

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGAR HIZI DİKEY EKSTRAPOLASYONUNA YENİ
BİR YAKLAŞIM VE HELLMANN KATSAYISININ
RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ ANALİZİNE ETKİSİ**

OKTAY TEZCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2014

**RÜZGAR HIZI DİKEY EKSTRAPOLASYONUNA YENİ
BİR YAKLAŞIM VE HELLMANN KATSAYISININ
RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ ANALİZİNE ETKİSİ**

**A NEW APPROACH TO VERTICAL EXTRAPOLATION
OF WIND SPEED AND THE EFFECT OF HELLMANN
CONSTANT ON THE WIND ENERGY POTENTIAL
ANALYSIS**

OKTAY TEZCAN

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2014

“RÜZGAR HIZI DİKEY EKSTRAPOLASYONUNA YENİ BİR YAKLAŞIM VE HELLMANN KATSAYISININ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ ANALİZİNE ETKİSİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 15/09/2014 tarihinde, **ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof Dr. Tahir YAVUZ

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özgür EROL

ONAY

/ /2014

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

Sayın Prof. Dr. Tahir YAVUZ'a (tez danışmanı), çalışmanın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında her zaman yardımcı ve yol gösterici olduğu için teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

RÜZGAR HIZI DİKEY EKSTRAPOLASYONUNA YENİ BİR YAKLAŞIM VE HELLMANN KATSAYISININ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ ANALİZİNE ETKİSİ

Oktay TEZCAN

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde rüzgar hızı en önemli etkenlerden bir tanesidir. Rüzgar hızlarının doğru tahmin edilmesi, eldeki verilerin uygun ve sahaya özgü değişkenlerin etkisinin göz önüne alındığı bir analiz yöntemi uygulanarak mümkün olabilmektedir.

Bu tezde Çanakkale ilinde, Ege denizi yakınlarında bir noktada ölçülmüş olan 4 yıllık rüzgar verileri kullanılmıştır. Ölçümler rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılabilmesi için analiz yapılan türbinin göbek yükseliğine dikey ekstrapolasyon yönteminde kullanılmış ve rüzgar hızları güç kanunu ile hesaplanmıştır. Rüzgar hızları bulunurken kullanılan Hellmann katsayıları bu tezde önerilen yöntem ve geleneksel yöntemler ile ayrı ayrı bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemde sahaya özgü etkenlerin göz önüne alınmasıyla bulunan Hellmann katsayılarının sadece ortalama hız veya sadece tablolardan elde edilen Hellmann katsayılarından daha doğru sonuçlar vermesi öngörülmüştür. Hellmann katsayısını en çok mevsimler ile güneşin doğuş ve batış saatlerinin etkilediği anlaşılmış ve analizlerde bu değişkenler göz önüne alınmıştır. Sonuçlara bakıldığında önerilen yöntem ile bulunan rüzgar hızlarının geleneksel yöntemlerle hesaplanan rüzgar hızlarından %0,4 oranında daha yüksek çıktığı görülmüş ve rüzgar enerjisi potansiyelinin analiz edilen saha için geleneksel yöntemlerden %0,8 daha yüksek çıktığı görülmüştür.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Hellmann katsayısı, güç kanunu, Weibull dağılımı, rüzgar enerjisi, rüzgar enerjisi potansiyeli analizi.

Danışman: Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ABSTRACT

A NEW APPROACH TO VERTICAL EXTRAPOLATION OF WIND SPEED AND THE EFFECT OF HELLMANN CONSTANT ON THE WIND ENERGY POTENTIAL ANALYSIS

Oktay TEZCAN

Başkent University Institute of Science

Department of Energy Engineering

Wind speed is one of the most important factors in the wind energy potential analyses. The accurate prediction of wind speed is possible through the application of the analysis method in which the appropriate existing data and the site specific variables are taken into account.

In this thesis, four-year wind data which have been acquired from a wind measurement mast in Çanakkale region near Aegean Sea have been analyzed. The measurements have been used in the vertical extrapolation method for calculating the wind speed at the wind turbine's hub height so that the wind energy potential analysis could be performed, and the turbine hub height wind speeds have been calculated using the power law. The Hellman constants used to measure the wind speeds have been found by the application of three different methods, one of which is the new approach offered in this study and other two are through traditional methods, and then the findings of these three different methods have been compared. It has been hypothesized that that in this new approach, the Hellman constants which can be found by considering the site specific factors would give more accurate results than the ones which are obtained by solely considering the average wind speed or the tables. After this comparison, it has been found out that the seasons and the times of sunrise and sunset affect the Hellman constant value the most and these variables have been taken into consideration in the analyses. Overall findings have indicated that the wind speeds measured via the new approach are 0,4 % higher than the ones found via the traditional methods, and also for the analysed site, wind energy potential is 0,8 % higher for the one analysed by traditional methods.

KEYWORDS: Hellmann constant, power law, Weibull distribution, wind energy, wind energy potential analysis.

Advisor: Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent University, Department of Energy Engineering.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
ÇİZELGELER LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
1 GENEL BİLGİLER VE TEZ KAPSAMI	1
1.1 Giriş	1
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Tezin Amacı Ve Kapsamı	14
1.4 Tezin İçeriği Ve Organizasyonu	15
2 ÇALIŞMA YAPILAN SAHA VE RÜZGAR ÖLÇÜM VERİLERİ	16
2.1 Sahanın Bulunduğu Bölgenin Anlatımı	16
2.2 Rüzgar Ölçüm Direğinin Özellikleri	19
2.3 Rüzgar Ölçüm Verileri	24
3 METODOLOJİ VE ARAŞTIRMA YÖNTEMLERİ	26
3.1 Rüzgar Hızlarının Düşey Yönlü Değişimi	26
3.2 Olasılık yoğunluk fonksiyonları	32
3.3 Rüzgar Enerjisi Potansiyeli İçin Seçilen Rüzgar Türbini	36
3.4 Rüzgar Histogramı	38
4 HELLMAN KATSAYILARI VE ENERJİ POTANSİYELİ ANALİZİ	39
4.1 Analizlere Giriş	39
4.2 Hellman Katsayısının Hesaplanması	42
4.3 Enerji Potansiyelinin Hesaplanması	68
4.3.1 Histogram yöntemi ile enerji potansiyeli analizi	68
4.3.2 Weibull dağılımı ile enerji potansiyeli analizi	70
5 SONUÇLARIN VE TARTIŞILMASI VE BULGULAR	76
5.1 Bulgular	76
5.2 Öneriler	77
KAYNAKLAR LİSTESİ	78

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Türkiye Elektrik Üretimi	3
Şekil 1.2	Küresel yıllık kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi (1996-2013).....	4
Şekil 1.3	Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA)	5
Şekil 1.4	Türkiye’de RES’lerin kurulu güç bakımından kümülatif dağılımı.....	6
Şekil 1.5	Çanakkale için REPA.....	7
Şekil 2.1	Türkiye Rüzgar Atlası ve ölçüm direği.....	16
Şekil 2.2	Ölçüm yapılan arazinin çevresi.....	17
Şekil 2.3	Analiz edilen verilerin elde edildiği rüzgar ölçüm direği	21
Şekil 3.1	DeneySEL hız profili	27
Şekil 3.2	Çeşitli k değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonu	34
Şekil 3.3	Vestas V90 güç eğrisi.....	37
Şekil 3.4	Rüzgar Histogramı örneği.....	38
Şekil 4.1	Durum 1’de kullanılan Helman katsayıları.....	64
Şekil 4.2	Durum 2’de kullanılan Helman katsayısı	64
Şekil 4.3	Durum 3’te kullanılan Helman katsayısı	65
Şekil 4.4	Yüksekliklere göre 3 durum için rüzgar hızı dağılımları.....	66
Şekil 4.5	3 ayrı durum için bulunan 80 m yükseklikteki rüzgar hızları	67
Şekil 4.6	80 m yükseklikte Durum 1 için 4 yıllık rüzgar verilerinin histogramı ..	68
Şekil 4.7	Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.....	70

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Rüzgar ölçüm direğinin özellikleri.....	22
Çizelge 2.2	Ölçüm direği üzerinde yerleştirilen anemometreler	23
Çizelge 2.3	Ölçüm direği üzerindeki rüzgar gülleri23	
Çizelge 2.4	Ölçüm direği ekipmanları	24
Çizelge 3.1	Yüksek bölgelerde α 'nın rüzgar gücü yoğunluğuna etkisi.....	30
Çizelge 3.2	Hellmann katsayıları.....	31
Çizelge 3.3	Çeşitli yüzeylerde yüzey pürüzlülük değerleri.....	32
Çizelge 3.4	Vestas türbinin teknik özellikleri	36
Çizelge 4.1	Yıllık rüzgar ortalamaları ve Hellmann katsayıları	44
Çizelge 4.2	50 m. yükseklikte rüzgar hızlarının yıllara göre ve hız büyüklüğüne göre ortalamaları.....	46
Çizelge 4.3	30 m yükseklikte rüzgar hızlarının yıllara göre ve hız büyüklüğüne göre ortalamaları	46
Çizelge 4.4	Rüzgar hızı ortalamalarına göre α değerleri.....	46
Çizelge 4.5	Rüzgar hızı ortalamalarının gece ve gündüz saatlerine göre dağılımı	47
Çizelge 4.6	50 m yükseklikte günün saatlerine ortalama rüzgar hızları	48
Çizelge 4.7	30 m yükseklikte günün saatlerine ortalama rüzgar hızları	48
Çizelge 4.8	Günün saatlerine göre Hellmann katsayıları	49
Çizelge 4.9	50 m. yükseklikteki rüzgar hızlarının rüzgar yönlerine ve yıllara göre dağılımı.....	50
Çizelge 4.10	30 m yükseklikteki rüzgar hızlarının rüzgar yönlerine ve yıllara göre dağılımı	50
Çizelge 4.11	Yönlere göre dağılmasından Hellmann katsayıları.....	51
Çizelge 4.12	50 m yükseklikteki rüzgar hızlarının sıcaklığa göre dağılımı.....	52
Çizelge 4.13	30 m yükseklikteki rüzgar hızlarının sıcaklığa göre dağılımı.....	52
Çizelge 4.14	Sıcaklığa göre Hellmann katsayıları	52
Çizelge 4.15	50 m yükseklikte mevsimlere göre ortalama rüzgar hızları.....	53
Çizelge 4.16	30 m yükseklikte mevsimlere göre ortalama rüzgar hızları.....	53
Çizelge 4.17	Mevsimlere göre Hellmann katsayıları	54
Çizelge 4.18	50m rüzgar hızlarının hava basıncına göre sınıflandırılması.....	55
Çizelge 4.19	30m rüzgar hızlarının hava basıncına göre sınıflandırılması.....	55
Çizelge 4.20	Hava basıncına göre Hellmann katsayıları	55
Çizelge 4.21	50 m yükseklikte bağıl nem oranlarına göre rüzgar hızları	56
Çizelge 4.22	30 m yükseklikte bağıl nem oranlarına göre rüzgar hızları	56
Çizelge 4.23	Bağıl neme göre Hellmann katsayıları	56
Çizelge 4.24	Tüm sınıflandırmalara göre bulunan Hellmann katsayıları	58
Çizelge 4.25	50 m yükseklikte 3 m/s üzeri saatlere ve mevsimlere göre rüzgar hızı ortalamaları	60
Çizelge 4.26	30 m yükseklikte 3 m/s üzeri saatlere ve mevsimlere göre rüzgar hızı ortalamaları	61
Çizelge 4.27	3 m/s ve üzeri, mevsimlere ve günün saatlerine göre Hellmann katsayıları.....	62
Çizelge 4.28	Durum 1 için kullanılan Hellmann katsayıları.....	63
Çizelge 4.29	Durum 1 için kullanılan Hellmann katsayılarına göre rüzgar hızı ortalamaları	66

ÇİZELGELER LİSTESİ (Devamı)

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.30 3 Duruma göre bulunan Hellmann katsayıları ve 80 m'de ortalama rüzgar hızları.....	67
Çizelge 4.31 3 durum için türbinlerin enerji üretim miktarları.....	69
Çizelge 4.32 Durum 1 için Weibull parametreleri ve üretim miktarları.....	71
Çizelge 4.33 Durum 2 için Weibull parametreleri ve üretim miktarları.....	71
Çizelge 4.34 Durum 3 için Weibull parametreleri ve üretim miktarları	72
Çizelge 4.35 Tüm analiz sonuçları	73

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

c	skala parametresi
k	şekil faktörü
KE	kinetik enerji
P	Enerji üretim miktarı
$P(V)$	olasılık yoğunluk fonksiyonu
r_s	Siemens kanat uzunluğu
r_v	Vestas kanat uzunluğu
U_{ref}	referans noktadaki hız (m/s)
V	rüzgarın hızı
V_a	12 adet Hellmann katsayılı rüzgar hızı ortalaması
V_b	4 yıllık tüm verilerin rüzgar hızı ortalaması
V_c	1/7 kuralı uygulanan rüzgar hızı ortalaması
V_{ort}	ortalama hız
$V(z_r)$	z_r yüksekliğindeki referans hız
$V(z)$	z yüksekliğindeki rüzgar hızı
z_0	yüzey pürüzlülüğü
z_{ref}	referans nokta yüksekliği (m)
Γ	Gamma fonksiyonu
α	güç kanunu eksponenti (Hellmann katsayısı)
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GWEC	Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	Rüzgar Enerjisi Santrali
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
YEGM	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

1. GENEL BİLGİLER VE TEZ KAPSAMI

1.1 Giriş

Enerji günümüzde toplumların en çok ihtiyaç duyduğu unsurlardan biri haline gelmiştir. Nüfusun artması, şehirleşme ve sanayileşmenin de artmasıyla enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Dünya genelinde son 25 yıl göz önüne alındığında enerji talebi her yıl %2 oranında artış göstermiştir. Bundan sonraki 25-30 yılda da dünyada enerji talebinin her yıl %1.2 oranında artması beklenmektedir [1].

Enerji kaynakları yenilenebilen ve yenilenemeyen olmak üzere iki grupta incelenebilir. Yenilenemeyen enerji kaynakları milyonlarca yıllık bir süreçten sonra oluşurlar ve fosil yakıtlar (doğalgaz, petrol, kömür vb.) ile uranyum bunlara örnektir. Yenilenebilir kaynakları ise çok kısa bir sürede yenilenebilen kaynaklardır. Bunlar hidrolik, rüzgar, jeotermal, güneş, biokütle ve dalga enerjileridir [2].

İkincil enerji kaynakları birincil enerji kaynaklarından dönüştürülebilen elektrik ve petrol ürünleri gibi enerji kaynaklarıdır. Elektriğin ilk kullanılmaya başladığı yıllarda elektrik enerjisi üretimi sınırlıydı. Zaman içerisinde enerji kaynakları da çeşitlenmiş özellikle ikincil enerji kaynaklarından biri olan elektrik enerjisinin üretiminde daha çeşitli birincil kaynaklar kullanılmaya başlanmıştır [3]. Birincil enerji kaynaklarından yenilenemeyen enerji kaynakları dünyada geçmişte oluşmuş ve genellikle yer altında kendiliğinden depolanmış enerji kaynaklarıdır. Son yıllarda bu enerji kaynaklarının fiyatlarında artış yaşanmış, örneğin son 15 yılda petrol fiyatları 5 katına çıkmıştır [4;5]. Bu fiyat artışı insanları başka kaynaklara yöneltmiştir. Bunun yanında yenilenemeyen enerji kaynaklarının sonlu olması ve kullanımlarıyla doğaya verdikleri zararlar göz önüne alınarak son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına bir eğilim söz konusudur [6]. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) verilerine göre yenilenebilir enerji kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesinde Türkiye’de enerji üretimi bakımından hidroelektrik enerjisinin ardından rüzgar enerjisi gelmektedir [7].

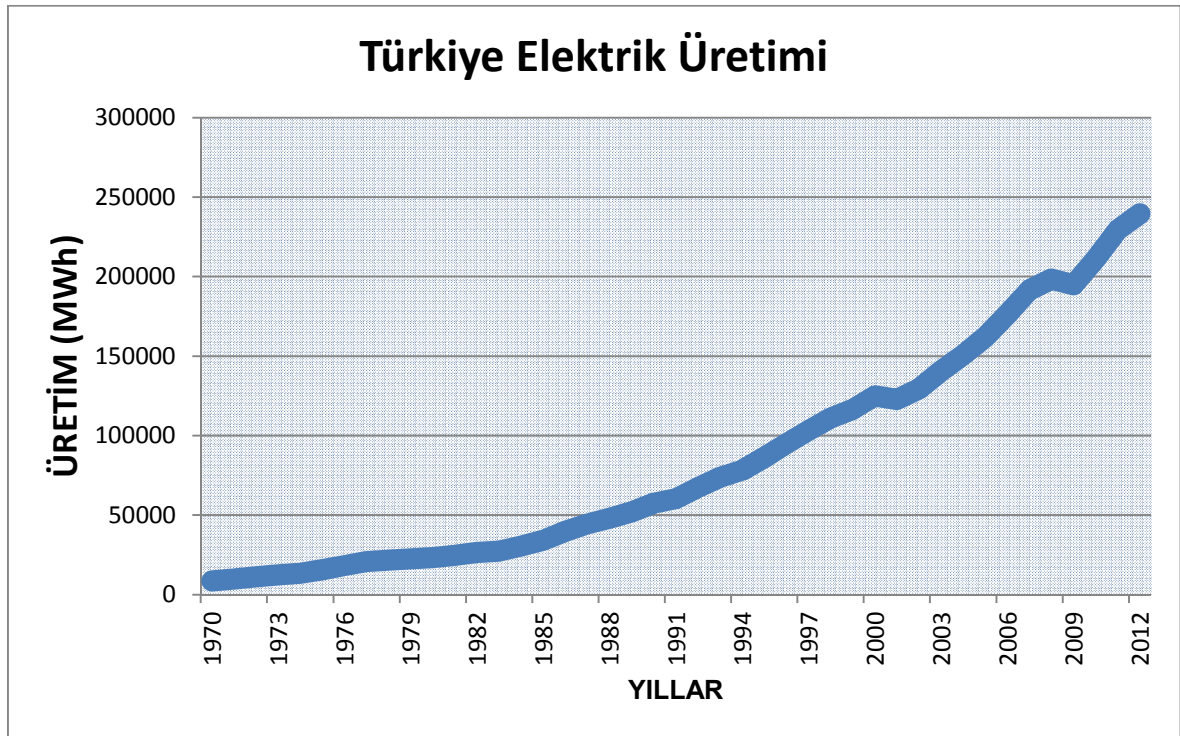
Rüzgar enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında günümüzde en çok kullanılan enerji kaynaklarından bir tanesi olmaya başlamıştır. Rüzgarın doğada kendiliğinden oluşması, oluşan rüzgardaki enerjinin kullanılmasının doğaya zarar

vermemesi, rüzgarlı bölgelerin uzun dönemde düzenli şekilde rüzgar kaynağı yaratması rüzgar enerjisinin kullanımını cazip hale getirmiştir [8]. Rüzgar herhangi bir bölgede yıllık hız ortalamaları bakımından yıllara göre çok az değişkenlik gösterir. Yani yıllık döngülerde rüzgar düzenlidir denilebilir. Fakat rüzgar gün içerisinde saatlik, günlük, aylık döngülerde düzenli değildir. Hatta dakikalar içerisinde bile rüzgar hızlarında ve yönünde değişimler yaşanır. Bu nedenle rüzgar enerjisi tahminlerini %100 kesinlikte yapmak olanaksızdır. Rüzgar enerjisi potansiyelinin değişkenliğini etkileyen başlıca faktörler rüzgar türbinlerinin teknik özelliklerinin farklılığı ve sahaya özgü faktörlerdir. Bunların her biri birçok iç etkenden dolayı rüzgar enerjisi potansiyeline etki eder. Bu nedenle rüzgar enerjisi potansiyellerinin bulunması için birçok yöntem geliştirilmiştir [9].

1.2 Literatür Araştırması

Son yıllarda birçok ülke rüzgar enerjisine büyük yatırımlar yapmaya başlamıştır. Mevcut olarak yapılmış olan rüzgar enerjisi santrallerinin büyük bölümü karada yapılan rüzgar santralleridir. Yenilenemeyen enerjinin cazibesinin düşmesiyle ülkeler karada ve denizde rüzgar enerjisi santralleri yaparak enerji ihtiyaçlarını karşılama politikasına yönelmişlerdir [10].

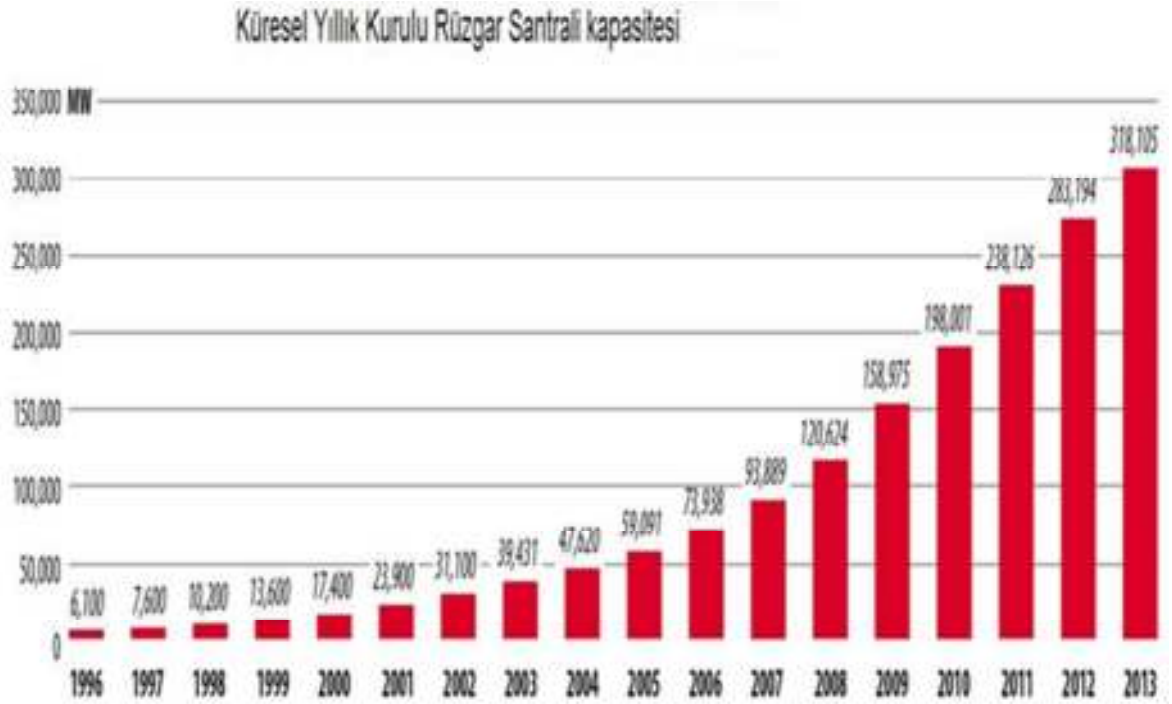
Türkiye’de de enerji tüketimi yıllar geçtikçe artmaktadır. Şekil 1.1’de Türkiye’nin son 30 yıldaki enerji tüketim verileri görülmektedir. Türkiye’nin elektrik tüketimi 1980 yılından 2012 yılına kadar 8 kat artmıştır. Bu artışın gelecek yıllarda da devam etmesi beklenmektedir. Dünya genelinde olduğu gibi Türkiye’de de enerji taleplerindeki artış ve yenilenemeyen enerji kaynaklarındaki çeşitli dezavantajlar nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim söz konusudur. Son yıllarda Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisine eğilim en fazla olmuştur. Türkiye’nin rüzgar enerjisi potansiyeli yüksektir ve bu potansiyelin şu anda çok sınırlı bir bölümü kullanılmaktadır [11].



Şekil 1.1 Türkiye Elektrik Üretimi [11]

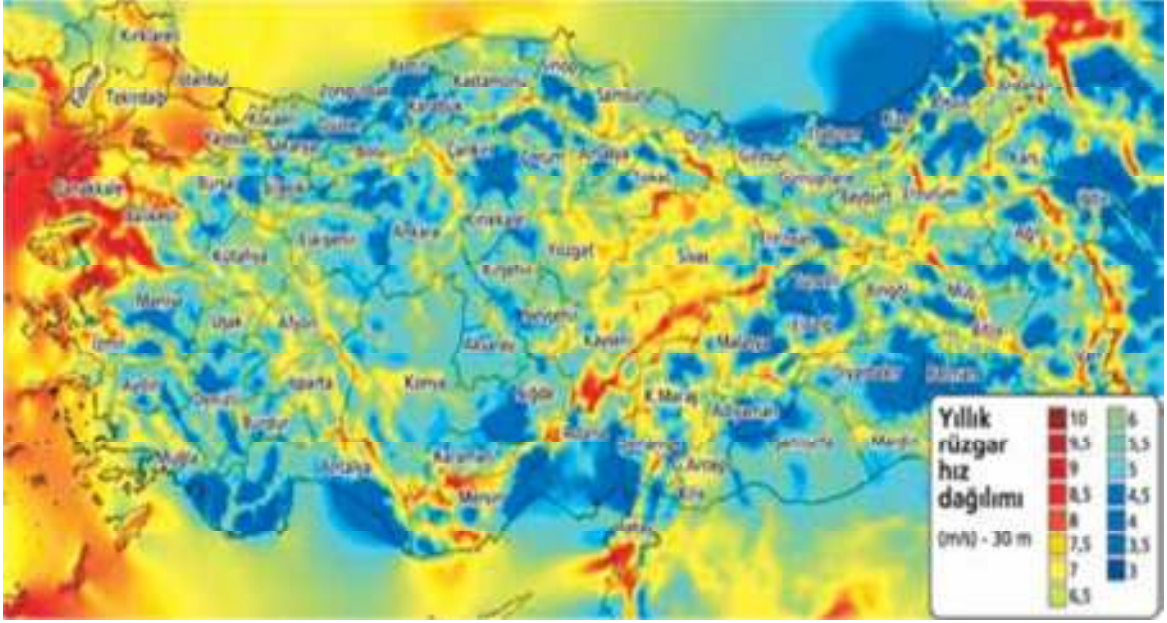
Rüzgar enerjisinde kullanılan türbinlerini teknolojilerinin gelişmesi ve fiyatlarının önceki yıllara göre daha cazip hale gelmesi rüzgar enerjisi santrallerinin hızla artmasını sağlamıştır [12].

Dünyada rüzgar enerjisi santrallerinin kurulumu son 15 yılda büyük artış göstermiştir. Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyinin (GWEC) verilerine göre dünyada toplam rüzgar santrali kurulu gücü 50 kat artmış 6.100 MW'tan 318.105 MW'a çıkmıştır. Şekil 1.2'de dünyada toplam kurulu gücün 1996-2013 yılları arasındaki gelişimi görülmektedir [13].



