

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZUN KISA SÜRELİ HAFIZA SİNİR AĞI
ALGORİTMASIYLA RÜZGAR ENERJİSİ GÜÇ
TAHMİNİ ÖN ÇALIŞMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Selahattin GÜNGÖR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22/02/2024

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Halil ŞENOL

Ortak Danışman : Prof. Dr. İlkay TÜRK ÇAKIR

Ocak 2024
GİRESUN

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZUN KISA SÜRELİ HAFIZA SINIR AĞI
ALGORİTMASIYLA RÜZGAR ENERJİSİ GÜÇ
TAHMİNİ ÖN ÇALIŞMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selahattin GÜNGÖR

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez 24/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
İlkay TÜRK ÇAKIR
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Halil ŞENOL
Üye

Doç. Dr.
Hande KARADENİZ
Üye

Doç. Dr.
Volkan ARI
Üye

Doç. Dr.
Sinan KUDAY
Üye

Prof. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Selahattin GÜNGÖR

24/01/2024

TEŞEKKÜR

Danışmanım olan sayın Doç. Dr. Halil ŞENOL' a yardımları ve danışmanlığı için teşekkür ederim. İki senelik lisansüstü eğitim hayatımda her konuda olabildiğince yardımcı olan, sabırla eş danışmanlık yapan ve bilge bir önder olarak yol gösteren saygıdeğer Prof. Dr. İlkay TÜRK ÇAKIR'a en içten dileyebileceğim teşekkürü bir borç bilirim. Yapmış olduğum çalışma boyunca desteğini hiç esirgemeyen saygıdeğer Prof. Dr. R. Gökhan Türeci'ye teşekkür ederim. Lisansüstü eğitim hayatım boyunca elde ettiğim fırsatlar için başta bölüm başkanımız sayın Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalı akademik kadrosunda yer alan saygıdeğer eğitimcilere çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her konuda yanımda olup en büyük destekçim olan çok sevgili ablam Doç. Dr. Nihan GÜNGÖR'e sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Çok sevgili manevi en büyük destekçim olan canım aileme babam Ali GÜNGÖR ve annem Gönül GÜNGÖR'e çok teşekkür ederim. Son olarak sevgili arkadaşlarım Simay MUTLU, Kaan EFİL ve Ufuk Tan GÜNEŞCAN'a tez yazım süresince bana destek oldukları için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLOLAR LİSTESİ.....	IX
ÖZET.....	X
SUMMARY.....	XI
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Rüzgarın Oluşumu.....	1
1.2. Rüzgar Türbini ve Yapısı.....	4
1.2.1. Rüzgar Türbini Parçaları.....	4
1.2.1.1. Kule.....	5
1.2.1.2. Kanatlar.....	6
1.2.1.3. Fren Diski.....	7
1.2.1.4. Dişli Kutusu.....	8
1.2.1.5. Jeneratör.....	8
1.2.1.6. Düşük Hızlı Şaft.....	8
1.2.1.7. Yüksek Hızlı Şaft.....	9
1.2.1.8. Kontrol Kutusu.....	9
1.2.1.9. Kanat Döndürme Mekanizması (Pitch).....	9
1.2.1.10. Rota Mekanizması (YAW).....	10
1.2.1.11. Rüzgar Vanası (Gülü).....	10
1.2.2. Rüzgar Türbin Çeşitleri.....	11
1.2.2.1. Eksenlerine Göre Türbinler.....	12
1.2.2.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinler.....	12
1.2.2.3. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinler.....	12
1.2.2.4. Darrieus Rüzgar Türbinleri.....	13

1.2.2.5. Darrieus-H Rüzgar Türbinleri	13
1.2.2.6. Savonious Rüzgar Türbinleri	14
1.2.2.7. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri	15
1.2.2.8. Rüzgar Etkisine Göre Türbinler	15
1.2.2.9. Rüzgarı Arkasından Alan Türbinler	16
1.2.2.10. Rüzgarı Önden Alan Türbinler.....	17
1.2.2.11. Kanatlarına Göre Türbinler	17
1.2.2.12. Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri	18
1.2.2.13. Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	19
1.2.2.14. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	19
1.2.2.15. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	20
1.2.2.16. Dişli Kutusu Kullanımına Göre Rüzgar Türbinleri.....	20
1.2.2.17. Dişli Kutusu Kullanan Rüzgar Türbinleri	20
1.2.2.18. Dişli Kutusu Kullanmayan Rüzgar Türbinleri	20
1.2.2.19. Kuruldukları Yere Göre Rüzgar Türbinleri	21
1.2.2.20. Kara Üstü Rüzgar Türbinleri.....	21
1.2.2.21. Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri.....	21
1.3. Dünyada ve Türkiyede Rüzgar Enerjisi	22
1.3.1. Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Durumu	22
1.3.2. Rüzgar Enerjisinin Türkiyedeki Durumu	24
1.4. Hiperparametreler.....	26
1.5. Yapay Sinir Ağları.....	26
1.5.1. Yapay Sinir Ağlarının Gelişimi	26
1.5.2. Yapay Sinir Ağlarının Optimizasyonu	27
1.5.3. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı	27
1.5.4. Yapay Sinir Ağları Çeşitleri	29
1.5.4.1. İleri Beslemeli Sinir Ağları	30
1.5.4.2. Tekrarlayan Sinir Ağları.....	30
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	32
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1. Materyal.....	36
3.2. Yöntem.....	37

3.2.1. Rüzgar Güç Hesabı.....	37
3.2.2. Uzun Kısa Süreli Hafıza	40
3.2.3. Kök Ortalama Karekök Hatası	44
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	45
4.1. Günlük Veriler.....	45
4.2. Aylık Veriler.....	52
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

\circ	: Derece
P	: Hava Yoğunluğu
λ	: Kanat Uç Hızı Oranı
\dot{m}	: Birim Zamanda Geçen Havanın Kütlesi
CFRP	: Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Plastik
DETR	: Düşey Eksenli Rüzgar Türbini
DFIG	: Değişken Hızlı – Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü
E_k	: Kinetik Enerji
EESG	: Direkt Sürümlü – Elektriksel Uyarımlı Senkron Jeneratörler
GRP	: Cam ile Güçlendirilmiş Plastik
GW	: Gigawatt
İBSA	: İleri Beslemeli Sinir Ağları
kg	: Kilogram
Km	: Kilometre
K-NN	: K En Yakın Komşu
kW	: Kilowatt
LSTM	: Long-Short Time Memory (Uzun-Kısa Süreli Hafıza)
m	: Metre
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S	: Milattan Sonra
MSE	: Mean Square Error
MW	: Megawatt
MWh	: Megawatt Saat
MWm	: Megawatt Ay
NCA	: Komşuluk Bileşen Analizi
p	: Basınç

Pitch	: Kontrol Döndürme Mekanizması
PMSG	: Direkt sürümlü – sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler
R	: Evrensel Gaz Sabiti
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hatası
RPM	: Dakikadaki Devir Sayısı
s	: Saniye
SCIG	: Sabit hızlı – Sincap kafesli indüksiyon jeneratörü
SVR	: Destek Vektör Makinesi
T	: Kelvin Cinsinden Sıcaklık
Teiaş	: Türkiye Elektrik Üretim A.Ş.
TSA	:Tekrarlayan Sinir Ağları
UV	: Ultraviyole Işık
$W_{kinetik}$: Kinetik İş
V	: Gazın Hacmi
v	: Hız
V_b	: Ve Benzeri
Yaw	: Rota Mekanizması
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgar Türbini
YSA	: Yapay Sinir Ağları

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin yapısı ve parçaları	5
Şekil 1.2. Yatay eksenli bir rüzgar türbin kanadının bölgeleri ve kesiti	7
Şekil 1.3. Pitch mekanizması.....	10
Şekil 1.4. Rüzgar türbini anemometre çeşitleri.....	11
Şekil 1.5. Rüzgar türbini sınıflandırılması.....	11
Şekil 1.6. Darrieus tipi rüzgar türbinleri.....	14
Şekil 1.7. Savonius tipi rüzgar türbini.....	15
Şekil 1.8. Rüzgar etkisine göre türbinler (a) Önden rüzgar alan, (b) Arkadan rüzgar alan.....	16
Şekil 1.9. Kanat sayılarına göre rüzgar türbinleri	18
Şekil 1.10. 2016-2020 yılları arası yeni rüzgar türbini kurulum dağılımı	23
Şekil 1.11. 2020 yılı rüzgar enerjisi santralleri kurulum dağılımı	23
Şekil 1.12. 2020 yılı rüzgar enerjisi santralleri kurulum dağılımı	24
Şekil 1.13. 1998-2020 yılları arası Türkiye’de rüzgar türbini kurulumları	25
Şekil 1.14. 2013-2020 yılları arası Türkiye’de rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi dağılımı	25
Şekil 1.15. Yapay bir nöronun yapısına ait diyagram.....	28
Şekil 1.16. TSA yapısı ve gizli katmanının yapısı.....	30
Şekil 3.1. LSTM modelinin blok diyagramı.....	41
Şekil 3.2. LSTM sigmoid katmanı.....	42
Şekil 3.3. Sigmoid katmanı ile \tanh katmanı birleşimi.....	43
Şekil 3.4. LSTM yeni hücre durumu.....	43
Şekil 3.5. LSTM çıkışı.....	44
Şekil 4.1. Günlük bazda ölçülen gerçek veriler.....	45
Şekil 4.2. Epok = 100 için eğitilmiş sinir ağının sonucu	46
Şekil 4.3. Epok=100 için loss grafiği.....	47
Şekil 4.4. Epok = 1000 için eğitilmiş sinir ağının sonucu.....	47

Şekil 4.5. Epok = 1000 için loss grafiği.....	48
Şekil 4.6. Epok = 5000 için eğitim sonuçları.....	48
Şekil 4.7. Epok = 5000 için loss grafiği.....	49
Şekil 4.8. Epok = 1000 ve gelişmiş sinir ağı	50
Şekil 4.9. Epok 1000 için loss grafiği.....	50
Şekil 4.10. Epok = 5000 için gelişmiş sinir ağı öğrenme sonucu.....	51
Şekil 4.11. Epok = 5000 ve gelişmiş sinir ağı için loss grafiği.....	51
Şekil 4.12. Küçük sinir ağı için epok = 100 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi.....	53
Şekil 4.13. Küçük sinir ağı için epok = 100 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği.....	54
Şekil 4.14. Küçük sinir ağı için epok = 1000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi.....	54
Şekil 4.15. Küçük sinir ağı için epok = 1000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği	55
Şekil 4.16. Küçük sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi.....	55
Şekil 4.17. Küçük sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği.....	56
Şekil 4.18. Yüksek sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi.....	56
Şekil 4.19. Yüksek sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği.....	57
Şekil 4.20. Yüksek sinir ağı için epok = 10000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi.....	57
Şekil 4.21. Yüksek sinir ağı için epok = 10000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği.....	58

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Rüzgar alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması.....	17
Tablo 1.2. Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması.....	18
Tablo 1.3. Onshore ve offshore rüzgar santrallerinin karşılaştırılması.....	21
Tablo 3.1. Veri setinin aylık değerleri.....	36



UZUN KISA SÜRELİ HAFIZA SINIR AĞI ALGORİTMASIYLA RÜZGAR ENERJİSİ GÜÇ TAHMİNİ ÖN ÇALIŞMASI

ÖZET

Yüksek basınçtan alçak basınca doğru yönelen hava hareketi rüzgar olarak adlandırılır. Rüzgarın varoluşunun temeli, sıcak havanın yoğunluğunun soğuk havaya göre daha az olması ve bu sebepten yükselmesi sonucunda iki hava türünün yer değiştirmesidir. Havanın kinetik enerjisi nedeniyle, rüzgar türbinlerinde önce mekanik daha sonra da elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanım için gereken elektrik enerji üretilmiş olur. Bu çevrim rüzgar türbinlerinin temel işleyişidir. Rüzgar enerjisi hesabında; güç katsayısı, rüzgarın hızı, hava yoğunluğu ve süpürme alanı gibi değişkenlerden yararlanır. Bu çalışmada rüzgar enerji elektrik üretimi değerleri kullanılarak bir sonraki yılda üretilen elektrik değerinin tahmini Uzun Kısa Süreli Hafıza yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Veri seti olarak, Yalova Armutlu'da bulunan ve 36 adet türbine sahip olan Yalova Rüzgar Enerjisi Santrali'nin 2018-2021 arasındaki verileri kullanılmıştır. Uzun Kısa Süreli Hafıza yöntemiyle oluşturulan sinir ağı modelinde modele özgü olarak seçilen test ve eğitim veri seti ile sinir ağı modeli eğitilmiştir. İlk 3 yıllık veri eğitim için son 1 yıllık veri test verisi olarak kullanılmıştır.

Uzun Kısa Süreli Hafıza yöntemiyle oluşturulan basit ve güçlü sinir ağı modellerinde aylık ve günlük olmak üzere kullanılan iki veri tipi üzerinden tahminler oluşturulmuştur. Bu tahminler sonucunda günlük veriler üzerinde sırasıyla epok 100, 1000 ve 5000 için Kök Ortalama Karekök Hatası değeri 283,24, 264,39 ve 350,48 MW olarak elde edilmiştir. Aylık veriler üzerinden yapılan çalışmada epok değeri 1000 ve 5000 için sırasıyla Kök Ortalama Karekök Hatası değerleri 3680,50 ve 3204,68 MW olarak gözlemlenmiştir. Günlük verilerde epok değeri arttıkça öğrenmenin artması beklenirken bunun aksine Kök Ortalama Karekök Hatası değerinde yükselme gözlemlenmiştir. Aylık verilerde ise beklenen olmuş epok değeri arttıkça Kök Ortalama Karekök Hatası değerlerinde düşüş yaşanmış olmasına rağmen yine de yüksek çıkmıştır. Ön çalışmamıza bakıldığında farklı hiperparametrelerle veya farklı sinir ağları kullanarak daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Rüzgar Enerjisi Tahmini, Sinir Ağı, LTSM Sinir Ağı

WIND POWER FORECASTING WITH LONG SHORT TIME MEMORY NEURAL NETWORK ALGORITHM PRELIMINARY STUDY

SUMMARY

The movement of air from high pressure to low pressure is called wind. The basis for the existence of wind is that the density of warm air is less than that of cold air and therefore the two types of air are displaced as a result of its rise. Due to the kinetic energy of the air, it is converted into mechanical and then electrical energy in wind turbines, generating the electrical energy required for use. This cycle is the basic functioning of wind turbines. Variables such as power coefficient, wind speed, air density and sweep area are utilized in wind energy calculation. In this study, the prediction of the value of electricity generated in the next year using the wind energy electricity generation values is realized with the Long Short Term Memory method. Yalova Wind Power Plant, which is located in Armutlu, Yalova and has 36 turbines, is used as the data set between 2018-2021. In the neural network model created with the Long Short Term Memory method, the neural network model was trained with the test and training data set selected specifically for the model. The first 3 years of data were used for training and the last 1 year of data was used as test data.

In the simple and robust neural network models created with the Long Short Term Memory method, forecasts were created over two data types, monthly and daily. As a result of these predictions, Root Mean Square Error values of 283,24, 264,39 and 350,48 MW were obtained for epochs 100, 1000 and 5000 respectively on daily data. In the study on monthly data, Root Mean Square Error values for epoch 1000 and 5000 were observed as 3680,50 and 3204,68 MW, respectively. While it was expected that learning would increase as the epoch value increased in daily data, on the contrary, an increase in the Root Mean Square Error value was observed. In the monthly data, although the Root Mean Square Error values decreased as the epoch value increased, which was expected, it was still high. Looking at our preliminary study, it is thought that better results can be obtained with different hyperparameters or by using different neural networks.

Keywords: Renewable Energy, Wind Energy Forecasting, Neural Network, LSTM Neural Network

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Geleneksel fosil kaynaklar, enerji kaynağı olarak sanayileşmenin başlangıcından beri yoğun bir şekilde kullanılmaktadır ve geliştirilen her teknoloji bu kaynakları temel olarak ilerleyiş göstermiştir. Enerji ihtiyacı, bu teknolojik ürünlerin gelişimiyle ve nüfus artışıyla beraber hızla artmıştır. Geleneksel fosil kaynakların yenilenme hızları çok uzun sürelerde gerçekleştiği için tükenme tehlikesiyle her geçen gün daha çok yüz yüze kalmaktadır. Bu durum güneş, rüzgar, jeotermal, hidrojen, biyokütle ve hidrolik gibi yenilenebilir enerji türlerini büyük önem taşıyan bir konu haline getirmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından, rüzgar enerjisi hem dünya hem de ülkemiz için önemli bir unsurdur. Hatta gelecek yıllarda ülkemizde üretimlerinde artış beklenen kaynaklardan biri rüzgar enerjisidir [1]. 2020 yılı TEİAŞ verilerine göre Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu gücü 8832,4 MW'dır [2]. Bu da Türkiye genel kurulu gücünün %9,21'ni oluşturmaktadır. Rüzgar enerjisiyle güç üretimi; havanın yoğunluğu, rüzgarın hızı, rotor çapı ve türbin verimliliği gibi değişkenlere bağlı olarak değişim gösterir. Rüzgar enerjisi üzerinden gelecekteki üretilecek enerjinin tahmini yapılabilmesi için bu değişkenlere dikkat edilmesi gerekmektedir [1,3].

1.1. Rüzgarın Oluşumu

Rüzgarın oluşumu temel olarak, sıcak havanın yoğunluğunun soğuk havadan az olması sebebiyle yükselmesi ve bu neticede havanın yer değiştirmesinin temel olduğu akımlardır. Yerel ve dünya çapında olmak üzere rüzgar akım kaynakları ikiye ayrılabilir [3].

Küresel rüzgarlar, ekvator ve çevresindeki güneş ışınlarının farklı açılarla yer yüzeyine gelmesi nedeniyle diğer enlemlere göre bu bölge daha çok ısınır. Farklı ısınma ve farklı sıcaklık derecesinin neden olması sonucunda hava akımları başlar. Sıcak; hava soğuk havaya göre daha hafiftir. Isınmayla birlikte sıcak hava yukarıya doğru 10 km yüksekliğe kadar hareket eder ve bu yükselen hava kuzey ve güney yönüne ayrılır. Bu kuzey ve güney yönüne hareketin esas sebeplerinden biri iki kürenin de 30° enlemlerinde bulunan Coriolis Kuvveti'nin hava akışının daha yüksek enlemlere gitmesini engellemesidir. Coriolis kuvveti, dünyanın dönüşü sebebiyle rüzgâr hareketinin kuzey yarım kürede sağa, güney yarım kürede sola doğru sapmasını sağlayan kuvvettir. Bu olay neticesinde oluşan rüzgarlara “jeostrofik rüzgâr” denir.

Yerel rüzgarlar, bölgesel ve yerel iklim şartları ile coğrafi koşullar, yerel rüzgarların oluşmasında en önemli etkenlerdir. Kara her daim sudan daha hızlı ısınma gösterir. Isınan hava yükselerek alçak basınç oluşturur. Su üzerinde bulunan soğuk hava alçak basınç bölgesine doğru harekete geçer. Böylece bir rüzgâr akımı oluşur. Vadi ve dağlık bölgelerde oluşan yerel rüzgarlar ise bu coğrafi oluşumların yamaçlarının konumsal olarak baktığı kuzey ve güney yönlerindeki hava yoğunlukları buldukları yarım küreye göre değişmektedir. Bu farklılık sayesinde hava akımları oluşur. Bu iki farklı yerel rüzgâr oluşumuna bakıldığında yerel rüzgarları deniz veya su kaynaklı esintiler ile tepe-dağ-vadi rüzgarları şeklinde iki ayrı gruba ayırabiliriz [1].

İki bölge arasındaki hava hareketinin temelinde bölgeler arasındaki basınç farklılıklarının yatmaktadır. Hava basıncının özel durumlarını açıklayan birkaç temel fizik kuralı vardır. Bunların başında denklem 1'deki Boyle Kanunu gelmektedir,

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 \quad (1)$$

diğer bir kanun ise denklem 2'de yer alan Charles kanunudur,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2)$$

bu iki kanunun bir araya gelmesiyle ortaya çıkan ideal gaz denklemi denklem 3'te gösterilir;

$$pV = nRT \quad (3)$$

bu formülde R evrensel gaz sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklığı, V gazın hacmini (m^3), n gazın kilomol cinsinden birimini, p ise pascal biriminde basıncı simgelemektedir.

Havanın yoğunluğu (ρ) ise birim zamanda geçen kütle miktarının (\dot{m}), kapladığı hacme (V) bölünmesi ile bulunur. Matematiksel gösterimi denklem 4'te yer almaktadır.

$$\rho = \frac{\dot{m}}{V} \quad (4)$$

hacmin basınç ve sıcaklık ile olan bağlantıları göz önüne alındığında;

$$\rho = \frac{\dot{m}P}{RT} = \frac{3.484p}{T} \text{ kg}/m^3 \quad (5)$$

olarak denklem 5'deki gibi elde edilir.

Rüzgar gücü ve enerjisinin belirlenmesi için havanın kütlesi ve hızından yararlanılır. Atmosferdeki basınç farklılığından dolayı hava bu basınç farklılıkları arasında hareket ederek kinetik enerjiye sahip olur. Kinetik enerji;

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6)$$

olarak denklem 6'daki gibi hesaplanır. Burada m havanın kütlesi (kg); v , havanın hızı (m/s) [3].

1.2. Rüzgar Türbini ve Yapısı

Tarih boyunca rüzgârdan çeşitli şekillerde yararlanılmıştır. Rüzgârdan faydalanma insanoğlu için iki önemli başlık altında ilerleme göstermiştir:

- a) Mekanik Güç Üretimi
- b) Elektriksel Güç Üretimi

Rüzgarın mekanik olarak kullanımına bakıldığında yaklaşık 3000 yıllık tarihi bulunan milattan önce (M.Ö) 17. Yüzyılda Babillilerin sulama için kullandığı, milattan sonra (M.S.) 7 ile 10 yüzyıllar arasında Persler'in tahıl öğüttüğü, M.S. 13. Yüzyılda Çinlilerin kullandığı “Yel değirmenleri” göz önüne gelmektedir.

