



**T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

RÜZGÂR ENERJİSİ – POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN OPTİMAL İŞLETİLMESİ

CEYHUN YILDIZ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

KAHRAMANMARAŞ 2017

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGÂR ENERJİSİ – POMPAJ DEPOLAMALI
HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN OPTİMAL
İŞLETİLMESİ

CEYHUN YILDIZ

Bu tez,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
DOKTORA
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2017

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Ceyhun YILDIZ tarafından hazırlanan “Rüzgar Enerjisi – Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Optimal İşletilmesi” adlı bu tez, jürimiz tarafından 20/12/2017 tarihinde oy birliği / oy çokluğu ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ (DANIŞMAN)

Elektrik-Elektronik Müh.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Serdar YILMAZ (ÜYE)

Elektrik-Elektronik Müh.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim Taner OKUMUŞ (ÜYE)

Bilgisayar Müh.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali ÖZÇELİK (ÜYE)

Elektrik ve Enerji Böl.

Gaziantep Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet Mete VURAL (ÜYE)

Elektrik-Elektronik Müh.

Gaziantep Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ceyhun YILDIZ



Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.
Proje No: 2016/3-53D

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**RÜZGÂR ENERJİSİ – POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK
SANTRALLERİN OPTİMAL İŞLETİLMESİ
(DOKTORA TEZİ)**

CEYHUN YILDIZ

ÖZET

Son yıllarda; dünyadaki rüzgâr enerjisi santrali (RES) kurulu gücü, ülkelerin destekleyici politikaları ve yatırım maliyetlerinin düşmesi ile hızla artmıştır. Bu hızlı artışa paralel olarak karasız ve kontrol edilemez olan RES çıkış gücünden kaynaklı işletim sorunları da artmıştır. RES işletim sorunlarının giderilmesi konusunda yapılan araştırmalar bu tesisler ile beraber çalışacak bir enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur. Bu ihtiyacı gidermek için ise pompaj depolamalı heslerin (PDHES) kullanılabileceği düşünülmüştür. PDHES ve RES tesislerinin beraber işletilebilmeleri için elektrik fiyat ve RES çıkış gücü tahminlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tahminler belirli güvenilirlik seviyesine sahip olsalar da enerji piyasalarının kırılgan yapıları ve rüzgâr hız değerlerini etkileyen karmaşık atmosferik olaylar, tahmin değerlerini gerçek değerlerden saptırabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, Türkiye şartlarında bir RES ve bir PDHES tesisinin beraber ve ayrı ayrı işletilmesi ile elde edilecek sonuçlar irdelenmiştir. Tesislerin işletiminde kullanılan RES çıkış gücü tahminleri ülke çapında tahmin üreten bir merkezden alınmıştır. Elektrik fiyat tahminleri ise tez kapsamında geliştirilen bir tahmin modeli ile elde edilmiştir. Tesislerin beraber ve ayrı ayrı en iyi şekilde işletimi için deterministik ve stokastik yaklaşım kullanılarak ülke şartlarına uygun toplam altı adet optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Stokastik optimizasyon modellerinde tahmin değerleri yerine senaryolar kullanılmıştır. Bu senaryolar tez kapsamında önerilen yeni bir metod kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuçlar irdelendiğinde tesislerin beraber ve ayrı ayrı işletilmesi durumlarında stokastik yaklaşımın deterministik yaklaşımdan daha başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca, beraber işletim ayrık işletim ile kıyaslandığında iki tür avantaj sağladığı görülmüştür. 1) Toplam gelir %2 oranında artmıştır. 2) Enerji dengesizlik miktarları deterministik yaklaşımda %72, stokastik yaklaşımda %91 oranında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, Pompaj depolamalı hidroelektrik santral, Stokastik optimizasyon, Gün öncesi elektrik piyasası.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Aralık / 2017

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ
Sayfa sayısı: 82

**OPTIMAL OPERATION OF WIND – PUMPED STORAGE HYDRO POWER
PLANTS
(Ph.D. THESIS)**

CEYHUN YILDIZ

ABSTRACT

In recent years, thanks to supportive policies of countries and decrease in installation costs, total installed capacity of wind power plants (WPP) has increased all around the world. Besides this increase, operation problems arising from uncertain and uncontrollable WPP output power has increased too. The studies on solving WPP operation problems have put forward that an energy storage system that will operate with WPP is required. It is considered that, pumped storage hydro power plants (PSPP) can fulfill this requirement. Electricity price and WPP power output forecasts are required to operate PSPP and WPP jointly. However, these forecasts have the reliability level, the fragile nature of energy markets and complicated atmospheric phenomena which affect wind speed can deviate the forecast values from actual values.

In this thesis, the results of an uncoordinated and a jointly operation of WPP and PSPP are scrutinized under conditions of Turkey. The WPP power output forecasts, used to operate the plants, are taken from a center which generates countrywide forecasts. Electricity price forecasts are obtained with a forecasting model that developed within this thesis. For jointly and uncoordinated optimal operation of plants, six optimization models that fit to the conditions of the country are developed by using deterministic and stochastic approaches. In the stochastic optimization models the scenarios are used instead of forecast values. These scenarios are obtained by using a new method, proposed within this thesis. When the results are scrutinized, it is seen that stochastic approach is more successful than deterministic approach in case of operating the plants uncoordinated and jointly. In addition to this, jointly operation has two fold advantages when compared with uncoordinated operation. 1) The total revenue increased by 2%. 2) The energy imbalance value decreased in deterministic approach by 72% and in stochastic approach by 91%.

Keywords: Wind energy, Pumped storage hydro power plant, Stochastic optimization, Day ahead electricity market.

Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering, December/ 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa ŞEKKELİ

Page Numbers: 82

TEŞEKKÜR

Öncelikle, akademik bilgi birikimi ve tecrübelerinden, tez çalışması süresince faydalandığım, danışman hocam Doç. Dr. Mustafa ŞEKKELİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin gelişim sürecinde yaptıkları olumlu katkılardan dolayı tez izleme komitesindeki hocalarıma, tez çalışmama yaptıkları desteklerinden dolayı bölümde çalışan araştırma görevlisi ve uzman arkadaşlarıma teker teker teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca engin mühendislik deneyimlerini benimle paylaşan Vehbi Hakan SAYAN'a ve özellikle bana bugüne kadar her konuda destek olan aileme ve eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam	3
1.3 Literatür Taraması.....	4
1.3.1 RES tesislerinin optimal işletilmesi	4
1.3.2 PDHES tesislerinin optimal işletilmesi.....	6
1.3.3 RES ve PDHES tesislerinin beraber optimal işletilmesi.....	8
1.4 Tezin Organizasyonu	10
2. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI	11
2.1 Gün Öncesi Piyasa	12
3. GÜN ÖNCESİ PİYASASINDA RES VE PDHES TESİSLERİNİN İŞLETİLMESİ	14
3.1. RES Tesisinin Gün Öncesi Piyasasında İşletilmesi	14
3.2. PDHES Tesisinin Gün Öncesi Piyasasında İşletilmesi.....	16
3.3. PDHES ve RES Tesislerinin Gün Öncesi Piyasasında İşletilmesi	18
4. TEZ KAPSAMINDA İNCELENEN TESİSLER	21
4.1. RES Tesis.....	21
4.2. Çakmak I-II ve Söğütlü HES	24
4.3. Çakmak I-II ve Söğütlü HES Tesislerinin PDHES’e Dönüştürülmesi.....	26
5. PDHES VE RES TESİSLERİNİN OPTİMAL İŞLETİM UYGULAMASI.....	29
5.1. Fiyat Tahmini.....	29
5.2 Rüzgar Gücü Tahmini.....	35
5.3 RES Üretim ve PTF Senaryoları Oluşturma Yöntemleri.....	37
5.3.1 RES üretim senaryoları oluşturma yöntemi	37
5.3.1.1 Senaryo oluşturma yöntemi.....	38
5.3.1.2 Hata senaryolarının oluşturulması.....	39
5.3.1.3 Hata senaryolarının azaltılması	42
5.3.1.4 Senaryo kalite indisleri.....	43

5.3.1.5 Ortalama mutlak hata indisi	43
5.3.1.6 Toplam sapma indisi	44
5.3.1.7 RES üretim senaryosu oluşturma algoritması	44
5.3.1.8 Üretilen senaryoların kalite testi sonuçları	47
5.3.2 PTF Senaryoları oluşturma yöntemi	48
5.4 RES İşletim Modelleri	49
5.4.1 Deterministik RES işletim modeli.....	50
5.4.2 Stokastik RES işletim modeli.....	50
5.5 PDHES İşletim Modelleri ve PDHES Duyarlılık Analizi	54
5.5.1 Deterministik PDHES işletim modeli	54
5.5.2 Stokastik PDHES işletim modeli	58
5.5.1 PDHES duyarlılık analizi	61
5.6 PDHES ve RES İşletim Modelleri	63
5.6.1 Deterministik RES ve PDHES işletim modeli	63
5.6.2 Stokastik RES ve PDHES işletim modeli	66
6. SONUÇLAR.....	70
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	GÖP piyasasında PTF ve piyasa takas miktarı oluşumu	13
Şekil 3.1.	GÖP’te RES tesisi işletiminin şematik gösterimi	15
Şekil 3.2.	PDHES tesisi şematik gösterimi	16
Şekil 3.3.	GÖP’te PDHES tesisi işletiminin şematik gösterimi	18
Şekil 3.4.	RES tesisi çıkış gücü ve şebeke talep gücü değerlerinin oluşturduğu eğriler ..	19
Şekil 3.5.	GÖP’te RES ve PDHES tesislerinin beraber işletiminin şematik gösterimi	20
Şekil 4.1.	RES tesisi uydu görünümü	21
Şekil 4.2.	RES tesisi 2016 yılı RİTM tahmin hataları	23
Şekil 4.3.	Çakmak I-II ve Söğütlü HES uydu görünümü	24
Şekil 4.4.	Çakmak I-II ve Söğütlü HES tesis tanıtım tabelaları.....	25
Şekil 4.5.	Çakmak I-II ve Söğütlü HESler için hesaplanmış beş yıllık üretim değerleri .	26
Şekil 4.6.	Tek pompalı senaryo ile oluşacak PDHES tesisinin şematik gösterimi	27
Şekil 4.7.	Üç pompalı senaryo ile oluşacak PDHES tesisinin şematik gösterimi.....	28
Şekil 5.1.	Grafiklerde talep güç PTF değişimleri verilmiştir. a) Değerler senelik saatlik ortalamalardır, b) Değerler günlük ortalamalardır, c) Değerler aylık ortalamalardır.....	30
Şekil 5.2.	MYTM talep tahmin sistemi 2016 yılı hataları dağılımı	31
Şekil 5.3.	2016 yılının 33. ve 34. haftasında oluşan PTF’ler.....	32
Şekil 5.4.	2016 yılının 53. ve 54. gününde oluşan PTF’ler	32
Şekil 5.5.	Fiyat tahmin modeli yapısı	33
Şekil 5.6.	Güç seviyesi 6,10 ve 14 te oluşmuş hataların dağılımları ve CDF’leri	39
Şekil 5.7.	12. güç seviyesi için örnek bir ters dağılım dönüşümü	40
Şekil 5.8.	RES üretim senaryolarının oluşturulma sürecini anlatan akış diyagramı.....	45
Şekil 5.9.	2016 yılının farklı mevsimlerindeki 4 gün için üretilmiş senaryolar	46

Şekil 5.10. RES tesisi, 2015 yılı toplam sapma kalite indisinin senaryo sayısına göre değişimi.....	47
Şekil 5.11. Grafik, RES tesisi, 2015 yılı ortalama mutlak hata kalite indisinin senaryo sayısına göre değişimini göstermektedir	48
Şekil 5.12. 2015 yılının farklı mevsimlerinden seçilen dört gün için oluşturulan senaryolar.....	49
Şekil 5.13. RES üretim senaryolarını temsil eden senaryo ağacı	51
Şekil 5.14. Stokastik ve deterministik modeller ile işletim sonucu elde edilen değerler....	53
Şekil 5.15. PDHES tesisinin deterministik model ile işletimi sonucu elde edilen değerler	57
Şekil 5.16. Fiyat senaryolarını temsil eden senaryo ağacı	58
Şekil 5.17. PDHES tesisinin deterministik ve stokastik model ile işletim sonuçları.....	60
Şekil 5.18. Deteministik yaklaşım duyarlılık analizi sonuçları	62
Şekil 5.19. Stokastik yaklaşım duyarlılık analizi sonuçları	62
Şekil 5.20. RES ve PDHES tesislerinin beraber deterministik model ile işletimi sonuçları.....	65
Şekil 5.21. Ayrık senaryolardan oluşan senaryo ağacı	66
Şekil 5.22. Birleşik senaryolardan oluşan senaryo ağacı	67
Şekil 5.23. RES ve PDHES tesislerinin beraber stokastik model ile işletimi sonuçları	69
Şekil 6.1. 2016 yılı RES gücü tahmin hataları histogram grafiği	71
Şekil 6.2. 2016 yılı PTF tahmin hataları histogram grafiği	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1. RES tesisi özet karakteristik bilgileri.....	22
Çizelge 4.2. Çakmak I HES özet Karakteristik bilgileri	25
Çizelge 5.1. Fiyat tahmini modeli girişleri.....	33
Çizelge 5.2. Fiyat tahmini modeli özellikleri.....	33
Çizelge 5.3. Fiyat tahmini modeli performans değerleri.....	34
Çizelge 5.4. PTF varyans, PTF standart sapma ve YEKDEM toplam üretim değerleri..	35
Çizelge 5.5. Fiyat tahmini modeli performans değerleri.....	36
Çizelge 5.6. Deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar	50
Çizelge 5.7. Stokastik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar	54
Çizelge 5.8. Deterministik modelde kullanılan sabitler	56
Çizelge 5.9. Deterministik modelde kullanılan değişken sayıları.....	56
Çizelge 5.10. Deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar	57
Çizelge 5.11. Stokastik modelde kullanılan değişken sayıları.....	60
Çizelge 5.12. Deterministik ve stokastik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar	61
Çizelge 5.13. Deterministik modelde kullanılan değişken sayıları.....	64
Çizelge 5.14. Deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar	65
Çizelge 5.15. Stokastik modelde kullanılan değişken sayıları.....	68
Çizelge 5.16. Stokastik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar	69
Çizelge 6.1. Fiyat tahmin modelleri performans değerleri	72
Çizelge 6.2. RES gücü tahmini modeli performans değerleri.....	72
Çizelge 6.3. Deterministik ve stokastik yaklaşım, RES tesis için elde edilen sonuçlar...	72
Çizelge 6.4. Deterministik ve stokastik yaklaşım, PDHES tesis için elde edilen sonuçlar	72
Çizelge 6.5. Deterministik ve stokastik yaklaşım, RES ve PDHES tesislerinin beraber işletimi sonucu elde edilen değerler.....	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

GÖP	: Gün Öncesi Piyasası
DGP	: Dengeleme Güç Piyasası
GİP	: Gün içi Piyasası
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
SMF	: Sistem Marjinal Fiyatı
PTF	: Piyasa Takas Fiyatı
RES	: Rüzgâr Enerjisi Santrali
HES	: Hidroelektrik Santral
GES	: Güneş Enerjisi Santrali
PDHES	: Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral
RİTM	: Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
MYTM	: Milli Yük Tevzi Merkezi
MATLAB	: Matris Laboratuvarı
CPLEX	: C dilinde Simpleks Metodu Uygulaması.
NRMSE	: Normalize Kök Ortalama Kare Hata
NMAE	: Normalize Ortalama Mutlak Hata
MAPE	: Ortalama Mutlak Yüzde Hata
AR	: Otoregresif
ARMA	: Otoregresif Hareketli Ortalama
ARIMA	: Otoregresif Bütünleşik Hareketli Ortalama
MVNRNDN	: Çoklu Değişen Rastgele Normal Sayılar
CDF	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
ECDF	: Ampirik Kümülatif Dağılım Fonksiyonu

IBM : International Business Machines

TGG : Toplam Günlük Gelir



1. GİRİŞ

Dünya üzerinde birçok ülke, enerji ihtiyaçlarının büyük bölümünü, kömür, doğalgaz gibi geleneksel enerji kaynaklarından karşılamaktadırlar (Merzic ve ark. 2017). Bu geleneksel enerji kaynakları dünya üzerinde sınırlı miktarda bulunmaktadır ve belirli bölgelerden temin edilebilmektedir. Bu durum ülkeleri çoğu zaman enerji arz güvenliği ve ekonomik açıdan zorlamaktadır. Ayrıca geleneksel enerji kaynaklarının çevresel kötü etkilerinin yüksek olması, doğada ve insan sağlığı üzerinde geri dönüşü olmayan zararlar oluşturabilmektedir. Bu olumsuz durumlar ülkeleri alternatif enerji kaynakları aramaya ve kullanmaya yöneltmiştir. Birçok ülke yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş, rüzgâr ve su enerjisinin, geleneksel enerji kaynaklarına alternatif olabileceğini düşünmüştür. Bu ülkelerin destekleyici politikaları ve teknolojik gelişmelerin yatırım maliyetlerini düşürmesi ile dünya üzerinde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı hızla arttırmıştır (Fouquet ve Johansson 2008).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının miktarı doğal süreçlere bağımlı olarak kısa ve uzun vadede değişmektedir. Doğal süreçlere müdahale etmek mümkün olmadığından bu kaynaklar değişken ve karasızdırlar. Suyun enerjisini kullanan baraj tipi Hidroelektrik Santrallerde (HES) suyun depolanabilmesi hidroelektrik enerjinin bir miktar kontrol altında tutulabilmesini sağlamaktadır. Fakat rüzgâr enerjisi kullanan Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde (RES) ve güneş enerjisi kullanılan Güneş Enerjisi Santrallerinde (GES) kaynak enerji depolanmadan elektriksel enerjiye dönüştürüldüğünden bu tip tesislerin çıkış gücü değişken ve kontrol edilemezdir. Bu durum şebeke operatörleri ve serbest elektrik piyasalarına katılıp üretim taahhüdü veren GES, RES işletmecileri için önemli sorunlar oluşturmaktadır. Bir enterkonnekte elektrik şebekesine bağlı RES ve GES kurulu gücü arttıkça şebeke operatörü sistemdeki arz-talep dengesini sağlama konusunda zorlanmaktadır. Bir RES veya GES işletmecisi serbest piyasada teklif vererek taahhüt ettiği enerjiyi üretemediği zaman piyasa mekanizması tarafından sebep olduğu dengesizlik miktarı kadar cezalandırılmaktadır. Şebeke operatörlerine ve tesis işletmecilerine gün öncesinden planlama yapma konusunda yardımcı olmak amacıyla birçok RES ve GES çıkış gücü tahmin sistemleri geliştirilmiştir. Ülke çapında, bölgesel ve santral bazında geliştirilen bu tahmin sistemleri gün öncesi planlama konusunda kısmen faydalı olsalar da tam olarak gerçek değerleri tahmin edemediklerinden dengesizlik problemlerini tamamen ortadan kaldıramamışlardır. Özellikle RES enerji kaynağı olan rüzgârın, modellenmesi çok zor karmaşık atmosferik olaylara bağımlı olması, rüzgâr hız ve yön tahminlerinde büyük hatalar yapılmasına sebep

olmaktadır. RES çıkış gücü rüzgâr hızının küpüyle orantılı olduğundan hız tahmininde yapılan hatalar santral çıkış gücü tahminlerinde daha büyük hatalar oluşturmaktadır. Bu hatalar şebeke operatörlerini ve santral işletmecilerini gün öncesinden yaptıkları üretim planlarından saptırmaktadır.

Rüzgâr enerjisi tahmin sistemlerinin doğruluğu önerilen yeni yöntemler ile gün geçtikçe artmaktadır (Foley ve ark. 2012). Tahmin değerleri gerçek değerlere yaklaştıkça gün öncesi planlama süreci daha sağlıklı işleyecektir. Fakat RES çıkış güçlerinin değişkenliği, enterkonnekte sisteme üretim ve iletim tarafından bakıldığında sorun oluşturmaya devam edecektir. Üretim tarafına bakıldığında, serbest piyasaya elektrik satan üretici firmalar çıkış güçlerini kontrol edemediklerinden gün içinde oluşan fiyat dalgalanmalarına karşı tepki gösteremeyecek ve optimum gelir elde edemeyeceklerdir. İletim tarafından bakıldığında ise sisteminden sorumlu şebeke operatörlerinin kontrolsüz olarak değişen RES üretimlerini dengeleyebilmeleri için daha fazla sıcak yedek tutulmak zorunda kalınacaktır.

Yüksek miktarda rüzgâr enerjisi enjekte edilen enterkonnekte elektrik şebeke sistemlerinde arz-talep dengesinin korunması konusunda yapılan araştırmalar bu sistemlerde büyük kapasiteli enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulacağını ortaya koymuştur (Ayodele ve Ogunjuyigbe 2015). Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri incelendiğinde ise Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin (PDHES) bir enerji depolama sistemi olarak alternatiflerine göre daha yaygın ve ekonomik oldukları görülmektedir (Luo ve ark. 2015). PDHES teknolojisi yaklaşık olarak iki asırdır kullanılan bir teknolojidir (Luo ve ark. 2015). Günümüzde yaşanan teknolojik gelişmeler ile bu tesislerde kısa sürede yük alıp atabilen, pompa-türbin modları arasında hızlıca geçiş yapabilen modern üniteler kullanılmaya başlanmıştır (Nagura ve ark. 2010). Şebekelerdeki yenilenebilir enerji payı arttıkça PDHES'e olan ilgi de artmış özellikle RES dengesizliklerinin giderilmesi konusunda bu tesislerin çözüm olabileceği düşünülmüştür. Bu çerçevede birçok araştırma yapılmış, RES ve PDHES sistemlerinin beraber çalıştırılması konusu teknik ve ekonomik açıdan incelenmiştir (Dhillon ve ark. 2014).

1.1 Amaç

Son yıllarda, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi Türkiye elektrik şebekesine bağlı RES kurulu gücü de hızla artmaktadır. RES çıkış gücü stokastik ve kontrol edilemez olduğundan bu durum ülkenin enterkonnekte şebeke sistemindeki enerji arz-talep dengesine bozucu yönde bir etki oluşturacaktır. Ayrıca ülke çapında giderek sayısı artan RES tesisi

işletmecileri de dengesiz üretimlerinden dolayı piyasa mekanizması tarafından cezalandırılacaklardır. Bu tez çalışmasının ilk amacı; Türkiye elektrik piyasası şartlarında, karasız RES tesisi çıkış güçlerinin olumsuz etkilerinin bir PDHES tesisi yardımıyla nasıl azaltılabileceğini ortaya koymaktır. Tezin ikinci amacı ise bu RES ve PDHES tesislerinin tek başlarına en iyi şekilde işetilmesini sağlayacak yöntemler geliştirmektir.

1.2 Kapsam

Tez kapsamında yapılan çalışmalar üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada RES ve PDHES tesislerinin ayrı ayrı ve beraber işletileceği elektrik piyasası yapısı incelenmiştir. Bu piyasa yapısında tesislerin beraber ve ayrı ayrı işletimi için modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin, uygulama aşamasında yardımcı olması amacıyla, akış şemaları oluşturulmuştur.

İkinci aşamada işletim modellerinin uygulamalarının gerçekleştirileceği bir RES ve PDHES tesisi belirlenmiştir. RES tesisi olarak, Hatay ilinde kurulmuş bir RES tesisi seçilmiştir. Bu tesis, çıkış gücü güvenilir şekilde tahmin edilebildiğinden tercih edilmiştir. Ülkede bir PDHES bulunmadığından, bu tesisin Kahramanmaraş ilinde kurulmuş Çakmak I-II ve Söğütlü HES'lere bir pompa istasyonu ve su rezervuarı eklenerek elde edilebileceği önerilmiştir. Çakmak I-II ve Söğütlü HES'ler, yaklaşık 850 metrelik bir düşüyü paylaşmaktadır. Bu yüksek düşü, PDHES'e dönüşüm için eklenecek su rezervuarı hacmini düşüreceğinden maliyet açısından avantaj sağlayacaktır. Tesislerin teknik detayları tez kapsamında yapılan saha ziyaretleri ile incelenmiştir.

Üçüncü aşamada deterministik ve stokastik yaklaşım ile tesislerin beraber ve ayrı ayrı işletimleri için oluşturulmuş optimizasyon modellerinin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deterministik modellerin çözümü için RES çıkış gücü ve elektrik fiyat tahminlerine ihtiyaç duyulmaktadır. RES çıkış gücü tahminleri ülke çapında santral bazlı tahmin üretilen bir tahmin merkezinden temin edilmiştir. Ülkede kabul görmüş elektrik fiyat tahmini verisi bulunmadığından tez kapsamında bir elektrik fiyat tahmin modeli geliştirilmiştir. Model çok girişli tek çıkışlı, birçok katmanlı yapay sinir ağı ile oluşturulmuştur. Stokastik modellerin çözümü için gerekli olan RES çıkış gücü ve elektrik fiyat senaryoları yine tez kapsamında önerilen yeni bir yöntem ile elde edilmiştir. Son olarak tez kapsamında önerilen optimizasyon modellerinin çözümü ile elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

1.3 Literatür Taraması

Tez konusu ile ilgili literatür taraması üç başlık altında yapılmıştır. Bunlardan ilki bir RES tesisinin optimal işletilmesidir. İkinci başlık PDHES tesisinin optimal işletilmesi, üçüncü başlık ise RES ve PDHES tesislerinin beraber optimal işletilmesidir. Literatürde bu üç konunun bir optimizasyon problemi olarak ele alındığı görülmektedir. Bu optimizasyon problemlerindeki amaç genelde santral veya santrallerin toplam gelirlerinin artırılması olmuştur(Dhillon ve ark. 2014). Gelir artışı, tesislerin toplam çıkış gücünün yüksek enerji talebinin olduğu saatlere kaydırılması veya RES tesisinin sebep olduğu enerji dengesizlik miktarının azaltılması ile elde edilmiştir. Bu iki işletim şeklinin elektrik şebekesindeki enerji arz-talep dengesini destekleyici etki oluşturacağı açıktır. Literatürden üç başlık altında seçilen bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1.3.1 RES tesislerinin optimal işletilmesi

RES tesislerinin çıkış gücünü bir enerji depolama sistemi olmadan zaman ekseninde kaydırmak mümkün değildir. Bu sebeple bu tesislerin optimal işletilmesi konusunda yapılmış çalışmalarda amaç tesislerin enerji piyasalarında sebep oldukları enerji dengesizlik miktarının düşürülmesi olmuştur. Konu ile ilgili yapılmış bazı çalışmaların özetleri aşağıda verilmiştir.

Morales ve ark. (2010a) çalışmasında, bir RES tesisinin optimal işletilmesi için stokastik bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Modeldeki stokastik değişkenler, elektrik fiyatları ve RES çıkış güçleridir. Bu değişkenler gerçekleşmesi muhtemel senaryolar ile temsil edilmiştir. Elektrik fiyat senaryoları bir ARIMA modeli kullanılarak, RES çıkış gücü senaryoları ise bir AR modeli kullanılarak elde edilmiştir. Önerilen yöntemin uygulaması, Iberian Peninsula elektrik piyasasında faaliyet gösteren bir RES tesisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. RES tesisi dört adet 2,5 MW çıkış gücüne sahip NORDEX marka, N80 model türbinlerden oluşmaktadır. Uygulama sonucu elde edilen sonuçlar deterministik yaklaşım ile kıyaslanmış ve %0,22 ile %2,29 aralığında bir gelir artışı olduğu görülmüştür.

Çalışma irdelendiğinde önerilen yöntemin bazı zayıf yönleri görülmektedir. Bunlardan ilki ARIMA ve AR modelleme yaklaşımları ile kendi içerisinde karasızlıklar içeren elektrik fiyat ve RES çıkış gücü değerlerinin modellenmesidir. ARIMA ve AR modelleme yaklaşımları temelde kararsız olmayan ve belirli trendleri izleyen veriler için uygun olduğundan elektrik fiyat ve RES çıkış gücü modellemesi için uygun değildir. İkinci zayıf yön ise RES çıkış gücü senaryoları oluşturmak için önerilen yöntemdedir. Önerilen yöntemde önce rüzgâr hız senaryoları oluşturulmuş ve bu hız senaryoları türbin güç eğrileri

kullanılarak santral çıkış gücüne dönüştürülmüştür. Rüzgâr hızı topografik etki nedeniyle santral sahasında değişim göstereceğinden farklı yerlerde konumlandırılmış türbinler için aynı hız değerini kullanmak uygun değildir.

Matevosyan ve Soder (2006) çalışmasında, RES tesisinin sebep olduğu enerji dengesizlik miktarlarını minimize eden bir stokastik optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Modeldeki stokastik değişken RES çıkış gücüdür. Bu değişken yerine kullanılan senaryolar, geçmiş rüzgâr hız ve yön tahminleri kullanılarak oluşturulan bir ARMA modeli üzerinden elde edilmiştir. Optimizasyon modeli Nordpool elektrik piyasasında işletilen bir rüzgâr türbini üzerinde denenmiştir. Bu türbin VESTAS firması tarafından üretilen V80 model türbindir ve 2 MW kurulu güce sahiptir. Sonuçlar irdelendiğinde, önerilen yöntem ile elde edilen gelirin doğrudan türbin çıkış gücü tahminleri kullanılarak elde edilen gelirden %8 daha fazla olduğu görülmüştür.

Bu çalışma irdelendiğinde (Morales ve ark. 2010a)'da olduğu gibi ARMA modeli ile rüzgâr hız ve yön verilerinin modellendiği ve bu model üzerinden hız ve yön senaryoları elde edildiği görülmektedir. Elde edilen hız ve yön senaryoları türbin güç eğrisi kullanılarak güce dönüştürülmüştür. ARMA yaklaşımı rüzgâr hız ve yön verilerini modellemek için uygun değildir. Ayrıca, üretici firma tarafından oluşturulmuş güç eğrisini sahadaki bir türbinin çıkış gücünü hesaplamak için kullanmak sonuçları kötü yönde etkileyecektir. Çünkü sahadaki türbinin güç eğrisi topografik ve meteorolojik etkiler ile değişecektir.

Pousinho ve ark. (2012) çalışmasında, bir RES tesisinin işletim optimizasyonu için stokastik bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Modeldeki stokastik değişkenler elektrik fiyatları ve RES çıkış gücüdür. Bu değişkenler gerçekleşmesi muhtemel senaryolar ile temsil edilmiştir. Senaryolar, geçmiş tahmin değerleri kullanılarak oluşturulmuş bir yapay sinir ağı modeli üzerinden elde edilmiştir. Önerilen yöntemin uygulaması iki RES tesisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tesislerden biri Portekiz'de bulunmaktadır ve 270 MW kurulu güce sahiptir diğeri ise 11,6 MW kurulu güce sahiptir ve Azores adasında bulunmaktadır.

Bu çalışma irdelendiğinde, önerilen optimizasyon modeline elektrik piyasasındaki enerji dengesizlik maliyeti tahminlerinin de eklendiği görülmüştür. Modele eklenen bu verinin sonuçları iyileştirmesi beklenmektedir. Fakat sonuçlar kıyaslamalı olarak verilmediğinden iyileşme olup olmadığı anlaşılmamaktadır. Çalışmada RES çıkış gücü ve fiyat senaryoları bir yapay sinir ağı modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Yapay sinir ağı modelinin, (Morales ve ark. 2010a) ve (Matevosyan ve Soder 2006)'de kullanılan ARMA, ARIMA ve AR modellerine kıyasla daha iyi sonuç vereceği düşünülmektedir. Ayrıca bu

çalışmada RES çıkış gücü doğrudan modellendiği için, rüzgâr hızının modellendiği (Morales ve ark. 2010a) ve (Matevosyan ve Soder 2006)'de yapıldığı gibi rüzgâr hızı – güç dönüşümüne ihtiyaç duyulmamış ve doğruluk seviyesi daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Literatür taramasının bu bölümünde, konu ile ilgili yapılmış geçmiş çalışmalarda RES çıkış gücü ve elektrik fiyat senaryolarının genelde ARMA, ARIMA, AR gibi modeller üzerinden elde edildiği görülmüştür. (Matevosyan ve Soder 2006; Morales ve ark. 2010b; Sharma ve ark. 2013; Sharma ve ark. 2014; Oskoue ve Yazdankhah 2015; Parastegari ve ark. 2015). Bu modelleme yöntemleri stokastik RES çıkış gücü ve elektrik fiyatlarını modellemek için uygun değildir. Literatürde bu modelleme yöntemleri haricinde daha uygun modelleme yöntemi kullanılmış az sayıda çalışma olduğu görülmüştür (Pinson ve ark. 2009; Pousinho ve ark. 2012; Ma ve ark. 2013).