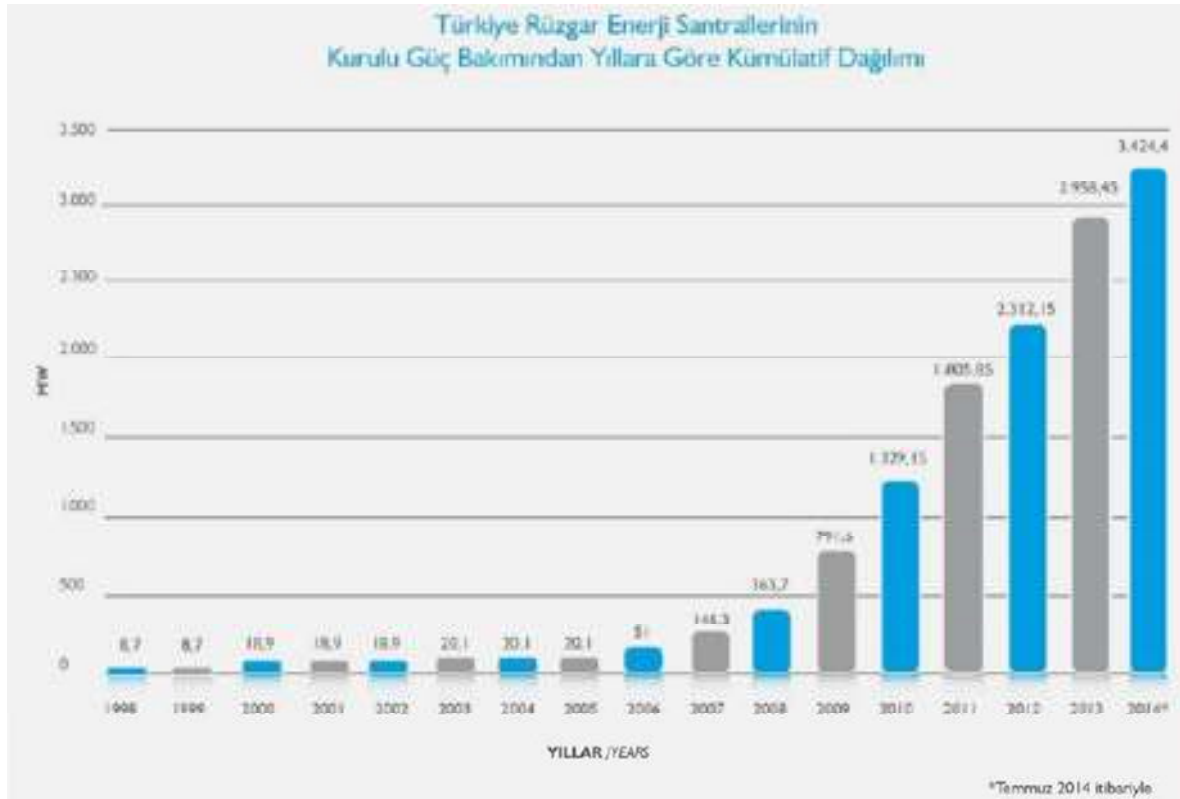
Şekil 1.2 Küresel yıllık kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi (1996-2013) [13]

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından Türkiye'nin rüzgar haritası üretilmiştir. Bu haritaya Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) adı verilmiştir. Bu haritada tüm Türkiye'nin rüzgar yapısı ortaya çıkmıştır. Haritanın oluşturulması için kullanılan veriler belirli yerlerdeki Meteoroloji istasyonlarına ait 10 m yüksekliğe sahip rüzgar ölçüm direklerinin verileridir. Bu veriler ile 100 m yüksekliğe kadar rüzgar hızları mevcut yöntemlerle hesaplanmıştır. Şekil 1.3'te REPA görülmektedir. Burada rüzgar verileri 30 m yükseklikler için gösterilmektedir [14].



Şekil 1.3 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) [14]

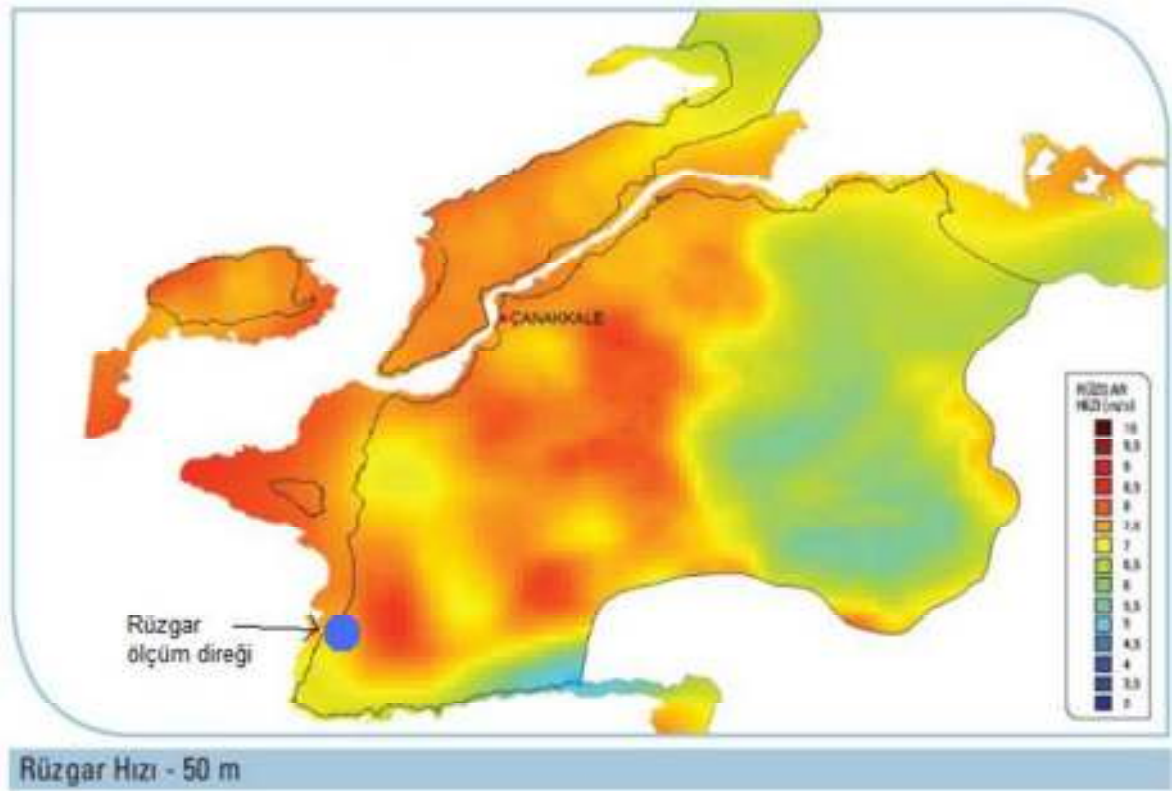
Türkiye’de ilk rüzgar enerjisi santrali 1998 yılında kurulmuştur. İlk kurulan rüzgar enerjisi santralinin büyüklüğü 8,7 MW’tır. 1998 yılından 2014 yılına kadar Türkiye rüzgar enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu bölgelere artan bir ivme ile santraller kurulmuştur. Bu gelişim esasında 2006 yılına kadar çok az olmuştur. Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin kurulumunda 2006 yılından sonra çok büyük bir artış olmuştur. Şekil 1.4’te görüldüğü gibi 2014 yılı Temmuz ayı itibariyle Türkiye’nin toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü 3424,4 MW’a ulaşmıştır [15].



Şekil 1.4 Türkiye’de RES’lerin kurulu güç bakımından kümülatif dağılımı [15]

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin bir sebebi de çevresel etkilere, Kyoto Protokolü ile seragazi emisyon sınırlamaları yürürlüğe girmiş ve enerjinin doğayı kirletmeden üretilmesine önem eskiye oranla artmıştır. Bu nedenle rüzgar enerjisi temiz bir enerji olması sebebiyle de son yıllarda daha çok kullanılan bir enerji kaynağı haline gelmiştir [16].

Şekil 1.5’te görüldüğü gibi Türkiye’nin batı kısımları rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından çok verimlidir. Bu tezde incelenen saha Çanakkale’dedir ve Şekil 1.5’te Çanakkale’nin REPA’daki ayrıntılı gösterimi ile bu tezde analiz edilen sahanın konumu gösterilmektedir.



Şekil 1.5 Çanakkale için REPA [17]

Gelibolu ve Gökçeada'da yıllık rüzgar hızı ortalamaları Türkiye'nin en yüksek olan rüzgar bölgeleri olarak tespit edilmiştir [18].

Kara ile denizin birleştiği noktalarda sıcaklık farkları gözlenir. Sıcaklık farkları da rüzgar oluşumuna neden olur. Deniz kıyısında günün farklı saatlerinde değişik hızlarda rüzgar oluşumu meydana gelir. Deniz tarafından gelen rüzgar yüzey sürtünmelerinden daha az etkilendiği için hızlıdır. Aynı zamanda türbülans da daha azdır. Dolayısıyla Çanakkale kıyılarında oluşan rüzgarlarda bu özellikler görülür [19].

Rüzgar hızı ölçümleri her durumda kurulacak olan ya da analizi yapılacak olan rüzgar türbinlerinin göbek yüksekliğinde yapılmaz. Gerçek ölçüm verileri çoğunlukla türbin göbek yüksekliklerinden daha alçakta alınan verilerdir. Örneğin yukarıda anlatıldığı gibi YEGM 10 m yükseklikte rüzgar ölçümleri yapmıştır. Bu durumda eldeki gerçek verilerin kullanılarak daha yüksek yerlerdeki rüzgar hızlarının bulunmasına ihtiyaç vardır. Bu şekilde rüzgar hızlarının dikey yönlü olarak farklılık göstermesiyle ilgili çeşitli yaklaşımlar ortaya atılmıştır. Bunlardan en çok kullanılanları logaritmik kanun ve güç kanunudur [20;21].

Kubik ve arkadaşları [22] rüzgar hızlarının türbin göbek yüksekliğindeki değerlerini bulmak için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada logaritmik kanun ve güç kanunu uygulanarak bulunan türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızları kullanılarak yapılan rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinin hassasiyeti test edilmiştir. Çalışmada İskoçya'nın Batı Freugh bölgesinde bir rüzgar ölçüm istasyonunun verileri kullanılmıştır. Rüzgar verileri düzenli ve 10 m. yüksekliktedir. Logaritmik kanunun en önemli değişkeni olan yüzey pürüzlülüğü (z_0) değeri için saha topografyasına en uygun olduğu düşünülen ve tablolarla ile gösterilen değerlerden 4 tanesi kullanılmıştır. Aynı şekilde Hellmann katsayısı (α) değeri olarak da birinci değer 1/7 olmak üzere toplam 4 ayrı katsayı katsayı kullanılmıştır. Seçilen rüzgar türbininin göbek yüksekliği 60 m.'de ve bu türbin için rüzgar kesme katsayısı ve pürüzlülük uzunluğu değerleri ile elde edilen 10 m. yükseklikten göbek yüksekliğine ekstrapolasyon yöntemiyle elde edilmiş rüzgar hızları kullanılarak enerji üretim, yıllık kapasite faktörü, sıfır üretim yapılan saatler ile üretim yapılamayan saatlerin yüzdesi hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre seçilen Hellmann katsayısı (α) çok hassas bir yapıya sahiptir ve α hesaplanan göbek yüksekliği hızlarında belirgin değişikliklere sebep olabilir, dolayısıyla hesaplanan rüzgar enerjisi potansiyel üretimine de etki eder. Yüzey pürüzlülük katsayısı daha az hassastır ve enerji üretimi sonuçlarına etkisi Hellmann katsayısı kadar yüksek değildir.

Newmann ve Klein [23] atmosferik düzenliliği sınıflandırarak en uygun bir düzenliliğe bağlı Hellmann katsayısı (α) geliştirmişlerdir. Bu çalışmada Oklahoma (ABD) verileri kullanılmıştır. Sadece 1 aylık verilerden elde edilen Hellmann katsayıları güç kanununa başka mevsimler için de uygulanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, teorik başka yöntemler de incelenerek güç kanunu ile karşılaştırması yapılmıştır. Kullanılan rüzgar verileri 10 m. yüksekliğindeki bir ölçüm yerinden ve onun yakınındaki 10 m. ve 80 m. rüzgar ölçümleri yapılmış daha yüksek bir rüzgar ölçüm direğinin verileridir. Yapılan değerlendirme sonucunda sonuçlar düzenli şartlarda güç kanununun incelenen teorik yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği göstermektedir, ve güç kanunun diğer mevsimlere de uygulanabilirliği anlaşılmaktadır.

Rüzgar hızı ekstrapolasyonunda yapılan hesaplamaların ve değerlendirmelerin doğrulunu test etmek için ekstrapolasyon yapılarak elde edilen değerlerin aynı yükseklikte gerçek değerlerle karşılaştırılması gerekmektedir. Gualtieri ve Secci [24] rüzgar hızlarının ekstrapolasyonunda İtalya'da bir bölgedeki ölçüm değerlerinin kullanarak analiz yapmışlardır. Çalışmada güç kanununun en doğru sonuçlar ortaya koyduğu düşünülerek kullanılmıştır. Geleneksel olarak dikey ekstrapolasyonda kullanılan rüzgar hızı zaman serisi çalışmanın bir tarafında yer almıştır. Diğer taraftan “anlık” rüzgar profillerinin Weibull dağılımının yükseklik çeşitliliği ile birbiriyle tutarlı olduğu gösterilmiştir. Bu iki yöntem karşılaştırılmış ve birinci yöntemde kullanılan rüzgar hızı zaman serileri ekstrapolasyonu ile ikinci yöntemde kullanılan Weibull rüzgar hızı dağılımı ekstrapolasyonu sonuçları arasındaki farklar gözlenmiştir. Seçilen saha düzgün ve pürüzlü özelliklere sahip olup bu şekilde atmosferik düzenlilik ile yüzey pürüzlülüğünün zaman ile beraber ve rüzgar karakteristiği ile beraber değişkenliği ile rüzgar hızların oluşmasındaki rolü incelenmiştir. Burada kullanılan veriler saatlik ortalamalar ile 10 m. ve 50 m. yüksekliğinde alınmış olan verilerdir. 10 m.'de yapılmış olan ölçümler ile 50 m. yükseliğe ekstrapolasyon yapılarak kullanılan modeller test edilmiştir.

Duricic ve Mikulovic [25] WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) programı ile yapılan rüzgar gücü potansiyeli analizleri ile en küçük kare yöntemiyle yapılan rüzgar gücü potansiyeli tahminlerini kullanarak karşılaştırmalı bir analiz ile yapmışlardır. WAsP programı Weibull analizine dayanan bir programdır. Buna göre farklı yüksekliklerden elde edilen rüzgar verileri en küçük kare yöntemine dayanan bir matematiksel modelle ölçülmüş olan verilerin dikey ekstrapolasyonu için kullanılmıştır. Önerilen modelin en az 3 farklı ölçüm yüksekliğinde uygulanmasıyla rüzgar gücü potansiyeli analizi yapılmak istenen yükseklik için bir veri havuzu oluşturulmuştur. Kullanılan ölçüm verileri 3 ayrı bölgede birbirinden farklı topografik özelliklere ve iklime sahip 1 yıllık ölçüm verilerle algoritma test edilmiştir. Ölçümler, bir tanesi analizde değerlendirilecek olan türbinin göbek yüksekliğinde olmak üzere her bir ölçüm noktası için 4 farklı yükseklikte yapılmıştır. Çıkan sonuçlara göre önerilen yöntemle yani en küçük kare metoduyla ölçümlerin işlenmesi ölçüm yapılan yüksekliklerden daha yüksek bir nokta için yapılan güç potansiyeli tahmini WAsP'in standart bir uygulamasında sadece bir

ölçüm yüksekliği kullanılarak elde edilen tahmin verilerinden daha uygun tahminler ortaya çıkarmıştır.

Çelik [26] Weibull dağılımına uygun olan rüzgar verilerini kullanarak rüzgar enerjisi üretim hesaplamalarını yapmıştır. Hesaplamalarda küçük ölçekli (50-300 kW arası) rüzgar türbinleri gözönüne alınmıştır. Weibull parametrelerine gama fonksiyonu kullanılarak ölçülen rüzgar verilerine dayanarak hesaplanmış olan rüzgar dağılımına göre karar verilmiştir. Burada hesaplanan Weibull parametrelerinden bağıl frekans biçimli rüzgar verileri elde edilmiştir. Bir rüzgar türbini için rüzgar enerjisi üretim tahminleri hesabı yapılmış ve bu hesap yapılırken zaman serileri biçimindeki rüzgar hız verileri ile Weibull'u temsil eden rüzgar hızları kullanılmıştır. Zaman serilerinden ve Weibull rüzgar verilerden elde edilen aylık enerji üretim tahminleri hesaplanmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlara bakıldığında Weibull verileri rüzgar enerji üretim tahminlerinde yüksek doğrulukta sonuçlar ortaya koymuştur. Ortaya sadece %2,79 düzeyinde hata çıkmıştır.

Palaiologou ve arkadaşları [27] Ege Bölgesi'nde bulunan Yunanistan'a ait Midilli adası için rüzgar karakteristiği çalışması yaparak adanın rüzgar enerjisi üretim kapasitesini tanımlamışlardır. Bu çalışmada meteoroloji istasyonlarındaki uzaktan okunabilir otomatik veri toplama cihazlarının topladığı verilerden faydalanılmıştır. Kullanılan veriler eş zamanlı ve üç yıla ait verilerdir. Analizler yapılırken rüzgar gülleri, Weibull eğrileri, Weibull grafikleri oluşturulmuş ve bunlar rüzgar karakteristiği analizi yapılırken veri olarak kullanılmıştır. Bu göstergeler Coğrafi Bilgi Sistemi ve WAsP programı kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmada temel hedef söz konusu adanın rüzgar gücü potansiyelini tespit etmek olduğu için adaya bir rüzgar çiftliği kurulması öngörülerek analizler belirli bir alanda belirli sayıda rüzgar türbini kurulması ve bu türbinlerden elde edilecek toplam yıllık elektriksel gücü tespit etmek üzerine kurulmuştur. Bu sebeple 15 rüzgar türbin sahası için altışar ayrı senaryo yaratılarak toplamda 5 türbine sahip bir rüzgar çiftliği için optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Rüzgar karakteristiği çalışmaları yapılırken bölgesel veriler kullanılmış ve öngörülerin Ege Bölgesi özelinde gerçeğe çok yakın bir şekilde olması için Ege bölgesi'ndeki meteoroloji ve iklim üzerine yapılan akademik çalışmalardan faydalanılmıştır.

Chang [28] olasılık yoğunluk fonksiyonunlarını karşılaştırarak eldeki rüzgar verilerinin farklı olasılık yoğunluk fonksiyonlarındaki hata oranlarını hesaplamıştır. Buna göre geleneksel Weibull dağılımındaki hata miktarı daha fazla parametrelili Bimodal Weibull fonksiyonu (WW) ve düzeltilmiş Normal Weibull fonksiyonu (NW)'na oranla daha fazla çıkmıştır. Burada analiz yapılan sahaların rüzgar rejimlerinde Histogramda gösterilen rüzgar rejiminde iki ayrı noktada tepe noktası oluşmuş ve bu şekilde oluşan rüzgar verilerinin geleneksel Weibull fonksiyonu ile yapılan analizlerde daha fazla hata oranı gözlenmiştir.

Durak [29] Danimarka'da geliştirilen ve Danimarka iklim ve yeryüzü koşullarına göre hazırlanan WAsP programının Türkiye konullarında uygulanabilirliğini incelemiştir. Analiz yapılan saha şartları için girdiler düzenlenmiş ve Türkiye şartları için de Weibull analizi tabanlı olan WAsP programı ile rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılabileceği gösterilmiştir.

Ölçülmüş olan ortalama rüzgar hızı verileri rüzgar enerjisi analizleri için temel oluşturmaktadır. Mevcut olarak ölçülen rüzgar hızı veritabanları çok uzun süreli olmadığı için ve uzun örnekleme süreleri nedeniyle bazı yetersizlikleri barındırmaktadır [30].

Lange ve Hojstrup [31] rüzgar analizlerinin Weibull analiz ile yapılması ile gerçek veriler arasındaki farkları analiz etmişlerdir. Çıkan sonuçlara göre farklı rüzgar yönlerinden gelen rüzgarların sonuçlara etkisi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise farklı rüzgar yönlerinde yüzey pürüzlülüğünün farklı olması olarak gözlenmiştir.

Rüzgar hızlarının dikeydeki hız profilindeki zamanla değişimi ölçülmüş hız değerlerine bağlı dikey yönlü ekstrapolasyon sonucunda rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde belirsizliklere yol açar. Özellikle tek bir yükseklikteki ölçümlerde belirsizlik miktarları artar. Bunun en aza indirilebilmesi için daha fazla yükseklikte ve daha fazla noktada ölçümler yapılır. Buna rağmen ekstrapolasyon sonucunda belirsizlikleri sıfırlamak mümkün değildir [32].

Taylor *et.al.* [33] rüzgar enerjisi analizindeki belirsizliklerle ilgili çalışma yapmışlardır. Uzun dönem rüzgar kaynaklarının türbin göbek yüksekliğindeki değerlerinde oluşan belirsizlikler rüzgar tesislerinin toplam enerji üretim analizlerinin en önemli belirsizlik kaynağıdır. Taylor ve arkadaşları enerji üretim

analizlerindeki belirsizlikleri 2 ana başlıkta ortaya koymuşlardır. Birincisi ölçüm korelasyonu tahmini, ikincisi ise türbin göbek yüksekliğine rüzgar kesme ekstrapolasyonudur. Ölçüm korelasyonu tahmini uzun dönem referans bir istasyondan alınan veriler ile bir sahadaki kısa dönemli verilerin korelasyonu ile uzun dönem verilerin tahmin edilmesine dayanır. İki istasyon arasındaki bağlantım ya da başka bir ilişki var ise tespit edilir, daha sonra referans ölçüm istasyonundaki uzun dönem ortalama rüzgar hızı istenen sahadaki uzun dönem rüzgar hızını bulmak için kullanılır. Bu çalışmada üç farklı yöntem birbirlerinin doğruluklarını karşılaştırmak için kullanılmıştır. Birinci yöntem kütleli gerileme yöntemi, bireysel gerileme denklemleri ve üçüncü yöntemde ikinci yöntemdeki yönlü gerilemeden farklı olarak yönlü oranlama kullanılmıştır. Çalışmada 3 adet gözlem sahası bu sahalardaki dört yıl ölçülmüş devamlılığı olan ve kayda değer veri eksikliği olmayan verilerle incelenmiştir. Uzun dönem tahminlerdeki değişkenliği görebilmek için gözlemlenen sahalardaki uzun dönem verilerin korelasyonunda birkaç tane referans istasyon gözönüne alınması gerekmiştir. Her üç yöntem için de uzun dönem rüzgar tahminlerinin ortalamaları alınmış ve bunlara dayalı standart sapmalar hesaplanmıştır. Tüm analizlerden sonra tablolastırılan sonuçlar göstermiştir ki kütleli gerileme ölçüm korelasyonu tahmin yöntemi 3 yöntem arasında en yüksek kesinlikte ve doğrulukta sonuçları vermiştir. Bu çalışmanın ikinci ana başlığı da ekstrapolasyon yapılmış göbek yüksekliği rüzgar hızındaki belirsizliklerdir. Buradaki belirsizlikler ölçümlerden ve rüzgar kesme modelinden kaynaklanmaktadır. Analiz edilen yükseklik 80 metredir. Rüzgar ölçüm belirsizliğinin en önemli etkeni anemometrede oluşan belirsizliklerdir. Buna ek olarak kulenin dikey yerleşimi, gözlem periyodu, ölçüm korelasyonu tahmini yöntemlerinde kullanılan geçici periyotlar, gözlem ve referans istasyonları arasındaki bağlantılar da göz önüne alınmalıdır. Burada her bir belirsizliğin diğer belirsizliklerden bağımsız olduğu varsayılarak analizler yapılmıştır. Çıkan sonuçlar farklı yüksekliklerdeki anemometrelerden elde edilen rüzgar hızlarının göbek yüksekliklerine taşınmasıyla oluşan ayrı ayrı belirsizlikleri ortaya koymuştur.

Jung ve arkadaşları [34] sınırlı verilerden kaynaklanan belirsizlikleri göz önüne alarak rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapmışlardır. Türbinlerin yerleştirilmesi düşünülen bir sahada Bayes teoremi yaklaşımı yıllık enerji üretimi tahminlerinde kullanılması önerilmiştir. Bu yaklaşımda belirlenen sahaya yakın bir bölgedeki

meteoroloji istasyonundan alınan uzun dönem rüzgar verileri ile sahadaki kısa dönemli ölçülmüş rüzgar verileri kullanılmıştır. Kısa dönemli rüzgar verilerinin kullanılıyor olması belirsizliklere yol açmaktadır. Bunun yanında hava yoğunluğu, rüzgar hızındaki doğal değişimler, yüzey pürüzlülüğü ve türbinin güç performansı da belirsizliklere yol açan diğer etkenler olarak değerlendirilmiştir. Önerilen yöntem ile belirsizlikler rüzgar enerjisi analizi dağılımında işaret edilmiştir. Örnek olarak Kore'deki bir arazide 3 MW'lık türbinler ile önerilen yöntem incelenmiştir. Çıkan sonuçlara bakıldığında %95 güvenilirlik oranında yıllık enerji üretimi tahmin değerleri içerisinde %8,9'luk bir belirsizlik, %99 güvenilirlik oranında ise yıllık enerji üretimi tahmin değerleri içerisinde ise %11,9'luk belirsizlik ortaya konmuştur.

Tindal *et.al.* [35] Garrad Hassan (GH) kuruluşunun 14 yıllık enerji üretim tahmin sonuçlarını üretim sırasında gerçekleşen gerçek sonuçlarla karşılaştırmıştır. GH'ın Avrupa ve Kuzey Amerika'daki sahalarla ilgili yaptığı toplam 156 adet Rüzgar Çiftliği'nin analizinin işletmedeki dönemlerinde ortaya çıkan üretimleri göz önüne alınmıştır. Bu rüzgar çiftliklerinin rüzgar ölçüm zamanları 1 ile 14 yıl arasında değişmektedir. Burada geçerli olan toplam rüzgar çiftliği yılı 510 yıldır. 510 rüzgar yılı analizlerinin gerçek değerlerle karşılaştırılması sonucunda gerçek üretim değerlerinin rüzgar analiz değerlerine oranı ortalama %93,3 çıkmıştır. Ayrıca P90 (gerçekleşme ihtimali %90) değerinin altında kalan rüzgar çiftliği yılı seviyesi %21,2 iken P95 (gerçekleşme ihtimali %95) değerinin altında kalan rüzgar çiftliği yılı %11,6 olmuştur. Tüm bu sonuçlar gösteriyor ki ortalama olarak düşünüldüğünde eldeki mevcut veriler rüzgar çiftlikleri inşa öncesi tahminlerin altında bir performans sergilediğini göstermektedir.

