

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR SANTRALLERİNDE ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ
KULLANIMI İÇİN ALGORİTMA TASARIMI
VE FİZİBİLİTE HESAPLAMASI

ABDÜLHADİ ÇİFTÇİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR SANTRALLERİNDE ENERJİ
DEPOLAMA SİSTEMİ KULLANIMI İÇİN
ALGORİTMA TASARIMI
VE FİZİBİLİTE HESAPLAMASI

ABDÜLHADİ ÇİFTÇİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. ABDULKADİR BALIKÇI

GEBZE

2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23.06.2014 tarih ve 2014/37 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/07/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Abdülhadi ÇİFTÇİ'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

: Doç. Dr. M. Ali Arslan

ÜYE

: Doç. Dr. M. Hakan Hoccoğlu

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) doğal olaylara bağılı olduğu için mevsime ve doğal şartlara göre değişkenlik göstermektedir. Bu durumun şebekede üretimin dalgalanmasına ve şebeke arz kalitesinin düşmesine sebep olması mümkündür. Şiddetli dalgalanmalarda cihazların arızalanması, şebeke çökmesi veya büyük elektrik kesintileri olabilir. Bu sebeple yüksek oranda YEK kullanımı, ulusal şebeke için enerji kalitesi ve arz-talep dengesi açısından risk oluşturmaktadır. Enerji üretiminde YEK kullanımının arttırılması ile ortaya çıkacak olumsuzlukların da giderilmesi gerekmektedir.

Bu olumsuzlukların giderilebilmesi için en ideal çözüm enerji depolama sistemleridir. (EDS) EDS'ler günümüzde uygun algoritmaların kullanılması ile ticari olarak uygulanabilir hale gelmiştir.

Bu çalışmada 3 rüzgar enerji santralinde EDS kullanımının getiri hesabı yapılarak, EDS'lerin ne kadar sürede geri dönüş sağladığı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji Depolama Sistemi, Rüzgar Enerji Santrali, Vanadyum Redoks Bataryası.

SUMMARY

Renewable Energy Sources (RES) are fluctuating due to seasons and natural events. By the way, this feature may bring about production uncertainty and problems on grid quality. Strong changes on RESs may cause damages, grid failure or large scale blackouts. For this reason, penetrating of RES has a risk on grid quality and supply-demand equilibrium. It is needed to be overcome possible problems which will appear with RES penetration on energy production.

Ideal solution to get rid of the problems is energy storage systems (ESS). Today, ESS are economically feasible with using of proper algorithm.

In this work, revenue of ESS integration of 3 wind power plants calculated and payback periods are stated.

Key Words: Energy Storage System, Wind Power Plant, Vanadium Redox Battery.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya,

Çalışmalarım boyunca destek olan Eksim Holding'teki çalışma arkadaşlarıma,

Ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Rüzgar Enerjisinde Enerji Arzı Problemleri	1
1.2. Arz-Talep Dengesi	3
1.3. Değişken Elektrik Enerjisi Tarifeleri	4
2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİ	5
2.1. Batarya ile Enerji Depolama Sistemi	5
2.1.1. Kurşun Asit Batarya	5
2.1.2. Nikel-Kadmium Batarya	5
2.1.3. Lityum-iyon Batarya	5
2.1.4. Sodyum-Sülfür Batarya	6
2.1.5. Akış Bataryası ile Enerji Depolama Sistemi	6
2.1.6. Vanadyum Redoks Akış Bataryası	8
2.2. Hidrojen Bazlı Enerji Depolama Sistemi	10
2.3. Süperkapasitör	10
2.4. Volan ile Enerji Depolama Sistemi	10
3. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARI	11
3.1. Rüzgar Enerji Santrallerinin Üretim Paylarının Arttırılması	11
3.2. Dalgalanmaların Sönümlendirilmesi	12
3.3. Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yapılması	12
3.4. Yan Hizmetlerin Sağlanması	13
3.5. Üretim Kontrolü	13

3.6. Tarife Kaydırma	13
4. VAKA ÇALIŞMASI	15
4.1. Vaka Çalışması: Giriş	15
4.1.1. Batarya ile Enerji Depolama Sisteminin Bağlantı Yöntemleri	15
4.2. Vaka Çalışması İçin Belirlenen Hedefler	16
4.2.1. PMUM’a Verilen Tahminlerin Yakalanması	18
4.2.2. Tarife Kaydırma	18
4.2.3. Frekans Kontrolü ve Dengeleme Piyasasına Teklif Verilmesi	20
4.3. Boyutlandırma	21
4.4. Varsayımlar	21
4.5. Algoritma	22
4.5.1. Şarj-deşarj Algoritması	22
4.5.2. Tahmin Algoritması	23
4.5.3. Gelir Algoritması	25
4.6. Hesaplama	28
5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME	36
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	40

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar Kısaltmalar

ABEDS	: Akış Bataryası ile Enerji Depolama Sistemi
BAL	: Tahmin değeri ile üretim değeri arasındaki fark, balans değeri
BAT	: Bataryanın sahip olduğu enerji miktarı (MWh)
BEDS	: Batarya ile Enerji Depolama Sistemi
DGP	: Dengeleme Güç Piyasası
EDS	: Enerji Depolama Sistemi
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
GİP	: Gün İçi Piyasa
GÖP	: Gün Öncesi Piyasa
KAP	: Enerji Depolama Sistemi kapasitesi (MWh)
KGÜP	: Kesinleşmiş Günlük Üretim Planı
PMUM	: Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
SGÖF	: Sistem Gün Öncesi Fiyatı
SMF	: Sistem Marjinal Fiyatı
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A. Ş.
THM	: KGÜP olarak verilen tahmin değeri
THMY	: KGÜP ve YALT toplamı olarak verilen tahmin değeri
VRB	: Vanadyum Redoks Bataryası
YAL	: Yük Al Talimatı
YALF	: Yük Alma İşlemi Birim Fiyatı
YALT	: Yük Al-At Talimatları
YAT	: Yük At Talimatı
YATF	: Yük Atma İşlemi Birim Fiyatı
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: Bir rüzgar enerji santralinin 1 dakika periyotlu bir günlük enerji üretimi.	2
1.2: Türkiye’de 3 rüzgar enerji santraline ait hakim rüzgar yönleri.	2
1.3: Türkiye’de 3 rüzgar enerji santraline ait aylık ortalama değerler.	3
1.4: Enerji depolama sistemi ile arz-talep dengesizliğinin giderilmesi örneği.	3
2.1: Akış bataryası ile enerji depolama sistemi çalışma prensibi.	8
3.1: Türkiye’de yıllara göre rüzgar enerjisi kurulu gücü.	11
3.2: Türkiye’de yıllara göre toplam kurulu güç artışı.	12
4.1: Enerji depolama sistemleri ve rüzgar türbinlerine ait iki popüler bağlantı şekli.	16
4.2: Düşük tarifelerin getiriye azaltılmasına ait bir örnek.	17
4.3: Düşük tarifelerin getiriye azalttığına ait diğer örnek.	17
4.4: Yüksek tarifelerin kaçırılması örneği.	18
4.5: 2012 yılına ait günlük enerji üretimi profili.	19
4.6: Enerji birim fiyatlarının gece ve gündüz değişimi örneği.	19
4.7: 2012'deki toplam enerji satışı günlük profili.	20
4.8: Enerji depolama sistemi şarj-deşarj algoritması.	24
4.9: Tahmin akış şeması.	25
4.10: Gelir akış şeması.	27
4.11: A santraline ait 24 saatlik enerji depolama sistemli üretim eğrileri.	32
4.12: 3 adet rüzgar enerji santralinin ortalamasına ait getiri ve maliyet grafiği.	35

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Kurşun-asit batarya ile Vanadyum redoks batarya karşılaştırması.	9
4.1: Enerji depolama sistemi kapasitelerine ait maliyetler.	28
4.2: Hesaplama örneği.	29
4.3: Örnek maliyet ve getiri karşılaştırma tablosu.	30
4.4: Geri ödeme süreleri.	33
4.5: Enerji depolama sistemleri yıllık döngü sayıları.	33
4.6: Enerji depolama sistemi kullanımının sağladığı yıllık kâr miktarları.	34

1. GİRİŞ

Bugün tüm dünyadaki enerji politikaları daha yüksek oranda YEK kullanımını desteklemektedir. 2006 yılında Avrupa Birliği, 2020 hedefini toplam üretilen enerjinin %20'sinin YEK ile üretilmesi olarak belirlemiştir[1]. Şimdi görülmektedir ki, bu hedefin yakalanması mümkündür[2].

YEK doğal olaylara bağlı olduğu için mevsime ve doğal şartlara göre değişkenlik göstermektedir. Bu durumun şebekede üretimin dalgalanmasına ve şebeke arz kalitesinin bozulmasına sebep olması mümkündür. Şiddetli dalgalanmalarda cihazların arızalanması, şebeke çökmesi veya büyük elektrik kesintileri olabilir. Bu sebeple yüksek oranda YEK kullanımı, ulusal şebeke için enerji kalitesi ve arz-talep dengesi açısından risk oluşturmaktadır. Enerji üretiminde YEK kullanımının artırılması ile ortaya çıkacak olumsuzlukların giderilmesi gerekmektedir.

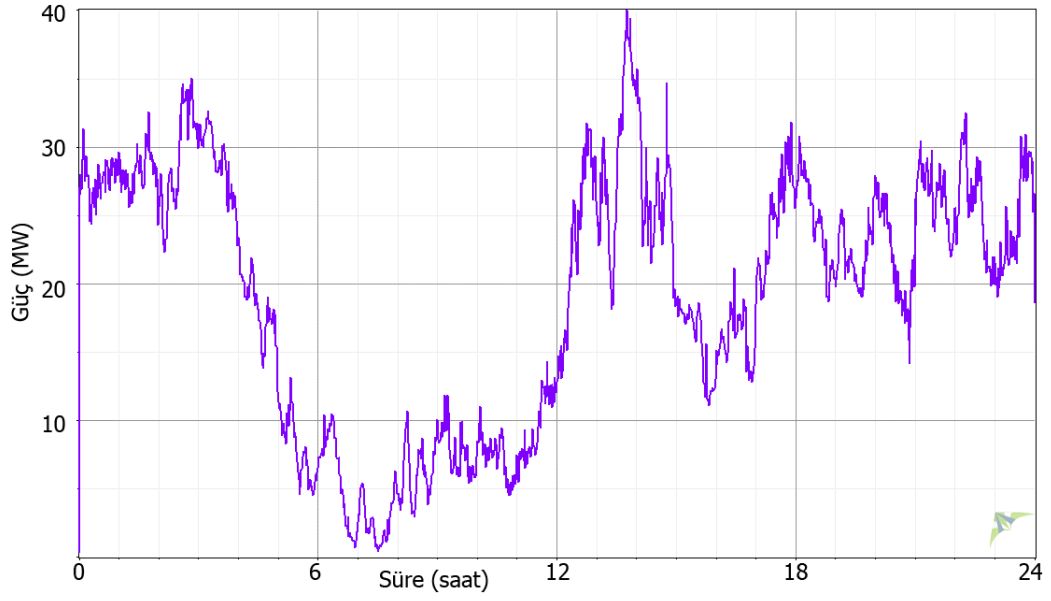
1.1. Rüzgar Enerjisinde Enerji Arzı Problemleri

YEK içerisinde özellikle rüzgar enerjisi geçtiğimiz yıllardan itibaren oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisi anlık olarak değişen bir kaynak olduğu için arz-talep dengesi problemlerine sebep olabilmektedir.

Rüzgar enerjisi Şekil 1.1'deki gibi dalgalanan bir grafiğe sahip olabilir. Rüzgar hızı, rüzgar gücü büyüklüğünü küpü ile etkilemektedir[3]. Bu sebeple, rüzgar hızındaki küçük bir dalgalanma, üretimde büyük bir etki meydana getirmektedir.

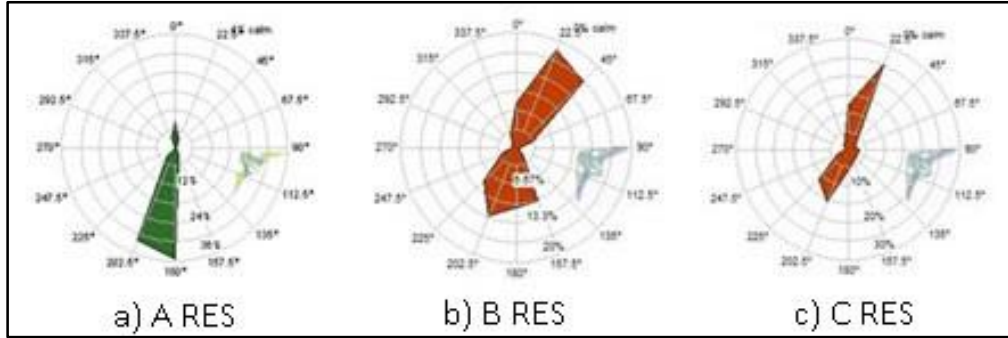
$$P = \frac{1}{2} A \rho U^3 \quad (1.1)$$

- **A:**Tarama alanı
- **U:**Rüzgar hızı
- **ρ :**Hava yoğunluğu

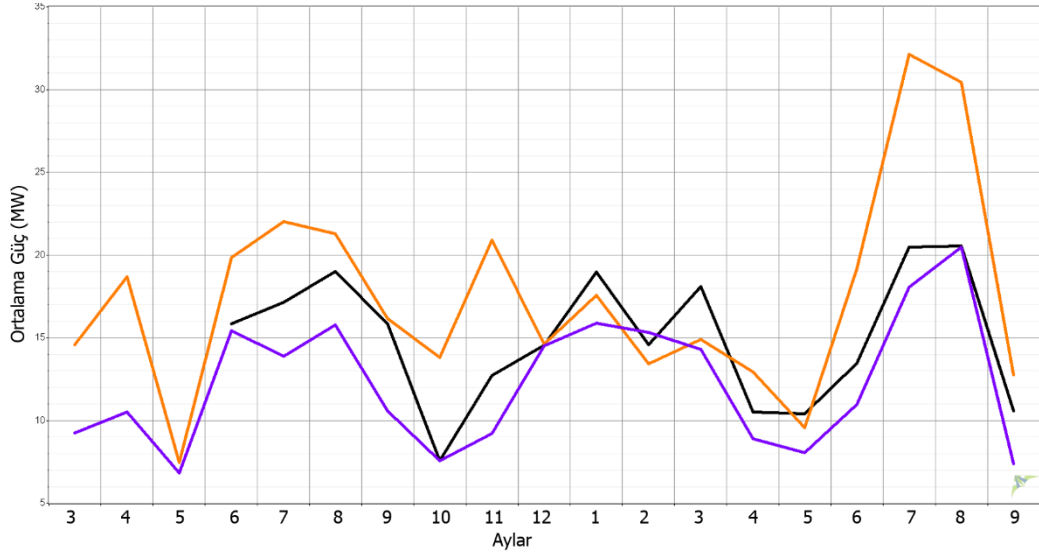


Şekil 1.1: Bir rüzgar enerji santralinin 1 dakika periyotlu bir günlük enerji üretimi.

