

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANILDIĞI ELEKTRİK
DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE ENERJİ DEPOLAMA VE DAĞITIM
OPERASYONU KARARLARI OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Cansu AĞRALI

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN

Ağustos 2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131311024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cansu AĞRALI** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANILDIĞI ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE ENERJİ DEPOLAMA VE DAĞITIM OPERASYONU KARARLARI ”** başlıklı tezi **02.08.2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Yrd. Doç. Dr. Salih TEKİN**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Bülent TAVLI (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Niyazi Onur BAKIR
İstanbul Kemerburgaz Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Gültekin KUYZU
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Cansu Ağralı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANILDIĞI ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE ENERJİ DEPOLAMA VE DAĞITIM OPERASYONU KARARLARI OPTİMİZASYONU

Cansu AĞRALI

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Hakan GÜLTEKİN

Tarih: Ağustos 2016

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları portföyü bulunan ve bu kaynakları belirli bir coğrafyadaki müşterilere enerji sağlamada kullanan bir firma ele alınmıştır. Firma kullandığı dağıtım ağı üzerinde enerji depolama sistemleri kullanmak istemektedir. Firma müşteri taleplerini karşılamak için hem elindeki yenilenebilir kaynakları hem de spot elektrik marketlerini kullanabilmektedir. Firma çok periyotlu kapasite yönetim problemi ile karşı karşıyadır. Enerji depolama sistemlerinin kullanılması ile önceki periyotlarda üretilen enerjinin sonraki periyotlara aktarılma durumu olabilecektir. Boşa giden enerji (geceleri rüzgârdan çok fazla üretim olup, talebin çok az olması) ile yenilenebilir kaynakların daha verimli kullanılması sağlanmış olacaktır. Ayrıca firma enerji depolama sayesinde, elektrik piyasalarında fiyat düşük iken enerjiyi depolarken, fiyat yükseldiğinde piyasalara satma fırsatı da bulacaktır. Hat üzerindeki enerji iletim kısıtları da enerji depolama sistemlerinin kullanılma teşvikini artıran başka bir faktördür. Bu çerçevede firma için optimal yatırım ve işletim planı araştırılmıştır. Bunlar depoların yerlerinin ve kapasitelerinin belirlenmesini kapsamaktadır. Yatırımın ardından

işletim kararları verilmektedir, bunlar depoların nasıl daha iyi işletileceği yani periyotluk olarak enerji depolama ve/veya enerjinin piyasaya arzı kararları üzerinedir. İlgili karma tam sayılı programlama modeli oluşturulmuştur. Ayrıca çok büyük boyutlu olan bu problemi çözebilmek için bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem öncelikle yıl içerisinden seçilen daha küçük periyotların her biri için bir çözümler kurmakta, bu çözümleri bir yerel arama ve tavlama benzetimi algoritması ile iyileştirmektedir. Son aşamada ise birbirinden bağımsız olarak çözümlenen bu periyotlar birleştirilerek ortak depo yeri, tipi ve kapasite kararları verilmektedir. Geliştirilen yöntem IEEE RTS-96 veri seti kullanılarak test edilmiş ve depo kullanımıyla ilgili çeşitli yönetimsel çıkarımlar yapılmıştır. Elde edilen çözümlerin orijinal durum için optimale % 0,155 kadar yakındır.

Anahtar Kelimeler: Enerji depolama, Matematiksel programlama, Yenilenebilir enerji, Tavlama benzetimi.

ABSTRACT

Master of Science

OPTIMIZATION OF ENERGY STORAGE DECISIONS IN POWER NETWORKS WITH RENEWABLE GENERATION

Cansu AĞRALI

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Doç.Dr. Hakan GÜLTEKİN

Date: August 2016

We consider a firm, with an already existing portfolio of renewable generation resources and customers dispersed over a certain geographical region, which is planning to invest in energy storage systems. The firm uses its renewable resources to generate electricity and the spot electricity markets to meet the demand from the customers. As a result, the firm faces a multi-period capacity management problem. The complexity of the problem is further exacerbated by the transmission line constraints in between the supply and demand points. These constraints may also motivate the firm to store electricity when the transmission lines are blocked because of the capacities. The possibility of storing electricity links the operating periods with each other. In particular, the energy produced by the renewable generators can be stored in storage units when the prices are low or the production is high while this energy can be released to the system when either the prices are high or the production is low. In this set up, the optimal investment plan is investigated, i.e., the location, the type and the capacity of the storage facilities and how to optimally operate the whole system. This includes the buy or sell decision at each period to the spot electricity markets, store or release energy from

the storage facilities and the transmission of power among the nodes in the network. A mixed integer mathematical formulation is constructed. Besides, to solve this big model a heuristic approach is suggested. In this approach a solution for small periods over one year is obtained, then the solution is improved by local search and simulated annealing algorithms. At the last part of approach, the small periods are getting combined by deciding storage locations, types and capacities. IEEE modified RTS-96 benchmark is used and several managerial insides are offered. The solution get from the heuristic approach is close to optimal by 0.155% for original scenario.

Keywords: Energy storage, Mathematical programming, Renewable energy, Simulated annealing.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her türlü hatamda, sıkıntıda yanımda olan, bilgi birikimleri ile sürekli beni aydınlatan, ofiste çalışmayı benim için eğlenceli hale getiren, "başarabilirsin" sözleriyle her zaman motive eden çok sevdiğim insan Nihat ÖNER'e, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, bana hayat dersleri ve yemek önerileri veren, aynı zamanda her toplantımızda toplantıyı en eğlenceli ve öğretici hale getiren hocalarım Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN, Yrd. Doç. Dr. Salih TEKİN'e, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, her sıkıntılı anımda benim yanımda olan aileme, özellikle de her konuda beni dinleyen ağladığımda omuz olan anneme, tez danışmanım olarak adı gözükmese de yardımlarını esirgemeyen, çekinmeden soru sorabildiğim Yrd. Doç. Dr. Gültekin KUYZU'ya çok teşekkür ederim. Kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve son olarak maddi desteğinden dolayı TÜBİTAK'a ve sağladığı burstan dolayı da TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Optimal Güç Akış Problemi	5
2.2 Depolama Sistemleri ile Kullanılan Optimal Güç Akış Problemi	5
2.2.1 Depo operasyon kararları	6
2.2.2 Depo kapasitesi belirleme	7
2.2.3 Depo yer seçimi kararları	9
3. MATEMATİKSEL MODEL VE SAYISAL YÖNTEM	13
3.1 Kümeler ve Parametreler	14
3.2 Karar Değişkenleri	14
3.3 Matematiksel Model	15
4. SEZGİSEL YAKLAŞIM	17
4.1 Başlangıç Çözümü ve Yerel Arama	17
4.2 Tavlama Benzetimi	18
4.3 Birleştirme Sezgiseli	20
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
5.1 Depo Değişken Maliyetlerinin Etkisi	26
5.2 Hiç Depo Kurulmadığı Durum	27
5.3 Hat Kapasitelerinin Etkisi	27
5.4 Talepteki Varyansın Etkisi	28
5.5 Üretimdeki Artışın Etkisi	30
5.6 Başlangıç ve Bitiş Anı Doluluk Oranlarının Etkisi	31
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	33
KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ	38

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Elektrik üretiminden ortaya çıkan gaz emisyonu miktarları.	1
Şekil 3.1: IEEE RTS-96 diyagramı.	16
Şekil 4.1: Yerel arama algoritması akış diyagramı.	18
Şekil 4.2: Tavlama benzetimi akış diyagramı.	20
Şekil 4.3: Birleştirme sezgiseli akış diyagramı.	22
Şekil 5.1: 1 haftalık zamana bağlı enerji talep grafiği.	24
Şekil 5.2: 1 haftalık zamana bağlı enerji üretim grafiği.	24
Şekil 5.3: Değişken maliyetin etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.	26
Şekil 5.4: Hat kapasitelerinin etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.	28
Şekil 5.5: Varyans ötelemenin etkisi.	28
Şekil 5.6: Talep varyansının etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet, (e) 73 düğüm depo olmadan toplam maliyet.	29
Şekil 5.7: Üretimdeki artışın etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.	30
Şekil 5.8: Dönem başı ve sonu saklanan miktarın etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.	31

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Literatür özeti.	11
Çizelge 5.1: Oluşturulan senaryolar.	25
Çizelge 5.2: Hiç depo açılmadığı durum toplam maliyet karşılaştırması.	27



KISALTMALAR

EDS : Enerji Depolama Sistemleri
OGA : Optimal Güç Akış
TB : Tavlama Benzetimi



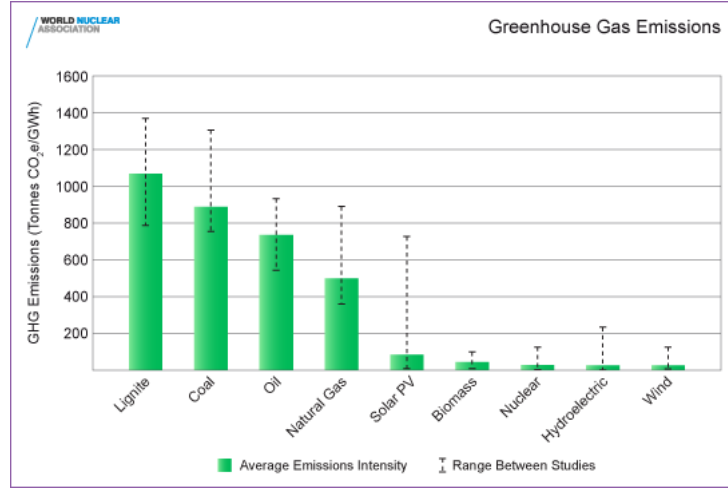
SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
\mathcal{N}	Düğüm Kümesi. $\mathcal{N} = \{0, \dots, N\}$
\mathcal{T}	Zaman Periyotları Kümesi. $\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$
\mathcal{B}	Depo Tipleri Kümesi.
g_{it}	$i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anındaki üretim miktarı
d_{it}	$i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anındaki talep miktarı
f_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümünde $b \in \mathcal{B}$ tipi depo açmanın sabit maliyeti
u_{ij}	$i \in \mathcal{N}$ ve $j \in \mathcal{N}$ düğümleri arasındaki hattın kapasitesi
c_b	$b \in \mathcal{B}$ tipi depoda 1 birim enerji depolamanın maliyeti
e_b	$b \in \mathcal{B}$ tipi depo kurmanın değişken maliyeti
P_t	Merkezi şebekeden $t \in \mathcal{T}$ anında 1 birim enerji satın almanın maliyeti
V_t	Merkezi şebekeye $t \in \mathcal{T}$ anında 1 birim enerji satmanın maliyeti
M_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümüne kurulabilecek en büyük $b \in \mathcal{B}$ tipi depo kapasitesi
L_{ij}	$i \in \mathcal{N}$ ve $j \in \mathcal{N}$ düğümleri arasında aktarımdan kaynaklanan kayıp miktarı
ρ_b^c	$b \in \mathcal{B}$ tipi deponun şarj verimliliği
ρ_b^d	$b \in \mathcal{B}$ tipi deponun deşarj verimliliği
a_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümüne $b \in \mathcal{B}$ tipi depo kurulabiliyorsa 1 değerini alır
B_{ij}	$i \in \mathcal{N}$ ve $j \in \mathcal{N}$ düğümleri arasındaki empedans evrik değeri
z_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümüne $b \in \mathcal{B}$ tipi depo açıldıysa 1 değerini alır
θ_{it}	$i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anındaki voltaj değeri
y_{ibt}	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi depoya $t \in \mathcal{T}$ anında gönderilen enerji miktarı
r_{ibt}	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi depodan $t \in \mathcal{T}$ anında çekilen enerji miktarı
s_{ibt}	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi depoda $t \in \mathcal{T}$ anı sonunda kalan enerji miktarı
o_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun kapasitesi
η_{it}	$i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anında topraklanan enerji miktarı
ϕ_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümü ve $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun açılma olasılığının hesaplandığı oran
μ_t^i	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki talebin ortalaması
μ_u^i	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki üretimin ortalaması
σ_t^i	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki talebin varyansı
σ_u^i	$i \in \mathcal{N}$ düğümündeki üretimin varyansı
cor_{ut}^i	$i \in \mathcal{N}$ düğümünde üretim ve talep arasındaki korelasyon katsayısı
ω_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümü seçildikten sonra depo tipinin seçilme olasılığının hesaplandığı oran
ϕ_{ib}	$i \in \mathcal{N}$ düğümü ve $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun açılma olasılığının hesaplandığı oran
λ	0 ile 1 arasında bir reel sayı

1. GİRİŞ

Fosil yakıt kullanımı geçtiğimiz yıllar içerisinde hızlı bir şekilde azalmaktadır ve fiyatlarında dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Tüm fosil yakıtları için tüketim 2014 yılı içerisinde % 0,9'luk bir artış ile rekor seviyelere ulaşmıştır BP Statistical Review of World Energy (2015). Oysa yenilenebilir enerji kaynakları doğada hâlihazırda mevcuttur. Ayrıca, fosil yakıtlarından üretilen enerjiden dolayı ortaya çıkan karbon ayakizi, güneş enerjisinden elde edilene göre % 65 daha fazladır EPIA (European Photovoltaic Industry Association) report (2008). Elektrik üretiminden ortaya çıkan gaz emisyonu miktarı Şekil 1.1 gösterilmiştir World Nuclear Association (2011). Fosil yakıtları belirli bölgelerde yoğunlaşmış olarak bulunmasına rağmen yenilenebilir enerji kaynakları daha eşit bir şekilde coğrafyaya yayılmıştır. Bu da ülkelerin enerji konusunda yenilenebilir kaynaklar kullanarak diğer ülkelere olan bağımlılıklarını azaltmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 1.1: Elektrik üretiminden ortaya çıkan gaz emisyonu miktarları.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması ve bu kaynakların kesikli üretim yapısında olmasından dolayı enerji depolama yönetimi konusu akademide dikkat çekmeye başlamıştır. Bilindiği üzere, güneş enerjisi gündüzleri kullanılabilirken akşamları kullanılamamaktadır ve elektrik kesintilerinin de önüne geçilmesi için enerji

depolama sistemleri (EDS) kullanılmaya başlanmıştır. EDS çok hızlı şekilde gelişmekte ve mantıklı bir yatırım kararı olarak düşünülmektedir.