1.3 Tezin Amacı Ve Kapsamı

Rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde başta gelen araştırma konularından bir tanesi rüzgar hızı potansiyelinin araştırılmasıdır. Rüzgardaki kullanılabilir enerji kinetik enerjidir. Rüzgar hızı ve rüzgar yönü, yoğunluk, nem gibi diğer değişkenler rüzgar karakteristiğini oluşturur. Bu değişkenler de rüzgardaki enerjinin büyüklüğüne etki eder. Rüzgar enerjisi potansiyelinin bulunması amacıyla rüzgar çiftliği kurulacak alanlarda rüzgar ölçüm direkleri kurulur. Bu direkler genellikle rüzgar türbinlerinden daha az yükseklikte kurulur. Rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde ise analizlerin yapılabilmesi için rüzgar türbini göbek yüksekliklerindeki rüzgar hızları bilinmelidir. Bunun için daha alçakta ölçülmüş rüzgar hızları çeşitli deneysel ve istatistiksel yöntemlerle türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızlarının tahmininde kullanılır. Fakat bu tür yöntemler genellikle genel formüller yada genel yaklaşımlar içermektedir. Her bir sahaya ya da her bir duruma özgü ayrı yaklaşımlar bulunmamaktadır. Dolayısıyla her bir rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılan sahada hemen hemen benzer yöntem ve formüllerin kullanılması bazen elde edilen sonuçlarda hata paylarının artmasına neden olmaktadır. Literatür çalışmalarında da bununla ilgili çalışmalar yapılmış fakat hem saha özelinde hem de çeşitli değişkenlerle ilgili çalışmalar kısıtlı miktardadır. Burada oluşan boşluğun doldurulması amacıyla bu tezde sahaya özgü rüzgar hızlarının dikey ekstrapolasyonu farklı bir yaklaşım ile yapılarak rüzgar enerjisi analizi yapılmış ve sonuçlar geleneksel yöntemler ile yapılan analizlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından zengin bir ülkedir. Rüzgar enerjisi potansiyeli ülkenin batı tarafında özellikle de Ege Denizi kıyılarında yoğunlaşmıştır. Türkiye’de enerji tüketiminin çoğunluğu da ülkenin batı tarafındadır. Çanakkale Bölgesi de Marmara ve Ege bölgesine kıyısı olan, elektrik enerjisinin çok tüketildiği bölgeler olan İzmir ve İstanbul’a yakın bir konumda ve rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından zengin bir bölgedir. Bu tezde Çanakkale bölgesindeki bir sahada kurulu bir rüzgar ölçüm direğinden elde edilen 4 yıllık rüzgar verileri kullanılmış ve geliştirilen yöntemle bulunan türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızları kullanılıp sahaya özgü rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılmıştır

1.4 Tezin İçeriği Ve Organizasyonu

Bu tezde bir sahada ölçülmüş olan rüzgar hızlarının aynı sahadaki rüzgar enerjisi potansiyelinin bulunmasında kullanılması farklı bir yaklaşımla ele alınmış ve geleneksel yöntemlerle yapılan hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Tezin ilk bölümünde çalışma ile ilgili literatür bilgileri verilmiş, tezin amacı, kapsamı ve yöntemler anlatılmıştır. Konu ile ilgili yapılan akademik çalışmalar incelenmiş ve onların bu teze yapacakları katkı ile birlikte tez konusunun seçilmesinin nedenleri anlatılmıştır. İkinci bölümde ise eldeki veriler ve saha ile ilgili detaylar sunulmuştur. Bölgenin rüzgar karakteristiği ve sahanın topografik özellikleri detaylı incelenmiştir. Ayrıca rüzgar ölçüm direğinin ekipmanları ve görevleri anlatılmıştır. Bunun yanında ölçüm direğinden elde edilen rüzgar verilerinin özellikleri tarif edilmiştir. nc bölümde tanımlar ve araştırma yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır. Analizlerde kullanılan formüller, bağıntılar konu ile bağdaştırılmış ve seçilen konunun analizinin hangi yöntemle neden yapıldığı gösterilmiştir. Dördüncü bölümde analizler yapılmış, hesaplamalar ve karşılaştırmalar izelge ve şekiller ile ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Tezin son bölümünde ise sonuçlar anlatılmış ve bulgular tartışılmıştır.

Bu tezde konular aşığıdaki sıra ile gösterilecektir.

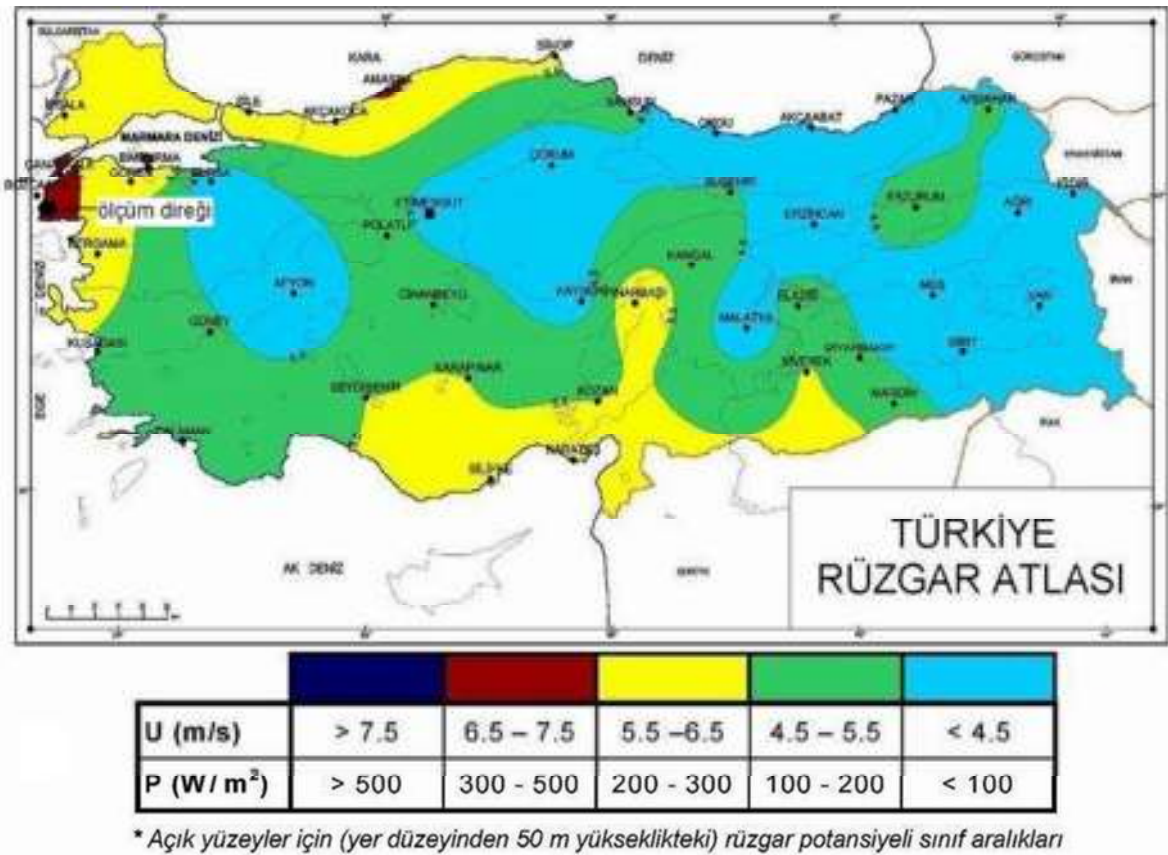
- 1. bölüm giriş bölümüdür ve literatür araştırması, tezin konusu, tezin amacı, tezin kapsamından oluşmaktadır.
- 2. bölüm çalışma yapılan saha ve rüzgar ölçüm verileri bölümüdür. Bu bölüm analiz yapılan sahanın bilgileri, rüzgar ölçüm düzeneği ve ölçüm verilerinin tanımlanmasından oluşmaktadır.
- 3. bölümde kullanılan metodoloji ve araştırma yöntemleri anlatılmaktadır.
- 4. bölümde Hellmann katsayıları ve rüzgar enerjisi potansiyeli analizi sonuçları karşılaştırmaları gösterilmektedir.
- 5. bölümde sonuçların tartışılması, bulgular ve öneriler ortaya konulmaktadır.

2. ÇALIŞMA YAPILAN SAHA VE RÜZGAR ÖLÇÜM VERİLERİ

2.1 Sahanın Bulunduğu Bölgenin Tanımı

Bu çalışmada rüzgar enerjisi potansiyeli analizi Çanakkale bölgesinde bir arazideki ölçüm verileri kullanılmıştır. Arazi Çanakkale ili sınırları içerisinde il merkezinin 60 km. güneyinde yer almaktadır. Türkiye Rüzgar Atlası'na göre bu bölge Türkiye'nin en çok rüzgar alan bölgelerinden bir tanesidir [36].

Şekil 2.1'de Türkiye'nin ve Çanakkale'nin rüzgar potansiyeli görülmektedir. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından zengindir. Özellikle ülkenin batı kıyı kesiminde rüzgar potansiyeli yüksektir. Marmara ve Ege Bölgelerindeki rüzgar potansiyeli diğer bölgelere göre çok yüksektir. Bunun yanında Akdeniz Bölgesinin doğu kısmında da rüzgar potansiyeli yüksektir. Bu tezde çalışma yapılan bölge Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından en verimli kısmıdır.



Şekil 2.1 Türkiye Rüzgar Atlası ve ölçüm direği [37]

Ölçüm sahası denize 300 m uzaklıktadır ve deniz batı yönde kalmaktadır. Arazinin çevresindeki durum Şekil 2.2’de özetlenmiştir. Arazinin kuzey doğu kesiminde deniz vardır. Rüzgar bu yönden geldiğinde deniz etkisiyle gelmektedir. Arazi güneybatıdan kuzeydoğuya doğru deniz seviyesinden yükselmektedir. Bu nedenle rüzgar sahaya güneybatıdan gelirken sahanın yükselmesinden dolayı karaya çarparak ve yükselerek gelir. Diğer yönlerden gelen rüzgar için durum tam tersi olmaktadır.



Şekil 2.2 Ölçüm yapılan arazinin çevresi

Ölçüm sahası Ege Denizi etkisindedir. Ege denizinde Bozcaada ve Gökçeada’da rüzgar ölçümleri yapılmaktadır. Bu ölçümler Ege denizi civarındaki rüzgar ölçüm verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır [38].

Ege Denizinin ve Ege Bölgesinin rüzgar karakteristiğinin değerlendirilmesi, modellenmesi ve haritalanması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [39;40].

Ege Denizi’ndeki rüzgar yapısı incelendiğinde azor yüksek basınç alanının aktiviteleri ve yaz aylarındaki Güneydoğu Asya’daki basınç düşmeleri Ege Denizi’nde Kuzeydoğu ve Kuzeybatı yönlü Etezyen rüzgarlarının oluşumuna neden olduğu görülür. Bu rüzgarlar Mayıs ayının başında artan bir şekilde esmeye başlarlar ve bu düzende Eylül ayı ortalarına kadar esmeye devam eder. Bu esiş

periyodunun ardından Ekim ayı sonlarına kadar devam eden ve düşen bir esme kuvveti ve hızıyla Etezyen rüzgarları görülmeye devam eder. Rüzgar karakterine bakıldığı zaman maksimum rüzgar şiddeti gündüz saatlerine rastlar ve en yüksek seviyeleri öğleden sonra görülür ve gece saatleri boyunca rüzgar şiddeti düşer [27].

Dündar ve İnan [41] Bozcaada'daki rüzgar enerjisi potansiyelini incelemişlerdir. Bozcaada Türkiye'nin kuzey batı kıyılarında bir adadır. Bu tezde analiz edilen saha ile yakın olması nedeniyle benzer özellikler göstermektedir. Buradaki 10 yıllık ölçülmüş rüzgar verileri arazinin özellikleri göz önüne alınarak ve WAsP kullanılarak analiz edilmiştir. Rüzgar verileri Bozcaada Meteoroloji istasyonundan alınmıştır. Ölçülen değerler deniz seviyesinden 28 metre yukarıda olan bir noktada ölçülmüştür. Ölçüm verilerine göre Bozcaada'da 10 metre yükseklikteki rüzgar hızı ortalama 6,4 m/s olarak ölçülmüş iken 100 metre yükseklikteki rüzgar hızı 11,2 m/s olarak hesaplanmıştır.

Eskin *et. al* [42] Gökçeada üzerindeki rüzgar potansiyeli analizini yapmışlardır. Gökçeada Ege Denizi üzerinde ve ölçüm yapılan arazinin 61 km. kuzey batısındadır. Gökçeada'daki yapılan rüzgar ölçümleri Ege Denizi'ne kıyısı olan karalardaki rüzgar karakteristiği için iyi bir örnektir. Ölçüm yapılan yerlerden kıyıda iki adet ölçüm değerleri analiz edilen araziye uygun özellikler taşımaktadır. Bunlardan bir tanesi Gökçeada-Uğurlu bölgesinde 10 ve 30 metredeki 10 dakikalık aralıklarla yapılan 3 yıllık ölçümlerdir. Uğurlu Doğu tarafı kara Batı tarafı deniz olacak şekilde konumlanmıştır. Bu da bu tezde analiz edilen arazinin doğrultusuna uygun bir konumdur. Burada yapılan ölçümler 35 metre rakımda yapılmıştır ve denize doğru herhangi bir büyük engel bulunmamaktadır. İkinci ölçüm yapılan yer Aydıncık kıyısıdır. Burası Adanın doğusunda olup doğu taraf deniz ve batı taraf kara olacak şekilde konumlanmıştır. Yine burada da ölçümler 10 ve 30 metre yükseklikteki 10 dakikalık aralıklara yapılmış olup 8 yıllık veriler değerlendirilmiştir. Ölçümler 25 metre rakımda yapılmış ve denize doğru herhangi büyük bir engel bulunmamaktadır. Her iki ölçümler de değerlendirilme yapmak üzere güç kanununa göre 50 metre yükseklikteki rüzgar hızları ekstrapolasyon yöntemi ile hesaplanmıştır. Sonuçlara göre Aydıncık'ta 50 metre yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı 8,89 m/s ve Uğurlu'da ise 9,1 m/s'dir.

Rüzgar hızlarının çok yüksek olması rüzgar enerjisi üretimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu konuda yapılmış olan risk analizi çalışmaları Çanakkale Bölgesi'ndeki rüzgar karakteristiğinin yüksek hızlar bakımından Türkiye'deki en yüksek risk taşıyan bölge olduğunu göstermektedir. Rüzgar enerjisi üretimi bakımından düşünüldüğünde türbinin devreden çıkmasını gerektirecek düşük hızlar da düşük üretime sebep olma bakımından riskler taşıyor olsa da yüksek hızdaki rüzgarların rüzgar türbinlerinde sağlamlık yönünden olumsuz etkileri olmaktadır. Bu aynı zamanda mühendislik için yapısal tasarımda da temel önem taşıyan bir etkidir. Ölçülen rüzgar verilerine bakıldığında 10 dakikalık aralıklarla alınan yılda toplam 52.560 adet rüzgar verisinden Bozcaada'da 10 m/s rüzgar hızını yılda 4.400 kez, 12 m/s'yi yılda 1.736 kez ve 15 m/s hızı 346 kez aşıldığı görülmüştür. Bozcaada'nın analiz edilen sahaya çok yakın olduğu düşünüldüğünde sahada yüksek rüzgar hızı kaynaklı risklerin olduğu varsayılır [43].

2.2 Rüzgar Ölçüm Direğinin Özellikleri

Dünyada rüzgar ölçümleri belli noktalara kurulan rüzgar ölçüm direkleri ile yapılmaktadır. Ölçüm direklerinden elde edilen veriler bilgisayar ortamında birçok ölçüm direğinin verilerinin bir arada değerlendirilmesi ve ilgili sahaların topografik özelliklerinin göz önüne alınmasıyla bütün bölgelerin rüzgar verileri bulunmaktadır. Bu veriler ile gelecek zamanlar için rüzgar tahminleri yapılmaktadır. Rüzgar oluşumunun birçok nedene bağlı olmasından dolayı bu rüzgar tahminleri hiçbir zaman %100 kesinlikte olamamaktadır. Dolayısıyla rüzgar ölçümleri gelecek dönem rüzgar verilerinin ölçülmesinde gösterge niteliğinde verilerdir. Rüzgar tahminlerindeki hata paylarının azaltılması maksadıyla günümüzde eski dönemlere kıyasla daha çok noktada rüzgar ölçümleri yapılmakta ve yapılan ölçümler daha yüksek noktalarda yapılmaktadır [21].

Rüzgar enerjisi analizi yapılan sahada 2009 yılı ile 2013 yılı arasında kesintisiz rüzgar ölçümleri yapılmıştır. Rüzgar ölçümleri yapılırken 50 metre yüksekliğinde boru direklerle ölçümler yapılmıştır. Ölçüm noktası bölgenin rüzgar potansiyeli bakımından en verimli yerlerinden bir tanesidir. Bunun için ölçüm değerlerinden yüksek veriler alınmıştır. Ölçüm direği alttaki resimlerde görüldüğü gibi düz arazide denize 200 m. mesafede kurulmuştur. Ölçüm noktası deniz seviyesinden 38 m.

yüksekliktedir. Ölçüm noktasıyla ilgili koordinatlar aşağıda gösterilmiştir. Arazinin yapısı ve denize olan mesafeler ölçümlerle ilgili analizlerde yüzey pürüzlülüğü gibi etkenleri ortadan kaldırdığından yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi ve istenen sonuçlara ulaşılması bakımından iyi bir çalışma örneğidir. Rüzgar ölçüm direği Şekil 2.3'te gösterilmiştir [44].



Şekil 2.3 Analiz edilen verilerin elde edildiği rüzgar ölçüm direği

Çizelge 2.1 Rüzgar ölçüm direğinin özellikleri

Ölçüm direği koordinatları					
	Doğu	Kuzey	Koordinat sistemi	Datum	Bölge
Grid	425640	4383596	UTM	ED50	35 S
Deniz seviyesinden yükseklik			38 m		

Rüzgar hızı ölçümleri ölçüm direği üzerinde 4 ayrı yükseklikte alınmıştır. Rüzgar ölçümleri için yerleştirilen anemometrelerin yükseklikleri 30 m, 40 m, 48,5 m ve 50 m.'dir. Ölçüm noktalarının 4 adet olması sayesinde ölçüm direğinden daha yüksekte noktalar için rüzgar verileri dikey ekstrapolasyon yöntemiyle hesaplanırken doğru sonuçlar alınması sağlanmaktadır.

Rüzgar enerjisi analizi yapılırken rüzgar hızlarının yanında başka etkenlerin de değişkenliğinin gözlenmesine ihtiyaç vardır. Rüzgar hızları rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde en önemli etken olması nedeniyle doğru ölçümler ve olabildiğince çok veriye sahip olunması önemlidir. Bunun için ölçüm direği üzerinde birden fazla noktada hız ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, hız ölçümleri ile eşzamanlı olarak ölçüm direği üzerinde çeşitli yüksekliklerde yerleştirilmiş ekipmanlar ile başka değişkenler de kaydedilmiştir. Ölçüm direği üzerinde yerleştirilen ve veri toplanması için kullanılan ekipmanlar ve bu ekipmanların özellikleri aşağıda gösterilmiştir.

Ölçümler ve ekipmanlar

Rüzgar hız	: 4 farklı yükseklikte anemometreler ile ölçüm yapılmıştır
Rüzgar yönü	: 2 farklı yükseklikte rüzgar gülleri ile ölçümler yapılmıştır.
Nem	: 1 noktada nem ölçer ile ölçüm yapılmıştır.
Basınç	: 1 noktada barometre ile ölçüm yapılmıştır.
Sıcaklık	: 1 noktada termometre ile ölçüm yapılmıştır.

Rüzgar hız ölçümleri için ölçüm direği üzerinde 4 farklı noktada anemometreler yerleştirilmiştir. Bunun nedeni rüzgar hızının analizi ve dikey ekstrapolasyon yapabilmektir. Çizelge 2.2'de anemometrelerin özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Ölçüm direği üzerinde yerleştirilen anemometreler

Anemometreler			
Anemometre no	Model	Yükseklik (m)	Kol uzunluğu (m)
1	NRG #40C	30	1,5
2	NRG #40C	40	1,5
3	NRG #40C	48,5	1,5
4	NRG #40C	50	1,03

Anemometreler Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi ölçüm direklerinden 1,5 m uzağa yerleştirilmiştir. Bunun sebebi boru ölçüm direğinin rüzgarı engelleme ihtimalini ortadan kaldırmaktır. 1 nolu anemometre en yüksek noktada olduğu için borunun bitim noktasının hemen üzerinde yer almaktadır. Bu nedenle diğer anemometrelere kıyasla ölçüm direğine daha yakın olmasında sakınca yoktur ve 1 nolu anemometre 1,03 m. uzaklığa yerleştirilmiştir.

Rüzgar yönü ölçümleri ölçüm direğinin 2 farklı yüksekliğinde yapılmıştır. Rüzgar güllerinin özellikleri Çizelge 2.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Ölçüm direği üzerindeki rüzgar gülleri

Rüzgar gülleri			
Rüzgar gülü no	Model	Yükseklik (m)	Kol uzunluğu (m)
1	NRG #200 P	30	1,5
2	NRG #200 P	48,5	1,5

Rüzgar gülleri ile 2 farklı yükseklikte yapılan ölçümler incelendiğinde 30 m. ve 48,5 m. yüksekliklerinde rüzgar yönlerinin bir farklılık göstermediği gözlenmiştir. Bu nedenle rüzgar kesme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü analizleri yapılırken sadece 30 m. yüksekliğindeki rüzgar gülünün verileri kullanılmıştır. Ölçüm direğinde 3 m. yükseklikte bir adet nem ölçer ile ortam nemi ölçülmüştür.

Rüzgar hızlarının değişkenliğinde basıncın etkisi de ihmal edilmemelidir. Ölçüm direğine bir adet barometre yerleştirilerek basınç değerleri kaydedilmiş ve rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde göz önüne alınmıştır.

Rüzgar oluşumunda sıcaklık farklarının oluşturduğu akımlar olarak düşünüldüğünde sıcaklığın rüzgar hızlarına etkisinin unutulmaması gerektiği

anlaşılmaktadır. Ölçüm cihazının 5. metresinde ortam sıcaklığı ölçümü yapılarak kaydedilmiştir.

Şekil 2.4'te nem ölçer, barometre ve termometre'nin kurulum yükseklikleri görülmektedir. Bu cihazlar ölçüm direğinde teknik ekip tarafından kolay ulaşılabilir olmaları için o yüksekliklere yerleştirilmişlerdir.

Çizelge 2.4 Ölçüm direği ekipmanları

Ekipman özellikleri	
Ekipman adı	Yükseklik (m)
Nem ölçer	3
Barometre	3
Termometre	5

2.3 Rüzgar Ölçüm Verileri

Ölçüm verileri rüzgar ölçüm direğinde bulunan ekipmanların aldığı verilerin yine ölçüm direği üzerinde bulunan veri toplama kutusunda sürekli olarak toplanmasıyla elde edilir. Veri toplama kutusundaki veriler uzaktaki bilgisayara otomatik olarak kaydedilmektedir. Kaydedilen bu veriler (.RWD) uzantılı dosyalar olarak her gün için ayrı ayrı dosyalar halinde bilgisayarda toplanmaktadır. Daha sonra bu veriler ölçüm cihazının firmasına ait olan bilgisayar programından elde edilebilmektedir. Bu program "NRG Symponie Data Retriever"dır. Bu program aracılığı ile ölçümler toplu halde raporlanabilmektedir. Bu çalışmada NRG Symponie Data Retriever ile rüzgar gülü oluşturulmuştur. Ayrıca program ile eldeki tüm veriler EXCEL ortamına aktarılmıştır.

Rüzgar ölçüm direğinin verileri 2009 yılı mart ayından 2013 yılı aralık ayına kadar kesintisiz alınmıştır. Bu çalışmada rüzgar ölçüm verilerinin 2010 yılı Ocak ayı ile 2013 yılı Aralık ayı arasındaki 48 aylık (4 yıllık) kesintisiz verileri kullanılmıştır. Verilerde bazı teknik aksaklıklardan kaynaklanan veri kayıpları olmuştur. Veri eksiklikleri eldeki toplam verilerin 1/100'ünden daha azdır. Bu kayıplar veri bütünlüğünün sürdürülmesi ve analizlerin sonuçlarında sapmalar yaşanmaması amacıyla 2009 yılı verileri ile tamamlanmıştır. Tamamlamalar yapılırken ay ve gün olarak tam olarak aynı ayın aynı verisi kullanılarak yapılmıştır. Örneğin 2011 yılı Ocak ayının 21. gününde saat 10:00 ile 11:00 arasındaki verilerin eksik olması

nedeniyle 2009 yılının aynı ayının aynı gün ve saatinde veriler eklenerek 2011 yılı verileri tamamlanmıştır.

Rüzgar ölçüm verileri 10 dakikalık aralıklar ile ölçüm direğinde kurulu bulunan tüm ekipmanların elde ettiği veri gruplarından oluşmaktadır. 10 dakikalık veriler ölçüm yapılan o 10 dakikalık bölümün ortalamasıdır. 10 dakikalık veriler ile saatte toplam 6 veri grubu günde 144 veri grubu ve yılda ise toplam 52.560 veri grubu bulunmaktadır. Bu çalışmada 4 yıllık veriler kullanıldığı için toplam 210.240 adet veri grubu kullanılmıştır.

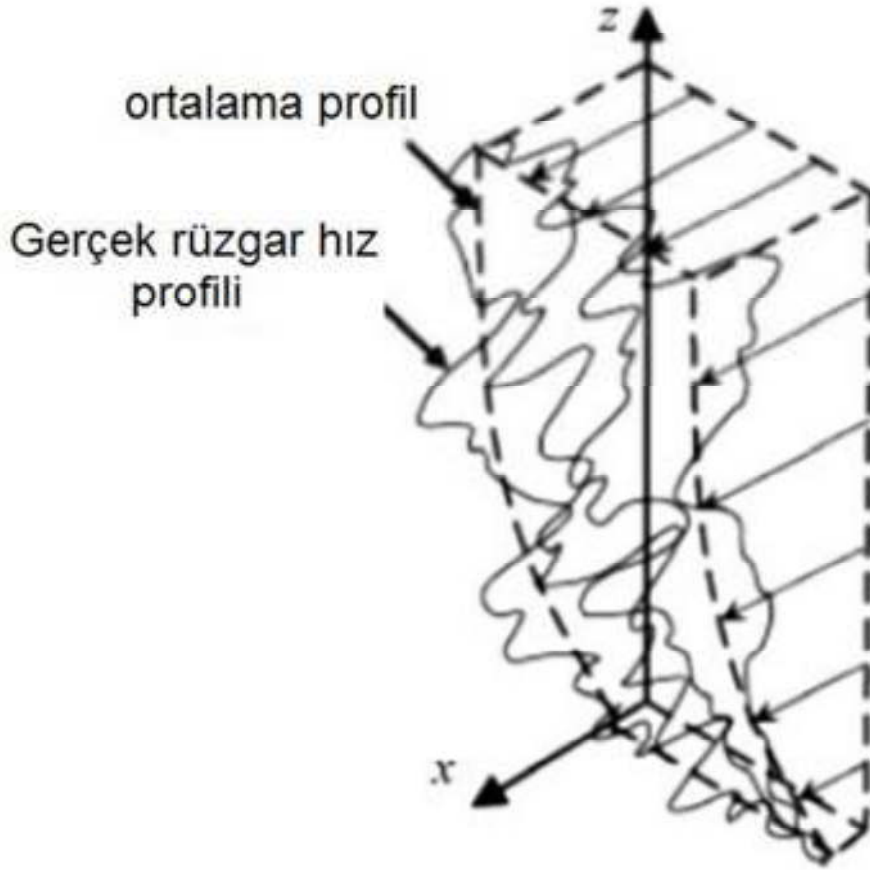
Veri grupları içerisinde birbirine en uzak mesafede olan 30 m. ve 50 m. yükseklikteki veri grupları bu çalışmadaki analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bunların yanında her 10 dakikada bir elde edilen rüzgar yönü (30 m.yükseklikteki), basınç, sıcaklık ve nem verileri analizlerde değişkenler olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla 210.240 adet veri grubunda yukarıda sayılan toplam 7 veri çeşidi analizlerde kullanıldığı göz önüne alındığında toplam 1.471.680 adet veri bu çalışmada kullanılmıştır. Bu kadar çok veri kullanılması analizlerin güvenilirliğini artırmaktadır.

