

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI ŞEBEKELERDE DEPOLAMA SİSTEMLERİNE SAHİP RÜZGAR
ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİM TAHMİNİ VE SİSTEME KATILIM
MİKTARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Betül AKYÜREK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKILLI ŞEBEKELERDE DEPOLAMA SİSTEMLERİNE SAHİP RÜZGAR
ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİM TAHMİNİ VE SİSTEME KATILIM
MİKTARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Betül AKYÜREK
504121006**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Belgin EMRE TÜRKAY

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504121006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Betül AKYÜREK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AKILLI ŞEBEKELERDE DEPOLAMA SİSTEMLERİNE SAHİP RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİM TAHMİNİ VE SİSTEME KATILIM MİKTARININ BELİRLENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Belgin TÜRKAY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet CANSIZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **26 Mayıs 2015**

Ünzile'ye,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana rehberlik eden ve çalışmam konusunda motive olmamı sağlayan, takıldığım noktalarda bana yardımcı olan tez hocam Prof. Dr. Belgin EMRE TÜRKEY'a teşekkür ederim.

Tezime başlarken ilk adımı atmam konusunda bana cesaret veren Onur ÇIKRIKÇILI'ya, tez yazımı ve yaklaşımı konusunda fikirlerine her zaman ihtiyaç duyduğum hocam Yrd. Doç. Dr. Fehmi Gökem ÜÇTUĞ'a, teknik anlamda sorularıma yanıt veren Yrd. Doç. Dr Gürkan SOYKAN'a ve yakın arkadaşlarıma destekleri için teşekkür ederim.

Son olarak aileme ve CAN DUYGAN'a her zaman yanımda oldukları ve bana güç verdikleri için minnettarım.

Mayıs 2015

Betül Akyürek
(Elektrik-Elektronik Mühendisi –
Enerji Sistemleri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. RÜZGAR ENERJİSİ.....	5
3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....	9
4. ANFİS.....	11
5. PSAT	15
6. YÖNTEM.....	21
6.1 Üretilecek Rüzgar Enerjisinin Tahmini.....	21
6.2 Üretilen ve Kullanılamayan Enerji.....	22
6.3 Kullanılacak Enerji Depolama Sistemleri	24
6.3.1 Boyutunun belirlenmesi	24
6.3.2 Maliyetinin hesaplanması	24
7. UYGULAMA VE SONUÇLARI	29
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	33
KAYNAKLAR	35
EKLER.....	39
EK A	40
EK B	42
EK C	46
EK D	47
ÖZGEÇMİŞ.....	51

KISALTMALAR

ANFIS	: Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi
CO₂	: Karbondioksit
MATLAB	: Matrix Laboratory
PSAT	: Power System Analysis Toolbox
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
ESS	: Energy Storage Systems
OPF	: Optimum Yük Akışı
LA	: Kurşun Asit Akü
VRLA	: Karbonla Zenginleştirilmiş Elektrotlu Kurşun Aist Akü
Na/S	: Sodyum Sülfür Akü
VRB	: Vanadyum Redoks Akü
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Depolama kaynaklarının çeşitleri ve teknik bilgileri	10
Çizelge 4.1 : ANFIS girdileri örnek verileri	12
Çizelge 4.2 : Sıcaklık ve atmosfer basıncına bağlı hava yoğunluğu (kg/m^3)	13
Çizelge 4.3 : Rüzgar gücü hesabı örnek data seti	14
Çizelge 5.1 : IEEE 6 baralı sistemin şebeke komponentleri.....	18
Çizelge 5.2 : IEEE 6 barada güç akışı sonuçları.....	18
Çizelge 5.3 : IEEE 6 barada iletim hatlarında güç akışı	19
Çizelge 6.1 : Farklı enerji kaynaklarının üretim maliyetleri.....	23
Çizelge 6.2 : Dağıtım seviyesindeki tüketicilerin elektrik tarifeleri.....	23
Çizelge 6.3 : Elektrik fiyatı periyotları	23
Çizelge 6.4 : 10000 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.....	26
Çizelge 6.5 : 2500 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.....	26
Çizelge 6.6 : 6000 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.....	26
Çizelge 6.7 : 1728 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.....	27
Çizelge 7.1 : Rüzgar türbininin özellikleri	29
Çizelge 7.2 : Şebekede kullanılamayan rüzgar enerjisi ve maliyeti	30
Çizelge 7.3 : Alternatif depolama sistemleri ve maliyetleri	31
Çizelge 7.4 : Tüketici bakımından depolamanın yararı	31
Çizelge 7.5 : Üretici bakımından depolamanın yararı	32
Çizelge A.1: Yük data.....	40
Çizelge A.2: Hat datası	40
Çizelge A.3: Generatör data	41
Çizelge B.1: Bara data	42
Çizelge B.2: Hat data	43
Çizelge B.3: Kapasite ve maliyet katsayısı.....	44
Çizelge B.4: Trafo ve kademe ayarları	45
Çizelge C.1: Gün içinde saatlik puant yük	46
Çizelge D.1: PSAT sonucu – üretilen, kullanılamayan enerji	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünyada kurulu rüzgar kapasitesinin kümülatif değeri 1997 - 2014	1
Şekil 2.1 : Basit bir rüzgar türbininin yapısı.....	6
Şekil 2.2 : Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri için yıllık kurulum.....	7
Şekil 2.3 : Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum.....	7
Şekil 4.1 : İki girişli bir çıkışlı ve 2 kurallı ANFIS yapısı.....	12
Şekil 5.1 : PSAT yapısı.....	16
Şekil 5.2 : PSAT ana kullanıcı ekranı.....	17
Şekil 5.3 : PSAT – OPF seçenek ekranı	17
Şekil 5.4 : IEEE 6 bara için OPF çözümü	18
Şekil 6.1 : ANFIS modeli	22
Şekil 7.1 : Üretileceği tahmin edilen, hesaplanan ve kullanılamayan enerjinin karşılaştırılması	30
Şekil 7.2 : Yıllık depolama maliyeti, depolamanın üreticiye ve kullanıcıya yararı ..	32
Şekil A.1: IEEE 6 bara sistemi – PSAT modeli... ..	41
Şekil B.1: IEEE 14 bara sistemi – PSAT modeli... ..	42

AKILLI ŞEBEKELERDE DEPOLAMA SİSTEMLERİNE SAHİP RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNDE ÜRETİM TAHMİNİ VE SİSTEME KATILIM MİKTARININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Çalışmada, 10 adet 900 kW rüzgar türbinlerine sahip 9 MW kurulu gücü olan rüzgar santralinin üreteceği enerjinin tahmini yapılmıştır. Üretileceği tahmin edilen enerjiden şebekeye dahil olamayan enerji miktarı elde edilmiştir. Bu miktar ise kullanılması gereken ve yenilenebilir enerji ile uyumlu çalışan, markette ulaşılabilen enerji depolama sistemlerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Depolama sistemleri rüzgar santrali ile uyumlu çalışacak çeşitlerinin belirlenmesi, boyutunun ve maliyetinin yıllık bazda ne olacağının hesaplanması ile bulunmuştur. Bu amaç doğrultusunda rüzgar enerjisi tahmini yapmak için adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. MATLAB programı içerisinde bulunan ve anfisedit komutu ile kullanılan bu modelin girdileri ve çıktıları belirlenmiştir. Rüzgar santralinden üretilecek enerjinin hesaplanabilmesi için rüzgar hızı, hava yoğunluğu, türbin kanatlarının süpürdüğü alan ve bölgeye göre değişen kapasite faktörü göz önünde bulundurulmuştur. Rüzgar hızı Urla'da 2008 ile 2011 yılları arasında on dakikada bir alınan kayıtlar aracılığı ile sağlanmıştır. Rüzgar hızı modellemenin ilk girdisidir. Diğer bir girdi olan hava yoğunluğu ise yine aynı tarihler arasında Çeşme, Seferihisar ve İzmir bölgeerine ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan hava sıcaklığı ve nem değerleri ile bulunmuştur. Modelin çıktısı ise elimizde bulunan veriler ile teorik olarak hesaplanan rüzgar gücüdür. Bu değerler modellemede test ve eğitim için kullanılmıştır. Hat kapasiteleri, gerilim limitleri gibi şebeke fiziksel kısıtlamaları sebebi ile üretilen rüzgar enerjisinin tamamı sisteme verilememektedir. Bu nedenle sisteme katılabilecek enerji miktarı Power System Analysis Toolbox ile hesaplanmıştır. Şebekenin teknik limitleri Power System Analysis Toolbox'ta gömülü bulunan IEEE 14 baralı sisteme entegre edilmiştir. Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi'nin belirlediği elektrik tarifeleri ve Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'nden elde edilen birim enerji üretim maliyetleri de sistemde göz önünde bulundurulmuştur. Rüzgar enerjisi kullanıldığında üretilen birim enerji maliyeti düşmektedir. Karşılaştırma yaparken birim enerji maliyeti de modele dahil edilmiştir. Şebekeye dahil edilemeyen enerji başlı başına bir maliyettir ve bu yöntemle bu maliyet belirlenmiştir. Dahil edilemeyen enerjinin depolanması bu maliyet, düşürmekle beraber depolama sisteminin maliyeti de düşünülmelidir. Bu nedenle çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan depolama sistemleri belirlenmiştir. Paranın bugünkü değeri, gelecek değeri ve yıl bazında hesaplanmış değerleri finansal analizle hesaplanarak enerji depolama sistemlerinin yıllık kurulum ve kullanım maliyetleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda ilk yatırım, işletme, bakım maliyeti ve yenileme maliyetleri de eklenmiştir. Enerji depolama sistemlerinin kurulumdan kaynaklanan hat kayıplarında azalma ve sisteme verilemeyen rüzgar enerjisinin depolanmasıyla birlikte ortaya çıkan yıllık kazanç, enerji depolama

sisteminin kurulumunun yıllık maliyeti ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda 9 MW sistem de maliyeti yüksek olduğu için depolama sisteminin uygun olmadığı görülmüştür. Ancak rüzgar türbinin gücü arttıkça depolama maliyeti azaldığı için sistem uygun olduğu tespit edilmiştir.

PREDICTION AND PENETRATION OF WIND ENERGY WITH STORAGE SYSTEM ANALYSIS

SUMMARY

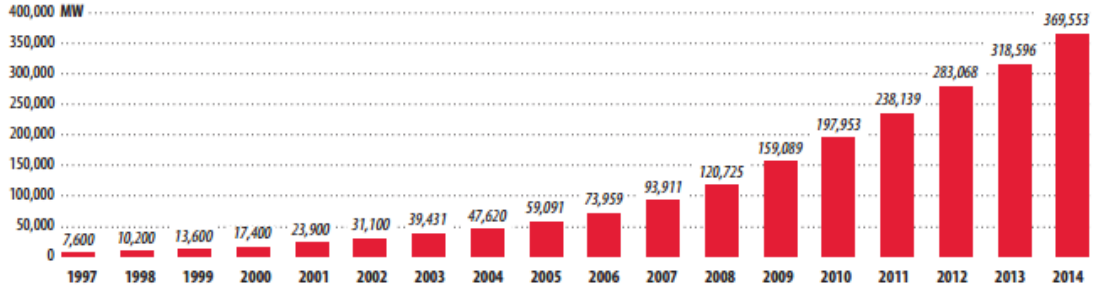
In this study, expected wind energy of 9 MW installed power is determined. The proper energy storage system (ESS) is found out by considering power rate, capacity and cost. As a result, annual cost of energy storage systems and spilled wind energy are compared. Wind energy is a renewable energy source but intermittence is a drawback. Energy storage systems are a solution to provide stability both on grid and off grid. ESS is an important issue and nowadays studies on ESS are increasing. By modeling renewable energy sources, capacity of storage systems is calculated in some studies. In another studies, in aspect of power electronics, storage systems are compared for different kinds of distributed energy systems. Comparing storage systems according to their advantages and disadvantages is another subject for the studies. Another important issue is reliability of storage systems. So reliability of a grid by adding ESS and wind energy are mentioned. Not only for wind energy but also for other renewable energy sources, types of ESS and capacity calculations are common. But in these studies, missing subject is cost of ESS, benefit analysis for customers and system owners. The study also improves conditions for customers and prompt potential investors to invest on renewable energy projects. So in this study, some tools are used to estimate wind energy production, calculate spilled energy and also financial analysis is performed for both customers and producers. For the study, different methods are used in each steps. First step is to predict amount of wind energy. In literature, there are many methods that are used such as Weibull distribution, neural networks, classic linear models. In the study, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System is used for estimation wind energy because it has advantages of both artificial neural networks and fuzzy logic. The program includes nodes which have different functions. In this program, there are inputs and outputs, these are used to train and determine rules. Two inputs, one output and two rules Sugeno model is commonly used in literature. According to the data, the proper wind turbine was selected and power related with wind speed was specified in the wind turbine datasheet. In the study, program is prepared by considering air density, wind speed, swept area and capacity factor as inputs and wind power calculated by wind power equation is used as outputs in program and all data are normalized. Wind speed is provided from a study in Urla, İzmir between 2008 – 2011. Other inputs are provided from Turkish State Meteorological Service for same time interval but for Çeşme, İzmir and Seferhisar since meteorological station is broken in Urla. ANFIS is used for wind energy prediction. In the program, 66% of wind speed data (5187) were used for training and 34% of data (3573) were used for testing. Subtractive clustering was selected in the tool. This selection is effective when clustering of data is not accurately known. In the process, the epoch number was three and the margin of error 3.74%. In the model, there are three rules. As a result of the program,

