle kutupların yerleri doğal frekans (ω_n) değerine ve sönüm oranı (ζ) değerinin değişimine bağlı olarak değiştirilerek sistem osilasyonu sağlanmıştır. Sistemin PID kontrolör için her defasında parametreleri hesaplanmış ve matlab/simulink programıyla bu değerler doğrulanmıştır.

3.2.3 Optimizasyon algoritmaları ile kontrol parametrelerinin belirlenmesi

Herhangi bir problemin çözümünde sonuçlar içerisinde en uygununu seçme işlemine optimizasyon denmektedir (Akyol ve Alataş, 2012). Optimizasyon algoritmaları karmaşık bir sistem içerisinde teknolojik gelişmelere dayanarak en hızlı ve en uygun sonuçları vermektedir. Optimizasyon algoritmaları bir problemin çözümünde karar verme sürecini hızlandırırken bu problemler ile gerçek hayatta karşılaşırsa aktif, anlık ve doğru karar verme olasılığını artırmaktadır (Winston, 2004). Sezgisel algoritmalar karmaşık süreci olan problemlerde belirli yöntem ve bir dizi kural çerçevesinde sonuca en yakın çözümü veren algoritmalar olup; yeni çözüm yolları geliştirmeden sonuca genel kurallar çerçevesinde yaklaşmaktadırlar. Bu algoritmalar içerisinde en çok kullanılan kısım doğadaki mimariye dayanarak oluşturulan sürü algoritmalarıdır ve bu birlikte hareket eden canlılardan esinlenerek oluşturulmuştur (Murty, 2003). Bu tez çalışmasında hesaplanan PID kontrolör parametrelerinin sistem ile uyumluluğunu test etmek amacıyla parçacık sürü optimizasyonu

(PSO) algoritması kullanılmıştır. Bu bağlamda PSO algoritması ile bulunan sonuçların hesaplar ile benzer sonuç verdiği görülmüş ve enerji fiyat eğrileri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2.3.1 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

PSO, James Kennedy ve Russel Eberhart tarafından 1995 yılında önerilmiştir (Kennedy ve Eberhart, 1995). PSO böcek, kuş, balık gibi sürüyle hareket eden hayvanların sosyal davranışlarından esinlenerek oluşturulan sezgisel bir algoritma türüdür. Bu sürüler, yiyecek bulmak için işbirlikçi bir yola uyar ve sürülerdeki her üye, kendi ve diğer üyelerin öğrenme deneyimlerine göre arama modelini değiştirmeye devam eder (D. Wang vd., 2018). PSO sürüdeki tüm canlıların aralarında gerçekleştirdikleri bilgi alışverişini esas alır. Canlıların her birine parçacık denir ve bu popülasyonun tamamına sürü denmektedir. Her bir parçacık komşu olan parçacığa göre konumunu rastgele ayarlar (Hien vd., 2013). Sürü içerisindeki her birey mevcut konumunu bir önceki konumundan elde ettiği deneyim ve sürüdeki en iyi konuma göre mevcut hedefe varıncaya kadar ayarlar (Eberhart ve Kennedy, 1995; Özsağlam ve Cunkaş, 2008).

Başlangıç aşamasında parçacık sayısı n olan, bütün parçacıkların başlangıç hız (V_0^i) ve başlangıç konumları (X_0^i) belli olan sürüde konumlar, sınırları belli olan alan içerisinde rastgele belirlenir. Konumların uygulanan sistem içerisinde benzetim yoluyla yakınlıkları, parçacık hızları hesaplanır ve her bir parçacığın yer değiştirmesi sağlanır. Bu yer değiştirmeler esnasında parçacıkların uğradığı ve arzu edilen sonuca en uygun değeri veren yerel konum ($X_t^{i,pbest}$) her parçacığa özel olarak hafızaya alınır. Bütün parçacıklar arasında rastlanılan en iyi sonucu veren değişken global (X_t^{gbest}) olarak adlandırılır. Parçacık sayısının 1'den büyük olduğu ($n > 1$) ve i numaralı parçacık için t iterasyonundaki konumu (X_t^i) ve hızı (V_t^i) denklem (3.12) ve (3.13) ile verilen formüllere göre hesaplanmaktadır (Kennedy ve Eberhart, 1995; Özsağlam ve Cunkaş, 2008).

$$V_{t+1}^i = \omega \cdot V_t^i + c_1 \cdot rand_1 \cdot (X_t^{i,pbest} - X_t^i) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (X_t^{gbest} - X_t^i) \quad (3.12)$$

$c_1 \cdot rand_1 \cdot (X_t^{i,pbest} - X_t^i)$ ifadesi bilimsel kavram, $c_2 \cdot rand_2 \cdot (X_t^{gbest} - X_t^i)$ ifadesi ise sosyal kavram olarak isimlendirilmektedir (Şeker, 2022).

$$X_{t+1}^i = X_t^i + V_{t+1}^i \quad (3.13)$$

$rand_1$ ve $rand_2$ değerleri $[0,1]$ arasında rastgele oluşturulan sayılarken, ω atalet ağırlığı değeri ve c_1, c_2 değerleri öğrenme/ivme faktörleridir. Çoğu durumda c_1, c_2 değerleri en iyi konumu ayarlamak için sürü içerisinde bilgi alışverişi sağlar. $[0-2.5]$ aralığından seçilen değer (Şeker, 2022), genellikle başlangıçta 2 değerine ayarlanmaktadır. En fazla deneme (iterasyon) sayısı ile pozisyonlar anlık güncellenir ve X_t^{gbest} denklem (3.14)'de verilen formül ile bulunmuş olur (Kennedy ve Eberhart, 1995).

$$X_t^{gbest} = \min\{X_t^{i,pbest}\}, \quad i \in \{1,2,\dots,n\}, n > 1 \quad (3.14)$$

Algoritma aşamasında sırasıyla aşağıdaki adımlara bakılır (Perez ve Behdinan, 2007);

1. Başlangıçta sürünün pozisyon (X_0^i) ve hızları (V_0^i) rastgele oluşturulur ve öğrenme faktörü belirlenir.
2. Sürünün her bir bireyinin uygunluk (fitness- F) değeri belirlenir.
3. Her bir bireyin mevcut durumu içerisindeki en iyi pozisyonu ($X_t^{i,pbest}$) belirlenir denklem (3.15) ile verilmiştir (Jumaa vd., 2021).
4. En iyi konumlar arasından global değişken değeri seçilir (X_t^{gbest}), denklem (3.16) ile verilmiştir (Jumaa vd., 2021).

$$X_t^{i,pbest} = (X_t^{1,pbest}, X_t^{2,pbest}, \dots, X_t^{n,pbest}) \quad (3.15)$$

$$X_t^{i,gbest} = (X_t^{1,gbest}, X_t^{2,gbest}, \dots, X_t^{n,gbest}) \quad (3.16)$$

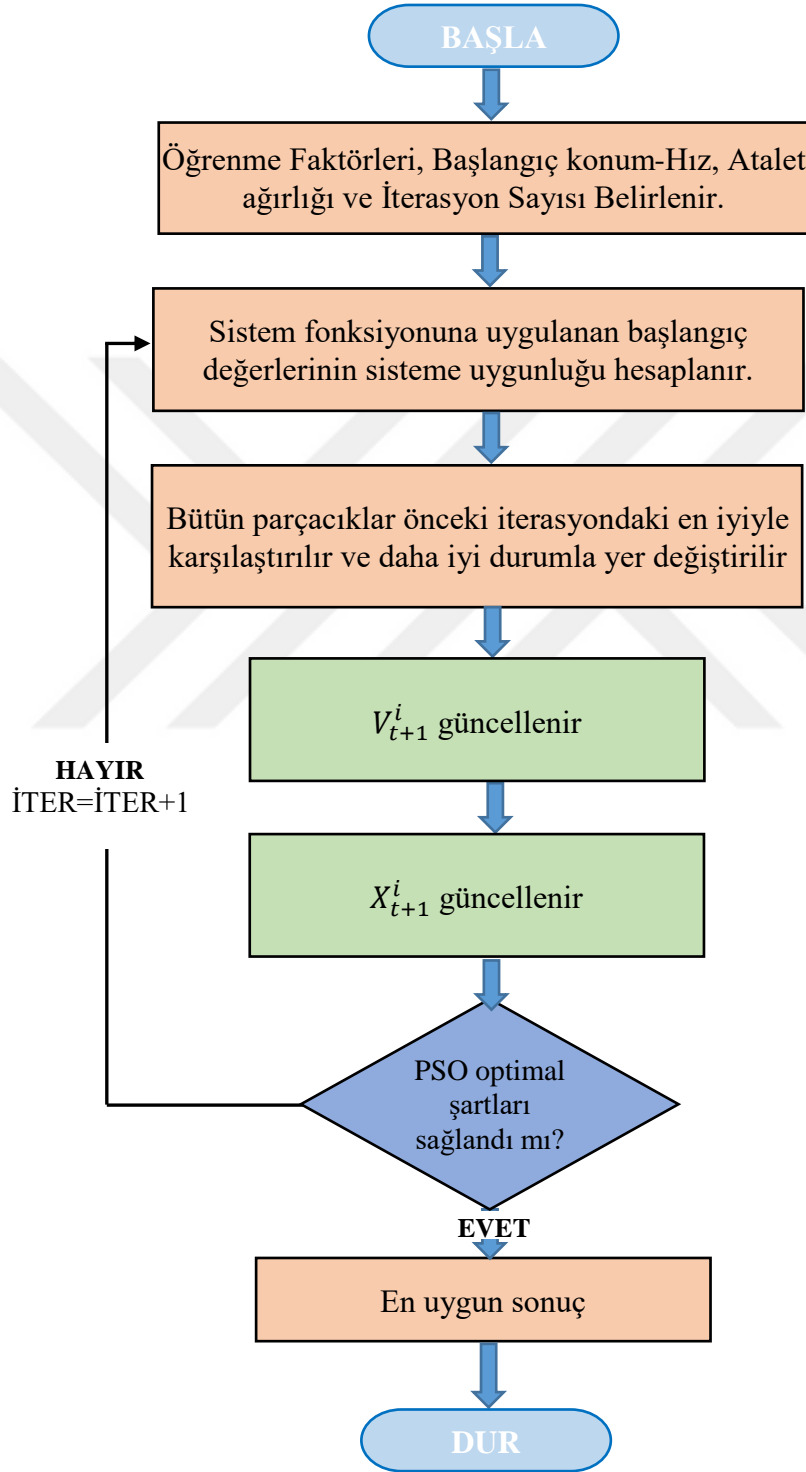
5. Her bir bireyin yeni pozisyon ve hızları denklem (3.12) ve (3.13) ile belirlenir.
6. Maksimum iterasyon sağlanıncaya kadar bu işlemlere devam edilir. Maksimum iterasyon adımı sağlanamazsa 2, 3, 4 ve 5, adımlar sırayla tekrar edilir. İterasyon sağlandığı anda işlem bitirilir ve sonuçlar yazdırılır.

ω atalet ağırlığı değeri denklem (3.17) ile hesaplanmaktadır (Hien vd., 2013; Jumaa vd., 2021; Perez ve Behdinan, 2007),

$$\omega = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{t_{max}} \cdot t \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'de ω_{max} ve ω_{min} sırasıyla ilk ve son atalet ağırlığı değerlerini, t iterasyon sayısını ve t_{max} ise en büyük iterasyon sayısını belirtmektedir (Jumaa vd., 2021; Perez ve Behdinan, 2007).

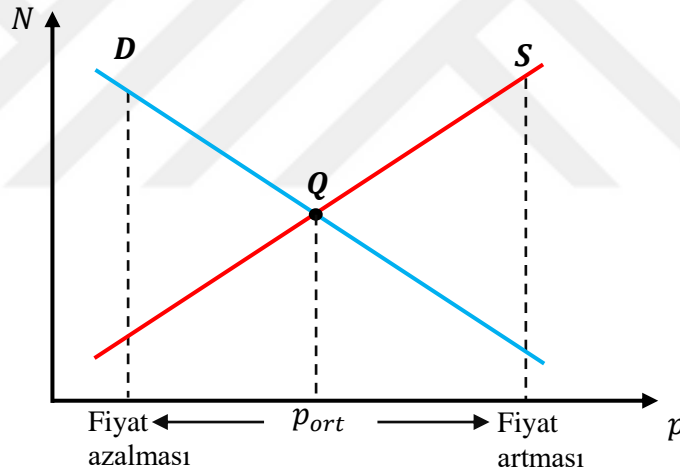
Şekil 3.8'de PSO algoritmasının genel akış diyagramı verilmiştir (Jumaa vd., 2021).



Şekil 3.8: Genel PSO akış diyagramı.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Arz ve talep dinamik fiyat eğrisinin elde edilmesi için iki önemli parametredir. Denge fiyatı arz ve talep durumlarına göre değişiklik göstermektedir. Enerji fiyatının azalması, arzı azaltırken talebi artıran yönde, enerji fiyatının yükselmesi ise talebi daraltan ve arzı artıran yönde etki etmektedir. Talep eğrisi farklı fiyatlar için tüketicilerin üründen ne kadar almak istediğini gösterirken, arz eğrisi farklı fiyat seviyelerinden üreticilerin o üründen ne kadar satmak istediğini göstermektedir. Daha fazla yapılan üretim daha fazla üretim maliyetine sebep olacağından dolayı fiyatın artmasına sebep olmaktadır. Dikey eksenin enerji miktarını (N), yatay eksenin enerji fiyatını (p) temsil ettiği Şekil 4.1 için, arz (S) ve talep (D) eğrilerinin birbirlerine eşit olduğu nokta en uygun enerji fiyatını (p_{ort}) bir başka ifadeyle fiyat denge noktasını (Q) göstermektedir (Alagoz vd., 2013; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Denge fiyat noktası arz ve talep fiyatlarının hangi fiyat seviyesinde eşit olduğunu belirlemektedir.



Şekil 4.1: Denge fiyatı noktası ve arz (üretim)-talep (tüketim) grafiği.

Talep ile üretim yani arz arasındaki istikrarsızlığı ifade etmek için hata sinyali " e " bir başka ifadesi ile denge hata fonksiyonu tanımlanırsa bu noktaların birbirine eşit olduğu nokta Q denge noktasını ifade etmektedir. " e " denge hata fonksiyonu denklem (4.1)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Alagoz vd., 2013).

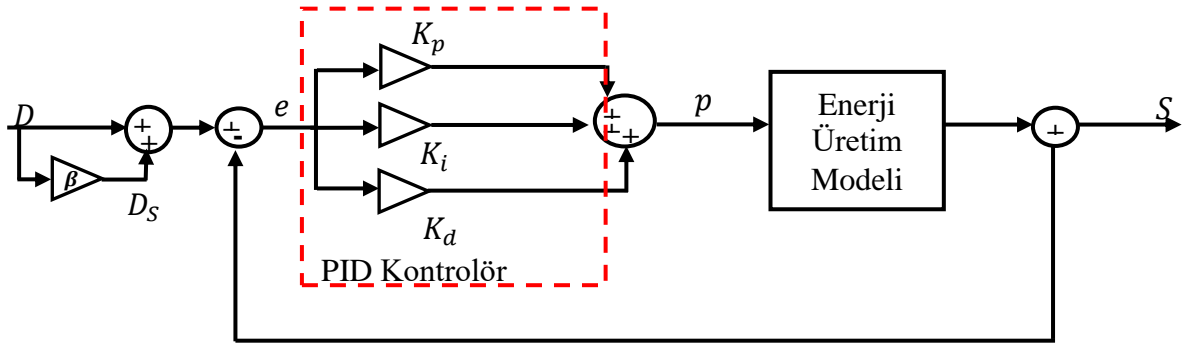
$$e = D - S \quad (4.1)$$

e sinyali tam olarak 0'a eşit oluncaya veya asimptotik olarak yakınsayınca kadar sistem çalışmaktadır. Çünkü en uygun fiyat sinyali $e = 0$ iken elde edilir. Denge hata

fonksiyonu " e " eğer sıfırdan büyükse ($e > 0$, $D > S$), bu durum; toplam üretimin talepten düşük olması anlamına gelmektedir. Bu koşulda üretimin talebi karşılayamama durumundan dolayı enerji kıtlığına sebep olabilir. Bu durumun önüne geçebilmek için üretim hacminin artırılması gerekmektedir. Tam tersi durumun ise yani hata sinyalinin sıfırdan küçük olması ($e < 0$, $D < S$), üretimin talepten yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu durum ise fazla üretime sebep olacağı için enerji verimini düşürmektedir. Üretim hacminin azaltılmasıyla bu durum engellenebilmektedir. e kontrol denge hata fonksiyonu sıfır değerine zorlanarak sistem içinde dinamik denge sağlanabilmektedir. Simülasyonlarda $e > 0$ durumuna karşı bir direnç oluşturmak ve fazla üretim sağlayıp, üretimi talepten daha üst seviyede tutmak ve enerji kıtlığının önüne geçmek amacıyla "Sanal Talep (D_S)" kullanılmıştır. Hata sinyali denklemi yeniden denklem (4.2) şeklinde D_S eklenerek düzenlenmelidir (Alagoz vd., 2013; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021).

$$e = D + D_S - S \quad (4.2)$$

Simülasyonda kullanılan enerji fiyatlandırması için tasarlanan kapalı çevrim PID blok diyagramı Şekil 4.2'de verilmiştir. Üretim modeli olarak verilen blok içinde sırasıyla termal, hidroelektrik, güneş ve rüzgar arzları bulunmaktadır (Alagoz vd., 2013; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). PID kontrolör girişi aritmetik olarak enerji denge hata fonksiyonunu ifade eden e iken, PID kontrolörün çıkışı üretici enerji fiyat sinyalini temsil eden p kontrol fiyat sinyalidir. Bu fiyat sinyali enerji üretici toplumu için önemlidir. Çünkü birim fiyat sinyaline göre üreticiler enerjiyi şebekeye satıp satmamaya karar vereceklerdir (Alagoz vd., 2013). Tasarlanan sistem modeli şu şekilde çalışmaktadır; kontrolör başlangıç şartlarında enerji denge hata fonksiyonu sinyalini azaltmak için fiyat sinyalini rastgele üretmektedir. Geri besleme sinyali ile e denge hata fonksiyonu sinyali 0 oluncaya kadar sistem tekrarlı olarak çalışır ve eğer sistem kararlı hale en yakın duruma gelirse dinamik enerji fiyat sinyalleri optimal durumda alınır. e denge hata fonksiyonu sinyali sürekli güncellenerek enerji dengesine ulaşılmaya çalışılır. Fiyat sinyali kullanılan kontrolör tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 4.2: Dinamik enerji fiyatlandırması için kapalı çevrim PID blok diyagramı simülasyonu modeli.

Sanal talep $D_s = \beta \cdot D$ olarak yazılırsa e denge hata fonksiyonu sinyali denklemi (4.3) ile düzenlenmektedir.

$$e = D + \beta \cdot D - S = D \cdot (\beta + 1) - S \quad (4.3)$$

β enerji yetersizliği durumu için kullanılan sanal talep oranını ifade etmektedir. Sanal talep oranı 0 ile 1 arasında değişen bir değer olup gerçekleştirilen simülasyonlar için değeri 0.2 olarak alınmıştır. Böylelikle sisteme verilen talep seviyesi 1.2 katına çıkmış olacak ve kontrolör aracılığıyla üretim artışı tetiklenecektir.

Enerji fiyatına bağlı olarak yapılan çalışmalarda simülasyon çalışmasının etkin bir şekilde sürdürülmesini sağlamak amacıyla kullanılan kontrolör parametrelerini doğru hesaplamak gerekmektedir. Bu amaçla simülasyon senaryosunda kullanılan enerji üretim modelinin matematiksel modeli sisteme uygun olarak oluşturulmalıdır. Sistem için kullanılan enerji üretim modeli denklem (4.4)'te verildiği gibidir. Bu denklem ile enerji üreticilerinin fiyat tepkileri analitik olarak gösterilmektedir (Alagoz vd., 2013; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021).

$$S_a(p) = \sum_{i=0}^d a_i \cdot p^i \quad (4.4)$$

Bu denklemde d polinomun derecesidir ve a_i ise polinom katsayılarıdır. Burada asıl kabul edilen husus şudur ki talepteki değişiklik karşısında arz güvenliğini sağlamak adına üreticilerin toplam kurulu enerji kapasitesi (C_{max}) talepten büyük varsayılmıştır. Bu üretim modelinin tamamlanması için bir başka önemli husus üretimdeki gecikmenin modellenmesidir. Burada verilen kapasitif bir gecikme modeli olup kondansatör devre elemanının şarj ve deşarj kinetiğine dayanmaktadır. τ parametresi bir zaman sabitidir. O halde bu gecikme dikkate alınarak s zaman domainine bağlı olarak enerji üretim modeli

aşağıda verilen denklem adımlarıyla yeniden düzenlenebilir (Alagoz vd., 2013; Kaygusuz, 2019; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Denklem (4.5) ile verilen ifadenin ters Laplace işlemi alınarak (denklem (4.6) ve (4.7) ile) denklem (4.8) elde edilmektedir. (4.6) ile verilen denklemde başlangıç şartı olan $s(0)$ üretimi 0 alınmıştır.

$$\tau \cdot \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = S_d(p) \quad (4.5)$$

$$\tau \cdot (s \cdot S(s) - s(0)) + S(s) = S_d(p) \quad (4.6)$$

$$S(s) \cdot (\tau s + 1) = S_d(p) \quad (4.7)$$

$$S(s) = S_d(p) \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4.8)$$

$S_d(p)$ polinomu üreticilerin anlık olarak enerji satış eğilimlerini karakterize etmektedir. $S_d(p)$ polinomu doğrudan 1. dereceden dinamik sistem modelinin kazancını yani transfer fonksiyonundaki "K" katsayısını etkilemektedir. Transfer fonksiyonu $G(s) = K/(\tau \cdot s + 1)$ olan bir sistem için $K = S_d(p)$ alınırsa yukarıda elde edilen denklem (4.8)'den dolayı eğer enerji fiyatı yüksek ise $S_d(p)$ polinomu yüksek bir değer sağlar. Buna bağlı olarak K kazancını artırır ve buda üreticilerin daha hızlı ve güçlü enerji satışı yapması anlamına gelmektedir.

Çok kaynak kullanılarak oluşturulan simülasyonda bütün enerji kaynaklarından yapılan üretimin analitik modeli denklem (4.9) ile verilmektedir (Alagoz vd., 2013).

$$S_T(s) = \sum_{i=1}^n G_i(s) \quad (4.9)$$

(4.9) ile verilen denklemde $n=4$ olarak üretim yapan kaynakların sayısını, G_i ise i . kaynak türünün yaptığı zamanla değişen üretimi belirlemektedir. Enerji üretim modeli denklemini tamamlayabilmek adına 2 faktör önerilmiştir (Alagöz, 2015b; Alagoz vd., 2013);

1. Enerji üretimi yapan topluluk ancak enerji birim fiyatının, enerji üretim maliyetinin üzerinde bir değere ulaştığında üretim yapmalıdır.
2. Maksimum kurulu kapasite (C_{max}), her bir kaynağın üretimini sınırlamaktadır.

Bu iki temel madde göz önünde bulundurularak toplam enerji üretim-fiyat fonksiyonu denklem (4.10) ile yeniden düzenlenebilir (Alagöz, 2015b; Alagoz vd., 2013);

$$G(s) = \begin{cases} 0, & p < p_0 \\ S(s), & p \geq p_0 \vee S(s) \leq C_{max} \\ C_{max}, & S_d(p) \geq C_{max} \end{cases} \quad (4.10)$$

Denklem (4.10)'da p_0 ile belirtilen üretim maliyetleridir.

i . kaynak türünün yaptığı üretime göre denklem (4.8) yeniden düzenlenerek denklem (4.11) aşağıda verildiği gibi, i . kaynağın zaman sabiti olan τ_i değerinin hesaplanması için yeniden yazılmalıdır.

$$S(s)_i = S_{di}(p) \cdot \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'de zaman sabiti $\tau_i = (1 - e^{-1}) \cdot T_i$ ile ifade edilebilir. T_i sıfır üretim hacminden maksimum kapasiteye ulaşmaya kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Çizelge 4.1 üretim modeli için çok kaynaklı arz model parametrelerini belirtmektedir. (Alagoz vd., 2013).

Çizelge 4.1: 50 GW kurulu güce sahip üretim simülasyon parametreleri 1.

i	Enerji Arz Modelleri	C_{max} (MW)	T_i (Dakika)
1	Termik	10000	30
2	Hidroelektrik	30000	5
3	Rüzgar	6000	8
4	Güneş	4000	5

$\tau_i = (1 - e^{-1}) \cdot T_i$ zaman parametre denklemi her bir üretim kaynağına göre Çizelge 4.1 ile belirtilen T_i değerlerine aracılığıyla aşağıda sırasıyla verilen denklem (4.12), (4.13), (4.14) ve (4.15) ile hesaplanmaktadır. τ_1 termik santral için, τ_2 hidroelektrik santral için, τ_3 rüzgar santrali için ve τ_4 güneş santrali için saatlik zaman sabitleridir.

$$\tau_1 = (1 - e^{-1}) \cdot T_1 = 0.632 \cdot \frac{1}{2} \text{ saat} = 0.31 \text{ saat} \quad (4.12)$$

$$\tau_2 = (1 - e^{-1}) \cdot T_2 = 0.632 \cdot \frac{1}{12} \text{ saat} = 0.052 \text{ saat} \quad (4.13)$$

$$\tau_3 = (1 - e^{-1}) \cdot T_3 = 0.632 \cdot \frac{8}{60} \text{ saat} = 0.084 \text{ saat} \quad (4.14)$$

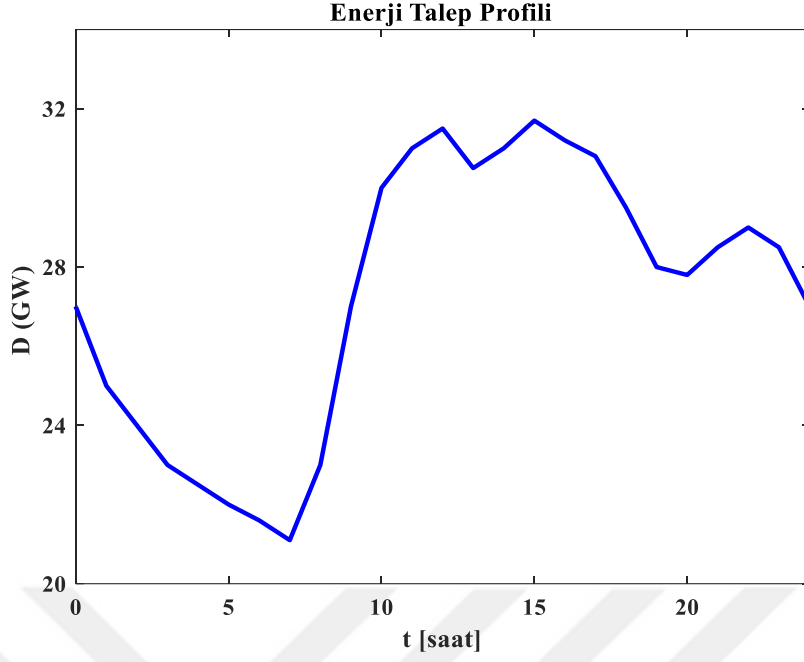
$$\tau_4 = (1 - e^{-1}) \cdot T_4 = 0.632 \cdot \frac{1}{12} \text{ saat} = 0.052 \text{ saat} \quad (4.15)$$

Ayrıca simülasyonlarda kullanılan toplam 50000 MW kurulu güce sahip termal, hidroelektrik, rüzgar ve güneş enerjilerinin üretim modelleri, kaynakların doğal davranışları göz önünde tutularak hesaplanan zaman sabitleri, kurulu güçleri ve üretim modelleri Çizelge 4.2 de listelenmektedir (Alagoz vd., 2013).