3. METODOLOJİ VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

3.1 Rüzgar Hızlarının Düşey Yönlü Değişimi

Rüzgar enerjisi üretim analizleri yapılırken ilk olarak bilinmesi gereken ve en önemli değişken rüzgar hızlarıdır. Herhangi bir bölgede rüzgar hızı analizi yapmak için o bölgede rüzgar ölçümleri yapılmış olması gerekir. Ölçümler ile elde edilmiş olan gerçek rüzgar verileri hangi yükseklikte ölçüm yapılmış olursa olsun rüzgar enerjisi analizi kullanılacak olan rüzgar türbinlerinin göbek yüksekliğindeki analizler olması gerekir. Eğer analiz yapılacak olan rüzgar türbininin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızı verileri elde yoksa bu veriler diğer yüksekliklerdeki rüzgar hızı verilerinden çeşitli modellemeler kullanılarak elde edilir. Günümüzde genel olarak ölçülmüş olan rüzgar hızlarının yükseklikleri türbin göbek yüksekliğinden daha alçaktadır. Bunun temel nedeni rüzgar hızı ölçümleri için kurulan ekipmanların maliyetlerinin düşürülmeye çalışılmasıdır. Dolayısıyla eldeki belli yüksekliklere ait rüzgar hızlarından faydalanılarak dikey ekstrapolasyon ile türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar hızlarının bulunması gerekliliği vardır [20;46].

Rüzgar değişik yüksekliklerde farklı hızlardadır. Herhangi bir noktadaki rüzgar hızı yerden yüksekliğe doğru gidildikçe artar. Bu hızı genel olarak sabit bir şekilde arttığını düşünmek olanaksızdır. Türbülans etkisinden dolayı havada rüzgar hızında ve yönünde farklılıklar meydana gelmektedir. Van der Tempel [45] rüzgar hızı ile yükseklik arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde göstermiştir. Buradan açıkça görülebiliyor ki bir noktadaki ortalama rüzgar hızı yükseklik arttıkça artıyor. Rüzgar hızının ve yönünün yükseklik ile değişmesi olgusuna “rüzgar kesmesi” (ingilizce: wind shear) adı verilir.



Şekil 3.1 Deneysel hız profili [45]

Rüzgar kesmesinin rüzgar enerjisi analizlerinde çeşitli etkileri vardır. Bir noktadaki rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılırken o noktadaki belirli bir yükseklikte bilinen bir rüzgar hızı yardımı ile aynı noktadaki başka bir yükseklikteki rüzgar hızının bulunmasının gerektiği durumlar vardır. Başka bir deyişle rüzgar ölçümleri ile anemometrelerden elde edilen değerlerin başka bir yüksekliğe düzeltilmesi gerekebilir. Fakat, atmosferik sınır tabakasının karışık ve hareketli özelliği nedeniyle sabit tek bir profile rüzgar hızının dikey yönlü bir yükseklikte diğer yüksekliğe ekstrapolasyonu tam anlamıyla güvenilir sonuçlar vermemektedir [46].

Rüzgar kesmesinin rüzgar hız analizlerinin sonuçlarına etkisinin yanında bir de rüzgar türbini tasarımlarında da göz önüne alınması gereken bir değişkendir. Dikey yönde değişken olan rüzgar hızı rüzgar türbinlerinin yorulma ömrü rüzgar alanı boyunca çevrimsel yüklerden kaynaklanan sebeplerden etkilenmektedir. Bu da rüzgar türbinlerinin rüzgar kesmesinin etkileri göz önüne alarak tasarlanmasını gerektirmektedir [47].

Rüzgar kesmesinin hesaplanmasında başlıca iki matematiksel model kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi logaritmik kanun, diğeri ise güç kanunudur. Bu modellemeler homojen dağılımlı ve düz araziler için en uygun modellerdir. Her iki model de türbülans etkisinin karmaşık ve değişkenliğinden kaynaklanan belirsizliklere açıktır [20].

Logaritmik kanun akışkanlar mekaniğindeki atmosferik çalışmaların sınır tabakası akımının incelenmesindeki yöntemler esasına dayanır. Teorik ve ampirik araştırmaların birleşimi şeklindedir.

Logaritmik kanun;

$$V(z) = \frac{V^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.1)$$

Burada;

$V(z)$: z yüksekliğindeki rüzgar hızı

V^* : Sürtünme hızı

k : Von Karman Sabiti

z_0 : Yüzey pürüzlülük uzunluğu'nu ifade etmektedir.

Logaritmik kanunda kullanılan pürüzlülük uzunluğu atmosferik düzenlilik olduğu varsayımda doğru sonuçlar çıkarmaktadır. Bu durumda, atmosferik düzenlilik tam anlamıyla gerçekleşmeyen bir durum olduğu için gerçek değerler ile logaritmik kuralın çıkardığı sonuçlar arasında farklılıklar olabilmektedir.

Logaritmik kanun birçok araştırmacı tarafından karışık varsayımları nedeniyle uygulanabilirliği ve sadeliği bakımından güç kanununa kıyasla daha verimsiz olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle güç kanunu daha çok kabul edilir bir modeldir. Ayrıca güç kanunun ampirik yapısından dolayı ve güç kanunu eksponentinin en uygun değerlerini tespit etmek bakımından daha güvenilir bir yöntemdir. Elkinton ve arkadaşları [48] logaritmik kanun ile güç kanununun performanslarında kayda değer bir farklılık olmadığını ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada bazı durumlarda her iki yöntemin de doğru olmayan sonuçlar ortaya çıkardıklarını göstermişlerdir. Bu sonucu ağaçsız düz araziler için ve hafif tepeli ağaçsız bölgeler ile ormanlık alan için yapmışlardır. Bu üç durum için yapılan

çalışmada 50 m. türbin göbek yüksekliğinde tahmin edilen rüzgar hızı ile deneysel olarak ölçülen değerler arasındaki fark %1 ile en fazla %13 arasında oluşmuştur.

Kubik *et.al.* [22] logaritmik kanun ve güç kanununu karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Farklı değerler kullanılarak yapılan analizlerde Hellmann katsayısının yüzey pürüzlülüğünden daha hassas bir değişken olduğu görülmüştür. Bunun yanında uygun değerler kullanılırsa da güç kanununun enerji potansiyeli hesaplarında daha doğru sonuçlar çıkardığı gösterilmiştir.

Güç kanunu logaritmik kanuna kıyasla düzensiz ve doğal şartlarda daha iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca Justus ve Mikhail [50] güç kuralının Weibull dağılımı ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Weibull dağılımı da rüzgar analizlerinde çok kullanılan bir bağıntı olduğu için güç kanununun rüzgar hızı ekstrapolasyonunda kullanılmasının doğruluğunu desteklemektedir. Bu sebeple bu çalışmada güç kanunu incelenecektir [20].

Güç kanunu dikey hız profili için basit bir şekilde;

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (3.2)$$

Burada:

$V(z)$: z yüksekliğindeki rüzgar hızı

$V(z_r)$: z_r yüksekliğindeki referans hız

α : güç kanunu eksponenti (Hellmann katsayısı)'nı belirtmektedir.

Daha önceki çalışmalar güç kanunu eksponenti α 'nın belirli şartlarda 1/7 (0,143) değerinde olduğunu göstermektedir. Bu değer rüzgar profilleri ile düzgün yüzeyler üzerindeki rüzgar akışının ilişkisini göstermektedir. Fakat, pratikte α çok değişken bir niceliktir.

Fırtın *et. al.* [32] ABD'de 39 farklı bölgede toplam 7.082 adet rüzgar kesmesi katsayısı tespit etmişlerdir. Bu katsayıların %7,3'ü 0 ile 0,14 değerleri arasında yer almıştır. %91,9'u ise 0,14 değerinin üzerinde bulunmuştur. Bir de %0,8'lik kısmı ise negatif değerlerdedir.

Çizelge 3.1 Yüksek bölgelerde α 'nın rüzgar gücü yoğunluğuna etkisi [20]

	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 1/7$	$\alpha = 0,3$
U_{30m} (m/s)	5,58	5,85	6,95
P/A (W/m ²)	106,4	122,6	205,6
10 m.'deki artış yüzdesi (%)	39,0	62,2	168,5

Çizelge 3.1'de örnek bir saha için değişik α değerlerinde rüzgar güç yoğunluğundaki değişimler görülmektedir. Bu tablodaki değerler 10 m. yükseklikteki rüzgar hızlarının 30 m. yükseklikteki değerlerin güç kanunu formülü uygulanarak bulunmasıyla elde edilmiş değerlerdir. Güç kanununda α değerleri 3 farklı sayı olarak alınmış ve her birinin ayrı ayrı uygulanmasıyla çıkan sonuçlar gösterilmiştir.

Güç kanunu eksponentinin rüzgar hızlarının bulunmasında etkileri açıktır. α birçok faktörden etkilenecek değişkenlik gösterir.

α değerini etkileyen faktörler;

1. Rakım
2. Günün saati
3. Mevsim
4. Bölgenin doğal yapısı
5. Rüzgar hızı
6. Sıcaklık
7. Atmosferik düzenlilik
8. Yüzey pürüzlülüğü
9. Zaman aralığı
10. Ölçüm yüksekliği
11. Diğer termal ve mekanik sebepler [46;47]

Rüzgar kesmesi atmosferik tabakalanmalardan fazlasıyla etkilenir. Öyle ki, saat saat, gün gün, mevsimden mevsime ve yıldan yıla sürekli farklılık gösterir. Bu sebeple rüzgar hızı ekstrapolasyonu hatalara açık bir kavramdır. Rüzgar enerjisi analizlerinin genelinde dikey yönlü ekstrapolasyon yapıldığı için analiz sonuçları çok önemli miktarlarda belirsizlikleri içerisinde barındırır. Başka bir deyişle rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerindeki belirsizliklerin en önemli etkeni rüzgar

kesmesinin sebep olduğu belirsizliklerdir. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte rüzgar türbinlerinin yükseklikleri artmış ve dolayısıyla rüzgar hızı dikey ekstrapolasyonu daha önemli bir hale gelmiştir [51;52].

Güç kanununda değişkenlerden bir tanesi (güç kanunu eksponenti) Hellmann katsayısıdır. Hellmann katsayısı araziye göre değişir. Bu değişkeni elde etmek için deneysel yöntemler veya tablolardan faydalanılır. Hellmann katsayısı tablosu Çizelge 3.2’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Hellmann katsayıları [53]

Konum özellikleri	Hellmann Katsayısı (α)
Açık su yüzeyinde durağan olmayan hava	0,060
Açık su yüzeyinde yüksüz hava	0,100
Düzgün kıyı şeridinde durağan olmayan hava	0,110
Düzenli ortam (standart şartlar)	0,143
Düzgün kıyı şeridinde yüksüz hava	0,160
Açık su yüzeyinde durağan hava	0,270
Yerleşim yeri üzerinde durağan olmayan hava	0,270
Yerleşim yeri üzerinde yüksüz hava	0,340
Düzgün açık kıyıda durağan hava	0,400
Yerleşim yeri üzerinde durağan hava	0,600

Güç kanunu eksponentinin (α) belirlenmesinde bazı ampirik yöntemler vardır. Bunlardan bir tanesi güç kanunu eksponentinin hız ve yüksekliğin fonksiyonu olarak bağıntısıdır. Bu yöntemi Justus [54] önermiştir.

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln(U_{ref})}{1 - 0,088 \ln(\frac{z_{ref}}{10})} \quad (3.3)$$

Burada:

U_{ref} : Referans noktadaki hız (m/s)

z_{ref} : Referans nokta yüksekliği (m) belirtmektedir.

Bir başka bağıntı ise yüzey pürüzlülüğüne bağlı bağıntıdır. Counihan [55] aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$\alpha = 0,096 \log z_0 + 0,016 (\log z_0)^2 + 0,24 \quad (3.4)$$

Burada;

z_0 : yüzey pürüzlülüğü ve $0,001 \text{ m} < z_0 < 10 \text{ m}$ olarak gösterilmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü değerleri için örnekler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Bu tezde Hellmann katsayısı ve güç kanunu kullanılacağı için yüzey pürüzlülüğü değerleri kullanılmamıştır. Hellman katsayısı değerlerinden yüzey pürüzlülüğü değerlerine Eşitlik (3.4) ile ulaşılabilir.

Çizelge 3.3 Çeşitli yüzeylerde yüzey pürüzlülük değerleri [21]

Yüzey tanımı	Z_0 (mm)
Çok pürüzsüz, buz ya da balçık	0,01
Sakin açık deniz	0,20
Durgun deniz	0,50
Kar yüzey	3,00
Çim yüzey	8,00
Pürüzlü otlak	10,00
Nadasta arazi	30,00
Ekilmiş arazi	50,00
Seyrek ağaçlar	100,00
Çok ağaç, çitler, binalar	250,00
Orman ve ağaçlık arazi	500,00
Kenar mahalleler	1.500,00
Şehir merkezleri ve yüksek binalar	3.000,00

3.2 Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları

Rüzgar hızlarındaki çeşitlilik ile yükseklik arasındaki ilişkiyi tespit etmek önemli bir konudur. Rüzgar hızlarının farklı tespit edilmesi rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde büyük farklılıklar yaratmaktadır. Doğruluk oranının çok yüksek olması için rüzgar kesmesinin tanımlaması en uygun şekilde yapılmalıdır. Genel olarak rüzgar hızlarının dikey yönde yani yükseklikte hesaplanmasında rüzgar türbinlerinin göbek yüksekliği esas alınmaktadır. Günümüzde rüzgar türbinleri göbek yükseklikleri 60-120 m. arasında değişmektedir [56].

Pratikte, rüzgar kesmesinin birçok faktörden etkilendiği söylenebilir. Bunlar; atmosferik düzenlilik, yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki şartlarda değişimler, yüzeyin şeklidir. Bu nedenle rüzgar kesmesinin ekstrapolasyon ile bulunması büyük belirsizliklere neden olabilmektedirler. Çünkü rüzgar kesmesi modelleri her zaman en doğru sonuçları vermemektedir [57].

Rüzgar enerjisi analizi yapılırken bilinmesi gereken en önemli veri rüzgar hızı ortalamalarıdır. Rüzgar hızı ortalamaları yardımı ile sahanın rüzgar enerjisi potansiyeli bulunabilir. Burada kullanılan yöntem temelde istatistiksel analizlere dayanır. Eğer bir bölgede bir noktanın belli bir yüksekliğinde rüzgar hızı ortalamaları zaman serileri şeklinde biliniyorsa rüzgar enerjisi potansiyeli istatistiksel yöntemlerle ve yoğunluk dağılımları ile bulunabilir [47;49] .

Rüzgar potansiyeli analizleri bulunurken en çok kullanılan araçlardan bir tanesi olasılık yoğunluk fonksiyonlarıdır. Rüzgarın herhangi bir hız aralığında esmesi olasılığı olasılık yoğunluk fonksiyonu ile gösterilir. Geçmişteki deneyimler rüzgar hızının ortalama hıza çok yakın olarak estiğini ve ayrıca ortalama hızdan daha düşük esmesinin ortalama hızdan daha yüksek hızda esmesinden daha büyük bir olasılık olduğunu göstermektedir.

En çok kullanılan olasılık yoğunluk fonksiyonları Rayleigh ve Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonlarıdır. Rayleigh dağılımında değişken olarak sadece rüzgar hızı ortalaması kullanılır. Weibull dağılımında ise iki değişken kullanılır. Bu nedenle Weibull dağılımı Rayleigh dağılımına kıyasla daha net sonuçlar vermektedir. Her iki dağılım fonksiyonu da sıfırdan büyük değerler için geçerli fonksiyonlardır [20].

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu 2 değişkene ihtiyaç duyar; bunlar k şekil faktörü ve c skala parametresi'dir. Bu değişkenlerin her ikisi de rüzgar hızı ortalamasına (V_{ort}) ve standart sapmanın (σ_v) fonksiyonlarıdır.

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu:

$$P(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (3.5)$$

Burada;

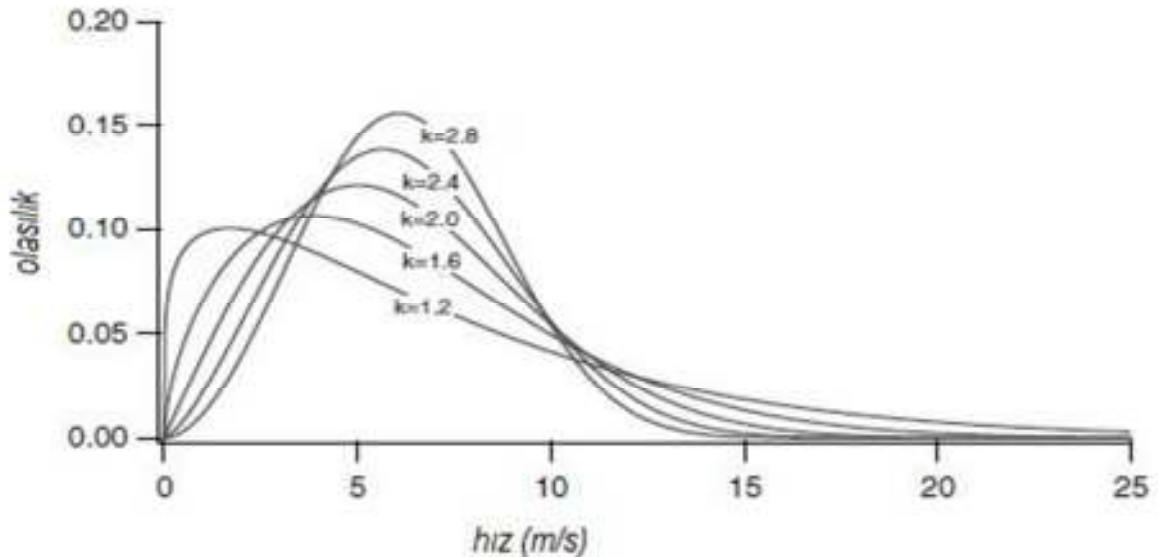
$P(V)$: Olasılık yoğunluk fonksiyonu

k : şekil faktörü

c : skala parametresi'ni göstermektedir.

Fonksiyonda k değeri değiştikçe fonksiyon grafiği daha yüksek bir noktada pik yapar. Bu da rüzgar hızlarının değişkenliğinin k arttıkça azaldığını göstermektedir.

Aşağıdaki Şekil 3.2'de olasılık yoğunluk fonksiyonunun grafiği görülmektedir. Görüldüğü gibi k değeri arttıkça grafiğin uç noktası yükselmekte ve hız dağılımı birbirine daha yakın olmaktadır. Grafiğin altında kalan alan olasılık gösterdiği için toplamda 1'e eşittir.



Şekil 3.2 Çeşitli k değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonu [20]

Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu $P(V)$ kullanılarak;

$$v_{ort} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.6)$$

Burada ;

Γ : Gamma fonksiyonu

v_{ort} : ortalama hız'ı göstermektedir.

Ortalama hız ve standart sapma Gökçek *et. al.*'da [59] şu şekilde hesaplanmıştır:

$$v_{ort} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n v_i) \quad (3.7)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (v_i - v_{ort})^2 \right]^{0,5} \quad (3.8)$$

$$\Gamma(X) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (3.9)$$

k ve c değerlerinin bulunması için çeşitli deneysel yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi Justus [54] tarafından ortaya atılmış ve pratikte en çok kullanılanlardan biridir. Bu yöntemde de Gamma fonksiyonu kullanılması gerekmektedir.

Buna göre;

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{ort}} \right)^{-1,086} \quad (3.10)$$

ve

$$c = \frac{v_{ort}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3.11)$$

Weibull olasılık yoğunluk dağılımı ile bu çalışmada 4 yıllık rüzgar hızı verileri kullanılarak enerji potansiyeli hesabı yapılmıştır. Rüzgar ölçüm direğinden alınan 4 yıllık veriler bir önceki bölümde gösterilen rüzgar hızları dikey ekstrapolasyonu yöntemi ve elde edilen Hellmann katsayılarının bu yöntemde uygulanmasıyla bulunmuştur. Bütün hesaplamalar EXCEL ortamında yapılmıştır.

Rayleigh yoğunluk dağılım fonksiyonu Weibull dağılımda k=2 olduğu durumdur ve bir rüzgar kaynağının dağılımını göstermek için en basit yoldur. Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonunda sadece ortalama hızı bilmek yeterlidir.

Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$P(V) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{v_{ort}^2} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{v_{ort}} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

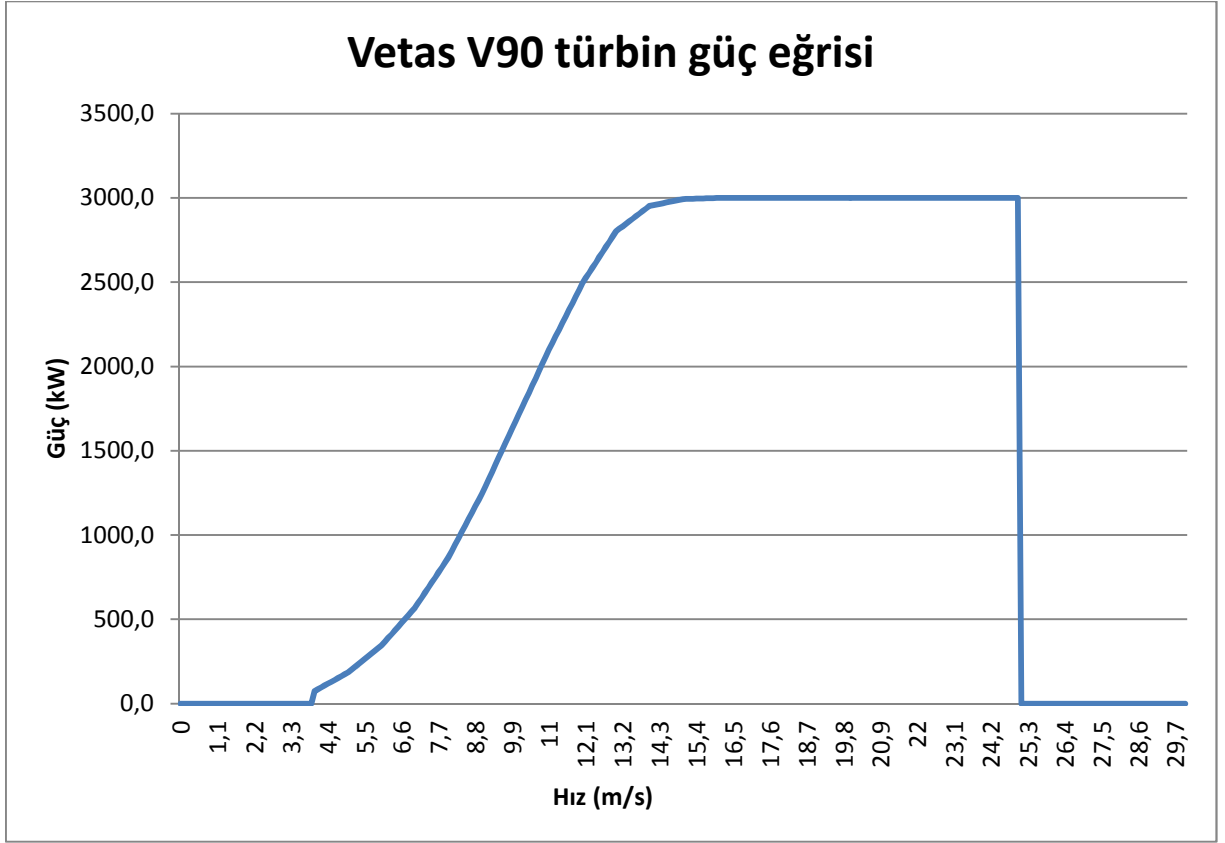
3.3 Rüzgar Enerjisi Potansiyeli İçin Seçilen Rüzgar Türbini

Rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanırken rüzgardaki enerjinin yanısıra rüzgar enerjisinden bu enerji ile üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı hesaplanır. Bu hesabı yapabilmek için belli bir rüzgar türbinine ihtiyaç vardır. Rüzgar türbinleri kanat uzunlukları, göbek yükseklikleri, kullanılan malzemeler ve jeneratörlerinin özellikleri gibi sebeplerden dolayı aynı noktada farklı üretimler elde edilmesine sebep olurlar. Bu çalışmada Vestas V90 türbini kullanılmıştır. Bu türbinin seçilmesinin sebebi türbinin 80 m göbek yüksekliğine sahip olması ve dolayısıyla eldeki verilere göre dikey ekstrapolasyon yapılması gereğindendir. Ayrıca bu türbin günümüzde en çok kullanılan türbinlerden bir tanesidir. Çizelge 3.4 ve Şekil 3.3'te türbinin özellikleri ve güç eğrisi gösterilmiştir [60;61].

Çizelge 3.4 Vestas V90 türbinin teknik özellikleri [61]

Türbin özellikleri	
	Vestas V90
Jeneratör gücü (kW)	3.000
Göbek yüksekliği (m)	80
Kanat uzunluğu (m)	45
Türbin ilk çalışma hızı (m/s)	4
Türbin devreden çıkma hızı (m/s)	25

Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi rüzgar türbini 3 MW gücündedir. Şekil 3.4'teki grafikte bu türbinin 3 MW güce ulaşması ancak 13 m/s ve üzerindeki rüzgar hızlarında mümkündür. Türbinin ilk çalışma hızı 4 m/s'dir. Bu hızın altında türbin çalışmamaktadır. Ayrıca rüzgar hızı 25 m/s'yi aştıktan sonra türbin güç eğrisinde de açıkça görüldüğü gibi türbin durmaktadır. Türbin göbek yüksekliği 80 m'dir ve eldeki 30 m ve 50 m yükseklikteki rüzgar verileri kullanılarak 80 m'deki hızlara ulaşmak bu tezin amaçlarından bir tanesidir.