Piyasada çok çeşitli depolama sistemleri bulunmaktadır. Genel olarak bilinen ve herkesin evinde ve ofisinde kullandığı piller bunlara bir örnektir. İki havuzlu baraj sistemleri, yüksek hızlı uçan tekerlekler, bataryalar vs. hepsinin kendisine ait maliyetleri, kayıp miktarları, maksimum kapasiteleri ve kurulum ihtiyaçları vardır. Örnek olarak, yüksek hızlı uçan tekerlekler için hava sürtünmesinin en az olduğu bir oda veya 2 havuzlu baraj sistemi için 2 havuzun kazılması gibi ihtiyaçlar doğmaktadır. Yüksek hızlı uçan tekerlekler sistemde güç varken döndürülmeye başlanır ve sürtünmesiz bir ortamda oldukları için sistemdeki güç kesildiğinde kazandığı kinetik enerjiyi sisteme geri vererek elektrik kesintilerinin önüne geçilir. Yine iki havuzlu baraj sistemleri diğer bir adı pompalı hidro depolama da şu şekilde çalışır: Sistemde güç varken alt havuzdaki su üst havuzdaki suya pompalanır. Sistemdeki güç kesildiğinde yukarıdaki su salınarak potansiyel enerji kinetik enerjiye çevrilerek sistemde kesinti olması engellenir. Bahsedilen depolama sistemlerini her yere ve her kapasite ile açmak mümkün değildir. Pompalı hidro depolama için arazinin özellikleri bunu belirlerken, uçan tekerlekler için sürtünmesiz oadanın boyutları etkilemektedir. Yeni gelişen bu sistemler ve yenilenebilir kaynak kullanımının artması için eskiden önerilen elektrik market modellerinin tekrardan gözden geçirilmesi gerekliliği doğmuştur. Çok kullanılan EDS'nden birisi olan Lityum-ion bataryalarının maliyetlerinin 20 yıl içerisinde hızlı bir şekilde azalması beklenmektedir Naam (2015). Ayrıca, 100\$'a saklanan enerji miktarı 1991-2005 zaman aralığında 11 kat artış göstermiştir Anderson (2009).

Ele alınan problem bir yıllık periyotta kapasiteli elektrik dağıtım şebekelerinde depo yerleşim ve yönetim kararlarının verilmesidir. Burada stratejik olarak depo yerleri ve kapasiteleri belirlenirken, operasyonel olarak akış miktarları, merkezi şebeke alım/satım kararları verilmektedir. Bilindiği gibi anlık olarak enerji üretimi ve tüketimi yapılmaktadır, fakat bunun modellenebilmesi için çalışmada kesikli zaman periyotları kullanılmasına karar verilmiştir. Kışları akşam saatleri ısınma için, yazları ise serinlemek için öğle saatlerinde daha çok enerji tüketilmektedir. Bunun yanı sıra, hafta sonları fabrikaların ve firmaların çalışmamasından dolayı da enerji tüketimi azalmaktadır. Bu sebeple, problem bir yıllık planlama ufku için ele alınmıştır ve bu şekilde saatlik, haftalık ve

mevsimsel dalgalanmalar modellenmiştir. Ayrıca EDS'nin yer seçimi dinamikleri modele entegre edilmiştir. İlgili Karışık Tam Sayılı Programlama modeli oluşturulmuştur. Bu modelin çözümünün zor olmasından dolayı Tavlama Benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Bir sonraki bölümde yapılan literatür taraması verilecektir, bahsedilen karışık tam sayılı programlama modeli Bölüm 3'de tanıtılacaktır, Bölüm 4'de çözüm süresinin uzun olması probleminin üstesinden gelmek için geliştirilen algoritmalar detaylı bir şekilde sunulacaktır. IEEE RTS-96 veri seti için yapılan deneysel çalışmalar Bölüm 5'te verilecektir. Sonuçlar bölümünde çalışmanın sonuçları özetlenecek ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar listelenecektir.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yukarıda bahsedildiği gibi yenilenebilir enerji ve enerji depolama konuları son yıllarda akademide oldukça dikkat çekmektedir. Ele alınan konuda çok fazla çalışma bulunmasından dolayı Optimal Güç Akış Problemi (OGA) ve OGA'nın depolama sistemleri ile ele alındığı çalışmalar olmak üzere literatür taraması iki ana başlık ve bunun altındaki alt başlıklar şeklinde düzenlenmiştir.

2.1 Optimal Güç Akış Problemi

OGA problemi en düşük üretim maliyeti veya ağdaki güç kaybı amaç fonksiyonu altında optimal üreteçlerin üretim, düğümlerin de tüketim kontrollerini belirlemektedir. Alguacil ve Conejo (2000) bu problemi çoklu periyotta çözmüşlerdir ve termal ünitelerin açma-kapatma kararlarını ve nehirlere bağlı hidroelektrik tesislerinin kısıtlarını modellemişlerdir. Büyük ölçekli bir Doğrusal Olmayan Karışık Tam Sayılı Programlama modeli önermişler, fakat çözüm süresinin makul sürelerde olmamasından dolayı Bender's Ayrışım tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynakları ve EDS kullanılmamıştır. Gan vd. (2013) OGA problemini kesikli üretim ortamına maruz kalan bir ağ için modellemiştir. İkinci Derece Koni Programlama gevşetmesi ile problemi çözmüşlerdir. Çalışmalarında EDS kullanılmamıştır ve tek bir periyot için çözdürülmüştür. Bizim çalışmamız yenilenebilir enerji kaynakları altında çok periyotlu depo yerleşim problemini ele almaktadır. Stluka vd. (2011) mikro şebekeler için arz ve talep taraflarını ayrı ayrı ele alan enerji yönetim problemini çalışmaktadır. EDS yerleri ve kapasitelerinin belirlenmesi göz önünde bulundurulmamıştır.

2.2 Depolama Sistemleri ile Kullanılan Optimal Güç Akış Problemi

Depolama sistemlerinin kullanıldığı elektrik dağıtım şebekesi çalışmaları literatürde üç başlık altında incelenmektedir: depo operasyon kararları, depo kapasitesi belirleme

ve depo yer seçimi. Depo operasyon kararları literatürde en çok çalışılan konu olmuştur. Bir depo kurulması durumunda orada ne kadar depolanacağı, bunun ne kadar ne zaman kullanılacağı kararlarının verilmesine yardımcı olur. Depo kapasitesi belirleme operasyon kararlarına göre nispeten daha az çalışılmıştır. Burada deponun optimal kapasitesi belirlenmeye çalışılmıştır ve stratejik bir karar verilmektedir. Depo yer seçimi problemi ise bu alanda literatürde en az çalışılan konudur. Depo yer seçimi problemi endüstri mühendisliğinde çok sık karşılaşılan sabit maliyet problemi gibidir ve ikili değişkenler içermektedir. İkili değişkenlerin modeli doğrusal modelden karışık tam sayılı modele çevirdiği için çoğu çalışma bunu dikkate almadan modellemektedir.

2.2.1 Depo operasyon kararları

Alharbi ve Bhattacharya (2013) ayrılmış mikro şebekeler için optimal güç yönetimi sunmuşlardır. Burada araç olarak Talep Tepkisi ve EDS sistemleri kullanmışlardır. Depoların yerlerinin hali hazırda bilindiği ve tek tip olduğu varsayılmıştır. Ele aldıkları ağda kayıplar ve kapasiteler kısıt olarak modele eklenmemiştir ve 1 gün için çözdürülmüştür. Bu yönleri ile bizim çalışmamızdan ayrılmaktadır. Ekonomik Dağıtım her bir üreticinin hangi zaman diliminde açılacağına ve kapanacağına karar veren problemdir. Vale vd. (2010) bu problem için 2 aşamalı bir çözüm yöntemi sunmuştur. İlk aşamada üreticiler için bulanık bir tahmin seti oluşturmuş, 2. aşamada ise tahminleri, depo sistemlerini ve talep tepkisini dâhil ederek meta sezgisel bir optimizasyon yöntemi kullanmıştır. Bahsedilen son iki çalışmada teşvik ve elektrik fiyatları ile oynanarak talep tepkisi yönetimi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bizim çalışmamızdan bu yönleri ile ayrılmaktadır.

Yang ve Nehorai (2014) çoklu enerji depoları, yenilenebilir kaynaklar ve dizel üreticiler kapasitesini birleştiren bir optimizasyon problemini ele almışlardır. Bileşik optimizasyon modeli farklı depo tiplerinin, yenilenebilir kaynakların avantajlarını kullanmaktadır. Paralel koşturma çözümü olarak büyük boyutlu problemin üstesinden gelmiştir. Aktarım ağındaki kısıtlamalar ve depo yerleri çalışmalarında ele alınmamıştır. Mikro şebekelerde verilen talep profili, yerel fiyatlandırma ve yatırım maliyetleri altında yenilenebilir kaynakların ve depoların optimal sayısını belirlemek için Yu vd. (2014) metot önermiştir. EDS kullanılmasına rağmen, aktarım ağ yapısı ve depo yerleri burada da

ele alınmamıştır.

Konvensiyonel ve rüzgâr üreteçlerinin bulunduğu büyük boyutlu şebekelerde optimal yer seçimi problemi Bose vd. (2012) tarafından çalışılmış ve depoların kapasitesine de karar veren güç akış problemi için model oluşturulmuştur. Depoların yerleşiminde gerekli olan sabit maliyetler göz ardı edilmiştir bu da elde edilen çözümün gerçek hayat için optimalliğini sorgulatmaktadır. Bunun yanı sıra depo tipleri de çalışmada göz önünde bulundurulmamıştır. Gayme ve Topcu (2013) OGA problemi modellerine EDS ve basit şarj/deşarj kısıtları ekleyerek güncellemişlerdir. Problemi belirli bir planlama ufku için çözdürmüşlerdir. Fakat problemlerinde depo yerlerini ve depo kapasitelerini önceden belirli olarak ele almışlardır. Korpaas vd. (2003) elektrik marketlerindeki rüzgâr güç üretim tesisleri için çizelgelemenin ve operasyon kararlarının verildiği bir dinamik programlama algoritması önermiştir. Belirlenmiş çizelgeleme periyodu için optimal enerji alım ve satım kararları ağ kısıtları hesaba katılarak belirlenmektedir. Önerilen model simülasyon modeline entegre edilerek, EDS kapasite kararlarının operasyonel ve ekonomik çıkarımları hakkında bilgi edinilmektedir. Verilen spot market fiyatları, talep profili ve rüzgâr hızı tahminleri doğrultusunda kârın en büyükleştiği saatlik enerji yönetim kararlarını vermektedir. Topcu vd. (2013) akıllı, kontrol edilebilir ve verimli güç sistemleri için optimizasyon ve kontrol teknikleri önermiştir. OGA modellerini iki bakış açısı ile güncellemiştir: Düşüme enjekte edilen model ve dal akış metodu. Wang vd. (2013) birçok hücreden oluşan mikro şebekelerde gizlilik korumalı enerji yönetim problemini çalışmıştır. Her bir hücre kendi üreticini, kontrol cihazını ve müşterilerini kapsamaktadır. Çalışmadaki amaç mikro şebekedeki talebi en düşük dışardan alım maliyetleri ile karşılamaktır. Hat kayıpları göz ardı edilmektedir. Problemlerini Lagranj Çifteş Problemine dönüştürerek çözmüşlerdir. Bu paragrafta adı geçen makaleler EDS'nin dâhil olduğu enerji yönetim problemlerini incelemiştir.

2.2.2 Depo kapasitesi belirleme

Brekken vd. (2010) çinko-brom akış bataryalarının kullanıldığı enerji sistemleri için depo boyut kararının ve kontrol mekanizmasının belirlenmesi için çözüm yöntemi önermiştir. 1 saatlik rüzgâr güç tahminleri doğrusal bağımlı olacak şekilde ilgili saatten 10 dakika önceden başlayarak 10 dakika sonraya kadar olacak şekilde hesaplanmakta-

dır. 4 farklı depo kontrol tipi önerilmiştir: Basit, Bulanık, Basit Yapay Sinir Ağı, Gelişmiş Yapay Sinir Ağı. Önerilen kontrol sistemleri 282 günlük rüzgâr güç verisi için tam simülasyon koşturumu yapılarak depo güç çıkış oranları ve depo kapasiteleri kriterleri altında değerlendirilmiştir. Budischak vd. (2013) yenilenebilir enerji kaynaklarının depolama sistemleri ile birlikte kullanıldığı büyük boyutlu şebeke sistemlerini 2 amaç altında incelemiştir: 1-) Her bir talep noktasında tek bir yenilenebilir kaynak olmasına rağmen, çalışmalarında bunların kombinasyonlarını kullanarak talebin karşılanmasını sağlamak, 2-) En düşük elektrik maliyetini bulmak. 4 yıllık talep ve hava verisi ile 28 milyar kombinasyon oluşturularak model test edilmiştir. Farklı yerlerdeki yenilenebilir kaynakların çizelgenmesi ile talep daha düşük boyuttaki kapasiteli depolar kullanılarak daha düşük maliyette karşılanmıştır. Bahsedilen iki çalışmada simülasyon kullanılmıştır ve aktarım ağlarındaki kayıp ve kapasiteleri göz önünde bulundurmamıştır.