1.3.2 PDHES tesislerinin optimal işletilmesi

PDHES tesisleri temelde bir enerji depolama sistemidir. Bu tesisler gelirlerini düşük fiyattan enerji satın alıp yüksek fiyattan satarak elde etmektedirler. Kısa süreli elektrik fiyat tahminlerinin doğruluk seviyesi bu tesislerin gelirini önemli derecede etkilemektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardaki amaç genelde PDHES tesisinin en ucuz fiyattan enerji depolamasını ve depoladığı bu enerjiyi en yüksek fiyattan satmasını sağlamak olmuştur. Literatürden seçilmiş bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kanakasabapathy ve Swarup (2010) çalışmasında bir PDHES tesisi işletimi için parçacık sürü optimizasyon yöntemi kullanılarak bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Önerilen bu modelin uygulaması, New York, Amerika Birleşik Devletlerinde işletilmekte olan Blenheim Gilbao PDHES tesisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin performansı genetik algoritma ve basit bir sıralama yöntemi ile oluşturulmuş iki ayrı optimizasyon modeli ile kıyaslanmış, önerilen yöntemin daha başarılı olduğu görülmüştür.

Çalışma irdelendiğinde elektrik fiyatlarının deterministik olduğunun kabul edildiği ve önerilen optimizasyon modelinde elektrik fiyat tahminlerin doğrudan kullanıldığı görülmüştür. Bu durum fiyatlardaki stokastik değişimlerin hesaplamalarda dikkate alınmamasına sebep olmuştur.

Muche (2014) çalışmasında PDHES işletim optimizasyonu için deterministik ve stokastik yaklaşım kullanılarak iki adet optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Modellerde kullanılan elektrik fiyat tahminleri ve senaryoları çalışma kapsamında oluşturulmuş bir SARIMA modeli kullanılarak elde edilmiştir. Önerilen optimizasyon modellerinin uygulaması European Energy Exchange elektrik piyasası şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Önerilen yöntemlerin performansları kıyaslamalı olarak verilmiştir. Sonuçlar ışığında fiyat tahmin sisteminin doğruluk seviyesi arttıkça deterministik yaklaşım ile stokastik yaklaşım performanslarının birbirine yaklaştığı belirtilmiştir.

Çalışma irdelendiğinde PDHES tesislerinin işletimi için fiyat tahminlerinin iyileştirilerek deterministik modelin kullanılmasının önerildiği anlaşılmaktadır. Fakat elektrik fiyatlarının ülkeler özelinde oldukça fazla parametreye (meteorolojik olaylar, ülkenin enerji kaynağı çeşitliliği, siyasi ve ekonomik gelişmeler vb.) bağımlı olarak değişim gösterdiği bilindiğinden fiyat tahminleri için sabit bir doğruluk seviyesi elde etmek mümkün değildir.

Winnington (2012) çalışmasında, bir PDHES tesisinin stokastik ve deterministik yaklaşım ile optimal işletilmesi sonucu elde edilen neticeler kıyaslanmıştır. Stokastik değişken olan elektrik fiyatı yerine kullanılacak senaryolar Monte Carlo Simülasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Önerilen optimizasyon modellerinin uygulaması 25MW türbin ve 30 MW pompa kurulu gücüne sahip bir PDHES üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar beş yıl için kıyaslamalı olarak yıllık deterministik ve stokastik yaklaşım gelirleri şeklinde verilmiştir. Stokastik yaklaşım gelir artışının %0,4 - % 6,6 aralığında olduğu görülmüştür.

Lu ve ark. (2003) çalışmasında bir PDHES tesisinin optimal işletimi için haftalık fiyat tahminlerini kullanan iki ayrı yöntem önerilmiştir. İlk aşamada tesisin haftalık işletimini temsil eden ve türbin çalışma süresi değişken olmak üzere bir matematiksel fonksiyon elde edilmiştir. Önerilen yöntemlerden ilkinde türbin çalışması süresi adım adım arttırılarak fonksiyon çözülmüş, en yüksek gelir elde edilen türbin çalışma süresinin optimum geliri vereceği kabul edilerek optimum işletim planı oluşturulmuştur. İkinci yöntemde ise fonksiyonun optimum değerini birinci dereceden türevinin sıfır olduğu noktada alacağı kabul edilmiş ve bu noktadaki çözüm, işletim planını oluşturmak için kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin uygulamaları New York elektrik piyasası şartlarında, sırasıyla 130 ve 100 MW, pompa ve türbin kurulu gücüne sahip bir tesis üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar iki ayrı hafta için elde edilmiş ve ikinci yöntemin ilk haftada %6 ikinci haftada %2 gelir artışı sağladığı görülmüştür.

Çalışma incelendiğinde elektrik fiyat değerlerinin deterministik olduğunun kabul edildiği görülmektedir. Elektrik fiyatlarının stokastik olarak değiştiği ve tahminlerin çoğu zaman gerçek değerlerden saptığı bilindiğinden önerilen yöntemlerin tahmin kalitesine bağımlı olarak optimum çalışma noktasından uzak sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Literatür taramasının bu bölümünde, konu ile ilgili yapılmış geçmiş çalışmalarda deterministik ve stokastik yaklaşımların kullanıldığı görülmüştür. Elektrik fiyat değerleri stokastik olduğundan deterministik yaklaşımın uygun olmayacağı düşünülmektedir. Literatürdeki stokastik yaklaşım kullanılmış çalışmalarda ise elektrik fiyatları yerine kullanılacak senaryoların oldukça basit senaryo üretim yöntemleri ile elde edildiği görülmüştür. Bu sebeplerle tez çalışması kapsamında stokastik bir yaklaşım kullanılmış, ayrıca elektrik fiyat senaryolarını elde etmek için yeni ve etkili bir yöntem öne sürülmüştür.

1.3.3 RES ve PDHES tesislerinin beraber optimal işletilmesi

RES çıkış gücünün değişken, kontrol edilemez ve yüksek doğruluk seviyesinde tahmin edilemez olması tesis sahipleri ve şebeke operatörleri için problemler oluşturmaktadır. RES'lerin çıkış gücünü kontrol altına almak için PDHES tesisleri ile beraber işletimi önerilmektedir. Bu kapsamda yapılmış bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Garcia-Gonzalez ve ark. (2008) çalışmasında RES çıkış gücü ve elektrik fiyat tahmin değerlerinin stokastik olduğu kabul edilerek İspanya elektrik piyasası şartlarında RES ve PDHES tesislerinin işletimi için stokastik bir optimizasyon modeli önerilmiştir. Optimizasyon modelinde kullanılan RES gücü ve elektrik fiyat senaryoları Markov zinciri kullanılarak elde edilmiştir. Uygulamanın yapıldığı RES ve PDHES tesislerinin kurulu güçleri sırasıyla 30 ve 10 MW'tır. Tesislerin beraber işletilmeleri durumunda toplam gelirin ayrık işleme kıyasla %2,53 oranında arttığı görülmüştür.

Çalışma incelendiğinde, iki tesisin işletim optimizasyonunda stokastik bir yaklaşımın izlendiği görülmektedir. Fakat sonuçlar deterministik yaklaşım ile kıyaslanmadığından stokastik yaklaşımın sonuçlara etkisinin olup olmadığı anlaşılmamaktadır.

Varkani ve ark. (2011) çalışmasında, RES çıkış gücünün stokastik, elektrik fiyat tahmin değerlerinin deterministik olduğu kabul edilerek İspanya elektrik piyasası şartlarında RES ve PDHES tesislerinin işletimi için stokastik bir optimizasyon modeli önerilmiştir. RES gücü yapay sinir ağı kullanılarak tahmin edilmiş, bu tahminler kullanılarak optimizasyon modelinin girdisi olan senaryolar oluşturulmuştur. Uygulamanın yapıldığı Sotvaneto RES kurulu gücü 17,56 MW'tır. PDHES tesisi türbin ve pompa güçleri sırasıyla 12 ve 10 MW'tır. Tesislerin beraber işletilmeleri durumunda toplam gelirin ayrık işleme kıyasla %2,78 oranında arttığı görülmüştür.

Çalışma incelendiğinde, RES çıkış gücü tahmini için bir yapay sinir ağı modeli kullanıldığı görülmektedir. RES çıkış gücü karmaşık atmosferik olaylara bağımlı rüzgar hız ve yön değerlerine bağımlı olarak değiştiğinden sadece geçmiş güç, rüzgar hız ve yön

verileri kullanarak tahmin üreten bir yapay sinir ağı modelinin yetersiz olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çalışmanın bir diğer zayıf yönünün de stokastik olduğu bilinen fiyat değerlerinin deterministik olarak hesaba katılması olduğu düşünülmektedir.

De la Nieta ve ark. (2013) çalışmasında RES ve PDHES tesislerinin beraber ve ayrı ayrı işletimi için stokastik optimizasyon modelleri oluşturulmuştur. Modeller oluşturulurken elektrik fiyat ve RES çıkış gücü değerlerinin stokastik olduğu kabul edilmiştir. Önerilen yöntemlerin uygulaması 50 MW kurulu güce sahip bir RES ve sırasıyla 28,62 ve 35,77 MW türbin ve pompa kurulu güçlerine sahip bir PDHES üzerinde, Iberian elektrik piyasası şartlarında gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda 2009 ve 2010 yıllarına ait veriler kullanılmıştır. Tesislerin beraber işletilmesi durumunda 2009 ve 2010 yıllarında sırasıyla %3,6 ve % 7,5 oranında gelir artışı olduğu görülmüştür.

Çalışma irdelendiğinde zayıf yönün RES çıkış gücü senaryoları üretme yönteminde olduğu görülmektedir. Kullanılan yöntemde önce rüzgar hızı senaryoları elde edilmiş daha sonra bu hız senaryoları RES çıkış gücüne dönüştürülmüştür. Rüzgar hızı – güç dönüşümü senaryoları gerçek değerlerden uzaklaştıracağı için kullanılan yöntemin çok uygun olmadığı düşünülmektedir.

Literatür taramasının bu bölümünde RES ve PDHES tesislerinin beraber işletimi konusu ile ilgili çalışmalar irdelenmiştir. İrdelenen çalışmaların bazılarında stokastik yaklaşımın (Castronuovo ve Lopes 2004; Anagnostopoulos ve Papantonis 2008; Garcia-Gonzalez ve ark. 2008; Lee 2008; Ummels ve ark. 2008; Faias ve ark. 2012; Jiang ve ark. 2012), bazılarında ise deterministik yaklaşımın (Siahkali ve Vakilian 2009; Siahkali 2011; Dhillon ve ark. 2012; Hu ve ark. 2012; Yıldız ve Şekkeli 2014, 2016b, a), kullanıldığı görülmüştür. Bu iki tesisin işletiminde önemli değerler olan RES çıkış gücünün ve elektrik fiyatlarının stokastik olduğu bilindiğinden deterministik yaklaşımın uygun olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca literatürdeki stokastik yaklaşımlarda kullanılan senaryo üretim yöntemlerinin bazı zayıf yönleri olduğu görülmüştür. Bu sebeplerle tez kapsamında stokastik yaklaşım kullanılmış ve sonuçlar deterministik yaklaşım ile karşılaştırılmış, ayrıca literatürdeki eksikliği kapatmak amacıyla yeni bir senaryo üretim yöntemi önerilmiştir.

1.4 Tezin Organizasyonu

Tez, altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; tez konusu ile ilgili genel bilgiler ve literatür taraması özetleri verilmiş, tezin amaç ve kapsamı detaylı olarak açıklanmıştır. İkinci bölümde; Türkiye’deki elektrik piyasaları kısaca anlatılmıştır. Üçüncü bölümde; elektrik piyasalarında RES ve PDHES tesislerinin nasıl en iyi şekilde işletilebileceği irdelenmiştir. Bu işletim şekilleri için akış diyagramları oluşturulmuş, tez kapsamında kullanılan yaklaşımlar kısaca açıklanmıştır. Dördüncü bölümde; tez kapsamında incelenen tesislerin teknik detayları verilmiştir. Bu tesislerden Çakmak I-II ve Söğütlü HES’lerin bir PDHES’e nasıl dönüştürülebileceği anlatılmıştır. Beşinci bölümde; RES ve PDHES tesislerinin ayrı ayrı ve beraber işletimi için tez kapsamında geliştirilmiş işletim optimizasyonu modelleri anlatılmıştır. Bu optimizasyon modellerinin matematiksel alt yapıları ayrıntılı olarak anlatıldıktan sonra tez kapsamında seçilmiş bir RES ve PDHES tesisine modellerin nasıl uygulandığı açıklanmıştır. Altıncı bölümde; tez kapsamında yapılmış hesaplamaların sonuçları ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Ayrıca konu ile ilgili bir sonraki aşamada yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. TÜRKİYE ELEKTRİK PİYASASI

Türkiye elektrik piyasası, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, tek fiyatlı katı yapıdan serbest piyasa yapısına dönüşmüştür. Elektrik piyasasının serbestleştirilmesindeki amaç enerji üretim - tüketim sürecinin optimum şekilde gerçekleştirilmesidir. Serbest piyasa yapısında piyasa oyuncuları üretim veya tüketimlerini daha esnek piyasa şartlarında değerlendirebilmekte, böylece rekabetçi bir ortam oluşmaktadır.

Elektrik piyasa yapıları ülkelerin kendi özelindeki şartlara göre değişim göstermektedir. Bu şartlar arasında ülkenin ekonomik ve politik durumu, enerji üretiminde kullanılan kaynak çeşitliliği, enerji arz güvenliğinde dışa bağımlılık gibi faktörler bulunmaktadır. Türkiye elektrik piyasası da kendine özel bir karakteristiğe sahiptir. Ülkenin piyasa yapısının analizi geniş kapsamlı bir çalışma gerektirdiğinden ve tez konusu kapsamında olmadığından sadece mevcut piyasa yapısı özetlenecektir.

Mevcut piyasa şartlarında enerji üretim tesisleri ürettikleri enerjiyi dört tip piyasada değerlendirebilmektedir. Bu piyasalar risk sıralamasına göre aşağıdaki gibidir.

- 1) İkili anlaşmalar.
- 2) Gün Öncesi Piyasası (GÖP).
- 3) Gün İçi Piyasası (GİP).
- 4) Dengeleme Güç Piyasası (DGP).

İkili anlaşmalar ile enerji üretim/tüketiminin değerlendirildiği yapıda arz tarafı ile talep tarafı arasında uzun vadeli bir sözleşme söz konusudur. Bu piyasada taraflar, kısa vadeli fiyat dalgalanmalarından etkilenmemektedir. Uzun vadeli ortalama fiyat tahminleri üretim ve tüketim tarafları için yeterlidir. Burada oluşan fiyatlar iki tarafın uzlaştığı fiyatlardır.

İkili anlaşmalar ile üretim/tüketimlerini değerlendirmeyen piyasa oyuncuları GÖP'e yönelmektedir. GÖP'te katılımcılar bir gün gibi daha kısa süreli bir alanda üretim/tüketimlerini değerlendirmektedir. GÖP, ikili anlaşmalara göre gerçek zamana daha yakın olduğundan buradaki fiyat riski daha yüksektir. Fakat GÖP; bir gün sonrası için (arz-talep miktarı bakımından) dengeli bir sistem bıraktığından, şebeke operatörlerine; gerçek fiyatlarla rekabetçi bir ortam sunduğundan, piyasa katılımcılarına faydalı bir yapıdır. Serbest piyasa yapılarında arzu edilen, piyasa katılımcılarının işlemlerini GÖP'te yapmasıdır. Türkiye'nin, piyasa yapısı olarak örnek aldığı Nord Pool (Flatabo ve ark. 2003) piyasasına

bakıldığında katılımcıların yaklaşık %90'ının GÖP'te üretim/tüketimlerini değerlendirdiği görülmektedir.

GÖP'ten arta kalan bazı üretim/tüketimler GİP'te değerlendirilmektedir. GİP yapısı, GÖP ile DGP arasında bir köprü görevi üstlenmektedir. GİP yapısında katılımcılar üretim/tüketimlerini 2 saatlik oldukça kısa bir alanda değerlendirmektedir. GİP, GÖP'e göre gerçek zamana daha yakın olduğundan fiyat riski daha yüksektir. GÖP'teki tekliflerini gerçekleştiremeyen veya GÖP'te piyasa dışına atılan katılımcılar için son şans GİP'tir. Piyasa katılımcıları açısından riski çok yüksek olduğu için GİP sadece mecbur kaldığında tercih edilen bir yapıdır. Şebeke operatörleri açısından da yüksek GİP hacmi istenilmeyen bir durumdur, çünkü yüksek GİP hacmi GÖP'te gün öncesinden yakalanan arz-talep dengesinin bozulduğu anlamına gelmektedir.

İkili anlaşmalar, GÖP ve GİP'ten arta kalan üretim/tüketim dengesizlikleri, DGP ile giderilmektedir. Bu yapıda işlemler artık gerçek zamanda yapılmaktadır. Bu sebeple fiyat riskinin en yüksek olduğu yapı budur. DGP işlemlerinin artması şebeke operatörleri ve piyasa katılımcıları için istenmeyen bir durumdur.

Bu tez çalışmasında incelemeler GÖP şartlarında yapılacaktır. Ülkenin mevcut GÖP yapısı bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

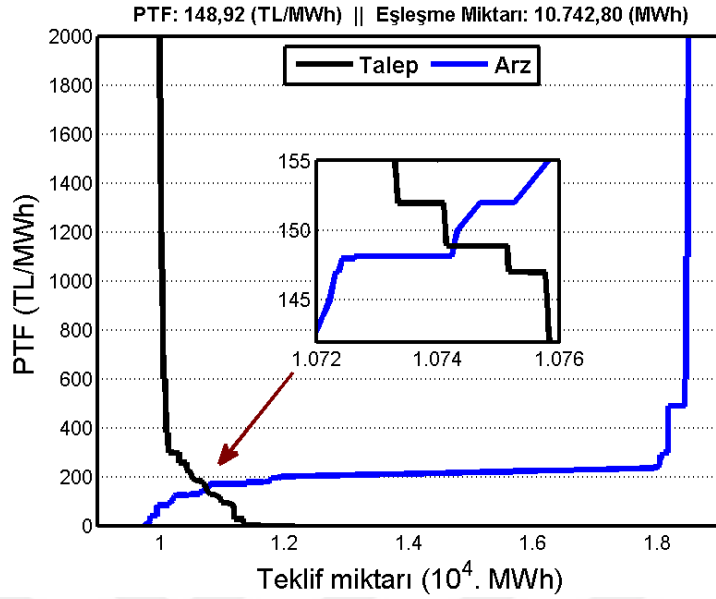
2.1 Gün Öncesi Piyasa

Uzun vadeli ikili anlaşmalarla üretim ve tüketimlerini değerlendirmeyen piyasa katılımcılarını daha kısa vadeli ve riski daha yüksek GÖP piyasasına katılmaktadırlar. GÖP yapısında katılımcılar üretim veya tüketim planlarını (tekliflerini) bir gün öncesinden piyasa mekanizmasına bildirmek zorundadırlar. Bildirilen plan bir gün sonrası için 24 saatlik (24 adet) üretim/tüketim miktar ve fiyat değerlerinden oluşmaktadır. Piyasa mekanizması katılımcıların bildirdiği saatlik teklifleri eşleştirerek Piyasa Takas Fiyatı (PTF) değerini hesaplar. Eşleştirme her saat için yapılmakta ve her saat için bir PTF değeri oluşmaktadır. Eşleştirme işlemi temel olarak şu şekildedir.

1. Üretim teklifleri düşük fiyattan yüksek fiyata doğru sıralanır.
2. Tüketim teklifleri yüksek fiyattan düşük fiyata doğru sıralanır.
3. İki eğrinin kesiştiği noktadaki fiyat PTF'dir. Bu noktadaki miktar ise piyasa takas miktarıdır.

Örnek bir saat için oluşmuş PTF ve piyasa takas miktarı Şekil 2.1'de verilmiştir. Grafik, GÖP katılımcılarının 11.09.2016 günü, saat 15:00 için verdikleri tekliflerin oluşturduğu arz

ve talep eğrileri göstermektedir. Eğrilerin kesişim noktasında PTF ve piyasa takas miktarı oluşmuştur.



Şekil 2.1. GÖP piyasasında PTF ve piyasa takas miktarı oluşumu.

Oluşan PTF üstündeki üretim teklifleri piyasada işlem görmemektedir. PTF altındaki üretim teklifleri ise PTF değerinden işlem görmektedir. Tüketim teklifleri için ise tam tersi bir durum geçerlidir. PTF'den yüksek tüketim değerleri piyasada işlem görürken PTF altındaki teklifler piyasa dışında kalmaktadır.

Piyasa katılımcıları gün öncesinden bildirdikleri teklifleri bir gün sonra gerçekleştirmekten sorumlu tutulmaktadır. Tekliflerinden sapan katılımcılar sebep oldukları dengesizlik miktarı kadar cezalandırılmaktadır. Dengesizlik pozitif yönde ise fazla üretim, SMF ve PTF değerlerinden küçük olanıyla ve 0,97 katsayısıyla çarpılıp toplam gelire eklenmektedir. Dengesizlik yönü negatif ise eksik üretim, SMF ve PTF değerlerinden büyük olanıyla ve 1.03 katsayısıyla çarpılıp toplam gelirden düşülmektedir. Türkiye GÖP şartlarında bir günlük gelir aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$TGG = \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_t \cdot X_t^{teklif} + (X_t^{gercek} - X_t^{teklif}) \cdot \begin{cases} 1,03 \cdot \max(PTF_t, SMF_t) & |X_t^{gercek} < X_t^{teklif}| \\ 0,97 \cdot \min(PTF_t, SMF_t) & |X_t^{gercek} > X_t^{teklif}| \\ 0 & |X_t^{gercek} = X_t^{teklif}| \end{cases} \right\} \quad (2.1)$$

Bir sonraki bölümde RES ve PDHES tesislerinin GÖP şartlarında nasıl işletilebileceği anlatılmıştır.

3. GÜN ÖNCESİ PİYASASINDA RES VE PDHES TESİSLERİNİN İŞLETİLMESİ

Önceki bölümde anlatıldığı gibi GÖP piyasasında tesislerin optimum şekilde işletilmesi, tesis gelirlerini arttıracak ve şebekedeki arz talep dengesini güçlendirecektir. GÖP şartlarında RES ve PDHES tesislerinin ayrı ayrı ve beraber işletimi bölümün ilerleyen kısımlarında açıklanmıştır.

3.1. RES Tesisinin Gün Öncesi Piyasasında İşletilmesi

GÖP'e katılan bir RES tesisi bir gün sonrası için oluşturduğu (24 adet saatlik üretim miktarı ve fiyatından oluşan) teklifleri piyasa mekanizmasına bildirmek zorundadır. Tesis, bildirdiği saatlik üretim miktarlarından sapar ise bir önceki bölümde açıklandığı gibi sebep olduğu dengesizlik miktarı kadar cezalandırılmaktadır. Bu sebeple GÖP'e katılan bir tesis bir gün sonrası için bildirdiği üretim planından emin olmalıdır. Tekliflerdeki ikinci kritik değer ise bildirilen fiyattır. Oluşacak PTF değerinden yüksek verilmiş teklifler piyasa dışında kalacaktır. Tesisler teklif fiyatını belirlerken ürettikleri enerjinin maliyetini göz önünde bulundurmaktadırlar. Geleneksel enerji kaynakları kullanan tesislerde bu maliyetin büyük bölümünü enerji kaynağı oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanan tesislerde ise kaynak maliyeti sıfır olduğundan, fiyat belirlenirken sadece işletmenin personel ve bakım giderleri hesaba katılmaktadır. Bu sebeple RES ve HES gibi tesisler geleneksel tesislere göre daha düşük fiyat teklifi verebilmektedir.

GÖP'e katılan RES tesisleri teklif fiyatı belirleme konusunda sorun yaşamamaktadırlar. Fakat rüzgâr enerjisi depolanamayan ve tahmin edilmesi zor bir kaynak olduğundan bu tesisler, tekliflerindeki enerji miktarını belirleme konusunda zorlanmaktadırlar. Mevcut rüzgâr enerjisi tahmini sistemlerinin hataları RES tesislerinin GÖP'te dengesizliğe düşmelerine ve ceza ödemelerine sebep olmaktadır. Bu durum, son yıllarda, kısa süreli rüzgâr enerjisi tahmini konusunu, üzerinde çalışmalar yapılan, popüler bir konu haline getirmiştir (Wang ve ark. 2011).

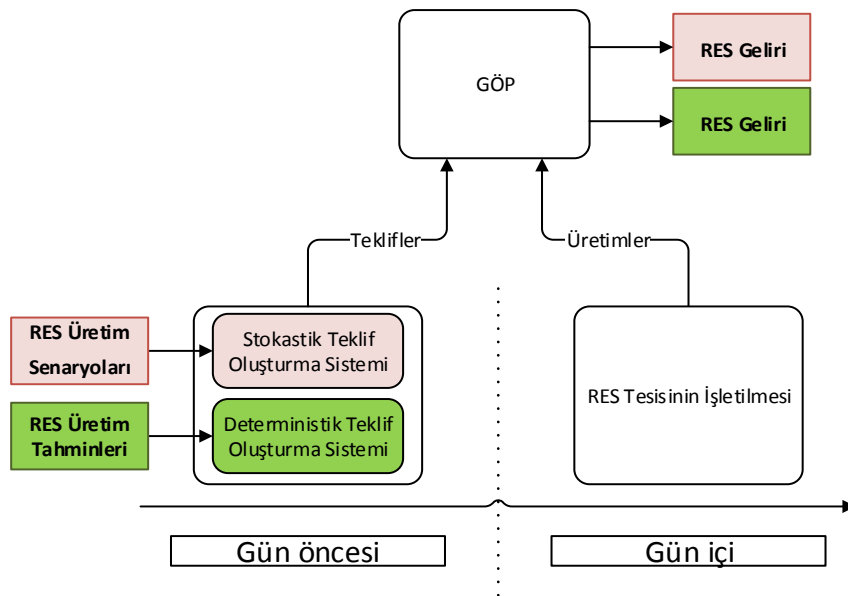
Bir RES'in bir gün sonra üreteceği saatlik enerjiyi tahmin edebilmek için rüzgâr hız ve yön tahminlerine ihtiyaç vardır. Ayrıca rüzgâr hız ve yön tahminlerinden santral çıkış gücünü elde edebilmek için santral modellerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla oluşturulan santral modelleri tam olarak çıkış gücünü veremediklerinden tahminleri gerçek değerlerden uzaklaştırabilmektedir. Ayrıca rüzgâr hızı ve yönü karmaşık atmosferik olaylara bağımlı olarak değiştiklerinden, modellenmesi ve tahmin edilmesi oldukça zor büyüklüklerdir. Bu sebeple rüzgâr hızı ve yönü tam olarak tahmin edilememektedir. Rüzgâr

tahminindeki hatalar, RES üretim tahminlerinde daha büyük hatalara sebep olmaktadır. Fakat bu konuda çalışma yapan araştırmacılar, geliştirdikleri modeller tam olarak santral çıkış gücünü tahmin edemese de elde ettikleri tahminlerin bir güvenilirlik seviyesine sahip olduğunu iddia etmektedirler.

Yukarıda anlatılan durumlar göz önünde bulundurularak; bu çalışmada, GÖP'e katılan RES tesisleri için teklif oluşturma konusunda aşağıda sıralanmış iki yöntem kullanılmıştır.

- 1) **Deterministik yöntem:** Bu yöntemde teklifler doğrudan RES üretim tahminleri kullanılarak oluşturulmuştur.
- 2) **Stokastik yöntem:** Bu yöntemde teklifler olası RES üretim senaryoları kullanılarak oluşturulmuştur. Üretim senaryoları tez kapsamında önerilen bir yöntem ile oluşturulmuştur(Yildiz ve ark. 2017).

Oluşturulan modellerinin uygulama süreçlerini temsil eden akış şeması aşağıdaki şekilde verilmiştir. Uygulama süreci temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda teklifler oluşturulmakta ve GÖP mekanizmasına bildirilmektedir. Deterministik model, doğrudan RES üretim tahminlerini; stokastik model, olası RES üretim senaryolarını kullanarak teklifleri oluşturmaktadır. İkinci kısımda ise tesisin gerçekleştirdiği üretim değerleri GÖP mekanizmasına bildirilmektedir. Süreç sonunda tesis gelirleri elde edilmektedir.

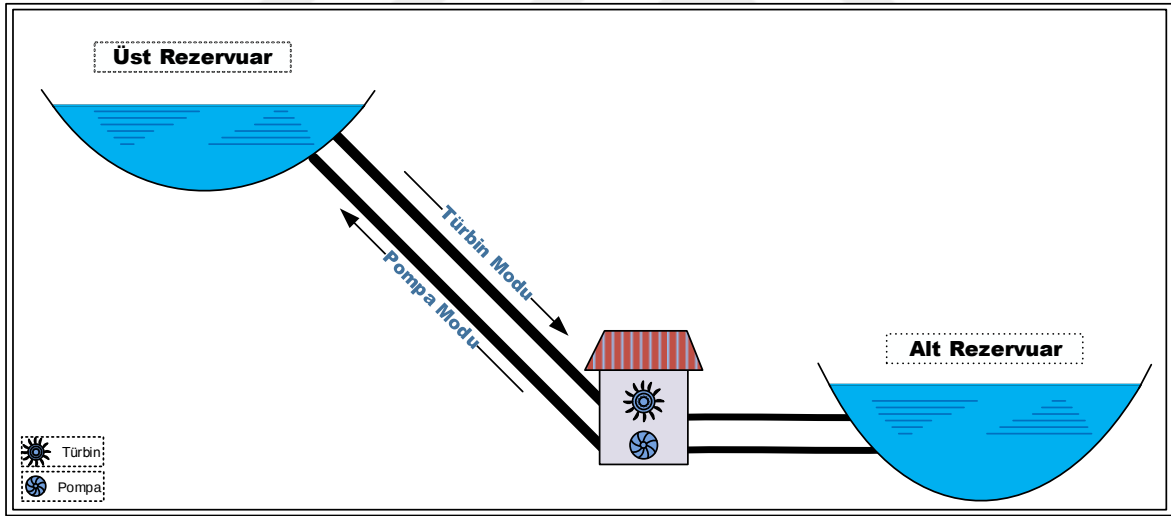


Şekil 3.1. GÖP'te RES tesisi işletiminin şematik gösterimi.

Tez kapsamında incelenen RES tesisi için oluşturulan deterministik ve stokastik işletim modelleri Bölüm 5.4’te verilmiştir. Ayrıca stokastik modelde kullanılmak üzere tez kapsamında geliştirilmiş RES çıkış gücü senaryosu oluşturma yöntemi Bölüm 5.3’te verilmiştir.

3.2. PDHES Tesisinin Gün Öncesi Piyasasında İşletilmesi

Türkiye’de uygulaması bulunmayan PDHES tesisleri, elektrik şebekelerinde enerji depolama amacıyla kullanılmaktadır. Bir PDHES tesisi, aralarında yükseklik kotu farkı bulunan iki adet su rezervuarı ile santral binasına yerleştirilmiş pompa ve türbin ünitelerinden oluşmaktadır. Tesiste enerji depolanacak ise alt rezervuardaki su, pompa üniteleri yardımı ile üst rezervuara pompalanmaktadır. Böylece elektriksel enerji, potansiyel enerji formunda depolanmaktadır. Depolanmış enerjiye ihtiyaç duyulduğunda ise üst rezervuardaki su, türbin ünitelerine bırakılarak elektriksel enerji elde edilmektedir. Bir PDHES’in basit şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 PDHES tesisi şematik gösterimi.