Türkiye’ye ait rüzgar enerjisi profili mevsimsel olarak da değişkenlik göstermektedir. Şekil 1.2 ve 1.3’te görüldüğü gibi rüzgar genellikle kuzey-güney ekseninde hakim olup, mevsim geçişlerinde (Nisan-Haziran ve Ekim-Kasım) daha düşük seyretmektedir.



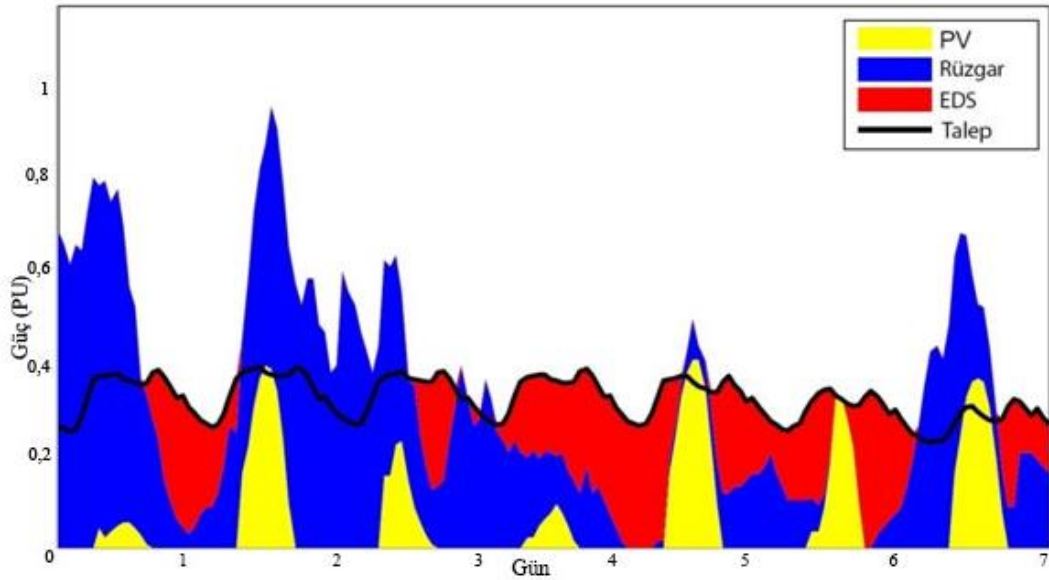
Şekil 1.2: Türkiye’de 3 rüzgar enerji santraline ait hakim rüzgar yönleri.



Şekil 1.3: Türkiye’de 3 rüzgar enerji santraline ait aylık ortalama değerler.

1.2. Arz-Talep Dengesi

Arz-talep dengesi, kontrol edilebilen enerji kaynakları ile sağlanabilir. Sürekli değişen talep karşısında enerji arzının oldukça esnek olması gerekmektedir. Enerji depolama sistemleri bu noktada büyük önem taşımaktadır. Genel olarak kabul edilen şudur ki, kesintisiz çalışan yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemi kullanılmadan toplam üretimin %20’sinden fazla olmamalıdır[4].



Şekil 1.4: Enerji depolama sistemi ile arz-talep dengesizliğinin giderilmesi örneği.

Enerji depolama sistemi kullanımı ile şebekedeki arz ve talep arasındaki güç akışı dengesinin sağlanmasındaki zorluğun aşılabileceği düşünülmektedir[5],[6].

1.3. Değişken Elektrik Enerjisi Tarifeleri

Elektrik enerjisi piyasa fiyatları, arz-talep dengesi ve santrallerin enerji üretim maliyetlerine göre değişim göstermektedir. Eğer ucuz üretim kaynakları olan baz enerji santralleri enerji talebine karşı yeterli arz sağlayamazsa, puant enerji santralleri devreye girmektedir. Bu şekilde puant enerji santrallerinin teklif ettiği yüksek fiyatlar sebebiyle enerji birim fiyatı yükselmektedir.

Puant saatlerdeki enerji ihtiyacı çok yüksek kapasitedeki enerji depolama sistemleri ile yüksek tarife olmadan karşılanabilir. Depolama maliyeti, puant enerji santrallerin üretim maliyetinden düşük olduğu takdirde yerine ikame edilmesi mümkün olacaktır.

2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ TEKNOLOJİLERİ

2.1. Batarya ile Enerji Depolama Sistemi

Batarya ile kimyasal enerji depolama sistemleri(BEDS) gün geçtikçe daha fazla alanda kullanılmaktadır. Büyük ölçekli BEDS’lerde büyük miktarda enerji depolanabilmektedir. Şebeke gerilimi ve arzı desteklemek için bataryaların şebekeye bağlı bir güç eviricisi ile kullanılması gerekmektedir.

2.1.1. Kurşun Asit Batarya

Kurşun asit batarya en çok bilinen batarya tipidir. Bu bataryada elektrolit olarak seyreltik sülfürik asit kullanılmaktadır. Günlük hayatta oldukça yaygın kullanılmasına rağmen büyük ölçekli depolama sistemi için birçok mahzurları vardır. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda performansı düşmekte olup, kullanım ömrü göreceli olarak kısadır. Büyük ölçekli depolama sistemleri için güvenilir olmayan ve diğer muadilleri ile rekabet edemeyen bir depolama sistemi olarak değerlendirilmiştir[7]. Tablo 1’de VRB ile kurşun asit batarya karşılaştırması verilmiştir.

2.1.2. Nikel-Kadmium Batarya

Nikel-Kadmium batarya, aktif madde olarak nikel türünden pozitif elektrot ile kadmiyum türünden negatif elektrot ve elektrolit olarak akışkan alkali çözeltisinden oluşur[8]. Bu batarya tipinin büyük ölçekli EDS’ler için uygun olmamasının sebebi yüksek maliyetli olması(kurşun asit bataryanın yaklaşık 10 katı), düşük gerilim ve çevreye bulaştığında zarar verebilecek zehirli kadmiyum elementi içermesidir[9].

2.1.3. Lityum-iyon Batarya

Lityum iyon bataryanın ömrü sıcaklığa bağlı olarak değişmekte, yüksek sıcaklıklarda hızlıca tükenebilmektedir. Özellikle (%90’dan fazla) derin deşarjlar pilin ömrünü çok kısaltmaktadır. Bu özelliğinden dolayı lityum iyon batarya büyük ölçekli

depolama sistemi olarak kullanılmaya uygun değildir. Ek olarak, lityum iyon bataryalar kırılmalıdır ve güvenli olarak çalışmaları için koruma devresi kullanılması gerekmektedir[10].

2.1.4. Sodyum-Sülfür Batarya

Sodyum sülfür bataryada anot ve katot olarak sırasıyla sodyum ve sülfür kullanılır. Ayrıca içeriğinde kullanılan beta- Al_2O_3 seramiği hem elektrolit, hem de seperatör olarak görev yapar[11]. Yüksek enerji ve güç yoğunluğuna rağmen Sodyum sülfür batarya büyük ölçekli depolama için çok yüksek maliyetlidir[12].

2.1.5. Akış Bataryası ile Enerji Depolama Sistemi

Akış bataryası teknolojisinde iki elektrolit tankı ve bu elektrolitlerin içinden geçtiği anot ve katot elektrotlar ile ayırıcı membrandan oluşan hücre kullanılmaktadır. Bu sistemin enerji yoğunluğu tamamen depolanan elektrolit hacmine bağlıdır. Güç yoğunluğu ise anot ve katot arasındaki tepkime oranına bağlıdır[13].

Çalışma prensibi ise Şekil 2.1’de verildiği gibi şarj süresince A elektroliti anotta yükseltgenirken B elektroliti katotta indirgenir. Deşarj döngüsü ise işlemin tamamen tersidir[14].

Bu teknolojinin diğer bir ilginç özelliği ise zarar görmeden tamamen deşarj olabilmesi ve elektrolitlerin ayrı tanklarda olmasından dolayı kendi kendine boşalma hızının çok yavaş olmasıdır. Bu sebeple redoks akış bataryaları uzun ömürlü ve az bakım ihtiyacı olan ve uzun süre enerji saklayabilen bir sistemdir[14].

Akış Bataryası ile Enerji Depolama Sistemi(ABEDS)’in avantajlı özellikleri; yüksek olmayan maliyet, modülerlik, taşınabilirlik, esnek çalışma olmak üzere dört maddede özetlenebilir.

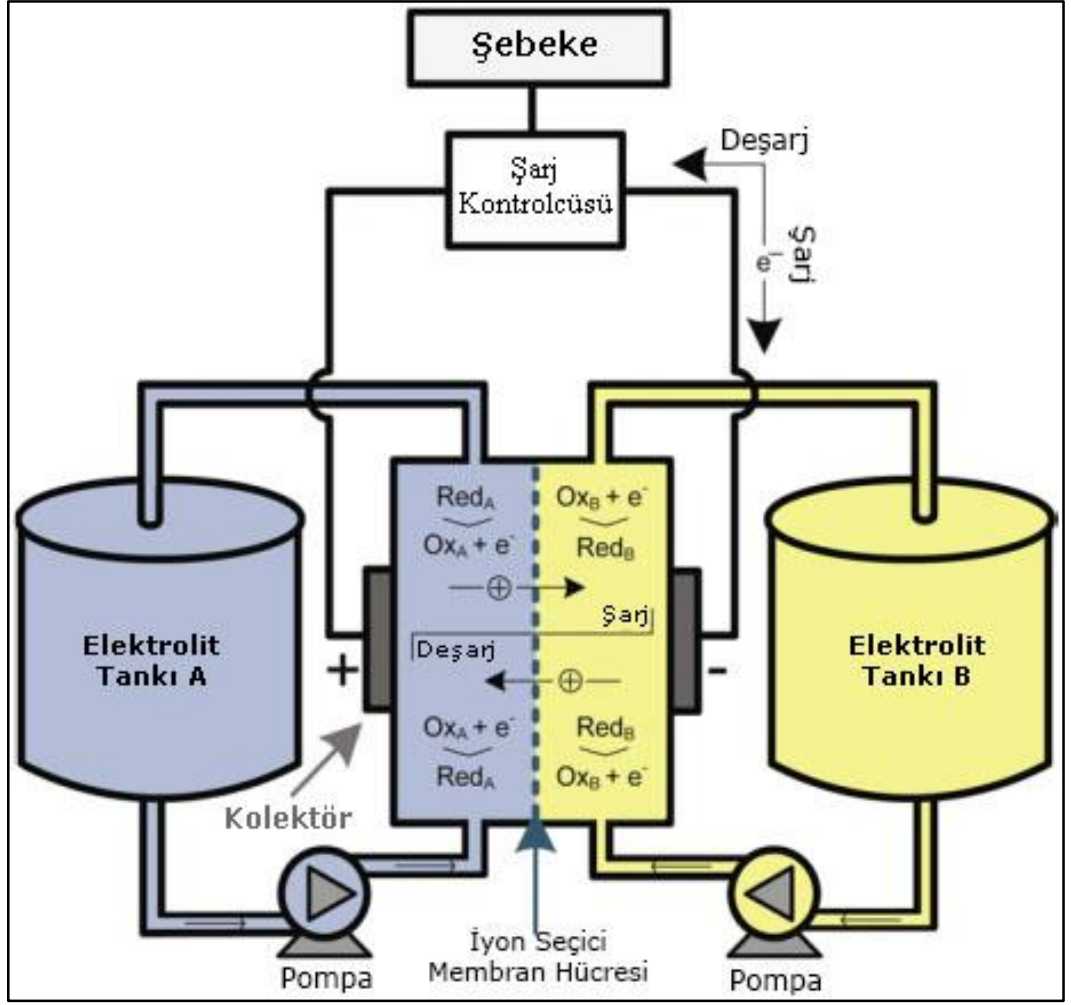
- i) Ucuz depolama sistemlerinden biridir.
- ii) Modüler tasarım sayesinde inşaat ve bakım maliyetleri diğer depolama sistemlerine göre düşüktür. Modülerliğin faydalarından biri de her bağımsız ünite için ayrı ayrı yapılabilen bakım kolaylığıdır.

