

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAPASİTE ARTIŞI PROJELERİ İÇİN KOMPLEKS SAHALARDA ÖLÇÜM VE
SCADA VERİLERİ KULLANAN WASP VE METEODYN MODELLERİNİN
PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Özkan BAŞAR

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

HAZİRAN 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAPASİTE ARTIŞI PROJELERİ İÇİN KOMPLEKS SAHALARDA ÖLÇÜM VE
SCADA VERİLERİ KULLANAN WASP VE METEODYN MODELLERİNİN
PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Özkan BAŞAR
511161030**

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin TOROS

HAZİRAN 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **511161030** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Özkan BAŞAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Kapasite Artışı Projeleri İçin Kompleks Sahalarda Ölçüm Ve Scada Verileri Kullanan Wasp Ve Meteodyn Modellerinin Performans Analizi**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin TOROS**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Bahtiyar EFE
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Haziran 2020**
Savunma Tarihi : **20 Temmuz 2020**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bitirme çalışmama fikir, eleştiri ve önerileriyle her türlü desteği sunan değerli proje danışmanım Sn. Prof. Dr. Hüseyin TOROS'a çok teşekkür ederim. Rüzgâr Santrali'nin gözlenmiş türbin verilerini benimle paylaşan ve kullanmama olanak sağlayan Rüzgâr Santrali şirketi çalışanlarına, çalışmalarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Haziran 2020

Mehmet Özkan BAŞAR
Meteoroloji Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. RÜZGAR ENERJİSİ	7
2.1 Rüzgarın Temel Oluşum Mekanizması.....	7
2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi	7
2.3 Dünya'da Rüzgar Enerjisi.....	8
2.4 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi.....	11
2.5 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Hesaplanması	13
3. VERİ VE YÖNTEM	15
3.1 Santralin ve Projenin Genel Özellikleri	15
3.2 Sahanın Konumu	16
3.3 Santral Sahasının Tanımlanması	16
3.4 Ölçüm Direkleri.....	18
3.5 Uzun Vadeli Referans Verilerin Analizi	27
3.6 Dikey Ekstrapolasyon Analizi	28
3.7 Scada Data Analizi	29
3.8 Wasp Modeli	29
3.9 Meteodyn WT Modeli	30
3.9.1 Navier Stokes formülleri	30
3.9.2 Türbülanslı modelleme yöntemi	31
3.9.3 Sınır koşulları	33
3.10 Türbin Noktalarının Belirlenmesi	33
3.11 Temsili Ölçüm Direğinin Belirlenmesi	33
3.12 Modellenecek Arazinin Yükselti Haritasının Belirlenmesi	35
3.13 Modellenecek Arazinin Pürüzlülük Haritasının Belirlenmesi	35
3.14 Model Parametrelerinin Belirlenmesi	37
3.14.1 Wasp Model parametrelerinin belirlenmesi	37
3.14.2 Meteodyn Model parametrelerinin belirlenmesi	37
3.15 Dikey Profillerin Belirlenmesi	37
3.15.1 Wasp dikey profilin belirlenmesi	37
3.15.2 Meteodyn dikey profilin belirlenmesi	38
3.16 Rüzgar Atlasının Oluşturulması	41
3.17 Wake Modelinin Belirlenmesi	41

3.18 Hava Yoğunluğunun Belirlenmesi	41
4. SONUÇLAR VE HATA ANALİZİ	43
4.1 Karşılaştırma Yöntemi.....	43
4.2 Wasp Sonuçlarının Gerçek Üretimle Karşılaştırılması	44
4.3 Meteodyn Sonuçlarının Gerçek Üretimle Karşılaştırılması	46
4.4 Wasp ve Meteodyn Sonuçlarının Gerçek Üretimle Karşılaştırılması	47
4.5 Doğrulama Katsayılarının Belirlenmesi ve Uygulanması	49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	61



KISALTMALAR

CFD	: Computational Fluid Dynamics
EWEA	: The European Wind Energy Association
GW	: Gigawatt
GWh	: Gigawatt hour
GWEC	: Global Wind Energy Council
KW	: Kilowatt
MAE	: Mean Absolute Error
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MW	: Megawatt
nMAE	: Normalized Mean Absolute Error
nRMSE	: Normalized Root Mean Square Error
RMSE	: Root Mean Square Error
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : M1, M2 ve M3 Ölçüm direği bilgileri.....	19
Çizelge 3.2 : M4, M5 ve M6 Ölçüm direği bilgileri.....	22
Çizelge 3.2 : Mevcut referans verisinin ana özellikleri	27
Çizelge 3.4 : Ölçümler ve Veriler arasındaki korelasyon	28
Çizelge 3.5 : Ölçülen ve Modellenen ortalama rüzgar shear katsayıları	28
Çizelge 3.6 : Türbin noktaları hakkında temel bilgiler	35
Çizelge 3.7 : Sahaya uygulanan pürüzlülük katsayıları	35
Çizelge 3.8 : Wasp Model parametreleri	36
Çizelge 3.9 : Meteodyn Model parametreleri	37
Çizelge 4.1 : Wasp Model hata analizi	45
Çizelge 4.2 : Meteodyn Model hata analizi	47
Çizelge 4.3 : Doğrulama işleminin etkisi.....	52
Çizelge 4.4 : Kapasite artışı kapsamında belirlenen 12 türbin için Meteodyn Model hata analizi	52
Çizelge 4.5 : Kapasite artışı kapsamında belirlenen 12 türbin için doğrulama katsayısı uygulanmış model sonucunun hata analizi.....	53