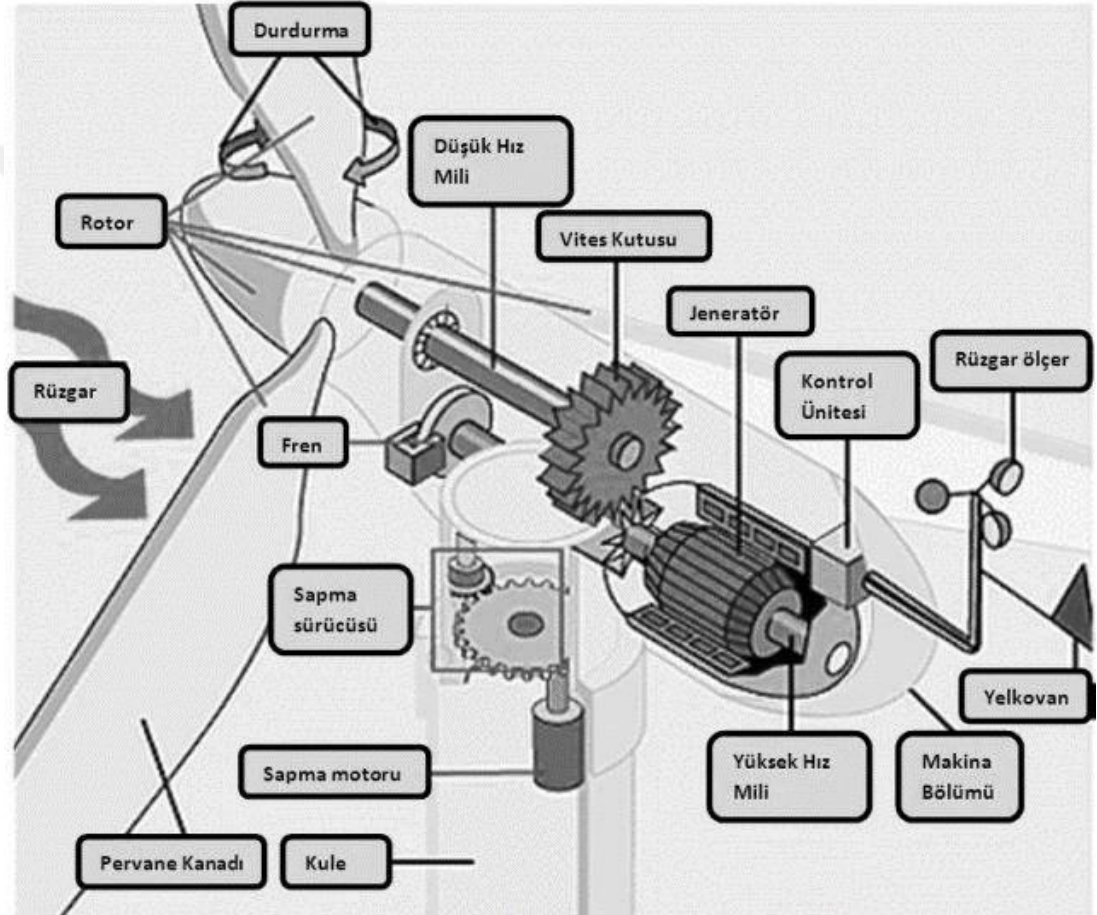
Elektriksel güç üretiminde rüzgârdan faydalanmanın yolu rüzgâr türbinlerinden geçmektedir. İlk Rüzgâr türbini ile elektrik üretimi 23 metre rotor çapı olan bir türbin tarafından 1980 yılında Danimarka’da gerçekleşmiştir. 1925 itibariyle elektrik üretimi odaklı iki ve üç kanatlı türbinler üretilmeye hatta ticari olarak satılmaya başlanmıştır. 1979-80’deki dünyada yaşanan petrol krizinde yenilenebilir kaynaklardan sağlanan enerjinin önemi artması sonucunda rüzgâr enerjisinin de önemi artmış bu sebepten dolayı bu alanda teknolojik gelişmelerin yaşanmasına önayak olmuştur. Kyoto protokolü ile yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen elektrik yüzdesinin artmaya başlamıştır, bu artış daha yüksek kapasiteli türbinler, alternatif kurulumlar ve teknolojileri beraberinde getirmiştir [4].

1.2.1. Rüzgar Türbini Parçaları

- a) Kule
- b) Rotor
- c) Kontrol Kutusu
- d) Düşük hızlı şaft
- e) Rotor Şaftında Fren diski
- f) Vites kutusu
- g) Yüksek hızlı şaft

- h) Jeneratör
- i) Kanat döndürme mekanizması (pitch)
- j) Rota mekanizması (yaw)
- k) Rüzgâr gülü (Anemometre) [1]

Şekil 1.1.' de rüzgar türbini parçalarının geneli görsel halde sunulmaktadır.



Şekil 1.1. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin yapısı ve parçaları [5]

1.2.1.1. Kule

Kule, kafa kısmını ve rotoru üzerinde taşıyan tüp veya kafes biçimindeki rüzgar türbini parçasıdır. Kule ne kadar yüksek olursa o kadar avantajlı hale gelmektedir. Çünkü rüzgarın hızı yükseklik arttıkça artmaktadır. Kule yüksekliği arttıkça maliyetinde

artmasından dolayı yükseklik sınırlı kalmaktadır. Kafes biçimindeki kuleler daha ucuza mal edilmektedir. Tüp biçimindeki kulenin kafese göre avantajı türbinin tepesine çıkmak daha kolay olmasıdır. Tipik olarak 600 kW'lık modern bir rüzgar türbini kulesinin boyu yaklaşık 40-60 metre aralığında bulunmaktadır [6].

1.2.1.2. Kanatlar

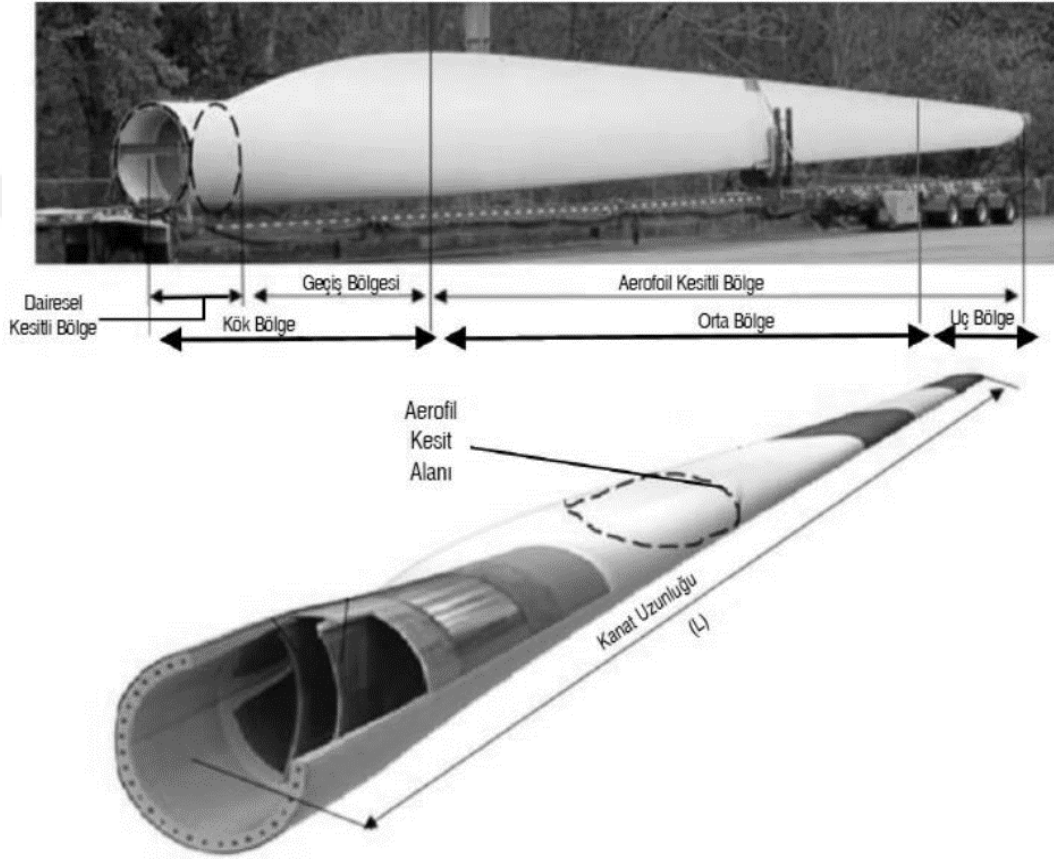
Rüzgarın kinetik enerjisini, mekanik enerjiye dönüştürmeyi sağlayan türbin parçasıdır. Kanatlar, rüzgarın uyguladığı etkiyle burulmak zorunda kalır. Bu burulma etkisiyle kanatların arka uçları, rüzgarla aynı yönde olacak şekilde itilir. Kanatların aerodinamik yapısının esas özelliği rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin en fazla %59'unu yararlı enerjiye dönüştürebiliyor olmasıdır. Bu yüzden kanat tasarımı türbin için çok önemlidir. Kanat tasarımı konusunda uzun yıllar boyunca çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların sonucunda çeşitli kanat profilleri ortaya konulmuştur. Kurulacak rüzgar türbininin kanadı kurulacak olan bölgenin fiziki ve coğrafi şartlarına göre profillendirilmelidir. Kanadın profil seçimi önemli olduğu kadar bağlanma açısı da çok önemlidir. [7-9]

Kanatlar, kök bölge, orta bölge ve uç bölge olmak üzere üç ana kısımdan oluşur. Kök bölge, kanadın profilinin şeklini aldığı yer ile kanadın bağlantı noktası arasındaki bölgedir. Ayrıca kanadın en çok zorlanmaya maruz kalan kısmıdır. Kök bölgesinin üst kısmında kanat orta bölgesi vardır ve kanadın aerodinamik parametreler göz önünde bulundurularak tasarlanan bölümüdür. Güç üretiminde en önemli bölgedir. Uç bölge, kanat orta bölgesi kadar güç üretiminde kritik olmasa bile bu konuda önemli bir rol oynamaktadır. Kanadın en narin bölgesidir [10]. Şekil 1.2.'de yatay eksenli rüzgar turbine ait bahsedilen bölge ve kesit kısımları yer almaktadır.

Kanat malzemesi olarak, ağaç, haddelenmiş ağaç, karbon fiberle güçlendirilmiş plastik (CFRP- Carbon Fibre Reinforced Plastic), çelik, GRP (Glass Reinforced Plastic) ve alüminyum kullanılmaktadır [6].

Rüzgar türbinlerinin verimliliğini etkileyen en önemli eleman Türbin kanatlarıdır. Türbin için en büyük verim kaybı bu kısımda gerçekleşir. Bir rüzgar türbininde üretilen gücün miktarı, kanatların boylarının karesi ile doğru orantılıdır [11].

Rüzgar türbinlerinin kanatları dış ortamda bulunduğu için zararlı çevresel faktörlere (nem, UV, yağmurlar ve sıcaklık farkı, vb.) maruz kalır. Maruz kalma sonucu kanatlar mekanik özellikleri olumsuz etkilenir [12].



Şekil 1.2. Yatay eksenli bir rüzgar türbin kanadının bölgeleri ve kesiti [10]

1.2.1.3. Fren Diski

Denklem 16'da verilen rüzgar güç formülünde rüzgarın gücü, hızının küpü ile doğru orantılıdır. Bu yüksek güç artışını kontrol altına alabilmek için fren sistemleri kullanılmaktadır.

Fırtınalı havalar gibi rüzgârın güçlü olduğu hava koşullarında tesis kullanılmayacak ise sistemi durdurmak gerekmektedir. Bunun yapılması için çeşitli fren sistemleri kullanılmaktadır. Mekanik Fren sistemi, dişli kutusuna bir disk yerleştirilerek fren blouğu ile disk arasında sürtünme yaşanması sağlanır [6].

1.2.1.4. Dişli Kutusu

Dişli kutusu, düşük ve yüksek hızlı şaftların arasında yer almaktadır. Kanatlardan gelen mekanik gücün düşük şafttan yavaş dönme hızı yüksek tork olarak dişli kutusuna oradan yüksek hızlı şafta aktarılarak yüksek hız, düşük torka dönüştürülerek jeneratöre uygun hale getirilir. Dişli kutusu özet olarak pervane-düşük şaft ile yüksek şaft-jeneratör ikilileri arasında köprü görevi görmektedir. Genellikle rotorun dönüşüyle jeneratör arasında, tek bir dişli oranı vardır [6].

1.2.1.5. Jeneratör

Türbin sisteminde jeneratörlerin görevi mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürmektir. Senkron ve asenkron olmak üzere iki tipten oluşmaktadır. Senkron tipteki jeneratörler pahalı olmasına rağmen şebekeden reaktif güç çekmez ve şebeke frekansında çalışırlar. Asenkron jeneratörler, senkron tiptekini aksine basit ve ucuzdur. Şebeke frekansına göre biraz daha yüksek bir frekansta çalışırlar. Fakat reaktif güç çekişi vardır [6].

1.2.1.6. Düşük Hızlı Şaft

Dişli kutusu ile rotor arasındaki bağlantıyı sağlar. 600 kW'lık bir modern rüzgar türbini ele alındığında düşük hızlı şaftı 19-30 dönüş/dakika (RPM) kadar yavaş döner [6].

1.2.1.7. Yüksek Hızlı Şaft

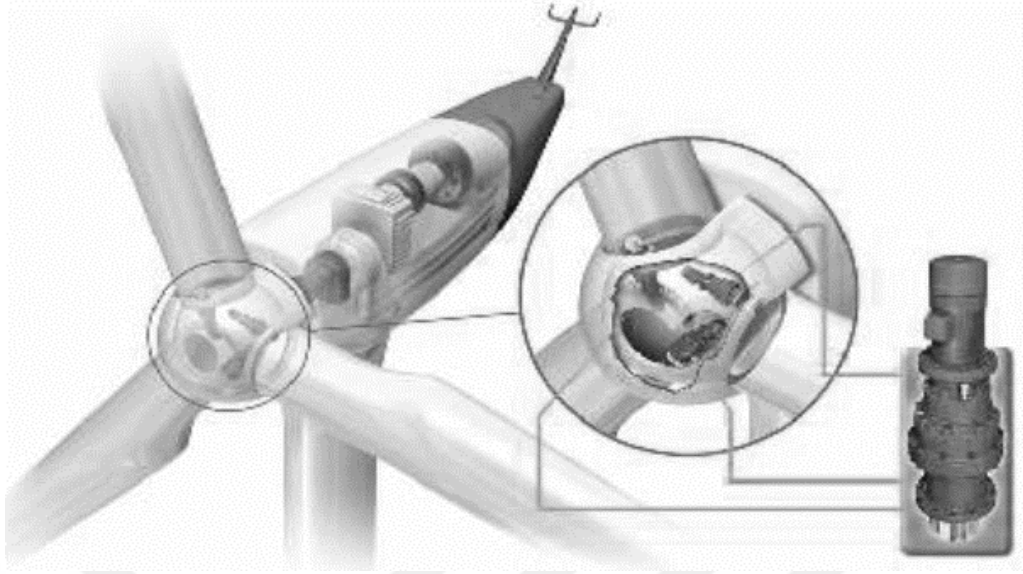
Dişli kutusuyla jeneratör arasındaki bağlantıyı sağlar. Acil bir fren diskine sahiptir. Yaklaşık 1500 devir/dakika (RPM) dönme hızını sahip olarak jeneratörü çalıştırır [6].

1.2.1.8. Kontrol Kutusu

Kontrol kutusu, rüzgar türbinin durumunu kontrol eden bilgisayardır. Türbinle ilgili bir sıkıntı baş gösterdiğinde türbini durdurur ve modem hattı sayesinde ana merkeze mesaj gönderir. Bir diğer özelliği ise rüzgar türbininde bulunan rota mekanizmasını kontrol etmesidir [6].

1.2.1.9. Kanat Döndürme Mekanizması (Pitch)

Bu mekanizmaya sahip rüzgar türbinleri göbeğe sabit bir açı ile sabitlenmiş değildir. Kanat, kanat döndürme mekanizması (pitch) vasıtasıyla rüzgar hızına göre ekseni etrafında döndürme işlemi yapmasını sağlar. Bu sayede nominal hız üzerinden sabit bir güç üretimi yapılır. Kanat Döndürme mekanizması sistemi, çeşitli hızlarda elde edilen enerjinin arttırılmasını sağlar. Diğer bir kullanımı ise nominal hız üzerinde güç kontrolünü sağlar. Bu iki kullanımı sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlanır. Bu performans artışının sağlanması kanat döndürme mekanizmasının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Yüksek hızlarda yapısal sorunlar ortaya çıkabilir. Gelişen teknolojilerle bu yapısal sorunları azaltılmak hedeflenmeye devam etmektedir. Şekil 1.3.'te Pitch mekanizması görsel olarak sunulmuştur.



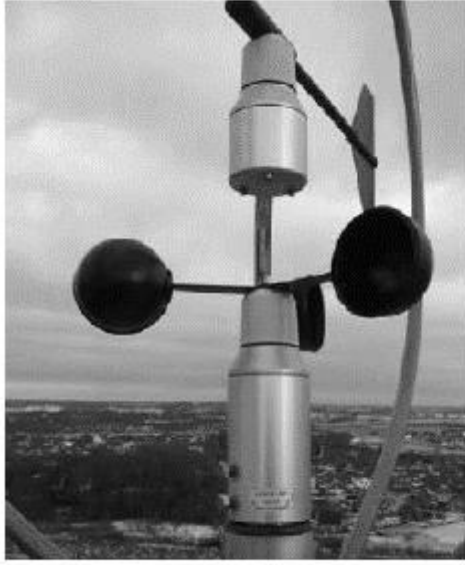
Şekil 1.3. Pitch mekanizması [6]

1.2.1.10. Rota Mekanizması (YAW)

Rüzgardan azami şekilde yararlanmanın esası kanatların yönü rüzgara dik olarak kullanılmasıdır. Rüzgarın yönü değiştiği zaman rüzgar vanası (gülü) kullanılarak rüzgar yönü belirlenir ve rota mekanizması devreye girerek türbin kanatlarının yönünü en ideal açığa getirir. Bunu genelde birkaç derecelik açı değişimi ile yapabilmektedir. Yüksek rüzgar hızlarının olduğu bir senaryoda kanatların dönüşünün yavaşlatılması veya durdurulması gerekebilir. Böyle bir istekte rota mekanizması ters yönde çalıştırılabilir. Yeni nesil rüzgar türbinlerinde rota mekanizması hidrolik fren sistemiyle beraber takılmaktadır [6].

1.2.1.11. Rüzgar Vanası (Gülü)

Rüzgar vanası, rüzgar hızını ve yönünü ölçmek için kullanılmaktadır. Ölçtüğü bu verileri nasıl içerisindeki işlemcilerle yönlendirerek maksimum verim elde edilmesini sağlayan parçadır. Zorlu iklim koşullarından korunabilmek amacıyla ultrasonik modeller kullanılmaktadır [6, 13]. İki modelin genel görünümü Şekil 1.4.'te verilmiştir.



Standart Rüzgar Türbini Anemometresi



Ultrasonik Anemometre

Şekil 1.4. Rüzgar türbini anemometre çeşitleri [13]

1.2.2. Rüzgar Türbin Çeşitleri



Şekil 1.5. Rüzgar türbini sınıflandırılması [4]

Rüzgar Türbinleri, dönme eksenlerine, güçlerine, kanat sayılarına, kurulum yerlerine, dişli özelliklerine, devirlerine ve rüzgarı aldığı yöne göre çeşitlerine ayrılmaktadır. Bu ayırım Şekil 1.5.'te grafik şeklinde verilmiştir.

1.2.2.1. Eksenlerine Göre Türbinler

Eksenlerine göre türbinler yatay eksenli, düşey eksenli ve eğik eksenli olmak üzere üçe ayrılır.

1.2.2.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinler

Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT) dönme eksenleri yeryüzüne yatay şekilde ve rüzgarın akışına yönüne diktir. Günümüzde en çok kullanılan rüzgar türbini türüdür. Ticari olarak kullanılan rüzgar türbini türlerinin bir çoğu bu tiptedir. Kanat sayısı azaldıkça bu türde dönme hızı artmaktadır. Yüksek güç katsayısına sahip olan yatay eksenli rüzgar türbinleri yaklaşık %45 verime sahiptirler. Kule, kanatlar, jeneratör, dişli kutusu, elektronik elemanlar ve göbek bu tip sistemlerde yer alan ana parçalarıdır. Bu tip rüzgar türbinlerinden tam verim alabilmek için bazı araçlar kullanılarak rüzgarın yönüne doğru açlandırılmalıdır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri genel olarak yerden 20-30 metre yüksekte yerleştirilir. Kanat uç hızı oranı (λ) için aşağıdaki değerler,

- a) $\lambda = 1-5$ Çok kanatlı rotor,
- b) $\lambda = 6-8$ Üç kanatlı rotor,
- c) $\lambda = 9-15$ İki kanatlı rotor,
- d) $\lambda > 15$ Tek kanatlı rotor,

kullanılır [4].

1.2.2.3. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinler

Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT), rüzgar yönüne dik eksenlere sahip olan türbin tipidir. Rüzgarın yönü fark etmeksizin yaw sistemine ihtiyaç duymadan aynı verimle çalışabilmektedirler. Jenaratör ve dişli kutusunun sistemdeki yeri zemin kısmında olduğu için inşaat ve bakım masraflarında tasarruf sağlanır. Düşük hızlı rüzgarlarda mekanik iş yapabilirler. Kanat sayıları arttığında maliyet ve ağırlık bakımından sisteme yük olacağı gibi yüksek hızlı rüzgarlarda verimi düşmektedir. Yapımlarında güçlendirme amaçlı çelik bağlantı halatları ile yere sabitlenirler. Daha

çok bilimsel amaçlı üretilmektedirler. Düşey eksenli türbinlerin pek çok çeşidi olmasına rağmen daha çok ilgi gören Darrieus, Darrieus-H ve Savanious Rüzgar Türbini modelleridir [3,4]. Darrieus ve Darrieus-H Rüzgar Türbinleri Şekil 1.6.'da ve Savanious Rüzgar Türbinleri Şekil 1.7.'de görsel olarak sunulmuştur.

1.2.2.4. Darrieus Rüzgar Türbinleri

Fransız mühendis George Darrieus tarafından tasarlandığından, kendi ismiyle anılan düşey eksenli rüzgar türbinleridir. Genellikle iki adet veya üç adet kanata sahiptirler. İlk çalıştırmada tahrik motoruna ihtiyaç duyarlar. Kanatlar, bir elips şekli oluşturacak şekilde türbin miline yerleştirilmiştir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeylerinde çekme kuvveti farkı oluşur. Bu kuvvet sonucunda dönme hareketi elde edilir. Rotorun her devrinde sadece iki kez maksimum güç üretmesi sistemin dezavantajlarından biridir. Türbinin verdiği güç, sinüs şeklinde bir eğri oluşturur [3,4].

1.2.2.5. Darrieus-H Rüzgar Türbinleri

Dikey eksenli darrieus türbinin daha karmaşık tipte ve gelişmiş halidir. Darrieus ile Darrieus-H arasında 2 temel fark vardır. Bunlar:

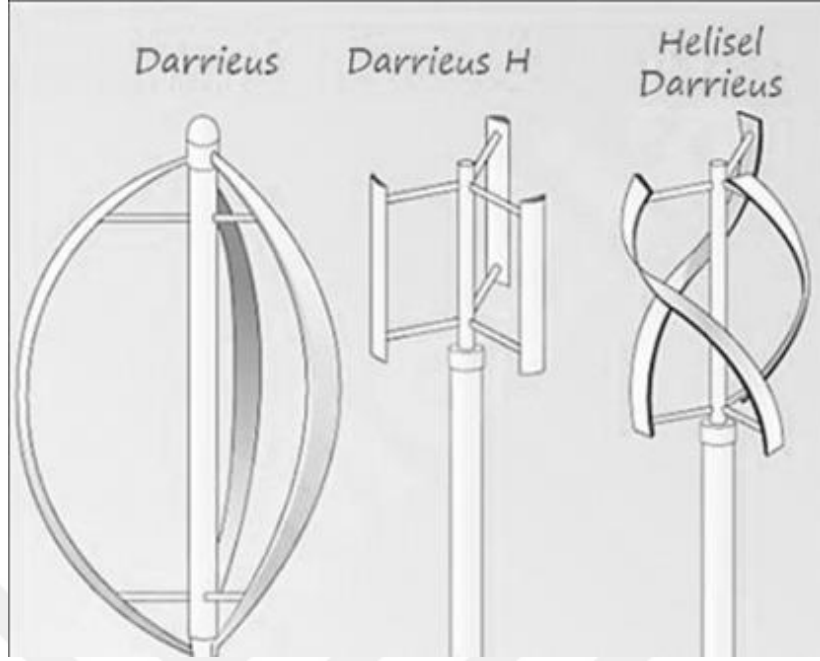
- a) Aerodinamik profili düzdür.
- b) Kanatlarda pitch kontrolü vardır.

Bu türbinin avantajı;

- a) Rüzgar yönüne çevrilmeye ihtiyaç yoktur.
- b) Jeneratör ve dişli kutusu zemine yerleştirildiği için ekonomiktir.
- c) Üretilen güç toprak seviyesinde aktarılması daha kolaydır.