- iii) Redoks bataryalar taşıma, dağıtım veya kapasiteyi arttırma gibi farklı uygulamalar için uygundur
- iv) En büyük avantajı ise şarj-deşarj döngüsündeki esnekliğidir. Bataryalar hiç zarar görmeden tamamen şarj vedeşarj edilebilir. Bu özelliği, kurşun asit bataryalara göre çok önemli bir üstünlük sağlar[15].

Ayrıca ABEDS uzun ömürlüdür. Tahmini çalışma ömrü 20 yıldır ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmektedir.

Şarj vedeşarj işlemlerinin hızı birçok parametreye bağlıdır. Pompa debisi, elektrot yüzeyi pürüzlülüğü, elektrot metali ve elektrolit türü ABEDS tasarımında belirlenmesi gereken parametrelerdir[15].

En büyük özelliklerinden biri de güç ve enerji kapasitelerinin bağımsız olarak belirlenebilmesidir. Elektrotların seri ve/veya paralel bağlanmasıyla depolama sisteminin kurulu gücü belirlenmektedir. Pozitif ve negatif elektrolit yüklü tankların hacim büyüklüğü seçimi ile depolama sisteminin enerji depolama kapasitesi belirlenmektedir[15].



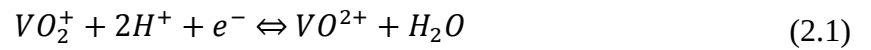
Şekil 2.1: Akış bataryası ile enerji depolama sistemi çalışma prensibi.

2.1.6. Vanadyum Redoks Akış Bataryası

Bataryada diğer redoks pillerinden farklı olarak sülfürik asit çözeltisinde V^{2+}/V^{3+} ve V^{4+}/V^{5+} iyonları bulunur[16]. Vanadyum Redoks Akış Bataryası(VRB) ile kurşun asit bataryanın karşılaştırması Tablo 2.1'de verilmiştir[15].

Depolarda bulunan elektrolit, pompalar vasıtasıyla elektrot ve membran yüzeylerine temas eder, bu sırada elektron alışverişi meydana gelir.

Şarj vedeşarj olayları pozitif elektrotta ve negatif elektrotta redoks tepkimeleri denklem 2.1 ve denklem 2.2 ile gerçekleşir.





Tablo 2.1: Kurşun-asit batarya ile Vanadyum redoks batarya karşılaştırması.

Kurşun-asit batarya (derin döngü)	Vanadyum redoks akış bataryası (VRB)
Yıllara göre değişmekte olan verimi %70-80'dir.	Verimi, istenen düşük akım yoğunluğunda %90'lara varmaktadır.
Enerji kapasitesi ve güç oranları elektrotların kimyasal depolama kapasiteleri ile ilişkilidir.	Enerji ve güç kapasiteleri birbirinden bağımsız olarak tasarlanabilmektedir.
Batarya gerilimi şarj ve deşarj durumlarında %10 değişir.	Gerilim, şarj ve deşarj sırasında sabittir.
Aşırı şarj ve deşarj ile kolayca hasar görebilmektedir.	Hasar görmeden tamamen deşarj olabilmektedir. Ancak aşırı şarjdan korunmalıdır.
Ancak yavaş şarj olabilmektedir.	Elektrik akımı veya elektrot değişimi ile herhangi bir hızda şarj olabilmektedir.
Hızlı boşalmalarda hasar görmektedir.	Herhangi bir hızda deşarj edilebilmektedir.
Mikroçevrimlerden dolayı ömrü kısalmaktadır. (rüzgâr ve solar uygulamalarındaki ani dalgalanmalar)	Mikroçevrimlerden etkilenmemektedir.
Düzenli olarak bakım gerektirmektedir.	Çok az bakım gerektirebileceği tahmin edilmektedir.
Çalışma ömrü çok seyrek olarak 5 yılı geçmektedir.(çünkü faz değişiklikleri elektrotları yıpratmaktadır.)	Çalışma ömrünün minimum 20 olması beklenmektedir. (VRB'de faz değişimi olmamaktadır. Dayanıklı membran kullanımı gereklidir.)
Kilowatt başına maliyet ve kapasite büyüklüğü sabit orantılı olarak artmaktadır.	Depolama kapasitesi yükseldikçe kilowatt başına maliyet düşmekte ve hacim ise kurşun asitten küçük olmaktadır.

Çinko-bromür akış bataryası ve demir-krom akış bataryası geliştirilmekte olan diğer benzer redoks akış bataryalarıdır.

2.2. Hidrojen Bazlı Enerji Depolama Sistemi

Hidrojen bazlı sistemin verimi oldukça düşüktür. %60 yakıt hücresi verimi ve %70 elektroliz hücresi verimi ile toplamda yaklaşık verim %42'dir[17].

2.3. Süperkapasitör

Uzun kullanım ömrüne sahip olması, bakım ihtiyacı olmaması ve yüksek verimli olmasına rağmen kendi kendine deşarj olma oranı yüksek olup[18], yüksek maliyetli (yaklaşık 9500 \$/kWh) bir sistemdir. Yaklaşık olarak maliyeti kurşun asit bataryanın 5 katıdır[19].

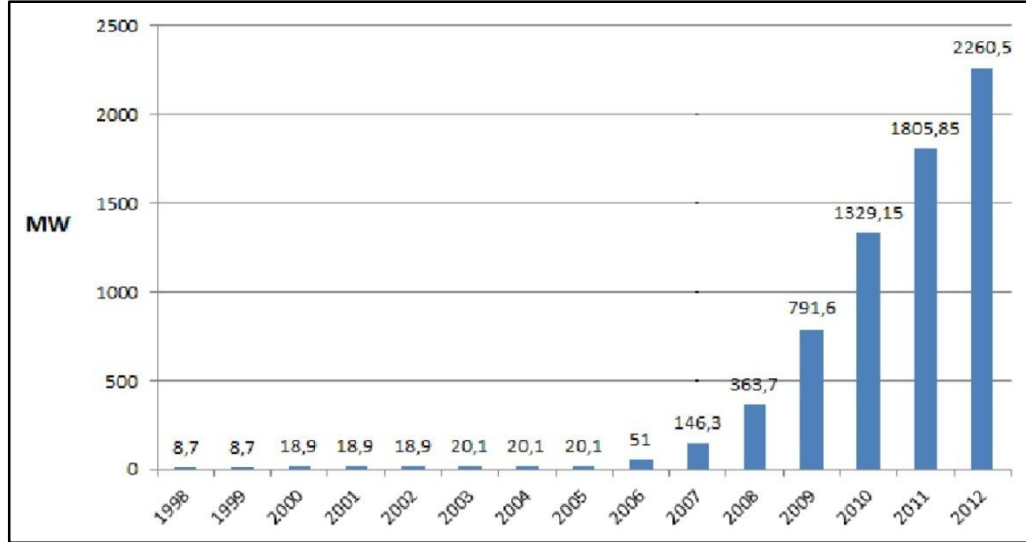
2.4. Volan ile Enerji Depolama Sistemi

Volanların en büyük problemleri yüksek maliyet ve göreceli yüksek bekleme kayıplarıdır. Kendi kendine boşalma oranları minimum olarak toplam kapasitenin saatte %20'si olup oldukça yüksektir. Bu yüksek oranlar enerji verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir[10].

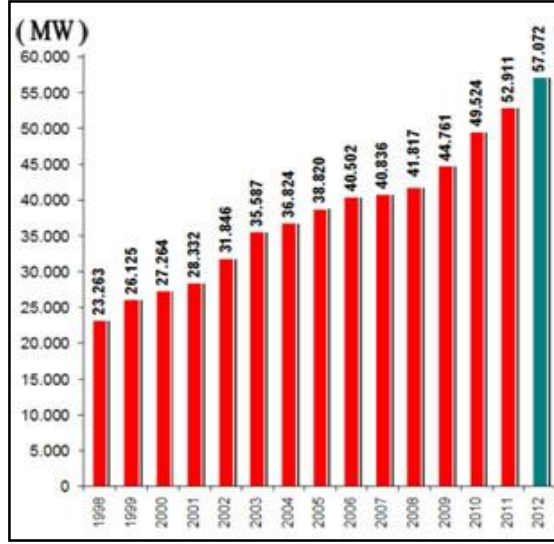
3. RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARI

3.1. Rüzgar Enerji Santrallerinin Üretim Paylarının Arttırılması

RES'lerin toplam üretimin yüksek bir yüzdesi ile şebekeye uyumlu olarak çalışmasını, enerji depolama sistemleri sağlayabilecektir. Şekil 3.1 ve 3.2'de RES'ler kurulu gücü ile toplam kurulu gücün yıllara göre artışları görülmektedir[20]. Buna göre RES'ler önümüzdeki yıllarda yüksek oranlara ulaşacaktır.



Şekil 3.1: Türkiye’de yıllara göre rüzgar enerjisi kurulu gücü.



Şekil 3.2: Türkiye’de yıllara göre toplam kurulu güç artışı.

Toplam üretimdeki her %10’luk rüzgar enerjisi artışı dengelemek için rüzgar enerjisinin %2-4’ü oranında diğer enerji kaynakları kullanılması gereklidir. Bu amaçla EDS yerine konvansiyonel kaynakların kullanımı karmaşık bir çözüm olacaktır[6]. EDS, RES üretimini kontrol ederek ve güç sistemine yan hizmetler sağlayarak rüzgar enerjisi üretim payının artmasında önemli bir konuma sahiptir[21].

3.2. Dalgalanmaların Sönümlendirilmesi

Stabil olmayan enerji kaynakları gerilim ve frekans dalgalanmalarına yol açmakta ve rüzgar türbinlerinin devreden çıkmalarına sebep olabilmektedirler. Genel kabul görmüş çözümlerden biri dalgalanmaları rüzgar türbinlerinin çift uyartımlı asenkron generatörün, DC barasında EDS ile desteklenmiş çevirici ünitesi kullanılmasıdır[14].

EDS, RES’lerin üretim dalgalanması problemine karşı en uygun ve verimli yöntemdir, çünkü enerjiyi hapsederek en hızlı dalgalanmayı bile verimli şekilde sönümlendirebilir[22].

3.3. Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yapılması

Stator sargıları doğrudan şebekeye bağlı olan rüzgar türbinleri şebeke gerilimi değişimlerine karşı oldukça hassastır ve limitleri aşması durumunda senkronluğunu

devam ettiremezler[23]. EDS, arıza sırasında DC barasındaki gerilimin sabit tutulmasına katkıda bulunurken generatör ivmesini limitleyerek rüzgar türbininin devreden çıkmasını engeller. Ayrıca sistemin geri toparlanmasına destek olur[24].

3.4. Yan Hizmetlerin Sağlanması

Sistemde üretim yapmayan fakat üretime hazır olan tüm kurulu güç, rezerve güç hesabına katılır[25]. Tüm şebeke yük tevzi merkezlerinin rezerve hesabı olmak zorundadır. Bu şekilde EDS de frekans kontrolünde kullanılabilen bir rezerv olarak hesaba katılabilir.

RES'ler EDS kullanılarak Dengeleme Güç Piyasası(DGP)'na katılabilmektedir. Bu şekilde piyasaya teklif vermesi mümkün olmakta ve fiyatların belirlenmesinde rol oynayabilmektedir[26].

3.5. Üretim Kontrolü

EDS, RES'lerin ürettiği aktif ve reaktif güç dengeleme aygıtı olarak kullanılabilir, bu sebeple EDS kontrolü ile güç salınımları güçlü bir şekilde dengelenebilir[27]. EDS kontrol sisteminin çalışabilmesi için yük profili referans değerine ihtiyacı vardır[28]. Günlük yük profili ulusal şebeke işletmecisi tarafından verilmektedir. Bu şekilde RES'lerin üretimleri yük profiline uyarlanabilir. Örnek olarak, 34 MW güç ve 245 MWh enerji depolama kapasitesi 51 MW kurulu güce sahip rüzgar enerji santralinin dengelenmesi için uygulanmıştır ve salınımlar %2'ye kadar düşürülmüştür[29].

EDS boyutlandırması, güç salınımlarının yeterli olarak dengelenebilmesi için kritik bir hesaplamadır. Yapılan bir optimizasyon çalışmasında 100 MW kurulu güce sahip bir rüzgar enerji santrali için optimum değerlerin 34 MW güç ve 40 MWh enerji depolama kapasitesi olarak verilmiştir. [30]

3.6. Tarife Kaydırma

EDS'nin RES'in ürettiği tüm fazla enerjiyi depolayabilmesi ve gerektiğinde RES ile birlikte şebekeye arz edebilmesidir. Düşük birim fiyatlı tarifelerde üretimin

depolanması ve yüksek birim fiyatlı tarifelerde ise EDS'deki tüm enerjinin boşaltılması ile getiri sağlanmaktadır. Ayrıca, bu şekilde puant zamanlarda çalışan konvansiyonel sistemlerin devreye girmesi zorunluluğunu ortadan kaldırılabilecektir[14].

4. VAKA ÇALIŞMASI

4.1. Vaka Çalışması: Giriş

Türkiye ulusal şebeke işletmecisinin (TEİAŞ) enerji satışı için gün-içi piyasa (GİP) ve gün-öncesi piyasa (GÖP) olmak üzere iki tarifesini bulunmaktadır. GÖP birim fiyat değerleri (SGÖF) TEİAŞ tarafından bir gün önceden piyasa tekliflerine göre verilmekte, GİP birim fiyat değerleri (SMF) ise saatlik olarak belirlenmektedir. Her RES işletmecisi üretim tahminini yaparak ertesi gün için GÖP veya GİP tercihini yapmaktadır. A, B ve C santrallerine ait tahmin değerleri ile aynı zamana ait SGÖF ve SMF değerleri alınarak hesaplama katılmıştır.