prediction of wind energy by ANFIS for each hour in typical season day and theoretical results of wind power are compared. The coefficient of determination R^2 shows that the difference between measurement of fit prediction and statistical analysis was 98.84%, which is acceptable. After prediction of wind energy production, the electrical network and loads were specified. Next step is determine amount of accomated wind energy to the network. Because of physical limits such as line capacities, voltage limits, all amount of expected energy cannot penetrate grid. Spilled wind energy is determined by Power System Analysis Toolbox. PSAT is a power analysis and control program and used for power flow analysis and control. It can perform continuous power flow, optimal power flow, small signal stability analysis, and time domain simulation. There are embedded test networks of IEEE in PSAT. In network analysis, optimal power flow is performed on IEEE 14 bus system. In this analysis, control equations can be generator active powers except for slack bus, voltage magnitude of generator bus, reactive powers of reactive generators, tap changers and angle of phase transformations. Constraints are active and reactive power flow in branches, voltage limits of branches except for slack, and feeder capacity limit. Objective function is determine maximum wind energy by considering technical limits and maximize cost of using wind energy in network. Wind power plant is connected to bus 12. Since unit price of electricity generation by wind energy is known, cost of the spilled wind energy is calculated. Electricity tariffs in distribution system is provided from Turkish Electricity Distribution Company and electricity prices for day, night and peak hours and the cost of energy production methods were considered. In the study, data which is hour by hour wind energy prediction for typical days of each season is entered into the program and also for same hours, electricity prices with regard to wind energy penetration are added. Unit cost of energy generation for different sources is provided from Turkish Electricity Transmission Company since common energy sources are coal, natural gas and hydropower, in the study, these sources are considered. Then, energy storage systems are researched. There are many energy storage systems such as supercapacitors, fuel cells, lithium-ion, flywheels but not all them are suitable for renewable energy systems. Energy storage systems which can be used for renewable energy and common in markets are lead acid, valve-regulated lead acid, sodium sulphur and vanadium redox. In specific hour, maximum spilled power specifies power rating of ESS and maximum spilled energy during a day specifies capacity of ESS. To calculate annual cost of ESS, all possible investments such as unit costs of ESS, power electronics, balance of plant and fixed operation and maintenance cost are considered and annual costs of installation of each ESS are calculated by using financial equations related with net present, future and annual values. Also, it is figured out that ESS leads to decrease in line losses so profits of line losses and spilled energy are compared with cost of installed ESS. Since the production cost of wind energy is lower than that of the energy sources already installed, the production cost of energy decreases. This provides benefits to customers because electricity prices decrease. For the producer, it is also beneficial because of lower production costs. There is also another benefit for the producer because spilled energy will be stored and then penetrate the system. Profits of producers and consumers for each year are compared with annual cost of installing different kind of ESS technologies. Results of the study showed that for 9 MW wind energy system, ESS is not feasible but it is obviously seen that ESS will be feasible for penetration of bigger power ratings wind energy. In today's technology, annual cost of ESS is extremely expensive. Also, as growing technology, the cost of energy storage systems will

decrease and investments in storage systems will become more feasible and for smart grids, energy storage systems will be necessary. The study can be improved by exploring more wind energy operations and by finding the optimum point for installing energy storage systems by using more than one wind power plant and ESS.

1. GİRİŞ

Dünya enerji kaynaklarının %80'i petrol, kömür ve doğalgazdan oluşmaktadır (IEA Key World Energy Statistics, 2014). Ancak bu kaynaklar ciddi bir azalma göstermektedir. Ayrıca fosil kaynaklar karbondioksit salınımı ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi önem kazanmaya başlamıştır. Ülkemizde olduğu gibi dünyada da yenilenebilir enerjiye teşvik amaçlı kanun ve yönetmelikler çıkarılmış yatırımcıların temiz enerji üretimine yönelimleri teşvik edilmeye çalışılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi, yakıtının bedava olması, hava kirliliğine direkt neden olmaması, kaynağın tükenme sorununun olmaması ve CO₂ salımına direkt olarak neden olmaması gibi sebeplerle ön plandadır. Dünyada 1997 yılından itibaren kurulan rüzgar santrallerinin kümülatif değeri Şekil 1.1'de gösterilmiştir (GWEC, 2014).



Şekil 1.1: Dünyada kurulu rüzgar kapasitesinin kümülatif değeri 1997 – 2014.

Rüzgar enerji teknolojisinin üstünlüklerinin yanı sıra dezavantajı ise rüzgar sürekli olmadığı için sürekli enerji üretimi yapılamamasıdır. Rüzgar santralleri zamanla değişen yük talebini sürekli sağlayamadıkları için santrali depolama sistemleriyle paralel kullanmak ya da başka bir enerji kaynağı ile birlikte hibrit enerji sistemi olarak kullanmak zorunda kalınmaktadır. Başka bir çözüm ise şebekeye bağlı olarak rüzgar enerjisini kullanabilmektedir. Depolama sistemlerinin maliyetli olduğu düşünülmekte, kurulan sistemlerde depolamadan uzak kalınmaktadır. Ancak rüzgar enerjisi gibi sürekli olmayan üretim yöntemlerinde sürekliliği sağlamanın kolay bir

yöntemi olan depolama konusuna ağırlık verilmesi gerekmektedir. Bu konu çevreye zararlı olan ve sonu geleceği öngörülen fosil yakıtlardan uzaklaşılmasını sağlayacak ayrıca yenilenebilir enerji sistemlerinin dezavantajı olarak görülen sürekli olmaması durumunu engelleyecektir. Ayrıca depolama sistemleri rüzgar enerjisinden elde edilen enerjinin tamamının kullanılmasını sağladığı ve hat kayıplarını azalttığı için avantajlıdır.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı pahalı olarak düşünülen depolama sistemlerinin maliyetinin kullanılamayan enerji maliyeti ile karşılaştırılması ve sonuçların üretici/tüketici yönünden kar ve zararını belirlemektir. Literatür taraması sonucu görüldüğü üzere enerji depolama konularında yapılan çalışmalarda depolama konusunda özellikle finansal hesaplamaların eksikliği görülmüş, yatırım yapıldığında elde edilebilecek getiri hesaplanmamıştır. Bu nedenle çalışmada rüzgar enerjisinin sürekliliği depolama ile sadece sağlanmış olmayacak, ayrıca yatırım sonucu üretici ve tüketici bakımından elde edilen kar hesaplanacak, üretim teknolojisinin bilinen sürekli olmaması dezavantajının kaldırılmasıyla bu enerjiye olan güvenin artmasını sağlayacaktır.

Bu amaçla çalışmada rüzgar enerji üretim tahmini miktarı hesaplandıktan sonra uygun depolama sistemleri seçilip, fiyat/performans karşılaştırılması ve üretici/müşteri için yarar-maliyet analizleri yapılmıştır. Ayrıca depolama sistemlerinin tahmini maliyeti ve amortisi de incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Kurulu yenilenebilir enerji santrallerinin yaygınlaşmaya başladığı son yıllarda bu enerji kaynaklarını depolama ve şebekede enerji sürekliliğini sağlama amacıyla enerji depolama konusuna ağırlık verilmekte ve bu konuda çalışmalar yapılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını modelleyerek bu sistemlere uygun depolama sisteminin kapasitesinin bulunması birçok çalışmada yapılmıştır. Strnad ve Skrllec (2013) yaptıkları çalışmada enerji üretiminde açığa çıkan karbondioksit miktarını ve üretim maliyetini en aza düşürmek için elektrik enerjisini çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak küçük boyutta farazi bir şebeke kurmuş, üretimini ve

depolanmasını modellenmiştir. Brekken ve diğ. (2011) en düşük maliyetli enerji depolama sistemini kurmayı amaçlayarak büyüklüğünü ve depolama sisteminin kontrol stratejisini belirlemişlerdir. Tek bir depolama sistemi seçilmiş çalışma bu sistem üzerinden yapılmıştır. Chen ve diğ. (2012) çalışmalarında rüzgar çiftliklerinin sürekli üretimi için depolama sitemlerini modelleyip boyutunu belirlemişlerdir. Ding ve diğ. (2012) güneş ve rüzgar enerji santrallerinin hava koşullarından dolayı sürekli olmayan üretimlerini depolama sistemleri ile süreklileştirmek amacıyla depolama sistemlerinin kontrol stratejisini belirleyecek modellemeyi yapmaya çalışmışlardır. Yine büyük boyutlu rüzgar santralleri için depolama sistemlerinin kontrolü için modelleme çalışmasını Weihua ve diğ. (2012) yapmıştır.

Çeşitli dağıtık enerji üretim teknolojilerinden oluşan şebekeler için depolama sistemleri karşılaştırılmış ve güç elektroniği yönüyle depolama konusuna bakılmıştır. Molina (2012) çeşitli dağıtık enerji üretim teknolojilerinden oluşan modellenmiş şebeke için depolama sistemlerini güç elektroniği yönünden karşılaştırmıştır. Jintao (2011) farklı bir bakış açısıyla dağıtık enerji üretim metodunu modellemek yerine dağıtık, taşınabilir enerji depolama sistemini düşünmüştür. Mundacka ve Varghese (2013) çalışmalarında depolama sistemlerini rüzgar enerjisine entegre ederek gerilim kararlılığı üzerinde çalışmışlardır. Zhenhua ve Xunwei (2009) de rüzgar enerji üretimi için depolama sistemlerinin modellemesi ve kontrolünü güç elektroniği bazında yapmışlardır. Wei ve Joos (2008) rüzgar uygulamalarında süper kapasitör dahil olmak üzere hibrit depolama sistemleri kullanarak modellemiştir.

Depolama sistemlerinin kendi içlerinde avantaj ve dezavantajları karşılaştırılarak uygun depolama sisteminin seçilmesi çalışmaları da mevcuttur. Yang ve diğ. (2008) rüzgar enerji santrallerinin etkili bir miktarda bulunduğu sistemlerde kullanılan enerji depolama sistemlerini ve Smith ve diğ. (2008) ise genel olarak şebekelerde kullanılan enerji depolama sistemlerini avantaj ve dezavantajlarına göre karşılaştırma çalışmaları yapmışlardır.

Gao ve diğ. (2010), Caralis ve Zervos (2010) var olan sisteme ekleme yapıldığında bu sistemin güvenilirliği ve rüzgar enerjisi ile depolama sistemlerinin birlikte çalıştığı durumlarda sistemin güvenilirliği hakkında çalışmalar yapmışlardır.

Hongliang ve diğ. (2012) batarya sisteminin modellenerek rüzgar enerjisi için uygun olan özelliklere sahip enerji depolama sistemi çalışmalarıdır.

Sadece rüzgar için değil diğer enerji sistemlerinde yapılan depolama çalışmalarında, depolama sisteminin karşılaştırılması ve kapasitesinin belirlenmesi ön plandadır. Güç elektroniğı bakımından yapılan modelleme ve karşılaştırmalar da mevcuttur. Ancak günümüze kadar yapılan çalışmalarda bu sistemlerin maliyet analizi yapılmamıştır. Yapılanlarda ise çeşitli depolama sistemleri maliyet bakımından karşılaştırılmamıştır. Enerji depolama sistemlerinin kurulmasından kaynaklanan, kullanılmayan enerjinin kullanılabilir enerji haline gelmesinden ortaya çıkan kazanç ise kurulum maliyeti ile karşılaştırılmamıştır.

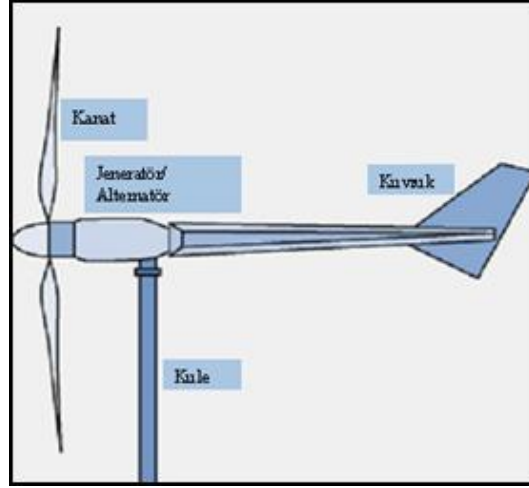
2. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgar atmosferdeki hava kütlelerinin hareketidir. Bu hareket atmosferdeki sıcaklık farkından meydana gelmektedir. Bu bakımdan rüzgar enerjisi de güneş enerjisinin doğrudan olmayan bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Rüzgar enerjisi tarihte ilk olarak mekanik enerji üretmek amaçlı yel değirmenleri şekli ile su pompalama ve tahıl üretmek için ilkçağda Akdeniz ve Doğu medeniyetlerinde, ortaçağda Avrupa’da kullanılmıştır. Rüzgardan direkt olarak elektrik üreten jeneratörlerin üretimi için 1940’larda deneyler yapılmış, bu türbinlerin günümüz şeklini alması enerji kriz döneminin yaşandığı 1970lere denk gelmektedir (Cassedy, 2000).

Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370 W/m^2 ’dir. Bu enerjinin büyük kısmı atmosferde tutulmaktadır. Ekvator dünyanın kutuplarına göre daha çok enerji çeker. Bu fark havada bir akıma neden olmaktadır. Dünyanın hareketinin de bu akımda önemli bir etkisi vardır. Rüzgarın bu hareketi kinetik enerjiyi oluşturmaktadır. Kinetik enerji ise rüzgar türbinleri ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgar türbinleri genel olarak iki veya üç kanatlıdır. Bu kanatlar yerden en az 30 metre yükseklikte bulunan kuleye bağlıdır. Günümüz teknolojisinde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinlerinde jeneratör de bu kulenin üstünde bulunmaktadır. Rüzgar, kanatlara çarptığında, kanatların açıları dolayısıyla alt ve üst kısımlarına düşük ve yüksek basınçlar etki eder. Bu basınç farkı kanatların hareketlenmesini sağlar (Schlager ve Weisblatt, 2006). Böylece rüzgar kütlelerinin hareketiyle oluşan kinetik enerji kanatlar ile rotora mekanik enerji olarak iletilir. Bu iletilen enerji jeneratöre geldiğinde ise elektrik enerjisi çıkışı alınmaktadır.

Basit bir rüzgar türbini Şekil 2.1’deki gibi olup kanat, kule, jeneratör ve kuyruktan oluşmaktadır (EİE, 2014). Sistemin tamamlayıcı elemanları da kurulan sistemin yapısına ve kurulum amacına göre değişmekle beraber kontrol ünitesi, invertör ve aküler kullanılabilir.



Şekil 2.1: Basit bir rüzgar türbininin yapısı.

Oluşan rüzgar enerji miktarını üç etken belirlemektedir. Bu etkenler havanın yoğunluğu, kanatların süpürdüğü alan ve rüzgar hızıdır. Hava yoğunluğu ise direkt olarak atmosfer basıncı ve sıcaklıkla alakalıdır.

Şebeke boyutunda yani elektrik şebekesine bağlı olan ve iletim/dağıtım hatlarıyla son kullanıcıya ulaşan sistemlerde 100 kW'dan daha büyük türbinler kullanılabilirken dağıtık, daha küçük sistemlerde direkt olarak evin, çiftliğin gibi bireysel tüketim amacıyla kurulmuş santrallerde 100 kW ve altı türbinler kullanılmaktadır.

Fosil yakıtların azaldığı ve karbon salımları nedeniyle çevre duyarlılığının arttığı dönemimizde rüzgar enerjisi temiz enerji kaynağı olması nedeniyle avantaj kazanmaktadır. Rüzgar enerjisi kaynağı bakımından temiz aynı zamanda bedava olan enerji kaynağıdır. Kaynağının yerel olması da ülkenin enerjide dışa bağımlılığını azaltan önemli bir etkendir. Ayrıca son yıllarda teknolojinin gelişmesi ve kullanımının artması ile ilk yatırım maliyeti düşmekte yatırımlar için fırsat haline gelmektedir. Rüzgar enerjisi ülkemizde büyük bir potansiyele sahip olup, devlet teşvikleri ile günümüzde en çok yatırım yapılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Rüzgar enerjisinin en büyük dezavantajı ise sürekli olmamasından kaynaklıdır.

Türkiye'de 2013 yılında 646,3 MW, 2014 yılında 803,65 MW rüzgar santrali kurulumu yapılmıştır. Yıllık kurulum miktarları Şekil 2.2'de kümülatif kurulum değeri ise Şekil 2.3'de gösterilmektedir (TUREB, 2015).



Şekil 2.2: Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri için yıllık kurulum.



Şekil 2.3: Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum.

3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Nüfus artışı ve sanayileşme sonucu enerji üretimi ve tüketimi artmakta olup kaynakların kısıtlı olmasından yenilenebilir enerjiye veya enerji verimliliğine yatırımlar artmıştır. Başka bir çözüm ise üretilen enerjinin daha etkin şekilde kullanılmasını sağlayan enerji depolamadır.

Enerji farklı şekillerde depolanabilir. Çalışmada gerekli olan depolama yöntemleri elektriksel enerji ile ilgili olanlardır. Elektriksel depolama yöntemlerinin bazıları şu şekildedir (Kocak ve Kozak, 2012):

- Süperkapasitörler: Geliştirilmiş kapasitörler olarak bilinir. Güç yoğunlukları daha yüksek olup deşarj süreleri daha hızlı, çevrim ömürleri ile daha uzundur.
- Süperiletken Manyetik Enerji Depolama: Süperiletken bobin içerisinden akan akım ile oluşan manyetik alanda depolama yöntemidir.
- Yakıt Hücreleri: Depolamada kimyasal tepkimeleri kullanırlar. An itibarı ile oldukça pahalı kalmaktadır.
- Lityum-iyon: Elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılan yöntemdir.
- Kurşun asit: En eski teknolojilerden biridir. Ömrü kısa olduğundan uygulaması sınırlıdır.
- Nikel-Kadmiyum: Verimlilikleri yaklaşık %75'tir. Kadmiyum zehirli bir madde olduğundan yaygın değildir.
- Volan: Kinetik enerjinin volan kütlelerinde depolama sistemidir. Ancak depolanabilen enerji miktarı düşüktür.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimle birlikte bu kaynakların büyük bir kısmının en büyük sorunu olan enerji kaynağının sürekli olmaması sorunu depolama sistemleri ile çözülmeye çalışılmaktadır. Elektrik enerjisi depolamasında kullanılan tüm depolama sistemleri yenilenebilir enerji için uyumlu değildir. Yapılan araştırmalar sonucu markette bulunan depolama sistemleri ve bu depolama sistemleri

hakkında teknik bilgi Çizelge 3.1’de verilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla uyumlu depolama sistemleri de kurşun asit akü, karbonla zenginleştirilmiş elektrotlu kurşun asit akü, sodyum sülfür akü ve vanadyum redoks aküdür. (Strnad ve Skrlec, 2013; Ted ve diğ., 2011; Molina, 2012; Gao ve diğ., 2010; Cui ve diğ., 2011; Poonpun ve Jewell, 2008).

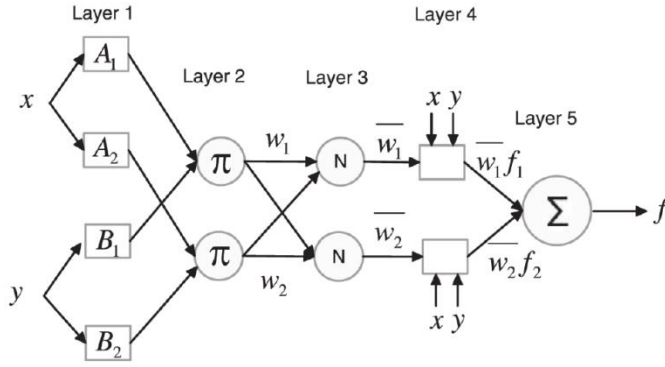
Çizelge 3.1 : Depolama kaynaklarının çeşitleri ve teknik bilgileri.

Teknoloji	Enerji Depolama Maliyeti (\$/kWs)	Güç Ek Ekipman Maliyeti (\$/kW)	Toplam Verimlilik (%)	Yaşam Ömrü (yıl)
Kurşun-Asit Akü (Advanced)	330	400	80	10
Sodyum Sülfür Akü	350	350	75	10
Karbonla zenginleştirilmiş elektrotlu kurşun-asit Akü	330	400	75	10
Çinko-Brom Akü	400	400	70	10
Vanadyum Redoks Akü	600	400	65	10
Lityum-ion Akü	600	400	85	10
Basınçlı Su	75	1200	85	60
Volan	1600	600	95	20
Süper Kapasitör	10000	500	95	12

4. ANFIS

Rüzgar santralleri şebekeye dahil olduğunda kontrolünü sağlamak amacıyla rüzgar hızı ve gücü için uzun ve kısa süreli tahminler yapılmaktadır. Çalışmada ise üretilen enerji maliyetini hesaplamak için öncelikle rüzgar enerji miktarının hesaplanması gerekmektedir. Rüzgar hızı veya enerjisinin tahmini için birçok yöntem kullanılmaktadır. Literatür taramalarında en çok karşımıza çıkan yöntemlerden bazıları şu şekildedir: Weibull dağılımı, sinir ağları, destek vektör makinesi ve klasik lineer modellerdir (Yu ve Tuzuner, 2008; Rizwan ve diğ., 2012; Castellani ve diğ., 2014; Al-Yahyai ve diğ., 2010; Kramer ve diğ., 2013).

Çalışmada üretilecek rüzgar enerjisinin tahminini yapmak için ANFIS kullanılmıştır. Bu model hem sinir ağlarını hem de bulanık mantığı bir arada bulundurur. Bulanık mantık verilerden elde edilen ilişki ve veriler arası kuralları daha iyi belirler ve sunar. Yapay sinir ağları modeli ise lineer olmayan sistemler için öğrenme sürecini kolaylaştırır. ANFIS lineer olmayan sistemlerde ve kaotik zaman serilerini tahmin etmede oldukça etkilidir (Mohandes ve diğ., 2011). ANFIS düğümlerden oluşur ve bu düğümler arasında bir ilgi vardır. Düğümlerin çıkışları değişken parametrelerle ilgilidir. ANFIS kullanılırken öncelikle eldeki verilerden öğrenme süreci vardır. Veriler sisteme girişler ve çıkış olarak sunulur. Aralarındaki ilişki ANFIS tarafından belirlenir. Kuralları ortaya koyar. Kurallar el ile de düzenlenebilir. ANFIS yapısında beş adet katman bulunmaktadır. İlk katman bulanıklaştırma katmanı olarak bilinir. ANFIS tarafından giriş değerleri bulanık kümelerle ayrılır. İkinci katman kural katmanıdır. Bu katmanda bulanık mantık çıkarım sistemine göre kurallar oluşturulur. Üçüncü katman değerlerin normalize edildiği katmandır. Bu katmana kadar gelen tüm değerleri giriş değeri olarak algılar. Dördüncü katman berraklaştırma katmanı olarak adlandırılır. Son katman ise toplam katmanıdır çıkış değerleri buradan elde edilir (Demirel ve diğ., 2010). Sistem modellenmesi Şekil 4.1’de gösterilmiştir (Çıkrıkçılı, 2013).



Şekil 4.1: İki girişli bir çıkışlı ve 2 kurallı ANFIS yapısı.

Çalışmada girdiler rüzgar hızı ve hava yoğunluğu çıktısı ise rüzgar gücüdür. Rüzgar hızı 2008 – 2011 yılları arasında önceden yapılmış bir çalışmadan alınmıştır. Sonraki bölümlerde detaylandırılacaktır. Hava yoğunluğu ise nem, sıcaklık ve nem faktörleri aynı seneler için Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nden sağlanmıştır. Urla için elde edilen rüzgar hızlarına karşı nem, sıcaklık ve nem faktörleri aynı ilçe içerisinde bulunamamıştır. Urla ilçesi, Çeşme, İzmir ve Seferhisar ilçelerinin ortasında bulunduğundan ilçe için gerekli bilgiler bu üç ilçenin datalarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Giriş verilerinin bir kısmı örnek amaçlı **Çizelge 4.1**’de gösterilmektedir. Nem düzeltme faktörü atmosfer basıncına ve sıcaklığa bağlıdır. **Çizelge 4.2**’de sıcaklık, atmosfer basıncı ve nem düzeltme faktörü arasındaki ilişki görülmektedir. Çizelge dışındaki değerler için regresyon yapılmıştır.

Çizelge 4.1 : ANFIS girdileri örnek verileri.

			ORTALAMA 2010	ORTALAMA 2011	ORTALAMA 2010	ORTALAMA 2011	ORTALAMA 2010	ORTALAMA 2011
Ay	Gun	Saat	Ort, Nem (%)	Ort, Nem (%)	Sıcaklık (°C)	Sıcaklık (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Hızı (m/s)
1	1	0	66	81	17	4	15,544	8,230
1	1	1	64	82	17	3	19,298	6,875
1	1	2	66	79	16	4	18,850	8,334
1	1	3	64	83	17	3	19,705	8,727
1	1	4	66	83	17	2	21,252	10,416
1	1	5	66	82	17	2	19,754	10,460
1	1	6	66	79	17	3	19,083	8,217
1	1	7	65	68	18	6	20,155	7,506
1	1	8	59	57	19	9	20,484	6,940
1	1	9	57	53	20	11	20,063	7,074
1	1	10	56	52	21	11	18,942	7,467
1	1	11	57	50	21	11	25,420	7,768

Çizelge 4.2 : Sıcaklık ve atmosfer basıncına bağlı hava yoğunluğu (kg/m³).