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yıllara göre Dünya rüzgar enerjisi yıllık kurulum ve toplam kurulu güç. .	9
Şekil 2.2 : 2020 yılı Dünya’da en yüksek kurulu güce sahip 10 ülke	9
Şekil 2.3 : Yıllara göre Avrupa rüzgar enerjisi toplam kurulu güç.....	10
Şekil 2.4 : 2017 yılı Avrupa rüzgar enerjisi kurulu güç ülkeler arası dağılım	11
Şekil 2.5 : Türkiye’deki rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum	12
Şekil 3.1 : Projenin Türkiye’deki konumu.....	16
Şekil 3.2 : Sahanın orografik yapısı.....	17
Şekil 3.3 : Sahanın pürüzlülük yapısı	17
Şekil 3.4 : Sahada bulunan ölçüm direklerinin konumu	18
Şekil 3.5 : M1, M2 ve M3 ölçüm direkleri	19
Şekil 3.6 : M1 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi.....	20
Şekil 3.7 : M1 Sektörel rüzgar ve enerji dağılımı.....	20
Şekil 3.8 : M2 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi.....	21
Şekil 3.9 : M2 Sektörel rüzgar ve enerji dağılımı.....	44
Şekil 3.10 : M2 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi.....	45
Şekil 3.11 : M2 Sektörel rüzgar ve enerji dağılımı.....	45
Şekil 3.12 : M4, M5 ve M6 ölçüm direkleri	46
Şekil 3.13 : M4 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi.....	24
Şekil 3.14 : M4 Sektörel rüzgar ve enerji dağılımı.....	47
Şekil 3.15 : M5 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi.....	48
Şekil 3.16 : M5 Sektörel rüzgar ve enerji dağılımı.....	48
Şekil 3.17 : M6 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi.....	49
Şekil 3.18 : M5 Sektörel rüzgar ve enerji dağılımı.....	49
Şekil 3.19 : M1, M2, M3, M4,M5 ve M6 Sektörel rüzgar ve enerji dağılımı	50
Şekil 3.20 : Meteodyn ağ üretimi örneği (Meteodyn).....	57
Şekil 3.21 : Türbinler arası boşluk ve dizilim (7D x 2D)	57
Şekil 3.22 : Sahanın pürüzlülük haritası	59
Şekil 3.22 : M1, M2 ve M3 ölçülen ve modellenen dikey profiller.....	61

Şekil 3.24 : M4, M5 ve M6 ölçülen ve modellenen dikey profiller.....	61
Şekil 3.25 : M1 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri.....	62
Şekil 3.26 : M2 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri.....	62
Şekil 3.27 : M3 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri.....	62
Şekil 3.28 : M4 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri.....	63
Şekil 3.29 : M5 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri.....	63
Şekil 3.30 : M6 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri.....	63
Şekil 3.31: Model Sonucunda oluşturulan sahanın Enerji Haritası	64
Şekil 4.1 : Gerçek üretim ve Wasp model sonucunun karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.2 : Gerçek üretim ve Meteodyn model sonucunun karşılaştırılması	69
Şekil 4.3 : Gerçek üretim, Wasp ve Meteodyn model sonucunun karşılaştırılması ..	70
Şekil 4.4 : Wasp ve Meteodyn modellerinin gerçekten üretimden sapma oranları ...	71
Şekil 4.5 : Wasp ve Meteodyn modellerinin gerçekten üretimden sapma oranları ...	72
Şekil 4.6 : Doğrulama katsayıları belirlenirken faydalanan türbinler.....	74
Şekil 4.7 : Meteodyn ve doğrulama katsayısı uygulanmış model sonucunun karşılaştırılması	75

KAPASİTE ARTIŞI PROJELERİ İÇİN KOMPLEKS SAHALARDA ÖLÇÜM VE SCADA VERİLERİ KULLANAN WASP VE METEODYN MODELLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Rüzgâr santrallerinin kurulması düşünülen yerlerde proje öncesi rüzgâr kaynağı değerlendirmesi yapılarak sahanın yıllık potansiyel enerji üretimleri hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamalar projeye ilgili fizibilite çalışmalarını doğrudan etkilemektedir çünkü bir rüzgâr santralinin kurulması sürecindeki ilk ve en önemli nokta rüzgâr kaynağının doğru değerlendirilmesi ve buradan elde edilecek üretim çıktısına göre finansal yatırımların belirlenmesidir. Enerji üretimleri yanlış hesaplanan projelerde enerji verimliliği düşük olacak ve bu da ülke kaynaklarının boşa harcanmasına sebep olacaktır. Enerjide dışa bağımlı bir ülke olduğumuz düşünüldüğünde bu hesaplamaların tutarlılığı hayati önem taşımaktadır.

Bu çalışmada lineer ve non-lineer akış modellerinin sonuçları için hata değerleri hesaplanmış ve bulunan sonuçlar ışığında kapasite artışı projelerinde SCADA verileri yardımıyla sahanın bölgesel hata oranları hesaplanarak model kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon sonucunda hesaplanan üretimlerinin doğruluğun artırılması hata oranlarının azaltılması amaçlanmıştır. Lineer model hesaplamaları için Rüzgâr Atlası Analiz ve Hesaplama Programı (WAsP) kullanılırken non-lineer model için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) çözümlemesi yapan Meteodyn yazılımı kullanılmıştır.

Wasp ve Meteodyn modelleri kullanılarak 6 farklı ölçüm direğinden toplanan veriler yardımıyla 169 farklı türbin noktası için üretim hesaplaması yapılmıştır. İki model de bazı noktalarda çok iyi performans sergilemesine rağmen bazı noktalarda çok kötü sonuçlar yakalamıştır. Bu durum, arazinin kompleks bir yapıya sahip olması ve modellerin bazı noktalarda dağların perdeleme etkisini yeterince hesaba katılamamasından kaynaklanmaktadır. Wasp ve Meteodyn modelleri ile alınan üretim sonuçlarının gerçek üretimden sapmaları ve bağıl hataları hesapladığında tüm santralde Wasp modelinin bağıl hata oranı +%7.02 olarak hesaplanırken Meteodyn modelinin bağıl hata oranları -%1.37dir. Yapılan analizler sonucunda SCADA veriler yardımıyla geliştirilen sistem, tahminlerdeki hata oranını büyük ölçüde azaltmaktadır öyle ki yeni kurulması planlanan 12 türbin için yapılan analizde bağıl hata oranının -%8.64 ten -%1.52 ye düştüğü görülmektedir.

Türkiye’de kapasite artışı planlayan çok fazla sayıda rüzgâr santrali yatırımcısı bulunmaktadır ve bu santrallerin büyük bir bölümü kompleks arazilerde yer almaktadır. Bu yöntemin tutarlılığının tespit edilmesinde aynı işlemlerin farklı santrallere uygulanarak gerekli sağlamaların yapılması çalışmanın tutarlılığını arttıracaktır.