PDHES tesislerinin rezervuar ve kurulu güç kapasiteleri ihtiyaçlar doğrultusunda değişmektedir. Enerji depolama kapasitesi ihtiyaca göre mevsimlik, aylık, günlük olabilmekte, kurulu güç ise anlık güç ihtiyacına göre değişebilmektedir. Bu tez çalışmasında, bir günlük işletim için enerji depolayabilecek bir PDHES tesisi incelenmiştir. Bu PDHES tesisinin, çalışma kapsamında incelenen üç adet nehir tipi HES’in, PDHES’e dönüştürülmesi

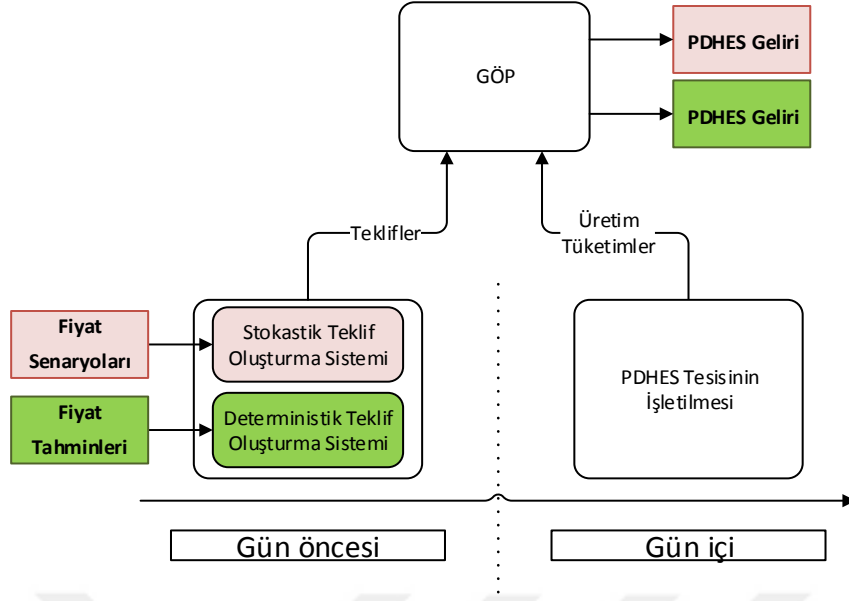
ile oluşturulabileceği düşünülmüştür. İncelenen HES'lerin ve önerilen PDHES'in detayları Bölüm 4'te verilmiştir.

GÖP'e katılan PDHES tesisleri, üretim veya tüketim miktar ve fiyatlarından oluşan tekliflerini bir gün öncesinden piyasa mekanizmasına bildirmektedirler. Teklifler ile oluşturulan işletim senaryolarındaki amaç düşük fiyattan enerji satın alarak tesiste depolamak ve depolanmış enerjiyi yüksek fiyattan satmaktır. Böylece arz fazlası enerji tesiste depolanıp yüksek talep oluşan saatlere taşınmakta ve şebekedeki arz-talep dengesine tesis yardımcı olmaktadır.

Tesisin hangi zaman aralığında ne miktarda üretim/tüketim yapacağı ise bir gün sonrası için yapılan fiyat tahminleri temel alınarak belirlenmektedir. Fiyat tahmini konusunda, tez kapsamında yapılan çalışmalar, Türkiye'deki GÖP şartlarında belirli doğrulukta fiyat tahmini yapılabileceğini göstermiştir. Fakat GÖP mekanizmasındaki kırılganlığın bazen tahmin hatalarının arttırdığı da görülmüştür. Bu sebeple PDHES tesisinin optimal işletilmesi amacıyla deterministik ve stokastik olmak üzere iki optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Yöntemler, kısa açıklamaları ile beraber aşağıda sıralanmıştır.

- 1) **Deterministik yöntem:** Bu yöntemde elektrik fiyat değerlerinin deterministik olduğu kabul edilmiş ve teklifler doğrudan fiyat tahminleri kullanılarak oluşturulmuştur.
- 2) **Stokastik yöntem:** Bu yöntemde elektrik fiyat değerlerinin stokastik olduğu kabul edilmiş ve teklifler olası fiyat senaryoları kullanılarak oluşturulmuştur. Fiyat senaryoları tez kapsamında önerilen bir yöntem ile oluşturulmuştur(Yildiz ve ark. 2017).

Oluşturulan modellerinin uygulama süreçlerini temsil eden akış şeması aşağıdaki şekilde verilmiştir. Uygulama süreci temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda optimizasyon modelleri kullanılarak teklifler oluşturulmakta ve GÖP mekanizmasına bildirilmektedir. İkinci kısımda tesis işletilmekte ve üretim/tüketim değerleri GÖP mekanizmasına bildirilmektedir. Süreç sonunda tesis gelirleri elde edilmektedir.



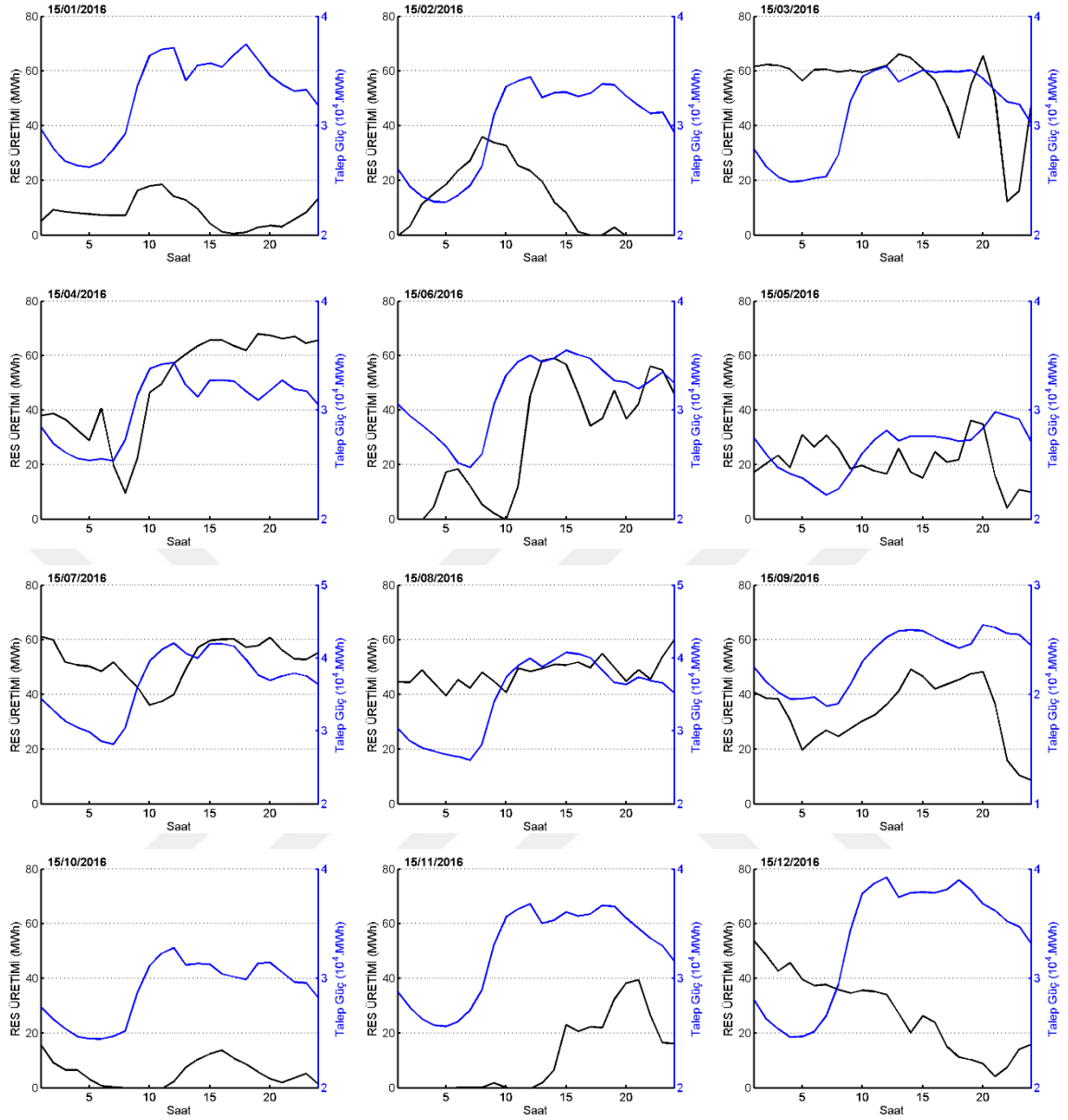
Şekil 3.3 GÖP'te PDHES tesisi işletiminin şematik gösterimi.

Önerilen PDHES tesisi için tez kapsamında oluşturulan deterministik ve stokastik optimizasyon modelleri Bölüm 5.5'te detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca stokastik modelde kullanılmak üzere tez kapsamında önerilen fiyat senaryosu oluşturma yöntemi Bölüm 5.3'te açıklanmıştır.

3.3. PDHES ve RES Tesislerinin Gün Öncesi Piyasasında İşletilmesi

Bu bölümden önceki iki bölümde RES ve PDHES tesislerinin GÖP'te işletimi konusu irdelenmiştir. Bu bölümde RES ve PDHES tesislerinin GÖP'te beraber bir tesis gibi işletilmesi durumu incelenecektir.

Bu iki tesisin beraber işletilmesindeki amaç, değişken ve kontrol edilemez olan RES enerji üretimlerinin daha düzenli hale getirilmesidir. Elektrik şebekelerindeki günlük talep güç eğrileri ile RES üretim değerleri çoğu zaman farklı trendler izlemektedir. Bu durum, yüksek kapasitede RES kurulu gücüne sahip şebeke sistemlerinde arz-talep dengesini sağlamayı zorlaştırmaktadır. Tez kapsamında incelenen RES tesisi üretim değerlerinin ve Türkiye elektrik şebekesindeki talep güç değerlerinin oluşturduğu, günlük eğriler aşağıdaki şekilde verilmiştir.



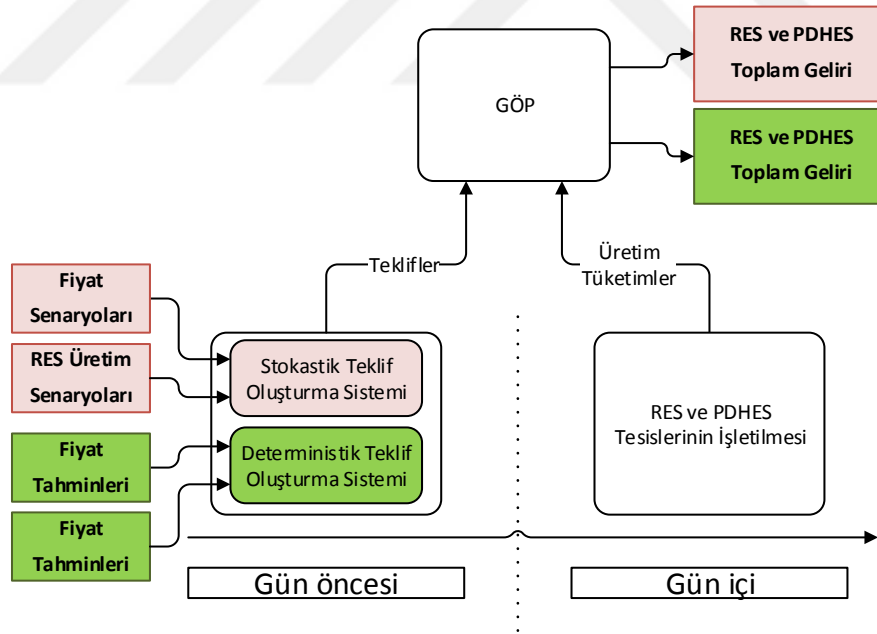
Şekil 3.4. RES tesisi çıkış gücü ve şebeke talep gücü değerlerinin oluşturduğu eğriler.

RES üretimlerinin arz-talep dengesine olan bozucu etkisinin giderilmesi konusunda yapılan çalışmalar, bu tesisler ile beraber çalışacak bir enerji depolama sistemine ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur (Ayodele ve Ogunjuyigbe 2015). Büyük kapasitede enerji depolama konusunda PDHES tesislerinin alternatiflerine kıyasla daha ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilir oldukları bilinmektedir (Luo ve ark. 2015). Bu tez çalışmasında RES ve PDHES tesislerinin GÖP şartlarında beraber optimal işletilmesi amacıyla iki tür optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon modellerinin amacı tesislerin toplam gelirinin artırılmasıdır. Gelir artışı RES üretimlerinin yüksek talep oluşan (yüksek fiyatların olduğu) saatlere kaydırılması ile gerçekleşmektedir. Böylece RES üretimlerinin

oluşturduğu eğri talep eğrisine yaklaştırılmış ve RES üretimlerinin arz-talep dengesine olan bozucu etkisi azaltılmış olacaktır. Modellerden biri deterministik, diğeri stokastik yaklaşım ile oluşturulmuştur. Yöntemlerin kısa açıklamaları aşağıda sıralanmıştır.

- 1) **Deterministik yöntem:** Bu yöntemde teklifler doğrudan fiyat tahminleri ve rüzgâr enerjisi üretimi tahminleri kullanılarak oluşturulmuştur.
- 2) **Stokastik yöntem:** Bu yöntemde teklifler olası fiyat ve rüzgâr enerjisi üretimi senaryoları kullanılarak oluşturulmuştur. Fiyat ve rüzgâr enerjisi üretim senaryoları tez kapsamında önerilen yöntemler ile oluşturulmuştur(Yildiz ve ark. 2017).

Oluşturulan modellerinin uygulama süreçlerini temsil eden akış şeması aşağıdaki şekilde verilmiştir. Uygulama süreci temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda optimizasyon modelleri kullanılarak teklifler oluşturulmakta ve GÖP mekanizmasına bildirilmektedir. İkinci kısımda tesisler işletilmekte ve gerçekleşen üretim/tüketim değerleri GÖP mekanizmasına bildirilmektedir. Süreç sonunda tesis gelirleri elde edilmektedir.



Şekil 3.5 GÖP'te RES ve PDHES tesislerinin beraber işletiminin şematik gösterimi.

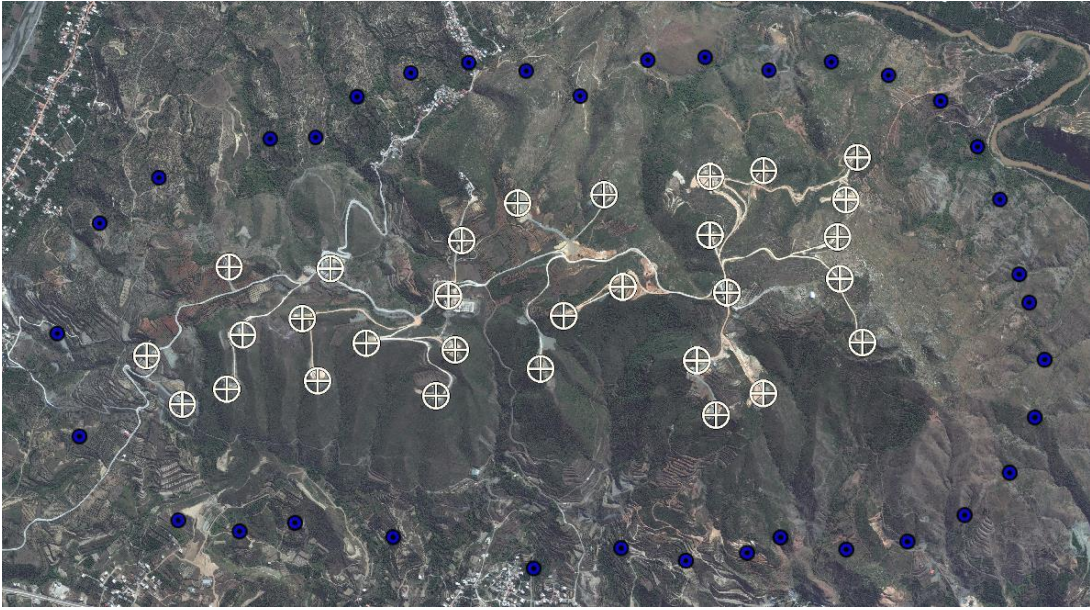
RES ve PDHES tesisi için tez kapsamında oluşturulan deterministik ve stokastik optimizasyon modelleri Bölüm 5.6'da ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca stokastik modelde kullanılmak üzere tez kapsamında önerilen fiyat ve rüzgâr enerjisi üretim senaryosu oluşturma modelleri Bölüm 5.3'te verilmiştir.

4. TEZ KAPSAMINDA İNCELENEN TESİSLER

Tez kapsamında Türkiye enterkonnekte elektrik şebeke sistemine bağlı bir RES ve üç nehir tipi HES (Çakmak I-II ve Söğütlü HES'ler) incelenmiştir. Çakmak I-II ve Söğütlü HES'lerin bazı eklemeler yapılarak bir PDHES'e dönüştürülebileceği ve RES tesisi ile beraber işletilebileceği düşünülmüştür.

4.1. RES Tesis

RES tesisi, Hatay ili sınırları içerisinde bulunmaktadır. Santral bölgedeki rüzgârdan faydalanarak enerji üretmek amacıyla tesis edilmiştir. Tesisin uydu görünümü aşağıdaki şekilde verilmiştir. Beyaz artılar türbin yerleşimlerini, mavi noktalar santral köşe koordinatlarını göstermektedir.



Şekil 4.1. RES tesis uydu görünümü.

Tesisin bazı karakteristik bilgileri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

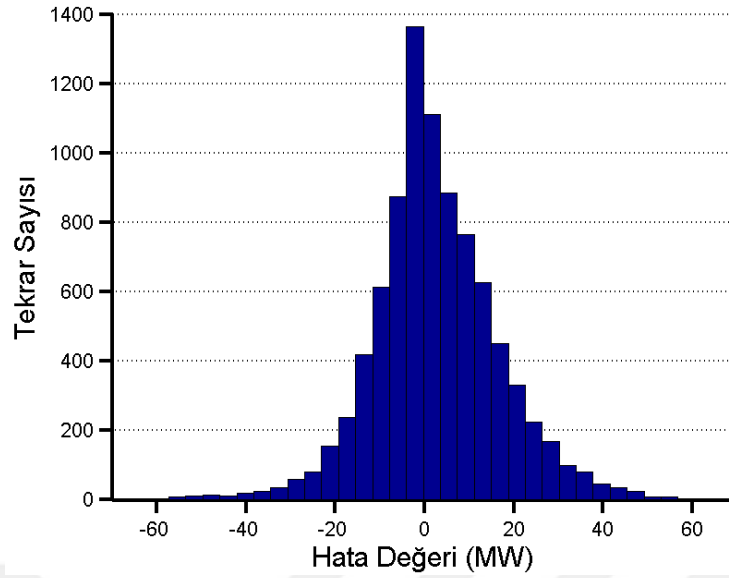
Çizelge 4.1 RES tesisi özet karakteristik bilgileri

Tesis Türü	RES
Toplam Kurulu Güç (MW)	76
Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)	7,6
Ünite Sayısı (m)	30
Kule Yüksekliği (m)	100,85,75
Rotor Çapı (m)	100
Süpürme Alanı (m²)	7854
Ünite Gücü (MW)	2,5
Çalışma Rüzgâr Hızı (m/s)	3
Çalışma Rüzgâr Hızı (m/s)	25
Şebeke Bağlantı Noktası	Antakya TM III

Tesis, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamında oluşturulan piyasada ürettiği enerjiyi satmaktadır. Bu piyasada teşvik amacıyla, yenilenebilir enerji kaynaklı santrallere 10 yıl süreyle alım garantisi verilmiştir. RES'ler için YEKDEM alım fiyatı 1 MWh için 73 Amerikan Doları'dır. 2016 yılına kadar YEKDEM piyasasına katılan santraller gün öncesi planlama aşamasında bildirdikleri üretim planından sorumlu tutulmamışlardır. 2016 yılında YEKDEM yönetmeliğinde yapılan bir değişiklik ile YEKDEM santralleri azda olsa (%2) oluşturdukları dengesizliklerden dolayı cezalandırılır hale getirilmiştir. Mevcut GÖP piyasası dengesizlik ceza şartları ve oluşan alım fiyatları göz önüne alındığında YEKDEM'in halen RES'ler için daha cazip olduğu görülmektedir.

YEKDEM kapsamında teşvik olarak verilen 10 yıllık alım garantisi süresi dolduğunda RES tesisi ürettiği enerjiyi ikili anlaşma yoluyla veya GÖP piyasasında satmak zorunda kalacaktır. Bu durumda santral gün öncesinden bildirdiği üretim planından sorumlu olacak ve sebep olduğu dengesizliklerden dolayı GÖP şartlarında cezalandırılacaktır. Ayrıca santralin sisteme aktardığı enerji GÖP fiyatlarından satın alınacaktır.

YEKDEM dışında kalacak ve ürettiği enerjiyi GÖP'te satacak bir RES için üretim tahminlerinin oldukça önemli olacağı açıktır. Bu durum göz önüne alınarak şebeke operatörü ve RES işletmecilerinin faydalanması amacıyla Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından bir Rüzgar Enerjisi İzleme ve Tahmin Merkezi (RİTM) kurulmuştur(Terciyanlı ve ark. 2014). Bu merkezde santral bazlı rüzgar enerjisi üretim tahminleri yapılmakta ve santrallere gün öncesinden bildirilmektedir. Bu tahminler tesis işletmecilerine yardımcı olsa da tahmin hatalarından kaynaklı enerji dengesizlik miktarları tesis gelirlerini olumsuz yönde etkileyecektir. RES tesisi için 2016 yılında oluşmuş RİTM tahmin hatalarının histogram grafiği aşağıdaki şekilde verilmiştir.



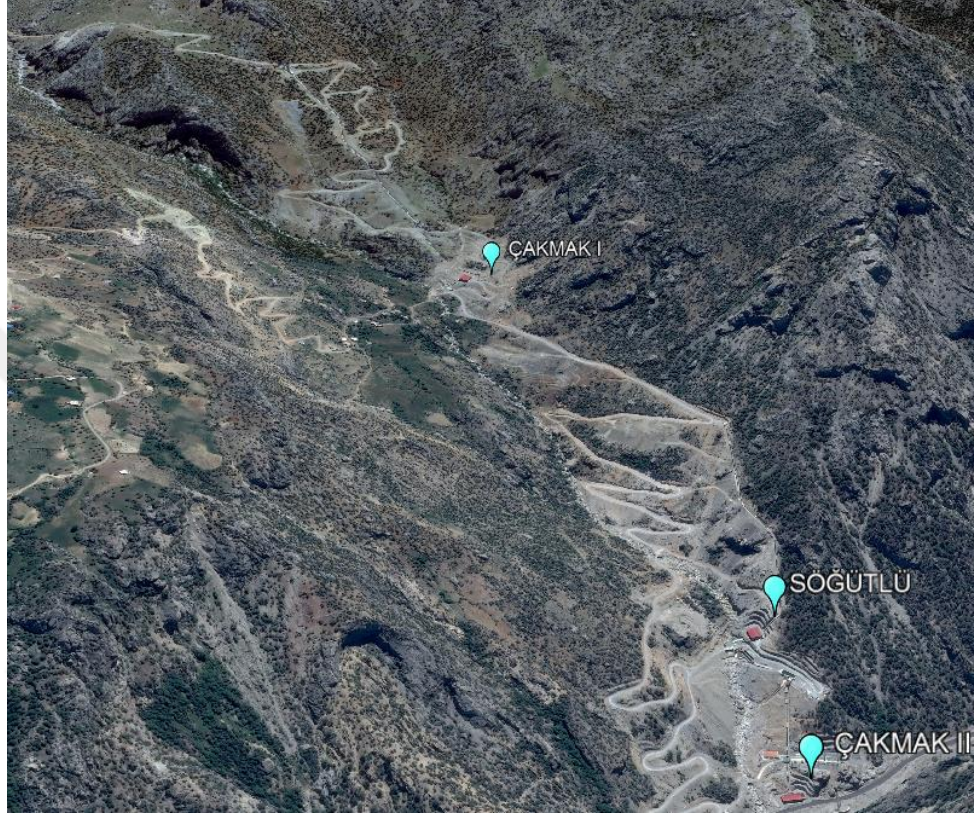
Şekil 4.2. RES tesisi 2016 yılı RİTM tahmin hataları

Histogram grafiği incelendiğinde hataların ± 20 MW aralığında yoğunlaştığı ve hata dağılımının simetrik olmadığı görülmektedir. 20 MW'lık hata 76 MW kurulu güce sahip RES tesisi için oldukça yüksektir. Bu büyüklükteki hatalar GÖP piyasasında yüksek dengesizlik cezalarına sebep olacaktır. Tesisin 2016 yılı için GÖP ve YEKDEM piyasalarındaki gelirleri ve tahmin hatalarından kaynaklanan dengesizlik cezaları ileriki bölümlerde verilmiştir.

Bu çalışmada, RES tesisinin maruz kalacağı dengesizlik cezalarını azaltmak ve ürettiği enerjiyi yüksek talep güç oluşan saatlere taşımak amacıyla bir PDHES tesisinin faydalı olacağı düşünülmüştür. Bu kapsamda Kahramanmaraş ilinde tesis edilmiş üç adet nehir tipi HES'in PDHES'e dönüştürülebileceği düşünülmüştür. Bu HES'ler incelenmiş, PDHES'e dönüştürülmeleri için gereken ilave ekipmanlar ve PDHES'in kurulu güç ve enerji depolama kapasitesi belirlenmiştir. İncelenen HES'lerin bazı teknik detayları bir sonraki bölümde verilmiştir.

4.2. akmak I-II ve Sütlü HES

akmak I-II ve Sütlü HES tesisleri, Kahramanmaraş ili sınırları içerisinde, Sütlüboynu Deresi üzerinde bulunmaktadır. Tesisler, havzada biriken kar ve yağmur suyunu kullanarak enerji üretmektedir. Santrallerin uydu fotoğrafı görünümü aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.3 akmak I-II ve Sütlü HES uydu görünümü.

Tesislerin tanıtım tabelaları ve bazı karakteristik bilgilerinin özetleri Şekil 4.4'te ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

ATASER ELEKTRİK ÜRETİM ve İNŞAAT A.Ş	
ÇAKMAK REGÜLATÖRÜ ve HES (ÇAKMAK-1)	
KURULU GÜÇ	: 2 x (9,375 MWe) 18,75 MWe
ÜNİTE	: PELTON
NET DÜŞÜ	: 356 MT

ATASER ELEKTRİK ÜRETİM ve İNŞAAT A.Ş	
ÇAKMAK REGÜLATÖRÜ ve HES (ÇAKMAK-2)	
KURULU GÜÇ	: 2 x (3,61 MWe) + 1 x (1,41 MWe) = 8,63 MWe
ÜNİTE	: YATAY FRANÇİS
NET DÜŞÜ	: 129 MT

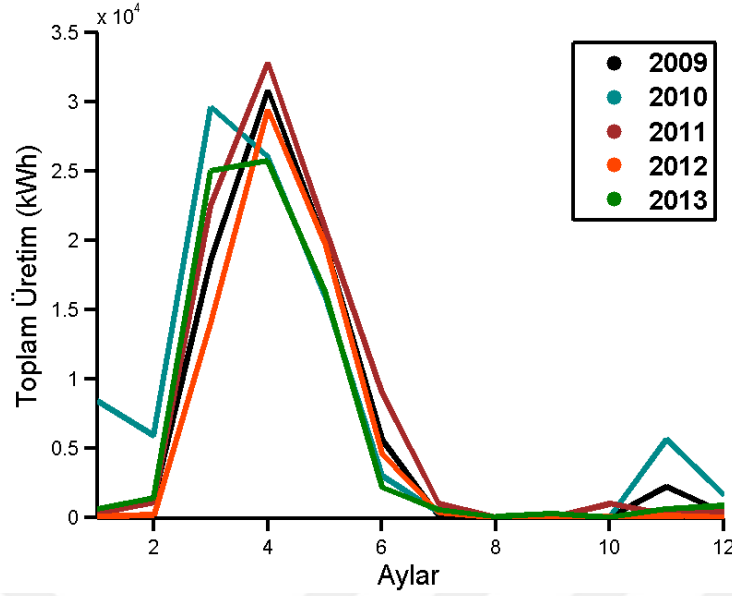
SU-EN ENERJİ ELEKTRİK ÜRETİM A.Ş	
SÖĞÜTLÜ HİDROELEKTRİK SANTRALİ	
KURULU GÜÇ	: 2 x (9,61 MWe) 18,32 MWe
ÜNİTE	: PELTON
NET DÜŞÜ	: 356 MT

Şekil 4.4 Çakmak I-II ve Söğütlü HES tesis tanıtım tabelaları

Çizelge 4.2. Çakmak I HES özet Karakteristik bilgileri

Tesis Adı	Çakmak I	Söğütlü	Çakmak II
Santral Binası Tipi	Yerüstü Santrali	Yerüstü Santrali	Yerüstü Santrali
Toplam Kurulu Güç (MW)	18,75	18,32	8,63
Normal Su Seviyesi (m)	1553	1174	787
Brüt Düşü (m)	371	371	132
Net Düşü (m)	356	356	129
Türbin Eksen Kotu (m)	1182	803	651
Proje Debisi (m ³ /s)	6,0	6,0	7,8
Türbin Tipi	Pelton Düşey eksenli	Pelton Düşey eksenli	Francis Yatay Eksenli
Ünite Adedi	2	2	3

Havzadaki senelik su debisi değerleri çok düşük olmasına rağmen YEKDEM kapsamında verilen teşvik sayesinde tesisler rantabıl hale gelmiştir. Teşvik süresi olan 10 yıl sonunda tesisler destekleme dışında kalacak ve gelirleri büyük oranda düşecektir. Bu tesislere bazı eklemeler yapılarak PDHES'e dönüştürülürler ise susuz geçen mevsimlerde tesisler enerji depolama sistemi olarak çalıştırılabilir ve gelirleri büyük oranda arttırılabilir. Şekil 4.5'te santrallerin projelendirilmesinde kullanılan hesaplamalar sonucu elde edilen üretim değerleri verilmiştir.



Şekil 4.5 Çakmak I-II ve Söğütlü HESler için hesaplanmış beş yıllık üretim değerleri

Yukarıdaki şekilden de anlaşılabileceği gibi santraller yılın yaklaşık üç ayında üretim yapabilmektedir. Güncel GÖP fiyatları göz önüne alındığında toplam gelirin oldukça düşük olacağı anlaşılmaktadır. Tesislerin PDHES'e dönüştürülerek tek başına ve bir RES tesisi ile beraber işletilmesinin faydaları ileriki bölümlerde yapılan hesaplamalarla ortaya koyulmuştur.

PDHES ve RES tesislerinin GÖP şartlarında beraber işletilebilmesi için bir gün sonrasının RES üretim ve GÖP fiyat tahminlerine ihtiyaç vardır. RES üretim tahminleri RİTM'den alınmıştır. Türkiye elektrik piyasasında belirli bir fiyat tahmin mekanizması olmadığı için bir fiyat tahmin yöntemi geliştirilmiş, yöntemin ve performansının uygunluğu şebeke operatörü olan Türkiye Elektrik İletim A.Ş. bünyesindeki Milli Yük Tevzi Merkezi personelleri ile tartışılmıştır. Geliştirilen fiyat tahmin yönetimi ve sonuç değerlendirmeleri Bölüm 5.1'de verilmiştir.

4.3. Çakmak I-II ve Söğütlü HES Tesislerinin PDHES'e Dönüştürülmesi

PDHES tesisleri, kabaca aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır.