Sıcaklık	Atmosfer Basıncı (mbar)												Nem Düzeltme Faktörü A (kg/m ³)
°C	930	940	950	960	970	980	990	1000	1010	1020	1030	1040	
15	1,1247	1,1368	1,1489	1,161	1,1731	1,1852	1,1973	1,2094	1,2215	1,2336	1,2457	1,2578	-7,77.10 ⁻³
16	1,1208	1,1329	1,145	1,157	1,1691	1,1811	1,1932	1,2052	1,2173	1,2294	1,2414	1,2535	-8,25.10 ⁻³
17	1,117	1,129	1,141	1,153	1,165	1,177	1,1891	1,2011	1,2131	1,2251	1,2371	1,2491	-8,77.10 ⁻³
18	1,1131	1,1251	1,1371	1,149	1,161	1,173	1,185	1,1969	1,2089	1,2209	1,2329	1,2448	-9,30.10 ⁻³
19	1,1093	1,1212	1,1332	1,1451	1,157	1,169	1,1809	1,1928	1,2048	1,2167	1,2286	1,2406	-9,87.10 ⁻³
20	1,1055	1,1174	1,1293	1,1412	1,1531	1,165	1,1769	1,1887	1,2006	1,2125	1,2244	1,2363	-10,47.10 ⁻³
21	1,1017	1,1136	1,1254	1,13,73	1,1491	1,161	1,1728	1,1847	1,1965	1,2084	1,2202	1,2321	-11,09.10 ⁻³
22	1,098	1,1098	1,1216	1,1334	1,1452	1,157	1,1689	1,1807	1,1925	1,2043	1,2161	1,2279	-11,75.10 ⁻³
23	1,0943	1,1061	1,1178	1,1296	1,1414	1,1531	1,1649	1,1767	1,1884	1,2002	1,21	1,2238	-12,45.10 ⁻³
24	1,0906	1,1023	1,114	1,1258	1,1375	1,1492	1,161	1,1727	1,1844	1,1962	1,2079	1,2196	-13,18.10 ⁻³
25	1,0869	1,0986	1,1103	1,122	1,1337	1,1454	1,1571	1,1688	1,1805	1,1921	1,2038	1,2155	-13,94.10 ⁻³

ANFIS modelinde eğitime amaçlı kullanılacak çıkış bilgisi ise rüzgar hızı ve nem, nem düzeltme faktörü ile sıcaklık ile bulunan hava yoğunluğu kullanılarak hesaplanan rüzgar gücüdür. Bu hesaplamada kullanılan formül 6. Bölümde 6.1 olarak formülize edilmiştir. C_p değeri yapılan rüzgar hızının alındığı çalışmada 0.4 olarak belirlenmiştir. Örnek data Çizelge 4.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 : Rüzgar gücü hesabı örnek data seti.

Rüzgar Hızı (m/s)	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Hesaplanan Güç (W)	Kapasite faktör ile $C_p=0.4$
4.931	1.179	70.671	28.268
4.467	1.179	52.544	21.018
4.469	1.179	52.630	21.052
5.036	1.179	75.308	30.123
5.191	1.179	82.464	32.986
6.851	1.179	189.567	75.827
8.439	1.171	351.892	140.757
8.674	1.171	382.058	152.823
7.433	1.171	240.414	96.166
6.078	1.171	131.436	52.574
5.934	1.171	122.304	48.922
6.689	1.163	174.060	69.624
7.297	1.159	225.117	90.047
7.162	1.155	212.149	84.860
7.002	1.155	198.269	79.308
6.606	1.151	165.949	66.380
7.275	1.147	220.856	88.342
8.736	1.155	385.116	154.046
7.175	1.155	213.319	85.328
6.855	1.155	186.042	74.417
6.628	1.170	170.308	68.123
6.372	1.170	151.297	60.519
6.990	1.170	199.751	79.900
7.602	1.163	255.455	102.182
8.337	1.170	338.888	135.555
10.551	1.170	686.803	274.721
10.454	1.170	668.198	267.279

5. PSAT

Güç sistemleri karmaşık fizik problemlerinden ve detaylı matematik modellerinden oluşmaktadır. Matematiksel denklemlerin çözümündeki zorluk güç sistemlerini modellemede de zorluğa neden olmaktadır. Bu nedenle güç sistemlerini çözmek için bir çok yazılım programları geliştirilmiştir. Bu programların en büyük sorunları kaynak kodlarının değiştirilememesi, daha detaylı programların lisanslı ve ücretli olmasıdır. PSAT bu sorunlara karşı Dr. Federico Milano tarafından hazırlanmış yazılım programıdır (Vanfretti and Milano, 2008). Ücretsiz olması nedeniyle üniversitelerde ve güç sistemleri ile ilgili yapılan araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

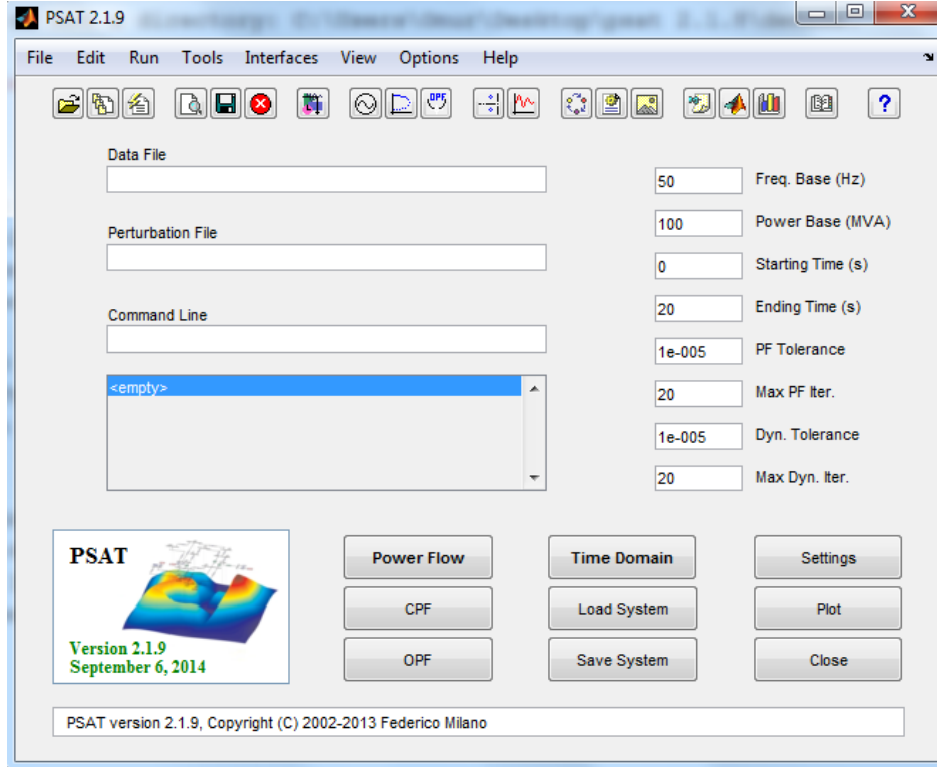
<http://faraday1.ucd.ie/psat.html>,
<http://thunderbox.uwaterloo.ca/~fmlano> veya <http://www.power.uwaterloo.ca>
linkleri kullanılarak indirilebilir.

Bir MATLAB aracı olan PSAT aracı elektrik güç sistemlerinin analizleri ve kontrolü için kullanılır. Psat ile yapılabilen bazı analizler şu şekildedir:

- Sürekli güç akışı
- Optimal güç akışı
- Küçük sinyal kararlılık analizi
- Zaman etki simülasyonu

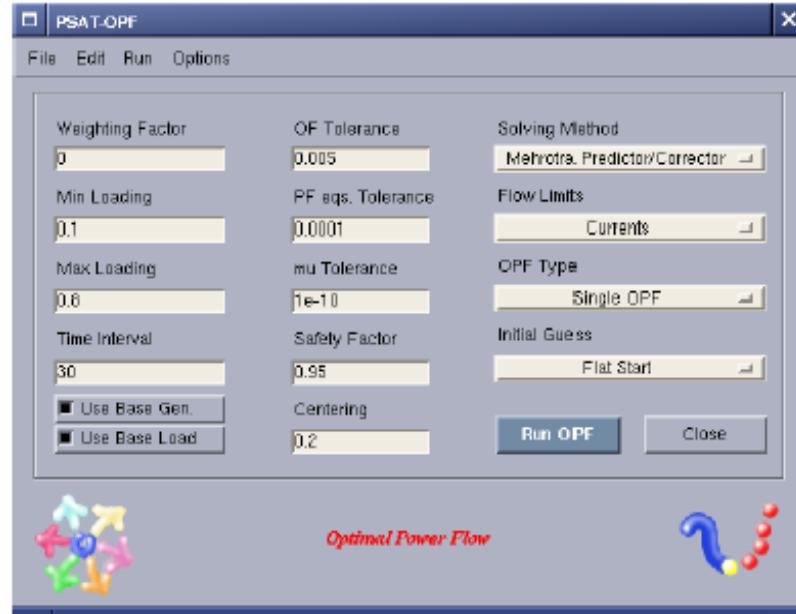
Ayrıca Psat içerisinde statik ve dinamik elemanların modelleri mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

- *Güç akışı dataları:* bara çubukları, iletim hatları ve trafoları, gevşek baralar vs.
- *Sürekli ve optimal güç akışları:* üretici ve tüketici güç limitleri
- *Anahtarlama operasyonları:* iletim hattı hataları ve iletim hattı kesicileri
- *Ölçüm:* bara frekans ve faz ölçüm üniteleri



Şekil 5.2: PSAT ana kullanıcı ekranı.

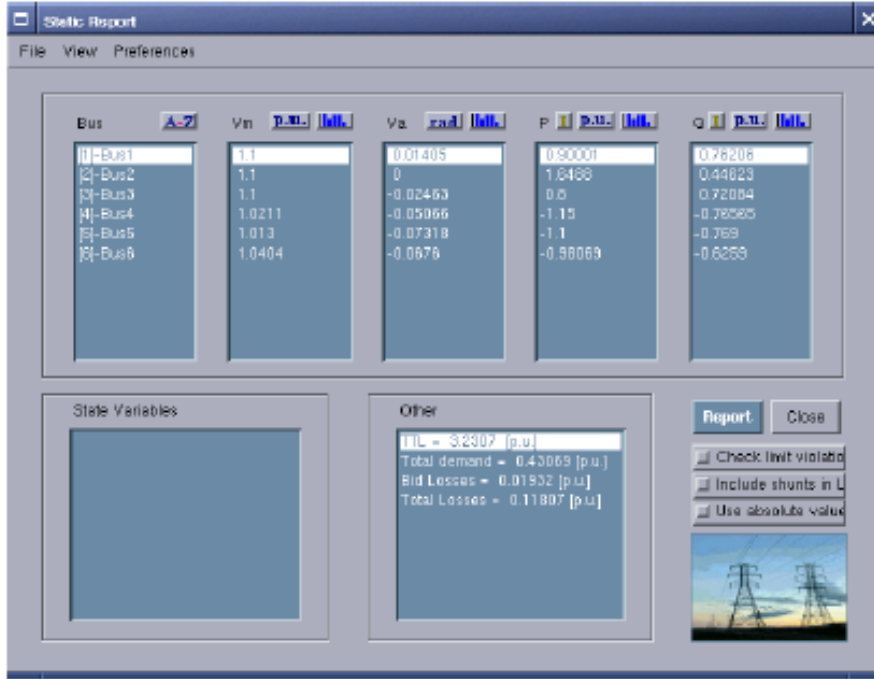
PSAT programında yapılabilecek güç akışı yöntemlerinden biri olan optimum güç akışı çalışmada kullanılmıştır. İçerisinde gömülü üç farklı amaç fonksiyonu bulunan PSAT'ta optimum güç akışı için kullanılan ayarlar Şekil 5.3'teki gibidir.



Şekil 5.3: PSAT – OPF seçenek ekranı.

PSAT OPF çözümü için IEEE 6 baralı sistemi örnek olarak gösterilmiştir (Milano, 2005). IEEE 6 barası ile ilgili bilgiler Ek A’da bulunmaktadır.

IEEE 6 barası için OPF sonuç raporu ve şebeke bilgileri Şekil 5.4, Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3’te bulunmaktadır.



Şekil 5.4: IEEE 6 bara için OPF çözümü.

Çizelge 5.1 : IEEE 6 baralı sistemin şebeke komponentleri.

Şebeke İstatistikleri	
Bara sayısı	6
Hat sayısı	11
Generatör sayısı	3
Yük sayısı	3
Besleme	3
Talep	3

PSAT’ta yapılan OPF sonucu baralardaki durumlar, iletim hatlarında baralar arası akım, kayıplar belirlenmiştir.

Çizelge 5.2 : IEEE 6 barada optimum güç akışı sonuçları.

Yük akışı sonuçları						
	P	Q	rho P	rho Q	NCP	Pay
	[MW]	[MVar]	[\$/MWh]	[\$/MVarh]	[\$/MWh]	[\$/h]
Bara 1	90.001	44.6233	9.0204	0	-0.04872	-812

Çizelge 5.2 (devam) : IEEE 6 barada optimum güç akışı sonuçları.

Bara 2	164.8754	76.206	8.9805	0	0	-1481
Bara 3	80	72.0844	9.1455	0	0.07648	-732
Bara 4	-115	-76.665	9.563	0.39306	0.20737	1100
Bara 5	-110	-77	9.6535	0.40762	0.29043	1062
Bara 6	-98.0693	-62.6898	9.4284	0.21472	0.23945	925

Çizelge 5.3 : IEEE 6 barada iletim hatlarında optimum güç akışı.