PERFORMANCE ANALYSIS OF WASP AND METEODYN MODELS USING MEASUREMENT AND SCADA DATA FOR EXTENSION PROJECTS IN COMPLEX TERRAIN

SUMMARY

In places where the wind power plants are planned to be installed, annual potential production of energy can be calculated by making wind resource assessment. The result of these calculations directly affects the feasibility studies of the projects. Energy efficiency will be low in projects whose energy production is calculated incorrectly, and this will cause the country resources to be wasted. In energy-dependent countries, this is vital.

In this study, error values were calculated for the results of linear and non-linear flow models. In the light of the results, the model was calibrated by calculating the regional error rates of the site with the help of SCADA data for the extension projects. The aim of this calibration is increase the accuracy rate of production prediction and decrease the total error rates. Meteodyn software was used for the non-linear model, while WasP were used for linear model calculations.

This project is located in western Turkey, in the provinces of Mugla. The average altitude at the sites where the wind turbines are installed or expected to be installed is of 821 m above sea level (a.s.l.), ranging from 621 to 930 m a.s.l

For the description of the topography and later use in atmospheric flow simulation softwares, a digitized representation of the terrain is necessary in the form of contour lines. For this project, the digitized topography was prepared based on the topographic information given by the Developer, with contour lines at 5 m intervals, and from the data made available by the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), with contour lines at 10 m intervals.

Steep slopes are a matter of great relevance when it comes to the operation of the wind türbines, since they can induce substantial alterations in the incidence angle of the flow at the blades, threatening their performance. In this project despite some areas with steeper slopes, in none of the sites where the wind türbines are expected to be installed slope exceeds the abovementioned 25 % limit

The roughness length, taken as the description of the land coverage, was characterized by defining different terrain surface characteristics. The association between occupation type and roughness values was obtained accordingly to the scale defined by the European Wind Atlas and other sources, varying between 10-4 and 0.80 m.

For the characterization of the wind regime and for the resource assessment in the area, data collected at six local measuring stations were used: M1, M2, M3, M4, M5, M6 and M8. The wind data collected at M4 had been partially influenced by the operation of the existing wind turbines. In order to mitigate the impact of such disturbance in the energy yield estimates some correction was applied.

Taking in consideration the data series extension, the regarding data availability and the station's location, M1 station was selected to be the reference one, comprising the period between February 2009 and November 2017, about 8.8 years, with a good availability, 83 %. None of the other local stations covers such period.

The distribution of the wind resource in a given area can be performed based on the wind atlas determined from a measuring station installed in the area. A wind atlas contains the characterization of the wind regime, classifying the records by direction and wind speed bins, after removing the effects induced by the topography, local obstacles and superficial roughness. The reverse process is applied to determine the wind regime characteristics at the locations where the prediction is being required. The results obtained in the performance evaluation of the atmospheric flow model indicate that WAsP and Meteodyn can be used to estimate the wind regime in the area of the project. Applying the reference data of M1, M2, M3, M4, M5, M6 stations, in WAsP and Meteodyn, together with previously mentioned digital representation of the terrain.

Production calculations were made for 169 different turbine points with the help of data collected from 6 different measuring met masts using Wasp and Meteodyn models. Although both models performed very well at some points, both of them had very bad results. The reason for this situation is that the land has a complex structure and the models are not able to take into account the shielding effect of the mountains at some points. When the deviations of the results obtained with the Wasp and Meteodyn models from real production are measured, the error rate of the Wasp model in the whole plant is calculated as +7.02%, while the error rates of the Meteodyn model are -1.37%.

As a result of the analysis, the method developed with the help of SCADA data greatly reduces the error rate in the estimates. Real production values of 169 turbines have been used while calculating the correction factor for the energy generation phase of extension project to reach the most accurate P50 value.

After comparison between actual and modelled data correction coefficient has been calculated for each turbine points that belongs to determined 169 turbines by using deviations on production.

If extension turbines is close to any installed turbines, estimated correction coefficients will demonstrate the model behaviour in that area. If model under or overestimated in that region according to installed turbines comparison results, correction coefficient applied to extension turbines. Thanks to this way, model mistakes have been partly eliminated.

In the analysis made for 12 türbines that are planned to be newly installed, it is seen that the relative error rate decreased from -8.64% to 1.52% thanks to this post process methodology.

The conclusion reached in the scope of this study is that Meteodyn, which is a non-linear model in complex lands, gave a better result than the linear Wasp model. In addition, it is possible to calculate production at much lower errors with the post process method developed by using scada data in capacity increase studies, but using a large number of test scenarios to reach a definitive result will be important to better understand the relationship between the model used and the energy estimation errors.

Lots of wind energy investor are planning to extension for their operationa wind powe plants in Turkey and most of these power plants are located in complex terrains. In determining the consistency of this method, applying the same procedures to different power plants will provide the consistency of the study.





1. GİRİŞ

Bir devletin veya bir topluluğun kalkınabilmesi için en önemli parametrelerden birisi enerjidir. Ekonomik ve sosyal olarak gelişmişlik seviyesini arttırmaya çalışan ülkemizin göstermiş olduğu gayretleri, hedeflerine ulaştıracak etkenlerden biri de enerji kullanımı ve yeterli enerjiye sahip olmaktır. Ülke nüfusunun her geçen gün artması ve büyüyen bir ekonomiye sahip olmamız, elektrik enerjisine olan talebi de günden güne arttırmaktadır fakat birincil enerji kaynaklarında ve elektrik enerjisinde büyük oranda dışa bağımlı bir ülke olamamız ve hızlı talep artışı, enerji sektörümüzün yüksek yatırıma ihtiyaç duyduğunu açıkça göstermektedir.