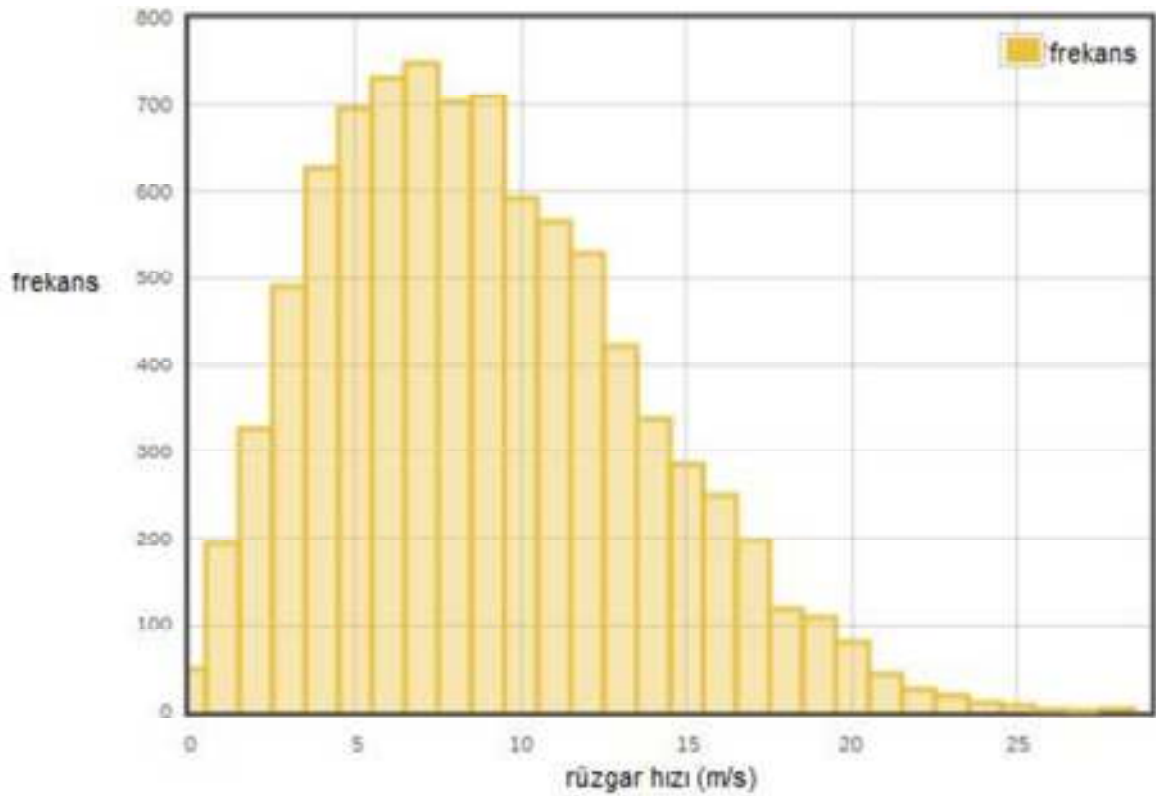


Şekil 3.3 Vestas V90 güç eğrisi [62]

3.4 Rüzgar Histogramı

Histogram bir verinin gerçekleşme sıklığının grafikte gösterimine denir. Rüzgar histogramı herhangi bir rüzgar hızının belli bir süre içerisinde (genellikle 1 yıl) içerisinde toplam esme sayısını gösteren ve diğer tüm rüzgar hızlarıyla aynı şekilde gösteren grafiklerdir. Bu grafikler rüzgar hızlarının hız frekansı dağılım tablosundan faydalanılarak çizilir. Rüzgar histogramı ile rüzgar hızlarının her birinin ne sıklıkta estiği görülebilir. Şekil 3.4'te örnek bir rüzgar histogramı görülmektedir [20].

Bu çalışmadaki histogramlarda 4 yıllık ve her 10 dakikada bir elde edilmiş toplam 210.240 adet veri gösterilmiştir. Ayrıca bu histogramlardaki hız değerleri 0 ile 30 m/s arasında değişmektedir. Histogram üzerindeki hız değerleri 0,1 m/s aralıklarla ayrılmış ve tüm veriler histogramda gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Rüzgar histogramı örneği [63]

4. HELLMANN KATSAYILARI VE ENERJİ POTANSİYELİ ANALİZİ

4.1 Analizlere Giriş

Rüzgar enerjisi potansiyeli analizleri yapılırken analiz yapılacak olan bölgeden elde edilen gerçek rüzgar ölçüm verileri kullanılır. Burada Çanakkale bölgesindeki bir rüzgar ölçüm direğinden elde edilen rüzgar verileri kullanılmıştır. Bu veriler ile enerji potansiyelinde kullanılması planlanan rüzgar türbini ile hesaplamalar yapılarak sonuçlar elde edilir. Her bir rüzgar türbini modeli ve bu türbin ile elde edilebilecek enerji miktarı hesaplanırken rüzgar türbininin göbek yüksekliğine ve diğer teknik özelliklerine göre hesaplamalar yapılır [20;46]. Her bir rüzgar türbini için hesaplanmış türbin güç eğrileri vardır. Rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde Vestas V90 modelinin güç eğrisi kullanılmıştır. Bu eğri yardımı ile elde edilecek rüzgar verileri birlikte değerlendirilerek ilgili rüzgar türbinin ortamdaki rüzgar enerjisi ile üretebileceği enerji miktarı hesaplanır.

Rüzgar enerjisi potansiyeli hesapları yapılırken 2 önemli bilgiye ihtiyaç vardır [20].

1. Rüzgar türbini kurulacak yerin rüzgar bakımından ve diğer şartlar bakımından özellikleri
2. Rüzgar türbininin özellikleri

Rüzgar türbininin özellikleri türbinleri üreten firmalar tarafından sunulmaktadır. Burada kullanılan rüzgar türbinlerinin teknik özellikleri rüzgar türbini üretici firması tarafından sunulmakta ve bu veriler deneysel olarak doğruluğu ispat edilmiş değerlerdir [60]. Ortam özellikleri ise ölçümler ve sonrasında bu ölçümlerin gerekli şekilde analiz edilmesi ile ilgili çalışmaya uyarlanması yoluyla elde edilir. Rüzgar ölçümlerinin rüzgar enerjisi analizlerinde kullanılabilmesi için rüzgar verilerinin analizde kullanılan rüzgar türbinin göbek yüksekliğinde olması gerekir. Yani hesaplamalar rüzgar türbininin göbek yüksekliğine göre yapılmalıdır. Dolayısıyla göbek yüksekliğindeki verilere ihtiyaç vardır [49].

Rüzgar ölçümleri her zaman ilgili türbinlerin göbek yüksekliklerinde yapılmaz. Genellikle rüzgar ölçümleri türbin göbek yüksekliklerinden daha alçakta yapılır. Türkiye’de ve dünyanın birçok ülkesinde meteoroloji istasyonları tarafından rüzgar ölçümleri 10 m. yükseklikte yapılır. Türkiye’de son yıllarda rüzgar enerjisi sektörünün gelişmesi ile birlikte rüzgar ölçümleri önce 30 m. yükseklikte yapılmış,

daha sonra 50 m. yükseklikte yapılmaya başlanmıştır [8;14]. Günümüzde ise Türkiye’de rüzgar ölçümleri 80 m.’lik direkler ile yapılmaya başlanmıştır. Modern rüzgar türbinlerinin göbek yükseklikleri de bu şekilde artmaktadır. Mevcut şartarda rüzgar türbinlerinin göbek yükseklikleri 60-120 m. arasındadır [64]. Bu değerler karada kurulan rüzgar türbinleri için geçerlidir. Rüzgar ölçümleri maliyetlerin azaltılması veya başka nedenlerle her durumda türbin göbek yüksekliklerinde yapılmamaktadır. Bu nedenle elde edilen rüzgar verileri ile çeşitli bağıntılar kullanılarak türbin göbek yüksekliğindeki rüzgar özellikleri elde edilmektedir. Bunlara dikey yönlü olarak rüzgar hızı ekstrapolasyonu denilmektedir. Dikey ekstrapolasyonda başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar logaritmik kanun ve güç kanunudur. Bu kanunlarda belli bir yükseklikte bilinen rüzgar hızı yardımı ile başka bir yükseklikteki rüzgar hızları bulunmaktadır. Bu kanunlardan logaritmik kanundan z_0 : yüzey pürüzlülüğü katsayısı kullanılır. Bu katsayı ortamın şartlarına göre belli bir değer alınır. Bu katsayı için alınan değer daha önce deneysel yöntemlerle elde edilmiş olan listeden seçilir. Aynı şekilde güç kanununda ise Hellmann katsayısı (α) vardır. Bu katsayı rüzgar kesme katsayısı olarak bilinir ve yine ortamın şartlarına göre bir bölge için 1 adet katsayı listelenmiş olan değerlerden biri olarak seçilir ve rüzgar hızları bu katsayılar kullanılarak bulunur. Bu katsayılar ortama göre farklılık gösterse de seçilen bir katsayı bir nokta için tüm hesaplamalarda kullanılmaktadır. Rüzgar hızlarının yükseklikle değişkenliğinin oldukça fazla etkenden etkilendiği düşünüldüğünde sadece bir adet yüzey pürüzlülük katsayısı veya sadece bir adet Hellmann katsayısı kullanılarak elde edilen rüzgar hızlarının doğruluğu tartışma konusudur [46;47].

Bu tezde rüzgar enerjisi potansiyeli analizi 2 farklı analiz olarak yapılmıştır. Birinci analizde rüzgar verileri zaman serisinin histogramı ile türbin güç eğrisinin birlikte her bir hız aralığı için parçasal hesaplanıp toplanmasıyla rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanmıştır. İkinci analizde Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak bu fonksiyonun türbin güç eğrisi ile birlikte nihai enerji üretimleri bulunmuştur. Gualtieri ve Secci [24] Weibull dağılımına dikey ekstrapolasyon ve rüzgar zaman serilerine dikey ekstrapolasyon yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Zaman serisi analizlerine kıyasla Weibull dağılımı analizleri daha konservatif çıkmış ve Weibull dağılımı analizlerinde daha düşük üretim miktarları vermiştir. Bu çalışmada ise Weibull dağılımı daha düşük sonuçlar vermiştir.

Histogram yöntemi ve Weibull dağılımı ile 2 farkı analiz şeklinde yapılan rüzgar enerjisi potansiyeli çalışmasında her bir analiz için kullanılacak olan Hellmann katsayıları 3 farklı durum için analiz edilmiştir.

Bunlar;

Durum 1: Çoklu Hellmann katsayılı hesaplama

Durum 2: Tüm rüzgar verilerinin ortalamalarına göre bulunan Hellmann katsayılı hesaplama

Durum 3: 1/7 Hellmann kuralı ile hesaplama

Buradaki DURUM'ların herbiri farklı Hellmann katsayıları ile analiz yapılmasını sağlamış ve bu farklı hesaplamalar bu tezde ulaşılmak istenen yaklaşımın temelini oluşturmuştur.

Analizlerde elde edilen rüzgar hızları türbin göbek yüksekliğinde yani 80 m yükseklikteki değerleri yukarıdaki 3 durum ile ayrı ayrı hesaplanmış olan değerlerdir.

Durum 1'de bir noktada 2 farklı yükseklikte bilinen rüzgar hızları kullanılarak çeşitli hellmann katsayıları elde edilmesi amaçlanmıştır. Rüzgar karakteristiğinin rüzgar hızı, günün saati, mevsim, basınç, nem gibi etkenlerin etkisi ile değişkenlik göstermesi nedeniyle bu etkenlere göre bir noktada uygulanması amaçlanan farklı farklı birden fazla Hellmann katsayısı elde edilerek bu katsayıların uygulanması ile rüzgar hızı analizi ve bu rüzgar hızları ile rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılmıştır.

Durum 2'de 4 yıllık bilinen rüzgar verileri (30 m ve 50 m yükseklikteki) kullanılarak güç kanunu ile tek bir Hellmann katsayısı hesaplanmış ve bu Hellmann katsayısı tüm hesaplamalarda kullanılarak analizlere uygulanmıştır.

Durum 3'te ise Hellmann katsayısı ise tabloda gösterilen, arazi şartlarına en uygun olan ve aynı zamanda da standart Hellmann katsayısı olarak bilinen $\alpha=1/7$ olarak alınmış ve analizler bu Hellmann katsayısı ile yapılmıştır.

Durum 2 ve Durum 3'teki tek bir Hellmann katsayısı uygulanarak elde edilen rüzgar hızları ve rüzgar enerjisi potansiyeli analizi ile bu çalışmada ortaya atılan

Durum 1 ile elde edilen Hellmann katsayıları ile yapılan analizin karşılaştırması yapılmıştır.

4.2 Hellmann Katsayısının Hesaplanması

Rüzgar ölçüm analizlerinde dikey ekstrapolasyon yapılırken rüzgar hızı ortalamaları Hellmann katsayısı kullanılarak hesaplanır. Bu yöntemde bilinen bir yükseklikteki rüzgar hızları kullanılarak istenen yükseklikteki rüzgar hızı bulunması amaçlanır. Güç kanunu olarak adlandırılan yöntemde Hellmann katsayısı (α)'nın bilinmesi gerekir.

Kuvvet kanunu önceki bölümde anlatıldığı gibi;

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (4.1)$$

Burada:

$V(z)$: z yüksekliğindeki rüzgar hızı

$V(z_r)$: z_r yüksekliğindeki referans hız

α : güç kanunu eksponenti (Hellmann katsayısı)'nı belirtmektedir.

Hellmann katsayısı belirlenirken ortamın şartları göz önüne alınır ve Hellmann katsayısı tablosundaki değerlerden bir tanesi seçilir. Hellmann katsayısı düzenli ortam şartlarında 1/7 olarak kabul edilir. Buna 1/7 kuralı denir. Hellmann katsayısı 1/7 olarak alındığında ortamda düzensizliğin olmadığı öngörülür. Bu tezde kullanılan sahanın şartları da düzenli şartlar olarak kabul edilmiş ve durum 3'te buna göre analizler yapılmıştır.

Eğer 2 farklı yükseklikteki hız ortalamaları biliniyorsa güç kanununa bu değerler konularak Hellmann katsayısı bulunabilir. Bu tezde 30 m ve 50 m yükseklikteki rüzgar hızları kullanıldığı için Hellmann katsayısı güç kanunundaki tek bir bilinmeyen olarak kolayca bulunmuş ve Durum 3'te bu katsayı ile analizler yapılmıştır.

Rüzgar verilerinin 4 yıllık ortalamaları kullanılarak;

- Standart hellmann katsayısı
- Hız büyüklüklerine göre değişen Hellmann katsayısı

- Gece-gündüz için Hellmann katsayısı
- Sabah ve akşam saatlerine göre değişen Hellmann katsayısı
- Rüzgarın yönüne göre Hellmann katsayısı
- Sıcaklığa göre Hellmann katsayısı
- Mevsimlere göre Hellmann katsayısı
- Basınca göre Hellmann katsayısı
- Neme göre Hellmann katsayısı

Analiz yapılan noktadan elde edilen veriler yıl, gün, gece-gündüz, rüzgar yönü, sıcaklık, mevsim, nem, basınç değişkenlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Analizlerde 30m'lik ve 50 m'lik rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Normal şartlarda sadece 1 adet yükseklikte rüzgar hızları biliniyorsa, güç kanunu veya logaritmik kanun kullanılarak istenen yükeklikteki hızlara ulaşılır. Bu işlemi yapabilmek için logaritmik kanunda yüzey pürüzlülük uzunluğu, güç kanununda ise rüzgar kesme katsayısı bilinmesi gerekir. Bu iki değişken, deneysel olarak elde edilmiş ve çizelge halinde verilen ve ortam şartlarına göre belirlenmiş olan değerlerden biri olarak seçilir.

Eğer iki ayrı yükseklikteki rüzgar hızları biliniyorsa logaritmik kanun ve güç kanunu denklemlerinde bilinmeyenler sadece pürüzlülük uzunluğu ve rüzgar kesme katsayıdır. Rüzgar kesme katsayısı ve pürüzlülük uzunluğu çeşitli etkenlerden etkilenererek farklı durumlarda farklı değerler alabilir. Rüzgar verileriyle ayrı ayrı yapılan analizler ile rüzgarın yıldan yıla, günden güne, mevsimden mevsime, gecedan gündüze, farklı rüzgar yönüyle, farklı basınçlarla, farklı nem oranlarıyla değişkenliği incelenmiştir.

Rüzgar hızlarının bir yıllık döngü ile dünyanın güneş etrafındaki bir tur dönüşünü tamamlamış olması bakımından doğru bir yaklaşımdır. Çünkü dünyadaki doğa olayları yıllık olarak bir döngü içerisinde. Yine de sadece bir yıllık veri incelemeleri tam anlamıyla bir genelleme yapmak için yeterli değildir. Bu çalışmada 4 yıllık veriler kullanılarak olabildiğince genel sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır.

Burada 4 yıllık rüzgar verileri yıllık olarak ayrı ayrı ortalamalar bulunarak incelenmiştir. Daha sonra yıllık ortalamaların da ortalaması alınarak bütün rüzgar

hızı verilerinin ortalamasına ulaşılmıştır. Çizelge 4.1’de 4 yıllık verilerin 30 m. ve 50 m. yükseklikte yıllık bazda ortalamaları görülmektedir. Hesaplanan ortalamalar ile yıllık olarak Hellmann katsayısı değerleri hesaplanmış ve bir de tüm yılların ortalama rüzgar hızlarına göre Hellmann katsayısı hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1 Yıllık rüzgar ortalamaları ve Hellmann katsayıları

Rüzgar hızı ortalamaları			Hellmann katsayıları
Yıllar	50 m yükseklikte (m/s)	30 m yükseklikte (m/s)	α
2010	7,05	6,57	0,13561
2011	7,00	6,53	0,13549
2012	6,94	6,42	0,15177
2013	6,85	6,40	0,13136
ortalama	6,96	6,48	0,13856

Çıkan sonuçlara göre yıllık ortalamalar ile hesaplanan α değerleri birbirine çok yakındır. Hesaplanan en düşük α değeri 2013 yılına aittir ve 0,13136’dır. En yüksek α değeri ise 2012 yılının verilerinden çıkmıştır ve 0,15177’dır. α değerlerinin birbirine çok yakın olması bölgedeki rüzgar rejiminin düzenliliğini ve yıllara göre ölçüm direğinden elde edilen ölçüm verilerinin doğruluğunu göstermektedir.

Hellmann katsayısı ve rüzgar hızları ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle burada yapılan yıllık rüzgar hızı ortalamalarına göre sonuçlar incelenmektedir. Bu tezde ise yıllık rüzgar ortalamalarına göre hesaplanan α değeri ile rüzgar hızlarını etkilemesi muhtemel diğer faktörler incelenerek elde edilen α değerleri karşılaştırılmış ve bulunan farklı α değerleri ile istenen yükseklikteki rüzgar hızları bulunmuş, ve bu farklı rüzgar hızları ile yapılan rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplamaları karşılaştırmaları olarak analiz edilecektir.

Çizelge 4.1’de 4 yıllık 30 m ve 50 m yükseklikteki rüzgar hızı ortalamaları gösterilmiştir. Bu veriler kullanılarak Güç kanunu ile Hellmann katsayılarına ulaşılır.

Eşitlik (4.1)’deki kuvvet kanunu 4 yıl için uygulaması 2010 yılı için örnek olarak aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{V(z)}{V(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha = \frac{7,05}{6,57} = \left(\frac{50}{30}\right)^\alpha \quad (4.2)$$

Her iki tarafından doğal logaritması alınarak;

$$\ln\left(\frac{7,05}{6,57}\right) = \alpha \times \ln\left(\frac{50}{30}\right) \quad (4.3)$$

$$\alpha = 0,13561 \quad (4.4)$$

Bu hesaplama ile 2011, 2012 ve 2013 yıllarının da Hellmann katsayıları bulunmuş ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Daha sonra bu Hellmann katsayılarının da ortalaması alınmış ve bir tüm ortalamaların Hellmann katsayısı bulunmuştur. Tüm ortalamaların Hellmann katsayısı $\alpha=0,13856$ 'dır. Burada bulunmuş olan Hellmann katsayısı değeri Durum 2 için kullanılacak olan değerdir.

Rüzgar hızlarının büyüklüklerine göre α hesaplamaları değişkenlik gösterebilmektedir. Rüzgar ölçüm verilerinin elde edilme yöntemine göre veriler 10 dakikalık ortalamalar olarak veri toplama kutusunda toplanmaktadır. Rüzgar verileri virgülden sonra sadece 1 satır olacak şekilde alınmaktadır. Bu da çok düşük rüzgar hızlarında hesaplarda sapmalara neden olabilmektedir. Örneğin belli bir anda elde edilen rüzgar hızları 50 m yükseklikte $V_{50}=0,741$ m/s olsun. Aynı anda 30 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızı ise $V_{30}=0,690$ olsun. Bu değerler veri toplama kutusuna $V_{50}=0,7$ ve $V_{30}=0,7$ olarak geçmektedir. Dikkat edilirse her iki hız da aynı değer olarak veri kutusu tarafından kaydedilmiştir ve bu değerler kullanılarak hesaplanan α değeri sıfıra eşit olacaktır. Halbuki gerçek veriler ile hesaplanan α değeri örnekte verilen hızlar için $\alpha=0,13959$ olacaktır. Dolayısıyla özellikle düşük rüzgar hızlarında bulunan α değerlerinin tutarsız olması beklenmektedir. Yüksek rüzgar hızlarında küsüratların etkisi azalacağından böyle bir sonuçla karşılaşılmayacaktır. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te 30 m ve 50 m yükseklikteki rüzgar hızları hız büyüklüklerine göre 6 farklı aralıkta sınıflandırılmış ve sonuçlar gösterilmiştir. Bir önceki bölümdeki gibi Hellmann katsayıları Güç kanunu formülü uygulanarak ayrı ayrı bulunmuştur. Yukarıdaki örnekte anlatıldığı gibi düşük rüzgar hızlarında (Çizelge 4.4'te 3 m/s ve altı hızlar) α değerleri 3 m/s hızlar için 0'a yakın veya eksi değerlerdedir. Bundan dolayı 3 m/s rüzgar hızları rüzgar enerjisi analizi yapılırken ve Hellmann katsayısı hesaplanırken hata yapılmasına sebep olabilecektir. 3 m/s üzerindeki hızlar için elde edilen Hellmann katsayılarına bakıldığında Hellmann katsayıları tutarlıdır. Dolayısıyla hız

büyükliklerine göre yapılan analizlerde 3 m/s hızların altı ve üstü ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.2 50 m. yükseklikte rüzgar hızlarının yıllara göre ve hız büyüklüğüne göre ortalamaları

50 m'deki hızların hız büyüklüğüne göre ortalaması (m/s)						
Yıllar	3 m/s altı	3-6 m/s arası	6-9 m/s arası	9-12 m/s arası	12 m/s üzeri	3 m/s üzeri
2010	1,70	4,44	7,45	10,29	14,74	9,23
2011	1,75	4,49	7,45	10,30	13,83	9,02
2012	1,80	4,43	7,43	10,31	14,20	9,09
2013	1,70	4,45	7,42	10,31	14,34	9,13
ortalama	1,74	4,45	7,43	10,30	14,28	9,12

Çizelge 4.3 30 m. yükseklikte rüzgar hızlarının yıllara göre ve hız büyüklüğüne göre ortalamaları

30 m'deki hızların hız büyüklüğüne göre ortalaması (m/s)						
Yıllar	3 m/s altı	3-6 m/s arası	6-9 m/s arası	9-12 m/s arası	12 m/s üzeri	3 m/s üzeri
2010	1,79	4,11	6,91	9,58	13,63	8,56
2011	1,77	4,11	6,91	9,62	12,94	8,40
2012	1,75	4,01	6,84	9,60	13,22	8,42
2013	1,85	4,11	6,87	9,61	13,32	8,48
ortalama	1,79	4,08	6,88	9,60	13,28	8,46

Çizelge 4.4 Rüzgar hızı ortalamalarına göre α değerleri

Hız büyüklüklerine göre elde edilen α değerleri						
Yıllar	3 m/s altı	3-6 m/s arası	6-9 m/s arası	9-12 m/s arası	12 m/s üzeri	3 m/s üzeri
2010	-0,09613	0,15186	0,14679	0,13901	0,15228	0,14741
2011	-0,02651	0,17352	0,14555	0,13227	0,13022	0,13931
2012	0,05501	0,19715	0,16208	0,14069	0,14005	0,15159
2013	-0,15940	0,15445	0,15116	0,13722	0,14331	0,14453
Ort.	-0,05676	0,16925	0,15140	0,13730	0,14146	0,14571

Rüzgar hızları ve rüzgar rejimi güneşin dünyaya gönderdiği ısınn yarattığı etkilerden kaynaklandığı için güneşin doğuşu ve batışı rüzgar oluşumunu etkilemektedir. Bu nedenle güneş battıktan sonra ve güneş doğduktan sonrası rüzgar özellikleri bakımından incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Aşağıdaki Çizelge 4.5'te yıllara göre rüzgar hızı ortalamaları gece ve gündüz saatlerine göre ayrı ayrı hesaplanmış ve bunlara göre güç kanunu formülü kullanılarak α değerleri bulunmuştur.

Gece gündüz saatlerinde ayrı ayrı olarak rüzgar hızları değerlendirildiğinde Hellmann katsayısının çok az farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Gündüz saatlerinde 4 yıl boyunca Hellmann katsayısı ortalaması 0,13542 ve gece saatlerinde Hellmann katsayısı ortalaması 0,13992 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5 Rüzgar hızı ortalamalarının gece ve gündüz saatlerine göre dağılımı

Rüzgar hızı ortalamalarının gece-gündüz dağılımı						
	50 m. yükseklikte hızlar (m/s)		30 m. yükseklikte hızlar (m/s)		α	
Yıllar	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece	Gündüz	Gece
2010	7,74	6,35	7,22	5,92	0,13481	0,13639
2011	7,77	6,23	7,26	5,80	0,13162	0,14050
2012	7,64	6,22	7,08	5,76	0,14777	0,15144
2013	7,57	6,11	7,09	5,71	0,12746	0,13134
ortalama	7,68	6,23	7,17	5,80	0,13542	0,13992

Rüzgar sıcaklık farklarında dolayı oluştuğu için sıcaklığın değiştiği zamanlarda rüzgar karakteristiği de değişir. Sabah saatlerinde rüzgar hızlarının düşük olması beklenir. Akşam üzeri saatlerde ise rüzgar hızlarının günün en yüksek değerlerine ulaşması beklenir. Bundan dolayı rüzgar hızlarını sabah saatleri, akşam üzeri saatleri ve diğer kalan saatler olarak sınıflandırıp rüzgar hızı ortalamaları bulmak ve bu ortalamalardaki Hellmann katsayılarına ulaşmak önemli bir veridir [46].

Analizlerde sabaha saatleri için sabah 03:00 ile 08:59 arası değerlendirilmiştir. Akşam üzeri saatleri için ise 14:00 ile 19:59 arası veriler değerlendirilmiştir. Bu saatlerin dışında kalan saatler ise diğer saatler olarak analiz edilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre beklendiği gibi sabah saatlerinde rüzgar hızı en düşük hız olarak görülmüştür. Çizelge 4.6'da sabah saatlerindeki ortalama rüzgar hızı 50 m yükseklikte 6,33 m/s olarak gerçekleşmiştir. Akşam üzeri saatlerdeki rüzgar hızı ise yine beklendiği gibi en yüksek ortalamalar olmuştur ve akşam üzeri saatlerdeki rüzgar hızı ortalaması 50 m yükseklikte 7,67 m/s olmuştur.

Günün saatlerine Hellmann katsayıları değişkenlik göstermiştir. Sabah saatlerinde ve akşam üzeri saatlerde Hellmann katsayıları birbirine yakın ve aynı zaman tüm yıl üzerinden hesaplanan genel Hellmann katsayısına da çok yakın çıkmıştır. Ancak günün diğer saatleri için hesaplanan Hellmann katsayısı çok düşük çıkmaktadır. Bu da gösteriyor ki sabah ve akşam üzeri saatlerinde yükseklik arttıkça rüzgar hızları hızlı bir şekilde artarken diğer saatlerde böyle olmamaktadır.