Rüzgar enerjisine maruz kalan dağıtım sistemlerinde EDS'nin tahsis edilmesi için Atwa ve El-Saadany (2010) yöntem önermişlerdir. Geçmiş veriler ve zaman serisi modeli kullanarak saatlik rüzgâr güç hız tahminleri oluşturulmuştur. Otomatik Regresyon Hareketli Ortalama tekniği kullanılmıştır. Rüzgar türbin parametreleri kullanılarak elde edilebilecek elektrik gücü hesaplanmıştır. Talepler için IEEE-RTS veri seti kullanılmıştır. EDS kapasiteleri boşa giden enerjinin maksimum olduğu gün için hesaplanmıştır. EDS yer seçimi ve tipleri göz önünde bulundurulmamıştır. Dvijotham vd. (2014) EDS yerlerini ve kapasitelerini belirleyen açgözlü bir algoritma geliştirmek için optimal enerji kontrol algoritması önermiştir. Farklı zamanlar için kesikli üretim ve talep senaryoları için simülasyon koşturumları yapmışlardır. Buradan depoların kapasite kullanım istatistiklerine bakarak depo yerleşimlerine karar vermişlerdir. Sıfır kapasiteli depolar için o düğüme depo yerleştirmemişler ve kapasitelerini doğrusal programlama modeli çözerek belirlemişlerdir. EDS'nin dâhil edildiği güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisinin bir arada kullanıldığı sistemler için Ekren ve Ekren (2010) Tavlama Benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Amaç, hibrit sistemdeki toplam maliyeti en küçüktür. Karar değişkenleri güneş enerjisi üreticilerinin kapasitesi, rüzgâr türbin tarama alanı ve batarya kapasiteleridir. İlk olarak simülasyon modeli geliştirilmiş ve 2001-2003 yılı meteorolojik verileri kullanılarak solar radyasyon, rüzgâr hız ve elektrik tüketim dağılımı ARENA Girdi Analizi kullanılarak belirlenmiştir ve senaryo analizleri için koş-

turum yapılmıştır. Sonrasında, model Tavlama Benzetimi kullanılarak sezgisel olarak optimize edilmiştir. Bu kısımdaki makaleler, dağıtım ağlarını depolama sistemleri ile ele almaktadır fakat EDS'nin yeri önceden belirlidir ve kapasitelere sonradan karar verilmektedir.

2.2.3 Depo yer seçimi kararları

Chen vd. (2013) akıllı mikro şebekeler için optimizasyon modeli geliştirmiş, optimal yönetim stratejileri belirlemiş ve ekonomik analizler yapmıştır. Her düğümdeki üreteç, batarya sayısını ve bataryaların kapasitelerini optimizasyon modeli sonucunda elde etmektedir. Elektrik talebindeki belirsizleri simüle etmiş ve batarya kapasitesi üzerinden duyarlılık analizleri yapmıştır. Optimal batarya kapasiteleri mikro şebekedeki üretim ve taleplere göre belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Farklı tiplerdeki depoları ele almamıştır. Üretim miktarları da karar değişkeni olarak ele alınmaktadır. Pandzic vd. (2015) üreteç çizelgeleme, depo yeri ve kapasitesi için 3 aşamalı bir sezgisel yöntem sunmaktadır. Bu sezgisel yöntem ile yakın optimal olarak depo yerlerine ve kapasitelerine karar vermektedir. Önerilen yöntemde konvansiyonel kaynaklardan gelen miktarlar karar değişkeni olarak ele alınmış ve bunların aç-kapat kısıtları da modele eklenmiştir. Çözüm sonucunda optimallikten çok fazla uzaklaşmadığı ifade edilmiştir. Thrampoulidis vd. (2013a) tek bir üreteç ve tek bir talep noktasının olduğu şebekede, talep profilinden, üretim kapasitesinden ve hatlardaki kapasitelerden bağımsız olarak optimal depo yerinin her zaman talep düğümünde olduğunu ispat etmişlerdir. Depo yerleşimindeki sabit maliyetleri göz ardı etmişlerdir. Thrampoulidis vd. (2013b) depo optimal yer seçimi, kapasitesi ve kontrolü için model geliştirmişlerdir. Amaç fonksiyonu üretim maliyetlerinin talep kayması ile en küçüklenmesidir. Thrampoulidis vd. (2013a)'da kullandıkları modeli daha büyük ağlar için güncelleyerek çalışmalarını yapmışlardır. van den Akker vd. (2014) depo yerlerine, kapasitelerine ve operasyonel kararlarını belirleyen bir karışık tam sayılı programlama modeli önermişlerdir. Amaç fonksiyonu merkezi şebekeden satın alınan enerjinin ve kısıt ihlallerinin en küçüklenmesidir. Burada bahsedilen kısıt ihlali: Hat kapasitelerinin aşılmasıdır. İkili değişkenlerin modelin çözümünü zorlaştırmasından dolayı Tavlama Benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarını ele almamışlardır.

Yukarıdaki paragrafta bahsedilen çalışmalar tez konumuzla en yakından alakalı olan çalışmalardır. Buradaki çalışmalar genellikle depo yer seçimi ve kapasitelerinin belirlenmesi üzerinedir. Bizim buradaki çalışmalardan farkımız çözüm yöntemimizden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, hiçbir çalışma farklı depo tiplerini ve merkezi şebekeyi birlikte dâhil ederek bu problemi ele almamıştır. EDS'nin yer seçimi dinamikleri modele diğer çalışmalara oranla daha doğru entegre edilmiştir. Diğer çalışmalarda depo yerleşimi için ikili değişkenler tanımlanmazken, bizim çalışmamızda depo yerleştirmenin sabit maliyetleri modele eklenmiştir. Aşağıda verilen Çizelge 2.1'de bizim çalışmamız ve bahsedilen çalışmaların farkları incelenebilir.



Çizelge 2.1: Literatür özeti.

Çalışma	Depo Kararları												
	D	YS	Kap	F. Tip	Sim	KÇ	Sez	OGA	TT	Ağ Y.	PU	YK	MŞ
Alguacil ve Conejo (2000)						✓		✓		✓	✓		
Gan vd. (2013)						✓		✓		✓		✓	
Alharbi ve Bhattacharya (2013)	✓					✓		✓	✓	✓		✓	
Vale vd. (2010)	✓						✓	✓				✓	
Brekken vd. (2011)					✓						✓	✓	
Budischak vd. (2013)	✓				✓						✓	✓	
Yang ve Nehorai (2014)	✓			✓		✓		✓		✓	✓	✓	
Yu vd. (2014)	✓			✓		✓		✓		✓	✓	✓	
Bose vd. (2012)	✓					✓		✓		✓	✓	✓	✓
Gayme ve Topcu (2013)	✓					✓		✓		✓	✓	✓	
Korpaas vd. (2003)	✓				✓						✓	✓	✓
Stluka vd. (2011)	✓					✓		✓		✓	✓	✓	✓
Topcu vd. (2013)	✓					✓		✓		✓	✓	✓	
Wang vd. (2013)	✓					✓		✓		✓	✓	✓	✓
Atwa ve El-Saadany (2010)	✓					✓		✓		✓	✓	✓	✓
Dvijotham vd.(2014)	✓					✓		✓		✓	✓	✓	✓
Ekrens (2010)	✓						✓	✓		✓	✓	✓	✓
Chen vd. (2012)	✓							✓		✓	✓	✓	✓
Pandžić vd. (2014)	✓							✓		✓	✓	✓	✓
Thrapoulidis vd. (2013)	✓							✓		✓	✓	✓	✓
vdAkker vd. (2011)	✓							✓		✓	✓	✓	✓
Bizim Çalışmamız	✓							✓		✓	✓	✓	✓

D: Depo Kullanımı Var, **YS:** Yer Seçimi, **Kap:** Kapasite Belirleme, **F. Tip:** Farklı Tip Kullanımı, **Sim:** Simulasyon, **KÇ:** Kesin Çözüm Yöntemi, **Sez:** Sezgisel Yöntem, **OGA:** Optimal Güç Akış Problemi, **TT:** Talep Tepkisi, **Ağ Y:** Ağ Yapısı, **PU:** Planlama Ufku, **YK:** Yenilenebilir Enerji Kaynağı, **MŞ:** Merkezi Şebeke.



3. MATEMATİKSEL MODEL VE SAYISAL YÖNTEM

Bu çalışmada n talep ve $m < n$ üretim düğümü bulunan bir ağ ele alınmıştır. Merkezi şebeke 0. düğüm olarak temsil edilmektedir. Merkezi şebekeden alımlar ve merkezi şebekeye satışlar limitsiz olarak yapılabilmektedir. Yenilenebilir kaynaklarının yerleri bu şebekede önceden belirlidir.

Her depo tipi düğümden düğüme değişen kendine ait inşa maliyetini de birlikte getirmektedir. Bu depo tiplerinin özel ihtiyaçlarının olmasından kaynaklanmaktadır. Lityum-ion bataryaların herhangi bir kurulum maliyetine ihtiyacı olmazken, 2 havuzlu baraj sisteminin oldukça yüksek inşa maliyetleri vardır. Bunun için büyük bir arsa ve kazma işlemleri gerekmektedir. Ayrıca açılacak kapasite de maliyetlere etki etmektedir. Bu inşa gereksinimlerinden dolayı her düğüme her tip depo açılmamaktadır ve belirli bir kapasiteye kadar açılabilmesine sebep olmaktadır. Her depo tipinin kendine özgü ve düğümden düğüme değişen en büyük kapasitesi vardır. Bunun dışında depolama yaparken bir birim depolama, deponun eskimesine sebep olduğundan bunlar da bir maliyet olarak amaç fonksiyonuna yansıtılmıştır. Depolara gönderilen enerji bilindiği gibi %100 verimle geri alınamamaktadır. Her depo tipinin şarj ve deşarj verimlilikleri birbirinden farklıdır ve modele parametre olarak girilmiştir. Üretim, talep miktarları ve merkezi şebekeye enerji alım/satım fiyatları her düğüm ve dönem için önceden belirli olduğunu varsayılmıştır. Sonuç olarak amaç fonksiyonunda depo yerleşim ve kapasite, merkezi şebeke alım/satım ve depo eskime maliyetleri yer almaktadır.

Depo tipleri, yerleri ve kapasiteleri stratejik, akışlar ve depo yönetim kararları periyotluk operasyonel kararlar olarak verilmektedir. Çalışmamızda planlama ufku zaman periyotlarına bölünmüştür ve talep, üretim ve elektrik fiyatlarındaki dalgalanmaları hesaba katmak için her bir zaman periyodu bir saat olarak alınmıştır. Elektrik marketlerindeki fiyatlar saatlik olarak verilmektedir ve üretim gücü, talep de saatlik olarak hesaplanmaktadır. Her düğümden birden fazla depo tipi açılmasına izin verilmiştir.

Probleme kesin çözüm yöntemi olarak karışık tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model için aşağıdaki notasyon tanımları kullanılmıştır ve ilgili model Bölüm 3.3’de sunulmuştur. Bu modelde akışlar iki düğüm arasındaki voltaj farkında meydana gelmektedir ve akış iki düğüm arasındaki iletkenlik değerinin voltaj farkları ile çarpılmasıyla elde edilir.

3.1 Kümeler ve Parametreler

\mathcal{N} : Düğümler Kümesi. $\mathcal{N} = \{0, \dots, N\}$

\mathcal{T} : Zaman Periyotları Kümesi. $\mathcal{T} = \{1, \dots, T\}$

\mathcal{B} : Depo Tipleri Kümesi.

g_{it} : $i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anındaki üretim miktarı.

d_{it} : $i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anındaki talep miktarı.

f_{ib} : $i \in \mathcal{N}$ düğümünde $b \in \mathcal{B}$ tipi depo açmanın sabit maliyeti.

u_{ij} : $i \in \mathcal{N}$ ve $j \in \mathcal{N}$ düğümleri arasındaki hattın kapasitesi.

c_b : $b \in \mathcal{B}$ tipi depoda 1 birim enerji depolamanın maliyeti.

e_b : $b \in \mathcal{B}$ tipi depo kurmanın değişken maliyeti.

P_t : Merkezi şebekeden $t \in \mathcal{T}$ anında 1 birim enerji satın almanın maliyeti.

V_t : Merkezi şebekeye $t \in \mathcal{T}$ anında 1 birim enerji satmanın maliyeti.

M_{ib} : $i \in \mathcal{N}$ düğümüne kurulabilecek en büyük $b \in \mathcal{B}$ tipi depo kapasitesi.

L_{ij} : $i \in \mathcal{N}$ ve $j \in \mathcal{N}$ düğümleri arasında aktarımdan kaynaklanan kayıp miktarı.

ρ_b^c : $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun şarj verimliliği.

ρ_b^d : $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun deşarj verimliliği.

$a_{ib} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \in \mathcal{N} \text{ düğümüne } b \in \mathcal{B} \text{ tipi depo kurulabiliyorsa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

B_{ij} : $i \in \mathcal{N}$ ve $j \in \mathcal{N}$ düğümleri arasındaki iletkenlik.

3.2 Karar Değişkenleri

$z_{ib} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \in \mathcal{N} \text{ düğümüne } b \in \mathcal{B} \text{ tipi depo açıldıysa,} \\ 0, & \text{diğer durumlarda.} \end{cases}$

θ_{it} : $i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anındaki voltaj değeri.

y_{ibt} : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi depoya $t \in \mathcal{T}$ anında gönderilen enerji miktarı.

r_{ibt} : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi depodan $t \in \mathcal{T}$ anında çekilen enerji miktarı.

s_{ibt} : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi depoda $t \in \mathcal{T}$ anı sonunda kalan enerji miktarı.

o_{ib} : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun kapasitesi.

η_{it} : $i \in \mathcal{N}$ düğümünde $t \in \mathcal{T}$ anında topraklanan enerji miktarı.