Dezavantajları ise;

- a) Verimi düşüktür.
- b) Bir motor yardımıyla ilk hareketin başlatılmasına ihtiyaç vardır.
- c) Tellerle yere sabitlenerek sağlamlaştırılma yapılması gerekir.
- d) Türbin mili yatakları değiştirilmek istendiğinde makinanın tamamının yere yatırılması gerekir.
- e) Yere yakınlıkları sebebiyle alt noktalarında rüzgar hızı düşüktür. [6]



Şekil 1.6. Darrieus tipi rüzgar türbinleri [4]

1.2.2.6. Savonius Rüzgar Türbinleri

İlk Savonius modellerinde merkezleri birbirinden uzaklaştırılmış iki adet silindirden oluşmaktaydı. Şuan ki modeller iki veya üç adet kepçeye benzeyen kesitin birleşimine benzemektedir. “S” harfinin şeklini andıran bir görünüşü vardır. Savonius tipi türbinlerde akışkan, içbükey kanat üzerinde türbülanslı bir yol izleyerek dönel akışkanlar meydana getirir. Bu dönel akışkanlar türbinin performansını düşürür. Bu düşüş bu tip türbinleri elektrik üretimi yerine tarımsal su pompalama, havalandırma alanlarında kullanım tercihini arttırmıştır. Düşük hıza sahip akışkanlarla tahrik motoruna ihtiyaç duymadan devreye girebilirler. Yapımı oldukça basittir. Bu basitlik maliyet bakımından ucuzluk getirir.



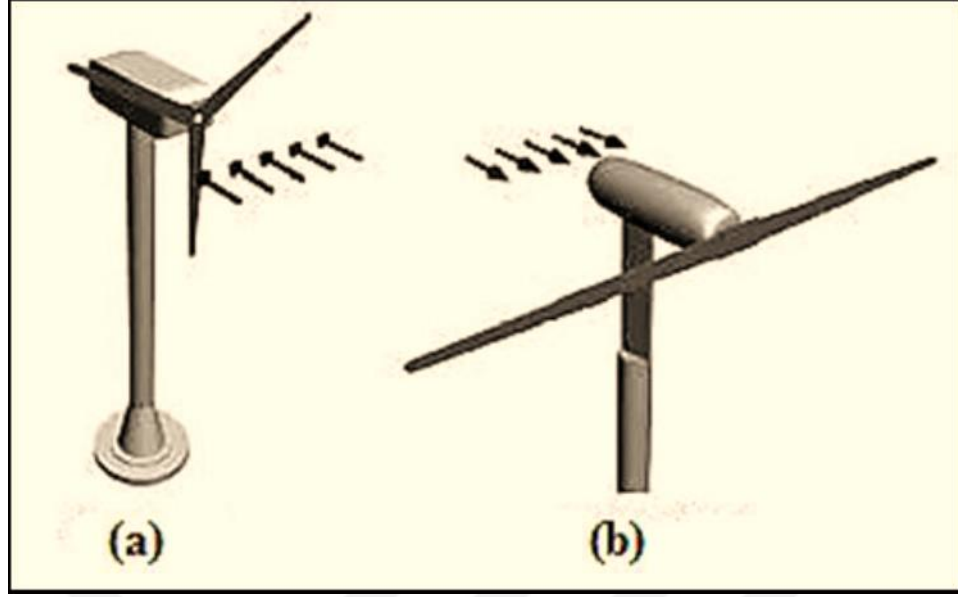
Şekil 1.7. Savonius tipi rüzgar türbini [4]

1.2.2.7. Eğik Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenleri düşeyle rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır [4].

1.2.2.8. Rüzgar Etkisine Göre Türbinler

Rüzgar etkisine göre türbinler, rüzgarın türbine geliş yönü üzerinden sınıflandırılır. Bu sınıflandırma rüzgarı arkasından alan türbinler ve rüzgarı önünden alan türbinler olmak üzere ikiye ayrılır. Rüzgar etkisine göre türbinler Şekil 1.8.'de verilmiştir.



Şekil 1.8. Rüzgar etkisine göre türbinler (a) Önden rüzgar alan, (b) Arkadan rüzgar alan [4]

1.2.2.9. Rüzgarı Arkasından Alan Türbinler

Bu türden türbinlerde sahip oldukları rotorlar kule arkasına yerleştirilir. Rüzgarı arkadan alan türbinlerde nacelle ve rotor uygun tasarlanırsa “yaw” mekanizmasına ihtiyaç kalmadan nacelle rüzgarı pasif şekilde takibe alır. Bu ve kanatlarının esnek özelliğe sahip olması rüzgarı arkadan alan türbinlerin en önemli özellikleridir. Kanatların esnek olması hem ağırlık hem de güç dinamiği açısından önemli üstünlüktür. Önden rüzgarlı türbinlere göre avantajı daha hafif olması kaynaklı kulenin yükünün azalmasıdır. Dezavantajı ise güç dalgalanmasına maruz kalındığında önden rüzgar alan türbinlere göre daha çok zarar görmeleridir. Ayrıca pasif olarak belirli bir periyotta her yöne dönebildiği için, kabloların dolanıp zarar görme ihtimali vardır [14,15]. Tablo 1.1.’de rüzgarı arkasından alan türbinler ve rüzgarı önden alan türbinler arasında yaw mekanizması ihtiyacı, kanat malzeme yapısı, kuleye binen yük ve rüzgarın turbine verdiği zarar bakımından karşılaştırması yer almaktadır.

Tablo 1.1. Rüzgar alış yönüne göre türbinlerin karşılaştırılması [4,15]

	Yaw mekanizması ihtiyacı	Kanat malzeme Yapısı	Kuleye Binen Yük	Rüzgarın Türbine Verdiği Zarar
Rüzgarı Önden Alan Rüzgar Türbinleri	Var	Sert	Ağır	Az
Rüzgarı arkadan alana rüzgar türbinleri	Yok	Esnek	Hafif	Çok

1.2.2.10. Rüzgarı Önden Alan Türbinler

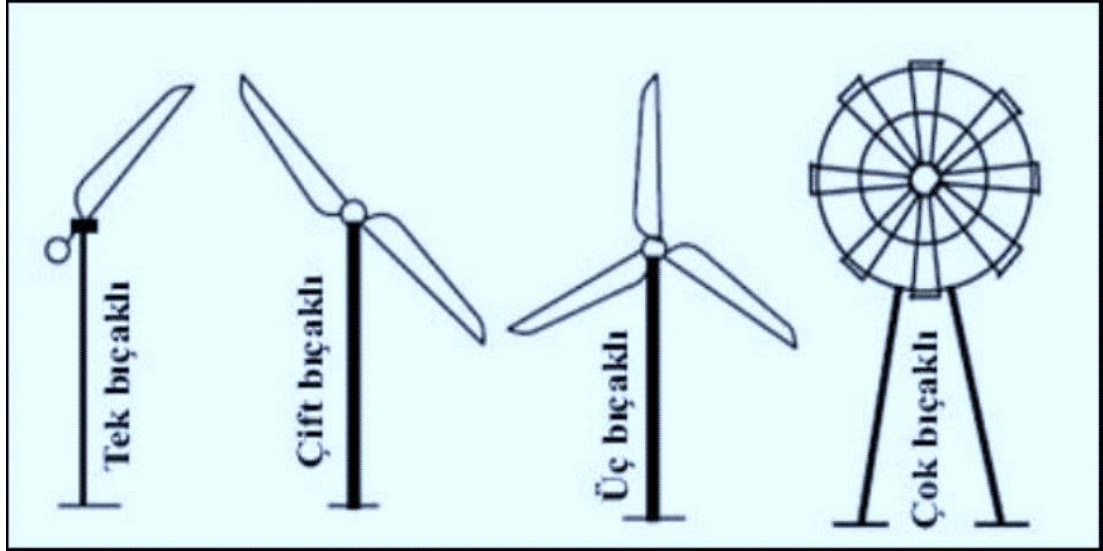
Rüzgarı önden alan türbinlerde rotor yüzü rüzgara dönüktür. Yaygın olarak kullanılırlar. En önemli özelliklerinden biri rüzgar gölgelenmesinden çok az etkilenmeleridir. Kule yapısal olarak yuvarlak ve düz olsa bile, kanatların her kule hizasından geçişinde üretilen güç azalır. Bu rüzgar çekilmesi olayı kaynaklı kanatların sert yapıp kuleden uzak yerleştirilmesi gerekir. Önden rüzgar alan türbinlerde rüzgar yönüne rotoru döndürmek için yaw mekanizması gerekir [14,15].

1.2.2.11. Kanatlarına Göre Türbinler

Kanatlarına göre rüzgar türbinleri tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olmak üzere dört adet alt gruba sahiptir. Tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgar türbinlerinin genel görünüşleri Şekil 1.9.'da yer almaktadır. Bu alt grupların maliyet, estetik görünüm, gürültü, kule ihtiyacı ve çalışma hızı bakımından değerlendirilmeleri Tablo 1.2.' de yer almaktadır.

Tablo 1.2. Kanat çeşitlerine göre türbinlerin karşılaştırılması [4,15]

	YERT			DERT		
	Tek Kanatlı	İki Kanatlı	Üç kanatlı	Çok kanatlı	Savonius	Darrierus
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Estetik Görünüm	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
Kule İhtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Çalışma hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kullanım Amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Az elektrik ve su pompalaması	Az elektrik ve su pompalaması	Az elektrik ve su pompalaması
Günümüzde Kullanımı	Yok	Yok	Var	Var	Az	Az
Rotorun Dönmesi için Rüzgarı	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler



Şekil 1.9. Kanat sayılarına göre rüzgar türbinleri [16]

1.2.2.12. Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Tek kanatlı rüzgar türbinlerinin temeli, kanat adetine göre dönme hızının yüksek olmasıdır ve bu sayede kütlede ve kanatları etkileyen yüksek rotasyonel hızda azalma görülür. Tek kanatlı türbin aerodinamik olarak dengesiz olduğu için ek hareketler meydana getirerek istenmeyen sistem yüklerine neden olabilir. Kontrol edebilmek için göbek kısmına ek yapılar yapılmalıdır (tek menteşe ile sabitleme, iki karşı ağırlıklı dengeleme, vb.). Yüksek gürültü kirliliklerine sebep olmaktadır. Kanat uç hızı

bakımından üç kanatlı türbinlerle (yaklaşık 120 m/s) karşılaştırıldıklarında iki kat daha hızlıdır [4].

1.2.2.13. Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri

İki kanatlı türbin fikri üç kanatlı türbinlerin rotor maliyetini azaltabilir miyiz düşüncesiyle ortaya çıkan ve son 25 yıla kadar kullanılmış olan bir rüzgar türbini türüdür. 10 ile 100 metre arasında yer alan rotor çaplarına sahip olup Amerika ve Avrupa'da kullanımları görülmüştür. İki kanatlı rüzgar türbinleri, bir kanatlı rüzgar türbinlerine göre daha dengelidir. İki kanatlı türbin fikri üç kanatlı türbin maliyetlerini azaltmak için ortaya atılmış olsa bile iki kanatlı rüzgar türbinlerinin dinamik etkilerinden dolayı ilave teknik güç gerektiğinden maliyeti üç kanatlılara göre aynı veya duruma göre daha fazla kalmıştır. Kanat bağlantı noktalarındaki titreşimin azaltılması için iki kanatlı rüzgar türbinlerinde rotor kısmına rotor şaftına dikey ve iki rotor kanadına dik olacak şekilde yerleştiren bir kadran sistemi kurulur. Kulenin yatay eksenine doğrultusunda dönme sonucu meydana gelen bir atalet momentine sahiptir. Bu moment sonucu türbine fazladan yük biner. Fazla yükten kurtulmanın yolu sallanan göbek ile engellenmesidir. İki kanatlı rüzgar türbininin en büyük avantajı kanat uç hızlarının yüksek olmasıdır. Dezavantajlarına baktığımızda ise yaptığı gürültünün yüksek olması ve 3 m/s gibi düşük hızlarda çalışmaması göze çarpmaktadır [4].

1.2.2.14. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Günümüzde modern rüzgar türbini olarak adlandırabileceğimiz türbinlerin birçoğu 3 kanada sahiptir. Bunun temel nedeni olarak kanatların tüm hızlarda dönme momentinin düzgün olmasıdır. Türbinin yapısından kaynaklı atalet momenti olmadığı için kanat bağlantı noktalarına titreşim önleyici sistemlere ihtiyaç duyulmaz. 70 m/s altında kanat uç hızlarına sahip olduklarından dolayı yaptıkları gürültü daha azdır. Ayrıca sarsıntısız döndükleri için göze daha estetik görünürler. Düşük güçteki rüzgar türbinlerinde üç kanatlı rotor sistemi kullanılırsa güç problemleri ortaya çıkabilir. Bu problemi çözmek için $1/n$ oranında rotorun devir sayısını arttıran dişliler kullanılabilir. "Cut in" denilen hız değerine sahip oluncaya kadar jeneratör boşa çalıştırılır [4].

1.2.2.15. Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Çok kanatlı rüzgar türbinleri aslında gelişmemiş rüzgargülleridir. Uzun süreler boyunca su pompalamasında kullanılmışlardır. Pompalama işlemindeki momentin karşılanması amacıyla çok kanatlı olarak dizayn edilmişlerdir. Çalışma hızları düşüktür. Türbin kanatlarının tasarımı genişliği göbekten kanat ucuna gidildikçe artan şekilde yapılmıştır. Pervana mili dişli kutusuna bağlanarak jeneratörün devir sayısını artırır. Rüzgargülü yönlendirici taşıyan bu sistemler yönlendirici sayesinde rüzgargülü kanat sistemi rüzgar vektörünü her zaman dik olarak alabilir [15].

1.2.2.16. Dişli Kutusu Kullanımına Göre Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri sürücü sistemleri bakımından dişli kutusu kullanan ve kullanmayan olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadırlar.

1.2.2.17. Dişli Kutusu Kullanan Rüzgar Türbinleri

Yüksek devirli ve az kutuplu jeneratörlere sahiptir. Jeneratörün devir sayısı ile pervanenin devir sayısını eşitlemek için 1/50,1/70 gibi oranlarda dişliler kullanılır. Bunlar;

- a) Sabit hızlı – Sincap kafesli indüksiyon jeneratörü (SCIG)
- b) Değişken hızlı – çift beslemeli indüksiyon jeneratörü (DFIG) [17,18]

1.2.2.18. Dişli Kutusu Kullanmayan Rüzgar Türbinleri

Dişli kutusu kullananların tersine düşük devirli ve çok kutuplu jeneratörlere sahiptir. Bu yüzden dişli kutusuna ihtiyaç duymazlar. Bunlar;

- a) Direkt sürümlü – elektriksel uyartımlı senkron jeneratörler (EESG)
- b) Direkt sürümlü – sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler (PMSG) [17,18]

1.2.2.19. Kuruldukları Yere Göre Rüzgar Türbinleri

Kurulum yerlerine göre türbinler kara üstü(onshore) ve deniz üstü (offshore) olmak üzere ikiye ayrılır.

1.2.2.20. Kara Üstü Rüzgar Türbinleri

Kara üstü rüzgar türbinleri, kurulacak olan bölgenin toprak yapısı ve sismik faaliyet durumuna bakılarak ankraj sepeti üzerine türbin temeli olarak karaya monte edilen türbin çeşididir. Bu türbin tipi yaşam yerlerine yakın bir yere kurulabileceğinde dolayı civar bölgedeki yerleşim yerleri, yapacağı gürültü seviyesi gibi etkenler göz önüne alınmalıdır. Kara üzeri rüzgar türbinlerinde maksimum kanat ucu yüksekliği teknik analizde değerlendirmeye alınan ilk unsurdur [13].

1.2.2.21. Deniz Üstü Rüzgar Türbinleri

Deniz üstü rüzgar türbinleri, açık denizlere kurulan rüzgar türbinleridir. Kara üzeri rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında olarak rotor çapı, kule yüksekliği ve gürültü koşulları bakımından daha esnekler fakat Kara üzeri türbinlere göre daha çok korozyona maruz kalırlar. Bu yüzden dış yüzeyleri korozyon önleyici boya ve kimyasal bileşenlerle kaplanmalıdır. Bu tip türbinlerde aerodinamik verimin oldukça yüksek seviyelerde tutulması amaçlanır. Bu doğrultuda bakıldığında kanat hızında deniz üstü rüzgar türbinleri kara üstü türbinlere göre daha hızlıdır. En önemli kriterler santralin kara uzaklığı ve temelin kurulacağı derinliktir. Bu faktörler türbinin maliyetini etkilemektedir [13]. Kara üstü ve deniz üstü rüzgar türbinlerinin çeşitli şartlar altında karşılaştırılması Tablo 1.3.'te verilmiştir.

Tablo 1.3. Onshore ve offshore rüzgar santrallerinin karşılaştırılması [4]

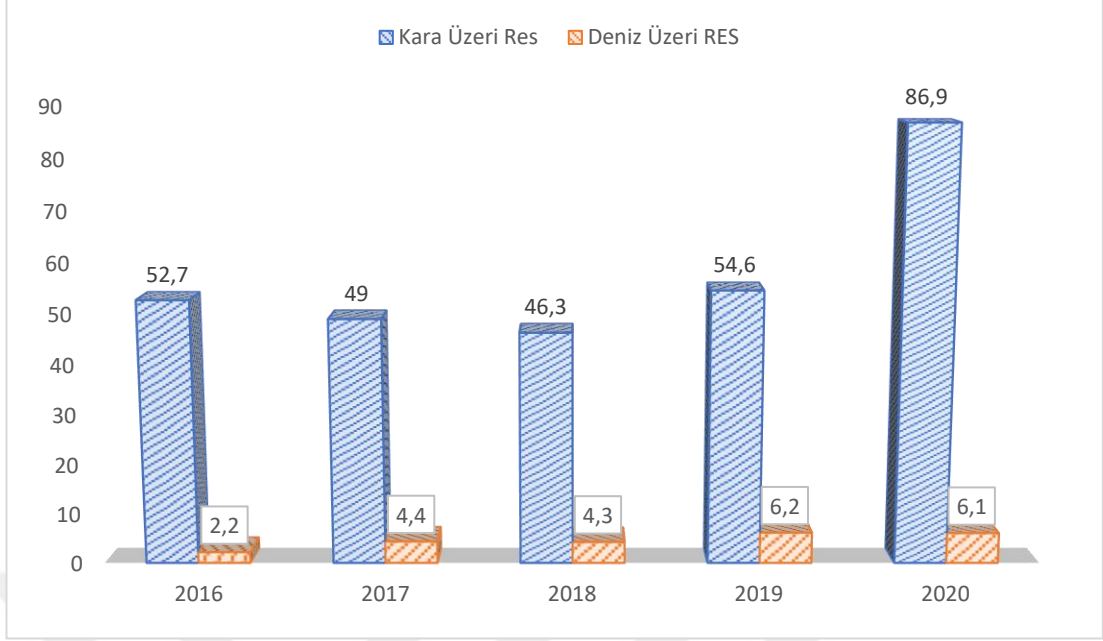
	Kurulum Maliyeti	Çalışma Hızı	Enerji Üretimi	İşletme Maliyeti	Yaygın Kullanımı
Onshore (Kara üstü)	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
Offshore (Deniz üstü)	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük

1.3. Dünyada ve Türkiyede Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi dünyada ve Türkiye’de her geçen yıl daha çok değer görmektedir. Ham madde olan rüzgarın coğrafi koşullara göre potansiyel fark göstermektedir. Doğada kendiliğinden mevcut olan enerji potansiyeline, doğal potansiyel denir. Rüzgar enerjisinin potansiyeli de doğal potansiyel adı altında yer almaktadır. Bir doğal potansiyelin insanoğlunun geliştirmiş olduğu teknolojiler sayesinde kullanılabilir duruma getirilmiş haline teknik potansiyel, bu teknik potansiyelin diğer enerji pazarlarıyla ekonomik olarak karşılaştırılması sonucu nitelenen miktara ise ekonomik potansiyel adı verilmiştir. Atmosferik koşulların yeterince el vermediği koşullarda bu doğal potansiyel düşük kalmaktadır. Ama bu ekstrem koşullarla karşı yatırımı devam ettirme amaçlı tasarımların geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu gelişmelere bakıldığında üzerine çalışılan bu geliştirmeler önümüzdeki yıllarda daha da artacağı öngörülebilmektedir [13].

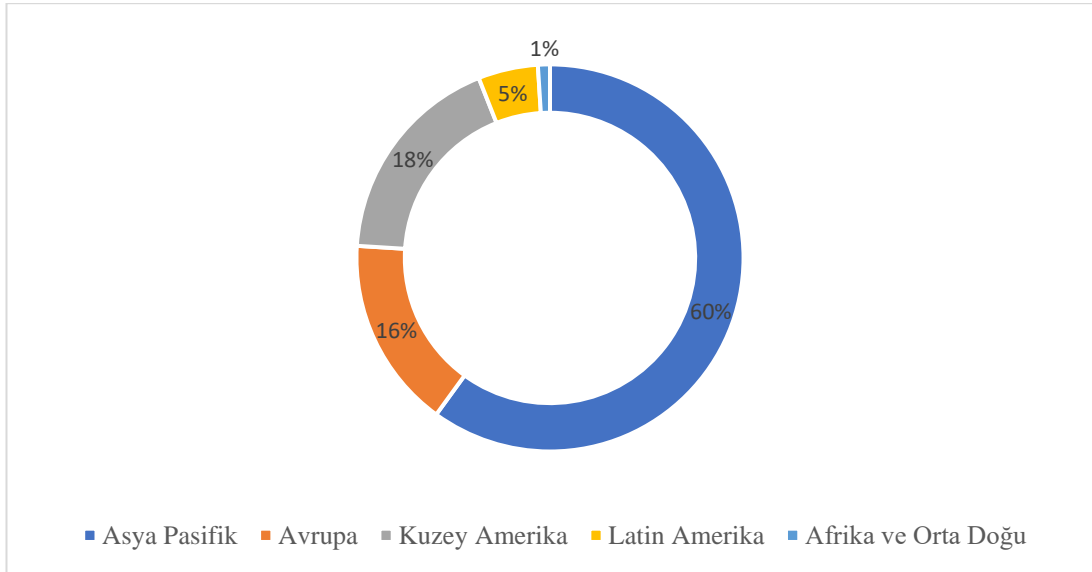
1.3.1. Rüzgar Enerjisinin Dünyadaki Durumu

Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretimine olan ilgi dünyada her geçen yıl daha çok artıyor. Bu artıştan rüzgâr enerjiside ciddi şekilde yararlanılmaktadır. 2020 yılına ait verilere baktığımızda 2019’a göre yeni kurulan rüzgâr enerjisi kurulum hacmi %56’lık bir büyüme ile 90 GW’ı aşmış durumda olduğu gözlenmektedir. Kurulum hacmi bakımından 2020 yılında kara üzeri rüzgâr enerjisi santralleri 86,9 GW, deniz üzeri rüzgar türbini santralleri 6,1 GW’lık kurulu güç payına sahiptir. Santral kurulumları yıllara göre baz alınarak bakıldığında 2020 yılı kara üstü rüzgâr santrali bakımından en yüksek değere sahip olduğu görünmektedir. Bahsedilen değerler Şekil 1.10.’da görülmektedir [13].