Enerji kullanımının artacağını öngördüğümüz bu ortamda yapılan yatırımların çevreyle uyumlu olması büyük önem arz etmektedir. 2005 yılında yürürlüğe girmiş ve 2009 yılında Türkiye'nin de imzaladığı İklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası tek çerçeve olan, Kyoto Protokolü uyarınca, YEK (Yenilenebilir Enerji Kaynakları)'na yönelimin önemli oranda artırılması gerekmektedir. Bu bağlamda rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisinden elektrik üretim amaçlı yararlanılması son yıllarda tüm Dünya'da ve Türkiye'de son derece popüler olmuştur. Yaşanan teknolojik gelişmelere bağlı olarak rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin, ekonomik değer kazanması sadece enerji sektörüne değil aynı zamanda ekolojik dengenin de bozulmadan korunmasına olumlu katkı sağlamaktadır. Rüzgâr enerjisi insan sağlığına ve bitki örtüsüne olumsuz etkisi diğer enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında azımsanacak kadar azdır. Bunun yanında, CO₂ emisyonu olmadığı için, asit yağmurları ve atmosferik ısınma gibi etkilere yol açmaz ve kesinlikle hiçbir radyoaktif etkisi olmayan oldukça doğal bir kaynaktır. GWEC raporlarından da anlaşılacağı üzere rüzgâr enerjisi ekonomik olarak kullanılabilir hale geldikten ve Dünya'nın ekolojik geleceğinin önemi kavrandıktan sonra rüzgâr enerjisinin taşıdığı önem fark edilmiş ve bu alanda yapılan yatırımlar oldukça artmıştır.

Bu bilgiler ışığında, rüzgâr potansiyeli bakımında ciddi bir potansiyele sahip ülkemizde (7 m/s'den büyük rüzgâr hızları göz önüne alınarak Türkiye rüzgâr enerji potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir.) sadece rüzgâr yatırımlarının değil

rüzgâr sanayisinin de gelişimine katkıda bulunmak en asli görevlerimizden biri olmalıdır. Şu anda rüzgâr enerjisinde Türkiye, yaklaşık 8 Gigawatt (GW) kurulu güce sahip ve bu alanda büyük hedefleri olan aynı zamanda rüzgâr enerjisi kapasitesi ile Avrupa'daki en önemli rüzgâr pazarlardan biridir. Türkiye'nin bulunduğu bölge, jeopolitik ve stratejik konumu sebebiyle bir enerji üssü haline gelmiş olması, Türkiye'deki yatırım fırsatlarının şekillenmesinde önemli rol oynayacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Enerji politikalarının emniyetli bir şekilde belirlenmesi, çalışması, dağıtım planlamasının verimli bir şekilde yapılması ve arz-talep dengesinin kurulabilmesi için enerji güç sistemlerinin öngörülebilir olması ve iyi yönetilmesi gerekmektedir fakat rüzgâr doğası gereği, atmosferik ve topoğrafi birçok etkiden dolayı alansal ve zamansal olarak süreksizlik göstermektedir. Enerji konusunda dışa bağımlılığın azaltılması amaçlanırken ekolojik dengenin de korunmasını istediğimiz ülkemizde doğru enerji politikaları ancak yenilenebilir enerji kaynakları ve bu kaynakların doğru üretim tahminleri ile yapılabilir. Bu tez çalışmasında da elimizdeki kaynakları en verimli şekilde kullanarak en başarılı üretim tahminine ulaşmaya çalışacağız.

Bu tez çalışmasında; Türkiye'nin güney batısındaki Muğla ili içerisinde bulunan, rüzgar santralindeki kapasite artışı sebebiyle yeni kurulacak türbinlerin, 6 ayrı ölçüm direği ve mevcut türbinlerin SCADA verileri kullanılarak yapılacak analizde Mikro (küçük) ölçek etkilerini iyi simule edebilen ve lokal etkileri iyi yakalayan Meteodyn (CFD) (Computational Fluid Dynamics- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ve WasP (Lineer) modellerin yıllık enerji üretimleri konusundaki performansları analiz edilecektir. Yapılan model çalışmaları ile elde edilen rüzgâr enerjisi güç değerleri ilgili santrale ait türbinlerin gözlenmiş üretim değerleriyle karşılaştırılarak yapılan tahminlerin güvenilirlik aralığı belirlenecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Pereira ve diğ. (2015), rüzgâr kaynağı değerlendirme çalışmalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (CFD) WAsP gibi lineer model yaklaşımlarına gerçek bir alternatif olabileceği düşüncesiyle bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, 7 farklı vaka analizini kullanarak model performanslarının karşılaştırıldığı bu çalışmada CFD modeli kurulumunda kullanıcı uzmanlığının bağımlılığını bir kenara

bırakmak için standart ve tek tip bir yaklaşımın altını çizmiştir. Sonuç olarak CFD sonuçlarındaki sapmaların WAP'taki sapmalardan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 7 test vakasının hepsinde, CFD ortalama rüzgâr hızı tahminlerindeki hatalar, WAP'taki hatalardan daha az olduğu saptanmıştır. Bu çalışma CFD değerlendirmesine yönelik iyi bir gösterge olarak sunulmaktadır. Gelecekte, yazarlar test örneklerini hem sayı hem de alan karakteristik çeşitliliği açısından genişletmeyi amaçlamaktadır.

Palma (2008), bir kıyı bölgesi üzerindeki rüzgâr akışlarını, doğrusal ve doğrusal olmayan (CFD) matematiksel modelleri kullanan bilgisayar simülasyonları ile incelenmiştir. Model sonuçları karşılaştırıldığında CFD modelin sonuçları lineer model sonuçlarına göre saha ölçümleri ile daha uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Her bir rüzgâr türbini konumu için yapılan bu çalışmada incelenen beş konumdan üçünün, aynı zamanda büyük türbülans yoğunluğu konusunda da CFD modelin daha iyi iş çıkardığı sonucuna varılmıştır. Araştırma sonucunda santral kurulacak sahada türbin noktaları belirlenirken CFD hesaplamalarından yararlanmanın faydalı olacağına değinilmiştir.