3.3 Matematiksel Model

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} \sum_{b \in \mathcal{B}} (e_b o_{ib} + f_{ib} z_{ib}) + \sum_{i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{t \in \mathcal{T}} c_b (y_{ibt} + r_{ibt}) \\ & + \sum_{i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (P_t B_{0i} (\theta_{0t} - \theta_{it}) - V_t B_{i0} (\theta_{it} - \theta_{0t})) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$-u_{ij} \leq B_{ij} (\theta_{it} - \theta_{jt}) \leq u_{ij} \quad \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{N} \setminus \{i\}, t \in \mathcal{T} \quad (3.2)$$

$$y_{ibt} + r_{ibt} \leq o_{ib} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, b \in \mathcal{B}, t \in \mathcal{T} \quad (3.3)$$

$$o_{ib} \leq M_{ib} z_{ib} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, b \in \mathcal{B} \quad (3.4)$$

$$s_{ibt} \leq o_{ib} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, b \in \mathcal{B}, t \in \mathcal{T} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} g_{it} + \sum_{j \in \mathcal{N}} B_{ji} (\theta_{jt} - \theta_{it}) + \sum_{b \in \mathcal{B}} \rho_b^d r_{ibt} \\ = \sum_{j \in \mathcal{N}} B_{ij} (\theta_{it} - \theta_{jt}) + d_{it} + \sum_{b \in \mathcal{B}} y_{ibt} + \eta_{it} \end{aligned} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, t \in \mathcal{T} \quad (3.6)$$

$$s_{ib0} = \frac{o_{ib}}{2} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, b \in \mathcal{B} \quad (3.7)$$

$$s_{ibT} \geq \frac{o_{ib}}{2} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, b \in \mathcal{B} \quad (3.8)$$

$$s_{ibt} = s_{ib(t-1)} + \rho_b^c y_{ibt} \Delta t - r_{ibt} \Delta t \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, b \in \mathcal{B}, t \in \mathcal{T} \quad (3.9)$$

$$z_{ib} \leq a_{ib} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, b \in \mathcal{B} \quad (3.10)$$

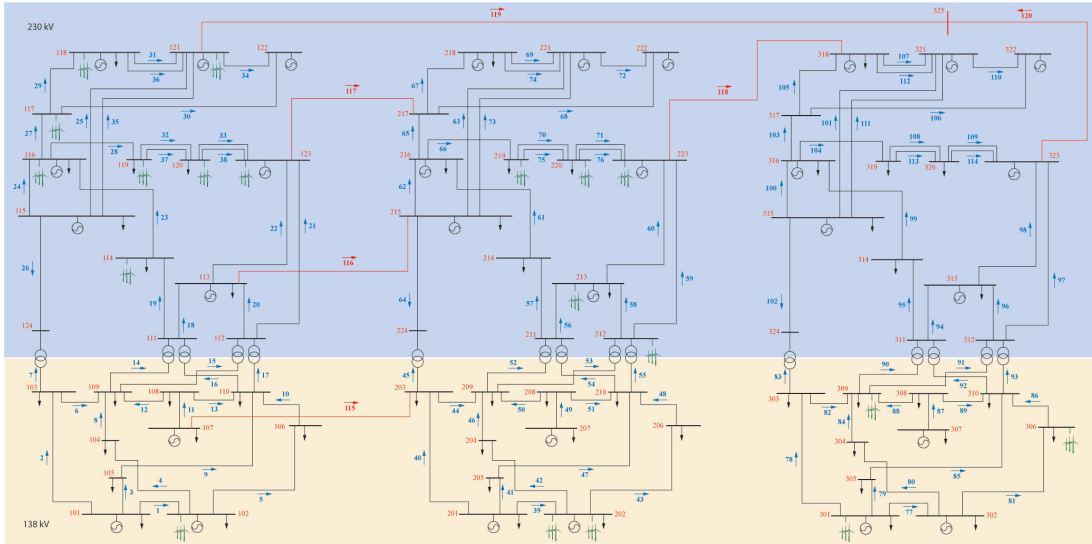
$$-180 \leq \theta_{it} \leq 180 \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, t \in \mathcal{T} \quad (3.11)$$

$$z_{ib} \in \{0, 1\}, \theta_{it}, y_{ibt}, r_{ibt}, o_{ib}, \eta_{it} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{N}, b \in \mathcal{B}, t \in \mathcal{T} \quad (3.12)$$

Modelimizde amaç fonksiyonu (3.1) depo açmanın sabit ve değişken maliyetleri, merkezi şebekeye alım-satım maliyetleri ve depo eskime maliyetlerini içermektedir. Kısıt (3.2) iki düğüm arasında aktarılan enerji miktarı o hat kapasitesinden fazla olamayacağını göstermektedir. Kısıt (3.3) depodan alınan ve gönderilen enerji miktarının o deponun kapasitesini geçmemesini sağlar. Kısıt (3.4) bir düğüme depo kurulmuyorsa, oradaki depo kapasitesi sıfır olur. (3.5) bir deponun kapasitesi ilgili düğümde ve depo tipinde periyot sonunda kalan enerjilerin en büyüğünden daha fazla olmalı-

dır. Kısıt (3.6) her bir düğüm ve periyot için toplam o düğümdeki üretim miktarı ve gelen güç toplamı diğer düğümlere ve depoya gönderilen güç, talep ve topraklanma miktarına eşit olmalıdır. Kısıt (3.7), (3.8) sürecin başlangıç ve bitiş anında depo yarı dolu olmalıdır. Bunun altında yatan sebep ise, yıllık bazda bir plan yapıldığı için her yıl aynı durumda başlamasını garantilemektir. Kısıt (3.9) bir periyot sonunda depoda kalan miktar o depoya o anda gelen miktar ile düğüme gönderilen miktarın farkının bir önceki dönemde depoda kalan miktara eklenmesi ile hesaplanır. Eğer bir düğüme herhangi bir tipte depo açılması mümkünse oraya depo açılabilir (3.10). Her periyotta her düğümdeki voltaj değerleri $-\pi$ ve π aralığında olmalıdır (3.11). (3.12) işaret kısıtlarını içermektedir.

Modeli çözerken amaç bir yıllık bir plan oluşturmaktır. Ele alınan 73 düğümlük ağ için koşturulmuştur fakat 2 hafta için dahi optimal çözmek 1 aylık zaman süresince eldeki bilgisayar donanımlarıyla mümkün olmamıştır. Ayrıca 73 düğüm 3.1’de görülebileceği gibi 24-24-25 şeklinde gruplanan düğümlerden oluşan alt sistemlere sahiptir REAL Lab Library (2014a). İlk 24 düğümlük alt sistem için de 4 haftalık planı çözmek 1 günü aşmaktadır. Çözüm sürelerinin bu kadar uzun olmasından dolayı sezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 3.1: IEEE RTS-96 diyagramı.

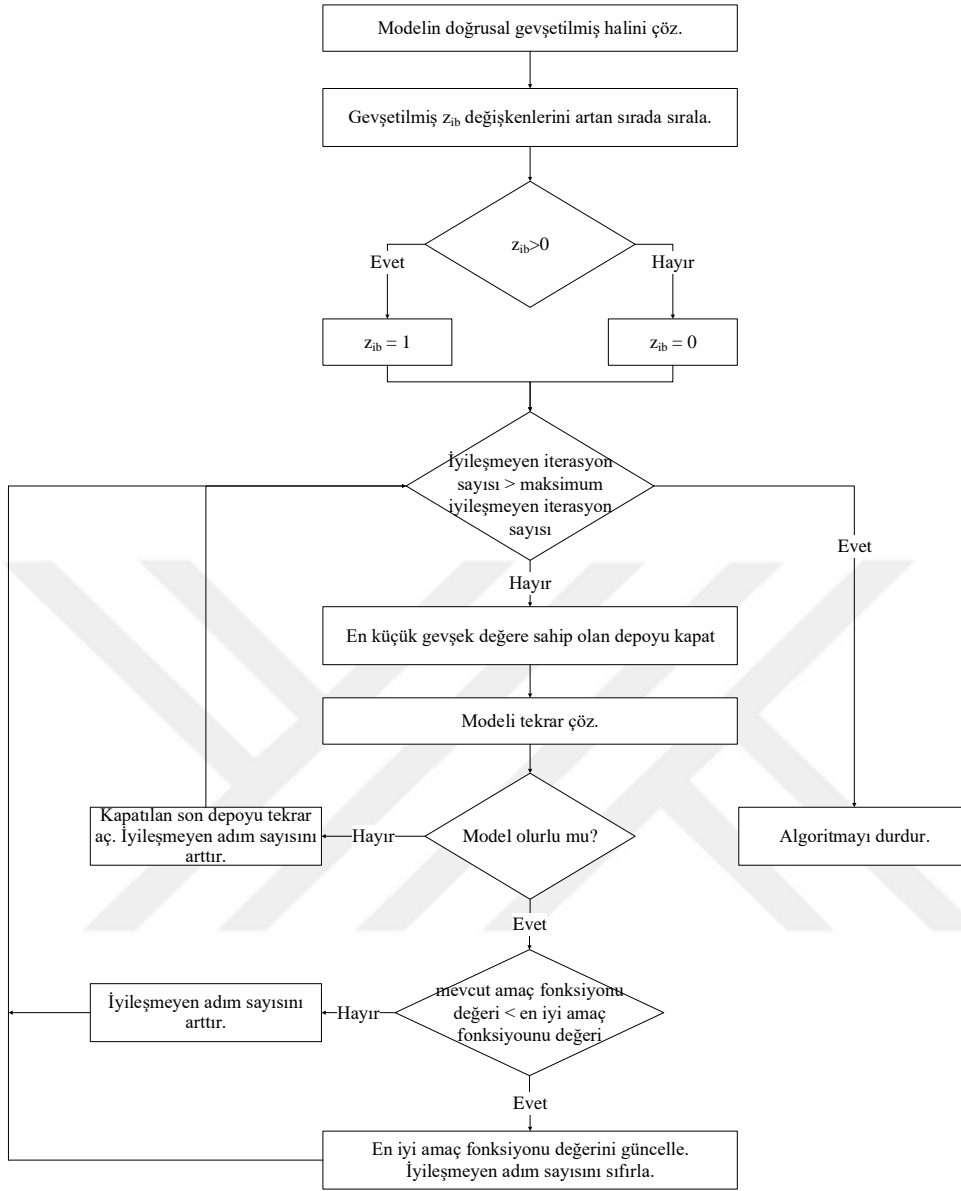
4. SEZGİSEL YAKLAŞIM

Gerçek hayattan alınan 73 düğümlük bir örneğe bir yıllık planlama ufku için makul sürelerde optimal çözüm bulmak mevcut bilgisayarlarla mümkün olmadığı belirtilmişti. Bunun üstesinden gelebilmek için bir çözüm kurucu algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmadan elde edilen sonuçlar bir yerel arama algoritması ile iyileştirilmiştir. Son olarak yerel optimumdan kurtulabilmek amacıyla tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır. Fakat matematiksel model tabanlı bir sezgisel olduğu için yine örnekleri çözmek uzun zaman almaktadır. Bu sebeple, bahsedilen algoritmalar bir yıl içerisinde seçilen küçük zaman periyotları (planlama ufku) için çözdürülmektedir. Elde edilen çözümler (depo yerleri, tipleri ve kapasiteleri) her periyot için farklı olmaktadır. Bir yıllık ortak plan hedeflendiğinden bu küçük zaman periyotları yeni bir algoritma ile birleştirilerek, bir yıl için ortak depo yerlerine ve kapasitelerine karar verilmektedir.

4.1 Başlangıç Çözümü ve Yerel Arama

TB algoritması bir başlangıç çözümüne ihtiyaç duymaktadır. Bunun için bir inşa ve bir yerel arama algoritması geliştirilmiştir. Başlangıç çözümü için matematiksel modelin LP gevşetmesi çözümler ve burada eğer depo yeri ve tipini gösteren ikili karar değişkeni $z_{ib} \forall i \in \mathcal{N}, b \in \mathcal{B}$ pozitifse değeri 1'e, diğer durumlarda ise 0'a set edilir.

Başlangıç çözümü, yerel arama algoritması ile iyileştirilmektedir. En küçük gevşetme değerine sahip olan $z_{ib} \forall i \in \mathcal{N}, b \in \mathcal{B}$ 0'a eşitlenir ve olurluluğu kalan doğrusal model çözümler test edilir. Eğer model olurlu ise sıradaki en küçük gevşetme değerine sahip olan depo kapatılır. Algoritmada süreç şu şekilde devam etmektedir: eğer model olurlu ve amaç fonksiyonu iyileşiyorsa depo kapatmaya aynı kuralla devam et, diğer durumlarda kapatılan depoyu geri aç. Algoritma iyileşmeyen adım sayısı maksimum sayıya geldiğinde durur. İyileşmeyen adım sayısı model her olursuz ve amaç fonksiyonu kötüleştiğinde artmaktadır. Algoritma adımları Şekil 4.1'de görülebilir.



Şekil 4.1: Yerel arama algoritması akış diyagramı.