Çizelge 4.6 50 m yükseklikte günün saatlerine ortalama rüzgar hızları

50 m rüzgar hızlarının saatlere göre dağılımı (m/s)			
Yıllar	sabah saatleri	akşam üzeri saatleri	diğer saatler
2010	6,34	7,76	7,04
2011	6,31	7,89	6,90
2012	6,41	7,53	6,91
2013	6,26	7,51	6,81
ortalama	6,33	7,67	6,91

Çizelge 4.7 30 m yükseklikte günün saatlerine ortalama rüzgar hızları

30 m rüzgar hızlarının saatlere göre dağılımı (m/s)			
Yıllar	sabah saatleri	akşam üzeri saatleri	diğer saatler
2010	5,90	7,23	6,59
2011	5,88	7,37	6,43
2012	5,90	6,99	6,40
2013	5,86	7,01	6,37
ortalama	5,89	7,15	6,45

Çizelge 4.8 Günün saatlerine göre Hellmann katsayıları

Saatlere göre α			
Yıllar	sabah saatleri	akşam üzeri saatleri	diğer saatler
2010	0,14228	0,13889	0,13081
2011	0,13863	0,13499	0,13434
2012	0,16081	0,14594	0,15078
2013	0,12983	0,13297	0,13117
ortalama	0,14289	0,13820	0,13678

Rüzgar hızlarının değişkenliğinde arazinin yapısı büyük önem taşır. Dünyada rüzgar enerjisi çalışmaları ileri seviyelere gelmiş ve dünyadaki ilk rüzgar türbini üretimlerini gerçekleştirmiş olan Danimarka'daki Danimarka Rüzgar Endüstrisi Birliği rüzgar türbinleri ve rüzgar yapısı üzerine birçok çalışma yapmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesinde değişik yönlerden gelen rüzgardaki enerjinin haritası üretilmiş, yüzey pürüzlülüğü etkisi her bir yön için gösterilmiştir. Rüzgar yönlerine göre bir yüzey pürüzlülüğü gülü çıkarılmış ve bu da rüzgar enerjisi analizi programlarında kullanılmıştır. Bu pürüzlülük gülü ile her bir yön için ayrı ayrı yüzey pürüzlülüğü katsayısı bulunmuş ve böylece farklı yönlerden gelen rüzgarın özellikleri ortaya konulmuştur [65].

Rüzgar enerjisi potansiyeli araştırılan arazilerde arazinin düz ya da engebeli olması, etrafında engeller olması, deniz seviyesinden yüksekliği, denize olan uzaklığı gibi etkenler rüzgar hızlarının değişkenliğine sebep olur [66]. Bu çalışmada analizi yapılan arazinin etrafında ağaç, bina vb. engel yoktur. Ancak arazi bir tarafında deniz, bir tarafta alçalan rakım, diğer tarafta yükselen rakım ve bir tarafında ise hafif alçalan rakım olarak çevrilmiştir. Arazinin etrafındaki durum Şekil 2.2'de gösterilmiştir [31].

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi arazinin kuzeybatısında deniz vardır. Denizin ölçüm direğine uzaklığı 200 m'dir. Diğer 3 taraf karadır fakat yükseklik değişmektedir. Deniz yönünden esen rüzgarın hız ve Hellmann katsayısı dağılımının kara yönündekiler göre farklı olması beklenmektedir.

Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da 50 m yükseklikteki ve 30 m yükseklikteki rüzgar hızlarının rüzgar yönlerine göre dağılımı gösterilmiştir. Batı yönünden esen

rüzgarın yönü diğer yönlerden esen rüzgar hızlarına göre daha düşüktür. Arazinin kuzey batısının ve bir miktar da güney batısının denize baktığı göz önüne alınırsa denizden esen rüzgar daha düşük hızlarda esmiş olduğu anlaşılır. En yüksek rüzgar hızı kuzey doğu yönünden esen rüzgar hızı olarak gözlenmiştir. Kuzey doğu yönünün özelliklerine bakıldığında arazinin o yöne doğru deniz seviyesinden giderek yükseldiği görülür.

Elde edilen rüzgar hızı ortalamalarına göre Hellmann katsayısı değerleri ayrı ayrı hesaplanmış ve Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. En yüksek Hellmann katsayısı değerleri güney yönlerden esen rüzgar yönlerinden elde edilmiştir. Kuzey yönlerden esen rüzgar hızlarından elde edilen Hellmann katsayısı daha düşüktür. Bu da demek oluyor ki rüzgar güney yönlerden estiği zaman yükseklerle çıkıldığında rüzgar hızları daha hızlı bir artış göstermektedir. Dört rüzgar yönünün 4 yıllık ortalamaları göz önüne alındığında en düşük Hellmann katsayısı 0,12871 ve en yüksek Hellmann katsayısı 0,14869 olmuştur.

Çizelge 4.9 50 m. yükseklikteki rüzgar hızlarının rüzgar yönlerine göre dağılımı

50 m. rüzgar hızlarının rüzgar yönlerine göre dağılımı (m/s)				
Yıllar	Kuzeydoğu	Güneydoğu	Güneybatı	Kuzeybatı
2010	7,00	7,32	7,50	6,50
2011	7,65	5,87	6,04	6,71
2012	7,62	6,73	5,89	6,16
2013	6,95	7,06	6,34	6,48
ortalama	7,30	6,74	6,44	6,46

Çizelge 4.10 30 m yükseklikteki rüzgar hızlarının rüzgar yönlerine göre dağılımı

30 m. rüzgar hızlarının rüzgar yönlerine göre dağılımı (m/s)				
Yıllar	Kuzeydoğu	Güneydoğu	Güneybatı	Kuzeybatı
2010	6,56	6,80	6,92	6,09
2011	7,14	5,43	5,62	6,31
2012	7,07	6,19	5,44	5,70
2013	6,49	6,59	5,89	6,12
ortalama	6,82	6,25	5,97	6,05

Çizelge 4.11 Yönlere göre dağılmasından Hellmann katsayıları

Yönlere göre α değerleri				
Yıllar	Kuzeydoğu	Güneydoğu	Güneybatı	Kuzeybatı
2010	0,12609	0,14234	0,15746	0,12830
2011	0,13402	0,15328	0,14186	0,12132
2012	0,14564	0,16158	0,15367	0,15232
2013	0,13445	0,13559	0,14177	0,11291
ortalama	0,13505	0,14820	0,14869	0,12871

Rüzgarın temelde sıcaklık değişimlerinden oluştuğu göz önüne alındığında rüzgar hızlarının hava sıcaklığı ile değişkenlik göstermesi kaçınılmazdır [67]. Çanakkale bölgesinin iklimi ılıman ile soğuk iklim arasındadır. Hava sıcaklığı yıllık ortalaması 17° C civarındadır. Havanın 0° C'ın altına düştüğü zaman dilimleri olsa da bunlar yıl içerisinde kısa bir zaman dilimdir [68].

Rüzgar hızları hava sıcaklığına göre Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'teki gibi 6 dilime ayrılmış ve her bir dilimdeki ortalama rüzgar hızları ortalamaları 30 m ve 50 m yükseklik için yıllara göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre her bir dilim için ayrı ayrı Hellmann katsayıları bulunmuştur.

Hava sıcaklığı 0° C'ın altında iken rüzgar hızları en yüksek ortalamalara ulaşmaktadır. Ancak, aynı sıcaklık değerlerinde Hellmann katsayılarında dikkate değer bir büyüklük ya da küçüklük olmamıştır. Hava sıcaklığı $10-20^{\circ}$ C arasında iken Hellmann katsayıları en düşük değerlerini almaktadır. Hava sıcaklığı 20° C'nin üzerinde iken rüzgar hızı ortalamaları genel ortalamanın üzerinde ve Hellmann katsayısı ise en yüksek değerlere ulaşmıştır. En düşük Hellmann katsayısı hava sıcaklığı $5-10^{\circ}$ C arasındayken ve bu sıcaklık aralığında $\alpha=0,12233$ 'dir. Hava sıcaklığı 20° C'nin üzerinde iken en yüksek ortalama olan $\alpha=0,15300$ olmaktadır.

Çizelge 4.12 50 m yükseklikteki rüzgar hızlarının sıcaklığa göre dağılımı

50 m rüzgar hızlarının sıcaklığa göre dağılımı (m/s)						
Yıllar	0° C altı	0-5° C	5-10° C	10-15° C	15-20° C	20° C üzeri
2010	8,07	7,65	6,84	6,65	7,27	7,03
2011	11,33	7,50	6,94	6,99	6,55	7,12
2012	9,46	7,70	6,46	7,08	6,36	7,09
2013	6,73	5,33	6,33	6,67	6,88	7,25
ortalama	8,90	7,04	6,64	6,85	6,76	7,12

Çizelge 4.13 30 m yükseklikteki rüzgar hızlarının sıcaklığa göre dağılımı

30 m rüzgar hızlarının sıcaklığa göre dağılımı (m/s)						
Yıllar	0° C altı	0-5° C	5-10° C	10-15° C	15-20° C	20° C üzeri
2010	7,53	7,23	6,42	6,17	6,76	6,57
2011	10,62	7,01	6,54	6,55	6,15	6,57
2012	9,00	7,23	6,02	6,59	5,91	6,50
2013	6,12	4,96	5,97	6,24	6,52	6,72
ortalama	8,32	6,61	6,24	6,39	6,33	6,59

Çizelge 4.14 Sıcaklığa göre Hellmann katsayıları

Hava sıcaklığına göre α değerleri						
Yıllar	0° C altı	0-5° C	5-10° C	10-15° C	15-20° C	20° C üzeri
2010	0,13684	0,11040	0,12197	0,14636	0,14103	0,13352
2011	0,12633	0,13281	0,11419	0,12823	0,12448	0,15704
2012	0,09908	0,12440	0,13926	0,14109	0,14151	0,17168
2013	0,18402	0,13843	0,11389	0,13155	0,10676	0,14976
ortalama	0,13657	0,12651	0,12233	0,13681	0,12844	0,15300

Mevsimlerin sıcaklık ortalamaları ve güneşin geliş açısının mevsimlere göre değişkenlik göstermesi nedeniyle rüzgar hızı ortalamaları ve rüzgar karakteristiği de mevsimlere göre değişkenlik göstermektedir.

Banuelos-Ruedas et. al. [69] Hellmann katsayılarını aylara ve mevsimlere göre sınıflandırma yaparak analiz etmişlerdir. Bu analizde her mevsimde Hellmann

katsayılarının değiştiği görölmüştür. Bu çalışmada 3 farklı yükseklikte bilnen rüzgar hızı ortalamaları kullanılarak karşılaştırılmalı olarak Hellmann katsayısı sonuçları incelenmiştir. İncelenen sahadaki rüzgar karakteriştiği bu sahadan daha farklıdır ve en yüksek rüzgar hızlarına yaz aylarında ulaşılmıştır. Kış aylarında ise en düşük rüzgar hızları tespit edilmiştir.

Rüzgar hızları kış aylarında en yüksek ortalamalara ulaşmaktadır. Yüksek yerlerde rüzgar hızları yaz aylarında da yüksek değerlere ulaşmaktadır. Ancak yükseklik azaldıkça yaz aylarında rüzgar hızları daha hızlı bir düşüş göstermektedir. Bu da Hellmann katsayısının yaz aylarında daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. İlkbaharda rüzgar hızı ortalamaları en düşük seviyelerdedir. Ancak Hellmann katsayısının en düşük değerlerine sonbahar aylarında ulaşılmaktadır. En yüksek Hellmann katsayısı ortalaması yaz aylarında ve $\alpha=0,16522$ ve en düşük Hellmann katsayısı sonbaharda ve $\alpha=0,11990$ olarak gerçekleşmiştir. Analizlerden sonra ortaya çıkan Hellmann katsayıları gösteriyor ki mevsimlerin Hellmann katsayısı üzerine önemli bir etkisi vardır.

Çizelge 4.15 50 m yükseklikte mevsimlere göre ortalama rüzgar hızları

50 m rüzgar hızlarının mevsimlere göre dağılımı (m/s)				
Yıllar	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
2010	5,47	6,78	7,60	8,37
2011	6,46	7,12	7,38	7,05
2012	6,25	7,28	6,86	7,36
2013	6,05	7,54	6,20	7,59
ortalama	6,06	7,18	7,01	7,59

Çizelge 4.16 30 m yükseklikte mevsimlere göre ortalama rüzgar hızları

30 m rüzgar hızlarının mevsimlere göre dağılımı (m/s)				
Yıllar	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
2010	5,13	6,30	7,12	7,78
2011	6,03	6,57	6,96	6,58
2012	5,83	6,60	6,37	6,90
2013	5,68	6,93	5,92	7,08
ortalama	5,67	6,60	6,59	7,08

Çizelge 4.17 Mevsimlere göre Hellmann katsayıları

Mevsimlere göre α değerleri				
Yıllar	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
2010	0,12525	0,14416	0,12817	0,14219
2011	0,13395	0,15940	0,11468	0,13400
2012	0,13660	0,19247	0,14746	0,12799
2013	0,12485	0,16487	0,08929	0,13730
ortalama	0,13016	0,16522	0,11990	0,13537

Hava basıncının rüzgar hızlarına doğrudan etkisi vardır. Rüzgar basınç değişimlerinin oluşturduğu bir olgudur. Rüzgar temelde yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına yatay yönlü hava akımlarıdır. Bu nedenle rüzgar hızı ortalamalarının hava basınçlarına göre sınıflandırılmış olarak incelenmesi gerekir. Düzenli hava şartlarında basınçlar da düzenli bir hal almakta atmosferik düzensizliği basınçlarda da düzensizliğe neden olmaktadır [20].

Newmann ve Klein [70] atmosferik düzenliliğin rüzgar hızlarına ve yüksek yerlerdeki rüzgar hızlarına olan etkisini incelemişlerdir. Analiz ettikleri sahanın 1/7 güç kuralına uyumluluğu üzerinde kurdukları analizlerde yönteminde eldeki 10 m yükseklikteki rüzgar verilerini dikey ekstrapolasyon ile 80 m yükseklikteki rüzgar hızlarını bulmak üzere kullanmışlardır. Çalışmaları atmosfer düzenliliği şartlarında 1/7 kuralının uygun sonuçlar çıkardığını göstermiştir.

Bu tezde rüzgar ölçüm direğinin ölçümlerinin bir tanesi olan ortam basınçları incelendiğinde basıncın 980-1030 mbar arasında değiştiği gözlenmiştir. Rüzgar hızları ortalamaları basınç miktarlarına göre 3 farklı gruba ayrılıp incelenmiştir.

Rüzgar hızları ortalamaları basınç miktarlarına göre Çizelge 4.18 ve 4.19'daki gibi gruplandırıldığında düşük basınçlarda rüzgar hızının çok yüksek olduğu gözlenmiştir. Basıncın 996 mbar'ın altında olduğu şartlarda 50 m'de rüzgar hızı 4 yıllık ortalaması 9,51 m/s olarak gerçekleşmiştir. Basınç 1.006 mbar üzerinde iken 50 m'de rüzgar hızı 4 yıllık ortalaması 6,31 m/s olarak gerçekleşmiştir. Rüzgar hızları ortama basıncı arttıkça azalırken Hellmann katsayısında böyle bir durum oluşmamıştır. Çizelge 4.20'de görüldüğü gibi en düşük Hellmann katsayısı 1.006 mbar ve üzeri ortalamalarda gerçekleşmiş ve burada $\alpha=0,12256$ olmuştur. 1.006

mbar ve altında ise ortalama Hellmann katsayısı $\alpha=0,14857$ olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.18 50 m rüzgar hızlarının hava basıncına göre sınıflandırılması

50 m rüzgar hızlarının basınçlara göre dağılımı (m/s)			
Yıllar	0-996 mbar	997-1.006 mbar	1.006 mbar üzeri
2010	10,02	7,27	6,16
2011	8,39	7,11	6,87
2012	9,59	7,31	6,43
2013	10,03	7,47	5,79
ortalama	9,51	7,29	6,31

Çizelge 4.19 30 m rüzgar hızlarının hava basıncına göre sınıflandırılması

30 m rüzgar hızlarının basınçlara göre dağılımı (m/s)			
Yıllar	0-996 mbar	997-1.006 mbar	1.006 mbar üzeri
2010	9,25	6,77	5,79
2011	7,71	6,60	6,44
2012	8,96	6,73	6,01
2013	9,34	6,93	5,48
ortalama	8,82	6,76	5,93

Çizelge 4.20 Hava basıncına göre Hellmann katsayıları

Ortam basınçlarına göre α değerleri			
Yıllar	0-996 mbar	997-1.006 mbar	1.006 mbar üzeri
2010	0,15566	0,13868	0,12429
2011	0,16417	0,14651	0,12550
2012	0,13407	0,16247	0,13153
2013	0,14014	0,14661	0,10892
ortalama	0,14851	0,14857	0,12256

Nem oranları ortamın sıcaklık basıncıyla ilgili olduğu için rüzgar hızlarına da etkileri vardır. Analiz edilen sahada yapılmış olan ölçümlerde bağıl nem miktarı %0 ile %100 arasında değişkenlik göstermektedir. Nem ile rüzgar hızları arasındaki

ilişkiyi görebilmek için bağıl nem miktarları 3 gruba ayrılmış ve rüzgar hızı ortalamaları bu 3 grup üzerinde değerlendirilmiştir. Çizelge 21’de bağıl nem miktarları ve rüzgar ortalamaları ilişkisi görülmektedir. 2012 yılına ait olan bağıl nem oranı verileri ölçüm cihazından kaynaklanan nedenlerle sağlıklı alınamamıştır. Bu nedenle değerlendirmelerde 2010, 2011 ve 2013 yılı verileri dikkate alınmıştır.

Bağıl nem oranları dikkate alındığında en yüksek Hellmann katsayısı bağıl nemin %33-66 arasında olduğu durumda ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.21 50 m yükseklikte bağıl nem oranlarına göre rüzgar hızları

50 m rüzgar hızlarının bağıl neme göre dağılımı (m/s)			
Yıllar	%33 altı	%33-66 arası	%66 üzeri
2010	7,26	7,32	6,33
2011	7,76	6,95	6,84
2013	7,76	7,17	6,16
ortalama	7,59	7,15	6,44

Çizelge 4.22 30 m yükseklikte bağıl nem oranlarına göre rüzgar hızları

30 m rüzgar hızlarının bağıl neme göre dağılımı (m/s)			
Yıllar	%33 altı	%33-66 arası	%66 üzeri
2010	6,83	6,81	5,91
2011	7,29	6,47	6,39
2013	7,22	6,67	5,81
ortalama	7,11	6,65	6,03

Çizelge 4.23 Bağıl neme göre Hellmann katsayıları

Bağıl neme göre α değerleri			
Yıllar	%33 altı	%33-66 arası	%66 üzeri
2010	0,12092	0,14102	0,13432
2011	0,12289	0,14250	0,13364
2012	0,14178	0,13588	0,15243
2013	0,12853	0,14042	0,11508
ortalama	0,12092	0,14131	0,12768

Rüzgar hızları toplam 9 farklı değişken üzerinden analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde çıkan sonuçlar farklı Hellmann katsayılarını ortaya koymuştur. Bu durumda tüm yıl için rüzgar hızı ortalamaları kullanılarak elde edilen Hellmann katsayısı ile farklı yüksekliklerdeki rüzgar hızlarını bulmak sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Hellmann katsayısının yukarıda analiz edilen değişik sınıflandırmalar için farklı değerler kullanılması rüzgar enerjisi potansiyeli analizleri için daha doğru sonuç çıkaracaktır. Çizelge 4.24'te tüm sınıflandırmalara göre bulunan Hellmann katsayıları gösterilmektedir.

Çizelge 4.24 Tüm sınıflandırmalara göre bulunan Hellmann katsayıları

SINIFLANDIRMA TÜRÜ	ANALİZ ARALIĞI	α
Yıllık ortalama	Tüm veriler	0,13856
Rüzgar hızı büyüklüklerine göre	3 m/s altı	-0,05676
	3-6 m/s arası	0,16925
	6-9 m/s arası	0,15140
	9-12 m/s arası	0,13730
	12 m/s üzeri	0,14146
	3 m/s üzeri	0,14571
Gece ve gündüze göre	Gündüz	0,13542
	Gece	0,13992
Günün saatlerine göre	Sabah saatleri	0,14289
	Akşam üzeri saatleri	0,13820
	Diğer saatler	0,13080
Yönlere göre	Kuzeydoğu	0,13505
	Güneydoğu	0,14820
	Güneybatı	0,14869
	Kuzeybatı	0,12871
Sıcaklığa göre	0° C altı	0,13657
	0-5° C	0,12651
	5-10° C	0,12233
	10-15° C	0,13681
	15-20° C	0,12844
	20° C üzeri	0,15300
Mevsimlere göre	İlkbahar	0,13016
	Yaz	0,16522
	Sonbahar	0,11990
	Kış	0,13537
Basınç miktarına göre	0-996 bar	0,14851
	997-1006	0,14857
	1006 üzeri	0,12256
Bağıl neme göre	%33 altı	0,12092
	%33-66 arası	0,14131
	%66 üzeri	0,12768

Çizelge 4.24'teki sonuçlara bakıldığında elde edilmiş olan farklı farklı Hellmann katsayıları gösteriyor ki rüzgar enerjisi potansiyeli analizleri yapabilmek için tek bir Hellmann katsayısı kullanmak yerine birden fazla Hellmann katsayısı kullanmak daha doğru sonuçlar verecektir. Çizelge 4.24'teki değerler incelendiğinde Hellmann katsayısını en çok etkileyen faktörler şunlardır.

1. 3 m/s ve altındaki hızlar Hellmann katsayısı hesaplamaları yapılırken kullanılmamalıdır.
2. Günün saatlerine göre Hellmann katsayıları daha az değişkenlik gösterse de rüzgar hızlarındaki aşırı değişim ve bu saatlere göre rüzgarın yönünün de değişmesi nedeniyle günü 3 saat dilimine bölerek elde edilen sonuçlar doğru olacaktır.
3. Mevsimlere göre Hellmann katsayıları önemli değişkenlik gösterdiğinden göz önüne alınmalıdır.

Yukarıdaki 3 etken dışında kalan değişkenler Hellmann katsayısına etki etmiş olsa da ortalamalarda daha az etki göstermişlerdir. Dolayısıyla 3 etken göz önüne alınarak toplam 12 farklı Hellmann katsayısı (3 farklı saat dilimi ve 4 farklı mevsim için) bulunması gerekir.

Yukarıda sayılan 3 etkenin rüzgar hızları ortalamalarına uygulanmasıyla Çizelge 4.25'te 50 m yükseklikler için rüzgar hızları ve Çizelge 4.26'da 30 m yükseklikleri için rüzgar hızı ortalamaları bulunmuştur. Daha sonra bu Çizelgelerdeki rüzgar hızı ortalamaları kullanılarak her bir yıl için 12 farklı Hellmann katsayısı bulunmuştur. Yıllara göre Hellmann katsayılarının ortalamaları alınarak toplam 12 adet Hellmann katsayısına ulaşılmıştır.

Çizelge 4.25 50 m yükseklikte 3 m/s üzeri saatlere ve mevsimlere göre rüzgar hızı ortalamaları

50 m yükseklikte saatlere ve mevsimlere göre rüzgar hızları ortalamaları (m/s)					
Yıllar	Saat dilimi	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
2010	Sabah saatleri	6,76	6,72	8,88	8,67
	Akşam üzeri saatleri	7,47	9,36	8,64	9,07
	Diğer saatler	6,84	7,84	9,04	9,09
2011	Sabah saatleri	6,96	6,78	7,71	8,38
	Akşam üzeri saatleri	8,03	9,59	8,78	8,17
	Diğer saatler	7,30	8,06	8,30	8,25
2012	Sabah saatleri	7,60	6,96	7,92	8,27
	Akşam üzeri saatleri	7,85	9,26	8,15	8,38
	Diğer saatler	7,47	8,31	7,95	8,40
2013	Sabah saatleri	6,98	7,13	7,50	8,66
	Akşam üzeri saatleri	7,62	10,05	7,48	8,31
	Diğer saatler	7,29	8,28	7,23	8,75

Çizelge 4.26 30 m yükseklikte 3 m/s üzeri saatlere ve mevsimlere göre rüzgar hızı ortalamaları

30 m yükseklikte saatlere ve mevsimlere göre rüzgar hızları ortalamaları (m/s)					
Yıllar	Saat dilimi	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
2010	Sabah saatleri	6,22	6,32	8,17	7,92
	Akşam üzeri saatleri	6,92	8,54	8,13	8,50
	Diğer saatler	6,36	7,22	8,45	8,46
2011	Sabah saatleri	6,45	6,32	7,15	7,69
	Akşam üzeri saatleri	7,48	8,78	8,27	7,69
	Diğer saatler	6,80	7,39	7,81	7,69
2012	Sabah saatleri	6,97	6,38	7,27	7,63
	Akşam üzeri saatleri	7,34	8,37	7,60	7,91
	Diğer saatler	6,94	7,50	7,37	7,85
2013	Sabah saatleri	6,45	6,66	6,97	7,93
	Akşam üzeri saatleri	7,08	9,14	7,14	7,80
	Diğer saatler	6,78	7,55	6,81	8,14

Çizelge 4.27 3 m/s ve üzeri, mevsimlere ve günün saatlerine göre Hellmann katsayıları

α					
Yıllar	Saat dilimi	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
2010	Sabah saatleri	0,16299	0,12061	0,16325	0,17853
	Akşam üzeri saatleri	0,14863	0,17852	0,12020	0,12758
	Diğer saatler	0,14288	0,16081	0,13180	0,14114
2011	Sabah saatleri	0,14701	0,13767	0,14787	0,16926
	Akşam üzeri saatleri	0,13952	0,17424	0,11545	0,11890
	Diğer saatler	0,13958	0,16956	0,11908	0,13769
2012	Sabah saatleri	0,17089	0,17102	0,16945	0,15914
	Akşam üzeri saatleri	0,13107	0,19788	0,13581	0,11320
	Diğer saatler	0,14451	0,20070	0,14843	0,13093
2013	Sabah saatleri	0,15301	0,13272	0,14373	0,17218
	Akşam üzeri saatleri	0,14453	0,18642	0,09034	0,12389
	Diğer saatler	0,14152	0,18045	0,11546	0,14071
ortalama	Sabah saatleri	0,15847	0,14051	0,15607	0,16978
	Akşam üzeri saatleri	0,14094	0,18426	0,11545	0,12089
	Diğer saatler	0,14212	0,17788	0,12869	0,13762

Bulunan Hellmann katsayıları hesaplandıkları günün saatleri bölümüne göre ve mevsimlere göre her biri temsil ettiği bölüm için kullanılarak rüzgar hızlarının dikey ekstrapolasyonu yapılmıştır. Böylece elde bulunan 30 m ve 50 m'lik rüzgar hızları ve hesaplamalarla elde edilen Hellmann katsayıları yardımı ile 80 m yükseklik için rüzgar hızları bulunmuştur. Hellmann katsayıları ölçüm direğinden elde edilmiş olan 10'ar dakikalık bütün rüzgar hızı verilerine uygulanmış ve her 10 dakika için rüzgar hızı ortalamaları bulunmuştur.

Kullanılan Hellmann katsayılarının en küçüğü Sonbahar ve akşam üzeri saatleri için kullanılmış olup $\alpha=0,11545$ 'tir. Kullanılan en büyük Hellmann katsayısı ise yaz ve akşam üzeri saatleri için kullanılmış olup $\alpha=0,18426$ 'dır. Böylece Durum 1 analizi için Hellmann katsayıları 12 adet olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.28 Durum 1 için kullanılan Hellmann katsayıları

		İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış
ortalama	Sabah saatleri	0,15847	0,14051	0,15607	0,16978
	Akşam üzeri saatleri	0,14094	0,18426	0,11545	0,12089
	Diğer saatler	0,14212	0,17788	0,12869	0,13762

Elde edilen 12 farklı Hellmann katsayısı kullanılarak veriler 80 m rüzgar hızları bulunmuştur. Hesaplanan rüzgar hızları eldeki 4 yıllık ve 10 dakikalık ortalama hızların tamamına uygulanarak 10 dakikalık ve 4 yıllık tüm rüzgar hızları hesaplanmıştır. 12 farklı Hellmann katsayısı ile yapılan hesaplamaların yanında geleneksel olarak kullanılan 2 ayrı hesaplama yöntemiyle (Durum 2 ve Durum 3) daha rüzgar hızları hesaplanmıştır. Böylece toplam 3 ayrı şekilde rüzgar hızları hesaplanmıştır.