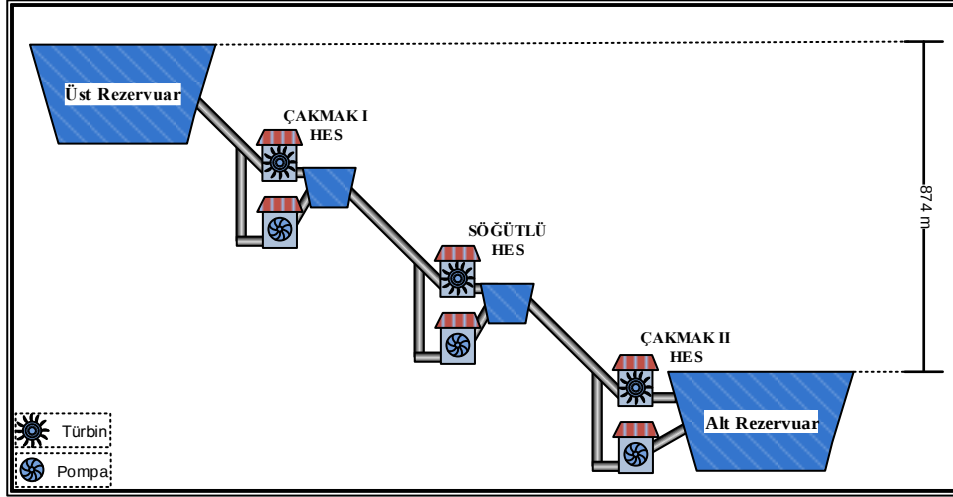
- 1) Aralarında yükseklik kotu farkı bulunan iki adet su rezervuarı.
- 2) Pompa ve türbin üniteleri ve ünitelerin yerleştirildiği santral binası.
- 3) Üniteler ile rezervuar arasındaki bağlantıyı sağlayan cebri borular.

PDHES tesisi kurulurken, yukardaki bileşenlerin hepsi yeniden oluşturulabileceği gibi mevcut bir HES'e bu bileşenlerin bazıları eklenerek de PDHES oluşturulabilmektedir.

Bu çalışmada Çakmak I-II ve Söğütlü nehir tipi HES’lerin bir PDHES’e dönüştürülmesi önerilmiştir. İncelenen HES’ler aynı dere üzerinde bulunduklarından ve yaklaşık 850 metrelik bir düşüyü paylaştıklarından çok yakın mesafelerde tesis edilmişlerdir. Bu yüksek düşü tesis edilecek rezervuar hacmini küçülteceğinden avantaj sağlamaktadır. PDHES’e dönüşüm için iki alternatif senaryo önerilmiştir. Her iki senaryoda da iki adet su rezervuarına ihtiyaç vardır. Senaryolar, pompa ünitesi sayısı ve cebri boru kullanımı bakımından birbirinden ayrılmaktadır.

-
- Üst Rezervuar
- ÇAKMAK I HES
- SÖĞÜTLÜ HES
- ÇAKMAK II HES
- Alt Rezervuar
- 87.4 m
- Türbin
- Pompa

2) **Üç pompa ünitesi kullanılan senaryo:** Bu senaryoda, tesislerdeki santral binalarına paralel üç pompa istasyonunun eklenmesi önerilmiştir. Pompa istasyonları bir birine seri olarak çalışacak ve HES'lerin mevcut cebri borularını kullanacaklardır. Bu senaryo ile oluşacak PDHES tesisinin şematik gösterimi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.7. Üç pompalı senaryo ile oluşacak PDHES tesisinin şematik gösterimi

Önerilen senaryolar ilk yatırım ve işletim maliyetleri açısından kıyaslandığında:

1) 1. senaryoda tek pompa ünitesi kullanıldığından, ünite kurulu gücü 2. senaryoya kıyasla artacaktır. Ünite kurulu gücü arttığında maliyet düşeceğinden, bu senaryodaki pompa ünitesi maliyeti düşük olacaktır. Fakat ilave cebri boruların kullanılıyor olması bu senaryonun maliyetini arttırmaktadır.

2) 2. senaryoda pompa ünitesi kurulu gücü düştüğünden 1. senaryoya kıyasla pompa istasyonu toplam maliyeti yüksek olacaktır. Fakat cebri boru ilavesi olmadığından 1. Senaryoya kıyasla maliyet açısından avantaj sağlanacaktır. Ancak üç ayrı pompa istasyonunun bulunması işletme ve bakım giderlerini arttıracaktır.

Yukarıdaki kıyaslamalar belirtildikten sonra uygulama aşamasında malzeme temini maliyetleri ve süreleri değişkenlik gösterebileceğinden tesisin kurulum aşamasında maliyetlerin tekrar değerlendirilmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Kurulacak PDHES tesisi geliri rezervuar aktif hacminden etkileneceği için tesis kurulumu yapılırken doğru hacim değeri seçilmesi de önemlidir. Rezervuar hacmi değerinin küçük seçilmesi tesis gelirini düşürecektir. Hacim değerinin tesis ihtiyacında büyük seçilmesi ise yatırım maliyetini arttıracaktır. Bu konuda ışıktutması açısından tesis geliri ile rezervuar kapasiteleri arasındaki ilişkiyi anlatan bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bölüm 5.5.1’de duyarlılık analizi sonuçları verilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde tez kapsamında önerilmiş ve kullanılmış yöntemlerin uygulamaları anlatılmıştır.

5. PDHES VE RES TESİSLERİNİN OPTİMAL İŞLETİM UYGULAMASI

Bu bölümde RES ve PDHES tesislerinin beraber ve ayrı ayrı optimal şekilde işletiminin nasıl gerçekleştirilebileceği irdelenecektir. Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi tez kapsamında, ayırık ve beraber çalışma durumları için deterministik ve stokastik olmak üzere toplam 6 adet işletim optimizasyonu modeli geliştirilmiştir. Bu modellerden deterministik olanlar girdi olarak fiyat ve RES gücü tahminlerini kullanmaktadır. Bu sebeple ülke şartlarında erişilebilecek tahminler araştırılmıştır. RES gücü tahminlerinin Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü bünyesinde kurulmuş bir tahmin merkezinden temin edilebileceği tespit edilmiştir. Fiyat tahmini olarak ülke çapında kabul görmüş bir tahmin mekanizması bulunmadığından tez kapsamında bir fiyat tahmin modeli geliştirilmiştir. İşletim uygulaması için oluşturulmuş stokastik optimizasyon modellerinde ise girdi olarak fiyat ve RES gücü senaryolarına ihtiyaç vardır. Bu senaryolar yine tez kapsamında önerilmiş senaryo oluşturma yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modelleri ve senaryo oluşturma yöntemleri, uygulama ayrıntıları ile beraber bu bölümün ilerleyen kısımlarında açıklanmıştır. Her uygulama sonrası elde edilen sonuçlar kısaca alt bölüm sonlarında verilmiştir.

Uygulama çalışmalarında bir AMD A8 6410 APU işlemciye ve 4GB belleğe sahip kişisel bilgisayar kullanılmıştır. Optimizasyon modelleri MATLAB yazılım geliştirme ortamında oluşturulmuştur. Modellerin çözümü için ise IBM kuruluşu tarafından geliştirilmiş CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. Bir sonraki bölümde tez kapsamında geliştirilmiş fiyat tahmin modeli açıklanmıştır.

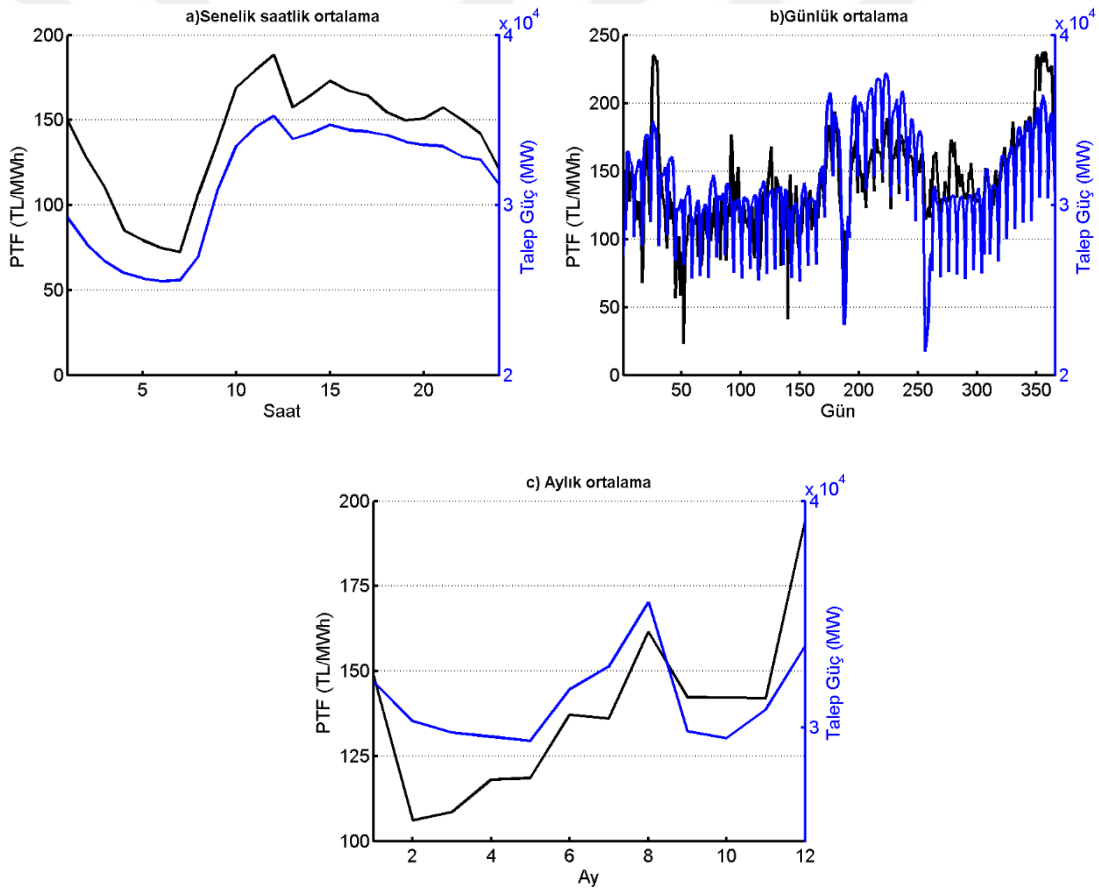
5.1. Fiyat Tahmini

GÖP'te iki tür fiyat oluşmaktadır. Bunlardan biri katılımcıların gün öncesi üretim ve tüketim tekliflerinin eşleştirilmesi sonucu oluşan PTF'dir. Piyasa katılımcıları gün öncesinden bildirdikleri üretim veya tüketim planından sapmazlar ise dönem sonunda bu fiyattan gelir veya gider hesaplamaları yapılmaktadır. GÖP'te oluşan ikinci fiyat ise SMF'dir. Bu fiyat piyasa işlem günü içerisinde oluşan dengesizliklerin giderilmesi için verilen yük al/at tekliflerine bağlı olarak değişmektedir. SMF tahmini, sistem dengesizliklerinin ve yük al/at tekliflerinin tamamen belirsiz süreçlere bağımlı olmasından dolayı tartışmalı bir konudur. SMF tahmini, bu tez kapsamında incelenmemiştir. Tez çalışmasında PTF değerleri için bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Modelde çok girişli ve tek çıkışlı bir yapay sinir ağı kullanılmıştır. Model girişlerinin neler olabileceği üzerinde

durulmuş, bu amaçla PTF değerlerini etkileyen toplam talep güç ve üretim değerleri gibi büyüklükler incelenmiştir.

PTF'lerin sistemdeki talep güce bağımlı olarak gün içinde değişim gösterdiği bilinmektedir. Talep gücün artması durumunda fiyatlar yükselmekte, talep gücün düşmesi durumunda fiyatlar düşmektedir. Ayrıca sistemin üretim tarafından bakıldığında ise fiyatların düşük üretim olan dönemlerde arttığı, yüksek üretim olan dönemlerde azaldığı görülmektedir. Bu iki durum göz önüne alındığında PTF'lerin temelde sistemdeki üretim ve tüketim miktarlarına bağımlı olarak değiştiği görülmektedir.

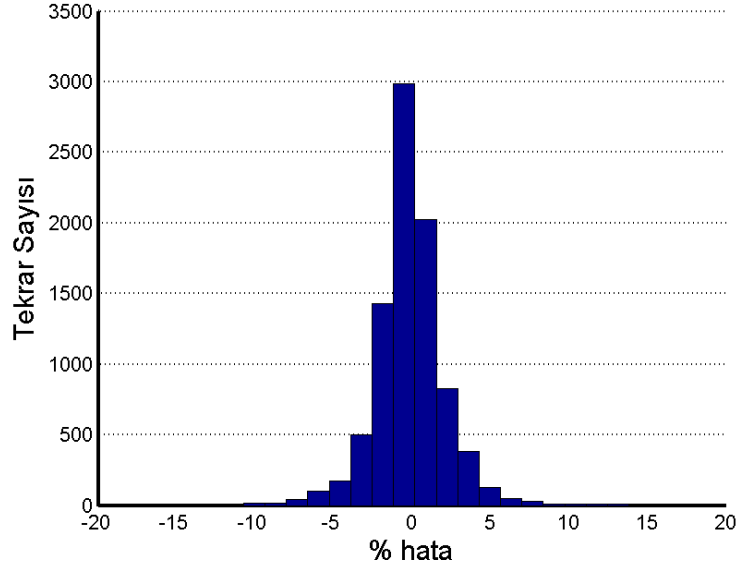
Talep güç eğrisi incelendiğinde eğrinin saatlik, günlük ve aylık salınımlara sahip olduğu görülmektedir. Bu salınımlara bağımlı olarak PTF değerleri de değişmektedir. Saatlik, günlük ve aylık PTF-talep güç değişimleri Şekil 5.1'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.1. Grafiklerde talep güç PTF değişimleri verilmiştir. a) Değerler senelik saatlik ortalamalardır, b) Değerler günlük ortalamalardır, c) Değerler aylık ortalamalardır.

Tez kapsamında oluşturulan PTF tahmin modeli bir gün sonraki PTF değerlerini tahmin edecektir. Bu sebeple, talep gücün bir gün sonraki değerlerinin PTF tahmin modelinin girişlerinden biri olabileceği düşünülmüştür. TEİAŞ bünyesindeki MYTM'de performansı iyi bir talep güç tahmin sistemi bulunduğundan yeni bir talep güç modeli geliştirilmemiştir.

mevcut tahmin sisteminin çıktıları geliştirilen PTF tahmin modelinin girdisi olarak kullanılmıştır. MYTM merkezindeki talep tahmin modelinin hata değerlerinin dağılımı Şekil 5.2’de verilmiştir.

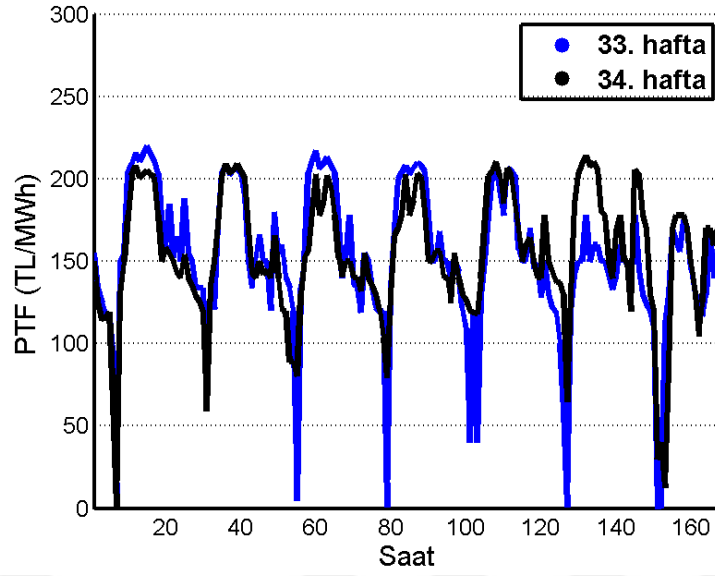


Şekil 5.2. MYTM talep tahmin sistemi 2016 yılı hataları dağılımı.

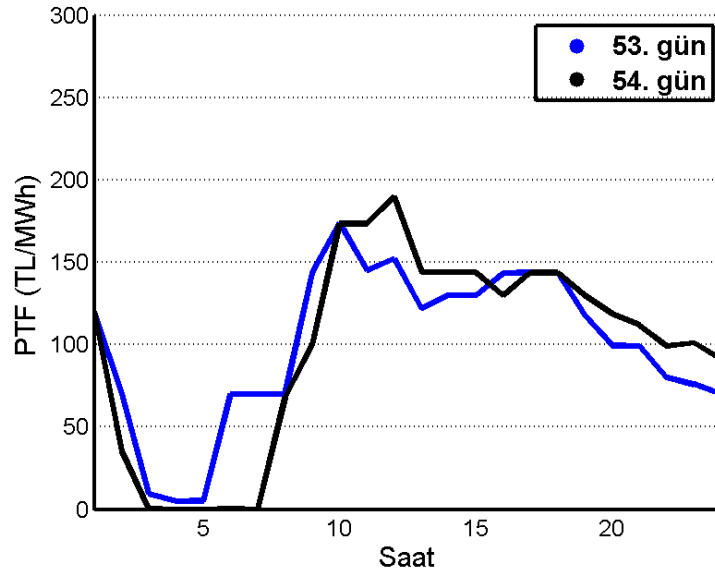
Hata dağılımı incelendiğinde hata değerlerinin $\pm\%10$ aralığında kaldığı ve tahmin sistemi çıktılarının genelde gerçek değerlere yakın olduğu anlaşılmıştır.

Bölümün başında bahsedildiği gibi PTF değerlerinin toplam enerji üretim değerlerinden de etkilendiği bilinmektedir. Fakat Türkiye’de enerji üretim santrallerinin bir gün sonra üretecekleri toplam enerji için bir tahmin sistemi bulunmamaktadır. Üretim tahmini konusu tez kapsamında olmadığından ve geniş kapsamlı bir çalışma gerektirdiğinden, bu çalışmada irdelenmemiş ve üretim değerleri PTF tahmin modelinin bir girdisi olarak kullanılmamıştır.

Tahmin modeli girdisi olarak geçmiş PTF değerleri de kullanılmıştır. PTF değerleri incelendiğinde haftalık ve günlük periyotlarda kendisini tekrarlayan eğriler oluşturdukları görülmüştür. Birbirine yakın günlerde ve haftalarda oluşan PTF değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Bu durum 2016 yılından seçilmiş ardışık iki hafta ve gün için Şekil 5.3-4’te verilmiştir.



Şekil 5.3. 2016 yılının 33. ve 34. haftasında oluşan PTF'ler.



Şekil 5.4. 2016 yılının 53. ve 54. gününde oluşan PTF'ler.

Sonuç olarak fiyat tahmini modeli için iki tür giriş seçilmiştir. Bunlardan biri bir gün sonrası için yapılmış talep güç tahmin değerleridir, diğeri ise geçmiş fiyat değerleridir. Model girişleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

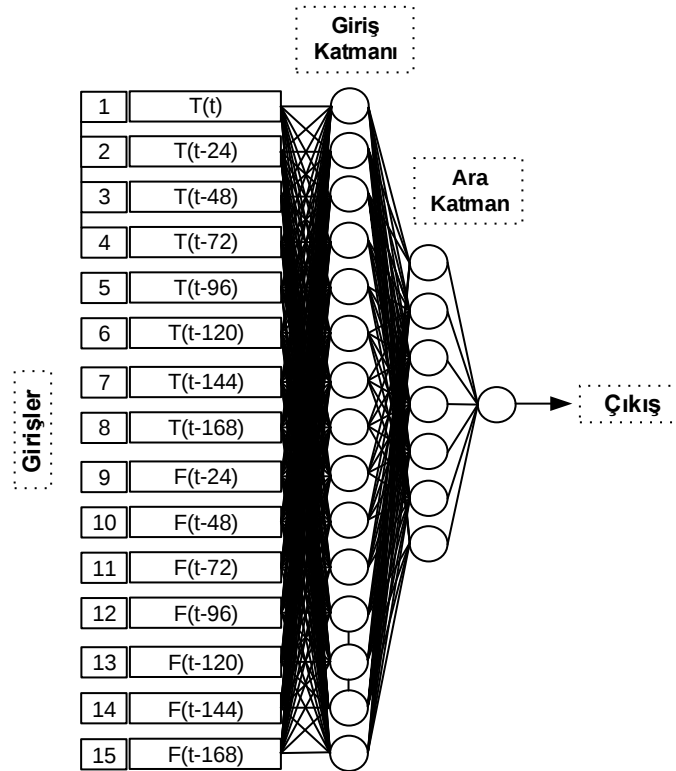
Çizelge 5.1. Fiyat tahmini modeli girişleri

Giriş Numarası	Giriş Türü	Giriş Kısa Adı
1	Tahmini talep	$T(t)$
2	Tahmini talep (bir gün önceki)	$T(t-24)$
3	Tahmini talep (iki gün önceki)	$T(t-48)$
4	Tahmini talep (üç gün önceki)	$T(t-72)$
5	Tahmini talep (dört gün önceki)	$T(t-96)$
6	Tahmini talep (beş gün önceki)	$T(t-120)$
7	Tahmini talep (altı gün önceki)	$T(t-144)$
8	Tahmini talep (yedi gün önceki)	$T(t-168)$
9	Fiyat (bir gün önceki)	$F(t-24)$
10	Fiyat (iki gün önceki)	$F(t-48)$
11	Fiyat (üç gün önceki)	$F(t-72)$
12	Fiyat (dört gün önceki)	$F(t-96)$
13	Fiyat (beş gün önceki)	$F(t-120)$
14	Fiyat (altı gün önceki)	$F(t-144)$
15	Fiyat (yedi gün önceki)	$F(t-168)$

Model girişlerine karar verildikten sonra çok katmanlı bir yapay sinir ağı kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuştur. Modelin yapısı Çizelge 5.2. ve Şekil 5.5’te özetlenmiştir.

Çizelge 5.2. Fiyat tahmini modeli özellikleri

Katman	Nöron sayısı	Transfer Fonksiyonu
Giriş	15	Hyperbolic tangent sigmoid
Ara	7	Hyperbolic tangent sigmoid
Çıkış	1	Linear



Şekil 5.5. Fiyat tahmin modeli yapısı

Tahmin modeli oluşturulduktan sonra model, farklı eğitim ve test veri setleri üzerinde denenmiştir. Üç adet performans değerlendirme ölçütü kullanılarak modelin performansı değerlendirilmiştir. Bu ölçütler Normalize Kök Ortalama Kare Hata (NRMSE), Normalize Ortalama Mutlak Hata (NMAE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE)'dir. Ölçütler Eşitlik 5.1, Eşitlik 5.2 ve Eşitlik 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3'te özetlenmiştir.

$$MAPE = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T (|PTF_t^{Gerçek} - PTF_t^{Model}|) / PTF_t^{Gerçek} \quad (5.1)$$

$$NMAE = \frac{100}{T} \cdot [\sum_{t=1}^T (|PTF_t^{Gerçek} - PTF_t^{Model}|)] / \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (PTF_t^{Gerçek}) \quad (5.2)$$

$$NRMSE = 100 \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (PTF_t^{Gerçek} - PTF_t^{Model})^2} \right] / \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (PTF_t^{Gerçek}) \quad (5.3)$$

Çizelge 5.3. Fiyat tahmini modeli performans değerleri

Eğitim	Test	MAPE	NMAE	NRMSE
2012	2013	11,2366	9,8477	13,4529
2013	2014	8,6303	8,8846	11,9593
2014	2015	30,810	17,4135	24,4285
2015	2016	30,5224	18,5802	26,0147
2012-2013	2014	7,8244	8,2270	11,1826
2012-2014	2015	23,8789	14,7953	20,8690
2012-2015	2016	29,5145	17,5490	24,5722

Önerilen fiyat tahmin modelinin 2014 yılında en iyi performansı yakaladığı görülmüştür. 2015 ve 2016 yıllarında model performansı giderek kötüleşmiştir. Modelin eğitim verisi genişletilmiş fakat performansta istenilen iyileşme elde edilememiştir. Yıllara göre performanstaki kötüleşmenin sebepleri araştırıldığında, artan YEKDEM piyasası hacminin etkisinin olduğu görülmüştür. YEKDEM piyasasına katılan santraller gün öncesinden bildirdikleri üretim planından sorumlu tutulmadıklarından tesis sahiplerinin aslında gerçekleşmeyecek üretim planlarını GÖP piyasasına bildirdikleri görülmüştür. Bu durum PTF değerlerinde kırılmalara sebep olmuştur. YEKDEM kapasitesi değiştikçe kırılmalık da değişmiş böylece önerilen tahmin modeli başarısız olmuştur. Bu durum aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir.

Çizelge 5.4. PTF varyans, PTF standart sapma ve YEKDEM toplam üretim değerleri

Yıl	Varyans	Standard Sapma	YEKDEM (MWh)
2012	1324,6	36,39	5.395.855,79
2013	1294,9	35,98	2.370.888,19
2014	987,9	31,43	5.845.453,59
2015	2038,1	45,15	17.720.976,41
2016	2608,6	51,07	44.696.478,91

Fiyat tahmini konusunda yapılan çalışmalar sonucunda ülkenin mevcut GÖP piyasası şartlarında güvenilir fiyat tahmini yapılamayacağı kanaatine varılmıştır. Bu durum MYTM personelleri ile paylaşıldığında merkezdeki uzman personellerin de aynı kanaatte olduğu görülmüştür.

PTF değerlerinin oluşum sürecinin oldukça kırılğan ve karasız karakteristiğe sahip olması ve bu sebeple istenilen tahmin sonuçlarının elde edilememesi, PTF oluşum sürecinin stokastik bir süreç olduğunu ortaya koymuştur. Bu sebeple PTF tahmin değerlerinin kullanıldığı hesaplamalarda deterministik yaklaşım yerine stokastik yaklaşımın daha başarılı olabileceği düşünülmüş ve stokastik yaklaşım kullanılarak bir optimizasyon modeli daha oluşturulmuştur. Bu stokastik modelde kullanılacak fiyat senaryoları tez kapsamında önerilen yeni bir yöntem ile oluşturulmuştur. Önerilen bu yeni yöntem Bölüm 5.3.2’de verilmiştir.

5.2 Rüzgar Gücü Tahmini

Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi Türkiye’de de enerji konusunda dışa bağımlılığın azaltılması ve maliyetlerin düşürülmesi amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneliş olmuştur. Bu kapsamda ülkedeki RES tesisi kurulu gücünü arttırmak için çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirilmiştir. Bu teşviklerin yardımıyla 2023 yılında 20 GW’lık RES kurulu gücüne ulaşılması hedeflenmiştir. RES kurulu gücü arttıkça gün öncesi planlamada, kısa süreli rüzgâr enerjisi tahminlerine ihtiyaç duyulacağı bilinmektedir. Gelecekte yaşanacak bu ihtiyacı karşılamak amacıyla Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü bünyesinde ülkedeki RES üretimlerini izlemek ve bu üretimler için kısa süreli tahminler yapmak amacıyla bir merkez oluşturulmuştur. Merkez, “Türkiye’de Rüzgârdan Üretilen Elektriksel Güç için bir İzleme ve Tahmin Sistemi Geliştirilmesi” (RİTM) isimli bir proje kapsamında geliştirilmiştir. Projenin yüklenicisi TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü olmuştur.

RİTM’de kısa süreli (0-48 saat) ve çok kısa süreli (0-6 saat) tahminler üretilmektedir. Kısa süreli tahmin algoritması temel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada tahmin

yapılacak santral bölgesi için kısa süreli rüzgâr hız ve yön tahminleri elde edilmektedir. Bu tahmin bilgileri, merkez sunucusunda çalıştırılan Weather Research and Forecasting (WRF) yazılımı ile elde edilen ve Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan tahminler arasından seçilerek elde edilmektedir. İkinci kısımda ise rüzgâr hız ve yön tahminleri, RES çıkış gücüne dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm, santral çıkış gücü ile santral bölgesindeki rüzgâr hız ve yön değerlerini ilişkilendiren bir santral güç eğrisi ile yapılmaktadır. Santral güç eğrileri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği temelli bir yazılım olan WindSim ile santrallerin modellenmesi sonucu elde edilmiştir. Merkezde elde edilen tahminler tez kapsamındaki hesaplamalarda kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında bir RES tesisi incelenmiş ve tesisin GÖP şartlarında optimal işletimi için teklif oluşturma modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerde yukarıda anlatılan RİTM tahminleri kullanılmıştır. Tahminlerin performansı aşağıdaki eşitliklerde verilen üç indis (MAPE, NMAE, NRMSE) ile değerlendirilmiş, değerlendirme sonuçları Çizelge 5.5'te verilmiştir.

$$MAPE = \frac{100}{T} \cdot \sum_{t=1}^T (|RES_t^{\text{Üretim}} - RES_t^{\text{Tahmin}}| / RES_t^{\text{Üretim}}) \quad (5.4)$$

$$NMAE = \frac{100}{T} \cdot [\sum_{t=1}^T (|RES_t^{\text{Üretim}} - RES_t^{\text{Tahmin}}|)] / RES^{\text{Kurulu Gücü}} \quad (5.5)$$

$$NRMSE = 100 \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (RES_t^{\text{Üretim}} - RES_t^{\text{Tahmin}})^2} \right] / RES^{\text{Kurulu Gücü}} \quad (5.6)$$

Çizelge 5.5 Fiyat tahmini modeli performans değerleri

Yıl	Veri sayısı	MAPE	NMAE	NRMSE
2016	8784	36.0501	13.8832	18.7550

RİTM tahminleri performansının literatürde kabul edilen aralıkta kaldığı görülmektedir (Foley ve ark. 2012). Fakat literatürde de vurgulandığı gibi mevcut tahmin sistemlerinin yakaladığı performans henüz sağlıklı bir gün öncesi planlama için yeterli değildir. Bu sebeple birçok araştırmacı, RES üretim ve tahminlerinin stokastik süreçler olduğunu kabul etmiştir. Bu durum tez çalışması kapsamında dikkate alınmış ve stokastik yaklaşım kullanılarak bir işletim optimizasyonu modeli oluşturulmuştur. Stokastik model girdisi olan olası RES üretim senaryoları tez kapsamında önerilen yeni bir yöntem kullanılarak üretilmiştir (Yildiz ve ark. 2017). Önerilen bu yeni yöntem bir sonraki bölümde verilmiştir.

5.3 RES Üretim ve PTF Senaryoları Oluşturma Yöntemleri

Stokastik yaklaşım ile oluşturulan optimizasyon modellerindeki stokastik değişkenler (süreçler) bu değişkenlerin alabileceği muhtemel değerlerden oluşan senaryo setleri ile temsil edilmektedirler. Tez kapsamında oluşturulan stokastik modellerde RES üretimi ve PTF değişkenleri stokastiktir. Bu değişkenleri doğru şekilde temsil edebilecek senaryo setleri, bu bölümün ilerleyen kısımlarında açıklanan yöntemler ile elde edilmiştir.