4.2 Tavlama Benzetimi

TB algoritması $z_{ib} \forall i \in \mathcal{N}, b \in \mathcal{B}$ değişkenlerinin sıfır veya bire eşitlenip yeni komşuluklar elde edilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Örnek olarak $z_{13} = 1$: 1 düğümündeki 3.tip depo açılmıştır ve bu başka bir komşulukta kapanabilmektedir. Algoritma 3 kom-

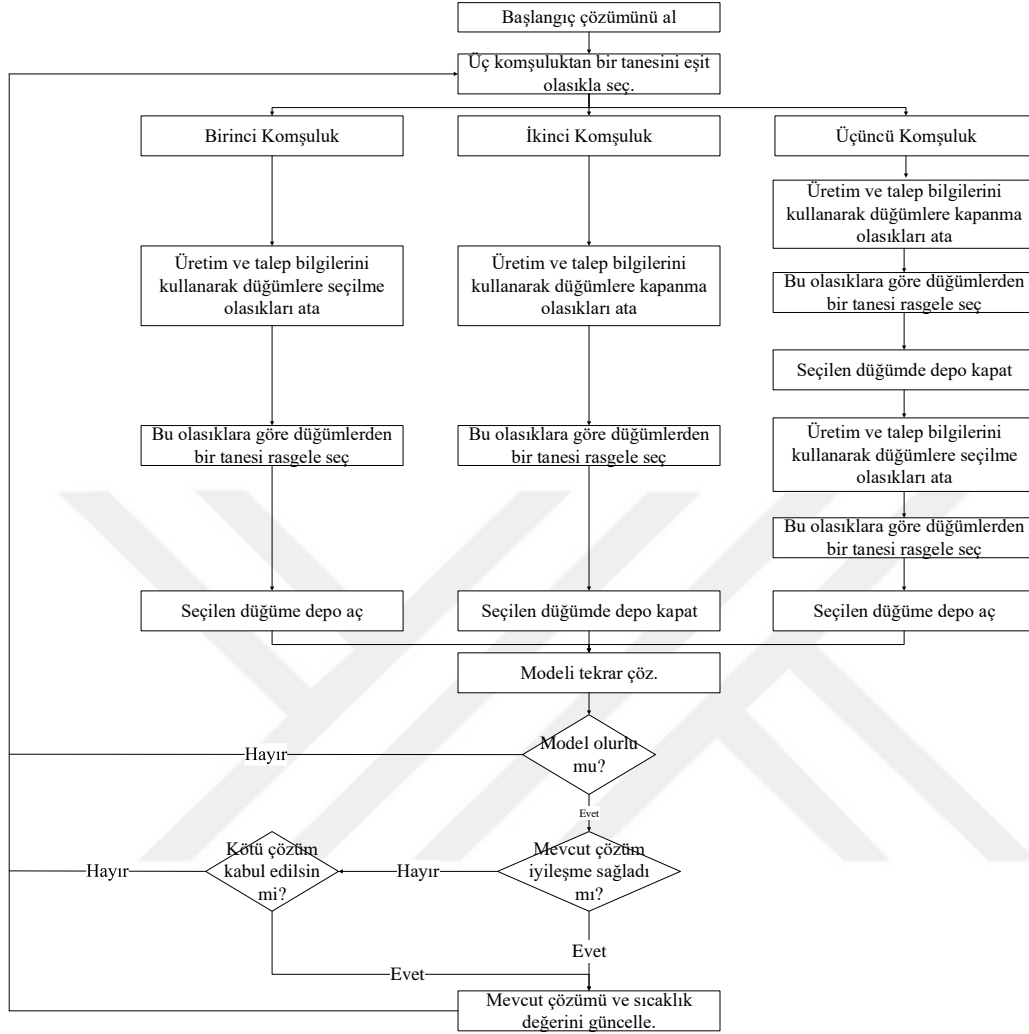
şuluk üzerinden çalışmaktadır: i. Depo Aç, ii. Depo Kapat, iii. Aynı anda Depo Aç - Depo Kapat. Açma ve kapatma olasılıkları Formül 4.1’de verilen değerden elde edilen orana göre hesaplanmaktadır. Buradaki mantık ise şu şekildedir: eğer o düğüme giren ve çıkan hat kapasitesi az ise ve üretim talep arasındaki fark fazlaysa hat kapasitelelerinden dolayı o düğüme depo açılma ihtiyacı olacağı öngörülmüştür. Ayrıca üretim ve talep arasındaki korelasyon kat sayısı negatif bir değer alıyorsa burada zıt yönlü bir etki var demektir. Yani üretim yüksek iken talep düşüktür. Bu sebeple negatif korelasyon kat sayısı mutlak değer içerisine alınarak eğer aralarındaki ilişki negatif yönlü ise oraya depo açılmasını teşvik etmektedir. Korelasyon kat sayısı pozitif veya sıfır ise formüle dâhil edilmemektedir.

Hangi deponun açılacağına veya kapatılacağına önce düğüm daha sonra depo tipi seçilerek karar verilmektedir. Açma olasılıkları elde edilen sayılarla doğru orantılı olarak verilirken, kapatma olasılıkları en yüksek değere en düşük olasılık atanacak şekilde zıt orantılı verilmektedir. Hangi depo tipinin seçileceği olasılıklar ise Formül 4.2’de verilen değerlerin oranı olarak hesaplanmaktadır. Burada açgözlü bir yaklaşımla maliyeti düşük depoya daha yüksek olasılık verilmektedir. Devamında bilinen TB algoritması adımları izlenmektedir. Detaylı algoritma adımları Şekil 4.2’de görülebilir. Denklem 4.1’deki kısaltmaların tanımları ise şu şekildedir: γ_i : $i \in \mathcal{N}$ düğümünün seçilme olasılığını tanımlayan denklem, μ_t^i : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki talebin ortalaması, μ_u^i : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki üretimin ortalaması, σ_t^i : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki talebin varyansı, σ_u^i : $i \in \mathcal{N}$ düğümündeki üretimin varyansı, cor_{ut}^i : $i \in \mathcal{N}$ düğümünde üretim ve talep arasındaki korelasyon katsayısı, $\sum_{j \in \mathcal{N}} u_{ij}$: $i \in \mathcal{N}$ düğüme giren ve çıkan toplam hat kapasitesi. Denklem 4.2’de ω_{ib} : $i \in \mathcal{N}$ düğümü seçildikten sonra depo tipinin seçilme olasılığının hesaplandığı oranı oluşturur.

$$\gamma_i = \frac{(|\mu_t^i - \mu_u^i| + (\sigma_t^i + \sigma_u^i))(1 + |\min\{0, cor_{ut}^i\}|)}{\sum_{j \in \mathcal{N}} u_{ij}} \quad (4.1)$$

$$\omega_{ib} = f_{ib} + e_b MC_{ib} \quad (4.2)$$

$$P(kabul) = e^{\frac{-\Delta obj}{T}} \quad (4.3)$$



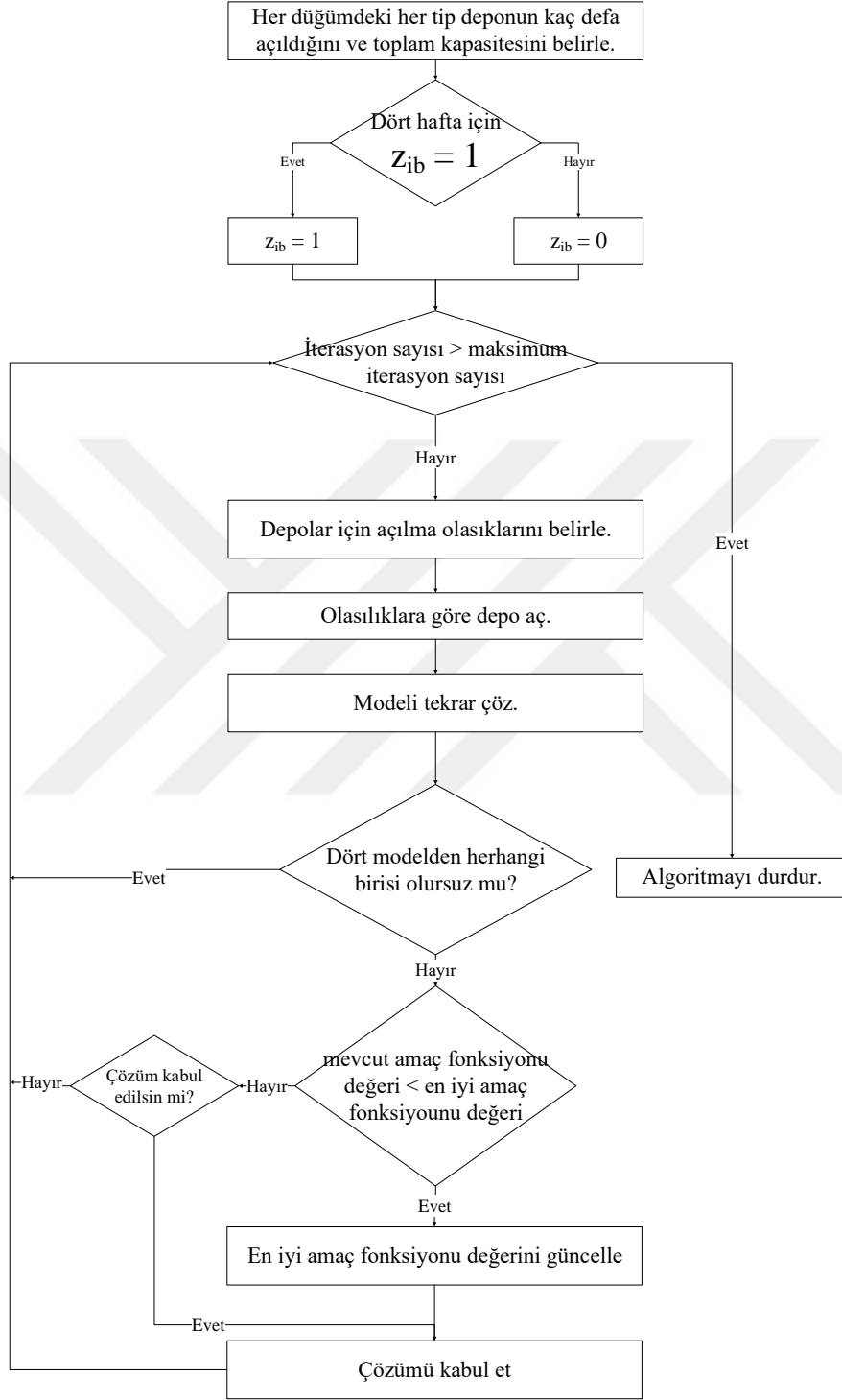
Şekil 4.2: Tavlama benzetimi akış diyagramı.

4.3 Birleştirme Sezgiseli

Yukarıda bahsedilen algoritmalar bir yıl periyodundan seçilen küçük zaman dilimleri için ancak çözülebilmektedir. Bunun temel sebebi matematiksel model tabanlı bir algoritma çalıştırılmasıdır. Tam bir yıl için TB algoritması yine çok uzun zaman almaktadır. Yıl içerisinde seçilen küçük zaman dilimlerinin hepsinin kendine ait depo yerleri ve kapasiteleri vardır. Fakat ele alınan problemde istenen, bir yıllık planlama ufku için ortak depo yerleri ve kapasiteleri olmasıdır. Bunun için yeni bir algoritmaya daha ihtiyaç duyulmuştur. Öncelikle, alınan küçük planlama ufuklu örnekler ayrı ayrı TB ile çözü-

lür. Sonrasında depoların kaç defa hangi kapasite ile açıldıkları tespit edilir. Bir depo en fazla alınan küçük örneklerin sayısı kadar açılabilir. Örnek z_{23} deposu her zaman diliminde açılmışken, z_{54} deposu birkaç periyotta açılmış olabilir. Eğer herhangi bir z_{ib} $i \in \mathcal{N}, b \in \mathcal{B}$ tüm periyotlarda açıldıysa $z_{ib} = 1$ yapılıp, diğer depolar kapatılır. Daha sonra elimizdeki kapalı olan depoların çözüm kümesinden belirli bir olasılıkla depolar açarak hepsi için olurlu ve maliyeti en az depo kombinasyonu belirlenir. Burada yine depoların açılma olasılığı için Formül 4.4 kullanılmaktadır. Burada amaç zaman periyotlarında en sık ve yüksek kapasitede açılan z_{ib} $i \in \mathcal{N}, b \in \mathcal{B}$ 'ye daha yüksek olasılık atamaktır. Elde edilen olasılıklara göre bir depo açılır, eğer model olursuzsa yeni bir depo daha açılır. Model olurlu olursa en son elde edilen amaç fonksiyonu değerinin iyileşip iyileşmediğine bakılır. Eğer iyileşiyorsa yeni çözüm kabul edilir ve devam edilir. Eğer iyileşme olmuyorsa TB algoritmasında kullanılan Denklem 4.3 kullanılarak, belirli bir olasılıkla iyileşmeyen çözüm kabul edilip edilmeyeceğine karar verilir. Kabul edilmediği durumda yapılan değişiklikler geri alınır. Aksi durumda yeni çözüme gidilir. Maksimum iterasyon sayısına ulaşına kadar depo açılmaya devam eder. Algoritma adımları Şekil 4.3'de görülebilir. Formül 4.4'deki kısaltmalar ise şu şekilde tanımlanmaktadır: ϕ_{ib} : $i \in \mathcal{N}$ düğümü ve $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun açılma olasılığının hesaplandığı oran. $\sum_{i \in \mathcal{N} \setminus 0, b \in \mathcal{B}}(acik\ z_{ib})$: $i \in \mathcal{N}$ düğümünde $b \in \mathcal{B}$ tipi depodan zaman periyotları içerisinde toplamda kaç defa açıldığını gösterir ve alabileceği maksimum değer seçilen zaman periyodu sayısıdır ve bu da #data ile gösterilir. $\sum_{i \in \mathcal{N} \setminus 0, b \in \mathcal{B}}(acik\ cap_{ib})$: zaman periyotları içerisinde ilgili depodan toplamda ne kadarlık kapasite açıldığını gösterir. Bu da olabilecek maksimum toplam kapasiteye bölünür. Bu şekilde açılma oranları için sayı ve kapasite doğru oranda alınmış olacaktır. MC_{ib} : $i \in \mathcal{N}$ düğümünde $b \in \mathcal{B}$ tipi deponun açılacak maksimum kapasitesi. λ : 0 ile 1 arasında bir reel sayı.

$$\phi_{ib} = \lambda \frac{\sum_{i \in \mathcal{N} \setminus 0, b \in \mathcal{B}}(acik\ z_{ib})}{\#data} + (1 - \lambda) \frac{\sum_{i \in \mathcal{N} \setminus 0, b \in \mathcal{B}}(acik\ cap_{ib})}{\#data * MC_{ib}} \quad (4.4)$$



Şekil 4.3: Birleştirme sezgiseli akış diyagramı.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

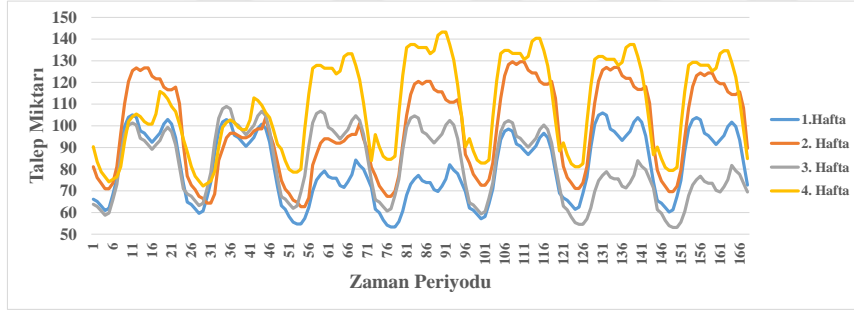
Deneysel çalışmalar için IEEE RTS-96 veri seti kullanılmıştır. Bu ağ Wong vd. (1999) tarafından önerilmiştir. Pandzic vd. (2013) bu ağı 19 tane yenilenebilir üretim kaynağı ekleyerek modifiye etmiştir. Bu çalışmada modifiye edilmiş veri seti kullanılmıştır. Ağda 73 düğüm bulunmaktadır. Ağı gösteren diyagram Şekil 3.1'den görülebilir. Diyagramda konvansiyonel enerji kaynakları da bulunmaktadır fakat bizim çalışmamızda bunlar çıkarılarak, bu düğümler merkezi şebekeye bağlanmıştır.