Ay (2004), yaptığı çalışmada Rüzgâr santrallerinin kurulması düşünülen yerlerde proje öncesi rüzgâr kaynağı değerlendirmesi yapılarak sahanın yıllık potansiyel enerji üretimleri elde edilebilmesi gerektiğini savunmuş ve bu çalışmada da lineer ve non-lineer akış modellerinin sonuçları için hata değerleri hesaplanmıştır. Lineer model hesaplamaları için Rüzgâr Atlası Analiz ve Hesaplama Programı (WAsP) kullanılırken non-lineer model için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlemesi yapan WindSim yazılımı kullanılmıştır. Non-lineer model ile elde edilen rüzgâr hızların ölçüme göre olan bağıl ve mutlak hata oranları lineer model sonuçlarına göre daha düşüktür. Üç ölçüm direği noktasındaki yıllık enerji üretimlerinin ortalaması kıyaslandığında da non-lineer model sonuçları gerçek ölçümle hesaplanan üretime göre %1.8 'lik bir sapmayla %4.2 olan lineer model sapmasından daha iyi sonuç vermektedir. Her ne kadar yarı kompleks sayılabilecek olan mevcut sahadaki sonuçlar non-lineer model için gerçek değerlere daha yakın çıksa da farklı zorluklarda (kompleksliklerde) ve atmosferik stabilite durumlarındaki sahalarda da aynı yöntemin test edilmesi önem teşkil etmektedir. Mevcut çalışma ile bu yazılımın denendiği ilk uygulama olduğu için standart olarak kullanılmadan önce daha zorlu olan birkaç farklı sahada denenmesi ve sonuçlarının incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yeşilköy ve diğ. (2012), çalışmalarında Soma Bölgesi'nde yer alan Soma Rüzgâr Santrali için lineer ve CFD akış alan modelleri kullanarak rüzgâr enerji potansiyelinin alansal dağılımını hesaplamışlardır. Hesaplamalar, santral alanında kurulu bulunan meteoroloji ölçüm istasyonundan alınan ölçüm verileri ile yapılmıştır. Ölçüm noktasından alınan veri Wasp ve WindSim modelleri kullanılarak alansal dağılımı sağlanmıştır. Elde edilen lineer ve CFD iki farklı modelin sonuçları, santralde bulunan başka bir ölçüm direğine ait gözlem verileri ile karşılaştırılarak kompleks saha koşullarında hangi modelin daha iyi sonuç verdiğini analiz etmişlerdir. Ayrıca yapılan rüzgâr hızı alansal dağılım simülasyonlarında Wasp lineer model sonuçlarının gözlem verileriyle WindSim CFD modeline göre daha düşük hata paylarıyla örtüştüğü gözlenmiştir. Çalışma sonucunda arazinin kompleks yapısı ve ölçüm direğinin alanı temsiliyeti göz önüne alındığında daha güvenilir sonuçlar elde edebilmek için analizlerde birden fazla ölçüm direğinin sisteme dahil edilmesi önerilmiştir.

Çatalbaş (2015), yaptığı çalışma boyunca Balıkesir'in Burhaniye bölgesindeki ölçüm direklerinden elde edilen rüzgâr verileri kullanılarak WindSim ve Meteodyn modellerinde çaprazlama yöntemi ile başka bir konumdaki rüzgâr verisi tahmin edilmiştir. Daha sonra tahmin edilen rüzgâr verisi ile gözlem verisi arasında hata analizi yapılmış ve hangi modelin daha başarılı tahmin yaptığı araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda her iki modelde de güneybatı yönlerinde rüzgâr yönü daha başarılı tahmin edilirken direklerin hâkim rüzgâr yönlerinde daha başarısız tahminler elde edilmiştir. Başarısız tahminlerin topografyanın karmaşıklığından doğan sorunlar nedeniyle olduğu ayrıca WindSim ve Meteodyn modellerinin dağların perdeleme etkisini iyi hesaplayamadığı görülmektedir. Bu çalışmada hata analizleri sonucunda WindSim CFD modelinin Meteodyn modeline göre daha iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.

Berge ve diğ. (2006), Norveç'teki karmaşık bir arazi alanında güney ve kuzeydeki iki hâkim rüzgâr yönü için WAsP ve iki CFD tabanlı WindSim ve 3DWind modelini karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda WAsP'nin karmaşık arazideki basitliğine ve bilinen zayıflıklarına rağmen, CFD modellerinin kullanılmasıyla ortalama rüzgâr hızı hesaplamalarının doğruluğu konusunda büyük bir gelişme saptanamamıştır.

Tabas ve diğ (2019), bu çalışmada, İsviçre Jura Dağları'ndaki kompleks sahada yer alan rüzgâr santralinin lineer ve lineer olmayan modellerle yapılmış rüzgâr enerjisi tahminlerinin doğruluğunu kıyaslamaktadır. Topoğrafı, orman yapısı ve heterojen bitki örtüsü sebebiyle zor bir sahaya sahip olan bu santralde çeşitli türbülans modelleri ve orman modelleri kullanılmıştır. Dokuz adet Vestas V90'ın 2.0 MW türbininin bulunduğu bu sahada. Sonuçlar, CFD modelin rüzgâr çiftliğinin performansını yeterli doğrulukla tahmin edebildiğini göstermektedir.

D. Cabezón (2012), çalışmasına göre rüzgâr akışı modellemesi için geleneksel lineer teknikler genellikle orta düzlükteki alanlar için kabul edilir ve bu da orta derecede belirsizliklere neden olur. Bununla birlikte, arazi karmaşıklığı arttıkça, rüzgâr alan simülasyonlarının hassasiyetini artırmak için doğrusal modeller daha yanlış olmaya başlar. Bu çalışma, rüzgâr alanı simülasyonlarında CFD iyileştirmelerini gösteren CFD modelleri ile doğrusal modeller arasındaki karşılaştırmaların sonucunu göstermektedir. Analiz, lineer olmayan çözücü Fluent 6.2'nin karmaşık arazi için rüzgâr hızı alanını diğer rüzgâr akışı modellerine göre daha doğru bir şekilde simüle edebileceğini göstermektedir

R. M. Dause (2015), İsviçre'deki Alpler ve Jura'daki üç potansiyel rüzgâr parkı sahası için Meteodyn ve WindSim'i direk ve SODAR ölçümlerini kullanarak sonuçları karşılaştırmayı amaçlamıştır. Her iki modelin genel olarak karmaşık topoğrafya ile başa çıktığı kanıtlanmışken, tek model çalışmaları ortalama yıllık rüzgâr hızını tahmin etmede ihmal edilemez hatalar üretmiştir. Türbülans yoğunluğunun simülasyon sonuçları yıllık ortalama türbülans yoğunluğu ölçümleriyle kıyaslandığında yıllık ortalama rüzgâr hızına göre daha büyük hatalar göstermiştir.