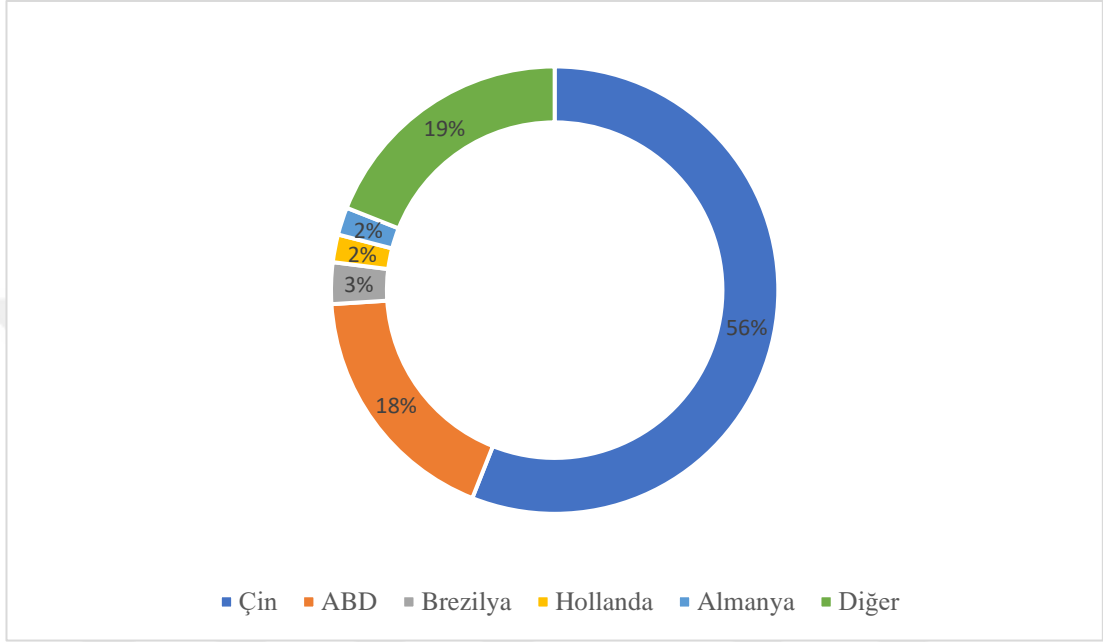
Şekil 1.10. 2016-2020 yılları arası yeni rüzgar türbini kurulum dağılımı [13]

2020 yılı pazar payı istatistiklerine ülkeler bazında bakıldığında Çin %8,5'lik büyüme ile liderliğini korumaktadır. Kuzey Amerika ise geçen yıla kadar ikinci sırada yer alan Avrupa'nın yerini %18,4'lük bir payla ele geçirmiştir. Latin Amerika ise %5'lik bir payla dördün sırada yer almıştır. Avrupa %15,9'luk payla üçüncü, Afrika ve Orta Doğu %0,9'luk pazar payıyla beşinci sırada olduğu Şekil 1.11.'de görülmektedir [13].



Şekil 1.11. 2020 yılı rüzgar enerjisi santralleri kurulum dağılımı [13]

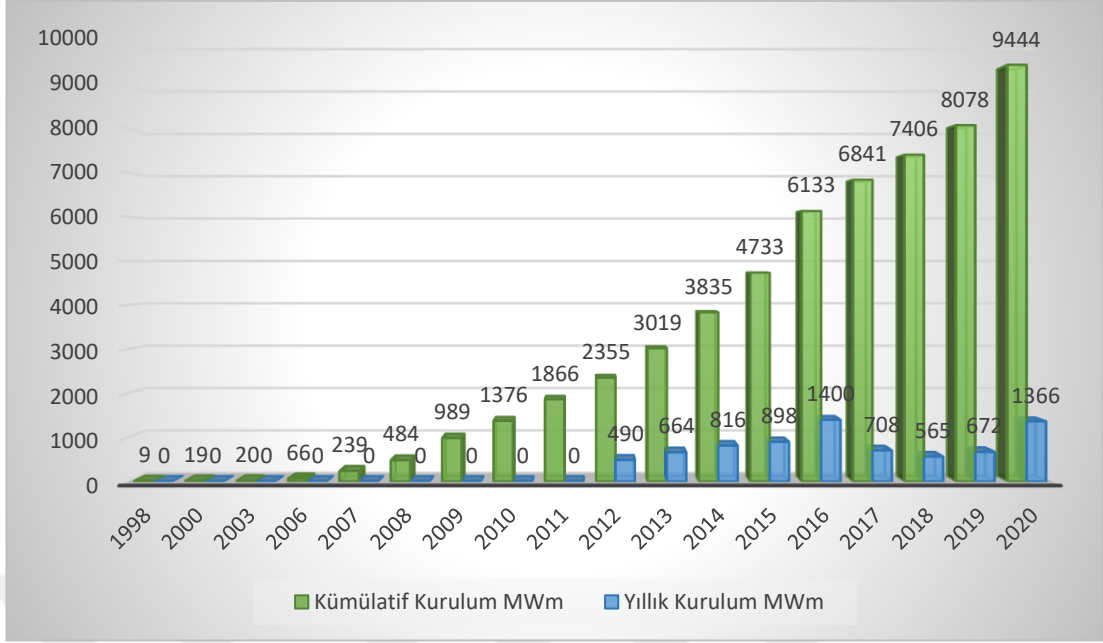
2020 yılı yeni kurulan santral verilerine bakıldığında ise ilk beş ülke sırasıyla Çin, ABD, Brezilya, Hollanda ve Almanya olarak görülmektedir. Bu ülkeler global pazar payının %80,6'sını oluşturmaktadırlar. Şekil 1.12.'de bu ülkelerin katkı oranları pasta grafik şeklinde verilmiştir [13].



Şekil 1.12. 2020 yılı rüzgar enerjisi santralleri kurulum dağılımı [13]

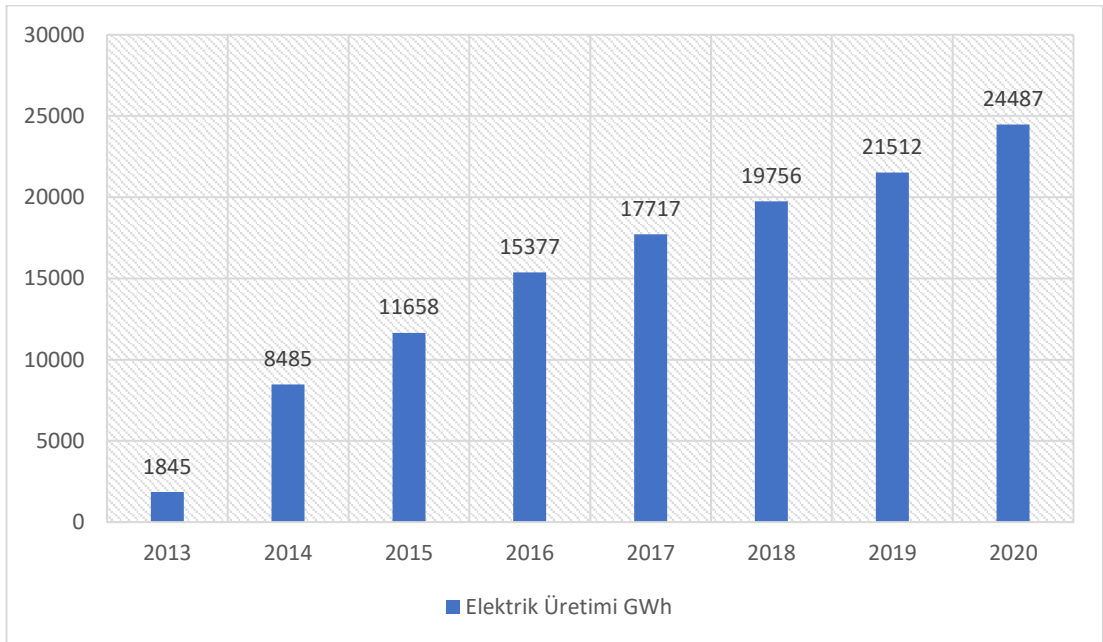
1.3.2. Rüzgar Enerjisinin Türkiyedeki Durumu

Türkiye’de ilk kurulan rüzgar enerjisi türbini 1986 yılında İzmir’in Çeşme İlçesinde yer alan 55 kW’lık enerji üreten Altın Yunus Tesisidir. Günümüze kadar Rüzgar enerjisine olan yatırımlarımız giderek artmıştır. 2021 yılı ilk yarı verilerine bakıldığında Rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi 13751,862 MWh’a ulaşarak Türkiye’de toplam üretilen elektriğe oranla %9,22’lik bir paya sahip olmuştur. Uluslararası perspektifte kurulumu tamamlanan ilk rüzgar türbininden 2020 yılına kadar Türkiye’deki rüzgar türbini kurulum verileri Şekil 1.13.’te verilmektedir.



Şekil 1.13. 1998-2020 yılları arası Türkiye’de rüzgar türbini kurulumları [13]

Şekil 1.13.’te görüldüğü üzere artan rüzgar enerjisi türbin kurulumları paralel olarak rüzgardan üretilen enerjiyi de etkilemiştir. Bu etki 2013-2021 yılları arasında Şekil 1.14.’te gösterilmiştir.



Şekil 1.14. 2013-2020 yılları arası Türkiye’de rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi dağılımı [13]

Paralel artışın kanıtı olarak görülebilecek Şekil 1.14.'e bakıldığında rüzgardan elde edilen elektrik üretiminin genel üretime oranında arttığı açık bir şekilde görülmektedir. 2013 yılındaki %1,5'lik oran 2020'de %8,4'e kadar yükselmiştir [13].

1.4. Hiperparametreler

Tüm opsiyonları, modeli tasarlayan kişiye bırakılmış, probleme ve veri setine göre farklılıklar gösteren parametre çeşidine hiperparametre denilmektedir [9]. Hiperparametreler, model tasarımı için kullanılanlar ve model eğitimi için kullanılanlar olarak iki ayrı gruba ayrılmaktadır. Model eğitimi için uygun hiperparametre seçimi, sinir ağlarının öğrenim hızını ve gelişmiş performansı iyi yönde etkilemektedir. Model tasarımı için kullanılan hiperparametreler daha çok sinir ağlarının yapısı ile ilgilidir [10].

1.5. Yapay Sinir Ağları

1.5.1. Yapay Sinir Ağlarının Gelişimi

Yapay Sinir Ağları (YSA) kavramı 1943 yılında Warren McCulloch ve Walter Pitts tarafından ileri atılmıştır. Bu ikili insan beyninin işlevlerini gerçekleştirebilecek birbirine bağlı olan sinir hücre ağlarına dayalı olarak kavramsallaştırılmasını önermişlerdir. İlk sinir ağı makinesi 1951 yılında Edmonds ve Minsky tarafından geliştirilmiştir. Bu ilk sinir ağı makinesinin kullanılış amacı bir deney faresinin kurulan labirent boyunca gösterebileceği hareketlenmeyi izlemektir. Geliştirilen nöral makine, farenin rolünü almıştır. 1962'de, Rosenblatt 'perceptron' algılayıcısını bulmuştur. Algılayıcının temel olarak öğrenme algoritmasıyla tek katmanda birbirine bağlı nöronların basit bir şekilde düzenlenmesidir. Rosenblatt'ın bu çalışmasından sonra yaklaşık 20 yıl boyunca çalıştığı konu hakkında başka bir gelişme yaşanmamıştır [19,20].

Minsky ve Papert'in 1969 yılında yazdıkları bir yayında ortaya çok önemli olan bir konu atmışlardır. Bu yayında Rosenblatt'ın algılayıcısının çok kompleks olan

ifadelerde yetersiz kaldığını ortaya çıkarmışlardır. 1980'lerin ortalarına kadar YSA'nın önünde engel olan sorunlarına bir çare bulunamamıştır. Evrensel yaklaşım olarak adlandırılan bir çalışmada Çok Katmanlı Algılayıcı'nın sınırlandırılmış bir boyutta bir uzaydan diğerine istenilen fonksiyona istenilen doğruluk derecesine kadar yaklaşabileceği matematiksel olarak kanıtlanmıştır. YSA, doğrusal olmayan senaryoları simüle edebilir ve yeni bilgilere otomatik olarak uyum sağlama davranışı gösterir. Dezavantaj olarak görülebilecek ana husus genelde az miktarda veri ile çalışmak kaynaklı matematiksel işlemlere gereksinim duyabilmeleridir. YSA'lar, çok çeşitli alanlarda sıklıkla kullanılan veriye dayalı olan oldukça popüler bir tekniktir [21].

1.5.2. Yapay Sinir Ağlarının Optimizasyonu

Ağ yapısı kurulduktan sonraki en önemli işlem bu ağın optimizasyonudur. YSA'lar, tanımlanmış bir öğrenme programı davranışı göstererek sunulan eğitim örneklerini bağlantılara adapte ederek işlevi öğrenir. Optimizasyon sürecinin temeli veri setindeki girdi ve çıktılardaki hataları küçülten önemlilik payını bulmak için kullanılmasıdır. YSA'ların eğitilmesinde ağ çıkısındaki hatayı azaltmak üzerine işlev gören optimizasyon algoritması, nöron yanlılıkları ve ağ ağırlık matrisi ayarlandıktan sonra kullanılır. YSA uygulamasıyla yapılan fonksiyon tahminlerinde yaygın olarak denetimli öğrenim algoritmaları kullanılır. Denetimli öğrenim algoritmaları giriş ve çıkış bilgileriyle birlikte kullanılır. Bir problem için uygun YSA sürecini bulmak şu şekilde ilerler;

- a) Yapıyı kurmak
- b) Ağı eğitmek
- c) Ağı test etmek [22,23,24]

1.5.3. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı

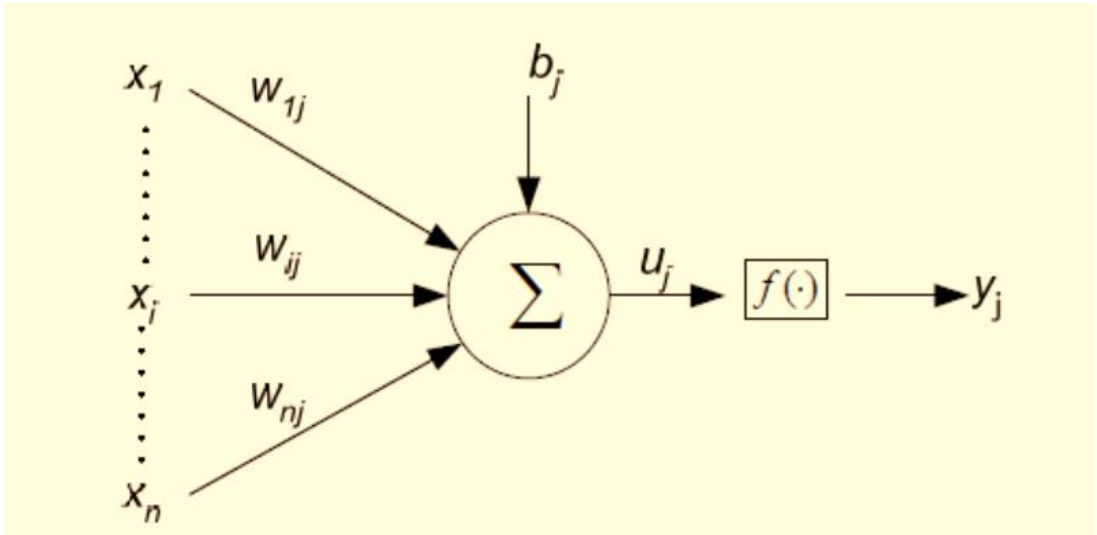
YSA, biyolojik sinir sistemlerini temel alarak ortaya atılan bilgi işleme paradigmasıdır. Sinir ağı dediğimiz olgu deneysel bilgiyi depolayıp onu kullanıma hazır hale getirmek adına doğal eğilime sahip olan, basit işlemlerden oluşan, büyük

ölçüde paralel şekilde dağıtılmış bir işlemcidir. YSA'yı insan beynine iki açıdan benzetebiliriz.

- a) Bir sinir ağı, insan beyni gibi öğrenme yolunu kullanarak bilgi edinir.
- b) Sinir ağının bilgisi, sinaptik ağırlıklara sahip olan nöronlar arası bağlantı güçleri içinde depolanır [20].

YSA'ların hem doğrusal hem de kompleks, doğrusal olmayan ilişkileri hem temsil etme hem de modellenen verilerden doğrudan öğrenme yetenekleri vardır. Bu yüzden günümüzde evrensel bir işlem yaklaşımı olarak kabul görür. Gerçek değerli ve belirli modifikasyonlardan sonra ayrık değerli fonksiyonlara yakınsamak için oldukça güçlü bir yaklaşımda bulunur. Bu yöntemler sınıflandırma, kontrol, örüntü tanıma, dinamik sistem modellenmesi ve zaman serisi tahmini gibi birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır [25].

YSA'lar nöron veya düğüm olarak adlandırılan çok sayıda basit işlemlerden oluşur. Her nöron doğrudan bağlantı ile bir diğerine bağlanır; her biri, ağ tarafından kullanılan bilgiyi temsil eden bir ağırlıkla ilişkilendirilir. Sinir ağlarının genel yapısı, eğitim veya öğrenme algoritması ve aktivasyon fonksiyonu ile karakterize edilebilir [25,26].



Şekil 1.15. Yapay bir nöronun yapısına ait diyagram [25,26]

Tek nöronlu bir sinir ağının yapısı beş temel unsurdan oluşur. Bunlar sırasıyla Şekil 1.15.'te;

- a) x_1, \dots, x_n sinyalleri alan giriş düğümleridir.
- b) Bağlantı halkası olarak adlandırılan bir ağırlık w_{ij} ile karakterize edilen bölüm
- c) Giriş sinyallerini toplamak için toplama işlevi,
- d) Nöronun aktivasyonunu hesaplayan aktivasyon fonksiyonu
- e) Çıkış düğümleri (y_1, \dots, y_j)
- f) Nöronların işlenmesi iki adımda olur:
- g) Ağırlıkla ilişkilendirilmiş giriş sinyallerinin toplanması
- h) Aktivasyon fonksiyonu toplam değere uygulanarak bir nöronun çıktısının genliğini sınırlamak.

Bu işlemlerin matematiksel izahı aşağıda yer alan denklem 7 ve denklem 8 ile göz önüne çıkartılabilir.

$$u_j = \sum_{i=1}^p w_{ij}x_i \quad (7)$$

$$y_j = f(u_j + b_j) \quad (8)$$

Burada w_{ij} , i girişini j nöronu bağlayan ağırlığı temsil etmektedir. Etkili gelen sinyal u_j ve önyargı b_j , çıktı sinyali y_j 'yi üretmek için $f(.)$ Aktivasyon fonksiyonundan geçirilir. Kullanılan nöronlar arasındaki en temel farklılık geçirilen aktivasyon fonksiyonunun tipidir. Aktivasyon fonksiyonlarının fonksiyonel tipleri, bir düğümün giriş sinyaline vereceği tepkisini belirler. Aktivasyon fonksiyonları arasında ortak olan bir nokta vardır. Hepsi giriş sinyallerini belirli bir sınırla kısıtlar. Yaygın olarak görülen aktivasyon fonksiyonlarının bir kısmı doğrusal, ikili, sigmoid ve teğet hiperboliktirler [26].

1.5.4. Yapay Sinir Ağları Çeşitleri

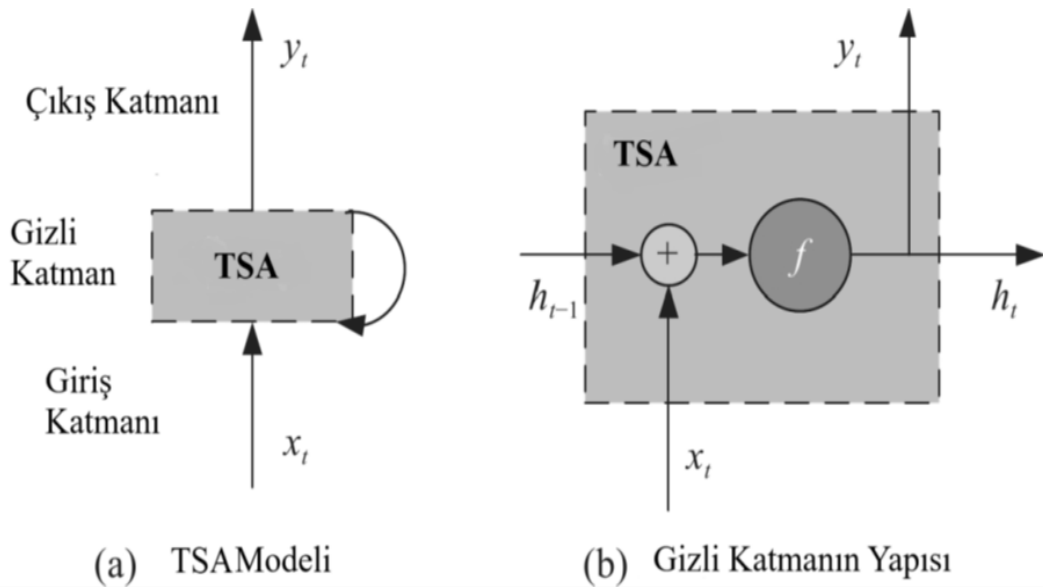
YSA'ları iki çeşite ayırabiliriz. Bunlar İleri Beslemeli Sinir Ağları (İBSA) ve Tekrarlayan Sinir Ağlarıdır (TSA).

1.5.4.1. İleri Beslemeli Sinir Ağları

İleri beslemeli sinir ağlarını temel olarak ele alırsak, bağlantıların girişten çıkışa doğru tek yönde ilerlemesini sağlamaktadır. Çok katmanlı algılayıcılar, giriş ve çıkış düğümleri arasında bir veya daha fazla katman bulunan ileri beslemeli yapılardır. Çok katmanlı algılayıcıların gizli katmanında yer alan düğümlerin sayısı, girdi ve çıktı değişkenlerinin arasındaki ilişkinin karmaşıklığına uyum sağlayabilecek şekilde değişebilirler. İleri beslemeli sinir ağlarında örnekleme ve ölçüm zaman aralığı yirmi dört saatten az veya eşit verilere uygulandığında, zaman adım tahmin olarak en iyi performansı elde ettiği görülmüştür [27].

1.5.4.2. Tekrarlayan Sinir Ağları

İBSA'ların aksine tek yönlü değil çift yönlü veri akışına sahiptirler. İBSA'lar girişten çıkışa akış sağlarken, TSA'lar 'akıntı yönü' işleme birimleri aracılığıyla verileri önceki düğümlere aktarabilirler. TSA'larda farklı döngü tiplerinde yer alan geri bildirim bağlantıları vardır. Bunun anlamı ağ çıkışının sadece harici çıkışlara değil, önceki zaman adımındaki ağ durumuyla da bağlantılı olduğudur [27,28].



Şekil 1.16. TSA yapısı ve gizli katmanın yapısı [28]

Şekil 1.16.'da tüm düğümler arasındaki yer alan bütün geri bildirim ve ara bağlantıları kullanana bir model gösterilmektedir. (a) kısmında gösterilen TSA modelinde model yapısı ve gizli katman yapısı belirtilmektedir.

TSA ve İBSA karşılaştırıldığında TSA'nın bazı avantajlara sahip olduğu görülmektedir. Mevcut hesaplamalarda kullanılabilen önceki işlem döngülerinden değerleri muhafaza etme yeteneğine sahip olmasıdır. Bu sayede TSA'lar basit statik girdilere karşı karmaşık, zamanla değişebilen çıktılar üretimini sağlayabilir.

TSA'larda her birim çıktısı zaman adımları cinsinden tanımlanabilir. Bağlam birimleri sayesinde önceki zaman adımlarından birinin çıktısının kopyası saklanabilir. Saklanan bu kopyalar bir sonraki eğitim adımlarında girdi olarak kullanılabilirler [27].