A, B ve C rüzgar enerji santrallerine ait 1 dakikalık tüm veriler incelenmiş ve algoritma kullanılarak EDS hesaplaması yapılmıştır. Hesaplamalar, MS Excel yazılımında VBA dili kullanılarak yapılmıştır.

Hesaplamalarda öncelikle EDS kullanılmadan yapılan üretim ve sağlanan getiri hesaplanmıştır. Daha sonra EDS'nin etkisinin hesaplanabilmesi için 1 dakika periyotlu şarj ve deşarj miktarları ve bunların toplam santral üretimine etkisi hesaplanmıştır. Bu şekilde depolama sistemi kullanımı ile oluşan kâr ortaya çıkmıştır. Bu döngü, farklı algoritmalarla ve farklı depolama kapasiteleriyle tekrarlanarak uygun kapasite ve algoritma belirlenmiştir.

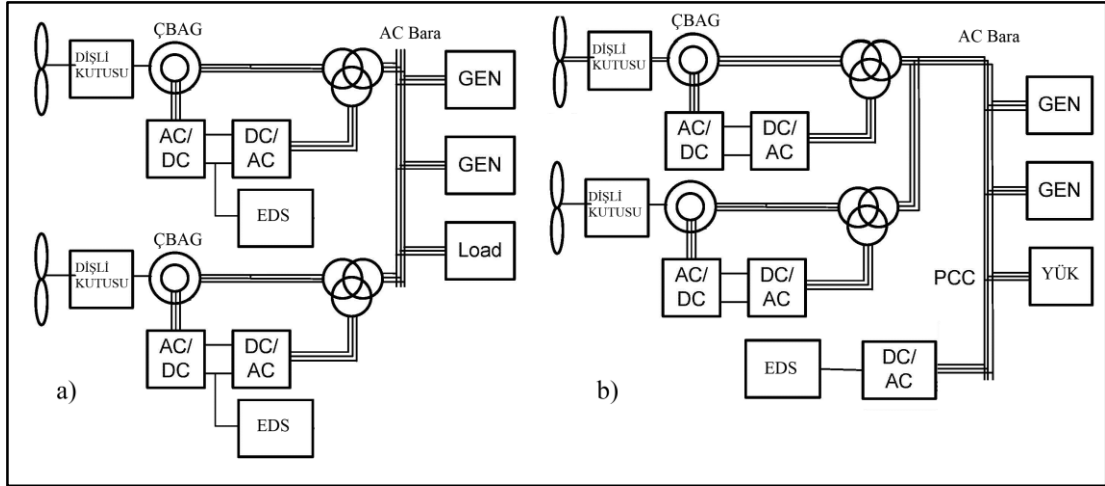
4.1.1. Batarya ile Enerji Depolama Sisteminin Bağlantı Yöntemleri

Rüzgar enerji santrallerinde BEDS farklı yöntemlerle uygulanabilmektedir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi BEDS doğrudan türbinin veya solar panelin çevirici ünitesi DC barasına veya transformatör ile evirici kullanılarak santrale paralel olarak bağlanabilmektedir[31].

BEDS rüzgar santralının OG barasına bağlanması durumunda tüm depolama sistemleri tek bir alanda birleştirilebilmekte ve santralin herhangi bir noktasına yerleştirilebilmektedir. Ancak yüksek maliyetli transformatör ve evirici kullanımı ihtiyacı olduğundan tercih edilmemiştir.

Rüzgar türbini çeviricisi, BEDS bağlantısı için uygun DC baraya sahiptir. Bu metotta maliyeti yüksek olan transformatör ve evirici ünitesi kullanılmamaktadır.

Rüzgar türbinleri çevresinde genellikle 1 MWh kadar enerji depolamaya yetecek kadar müsait alan bulunmaktadır. Bu gerekçelerden dolayı BEDS'nin rüzgar türbini çeviricisi DC barasına bağlanması tercih edilmiştir.

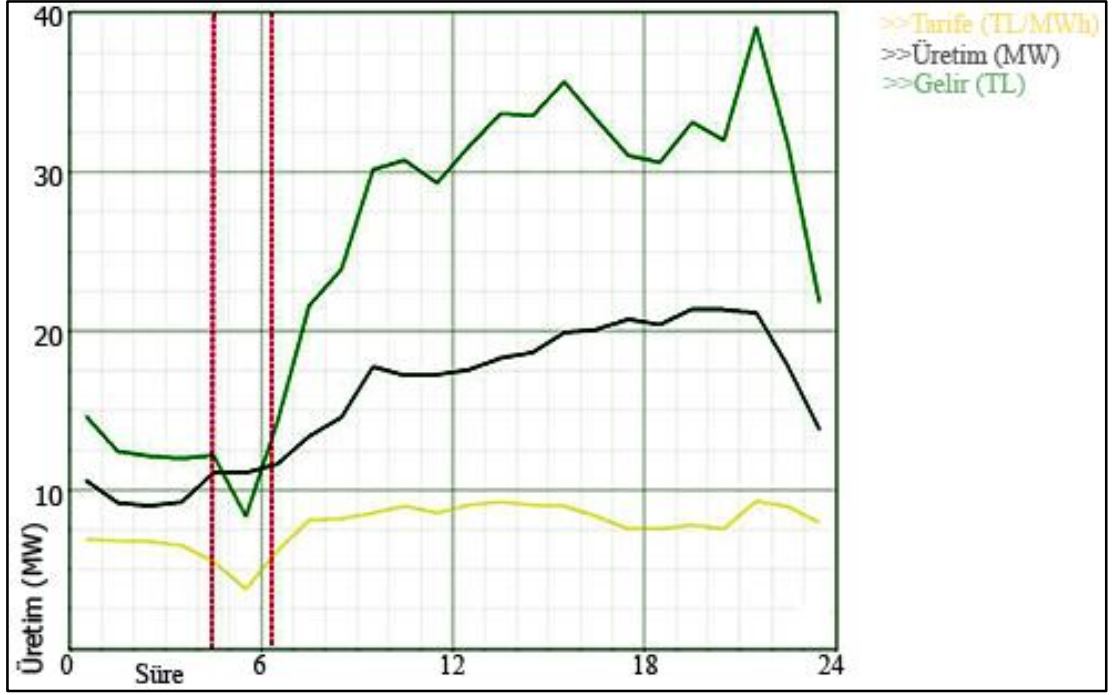


Şekil 4.1: Enerji depolama sistemleri ve rüzgar türbinlerine ait iki popüler bağlantı şekli. a) Çevirici ünitesi DC barasına bağlantı, b) Evirici aracılığı ile şebekeye bağlantı.

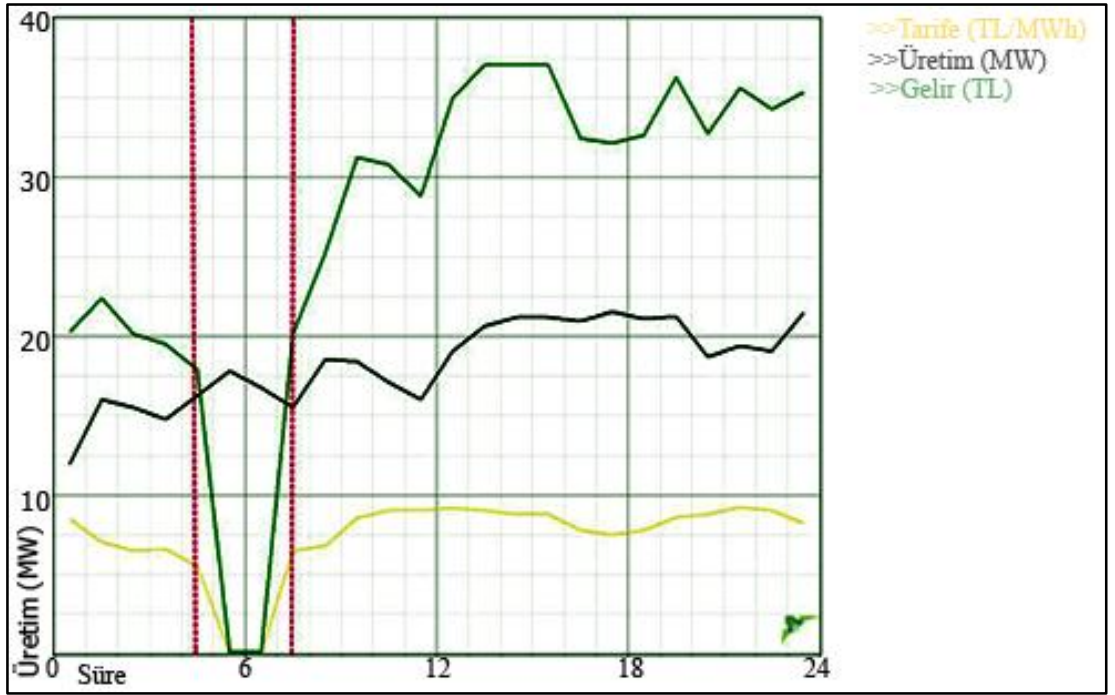
4.2. Vaka Çalışması İçin Belirlenen Hedefler

Rüzgar türbinleri enerji şebekesinde bir problem olmadığı ve rüzgar uygun değerde estiği sürece enerji üretimine devam eder. Enerji ihtiyacı olmadığı zamanlarda türbin bir süre için depolama yapabilmelidir. Şebeke tekrar enerjiye ihtiyaç duyduğunda, depolanan enerji ile birlikte üretime devam edebilmelidir.

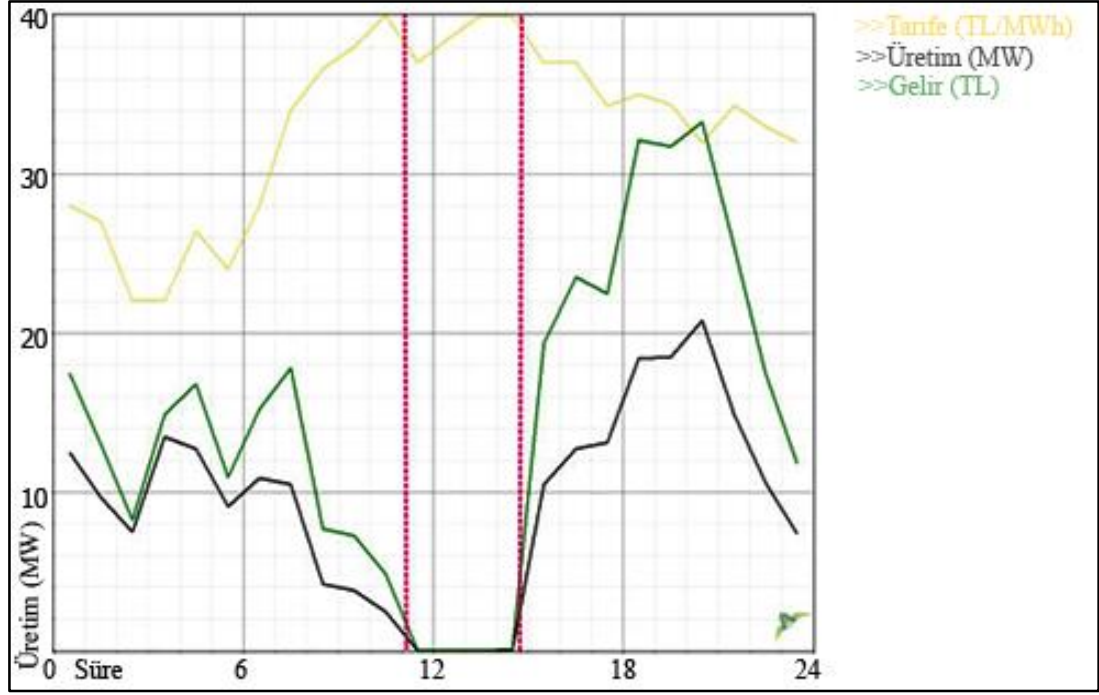
Bu sebeple Türkiye'de bulunan ve ismi verilmeyen A, B ve C rüzgar enerji santrallerine ait 1 dakika periyotlarla alınan yaklaşık 1,5 yıllık üretim değerleri incelenmiştir. Üretim değerlerinden örnekler Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmektedir.



Şekil 4.2: Düşük tarifelerin getiriye azaltılmasına ait bir örnek.



Şekil 4.3: Düşük tarifelerin getiriye azalttığına ait diğer örnek.



Şekil 4.4: Yüksek tarifelerin kaçırılması örneği.