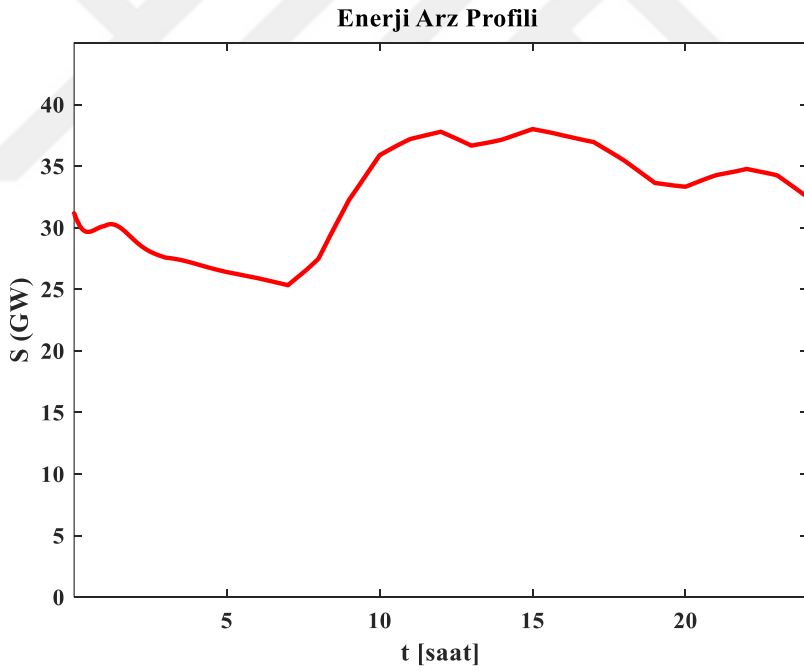
Çizelge 4.2: 50 GW kurulu güce sahip üretim simülasyon parametreleri 2.

Kaynak Tipi	C_{max} (MW)	Zaman Sabiti (<i>saat</i>)	Üretim Modeli
Termal	10000	0.31	$0.01p^2 + \frac{2.5p}{0.31s + 1}$
Hidroelektrik	30000	0.052	$0.01p^2 + \frac{2.5p}{0.052s + 1}$
Rüzgar	6000	0.084	$0.01p^2 + \frac{2.5p}{0.084s + 1}$
Güneş	4000	0.052	$0.01p^2 + \frac{2.5p}{0.052s + 1}$

Simülasyonda kullanılan 24 saatlik sistem için Şekil 4.3 talep eğrisini, Şekil 4.4 ise çoklu kaynaklardan gelen toplam üretim eğrisini göstermektedir. Bu profil Türkiye'nin enerji talep karakteristik eğrisi verilerine benzer olarak verilmiştir.

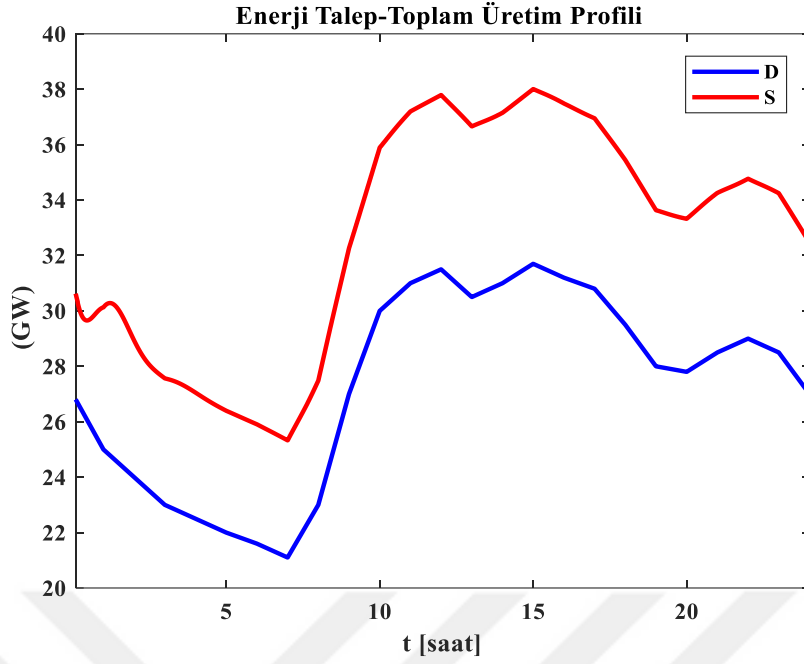


Şekil 4.3: 24 Saatlik değişken talep eğrisi senaryosu.



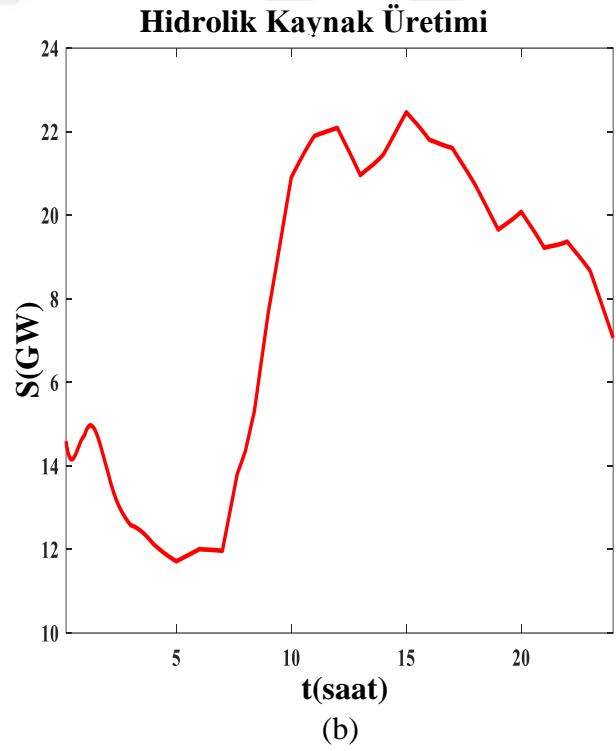
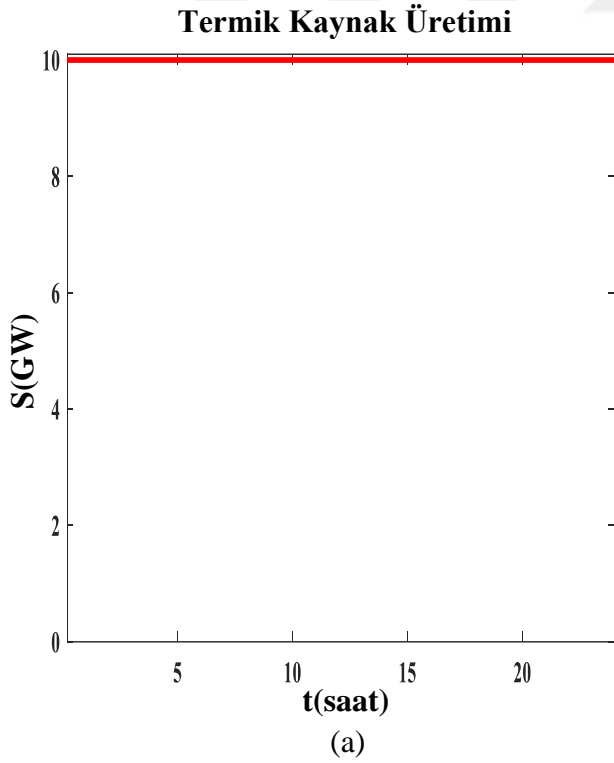
Şekil 4.4: 24 Saatlik toplam üretim eğrisi senaryosu.

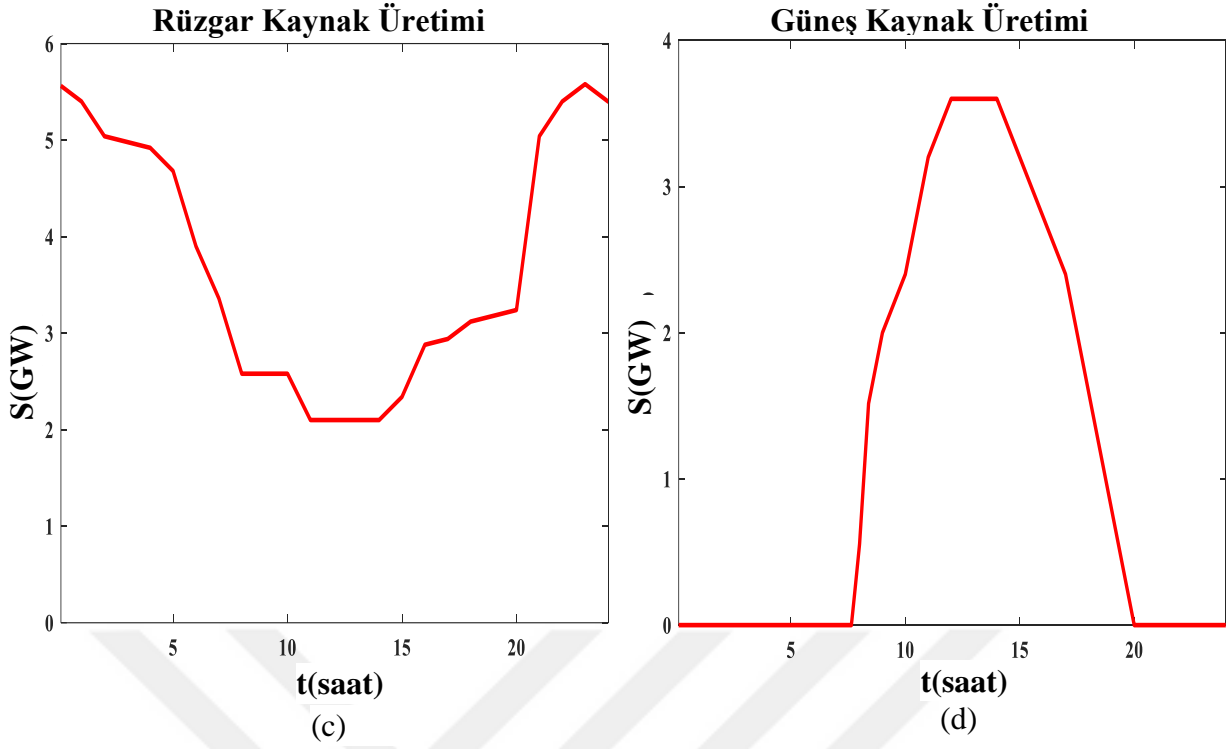
Toplam üretimin talep eğrisinden fazla olmasının sebebi simülasyon senaryosunda enerji yetersizliği durumunun önüne geçilmesi adına eklenen sanal taleptir (Alagoz vd., 2013). Şekil 4.5'te toplam üretim ve talep eğrisi bir arada verilmektedir.



Şekil 4.5: Toplam üretim ve talep eğrisi.

Çoklu kaynakların sırasıyla Termal, Hidroelektrik, Rüzgar ve Güneş enerjisinin gün boyunca yaptıkları enerji üretimleri ise Şekil 4.6 (a-d) ile verildiği gibidir (Alagoz vd., 2013; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021).





Şekil 4.6: Çok kaynaklı üretim profilleri; a) termik santral, b) hidroelektrik santral, c) rüzgar santrali ve d) güneş santrali.

4.1 Akıllı Şebekelerde Kutup Yerleştirme Metodu Kullanarak Dinamik Fiyatlandırma Kontrolü

4.1.1 Doğal frekans değişiminin fiyatlandırma üzerindeki etkisi

Kutup yerleştirme yöntemi ile kontrolörün kutupları arzu edilen yere göre ayarlanabilir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Bu bölümde arz-talep senaryoları üzerinden hazırlanan ve matematiksel işlemleri elde edilen sistem için kontrolör katsayılarını elde edip sonrasında dinamik fiyat eğrilerini elde etmek amacıyla kutup yerleştirme metodunda doğal frekans (ω_n) değerinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen katsayılar, sistem senaryo modeli ve gerçek talep değerleri üzerinden değerlendirilmiş ve fiyat eğrileri elde edilmiştir. Sistem için PID kontrolör üzerinden fiyat eğrileri oluşturulmuştur. Daha sonrasında bu değerler ile elde edilen fiyat eğrileri karşılaştırılmış ve tasarlanan sistem için en uygun parametre belirlenmiştir.

PID kontrolörde K_p , K_i ve K_d parametrelerini belirleyebilmek için öncelikle sistemi 2. dereceli bir sisteme dönüştürmek gereklidir. Sistem için kullanılan transfer fonksiyonu denklem (4.16) ile verildiği gibidir.

$$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad (4.16)$$

K sabit değer olup 1 alınmıştır. PID kontrolörünün genel transfer fonksiyonu denklem (4.17) ile belirlenir.

$$P(s) = K_p + \frac{1}{s} \cdot K_i + s \cdot K_d = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{s} \quad (4.17)$$

Herhangi bir sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu ise denklem (4.18) ile gösterilir.

$$T(s) = \frac{G(s) \cdot P(s)}{1 + G(s) \cdot P(s)} \quad (4.18)$$

Denklem (4.16) ve (4.17) ile verilen ifadeler (4.18)'de verilen denklemde yerlerine yazılırsa sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu 2. dereceye dönüştürülmüş olur ve yeniden denklem (4.19) gibi yazılabilir.

$$T(s) = \frac{K_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_i}{(K_d + \tau) \cdot s^2 + (K_p + 1) \cdot s + K_i} \quad (4.19)$$

Kontrol sistemlerinde 2. dereceden bir sistemin genel ifadesi denklem (4.20)'de belirtildiği gibi verilmektedir.

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (4.20)$$

Burada ω_n sistemin doğal frekansı ve ζ ise sönüm oranıdır. (4.20) ifadesinin karakteristik denklemini paydası 0 sayısına eşitlenerek bulunur ve (4.21) nolu denklem ile belirtilmiştir.

$$\Delta(s) = s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = 0 \quad (4.21)$$

(4.19) ve (4.20)'de her iki fonksiyonda karakteristik denklemler 0'a eşitleneceği için birbirlerine eşitlenerek doğal frekans değerinin değişimiyle PID parametreleri bulunabilir. O halde ifadeler birbirine eşitlenirse aşağıda (4.22) nolu denklem ile verilen ifade bulunmaktadır (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021).

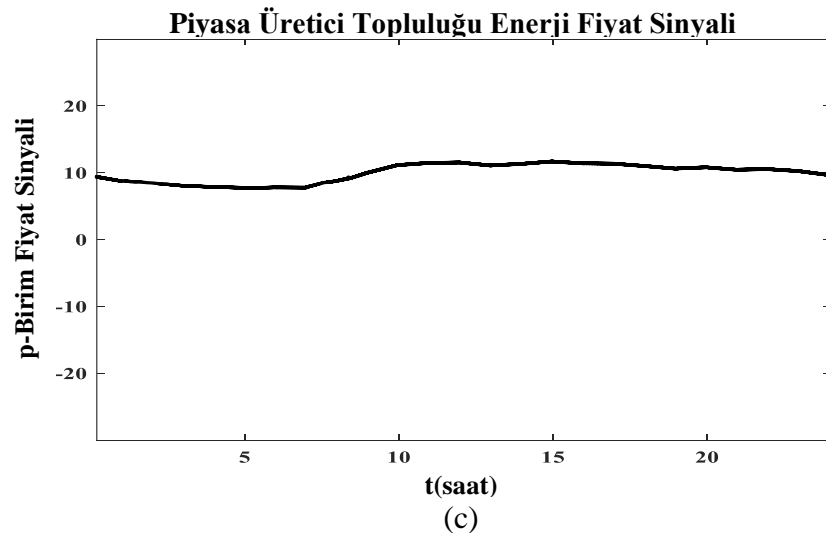
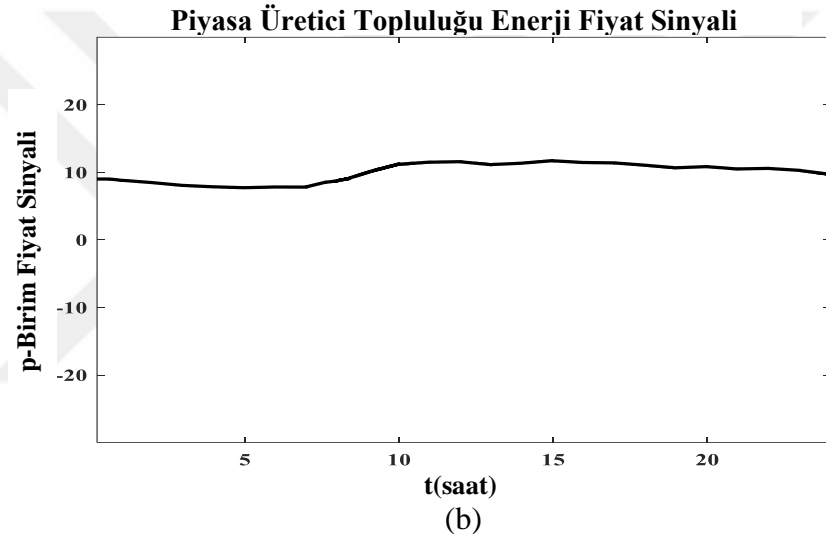
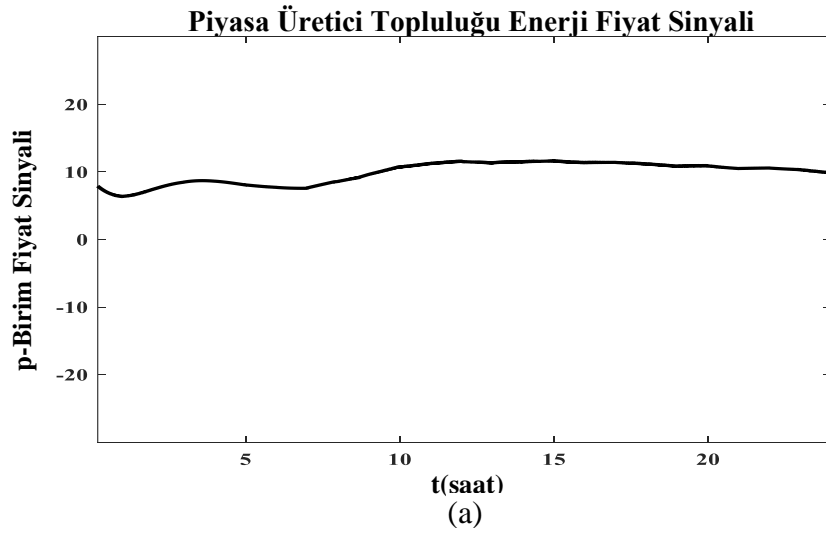
$$s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = (K_d + \tau) \cdot s^2 + (K_p + 1) \cdot s + K_i \quad (4.22)$$

4 ayrı kaynak için zaman sabitleri Çizelge 4.2 ile gösterilmiştir. Bu çalışma için zaman sabiti τ , sırasıyla 0.31 saat, 0.084 saat ve 0.052 saat olarak alınmıştır. Sönüm oranı $\zeta=0.6$ alınıp ω_n doğal frekans sırasıyla 1 *rad/sa*, 4 *rad/sa* ve 16 *rad/sa* olarak alınmış ve PID kontrolör için katsayılar verilen değerlerin (4.22) nolu denklemde yazılması ile hesaplanmıştır. Böylece doğal frekans değerinin değişimi yönteminin kutup yerleştirme metoduna uygulanmasıyla bulunan PID katsayıları Çizelge 4.3'te verildiği gibidir.

Çizelge 4.3: Doğal frekans değişimi ile bulunan PID kontrolör değerleri ($\zeta = 0.6, \tau = 0.31\text{saat}$).

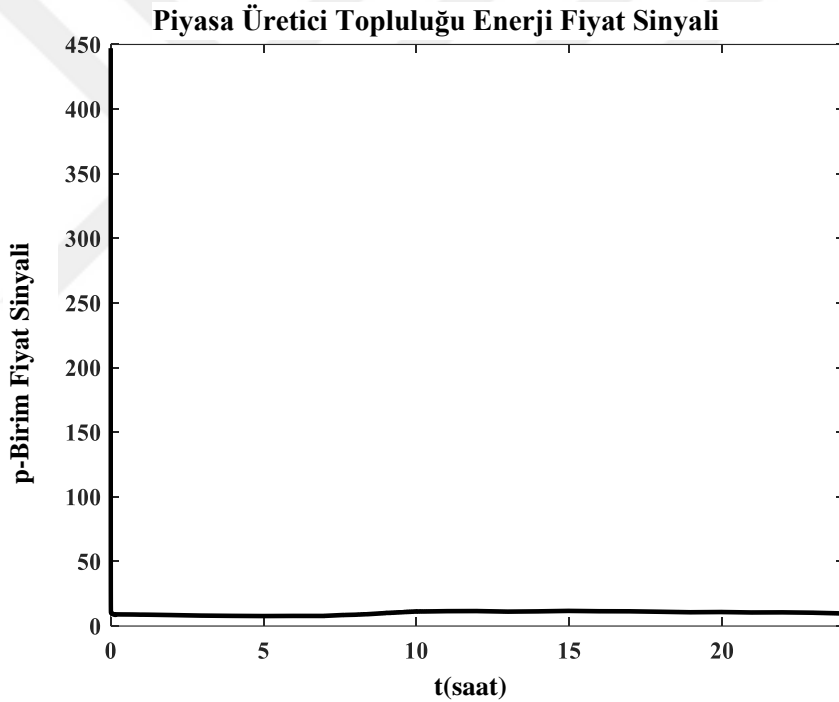
ω_n	K_p	K_i	K_d
1 <i>rad/sa</i>	0.2	1	0.69
4 <i>rad/sa</i>	3.8	16	0.69
16 <i>rad/sa</i>	18.2	256	0.69

Çizelge 4.3 ile bulunan kontrolör parametreleri Matlab/simulink programıyla sistemde yerine yazılarak elde edilen fiyat eğrileri Şekil 4.7 (a-c) gibi elde edilir. Doğal frekans değeri 1 *rad/sa* iken elde edilen eğri için salınım diğerlerine göre daha fazla olmaktadır. Salınım miktarının fazla olmasının sebebi kontrolör parametrelerine göre değişen üretim miktarından kaynaklanmaktadır. Sistem 4 *rad/sa* değeriyle ve sonrasında daha kararlı olmaktadır. Bu gibi sistemlerin kararlılık analizleri yapılırken sistemin kendi yapısından kaynaklı çalışma performansı göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü bu sistem yapısında e kontrol hata sinyalinin sıfırın altına düşmemesi önemli olup, sıfır değerinin altına düşmediği durumlarda doğal frekans, sönüm oranı ve kontrolör parametreleri üzerlerindeki küçük değişiklikler fiyat eğrisi üzerinde bir fark oluşturmamaktadır.



Şekil 4.7: ω_n değişimi ile elde edilen dinamik fiyat sinyalleri; a) $\omega_n = 1 \text{ rad/sa}$,
b) $\omega_n = 4 \text{ rad/sa}$, c) $\omega_n = 16 \text{ rad/sa}$ ($\zeta = 0.6, \tau = 0.31 \text{ saat}$).

Bu tür sistemler için sistem fiyat eğrisinin başlangıç anında yaptığı pik değeri vardır. Bu pik değeri sistem fiyat eğrisi için $\omega_n = 4 \text{ rad/sa}$ olduğu durumda Şekil 4.7 b’de yakınlaştırılmış haliyle verilen sistem cevabının Şekil 4.8’de geniş açıdan verilen hali görülmektedir. Bu pik değeri sistemin geçici hal cevabından kaynaklanmaktadır. Başlangıç anındaki pik değerinden kaynaklanan enerji hatası çok yüksek olması dolayısıyla sistem, enerji dengesine ulaşmak için çok yüksek $S_d(p)$ enerji satış eğilimi ile açılmaktadır. Bu da üreticilerin hızlı satış yapmalarına olanak tanımaktadır. Zaman içerisinde sistem enerji dengesine ulaştıkça yani enerji denge fonksiyonu sinyalinin 0’a doğru yaklaşması sağlandıkça fiyat optimal değere yaklaşmış ve bu durum sistemin geçici hal davranışından kalıcı hal davranışına geçtiğini göstermiştir. Böylece sistemin fiyat analizi kalıcı hal davranışında elde edildiğinden dolayı simülasyonun başlangıç anında meydana gelen bu geçici rejimin olduğu yerler dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.8: $\omega_n = 4 \text{ rad/sa}$ olduğu durum için dinamik fiyat eğrisinin geçici hal cevabı ($\tau = 0.31 \text{ saat}$).

Sistem için fiyat eğrileri incelendiğinde ω_n değerinin belli bir noktadan sonra değişimi katsayıları değiştirirse de fiyat sinyali üzerinde çok küçük farklılıklara sebep olmaktadır. Bu durum beklenen bir durumdur. Çünkü kapalı çevrim kontrol sistemi enerji denge hatasının ($e = D - S = 0$) 0’a ulaşması için tasarlanmıştır. Farklı PID katsayıları olsa dahi kararlılık içerisinde yine aynı denge durumuna ulaşması sağlanmaktadır. Dolayısıyla eğer kalıcı hal hatası problemi oluşmamışsa bütün PID kontroller enerji

dengeyi sağlayan birbirine çok yakın optimal fiyat cevapları oluşturmalıdır. Farklılıklar büyük oranda geçici hal cevaplarında görölmektedir. Yani denge fiyatı etrafında salınım veya değişim olursa bu değişimler için farklı PID parametreleri için küçük farklılıklar görönmeye başlanabilir. Bu durum ω_n değerinin 4 ile 16 *rad/sa* olması durumu için Şekil 4.7 (b-c) ile görölmektedir. Denge noktasına ulaşmak için her bir PID için geçici fiyat oluşumları sağlanabilir. Fakat kalıcı halde sistem denge noktasında kaldığı sürece cevaplar aynı veya çok yakındır. Bu durum Şekil 4.7 de açıkça görölmektedir.

Çizelge 4.4’de τ zaman sabitinin 0.084 saat ve Çizelge 4.5 de τ zaman sabitinin 0.052 saat olması durumlarında kutup yerleştirme yöntemiyle ω_n değerinin değişimine bağlı olarak hesaplanan PID kontrolör parametreleri verilmiştir. $\zeta = 0.6$ değeri aynı koşullarda değerlendirilmesi adına değiştirilmemiştir.