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde rüzgar enerjisinde makine öğrenimli tahmine dayalı çalışmalar son yıllarda giderek yaygınlaşmıştır. Örneğin Türkiye’de yapılan çalışmalara bakıldığında, Cantürk [29], Türkiye’de yer alan bir rüzgar çiftliğinden alınan verileri analiz ederek onları YSA modeli için uygun veri setleri haline getirir. Statik ve dinamik olarak iki farklı YSA modeli ile tahmin yaparak çıkan sonuçları naive yöntemi ile elde edilen tahmin sonuçlarıyla karşılaştırmaktadır. Dinamik YSA modeline test gününden önceki 2 gün ve önceki 1 haftaya ait veriler eğitim verisi olarak seçilirken statik modele test verisinin bulunduğu aylara ait birer hafta eğitim verisi olarak seçilmiştir. Çalışmada dinamik model naive yöntemine göre kabul edilebilir sonuçlar vermesine rağmen en düşük hata değeri statik yapıdaki ağdan elde edildiği görülür.

Demolli, ve ark [30], çalışmalarında 2013-2017 yılları arasında Niğde bölgesine ait sıcaklık ve güneşlenme şiddeti değerlerini içeren bir veri setini kullanırlar. Toplam 43800 satırdan oluşan saatlik veri setini ön işlem sonucunda günlük veri setine çevirerek 1825 satıra düşürmüşlerdir. Veri setinde yer alan ilk 4 yılın verisi makine öğrenimi için eğitim verisi olarak bir sonraki senenin verisi ise test verisi olarak kullanılmıştır. Makine öğrenimi algoritması olarak K-NN (K En Yakın Komşu), SVR (Destek Vektör Makinesi), Doğrusal (Linear) Regresyon ve Lasso Regresyonundan yararlanırlar. Bu üç algoritma arasından en başarılı tahmini 0,99788 R² skoruyla SVR sağlamıştır.

Görgel ve Kavlak [31], yaptıkları çalışmada Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) ve Uzun Kısa Süreli Hafıza (LSTM) metotlarının hibrit kullanımını olan ESA-LSTM yöntemini kullanmışlardır. Kullandıkları veri seti bir yıla ait günlük ve onar dakikalık rüzgar hızlarını içerir. Hibrit ESA-LSTM öğrenme yapısıyla yapılan tahminde MSE (Mean Square Error) 1,17’ye kadar düşürüldüğü gözlemlenmiştir.

Yazıcı [32], makine öğrenmesiyle yakın zamanlı rüzgar gücü tahmini üzerine bir çalışma yaptı. Veri seti olarak 9 türbinden oluşan aktif bir rüzgar santralının bir türbinine ait verileri kullanmıştır. Eksik kalan veriler için KNN algoritmasıyla tamamlanma yolu izlenmektedir. Verilerin tahmininde; Destek Vektör Regrasyonu (SVR), Karar Ağacı (DT), Gauss Süreç Regrasyonu gibi algoritmalarından yararlanmıştır. Elde edilen hiperparametre değerlerinin araştırılmasında Bayes optimizasyonu kullanılarak torbalama modeller oluşturmuştur. Zaman serisi analizinde LSTM sinir ağlarından yararlanır. Geçmiş Rüzgar güçleriyle birlikte kullanılacak girdi parametrelerinin seçimi için Komşuluk bileşen analizi (NCA) algoritmasından yararlanmıştır. Sonuç olarak 24 saatlik veri analizinde Statik yapıdaki torbalama modeli daha başarılı olduğunu belirtmiş fakat dinamik yapıdaki NCA-LSTM modeli 240 saatlik analizde daha başarılı bir tahmin yaptığını görmüştür.

Uluslararası yapılan çalışmalara bakıldığında ise, Lee ve Baldick [33], YSA ve GPR algoritmalarını kullanarak 48 saatlik süre baz alınarak rüzgar gücü tahmini yaptıkları bir çalışma yapmışlardır. GPR algoritmasıyla oluşturulan model geçmiş verilerden hareketle rüzgar gücü tahmini yaparken YSA modeli ile oluşturulan model hem geçmiş hem de tahmini rüzgar gücünü baz alarak güç tahmininde bulunmaktadır. Bu iki tahmin modelinde en uygun tahmin karar süreci tarafından belirlenmektedir.

Xiaoyun ve ark [34], 1 ay boyunca 100 m yükseklikteki rüzgar hızı, rüzgar yön, hava yoğunluğu, basınç ve sıcaklık verilerini ölçelerek bir veri seti elde etmişler ve bu veri setini LSTM yöntemiyle oluşturulan bir tahmin modelinde eğitim verisi olarak kullanmışlardır. Oluşturulan LSTM modelinden elde edilen rüzgar gücü tahmini gelecek 24 saatlik veriyi test verisi olarak kullanarak bir karşılaştırma yapmışlardır. Tahmin hatası NRMSE ve NMAE değerlerine göre oluşturdukları LSTM modeli Geri Yayımlı olagiritmasına (BP) göre %4 ve Destek Vektör Makinesi (SVM)'na göre %7 tahminde daha az hataya sahip olmuştur.

Dong ve ark [35], yaptıkları çalışmada rüzgar hız ve güç verilerinden yararlanarak 1,6,12,24 ve 48 saat gibi farklı test verisi ile 60,120 ve 240 saatlik eğitim verisinden yararlanarak bir LSTM modeli kullanarak kısa dönemli bir rüzgar gücü tahmini elde

etmeyi amaçlamışlardır. Deney sonucunda veri olarak alınan zaman süresinin artmasıyla Ortalama Kare Hatası (MSE)'nin arttığı tespit edilmiştir. 120 saatlik eğitim verisi ile elde edilen tahminde en düşük ortalama kare hatası değeri gözlemlenmiştir. Son ve ark [36], çalışmalarında 3 farklı coğrafi bölgeden elde ettikleri kısa dönemlik verilerden oluşan 4 ayrı veri setini LSTM yöntemi kullanarak bir hibrit model oluşturmuşlardır. Model 1'in veri seti olarak girdide sadece rüzgar gücü yer almaktadır. Model 2'de rüzgar gücü ve rüzgar yönü verileri girdi olarak kullanılmıştır. Model 3 rüzgar gücü ve rüzgar hızı verileri ile oluşturulmuştur. Model 4 ise rüzgar gücü, rüzgar hızı ve rüzgar yönü verilerini içermektedir. Bu modeller üzerinden yapılan rüzgar gücü tahminlerinde model 1'in ilk aşamada diğer modellere göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Fakat model 3'ün orta ve geç aşamalarda model 1'den de iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen verilere dayanarak kısa süreli tahminlerde rüzgar gücü verisinin en önemli parameter olduğu fakat uzun süreli tahminlerde rüzgar gücü verisinin tek başına yeterli olamayacağı yanında meteorolojik verilerde ihtiyaç duyulacağı sonucuna varılmıştır.

Cali ve Sharma [37], Sotevanto rüzgar çiftliği verilerini kullanarak 24 saatlik rüzgar gücü tahmininde bulunabilmek için çalışmalarında LSTM ve duyarlılık analizi yöntemlerinden yararlanmışlardır. Çalışmada kullanılan veri Sotevanto rüzgar çiftliğinin 1 yıllık rüzgar gücü verisidir. 1 yıllık verinin 9 ayı eğitim verisi, 3 ayı ise test verisi olarak kullanılmıştır. Veri setinin girdi parametrelerinin farklı kombinasyonlarıyla elde edilen 9 ayrı tahmin modeli yapılmış ve normalleştirilmiş ortalama karekök sapması değerleri hesaplanmıştır. Rüzgar yönü ve rüzgar hızı parametleri ile yapılan model 2 temel model olarak ele alınarak 1 saat zaman sürecinde normalleştirilmiş ortalama karekök sapması değeri %4,23 olarak ölçülmüştür. Aynı model 24 saat zaman sürecinde değerlendirildiğinde normalleştirilmiş ortalama karekök sapması değeri %10,43 olarak sonuç göstermiştir.

Liu ve ark [38], çalışmalarında LSTM ve yusufçuk algoritmasından yararlanarak bir tahmin modeli oluşturmuşlardır. Veri seti olarak bu modelde Texas'da yer alan bir rüzgar çiftliğinin 5 dakika zaman adımına sahip 1 yıllık güç değerleri kullanılmıştır. İki gizli katman, giriş katmanı ve bir çıkış katmanından oluşan LSTM modelinin kısa

dönem rüzgar gücü tahminindeki başarısını arttırmak amacıyla yusufçuk algoritmasıyla optimize edilmiştir. Yusufçuk modeliyle optimize edilen LSTM algoritmasının ne kadar başarılı olduğu gözlenlenmek istenip aynı veri setiyle Aşırı öğrenme makineleri ve Gri kurt optimizasyonu ile optimize edilmiş geri yayımlı ağ modelleri üzerinde de tahminler oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı sinir ağlarından elde edilen tahmin sonuçları RMSE, Ortalama Mutlak Hata ve R^2 hata kriterleri bakımından karşılaştırılmaya tabi tutulmuştur. Bu karşılaştırma sonucunda RMSE, Ortalama Mutlak Hata değeri olarak yusufçuk algoritmasıyla optimize edilen LSTM modelinin diğer modellere göre daha az hataya ve daha yüksek tahmin doğruluğuna sahip olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak literatür üzerinden yapılan araştırmalarda çalışmaların bir çoğunun Rüzgar enerjisi üzerinde kısa dönemlik tahminlerin yapıldığı görülmüş olup uzun dönemli tahmin çalışmalarının nerdeyse hiç olmadığı farkedilmiştir. Bu yüzden çalışmamızda uzun dönemli çalışmaların neden daha az yapıldığını öğrenmek temel amaç olmuştur.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yalova'nın Armutlu ilçesinde yer alan Yalova Rüzgar Enerjisi Santrali'nin 2018-2021 yılları içerisinde 35050 üretilen güç değeri çalışmamızda materyal olarak kullanılarak bir tahmin modeli oluşturulmak istenmiştir. Bu tahmin modeli için kullanılan yöntem Tekrarlanan Sinir Ağlarının gelişmiş bir versiyonu olan LSTM sinir ağı algoritmasıdır. Materyal olarak kullanılan 35050 adet üretilen güç verisi 1 saatlik süreler üzerinden ölçüm sağlandığı için matematiksel yöntemler kullanılarak günlük ve aylık versiyonlarına çevrilmişlerdir.

3.1. Materyal

Veri seti olarak, Yalova Armutluda bulunan Yalova Rüzgar Enerjisi Santrali'nin 2018-2021 yılları arasındaki üretilmiş güç değerleri kullanılmıştır. 35050 veriden oluşan setteki ilk 3 yılın verileri eğitim verisi, son yılın verileri test verisi olarak kullanılmıştır. Veri seti, makine öğrenimli tahmin programı kullanımı için günlüğe çevrilmiş olup, günlük ve aylık değerler kullanılmıştır. Veri setindeki değerlerden bazı aylık değerler Tablo 3.1.'de verilmiştir [2].

Tablo 3.1. Veri setinin aylık değerleri [2]

Tarih	Üretilen güç (MWm)
01.2018	11895,95
02.2018	10170,05
03.2018	14378,02
04.2018	6213,16
05.2018	6121,06
06.2018	7887,18
07.2018	4820,33
08.2018	16967,72
09.2018	11867,44
10.2018	11270,25
11.2018	14753,74
12.2018	11155,61
01.2019	13207,83

Tablo 3.1. Veri setinin aylık değerleri (Devam)

02.2019	10360,13
03.2019	15444,71
04.2019	7576,34
05.2019	6870,83
06.2019	9637,63
07.2019	11966,98
08.2019	17367,84
09.2019	14376,91
10.2019	6662,51
11.2019	10221,13
12.2019	13288,99
01.2020	13740,2
02.2020	15290,68
03.2020	12428,33
04.2020	13707,17
05.2020	8861,84
06.2020	5280,39
07.2020	18167,72
08.2020	14196,52
09.2020	12828,46
10.2020	6695,18
11.2020	13496,47
12.2020	15153,52
01.2021	19075,86
02.2021	14374,95
03.2021	11429,74
04.2021	10976,33
05.2021	9327,4
06.2021	4328,95
07.2021	12104,29
08.2021	11826,79
09.2021	14316,56
10.2021	13459,97
11.2021	12123,74
12.2021	18586,95

3.2. Yöntem

3.2.1. Rüzgar Güç Hesabı

v hızına sahip olduğunu varsaydığımız rüzgar ve m kütleli havanın sahip olacağı kinetik enerji [3],

$$W_{kinetik} = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (9)$$

şeklinde hesaplanabilir. Güç, birim zamanda harcanan enerjidir. Bu tanımdan yola çıkarak,

$$P = \frac{dW_{kinetik}}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2} \times m \times v^2\right)}{dt} = \frac{1}{2} \times \frac{dm}{dt} \times v^2 \quad (10)$$

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} \quad (11)$$

$$P = \frac{1}{2} \times \dot{m} \times v \quad (12)$$

şeklinde hesaplanabilir. Rüzgar hızı yeryüzüne paralel olarak hesaplandığından,

$$\dot{m} = \frac{\rho V}{t} \quad (13)$$

$$V = A \times l \quad (14)$$

$$\dot{m} = \frac{\rho \times A \times l}{t} = \rho \times A \times v \quad (15)$$

olarak belirtilebilir. Denklem 9'dan denklem 15'e kadar olan tüm formüllerin geneline bakıldığında rüzgar enerjisi formülü,

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \times \pi \times r^2 \quad (16)$$

şeklinde yazılır. Denklem 16'da; P değeri rüzgarın gücünü, ρ değeri havanın yoğunluğunu, v değeri rüzgarın hızını ve r değeri rotor yarıçapını belirtmektedir. Bu formül rüzgarın gücünü vermektedir. Rüzgar türbininde elde edilen gücün hesaplanabilmesi için türbin öncesi ve sonrasındaki rüzgar hızlarının karşılaştırılması gerekir. Türbinde elde edilen gücün hesabı için iki hızdan bahsedilebilir. Bunlar V değeri ile belirtilen rotora gelen rüzgarın hızı ve V_0 değeri ile belirtilen rotoru terk eden rüzgarın hızıdır.

$$P_0 = \frac{1}{2} \times \dot{m} \times (V^2 - V_0^2) \quad (17)$$

denklem 17'e birim zamandaki kütle geçişi yerine yazılıp gerekli cebirsel işlemler yapılırsa,

$$P_0 = \frac{1}{2} \times \left[\rho A \frac{(V - V_0)}{2} \right] \times (V^2 - V_0^2) \quad (18)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} (\rho A V^3) \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \times \left(1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right)}{2} \quad (19)$$

denklem 18 ve 19 elde edilir.

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \times \left(1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right)}{2} \quad (20)$$

denklem 20 de yer alan C_p değeri rotor sabitidir (güç sabiti). Önceki Formüller göz önüne alındığında,

$$P_0 = \frac{1}{2} \times (\rho A V^3) \times C_p \quad (21)$$

türbin tarafından elde edilen güç denklem 21'deki gibi bulunur [3].

Bu aşamada veri setindeki saatlik veriler, günlük verilere çevrilmiştir. 35050 satırlık veri, günlüğe çevrildiğinde 1461 satır haline geldi. Üretilen güç için günlük toplam değer hesaplanmıştır. Bu çevirme için kullanılan işlem denklem 22'de verilmiştir.

$$\text{Günlük veri} = \text{Saatlik verilerin toplamı} \times \frac{24}{1} \quad (22)$$

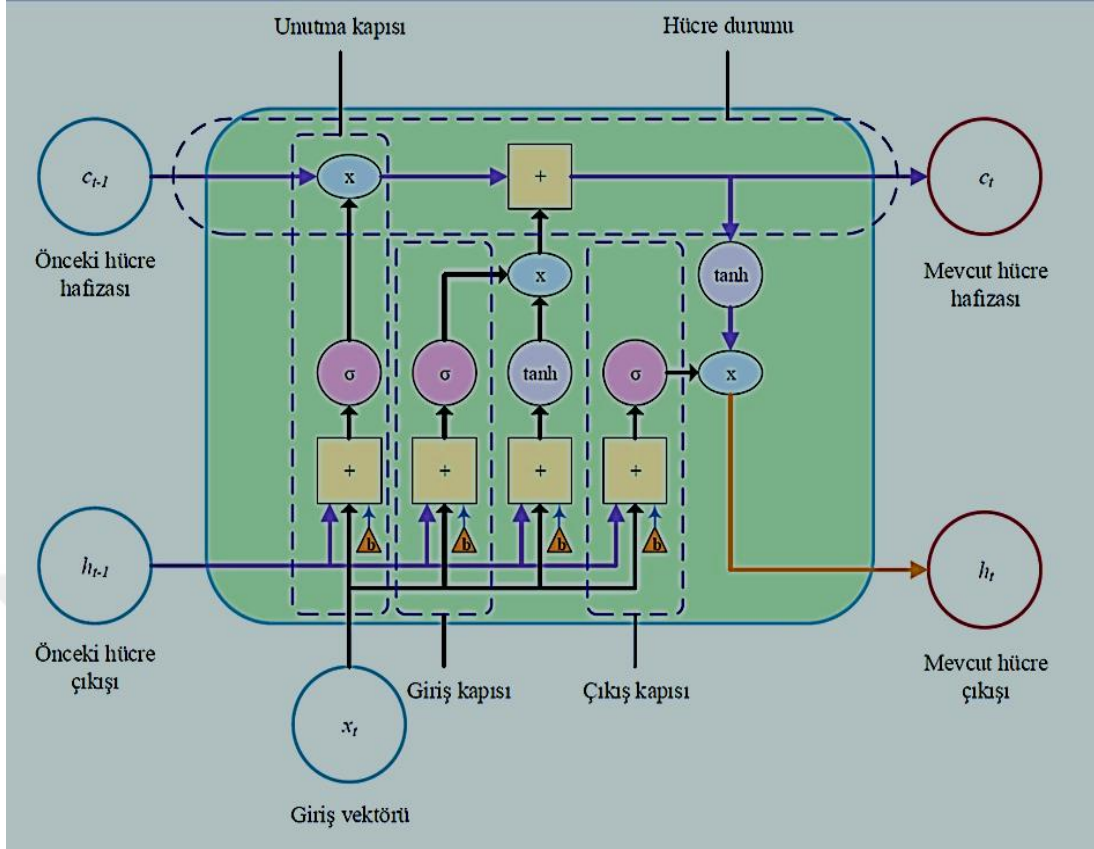
Bir diğler aşama olan günlük verileri aylığa çevirme işlemi ise denklem 23’de verilmiş olup 1461 satırdan oluşan günlük veri değerleri evirim sonrası 48 satırlık aylık veri haline gelmiştir.

$$\text{Aylık veri} = \text{Günlük verilerin toplamı} \times \frac{\text{o ayki gün sayısı}}{1} \quad (23)$$

3.2.2. Uzun Kısa Süreli Hafıza

TSA’lar kısa süreli bilgilerde geleceği tahmin etmekte başarı göstermekteyken uzun süreli bağımlı ve sıralı giriş verisinde bilgi ihmali yapmaktadır. TSA’da sinir ağlarını güncellemek için kullanılan eğim değerlerinin geriye yayılım yaptığında küçülmesidir. Eğim değerinin küçülmüş olduğu bir katman güncellemesinde öğrenme oranı azalır. Bu olumsuz sebeplerden dolayı uzun süreli verilerde TSA’nın kullanılabilirliği düşmektedir. Bahsedilen sorunların çözülmesi için yinelenen sinir ağlarının özel bir türü olan LSTM mimarisi geliştirilmiştir. Bu mimariler genellikle zaman serisi tahminleri ve öngörülerde kullanılır [31,39].

LSTM’ler geri yayılımda farklı katmanlardan gelen hataları korur. Giriş ve çıkış işlemleri arasında yeni bir kanal açarak yaptığı koruma sayesinde uzun zamansal verilerin belirli bir sayıdaki adımdan sonra alacağı hata payı sabit kalır. Bu metotla bilgi her hücre durumundan geçer ve geçişlerde değiştirilebilir. Böylece bilgi parçaları unutulup hatırlanabilmektedir. LSTM modelinin blok diyagramı Şekil 3.1.’de verilmiştir.



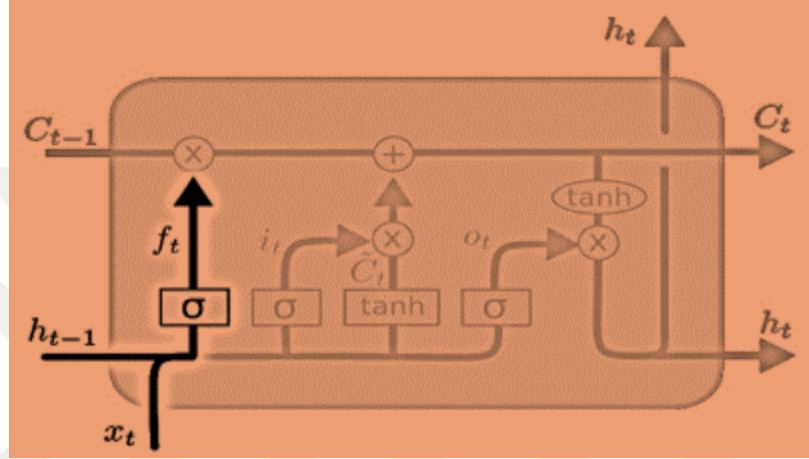
Şekil 3.1. LSTM modelinin blok diyagramı [39]

LSTM; dışardan depolanabilen, hücreye yazabilen, okunabilen bilgiyi alan yapıdaki birbirine bağlı dört katmandan oluşmaktadır. Okuma, yazma ve silme gibi işlemlerin gerçekleşme zamanlaması LSTM'nin yapısında yer alan kapılar sayesinde yapılır. Bu kapılar aktivasyon fonksiyonlarının yer aldığı ağ yapısını içerirler. Nöronlar gibi gelen giriş bilginin belirlenen i bir ağırlığa göre geçirme veya durdurma özelliği gösterir. Ağırlıklar öğrenme aşamasında hesaplanır. Bu ağ yapısı vasıtasıyla hücre gelen veriyi alma, silme veya iletme gibi işlemleri öğrenir.