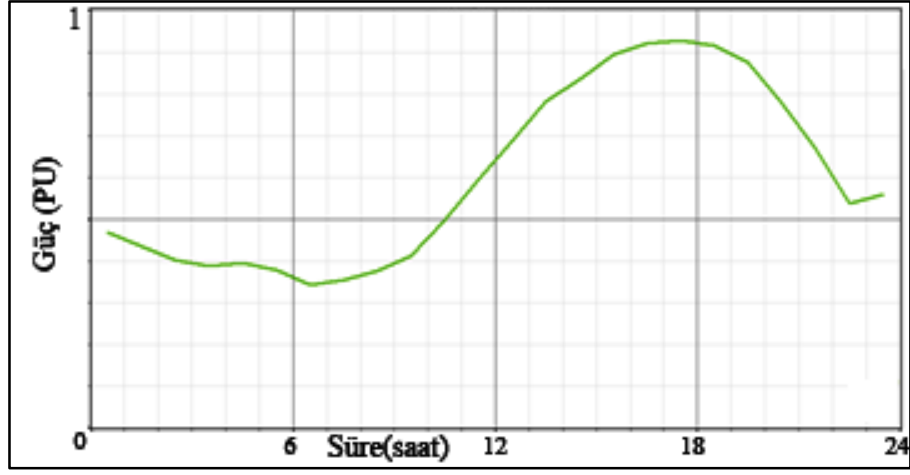
4.2.1. PMUM’a Verilen Tahminlerin Yakalanması

Piyasa Mali Uzlaştırma Merkezi’ne (PMUM) verilen tahminlerin zaman zaman yakalanamadığı ve bu sebepten dolayı ilave maliyet oluştuğu görülmüştür. Üretimden maksimum kazanç sağlanması için yeterli bir depolama sistemi ile PMUM’a verilen tahminlerin yakalanması hedeflenmektedir.

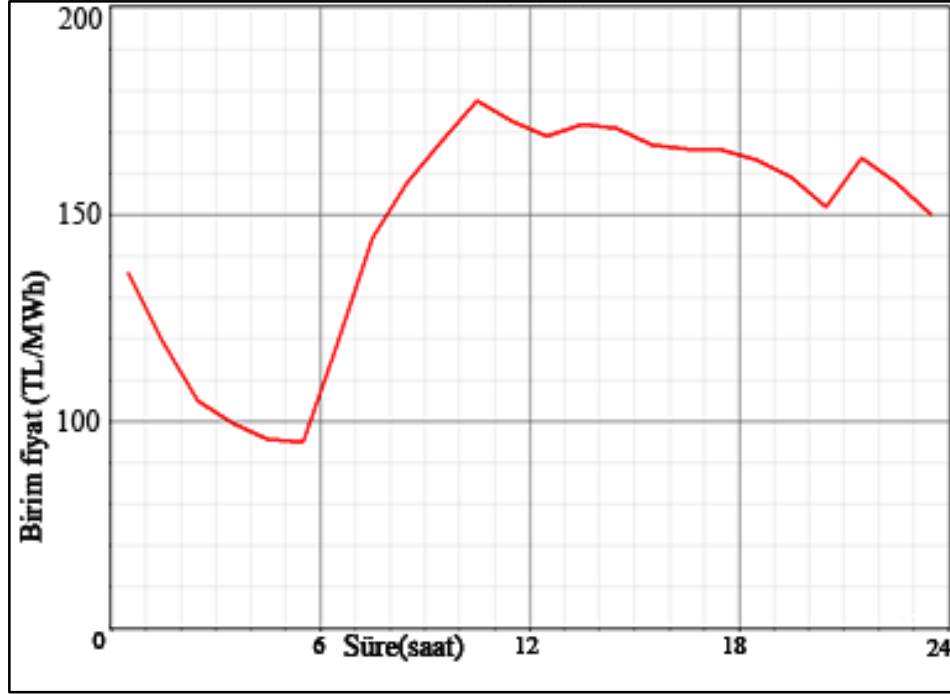
4.2.2. Tarife Kaydırma

Üretimin yüksek birim fiyat tarifeli saatlerde zaman zaman düştüğü görülmüştür. Bunun yanında çok düşük birim fiyatlı tarifelerde üretimin yüksek olması gibi örneklerin depolama sistemi ile düzeltilerek üretimin depolama kapasitesi oranında kontrol edilmesi hedeflenmektedir.

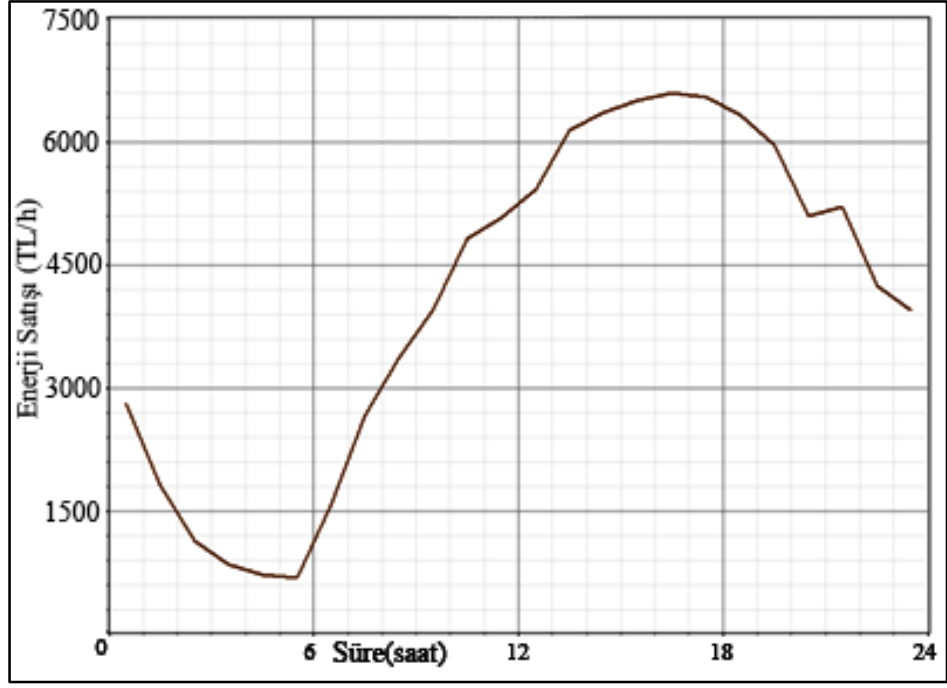
Şekil 4.5 ve 4.6’te görüldüğü gibi üretim ve tarife değerlerine ait günlük profil gün içinde değişiklik göstermektedir. Bu iki değerın çarpımı ile Şekil 4.7’teki günlük satış profili ortaya çıkmaktadır. Depolama sistemi ile günlük profilin yüksek tarifeli kısmında artış yapılabilecektir.



Şekil 4.5: 2012 yılına ait günlük enerji üretimi profili.



Şekil 4.6: Enerji birim fiyatlarının gece ve gündüz değişimi örneği.



Şekil 4.7: 2012'deki toplam enerji satışı günlük profili.

4.2.3. Frekans Kontrolü ve Dengeleme Piyasasına Teklif Verilmesi

DGP'ye girildiğinde şebekede arz ihtiyacı oluşması durumunda yük al-yük at talimatları ile yüksek fiyattan enerji satışı yapılması mümkündür. EDS'nin mümkün olan en uzun süre boyunca dolu tutulması ani bir yük al talimatının karşılanmasını sağlayabilecek ve yüksek kar getirebilecektir. Ters yönden; DGP'ye girildiğinde sistemde üretim fazlası oluşması durumunda yük atma talimatı gelecektir. Bu işlem ise EDS ve/veya türbin üreticisi SCADA'sından yapılabilecektir.

Primer frekans kontrolü yapılması için TEİAŞ 30 sn içinde maksimum güce çıkılabilmesini ve 15 dakika boyunca üretimin sürdürülebilmesini şart koşmuştur[26]. Sekonder frekans kontrolü için ise daha uzun devreye girme süresi istenmektedir. EDS, bu süreler içinde kolaylıkla devreye girebilecektir.

Bu şekilde DGP'de oyuncu olarak yer alınması ve fırsat maliyetleri değerlendirilerek yüksek getiri sağlanması hedeflenmektedir.

4.3. Boyutlandırma

Rüzgar santralinin gücüne uygun şekilde BEDS kapasitesi belirlenmelidir. A, B ve C RES santrallerinin üretimlerinde farklı büyüklüklerde depolama sistemi hesapları yapılmıştır. Ayrıca, BEDS'nin boyutu büyüdükçe birim tesis maliyeti azalmaktadır. Bu durumda optimum boyutun belirlenmesi için birim tesis maliyeti ve yıllık birim getiri hesaplanacaktır.

4.4. Varsayımlar

Şarj-Deşarj döngüsü verimi %85 olarak öngörülmüştür[32]. Depolama sistemi DC baraya bağlı olduğundan transformatör, evirici ve doğrultucu verimi hesaba katılmamıştır. Hızlı şarj-deşarj olabilen VRB'nin tamamen şarj-deşarj olma süreleri için minimum 15 dakika öngörülmüştür.

PMUM web sayfasında yer alan verilere göre 2009-2014 yıllarındaki fiyat artışı ortalaması %5'tir. Bu sebeple EDS'nin yıllara göre sağlayacağı getirilerin hesaplanmasında enerji fiyatları enflasyonu %5 olarak alınmıştır.

Meteorolojiden alınan tahmin değerleri yaklaşık olarak %80 doğruluktadır. Tahmin algoritmasında belirlenmesi gereken saatlik minimum tahmini üretim değerleri olarak, gerçekleşen üretim verilerinin 0,8 ile çarpımı kullanılmıştır. Bu varsayım kullanılarak EDS'nin saatlik depoladığı enerji miktarı hesaplanabilmektedir.

Sistemdeki iletim hattı ve benzeri kısıtlar sebebiyle, PMUM web sitesinden alınan (Yük al - Yük at) YAL-YAT talimatları değerlerinin %50'si alınmıştır. Tekliflerin değerlendirme sonunda kabul edilmesi ihtimali de %50 alınmıştır. Bu şekilde toplam talimatların %25'inin olumlu sonuçlandırıldığı varsayılmıştır. YAL talimatlarına SGÖF'den %10 fazla, YAT talimatlarına SGÖF'den %20 düşük fiyatlarda teklif verildiği varsayılmıştır. PMUM tarafından piyasa koşullarında YAL talimatı için en düşük, YAT talimatı için ise en yüksek fiyatların tercih edildiği göz önünde bulundurularak fahiş fiyatlardan kaçınılmıştır.

Yerine getirilemeyen DGP talimatları için birim fiyatın SGÖF'den %30 fazla olarak oluşturduğu varsayılmıştır.

4.5. Algoritma

Depolama sisteminden mümkün olan en yüksek getirinin sağlanması için iterasyon yöntemi ile algoritmalar geliştirilmiştir. Farklı algoritmaların denenmesi sonucu en uygun işlem sırası belirlenmiştir.

4.5.1. Şarj-deşarj Algoritması

Şekil 4.8’de gösterildiği gibi şarj hesaplaması için iki adet algoritma elde edilmiştir. İlk işlemde hangisinin kullanılacağı belirlenmektedir. Algoritmalarda işlemler, getiri sırasına göre azalan şekilde sıralandırılmıştır.

DGP’ye girilmiyorsa ve SMF ile SGÖF değerleri eşitse “Tarife Kaydırma Algoritması” kullanılmaktadır. Tarife kaydırma algoritmasında günlük en yüksek tarifede iken EDS’nin tamamı boşaltılmakta, günlük en düşük tarifede ise üretim miktarının tamamı veya EDS kapasitesinin tamamı doldurulmaktadır. Bu şekilde EDS kullanılarak “tarife kaydırması” yapılmaktadır.

Diğer durumda, “KGÜP Tahmini Yakalama Algoritması” kullanılır. Depolama sisteminin önemli bir avantajı, PMUM’a verilen tahminlerin ve PMUM’dan gelen talimatların uygulanması ve bu şekilde sistem yöneticisine ceza ödenmemesidir. Tahmin değeri ile gerçekleşen üretim değeri farkı “balans” değeri olarak belirlenmiştir. Balans değerinin sıfır olması istenmektedir. Bu sebeple balansın negatif olması durumunda EDS boşaltılmakta, pozitif olması durumunda doldurulmaktadır.

Ayrıca EDS’nin aşırı şarj veyadeşarj olmaması için kontrol mekanizmaları kurulmuştur. EDS, tahmini üretimin yakalanmasına yetecek kadar dolu ise tahmini üretim miktarı yakalanana kadar boşaltılmaktadır. Tahmini üretim ile gerçekleşen üretim arasındaki fark, EDS’de depolanan enerjiden fazlaysa cezayı en aza indirmek için EDS’nin tamamı boşaltılmaktadır. Aynı şekilde, KGÜP tahmininden fazla üretilen enerji; EDS kapasitesinden az ise EDS fazla miktar kadar doldurulmakta, EDS kapasitesinden fazla ise EDS’nin tamamı doldurulmaktadır.

Tüm bu şartlar gerçekleşmiyorsa EDS’ye şarj-deşarj uygulanmamaktadır. Her iki algoritmada da akım sınırlandırması kontrolü yapılarak maksimum akım miktarının aşılması engellenmektedir.

4.5.2. Tahmin Algoritması

KGÜP tahmin değerleri gün öncesinden verilmekte olup, depolama sisteminin kullanılması durumunda DGP'ye de gün öncesinden tahmin bildirimi yapılması gerekmektedir. İki tahminin seçimine ait algoritma Şekil 4.9'da verilmiştir.