İletim hatlarında yük akışı sonuçları				
Baradan	Baraya	I_{ij} [p.u.]	$I_{ij} \max$ [p.u.]	μI_{ij}
Bara 2	Bara 3	0.11693	0.3082	0
Bara 3	Bara 6	0.731	1.3973	0
Bara 4	Bara 5	0.07148	0.1796	0
Bara 3	Bara 5	0.33729	0.6585	0
Bara 5	Bara 6	0.11578	0.2	0
Bara 2	Bara 4	0.84775	1.374	0
Bara 1	Bara 2	0.08127	0.2591	0
Bara 1	Bara 4	0.49408	0.9193	0
Bara 1	Bara 5	0.39214	0.8478	0
Bara 2	Bara 6	0.4327	0.9147	0
Bara 2	Bara 5	0.35683	0.7114	0
Bara 3	Bara 2	0.10451	0.3082	0
Bara 6	Bara 3	0.74506	1.3973	0
Bara 5	Bara 4	0.06342	0.1796	0
Bara 5	Bara 3	0.36729	0.6585	0
Bara 6	Bara 5	0.0635	0.2	0
Bara 4	Bara 2	0.8581	1.374	0
Bara 2	Bara 1	0.06232	0.2591	0
Bara 4	Bara 1	0.51836	0.9193	0
Bara 5	Bara 1	0.42224	0.8478	0
Bara 6	Bara 2	0.45115	0.9147	0
Bara 5	Bara 2	0.3779	0.7114	0

6. YÖNTEM

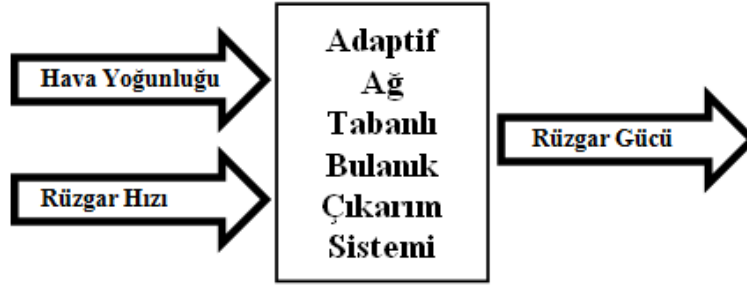
Çalışmada üretilen ancak kullanılamayan enerjinin kurulacak depolama sistemi ile karşılaştırılması, tüketici ve üretici açısından yararları araştırılmaktadır. Çalışma üç ana bölüme ayrılmıştır.

6.1 Üretilecek Rüzgar Enerjisinin Tahmini

Üretilen enerji maliyetini hesaplamak için öncelikle rüzgar enerji miktarının hesaplanması gerekmektedir. Bu bilgi ANFIS programlaması için hesaplanmış sonuç olarak kullanılacaktır. Rüzgar gücü aşağıdaki formülde gösterildiği gibi havanın yoğunluğu, rüzgar hızı, türbinin süpürdüğü alan ve kapasite faktörü ile hesaplanmaktadır. Formülde ρ hava yoğunluğu, kg/m^3 , A süpürülen alan, m^2 , V rüzgar hızı, m/s , C_p kapasite faktörü'dür **(6.1)** (Ackermann, 2005).

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \quad (6.1)$$

Rüzgar hızı bilgileri İzmir'in Urla İlçesi'nde kurulan ölçüm kulesinin 2008 – 2011 yılları arasında on dakikada bir aldığı datalardan sağlanmıştır. Hava yoğunluğu ise hava sıcaklığı ve nem ile doğrudan bağlantılı olduğu için Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden aynı yıllarda saatlik olarak alınmıştır. Bu datalara göre nominal hızda en uygun rüzgar türbini seçilmiş, türbinin veri sayfasına göre üretebileceği rüzgar gücü bulunmuştur. Rüzgar hızına ve hava yoğunluğuna bağlı rüzgar gücünü bulmak için MATLAB programının ANFIS aracı kullanılmıştır. Programın girdileri hava yoğunluğu ve rüzgar hızı olarak belirlenir. Türbinin hızlara bağlı üretim gücü ise çıktı olarak programa girilir. Çıktıyı hesaplamak için oluşturulan kuralları belirlemek amacıyla girdi ile çıktı arasındaki bağlantıyı sisteme öğretmek amacıyla kullanılmaktadır. Datalar programda normalize edilmiş şekilde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ANFIS modeli Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1: ANFIS modeli.

6.2 Üretilen ve Kullanılmayan Enerji

Rüzgar hızı datalarına bağlı olarak oluşan rüzgar hızı profiline göre uygun türbin seçilmiş, türbinin üretim yapabildiği rüzgar hızı aralığına göre üretim süresi belirlenmiştir. Rüzgar gücü ve üretim süresi ile üretilen rüzgar enerjisi hesaplanmıştır. Üretilen enerjinin maliyeti ise Türkiye’de geçerli olan günü üçe bölen gündüz, gece ve puant saatleri elektrik fiyatlarına göre hesaplanmıştır (Schoenung, 2011).

Şebeke analizinde optimum güç akışı kullanılmıştır. Bu analizde kontrol denklemleri salınım barası dışındaki generatörlerin aktif güçleri, generatör barası gerilim genlikleri, reaktif güç üreteçlerinin reaktif güçleri, kademe ayarları ve faz dönüştürücü transformatörlerin faz dönüştürme açıları olabilmektedir. Kısıtlar ve sınır denklemleri dallardaki aktif, reaktif güç akışları, akım denklemleri, gevşek bara dışındaki baraların gerilim limitleri, besleme kapasite limitidir. Amaç fonksiyonu ise rüzgar enerjisinin şebekede bozunuma sebep olmayacak şekilde maksimum değerde şebekeye verilmesi ve bu yöntemle de maliyetin maksimize edilmesidir. Bu aşamada MATLAB programının PSAT aracı kullanılacaktır.

PSAT güç sistemleri analizi ve kontrolünde kullanılabilen bir araçtır ve optimum güç akışı, küçük sinyal kararlılık analizi, zaman etki simülasyonu yapabilmektedir. Program içine gömülü olan IEEE tarafından hazırlanan test şebekeleri üzerinde çalışılabildiği gibi yeniden bir şebeke oluşturulmasına izin vermektedir.

Bu çalışmada ise her mevsim için tipik günlerde saatlik enerji tahminleri şebekeye tek tek saatlik girilmiş bu saatlerdeki tüketiciye yansıyan elektrik fiyatları da sisteme eklenmiştir. Rüzgar enerjisi ve diğer üretim kaynaklarının birim enerji başına üretim

maliyetleri ise TEİAŞ'ın verilerinden alınmıştır ve Çizelge 6.1'de gösterilmektedir. (TEİAŞ, 2014).

Çizelge 6.1 : Farklı enerji kaynaklarının üretim maliyetleri.

Üretim maliyetleri		
Üretim Maliyetleri	c\$/kWh	\$/MWh
Kömür	5,8	58
Doğalgaz	4,9	49
Biyokütle	6,1	61
Nükleer	7,3	73
Rüzgar	6	60
Güneş	29,9	299
Jeotermal	6,3	63
Hidroelektrik	12,1	121

Tüketici için elektrik fiyatları 1 Temmuz 2014 tarihinde yine TEDAŞ'tan alınmıştır. Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'te dağıtım seviyesindeki tüketiciler için elektrik tarifeleri ve tarife periyotları bulunmaktadır (TEDAŞ, 2014).

Çizelge 6.2 : Dağıtım seviyesindeki tüketicilerin elektrik tarifeleri.

Aktif Enerji				Reaktif Enerji	
Tek Zamanlı	Gündüz	Puant	Gece		
kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kWh	kr/kVARh	
20,9378	20,8186	35,0590	10,5470	10,3597	kr/kWh
95,1718	94,6300	159,3591	47,9409	47,0896	\$/MWh

Çizelge 6.3 : Elektrik fiyatı periyotları.

Tarife periyotları		
Tarife	Başlangıç Saati	Bitiş Saati
Gündüz	06:00	17:00
Puant	17:00	22:00
Gece	22:00	06:00

6.3 Kullanılacak Enerji Depolama Sistemleri

Çalışmada kullanılmayan enerji, depolama yöntemi ile saklanıp kullanılabilir hale getirilecektir. Bu amaçla şebekede kullanılabilir, markete ulaşılabilecek veya inşası yapılabilecek enerji depolama sistemleri araştırılmış ve maliyet karşılaştırılması yapılmıştır (Strnad ve Skrlec, 2013; Ted ve diğ., 2011; Molina, 2012; Gao ve diğ., 2010; Cui ve diğ., 2011; Poonpun ve Jewell, 2008). Bu maliyet analizinde depolama sisteminin kurulmasında kullanılacak olan her türlü malzeme fiyatı ve enerji depolama teknolojisinin kendi maliyeti göz önünde bulundurulmuştur.

6.3.1 Boyutunun belirlenmesi

Üretilen rüzgar enerjisinden herhangi bir bozunuma sebep olmadan şebekeye dahil olan rüzgar enerjisi miktarı çıkarılarak hesaplanan üretilen ve kullanılmayan enerjinin miktarı depolama sisteminin kapasitesini ve gücünü belirlemek için kullanılmaktadır.

Belli bir saatte maksimum kullanılmayan güç miktarı enerji depolama sisteminin güç değerini, gün boyunca ortaya çıkan maksimum kullanılmayan enerji miktarı ise enerji depolama sisteminin boyutunu belirlemektedir.

Yapılan çalışmada edinilen verilere göre bir yıl içerisinde en düşük yükün gerçekleştiği yani açıkta kalan enerjinin en fazla olduğu anın olduğu zaman bu miktar 1728 kW olarak gözlemlenmiştir. Bir gün boyunca kullanılmayan maksimum enerji miktarı da 13,812 MWh olarak bulunmuştur. Verimlilikleri de düşünülerek depolama sisteminin gücü ve kapasitesi bu bilgiler ışığında bulunacaktır.

6.3.2 Maliyetinin hesaplanması

Depolama sistemlerinin yıllık masrafını bulmak için sistem ömrü boyunca yapılacak yatırım maliyetinin günümüzdeki değeri hesaplanmıştır. Toplam maliyet için sistemde kullanılacak güç elektroniği malzemeleri, depolama parçalarının maliyeti, sistemin elektrik işleri gibi diğer harcamalarda göz önünde bulundurulmuştur.

Depolama sistemi için kullanılan maliyet denklemleri aşağıda verilmiştir.

- Güç Elektroniği Ekipmanlarının Toplam Maliyeti (TGEM):

$$TGEM = \text{Depolama sisteminin gücü}(kW) \times \text{Birim maliyet } (\$/kW) \quad (6.2)$$

- Depolama Malzemesi Toplam Maliyeti (TDMM):

$$TDMM = \text{Birim maliyet} \left(\frac{\$}{kWh} \right) \times \frac{\text{Depolama sistemi kapasitesi } (kWh)}{\text{Verimlilik}} \quad (6.3)$$

-Ek Ekipman Maliyeti (STM):

$$STM = \text{Birim maliyet} \left(\frac{\$}{kWh} \right) \times \frac{\text{Depolama sistemi kapasitesi } (kWh)}{\text{Verimlilik}} \quad (6.4)$$

-Toplam Yatırım Maliyeti (TYM):

$$TYM = TGEM + TDMM + STM \quad (6.5)$$

-Yatırım Maliyetinin Yıllık Eşdeğeri:

$$YİYM = TYM * \text{Anüite Faktörü} \quad (6.6)$$

$$\text{Anüite Faktörü} = \frac{i(1+i)^z}{(1+i)^z - 1} \quad (6.7)$$

i sabit bedel, z yılı ifade etmektedir.

Depolama sisteminin kullanımı boyunca ömrü tükendiği dönemlerde değiştirilmesi gerekmektedir. Günlük kullanım sayısı n, yıllık kullanım gün sayısı D ve ömrü boyunca doldurma/boşaltma devri düşünüldüğünde kaç senede ömrünü tüketeceğini r ve değiştirilmesi gerektiği bulunabilmektedir. Bu değer ile değişimden kaynaklanan maliyeti bulabiliriz.

$$r = \frac{\text{Ömrü boyunca dolup boşalma devri } (C)}{n \times D} \quad (6.8)$$

Depolama malzemesi yenilemenin yıllık maliyeti (DYM) gelecekte ödenecek depolama masrafının önce bugüne sonra depolama malzeme maliyetinin yıllık değere indirilmesi ile bulunur:

$$DYM = TDMM \times [(i + 1)^{-r} + (i + 1)^{-2r} + \dots] \times \text{Anüite Faktörü} \times \frac{\text{Depolama sistemi kapasitesi } (kWh)}{\text{Verimlilik}} \quad (6.9)$$

-Yıllık işletim ve bakım masrafı (İBM):

$$\dot{I}BM = \text{Birim maliyet} \left(\frac{\$}{kW} \right) \times \text{Depolama sisteminin gücü (kW)} \quad (6.10)$$

-Toplam yıllık maliyet (TYM):

$$TYM = YİYM + \dot{I}BM + DYM \quad (6.11)$$

Poonpun ve Jewell (2008) yaptıkları çalışmalarda belli büyüklükteki depolama sistemlerinin maliyetlerini belirlemişlerdir. Bu değerler Çizelge 6.4, 6.5, 6.6 ve 6.7’de görülmektedir.

Çizelge 6.4 : 10000 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.

Parametreler	LA	VRLA	Na/S	VB
Çıkış Gücü (kW)	10000	10000	10000	10000
Verimlilik	0.75	0.75	0.77	0.7
Güç elektroniği birim maliyeti (\$/kW)	125	125	833	
Depolama ünitesi birim maliyeti (\$/kWh)	305	360	208	500
Tamamlayıcı üniteler birim maliyeti (\$/kWh)	150	150	0	30
Sabit işletme ve bakım maliyeti (\$/kW)	15	5	20	20
Ünite değiştirme maliyeti (\$/kWh)	305	360	208	150

Çizelge 6.5 : 2500 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.

Parametreler	LA	VRLA	Na/S	VB
Çıkış Gücü (kW)	2500	2500	2500	2500
Verimlilik	0.75	0.75	0.77	0.7
Güç elektroniği birim maliyeti (\$/kW)	175	175	1000	
Depolama ünitesi birim maliyeti (\$/kWh)	305	360	500	740
Tamamlayıcı üniteler birim maliyeti (\$/kWh)	50	50	0	30
Sabit işletme ve bakım maliyeti (\$/kW)	15	5	20	20
Ünite değiştirme maliyeti (\$/kWh)	305	360	500	222

Çizelge 6.6 : 6000 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.