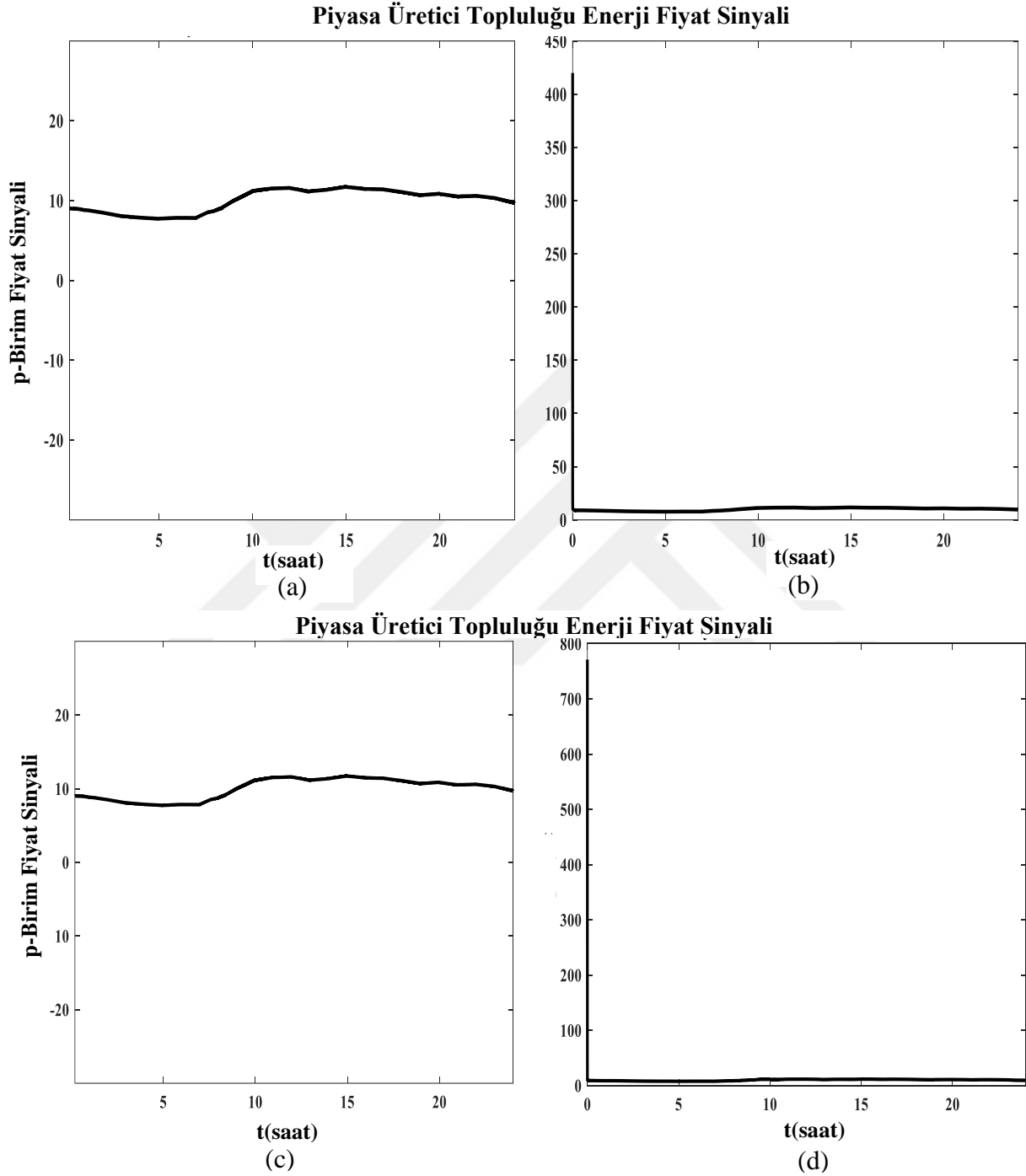
Çizelge 4.4: Doğal frekans değişimi ile bulunan PID kontrolör değerleri ($\zeta = 0.6, \tau = 0.084$ saat).

ω_n	K_p	K_i	K_d
1 <i>rad/sa</i>	0.2	1	0.916
4 <i>rad/sa</i>	3.8	16	0.916
16 <i>rad/sa</i>	18.2	256	0.916

Çizelge 4.5: Doğal frekans değişimi ile bulunan PID kontrolör değerleri ($\zeta = 0.6, \tau = 0.052$ saat).

ω_n	K_p	K_i	K_d
1 <i>rad/sa</i>	0.2	1	0.948
4 <i>rad/sa</i>	3.8	16	0.948
16 <i>rad/sa</i>	18.2	256	0.948

Açıklamalar doğrultusunda değerlerin birbirine yakın çıkmasından dolayı (τ değerinin değişiminden kaynaklı K_d değerinde küçük farklılıklar oluşmuştur) sadece ω_n değerinin 4 rad/sa olduğu durumda çıkan fiyat sinyalleri Şekil 4.9 (a-d) ile verilmiştir.



Şekil 4.9: $\omega_n = 4 \text{ rad/sa}$ kutup yerleştirme ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyalleri; a-b) $\tau = 0.084$ saat yakınlştırılmış sinyal ve geçici hal cevabı c-d) $\tau = 0.052$ saat yakınlştırılmış sinyal ve geçici hal cevabı.

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere fiyat sinyallerinin a-c görselinde çok farklılık görülmediği halde K_d değerinin küçük değişimine karşılık şeklin b-d görselinde başlangıçtaki geçici halden kontrol hatası 0’a yaklaşına kadar büyük bir farklılık vardır. Bu durum fiyat eğrisinde önceden bahsedildiği gibi önem taşımamaktadır. Asıl önemli olan kalıcı hale geçişteki fiyat eğrisidir. Değişen talep ve değişken toplam üretime karşılık fiyat eğrilerinde kararlılık elde edilmiştir.

4.1.2 Sönüm oranının değişiminin fiyatlandırma üzerindeki etkisi

Bir sistemin analizini yapmak o sistemin giriş sinyalinin zaman içerisinde verdiği tepkiyi incelemektir. Yani sistemin, çıkış cevabının zamana göre olan değişiminden sistem analizleri yapılmaktadır. Dinamik fiyat eğrilerinin arz ve talep değişimleri doğrultusunda en uygun değerlerin elde edildiği bu tez çalışmasının bu kısımda fiyat sinyallerinin sistem kontrolü için sönüm oranı değerinin değişiminin etkileri incelenecektir. Sönüm oranı (ζ), bir sistemin kararlılığının belirlenmesinde kullanılan, sistemin kök konumlarını değiştiren önemli bir parametredir. Bu bölümde ζ değerinin değişiminin dinamik fiyat eğrileri üzerindeki etkisi ω_n değerinin sabit kalması koşuluyla incelenmiştir. Bu doğrultuda değişen ζ değerlerine bağlı olarak sistem salınımı (osilasyonu) küçük değişiklikler olsa dahi değişmiş, sistem için en uygun fiyat sinyalleri alınmıştır. Doğal frekans değeri 4 rad/sa için sabit bırakılıp, sistem tepkileri ζ değerinin 4 farklı aralık durumu için incelenmiştir. 3.1.2. bölümde ζ değerinin 4 farklı durumda olması halinde genel olarak sistem davranışları anlatılmıştır. Bu durumlar genel olarak aşağıda verildiği gibidir.

- $\zeta = 0$; Sönümsüz
- $0 < \zeta < 1$; Düşük Sönümlü
- $\zeta = 1$; Kritik Sönümlü
- $\zeta > 1$; Aşırı Sönümlü

ζ oranının değişiminin sistem üzerindeki etkilerini incelemek için ω_n değişimi incelenirken yapıldığı gibi bir takım işlemler ile PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu üzerinden 2. dereceye çevrilen sistem için karakteristik denklem eşitliği kullanılmalıdır. Daha sonrasında elde edilen denkleme göre ω_n değeri sabit değerde bırakılıp ζ değişimi ile bulunan sistem PID parametreleri Matlab/Simulink’te tasarlanan sisteme

eklenerek fiyat eğrileri elde edilmiştir. Denklem (4.22)'de verilen eşitlik sonucunda sistemin paydaları yani karakteristik denklemleri eşitlenmiştir.

Buna göre ζ değişimine göre değerlerin bulunması için örnek bir çözüm aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\omega_n = 4 \text{ rad/sa} , \zeta = 0, \tau = 0.31 \text{ saat için};$$

$$s^2 + 2 \cdot 0 \cdot 4 \cdot s + 16 = (K_d + \tau) \cdot s^2 + (K_p + 1) \cdot s + K_i \quad (4.23)$$

$$s^2 + 16 = (K_d + 0.31) \cdot s^2 + (K_p + 1) \cdot s + K_i \quad (4.24)$$

Bu eşitliğe göre $K_d = 0.69$, $K_p = -1$, $K_i = 16$ olarak bulunmaktadır. Denklemin kökleri;

$$s^2 + 16 = 0 \text{ ise } s_{1,2} = \pm j4 \text{ olmaktadır.}$$

ζ değerinin 4 ayrı durumu için, ayrıca kontrol sistemlerinin daha kararlı durumu olan $0.5 < \zeta < 0.7$ durumunda hesaplanan değerler Çizelge 4.6'da ayrıntılı olarak verilmiştir. ζ değeri 0 durumundan sonra 0.5 değerinden başlayarak 0.05 adımlarla 0.7 değerine ulaşıncaya kadar artırılmış bu değerden sonra 1 ve 1'den büyük değerler için parametreler bulunmuştur. Ayrıca her bir ζ değerinin değişiminde sistemin kökleri olan $s_{1,2}$ bulunmuştur. Daha sonra bu köklerin fiyatlandırma için konumlarının analizi yapılmıştır. Sönüm oranının değişimiyle sistem için bulunan PID parametreleri Çizelge 4.6'da verildiği gibidir. τ değeri sabit 0.31 saat alındığı için ve K_d değeri, ω_n değeri sabit olduğu için K_i değeri değişmemiştir. ζ değeri değiştikçe karakteristik denklem eşitliğine göre K_p değeri değişmektedir.

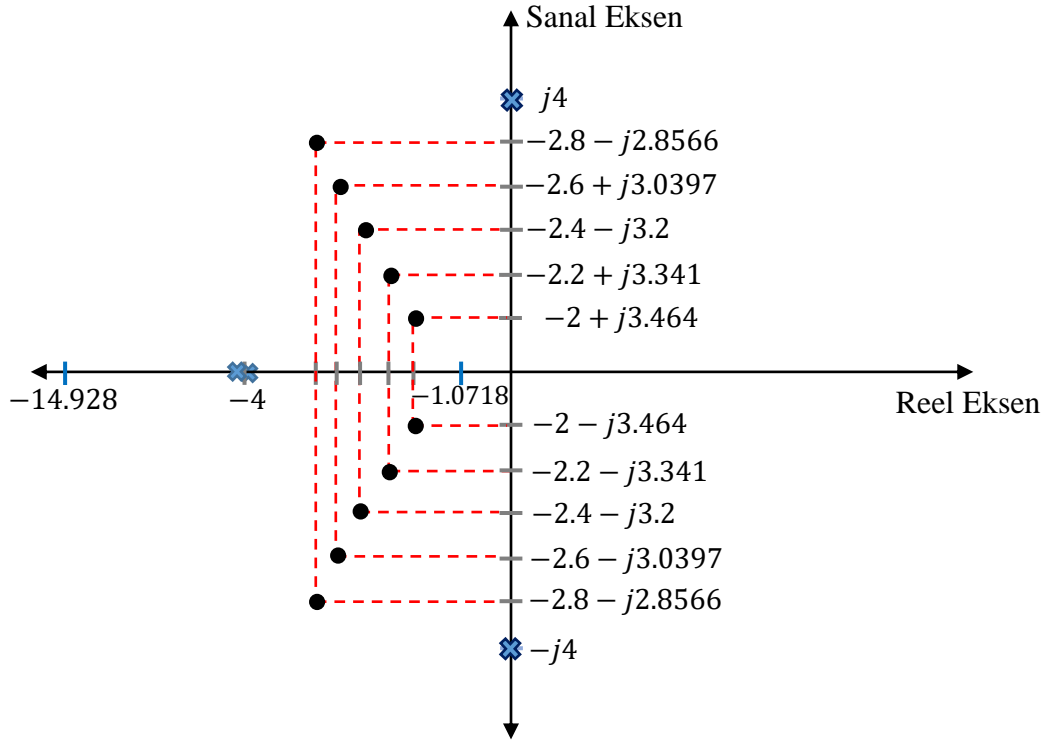
Çizelge 4.6: PID kontrolör için hesaplanan parametreler ve denklemin kök değerleri.

ζ	K_p	K_i	K_d	$s_{1,2}$
$\zeta = 0$	-1	16	0.69	$s_{1,2} = \pm j4$
$\zeta = 0.5$	3	16	0.69	$s_{1,2} = -2 \pm j3.464$
$\zeta = 0.55$	3.4	16	0.69	$s_{1,2} = -2.2 \pm j3.341$

Çizelge 4.7 (devam): PID kontrolör için hesaplanan parametreler ve denklemin kök değerleri.

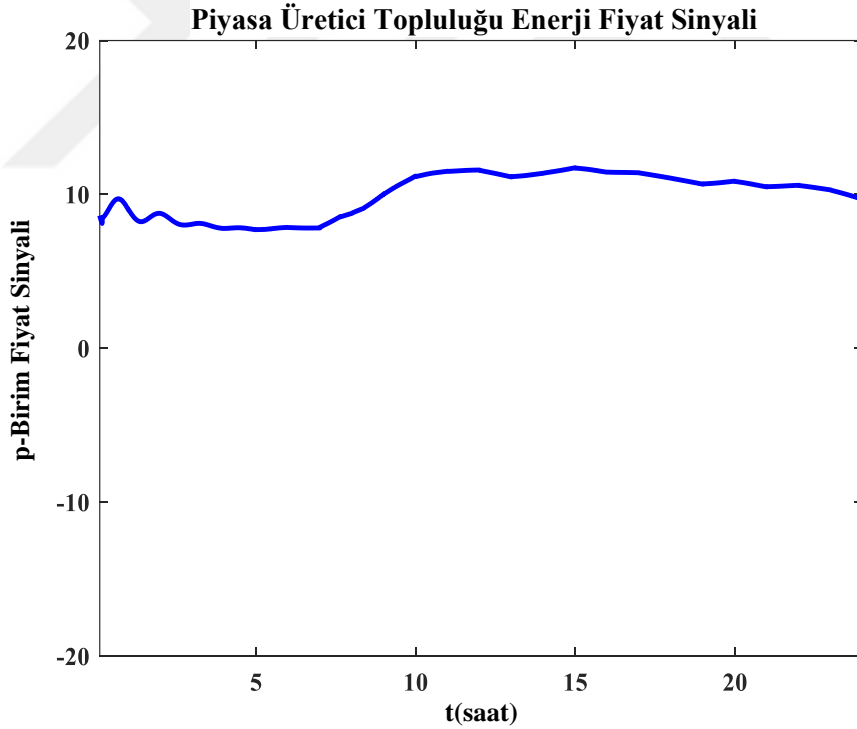
ζ	K_p	K_i	K_d	$s_{1,2}$
$\zeta = 0.6$	3.8	16	0.69	$s_{1,2} = -2.4 \pm j3.2$
$\zeta = 0.65$	4.2	16	0.69	$s_{1,2} = -2.6 \pm j3.0397$
$\zeta = 0.7$	4.6	16	0.69	$s_{1,2} = -2.8 \pm j2.8566$
$\zeta = 1$	7	16	0.69	$s_{1,2} = -4$
$\zeta > 1$	15	16	0.69	$s_1 = -1.0718$
$\zeta = 2$				$s_2 = -14.928$

Çizelge 4.6 ile hesaplanan değerlerin doğruluğunun test edildiği ve katsayıların daha hızlı ve doğru bulunduğu matlab kodu ekler bölümünde ayrıca verilmiştir. Karakteristik denkleme göre elde edilen köklerin değerleri Şekil 4.10'da verildiği gibidir.

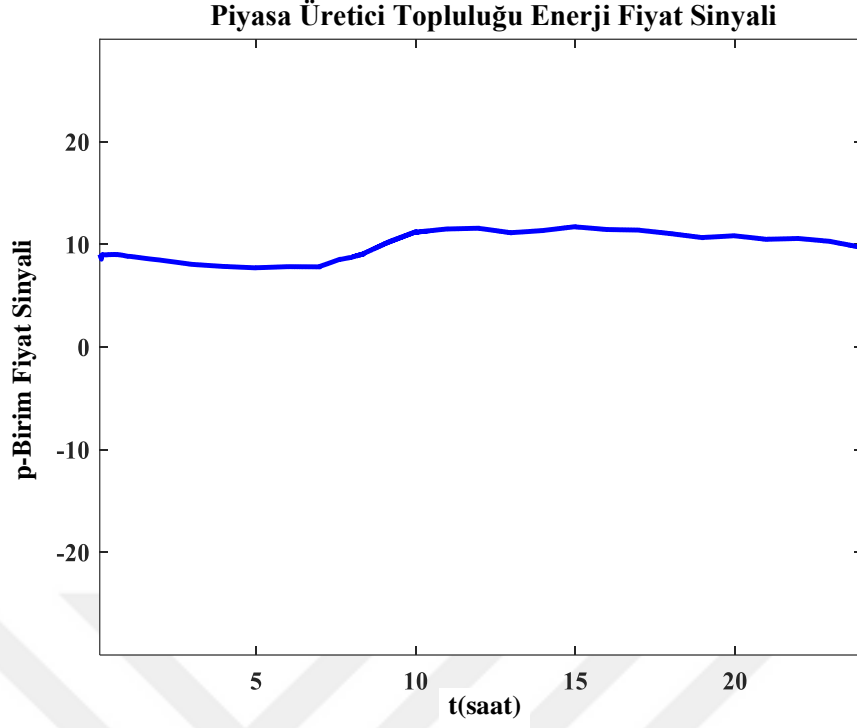


Şekil 4.10: ζ değişim durumlarına göre hesaplanan kök konumları.

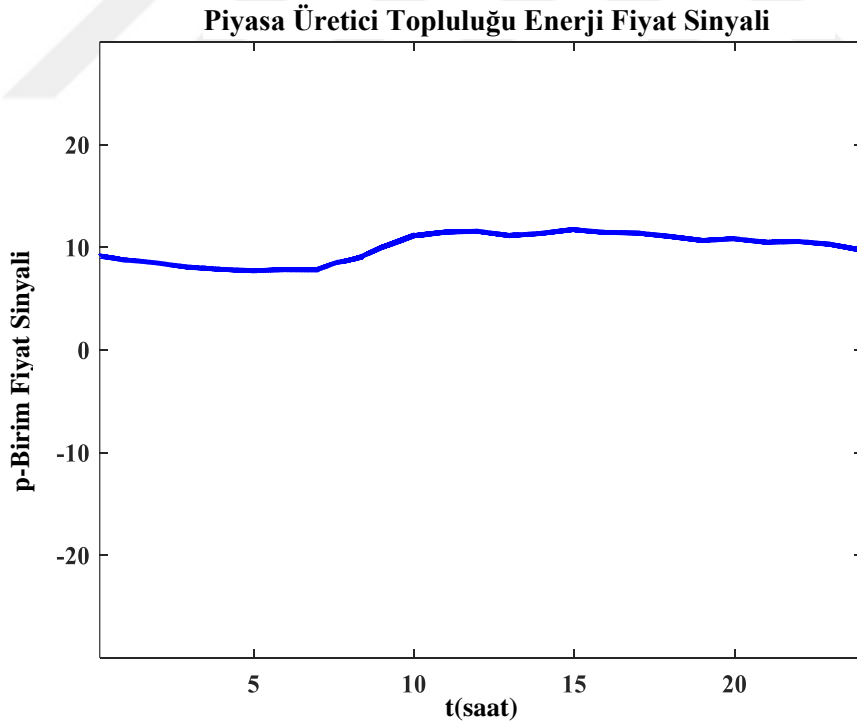
Şekil 4.10'da görüldüğü gibi kökler sol yarı düzlemde çıkmıştır. Böylelikle sistemin kararsız durumda olmadığı söylenebilmektedir. Çizelge 4.6'da ζ değerlerine karşılık hangi kökün ne konumda olduğu anlaşılmaktadır. $\zeta = 0$ durumu için sistem sönümsüz olup, sistemin sanal eksen üzerinde birbirinin eşleniği iki kökü bulunmaktadır. $0 < \zeta < 1$ durumu için sistemin sol yarı düzlemde birbirinin eşleniği olan iki kökü bulunup, sistem düşük sönümlüdür. Yani istenilen referans çıkışına düşük sönümlü bir osilasyon yaparak yaklaşmaktadır. $\zeta = 1$ durumunda sistem kritik sönümlü olup negatif reel eksen üzerinde çift katlı 2 kök değerine sahiptir. Böyle sistemler genel olarak diğer sistemlere nazaran sistem çıkışında istenilen değere daha hızlı ve osilasyonu yapmadan ulaşmaktadırlar. $\zeta > 1$ değerinde ise sistem aşırı sönümlüdür. Bu sistemler ise negatif reel eksen üzerinde 2 farklı kök değerine sahiptirler. Referans çıkışına sistem yine osilasyon yapmadan yaklaşmaktadır. Zaten bilindiği üzere sistem kökleri negatif reel eksenden uzaklaştıkça yaptıkları osilasyon miktarı artmaktadır. Bu değerlere göre bu bilgiler temel alınarak sistemin dinamik fiyat eğrileri aşağıda sırasıyla oluşturulmuştur.



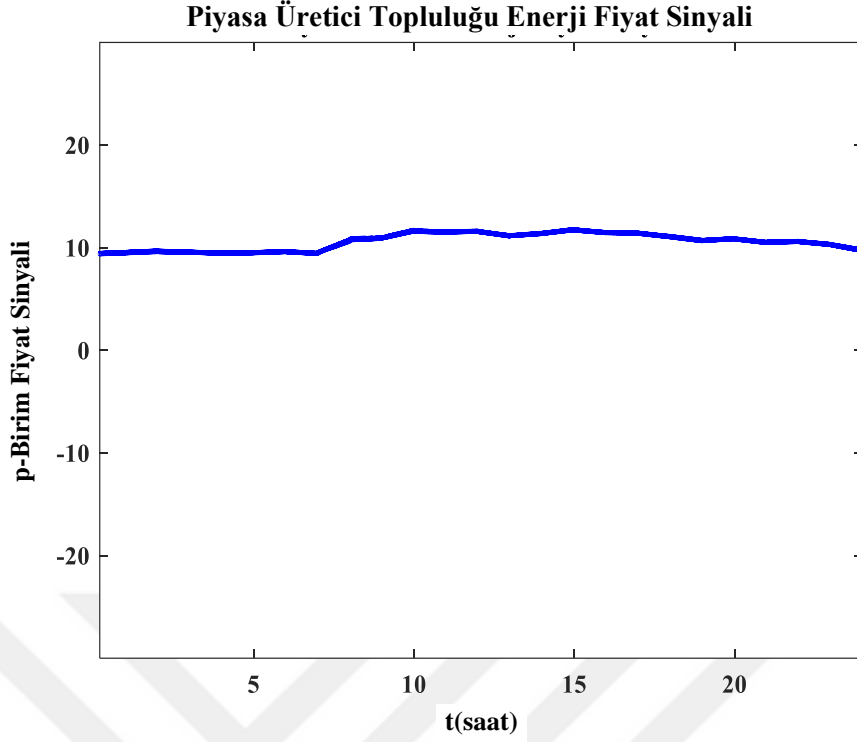
Şekil 4.11: $\zeta = 0$ durumu dinamik fiyat sinyali.



Şekil 4.12: $\zeta = 0.5$ durumu dinamik fiyat sinyali.



Şekil 4.13: $\zeta = 1$ durumu dinamik fiyat sinyali.



Şekil 4.14: $\zeta = 2$ durumu dinamik fiyat sinyali.

Çizelge 4.6’da verilen tüm değerlerden ziyade önemli kırılım noktası olan değerler incelenmiş ve üretici enerji fiyat sinyallerinin grafikleri Şekil 4.11-14 arasında elde edilmiştir. Dinamik fiyatlandırma için hazırlanan sistem modeline göre sistem kararsızlığa düşmediği sürece yani e denge hata fonksiyonu sinyali 0 değerinden çok uzaklaşmadığında sistem çalışırken farklı PID değerlerine rağmen birbirine benzer enerji sinyal eğrilerini vermektedir. $\zeta = 0$ değerinde Şekil 4.11’de görülen fiyat sinyali 0-4 saatleri arasında sistemde e hata sinyalinin değerini düzeltmeye çalışmış ve bu sebeple sistemde sönüm olmamıştır. Bu durum üretim verilerinin artmasıyla düzelebilir. ζ değeri 0.5 ile 0.7 değerleri arasında sisteme kararlılık sağlamıştır ve bu yüzden fiyat sinyali eğrileri birbirine çok benzer değerler almıştır. $\zeta > 1$ ise sistem aşırı sönümlü olup saat 8 sırasında oluşan ani yükseltmeyi azaltmış diğer eğrilere göre nispeten daha sönümlü bir sinyal eğrisi elde edilmiştir.

4.2 Ziegler-Nichols Metodu ile Kapalı Döngü Fiyat Sinyallerinin Kontrolü

Bu bölümde temeli 1942 yılına dayanan temel kontrol yöntemi olan Ziegler-Nichols yöntemi ile PID, PI, PD kontrolör katsayıları, sistem için belirlenen transfer fonksiyonu esas alınarak ve sisteme zaman gecikmesi verilerek hesaplanmış, matlab programı ile hesaplanan değerler doğrulanmıştır. Sisteme verilen zaman gecikmesinin nedeni doğal ortamda her bir

sistemin tetiklenme süresinden kaynaklanmaktadır. Yani gerçek şartlarda hiçbir sistem anında devreye girmemektedir. Sistem gecikmesi çok kaynaklı üretim modelinde bulunan termik, güneş, rüzgar kaynaklarına sırasıyla uygulanmıştır. Gerekli hesap adımları yapılarak hesaplanan kontrol parametreleri sistem için tasarlanan modele uygulanarak dinamik fiyat eğri sinyalleri elde edilmiştir.

1942 yılında John Ziegler ve Nathaniel Nichols tarafından bulunan ve genel adıyla Ziegler-Nichols yöntemi olarak adlandırılan kontrolör parametrelerini bulmaya yarayan metod iki ayrı yöntem olan basamak yanıtı ve frekans yanıtı yöntemi olarak uygulanmaktadır (Ziegler ve Nichols, 1942). Bu tez çalışmasında frekans yanıtı yöntemi kullanılmıştır. Bu doğrultuda sistem için $-\pi$ değerinde faz kaymasına sebep olan kritik kesim frekans değeri analitik ve deneysel olarak elde edilmiştir. Sistemin kritik kazancı olan K_c ve sistemin salınım periyodu olan T değeri hesaplanarak Çizelge 3.2 ile belirtilen işlemlere dayanarak katsayılar hesaplanmıştır. Ayrıca matlab programı aracılığıyla sistemin Bode ve Nyquist eğrileri çizdirilmiş ve aritmetik olarak hesaplanan değerlerin doğruluğu ispatlanmıştır. Bode eğrisi biri genlik diğeri faz açısını gösteren iki grafikten oluşmaktadır. Bode diyagramı yardımıyla hesaplanan ω_c açısal kesim frekansının faz-frekans eğrisinde -180° 'ye denk geldiği gösterilmiştir. Bu işlemde sonra sistemin Nyquist eğrisi elde edilerek hesap adımlarında sistemin bulunan reel değeri ve frekansı gösterilmiştir. Nyquist eğrisi kullanılan bir sistemin frekans davranışı incelenerek özellikle -180° için sistemin oluşturduğu en küçük ω_c bulunarak parametreler hesaplanmıştır.

Denklem (4.8)'de verilen transfer fonksiyonuna üretici topluluğundan gelen sistem gecikmesi katılarak oluşturulan sistemin yeni transfer fonksiyonu denklem (4.25) ile ifade edilmektedir.

$$G(s) = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \cdot e^{-Ls} \quad (4.25)$$

Bu fonksiyon zaman gecikmeli sistemler için kullanılan genel transfer fonksiyonudur.

YEK'in kullanımına imkan veren akıllı şebeke sistemi için bu çalışmada çoklu kaynak kullanımı ile toplam üretim verileri oluşturulmuştur. Termik santraller (kömür ve doğalgaz), hidrolik santraller gibi üretim kaynakları istikrarlı ve daha az değişken bir üretime sahipken, güneş ve rüzgar santralleri dalgalı ve değişken üretim profiline sahiptir. Bu durum üretimde dalgalanmalara sebep olacağından kontrol teorisi yöntemleri ele alınarak talep verilerine karşılık bir denge oluşturmak çok önemlidir.