5.3.1 RES üretim senaryoları oluşturma yöntemi

Literatür incelendiğinde, RES üretim senaryoları oluşturulması konusunda sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda önerilen yöntemlerin genelde önce rüzgâr hızı senaryoları ürettiği ve bu hız senaryolarının RES çıkış gücüne dönüştürüldüğü görülmektedir(Matevosyan ve Soder 2006; Morales ve ark. 2010b; Meibom ve ark. 2011; Hosseini-Firouz 2013; Sharma ve ark. 2013; Sharma ve ark. 2014; Oskouei ve Yazdankhah 2015; Parastegari ve ark. 2015). Rüzgâr hızından RES çıkış gücü hesaplanırken santral modeli doğruluğuna bağlı olarak önemli miktarda hatalar yapıldığından bu yaklaşım RES çıkış gücü senaryoları üretimi için pek uygun değildir(Wan ve ark. 2010). Ayrıca bu çalışmaların çoğunda senaryo üretimi için bir ARMA modelinin kullanıldığı görülmektedir(Matevosyan ve Soder 2006; Morales ve ark. 2010b; Hosseini-Firouz 2013; Sharma ve ark. 2013; Sharma ve ark. 2014; Oskouei ve Yazdankhah 2015; Parastegari ve ark. 2015). ARMA ile modelleme yöntemi, durağan süreçlerin modellenmesi için uygun olduğundan mevsimsel iklim koşullarına bağımlı olarak değişen RES üretim ve tahminlerinin modellenmesi için uygun değildir. Literatürde sadece iki çalışmanın mevsimsel değişimleri dikkate aldığı görülmüştür (Pinson ve ark. 2009; Meneses de Quevedo ve Contreras 2016). Meneses de Quevedo ve Contreras (2016) çalışmalarında her mevsim için ayrı bir cdf elde ederek RES üretimlerini modellemişlerdir. Pinson ve ark. (2009) çalışmasında ise RES üretim tahminlerinin çoklu değişen rasgele sayılara dönüştürülmesine dayanan bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde rasgele değişen noktasal tahmin değerleri arasındaki ilişki geçmiş değerlerden elde edilen bir kovaryans matrisi ile modellenmiştir. Bu matris her yeni değerde güncellenerek mevsimsel etkiler senaryo üretim sürecine katılmıştır. Bludszuweit ve ark. (2008) çalışmasında önerilen, tahminlerin seviyelere ayrılması yöntemi de literatüre yeni bir yaklaşım kazandırmıştır. Bu yaklaşımda tahmin hatalarının tahmin güç seviyelerine göre değiştiği kabul edilmiş ve tahminler güç seviyelerine bölünerek her seviye için ayrı bir model oluşturulmuştur.

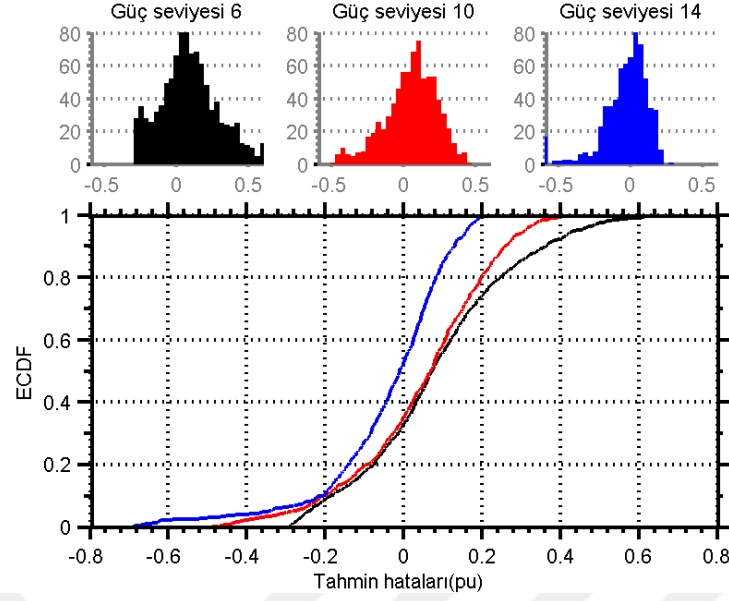
Yukarıdaki yöntemler ile oluşturulan senaryoların her birinin bir gerçekleşme olasılığı vardır. Senaryo sayısı arttırıldıkça muhtemel tüm durumları elde etmek mümkün olacak ve oluşturulan senaryo setinin gerçek değerleri içermeye olasılığı artacaktır. Fakat senaryo sayısı arttıkça stokastik modeli çözmek zorlaşacak belirli bir senaryo sayısından sonra model çözülemeyecektir. Bu sebeple (Dupačová ve ark. 2003; Growe-Kuska ve ark. 2003; Heitsch ve Römisich 2003; Sumaili ve ark. 2011) çalışmalarında senaryo sayısı azaltma yöntemleri önerilmiştir. Azaltılmış senaryoların, stokastik değişkenleri temsil kalitesi de stokastik model çözümünü etkilemektedir. Bu kalitenin değerlendirilebilmesi için tez çalışması kapsamında üç adet indis tanımlanmıştır.

RES üretim senaryolarını elde etmek için bu tez çalışmasında önerilen yeni yöntem, üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada çok sayıda RES üretim senaryoları oluşturulmuştur. İkinci aşamada senaryo sayısı azaltılmıştır. Üçüncü aşamada azaltılmış senaryo setinin kalitesi değerlendirilmiştir. Bu aşamalarda kullanılan yöntemler aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

5.3.1.1 Senaryo oluşturma yöntemi

İlk adımda RES üretim ve tahmin değerleri kullanılarak tahmin hataları modellenmiştir. Bu model ile hata senaryoları oluşturulacak, hata senaryoları ile tahmin değerleri toplanarak RES üretim senaryoları elde edilecektir.

Hata modeli oluşturulurken geçmiş tahmin değerleri 20 eşit güç seviyesine bölünmüş ve bu güç seviyelerindeki hataların Kümülatif Dağılım Fonksiyonları (CDF)'leri elde edilmiştir. Böylece 20 adet CDF'ten oluşan bir hata modeli elde edilmiştir. Güç seviyelerindeki hata dağılımlarının şekli bilinmediğinden Ampirik Kümülatif Dağılım Fonksiyon (ECDF) yaklaşımı kullanılarak dağılım fonksiyonları elde edilmiştir. Aşağıdaki şekilde RES tesisi tahmin hatalarının farklı güç seviyelerinde oluşturduğu dağılımlar ve bu dağılımların oluşturduğu CDF'ler verilmiştir. Grafikteki hata ve tahmin değerleri, gerçek değerlerin santral kurulu gücüne bölünerek elde edilmiş pu değerlerdir. Grafikteki güç seviyeleri 6, 10 ve 14 sırasıyla [0,25 - 0,30], [0,45 - 0,50] ve [0,65 - 0,70] (pu) aralığındaki tahminleri kapsamaktadır. Grafiğin üst kısmındaki dağılımlar, güç seviyesi 6,10 ve 14 te oluşmuş hataların dağılımlarıdır. Grafiğin altındaki CDF'ler 6,10 ve 14 güç seviyelerinde oluşmuş hata dağılımlarından elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Güç seviyesi 6,10 ve 14 te oluşmuş hataların dağılımları ve CDF'leri.

Şekil 5.6.'dan anlaşılacağı üzere güç seviyesine göre hata dağılımları değişmektedir. Bu durum tahmin performansının güç seviyesine göre değiştiğini göstermektedir. Her güç seviyesi için ayrı dağılım fonksiyonu oluşturularak bu değişim modele katılmıştır. Hata modeli elde edildikten sonra bu model kullanılarak hata senaryoları üretilecektir. Hata senaryolarının üretim süreci bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

5.3.1.2 Hata senaryolarının oluşturulması

Bu bölümde hata senaryoları üretim yönteminin matematiksel alt yapısı anlatılmıştır. H_t 'nin, t anındaki tahmin hatası olduğu kabul edilirse T süresi boyunca oluşan hatalar $\mathbf{H} = \{H_t, t \in T\}^T$ şeklinde gösterilebilir. F_t 'nin, t anındaki tahmin olduğu kabul edilirse T süresi için yapılmış tahminler $\mathbf{F} = \{F_t, t \in T\}^T$ şeklinde gösterilebilir. Bu iki kümedeki eleman sayısı eşittir, yani her tahmin değeri için bir hata değeri vardır. Bir önceki bölümde geçmiş tahmin değerleri 20 güç seviyesine bölünmüş ve bu güç seviyelerindeki hatalar için 20 adet ECDF elde edilmişti. O halde F_t tahmin değerinin hangi güç seviyesinde olduğu bulunursa bu güç seviyesindeki geçmiş hata değerlerinin oluşturduğu ECDF kullanılarak F_t tahmini için olası hata senaryoları oluşturulabilir.

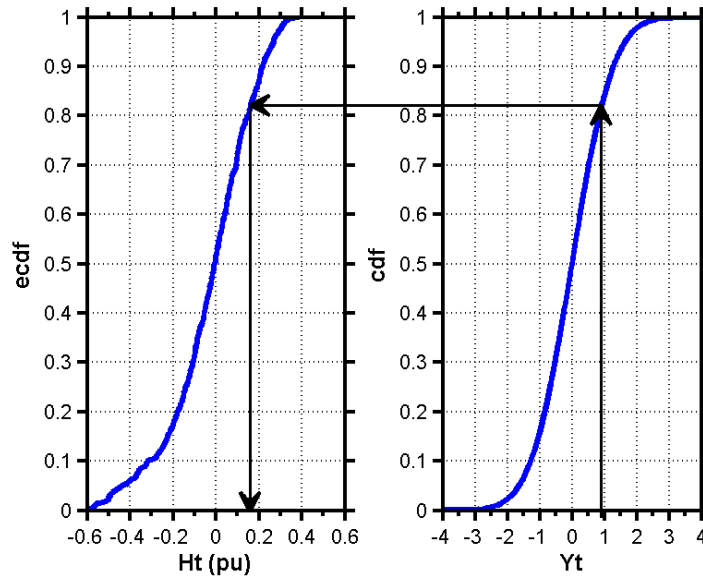
Önerilen hata senaryosu oluşturma yöntemindeki ilk aşama, tespit edilen güç seviyesine ait ECDF'ten hata senaryoları üretmektir. Bu amaçla ters dağılım dönüşümü kullanılmıştır. Bu dönüşüm sayesinde ortalaması 0, standart sapması 1 olan ve rasgele üretilmiş Y_t

değerleri, hata senaryolarına dönüştürülmüştür. Aşağıdaki eşitlikler bu süreçte kullanılmıştır. Eşitlik 5.7 ile normal dağılımı takip eden Y_t değerlerinin olasılıkları hesaplanmıştır. Eşitlik 5.8 ile de hesaplanan bu olasılık değerlerine ECDF’lerde karşılık gelen H_t değerleri hesaplanmıştır.

$$\varphi(Y_t) = \int_{-\infty}^{Y_t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2} dy \quad (5.7)$$

$$H_t = f^{-1}(\varphi(Y_t)) \quad (5.8)$$

f^{-1} ters dönüşüm fonksiyonudur. RES tesisi için elde edilmiş 12. güç seviyesindeki ECDF kullanılarak yapılmış örnek bir ters dağılım dönüşümü aşağıdaki grafikte verilmiştir. Grafiğin sağ kısmındaki dağılım Y_t değerlerinin örneklendiği normal dağılımdır. Grafiğin sol kısmındaki dağılım 12. güç seviyesinde gerçekleşmiş hataların oluşturduğu dağılımdır.



Şekil 5.7. 12. güç seviyesi için örnek bir ters dağılım dönüşümü.

Bu tez çalışmasında bir gün sonrasının 24 tahmin değerinde oluşabilecek hata senaryoları üretilmiştir. Bu durumda stokastik değişken sayısı 24 olmaktadır. Stokastik modeller için senaryo üretiminde kullanılan klasik yaklaşımda her sokastik değişken için ayrı senaryolar üretilmekte ve toplam senaryo sayısı her değişken için üretilen senaryo sayısının çarpımı olmaktadır. O halde her tahmin değeri için 400 senaryo üretilir ise 24 tahmin değeri için toplam 400^{24} senaryo oluşacak ve stokastik modelin çözümü ancak çok gelişmiş işlemciler ve çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilecektir. Bu durumu

ortadan kaldırmak için 24 tahmin değerinde oluşabilecek hatalar arasında bir ilişki olduğu ve bu hatalar için üretilen senaryoların çoklu değişen sayılar olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul yapıldıktan sonra her 24 hata değeri için bir senaryo oluşturulabilmiştir. 24 değerden oluşan bu senaryoyu üretebilmek için 24 hata değeri arasındaki ilişkiyi veren bir kovaryans matrisine ve 24 hatanın alabileceği değerlerin ortalamasını içeren bir ortalama matrisine ihtiyaç vardır. Geçmiş hata değerlerinin ortalamaları ve dağılımları sürekli değiştiğinden bu senaryoyu elde etmek mümkün değildir. Bu sebeple geçmiş hata değerleri ters dağılım dönüşümü kullanılarak, ortalamaları 0 olan ve normal dağılımı takip değerlere dönüştürülmüştür. Y_t , t anı için ters dağılım dönüşümü ile elde edilmiş değer ise T süresi boyunca oluşan Y_t değerleri $\mathbf{Y} = \{Y_t, t \in T\}^T$ vektörünü oluşturacaktır (bir günlük tahminler incelendiğinden $T = 24$ 'tür). Bu yeni değerler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi bir kovaryans matrisi ile tanımlanmıştır.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{1,1} & \dots & \sigma_{1,24} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{24,1} & \dots & \sigma_{24,24} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Tahmin performansı, mevsimsel iklim değişikliklerinin etkisi ile değiştikçe Σ matrisi de değişmektedir. Bu sebeple Σ matrisi, yeni tahmin ve hata değerleri eklendikçe güncellenmiştir. Güncelleme için aşağıda açıklanan yöntem kullanılmıştır.

$\mathbf{Y}^t$ (t anındaki değer vektörü) kullanılarak, Σ_t (t anındaki kovaryans matrisi) Eşitlik 5.10 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\Sigma_t = \frac{1}{t-1} \sum_{k=1}^t \mathbf{Y}^k \mathbf{Y}^{kT} \quad (5.10)$$

Eşitlik 5.10 iki terimin toplamı şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir. Bu yeni eşitlik kullanılarak kovaryans matrisi her yeni değer ile güncellenebilir.

$$\Sigma_t = \frac{t-2}{t-1} \Sigma_{t-1} + \frac{1}{t-1} \mathbf{Y}^t \mathbf{Y}^{tT} \quad (5.11)$$

Eşitlik 5.11'e bir unutma faktörü (α) eklenerek, tahmin performansının zamanla değişiminin kovaryans matrisine olan etkisi matris güncelleme hesabına katılmıştır. Unutma faktörü eklenmiş eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$\Sigma_t = \alpha \left(\frac{t-2}{t-1} \Sigma_{t-1} \right) + \left(1 + \alpha \left(\frac{1}{t-1} - 1 \right) \right) \mathbf{Y}^t \mathbf{Y}^{tT} \quad (5.12)$$

Eşitlik 5.12'deki t büyüdükçe eşitlik aşağıdaki haline yaklaşmaktadır.

$$\Sigma_t = \alpha \Sigma_{t-1} + (1 - \alpha) \mathbf{Y}^t \mathbf{Y}^{tT} \quad (5.13)$$

Yukarıda anlatılan yöntem kullanılarak kovaryans matrisi oluşturulduktan sonra, bir çoklu değişen rastgele sayı üretici ile n adet $\mathbf{Y}$ vektörü oluşturulabilir. Bu tez çalışmasında çoklu değişen rastgele sayı üretici olarak MATLAB kütüphanesinde oluşturulmuş *mvnrnd* fonksiyonu kullanılmıştır. Elde edilen $\mathbf{Y}$ vektörleri daha sonra ters dağılım dönüşüm yöntemi kullanılarak hata değerlerinden oluşan vektörlere dönüştürülmüştür. Son olarak hata senaryoları ile incelenen günün tahmin vektörü ($\mathbf{F}$) toplanarak RES üretim senaryoları elde edilmiştir. Aşağıdaki eşitlikler senaryo kümesini tanımlamaktadır. Eşitliklerdeki s indisi senaryo numarasını, t indisi zamanı temsil etmektedir. Eşitlik 5.15 $\mathbf{T}$ süresi boyunca üretilmiş n adet senaryodan oluşan senaryo vektörünü ($\mathbf{P}$) vermektedir.

$$P_t^s = H_t^s + F_t \quad (5.14)$$

$$\mathbf{P} = \{P_t^s, t \in T, s \in n\} \quad (5.15)$$

Hata senaryoları sayısı n arttıkça, RES üretim senaryo kümesinin gerçek üretim değerlerini kapsama olasılığı artacaktır. Gerçek değerlerin yakalanması çözüm kalitesini arttıracaktır fakat senaryo sayısı arttıkça stokastik modelin çözümü zorlaşacaktır. Bu durumu engellemek için bir senaryo azaltma yöntemine ihtiyaç vardır. Bir sonraki bölümde tez kapsamında kullanılmış senaryo azaltma yöntemi irdelenmiştir.

5.3.1.3 Hata senaryolarının azaltılması

Çözüm sürecini kolaylaştırmak için senaryo kümeleri bir senaryo azaltma yöntemi kullanılarak küçültülmelidir. Fakat başlangıçtaki senaryo kümesi ile küçültülmüş kümenin bir birine benzer olması gerekmektedir. Bu koşul birbirine yakın senaryolardan bir kısmı yok edilip benzeri olmayan senaryolar ise kümede bırakılarak sağlanabilir. Sumaili ve ark. (2011) çalışmasında birbirine yakın senaryoların tespiti için Kantorovich olasılık mesafe ölçütünün kullanılması önerilmiştir. Sarfati (2012)'de Kantorovich mesafe ölçütü kullanılarak iki adet senaryo sayısı azaltma algoritması verilmiştir. Bu tez çalışmasında (Sarfati 2012)'de verilmiş olan "Fast Forward Selection" isimli algoritma, senaryo sayısı azaltmak için kullanılmıştır. Algoritmanın detaylı anlatımı (Sarfati 2012)'de bulunmaktadır. Senaryo sayısı azaltıldıktan sonra elde edilen RES üretim senaryolarının kalitesinin kontrol

edilmesi gerekmektedir. Bu kalitenin değerlendirilmesi amacıyla tez kapsamında iki adet indis önerilmiştir. Önerilen indisler bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

5.3.1.4 Senaryo kalite indisleri

Senaryo kümesi hesaplamalarda kullanılmadan önce kümedeki senaryoların gerçek değerleri temsil edebilme kalitesine bakılmalıdır. Düşük kalitedeki senaryo kümeleri hesaplama sonuçlarını kötü yönde etkileyeceğinden gerekirse senaryo üretim sürecinde kullanılan bazı parametreler güncellenmeli ve uygun kalitede senaryo kümeleri tekrar oluşturulmalıdır. Özellikle senaryo sayısının azaltılması senaryo kümesinin kalitesini etkilemektedir. Çünkü senaryo azaltma sürecinde birbirine benzer senaryolar yok edilmekte; eğer benzer senaryoların hepsi yok edildiyse aslında farklı olan senaryolar da kümeden çıkartılabilmektedir. Bu durum senaryo kümesi kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Kalite değerlendirme amacıyla tez kapsamında iki tür indis önerilmiştir. Bu indisler aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

5.3.1.5 Ortalama mutlak hata indisi

Başka uygulamalarda da kullanılan ortalama mutlak hata indisi, burada senaryoların ortalaması ile gerçek değer arasındaki farkı değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu değerlendirmeyi yapabilmek için öncelikle senaryoların ortalamalarının hesaplanması gerekmektedir. Senaryoların ortalamaları Fast Forward Reduction algoritması ile elde edilen senaryo olasılıkları (ρ_s) ile senaryoların (P_t^s) çarpımlarının toplamına eşittir. m adet senaryonun t anındaki ortalaması aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir.

$$\bar{P}_t = \sum_{s=1}^m \rho_s P_t^s \quad (5.16)$$

T süresi boyunca oluşturulmuş senaryoların ortalamaları bulunduktan sonra ortalama mutlak hata indisi (mae) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir. G_t , t anında gerçekleşmiş üretim değeridir.

$$mae = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} |\bar{P}_t + G_t| \quad (5.17)$$

mae indisi, senaryo kümesinin gerçek değerlerden uzaklaşıp uzaklaşmadığı konusunda bilgi vermektedir. İstenen durum senaryo kümesinin gerçek değerlere yakın olmasıdır.

5.3.1.6 Toplam sapma indisi

Toplam sapma indisi, senaryo kümesinin kapsadığı alan dışında kalan gerçek üretim değerleri ile senaryo kümesi arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Bu indis hesaplanırken üç durum oluşabilmektedir. Bu durumlar aşağıdaki gibidir.

- Gerçek değerlerin senaryo kümesi alanının içinde olması.
- Gerçek değerlerin senaryo kümesi alanının üstünde olması.
- Gerçek değerlerin senaryo kümesi alanının altında olması.

Bu üç durum dikkate alınarak, toplam sapma indisi (ts) değeri, aşağıdaki iki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

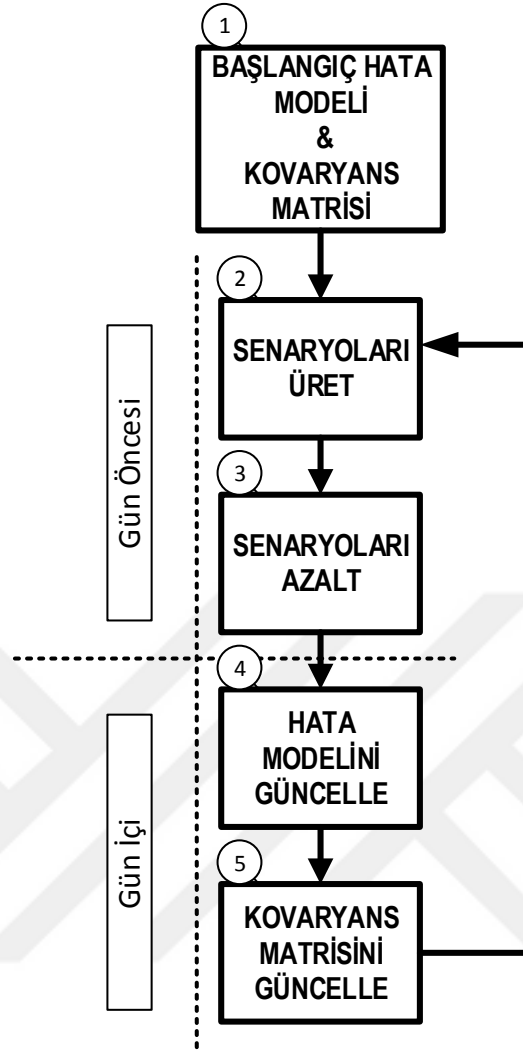
$$ts_t = \begin{cases} \min(P) - G_t & G_t < \min(P) \\ G_t - \max(P) & G_t > \max(P) \\ 0 & \min(P) \leq G_t \leq \max(P) \end{cases} \quad (5.18)$$

$$ts = \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} ts_t \quad (5.19)$$

ts indisi, gerçek değerlerin senaryo kümesi dışında kalıp kalmadığını ve dışardaki değerlerin senaryo kümesinden uzaklığını tespit etmek için kullanılmıştır. İstenilen durum gerçek değerlerin senaryo kümesi içinde olmasıdır. Bu durumda indis değeri 0 olacaktır. Gerçek değerler senaryo kümesinden uzaklaştıkça indis değeri büyüyecektir. Bu bölümde anlatılan indislerin kullanımı ve bazı sonuçlar Bölüm 5.3.1.8’de verilmiştir.

5.3.1.7 RES üretim senaryosu oluşturma algoritması

RES üretim senaryoları oluşturulması ile ilgili, bu bölüme kadar anlatılan yöntemlerin uygulama algoritması bu bölümde kısaca anlatılmıştır. Aşağıdaki şekilde algoritmanın işlem adımlarını anlatan akış diyagramı verilmiştir. Şekilden sonra algoritma adımları kısaca açıklanmıştır.



Şekil 5.8. RES üretim senaryolarının oluşturulma sürecini anlatan akış diyagramı.

Şekilde verilen algoritma gün öncesi ve gün içi olmak üzere iki günlük süreçte yapılan işlem adımlarından oluşmaktadır. Bu süreçler kesikli çizgiler ile ayrılarak şeklin solundaki etiketler ile belirtilmiştir. Algoritma, beş adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar işlem sırasına göre aşağıdaki gibidir.

1) İlk adımda geçmiş veriler kullanılarak bir hata modeli ve kovaryans matrisi oluşturulmuştur. Hata modeli ve kovaryans matrisi oluşturma yöntemleri Bölüm 5.3.1.1 ve Bölüm 5.3.1.2’de verilmiştir. Eğer geçmiş verilere ulaşılamıyor ise kovaryans matrisi yerine birim matris kullanılabilir. Zaman ilerledikçe hata modeli de oluşacaktır.

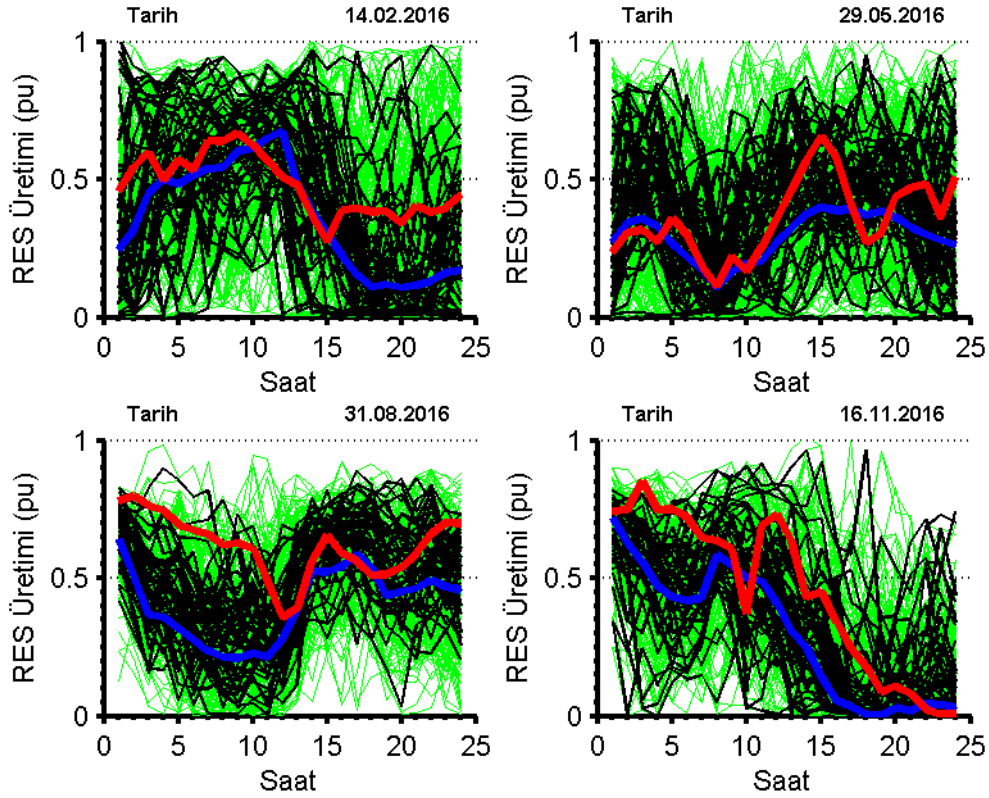
2) İkinci adımda RES üretim senaryoları oluşturulmaktadır. Senaryolar Bölüm 5.3.1.2’de verilmiş olan yöntem kullanılarak oluşturulmuştur.

3) Üçüncü adımda, bir önceki adımda oluşturulmuş RES üretim senaryoları Fast Forward Reduction algoritması kullanılarak azaltılmıştır. Kullanılan senaryo azaltma yönteminin ayrıntılı açıklaması (Sarfati 2012)'de verilmiştir.

4) Bu adımda hata modeli oluşan yeni değerler kullanılarak Bölüm 5.3.1.1'de anlatıldığı gibi güncellenmiştir.

5) Beşinci adımda kovaryans matrisi Bölüm 5.3.1.2'de anlatılan yöntem kullanılarak güncellenmiştir. Bu adımdan sonra algoritma adım ikiye dallanmaktadır.

Aşağıdaki şekilde 2016 yılının farklı mevsimlerindeki 4 gün için üretilmiş senaryolar verilmiştir. Başlangıçta üretilen 400 senaryo yeşil, azaltılmış senaryolar siyah renk ile gösterilmiştir. Kırmızı eğri gerçekleşen üretimi, mavi eğri tahmin edilen üretimi göstermektedir



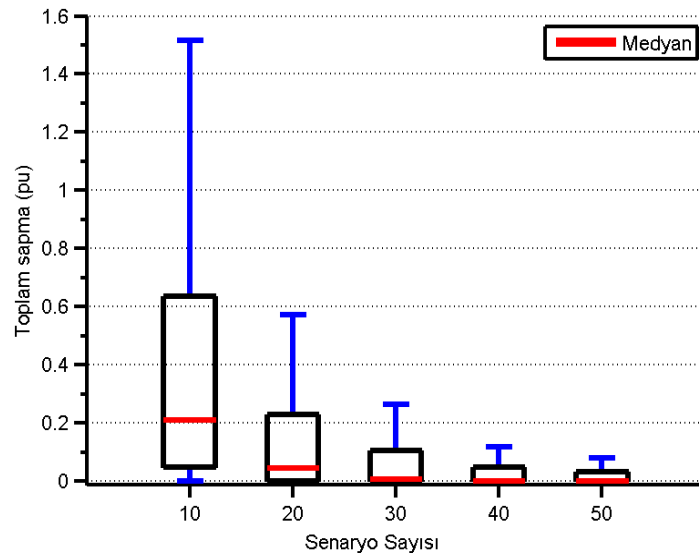
Şekil 5.9. 2016 yılının farklı mevsimlerindeki 4 gün için üretilmiş senaryolar.

Anlatılan algoritma kullanılarak RES üretim senaryoları üretilebilir fakat bir önceki bölümde değinildiği gibi senaryolar hesaplamalarda kullanılmadan önce kalitelerinin uygun olduğundan emin olunmalıdır. Bu sebeple senaryo kaliteleri test edilmiştir. Test işlemi RES tesisi 2015 yılı verileri kullanılarak yapılmış ve sonuçlar bir sonraki bölümde özetlenmiştir.

5.3.1.8 Üretilen senaryoların kalite testi sonuçları

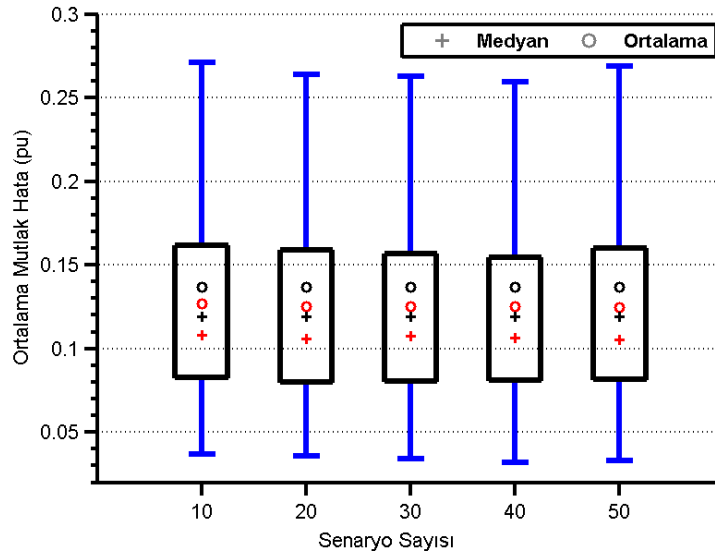
Daha önce değinildiği gibi senaryo kalitesini etkileyen en önemli parametre senaryo sayısıdır. Bu sebeple farklı senaryo sayıları için kalite indisleri incelenmiştir. Başlangıçta 400 senaryo oluşturulmuş daha sonra senaryo sayısı 10, 20, 30, 40 ve 50'ye düşürülmüştür. Senaryolar oluşturulurken tahmin değerleri 20 eşit seviyeye bölünmüştür. Kovaryans matrisi güncelleme işleminde kullanılan unutma faktörü 0.995 olarak alınmıştır. Senaryolar 2015 yılının her günü için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Test RES tesisi verilerine uygulanmıştır. Kalite testi sonucunda elde edilen değerler Şekil 5.10 ve 11'de özetlenmiştir.

Kutu grafikleri, kalite indisinin 2015 yılının her gününde aldığı değerler (toplam 365 değer) kullanılarak oluşturulmuştur. Farklı senaryo sayıları için toplam beş kutu grafiği oluşturulup senaryo sayısının kalite üzerine etkisi irdelenmiştir. Siyah kutular, veri dağılımının 1. ve 3. çeyrekleri arasındaki değerleri içermektedir ($q_3 - q_1$). Alt bıyık değerleri ($q_1 - 1,5.(q_3 - q_1)$)'e, üst bıyık değerleri ($q_1 + 1,5.(q_3 - q_1)$)'e eşittir.