2. RÜZGAR ENERJİSİ

2.1 Rüzgârın Temel Oluşum Mekanizması

Rüzgâr, ana enerji kaynağı Güneş olan hareket halindeki havadır. Dünyanın ve dönme ekseninin eğikliği buna ek olarak yüzeyin homojen olmayan yapısı nedeni ile güneşten alınan enerjisi miktarı farklılık göstermektedir ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan basınç farklılıkları havanın hareket haline geçmesine potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesine ve rüzgârın oluşmasına sebep olur. (Menteş, 2009).

Basınç gradyan kuvvetinin güçlü olduğu yerler, jeostrofik rüzgâr ve termal etkileşimlerin meydana geldiği kıyı şeritleri, tepe ve dağ zirveleri, hâkim rüzgâr yönüne paralel vadiler, yüksek ova ve platolar kuvvetli rüzgâr alanları olarak sıralanabilir.

Hâkim rüzgâr yönüne dik vadiler, engebelerle gölgelenmiş arazi, kısa dar vadi ve kanyonlar, pürüzlülüğün fazla olduğu alanlar ise zayıf rüzgâr alanları olarak sıralanabilir.

Bir bölgedeki rüzgâr potansiyelinin belirlenebilmesi için o bölgedeki kuvvetli ve zayıf rüzgâr alanları ile ilgili parametrelere hâkim olmak önemlidir bununla birlikte bölgedeki rüzgâr enerjisinden en verimli şekilde yararlanabilmek için en optimal türbin konuşturmasının yapılabilmesi için doğru alansal modellemeler, doğru alansal modellemeler için de rüzgârı etkileyen tüm meteorolojik ve topoğrafi faktörlerin iyi belirlenmiş ve tanımlanmış olması gerekmektedir.

2.2 Rüzgar Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr, tarihin çok eski dönemlerinden beri enerji üretimi için kullanılan atmosferik bir fenomendir. Yelkenli gemiler veya yel değirmenleri rüzgârın enerjiye dönüştürüldüğü ilk yerler olarak bilinir öyle ki bundan yaklaşık 4000 yıl önce Antik Mısır, İran, Çin ve Japonya'da yel değirmenlerinin tahıl öğütme işinde başarıyla kullanıldığı bilinmektedir. Yel değirmenlerinin Asya'dan Avrupa'ya geçmesi haclı

seferleri sebebiyle M.S. 640 yıllarına tekabül etmektedir. Görüldüğü gibi rüzgâr enerjiye dönüştürülme serüveni ilk olarak Asya medeniyetlerinde gerçekleşmiştir (Menteş, 2009).

Başlangıçta düşey eksenli olarak tasarlanan yel değirmenleri Avrupalılar tarafından geliştirilerek yatay eksenli hale getirilmiştir. Yatay eksenli ve mekanik enerji amaçlı yel değirmenlerinin gelişimi; ayaklı yel değirmeni (Almanya), kule tipi yel değirmeni (Akdeniz Ülkeleri, Alaçatı), döner çatılı Hollanda tipi yel değirmeni (Hollanda) ve 1850 yılında Daniel Halladay tarafından rüzgâr yönü yönlendiricisi takılan çok kanatlı Amerikan tipi yel değirmeni olarak sıralanabilir (Özgener, 2002).

Rüzgâr enerjisini elektrik üretmek için kullanan ilk ülke Danimarka'dır. Danimarkalılar 1890 yılında elektrik üretmek için 23m çapında rüzgâr türbinleri kullanmış ve 1910 yılına kadar da kapasitesi 5 ile 25 kW arasında değişen yüzlerce türbin modeli uygulamaya geçirilmiştir (Johnson, 2001).

Rüzgâr enerjisi kullanımının tarihsel gelişimine; 1942 yılında üretilen 17,5 m pervane çaplı ve 50 kW nominal güçlü Smith rüzgâr türbini ve 1957 yılında üretilen 24 m pervane çaplı ve 200 kW nominal güçlü Gedser rüzgâr türbini örnek verilebilir (Özgener, 2002).

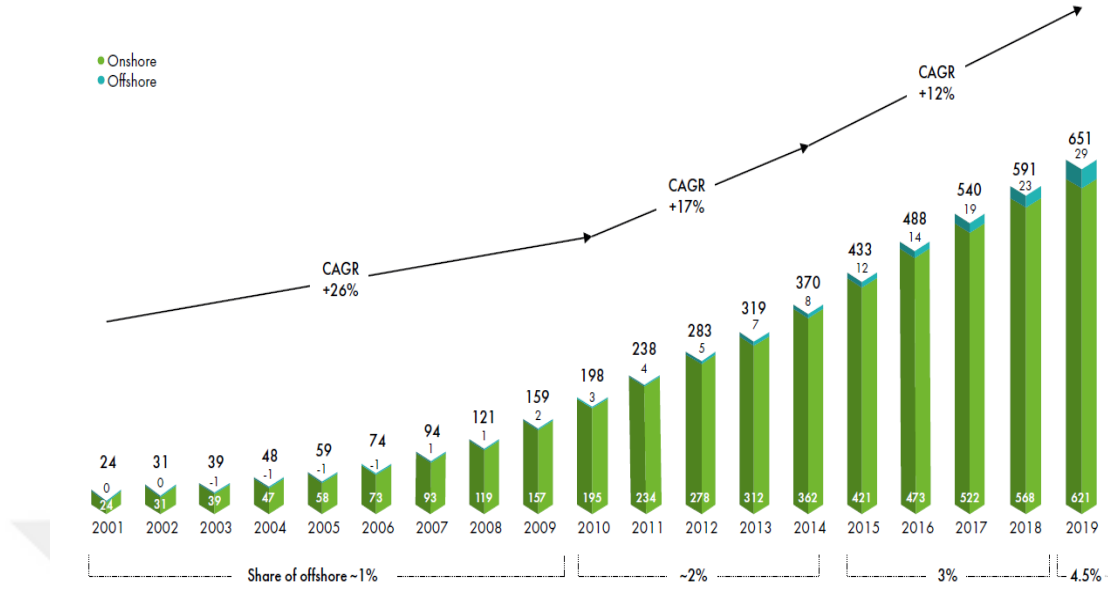
18. yüzyılda sanayi devrimi ile birlikte dünya yeni bir döneme girmiş ve sanayileşme tüm dünyada hızla artmaya başlamıştır. Sanayileşmenin ihtiyaç duyduğu enerji fosil yakıtlardan sağlanmış ve rüzgâr enerjisi gibi öngörülemeyen ve yeterli enerji ihtiyacını karşılayamayan doğayla barışık enerji alternatifleri bir kenara atılmıştır. Ancak 20. yüzyıla kadar geçen periyota meydana gelen petrol ve enerji krizleri savaşların ve siyasi ilişkilerin enerji maliyeti üzerindeki belirsizliği arttırması ve ekolojik dengenin hızla bozulması nedeniyle başta rüzgâr enerjisi ve doğayla barışık tüm enerji kaynakları tekrar popüler hale gelmiştir.