Parametreler	LA	VRLA	Na/S	VB
Çıkış Gücü (kW)	6000	6000	6000	6000
Verimlilik	0.75	0.75	0.77	0.7
Güç elektroniği birim maliyeti (\$/kW)	148	148	922	

Çizelge 6.6 (devam) : 6000 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri

Depolama ünitesi birim maliyeti (\$/kWh)	305	360	364	628
Tamamlayıcı üniteler birim maliyeti (\$/kWh)	97	97	0	30
Sabit işletme ve bakım maliyeti (\$/kW)	15	5	20	20
Ünite değiştirme maliyeti (\$/kWh)	305	360	364	222

Yapılan çalışmada gerekli olan depolama sistemi boyutu 6.3.1. bölümünde 1728 kW olarak hesaplanmıştır. Kullanılabilecek depolama sistemlerinin birim maliyetleri yukarıdaki çizelgelerden regresyon yoluyla yararlanılarak hesaplanmış ve Çizelge 6.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.7 : 1728 kW çıkış güçlü depolama sistemlerinin birim maliyetleri.

Parametreler	LA	VRLA	Na/S	VB
Çıkış Gücü (kW)	1728	1728	1728	1728
Verimlilik	0.75	0.75	0.77	0.7
Güç elektroniği birim maliyeti (\$/kW)	181	181	1017	
Depolama ünitesi birim maliyeti (\$/kWh)	305	360	529	628
Tamamlayıcı üniteler birim maliyeti (\$/kWh)	40	40	0	30
Sabit işletme ve bakım maliyeti (\$/kW)	15	5	20	20
Ünite değiştirme maliyeti (\$/kWh)	305	360	364	222

7. UYGULAMA VE SONUÇLARI

Çalışmada ANFIS uygulaması ile yapılan rüzgar enerjisi tahmini IEEE 14 baralı sisteme kurulu gücü 9 MW olan rüzgar santrali dahil edilmiştir. 2008 – 2011 yılları arasında yapılan Urla’da yapılan çalışma sonucu elde edilen rüzgar hızı verilerinin incelenmesi sonucu rüzgar hızının ortalama olarak uzun süre görüldüğü değer 9 m/s rüzgar hızında en yüksek verimlilikte çalışan türbin rüzgar hızı – güç grafiğine göre seçilmiştir (Enercon, 2014). Türbin özellikleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

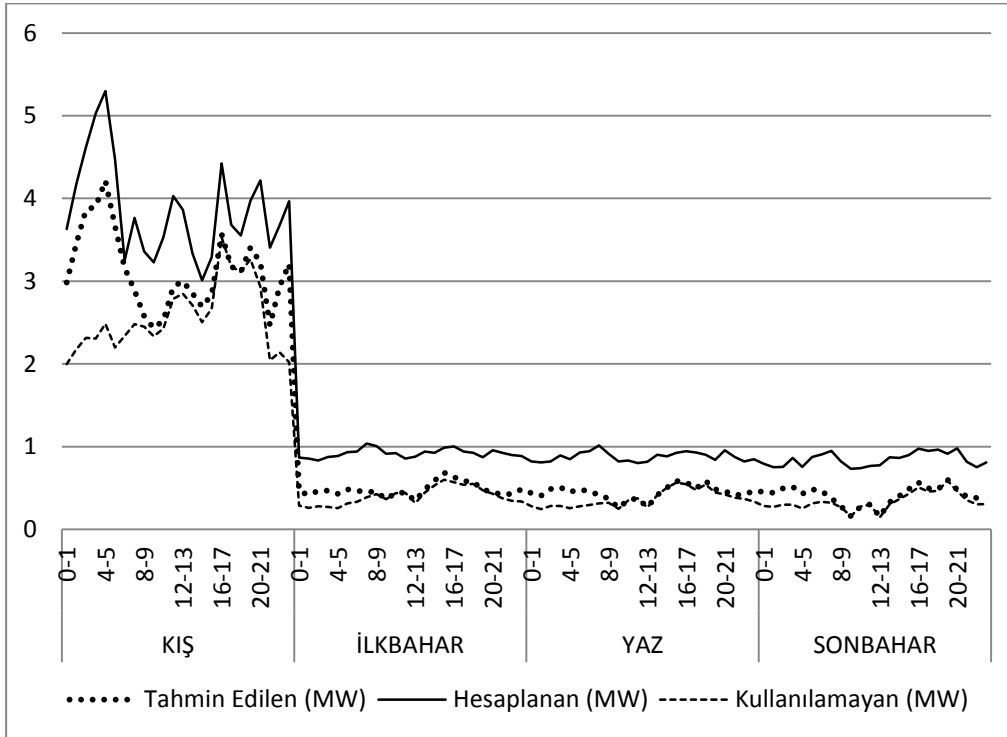
Çizelge 7.1 : Rüzgar türbininin özellikleri.

Özellikler	
Güç	900 kW
Başlama hızı	3,5 m/s
Durma hızı	28 m/s
Rotor çapı	44 m
Kanat sayısı	3
Taradığı alan	1,521 m ²

Rüzgar tahmininde ANFIS aracı kullanılmıştır. Programda Urla bölgesi için elde edilen rüzgar hızları datalarının %66’ı olan 5187’si programı eğitmek %34’ü olan 3573’ü ise test amaçlı kullanılmıştır. Araçta eksiltici kümeleme kullanılmıştır. Bu yöntem datalarda kümelemenin tam olarak bilinmediği durumlarda kullanılmakta olup devir sayısı üç olarak belirlenmiştir. Bu seçimlerle hata payı 0.037475 olarak çıkmaktadır. Modelde iki giriş, bir çıkış datası vardır. Model tarafından bu ilişki üç kural ile belirlenmiştir.

Rüzgardan elde edilebilecek enerji miktarının tahmini yapıldıktan sonra bu enerjinin verileceği şebeke ve şebeke yükleri belirlenmiştir. Model 14 baralı test sisteminde kullanılmıştır. 14 baralı sistem EK B’de verilmiştir. Modelde bulunan rüzgar enerjisi tahminini yaptığımız 10 adet 900 kW’lık rüzgar enerji santrali ile sağlanmaktadır. Rüzgar enerjisinin şebekede verimli kullanılması amacıyla rüzgar enerjisinin olabilecek en yüksek düzeyde sisteme verilmesi dolayısıyla rüzgar enerjisinin maliyetinin artırılması amaçlanmıştır.

ANFIS aracı kullanılarak yapılan rüzgar tahmini sonucu ve hesaplama yöntemiyle bulunmuş rüzgar gücü Şekil 7.1’de gösterilmiştir. PSAT sonucu olarak ortaya çıkan kullanılamayan enerji ile detaylı bilgi EK C’de verilmiştir. Bu iki değerin R^2 , yani doğruluk oranı 0,9884’tür. Doğruluk oranı belirtme katsayısı olarak da bilinir. Bağımsız değişkenin bağımlı değişkendeki değişimin yüzde kaçını açıkladığını gösterir. Bu tablodan ortaya çıkan başka bir sonuç ise üretilen ancak teknik kısıtlamalar nedeniyle kullanılamayan enerji miktarıdır. Belli bir saatte kullanılamayan maksimum güç depolama sisteminin güç değerini, gün boyu kullanılamayan enerji ise depolama enerji kapasitesini belirlemiştir. Yıl boyu toplam kullanılamayan enerji miktarı ve rüzgar enerjisiyle üretilen bu enerjinin maliyeti depolama sisteminin kurulumuyla karşılaştırılmak için kullanılmıştır. Depolama sisteminin maliyeti sistemin kullanım süresince kurulum, kullanım ve yenileme maliyetleri göz önünde bulundurularak finansal denklemlerle yıllık baza indirilmiştir. Şebekede kullanılamayan rüzgar enerjisi ve maliyeti Çizelge 7.2’de, alternatif depolama sistemleri ve maliyetleri de Çizelge 7.3’de gösterilmektedir.



Şekil 7.1: Üretileceği tahmin edilen, hesaplanan ve kullanılamayan enerjinin karşılaştırılması.

Çizelge 7.2 : Şebekede kullanılamayan rüzgar enerjisi ve maliyeti.

Yıl içerisinde kullanılamayan en büyük güç PESS	1,728 MW
Belirli bir gün içerisinde kullanılamayan maksimum enerji EESS	13,812 MWh
Toplam üretilen enerji miktarı	1776,737 MWh
Yıllık toplam kullanılamayan enerji maliyeti (million dollar)	0,106604

Çizelge 7.3 : Alternatif depolama sistemleri ve maliyetleri.

Teknoloji	Verimlilik	Güç (kW)	Kapasite (MWh)	ESS yıllık kurulum maliyeti (milyon \$)
LA	0,75	1728	18,416	1,36
VRLA	0,75	1728	18,416	1,62
Na/S	0,77	1728	17,938	2,16
VRB	0,7	1728	19,731	1,49

ANFIS ve PSAT araçlarıyla yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkan verilere göre hazırlanan depolama sistemlerinin yatırım sonuçları aşağıdaki çizelgelerde gösterilmektedir. Depolama sistemi kullanılarak hatlarda elektrik kaybının azaldığı açıkça görülmektedir. Şebeke kullanıcısı bakımından elektrik üretiminden yansıyan kar ise elektriğin rüzgar enerjisi ile daha ucuza elde edilmesiyle ilişkili olup Çizelge 7.4’de gösterilmiştir. Üretici bakımından ise yine daha ucuza elektrik ürettiklerinde elde ettikleri gelir hesaplanmıştır. Üretici bakımından depolamanın karı Çizelge 7.5’te gösterilmektedir. Ayrıca üretilen ama kullanılamayan enerjinin kullanılabilir hale gelmesi üretici bakımından büyük avantaj sağlamaktadır. Bu değerler Şekil 7.2’de karşılaştırılmıştır.

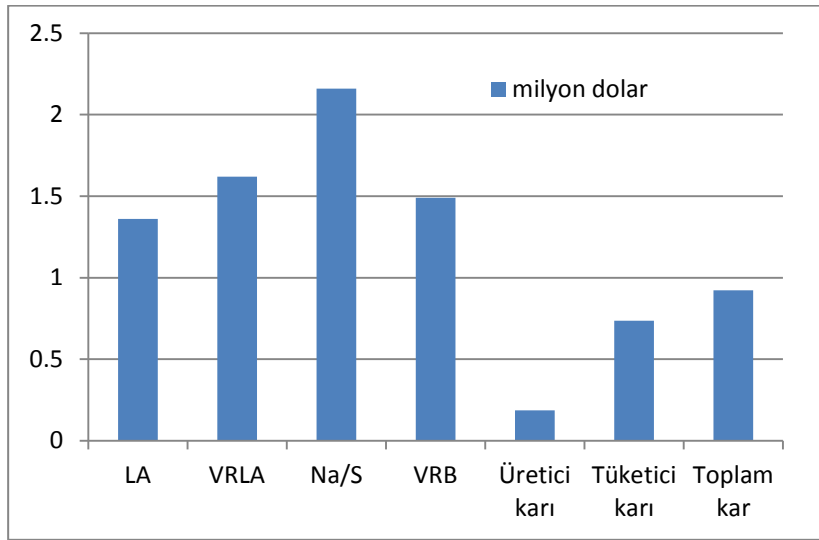
Çizelge 7.4 : Tüketici bakımından depolamanın yararı.

Şebeke Kullanıcı Bakımından Depolama Sistemi	
Elektrik üretiminde yansıyan kar	\$ 0.00710
Kayıplarda azalma (MW)	0.2212
Kayıpların azalmasından gelen kar (milyon \$)	\$ 0.18442

Çizelge 7.5 : Üretici bakımından depolamanın yararı.

Şebeke Üreticisi Bakımından Depolama Sistemi		
Elektrik üretimi yönteminden		
kaynaklanan kar	\$	0.270
Şebekeye alınamayan enerjiden		
gelen kar(spilled)	\$	0.106604
Toplam Üretici Karı	\$	0.37660

Şekil 7.2: Yıllık depolama maliyeti, depolamanın üreticiye ve kullanıcıya yararı.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fosil yakıtların azalması ve karbon salımının artmasıyla alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları hem temiz enerji olarak gündemde hem de yatırım aracı olarak görülmektedir. Rüzgar enerjisi bu kaynaklardan biridir. Temiz ve bedava yakıt olması yönünden avantajlıdır. Rüzgar enerjisinin en büyük sorunlarından biri süreklilik teşkil etmemesidir. Hem şebekeden bağımsız hem de şebeke bağlantılı rüzgar enerji sistemlerinde sürekliliği ve kararlılığı sağlamak için depolama sistemleri çözüm olarak öngörülmektedir. Maliyetli olduğu düşünüldüğünden kaçınılan depolama sistemlerine çalışmamızda yer verilmektedir.