LSTM algoritmasının ilk adımında hangi giriş bilgisinin hücreden geçirileceğine karar vermek yer alır. Bu eylem, unutma kapısında gerçekleştirilir. Unutma kapısı önceki hücrenin gizli durumu h_{t-1} ve o zamana ait x_t giriş değerlerini ele alır. Ele alma süreci Şekil 3.2.'de gösterilmektedir. Bu değerler kodlanarak ağırlıklarla çarpılıp eğim değeri eklenir. İşlemler yapıldıktan sonra elde edilen değere sigmoid fonksiyonu uygulanarak 0 ve 1'lerden meydana gelen çıkış vektörünün elde sağlanır. Anlamsal olarak

bakıldığında vektör değeri 0'a yaklaştıkça bilgiler unutulur, 1'e yaklaştıkça bilgiler tutulur. Vektör değerleri bu kapıdaki son işlem olarak hücre durumuna aktarılır ve bir önceki hücre değeri olan c_{t-1} ile çarpılır. Unutma kapısının matematiksel olarak ifadesi denklem 24'te yer almaktadır [31,39].

$$f_t = \sigma (W_f \times [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (24)$$



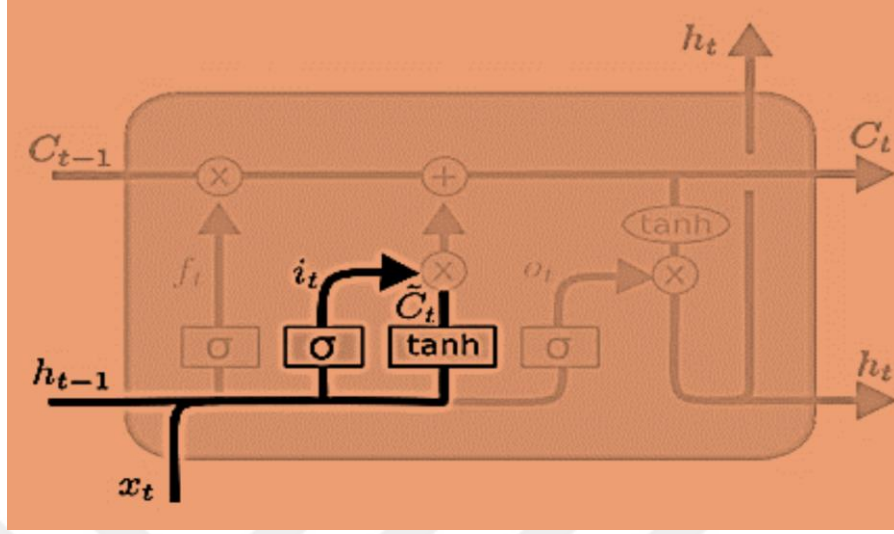
Şekil 3.2. LSTM sigmoid katmanı [31]

Hücre durumuna yeni bilginin eklenmesi iki aşamada gerçekleşir. İlk aşama giriş katmanıdır. Giriş kapısı, hücre durumunda hangi bilgilerin güncelleneceğinin karar verildiği yerdir. İlk işlem olarak önceki gizli durum h_{t-1} ve x_t mevcut giriş bir sigmoid fonksiyonundan geçirilir. 0 ile 1 arasında bir vektör eldesi alınır. Bu vektörden yola çıkılarak hangi değerlerin güncelleneceğine karar verilir. Daha sonra ikinci aşamada h_{t-1} ve x_t tanh fonksiyonundan geçirerek -1 ile 1 arasında değerlerden oluşan bir \tilde{C}_t yeni aday vektör elde edilir. Bu süreç Şekil 3.3.'te yer almaktadır. Sigmoid çıktısı tanh çıktısındaki hangi bilgilerin saklanacağına karar verir. Son olarak her iki çıktı çarpılır ve hücre durumuna eklenir. Denklem 27'de matematiksel Şekil 3.4.'te bu eklenme işleminin hücresel görünümü verilmiştir. Bu iki aşamanın matematiksel gösterimi denklem 25 ve 26'da verilir.

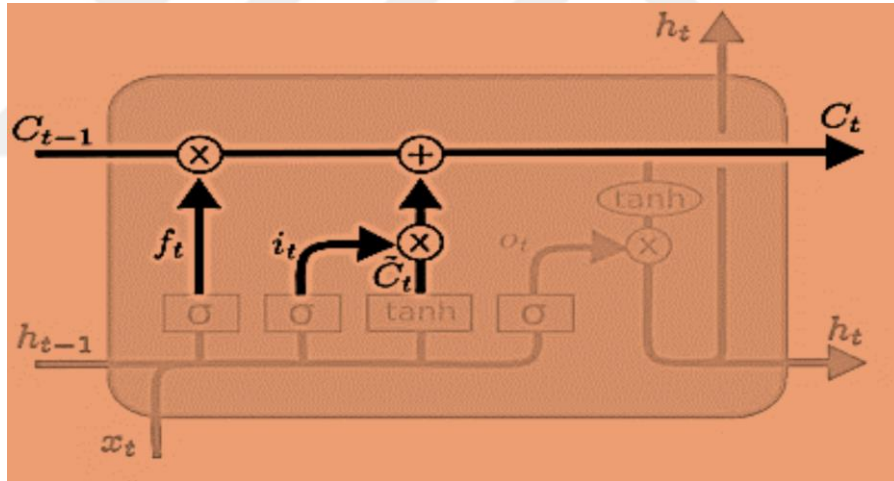
$$i_t = \sigma(W_i \times [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (25)$$

$$\tilde{C}_t = \tan h (W_c \times [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (26)$$

$$C_t = f_t \times C_{t-1} + i_t \times \tilde{C}_t \quad (27)$$



Şekil 3.3. Sigmoid katmanı ile tan h katmanı birleşimi [31]



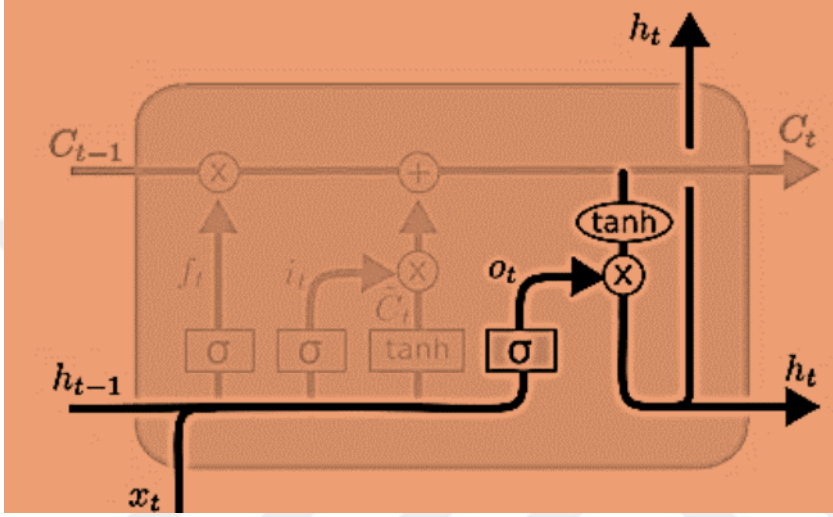
Şekil 3.4. LSTM yeni hücre durumu [31]

Son aşamada; çıkış kapısı, bir tanh aktivasyon fonksiyonu vasıtasıyla hücre durumu değerleri -1 ile 1 arasında yer alan bir vektöre dönüştürülür. Dönüştürülme işleminden sonra unutma kapısına benzer bir şekilde bir sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile hangi bilgilerin taşınıp silineceği seçilir. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu denklem 28'de verilmiştir. Sigmoid ve tanh fonksiyonlarından elde edilen sonuçlar çarpılarak bir sonraki zaman hücresinin gizli durumu olan h_t elde edilir. Bu eldenin matematiksel

gösterimi denklem 29’da verilmiştir. Çıkış kapısının hücre içi gösterimi Şekil 3.5’te verilmiştir [31,39].

$$o_t = \sigma(W_o \times [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (28)$$

$$h_t = o_t \times \tanh(C_t) \quad (29)$$



Şekil 3.5. LSTM çıkışı [31]

3.2.3. Kök Ortalama Karekök Hatası

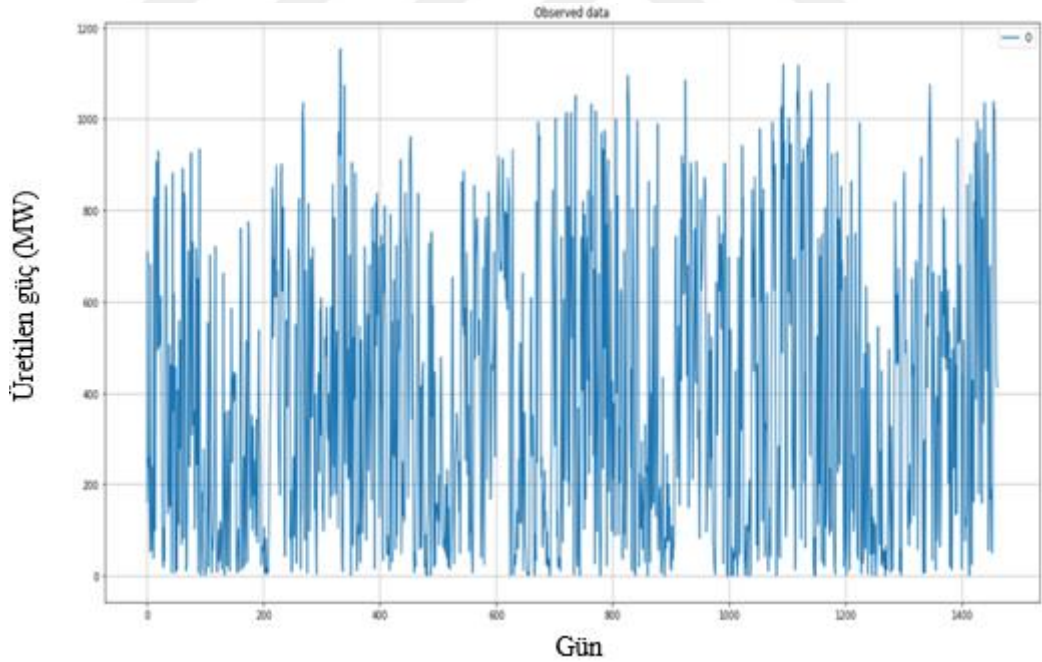
Kök Ortalama Karekök Hatası (Root Mean Absolute Error-RMSE), tahmin sonuçlarının verilerden ne kadar farklı olduğuna dair mutlak sayı değeri vererek model performansını ölçmek amacıyla kullanılan istatistiksel ölçüm metodudur. RMSE'nin matematiksel gösterimi denklem 30'da yer almaktadır [40].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (30)$$

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yalova Rüzgar Enerjisi Santralinin 2018-2021 yılları arasında yer alan 35050 adet veri günlük ve aylık çevrimleri yapılarak LSTM yöntemiyle oluşturulan bir tahmin modelinde öğrenim ve test verisi olarak çalışmamızda kullanılmıştır. Günlük ve aylık değerler farklı nöron ve epok (epoch) değerlerine sahip farklı LSTM modelleri üzerinden makine öğrenimiyle tahmin araştırmaları yapılmıştır. Bulgu olarak tahminler sonucu ortaya çıkan çeşitli RMSE değerleri incelenmiştir.

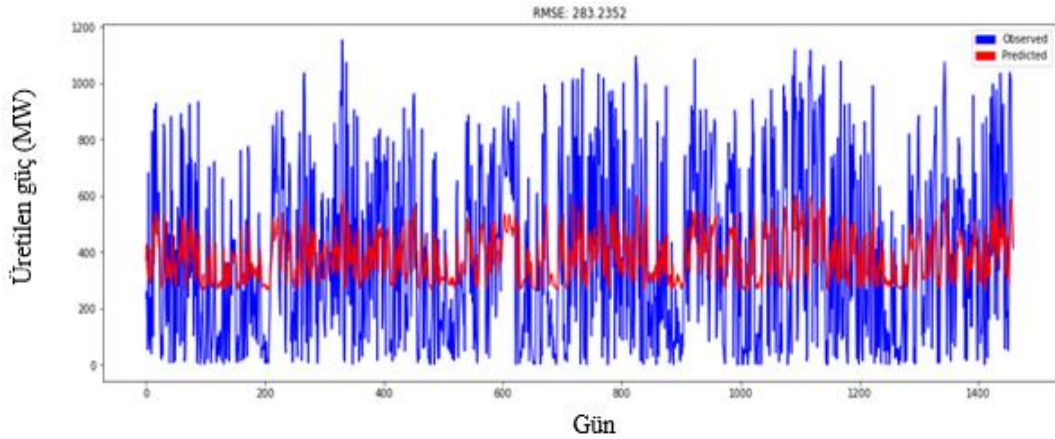
4.1. Günlük Veriler



Şekil 4.1. Günlük bazda ölçülen gerçek veriler

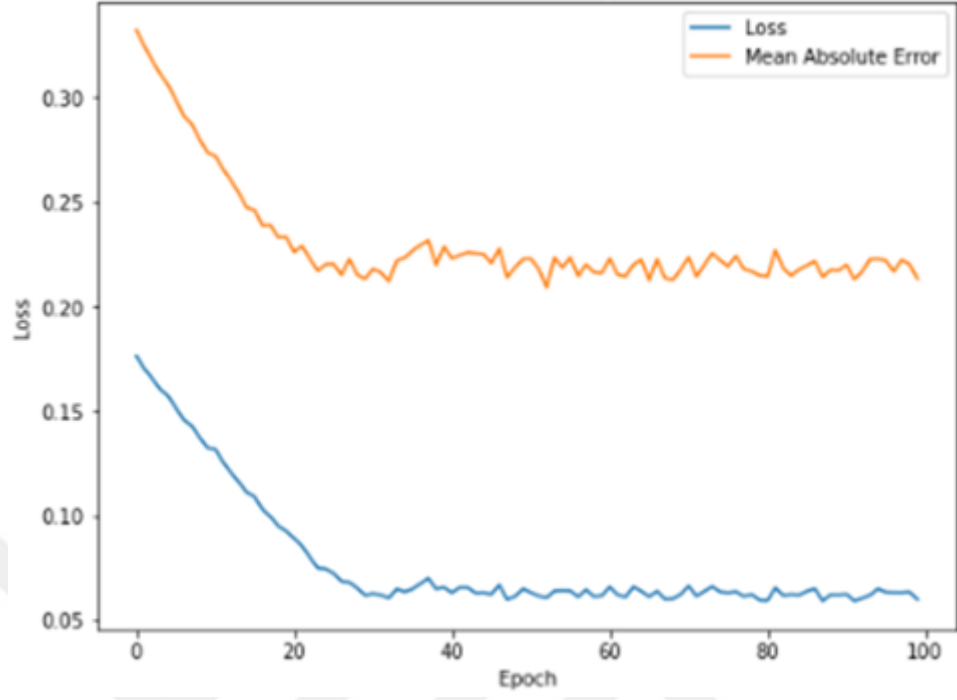
Şekil 4.1.'de yer alan ölçülen gerçek günlük verilerle ilgili olan ilk uygulamada 64 nöronlu birinci LSTM katmanı, 32 nöronlu ikinci LSTM katmanı ve

1 nörondan oluşan çıkış katmanı için değişen epok sayıları için sonuçlar verilmiştir. Epok 100 için geçerli tahmin değerleri Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te yer verilmektedir. Basit model üzerinden günlük verilerle yapılan 100 epoklu zaman-güç grafiğinde tahmin değerleri yaklaşık 300 MW ve 600 MW aralığında kalmıştır. Tahminin bu aralıklarda kalmasının sebebi basit modelin düşük epokta yeterince ezber yapamadığından kaynaklıdır. Yapılan tahmin ve gerçek veriler karşılaştırıldığında aralarındaki farkı açıklayan RMSE değeri 283,2352 olarak elde edilmiştir. Epok 1000 değeri için tahmin sonuçları Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'te görülmektedir. Epok 100'e göre epok 1000 değerinde makinenin yapmış olduğu tahmin değerlerinde beklenildiği üzere genişleme olmuştur. Bu eylem epok değeri arttıkça makinenin yaptığı ezberin daha iyi olduğuna ve daha iyi sonuçlar elde edebileceğimizin göstergesi olmuştur. Bu artış gerçek veri ve tahmin verisi arasındaki farkı azaltarak RMSE değerini 264,3929'a düşürmüştür. Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi Epok değerinin 5000 seçildiği sinir ağı modelinde, yüksek epok değerinde sistemin ezberleme yani overfitting olması beklenmiştir. Tahmin veri aralığı epok arttıkça genişleme göstermeye devam ettiği açıkça görülmektedir. Fakat RMSE değeri düşmesi beklenirken 350,4771 gibi bir değer eldesiyle beklenenden büyük çıkmıştır. Şekil 4.7.'e bakıldığında bunun nedeni olarak loss grafiğindeki aşırı dalgalanmalar gösterilebilir. Makine öğrenim yaparken yüksek tekrarda beklenenden büyük kayıplar ve öğrenmede zorlanma yaşandığı Şekil 4.7.'e bakarak yorumlanabilir.

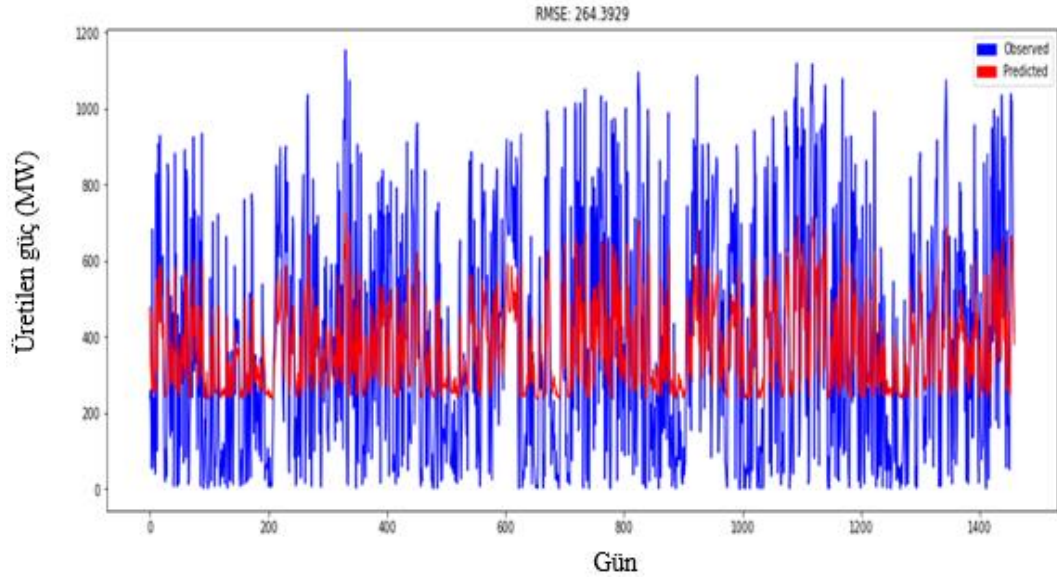


Şekil 4.2. Epok = 100 için eğitilmiş sinir ağının sonucu (Maviler gözlenen gerçek değer, kırmızılar tahmin edilen değerlerdir)

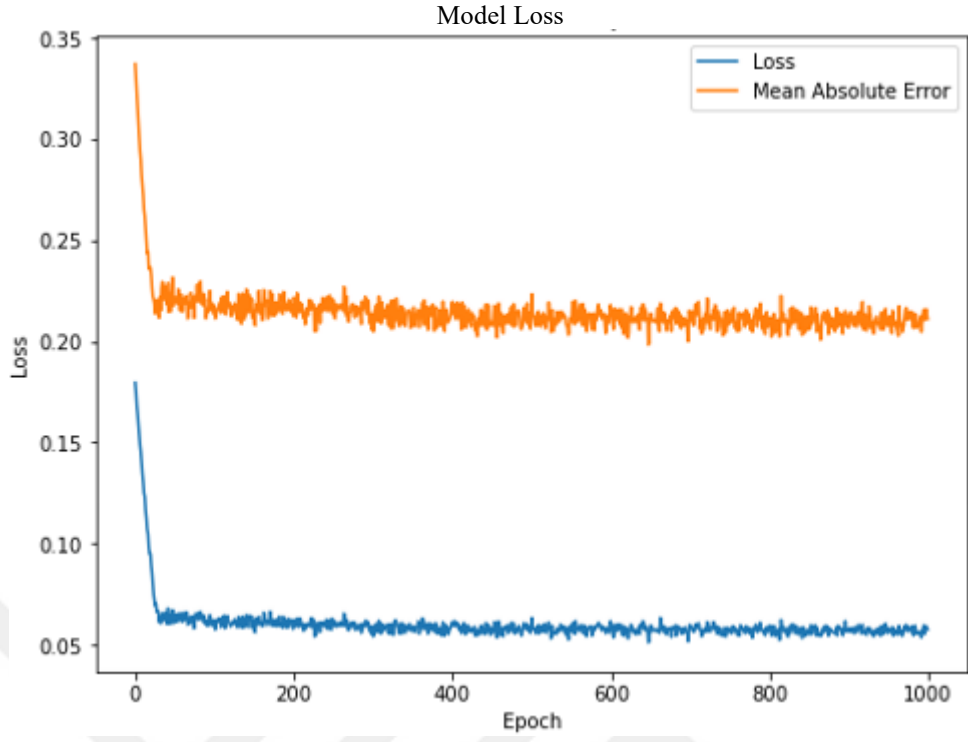
Model Loss



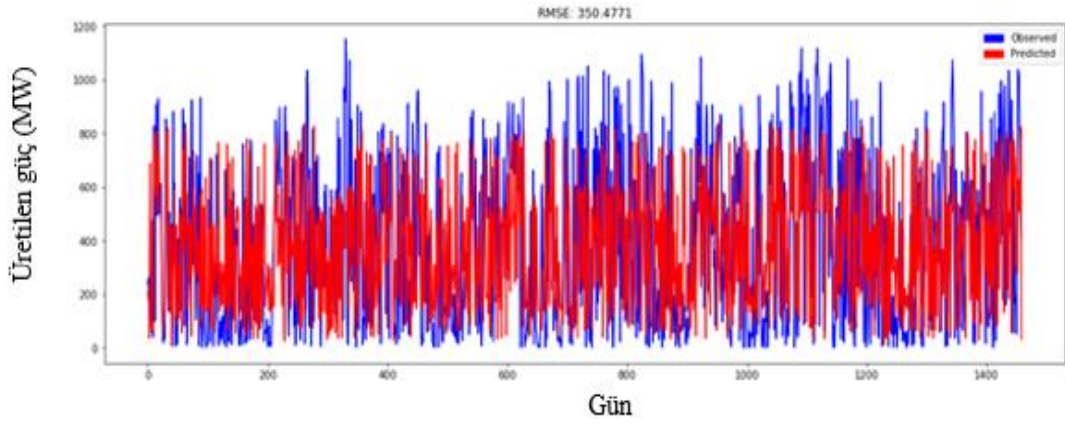
Şekil 4.3. Epok=100 için loss grafiği



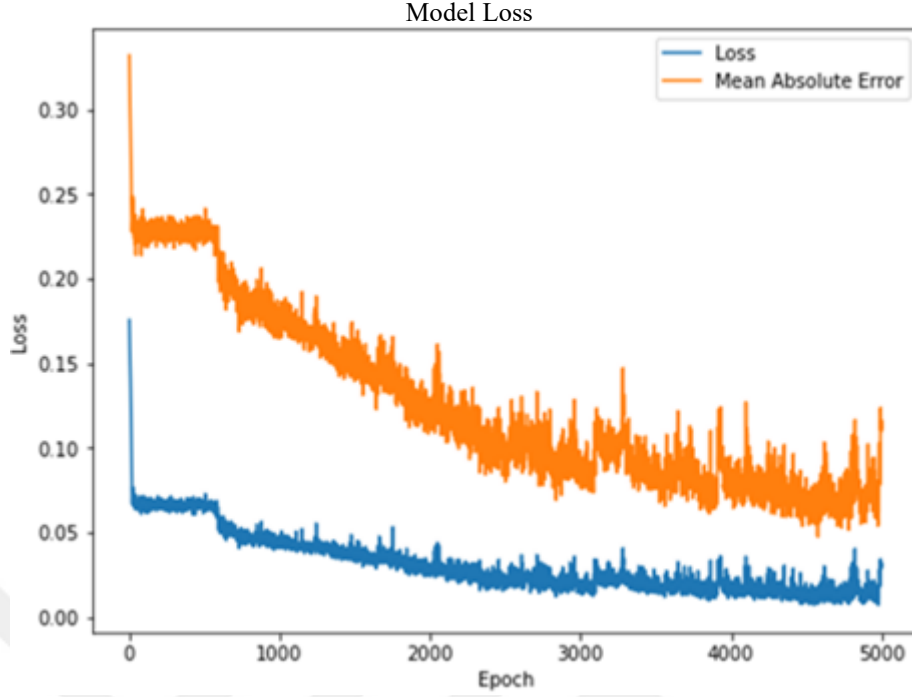
Şekil 4.4. Epok = 1000 için eğitilmiş sinir ağının sonucu. (Maviler gözlenen gerçek değer, kırmızılar tahmin edilen değerlerdir)