2.3 Dünya'da Rüzgar Enerjisi

1970'li yıllardan itibaren tüm dünyada ciddi bir program ve vizyoner bir bakış açısıyla rüzgâr enerjisine harcanan emek ve yatırımlar artmaya başlanmıştır.

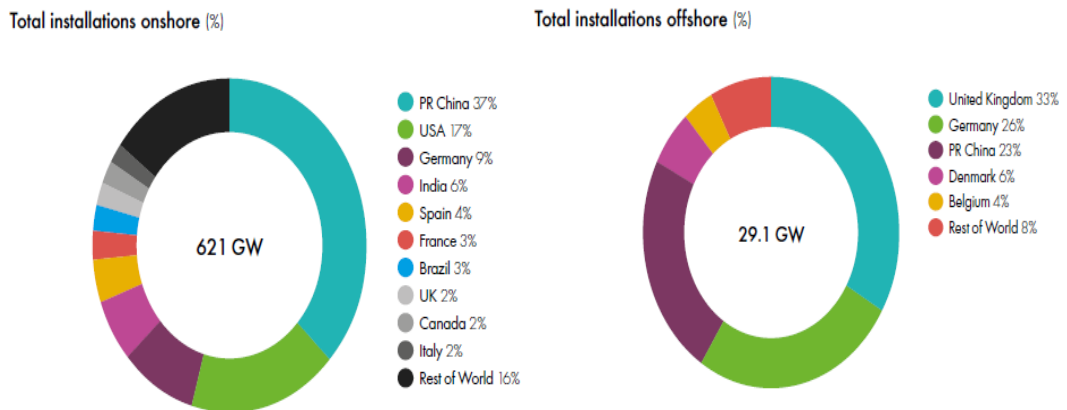
Şekil 2.1'de Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC)'in yayınlamış olduğu veriler ayrıntılı bir şekilde göstermektedir ki 2019 yılında Dünya'da 60.4 GW'lık bir kurulum yapılmış ve yıl sonu itibarıyla rüzgâr enerjisinde toplam kurulu güç 651 GW'a ulaşmıştır yine grafikte 2018 yılı sonunda bu değer 591 GW olduğu

görülmektedir. Dolayısıyla son 1 yılda dünya çapında rüzgâr enerjisi kurulu gücünde %10.1'lik bir artış söz konusudur (GWEC, 2020).



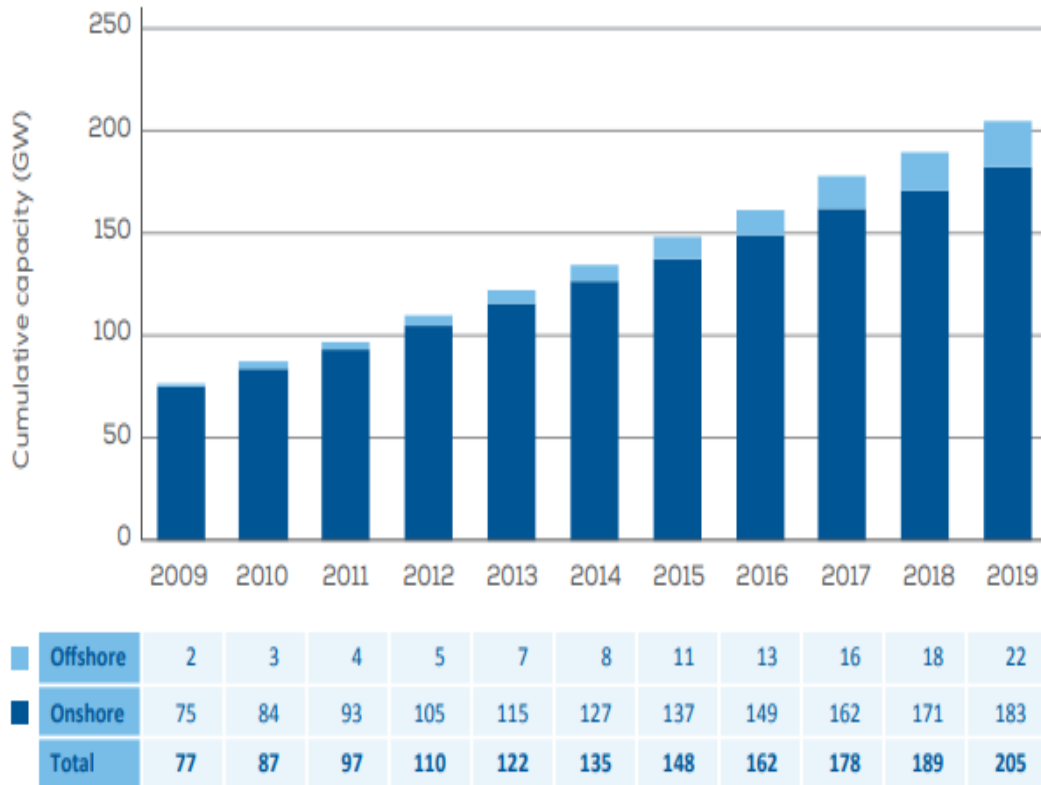
Şekil 2.1: Yıllara göre Dünya rüzgâr enerjisi yıllık kurulum ve toplam kurulu güç (GW) (GWEC, 2020).