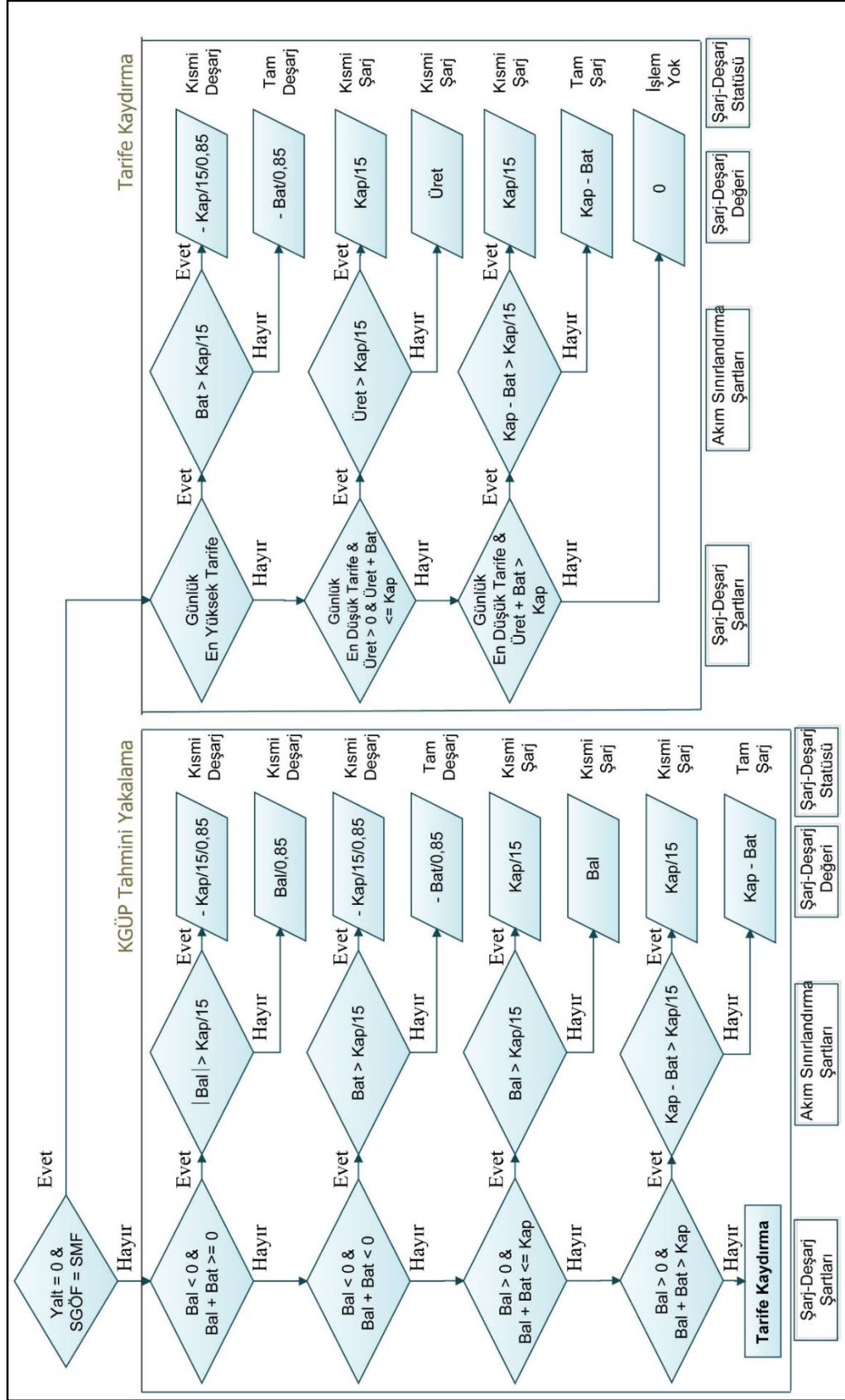
KGÜP ve DGP tahminlerinin toplamı ile üretim ve EDS'deki enerji toplamı karşılaştırılmaktadır. Daha sonra DGP talimatlarının YAL veya YAT olması durumuna göre tahmin değeri belirlenmektedir.

Örnek olarak, bir RES santralinin herhangi bir saatine ait değerler verilmiştir.

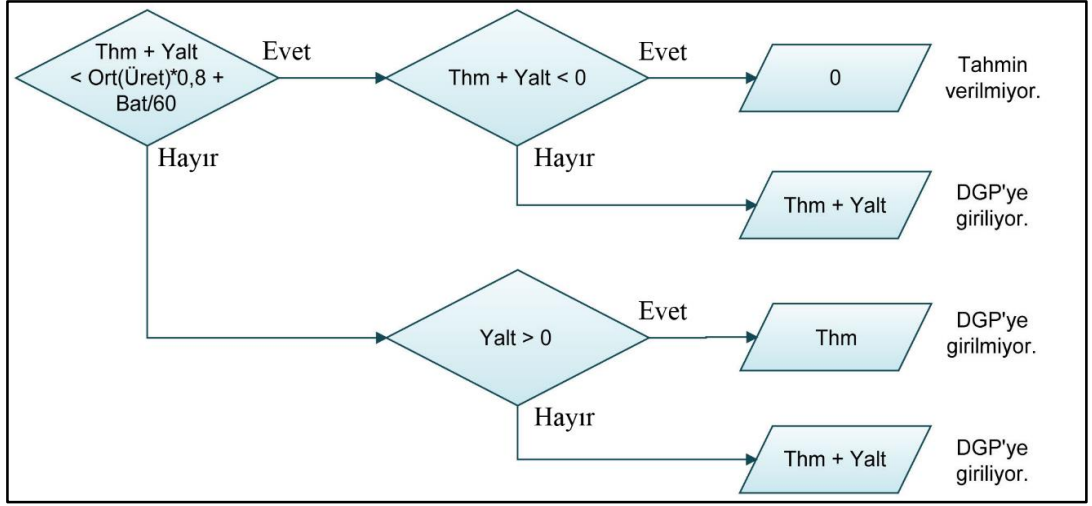
- Tahmin : 22 MW
- Üretim : 20 MW
- 15 MW'lık Batarya : 5 MW
- Yük alma talimatı : 8 MW
- SGÖF : 180 TL
- SMF : 155 TL

Şarj durumunun belirlenmesi için yük alma veya atma talimatı sıfıra eşit olmadığından KGÜP tahmini yakalama algoritması çalıştırılır. $22 > 20$ olduğundan Bal değeri negatiftir. Bal değerini sıfıra eşitlemek için batarya deşarj edilmelidir. Batarya değerinin sıfırın altına düşmemesi için çalıştırılan kontrol mekanizması $(-2) + 5 > 0$ doğrudur. Batarya deşarj hızı kontrolü $|-2| > K_{ap}/15$ olduğundan sonuç $-1/15/0,85 = -0,0784$ MW olarak bulunur.

TEİAŞ'a verilecek tahminin belirlenmesi için tahmin algoritması çalıştırılır. $22 + 8 > 20/0,8 + 5$ eşitsizliği doğru olmadığından ve $8 > 0$ olduğundan doğrudan tahmin değeri TEİAŞ'a verilecektir. DGP'ye girilmeyecektir.



Şekil 4.8: EDS şarj-deşarj algoritması.



Şekil 4.9: Tahmin akış şeması.

4.5.3. Gelir Algoritması

KGÜP ve DGP olarak iki farklı kategoride satış yapıldığında enerji satışı karmaşık bir hale gelmektedir. Bu sebeple gelirlerin hesaplanması için Şekil 4.10'daki "Gelir Algoritması" oluşturulmuştur. KGÜP ve DGP'ye birlikte tahmin verildiğinde iki farklı formül ile satış ve cezalar hesaplanmaktadır. Sadece KGÜP'e tahmin verildiğinde veya hiç tahmin verilmediğinde elde edilecek gelir de ayrıca hesaplanmaktadır.

Hesaplamalarda kullanılan denklemlerde Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu(EPDK)'nın yayınladığı "Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği" esas alınmıştır. Yönetmelikte bulunan aşağıdaki formüllere göre gelir miktarları hesaplanmıştır.

Üretim>KGÜP olduğu durumlarda tahminden fazla üretilen enerji düşük tarife üzerinden satılmaktadır.

KGÜP>Üretim olduğu durumlarda ceza olarak eksik enerji üretimi büyük olan tarife üzerinden ödenmektedir.

$$Gelir = SGÖF * KGÜP + (Üretim - KGÜP) * \max(SGÖF, SMF) \quad (4.1)$$

DGP'de gelir aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

$$Gelir_{YAL} = YALF * YAL \quad (4.2)$$

$$Gelir_{YAT} = YATF * YAT \quad (4.3)$$

Algoritmadan birtakım varsayımlar yapılarak hesaplama yapılmıştır. YALT değerleri pozitif olduğunda YAL, negatif olduğunda YAT değeri olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca DGP için verilmesi öngörülen teklifler aşağıda verilmiştir.

$$YALF = SGÖF * 1,1 \quad (4.4)$$

$$YATT = SGÖF * 0,8 \quad (4.5)$$

Yerine getirilemeyen YAL talimatı için aşağıdaki formüle göre ceza miktarı hesaplanmıştır.

$$CEZA_{YAL} = -SGÖF * 1,3 * (YAL - Üretim) \quad (4.6)$$

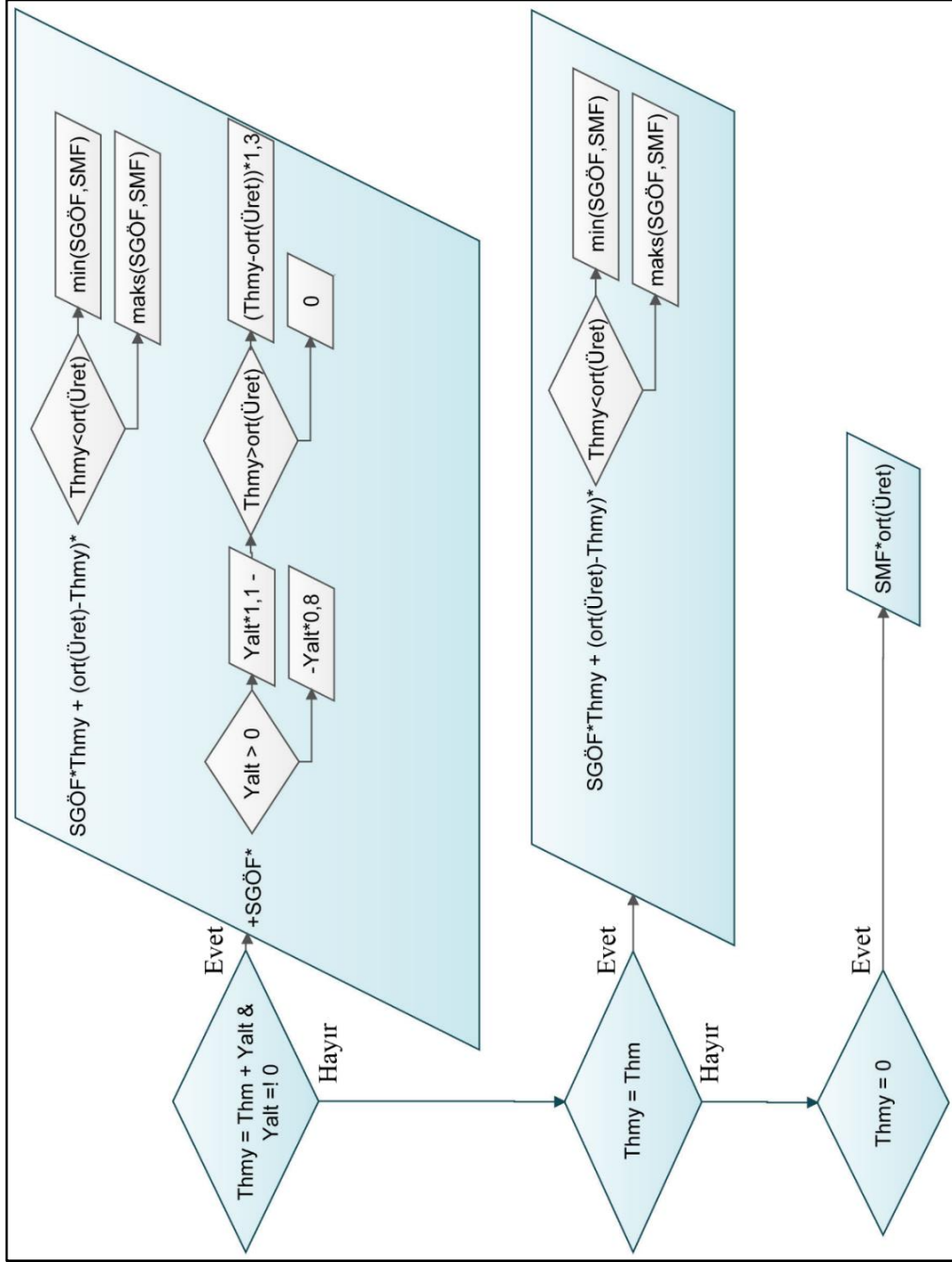
Tahmin algoritmasında verilen örnek değerlerin getirisi hesaplandığında DGP'ye girilmediğinden $Thmy=Thm$ 'dir. EDS kullanılmadığında

$$180*22+(20-22)*180 = 3600 \text{ TL} \quad (4.7)$$

EDS kullanıldığında tahminin yakalanması sebebiyle

$$180*22+(22-22)*180 = 3960 \text{ TL} \quad (4.8)$$

getiri sağlanmaktadır.



Şekil 4.10: Gelir akış şeması.

4.6. Hesaplama

Verilen hedeflere azami ölçüde ulaşılması için tasarlanan algoritma kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Tablo 4.2’te hesaplama tablosundan örnek bir kısım verilmiştir.

PMUM’a tahmin bildirildiğinde GÖP birim fiyatları (SGÖF), tahmin bildirilmediğinde GİP birim fiyatları (SMF) kullanılmaktadır.