Beaudin vd. (2010) çalışmasından yola çıkılarak depo sistemlerinin kendi içerisindeki baskınlıkları incelenerek çalışmada kullanılmak üzere 3 tip depo tipi seçilmiştir: Sıkıştırılmış hava enerjisi depolama, pompalanmış hidro depolama ve Lityum-Ion bataryalar. Depolar seçilirken, kurulum, yaşlanma, birim kapasite maliyetleri ve şarj/deşarj verimliliklerine bakılmıştır ve bu değerler aynı kaynaktan elde edilmiştir. Literatürde şarj vedeşarj verimlilikleri bir döngü verimliliğinin karekökü olarak hesaplanmaktadır Pandzic vd. (2015). Sıkıştırılmış hava enerjisi deposu ve Lityum-Ion batarya için kurulum maliyetleri kaynaktan direkt olarak verilmemektedir. Çalışmamızda Lithium-Ion bataryalarının bir kurulum maliyeti olmadığı ve sıkıştırılmış hava enerjisi deposunun maliyetinin pompalı hidro depolamaya göre daha fazla olduğu varsayılmıştır. Planlama ufku ise 1 yıl olarak belirlenmiştir. Bir yıl ise 365 gün 24 saatten hesaplandığında 8760 1 saatlik zaman dilimine karşılık gelmektedir. Rüzgâr güç üretimleri ve yıllık talep miktarları REAL Lab Library (2014b)'den elde edilmiştir. İletim ağı kapasite ve empedans evrik değerleri IEEE-RTS 96'da verilmiştir. Spot market fiyatları European Power Exchange(EPEX) (2014)'den elde edilmiştir. Bunlar Fransa için 2014 yılı saatlik spot market fiyatlarıdır. Bu fiyatlar üzerinden alım maliyetleri eldeki fiyatlar %20 arttırılarak, satım fiyatları %20 azaltılarak oluşturulmuştur. Topraklama olursuzluğu gidermek için kullanılmıştır ve herhangi bir maliyet oluşturmamaktadır. Topraklamanın olmadığı durumda, bir düğümde ve aynı periyotta fazla üretim ve düşük talep olması ve hat kapasiteleri fazla üretimin gönderilmesine izin vermediği durumda olur-

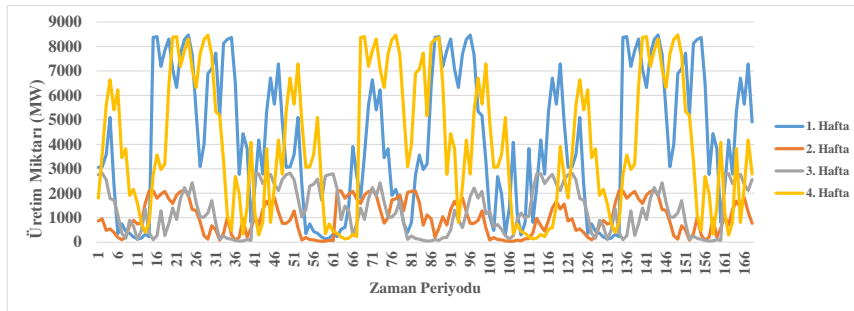
suzluk olmaktadır. Topraklama olmadığı durumunda kısıt 3.6'te düğüm ürettiğini ya kullanmak, ya satmak ya da diğer düğümlere veya deposuna göndermek zorundadır fakat kısıt 3.2'deki kapasiteler her zaman fazla üretimin gönderilmesine izin vermektedir bu da olumsuzluğa sebep olmaktadır.

Bir yıldaki üretim ve tüketimin günlük, haftalık ve yıllık dalgalanmalarını temsil edebilmek üzere 4 ayrı hafta seçilmiştir, sezgisel algoritmalar bu 4 hafta için ayrı ayrı çalıştırılarak her birisinde depo tipi ve yerlerine karar verilmiş, daha sonra 4 hafta için ortaya çıkan çözümler birleştirilerek tek bir çözüme ulaşılmıştır. Bu haftalar mevsimleri temsil etmesi açısından 21 Mart, 21 Haziran, 23 Eylül ve 21 Aralık ile başlayan haftalar olarak seçilmiştir.

Geliştirilen sezgisel Java programlama dili ile kodlanmıştır ve 12 adet 2.4 Ghz Intel(R) Xeon(R) CPU E5645 işlemcili, 18GB RAM kapasiteli bilgisayarda CPLEX 12.6.2 kullanılarak çözdürülmüştür.



Şekil 5.1: 1 haftalık zamana bağlı enerji talep grafiği.



Şekil 5.2: 1 haftalık zamana bağlı enerji üretim grafiği.

Çalışmada kullanılan rastgele bir düğüm için 4 haftalık talep verisi Şekil 5.1'de ve üretim verisi Şekil 5.2'de görülebilir. Fark edileceği üzere saatlik ve haftalık dalga-

lanmalar mevcuttur. Haftalar arası farka bakıldığında ise yıllık bir dalgalanma olduğu görülmektedir.

73 düğüm ve 4 hafta için optimal çözüm almak mümkün olmamıştır. Bu sebeple 24 düğüm ve 5 düğümden oluşturulan örnekler için 4 haftalık elde edilen sezgisel sonuçları optimal ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen sezgisel yöntemde her hafta kendi içerisinde çözülmektedir ve örnek olarak 1.hafta sakladığını 4.hafta satmamaktadır. Bundan dolayı, optimal ile karşılaştırılırken 4 hafta birlikte çözülen örneklerin optimal sonuçlarından elde edilen depo ve kapasiteler her haftaya ayrı ayrı girdi olarak verilmiştir ve toplam amaç fonksiyonuna bakılmıştır. Burada yine aynı depo tiplerini kullanması mümkündür 1.hafta sakladığını 4.hafta satması mümkün olamamaktadır. Sezgisel yöntemimizde elde ettiğimiz sonuçlar bu durumda elde edilen optimal çözümden 5 düğüm için % 0,29, 24 düğüm için % 0,04 sapmıştır.

Yönetimsel çıkarımlar oluşturulması adına çalışmada kullanılan parametreler üzerinden duyarlılık analizleri yapılmıştır ve bunların sonuçları birbirleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar depo değişken maliyetinin, üretim miktarının, 3.7 ve 3.8 kısıtlarındaki $\frac{1}{2}$ katsayısının, talepteki varyansın ve depo kullanımının toplam maliyete olan etkileri incelenmiştir. Oluşturulan senaryolar Çizelge 5.1’de görülebilir.

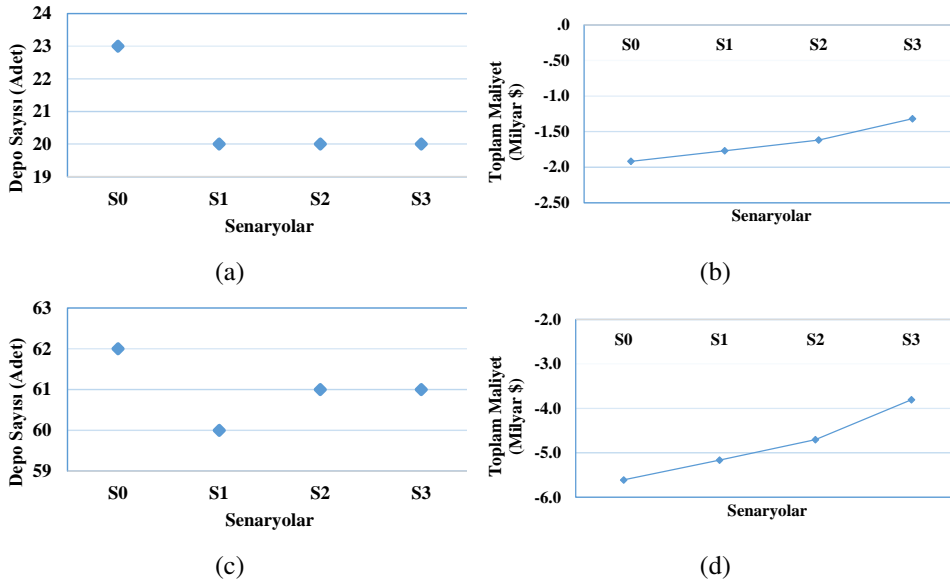
Çizelge 5.1: Oluşturulan senaryolar.

S0	Orijinal Durum
S1	Değişken Maliyetlerdeki 1,5 Kat Artış
S2	Değişken Maliyetlerdeki 2 Kat Artış
S3	Değişken Maliyetlerdeki 3 Kat Artış
S4	Hiç Depo Kurulmadığı Durum
S5	Hat Kapasitesindeki 1,5 Kat Artış
S6	Hat Kapasitesindeki 2 Kat Artış
S7	Talebin Ortalamadan -0,5 Ötelendiği Durum
S8	Talebin Ortalamadan -0,2 Ötelendiği Durum
S9	Talebin Ortalamadan 0,2 Ötelendiği Durum
S10	Talebin Ortalamadan 0,5 Ötelendiği Durum
S11	Talebin Ortalamadan 1 kat Ötelendiği Durum
S12	Talebin Ortalamadan 1,5 kat Ötelendiği Durum
S13	Üretimdeki 1,5 Kat Artış
S14	Üretimdeki 2 Kat Artış
S15	Kısıt 3.7 ve 3.8’de $\frac{1}{3}$ Doluluk
S16	Kısıt 3.7 ve 3.8’de $\frac{2}{3}$ Doluluk

5.1 Depo Değişken Maliyetlerinin Etkisi

Depo değişken maliyetleri deponun bir birim kapasitesi için katlanılmak zorunda olan maliyettir. Burada 3 farklı durum incelenmiştir. Depo değişken maliyetlerinin sırayla 1.5, 2 ve 3 katına çıkarılmasının depo sayısına ve amaç fonksiyonuna olan etkisine bakılmıştır.

24 düğüm için Şekil 5.3 (a)'da değişken maliyete bağlı depo sayısının grafiği, Şekil 5.3 (b)'de amaç fonksiyonunun grafiği verilmektedir. Değişken maliyet arttıkça açılan depo sayısının azalma eğiliminde olduğu Şekil 5.3 (a)'dan gözlemlenebilmektedir. Bu beklenen bir durumdur çünkü maliyetlerdeki artış amaç fonksiyonuna negatif bir şekilde yansıdığı için her yeni açılan depo maliyeti bir önceki senaryoya göre daha fazla arttırmaktadır. Şekil 5.3 (a) ve (b)'den de gözlemlenebileceği gibi depo sayısındaki azalma ve maliyetlerdeki artma amaç fonksiyonuna olumsuz yönde yansımaktadır. 73 düğüm için de benzer durumun olduğu Şekil 5.3 (c) ve (d)'den gözlemlenebilmektedir. 73 düğüm için depo sayısındaki ufak artış aslında maliyetleri düşürmek için farklı depo tipleri seçmesinden kaynaklanmaktadır. İki durumda da maliyetler monoton bir şekilde artmaktadır.



Şekil 5.3: Değişken maliyetin etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.