Şekil 5.10. RES tesisi, 2015 yılı toplam sapma kalite indisinin senaryo sayısına göre değişimi.

Aşağıdaki şekilde verilen grafik, RES tesisi 2015 yılı ortalama mutlak hata kalite indisinin senaryo sayısına göre değişimini göstermektedir. Grafikteki siyah renkli artılar ve daireler tahmin değerlerinin, kırmızı renkli artılar ve daireler ise senaryo değerlerinin medyan ve ortalamalarıdır.



Şekil 5.11 Grafik, RES tesisi 2015 yılı ortalama mutlak hata kalite indisinin senaryo sayısına göre değişimini göstermektedir.

Şekil 5.10'daki grafikte senaryo sayısının artmasıyla hata indisi değerlerinin düştüğü görülmektedir. Senaryo sayısı 50 olduğunda indis değerlerinin oldukça küçük bir aralıkta kalmıştır.

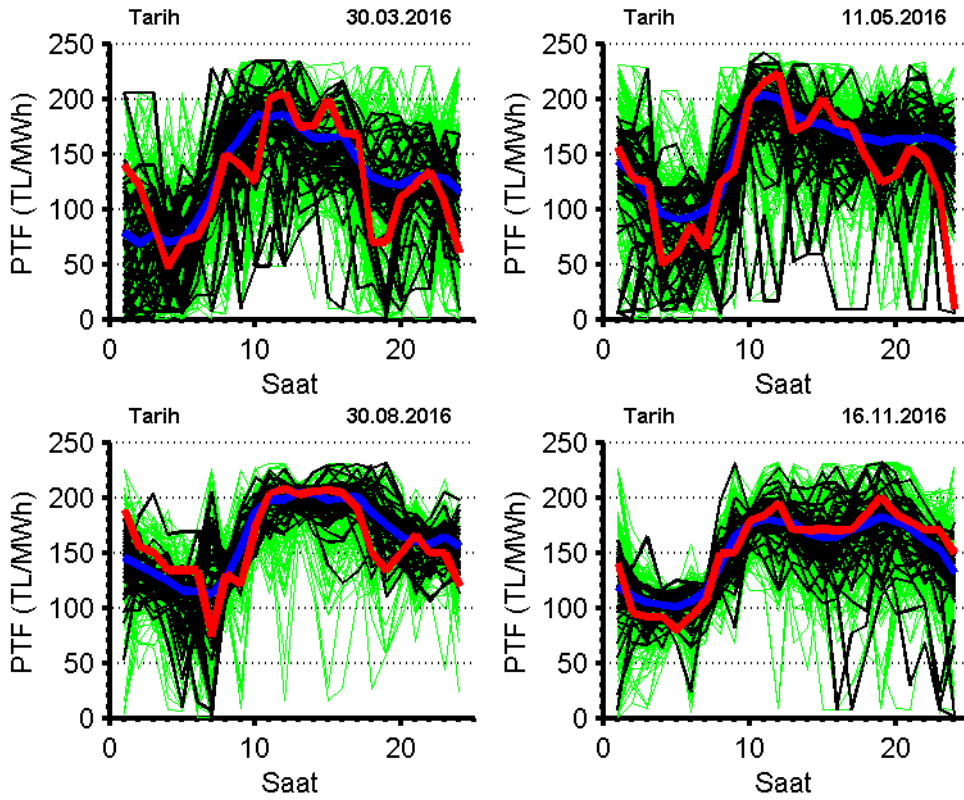
Şekil 5.11'deki grafikte senaryo sayısına göre indis değerlerinin pek değişmediği görülmektedir. Bu durum senaryo azaltma yönteminin sağlıklı bir şekilde çalıştığını, senaryo sayısı azalsa bile senaryo ortalamalarının gerçek değerlerden uzaklaşmadığını göstermektedir. Ayrıca bu grafikte tahmin değerlerinin hataları ile ortalama senaryo değerlerinin hataları da kıyaslanmıştır. Ortalama senaryo değerlerinin hatalarının tüm senaryo sayılarında tahmin değerlerinin hatalarından küçük olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar üretilen senaryoların kaliteli olduğunu göstermektedir.

Her iki kalite testi sonuçları dikkate alınarak, tez kapsamında kullanılan senaryo üretim yöntemiyle oluşturulmuş 400 senaryodan oluşan bir senaryo kümesinin senaryo sayısı 50'ye düşürülerek hesaplamalarda kullanılabileceğine karar verilmiştir.

5.3.2 PTF Senaryoları oluşturma yöntemi

PTF değerlerini temsil edecek senaryo setleri bir önceki bölümde önerilen yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. PTF senaryoları oluşturulurken kullanılan tahmin değerleri tez kapsamında geliştirilmiş tahmin modeli ile elde edilmiştir. Ayrıca tahmin değerleri bir önceki bölümde olduğu gibi büyüklüklerine göre 10 seviyeye bölünmüştür. Çoklu değişen rastgele sayı üreticinde kullanılan kovaryans matrisi geçmiş bir ayda oluşan değerler

kullanılarak elde edilmiştir. Oluşturulan PTF senaryolarının kalitesi, 2015 yılına ait PTF ve talep değerleri kullanılarak test edilmiştir. Başlangıçta 500 senaryo üretilip daha sonra senaryo sayısı 50'ye düşürüldüğünde uygun kalite değerlerinin elde edilebildiği görülmüştür. Örnek gösterim için 2015 yılının farklı mevsimlerinden seçilen dört gün için oluşturulan senaryolar aşağıdaki şekilde verilmiştir. Başlangıçta üretilen 500 senaryo yeşil, azaltılmış senaryolar siyah renk ile gösterilmiştir. Kırmızı eğri gerçek PTF, mavi eğri tahmin edilen PTF değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.12. 2015 yılının farklı mevsimlerinden seçilen dört gün için oluşturulan senaryolar.

5.4 RES İşletim Modelleri

Tez kapsamında incelenen RES tesisinin GÖP şartlarında optimum işletimi için deterministik ve stokastik olmak üzere iki ayrı yaklaşım ile işletim modelleri oluşturulmuştur. Modeller kullanılarak bir gün sonrası için üretim teklifi setleri oluşturulmuştur. Teklif setleri 24 adet üretim miktarı değerinden oluşmaktadır. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi RES üretimleri kontrol edilemez olduğundan bu üretimler yüksek fiyat oluşan saatlere kaydırılamayacaktır. Oluşturulan işletim modelleri tesisin dengesizliğe düşerek ceza ödemesini engellemeye çalışacaktır. Böylece tesis geliri artacak

ve RES üretimlerinden kaynaklanan enerji dengesizlik miktarları azalacaktır. Louşturulmuş modller bölümün ilerleyen kısımlarında anlatılmıştır.

5.4.1 Deterministik RES işletim modeli

Mevcut RES tesisleri, genelde deterministik yaklaşım ile tekliflerini oluşturmaktadırlar. Deterministik yaklaşımda; üretim tahminlerinin, gerçek üretim değerlere yakın olduğu kabul edilmektedir. Teklif seti Eşitlik...’da olduğu gibi üretim tahmin değerlerine eşittir.

Tahminler genelde gerçek değerlerden saptığından tesis bildirdiği teklif değerlerinden saparak dengesizliğe sebep olacaktır. Tesis, sebep olduğu bu dengesizlikten dolayı cezalandırılacaktır. Eşitlik 5.21 ile tesisin toplam günlük geliri (TGG) hesaplanabilir.

$$X_t^{teklif} = RES_t^{tahmin} \quad (5.20)$$

$$TGG = \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_t \cdot X_t^{teklif} + (RES_t^{üretim} - X_t^{teklif}) \cdot \begin{cases} 1,03 \cdot \max(PTF_t, SMF_t) & | RES_t^{üretim} < X_t^{teklif} \\ 0,97 \cdot \min(PTF_t, SMF_t) & | RES_t^{üretim} > X_t^{teklif} \\ 0 & | RES_t^{üretim} = X_t^{teklif} \end{cases} \right\} \quad (5.21)$$

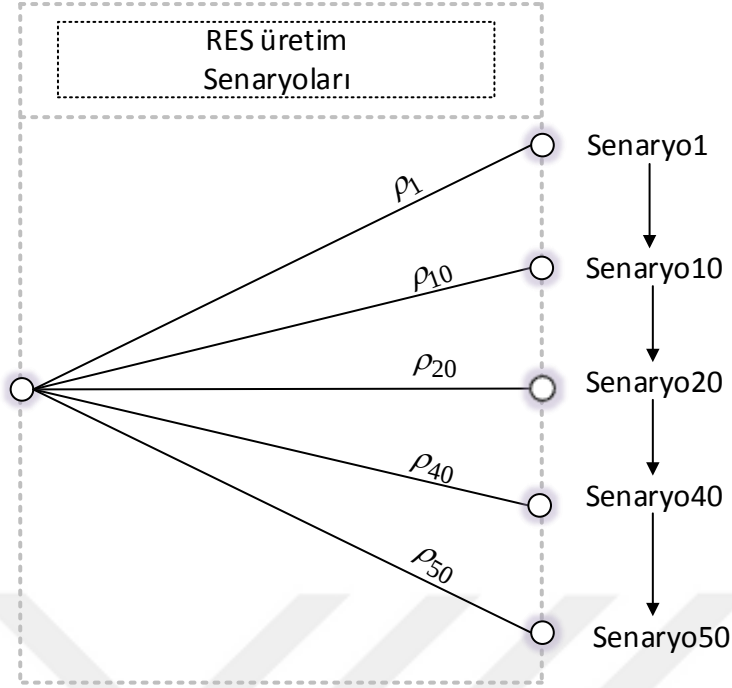
RES tesisi bu yaklaşım ile 2016 yılı şartlarında işletildiğinde oluşacak sonuçlar irdelenmiştir. Mevcut ve mükemmel tahmin değerleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar

Dengesizlik Miktarı (MWh)	Mükemmel Tahmin Geliri (TL)	Deterministik Model Geliri (TL)
92.595,3	38.931.229,6	36.830.469,8

5.4.2 Stokastik RES işletim modeli

Stokastik yaklaşımda; üretim tahminlerinin güvenilir olmadığı kabul edilmektedir. Bu sebeple, model girdisi olarak, tahmin değerleri yerine üretim senaryoları kullanılmıştır. Senaryolar, Bölüm 5.3’te anlatılan yöntem ile elde edilmiştir. Senaryoların her biri tesisin muhtemel üretim değeri ve bu değer in gerçekleşme olasılığından oluşmaktadır. Bu senaryoları temsilen oluşturulmuş senaryo ağacı Şekil 5.13’te verilmiştir.



Şekil 5.13. RES üretim senaryolarını temsil eden senaryo ağacı.

Stokastik optimizasyon modeli ile tüm üretim senaryolar için optimum çözüm olabilecek bir teklif seti aranmaktadır. Stokastik optimizasyon modeli ile gelir maksimizasyonu yapılmaya çalışıldığından, optimizasyon modeli GÖP gelir hesabı üzerine kurulmuştur. Modeldeki değişken sayısı 24'tür. Bu 24 değer teklif edilecek üretim değerleridir (X_t^{teklif}). Modelin amaç fonksiyonunun ilk hali aşağıda verilmiştir. Fonksiyondaki t değişkeni saati, s değişkeni senaryo numarasını temsil etmektedir.

$$f = \sum_{s=1}^{50} \rho^s \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_t \cdot X_t^{teklif} + \left(RES_{t,s}^{üretim} - X_t^{teklif} \right) \cdot \begin{cases} 1,03 \cdot \max(PTF_t, SMF_t) & | RES_{t,s}^{üretim} < X_t^{teklif} \\ 0,97 \cdot \min(PTF_t, SMF_t) & | RES_{t,s}^{üretim} > X_t^{teklif} \\ 0 & | RES_{t,s}^{üretim} = X_t^{teklif} \end{cases} \right\} \quad (5.22)$$

Fonksiyon incelendiğinde, tesis gelirinin dengesizliklerden dolayı azalacağı görülmektedir. Negatif yöndeki dengesizlikler SMF ve PTF'den büyük olanıyla çarpılıp %3 artırılarak teklif gelirinden düşülmektedir. Pozitif yöndeki dengesizlikler ise SMF ve PTF'den küçük olanıyla çarpılıp %3 azaltılarak teklif gelirine eklenmektedir. Tesis, teklif ettiği üretimleri gerçekleştirir ise herhangi bir gelir kaybı olmayacaktır. Fonksiyondaki SMF'nin stokastik bir değişken olduğu bilinmektedir. Fakat SMF, oluşum süreci oldukça karmaşık ve belirsiz etkenlere bağımlı olduğundan senaryolar ile temsil edilememiştir. Bu sebeple fonksiyonda SMF, PTF'ye eşitlenmiş ve fonksiyon aşağıdaki formda tekrar yazılmıştır.

$$f = \sum_{s=1}^{50} \rho^s \sum_{t=1}^{24} \left\{ \begin{array}{l} PTF_t \cdot RES_{t,s}^{üretim} \\ + \min \left(\left(RES_{t,s}^{üretim} - X_t^{teklif} \right), 0 \right) \cdot PTF_t \cdot 0,03 \\ + \min \left(\left(X_t^{teklif} - RES_{t,s}^{üretim} \right), 0 \right) \cdot PTF_t \cdot 0,03 \end{array} \right\} \quad (5.23)$$

Amaç fonksiyonunun bu formunda min() terimleri dengesizlik miktarının tespitinde kullanılmıştır. Bu formda SMF, PTF'ye eşitlendiğinden pozitif ve negatif yöndeki dengesizlikler PTF'nin %3'ü ile çarpılarak üretim gelirinden düşülmektedir.

Stokastik model doğrusal programlama yöntemi ile çözüleceğinden amaç fonksiyonu doğrusal olmalıdır. Bu sebeple fonksiyonda doğrusallığı bozan min() terimleri yerine iki yeni değişken tanımlanarak fonksiyon doğrusal hale getirilmiştir.

$$f = \sum_{s=1}^{50} \rho^s \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_t \cdot RES_{t,s}^{üretim} + \lambda_{t,s}^1 \cdot PTF_t \cdot 0,03 + \lambda_{t,s}^2 \cdot PTF_t \cdot 0,03 \right\} \quad (5.24)$$

Fonksiyonun yukarıdaki son haline bakıldığında; ilk terimin, PTF ile RES üretim senaryolarının çarpımı olduğu ve toplama işlemleri yapıldığında sürekli sabit bir değer vereceği görülmüştür. Bu sabit değer çözümü etkilemeyeceğinden ilk terim fonksiyondan çıkartılmıştır. Ayrıca diğer iki terimde birer katsayı olarak kalan 0,03 ve PTF çözümü etkilemeyeceğinden sadeleştirilmiştir. Amaç fonksiyonunun en sade hali aşağıdaki gibidir.

$$f = \sum_{s=1}^{50} \rho^s \sum_{t=1}^{24} \left\{ \lambda_{t,s}^1 + \lambda_{t,s}^2 \right\} \quad (5.25)$$

Fonksiyonun son halindeki iki terim pozitif ve negatif yöndeki dengesizliklerden kaynaklanan cezaları temsil etmektedir. Bu terimler 0 veya negatif değerler alabilmektedir. Fonksiyon değerinin 0 yaklaştırılması veya maksimize edilmesi çözümü optimuma yaklaştıracaktır. Optimizasyon modeli, gerekli kısıtlar da tanımlanarak aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur. İlk dört kısıt min() fonksiyonunun doğrusallaştırılması için tanımlanmıştır. Son kısıt teklif değerlerini sınırlamaktadır.

$$\text{maks.} \quad f = \sum_{s=1}^{50} \rho^s \sum_{t=1}^{24} \left\{ \lambda_{t,s}^1 + \lambda_{t,s}^2 \right\} \quad (5.26)$$

$$\text{k.s.} \quad \lambda_{t,s}^1 \leq 0 \quad (5.27)$$

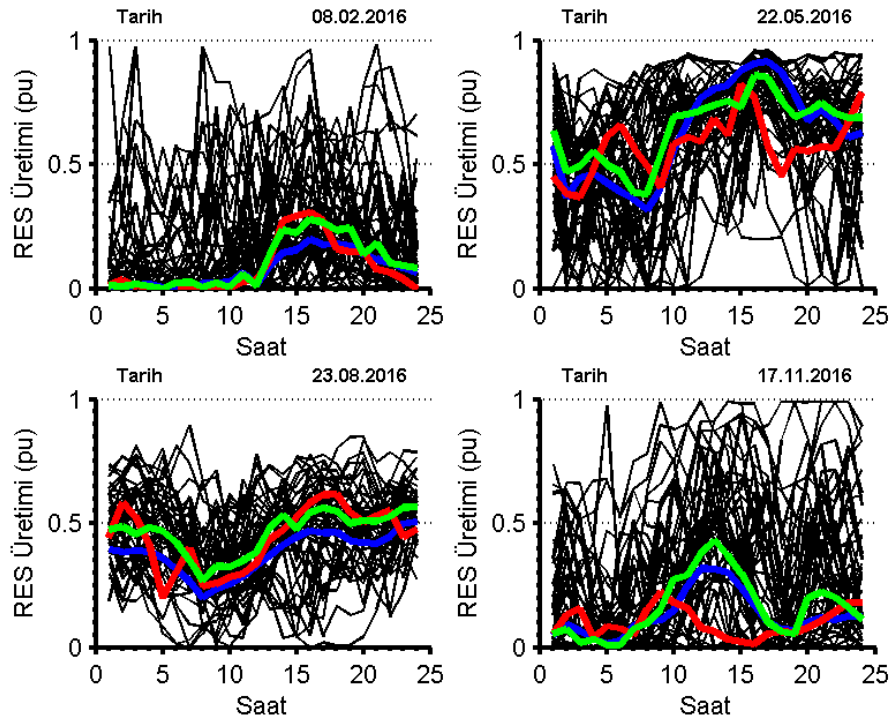
$$\lambda_{t,s}^2 \leq 0 \quad (5.28)$$

$$\lambda_{t,s}^1 \leq RES_{t,s}^{\text{üretim}} - X_t^{\text{teklif}} \quad (5.29)$$

$$\lambda_{t,s}^2 \leq X_t^{\text{teklif}} - RES_{t,s}^{\text{üretim}} \quad (5.30)$$

$$0 \leq X_t^{\text{teklif}} \leq RES^{\text{KuruluGüç}} \quad (5.31)$$

Tez kapsamında oluşturulan stokastik optimizasyon modelinin performansını görsel olarak göstermek amacıyla 2016 yılının her mevsiminden seçilen rastgele günlere ait bazı veriler Şekil 5.14'te grafiksel olarak verilmiştir. Grafiklerde stokastik yaklaşım tekliflerinin gerçek üretimlere yaklaştığı görülmektedir. Şekildeki grafiklerde RES üretim senaryoları, gerçekleşen RES üretimleri, deterministik ve stokastik yaklaşım ile oluşturulmuş teklif setleri verilmiştir. RES üretim senaryoları siyah, gerçekleşen RES üretimleri kırmızı, deterministik ve stokastik yaklaşım ile elde edilen teklif setleri sırasıyla mavi ve yeşil renk ile gösterilmiştir



Şekil 5.14. Stokastik ve deterministik modeller ile işletim sonucu elde edilen değerler.

Stokastik optimizasyon modeli 2016 yılı RES tesisi ve GÖP verileri kullanılarak çözüldüğünde aşağıdaki sonuçlar alınmıştır.

Çizelge 5.7. Stokastik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar

Dengesizlik Miktarı (MWh)	Mükemmel Tahmin Geliri (TL)	Stokastik Model Geliri (TL)
84.800,7	38.931.229,6	37.062.405,6

Şekil 5.14'teki grafikler ve Çizelge 5.6 ile Çizelge 5.7'deki sonuçlar incelendiğinde stokastik yaklaşımın deterministik yaklaşıma göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

5.5 PDHES İşletim Modelleri ve PDHES Duyarlılık Analizi

Tez kapsamında incelenen Çakmak I-II ve Söğütlü HES'lerin dönüştürülmesi ile elde edilecek PDHES tesisinin işletimi için deterministik ve stokastik yaklaşım kullanılarak iki optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon modelleri ile PDHES tesisinin geliri arttırılmaya çalışılmıştır. PDHES tesisi en çok geliri, en düşük fiyata enerji depolayıp en yüksek fiyata satarak elde edecektir. Bu amaçla optimizasyon modelleri ile bir gün sonrası için 24 adet, enerji alış/satış (depolama/üretme) miktarlarından oluşan teklif setleri oluşturulmuştur. Bu teklif setleri ile tesis işletildiğinde, en düşük fiyattan enerji depolaması ve depoladığı bu enerjiyi en yüksek fiyattan satması beklenmektedir. Bir sonraki bölümde deterministik yaklaşım modeli açıklanmıştır.

5.5.1 Deterministik PDHES işletim modeli

Deterministik yaklaşımda fiyat tahmin değerlerinin güvenilir olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul yapıldıktan sonra, tahmin değerleri optimum işletim için referans değerler olarak kullanılmıştır. Deterministik optimizasyon modeli amaç fonksiyonu Eşitlik 5.26'daki doğrusallaştırılmış GÖP gelir hesabı eşitliği kullanılarak oluşturulmuştur. Bu amaç fonksiyonu ve kısıtlardan oluşan model aşağıdaki gibidir.

$$\text{maks. } f = \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_t \cdot PDHES_t + \lambda_t^1 \cdot PTF_t \cdot 0,03 + \lambda_t^2 \cdot PTF_t \cdot 0,03 \right\} \quad (5.32)$$

$$\text{k.s. } \lambda_t^1 \leq 0 \quad (5.33)$$

$$\lambda_t^2 \leq 0 \quad (5.34)$$

$$\lambda_t^1 \leq PDHES_t - X_t^{\text{teklif}} \quad (5.35)$$

$$\lambda_t^2 \leq X_t^{\text{teklif}} - PDHES_t \quad (5.36)$$

$$Rez_t^{\text{üst}} = Rez_{t-1}^{\text{üst}} + Pompa_t \cdot \eta_p - T\ddot{u}rbin_t / \eta_t \quad (5.37)$$

$$Rez_t^{\text{alt}} = Rez_{t-1}^{\text{alt}} - Pompa_t \cdot \eta_p + T\ddot{u}rbin_t / \eta_t \quad (5.38)$$

$$PDHES_t = T\ddot{u}rbin_t - Pompa_t \quad (5.39)$$

$$0 \leq T\ddot{u}rbin_t \leq T\ddot{u}rbin^{\text{nominal}} \quad (5.40)$$

$$0 \leq Pompa_t \leq Pompa^{\text{nominal}} \quad (5.41)$$

$$0 \leq Rez_t^{\text{üst}} \leq Rez^{\text{mak.}} \quad (5.42)$$

$$0 \leq Rez_t^{\text{alt}} \leq Rez^{\text{mak.}} \quad (5.43)$$

$$-Pompa^{\text{nominal}} \leq X_t^{\text{teklif}} \leq T\ddot{u}rbin^{\text{nominal}} \quad (5.44)$$

Modeldeki değişkenler $PDHES_t$, λ_t^1 , λ_t^2 , $Rez_t^{\text{üst}}$, Rez_t^{alt} , $Pompa_t$, $T\ddot{u}rbin_t$ ve X_t^{teklif} dir. Eşitlik 5.32’deki amaç fonksiyonu, PDHES gücü ve dengesizlik miktarları toplamlarının o andaki fiyat ile çarpılarak toplanması sonucu elde edilmiştir. Eşitlik 5.33-36 ile pozitif ve negatif yöndeki dengesizlikler belirlenmiştir. Rezervuar durumları Eşitlik 5.37 ve Eşitlik 5.38 ile hesaplanmaktadır. PDHES ıkış gücü, Eşitlik 5.39’daki gibi türbin gücünden pompa gücünün çıkarılması şeklinde elde edilmiştir. Eşitlik 5.40-5.44 ile sırasıyla türbin, pompa, rezervuar ve teklif değerlerini sınırlandırılmıştır. Modelde kullanılan sabit değerler aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Ayrıca modelde kullanılan değişken sayısı değişken adlarına göre izelge 5.9’da verilmiştir.

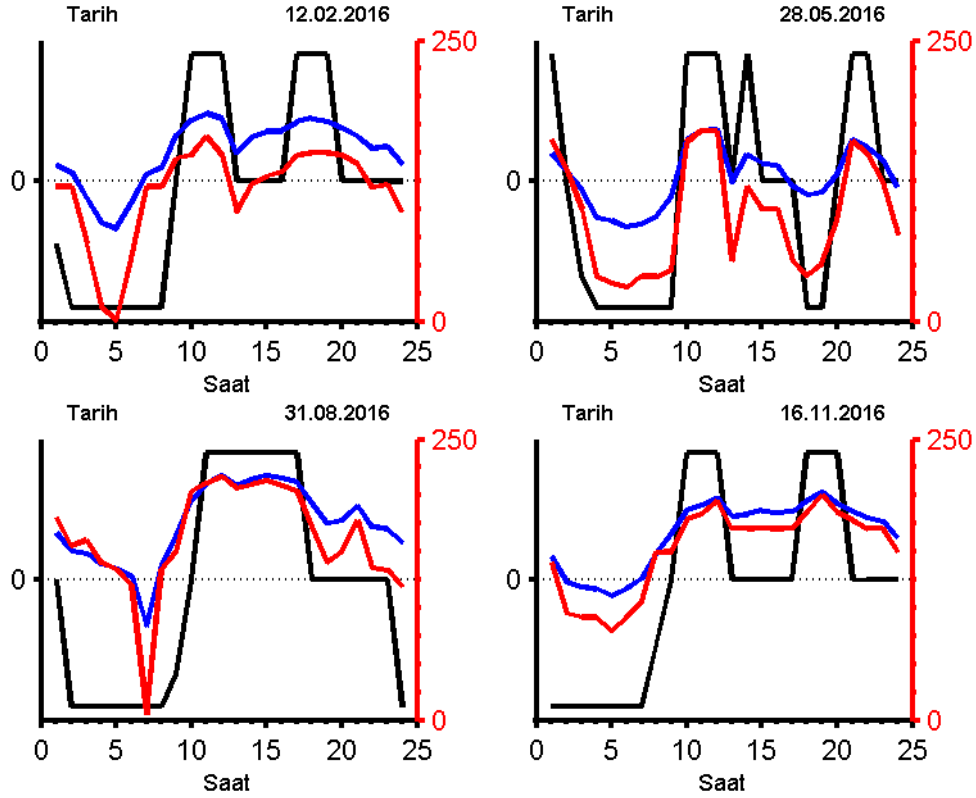
Çizelge 5.8. Deterministik modelde kullanılan sabitler

Sabit Adı	Açıklaması	Birimi	Değeri
$Pompa^{nominal}$	Pompa kurulu gücü	MW	55
$Türbin^{nominal}$	Türbin kurulu gücü	MW	46
$Rez^{mak.}$	Rezervuar kapasitesi	MWh	1000
η_p	Pompa ve motor verimi	-	0.9
η_t	Türbin ve jeneratör verimi	-	0.9

Çizelge 5.9. Deterministik modelde kullanılan değişken sayıları

Değişken Adı	Adet
$PDHES_t$	24
λ_t^1	24
λ_t^2	24
$Rez_t^{üst}$	24
Rez_t^{alt}	24
$Pompa_t$	24
$Türbin_t$	24
X_t^{teklif}	24
Toplam	192

Tesis işletim sürecinin görsel olarak anlatımı amacıyla, 2016 yılından seçilen örnek dört günde, deterministik model ile tesisin işletimi sonucu oluşan bazı değerler aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde fiyat tahmini, gerçek fiyat ve PDHES üretim/tüketimi değerlerinin oluşturduğu eğriler bulunmaktadır. Fiyat tahmini mavi, gerçek fiyat kırmızı, PDHES üretim/tüketimleri siyah renk ile gösterilmiştir. Grafiklerin solundaki düşey eksen PDHES gücü (MW), sağındaki düşey eksen gerçek ve tahmini fiyat (TL/MWh) değerleri için oluşturulmuştur



Şekil 5.15. PDHES tesisinin deterministik model ile işletimi sonucu elde edilen değerler.

Optimizasyon modeli 2016 GÖP şartlarında çözüldüğünde aşağıdaki çizelgede verilen sonuçlar alınmıştır.

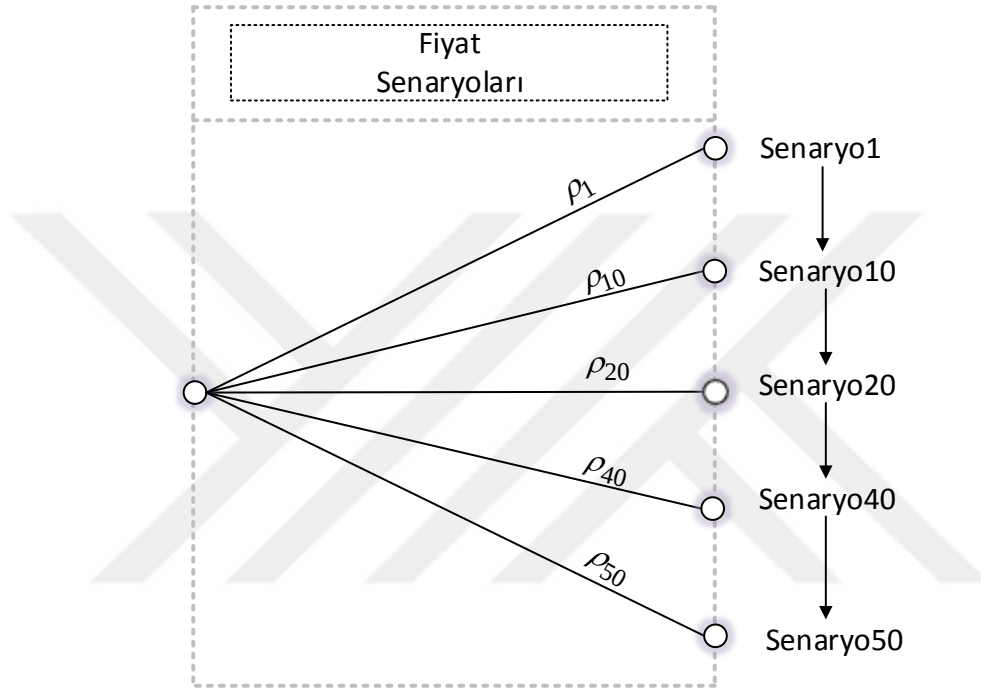
Çizelge 5.10. Deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar

Mükemmel Tahmin Geliri (TL)	Deterministik Model Geliri (TL)
9.720.832,2	7.135.828,5

Çizelgedeki mükemmel tahmin geliri, modele fiyat tahminleri yerine gerçek fiyat değerleri girilerek hesaplanmıştır. Deterministik model gelirin düşük olması tahmin hatalarından kaynaklanmaktadır. Bölüm 5.1’de bahsedildiği gibi mevcut GÖP şartlarında güvenilir fiyat tahmini yapılamamaktadır. Bu sebeple PDHES işletiminin optimizasyonu için stokastik yaklaşımla bir model daha geliştirilmiştir. Stokastik model bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

5.5.2 Stokastik PDHES işletim modeli

Mevcut GÖP şartlarında yapılan fiyat tahminleri güvenilir olmadığından fiyat oluşum sürecinin stokastik olduğu kabul edilerek bir stokastik optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu modelde fiyat tahminleri yerine gerçekleşmesi muhtemel 50 adet fiyat senaryosu kullanılmıştır. Her senaryo bir fiyat değeri ve bu fiyat değerinin gerçekleşme olasılığında oluşmaktadır. Bu senaryoları temsilen oluşturulmuş senaryo ağacı Şekil 5.16’da verilmiştir. Stokastik model oluşabilecek tüm fiyat senaryoları için optimum çözümü aramaktadır.



Şekil 5.16. Fiyat senaryolarını temsil eden senaryo ağacı.