Bunlar;

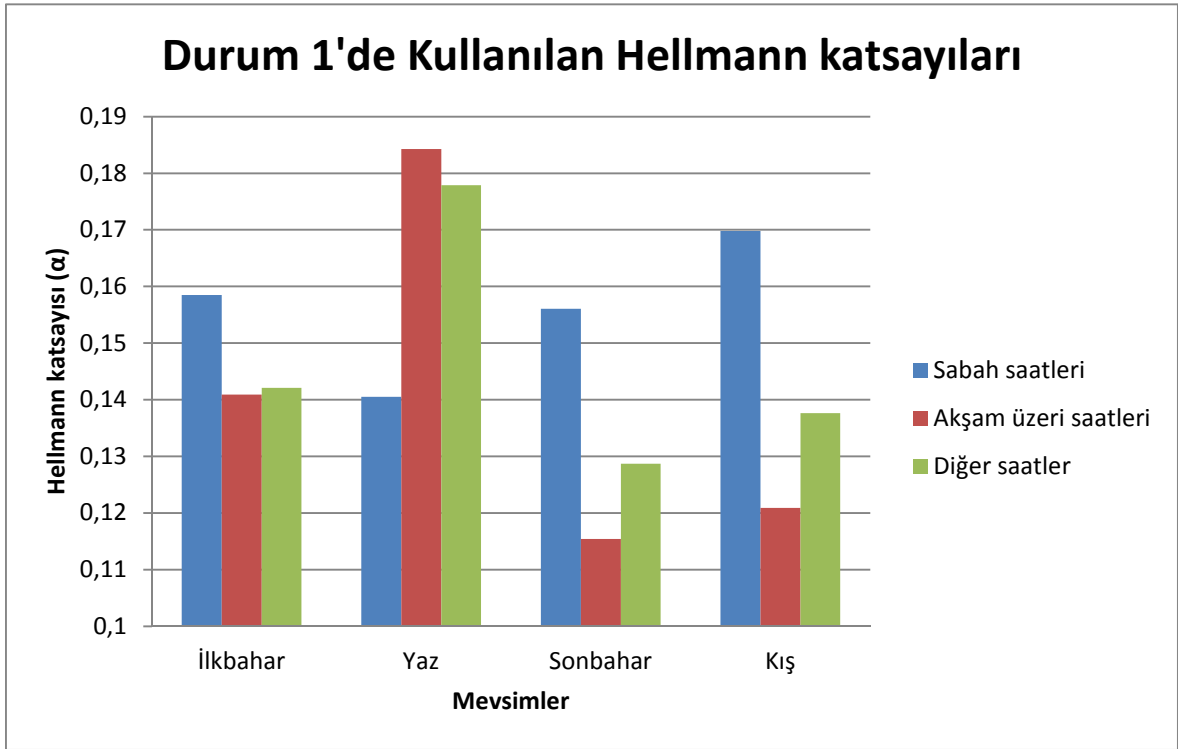
1. 12 adet Hellmann katsayısı ile 4 yıllık tüm rüzgar hızı verilerinin 80 m yükseklikteki değerlerinin bulunması (Durum 1)
2. 4 yıllık tüm verilen 30 m ve 50 m yükseklikteki rüzgar hızları kullanılarak güç kanunu yöntemiyle bulunan Hellmann katsayısının bu verilere 80 m rüzgar hızlarının bulunması için uygulanması (Durum 2)
3. Sadece 1 adet yükseklikteki rüzgar hızı verilerinin bilindiği varsayılarak Hellmann katsayısı tablolarından seçilen uygun Hellmann katsayısının kullanılmasıyla 80 m yükseklikteki rüzgar hızı verilerinin bulunması (Durum 3)

Bu çalışmada analizler 3 farklı durum üzerinde değerlendirilecek ve bu durumlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

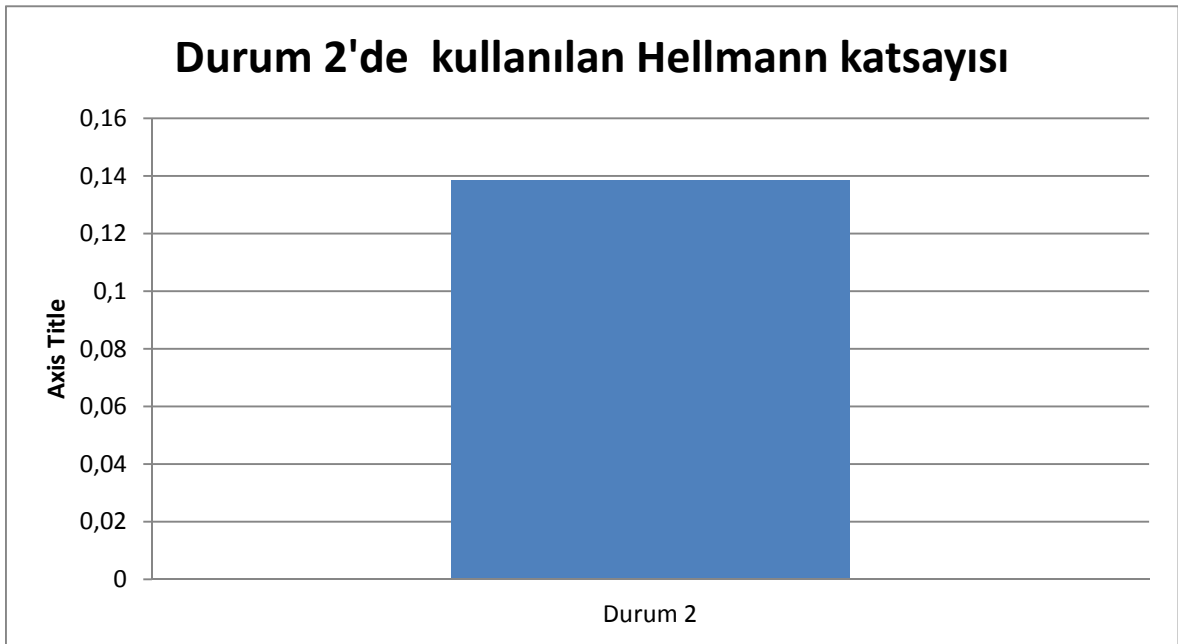
Durum 1: Yukarıda değinildiği gibi birinci durumda 12 ayrı Hellmann katsayısı kullanılmıştır.

Durum 2: İkinci durumda Çizelge 4.1'de gösterilen ve tüm verilerden ortalamasından elde edilen $\alpha=0,13856$ kullanılmıştır.

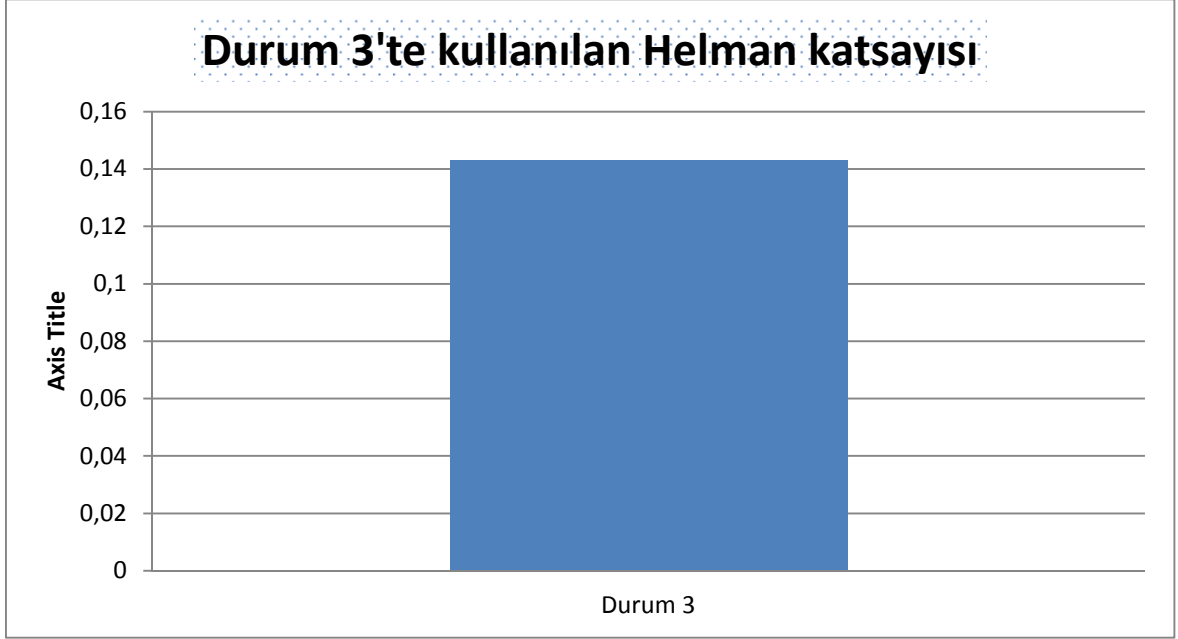
Durum 3: Üçüncü durumda analiz yapılan arazi standart şartlara uygun olduğu için 1/7 kuralı uygulanmış ve $\alpha=0,14286$ kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Durum 1’de kullanılan Helman katsayıları



Şekil 4.2 Durum 2’de kullanılan Helman katsayısı



Şekil 4.3 Durum 3'te kullanılan Helman katsayısı

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3' de görüldüğü gibi Durum 1'de Durum 2 ve Durum 3'ten farklı olarak çoklu Hellmann katsayıları uygulanmıştır. Burada amaç tüm ortalamalar ile bulunan Hellmann katsayısının yerine parça parça bulunarak kullanılan Hellmann katsayıları ile daha doğru sonuçların elde edilmesidir. Yukarıda sayılan 3 durum ile dikey yönlü rüzgar hızı ekstrapolasyonu yaparak elde edilen veriler birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.29'da;

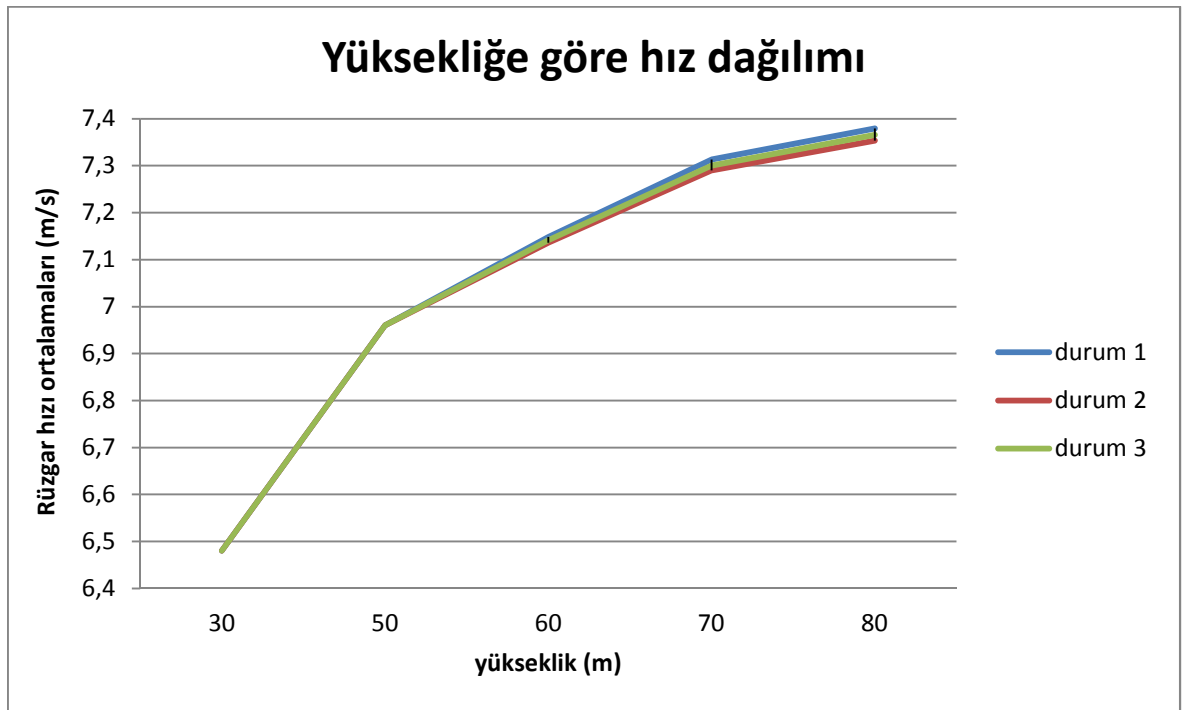
V_a : Çoklu Hellmann katsayısı (12 adet) kullanılarak bulunan ortalamalar (Durum 1)

V_b : 4 yıllık tüm verilerin ortalamasıyla bulunan $\alpha=0,13856$ kullanılarak yapılan hesaplamalar (Durum 2)

V_c : 1/7 kuralı uygulanarak ($\alpha=0,14286$) yapılan hesaplamalar (Durum 3) görülmektedir.

Çizelge 4.29 Durum 1 için kullanılan Hellmann katsayılarına göre rüzgar hızı ortalamaları

	80 m yükseklikte ortalama hız (m/s)			Hellmann katsayısı
Yıllar	V_a	V_b	V_c	α
2010	7,551	7,519	7,535	0,14740
2011	7,503	7,471	7,486	0,14782
2012	7,439	7,405	7,420	0,14830
2013	7,344	7,308	7,323	0,14895
Ortalama	7,459	7,426	7,441	0,14808



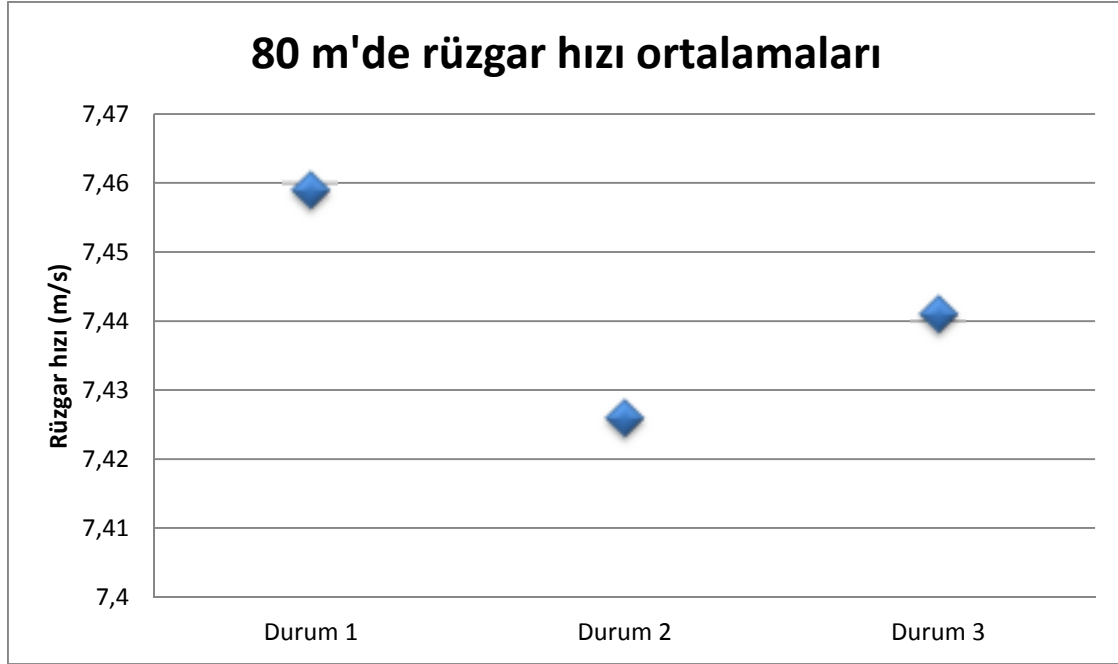
Şekil 4.4 Yüksekliklere göre 3 durum için rüzgar hızı dağılımları

Dikey yönlü hız ekstrapolasyonu yapılırken 3 durumda da değişik Hellmann katsayıları kullanılmıştır. Böylece her bir durumda da farklı sonuçlar bulunmuştur. Aşağıdaki Çizelge 30'da 3 Durum için de kullanılan ve 80 m yükseklik için ortaya çıkan rüzgar hızı ortalamaları görülmektedir. Burada birinci analizde görülen Hellmann katsayısı aslında kullanılan değil 12 adet Hellmann katsayısı uygulandıktan sonra hesaplanan ortalama Hellmann katsayısıdır. Durum 2 ise tüm yılların tüm rüzgar hızlarının ortalaması kullanılarak bulunan geleneksel güç kanunu uygulamasıdır. Durum 3 ise güç kanunundaki 1/7 kuralıdır.

Çizelge 4.30'da görüldüğü gibi 3 durumda 3 farklı rüzgar hızı ortalamaları bulunmuştur. Bu rüzgar hızı ortalamaları bir sonraki bölümde rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerinde kullanıldığında daha büyük farklılıklar ve sapmalar olacaktır. Çünkü enerji analizlerinde hız enerji üretim miktarına 3. kuvveti ile etki etmektedir.

Çizelge 4.30 3 Duruma göre bulunan Hellmann katsayıları ve 80 m'de ortalama rüzgar hızları

	α	80 m yükseklikte rüzgar hızı ortalamaları (m/s)
Durum 1	0,14805	7,459
Durum 2	0,13856	7,426
Durum 3	0,14286	7,441



Şekil 4.5 3 ayrı durum için bulunan 80 m yükseklikteki rüzgar hızları

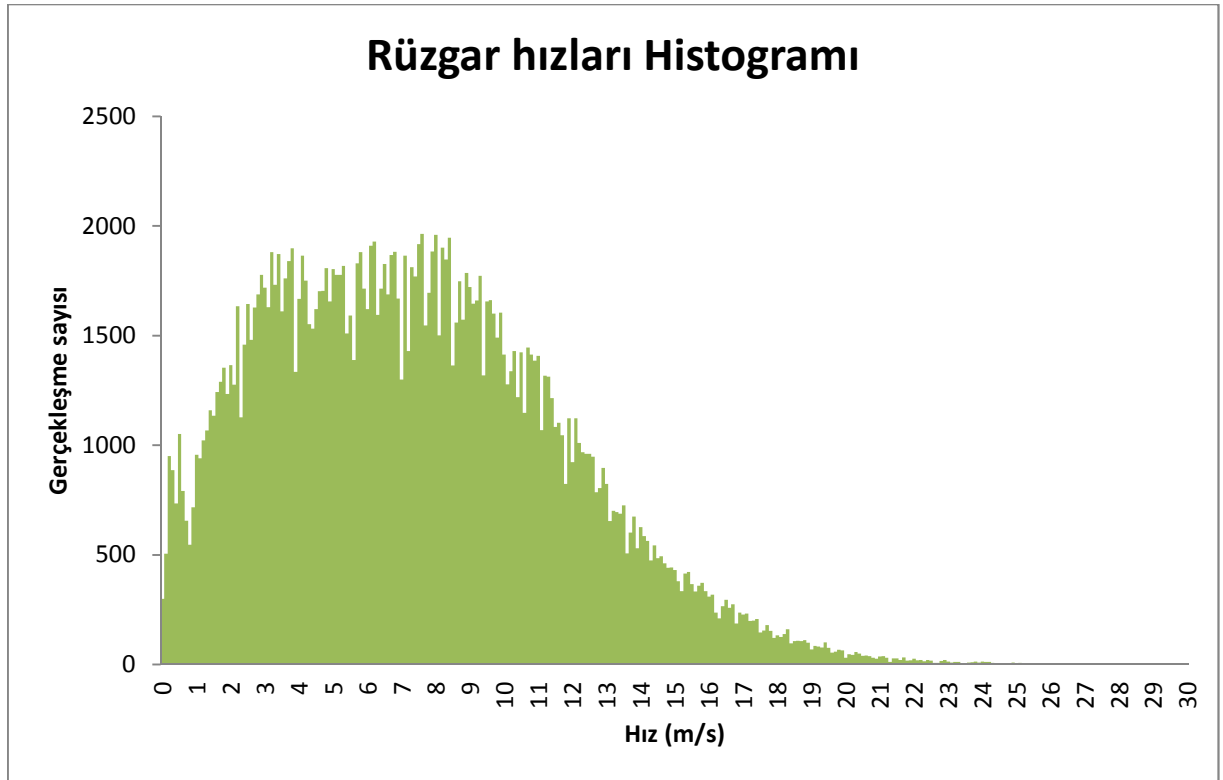
Yukarıda gösterilen sonuçlar karşılaştırıldığında durum 2 ve durum 1'deki rüzgar hızı ortalamaları arasında %0,4'lük bir fark görülmektedir. Bu fark bir sonraki bölümde rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplamaları yapılırken enerji hesabında rüzgar hızınının 3. kuvveti hesaplanacağından enerji potansiyeline daha büyük bir oranda etki etmektedir.

4.3 Enerji Potansiyelinin Hesaplanması

4.3.1 Histogram yöntemi ile enerji potansiyeli analizi

Bu analizde elde edilmiş olan rüzgar verilerinin zaman serislerinin önce histogramda gösterilmesi, daha sonra da bu histogram ile türbin güç eğrilerindeki değerlerin çarpılmasıyla elde edilen güçlerin alt alta toplanarak toplam gücün bulunması yöntemi uygulanmıştır [46].

80 m yükseklikte Durum 1 için Rüzgar hızı ortalamaları tüm veriler için Şekil 4.6'daki rüzgar histogramında gösterilmiştir. Durum 2 ve Durum 3 histogramları da benzerdir.



Şekil 4.6 80 m yükseklikte Durum 1 için 4 yıllık rüzgar verilerinin histogramı

Histogram üzerinde her bir rüzgar hızının gerçekleşme miktarları ile Vestas V90 türbinin güç eğrisindeki aynı hızlara karşılık gelen değerler çarpılıp daha sonra bunların tamamı toplanıp o türbinden elde edilebilecek enerji miktarları bulunmuştur. Buna göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4.31'de gösterilmiştir.

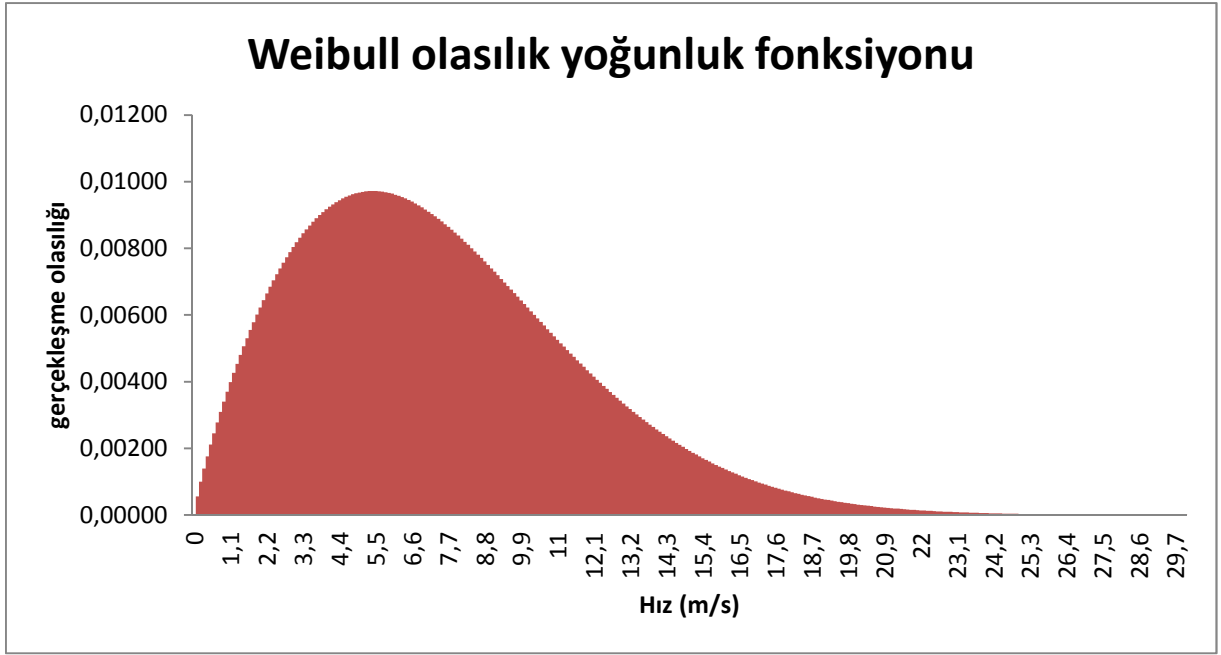
Çizelge 4.31 3 durum için türbinlerin enerji üretim miktarları

	Üretim miktarları (kWh)
	Vestas V90
Durum 1	8.775.921,7
Durum 2	8.704.320,5
Durum 3	8.739.883,7

Çizelge 4.31’de görüldüğü gibi Durum 1 ile üretilen enerji miktarı Durum 2 ve Durum 3 ile üretilen enerji miktarlarından daha fazladır. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü Durum 1 için bir önceki bölümde 80 m yükseklikteki rüzgar hızları daha yüksek çıkmıştı. Toplam üretilen enerji miktarlarına bakıldığında Durum 1 ile Durum 2 arasında %0,8’lik bir fark görülmektedir. Durum 1 ve Durum 2’nin rüzgar hızı ortalamalarında %0,4’lük bir fark görülmüştü. Rüzgardaki enerjinin rüzgar hızının üçüncü kuvveti ile doğru orantılı olduğu için enerji miktarlarında da böyle bir farkın olması bekleniyordu. Durum 3 için de Durum 2 ve Durum 1 ile karşılaştırılmasında aynı sonuçlar elde edilmiştir.

4.2.2 Weibull dağılımı ile enerji potansiyeli analizi

Bu analizde elde bulunan 4 yıllık rüzgar verileri ile elde edilen ve 3 durumdan çıkarılan ortalama rüzgar hızları yardımı ile Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplanmıştır. Buna göre her bir durum ve rüzgar türbinlerin Weibull parametreleri olan k ve c değerleri bulunup çizelgede gösterilmiştir. Şekil 4.7’de Weibull olasılık dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği

Rüzgar hızı ortalamaları ve bunlardan elde edilen histogram ile Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu yardımı ile rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılmıştır. Her Durum için Vestas türbinin üretim miktarları aynı k, c ve V_{ort} için hesaplanmıştır. Kullanılan türbinlerin güç eğrileri arasındaki fark toplam üretim miktarlarındaki farkı doğurmaktadır. Türbin kanat uzunlukları arasındaki ve jeneratörler arasındaki farktan dolayı üretim miktarları arasında fark görülmektedir. 3 durum için hesaplamaların sonuçları Vestas V90 türbin için aşağıda gösterilmiştir.

EXCEL programında hazırlanan hesaplama sayfasında bu çalışmada kullanılan rüzgar türbinleri dışında herhangi başka bir rüzgar türbininin güç eğrisi değerleri güç eğrisi sütununda yerine konularak başka rüzgar türbinleri için de analizler yapılabilir.