5.2 Hiç Depo Kurulmadığı Durum

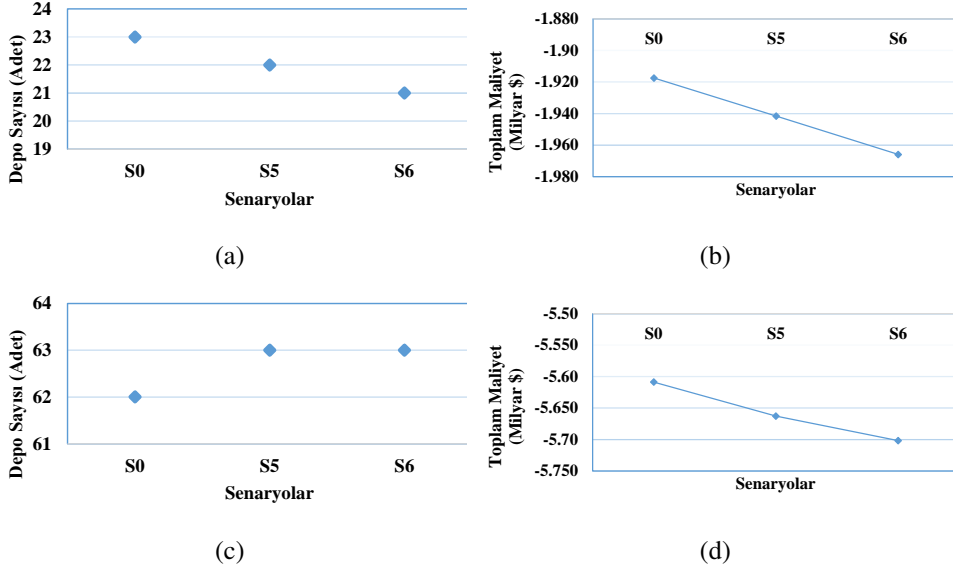
Tez motivasyonu olarak Bölüm 1’de depolamanın kârlı bir yatırım olacağından bahsedilmişti. Firma sahibi için depolamanın ona getirisini göstermek adına depoların toplam maliyete etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.2’den görülebileceği gibi depoların firmaya etkisi oldukça fazladır. Depolama sayesinde firma fazla üretim yaptığında bunu depolayarak gerekli olduğunda kullanabilmektedir ve merkezi şebekeden satın almak zorunda değildir. Bunun dışında, depolama sayesinde enerji fiyatları düşükken ürettiğini depolayarak fiyatlar yükseldiğinde bunu satma fırsatı bulmaktadır.

Çizelge 5.2: Hiç depo açılmadığı durum toplam maliyet karşılaştırması.

Düğüm Sayısı	Depo Olmayan Durum (S4) Toplam Maliyet (\$)	Orijinal Durum (S0) Toplam Maliyet (\$)
24	-67,1 Milyon	-1,9 Milyar
73	-69,5 Milyon	-5,6 Milyar

5.3 Hat Kapasitelerinin Etkisi

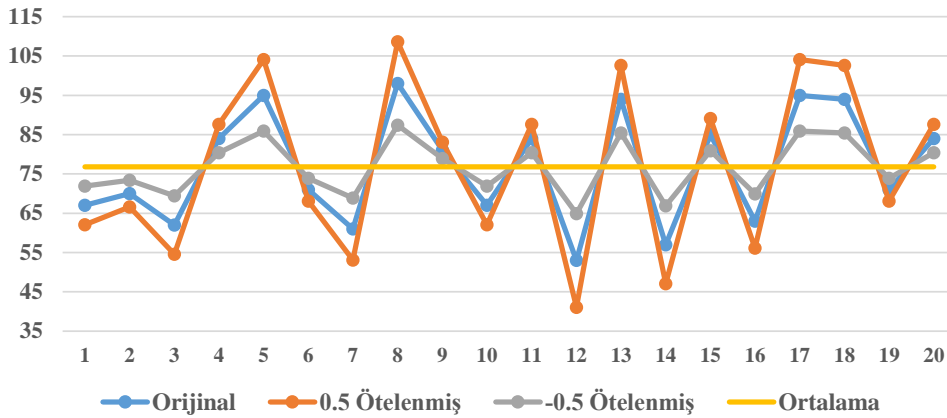
Hat kapasiteleri de çalışmada depo kurmak için bir motivasyon olarak verilmişti. Buradan anlaşılacağı gibi hat kapasiteleri gönderimi engellemektedir ve artışın modeli gevşeteceği ve bunun da amaç fonksiyonu değerinin iyileştirmesi beklenmektedir. Bu duyarlılık analizi altında matematiksel modeldeki kısıt 3.3 gevşemektedir. Bilindiği üzere model gevşetildiğinde amaç fonksiyonu değerinin iyileşmesi beklenmektedir. Hat kapasiteleri senaryo 5’te 1,5, senaryo 6’da 2 kat arttırılmıştır. Sayısal çalışmalardan da beklenen sonuç elde edilmiştir. Bunun yanı sıra hat kapasitelerinin artmasıyla depolamaya duyulan ihtiyaç azalmaktadır ve depolama maliyetine katlanılmak zorunda değildir. Bu sebeple açılan depo sayısı da azalmıştır. İlgili sonuçları 24 düğüm için Şekil 5.4 (a)’da ve (b)’de, 73 düğüm için Şekil 5.4 (c) ve (d)’de görebilirsiniz. 73 düğümde depo sayısında artış vardır burada model farklı depolar kurup depo sayısı arttırırken toplam maliyeti düşürmeyi hedeflemiştir.



Şekil 5.4: Hat kapasitelerinin etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.

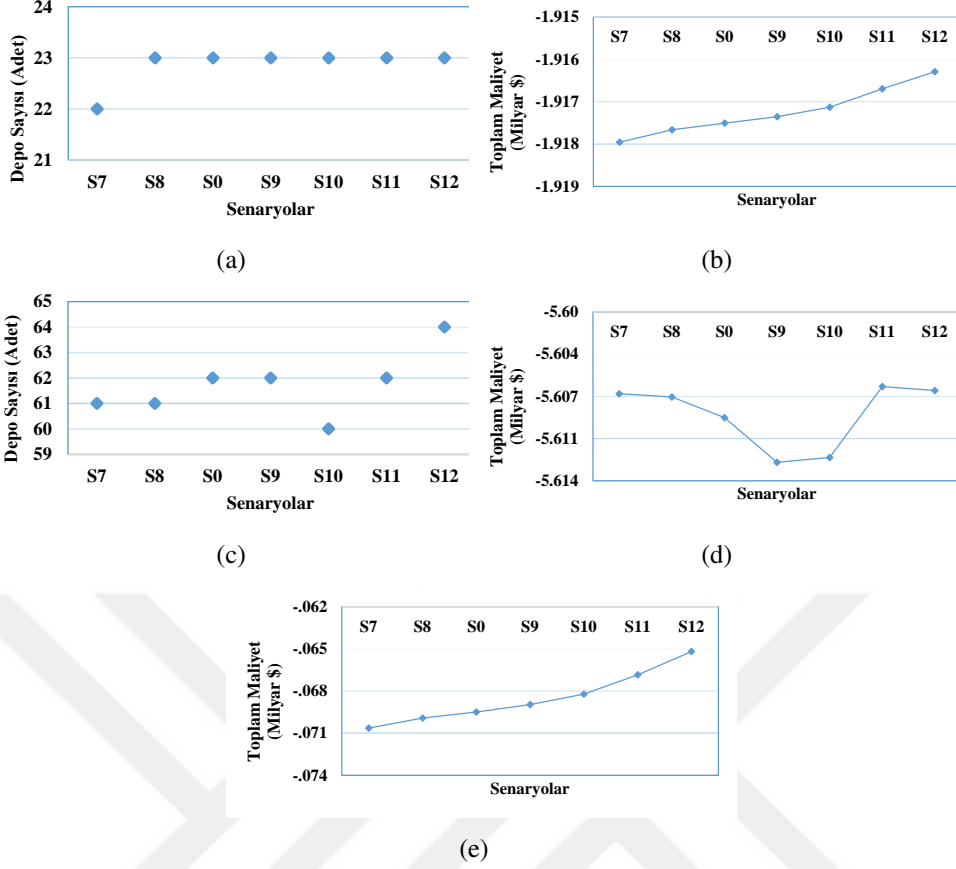
5.4 Talepteki Varyansın Etkisi

Talepteki varyans her bir düğüm için 1 haftalık periyodun ortalaması belirlendikten sonra ortalamadan sapması sırayla 0,5; 0,8; 1,2; 1,5; kat yakınlaştırılıp uzaklaştırılmıştır ve ayrıca 2; 2,5 kat da uzaklaştırılmıştır. Bu şekilde 6 senaryo oluşturulmuştur. 0,5 yakınlaştırmada ortalama değiştirilmeden varyans düşürülürken, 0,5 uzaklaştırmada yine ortalama değiştirilmeden bu sefer varyans artırılmıştır. Örnek bir veri için nasıl varyans ötelenildiği Şekil 5.5’de görülebilir. Senaryolar sırasıyla varyansın 0,5; 0,2 oranında azaltıldığı, 0,2; 0,5; 1; 2 oranında artırıldığı durumlar için oluşturulmuştur.



Şekil 5.5: Varyans ötelenmenin etkisi.

Varyansın değiştirilmesi durumunda 24 düğüm için alınan koştuurumlarda beklenil-



Şekil 5.6: Talep varyansının etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet, (e) 73 düğüm depo olmadan toplam maliyet.

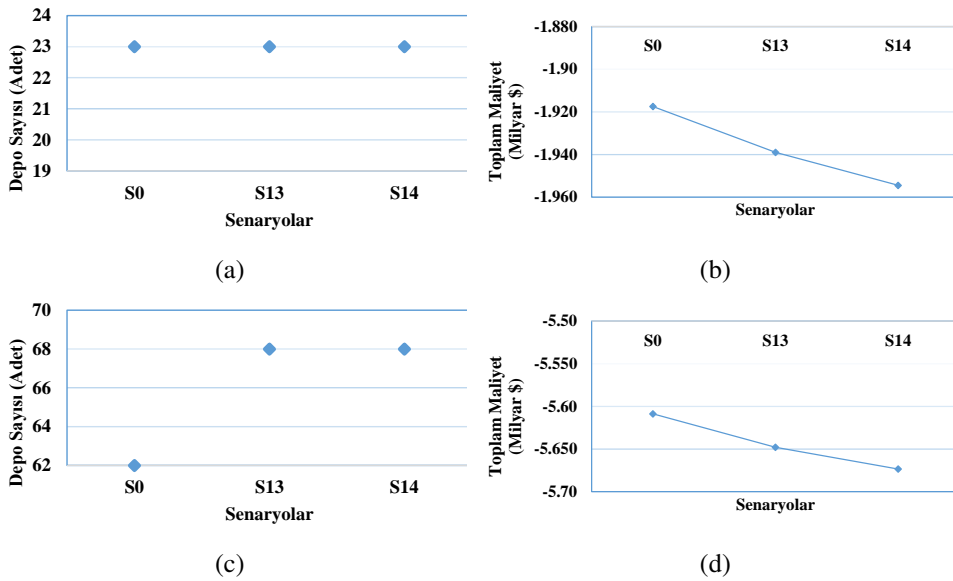
diği gibi depo sayısının artıp, maliyetlerin de bu ölçüde yükseldiği Şekil 5.6 (a)'da ve (b)'de gözlemlenebilir. Burada depo sayısının artmasını talepteki değişimleri yakalamak için daha fazla depo açtığı ve aynı anda yatırım, eskime ve kapasite maliyetlerinin gelmesiyle maliyetlerin arttığı şeklinde yorumlanabilmektedir. Fakat 73 düğümlük koşuturlarda ise farklı bir durum oluşmuştur: depo sayısı düzenli bir şekilde artmakla birlikte maliyetlerde düşüş gözlemlenmiştir. Beklenmeyen durum Şekil 5.6 (c) ve (d)'de verilmiştir.

Beklenmeyen durumun sebebini görmek adına, aynı örnekler depo kullanımına izin verilmeden çözdürülmüştür. Şekil 5.6 (e) 'de görüldüğü gibi depo kullanılmadığında sistemde amaç fonksiyonu değeri varyansın artması ile kötüleşmektedir. Anlaşılabacağı üzere depolama sistemleri burada varyansın getirdiği olumsuz etkiyi azaltmaktadır hatta bazı durumlarda kendi lehine çevirebilmektedir. Düşünüldüğünde varyans arttığında ortalamanın altındaki talep daha da azalacağı için, bu dönemlerde ürettiğini

depolarında saklarken fiyatlar yükseldiğinde daha fazla miktarda satma imkânı bulabilmektedir.

5.5 Üretimdeki Artışın Etkisi

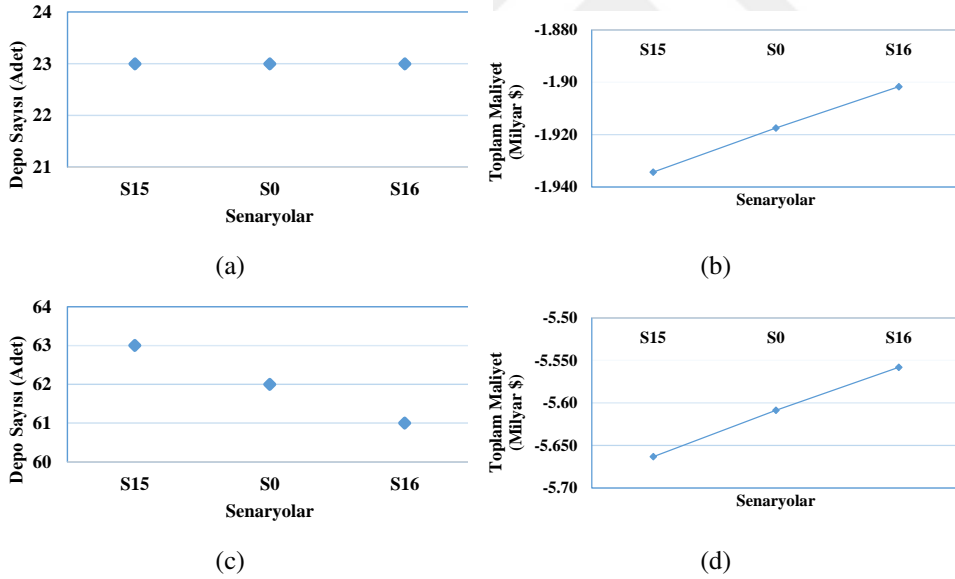
Yenilenebilir enerji kaynakları kesikli bir üretim profili sergilemektedir ve bu da depolama motivasyonlarımızdan birisidir. Üretim olmayan dönem için depolarda enerji saklanarak gerekli dönemlerde talep karşılanmaktadır. Üretimdeki artış ile merkezi şebekeye satışlar artabilir bu da toplam maliyetin düşmesine sebep olur ancak hat kapasiteleri burada kısıt olarak ortaya çıkmaktadır (Bkz. Kısıt 3.2) ve bu da gönderilemeyen enerji için düğümlerde depo açılmasını veya topraklanan enerji miktarının artmasını motive eder. Öngörüldüğü gibi deneysel çalışmalar yorumları desteklemektedir. Üretim senaryo 13'te 1,5, senaryo 14'te 2 katına çıkarılmıştır. 24 düğüm için Şekil 5.7 (a)'da ve (b)'de, 73 düğüm için Şekil 5.7 (c) ve (d)'de elde edilen sonuçlar incelenebilir. Üretim miktarı arttıkça depo sayısı ya artmıştır ya da sabit kalmıştır. Fakat maliyetler monoton olarak hep azalmıştır.