Öncelikle EDS kullanılmadığında oluşan gelir ile EDS kullanılması ile oluşan gelir ayrı ayrı hesaplanarak saatlik gelir farkı belirlenmiştir. Tüm verilere ait gelir farkı toplanarak EDS’nin yıllık getirisi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12,5 ve 15 MWh kapasitelerde EDS kullanılmıştır. Tüm bu kapasitedeki EDS’lere ait 1,5 yıllık veriler A, B ve C RES’leri için hesaplanmıştır. Eldeki verilere enflasyon oranı eklenerek 10 yıllık tahmini getirileri belirlenmiştir. Ayrıca VRB olarak kullanılması planlanan EDS tesis ve işletme maliyetleri olarak Tablo 4.1’deki değerler kullanılmıştır[31].

Tablo 4.1: Enerji depolama sistemi kapasitelerine ait maliyetler.

Kapasite (MWh)	Tesis Maliyeti	Yıllık İşletme Maliyeti
1	430.000 TL	10.000 TL
2	560.000 TL	10.000 TL
3	690.000 TL	10.000 TL
4	820.000 TL	10.000 TL
6	1.080.000 TL	11.000 TL
8	1.340.000 TL	12.000 TL
10	1.600.000 TL	13.000 TL
12,5	1.925.000 TL	14.000 TL
15	2.250.000 TL	15.000 TL

Depolama sistemi kullanılması ile DGP’den ne kadar kazanç sağlanacağını hesaplanması için PMUM web sitesinden saatlik YAL-YAT talimatları alınmıştır. Bu talimatlara ait güç değerleri, santral gücü/kurulu güç olarak A, B ve C santrallerine ölçeklendirilmiş ve 4.3’te verilen varsayımlar üzerinden hesaplamaya dahil edilmiştir.

Tablo 4.2: Hesaplama örneği.

TARİH	SAAT	TAHİMİN	ÜRET	Saatlik Ort(Üret)	SGÖF	SMF	GELİR	muht. VAL-YAT ihaleleri	Yeni TAHİMİN	VAL-YAT ile balans	Şarj	Batarya x60	Yeni ÜRET	Saatlik Ort(Üret)	Yeni GELİR	FARK
28.06.2012	09:33	17	13,2	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-0,87	-1,02	32,58	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:34	17	15,73	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	1,66	1,66	31,56	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:35	17	15,58	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	1,51	1,51	33,22	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:36	17	14,75	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	0,68	0,68	34,74	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:37	17	15,35	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	1,28	1,28	35,42	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:38	17	14,47	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	0,40	0,40	36,71	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:39	17	13,34	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-0,73	-0,85	37,11	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:40	17	11,6	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-2,47	-2,90	36,26	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:41	17	11,56	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-2,51	-2,95	33,36	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:42	17	13,02	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-1,05	-1,23	30,41	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:43	17	12,5	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-1,57	-1,84	29,18	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:44	17	12,52	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-1,55	-1,82	27,34	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:45	17	10,81	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-3,26	-3,83	25,52	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:46	17	10,26	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-3,81	-4,48	21,69	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:47	17	12,28	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-1,79	-2,10	17,21	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:48	17	12,25	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-1,82	-2,14	15,11	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:49	17	6,3	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-7,77	-9,14	12,97	14,07	12,85		- TL
28.06.2012	09:50	17	9,05	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-5,02	-4,51	3,83	12,88	12,85		- TL
28.06.2012	09:51	17	9,09	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-4,98	0,80	-0,68	8,29	12,85		- TL
28.06.2012	09:52	17	9,01	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-5,06	-0,14	0,12	9,13	12,85		- TL
28.06.2012	09:53	17	8,62	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-5,45	0,02	-0,02	8,60	12,85		- TL
28.06.2012	09:54	17	10,59	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-3,48	0,00	0,00	10,59	12,85		- TL
28.06.2012	09:55	17	10,63	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-3,44	0,00	0,00	10,63	12,85		- TL
28.06.2012	09:56	17	8,97	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-5,10	0,00	0,00	8,97	12,85		- TL
28.06.2012	09:57	17	10,21	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-3,86	0,00	0,00	10,21	12,85		- TL
28.06.2012	09:58	17	10,68	12,95	179,99	179,99		-2,93	14,07	-3,39	0,00	0,00	10,68	12,85		- TL
28.06.2012	09:59	17	7,5	12,95	179,99	179,99	2.331 TL	-2,93	14,07	-6,57	0,00	0,00	7,50	12,85	2.736 TL	405 TL

PMUM web sitesinden alınan değerlerin %25'inin olumlu sonuçlandırılması için değerler rastgele olarak elenmiştir. Bu şekilde DGP'de günde ortalama 6 saat YAL-YAT talimatı alınmıştır.

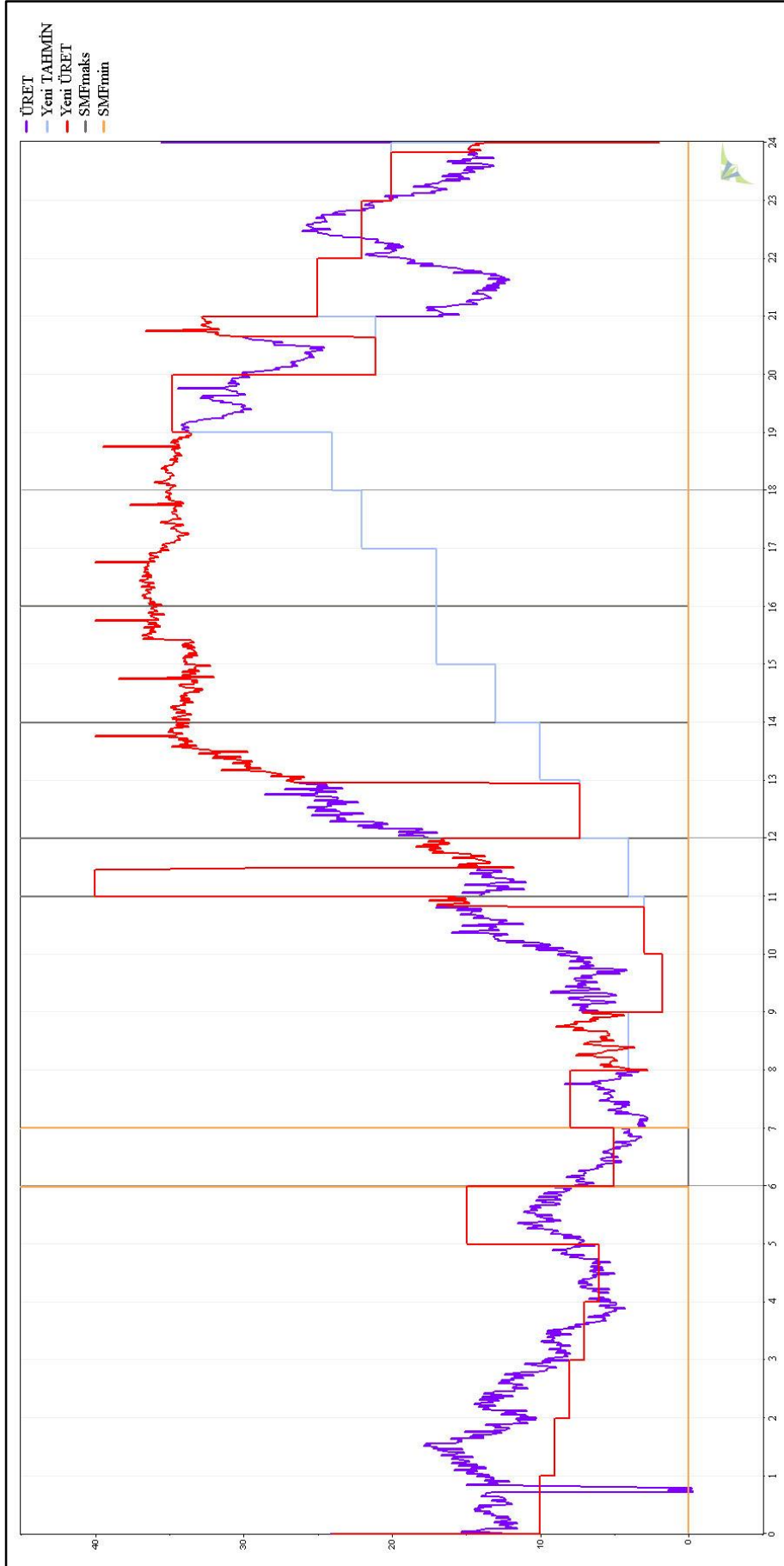
Yapılan hesaplarda öngörülen şarj hızları ve verim dikkate alınmıştır. Üretim, balans, şarj, batarya göstergesi ve EDS kullanılarak yapılan üretime ait değerler dakikalık olarak hesaplanmış, gelir miktarları saatlik olarak hesaplanmıştır. Saatlik gelir farkı miktarları yaklaşık 1,5 yıllık veriler için toplanmıştır. Fark değeri yıllık olarak hesaplanmış ve enflasyon dikkate alınarak Tablo 4.3'te verilen 10 yıllık bir getiri-maliyet karşılaştırma tablosu hazırlanmıştır.

Tablo 4.3: Örnek maliyet ve getiri karşılaştırma tablosu.

YIL	15 MWh'lik getiri	15 MWh'lik maliyet	12,5 MWh'lik getiri	12,5 MWh'lik maliyet	10 MWh'lik getiri	10 MWh'lik maliyet
1	370.832 TL	2.265.000 TL	359.121 TL	1.939.000 TL	348.130 TL	1.613.000 TL
2	389.374 TL	2.280.750 TL	377.077 TL	1.953.700 TL	365.537 TL	1.626.650 TL
3	798.216 TL	2.297.288 TL	773.007 TL	1.969.135 TL	749.351 TL	1.640.983 TL
4	1.227.501 TL	2.314.652 TL	1.188.734 TL	1.985.342 TL	1.152.355 TL	1.656.032 TL
5	1.678.249 TL	2.332.884 TL	1.625.248 TL	2.002.359 TL	1.575.510 TL	1.671.833 TL
6	2.151.535 TL	2.352.029 TL	2.083.587 TL	2.020.227 TL	2.019.822 TL	1.688.425 TL
7	2.648.486 TL	2.372.130 TL	2.564.843 TL	2.038.988 TL	2.486.350 TL	1.705.846 TL
8	3.170.284 TL	2.393.237 TL	3.070.162 TL	2.058.688 TL	2.976.204 TL	1.724.138 TL
9	3.718.172 TL	2.415.398 TL	3.600.746 TL	2.079.372 TL	3.490.552 TL	1.743.345 TL
10	4.293.454 TL	2.438.668 TL	4.157.860 TL	2.101.090 TL	4.030.616 TL	1.763.513 TL

Hesaplama sonuçlarının teyit edilmesi amacıyla 1 dakikalık değerler “Windographer” paket programına yüklenerek eğriler üretilmiştir. Şekil 4.11’de verilen eğrilere göre saat 0 ile 8 arasında KGÜP tahmin değerleri EDS ile yakalanmıştır. Saat 4’te günün en düşük birim fiyatları verilmiş olmasına rağmen SGÖF ve SMF fiyatları eşit olmadığı için tarife kaydırma algoritması kullanılmamıştır. Saat 8’de SGÖF ve SMF fiyatları eşit olduğu için EDS devre dışı bırakılmış, saat 9’dan 10:50’ye kadar KGÜP değerleri takip edilmiştir. 10:50’de EDS tamamen dolmuş ve devre dışı kalmıştır. Saat 11’de günün en yüksek birim fiyatı verilmiş ve tüm EDS boşaltılmıştır. Boşalma sırasında maksimum bağlantı gücü dikkate alınarak sınırlandırma yapılmıştır. Saat 12’de SGÖF ve SMF fiyatlarının eşit olmasına rağmen

YAL değeri sıfır olmadığı için KGÜP değeri takip edilmiş, EDS dolduktan sonra devreden çıkarılmıştır. Saat 14'te tekrar günün en yüksek birim fiyatı verilmiş olmasına rağmen KGÜP tahmini yakalanması algoritması uygulanmıştır. Saat 19'da üretimin KGÜP değerinden düşük çıkması ile tekrar devreye giren EDS saat 20'ye kadar tahmin değerini sağlamış, saat 20'de tekrar üretim KGÜP değerinin üstüne çıkmıştır. Saat 20'de şarja başlayan EDS, tamamen dolduktan sonra devreden tekrar çıkmıştır. Bu şekilde devam eden şarj vedeşarjlar ile gün sonunda sadece saat 23'te 0,92 MWh'lik açık verilmiştir. EDS kullanılmadığında ise 14,06 MWh açık verilmektedir.



Şekil 4.11: A santraline ait 24 saatlik EDS'li üretim eğrileri.

Hesaplamalar sonucunda maliyet ve getirilerin karşılaştırılması ile geri ödeme süreleri belirlenmiştir. Tablo 4.4'te, santrallerde kullanılan EDS kapasitelerinin geri ödeme süreleri verilmiştir.

Tablo 4.4: Geri ödeme süreleri.

MWh	Geri Ödeme Süresi (yıl)		
	A RES	B RES	C RES
15	6	8	7
12,5	5	7	7
10	5	7	6
8	5	6	6
6	4	5	5
4	4	4	4
3	3	4	4
2	3	3	4
1	3	3	3

Geri ödeme süreleri incelendiğinde 1 MWh'lik depolama sisteminin daha hızlı geri ödeme sağladığı görülmektedir. Bunun sebebi ise DGP'ye girilmesi ile alınan YAT talimatlarının depolama kapasitesine bağlı olmadan yerine getirilebilmesidir. Diğer KGÜP ve YAL tahminleri ise EDS kapasitesi oranında yakalanabilmiştir.