Ziegler-Nichols yöntemi ile gerekli parametreleri hesaplamak için aşağıdaki işlem adımları sırasıyla uygulanmalıdır. Bu işlem adımları için öncelikle $s = j\omega$ yazılmalıdır. Böylece elde edilen yeni transfer fonksiyonu denklem (4.26)'da verildiği gibi olmaktadır. Kararlı hal cevabına kadar beklenen sistemlerde transfer fonksiyonunda $s = j\omega$ yazılarak frekans cevabı analizleri yapılabilmektedir. Transfer fonksiyonu $G(s)$ olan sistemde $s = j\omega$ yazılarak aşağıda verilen denklem (4.26) elde edilmektedir (Ogata, 2002).

$$G(j\omega) = \frac{1}{\tau j\omega + 1} \cdot e^{-Lj\omega} \quad (4.26)$$

En genel formda $G(j\omega) = M \cdot e^{j\varphi} = M\angle\varphi$ olarak gösterilmektedir. Bu ifade de M genlik oranını, φ ise faz farkını ifade eden faz açısını belirtmektedir (Ogata, 2002).

Faz açısı;

$$\angle G(j\omega) = \angle e^{-j\omega L} + \angle \frac{1}{\tau j\omega + 1} \quad (4.27)$$

denklem (4.27) ile gösterilen şekilde elde edilmektedir.

Bu ifadenin faz açısı elde etmek için eşlenik ile çarpma işlemi yapılmalıdır. Bu doğrultuda denklem (4.26) ile belirtilen ifadenin eşlenik ile çarpma adımı denklem (4.28) ile yapılmaktadır.

$$\frac{1}{\tau j\omega + 1} = \frac{1 - \tau j\omega}{1 + \omega^2 \tau^2} = \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4.28)$$

Elde edilen denklem (4.28) için sanal kısmın reel kısma oranıyla sistemin açısı elde edilebilmektedir ve bu işlem denklem (4.29) ile gösterilmektedir.

$$\frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \cdot \frac{1 + \omega^2 \tau^2}{1} = \omega \tau \quad (4.29)$$

Böylece genel olarak sistemin faz açısı denklem (4.30)'da verildiği gibi yazılabilmektedir;

$$\theta = -\omega \cdot L - \tan^{-1}(\omega \cdot \tau) \quad (4.30)$$

Bu ifade -180° 'ye eşitlenirse sistemin ω_c kritik frekansı bulunacaktır. Zaman gecikmesine sahip sistem için $e^{-j\omega L}/(\tau j\omega + 1)$ ifadesi trigonometrik ifadeler şeklinde denklem (4.31)'de gösterildiği formda yazılıp bu ifadenin reel ve imajiner kısmı birbirinden ayrılıp, reel kısmı için ω_c değeri yerine yazılırsa ve bu ifadenin çarpma işlemine göre tersi alınırsa sistemin K_c kazancı elde edilmiş olur. Buna göre $e^{-j\omega L}/(\tau j\omega + 1)$ denkleminin yeni ifadesi aşağıda verilen denklem şekliyle belirtilmektedir.

$$\frac{1}{\tau j\omega + 1} \cdot e^{-Lj\omega} = \frac{\cos(L\omega) - j \sin(L\omega)}{\tau j\omega + 1} \quad (4.31)$$

Laplace denklemlerinin s ifadesi boyutsuz bir parametredir. τ zaman gecikmesi ve L sistem gecikmesi 24 saatlik çalışmaya göre saat cinsinden alınarak normalizasyon işlemi yapılmıştır. Böylece s ifadesi $1/saat$ cinsinden yazılmıştır.

Bu işlem adımları sırasıyla termik, hidrolik, güneş ve rüzgar enerji kaynaklarına uygulanıp enerji fiyat sinyallerini elde etmek için kontrolör parametreleri aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.

4.2.1 Termik sisteme verilen gecikme ile kontrolör parametrelerinin hesaplanması

1. transfer fonksiyonu için $\tau = 0.31$ saat ve $L = 0.1$ saat olarak alınırsa sistemin genel haliyle transfer fonksiyonu aşağıda (4.32) nolu denklem formu ile verildiği gibi olmaktadır.

$$T(s) = \frac{1}{0.31 \cdot s + 1} \cdot e^{-0.1s} \quad (4.32)$$

Buna göre yukarıda genel haliyle verilen işlem adımları yapılarak ω_c değeri bulunabilmektedir. İşlemler sırasıyla (4.33)-(4.38) arası verilen denklemler aracılığıyla hesaplanır.

$$-0.1\omega - \tan^{-1}(0.31\omega) = -180^\circ \quad (4.33)$$

$$180 - 0.1\omega = \tan^{-1}(0.31\omega) \quad (4.34)$$

Denklemin her iki tarafının tanjantı alınarak denklem (4.35) elde edilmektedir.

$$\tan(180 - 0.1\omega) = 0.31\omega \quad (4.35)$$

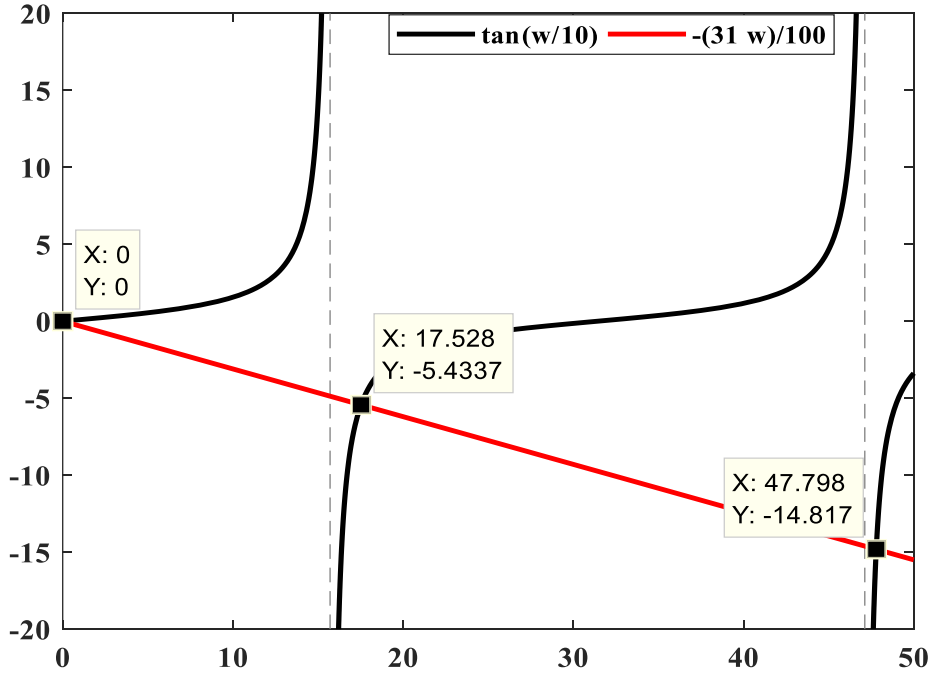
Yarım açı formülüne göre tanjant ifadesi açılırsa ve $\tan(180^\circ) = 0$ eşitliği gerekli yere yazılırsa denklemler sırasıyla aşağıdaki şekillerde yazılmaktadır.

$$\frac{\tan(180) - \tan(0.1 \cdot \omega)}{1 + \tan(180) \cdot \tan(0.1 \cdot \omega)} = 0.31 \cdot \omega \quad (4.36)$$

$$-\tan(0.1 \cdot \omega) = 0.31 \cdot \omega \quad (4.37)$$

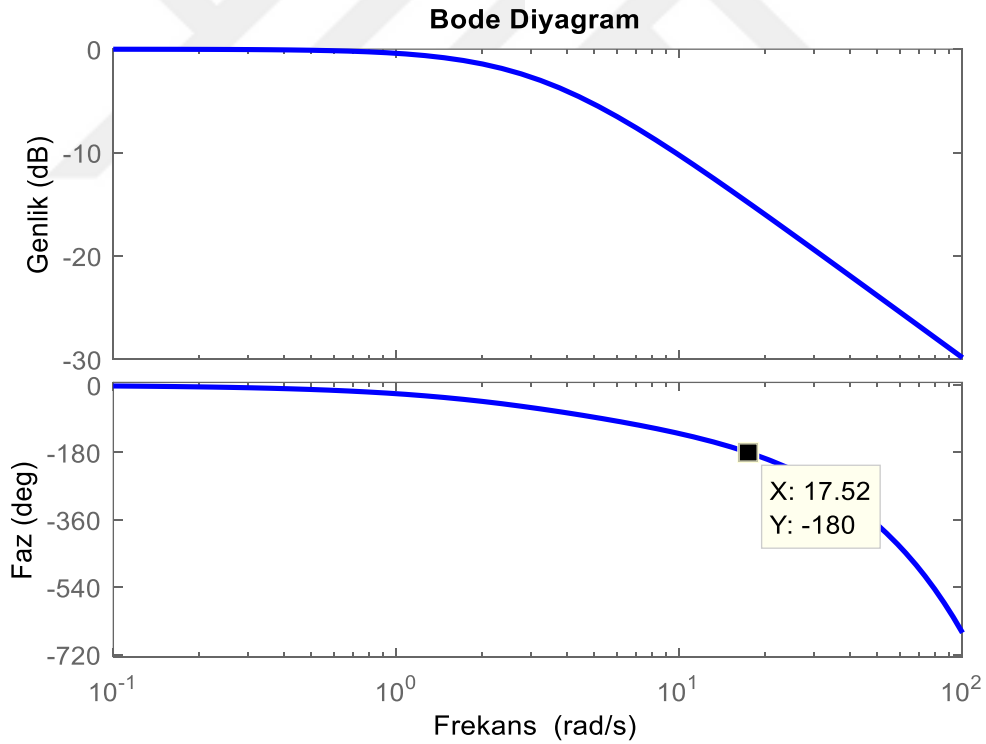
$$\tan\left(\frac{\omega}{10}\right) = -0.31\omega \quad (4.38)$$

Bu yolla elde edilen sistemde ω değerini analitik olarak elde etmek karmaşık işlemler gerektirdiğinden ω değeri matlab programı aracılığıyla ekler bölümünde belirtilen kısa kodlardan oluşan program yardımıyla elde edilmiş ve bu değere ait grafik Şekil 4.15'te verilmiştir. Denklem (4.38) ifadesinde ω değeri " $\tan(\omega/10)$ " değerinin " $-0.31 \cdot \omega$ " değerine eşit olduğu yerde bulunacağı için iki denklem üst üste çizdirilerek birbirlerine eşit olan noktalar Şekil 4.15'te veri göstergeleri ile belirtilmiştir. Burada sistemi sağlayan radyan olarak ifade edilen frekans değerinin ilk 3 değeri gösterilmiştir. Bu değerler grafikte de görüldüğü üzere sırasıyla $\omega = 0 \text{ rad/saat}$, $\omega = 17.528 \text{ rad/saat}$ ve $\omega = 47.798 \text{ rad/saat}$ frekans değerleridir. Bu 3 değerden 0'dan sonra sistemi sağlayan ilk frekans değeri olan $\omega = 17.528 \text{ rad/saat}$ değerine göre işlemler devam ettirilecektir.

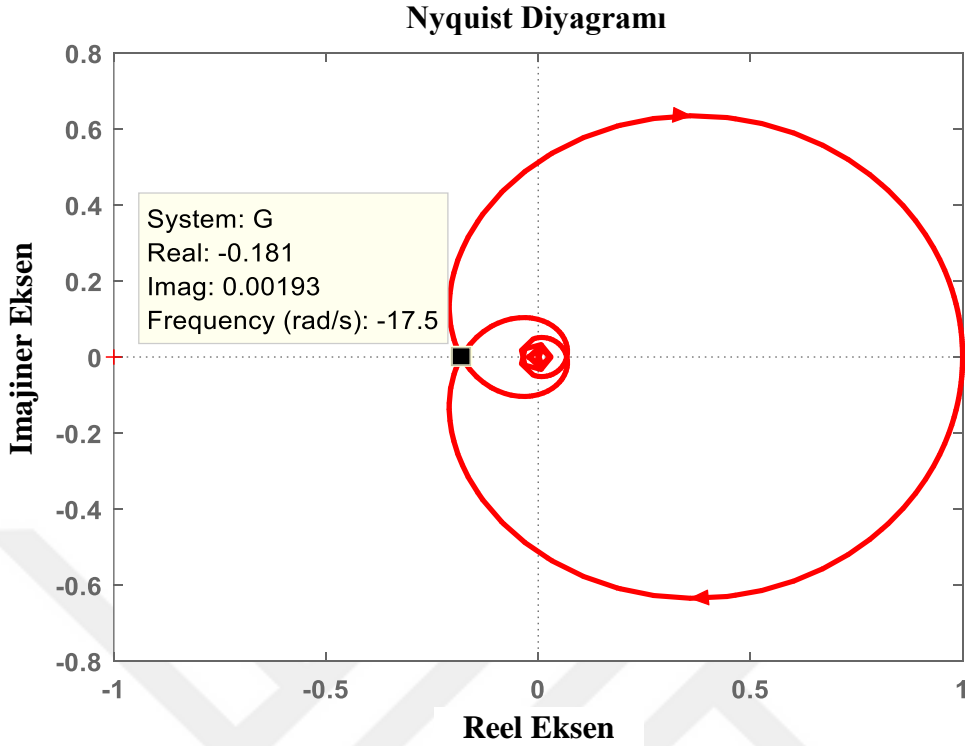


Şekil 4.15: Termik santral için kritik frekans değeri.

Transfer fonksiyonu $T(s)$ olarak verilen sistem için Şekil 4.16 genlik ve faz eğri bilgilerinin elde edildiği bode diyagramını göstermektedir. 1. dereceden ve gecikmeye sahip olan sistemde şekilden de anlaşılacağı üzere frekans cevabı elde edilebilmektedir. Bu değerin sistem için Şekil 4.15'te bulunan değerle aynı olduğu görülmektedir. Ayrıca bu değer başka bir yöntem olan kutupsal grafikler olarak adlandırılan yöntem ile de elde edilebilmektedir. Daha çok Nyquist grafiği olarak geçen kutup grafik yöntemi, Bode eğrisinde olduğu gibi Matlab programı aracılığıyla kolaylıkla çizdirilebilmektedir. Nyquist bütün frekans değerlerinde sistemin frekans yanıtını gösterdiği için avantaj sağlamaktadır. Şekil 4.16'da $T(s)$ transfer fonksiyonunun bode diyagramı frekans ve genlik cevabı gösterilmektedir. Şekil 4.17'de ise nyquist diyagramı verilmiş olup spiral olarak çıkmıştır. Ayrıca sistemin negatif faz açısına sahip olduğu saat yönünde dönen oklardan anlaşılmaktadır. Şekil 4.16 ve 4.17'de sistemin reel, imajiner ve frekans bilgileri yer almakta olup bu değerlerin hesaplanması ayrıca verilecektir. Bode ve nyquist eğrilerinin elde edilmesini sağlayan matlab kodu ekler bölümünde verilmiştir.



Şekil 4.16: Termik santrali transfer fonksiyonuna ait bode diyagramı.



Şekil 4.17: Termik santrali transfer fonksiyonuna ait nyquist diyagramı.

Matematiksel hesap, bode diyagramı ve nyquist diyagramından da görüldüğü üzere sistemin frekans değeri 17.5 rad/sa olarak çıkmaktadır. Normalizasyon işlemi yapıp sistem 24 saatlik fiyat eğrilerini elde etmeye yönelik olacağından alınan birimler saat olarak ve frekans cevabı da rad/saat olarak alınmıştır.

Transfer fonksiyonu belirtilmiş olan sistemde Nyquist diyagramında da belirtilen reel kısmın (-0.181) bulunması için zaman gecikmesi olan kısmı trigonometrik olarak yazmak gereklidir. Bu ifade sırasıyla aşağıda denklemlerde verildiği gibi yapılmaktadır.

$$T(j\omega) = \frac{\cos(0.1\omega) - j \sin(0.1\omega)}{0.31j\omega + 1} \quad (4.39)$$

Bu denklem payda kısmının eşleniği olan $(0.31j\omega - 1)$ ile çarpılırsa yeni elde edilecek denklem aşağıda verildiği gibidir.

$$T(j\omega) = \frac{-0.31j\omega \cdot \cos(0.1\omega) - 0.31\omega \cdot \sin(0.1\omega) + \cos(0.1\omega) - j \sin(0.1\omega)}{0.31^2 \cdot \omega^2 + 1} \quad (4.40)$$

(4.40) nolu denklem reel ve sanal kısımlarına ayrılarak elde edilen denklemlerde ω frekans değeri yerine bulunan değer (17.52 rad/saat) yazılırsa nyquist diyagramında bulunmuş olan reel kısmın sayısal değeri elde edilmiş olacaktır. Reel kısmın analitik değeri denklem (4.41)'de verildiği gibidir.

$$Re(T(j\omega))_{|\omega=17.528} = \frac{\cos(0.1\omega) - 0.31\omega \cdot \sin(0.1\omega)}{0.31^2 \cdot \omega^2 + 1} = -0.18099 \cong -0.181 \quad (4.41)$$

Kararlılık için sistemin kritik kazanç değeri ise reel kısmın çarpmaya göre tersi alınarak elde edilmektedir. Bu ifade (4.42) nolu denklem ile hesaplanmıştır.

$$K_c = \frac{1}{|Re(T(j\omega))|} = \frac{1}{0.181} = 5.525 \quad (4.42)$$

Son olarak bu sistem için Ziegler- Nichols tablo değerlerine göre sistemin kontrolör parametrelerinin elde edilmesi için sistemin sürekli salınım periyodu olan P_{cr} değeri denklem (4.43)'de verilen işlemler doğrultusunda bulunmaktadır.

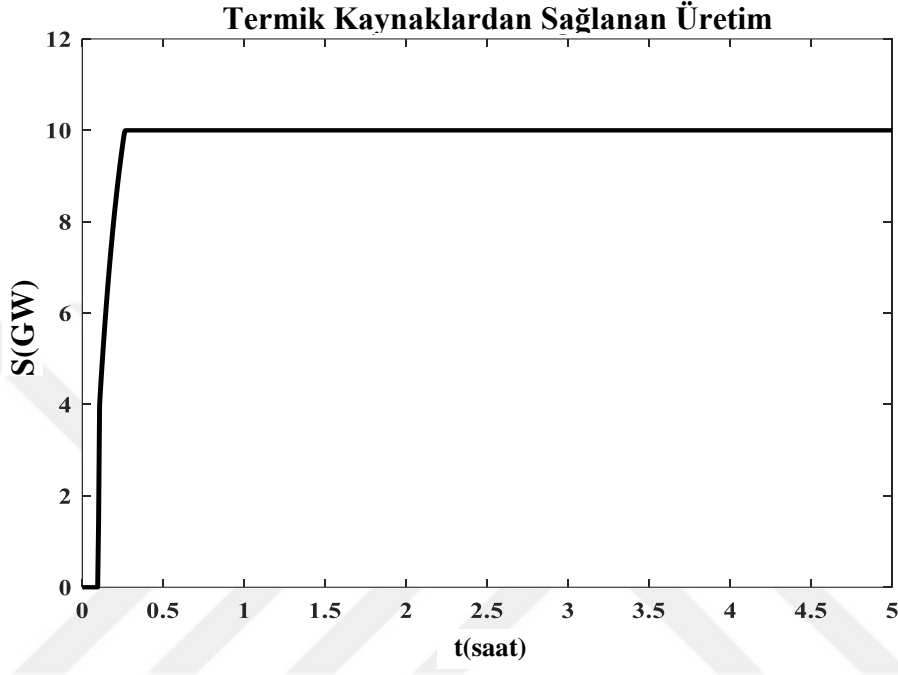
$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = 0.3585 \text{ saat} \quad (4.43)$$

Ziegler-Nichols frekans yanıtı parametrelerini belirlemek için Çizelge 3.2 kullanılarak elde edilen değerlere göre sistemde K_c değerine kadar K_p değeri artırılarak elde edilen analitik kontrolör değerleri Çizelge 4.7'de verildiği gibidir. Termik sistem için kullanılan transfer fonksiyonunda sistem kararlılığı için kullanılacak PID, PI ve PD kontrolör analitik olarak elde edilmiş ve sonrasında dinamik fiyat eğrileri bu parametre değerleriyle çizdirilmiştir.

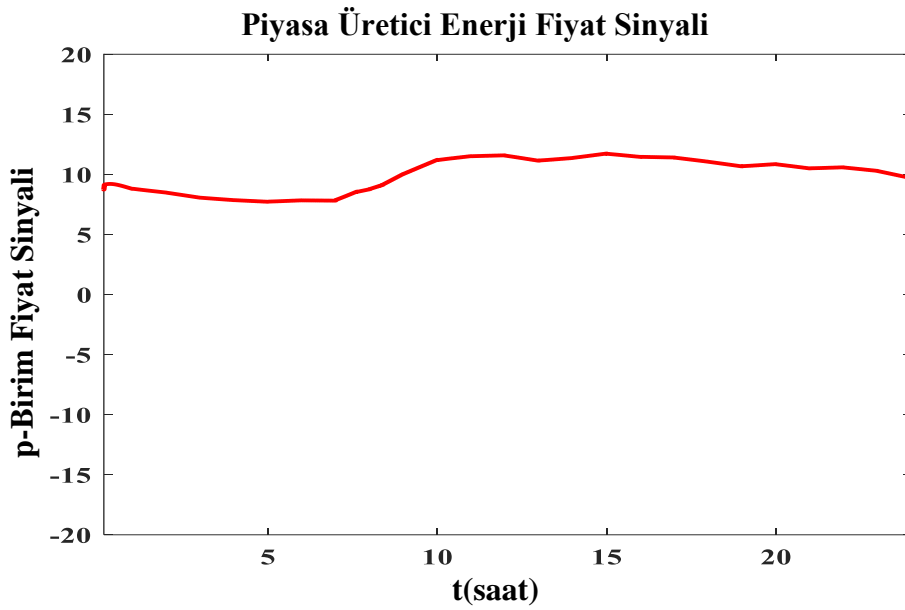
Çizelge 4.8: Termik santrali transfer fonksiyonuna ait Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan kontrolör değerleri.

Kontrol Tipi	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
PI	2.48625	0.2868	—	8.322	—
PD	4.42	—	0.0448	—	0.19807
PID	3.315	0.17925	0.0448	18.494	0.1485

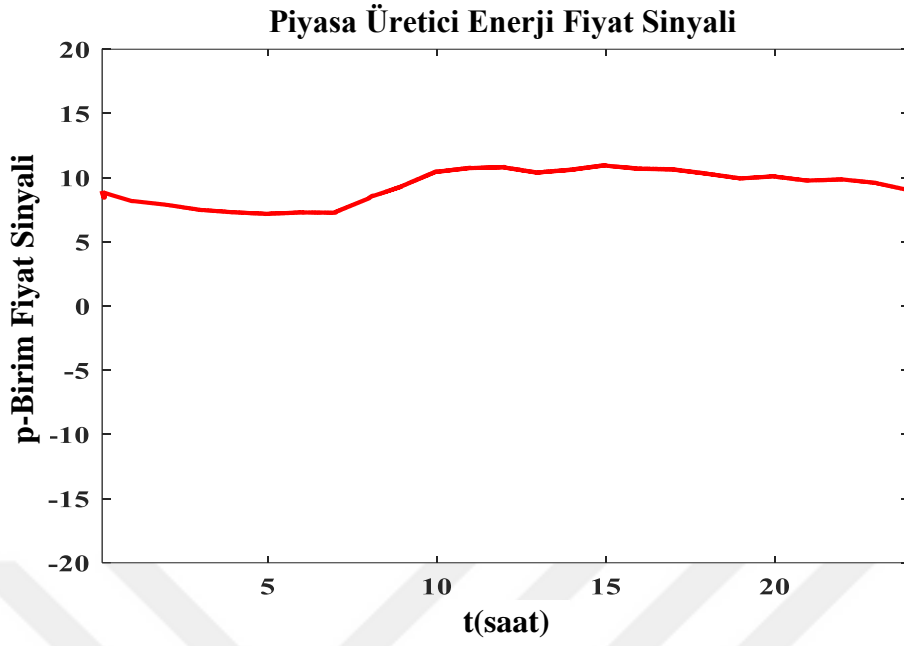
Bu sistemde arz ve talep değerleri değiştirilmemiş olup sistemde termik santrale olağan durumlara karşılık 0.1 saatlik verilen gecikme Şekil 4.18’de verilmiştir. Gecikmenin tam olarak görülebilmesi için termik üretim ilk 5 saati çizdirilmiştir. Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21’de termik santral için oluşturulan 0.1 saatlik gecikme ile hesaplanan kontrolör parametreleriyle elde edilen fiyat sinyal eğrileri grlmektedir.



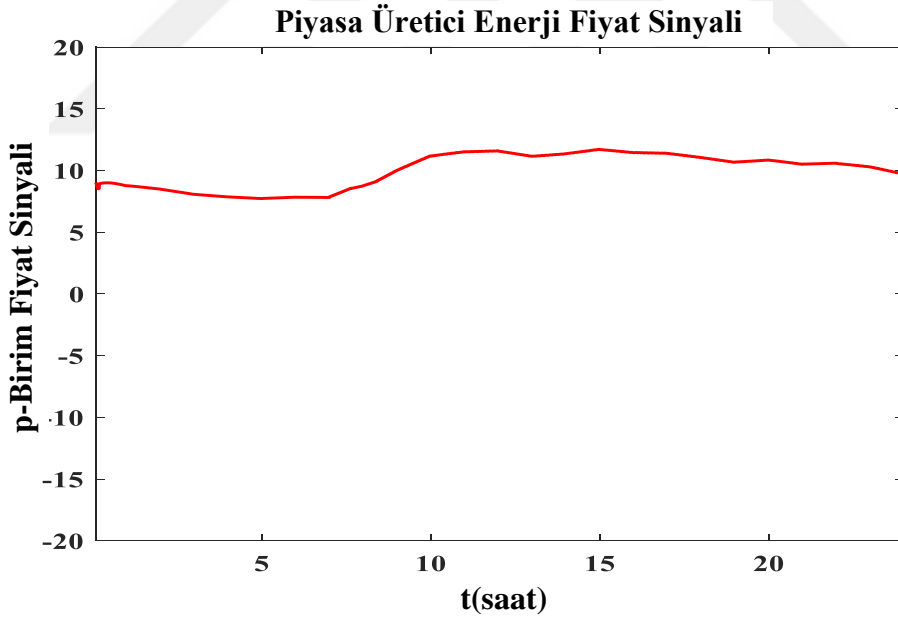
Şekil 4.18: Termik santral 0.1 saat gecikmeli retim.



Şekil 4.19: 1. transfer fonksiyonu için elde edilen PID kontrolörlü dinamik enerji fiyat eğrisi.



Şekil 4.20: 1. transfer fonksiyonu için elde edilen PD kontrolörlü dinamik enerji fiyat eğrisi.

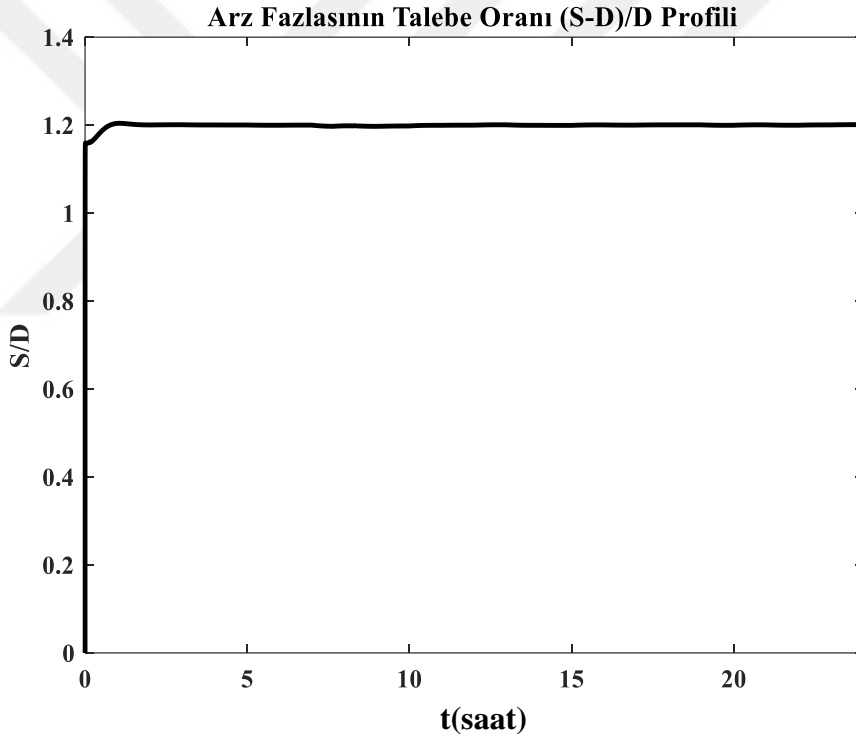


Şekil 4.21: 1. transfer fonksiyonu için elde edilen PI kontrolörlü dinamik enerji fiyat eğrisi.

Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21 ile verilen grafiklerden en iyi dinamik fiyat sinyali sonucunun alındığı grafik 4.19 grafiğidir. PD kontrolör nispeten PI kontrolöre göre daha iyi sonuç vermektedir. Her 3 durumda da kararlılık sağlanmış ve sistem kalıcı hal davranışı almıştır. Değişken talep eğrisine karşılık en uygun fiyat sinyalleri verilen değerler ile alınmıştır. Sistem kararlılığı bozulmadığı için eğriler birbirlerine yakın sonuç verse de

farklılık, başlangıçta sistem enerji dengesine gelinceye kadar oluşturulan $S_d(p)$ satış eğilimi eğrisidir. Bu geçici hal cevabı sistem dengeye gelinceye kadar farklı satış eğilimi sunarak sistemi dengeye ulaştırmaya çalışmaktadır.

Şekil 4.22 arz/talep oranını bir başka ifadeyle değişken talebin karşılanma durumunu göstermektedir. Görüldüğü üzere bu oran 1.2 olup 1 sınırını sisteme verilen sanal talep dolayısıyla aşmıştır. Böylelikle sistemde enerji yetersizliği veya kesinti durumları olmayacaktır. Enerji tedarikçileri talep adımıdaki değişikliklere anında karşılık vermiştir. $S/D \geq 1$ durumunun elde edilmesi verilen değerlerin sistemde kararsızlık oluşturmadığını, bu bulunan değerlerin doğruluğunu göstermektedir. $S/D \geq 1$ ile enerjide verim sağlanmıştır. Bu oranın aşırı büyük olması durumu da doğru olmayıp, fazlaca üretime sebep olacağından enerjide verimsizlik oluşacağı unutulmamalıdır.



Şekil 4.22: Termik sistem için talebin karşılanma oranı.

4.2.2 Güneş ve hidrolik sistemlerine verilen gecikme ile kontrolör parametrelerinin hesaplanması

Güneş ve Hidroelektrik sistemleri için transfer fonksiyonu (4.44) nolu verilen denklemde belirtildiği gibi olup termik santral için işlemler tekrarlanarak önce ω frekans değeri bulunmuştur. Bu değer ile bu tip santrallerin transfer fonksiyonuna bağlı olarak kritik

kazanç değeri ve salınım periyodu hesaplanmış ve simülasyon programlarıyla doğrulanmıştır.

$$T(s) = \frac{1}{0.052 \cdot s + 1} \cdot e^{-0.1s} \quad (4.44)$$

ω Frekansını bulmak için sırasıyla denklem (4.45)-(4.50) arasındaki işlemler yapılmıştır. Bu işlemlerin detaylı açıklaması termik santral bölümünde verilmiştir.

$$-0.1\omega - \tan^{-1}(0.052\omega) = -180^\circ \quad (4.45)$$

$$180 - 0.1\omega = \tan^{-1}(0.052\omega) \quad (4.46)$$

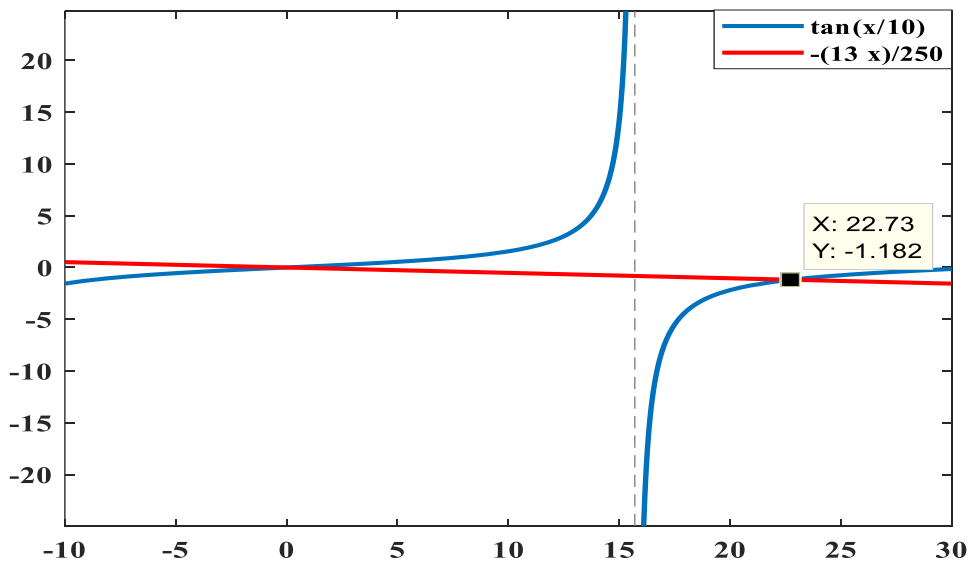
$$\tan(180 - 0.1\omega) = 0.052\omega \quad (4.47)$$

$$\frac{\tan(180) - \tan(0.1 \cdot \omega)}{1 + \tan(180) \cdot \tan(0.1 \cdot \omega)} = 0.052 \cdot \omega \quad (4.48)$$

$$-\tan(0.1 \cdot \omega) = 0.052 \cdot \omega \quad (4.49)$$

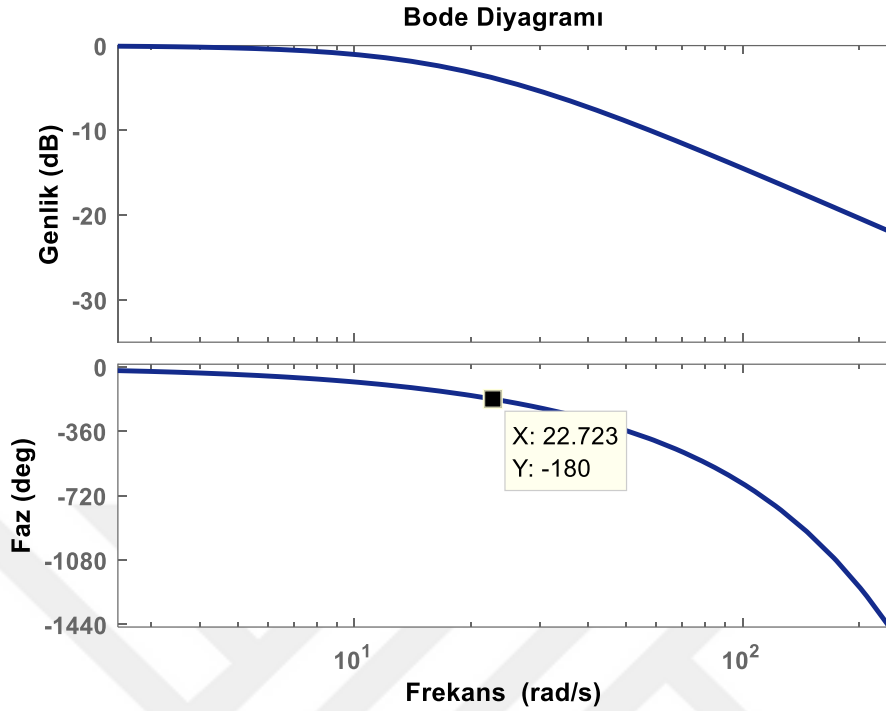
$$\tan\left(\frac{\omega}{10}\right) = -0.052\omega \quad (4.50)$$

Bu denklemde her iki tarafın birbirine eşit olduğu ω frekansının değeri Şekil 4.23 ile verilen noktalarda sağlanmaktadır. Bu değerler görüldüğü gibi (0,0) ve (22.73, -1.182) noktalarıdır.

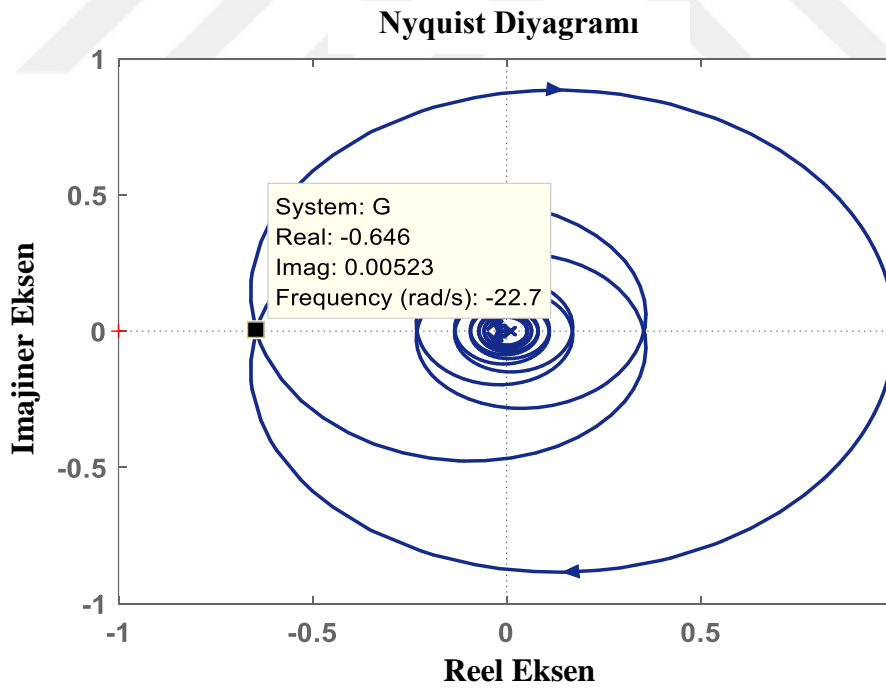


Şekil 4.23: Güneş ve hidrolik santral için kritik frekans değerinin matlab çözümü.

$\omega = 22.73$ rad/saat değerinde sistem istenilen eşitliği sağlamaktadır. Bu değer aşağıda sırasıyla verilen Şekil 4.24 ve 4.25'te bode ve nyquist eğrilerinde de gösterilmektedir.



Şekil 4.24: Güneş ve hidrolik santrallerinin transfer fonksiyonuna ait bode diyagramı.



Şekil 4.25: Güneş ve hidrolik santrallerinin transfer tonksiyonuna ait nyquist diyagramı.

Sistemin kararlılık için kritik değeri tekrardan reel kısmın çarpma işlemine göre tersinin alınmasıyla elde edileceğinden aşağıdaki işlem serileriyle denklem (4.53)'de önce reel kısım sonrasında denklem (4.54)'de kritik kazanç değeri ve denklem (4.55)'te salınım periyodu değerleri bulunmuştur.

$$T(j\omega) = \frac{\cos(0.1\omega) - j \sin(0.1\omega)}{0.052j\omega + 1} \quad (4.51)$$

$$T(j\omega) = \frac{-0.052j\omega \cdot \cos(0.1\omega) - 0.052\omega \cdot \sin(0.1\omega) + \cos(0.1\omega) - j \sin(0.1\omega)}{0.052^2 \cdot \omega^2 + 1} \quad (4.52)$$

$$Re(T(j\omega))_{|\omega=22.73} = \frac{\cos(0.1\omega) - 0.052\omega \cdot \sin(0.1\omega)}{0.052^2 \cdot \omega^2 + 1} = -0.64589 \cong -0.646 \quad (4.53)$$

$$K_C = \frac{1}{|Re(T(j\omega))|} = \frac{1}{0.646} = 1.548 \quad (4.54)$$

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = 0.276 \text{ saat} \quad (4.55)$$

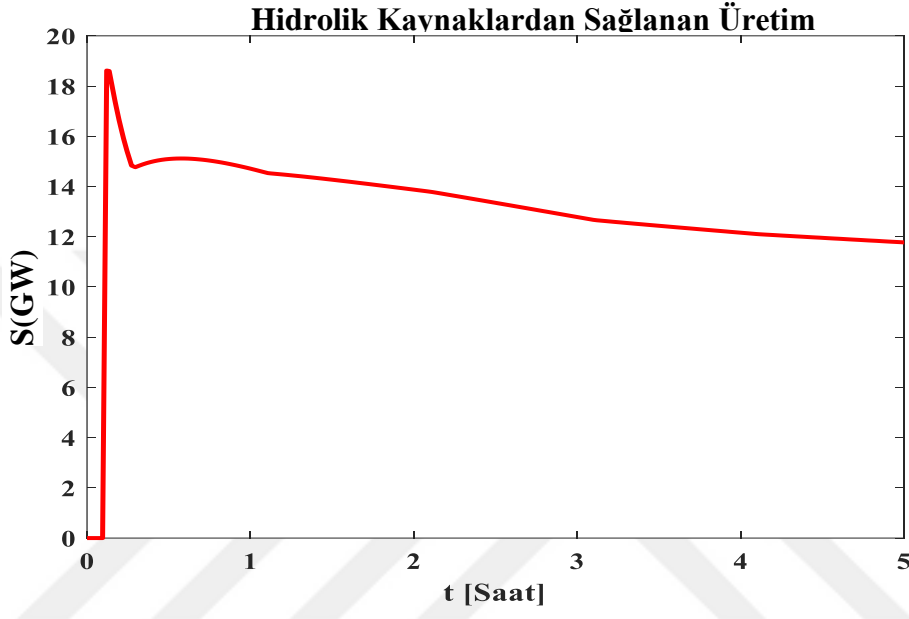
Böylece Ziegler-Nichols kontrolör parametre hesabı için gerekli olan kritik kazanç değeri $K_C = 1.548$ ve salınım periyodunun değeri ise $P_{cr} = 0.276 \text{ saat}$ 'dir.

Hidrolik ve güneş santrallerine verilen 0.1 saatlik gecikmeye göre Ziegler-Nichols metoduyla hesaplanan parametreler Çizelge 4.8'de verilmektedir.

Çizelge 4.9: Hidrolik ve güneş santrali transfer fonksiyonuna ait Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan kontrolör değerleri.

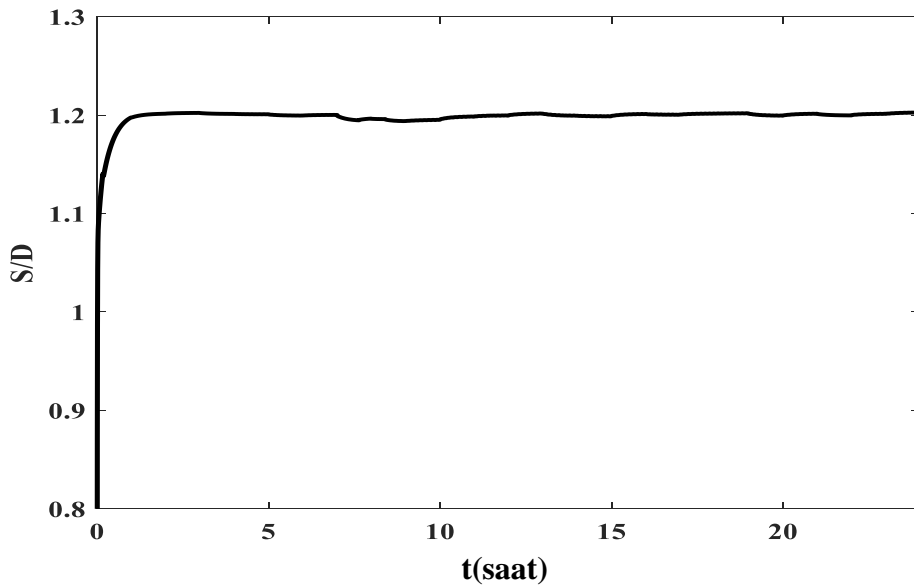
Kontrol Tipi	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
PI	0.6966	0.2208	–	3.0287	–
PD	1.238	–	0.0345	–	0.0427
PID	0.9288	–	–	6.73	0.032

Hidrolik kaynaklar ve güneş santraline verilen 0.1 saatlik gecikmenin belirtildiği şekiller sırasıyla verilmiştir. Güneş santralinden kaynaklanan üretim güneşin varlığıyla başlatıldığı için 0.1 saatlik gecikme güneş santrali için büyük bir etki oluşturmamıştır bu yüzden gösterilmemiştir. Şekil 4.26'te hidrolik kaynaklar için verilen gecikmenin net görülebilmesi için üretimin ilk 5 saati gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi üretim ilk 0.1 saatlik zaman dilimiyle ötelenmiş olup 0.1 saat sonra başlamaktadır.



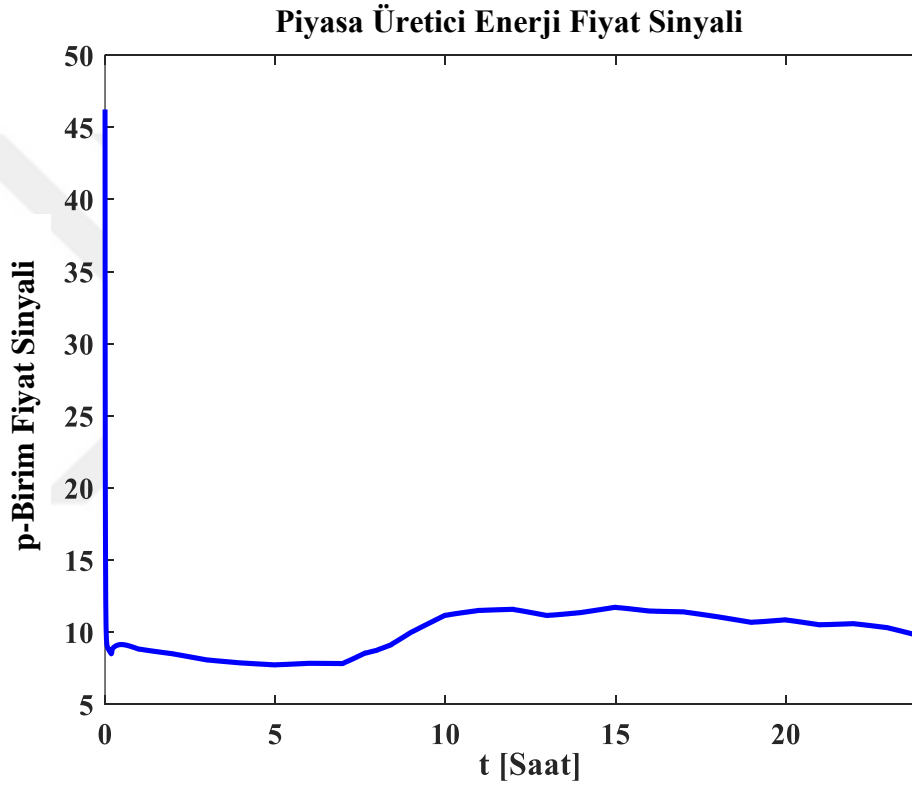
Şekil 4.26: Hidroelektrik santral 0.1 saat gecikmeli üretim.

Şekil 4.27 talebin karşılanma durumunu göstermekte olup enerji yetersizliği durumu PID ve PI kontrolörler ile yaşanmamıştır.



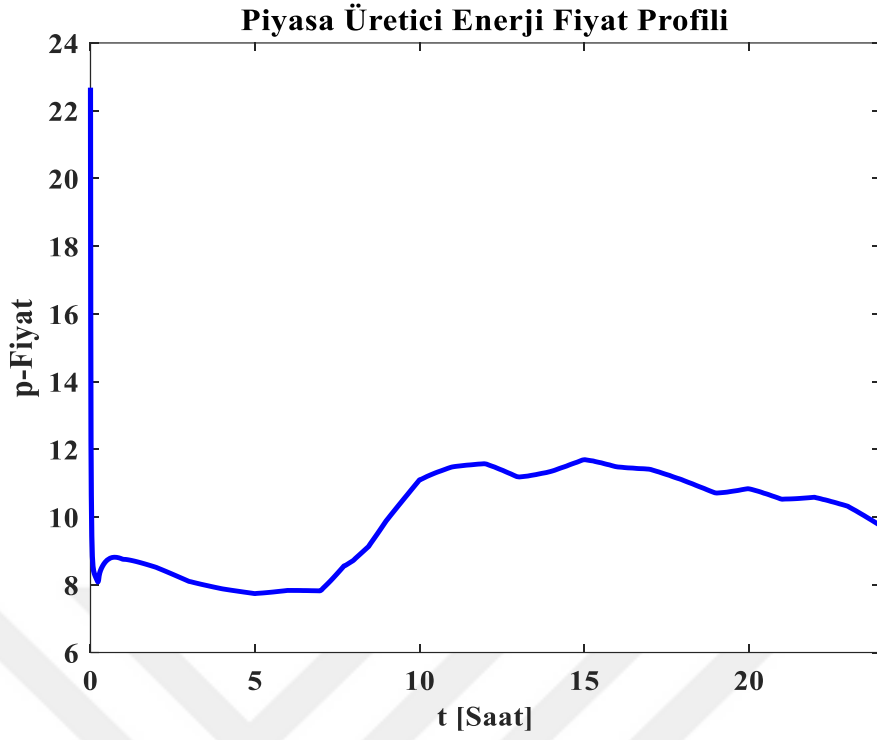
Şekil 4.27: Hidrolik sistem için talebin karşılanma oranı.

Şekil 4.28 ile belirtilen grafik güneş ve hidroelektrik santralleri için PID kontrolör kullanıldığı durumda sağlanan fiyat eğrisini göstermektedir. Termik santrale verilen gecikme doğrultusunda elde edilen fiyat sinyaline göre dalgalı eğri elde edilmektedir. Sistemin tam enerji denge hata fonksiyonunu sağlamak adına işlem yapmadığı pik değerinin 45 civarı olmasından görülmektedir. Bu sistemlerdeki gecikme sisteme olumsuz olarak yansımaktadır. Sistemde fiyat eğrisinin geçici hal cevabı ile gösterilmesinin sebebi sistemin Şekil 4.27’de enerji yetersizliği yaşamamasına rağmen $S_d(p)$ enerji satış eğilimini yüksek tutmayışını göstermektedir.

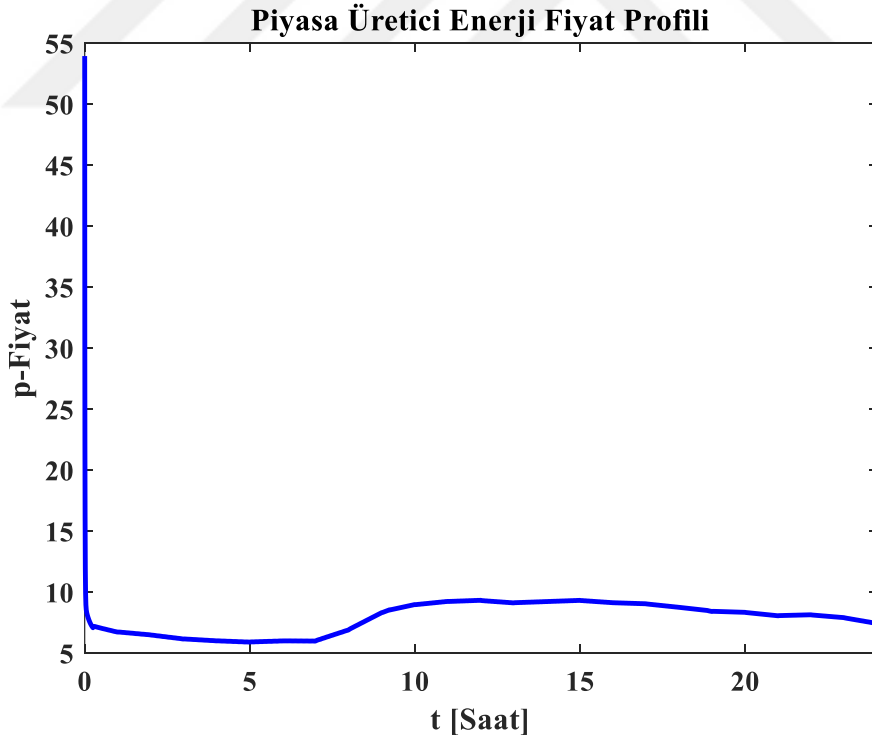


Şekil 4.28: 2. transfer fonksiyonu PID kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.

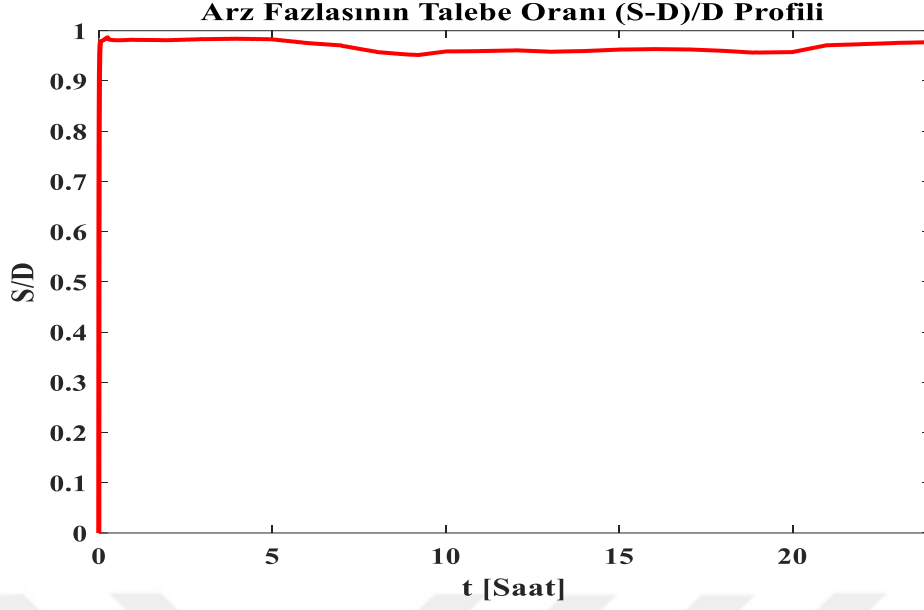
Şekil 4.29 hidrolik ve güneş santrallerine verilen gecikme sonucu PI kontrolör kullanılarak elde edilen enerji fiyat sinyalini göstermektedir. Arz talebi karşılamıştır fakat kontrolör fiyat istikrarını tam olarak sağlamamaktadır. Şekil 4.30 ise PD kontrolör kullanılarak gerçekleştirilen fiyat sinyalini göstermektedir. Fiyat sinyalinin enerji istikrarını sağlayamadığı ve enerji yetersizliği durumu oluşturduğu Şekil 4.31 ile görülmektedir. $S/D < 1$ durumunun elde edilmesi verilen değerlerin sistemde kararsızlık oluşturduğu, bu bulunan değerlerin doğruluğunu göstermektedir. Sistem değerleri daha sonrasında yapılan PSO algoritmasının kullanıldığı optimizasyon ile düzeltilmiştir sistem için gerekli olan genel parametreler bulunmuştur.



Şekil 4.29: 2. transfer fonksiyonu PI kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.