2008 ve 2011 tarihleri arasında Urla'da yapılan çalışma sonucu elde edilen rüzgar hızı verileri, aynı tarihler arasında Devlet Meteoroloji Müdürlüğü'nden alınan sıcaklık ve bağıl nem bilgileri birleştirip ANFIS aracına girdi olarak sunulmuştur. ANFIS aracını eğitmek ve kuralları belirlemek için çıktı bilgisine de ihtiyaç vardır. Böylece araç girdi ve çıktılar arası kuralları kendi içinde belirlemektedir. Çıktı ise rüzgar gücünün teorik olarak hesaplanması sonucu elde edilmiştir. ANFIS aracı ile mevsimsel olarak tipik günler için üretilecek enerji tahmini yapılmıştır. Üretilen enerjinin tamamı şebekeye fiziksel sebeplerden dolayı dahil olamamaktadır. Şebekeye hat kısıtlamaları gibi limitleri göz önünde bulundurarak dahil edilecek enerji miktarı PSAT aracı ile belirlenmiştir. PSAT içinde bulunan 14 baralı IEEE şebekesinde yapılan çalışma sonucu şebekeye girecek enerji miktarı ve kullanılamayan enerji miktarı ortaya çıkmıştır. Burada hem kullanılamayan enerjiden dolayı kayıp maliyet hem de enerji üretim yönteminin değişmesinden kaynaklı maliyet ortaya çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri için uygun olan depolama sistemleri literatür taraması sonucu belirlenmiştir. Uygun güç ve kapasitedeki depolama sistemi kullanılamayan enerji miktarı ile bulunmuştur. Bu depolama sistemlerinin yıllık maliyetleri kurulum maliyetleri, kullanım maliyetleri ve değiştirme maliyetleri de göz önünde bulunarak hesaplanmıştır. Bu maliyet diğer maliyetlerle karşılaştırılmış ve ekonomik olarak fizibil olup olmadığına bakılmıştır.

9 MW rüzgar enerji santrali için depolama sistemleri yıllık bazda oldukça pahalı kalmaktadır. Ancak bu sistemler daha büyük güçteki kurulumlarda ekonomik olarak fizibil hale gelmektedir. Ayrıca gelişen teknoloji depolama maliyetlerini düşürecek daha küçük kurulumlarda da bu sistemler fizibil hale gelecektir.

Bu çalışma şebekeye daha fazla rüzgar enerjisi dahil ederek ve bunun sonucu depolama sistemlerinin optimum noktası bulunarak geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Ackermann T.** (2005). Wind Power in Power Systems. John Wiley&Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Al-Yahyai S., Charabi Y. ve Gastli A.** (2010). Review Of The Use Of Numerical Weather Prediction (NWP) Models For Wind Energy Assessment. *Renewable and sustainable Energy Reviews, Vol 14, December 2010*, 3192 – 3198.
- Brekken T. K. A., Yokochi A., von Jouanne A., Yen Z. Z., Hapke H. M., Halamay D. A.** (2011). Optimal Energy Storage Sizing and Control for Wind Power Applications. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on Volume 2, Issue: 1*. 69-77.
- Caralis G., Zervos A.** (2010). Value Of Wind Energy On The Reliability Of Autonomous Power Systems. *IET Renewable Power Generation, Volume 4, Issue 2, March 2010*, p. 186 – 197.
- Cassedy E. S.** (2000). Prospects for Sustainable Energy: A Critical Assessment. Cambridge University Press.
- Castellani F., Burlando M., Taghizadeh S., Astolfi D. ve Piccioni E.** (2014). Wind Energy Forecast in Complex Sites with a Hybrid Neural Network and CFD based Method. *Energy Procedia, Vol 45, 2014*, 188-197.
- Chen W. Z., Li Q. B., Luo Y., Zhan D. D., Shi N., Liu K.** (2012). Energy Storage Sizing For Dispatchability Of Wind Farm. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on.
- Cui J., Li K., Sun Y., Zou Z., Ma Y.** (2011). Distributed Energy Storage System In Wind Power Generation. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on.

- Çıkıkcılı O.** (2013). Predicting Alzheimer's Disease Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. Fen Bilimleri Enstitüsü, (yüksek lisans tezi), Bahçeşehir Üniversite, İstanbul.
- Demirel Ö., Kakilli A. ve Tektaş M.** (2010). Anfis Ve Arma Modelleri İle Elektrik Enerjisi Yük Tahmini. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ*, Vol 25, No 3, 601-610.
- Gao Z. Y., Wang P., Wang J.** (2010). Impacts Of Energy Storage On Reliability Of Power Systems With WTGs. Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on.
- Jiang Z., Yu X.** (2009). Modeling And Control Of An Integrated Wind Power Generation And Energy Storage System. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES. IEEE.
- Kozak M., Kozak Ş.** (2012). Enerji Depolama Yöntemleri. *SDU International Technologic Science*, vol. 4, no 2, November 2012. 17 – 29.
- Kramer, O., Gieseke F. ve Satzger B.** (2013). Wind Energy Prediction And Monitoring with Neural Computation. *Neurocomputing*, Volume 109, 3 June 2013, 84-93.
- Mohandes M., Rehman S. ve Rahman S. M.** (2011). Estimation Of Wind Speed Profile Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *Applied Energy*, Volume 88, Issue 11, November 2011, 4024-4032.
- Molina M. G.** (2012). Distributed Energy Storage Systems For Applications In Future Smart Grids. Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES.
- Mundackal J., Varghese A. C., Sreekala P., Reshmi V.** (2013). Grid Power Quality Improvement And Battery Energy Storage In Wind Energy Systems. Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (AICERA/ICMiCR), 2013 Annual International Conference on.

- Poonpun P., Jewell W. T.** (2008). Analysis of the Cost per Kilowatt Hour to Store Electricity. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Volume:23, Issue:2, 529-534.
- Rizman M., Saini S. ve Singh U.** (2012). Prediction Of Wind Energy Using Intelligent Approach. Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on, 6-8 Dec. 2012, 1 – 5.
- Schlager N., Weisblatt J.** (2006). Alternative Energy. Thomas Gale, vl 3, China.
- Schoenung S.** (2011). Energy Storage Systems Cost Update. *A Study for the DOE Energy Storage Systems Program, Sandia Report, Unlimited Release, April 2011.*
- Smith S. C., Sen P. K., Kroposki B.** (2008). Advancement Of Energy Storage Devices And Applications In Electrical Power System. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.
- Strnad I., Skrlec D.** (2013). An Approach To The Optimal Operation Of The Microgrid With Renewable Energy Sources And Energy Storage Systems. EUROCON, 2013 IEEE.
- Wei L., Joos G.** (2008). A Power Electronic Interface For A Battery Supercapacitor Hybrid Energy Storage System For Wind Applications. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE.
- Weihua L., Songqi F., Weichun G., Zhiming W.** (2012). Research On The Control Strategy Of Large-Scale Wind Power Energy Storage System. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE.
- Yang B., Makarov Y., Desteese J., Viswanathan V., Nyeng P., McManus B., Pease J.** (2008). On The Use Of Energy Storage Technologies For Regulation Services In Electric Power Systems With Significant Penetration Of Wind Energy. Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on European.
- Yu Z., Tuzuner A.** (2008). Wind Speed Modeling And Energy Production Simulation With Weibull Sampling. Power and Energy Society

General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.

Zhang H., Liu J., Li W. (2012). Optimized Design of Energy-Storage Capacity for Wind Power Generating. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific.

Key world energy statistics. IEA. Alındığı tarih: 24.08.2014, adres: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf>

Rüzgar türbininin kullanımı ve gelişimi. Eie. Alındığı tarih: 07.03.2014, adres: http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_turbin.html

Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu 2015. TUREB. Alındığı tarih: 05.02.2015, adres: http://www.tureb.com.tr/attachments/article/420/T%C3%BCrkiye%20R%C3%BCzgar%20Enerjisi%20%C4%B0statistik%20Raporu_Ocak%202015.pdf

Url-1 <<http://www.tedas.gov.tr/Sayfalar/Anasayfa.aspx>>, alındığı tarih: 20.07.2014.

Url-2 <<http://www.teias.gov.tr/>>, alındığı tarih: 20.07.2014.

EKLER

EK A: IEEE 6 baralı sistem

EK B: IEEE 14 baralı sistem

EK C: Günlük yük yüzdeleri

EK D: PSAT sonucu – Üretilen, kullanılamayan enerji

EK A IEEE 6 baralı sistem

MVA Base: 100 MVA

Sistem Frekansı: 50 Hz

Bara Nominal Gerilimi: 11 kV

Bara Maksimum Gerilimi: 11,5 kV

Bara Minimum Gerilimi: 10,4 kV

Çizelge A.1 : Yık data.

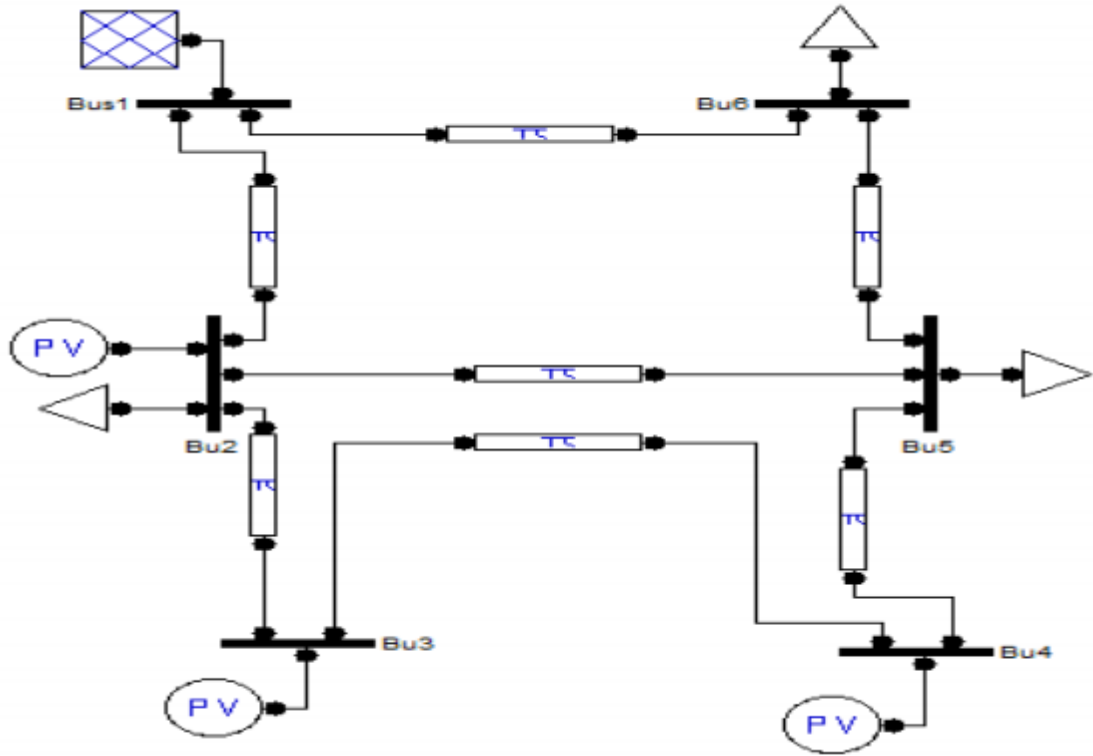
Bara	Aktif Güç, MW	Reaktif Güç, MVAR
Bara 2	20	10
Bara 5	40	15
Bara 6	30	10

Çizelge A.2 : Hat datası.

Hat No	Bara ilişkisi	Direnç, p.u	Reaktans, p.u
1	1-2	0,05	0,20
2	2-3	0,10	0,50
3	3-4	0,20	0,80
4	4-5	0,10	0,30
5	5-6	0,20	0,40
6	6-1	0,10	0,15
7	2-5	0,20	0,50

Çizelge A.3 : Generatör data.

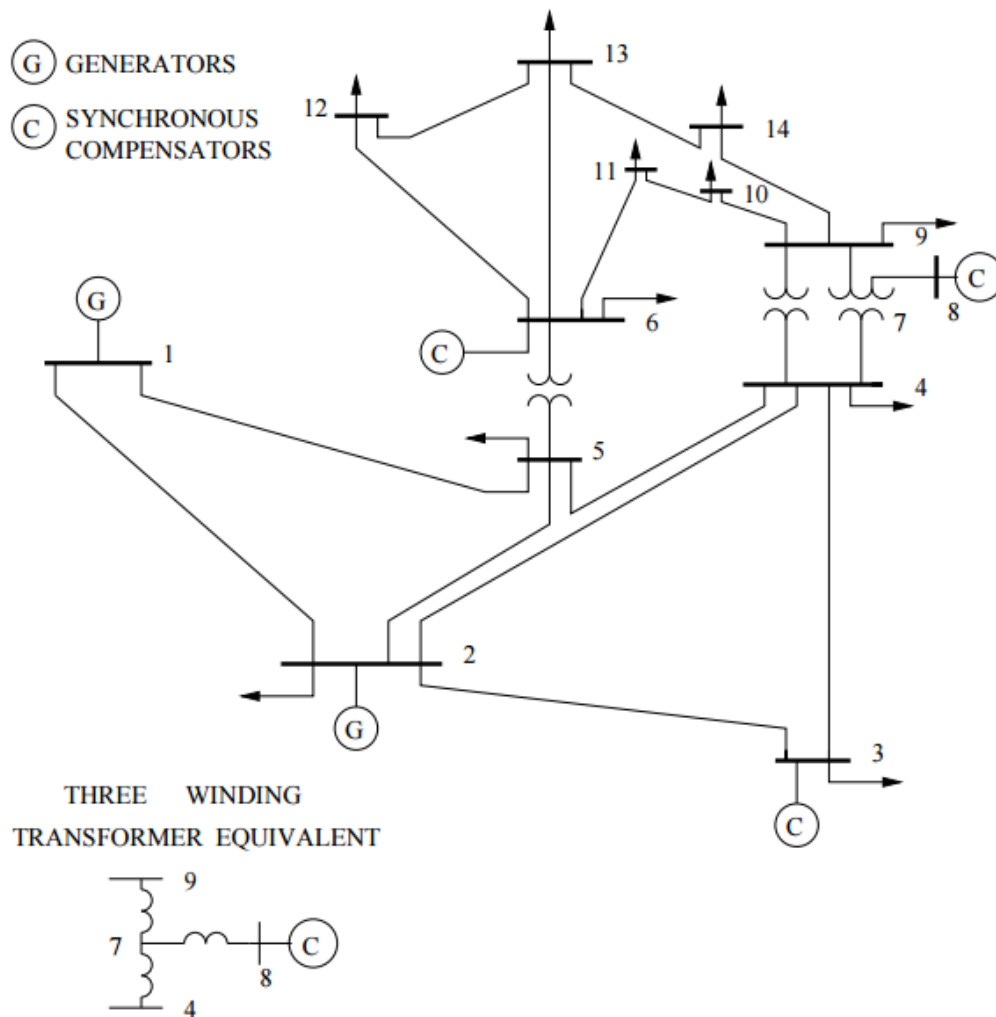
Generatör No	P + jQ	V, p.u.	MVA	Bara Tipi
G1	0 + j0	1,00	100	Gevşek
G2	0,1 + j0,05	1,041	15	PV
G3	0,30 + j0,2	1,0190	40	PV
G4	0,2 + j0,1	1,071	30	PV



Şekil A.1: IEEE 6 bara sistemi – PSAT modeli.