Şekil 5.7: Üretimdeki artışın etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.

5.6 Başlangıç ve Bitiş Anı Doluluk Oranlarının Etkisi

Depoların planlama ufkunun başlangıcında ve bitişinde belirli bir seviyede olması gerekliliğinden bahsedilmişti bunun da sebebi olarak kurulan planın 1 yıldan uzun bir süre işletilecek olmasıydı. Depoların başlangıç durumuna geri gelmesini sağlayan kısıtlar aynı şekilde diğer yıl da tekrar edilebilmesi için eklenmişti. Orijinal senaryoda depoların yarısının dolu olması önerilmişti. Senaryolarda 1/3'nün ve 2/3'nün dolu olması durumu ele alındı. Bunlar ile kısıt 3.7 ve 3.8'nin sağ taraf değerleri değiştirilerek, 3.8 kısıtı daha sıkı ve daha gevşek duruma getirildi. Bilindiği gibi matematiksel modellemede model sıkılaştırılırsa amaç fonksiyonu değeri kötüleşirken, model gevşetildiğinde amaç fonksiyonu değeri iyileşmektedir. Öngörüldüğü gibi senaryo 15'te amaç fonksiyonu değeri daha kötüyken senaryo 16'te iyileşme olduğu 24 düğüm için Şekil 5.8 (b)'de, 73 düğüm için (d)'de gözlemlenmektedir. Sırasıyla depo sayılarındaki değişim ise Şekil 5.8 (a) ve (c)'de görülebilir.



Şekil 5.8: Dönem başı ve sonu saklanan miktarın etkisi (a) 24 düğüm depo sayısı, (b) 24 düğüm toplam maliyet, (c) 73 düğüm depo sayısı, (d) 73 düğüm toplam maliyet.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynakları bulunan bir firmanın müşterilerinin talebini karşılamak için karşılaştığı çok periyotta depo yerleşim ve yönetim problemi ele alınmıştır. Literatürde oldukça popüler olan bu konuya endüstri mühendisliği bakış açısı ile yaklaşarak yeni bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Karışık tam sayılı programlama modeli kurulmuştur ama kullanılan örneğin büyük olması ve tam sayılı değişkenler içermesinden dolayı makul sürelerde optimal çözüme ulaşılamamıştır. Matematiksel programlama modeli tabanlı bir sezgisel geliştirilmiştir. Sezgisel bir yıldan seçilen 4 haftalık örnek için koşturulmaktadır. Önerilen yöntemde her hafta için bir başlangıç çözümü elde edilerek önce yerel aramayla daha sonra da tavlama benzetimi algoritmasıyla iyileştirilmiştir. Sonrasında 1 yıllık plan elde edilmesi hedeflenerek 4 haftaya ortak depo yeri, tipi ve kapasiteleri belirlemek için yeni bir sezgisel ihtiyaç duyulmuştur. Sezgisellerin matematiksel programlama temelli olmasından dolayı kaliteli çözümler elde etmek için uzun süreli koşturumlar yapılması gerekmiştir. Elde edilen çözümler optimalden 5 düğüm için % 0,29, 24 düğüm için % 0,04 sapmıştır. Geliştirilen sezgisel saatlik, haftalık ve yıllık dalgalanmaları ele aldığı için literatürdeki diğer çalışmalardan da farklılaşmaktadır.

Bu çalışmada sezgiselin yeterliliğini test etmek ve firma sahibine sunulmak üzere duyarlılık analizleri yapılmıştır. Duyarlılık analizlerinde önerilen yöntemin değişken maliyetlerinin, hat kapasitelerinin ve üretimin artmasına, talep varyansının değişmesine tepkisi incelenmiştir. Bunun yanı sıra depo kullanımının toplam maliyete etkisine bakılmıştır, depo kurulmadığı zaman firmanın kaybının ne olacağı belirlenmiştir. Toplamda 16 senaryo üretilerek hepsi test edilmiştir. Değişken maliyetlerindeki artışın amaç fonksiyonu değerini beklenildiği gibi düşürdüğü, hat kapasitelerindeki artışın modeli gevşettiği ve amaç fonksiyonu değerini iyileştirdiği, üretimdeki artışın depo sayısını arttırırken amaç fonksiyonu değerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Talepteki varyans artışının tahmin edilenin aksine depolama sistemleri sayesinde lehimize çev-

rilebildiği şaşırtıcı bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonuçlardan Bölüm 1’te bahsedilen motivasyonların geçerli olduğu kanıtlanmış ve firma sahibine ileride oluşması beklenen durumlar için bir bakış açısı sunulmuştur.

Bu çalışmada üretim, talep ve elektrik fiyatlarının deterministik olduğu durum ele alınmıştır. Bu problem gelecek çalışmalarda üretim ve talep değerleri stokastik olarak ele alınabilir. Fakat deterministik haliyle kullanılan yöntemlerde bile kaliteli çözüm elde etmek çok uzun sürmekteyken, senaryo temelli stokastik programlama modelinde bu durum oluşturulacak senaryo sayısına bağlı olacak şekilde çözüm bulmak daha da zorlaşmaktadır. Burada çözüm yolu olarak L-şekli metodu kullanılabilir veya Bender’s ayrışım tekniği uygulanabilir. Uygun olacak şekilde sezgisel yöntemler de geliştirilebilir.

Hat aktarımlarındaki kayıplar çalışmamızda göz ardı edilmiştir. Kayıplar doğrusal olmayan bir fonksiyon ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar modele dâhil edilerek doğrusal olmayan programlama çözümleri kullanılarak yine matematiksel model tabanlı sezgisellerle çözülebilir.

Ek olarak, bir yıl dört hafta ile temsil edilerek bu şekilde mevsimsel dalgalanmalar yakalanmıştır. İleriki çalışmalarda daha fazla hafta ile sütun türetme yöntemi kullanılabilir veya farklı dört haftalar seçilerek simülasyon çalışması da yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alguacil, N. ve Conejo, A. J.** (2000). Multiperiod optimal power flow using Benders decomposition. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 15(1):196–201.
- Alharbi, W. ve Bhattacharya, K.** (2013). Demand response and energy storage in MV islanded microgrids for high penetration of renewables. In *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2013 IEEE*, pages 1–6. IEEE.
- Anderson, D. L.** (2009). *An evaluation of current and future costs for lithium-ion batteries for use in electrified vehicle powertrains*. PhD thesis, Duke University.
- Atwa, Y. M. ve El-Saadany, E. F.** (2010). Optimal Allocation of ESS in Distribution Systems With a High Penetration of Wind Energy. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(4):1815–1822.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., ve Rosehart, W.** (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4):302–314.
- Bose, S., Gayme, D. F., Topcu, U., ve Chandy, K. M.** (2012). Optimal placement of energy storage in the grid. In *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on*, pages 5605–5612. IEEE.
- BP Statistical Review of World Energy** (2015). BP Statistical Review of World Energy, June 2015. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>. [Online; accessed 2015-11-15].
- Brekken, T. K. A., Yokochi, A., von Jouanne, A., Yen, Z. Z., Hapke, H. M., ve Halamay, D. A.** (2010). Optimal Energy Storage Sizing and Control for Wind Power Applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.
- Budischak, C., Sewell, D., Thomson, H., Mach, L., Veron, D. E., ve Kempton, W.** (2013). Cost-minimized combinations of wind power, solar power and electrochemical storage, powering the grid up to 99.9% of the time. *Journal of Power Sources*, 225:60–74.
- Chen, Y.-H., Lu, S.-Y., Chang, Y.-R., Lee, T.-T., ve Hu, M.-C.** (2013). Economic analysis and optimal energy management models for microgrid systems: A case study in Taiwan. *Applied Energy*, 103:145–154.

- Dvijotham, K., Chertkov, M., ve Backhaus, S.** (2014). Storage Sizing and Placement through Operational and Uncertainty-Aware Simulations. pages 2408–2416. IEEE.
- Ekren, O. ve Ekren, B. Y.** (2010). Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Applied Energy*, 87(2):592–598.
- EPIA (European Photovoltaic Industry Association) report** (2008). Solar Generation V 2008. <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>. [Online; accessed 2015-09-20].
- European Power Exchange(EPEX)** (2014). European power exchange (epex) spot se: Day-Ahead Auction. <https://www.epexspot.com/en/market-data/dayaheadauction/auction-table/2014-11-11/FR>. [Online; accessed 2015-11-23].
- Gan, L., Li, N., Topcu, U., ve Low, S. H.** (2013). Optimal power flow in tree networks. In *Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on*, pages 2313 – 2318.
- Gayme, D. ve Topcu, U.** (2013). Optimal power flow with large-scale storage integration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2):709–717.
- Korpaas, M., Holen, A. T., ve Hildrum, R.** (2003). Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(8):599–606.
- Naam, R.** (2015). Why energy storage is about to get big and cheap. <http://rameznaam.com/2015/04/14/energy-storage-about-to-get-big-and-cheap/>. Accessed: October 18, 2015.
- Pandzic, H., Qiu, T., ve Kirschen, D. S.** (2013). Comparison of state-of-the-art transmission constrained unit commitment formulations. In *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, pages 1–5. IEEE.
- Pandzic, H., Wang, Y., Qiu, T., Dvorkin, Y., ve Kirschen, D. S.** (2015). Near-Optimal Method for Siting and Sizing of Distributed Storage in a Transmission Network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5):2288–2300.
- REAL Lab Library** (2014a). IEEE-RTS 96 with Wind Farms Diagrams. http://www.ee.washington.edu/research/real/Library/Data/IEEE-RTS_3_wind_farms.jpg. [Online; accessed 2016-07-28].
- REAL Lab Library** (2014b). Unit Commitment under Uncertainty - GAMS Models, Library of the Renewable Energy Analysis Lab (REAL). http://www.ee.washington.edu/research/real/gams_code.html. [Online; accessed 2016-01-20].

- Stluka, P., Godbole, D., ve Samad, T.** (2011). Energy management for buildings and microgrids. In *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*, pages 1–7.
- Thrampoulidis, C., Bose, S., ve Hassibi, B.** (2013a). Optimal large-scale storage placement in single generator single load networks. In *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, pages 1–5. IEEE.
- Thrampoulidis, C., Bose, S., ve Hassibi, B.** (2013b). Optimal placement of distributed energy storage in power networks.
- Topcu, U., Gayme, D., Low, S., ve Khargonekar, P.** (2013). Towards smart, flexible and efficient power systems: Vision and research challenges. In *American Control Conference (ACC), 2013*, pages 5237–5244. IEEE.
- Vale, Z. A., Morais, H., Khodr, H., Canizes, B., ve Soares, J.** (2010). Technical and economic resources management in smart grids using heuristic optimization methods. In *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pages 1–7. IEEE.
- van den Akker, J., Leemhuis, S., ve Bloemhof, G.** (2014). Optimizing storage placement in electricity distribution networks. In *Operations Research Proceedings 2012*, Operations Research Proceedings, pages 183–188. Springer International Publishing.
- Wang, Z., Yang, K., ve Wang, X.** (2013). Privacy-Preserving Energy Scheduling in Microgrid Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(4):1810–1820.
- Wong, P., Albrecht, P., Allan, R., Billinton, R., Chen, Q., Fong, C., Haddad, S., Li, W., Mukerji, R., Patton, D., ve others** (1999). The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 14(3):1010–1020.
- World Nuclear Association** (2011). Greenhouse gas emissions avoided through use of nuclear energy. <http://www.world-nuclear.org/Nuclear-Basics/Greenhouse-gas-emissions-avoided/>. [Online; accessed 2015-12-20].
- Yang, P. ve Nehorai, A.** (2014). Joint Optimization of Hybrid Energy Storage and Generation Capacity With Renewable Energy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4):1566–1574.
- Yu, X. E., Malysz, P., Sirouspour, S., ve Emadi, A.** (2014). Optimal microgrid component sizing using mixed integer linear programming. In *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2014 IEEE*, pages 1–6. IEEE.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Cansu AĞRALI
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Tarihi ve Yeri : 15/11/1991 Alanya/ANTALYA
E-posta : agralicansu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
20014-2016	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Yüksek Lisans Burslu Öğrencisi

YABANCI DİL: İngilizce, Almanca

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Agrali, C., Gultekin, H., and Tekin, S., 2016. Optimization of Energy Storage Decisions in Power Networks with Renewable Generation, Proceedings on The 29th Conference of the European Chapter on Combinatorial Optimization, May 26-28, Budapest, Hungary.

- Agrali, C., Gultekin, H., Tekin, S., Tanrisever, F. ve Derinkuyu, K., 2015. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanıldığı Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama ve Dağıtım Operasyonu Kararları Optimizasyonun, Bildiri - Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği (YAEM) 35. Ulusal Kongresi, 9-11 Eylül, Ankara, Türkiye.