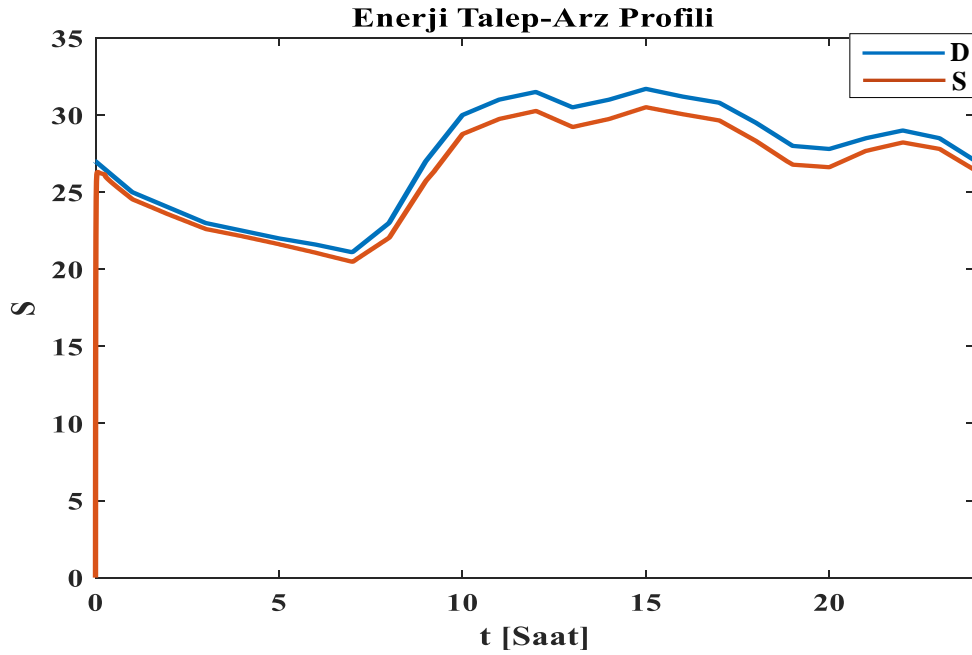


Şekil 4.30: 2. transfer fonksiyonu PD kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.



Şekil 4.31: Hidrolik ve güneş sisteminde PD kontrolör ile talebin karşılanmama grafiği.

Şekil 4.31 PD kontrolörün gecikme olması durumunda diğer kaynak üretimlerini etkileyerek yeterli üretimin olmaması durumuna sebep olduğu göstermektedir. Bu durumda talep miktarı arz miktarının üstüne çıkmaktadır. Bu durumu önleyebilmek için kontrolörde doğru katsayıların Ziegler-Nichols ile çıkan parametrelere göre optimize edilmesi gerekmektedir. Ziegler-Nichols hesap adımı için bir başlangıç değer vermekte olup bu değerlerin güncellenmesi gerekmektedir. Şekil 4.32 PD kontrolörün kullanılması durumunda gerçekleşen üretim yetersizliğini talep eğrisiyle birlikte göstermektedir.



Şekil 4.32: PD kontrolör kullanılması durumunda oluşan enerji yetersizliği grafiği.

4.2.3 Rüzgar sistemine verilen gecikme ile kontrolör parametrelerinin hesaplanması

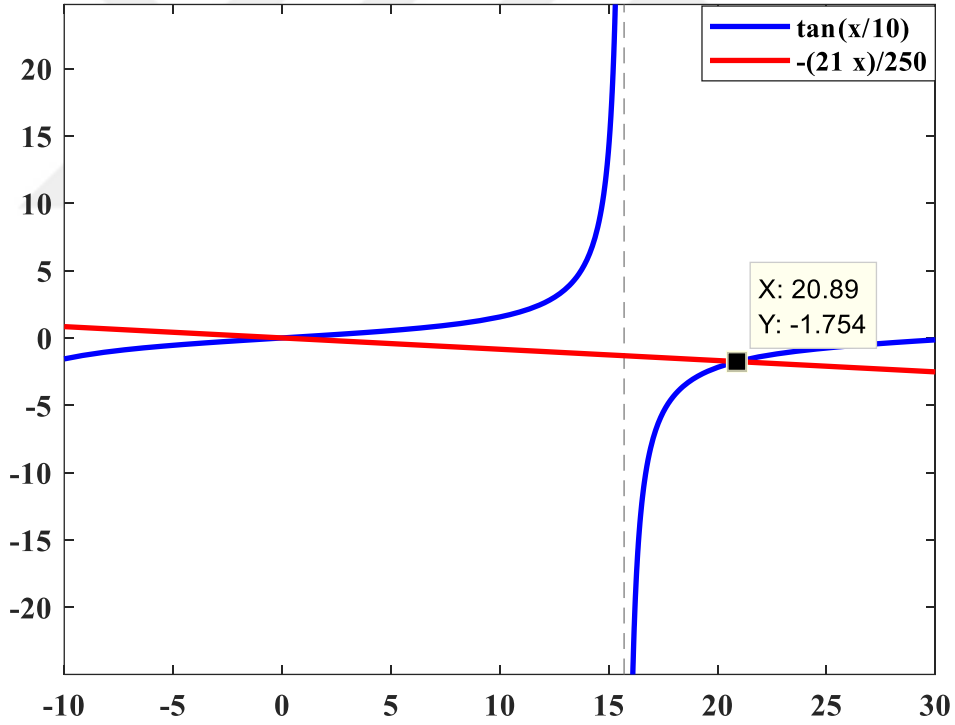
Termik ve Güneş ile Hidrolik santraller bölümünde detaylı olarak anlatılan hesap kısmı bu kısımda sadece simülasyon üzerinden yapılacaktır. Bu santral için 0.1 saatlik gecikme ile sağlanan transfer fonksiyonu denklem (4.56) ile verildiği gibidir.

$$T(s) = \frac{1}{0.084 \cdot s + 1} \cdot e^{-0.1s} \quad (4.56)$$

ω frekansı için işlem adımları yapılmış ve frekans değerinin bulunması için gelinen en son aşamadaki denklem (4.57) ile verilmektedir.

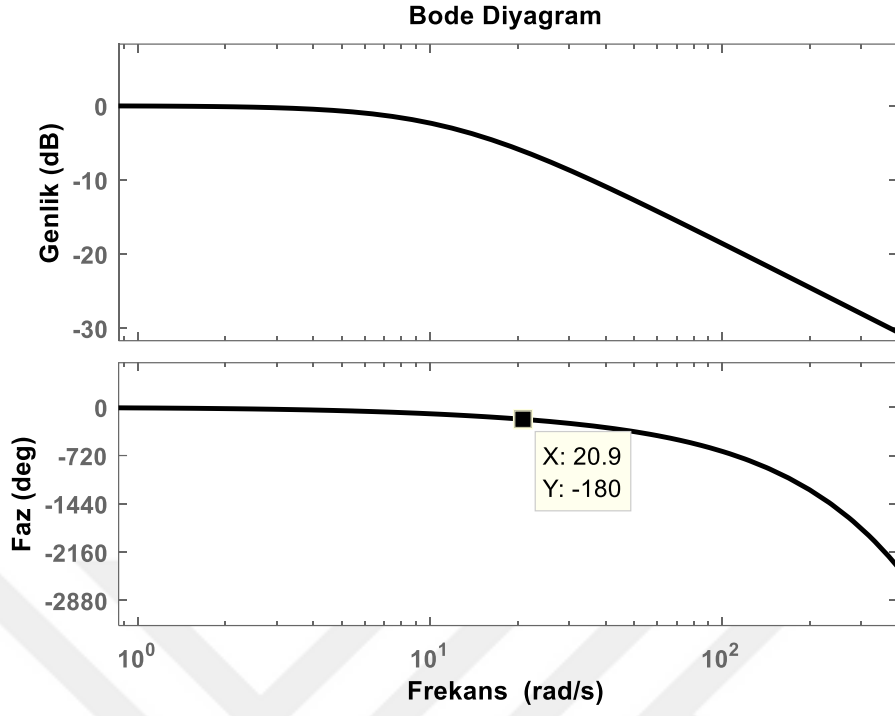
$$\tan\left(\frac{\omega}{10}\right) = -0.084\omega \quad (4.57)$$

Bu denklemin eşitliğini sağlayan ω değeri Matlab programı aracılığıyla Şekil 4.33'de verildiği gibi 20.89 *rad/saat* olmaktadır.

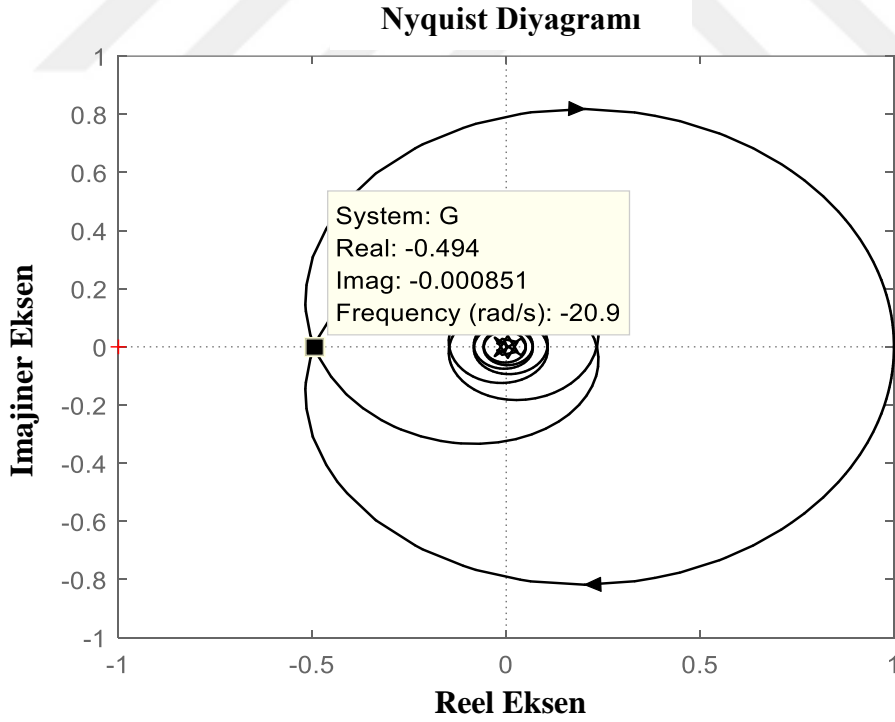


Şekil 4.33: Rüzgar santral için kritik frekans değerinin matlab çözümü.

ω değeri için ayrıca bode ve nyquist eğrileri sırasıyla Şekil 4.34 ve 4.35'te verilmiştir. Her iki şekilde de bulunan ω frekans değeri 20.9 *rad/saat* olup hesaplanan değer ile aynıdır.



Şekil 4.34: Rüzgar santrallerinin transfer fonksiyonuna ait bode diyagramı.



Şekil 4.35: Rüzgar santrallerinin transfer fonksiyonuna ait nyquist diyagramı.

Sistemin salınım periyodu ve kritik kazanç değeri tekrardan hesaplanırsa sırasıyla aşağıdaki işlem adımları yapılmalıdır. Denklem (4.58)-(4.62) arasında yapılan işlemler doğrultusunda 3. transfer fonksiyonu olan rüzgar santrallerinin reel kazanç değeri -0.495 olarak çıkmıştır ve bu değer doğru hesaplandığı Şekil 4.35'te görülmektedir.

$$T(j\omega) = \frac{\cos(0.1\omega) - j \sin(0.1\omega)}{0.084j\omega + 1} \quad (4.58)$$

$$T(j\omega) = \frac{-0.084j\omega \cdot \cos(0.1\omega) - 0.084\omega \cdot \sin(0.1\omega) + \cos(0.1\omega) - j \sin(0.1\omega)}{0.084^2 \cdot \omega^2 + 1} \quad (4.59)$$

$$Re(T(j\omega))_{|\omega=20.89} = \frac{\cos(0.1\omega) - 0.084\omega \cdot \sin(0.1\omega)}{0.084^2 \cdot \omega^2 + 1} \cong -0.495 \quad (4.60)$$

$$K_C = \frac{1}{|Re(T(j\omega))|} = \frac{1}{0.495} = 2.019 \quad (4.61)$$

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = 0.3 \text{ saat} \quad (4.62)$$

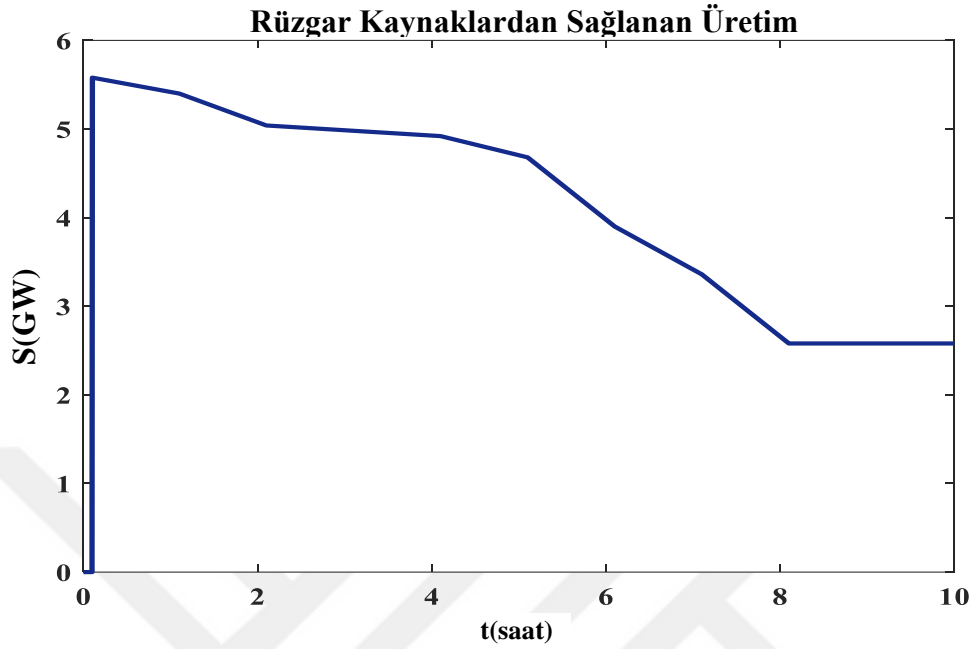
Böylece Ziegler-Nichols kontrolör parametre hesabı için gerekli olan kritik kazanç değeri $K_C = 2.019$ ve salınım periyodunun değeri ise $P_{cr} = 0.3 \text{ saat}$ 'dir.

Bu önemli iki parametreye bağlı oluşturulan kontrolör parametreleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.10: Rüzgar santrali transfer fonksiyonuna ait Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan kontrolör değerleri.

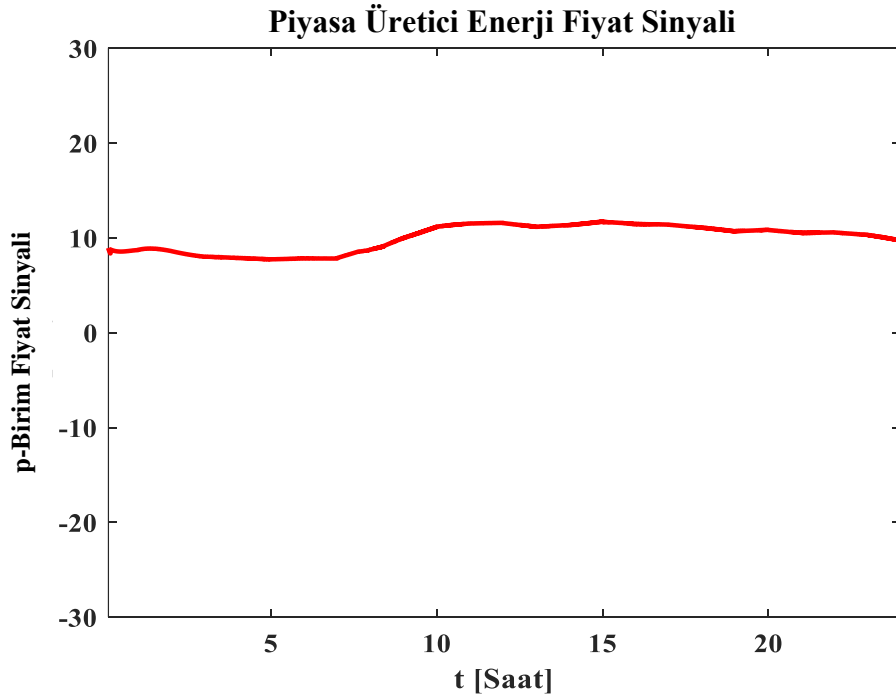
Kontrol Tipi	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
PI	0.909	0.24	—	3.636	—
PD	1.616	—	0.0375	—	0.0606
PID	1.212			8.063	0.045

Rüzgar santrali için olağan durumlara karşılık 0.1 saatlik verilen gecikme Şekil 4.36'da verilmiştir. Gecikmenin tam olarak görülebilmesi için rüzgar üretimin ilk 5 saati çizdirilmiştir.



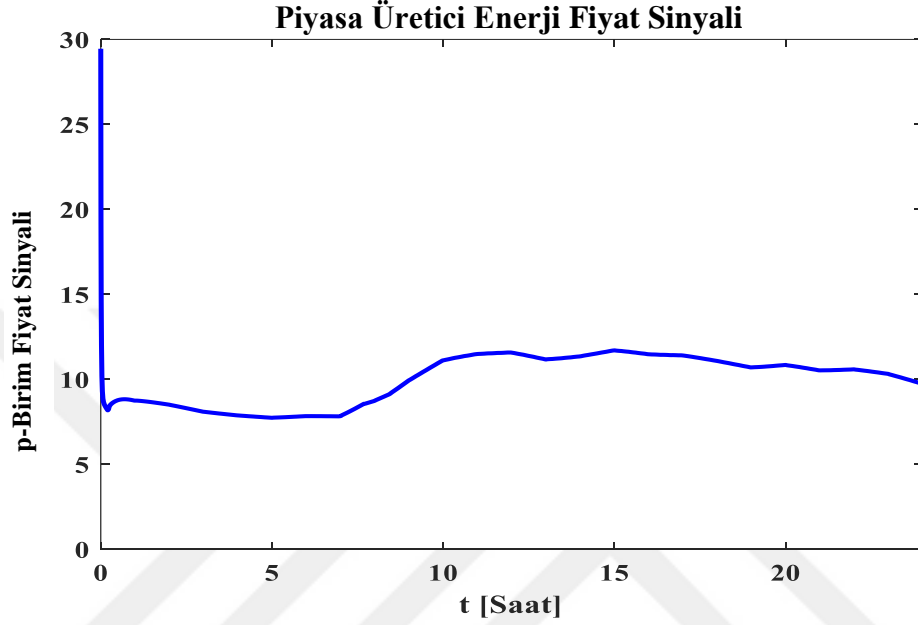
Şekil 4.36: Rüzgar santrali 0.1 saat gecikmeli üretim.

Şekil 4.37'de rüzgar santral için oluşturulan 0.1 saatlik gecikme ile hesaplanan PID kontrolör parametreleriyle elde edilen fiyat sinyal eğrisi görülmektedir.



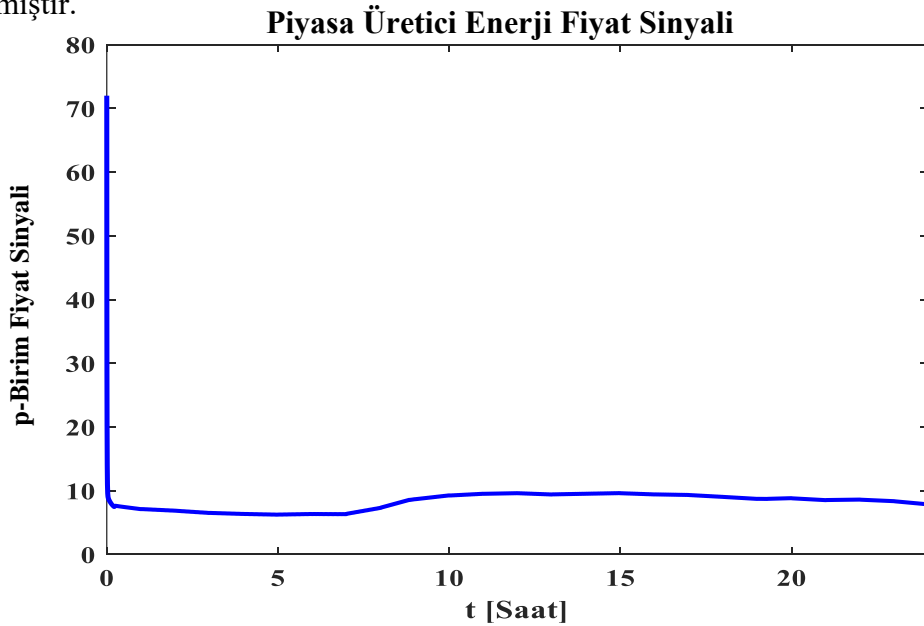
Şekil 4.37: 3. transfer fonksiyonu PID kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.

Şekil 4.38 rüzgar santrallerine verilen gecikme sonucu PI kontrolör kullanılarak elde edilen enerji fiyat sinyalini göstermektedir. 2. transfer fonksiyonuna göre sonuçlar daha istikrarlı çıkmasına rağmen 1. transfer fonksiyonuna göre daha düşük kararlılık görülmektedir. Bunun sebebi ise ilk transfer fonksiyonunda verilen zaman sabitinin diğer transfer fonksiyonlara göre daha büyük olmasıdır.



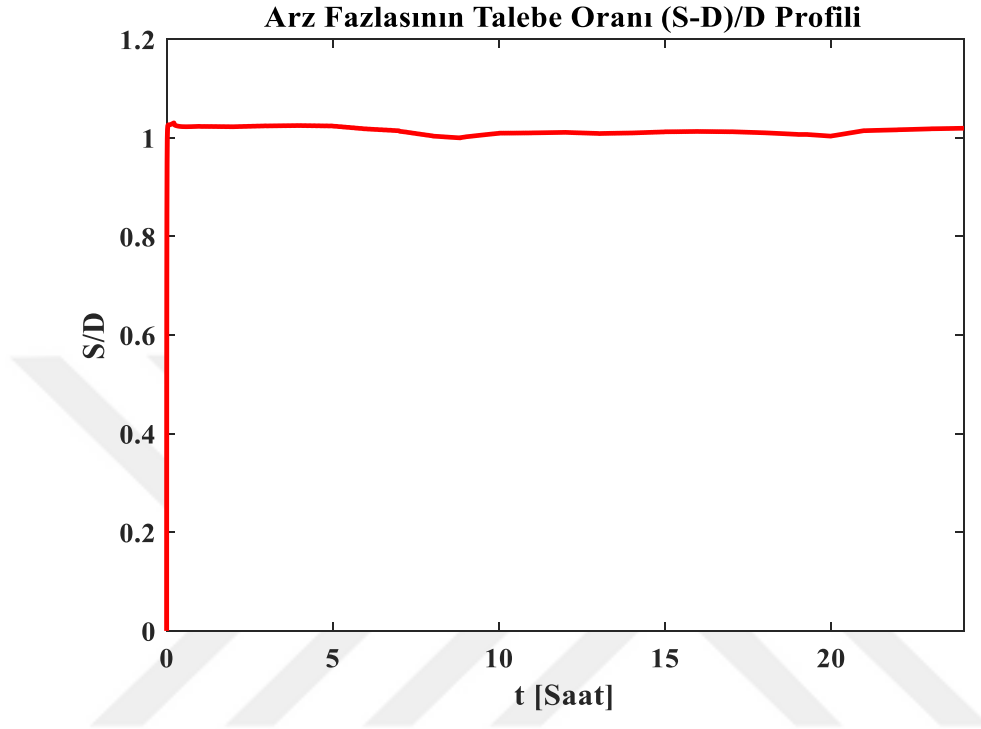
Şekil 4.38: 3. transfer fonksiyonu PI kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.

Şekil 4.37'de verilen sinyal ise PD kontrolör kullanılarak elde edilen enerji fiyat sinyalidir. Enerji istikrarı sağlanmıştır ve enerji talebinde oluşan değişikliklere rağmen kararlılık sağlanmıştır.



Şekil 4.39: 3. transfer fonksiyonu PD kontrolör ile elde edilen dinamik enerji fiyat sinyali.

Şekil 4.40 arz/talep oranını göstermektedir. Görüldüğü üzere bu oran 1 etrafında oluşmuştur ve dolayısıyla talepteki değişiklik üretim kaynakları tarafından sağlanmıştır. 3 transfer fonksiyonu arasında elde edilen sonuçlara bakılacak olursa termik santrali diğerlerine oranla daha yüksek gecikmeye sahip olduğu için en iyi sonucu vermektedir.



Şekil 4.40: Rüzgar santrali için talebin karşılanma oranı.

4.3 PSO Algoritması ile Elde Edilen Enerji Fiyat Sinyalleri

PSO ve diğer kullanılan optimizasyon algoritmaları ile kontrolü sağlanmak istenilen sistemde K_p, K_i, K_d değerlerinin sisteme en uygun olacak değerleri belirlenir. Bu işlemler için amaç fonksiyonunun doğru seçilmesi gerekmektedir. Sistemde hesaplanan parametreler ile optimizasyon kullanılarak elde edilen değerlerin doğru olarak karşılaştırılması için literatürde bulunan amaç fonksiyonları (mutlak hata toplamı, zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı, zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı ve hata karelerinin toplamı) arasından uygun olan seçilmelidir (Lu vd., 2015; S. Zhang vd., 2017). Bu tez çalışmasında amaç fonksiyonu, e kontrol hata sinyalinin sıfır noktasında fiyat sinyalinde en uygun sonucu vermesi amacıyla mutlak hataların karelerinin toplamı kullanılarak hata minimize edilmiştir. Kontrolör parametreleri için alt ve üst sınır limitleri [0.1,100] arasında alınmıştır. Program akış diyagramını oluşturmak için aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulanmalıdır (Şeker, 2022):

1. Her parçacık için başlangıç hızı ve popülasyon konumu sırasıyla verilen denklemler aracılığıyla rastgele oluşturulur.

$$X_j(0) = [X_{j,1}(0), \dots, X_{j,m}(0)], \quad [X_k^{min}, X_k^{maks}] \quad (4.63)$$

$$V_j(0) = [V_{j,1}(0), \dots, V_{j,m}(0)], \quad [-V_k^{min}, V_k^{maks}] \quad (4.64)$$

Bu adım ile birlikte rastgele yeni bir hız ilişkisi denklem (4.65) ile verilen eşitliğe bağlı oluşturulur. Bu eşitlikte " n " popülasyon sayısını, " V_k^{maks} " üst sınır hız değerini, X_k^{maks} ve X_k^{min} ise konum vektörünün alt ve üst sınırlarını tanımlamak için kullanılmaktadır.