EK B IEEE 14 baralı sistem

Şekil B.1: IEEE 14 bara sistemi – PSAT modeli.



Çizelge B.1 : Bara data.

Bara No	Aktif Güç, p.u.	Reaktif Güç, p.u.	Aktif Yük, p.u.	Reaktif Yük, p.u.	Bara Tipi	Maksimum Üretilen Reaktif Güç, p.u.	Minimum Üretilen Reaktif Güç, p.u.
1	2,32	0,00	0,00	0,00	2	10,0	-10,0
2	0,4	-0,424	0,2170	0,1270	1	0,5	-0,4
3	0,00	0,00	0,9420	0,1900	2	0,4	0,00

Çizelge B.1 (devam) : Bara data.

4	0,00	0,00	0,4780	0,00	3	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,0760	0,0160	3	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,1120	0,0750	2	0,24	-0,06
7	0,00	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	2	0,24	-0,06
9	0,00	0,00	0,2950	0,1660	3	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,0900	0,0580	3	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,0350	0,0180	3	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,0610	0,0160	3	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,1350	0,0580	3	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,1490	0,0500	3	0,00	0,00

Çizelge B.2 : Hat data.

Hat No	Baradan	Baraya	Hat Empedansı, p.u.		Half line charging susceptance, p.u	MVA
			Direnç	Reaktans		
1	1	2	0,01938	0,05917	0,02640	120
2	1	5	0,05403	0,22304	0,02190	65
3	2	3	0,04699	0,19797	0,01870	36
4	2	4	0,05811	0,17632	0,02460	65
5	2	5	0,05695	0,17388	0,01700	50
6	3	4	0,06701	0,17103	0,01730	65

Çizelge B.2 (devam) : Hat data.

7	4	5	0,01335	0,04211	0,00640	45
7	4	5	0,01335	0,04211	0,00640	45
8	4	7	0	0,20912	0	55
9	4	9	0	0,55618	0	32
10	5	6	0	0,25202	0	45
11	6	11	0,09498	0,1989	0	18
12	6	12	0,12291	0,25581	0	32
13	6	13	0,06615	0,13027	0	32
14	7	8	0	0,17615	0	32
15	7	9	0	0,11001	0	32
16	9	10	0,03181	0,0845	0	32
17	9	14	0,12711	0,27038	0	32
18	10	11	0,08205	0,19207	0	12
19	12	13	0,22092	0,19988	0	12
20	13	14	0,17093	0,34802	0	12

Çizelge B.3 : Kapasite ve maliyet katsayısı.

Generatör No	P_i (min), MW	P_i (max), MW	a_i (\$/(MWhr) ²)	b_i (\$/(MWhr) ²)	c_i (\$/hr)
G1	10	160	0,005	2,45	105,0
G2	20	80	0,005	3,51	44,1
G3	20	50	0,005	3,89	40,6

Çizelge B.4 : Trafo kademe ayarları.

Baradan	Baraya	Kademe ayarı değeri, p.u.
4	7	0,978
4	9	0,969
5	6	0,932

EK C Günlük yük yüzdeleri**Çizelge C.1 : Gün İçinde Saatlik Puant Yük.**

	Kış Haftaları		Yaz Haftaları		Bahar Haftaları	
	1 -8 & 44 - 52		18 -30		9-17 & 31 - 43	
Saat	Haftaiçi	Haftasonu	Haftaiçi	Haftasonu	Haftaiçi	Haftasonu
12-1 am	67	78	64	74	63	75
1-2	63	72	60	70	62	73
2-3	60	68	58	66	60	69
3-4	59	66	56	65	58	66
4-5	59	64	56	64	59	65
5-6	60	65	58	62	65	65
6-7	74	66	64	62	72	68
7-8	86	70	76	66	85	74
8-9	95	80	87	81	95	83
9-10	96	88	95	86	99	89
10-11	96	90	99	91	100	92
11-noon	95	91	100	93	99	94
Noon-1pm	95	90	99	93	93	91
1-2	95	88	100	92	92	90
2-3	93	87	100	91	90	90
3-4	94	87	97	91	88	86
4-5	99	91	96	92	90	85
5-6	100	100	96	94	92	88
6-7	100	99	93	95	96	92
7-8	96	97	92	95	98	100
8-9	91	94	92	100	96	97
9-10	83	92	93	93	90	95
10-11	73	87	87	88	80	90
11-12	63	81	72	80	70	85

EK D PSAT sonucu – Üretilen, kullanılmayan enerji

Çizelge D.1 : PSAT sonucu – Üretilen, kullanılmayan enerji.

		Tahmin Edilen Enerji (MW)	Hesaplanan (MW)	YÜK (%)	Şebekeye dahil edilen (MW)
KIŞ	0-1	2.982702722	3.631488615	67.0	1.9984
	1-2	3.452802608	4.17063305	63.0	2.1753
	2-3	3.85806113	4.615279287	60.0	2.3148
	3-4	3.906692153	5.030177869	59.0	2.3049
	4-5	4.21468863	5.296185414	59.0	2.4867
	5-6	3.66353704	4.473441622	60.0	2.1981
	6-7	3.161016472	3.249443725	74.0	2.3392
	7-8	2.885440677	3.764532991	86.0	2.4815
	8-9	2.5774442	3.35821567	95.0	2.4486
	9-10	2.431551132	3.227252373	96.0	2.3343
	10-11	2.528813178	3.529259994	96.0	2.4277
	11-12	2.9340717	4.028052332	95.0	2.7874
	12-13	2.998913063	3.860411989	95.0	2.8490
	13-14	2.853019995	3.336623326	95.0	2.7104
	14-15	2.690916587	3.01005379	93.0	2.5026
	15-16	2.836809655	3.289104191	94.0	2.6666
	16-17	3.566274994	4.421889417	99.0	3.5306
	17-18	3.177226813	3.679210044	100.0	3.1772
	18-19	3.11238545	3.552972664	100.0	3.1124
	19-20	3.404171585	3.969064614	96.0	3.2680
	20-21	3.225857836	4.219388223	91.0	2.9355
	21-22	2.463971814	3.405747168	83.0	2.0451
	22-23	2.9340717	3.674565935	73.0	2.1419
	23-00	3.209647495	3.966924176	63.0	2.0221
İLKBAHAR	0-1	0.455510579	0.867719179	63.0	0.2870
	1-2	0.416605761	0.857025227	62.0	0.2583
	2-3	0.466857817	0.833265593	60.0	0.2801
	3-4	0.470099886	0.874267886	58.0	0.2727
	4-5	0.431195067	0.885340864	59.0	0.2544
	5-6	0.484689192	0.934633691	65.0	0.3150
	6-7	0.463615749	0.941820043	72.0	0.3338
	7-8	0.455510579	1.036335811	85.0	0.3872
	8-9	0.449026442	1.00789458	95.0	0.4266
	9-10	0.366353704	0.912864048	99.0	0.3627

Çizelge D.1 (devam) : PSAT sonucu – Üretilen, kullanılamayan enerji.

İLKBAHAR	10-11	0.43605817	0.91985929	100.0	0.4361
	11-12	0.445784374	0.855908489	99.0	0.4413
	12-13	0.343659227	0.87932873	93.0	0.3196
	13-14	0.484689192	0.940014944	92.0	0.4459
	14-15	0.590056408	0.923927495	90.0	0.5311
	15-16	0.684076385	0.987026707	88.0	0.6020
	16-17	0.632203294	1.003289115	90.0	0.5690
	17-18	0.583572272	0.940536388	92.0	0.5369
	18-19	0.572225033	0.92359583	96.0	0.5493
	19-20	0.481447124	0.870013481	98.0	0.4718
	20-21	0.449026442	0.954836076	96.0	0.4311
	21-22	0.419847829	0.923724325	90.0	0.3779
	22-23	0.429574033	0.896499927	80.0	0.3437
	23-00	0.483068158	0.886326573	70.0	0.3381
YAZ	0-1	0.437679204	0.820766441	64.0	0.2801
	1-2	0.40850059	0.809383688	60.0	0.2451
	2-3	0.489552295	0.822326672	58.0	0.2839
	3-4	0.50738367	0.893327604	56.0	0.2841
	4-5	0.453889545	0.849486596	56.0	0.2542
	5-6	0.481447124	0.927399449	58.0	0.2792
	6-7	0.461994715	0.946096286	64.0	0.2957
	7-8	0.413363693	1.013815906	76.0	0.3142
	8-9	0.371216806	0.912436163	87.0	0.3230
	9-10	0.259365454	0.820696693	95.0	0.2464
	10-11	0.353385431	0.833386872	99.0	0.3499
	11-12	0.376079908	0.800224385	100.0	0.3761
	12-13	0.267470625	0.817493797	99.0	0.2648
	13-14	0.414984727	0.90284012	100.0	0.4150
	14-15	0.504141601	0.882035817	100.0	0.5041
	15-16	0.583572272	0.927188486	97.0	0.5661
	16-17	0.570603999	0.94300206	96.0	0.5478
	17-18	0.496036431	0.930066344	96.0	0.4762
	18-19	0.585193306	0.900426152	93.0	0.5442
	19-20	0.484689192	0.839260365	92.0	0.4459
	20-21	0.460373681	0.958089222	92.0	0.4235
	21-22	0.413363693	0.876139273	93.0	0.3844
	22-23	0.421468863	0.8222821	87.0	0.3667
	23-00	0.466857817	0.847965088	72.0	0.3361

Çizelge D.1 (devam) : PSAT sonucu – Üretilen, kullanılamayan enerji.

SONBAHAR	0-1	0.452268511	0.794139125	63.0	0.2849
	1-2	0.440921272	0.75284732	62.0	0.2734
	2-3	0.496036431	0.756099577	60.0	0.2976
	3-4	0.513867806	0.862283462	58.0	0.2980
	4-5	0.429574033	0.754191128	59.0	0.2534
	5-6	0.483068158	0.876947909	65.0	0.3140
	6-7	0.460373681	0.904603953	72.0	0.3315
	7-8	0.377700943	0.950037886	85.0	0.3210
	8-9	0.280438897	0.820246376	95.0	0.2664
	9-10	0.160644478	0.730393347	99.0	0.1590
	10-11	0.275575795	0.739011722	100.0	0.2756
	11-12	0.30151234	0.768646974	99.0	0.2985
	12-13	0.155457169	0.775580099	93.0	0.1446
	13-14	0.32906992	0.872898886	92.0	0.3027
	14-15	0.403637488	0.86175284	90.0	0.3633
	15-16	0.487931261	0.899845192	88.0	0.4294
	16-17	0.564119863	0.974772657	90.0	0.5077
	17-18	0.496036431	0.94701376	92.0	0.4564
	18-19	0.484689192	0.962272026	96.0	0.4653
	19-20	0.601403647	0.913424715	98.0	0.5894
	20-21	0.47982609	0.978343378	96.0	0.4606
	21-22	0.393911283	0.816042363	90.0	0.3545
	22-23	0.379321977	0.75313015	80.0	0.3035
	23-00	0.437679204	0.810174393	70.0	0.3064

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : BETÜL AKYÜREK
Doğum Yeri ve Tarihi : DENİZLİ 25.07.1989
E-Posta : btlakyurek@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği
- **Lisans** : 2012, Bahçeşehir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2012, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Yönetimi Programı
- **Yükseklisans** : Devam ediyor, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Türk Eğitim Vakfı Anatolian High School
High Honor Certificates 2004-2007
- Bahçeşehir University
High Honor Certificates 2007-2012
- IEEE Student Branch- Engineering and Technology Conferences
Participation Certificate- 30.04.2009
- Bilge Adamlar Stratejik Araştırmalar Merkezi – 16.10.2009 IV. National Hydrogen Energy Congress and Exhibition (UHK 2009)

- Bahçeşehir University OSYM scholarship (%100)
- Bahçeşehir University overachievement scholarship
- Certificate of Energy Law – Istanbul Institute October 2012
- REFA 1 - Business System and Process Regulation – MESS March 2014
- Bahcesehir University Energy Systems Engineering – First degree (2012)
CGPA: 3.74 / 4.00
- 2210-C TUBITAK Post Graduate Thesis Scholarship (2013-2)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Akyürek, B., Türkay, B., 2015. Prediction and Penetration of Wind Energy with Storage System Analysis, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*.