Şekil 4.5. Epok = 1000 için loss grafiği



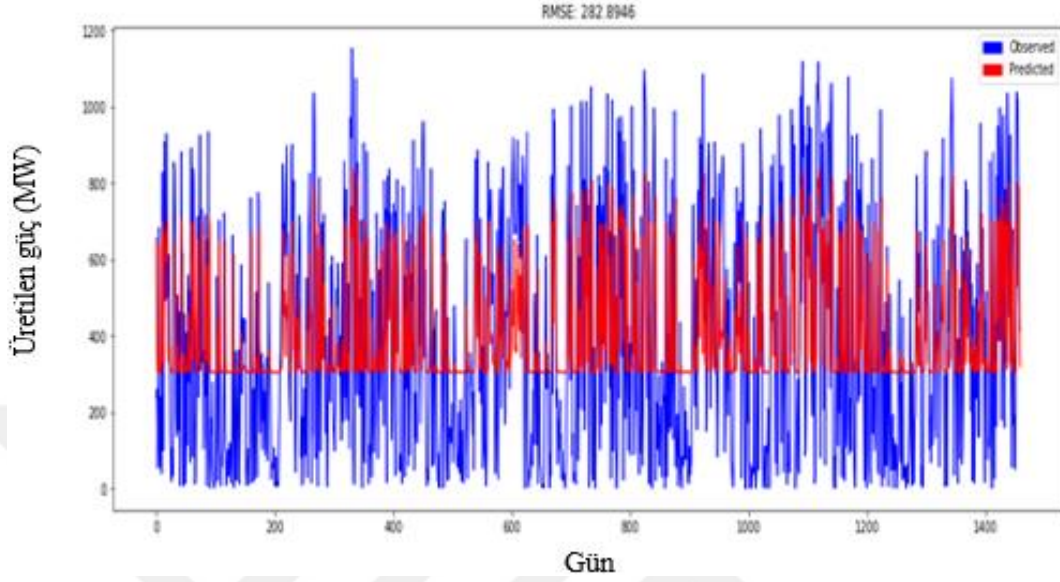
Şekil 4.6. Epok = 5000 için eğitim sonuçları



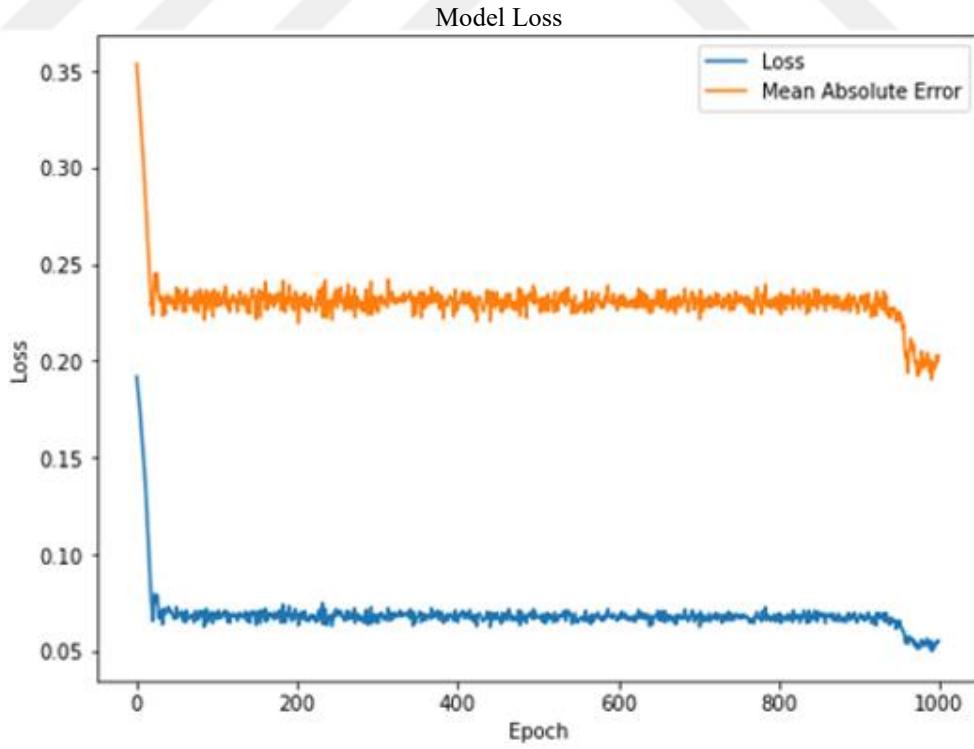
Şekil 4.7. Epok = 5000 için loss grafiği

Günlük veriler üzerine yapılan ikinci uygulamada 256 nörondan oluşan 4, 128 nörondan oluşan 4, 64 nörondan oluşan 2 ve 32 nörondan oluşan 1 LSTM katmanı ve 1 nörondan oluşan çıkış katmanı olmak üzere 10 katmandan oluşan bir sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Bu modelin çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar epok 1000 için Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da; epok 5000 için Şekil 4.10. ve Şekil 4.11. verilmiştir. Şekil 4.8.'de yer alan tahmin sonucuna bakıldığında 1000 epok değeri için basit modele göre düşük güç değerlerini tahmin etmekte daha zorlandığı görülmektedir. Güçlü modelde RMSE değeri 282.8946 olduğu görülmüştür. Şekil 4.8.ve Şekil 4.10 karşılaştırıldığında epok değeri arttıkça tahmin aralığını arttırdığı gözükmemektedir. Fakat günlük veri analizinde basit sinir ağı modelinde olduğu gibi epok 5000 için RMSE değeri düşmesi gerekirken yine yükselmiş durumdadır. Günlük veri modellerinde epok 5000 değeri loss grafikleri üzerinde yapılan incelemelerde yoğun dalgalanmalar açıkça gözlemlenmektedir. Bu durum makinenin beklenenden fazla kayıplar yaşadığını ve öğrenirken zorlandığını göstermektedir. Bu durumun sebebi olarak veri yoğunluğu ve veri çeşitliliğinin azlığı olduğu düşünülmektedir. Yüksek sinir ağı modelinde epok

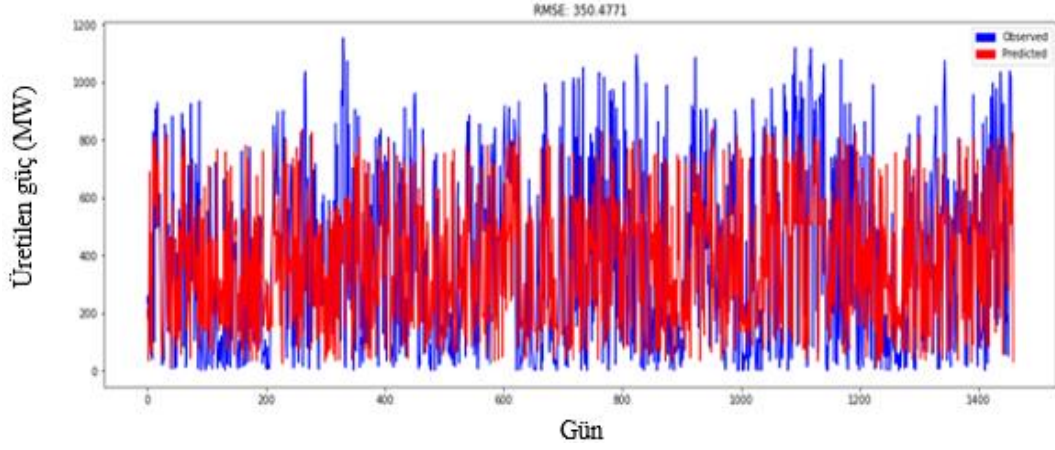
1000'den küçük epok değerlerinde öğrenme gerçekleşmemiştir. Yani underfitting durumlar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle çalışmaya dahil edilmemiştir.



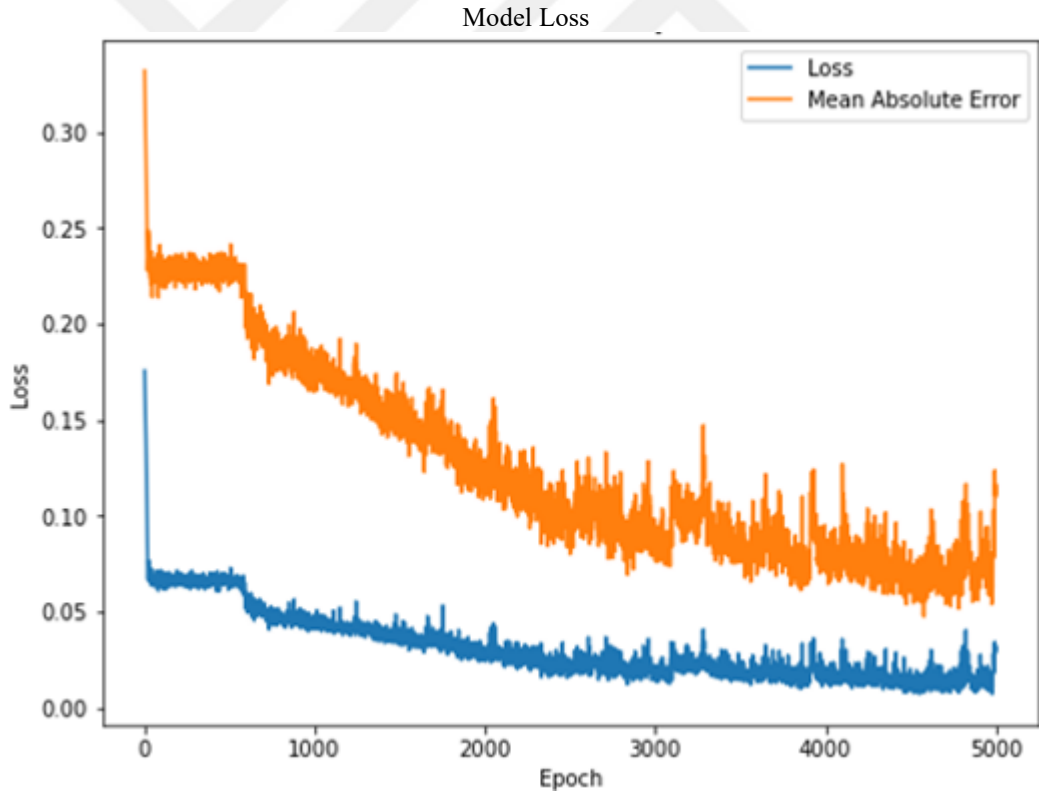
Şekil 4.8. Epok = 1000 ve gelişmiş sinir ağı



Şekil 4.9. Epok 1000 için loss grafiği



Şekil 4.10. Epok = 5000 için gelişmiş sinir ağı öğrenme sonucu



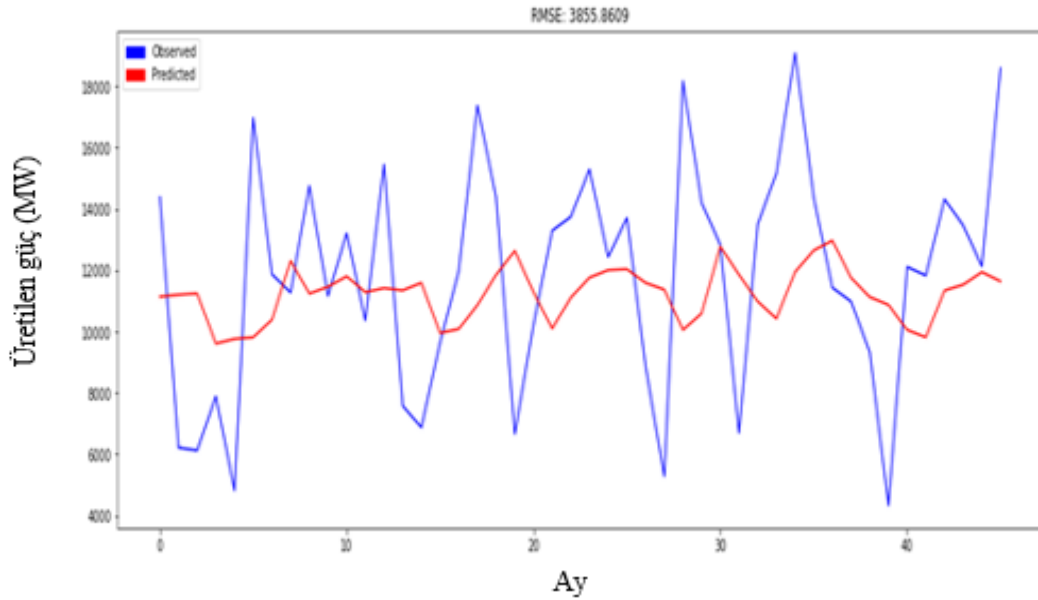
Şekil 4.11. Epok = 5000 ve gelişmiş sinir ağı için loss grafiği

4.2. Aylık Veriler

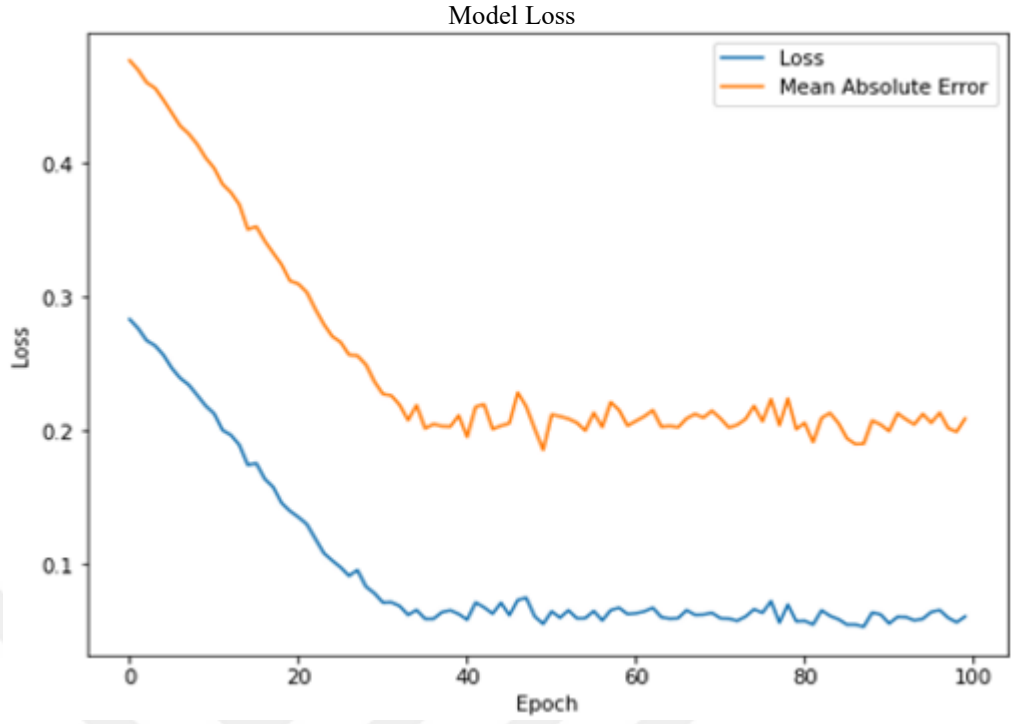
2018-2021 yılları arasındaki aylık toplam enerji değerleri yani 48 veri ile çalışılmıştır. Günlük verilerde olduğu gibi iki farklı sinir ağı ile çalışılmıştır.

İlki basit bir sinir ağı olarak tasarlanan 64 nörondan oluşan birinci LTSM katmanı, 32 nörondan oluşan ikinci LTSM katmanı ve 1 nörondan oluşan çıkış katmanı için değişen epok sayıları üzerinden çalışmalar yapılmıştır. Epok 100 olacak şekilde aylık veriler üzerinden yapılan tahmin çalışmasının sonuçları ve loss değeri Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'te yer almaktadır. Şekil 4.12. sonuç verileri incelendiğinde veri seti azalmasına rağmen tahminlerde çok başarılı olamadığı görülmektedir. RMSE değeri aylık veri üzerinden oluşturulan 100 epoklu basit modelde 3855,8609 elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak düşük epok değeri veya düşük nöron değeri gösterilebilir. Epok 1000 için sonuç ve loss grafiği Şekil 4.14. ve 4.15.'te verilmiştir. Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'teki değerler incelendiğinde RMSE değerinin 3680,5001 olduğu yani epok sayısı arttıkça RMSE değerinde düşüş yaşandığı kanıtlanmıştır. Fakat tahmin değerlerimiz hala istenilen düzeyde olmayıp underfitting durumda kalmıştır. Bu durum epok veya nöron değerlerinin istediğimiz veri sonuçlarını elde etmemiz için hala yetersiz olduğunu veya Son ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadaki gibi sadece üretilen güç verilerinin yeterli olmayacağını meteorolojik verilerinde gerekli olduğunu kanıtlamaktadır. Epok 5000 değeri için aynı grafik değerleri Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.'de görülmektedir. Epok 5000 için aylık veriler üzerinden oluşturulan basit modelin epok 100 ve 1000 'ne göre daha iyi tahmin yapması beklenirken RMSE değeri yükselerek 4437,0771'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Günlük veriler üzerinde yapılan incelemede hem basit hem de güçlü modelde epok 5000 değerinde yaşanan loss ve öğrenme zorluğu aylık veri üzerinden yapılan basit modelde de gözlemlenmiştir. Şekil 4.17.' incelendiğinde 1000 epok değerinden sonra 5000 epoka kadar loss grafiğinde dalgalanmaların yoğun bir şekilde arttığı açıkça gözlemlenmektedir. Bu durum 1000 epoktan sonra makinenin öğrenmekte zorlandığı ve losslar yaşadığı gibi genel bir düşünceye bizleri yönlendirmektedir.

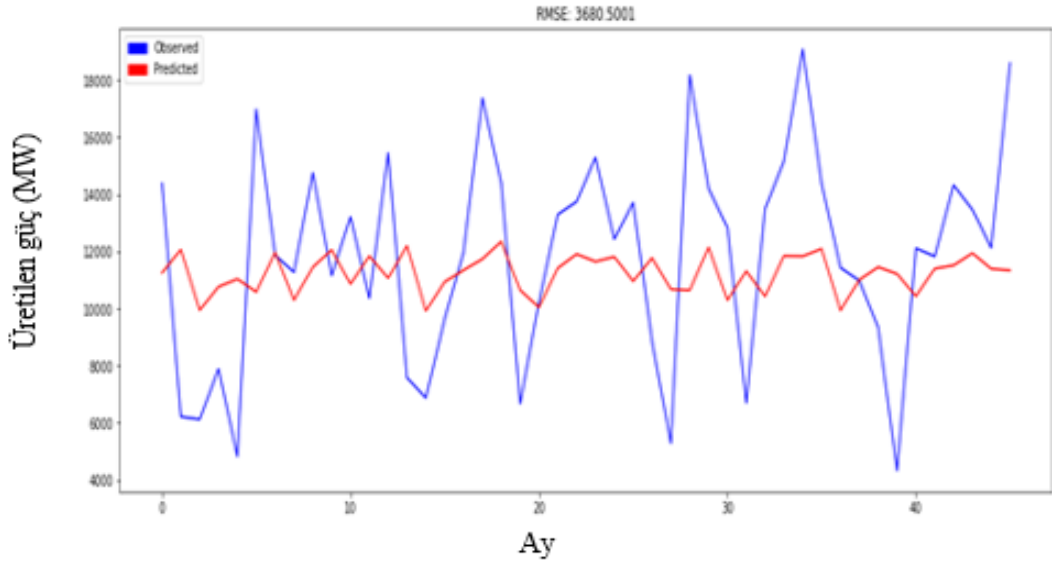
İkincisi güçlü bir sinir ağı olarak tasarlanan 256 nörondan oluşan 4, 128 nörondan oluşan 4, 64 nörondan oluşan 2 ve 32 nörondan oluşan 1 LSTM katmanı ve 1 nörondan oluşan çıkış katmanı olmak üzere 10 katmandan oluşan bir sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Güçlü sinir ağı üzerinde epok 5000 ve epok 10000 değerleri kullanılarak tahmin ve loss verileri elde edilmiştir. Epok 5000 için tahmin ve loss verileri Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da, epok 10000 için tahmin ve loss verileri Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de gösterilmiştir. 5000 epok değeri için sonuç değerlerinin yer aldığı Şekil 4.18. ve Şekil 4.19. incelendiğinde küçük sinir ağına göre daha düşük RMSE değeri verdiği gözükmektedir. Epok 10000 gibi yüksek bir epok değeri sonuçlarını içeren Şekil 4.19. ve Şekil 4.20 göz önüne alındığında aylık veriler üzerindeki çalışmalar arasındaki en düşük RMSE değerine sahiptir. Fakat belli bir epok sonrasında loss değerlerinde aşırı dalgalanmalar açıkça gözükmektedir. Bu durum belli bir tekrara kadar makine öğrenimini iyi düzeyde yaptığını fakat daha sonra daha fazla kayıp (loss) yaşadığının kanıtıdır.