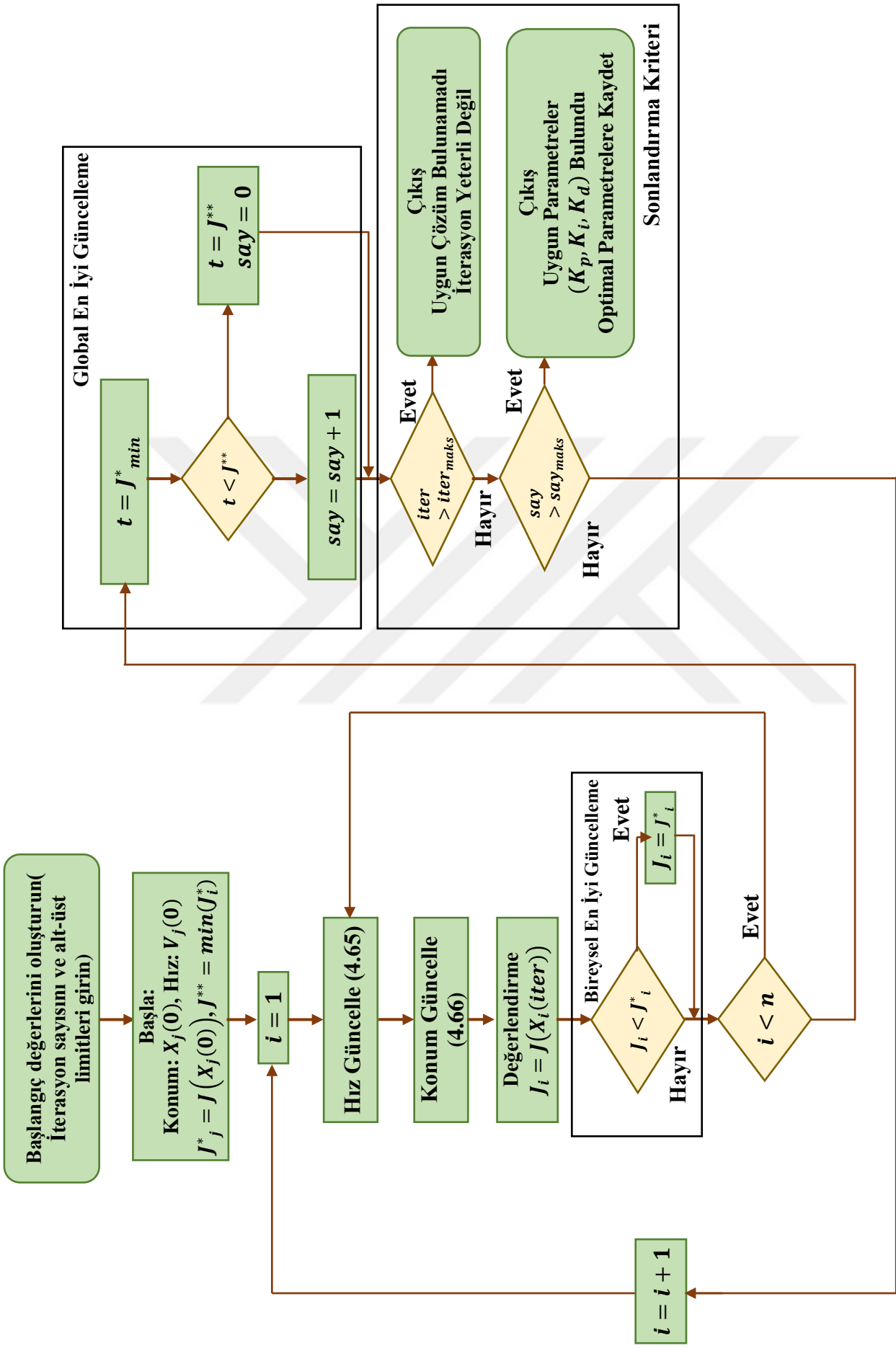
$$V_k^{maks} = \frac{X_k^{maks} - X_k^{min}}{n} \quad (4.65)$$

2. Hız değerinin güncellenmesine bağlı olarak her parçacığın konumu denklem (4.66) ile, hız değerinin yer değiştirmeye eklenmesi ile bulunmaktadır.

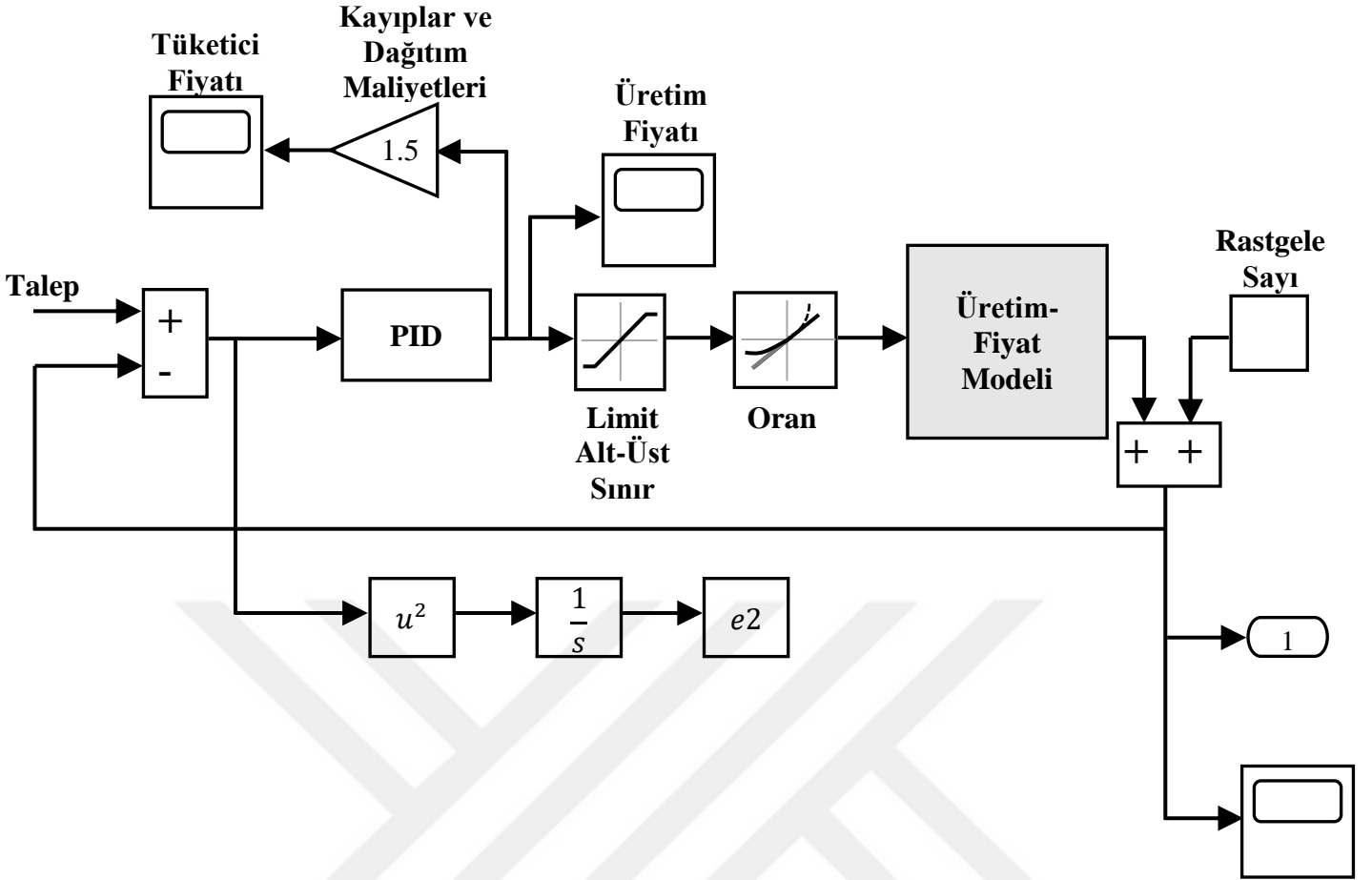
$$X_{j,k}(t) = V_{j,k}(t) + X_{j,k}(t - 1) \quad (4.66)$$

3. Bu adım ile her parçacık güncellenen konumuna göre verilen şarta uygun olmak durumuyla değerlendirilir. Parantez içinde verilen ifadeye göre $J_i = J^*_j$ durumunu ifade etmektedir ($J_i < J^*_j$ ise en iyi bireysel güncelleme $X^*_j(t) = X_j(t)$ ve $J^{**} = J_{min}$ olmaktadır ' J^*_j ' ifadesi bir sonraki hesaplamada bulunan konumu, ' J_i ' mevcut durumda bulunan iterasyon değerini bir önceki ile karşılaştırmadır, ' J_{min} ' minimum konum koşulunu ifade etmektedir.)
4. Bu adım ile en iyi global güncelleme adımı yapılırken J_{min} ile J^*_j arasında minimum değer aranır ve $J_{min} < J^{**}$ ise en iyi bireysel güncelleme $X^{**} = X_{min}(t)$ ve $J^{**} = J_{min}$ olur.
5. İterasyon sayısı maksimum sayıya ulaştığında veya iterasyon sayısı hata değerinden küçük veya eşit olma durumunda algoritma sonlandırılmaktadır.

Verilen adımlar için oluşturulan PSO akış diyagramı şeması Şekil 4.41'de verildiği gibi olmaktadır (Şeker, 2022) ve simülasyon modelinin temsili çizimi ise Şekil 4.42'de verildiği gibidir.



Şekil 4.41: PSO akış diyagramı.



Şekil 4.42: PSO fiyat analizi matlab/simulink modeli.

PSO simülasyonunda gerekli olan ve kullanılan simülasyon parametreleri Çizelge 4.10 ile verildiği gibi olmaktadır.

Çizelge 4.11: PSO algoritması için gerekli parametre değerleri.

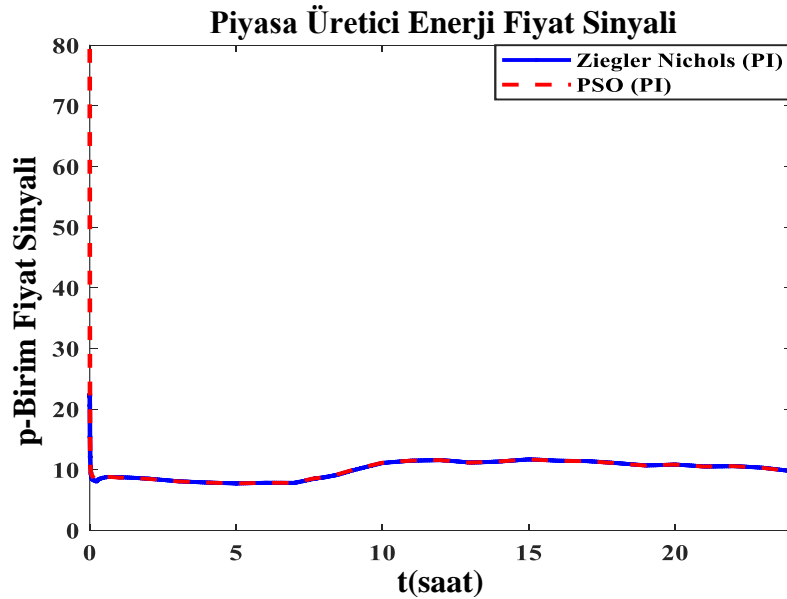
Parametre Adı	Değer
Parçacık Sayısı	50
İterasyon Sayısı	50
Atalet Ağırlığı Değeri (w)	0.9
Öğrenme Faktörü Değeri (c_1, c_2)	2.05

PSO programı kullanılarak hidrolik sistem için gerçek zamanlı dinamik enerji fiyatı sinyali elde etmek için gerekli olan kontrolör parametreleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.12: PSO ile elde edilen sistem kontrolör parametreleri.

Kontrol Tipi	K_p	K_i	K_d
PI	2.4499	5.5718	–
PD	2,973	–	0.258
PID	1.1420	9.8643	0.2666

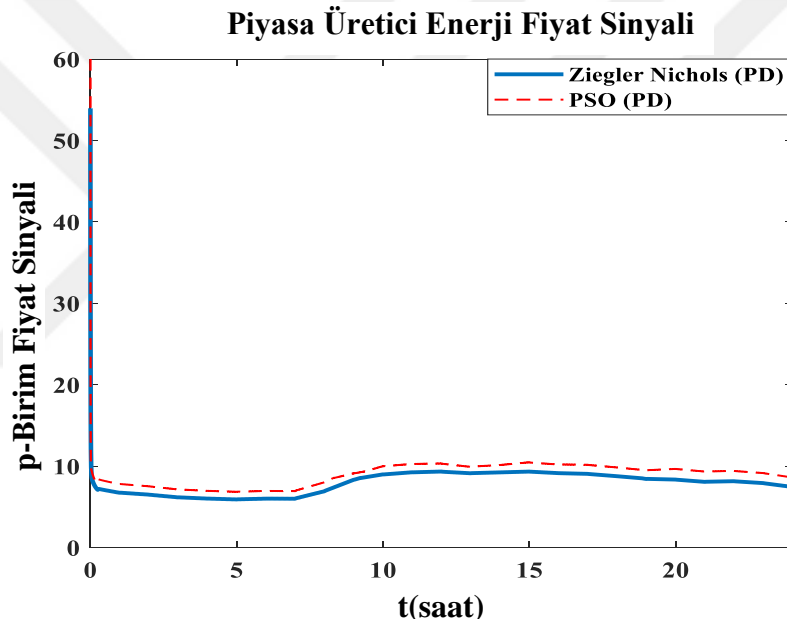
Sistem için bulunan parametre değerleri sistemi kararsızlığa düşürmemekle birlikte diğer yöntemler ile hesaplanan değerler ile yakın sonuç vermiştir. Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlardan güneş ve hidrolik sistemlere ait olan PD kontrolör kullanılarak elde edilen dinamik enerji fiyatı sinyalinde arz talepten büyük değerde olduğu için enerji yetersizliği durumu oluşmuştu (Şekil 4.31). Bu durumun bir çözümü olarak bulunan parametre değerlerinde bu durum önlenmiş ve başlangıç parametrelerini elde etmemize yarayan Ziegler-Nichols’da oluşan yetersizlik çözülmüştür. Bu sebeple elde edilen PSO parametreleri 2. transfer fonksiyonu değerleri ile elde edilen sonuçlarla üst üste çizdirilerek aşağıda sırasıyla verilen grafikler elde edilmiştir.



Şekil 4.43: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı fiyat eğrisi (PI kontrolör).

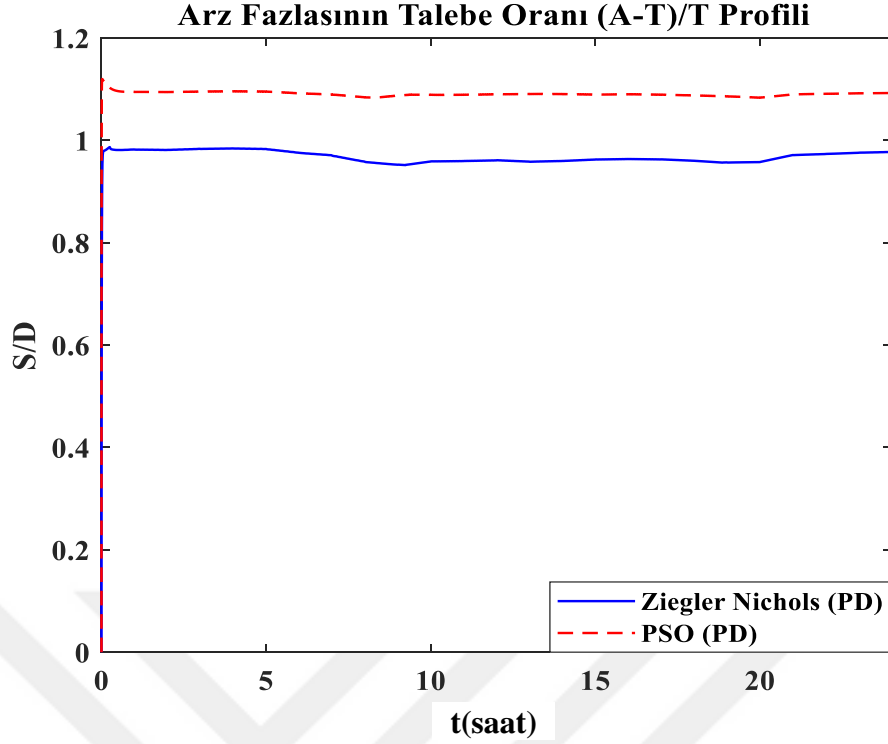
Şekil 4.43 incelenirse 2. transfer fonksiyonu için Ziegler-Nichols frekans yanıtı yöntemiyle elde edilen gerçek zamanlı dinamik enerji fiyatı sinyali ile PSO yöntemi kullanılarak elde edilen sonucun kararlı kısmının üst üste geldiği görülmektedir. Bunun sebebi e denge hata fonksiyonu sinyalinin 0'a yaklaşırken kararsızlığa düşmemesidir. Şekil 4.43'te oluşan tek fark $S_d(p)$ enerji satış eğilimi ile oluşmaktadır. $S_d(p)$ enerji denge noktasına ulaşıncaya kadar ($e = 0$) farklı açılış değeri verebilmektedir. Bu durum geçici hal ile ilgili olup göz ardı edilirse iki sinyalin aynı olduğu görülmekte ve PSO sonuçlarının sisteme uyum sağladığı ispatlanmaktadır.

Şekil 4.44 ise 2. transfer fonksiyonuna ait Ziegler-Nichols ve PSO sonuçlarının PD kontrolör kullanılarak elde edilen sonuçlarının karşılaştırmalı fiyat sinyallerini göstermektedir.



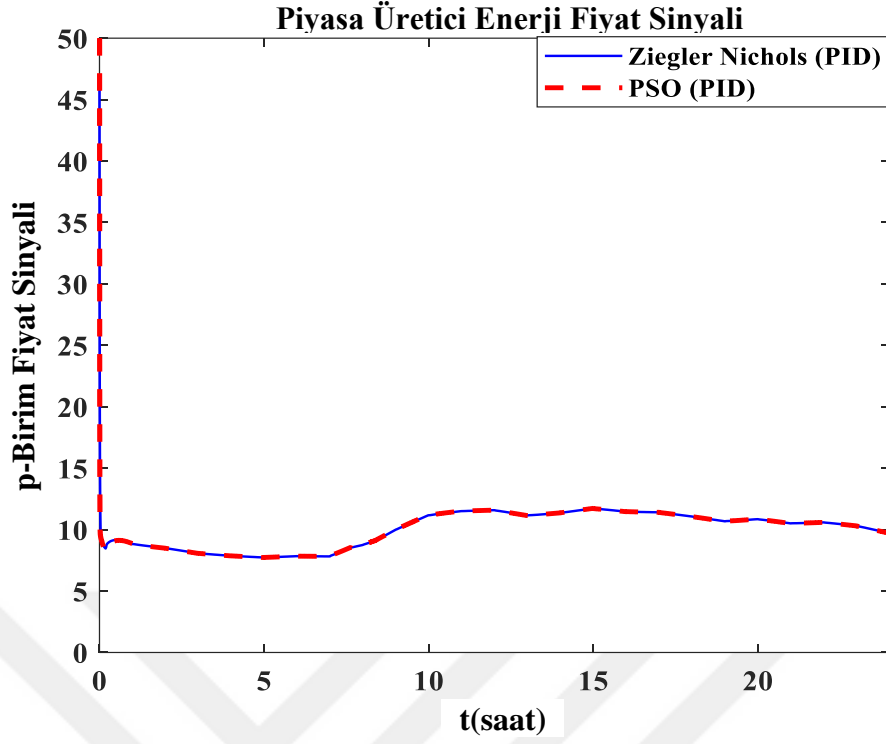
Şekil 4.44: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı fiyat eğrisi (PD kontrolör).

Şekil 4.44 incelendiğinde sonuçların birbirinden farklı çıktığı görülmektedir. PD kontrolör kullanılarak gerçekleştirilen Ziegler-Nichols sonucu incelenirse (Şekil 4.31) talep arzı karşılayamadığı için enerji yetersizliği denilen durum oluşmaktaydı. Şekil 4.44 ile bu durumun çözüme ulaşılma hali anlaşılamadığı için talebin karşılanma eğrisinin çizdirilmesi gerekmektedir. Şekil 4.45 ile PD kontrolör kullanılarak Ziegler Nichols ve PSO sonuçlarında talebin karşılanma durumu karşılaştırmalı olarak çizdirilmiştir.

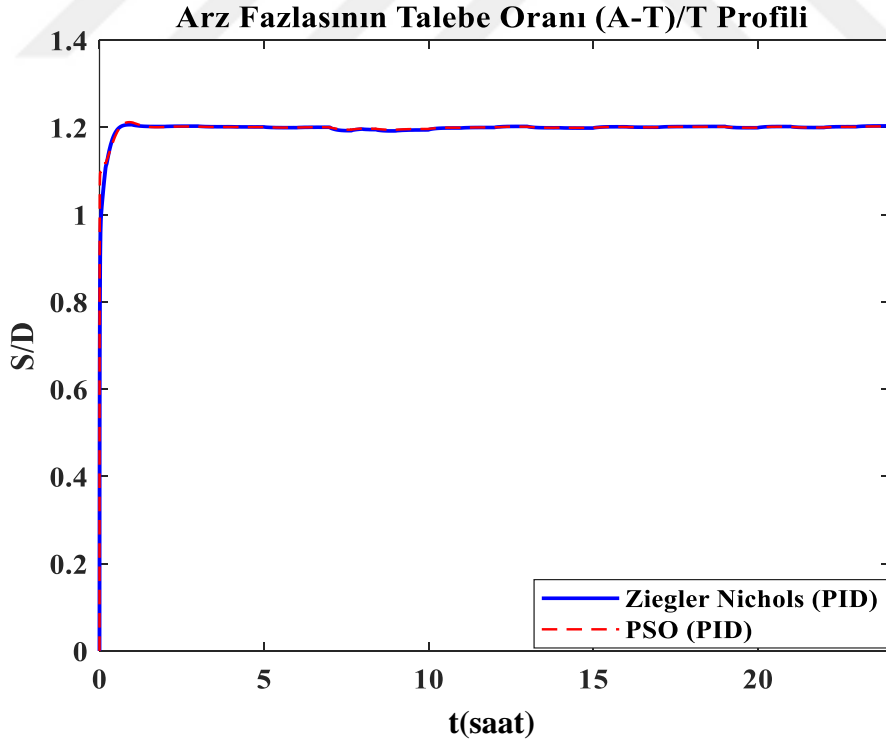


Şekil 4.45: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı talebin karşılanma oranı (PD kontrolör).

Şekil 4.45 ile PD kontrolde oluşan enerji yetersizliğinin önlendiği ve elde edilen PSO kontrolör parametrelerinin daha doğru sonuç verdiği görülmektedir. Böylece 2. transfer fonksiyonunda oluşan sıkıntının önüne geçilmiştir. Başlangıç olarak bulunan Ziegler-Nichols parametre değerleri sistemi kararsızlıktan kurtarmak adına PSO algoritması ile düzeltilmiştir. Son olarak PSO algoritması kullanılarak elde edilen PID kontrolörlü sistem için elde edilen fiyat eğrisi ile Ziegler Nichols yöntemi ile elde edilen (2. transfer fonksiyonu için) sonuçlar Şekil 4.46 ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre iki eğri üst üste çıkmıştır. Sistem kararsızlığa düşmediği sürece satış eğiliminde farklılık göstereceği için grafikler doğru çıkmıştır. Sistemde PSO sonuçlarında satış eğilimi daha düşük olduğu için grafik y eksenini için 0-50 değerleri arasında yaklaştırılmıştır. Şekil 4.47’de sistemin kararsızlığa düşmediği ve talebi karşılama oranlarının aynı olduğu görülmektedir. Böylece bu sistem enerji yetersizliği durumuna hesaplanan ve bulunan PID parametre değerleriyle düşmemektedir.



Şekil 4.46: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı fiyat eğrisi (PID kontrolör).



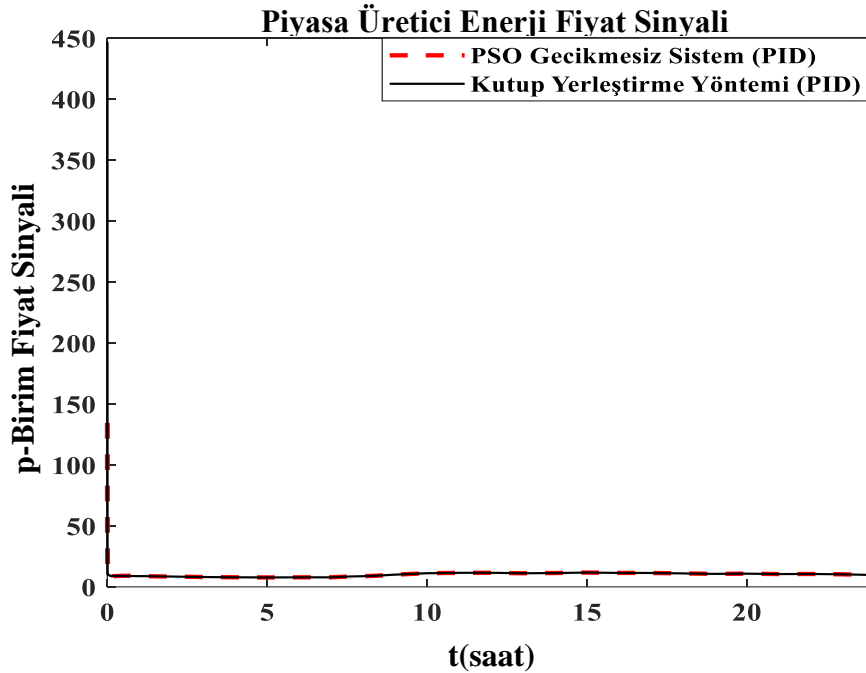
Şekil 4.47: 2. transfer fonksiyonu ve PSO karşılaştırmalı talebin karşılanma oranı (PID kontrolör).

Sistemde Ziegler-Nichols için diğer üretim modelleri kullanılarak elde edilen fiyat sinyallerinde herhangi bir enerji yetersizliği oluşmadığından dolayı sadece güneş ve hidrolik üretim modellerinde PSO sonuçları incelenmiştir. Gecikme verilmeden sistem parametreleri kutup yerleştirme yöntemiyle hesaplanmıştır. PSO algoritması kullanılarak elde edilen sistemin genel parametre değerleri Çizelge 4.12 ile verildiği gibidir.

Çizelge 4.12: PSO ile elde edilen gecikmesiz sistem PID kontrolör parametre değerleri.

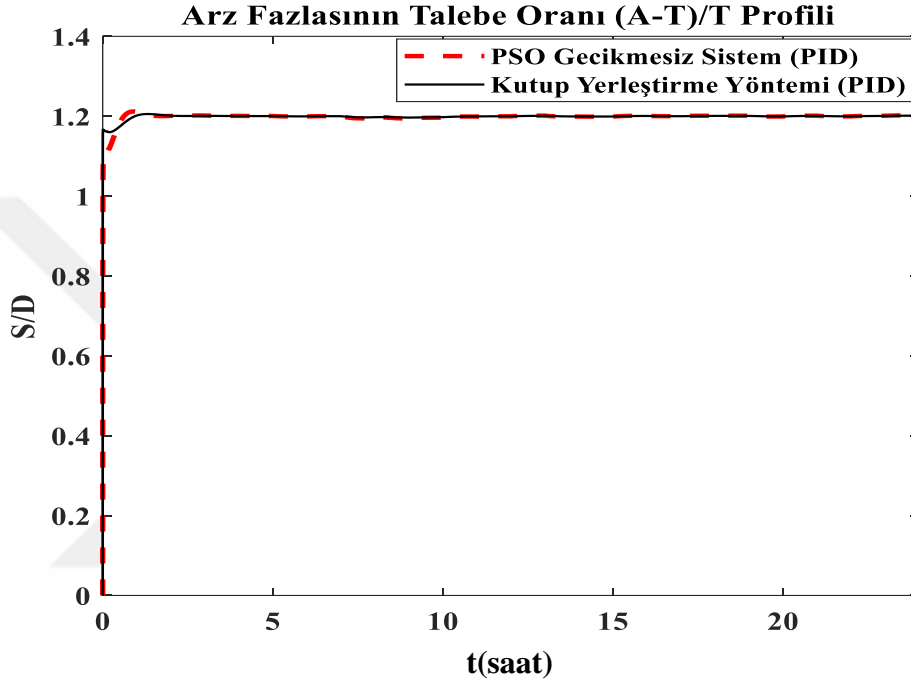
Kontrol Tipi	K_p	K_i	K_d
PID	1.35	10.44	0.28

Sisteme gecikme verilmediği durumda elde edilen Çizelge 4.12'deki PID kontrolör parametreleri ile kutup yerleştirme yöntemi ile hesaplanan değerlerin karşılaştırmalı birim fiyat sinyali eğrisi Şekil 4.48'de verildiği gibidir. Doğal frekans değerinin değişimi ve sönüm oranının değişimleri ile elde edilen parametre değerlerinin en iyi çalışma noktası ortak olarak $\omega_n = 4 \text{ rad/s}$ ve $\zeta = 0.6$ değerleri olup bu noktada elde edilen kontrolör parametreleri; $K_p = 3.8$, $K_i = 16$ ve $K_d = 0.69$ olarak bulunmuştu. Enerji yetersizliği durumu oluşmamış ve her iki değer için sistem kararlı çalışmaktadır.