Senaryolar Bölüm 5.4’te anlatılan yöntem ile elde edilmiştir. Bu senaryolar deterministik modeldeki fiyat tahmin değerleri yerine yazılarak stokastik model oluşturulmuştur. Modelin amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıdaki gibidir.

$$\text{maks. } f = \sum_{s=1}^{50} \rho_s \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_{t,s} PDHES_{t,s} + \lambda_{t,s}^1 \cdot PTF_{t,s} 0,03 + \lambda_{t,s}^2 \cdot PTF_{t,s} 0,03 \right\} \quad (5.45)$$

$$\text{k.s. } \lambda_{t,s}^1 \leq 0 \quad (5.46)$$

$$\lambda_{t,s}^2 \leq 0 \quad (5.47)$$

$$\lambda_{t,s}^1 \leq PDHES_{t,s} - X_t^{\text{teklif}} \quad (5.48)$$

$$\lambda_{t,s}^2 \leq X_t^{\text{teklif}} - PDHES_{t,s} \quad (5.49)$$

$$Rez_{t,s}^{\text{üst}} = Rez_{t-1,s}^{\text{üst}} + Pompa_{t,s} \eta_p - Türbin_{t,s} / \eta_t \quad (5.50)$$

$$Rez_{t,s}^{\text{alt}} = Rez_{t-1,s}^{\text{alt}} - Pompa_{t,s} \eta_p + Türbin_{t,s} / \eta_t \quad (5.51)$$

$$PDHES_{t,s} = Türbin_{t,s} - Pompa_{t,s} \quad (5.52)$$

$$0 \leq Türbin_{t,s} \leq Türbin^{\text{nominal}} \quad (5.53)$$

$$0 \leq Pompa_{t,s} \leq Pompa^{\text{nominal}} \quad (5.54)$$

$$0 \leq Rez_{t,s}^{\text{üst}} \leq Rez^{\text{mak.}} \quad (5.55)$$

$$0 \leq Rez_{t,s}^{\text{alt}} \leq Rez^{\text{mak.}} \quad (5.56)$$

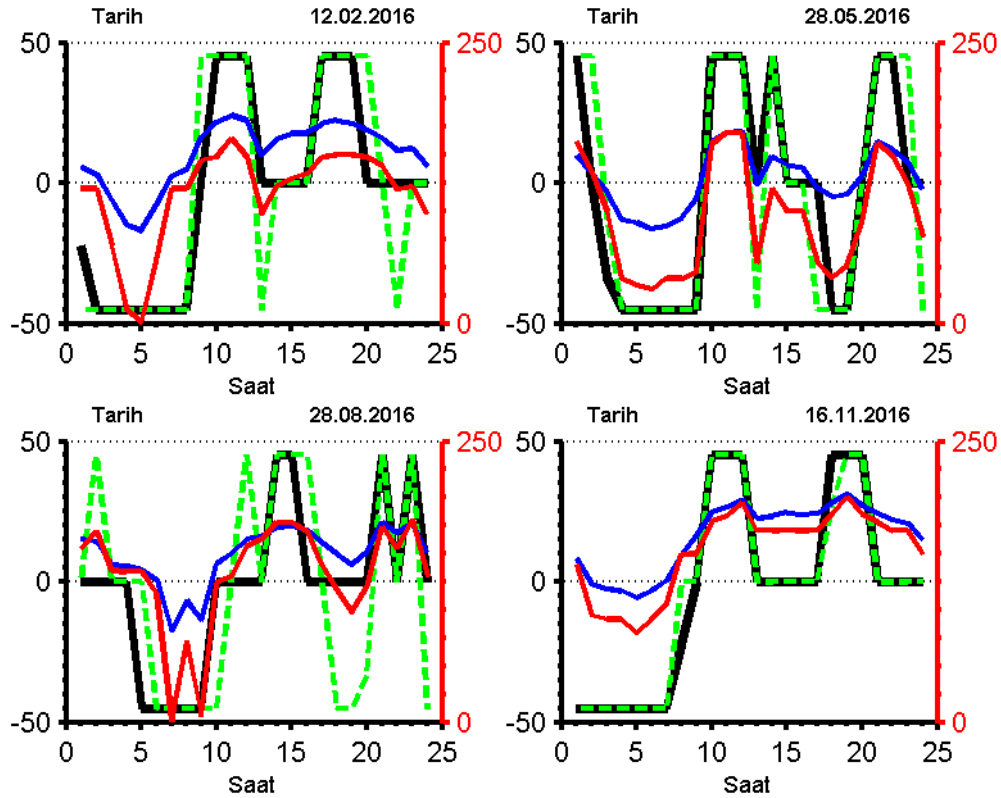
$$-Pompa^{\text{nominal}} \leq X_t^{\text{teklif}} \leq Türbin^{\text{nominal}} \quad (5.57)$$

Stokastik modelin amaç fonksiyonu ve kısıtları deterministik model ile aynı yapıdadır. Fakat bu amaç fonksiyonu ve kısıtlar, tüm fiyat senaryoları için değerlendirildiğinden karar değişkeni sayısı artmıştır. Stokastik modelin değişken sayısı Çizelge 5.11’de verilmiştir. Modelde kullanılan sabit değerler deterministik modeldeki değerlerdir .Bu değerler Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.11. Stokastik modelde kullanılan değişken sayıları

Değişken Adı	Adet
$PDHES_{t,s}$	1200
$\lambda_{t,s}^1$	1200
$\lambda_{t,s}^2$	1200
$Rez_{t,s}^{üst}$	1200
$Rez_{t,s}^{alt}$	1200
$Pompa_{t,s}$	1200
$Türbin_{t,s}$	1200
X_t^{teklif}	24
Toplam	8424

2016 yılından seçilen örnek dört gün için deterministik model ve stokastik model ile tesisin işletim sürecine ilişkin bazı veriler aşağıdaki şekilde verilmiştir. Şekildeki grafiklerin oluşturulmasının amacı stokastik yaklaşım ile deterministik yaklaşım arasında oluşan farkların gösterilmesidir. Grafiklerde, fiyat tahmini mavi, gerçek fiyat kırmızı, PDHES üretim/tüketimleri deterministik ve stokastik yaklaşım için sırasıyla siyah ve yeşil renk ile gösterilmiştir. Grafiklerin solundaki düşey eksen PDHES gücü (MWh), sağındaki düşey eksen gerçek ve tahmini fiyat (TL/MWh) değerleri için oluşturulmuştur



Şekil 5.17. PDHES tesisinin deterministik ve stokastik model ile işletim sonuçları.

Stokastik model 2016 yılı GÖP şartlarında çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.12’de deterministik model sonuçları ile beraber verilmiştir.

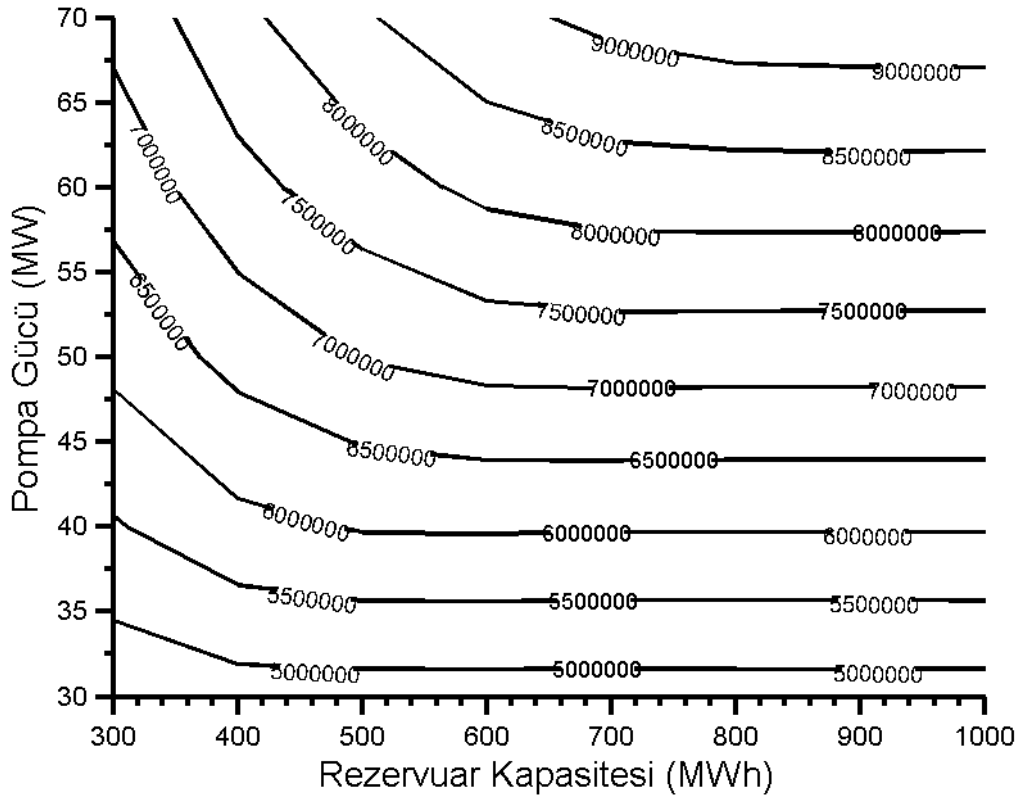
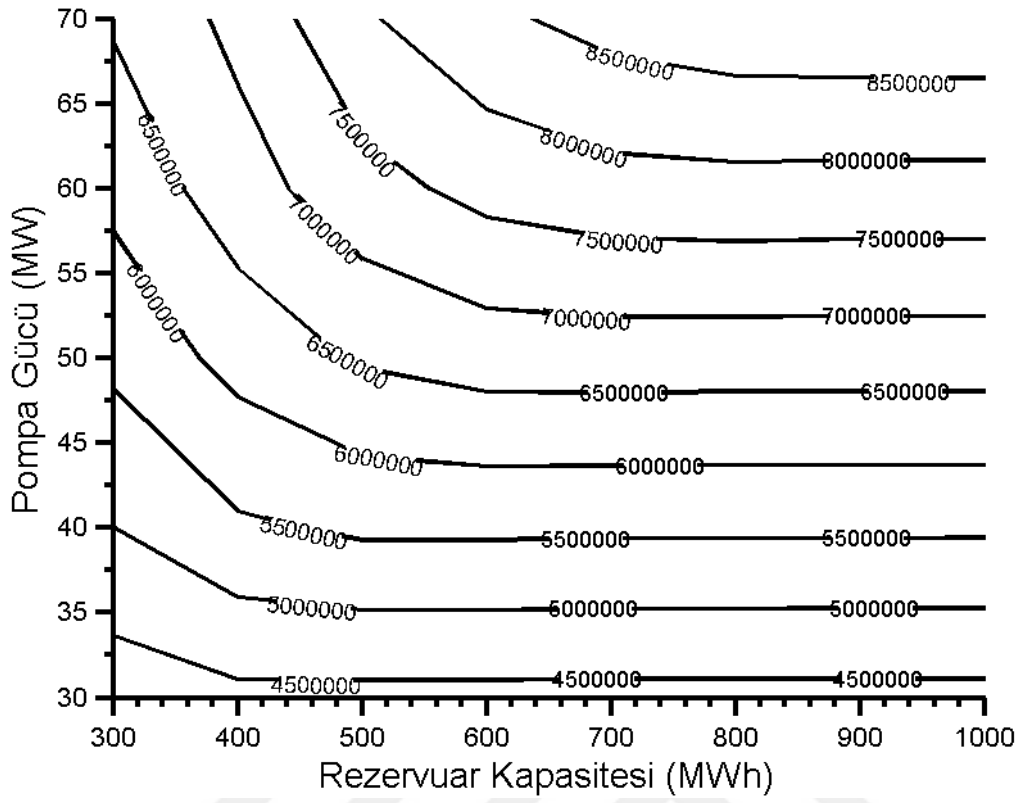
Çizelge 5.12. Deterministik ve stokastik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar

Mükemmel Tahmin Geliri (TL)	Deterministik Model Geliri (TL)	Stokastik Model Geliri (TL)
9.720.832,2	7.135.828,5	7.570.923,8

Yukarıda verilen sonuçlar incelendiğinde beklendiği gibi stokastik yaklaşımın deterministik yaklaşıma göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Bir sonraki bölümde, tez kapsamında incelenen RES ve PDHES tesislerinin beraber optimal işletilmesi için oluşturulmuş optimizasyon modelleri anlatılmıştır. PDHES tesisi pompa gücü ve rezervuar depolama kapasitesi değerlerinin seçimi için yapılmış duyarlılık analizi bir sonraki bölümde verilmiştir.

5.5.1 PDHES duyarlılık analizi

Yukarıda incelenen PDHES tesisi, hesaplamalarda kullanmak amacıyla tez kapsamında önerilmiş örnek bir tesistir. Bu tesis Bölüm 4.3’te anlatıldığı gibi mevcut üç nehir tipi HES’e (Çakmak I-II ve Söğütlü HESler) pompa istasyonu ve iki adet su rezervuarı eklenerek oluşturulabilecektir. Eklenecek pompa istasyonu kurulu gücü ile rezervuar depolama kapasiteleri tesis gelirini etkileyeceğinden bu iki büyüklük dikkate alınarak bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizi 2016 yılı piyasa verileri kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen değerler aşağıdaki grafiklerde özetlenmiştir.



5.6 PDHES ve RES İşletim Modelleri

RES tesislerinin bozucu etkisini azaltmak için bir PDHES tesisi ile beraber işletilmesi konusu önceki bölümlerde irdelenmiştir. Bu bölümde, tez kapsamında incelenen RES ve PDHES tesislerinin beraber işletimi uygulaması anlatılacaktır.

Tez çalışmasında öncelikle, RES ve PDHES tesislerinin GÖP şartlarında beraber işletiminin optimizasyonu için stokastik ve deterministik olmak üzere iki adet işletim optimizasyonu modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modellerin performansları ve beraber işletimin avantajları irdelenmiştir. Bir sonraki bölümde deterministik model anlatılmıştır.

5.6.1 Deterministik RES ve PDHES işletim modeli

Deterministik yaklaşımda model girdisi olan fiyat ve RES çıkış gücü tahmin değerlerinin güvenilir olduğu kabul edilmiştir. Oluşturulan model bu iki tahmin değerini referans alarak iki tesis için bir teklif seti oluşturmaktadır. Teklif seti iki tesisin bir gün sonra şebekeden çekeceği ya da şebekeye aktaracağı saatlik enerji miktarlarından oluşmaktadır. Model; tesislerin üretimini yüksek fiyatlı saatlere, tüketimini düşük fiyatlı saatlere kaydırarak toplam geliri arttırmaya çalışmaktadır.

Modelin amaç fonksiyonu GÖP gelir hesabı formülü temel alınarak oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu sistem kısıtlarından oluşan model aşağıdaki gibidir.

$$\text{maks. } f = \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_t \cdot RES\&PDHES_t + \lambda_t^1 \cdot PTF_t \cdot 0,03 + \lambda_t^2 \cdot PTF_t \cdot 0,03 \right\} \quad (5.58)$$

$$\text{k.s. } \lambda_t^1 \leq 0 \quad (5.59)$$

$$\lambda_t^2 \leq 0 \quad (5.60)$$

$$\lambda_t^1 \leq RES\&PDHES_t - X_t^{\text{teklif}} \quad (5.61)$$

$$\lambda_t^2 \leq X_t^{\text{teklif}} - RES\&PDHES_t \quad (5.62)$$

$$Rez_t^{\text{üst}} = Rez_{t-1}^{\text{üst}} + Pompa_t \cdot \eta_p - Türbin_t / \eta_t \quad (5.63)$$

$$Rez_t^{\text{alt}} = Rez_{t-1}^{\text{alt}} - Pompa_t \cdot \eta_p + Türbin_t / \eta_t \quad (5.64)$$

$$PDHES_t = Türbin_t - Pompa_t \quad (5.65)$$

$$RES\&PDHES_t = Türbin_t - Pompa_t + RES_t \quad (5.66)$$

$$0 \leq Türbin_t \leq Türbin^{\text{nominal}} \quad (5.67)$$

$$0 \leq Pompa_t \leq Pompa^{nominal} \quad (5.68)$$

$$0 \leq Rez_t^{üst} \leq Rez^{mak.} \quad (5.69)$$

$$0 \leq Rez_t^{alt} \leq Rez^{mak.} \quad (5.70)$$

$$-Pompa^{nominal} \leq X_t^{teklif} \leq Türbin^{nominal} + RES^{nominal} \quad (5.71)$$

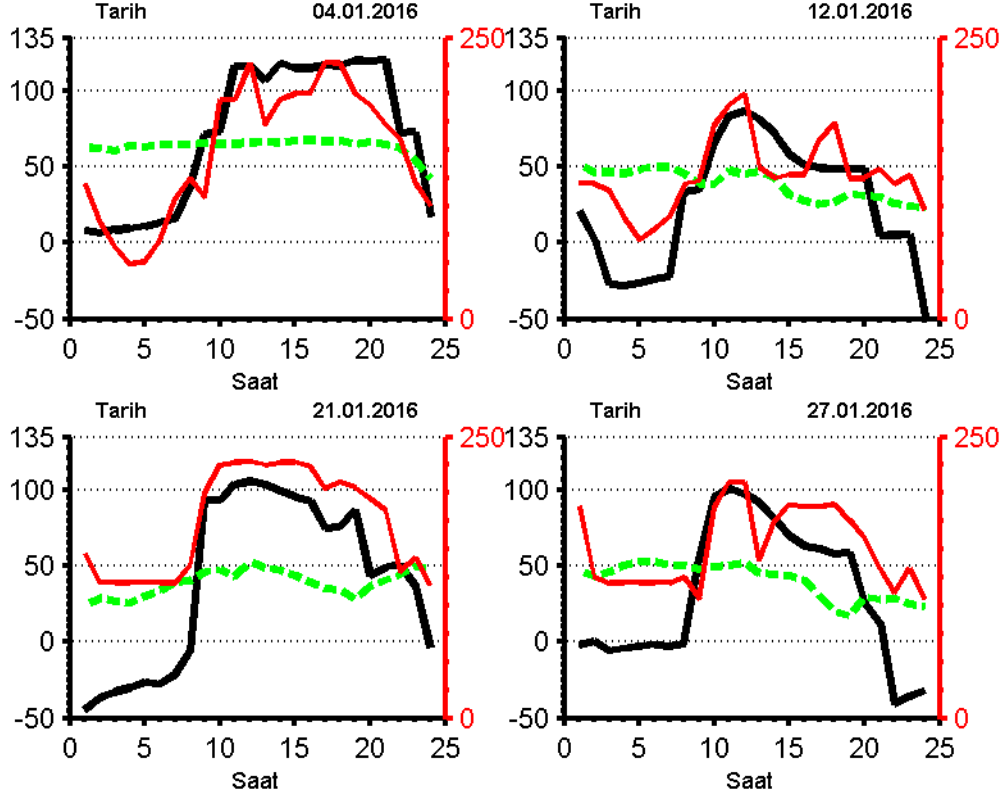
Modeldeki değişkenler, $PRES\&DHES_t$, $PDHES_t$, λ_t^1 , λ_t^2 , $Rez_t^{üst}$, Rez_t^{alt} , $Pompa_t$, $Türbin_t$ ve X_t^{teklif} , dir. Eşitlik 5.59-62 pozitif ve negatif yöndeki dengesizlik miktarlarını tanımlamaktadır. Eşitlik 5.63 ve Eşitlik 5.64 sırasıyla üst ve alt rezervuar durumlarını vermektedir. Bir sonraki gün, PDHES tesisi, Eşitlik 5.65 ile elde edilen değerler kullanılarak işletilecektir. İki tesisin beraber işletilmesi sonucu saatlik üretilmesi veya tüketilmesi beklenen enerji değerleri Eşitlik 5.66 ile hesaplanmaktadır. Eşitlik 5.67-71 sırasıyla türbin, pompa, rezervuar ve teklif değerlerini sınırlandırmaktadır. Modelde kullanılan sabitler daha önce Çizelge 5.8’de verildiği gibidir. Eşitlik 5.71’e eklenen RES kurulu gücü değeri 76 MW’tır. Modelde kullanılan karar değişkeni sayısı aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.13. Deterministik modelde kullanılan değişken sayıları

Değişken Adı	Adet
$RES\&PDHES_t$	24
$PDHES_t$	24
λ_t^1	24
λ_t^2	24
$Rez_t^{üst}$	24
Rez_t^{alt}	24
$Pompa_t$	24
$Türbin_t$	24
X_t^{teklif}	24
Toplam	192

İki tesisin beraber işletimi sonucunda RES üretimlerinin PTF eğrisine doğru kayması beklenmektedir. PTF eğrisi şebekedeki talep güç eğrisini takip ettiğinden PTF eğrisinin takip edilmesi RES üretimlerinin şebekedeki enerji dengesini bozan etkisinin ortadan kaldırılması anlamına gelmektedir. Bu durumun incelenmesi amacı ile 2016 yılının ilk 30 günü için elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Seçilen dört gün için aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur. Grafiklerde, gerçek fiyat kırmızı, toplam PDHES ve RES üretim/tüketimleri siyah, RES

üretimi yeşil renk ile gösterilmiştir. Grafiklerin solundaki düşey eksen PDHES ve RES üretimi (MWh), sağındaki düşey eksen fiyat (TL/MWh) değerleri için oluşturulmuştur.



Şekil 5.20. RES ve PDHES tesislerinin beraber deterministik model ile işletimi sonuçları.

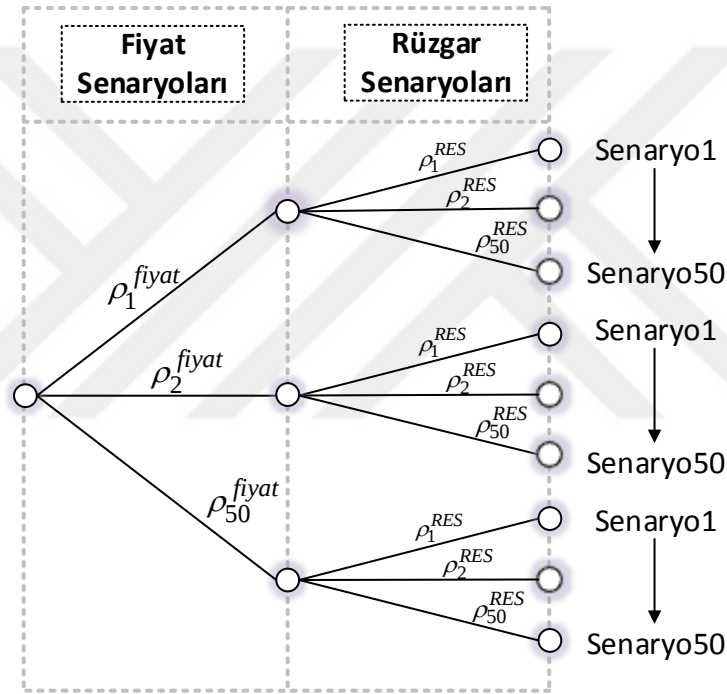
Tesisler 2016 yılı ilk 30 günün GÖP ve RES üretim değerleri kullanılarak beraberce işletildiğinde elde edilen sonuçlar ayrık çalışma ile kıyaslamalı olarak aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir.

Çizelge 5.14. Deterministik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar

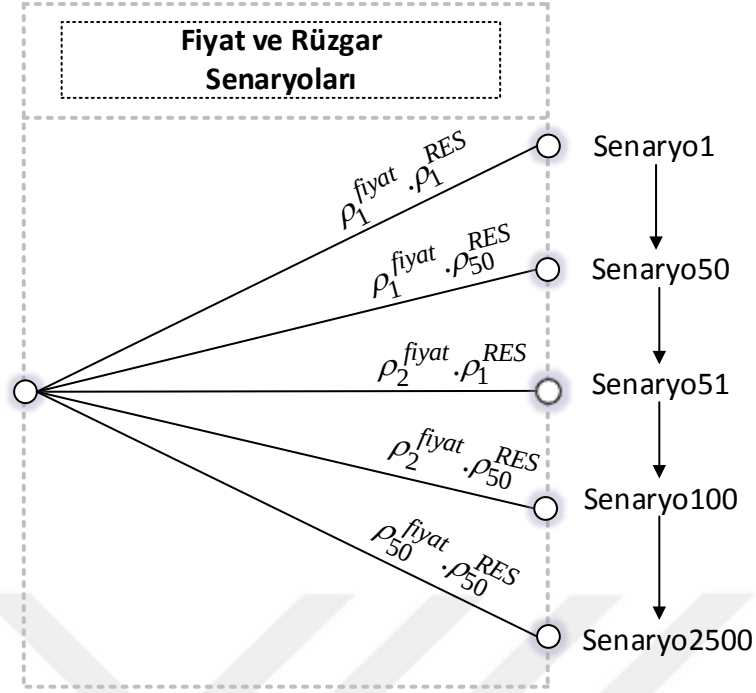
Ayrık Teklif Dengesizlik Miktarı (MWh)	Birleşik Teklif Dengesizlik Miktarı (MWh)	Ayrık Teklif Deterministik Model Geliri (TL)	Birleşik Teklif Deterministik Model Geliri (TL)
8.154,6	2.253,9	3.350.964,6	3.414.053,9

5.6.2 Stokastik RES ve PDHES işletim modeli

Stokastik yaklaşım ile oluşturulan modelde fiyat ve RES çıkış gücü tahmin değerlerinin güvenilir olmadığı kabul edilmiştir. Oluşturulan modelde bu iki tahmin değeri yerine gerçekleşmesi muhtemel fiyat ve RES gücü senaryoları kullanılmıştır. Geliştirilen diğer stokastik modellerden farklı olarak bu modelde iki senaryo seti kullanılmıştır. Bu senaryoların gerçekleşme zamanları modelin çözümünü etkilemediğinden senaryolar birleştirilmiştir. Senaryoların ayırık ve birleştirilmiş halleri sırasıyla Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Ayırık senaryolardan oluşan senaryo ağacı.



Şekil 5.22. Birleşik senaryolardan oluşan senaryo ağacı.

Stokastik model tüm senaryoları dikkate alarak en iyi geliri elde eden teklif setini aramaktadır. Model, bir önceki bölümde verilmiş deterministik modelde tahminler yerine senaryolar yazılarak elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu ve kısıtlar deterministik model ile aynı yapıdadır. Modeli temsil eden eşitlikler aşağıdaki gibidir.

$$\text{maks. } f = \sum_{s=1}^{50} \rho_s^{\text{fiyat}} \sum_{s=1}^{50} \rho_s^{\text{RES}} \sum_{t=1}^{24} \left\{ PTF_{t,s} \cdot \text{RES\&PDHES}_{t,s} + \lambda_{t,s}^1 \cdot PTF_{t,s} \cdot 0,03 + \lambda_{t,s}^2 \cdot PTF_{t,s} \cdot 0,03 \right\} \quad (5.72)$$

$$\text{k.s. } \lambda_{t,s}^1 \leq 0 \quad (5.72)$$

$$\lambda_{t,s}^2 \leq 0 \quad (5.73)$$

$$\lambda_{t,s}^1 \leq \text{RES\&PDHES}_{t,s} - X_t^{\text{teklif}} \quad (5.74)$$

$$\lambda_{t,s}^2 \leq X_t^{\text{teklif}} - \text{RES\&PDHES}_{t,s} \quad (5.75)$$

$$\text{Rez}_{t,s}^{\text{üst}} = \text{Rez}_{(t-1),s}^{\text{üst}} + \text{Pompa}_{t,s} \cdot \eta_p - \text{Türbin}_{t,s} / \eta_t \quad (5.76)$$

$$\text{Rez}_{t,s}^{\text{alt}} = \text{Rez}_{(t-1),s}^{\text{alt}} - \text{Pompa}_{t,s} \cdot \eta_p + \text{Türbin}_{t,s} / \eta_t \quad (5.77)$$

$$\text{RES\&PDHES}_{t,s} = \text{Türbin}_{t,s} - \text{Pompa}_{t,s} + \text{RES}_{t,s} \quad (5.78)$$

$$0 \leq \text{Türbin}_{t,s} \leq \text{Türbin}^{\text{nominal}} \quad (5.79)$$

$$0 \leq Pompa_{t,s} \leq Pompa^{nominal} \quad (5.80)$$

$$0 \leq Rez_{t,s}^{üst} \leq Rez^{mak.} \quad (5.81)$$

$$0 \leq Rez_{t,s}^{alt} \leq Rez^{mak.} \quad (5.82)$$

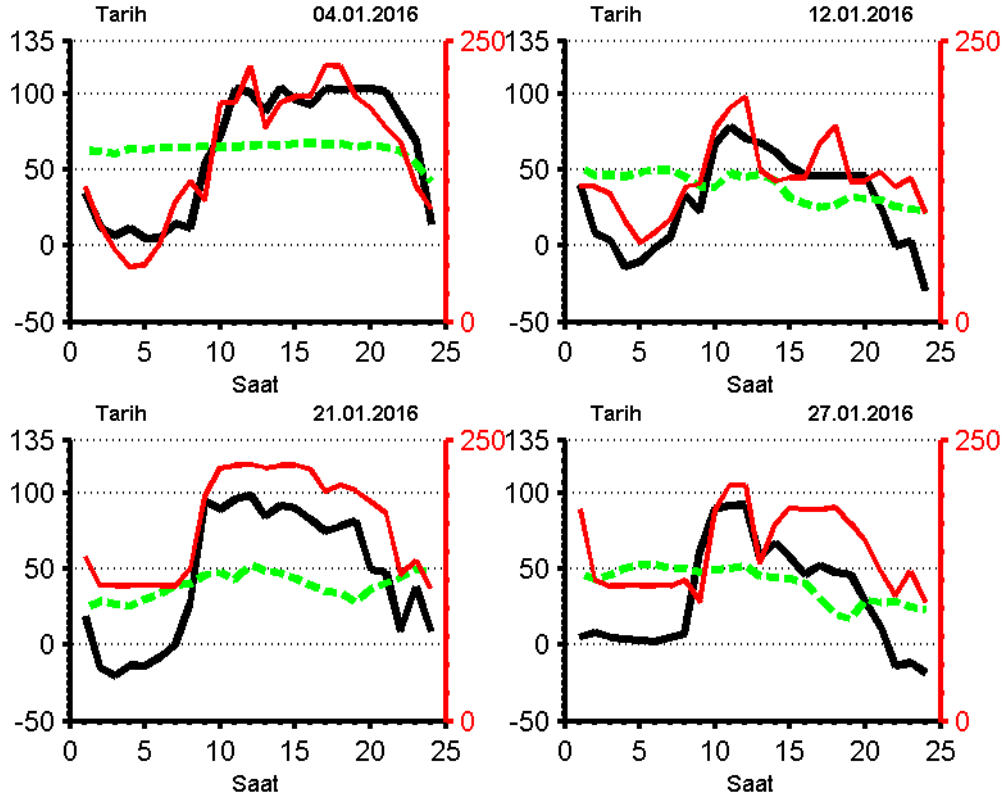
$$-Pompa^{nominal} \leq X_t^{teklif} \leq Türbin^{nominal} + RES^{nominal} \quad (5.83)$$

Modelin değişken türleri deterministik model ile aynıdır. Fakat tahmin değerleri yerine senaryolar kullanıldığından değişen sayısı artmıştır. Kullanılan sabitlerin değerleri Çizelge 5.8’de verilen değerlerdir. Değişken sayısı Çizelge 5.15’te verilmiştir.

Çizelge 5.15. Stokastik modelde kullanılan değişken sayıları

Değişken Adı	Adet
$RES\&PDHES_{t,s}$	60000
$\lambda_{t,s}^1$	60000
$\lambda_{t,s}^2$	60000
$Rez_{t,s}^{üst}$	60000
$Rez_{t,s}^{alt}$	60000
$Pompa_{t,s}$	60000
$Türbin_{t,s}$	60000
$PDHES_t$	24
X_t^{teklif}	24
Toplam	420048

Model çözümünden beklenen iki durum vardır. Bunlardan biri ortak teklifin ayrık RES teklifine daha az dengesizliğe düşmesidir. Diğer durum ise ortak teklifin PTF eğrisini takip etmesidir. Bu iki durumun gösterimi için 2016 yılı ilk 30 gününden seçilen dört günde oluşmuş teklifler , üretimler ve PTF değerleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Grafiklerde, gerçek fiyat kırmızı, toplam PDHES ve RES üretim/tüketimleri siyah, RES üretimi yeşil renk ile gösterilmiştir. Grafiklerin solundaki düşey eksen PDHES ve RES üretimi (MWh), sağındaki düşey eksen fiyat (TL/MWh) değerleri için oluşturulmuştur.