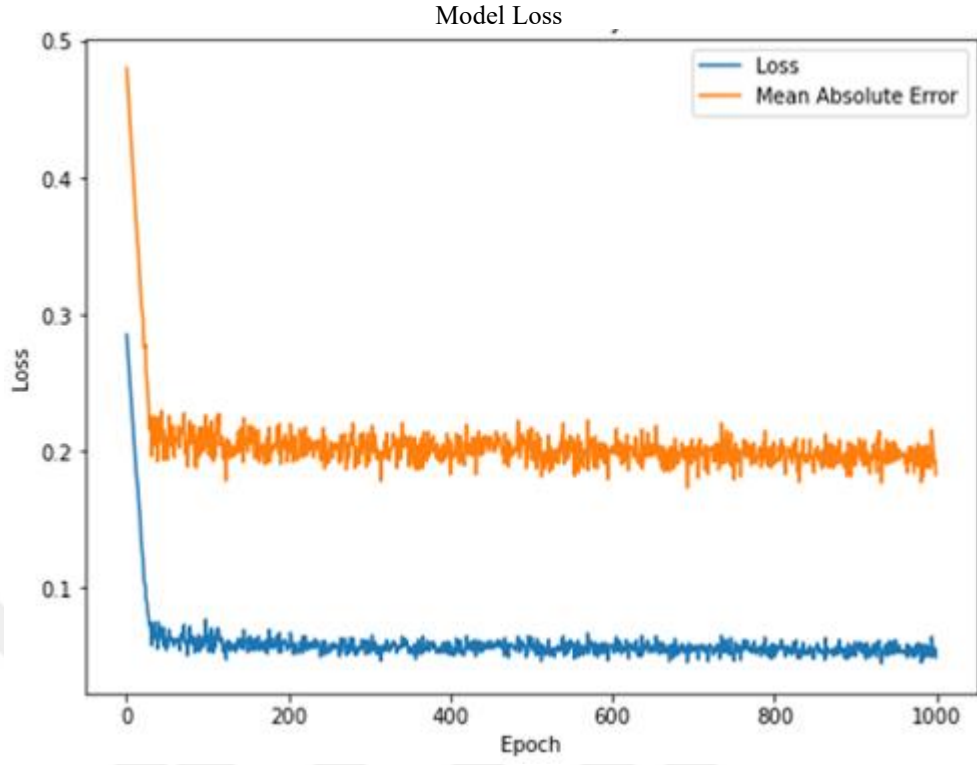
Şekil 4.12. Küçük sinir ağı için epok = 100 ve aylık veriler için sinir ağıнын öğrenmesi



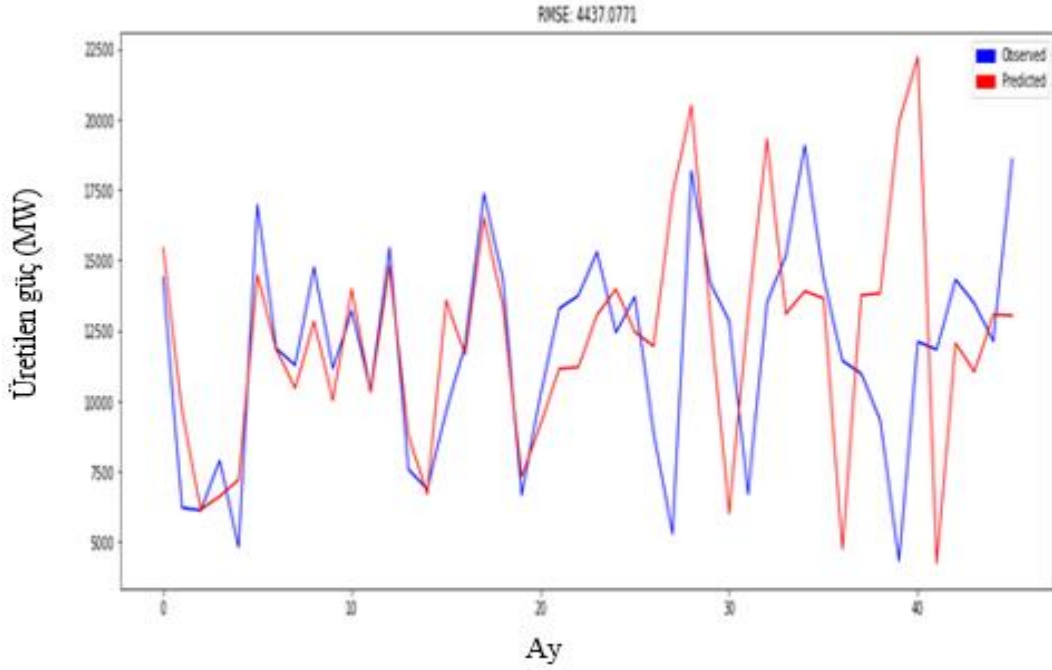
Şekil 4.13. Küçük sinir ağı için epok = 100 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği



Şekil 4.14. Küçük sinir ağı için epok = 1000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi

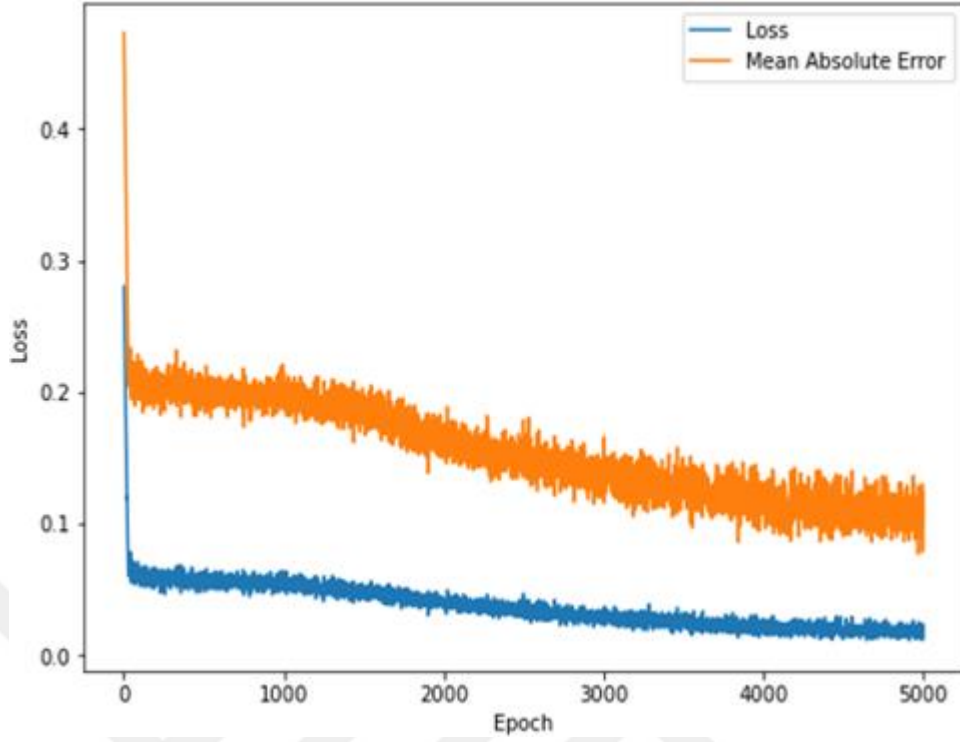


Şekil 4.15. Küçük sinir ağı için epok = 1000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği

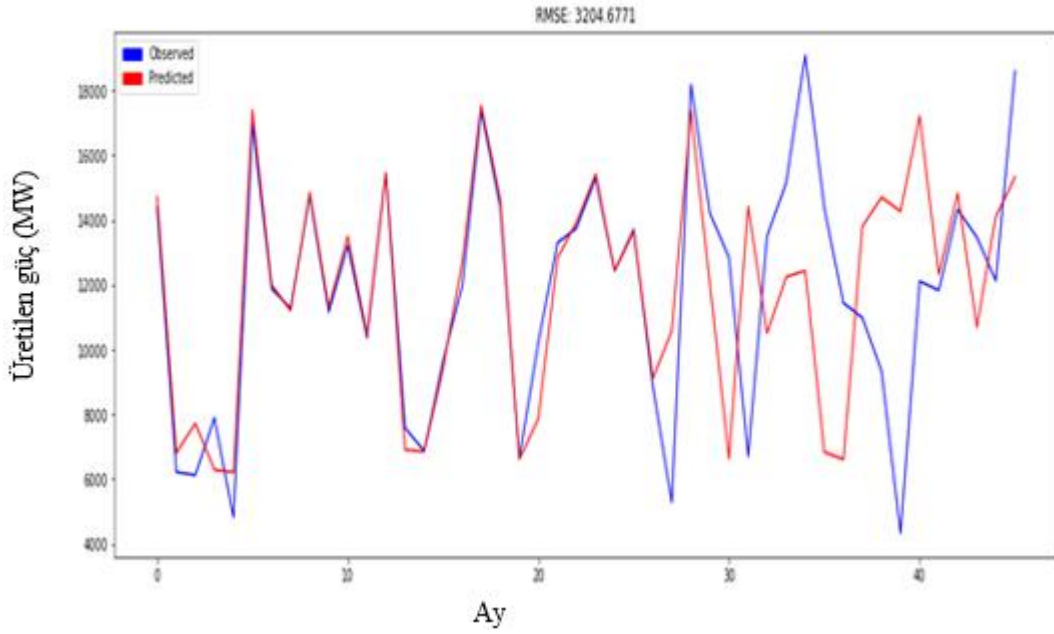


Şekil 4.16. Küçük sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi

Model Loss

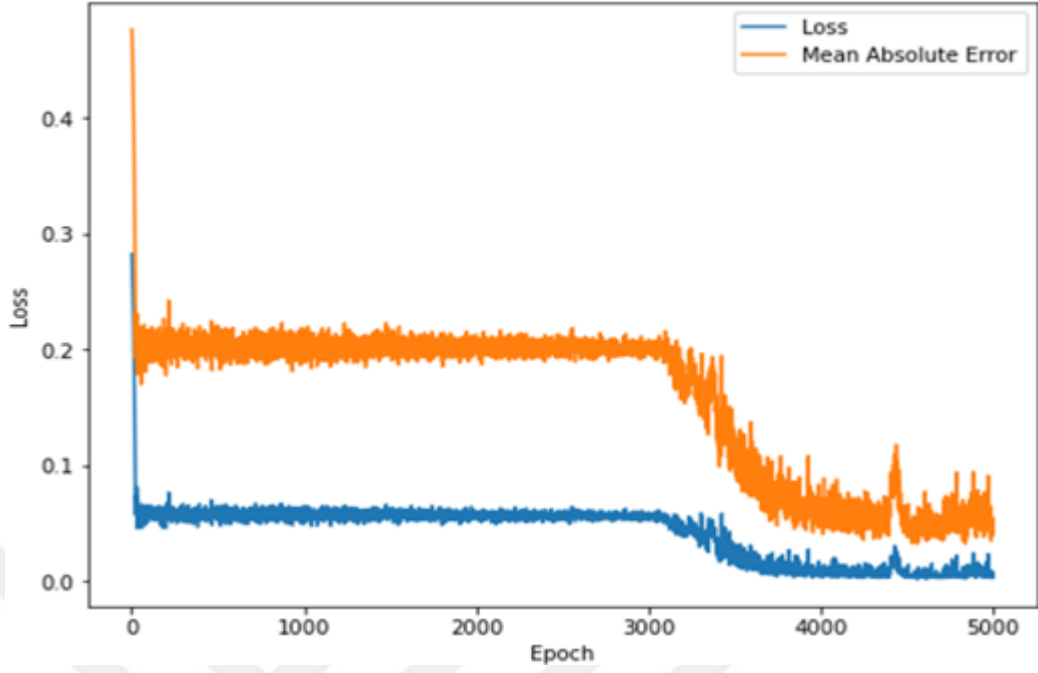


Şekil 4.17. Küçük sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği

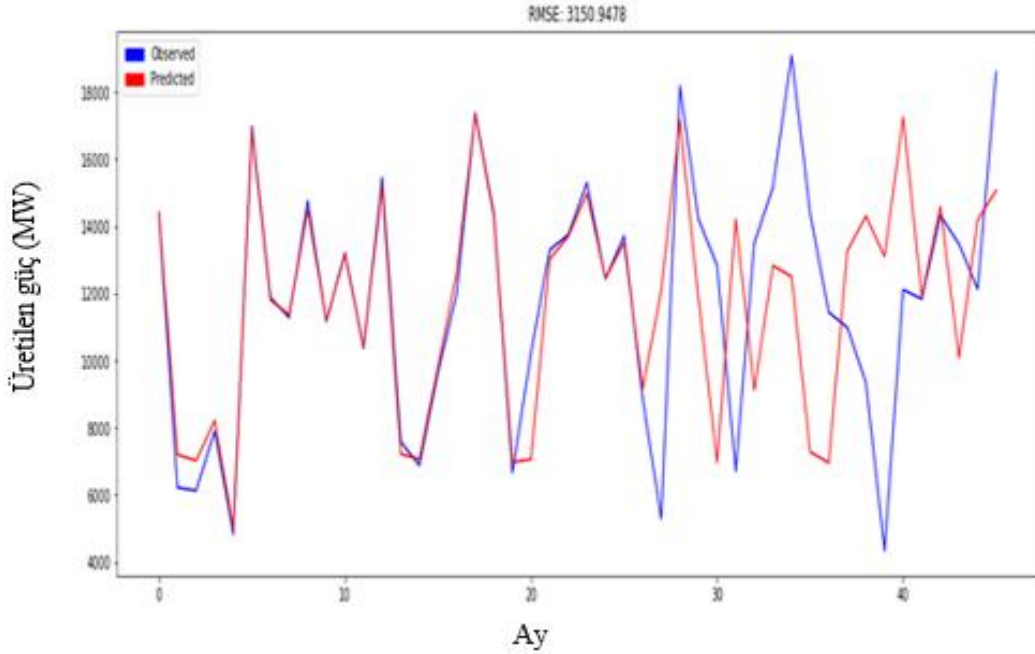


Şekil 4.18. Yüksek sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi

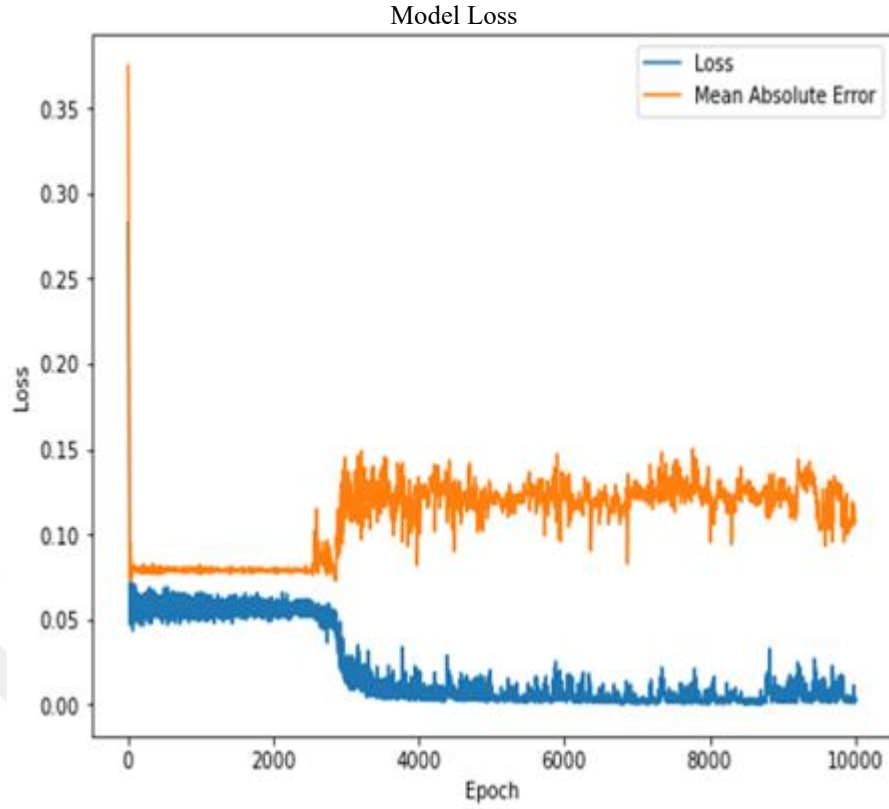
Model Loss



Şekil 4.19. Yüksek sinir ağı için epok = 5000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği



Şekil 4.20. Yüksek sinir ağı için epok = 10000 ve aylık veriler için sinir ağının öğrenmesi



Şekil 4.21. Yüksek sinir ağı için epok = 10000 ve aylık veriler için sinir ağının loss grafiği

Yukarıda verilen grafikler Python dili kullanılarak yazılan bir kod ile elde edilmiştir. Kod içerisinde pandas, numpy ve matplotlib kütüphaneleri kullanılmıştır. Ayrıca keras ve tensorflow kütüphanesi kullanılmıştır. Keras, tensorflow üzerinde bir dizi öğrenme modeli oluşturmanın kullanışlı bir yolunu sağlayan python kütüphanesidir. Tensorflow ise değişik seviyelerde yapay zeka sistemi oluşturma imkanı sunan yazılım kütüphanesidir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

LSTM yöntemiyle oluşturulan basit bir sinir ağı (düşük nöron) ve güçlü bir sinir ağı (yüksek nöron) kullanılarak Yalova Armutlu bölgesindeki Yalova Rüzgar Enerjisi Santrali 2018-2021 verileri günlük ve aylık olarak düzenlenerek makine öğrenmesi işlemi yapılmıştır. Günlük verilerde epok 100 ve epok 1000 için RMSE değerleri sırasıyla 283,24 ve 264,39 MW olarak elde edilmiştir. Epok 5000 için ezberleyen ve çok daha iyi sonuç vermesi beklenirken sinir ağının RMSE değeri artarak 350,48 MW olmuştur. Bu sonuca göre epok (tur) sayısı 5000 gibi yüksek değerler çıktığında model kötü tahminler yaptığı varsayılabilir.

Modeldeki hiper parametreler değiştirilerek ve LSTM sinir ağının daha farklı hiperparametrelerle çalıştırılmasıyla farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışmada iki farklı basit ve güçlü sinir ağı için değişen epok sayılarıyla göre rüzgar enerjisi tahmini yapılmıştır.

Günlük veriler için hazırlanan sinir ağı aynı tarihler arasındaki aylık veriler için uygulanmıştır. Aylık veriler için hem basit hem de güçlü sinir ağı epok değeri 1000 değerinin üstüne çıkana kadar düşük uyum (underfitting) sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle epok 1000 ve 5000 değerleri seçilerek çalışılmış RMSE değerleri sırasıyla 3680,50 ve 3204,68 MW olarak elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, bir pilot bölgeden toplanan az sayıda verilerle LSTM yöntemiyle oluşturulan basit sinir ağı ve güçlü sinir ağı ön çalışma yapılmıştır. Bu sırada Python bilgisayar program kullanılarak YSA programları ve geliştirmesi ile ilgili tecrübe kazanılmıştır. Ayrıca bu çalışma rüzgara ait diğer parametreler de göz önüne alınarak (örneğin rüzgarın hızı, rüzgarın yönü vb.) yapılırsa ve farklı hiperparametreler de kullanılırsa daha verimli sonuçlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın ileriki aşamasında rüzgara ait parametre sayısı artırılarak çok sayıda veri elde edilip, bu veriler radial tabanlı fonksiyon sinir ağı (RBFNN), geri yayılım ağları (BPNN), sinirsel dalgacık ağı (Dalgacık SA), kendi kendini organize eden harita sinir ağı (SOM NN) gibi çeşitli yapay sinir ağları kullanılarak da istatistiksel analiz yapılabilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir. Ayrıca yapılması istenen rüzgar parametreleri ile ilgili tahminin niteliğine göre mevcut farklı yöntemlerin avantajlı yanlarını birleştirecek şekilde kullanılan bazı hibrit modellerden de faydalanılarak çalışma genişletilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Acaroğlu, M., Alternatif Enerji Kaynakları, 3. Basım, Nobel Yayınları, 2013.
- [2] <https://www.teias.gov.tr/> Erişim Tarihi: 15.04.2022
- [3] Özil, E., Őiřbot, S., Özpınar, A. & Olgun, B., Elektrik Enerjisi Teknolojileri ve Enerji Verimliliği, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Elektrik Üretimi ve Çevre, 4.cilt, 1.baskı, TESAB Ticari İşletmesi, 2013.
- [4] Elibyük, U. & Üçgöl, İ., Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri, Cilt 2, Sayı 3, 1-14, 2004.
- [5] <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/cenk.gezezin/137373/8.Hafta%20Ders%20Sunusu.pdf> Erişim Tarihi: 15.05.2023.
- [6] Karadağ, H.İ., Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Rüzgar Enerjisinin Önemi ve Rüzgar Türbini Tasarımı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [7] Emniyetli, G., Eysel Elektrik İhtiyacının Karşılanması İçin Rüzgar Türbini Tasarımı, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 2007.
- [8] Uysal, A., Rüzgar Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2008.
- [9] Akbıyık, B., Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 2004.
- [10] Kaya, K. & Koç, E. (2015). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları, Mühendis ve Makina, 38-48.
- [11] Kekül, Ö., Rüzgar Türbin Kanatları İçin Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2017.

- [12] Signor, A. W., Vanlandingham, M.R. & Chin, J.W., Effects of Ultraviolet Radiation Exposure on Vinly Ester Matrix Resins: Characterization of Chemical, Physical and Mechanical Damage, Polimer Degradation and Stability, 79: 359-368, 2003.
- [13] Koroğlu, A., Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Yeniden Güçlendirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2022.
- [14] Emniyetli, G., Elektrik İhtiyacının Karşılınması için Rüzgar Türbini Tasarımı, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 102s, Edirne, 2007.
- [15] https://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf, ErişimTarihi: 05.05.2023
- [16] Durdyev, S., Rüzgar Enerjisinde Uygun Türbin Seçimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 71s, İstanbul, 2010.
- [17] Canpolat, Ş., Rüzgar Enerjisi ve Isparta Şartlarında Prototip Bir Rüzgar Türbini Tasarımı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Isparta, 2013.
- [18] Kurt, G., Dişli Kutulu ve Dişli Kutusuz Rüzgar Türbini-Generatör Sistemlerinin Karşılaştırılması, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 5-7 Ekim, Elazığ, 112-115, 2011.
- [19] Russell, S. J. & Norvig, P., Artificial Intelligence: A Modern Approach, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1995.
- [20] Hornik, K., Stinchcombe, M. & White, H, Multilayer feedforward networks are universal approximators, Neural Networks 2 (5), 359–66. 1989.
- [21] De Vos, N. J. & Rientjes, T. H.M., Multiobjective training of artificial neural networks forrainfall-runoff modeling, Water Resources Research, 44(8), 8434, 2008.
- [22] Maier, H. R., & Dandy G. C., Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: A review of modelling issues and applications, Environmental Modelling and Software, 15 (1), 101–24, 2000.
- [23] Wei, Y., Xu W., Fan, Y. & Tasi, H., Artificial neural network based predictive method for flood disaster, Computers and Industrial Engineering, 42 (2), 383–90, 2002.

- [24] Nagesh Kumar, D., Komaragiri S.R. & Sathish T., River flow forecasting using recurrent neural networks, *Water Resources Management* 18(2), 143–61, 2004.
- [25] ASCE, Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts, *Journal of Hydrologic Engineering*, 5 (2), 115–23, 2000.
- [26] https://www.researchgate.net/publication/41599693_Uncertainty_analysis_in_rainfallrunoff_modelling_application_of_machine_learning_techniques.
Erişim Tarihi: 10.05.2023
- [27] Khaparde, S. A., Lohtia, A. & Desai, U. B., Load forecasting using artificial neural network, *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, 1:208–12, 1991.
- [28] Liu, Z. H., Meng, X., Wei, H., Chen, L., Lu B., Wang, Z. & Chen, L., A Regularized LSTM Method for Predicting Remaining Useful Life of Rolling Bearings, *International Journal of Automation and Computing* 18 (4), 581–93, 2021.
- [29] Cantürk, S., Bir Rüzgar Çiftliğinden Yapay Sinir Ağlarıyla Kısa Süreli Elektrik Üretim Tahmini, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temiz Tükenmez Enerjiler, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [30] Demolli, H., Ecemiş, A., Dokuz, A.Ş. & Gökçek M., Makine Öğrenmesi Algoritmalarıyla Güneş Enerjisi Tahmini: Niğde İli Örneği, *International Turkic World Congress on Science and Engineering*, sayfa 775-783, Haziran 2019.
- [31] Görgel P. & Kavlak, E., Uzun Kısa Süreli Hafıza ve Evrişimsel Sinir Ağları ile Rüzgar Enerjisi Üretim Tahmini, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 69-80, 2020.
- [32] Yazıcı, K., Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Kısa Dönem Rüzgar Gücü Tahmini, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 106s, Sakarya, 2021.
- [33] Lee, D. & Baldick, R. Short-term wind power ensemble prediction based on Gaussian processes and neural networks, *IEEE Trans Smart Grid*, 5(1), 501-510, 2014.
- [34] Xiaoyun, Q., Xiaoning, K., Chao, Z., Shuai, J. & Xiuda, M., Short-term prediction of wind power based on deep long short-term memory, In 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 1148-1152, 2016.

- [35] Dong, D., Sheng, Z. & Yang, T., Wind power prediction based on recurrent neural network with long short-term memory units, International Conference on Renewable Energy and Power Engineering, 34-38, 2018.
- [36] Son, N., Yang, S. & Na, J., Hybrid Forecasting Model for Short-Term Wind Power Prediction Using Modified Long Short-Term Memory, Energies, 12: 3901, 2019.
- [37] Cali, U. & Sharma, V. , Short-term wind power forecasting using long-short term memory based recurrent neural network model and variable selection, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 8(2), 103-110, 2019.
- [38] Liu, H., Chen, D., Lin, F. & Wan, Z., Wind Power Short-Term Forecasting Based on LSTM Neural Network with Dragonfly Algorithm, In Journal of Physics: Conference Series, 1748 (3), 2021.
- [39] Dursun, Ö.O. & Toraman, S., Uzun Kısa Vadeli Bellek Yöntemi ile Havayolu Yolcu Tahmini, Journal of Aviation dergisi; 5(1), 241-248, 2021.
- [40] <https://gmd.copernicus.org/preprints/7/1525/2014/gmdd-7-1525-2014.pdf> , Erişim Tarihi:27.11.2023

ÖZGEÇMİŞ

Selahattin GÜNGÖR, ilk ve orta öğretimini Denizevleri İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2014 yılında Yeşilkent Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2015 yılında başladığı Sinop Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nü 2020 yılında bitirdi. 2021 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