Şekil 4.48: Kutup yerleştirme yöntemi ve PSO değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.48’de görüldüğü üzere sistem geçici bölgede e denge hata fonksiyonu sinyalini 0 değerine yakınlıştırmaya çalışırken satış eğilimlerinde farklı değerler almıştır. Bu sınırlar göz ardı edilediğinden sistem kararlı bölgede çalışırken PSO ve kutup yerleştirme ile bulunan değerlerde fiyat sinyalleri en uygun şekilde alınmıştır. Her iki durumda da enerji yetersizliği durumu oluşmamıştır. Enerji üreticilerinin talepteki değişikliklere anında yanıt vermesi Şekil 4.49 ile anlaşılmaktadır. Şekle göre $S/D \geq 1$ oranı sağlanmış ve sistemde kararsızlık oluşmamıştır.



Şekil 4.49: Gecikmesiz sistemde talebin karşılanma oranının PSO ile karşılaştırılması.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikle, tüketicilerin enerji taleplerine karşılık üretimin dengelenmesi amacıyla akıllı şebeke enerji piyasasında kapalı döngü ile kontrolör sistemleri tasarlanıp dinamik enerji fiyatlandırma yapılmıştır. Bu amaçla ilk olarak tasarlanan sistem için uygun transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Kapasitif elemanların şarj desarj kinetiğine uygun olarak oluşturulan transfer fonksiyonu kullanılarak doğal frekans değerinin değişimine göre kutup yerleştirme yöntemiyle kontrolör parametreleri hesaplanmıştır. Sonrasında kutup yerleştirme yöntemiyle parametre hesabı yapmak için sönüm oranının etkisi incelenmiştir. Kutup yerleştirme yöntemiyle elde edilen parametreler tasarlanan Matlab/Simulink modelinde kullanılarak sistem için gerekli eğriler elde edilerek karşılaştırma yapılmıştır. Sistem için kullanılan talep verileri Türkiye talep eğrisi modeline benzer olarak verilmiş, üretim modeli için kullanılan çoklu kaynaklar için senaryo oluşturulmuştur. Elde edilen üretim (arz) ve talep verilerinin farkından elde edilen kontrolör biriminin girişi olan e denge hata fonksiyonunun sinyalinin asimptotik olarak 0'a yaklaşmasını doğru şekilde sağlayan kontrolör parametreleri (PID), kullanılan sistem için ayrı ayrı her iki kutup yerleştirme yöntemiyle elde edilmiştir. Kullanılan kontrolörler tarafından yayınlanan dinamik enerji fiyatı sinyali ile, çoklu kaynaklardan gelen üretimin değişken olan talebi karşılayabildiği görülmüştür. Böylece eklenen sanal talep yardımıyla da enerji yetersizliği durumu yaşanmamış ve fiyat sinyali en uygun seviyede kontrolör biriminin çıkışından elde edilmiştir. Sonrasından karşılaştırma yapabilmek adına aynı talep verileri ve transfer fonksiyonu kullanılarak Ziegler-Nichols frekans yanıtı yöntemi aracılığıyla 4 üretim modeline ayrı ayrı 0.1 saatlik gecikme verilerek kontrolör parametreleri PI, PD ve PID sistemleri için hesaplanmıştır. Verilen gecikme ile sistem daha gerçekçi duruma gelmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre her sistem için PID kontrolör kullanılarak elde edilen fiyat sinyallerinin, değişen talep koşulları altında anlık olarak düzenlendiği görülmüş ve analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre kontrolör tabanlı dinamik enerji fiyatı düzenlemesinin, değişen anlık talep ve üretim dalgalanmalarını otonom şekilde ayarlayarak enerji istikrarını koruduğu ve enerji arz ve talebini eşitleyerek enerji fiyatını düzenlediği görülmüştür. Birim enerji fiyat sinyalinin düzenlenmesi amacıyla yapılan simülasyon modellerinde sistem geçici dalgalanmalarla başa çıkabilmiştir. Kullanılan kontrolörlerin amacı enerji üretimini değişken talep koşulları altında talebe yakınlaştırarak enerji sinyalinin düzenlenmesini ve istikrarını korumasını sağlamaktır. Bu amaçla kullanılan kontrol parametrelerinin doğruluğunu test etmek amacıyla sistem için PSO algoritması kullanılarak

parametreler en optimal durumda elde edilmiştir. Güneş ve hidrolik sistemlere verilen gecikme sonrasında elde edilen PD kontrolör parametreleri sistemde enerji yetersizliği oluşturmuş bu durum PSO algoritması kullanılarak giderilmiş ve optimizasyon sonuçlarıyla Ziegler Nichols eğrileri karşılaştırmalı olarak çizdirilmiştir. Gerçek zamanlı yapılan, fiyat sinyalinin 24 saatlik olarak çevrimiçi olarak alındığı bu çalışmada kullanılan kontrolörler aracılığıyla anlık ve keskin olarak değişen talep dalgalanmalarına anında cevap verilerek ilerleyen zamanların zeminini oluşturan akıllı şebekeler sayesinde daha güvenilir, daha otonom bir ağ yapısının olabirliği kanıtlanmıştır. Günümüz şartlarında artan enerji fiyatlarının yenilenebilir enerjiye yönelim ile daha da düşürülüp, uygun seviyelerde doğru tasarım ile sağlanacağı görülmüştür. Dinamik enerji fiyat sinyallerinin doğru şekilde elde edilmesi ve sistemin doğru çalışmasıyla e denge hata fonksiyonu sinyalinin kontrolü ile enerjide verim sağlanmış, tüketicilerin enerjiyi doğru kullanmasının TTY teknikleri ile düzenlenebildiği elde edilen simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. Böylelikle TY kategorilerinin kullanılması ile enerji fiyatının kontrol altına alınabileceği görülmüştür. Geleceğe yönelik olarak bu tez çalışma alanı aşağıda sıralanan öneriler ile genişletilebilir;

- Kullanıcılara bu alanda gerekli eğitimler verilerek dinamik yapıda olan tarifeleri hayatlarına geçirmeleri için mikro ölçekli çalışma yapılabilir,
- Talep-fiyat arasındaki ilişki küçük ölçekli alanlarda gerçek veriler kullanılarak araştırılmalıdır. Fiyat eğrisini etkileyen tüketici ve üretici kaynaklı problemler belirlenerek simülasyon modeline eklenebilir,
- Enerji depolamanın dinamik fiyat eğrisi üzerindeki etkilerine incelenerek, YEK kullanımı daha üst seviyelere getirilebilir,
- Sistemde en uygun fiyat sinyalleri alınırken e hata fonksiyonu sinyalinin 0'a eşit olması istendiğinden YEK ile sağlanan üretim dalgalanmaları ve talep içerisindeki keskin değişiklikler şebeke kararlılığını etkileyecektir. Bu sebeple fiyat sinyallerinin optimum seviyede olması istenirken şebeke kararlılığının bozulmaması istendiğinden enerji fiyatı ve şebeke kararlılığı birlikte incelenebilir.

KAYNAKÇA

- Ahmed, R., ve Amer, M. (2019).** A Hardware Dynamic Pricing based Energy Management System. *The 4th International Conference on Power Electronics and their Applications, ICPEA*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICPEA1.2019.8911136>
- 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 Wide-area management of smart grid by distributed control and near future projections. *Sakarya üniversitesi fen bilimleri dergisi*, 17(3), 457–470.
- Akyol, S., ve Alataş, B. (2012).** Güncel Sürü Zekâsı Optimizasyon Algoritmaları. *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 36–50.
- Alagöz, B. B. (2015a).** *Değişken üretim ve değişken talep koşullarında akıllı şebekelerde enerji dengeleme.* (Doktora Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Alagöz, B. B. (2015b).** *Değişken Üretim ve Değişken Talep Koşullarında Akıllı Şebekelerde Enerji Dengeleme.* (Doktora Tezi) , İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Alagoz, B. B., ve 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. <https://doi.org/10.1177/0142331215579949>
- 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, Kocaeli*, 535–539.
- Alagoz, B. B., Kaygusuz, A., Akcin, M., ve 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. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.074>
- Ali, A. B. S. M. (2013).** *Smart Grids Opportunities, Developments, and Trends.* Springer-Verlag, London.
- Anand, H., ve Ramasubbu, R. (2018).** A real time pricing strategy for remote micro-grid with economic emission dispatch and stochastic renewable energy sources. *Renewable Energy*, 127, 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.016>
- Anees, A. S. (2012).** Grid Integration of Renewable Energy Sources : Challenges , Issues and Possible Solutions. *5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 1–6.
- Anonim. (2014).** *Akıllı şebeke nedir?* Ekoyapı. <https://www.ekoyapidergisi.org/akilli-sebeke-nedir>
- Anonim. (2015).** *2015 Türkiye geneli elektrik kesintisi.* Wikipedi. https://tr.wikipedia.org/wiki/2015_Türkiye_geneli_elektrik_kesintisi
- Anonim. (2022).** *Elektrik Enerji Tarifeleri 2022.* Encazip. <https://www.encazip.com/elektrik-tarifeleri>
- Apergis, N., ve Payne, J. E. (2009).** Energy consumption and economic growth in Central

- America : Evidence from a panel cointegration and error correction model. *Energy Economics*, 31(2), 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.09.002>
- Arslan, B., ve Ertuğrul, İ.** (2022). Çoklu regresyon, arıma ve yapay sinir ağı yöntemleri ile türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmin ve analizi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 20(1), 331–353. <https://doi.org/10.11611/yead.988146>
- Aström, K. J., ve Hagglund, T.** (1995). *PID controllers: Theory-Design-and Tuning* (Second).
- Atıcı, T.** (2021). *Enerji Depolama Tesisi İçeren Akıllı Şebeke Sisteminde Puant Yük Dengelenmesi İçin Durum İzleme.* (Yüksek Lisans Tezi). Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Avinash, D., ve Vadhera, S.** (2015). Electricity Price Variations in a Power System with Wind Energy Penetration. *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443168>
- Baloğlu, U. Y.** (2017). *Akıllı Şebekelerde Hesapsal Yöntem Uygulamaları.* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Barbaros, E., Aydın, I., ve Celebioglu, K.** (2021). Feasibility of pumped storage hydropower with existing pricing policy in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110449>
- Boom, A., ve Schwenen, S.** (2021). Is real-time pricing smart for consumers ? *Journal of Regulatory Economics*, 60(2), 193–213. <https://doi.org/10.1007/s11149-021-09440-5>
- Boonchuay, K., Optimization, B., ve Peak, C.** (2017). Optimal Critical Peak Pricing Scheme with Consideration of Marginal Generation Cost. *2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 226–229.
- Boztepe, M.** (2019). Enerji sistemlerinde güç elektroniğinin yükselen önemi ve son gelişmeler. 5. *Enerji Verimliliği Günleri*.
- Çakmak, C.** (2011). *Ziegler-Nichols PID Kontrolör Parametrelerinin Bulanık Tabanlı İyileştirme Yöntemi.* (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cecati, C., Citro, C., Piccolo, A., ve Siano, P.** (2011). Smart Operation of Wind Turbines and Diesel Generators According to Economic Criteria. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 58(10), 4514–4525.
- Çetintaş, H., ve Bicil, İ. M.** (2015). Elektrik piyasalarında yeniden yapılanma ve türkiye elektrik piyasasında yapısal dönüşüm. *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 2(2), 1–15.
- Chakraborty, S., Ito, T., ve Senjyu, T.** (2014). Smart pricing scheme: A multi-layered scoring rule application. *Expert Systems With Applications*, 41(8), 3726–3735. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.12.002>
- Cohen, G. H., ve Coon, G. A.** (1952). Theoretical consideration of retarded control. *Transactions of the ASME*, 75, 827–834.
- Cui, Q., Wang, X., Liu, C., ve Hou, F.** (2015). Decision model of critical peak pricing coordinating wind power generation. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 775–779.

- Cunjiang, Y., Huaxun, Z., ve Lei, Z.** (2012). Architecture Design For Smart Grid. *International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems*, 17, 1524–1528. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.276>
- Danxi, L., Bo, Z., Yan, Q., ve Yu-jie, X.** (2017). Optimal Control Model of Electric Vehicle Demand Response Based on Real - time Electricity Price. *EEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 1815–1818.
- Datta, A. R., ve Datta, S.** (2016). Electricity Market Price-spike Classification in the Smart Grid. *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–5.
- Duan, Q.** (2016). A Price-Based Demand Response Scheduling Model in Day-Ahead Electricity Market. *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5.
- Dursun, E., ve Siano, P.** (2019). A dynamic pricing model for Turkey's electricity distribution companies in the future Smart Grid infrastructure. *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference, ASYU*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ASYU48272.2019.8946383>
- Dutta, G., ve Mitra, K.** (2017). A literature review on dynamic pricing of electricity. *Journal of the Operational Research Society*, 68(10), 1131–1145. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0149-4>
- Eberhart, R., ve Kennedy, J.** (1995). A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39–43.
- Eldem, M. O.** (2017). Akıllı şebekeler. *TMMOB Emo Ankara Şubesi Haber Bülteni*, 6–9.
- Emeksiz, C., ve Fındık, M. M.** (2021). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ölçeğinde Değerlendirilmesi. *European Journal of Science and Technology*, 26, 155–164. <https://doi.org/10.31590/ejosat.948729>
- EPDK.** (2013). *Elektrik Piyasası Dengeleme Ve Uzlaştırma Yönetmeliği*.
- EPIAŞ.** (2016). *Gün içi piyasası kullanım klavuzu*.
- Erol-Kantarci, M., ve Mouftah, H. T.** (2011). Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid. *Ad Hoc Networks*, 9(4), 542–551. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2010.08.005>
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., ve Yang, D.** (2012). Smart Grid – The New and Improved Power Grid : A Survey. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 14(4), 944–980.
- Farhangi, H.** (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18–28. <https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876>
- Gellings, C. W.** (1985). The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, 73(10), 1468–1470.
- Golnaraghi, F., ve Kuo, B. C.** (2010). *Automatic control systems* (Ninth). WILEY.
- Güngör, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergüt, S., Buccella, C., Cecati, C., ve Hancke, G. P.** (2011). Smart Grid Technologies : Communication Technologies and Standards. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, 7(4), 529–539.
- Güzen, Z.** (2003). *Kutup Yerleştirme Yöntemi ile Genelleştirilmiş Ayrık PID Kontrolör*

Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Gyamfi, S., Krumdieck, S., ve Urmee, T.** (2013). Residential peak electricity demand response—Highlights of some behavioural issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.006>
- Hassan, M. U., Rehmani, M. H., ve Chen, J.** (2020). Differentially Private Dynamic Pricing for Efficient Demand Response in Smart Grid. *CC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149131>
- Herter, K., ve Wayland, S.** (2010). Residential response to critical-peak pricing of electricity : California evidence. *Energy*, 35(4), 1561–1567. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.022>
- Hien, N. C., Mithulananthan, N., ve Bansal, R. C.** (2013). Location and Sizing of Distributed Generation Units for Loadability Enhancement in Primary Feeder. *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, 7(4), 797–806.
- Huang, W., Zhang, N., Kang, C., Li, M., ve Huo, M.** (2019). From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 4(1), 1–13.
- Jia, L., ve Tong, L.** (2016). Dynamic Pricing and Distributed Energy Management for Demand Response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 1128–1136.
- Jose, A. A., ve Pahwa, A.** (2010). Economic evaluation of small wind generation ownership under different electricity pricing scenarios. *North American Power Symposium 2010*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2010.5618946>
- Jumaa, F. A., Neda, O. M., Mhawesh, M. A., ve Neda, O. M.** (2021). Optimal distributed generation placement using artificial intelligence for improving active radial distribution system. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(5), 2345–2354. <https://doi.org/10.11591/eei.v10i5.2949>
- Kabatepe, S., ve Cerrah, Ö.** (2022). *Kar yağınca elektrik direği devrildi*. Değişim. <http://www.degisimmedya.com/kar-yaginca-elektrik-diregi-devrildi-48233-haber/>
- Kallel, R., Boukettaya, G., ve Krichen, L.** (2014). Control management strategy of stand-alone hybrid power micro-system using super-capacitor. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(1), 210–223.
- Karataş Ulusoy, C.** (2019). Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki gelişmeler; güneş enerji sistemleri ve finansman modelleri. *ASSAM International Refereed Journal*, 6(13), 65–84.
- Kaygusuz, A.** (2019). Closed loop elastic demand control by dynamic energy pricing in smart grids. *Energy*, 176, 596–603. <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.
- Kennedy, J., ve Eberhart, R.** (1995). Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33–57.
- Khan, Mahmood, A., Safdar, A., Khan, Z. A., ve Khan, N. A.** (2016). Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 54, 1311–1322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.117>

- Khan, T., Ullah, K., Hafeez, G., Khan, I., Khalid, A., Shafiq, Z., Usman, M., ve Qazi, A. B.** (2020). Closed-Loop Elastic Demand Control under Dynamic Pricing Program in Smart Microgrid Using Super. *Sensors*, 20(16), 1–24. <https://doi.org/10.3390/s20164376>
- Khattak, H. A., Tehreem, K., Almogren, A., Ameer, Z., Din, I. U., ve Adnan, M.** (2020). Dynamic pricing in industrial internet of things : Blockchain application for energy management in smart cities. *Journal of Information Security and Applications*, 55, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2020.102615>
- Kii, M., Sakamoto, K., Hangai, Y., ve Doi, K.** (2014). The effects of critical peak pricing for electricity demand management on home-based trip generation. *IATSS Research*, 37(2), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2013.12.001>
- Kong, P.** (2014). Effects of Communication Network Performance on Dynamic Pricing in Smart Power Grid. *IEEE Systems Journal*, 8(2), 533–541.
- Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z., ve Zhang, P.** (2010). Smart Transmission Grid: Vision and Framework. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, 1(2), 168–177.
- Li, Y., Ang, K. H., ve Chong, G. C. Y.** (2006). PID control system analysis and design. *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*, 32–41.
- Lu, J., Hu, H., ve Bai, Y.** (2015). Generalized radial basis function neural network based on an improved dynamic particle swarm optimization and AdaBoost algorithm. *Neurocomputing*, 152, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.10.065>
- Mahmood, A., Javaid, N., ve Razzaq, S.** (2015). A review of wireless communications for smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 248–260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.036>
- Mahmud, A., ve Sant, P.** (2017). Real-Time price savings through price suggestions for the Smart Grid Demand Response model. *5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG)*, 65–69. <https://doi.org/10.1109/SGCF.2017.7947603>
- Mahmud, A., Sant, P., Tariq, F., ve Jazani, D.** (2016). Empirical analysis of real time pricing mechanisms for demand side management: Contemporary Review. *Fifth International Conference on Future Generation Communication Technologies (FGCT)*, 11–16.
- Mehta, V. K., ve Mehta, R.** (2005). *Principles of Power System: Including Generation, Transmission, Distribution, Switchgear and Protection: for BE/B. Tech.* S. Chand Publishing.
- Murty, K. G.** (2003). *Optimization Models For Decision Making : Volume 1.* University of Michigan, Ann Arbor.
- Nazar, N. S. M., Abdullah, M. . P., Hassan, M. Y., ve Hussin, F.** (2012). Time-based electricity pricing for Demand Response implementation in monopolized electricity market. *IEEE Student Conference on Research and Development*, 178–181.
- NIST.** (2010). *NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards.* Release 1.0.
- Ogata, K.** (2002). *Modern control engineering* (Fifth). Prentice Hall.

- Özkan, E.** (2006). *Kontrol Sistemlerinin Modellenmesi ve PID Kontrolörü*. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özsağlam, M. Y., ve Cunkaş, M.** (2008). Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması. *Journal of Polytechnic*, 11(4), 299–305.
- Öztürk, İ.** (2010). A literature survey on energy – growth nexus. *Energy Policy*, 38(1), 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.024>
- Pahle, M., Schill, W., Gambardella, C., ve Tietjen, O.** (2016). Renewable Energy Support , Negative Prices , and Real-time. *Energy*, 37, 147–170.
- Palensky, P., ve Dietrich, D.** (2011). Demand Side Management : Demand Response , Intelligent Energy Systems , and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 381–388.
- Pallonetto, F., Oxizidis, S., Milano, F., ve Finn, D.** (2016). The effect of time-of-use tariffs on the demand response flexibility of an all-electric smart-grid-ready dwelling. *Energy & Buildings*, 128, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.041>
- Park, S. C., Jin, Y. G., Song, H. Y., ve Yoon, Y. T.** (2015). Designing a critical peak pricing scheme for the profit maximization objective considering price responsiveness of customers. *Energy*, 83, 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.057>
- Perez, R. E., ve Behdinan, K.** (2007). Particle Swarm Optimization in Structural Design. *Swarm intelligence: Focus on ant and particle swarm optimization*, 532, 373–394.
- Rafiei, S., ve Bakhshai, A.** (2012). A Review on Energy Efficiency Optimization in Smart Grid. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 5916–5919.
- Roosbehani, M., Dahleh, M. A., ve Mitter, S. K.** (2012). Volatility of Power Grids Under Real-Time Pricing. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 1926–1940.
- Samadi, P., Mohsenian-Rad, A., Schober, R., Wong, V. W. S., ve Jatskevich, J.** (2010). Optimal Real-time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid. *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 415–420.
- Şeker, M.** (2022). Parameter estimation of positive lightning impulse using curve fitting-based optimization techniques and least squares algorithm. *Electric Power Systems Research*, 205, 107733. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107733>
- Shao, S., ve Zhang, T.** (2010). Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration. *IEEE PES T&D 2010*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484336>
- Sinha, A. K., ve Kumar, N.** (2016). Demand response management of smart grids using dynamic pricing. *International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 1–4.
- Song, X., ve Qu, J.** (2014). An improved real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid. *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2509–2513.
- Sun, Q., Ge, X., Liu, L., Xu, X., Zhang, Y., Niu, R., ve Zeng, Y.** (2011). Review of smart grid comprehensive assessment systems. *Energy Procedia*, 12, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.031>
- Tanrıöven, K., Yararbaş, S., ve Cengiz, H.** (2011). Geleceğin Elektrik Dağıtım Şebekesi

- Smart Grid. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu 2011*, 52–55.
- Tur, M. R.** (2019). *Akıllı Şebekeler Ders 1*.
- Tuttokmağı, Ö.** (2019). *Akıllı Şebekelerin Sistem Kararlılığı Bakımından İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Tuttokmağı, Ö., ve Kaygusuz, A.** (2017). Investigation of System Stability in Power Systems Containing Renewable Energy Sources. *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, 3727–3732.
- Tuttokmağı, Ö., ve Kaygusuz, A.** (2019). Transient Stability Analysis of Power Systems with Distributed Generation. *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing Symposium, IDAP 2019*, 154–158. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875935>
- Vu, K., Begovic, M. M., ve Novosel, D.** (1997). Grids Get Smart Protection and Control. *IEEE Computer Applications in Power*, 40–44.
- Wang, D., Tan, D., ve Liu, L.** (2018). Particle swarm optimization algorithm : an overview. *Soft Computing*, 22(2), 387–408. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2474-6>
- Wang, J., Bloyd, C. N., Hu, Z., ve Tan, Z.** (2010). Demand response in China. *Energy*, 35(4), 1592–1597. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.020>
- Winston, W. L.** (2004). *Operations Research Applications and Algorithms* (Fourth). Belmont: Thomson Brooks/Cole.
- Xu, F. Y., Zhang, T., Lai, L. L., ve Zhou, H.** (2015). Shifting Boundary for price-based residential demand response and applications. *Applied Energy*, 146, 353–370. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.001>
- Yalçınöz, Z., ve Kaygusuz, A.** (2021). Dynamic price control using pole placement method in smart grids. *Computer Science*, 411–421. <https://doi.org/10.53070/bbd.982884>
- Yalçınöz, Z., ve Kaygusuz, A.** (2022). Akıllı Şebekelerde Dinamik Enerji Fiyatlandırılması Üzerine Bir Çalışma. *Computer Science*, 21–31. <https://doi.org/10.53070/bbd.1174257>
- Yan, X., Ozturk, Y., Hu, Z., ve Song, Y.** (2018). A review on price-driven residential demand response. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.003>
- Yan, X., Wright, D., Kumar, S., Lee, G., ve Ozturk, Y.** (2015). Real-Time Residential Time-of-Use Pricing: A Closed-Loop Consumers Feedback Approach. *Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference*, 132–138. <https://doi.org/10.1109/GREENTECH.2015.19>
- Yıldız, S.** (2015). *Türkiye Elektrik Piyasası Kısa Dönemli Referans Fiyat Tahmini*. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Zahedi, A.** (2014). Proposing a Smart Electricity Pricing Model for Future Smart Grid. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 1–4.
- Zehir, M. A., ve Bağrıyanık, M.** (2013). Akıllı şebekelerde gelişmiş yerel talep yönetimi. *V. Enerji verimliliği ve kalitesi sempozyumu*, 14–18.
- Zeng, S., Li, J., ve Ren, Y.** (2008). Research of Time-of-Use Electricity Pricing Models in China: A Survey. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2191–2195. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2008.4738260>

- Zhang, D., Zhu, H., Zhang, H., Goh, H. H., Liu, H., ve Wu, T.** (2022). Multi-Objective Optimization for Smart Integrated Energy System Considering Demand Responses and Dynamic Prices. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(2), 1100–1112.
- Zhang, Q., Wang, X., ve Fu, M.** (2009). Optimal Implementation Strategies for Critical Peak Pricing. *International Conference on the European Energy Market*, 1–6.
- Zhang, S., Luo, C., ve Tang, Y.** (2017). Controller Design of Higher-Order Closed-Loop Systems Based on Criterion of Minimum Integral of Time-Weighted Absolute Error. *International Conference on Electrical Engineering and Automation Control (ICEEAC 2017)*, 341–345. <https://doi.org/10.12783/dtetr/iceeac2017/10751>
- Ziegler, J. G., ve Nichols, N. B.** (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 115(2B), 220–222. <https://doi.org/10.1115/1.2899060>



EKLER

EK 1: Sönüm oranının değişimi ile PID parametrelerini, denklem köklerini hesaplamak için kullanılan matlab kodu;

```
clc
clear all
z=[0 0.5 0.55 0.6 0.65 0.7 1 2];
wn=4;
x=0.31;
k=length(z)
for j=1:k
    kd=1-x
    ki=wn^2
    kp(j)=2*z(j)*wn-1
    s1=-z(j)*wn+wn*sqrt(z(j)^2-1)
    s2=-z(j)*wn-wn*sqrt(z(j)^2-1)
end
```

EK 2: Denklem eşitliği ifadesiyle kesim frekansının değerinin bulunmasını sağlayan Matlab kodu;

```
syms w
eqn = tan(w/10) == -0.31*w;
solve(eqn, w)
fplot(tan(w/10), [0 50]);
hold on
fplot(-0.31*w, [0 50]);
```

EK 3: Bode ve nyquist eğrilerini elde etmek için oluşturulan matlab kodu aşağıda verildiği gibidir.

```
syms s
G=tf(1, [0.31 1], 'InputDelay', 0.1)
bode(G)
figure;
nyquist (G)
```

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Zehva YALÇINÖZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2017, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR:

Yalçınöz, Z., ve Kaygusuz, A. (2021). Dynamic price control using pole placement method in smart grids. *Computer Science*, 411–421. <https://doi.org/10.53070/bbd.982884>

Yalçınöz, Z., ve Kaygusuz, A. (2022). Akıllı Şebekelerde Dinamik Enerji Fiyatlandırılması Üzerine Bir Çalışma. *Computer Science*, 21–31. <https://doi.org/10.53070/bbd.1174257>