Önceki bölümde gösterildiği gibi 80 m yükseklikteki rüzgar hızı ortalamaları Durum 1’de 3 m/s ve üzeri rüzgar hızları baz alınarak mevsimlere ve günün saatlerine göre 12 farklı Hellmann katsayısının hesaplanıp ve bu Hellmann katsayılarının rüzgar hızlarına uygulanmasıyla elde edilmiştir. $V_{ort}=7,46$ m/s olup buna göre yapılan Weibull olasılık yoğunluk dağılımı fonksiyonu ile yapılan hesaplamalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.32 Durum 1 için Weibull parametreleri ve üretim miktarları

	Vestas V90
standart sapma	4,279856947
k	1,827216462
C (m/s)	8,395612651
V_{ort} (m/s)	7,455695871
Üretim (kWh)	8.445.432,9

Durum 2’de rüzgar hızı ortalaması 30 m ve 50 m yükseklikteki hızlarının 4 yıllık rüzgar hızı ortalamalarının güç kanununa uygulanmasıyla bulunan Hellmann katsayısının 80 m ve 50 m yükseklik arasında tekrar güç kanunu uygulamasıyla elde edilen 80 m yükseklikteki rüzgar hızı ortalamasıdır. Bulunan $V_{ort}=7,42$ m/s olup buna göre yapılan Weibull olasılık yoğunluk dağılımı fonksiyonu ile yapılan hesaplamalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.33 Durum 2 için Weibull parametreleri ve üretim miktarları

	Vestas V90
standart sapma	4,258734559
k	1,828045733
c	8,357829397
V_{ort} (m/s)	7,422000095
Üretim (kWh)	8.378.036,4

Durum 3’te güç kanunundaki 1/7 kuralı uygulanmıştır. Bu kural analiz yapılan sahanın standart şartlarda olduğun kabul edip Hellmann katsayısı tablosundaki bu şartlara uygun olan $\alpha=1/7$ olarak alınıp buna göre güç kanunu uygulanarak 80 m rüzgar hızı ortalamalarının hesaplanmasıyla elde edilen durumdur. Burada $V_{ort}=7,44$

m/s olup buna göre yapılan Weibull olasılık yoğunluk dağılımı fonksiyonu ile yapılan hesaplamalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.34 Durum 3 için Weibull parametreleri ve üretim miktarları

	Vestas
standart sapma	4.266776428
k	1.828555414
c	8.375859953
V_{ort} (m/s)	7.437924277
Üretim (kWh)	8,409,836.1

Rüzgar enerjisi potansiyelinde 2 ayrı analiz yöntemi –Weibull olasılık yoğunluk dağılım fonksiyonu ve Histogram yöntemi- kullanılmış ve bu analizlerin her biri için önceki bölümde hesaplamaları yapılan 3 ayrı Durum için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Çizelge 4.35'te tüm sonuçlar görülmektedir. En yüksek üretim miktarı $P=8.775.921,7$ kWh ile Histogram yönteminin Durum 1 ile yapılan analizlerinde bulunmuştur. En düşük üretim miktarı ise $P=8,378,036.4$ kWh çıkmış ve bu da Durum 2'nin Weibull dağılımı ile analiz edilmesiyle bulunmuştur.

Çizelge 4.35'te Weibull dağılımı ile bulunan en yüksek üretim miktarı $P=8.445.432,9$ kWh ve en düşük üretim miktarı $P=8.378.036,4$ kWh bulunmuştur. Bu iki sonuç arasında %0,8'lik fark vardır. Histogram yöntemiyle bulunan en yüksek üretim miktarı $P=8.775.921,7$ kWh ve en düşük üretim miktarı $P=8.704.320,5$ kWh bulunmuştur. Bu iki sonuç arasında da %0,8'lik fark vardır. Dolayısıyla her iki yöntem de kendi içerisinde tutarlı sonuçlar vermekte ve Hellmann katsayılarının %0,4 oranında farklı olması enerji potansiyeli analizlerine de %0,8 oranında etki etmektedir.

Yapılan analizlerde Histogram yöntemiyle daha fazla bir üretim miktarı göze çarpmaktadır. Bunun sebebi Weibull dağılımının genel bir fonksiyon olması ve her saha için uygun olmamasıdır. Yine de tüm rüzgar verilerinin tek tek analizde kullanılması ile sadece rüzgar hızı ortalamalarının kullanılması farklı sonuçlar veriyor olsa da farklılık yüzdesinin düşük olması nedeniyle eldeki verilerin bulunmaması ve sadece rüzgar hızı ortalamasının bilindiği durumda Weibull dağılımının bu saha için kullanılabilir bir fonksiyon olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.35 Tüm analiz sonuçları

	Üretim miktarları (kWh)	
Türbinler	Vestas V90	
Analiz	Weibull dağılımı sonuçları	Histogram sonuçları
Durum 1	8.445.432,9	8.775.921,7
Durum 2	8.378.036,4	8.704.320,5
Durum 3	8.409.836,1	8.739.883,7

Bu tezde Çanakkale bölgesindeki bir rüzgar ölçüm direğinin verileri kullanılmıştır. Çanakkale bölgesi Türkiye'nin rüzgar potansiyeli en yüksek olan bölgelerinde bir tanesidir. Bu nedenle çalışma sahası olarak bu bölge seçilmiştir. Rüzgar ölçüm direği Çanakkale il merkezinin 60 km. güneyinde ve deniz kıyısındadır. Rakımı 38 m'dir. Etrafında dağ, orman, ağaç, yerleşim yeri vb. bulunmamaktadır. Bu bakımdan rüzgar potansiyeli analizleri için ideal bir ortama sahiptir. Rüzgar ölçüm direği 50 m yüksekliktedir. Ölçüm direğinin rüzgar potansiyeli yüksek bir bölgede kurulmuş olması nedeniyle rüzgar hızı ortalamaları yüksektir. Ölçüm direği üzerinde 30 m, 40 m, 48,5 m ve 50 m'de anemometreler ile rüzgar hızı ölçümü yapılmış olup bu tezde bu verilerden 30 m ve 50 m yükseklikte olan ölçüm verileri kullanılmıştır. Anemometrelerden başka direk üzerindeki ekipmanlar ile rüzgar yönü, bağıl nem, ortam basıncı ve ortam sıcaklığı da ölçülmüştür. Bu ölçümler de yapılan analizlerde kullanılmıştır. Ölçüm verileri 2010-2013 yılları arasında kesintisiz 4 yılı kapsamaktadır. Toplam 48 aylık veriler her 10 dakikada bir o 10 dakikalık ortalamalar şeklinde toplanmış ve toplam olarak 210.240 adet veri kullanılmıştır. 30 m ve 50 m verileri ayrı ayrı kullanıldığı için bu tezde toplam 420.480 adet veri analiz edilmiştir.

Analizler Vestas V90 rüzgar türbini için yapılmıştır. Bu türbinin göbek yüksekliği 80 m'dir ve bu nedenle 80 m yükseklikteki rüzgar hızı verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Mevcut olan 30 m ve 50 m yüksekliklerde ölçülmüş rüzgar verileri ile dikey ekstrapolasyon yapılarak 80 m yükseklikteki veriler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar güç kanunu kullanılarak ve Hellmann katsayısı bulunmasıyla yapılmıştır. Dikey ekstrapolasyonda iki temel kanun olan logaritmik kanun ve güç kanunu ayrı ayrı değerlendirilmiş, 2 kanundan güç kanunu bu tezde kullanılmış ve güç kanunun bu

tezdeki kullanılma nedeni anlatılmıştır. Güç kanunundan sonra olasılık yoğunluk fonksiyonu ve Rüzgar Histogramı yöntemi enerji potansiyeli analizi için kullanılmıştır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu Weibull dağılımı seçilmiştir. Weibull dağılımında rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapmak için rüzgar hızı ortalamasına ihtiyaç vardır. Rüzgar histogramı ile yapılan rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde bütün rüzgar verileri (210.420 adet) histograma yerleştirilmiş ve analizler her rüzgar hızının gerçekleşme yüzdesi ile birlikte parça parça hesaplanıp analiz yapılmıştır.

Üçüncü bölümdeki analizler ortalama rüzgar hızlarının bulunması ve rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılması olarak 2 aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada Hellmann katsayısı bulunmuştur. Hellmann katsayısı 3 farklı durum için bulunmuştur. Durum 1’de bu tezin temelini oluşturan çoklu Hellmann katsayısı hesaplanmıştır. Burada 12 farklı Hellmann katsayısı elde edilmiş ve 80 m’deki rüzgar hızı ortalaması bunlara göre hesaplanmıştır. Rüzgar karakteristiğinin rüzgar hızı, günün saati, mevsim, basınç, nem, rüzgarın geliş yönü, hız büyüklüğü, gece-gündüz gibi etkenlerin etkisi ile değişkenlik göstermesi nedeniyle bu etkenlere göre bir noktada uygulanması amaçlanan farklı farklı birden fazla Hellmann katsayısı elde edilerek bu katsayıların uygulanması ile rüzgar hızı analizi ve bu rüzgar hızları ile rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılmıştır. Burada yukarıda sayılan etkenlerin her biri için ayrı ayrı Hellmann katsayısı hesaplaması yapılmıştır. Sonuçlar incelendikten sonra Hellmann katsayısını en çok etkileyen etkenlerin rüzgarın 3 m/s’den yüksek olup olmaması, günün saatleri (sabah erken, akşam üzeri ve diğer saatler) ve mevsimlere göre daha fazla farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Dolayısıyla bu etkenlerin hepsi birden aynı anda uygulanarak 12 farklı Hellmann katsayısı kullanılmış ve bu Hellmann katsayıları bulunmuş oldukları veri gruplarıyla güç kanunu formülü ile 80 m yüksekliğindeki rüzgar hız ortalamaları bulunmuştur. Durum 2’de bilinen 30 m ve 50 m yükseklikteki rüzgar hızı ortalamaları bulunup güç kanunu uygulanarak bir adet Hellmann katsayısı hesaplanmış ve bu Hellmann katsayısı güç kanununa konularak 80 m’deki ortalama rüzgar hızı bulunmuştur. Bu yöntem geleneksel yöntemdir. Durum 3’te ise Hellmann katsayısı hesaplanmadan doğrudan Hellmann katsayısı tablolarından seçilen Hellmann katsayısı güç kanununa uygulanarak 80 m yükseklikteki rüzgar hızları bulunmuştur. Böylece 3 farklı durum için 3 farklı rüzgar

hızı ortalaması bulunmuştur. Burada bulunan farklı sonuçlar enerji analizlerinin sonuçlarını da etkilemiştir.

5. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI VE BULGULAR

5.1 Bulgular

Bu tezde Güç kanunundaki değişkenlerden biri olan Hellmann katsayısının 3 farklı durum ile hesaplanması ile ortaya Durum 1’de 12 farklı Hellman katsayısı çıkmış, Durum 2 ve Durum 3’te de birer tane Hellman katsayısı çıkmış ve enerji analizi hesaplamaları toplam 14 farklı Hellmann katsayısı ile yapılmıştır. Bu tezde geliştirilen Hellmann katsayısı hesaplamalarına yeni bir yaklaşım Durum 1’de gösterilmiş ve burada hesaplanan 12 adet Hellman katsayısının en küçüğü $\alpha=0,11545$ ve en büyüğü $\alpha=0,18426$ olmuştur. Bu sonuçlara göre kullanılan en küçük Hellman katsayısı ile en büyük Hellman katsayısı arasında %60’lık bir fark oluşmuştur. Durum 2’de yani geleneksel yöntemle tüm rüzgar hızlarının ortalaması ile bulunan Hellmann katsayısı ise $\alpha= 0,13856$ ’dır. Durum 3’te ise Hellman katsayısı tablosundan doğrudan en uygun olan değer seçilmiş ve bu da $\alpha=0,14286$ olmuştur. Böylece her bir durumda birbirinden çok farklı katsayılar elde edilmiştir. Elde edilen Hellmann katsayıları ile yapılan hesaplamalar ile rüzgar hızı ortalamaları Durum 1’de $V_a=7,459$ m/s, Durum 2’de $V_b=7,426$ m/s ve Durum 3’te $V_c=7,441$ m/s bulunmuştur. Bu sonuçlara göre 80 m yükseklikteki rüzgar hızı ortalamaları Durum 1 ‘de Durum 2’dekinden %0,4 oranında ve Durum 3’tekinden ise %0,2 oranında daha yüksek çıkmıştır. Buradaki fark enerji potansiyeli analizi için önemli bir farktır ve enerji potansiyeli analizinde rüzgar hızının üçüncü kuvveti sonuçlara etki edeceği için nihai sonuçlarda daha büyük farklar gözlenmiştir.

80 m yükseklikteki rüzgar hızı ortalamaları 3 Durum için de hesaplandıktan sonra rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılmıştır. Enerji analizi Rüzgar histogramı yöntemiyle ve Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Vestas V90 rüzgar türbini ile yukarıdaki 3 Durum için yapılmış ve 2 ayrı analizle birlikte toplam 6 farklı sonuç elde edilmiştir. Çıkan sonuçlara göre Weibull dağılımı ile yapılan analizlerde en düşük enerji üretim miktarları elde edilmiştir. En düşük üretim miktarı Durum 2’nin Weibull dağılımı ile analiz edilmesiyle bulunmuş ve üretim miktarı $P=8.378.036$ kWh olmuştur. En yüksek üretim miktarı Durum 1’nin Histogram yöntemiyle analiz edilmesiyle bulunmuş ve üretim miktarı $P=8.775.921$ kWh olmuştur. En düşük ve en yüksek üretim miktarları arasında aynı Durum için Weibull analizi ile Histogram yöntemi arasında

yaklaşık %4'lük bir fark oluşmuştur. Weibull analizi ve Histogram yöntemi sonuçları ayrı ayrı incelendiğinde çıkan sonuçlara göre her bir yöntemde de en yüksek enerji miktarı ile en düşük enerji miktarı arasında %0,8'lik bir fark vardır.

Yukarıdaki bulgulardan özetle 3 Durumdaki rüzgar hızı ortalamalarında %0,4'lük bir fark oluşması rüzgar enerjisi potansiyeline %0,8'lik bir enerji üretim farkı oluşmasına neden olmuştur.

Bu tezde literatür çalışmalarında anlatılan rüzgar hızları dikey ekstrapolasyonundaki çeşitli yaklaşımların hem saha özelinde hem de çeşitli değişkenlerle ilgili eksiklikleri ile düşey rüzgar hızlarının rüzgar enerjisi potansiyeli analizlerine etkisi göz önüne alınarak dikey rüzgar hızlarının hesaplanmasına yeni bir yaklaşım getirilmiş ve rüzgar enerjisi potansiyeli analizleri bu yaklaşım ile hesaplanmıştır. Geleneksel yöntemler ile yapılan analizler paralel olarak yürütülmüş ve önerilen yöntem ile arasındaki farklar gösterilmiştir.

5.2 Öneriler

Bu tezin amacı ve kapsamı doğrultusunda bu tezde belli bir noktada bilinen rüzgar hızlarını kullanarak rüzgar enerjisi potansiyeli analizi yapılırken hesaplanan veya tablodan alınan Hellmann katsayısında geleneksel yöntemlerin eksik yönleri değerlendirilip burada oluşan boşluğun önerilen yeni bir yaklaşımla yapılması hedeflenmiştir. Bu tezde önerilen yaklaşım ile yapılan hesaplamalarda Hellmann katsayısının farklı değerler aldığı görülmüş ve bu farklılık rüzgar hızı ortalamalarını %0,4 oranında yükselttiği ve rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde hesaplanan enerji üretim miktarlarını da %0,8 oranında artırdığı görülmüştür. Burada çıkan sonuçlar bu tezde kullanılan sahaya özgü sonuçlardır. Önerilen yöntem ile her bir saha için bu yöntem kullanılabilir ve çıkan sonuçlar her bir saha için birbirinden farklı olacaktır. Bu tezin amacı da geleneksel yöntemler ile tablodan alınan ya da rüzgar hızı ortalamaları ile yapılan Hellmann katsayısı analizlerinin her sahada bu şekilde genelleme yapılarak her zaman doğru sonuçlar vermeyeceğini ortaya koymaktır. Bir başka sahada aynı analizler yapıldığında yine farklı sonuçlar bulunabilecek fakat bulunan sonuçlar her bir sahada birbirinden farklı olacaktır. Dolayısıyla bu tezde önerilen yöntem rüzgar enerjisi potansiyeli hesaplanması amaçlanan her sahada kullanılabilir fakat tüm analizler sahaya özgü bir şekilde tümüyle yapılmalıdır.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] DEK-TMK, “Enerji Raporu 2011”, DEK-TMK Yayın No: 0019/2011, Ankara, s1, 2011
- [2] Türkyılmaz, Oğuz, Türkiye’nin Enerji Görünümü, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ekim 2011
- [3] DEK-TMK, Enerji Raporu 2010, DEK-TMK Yayın No: 0017/2010, Ankara, 2010
- [4] Pamir, Necdet, Enerjide Küresel Politikalar ve Türkiye, Başkent Üniversitesi, Ankara, 2011
- [5] PİGM, Dünya Ham Petrol ve Doğalgaz Üretimi, http://www.pigm.gov.tr/dunya_ham_petrol_ve_dogal_gaz_uretimi.php, 12 Mart 2013
- [6] EIA, Renewable energy explained, http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=renewable_home, 20 Mart 2013
- [7] ETKB, 2011 Yılı Genel Enerji Dengesi, http://www.enerji.gov.tr/EKLENTI_VIEW/index.php/raporlar/raporVeriGir/71073/2, 10 Mart 2013
- [8] YEGM, Rüzgar Enerjisi Nedir, http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar-ruzgar_enerjisi.aspx, 20 Mart 2013
- [9] Durak, M. ve Özer, S., Rüzgar Enerjisi: Teori ve uygulama, Impress, 2008
- [10] Green, R. And Vasilakos, N., The economics of offshore wind, Energy Policy, Vol.39, s.496-502, 2011
- [11] DEK-TMK, Enerji Raporu 2012, DEK-TMK Yayın No: 0021/2012, Ankara, 2012
- [12] Pantaleo A., et al., Feasibility study of off-shore wind farms: an application to Puglia region, Solar Energy, Vol. 79, s.321-331, 2005
- [13] GWEC, Global Cumulative Wind Capacity 1996-2003, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/6_21-2_global-cumulative-installed-wind-capacity-1996-2013.jpg, 5 Temmuz 2013
- [14] YEGM, Türkiye RES Haritası, http://www.eie.gov.tr/images/res_haritasi.png, 1 Haziran 2013
- [15] TÜREB, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu 2014, <http://www.tureb.com.tr/tr/duyurular/353-turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-temmuz-2014>, 1 Haziran 2013

- [16] Esteban, M.D., Diez, J.J., Lopez, J.S., Negro, V., Why offshore wind energy?, Renewable Energy, Vol. 36, s 444-450, 2011
- [17] YEGM, Çanakkale İli Rüzgar Kaynak Bilgileri, <http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/CANAKKALE-REPA.pdf>, 30 Temmuz 2013
- [18] İlkiliç, Cumali, Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, s. 1165-1173, 2012
- [19] Tavman, İ.H., Gökçeada'nın Elektrik Enerjisi İhtiyacının Rüzgar Enerjisi ile Karşılanması, DEK-TMK 10. Enerji Kongresi, 2008
- [20] Manwell J.F., McGowan J.G., and Rogers, A. L., Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Wiley, 2nd edition, 2009
- [21] Windatlas, Determining the wind source, <http://www.windatlas.dk/europe/OtherFeatures.html> , 8 Ocak 2014
- [22] Kubik, M.L., Coker, P.J., and Hunt, C., Using Meteorological wind data to estimate turbine generation output:a sensitivity analysis, World Renewable Energy Congress, 8-13 May 2011, Linköping Sweden
- [23] Newman, J.F. and Klein, P.M., The impacts of atmospheric stability on the accuracy of wind speed extrapolation methods, Resources, Vol. 3, s 81-105, 2014
- [24] Gualtieri, G. Ve Secci, S., Extrapolating wind speed time series vs. Weibull distribution to assess wind resource to turbine hub height: A case study on coastal location in souther Italy, Renewable Energy, Vol. 62, s. 164-176, 2014
- [25] Durisic, Z. Ve Mikulović, J. , A model for vertical wind speed data extrapolation for improving wind resource assessment using WAsP, Renewable Energy, Vol. 41, s 407-411, 2012
- [26] Çelik, A.N., Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 91, s 693-707, 2003
- [27] Palaiologou, P., Kalabokidis, K., Haralambopoulos, D., Feidas, H., Polatidis, H., Wind characteristics and mapping for production in the Island of Lesvos, Greece, Computers & Geosciences, Vol 37, s 962-972, 2011
- [28] Chang, T.P., Estimation of wind energy potential using different probability density functions, Applied Energy, Vol. 88, s.1848-1856, 2011
- [29] Durak, Murat, Rüzgar enerjisi teknolojisi ve Türkiye uygulaması: Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali, yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000

- [30] Torrielli, A., Repetto, M.P., Solari, G., Long-term simulation of the mean wind speed, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 99, s.1139-1150, 2011
- [31] Lange, B., and Hojstrup, J., Evaluation of wind-resource estimation program WAsP for offshore applications, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, s.271-291, 2001
- [32] Fırtın, E., Guler, O., Akdağ, S.A., Investigation of wind shear coefficients and their effect on electrical energy generation, *Applied Energy*, Vol.88, s..4097, 2011
- [33] Taylor, M., Mackiewicz, P., Brower, M.C., Markus M., An analysis of wind resource uncertainty in energy production estimates, *AWSTruewind*, NY, ABD, 2010
- [34] Jung, S., Vanlı, O.A., Kwon, S., Wind energy potential assessment considering the uncertainties due to limited data, *Applied Energy*, Vol. 102, s .1492-1503, 2013
- [35] Tindal A., Harman, K., Johnson, C., Schwarz, A., Garrad, A., Hassan G., Validation of GH energy and uncertainty predictions by comparison to actual production, Oral presentation at the AWEA wind resource and project energy assessment wokshop, Portland USA, 2007
- [36] Türkeş, Murat, Çanakkale yöresinin rüzgar klimatolojisi ve rüzgar gücü/enerjisi potansiyeli, *GMKA Rüzgar Enerjisi Bilgilendirme Toplantısı*, Çanakkale, 2012
- [37] MGM, Rüzgar Atlası, <http://www.mgm.gov.tr/arastirma/yenilenebilir-enerji.aspx?s=ruzgaratlası>, 21 Mart 2014
- [38] Ziv et. al., The factors governing the summer regime of the eastern Mediterranean, *International Journal of Climatology*, Vol. 24, s.1859-1871, 2004
- [39] Tolun et al, The wind energy potential of Gökçeada in the northern Aegean Sea, *Renewable Energy*, Vol. 6, s.679-685, 1995
- [40] Haralampolous, D.A., Analysis of wind characteristics and potential in the East Mediteranean-the Lesvos case, *Renewable Energy*, Vol. 6, s.445-454, 1995
- [41] DüNDAR, C. and İnan, D, Investigation of wind energy appliation possibilities for a specific island (Bozcaada) in Turkey, *WREC*, s.822-825, 1996
- [42] Eskin, N., Artar, H., Tolun, S., Wind energy potential og Gökçeada Island in Turkey, *Renewable&Sustainable Energy Reviews*, Vol.12, s.839-851, 2008
- [43] Şahin, A.D., Hourly wind velocity exceedence maps of Turkey, *Energy Conversion and Management*, Vol.44, s.549-557, 2003

- [44] INEGI, Göztepe Wind Farm Assessment, Institute of Mechanical Engineering and Industrial Management, 2011
- [45] Van der Tempel, J., Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines, PHd Thesis, TU Delft, NL, 2006
- [46] Jain, Promod, Wind Energy Engineering, McGraw-Hill Companies, USA, 1st edition, 2011
- [47] Shea, K. and Howard, C., Build Your Own Small Wind Power System, McGraw-Hill Companies, USA, 1st edition, 2012
- [48] Elkinton, M. R., Rogers, A. L., and McGowan, J. G., An Investigation of Wind-shear Models and Experimental Data Trends for Different Terrains, Wind Engineering, vol. 30, s.341-350, 2006
- [49] Gipe, P., Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm and Business, Chelsea Green Publishing Company, revised edition, 2004
- [50] Justus, C.G. and A. Mikhail, Height Variation of Wind Speed and Wind Distribution Statistics, Geophysical Research Letters, Vol.3, s.261-264, 1976
- [51] Rehman, S., Al-Abbadi, N.M., Wind shear coefficient, turbulence intensity and wind power potential assessment for Dhulom, Saudi Arabia, Renewable Energy, Vol. 33, s.2653-2660, 2008
- [52] Gualtieri G., Secci, S., Wind shear coefficients, roughness length and energy yield over coastal locations in Southern Italy, Renewable Energy, Vol. 36, s.1081-1094, 2011
- [53] Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A., Renewable Energy: Technology, Economics, and Environment, Springer, 2007
- [54] Justus, C. G. (1978) Winds and Wind System Performance. Franklin Institute Press, Philadelphia, PA. Alıntı: Manwell J.F., McGowan J.G., and Rogers, A. L., Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Wiley, 2nd edition, 2009
- [55] Counihan, J. (1975) Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data collected from the period 1880–1972. Atmospheric Environment, 9, 871–905. Alıntı: Manwell J.F., McGowan J.G., and Rogers, A. L., Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Wiley, 2nd edition, 2009
- [56] Schlumberger, Wind Power Factbook, <http://www.sbc.slb.com/SBCInstitute/Publications/Wind.aspx>, 3 Ekim 2013
- [57] Ray, M. L. , Rogers A. L. and McGowan, J. G., Analysis of Wind Shear Models and Trends in Different Terrain, Conference Proceeding: American Wind Energy Association Windpower, Anaheim, 22-25 May 2006.

- [58] Sorensen, J.D., Sorensen, J.N., Wind Energy Systems: Optimizing Design and Construction for safe and reliable operation, Woodhead Publishing Limited, 2011
- [59] Gökçek, M., Bayülken, A. and Bekdemir, Ş., Investigation of Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Kırklareli, Turkey, Renewable Energy, Vol. 32: s.1739-1752, 2007
- [60] Vestas web site, V90-3.0 MW at a Glance, http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v90-3_0_mw, 18 Mayıs 2013
- [61] Vestas web site, V90-3.0 MW Technical Specifications, http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v90-3_0_mw#!technical-specifications , 18 Mayıs 2013
- [62] Vestas web site, V90-3.0 MW Power Curve, http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v90-3_0_mw#!power-curve, 18 Mayıs 2013
- [63] Lutralutra, Simulating a wind speed time series in python, <http://www.lutralutra.co.uk/2012/07/02/simulating-a-wind-speed-time-series-in-python/>, 15 Ocak 2014
- [64] Wiser, R., Bolinger, M., 2012 Wind Technologies market report, US Department of Energy Energy efficiency and renewable energy, 2013
- [65] DWIA, Research and Development, http://www.windpower.org/en/policy/research_and_development.html, 3 Aralık 2013
- [66] Bunker, C.J., Effects of wind direction and speed on turbulence and wind shear, BS thesis, Brigham Young University, Idaho, 2010
- [67] NCSU, Temperature Gradient, <https://www.nc-climate.ncsu.edu/edu/k12/.tempgradient>, 3 Aralık 2013
- [68] DMI, Resmi İstatistikler, <http://www.dmi.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=CANAKKALE>, 5 Aralık 2013
- [69] Banuleos-Ruedas et al. , Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14, s2383-2391, 2010
- [70] Newman, J.F., Klein, P.M., The impacts of atmospheric stability on the accuracy of wind speed extrapolation methods, Resources, Vol.3, s81-105, 2014