Şekil 5.23. RES ve PDHES tesislerinin beraber stokastik model ile işletimi sonuçları.

Tesisler 2016 yılı şartlarında beraberce işletildiğinde elde edilen sonuçlar mükemmel tahmin kullanılan çözüm sonuçları ile kıyaslamalı olarak aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir.

Çizelge 5.16. Stokastik yaklaşım ile elde edilen sonuçlar

Ayrık Teklif Dengesizlik Miktarı (MWh)	Birleşik Teklif Dengesizlik Miktarı (MWh)	Ayrık Teklif Stokastik Model Geliri (TL)	Birleşik Teklif Stokastik Model Geliri (TL)
7154,4	661,8	3.392.595,9	3.456.108,4

Tez kapsamında önerilen işletim optimizasyonu modellerinin sonuçları bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

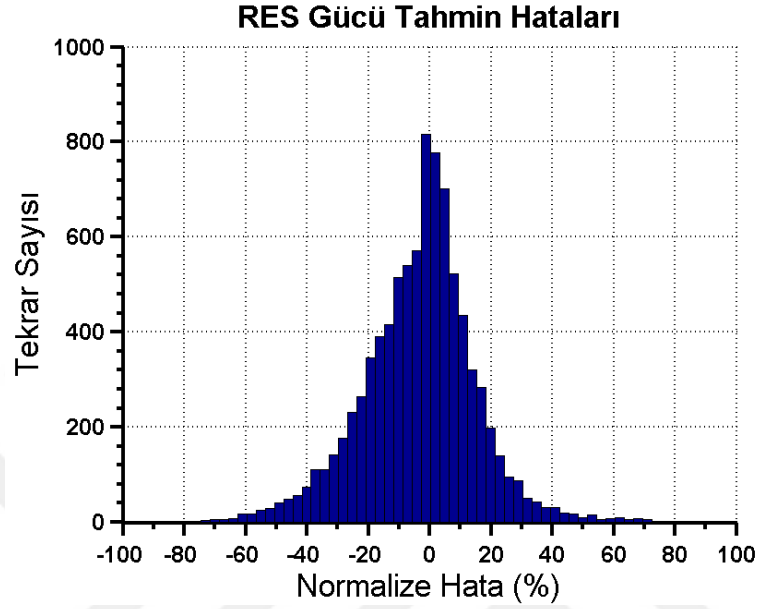
6. SONUÇLAR

Rüzgar enerjisi, çevresel etkisinin çok düşük olması ve kaynak olarak maliyetinin sıfır olmasından dolayı cazip bir enerji kaynağıdır. Ülkeler bu cazip enerji kaynağını daha çok kullanma konusunda politikalar ve teşvik mekanizmaları geliştirmiş ve son yıllarda, enterkonnekte elektrik şebekelerine bağlı rüzgar enerjisi kurulu gücü hızla artmıştır. Bu hızlı artış, rüzgar enerjisinin kontrol edilemeyen ve kararsız bir karakteristiğe sahip olmasından dolayı, şebekelerde enerji dengesini bozucu etki oluşturmuştur. Rüzgar enerjisinin bozucu etkilerinin giderilmesi konusunda yapılan araştırmalar bu sorunun giderilmesi için bir enerji depolama sistemine ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. PDHES tesisleri alternatiflerine göre daha ekonomik ve basit bir teknolojiye sahip olduklarından bu görev için kullanılabilecekleri düşünülmüştür. PDHES tesisleri RES üretimlerini zaman ekseninde kaydırmak ve üretimlerdeki kararsız karakteristiği daha kararlı hale getirmek amacıyla kullanılacaktır. Bu süreç gün öncesi planlama aşamasında gerçekleştirilebilecektir.

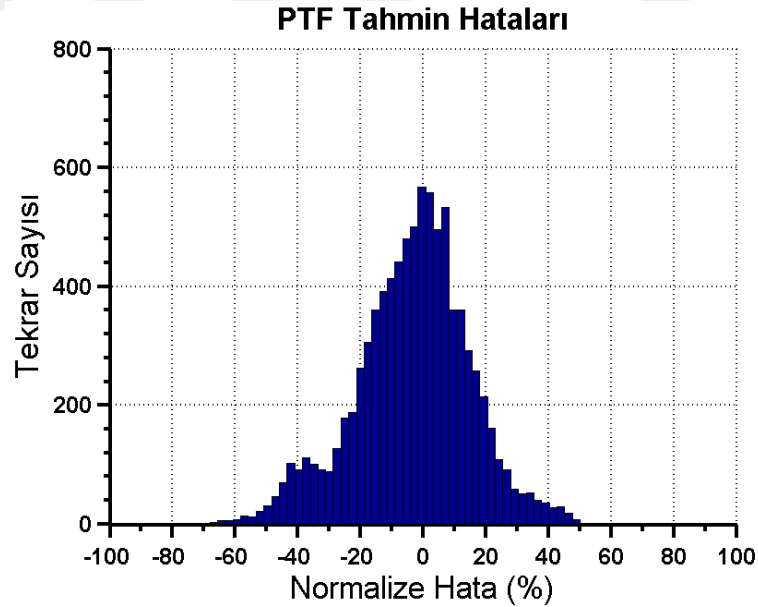
Elektrik şebeke sistemlerinin sağlıklı bir şekilde işletimi için gün öncesi planlamanın oldukça önemli olduğu bilinmektedir. Gün öncesi planlama aşamasında üretim ve tüketim tesisleri bir gün sonra gerçekleştirecekleri üretim/tüketim miktar ve zamanlarını şebeke operatörlerine bildirmektedirler. Bildirilen bu teklifler şebeke operatörü tarafından değerlendirilerek sistemde oluşabilecek enerji dengesizliklerine karşı önlemler alınmaktadır. Mevcut şebeke sistemlerinde bu planlama GÖP mekanizmaları ile gerçekleştirilmektedir.

GÖP şartlarında RES ve PDHES tesislerinin işletilebilmesi için RES çıkış gücü ve PTF tahminlerine ihtiyaç vardır. Türkiye’de ülke çapında santral bazlı RES çıkış gücü tahminleri yapılan bir merkez bulunmaktadır. Merkez, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü bünyesinde kurulmuş ve ülkedeki tüm RES tesisleri için tahmin üretmektedir. Tez çalışmasında bu merkezden alınan tahmin verileri kullanılmıştır. Ülkede kabul görmüş bir fiyat tahmini sistemi bulunmadığından tez kapsamında bir fiyat tahmini modeli geliştirilmiştir. Model çok katmanlı bir yapay sinir ağı kullanılarak oluşturulmuştur. Model bazı yıllarda başarılı olmasına karşın bazı yıllarda istenen performansı yakalayamamıştır. Model performansındaki bu değişimin, piyasa yapısının yıllara göre değişmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu durum MYTM personelleri ile paylaşılmış ve merkezde çalışan uzman personellerin görüşleri alınmıştır. Görüşleri alınan uzman personeller de piyasa yapısının her yıl değiştiğini ve fiyatların bu durumdan etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca mevcut piyasa şartlarında sağlıklı fiyat tahmini yapılamayacağı da bu personeller tarafından belirtilmiştir. Bu sebeplerle oluşturulan model ile elde edilen Şekil 6.1

ve Şekil 6.2’de sırasıyla RES çıkış gücü ve fiyat tahmin hatası dağılımlarının histogram grafikleri verilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de tahmin performansları farklı performans indislerine göre değerlendirilmiştir.



Şekil 6.1. 2016 yılı RES gücü tahmin hataları histogram grafiği.



Şekil 6.2. 2016 yılı PTF tahmin hataları histogram grafiği.

Çizelge 6.1. Fiyat tahmin modelleri performans değerleri

Yıl	MAPE	NMAE	NRMSE
2016	29,5145	17,5490	24,5722

Çizelge 6.2. RES gücü tahmini modeli performans değerleri

Model	Yıl	NMAE	NRMSE
RİTM	2016	13.8451	18.7276

İlk aşamada tesislerin ayrı ayrı işletimi için optimizasyon modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen ilk modellerde tahmin değerlerinin güvenilir olduğu kabul edilmiş ve deterministik yaklaşım kullanılmıştır. Bu modellerin girdileri fiyat ve RES çıkış gücü tahminleridir. İkinci aşamada tahmin değerlerinin stokastik olduğu kabul edilmiş ve tesislerin işletimi için stokastik optimizasyon modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerin girdileri ise fiyat ve RES gücü senaryolarıdır. Senaryolar gerçekleşmesi muhtemel fiyat ve güç değerlerinden oluşmaktadır. Senaryoların kalitesi stokastik modellerin performansını etkilediğinden bu konu ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tez kapsamında RES çıkış gücü ve fiyat senaryoları üretmek için yeni bir yöntem öne sürülmüş ve kullanılmıştır. Tez kapsamında oluşturulan bu stokastik ve deterministik modeller kullanılarak 2016 yılı ilk 30 günü için elde edilen neticeler Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 6.3 Deterministik ve stokastik yaklaşım, RES tesis için elde edilen sonuçlar

Tesis	RES	
Model	Deterministik	Stokastik
Dengesizlik Miktarı (MWh)	8.154,6	7.154,4
Model Geliri (TL)	2.884.897,6	2.918.817,9

Çizelge 6.4 Deterministik ve stokastik yaklaşım, PDHES tesis için elde edilen sonuçlar

Tesis	PDHES	
Model	Deterministik	Stokastik
Model Geliri (TL)	466.067	473.778

Tez çalışması kapsamında tesislerin ayrı işletimi incelendikten sonra bu iki tesisin beraber tek teklif oluşturarak işletilmesi durumu da incelenmiştir. Beraber işletimde iki tesis sanki bir tesismiş gibi GÖP mekanizmasına teklif sunmuştur. Bu çalışma şekli için de deterministik ve stokastik yaklaşım ile optimizasyon modelleri geliştirilmiştir. Tesislerin 2016 yılında beraber işletimi sonucu elde edilen değerler Çizelge 6.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 6.5. Deterministik ve stokastik yaklaşım, RES ve PDHES tesislerinin beraber işletimi sonucu elde edilen değerler

Tesis	RES ve PDHES Ayrık İşletim		RES ve PDHES Birlikte İşletim	
	Deterministik	Stokastik	Deterministik	Stokastik
Model				
Dengesizlik Miktarı (MWh)	8.154,6	7.154,4	2.253,9	661,8
Model Geliri (TL)	3.350.964,6	3.392.595,9	3.414.053,9	3.456.108,4

Tez çalışmasının sonuçları ışığında aşağıdaki durumlar tespit edilmiştir.

1) Stokastik yaklaşım deterministik yaklaşıma kıyasla, RES ve PDHES tesislerinin beraber ve ayrık işletiminde, yukarıdaki çizelgelerde özetlendiği gibi daha iyi sonuçlar vermiştir.

2) Türkiye şartlarında bir RES tesisinin bir PDHES tesisi ile beraber işletilmesi durumunda tahmin hatalarından kaynaklı enerji dengesizlik miktarlarının yukarıdaki çizelgelerde özetlendiği gibi önemli ölçüde azaltılabildiği görülmüştür.

3) Mevcut YEKDEM piyasasına katılan düşük kapasite faktörlü HES tesislerinin 10 yıllık teşvik süresi dolduktan sonra PDHES'e dönüştürülerek gelirlerinin arttırılabileceği ve bu tesislerin RES tesisleri ile beraber işletilebileceği tespit edilmiştir.

Yukarıda özetlenen tespitler ışığında PDHES tesislerinin ülke şebekesine faydalı olacağı sonucuna varılmıştır. Ayrıca düşük kapasite faktörlü HES tesislerinin PDHES'e dönüştürülmesinin tesis sahipleri için bir fırsat olabileceği de düşünülmektedir.

Son olarak, tez konusu ile ilgili sonraki aşamada yapılacak bazı çalışmalar, önem sırasına göre, aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1) Tez kapsamında GÖP şartlarında RES ve PDHES tesislerinin en iyi şekilde işletimi irdelenmiştir. Gerçek zamana daha yakın ve GÖP piyasasını tamamlayıcı nitelikte olan GİP ve DGP şartlarında da bu tesislerin işletimi irdelenecektir.

2) Tez çalışması seçilen örnek bir HES ve RES tesisinde gerçekleştirilmiştir. Ülke şebekesine bağlı çok sayıda RES ve HES tesis bulunmaktadır. Sonuçların zenginleştirilmesi amacıyla, tez çalışmasında önerilen yaklaşımlar farklı tesislerde de irdelenecektir.

3) Tez kapsamında benimsenen yaklaşımda, mevcut ülke şebekesine, PDHES tesisleri eklenerek şebekenin enerji depolama kapasitesinin arttırılması hedeflenmektedir. Böylece arz fazlası RES üretimleri depolanıp, yüksek talep güç oluşan saatlere taşınacak ve şebekeye daha fazla RES tesisi bağlanabilecektir. Ülke şebekesinde enerji depolama kapasitesine sahip barajlı HES'ler bulunmaktadır. Bu tesislerin depolama kapasiteleri mevcut durumda

RES dengesizliklerinin giderilmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Fakat ülkenin rüzgar enerjisi potansiyeli oldukça yüksek olduğundan bu tesislerin depolama kapasitesi RES kurulu gücü arttıkça yetersiz kalacaktır. Bu durum göz önünde tutularak şebekede ek depolama ihtiyacı duyulacak RES kurulu gücü değeri araştırılacaktır. Ayrıca bu RES kurulu gücü değerine ulaşılmadan önce RES ve barajlı HES tesislerinin optimal işletimi de irdelenecektir.



KAYNAKLAR

- Anagnostopoulos, J., Papantonis, D. 2008. Simulation and Size Optimization of a Pumped–Storage Power Plant for the Recovery of Wind-Farms Rejected Energy. *Renewable Energy*, 33 (7):1685-1694
- Ayodele, T., Ogunjuyigbe, A. 2015. Mitigation of Wind Power Intermittency: Storage Technology Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44:447-456
- Bludszuweit, H., Domínguez-Navarro, J. A., Llombart, A. 2008. Statistical Analysis of Wind Power Forecast Error. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23 (3):983-991
- Castronuovo, E. D., Lopes, J. P. 2004. On the Optimization of the Daily Operation of a Wind-hydro Power Plant. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19 (3):1599-1606
- De la Nieta, A. A. S., Contreras, J., Munoz, J. I. 2013. Optimal Coordinated Wind-Hydro Bidding Strategies in Day-Ahead Markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (2):798-809
- Dhillon, J., Kumar, A., Singal, S. 2012. Operation of Wind and Pumped Storage Plant Under Deregulated Environment. *Water and Energy International*, 69 (11):30-34
- Dhillon, J., Kumar, A., Singal, S. 2014. Optimization Methods Applied for Wind–PSP Operation and Scheduling Under Deregulated Market: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:682-700
- Dupačová, J., Gröwe-Kuska, N., Römisch, W. 2003. Scenario Reduction in Stochastic Programming. *Mathematical programming*, 95 (3):493-511
- Faias, S., de Sousa, J., Reis, F. S., Castro, R. 2012. Assessment and Optimization of Wind Energy Integration into the Power Systems: Application to the Portuguese System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3 (4):627-635
- Flatabo, N., Doorman, G., Grande, O. S., Randen, H., Wangensteen, I. 2003. Experience with the Nord Pool Design and Implementation. *IEEE Transactions on power systems*, 18 (2):541-547
- Foley, A. M., Leahy, P. G., Marvuglia, A., McKeogh, E. J. 2012. Current Methods and Advances in Forecasting of Wind Power Generation. *Renewable Energy*, 37 (1):1-8
- Fouquet, D., Johansson, T. B. 2008. European Renewable Energy Policy at Crossroads—Focus on Electricity Support Mechanisms. *Energy policy*, 36 (11):4079-4092
- Garcia-Gonzalez, J., de la Muela, R. M. R., Santos, L. M., Gonzalez, A. M. 2008. Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-Storage Units in an Electricity Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23 (2):460-468
- Growe-Kuska, N., Heitsch, H., Romisch, W. 2003. Scenario Reduction and Scenario Tree Construction for Power Management Problems. In: Power tech conference proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003. IEEE, p 7 pp. Vol. 3

- Heitsch, H., Römis, W. 2003. Scenario Reduction Algorithms in Stochastic Programming. *Computational Optimization and Applications*, 24 (2-3):187-206
- Hosseini-Firouz, M. 2013. Optimal Offering Strategy Considering the Risk Management for Wind Power Producers in Electricity Market. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 49:359-368
- Hu, X., Sun, Q., Zhang, H., Wang, Z. 2012. Multi-Objective Optimal Design of Wind/PV/Pumped-Storage System Based on GA. In: Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 2012. IEEE, pp 1-4
- Jiang, R., Wang, J., Guan, Y. 2012. Robust Unit Commitment with Wind Power and Pumped Storage Hydro. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27 (2):800-810
- Kanakasabapathy, P., Swarup, K. S. 2010. Evolutionary Tristate PSO for Strategic Bidding of Pumped-Storage Hydroelectric Plant. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 40 (4):460-471
- Lee, T.-Y. 2008. Short Term Hydroelectric Power System Scheduling with Wind Turbine Generators Using the Multi-Pass Iteration Particle Swarm Optimization Approach. *Energy Conversion and Management*, 49 (4):751-760
- Lu, N., Chow, J. H., Desrochers, A. A. 2003. Pumped-Storage Hydro-Turbine Bidding Strategies in a Competitive Electricity Market. In: Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, 2003. IEEE, pp 831-837
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J. 2015. Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation. *Applied Energy*, 137:511-536
- Ma, X.-Y., Sun, Y.-Z., Fang, H.-L. 2013. Scenario Generation of Wind Power Based on Statistical Uncertainty and Variability. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4 (4):894-904
- Matevosyan, J., Soder, L. 2006. Minimization of Imbalance Cost Trading Wind Power on the Short-Term Power Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (3):1396-1404
- Meibom, P., Barth, R., Hasche, B., Brand, H., Weber, C., O'Malley, M. 2011. Stochastic Optimization Model to Study the Operational Impacts of High Wind Penetrations in Ireland. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26 (3):1367-1379
- Meneses de Quevedo, P., Contreras, J. 2016. Optimal Placement of Energy Storage and Wind Power Under Uncertainty. *Energies*, 9 (7):528
- Merzic, A., Music, M., Haznadar, Z. 2017. Conceptualizing Sustainable Development of Conventional Power Systems in Developing Countries—A Contribution Towards Low Carbon Future. *Energy*, 126:112-123
- Morales, J. M., Conejo, A. J., Pérez-Ruiz, J. 2010a. Short-Term Trading for a Wind Power Producer. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25 (1):554-564

- Morales, J. M., Minguez, R., Conejo, A. J. 2010b. A Methodology to Generate Statistically Dependent Wind Speed Scenarios. *Applied Energy*, 87 (3):843-855
- Muche, T. 2014. Optimal Operation and Forecasting Policy for Pump Storage Plants in Day-Ahead Markets. *Applied Energy*, 113:1089-1099
- Nagura, O., Higuchi, M., Tani, K., Oyake, T. 2010. Hitachi's Adjustable-Speed Pumped-Storage System Contributing to Prevention of Global Warming. *Hitachi Review*, 59 (3):99-105
- Oskouei, M. Z., Yazdankhah, A. S. 2015. Scenario-Based Stochastic Optimal Operation of Wind, Photovoltaic, Pump-Storage Hybrid System in Frequency-Based Pricing. *Energy Conversion and Management*, 105:1105-1114
- Parastegari, M., Hooshmand, R.-A., Khodabakhshian, A., Zare, A.-H. 2015. Joint Operation of Wind Farm, Photovoltaic, Pump-Storage and Energy Storage Devices in Energy and Reserve Markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64:275-284
- Pinson, P., Madsen, H., Nielsen, H. A., Papaefthymiou, G., Klöckl, B. 2009. From Probabilistic Forecasts to Statistical Scenarios of Short-Term Wind Power Production. *Wind Energy*, 12 (1):51-62
- Pousinho, H. M. I., Mendes, V. M. F., Catalão, J. P. d. S. 2012. A Stochastic Programming Approach for the Development of Offering Strategies for a Wind Power Producer. *Electric Power Systems Research*, 89:45-53
- Sarfati, M. 2012. Modeling the diversification benefit of transmission investments: in the presence of uncorrelated generation sources. Yüksek Lisans Tezi. Department of Electrical Power Systems School of Electrical Engineering KTH Royal Institute of Technology. 88s.
- Sharma, K. C., Bhakar, R., Tiwari, H. 2014. Strategic Bidding for Wind Power Producers in Electricity Markets. *Energy Conversion and Management*, 86:259-267
- Sharma, K. C., Jain, P., Bhakar, R. 2013. Wind Power Scenario Generation and Reduction in Stochastic Programming Framework. *Electric Power Components and Systems*, 41 (3):271-285
- Siahkali, H. 2011. Wind Farm and Pumped Storage Integrated in Generation Scheduling Using PSO. In: Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference on, 2011. IEEE, pp 1-4
- Siahkali, H., Vakilian, M. 2009. Electricity Generation Scheduling with Large-Scale Wind Farms Using Particle Swarm Optimization. *Electric Power Systems Research*, 79 (5):826-836
- Sumaili, J., Keko, H., Miranda, V., Zhou, Z., Botterud, A., Wang, J. 2011. Finding Representative Wind Power Scenarios and Their Probabilities for Stochastic Models. In: Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference on, 2011. IEEE, pp 1-6

- Terciyanli, E., Demirci, T., Kucuk, D., Sarac, M., Cadirci, I., Ermis, M. 2014. Enhanced Nationwide Wind-Electric Power Monitoring and Forecast System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10 (2):1171-1184
- Ummels, B., Pelgrum, E., Kling, W. 2008. Integration of Large-Scale Wind Power and Use of Energy Storage in the Netherlands' Electricity Supply. *IET Renewable Power Generation*, 2 (1):34-46
- Varkani, A. K., Daraeepour, A., Monsef, H. 2011. A New Self-Scheduling Strategy for Integrated Operation of Wind and Pumped-Storage Power Plants in Power Markets. *Applied Energy*, 88 (12):5002-5012
- Wan, Y.-H., Ela, E., Orwig, K. 2010. Development of an Equivalent Wind Plant Power-Curve. In: Proceedings of the WindPower, 2010. pp 23-26
- Wang, X., Guo, P., Huang, X. 2011. A Review of Wind Power Forecasting Models. *Energy Procedia*, 12:770-778
- Winnington, F. K. a. E. 2012. Evaluating the Benefits of Stochastic Optimization for Hydro Assets. In: 4th IEEE and Cigré International Workshop in Bergen, 2012.
- Yıldız, C., Şekkeli, M. 2014. Türkiyede Bir Rüzgar Enerjisi Santrali ile Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santralin Birlikte İşletilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (2)
- Yıldız, C., Şekkeli, M. 2016a. Türkiye Gün Öncesi Elektrik Piyasasında Rüzgar Enerjisi ve Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral için Optimum Teklif Oluşturulması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (5):361-366
- Yıldız, C., Şekkeli, M. 2016b. Türkiyede Bir Rüzgar Enerjisi Santrali Üretim Karakteristiğinin Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral ile Değiştirilmesi. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 3 (2)
- Yildiz, C., Tekin, M., Gani, A., Kecicioglu, O. F., Acikgoz, H., Sekkeli, M. 2017. A Day-Ahead Wind Power Scenario Generation, Reduction, and Quality Test Tool *Sustainability-Basel*, 9 (5). doi:ARTN 864 10.3390/su9050864

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Ceyhun YILDIZ
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 26.01.1979, Kahramanmaraş
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (344) 300 41 53
Faks : 0 (344) 300 16 02
e-posta : cyildiz@ksu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	KSÜ /Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	2008
Lisans	MKÜ/ Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	2003
Lise	Kahramanmaraş Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-	KSÜ Elbistan Meslek Yüksekokulu.	Öğretim Görevlisi
2008-2015	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü.	Yüksek Mühendis
2005-2008	KSÜ Elektrik – Elektronik Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI, SCI- EXP kapsamındaki dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Yıldız, C., Tekin, M., Gani, A., Keçecioğlu, Ö. F., Açıkgöz, H., Şekkeli, M. 2017. A Day-Ahead Wind Power Scenario Generation, Reduction, and Quality Test Tool. *Sustainability-Basel*, 9 (5):864
2. İmal, M., Sekkeli, M., Yıldız, C., Kececioğlu, F. 2012. Wind Energy Potential Estimation and Evaluation of Electricity Generation in Kahramanmaraş, Turkey. *Energy Education Science and Technology Part A Ebergy Science and Research*, 30 (1):661-672

3. Kececioğlu, O. F., Acikgoz, H., Yildiz, C., Gani, A., Sekkeli, M. 2017. Power Quality Improvement Using Hybrid Passive Filter Configuration for Wind Energy Systems. *J Electr Eng Technol*, 12 (1):207-216
4. Acikgoz, H., Kececioğlu, O. F., Yildiz, C., Gani, A., Sekkeli, M. 2016. Performance Analysis of Electronic Power Transformer Based on Neuro-Fuzzy Controller. *Springerplus*, 5 (1):1350
5. Gani, A., Yildiz, C., Acikgoz, H., Sekkeli, M., Kececioğlu, O. F. 2016b. Improved Control Configuration of PWM Rectifiers Based on Neuro-Fuzzy Controller. *Springerplus*, 5 (1):1142

Diğer Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Sekkeli, M., Keçecioğlu, O. F., Açıkgoz, H., Yıldız, C. 2013. A Comparison Between Theoretically Calculated and Actually Generated Electrical Powers of Wind Turbines: A Case Study in Belen Wind Farm, Turkey. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 1 (3):41-47
2. Şekkeli, M., Yıldız, C., Karık, F., Sözen, A. 2016. Wind Energy in Turkey Electricity Market. *Gazi Journal of Engineering Science*, 1 (2)
3. Yıldız, C., Şekkeli, M. 2016a. Optimal Bidding in Turkey Day Ahead Electricity Market for Wind Energy and Pumped Storage Hydro Power Plant. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (5):361-366. doi:10.5505/pajes.2016.34654
4. Yıldız, C., Keçecioğlu, Ö. F., Açıkgoz, H., Gani, A., Şekkeli, M. 2015. Power Quality Measurement and Evaluation of a Wind Farm Connected to Distribution Grid. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195:2370-2375
5. Yildiz, C., Tekin, M., Gani, A., Kececioğlu, O. F., Acikgoz, H., Sekkeli, M. 2017. Considerin Air Density Effect on Wind Farm Power Curve Using Site Measurements. *Pressacademia*, 57:420-430. doi:10.17261/Pressacademia.2017.619
6. Tekin, M., Kececioğlu, O. F., Yildiz, C., Gani, A., Acikgoz, H., Sekkeli, M. K. M. 2017. Investigation of the Effects of Renewable Energy Sources on Interconnection Networks. *Pressacademia Procedia*, 57. doi:10.17261/Pressacademia.2017.618
7. Karik, F., Yildiz, C., Kaytez, F. 2017. A Robust Adaptive Control of Interleaved Boost Converter with Power Factor Correction in Wind Energy Systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 5 (1):22-28. doi:10.18201/ijisae.2017526692
8. Gani, A., Keçecioğlu, Ö. F., Açıkgoz, H., Yıldız, C., Şekkeli, M. 2016a. Simulation Study on Power Factor Correction Controlling Excitation Current of Synchronous Motor with Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 4 (Special Issue):229-233
9. Açıkgoz, H., Keçecioğlu, Ö. F., Gani, A., Yıldız, C., Şekkeli, M. 2015. Optimal Control and Analysis of Three Phase Electronic Power Transformers. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195:2412-2420

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler :

1. Özçalık, H. R., Yıldız, C., Danacı, M., Koca, Z. RBF Based Induction Motor Control with a Good Nonlinearity Compensation. In: International Work-Conference on Artificial Neural Networks, 2007. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 878-886
2. Özkan, M., Terciyanlı, E., Küçük, D., Buhan, S., Demirci, T., Yıldız, C., Günindi, M. Verification of a Real-Time Wind Power Monitoring and Forecast System for Turkey. In: 2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), Beijing, China, 2013. IET,
3. Terciyanlı, E., Yıldız, C. Optimal Operation of a Wind Powered Pumped Storage Hydroelectricity Plant. In: Int. Conf. on Sust. En. Tech, 2011.
4. Sekkeli, M., Yıldız, C., Ozcalik, H. Fuzzy Logic Based Intelligent Speed Control of Induction Motor Using Experimental Approach. In: International Symposium on Innovaitons in intelligent SysTems and Applications, Trabzon/Turkey, June, 2009.
5. Yildiz, C., Yilmaz, A., Bayrak, M. Genetic Algorithm Based PI Controller for Load Frequency Control in Power Systems. In: Proceedings of 5th international symposium on intelligent manufacturing systems, 2006. pp 1202-1210
6. Acikgoz, H., Yildiz, C., Kale, G., Kececioglu, O. F., Gani, A., Sekkeli, M. Speed control of induction motor based on model reference adaptive control. In: Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2015 9th International Conference on, Bursa, Turkey, 2015. IEEE, pp 654-659
7. Açıkgoz, H., Keçecioglu, Ö. F., Gani, A., Yıldız, C., Şekkeli, M. (2016b) Design and Analysis of Electronic Power Transformer in Matlab/Simulink. Paper presented at the ICNASE'16, Kilis Turkey,
8. Açıkgoz, H., Keçecioglu, Ö. F., Gani, A., Yıldız, C., Şekkeli, M. (2016a) Control of Dual Active Bridge Converter Based Solid-State Transformers Using Fuzzy Logic Controller. Paper presented at the 1st International Conference on Engeneering Technology and Applied Sciences, Afyon Turkey,

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler :

1. Yıldız, C., Şekkeli, M. 2016c. Türkiyede Bir Rüzgar Enerjisi Santrali Üretim Karakteristiğinin Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral ile Değiştirilmesi. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 3 (2).
2. Yıldız, C., Şekkeli, M. 2014. Türkiyede Bir Rüzgar Enerjisi Santrali ile Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santralin Birlikte İşletilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1 (2)
3. Özçalık, H., Türk, A., Yıldız, C., Koca, Z. 2008. Katı Yakıtlı Buhar Kazanında Yakma Fanının Bulanık Mantık Denetleyici ile Kontrolü. *KSÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (1)
4. İmal, M., Sekkeli, M., Yıldız, C. 2012b. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Ana Kampüste Rüzgar Enerji Potansiyeli Araştırması ve Değerlendirmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (2):11-16

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. Sekkeli, M., Yıldız, C., İmal, M. (2009) İklimlendirme (HVAC) Sisteminin Merkezci Taban Fonksiyonlu Yapay Sinir Ağları (RBF) Kullanılarak Denetlenmesi. Paper presented at the V. Otomasyon Sempozyumu, İzmir Türkiye,
2. Sekkeli, M., Yıldız, C., Özçalık, H. R. Bulanık Mantık ve PI Denetimli DC-DC Konvertöre Modellenmesi ve Dinamik Performans Karşılaştırması. In: IV. Otomasyon Sempozyumu, 2007.

Görev Aldığı Ulusal Projeler :

1. Türkiye’de Rüzgârdan Üretilen Elektriksel Güç İçin İzleme ve Tahmin Sistemi Geliştirilmesi Projesi (2010 – 2014)
2. Yalova Rüzgar Destekli Pompaj Depolamalı HES Tesisi Elektromekanik Sistemler Kavramsal Tasarım Projesi (2009 – 2011)

Hobiler

Seyahat, Koşu, Doğa yürüyüşleri.