Rüzgar santralleri üretimlerinde farklı büyüklüklerde dalgalanmalar olmakta, büyük depolama sistemlerinde şarj-deşarj döngüsü sayısı daha düşük olmaktadır. Bu şekilde atıl kalan kapasite birim getiriyi düşürmektedir. Bu sebeple EDS kapasitesi büyüdükçe, EDS birim getirisi azalmaktadır. A, B ve C RES'lerine ait şarj-deşarj döngü sayıları Tablo 4.5'te verilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Abdülhadi Çiftçi 1987 yılında İstanbul’da doğdu. 2005 yılında başladığı İTÜ Elektrik Mühendisliği bölümünü 2010 yılında tamamlayarak, aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü(GYTE), Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında başladı. 2009 yılından beri Eksim Yatırım Holding’de RES proje yöneticisi olarak çalışmaktadır.

Tablo 4.5: Enerji depolama sistemleri yıllık döngü sayıları.

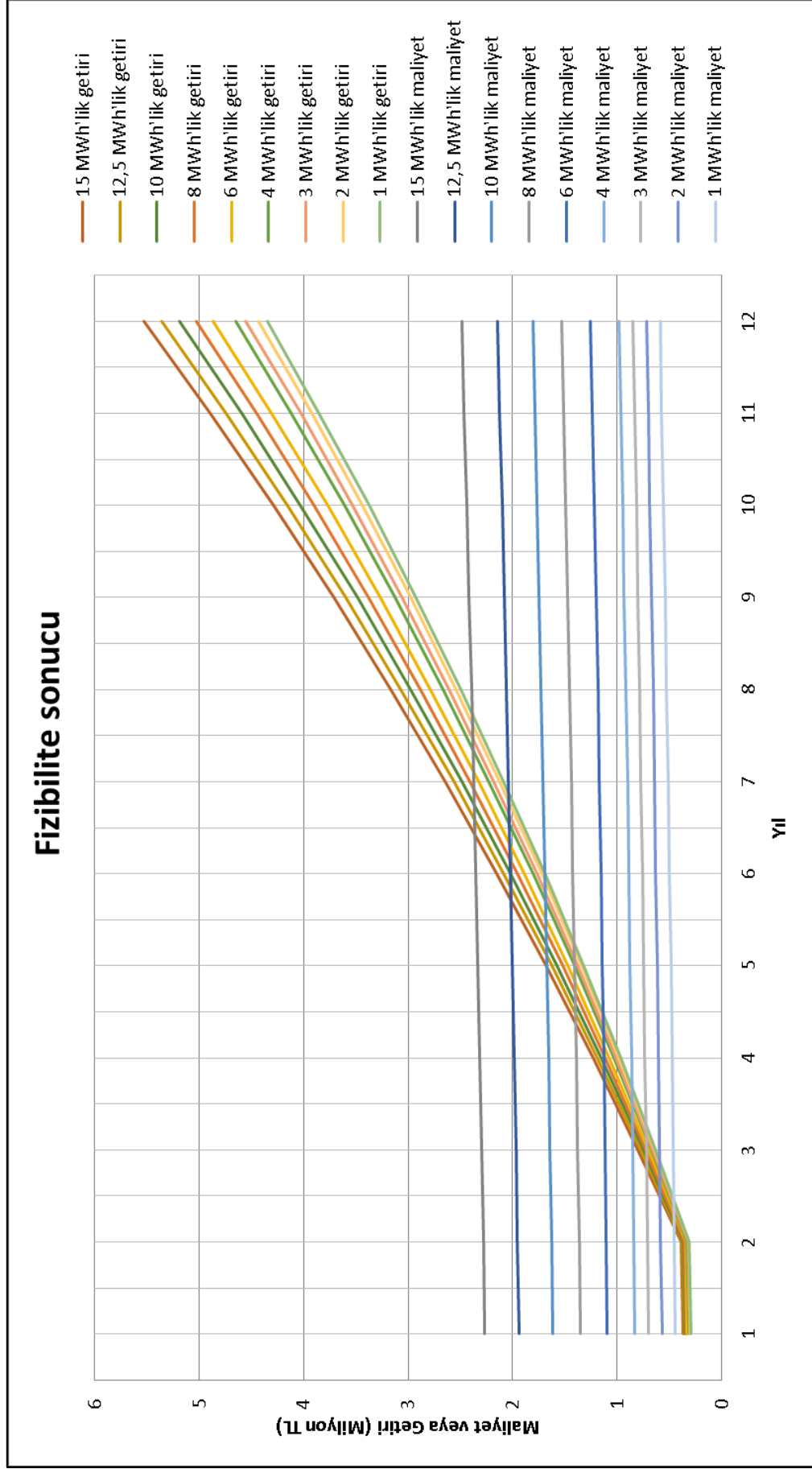
MWh	Döngü sayısı		
	A RES	B RES	C RES
15	431	437	385
12,5	470	467	406
10	525	505	440
8	569	550	482
6	626	605	555
4	700	714	640
3	745	781	684
2	842	888	777
1	998	1050	920

Şekil 4.12’de A, B ve C RES’lerinde kullanılan farklı EDS kapasitelerinin kümülatif getiri ve maliyet eğrileri verilmiştir. Değerler 3 santralin ortalamasına aittir. Getiri miktarları enflasyonun da etkisi ile ivmeli bir artış gösterirken, EDS bakım maliyetlerinin düşük olması sebebiyle yıllara göre maliyet artışı çok düşüktür. Bu sebeple EDS’ler verimli kullanıldığında kısa sürede geri ödeme sağlamaktadır.

Tablo 4.6’da 3 RES’te kullanılan EDS’lerin 20 yıllık amortisman hesabı ile yıllık kar miktarları karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.6: Enerji depolama sistemi kullanımının sağladığı yıllık kâr miktarları.

MWh	Yıllık ortalama kâr miktarı			
	A RES	B RES	C RES	ORTALAMA
15	607.562 TL	337.152 TL	427.051 TL	457.255 TL
12,5	599.573 TL	349.569 TL	420.002 TL	456.381 TL
10	589.292 TL	363.701 TL	416.998 TL	456.664 TL
8	576.663 TL	373.155 TL	410.764 TL	453.527 TL
6	566.843 TL	384.015 TL	400.478 TL	450.445 TL
4	553.661 TL	391.821 TL	381.564 TL	442.349 TL
3	547.050 TL	393.770 TL	373.584 TL	438.135 TL
2	539.746 TL	397.152 TL	358.308 TL	431.735 TL
1	533.599 TL	405.093 TL	350.305 TL	429.666 TL



Şekil 4.12: 3 adet RES'in ortalamasına ait getiri ve maliyet grafiği.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Hesaplamalar sonucunda elde edilen Tablo 4.4, 4.5 ve 4.6'ya göre RES'lerde EDS kullanımı, kendi maliyetini birkaç yılda ödeyecek kadar yüksek getiri sağlamaktadır. Birim getirisi düşük olsa da toplam kâr miktarı daha yüksek olduğundan yüksek kapasiteli EDS'ler tercih edilmelidir. Bu sebeple hesaplanan kapasiteler arasında en yüksek depolama kapasitesi olan 15 MW'lık EDS'nin kullanılması avantajlıdır. İlerideki yıllarda daha büyük kapasiteli ve daha yüksek verimli EDS'ler kullanıldığında döngü sayısı daha da düşeceğinden Şekil 4.12'ye benzer eğrilerin oluşması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2006), <http://eur-lex.europa.eu/lexuriserv/lexuriserv.do?uri=com:2006:0848:fin:en:pdf>, (Erişim Tarihi: 14/05/2014).
- [2] Web 2, (2014), http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ity_public/8-10032014-ap/en/8-10032014-ap-en.pdf, (Erişim Tarihi: 14/05/2014).
- [3] Web 3, (2011), <http://web.mit.edu/windenergy/windweek/presentations/wind%20energy%20101.pdf>, (Erişim Tarihi: 14/05/2014).
- [4] Denholm P., Kulcinski G. L., (2004), "Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems", Energy Conversion and Management, 28 (45), 2154-2155.
- [5] Steinke F., Wolfrum P., Hoffmann C., (2013), "Grid vs. storage in a 100% renewable Europe", Renewable Energy, 28 (50), 826-827.
- [6] Koohi-Kamali S., Tyagi V. V., Rahim N. A., Panwar N. L., Mokhlis H., (2013), "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (25), 136-137.
- [7] McDowall J., (2006), "Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids", Journal of Power Sources, 125 (162), 961-962.
- [8] Moriokaa Y, Narukawab S, Itou T.,(2001), "State-of-the-art of alkaline rechargeable batteries", Journal of Power Sources, 57 (100), 108-109.
- [9] Dell R. M., Rand D. A. J., (2001), "Energy storage - a key technology for global energy sustainability", Journal of Power Sources, 86 (100), 11-12.
- [10] Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V., (2009), "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5 (13), 1515-1516.
- [11] Wen Z., Cao J., Gu Z., Xu X., Zhang F., Lin Z., (2008), "Research on sodium sulfur battery for energy storage", Solid State Ionics, 126 (179), 1697-1698.
- [12] Kazempour S. J., Moghaddam M.P., Haghifam M. R., Yousefi G. R., (2009), "Electric energy storage systems in a market-based economy: Comparison of emerging and traditional Technologies", Renewable Energy, 26 (34), 2632-2633.
- [13] Hall P. J., BAin E. J., (2008), "Energy-storage technologies and electricity generation", Energy Policy, 23 (36), 4353-4354.

- [14] Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villafañila-Robles R., (2012), “A review of energy storage technologies for wind power applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5 (16), 2159– 2167.
- [15] C. Ponce de Leon C. P., Frias-Ferrer A., Gonzalez-Garcia J., Szanto D. A., Walsh F. C., (2006), “Redox flow cells for energy conversion”, *Journal of Power Sources*, 36 (1609), 717-718.
- [16] Rydh C.J., (1999), “Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage”, *Journal of Power Sources*, 16 (80), 21-22.
- [17] Li P., (2008), “Energy storage is the core of renewable energy technologies”, *IEEE Nanotechnology Magazine*, 4 (2), 5-6.
- [18] Helwig A., Ahfock T., (2009), “Ultra-capacitor assisted battery storage for remote area power supplies: A case study”, 19th Australasian universities power engineering conference: sustainable energy technologies and systems, 2-3, Adelaide, USA, 27 - 30 September.
- [19] Kusko A., Dedad J., (2005), “Short-term and long-term energy storage methods for standby electric power systems”, *IEEE Industry Applications Conference*, 72-73, Kowloon, Hong Kong, 2 - 6 October.
- [20] Web 4, (2013), <http://www.ewea.org/events/workshops/wp-content/uploads/2013/03/ewea-tureb-workshop-27-3-2013-halil-alis-euas.pdf>, (Erişim Tarihi: 14/05/2014).
- [21] Rabiee A., Khorramdel H., Jamshid A., (2013), “A review of energy storage systems in microgrids with wind turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3 (18), 316–326.
- [22] Nur Shahia H., Mohammad Y. H., Md Shah M., Hasimah A. R., (2013), “Review of storage schemes for wind energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5 (21), 237–247.
- [23] Gomis-Bellmunt O., Junyent-Ferre A., Sumper A., Bergas-Jane J., (2008), “Ride-Through Control of a Doubly Fed Induction Generator Under Unbalanced Voltage Sags”, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 4 (23), 1036-1037.
- [24] Abbey C., Joos G., (2007), “Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications”, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 3 (43), 770-771.
- [25] Web 5, (2005), http://www.ee.washington.edu/research/real/library/reports/what_is_spinning_reserve.pdf, (Erişim Tarihi: 14/05/2014).
- [26] Web 6, (2009), http://www.teias.gov.tr/dosyalar/081203-as-primer_el_ekitabi-v10.pdf, (Erişim Tarihi: 14/05/2014).

- [27] Du W., Wang H. F., Cheng S., Wen J. Y., Dunn R., (2011), “Robustness of damping control implemented by Energy Storage Systems installed in power systems”, *Electrical Power and Energy Systems*, 33 (1), 35–42.
- [28] Hida Y., Yokoyama R., Shimizukawa J., Iba K., Tanaka K., Seki T., (2010), “Load following operation of NAS battery by setting statistic margins to avoid risks”, *IEEE power and energy society general meeting*, 1-2, Minneapolis, USA, 25 - 29 July.
- [29] Iijima Y., Sakanaka Y., Kawakami N., Fukuhara M., Ogawa K., Bando M., Matsuda T., (2010), “Development and Field Experiences of NAS Battery Inverter for Power Stabilization of a 51 MW Wind Farm”, *The 2010 International Power Electronics Conference*, 1841-1842, Sapporo, Japan, 21 - 24 June.
- [30] Brekken T. K. A., Yokochi A., Jouanne A., Yen Z. Z., Hapke H. M., Halamay D. A., (2011), “Optimal Energy Storage Sizing and Control for Wind Power Applications”, *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, 1 (2), 76-77.
- [31] Tran D., Zhou H., Khambadkone A. M., (2011), “Design and Dynamic Power Management of Energy Storage System for Wind Plant”, *IEEE Peds 2011*, 356-357, Singapore, 5 - 8 December.
- [32] Blanc C., Rufer A., (2009), “Optimization of the Operating Point of a Vanadium Redox Flow Battery”, *Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009*, 2605-2606, San Jose, USA, 20 - 24 September.
- [33] Hu W., Chen Z., Bak-Jensen B., (2010), “Optimal Operation Strategy of Battery Energy Storage System to Real-Time Electricity Price in Denmark”, *IEEE power and energy society general meeting*, 5-6, Minneapolis, USA, 25 - 29 July.