Günümüzde rüzgâr enerjisi alanında en başarılı ülkeler, Asya’da Çin ve Hindistan. Kuzey Amerika’da Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Canada. Avrupa’da başta Almanya, İspanya, Fransa ve İngiltere olmak üzere diğer ülkeler gelmektedir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi 2020 yılı itibariyle Çin Dünya’da ki toplam karasal kurulu gücün %37’sini ve deniz üstü toplam kurulu gücün %23’ni oluşturarak zirvede yer almaktadır onu sırasıyla %17’lik oranla ABD, %9 ve %26’lık oranlarla da Almanya takip etmektedir (GWEC, 2020).



Şekil 2.2: 2020 yılı Dünya’da en yüksek kurulu güce sahip 10 ülke (GWEC, 2020)

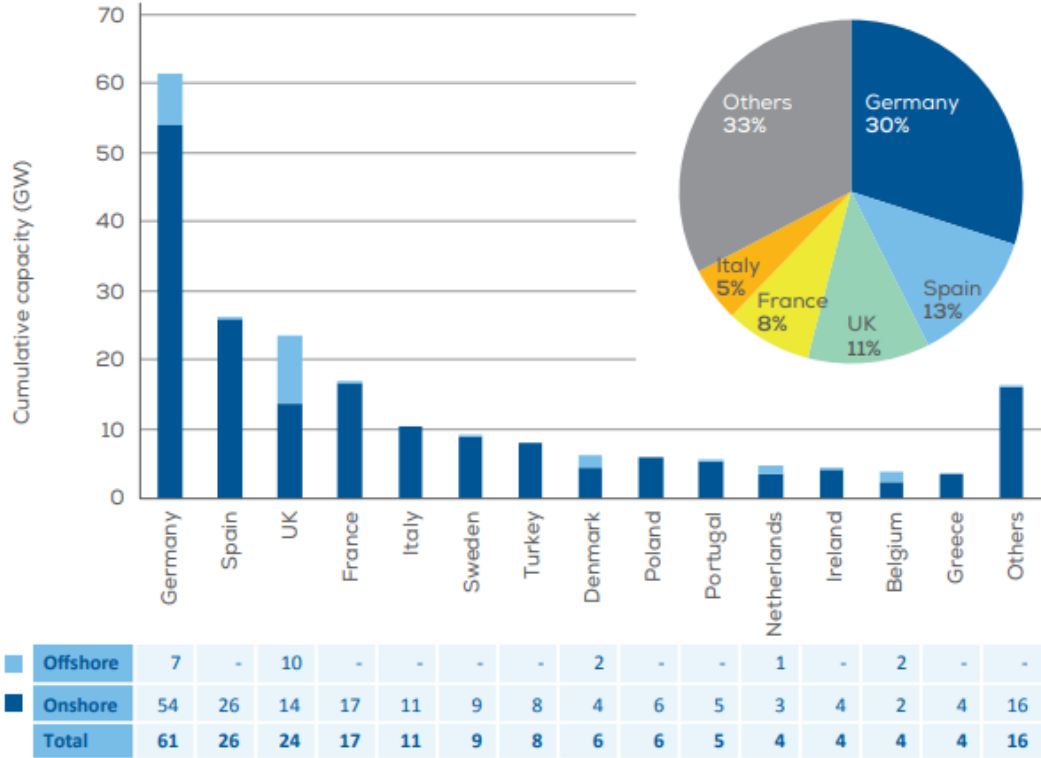
Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (Wind Europe)’nın yayınladığı verilere göre, 2020 yılı içerisinde Avrupa elektrik şebeke sistemine 4 GW deniz üstü ve 12 GW kara üstü olmak üzere toplamda 16 GW yeni rüzgar güç kapasitesi ilave olmuştur. 2020 yılı sonunda toplam kurulu güç ise 205 GW’a ulaşmıştır. 2018 yılı sonunda toplam kurulu güç 189 GW olduğu düşünüldüğünde Şekil 2.3 de görüleceği üzere bir önceki yıla göre Avrupa’daki rüzgâr enerjisi toplam kurulu gücü yaklaşık olarak %8.4 oranında artmıştır. (WindEurope, 2020).



Şekil 2.3: Yıllara göre Avrupa rüzgâr enerjisi yıllık kurulum ve toplam kurulu güç (GW) (WindEurope, 2020).

Avrupa’daki kurulu gücün ülkelere göre dağılımı incelendiğinde Şekil 2.4’de görüleceği gibi Almanya Avrupa’da hem kara hem deniz üzerindeki rüzgâr santralleriyle birlikte 61 GW lık kurulu güç ile en yüksek kapasiteye sahip ülkedir. Bunu sırasıyla 26 GW ile İspanya, 14 GW karasal ve 10 GW deniz üstü kurulumuyla İngiltere, 17 GW ile Fransa, 11 GW ile İtalya, 9 GW ile İsveç ve Türkiye takip etmektedir. Türkiye 8 GW kurulu gücü ile Avrupa’da rüzgâr enerjisinde en yüksek kapasiteye sahip 7. ülke konumundadır mevcut rüzgâr potansiyeli de düşünüldüğünde tüm otoritelerce gelecek yıllarda daha üst sıralara tırmanacağı

öngörülmektedir. Henüz deniz üzerinde kurulu gücü bulunmayan Türkiye'nin ilerleyen yıllarda bu teknolojinin ucuzlaması ve karalardaki verimli alanların azalmasıysa yakın kıyılarda rüzgâr santralleri kurması beklenebilir bu konudaki yönetmelikler de şimdiden gerekli bakanlıklarca hazırlanmaktadır.



Şekil 2.4: 2017 yılı Avrupa rüzgar enerjisi kurulu güç ülkeler arası dağılım (EWEA, 2017).

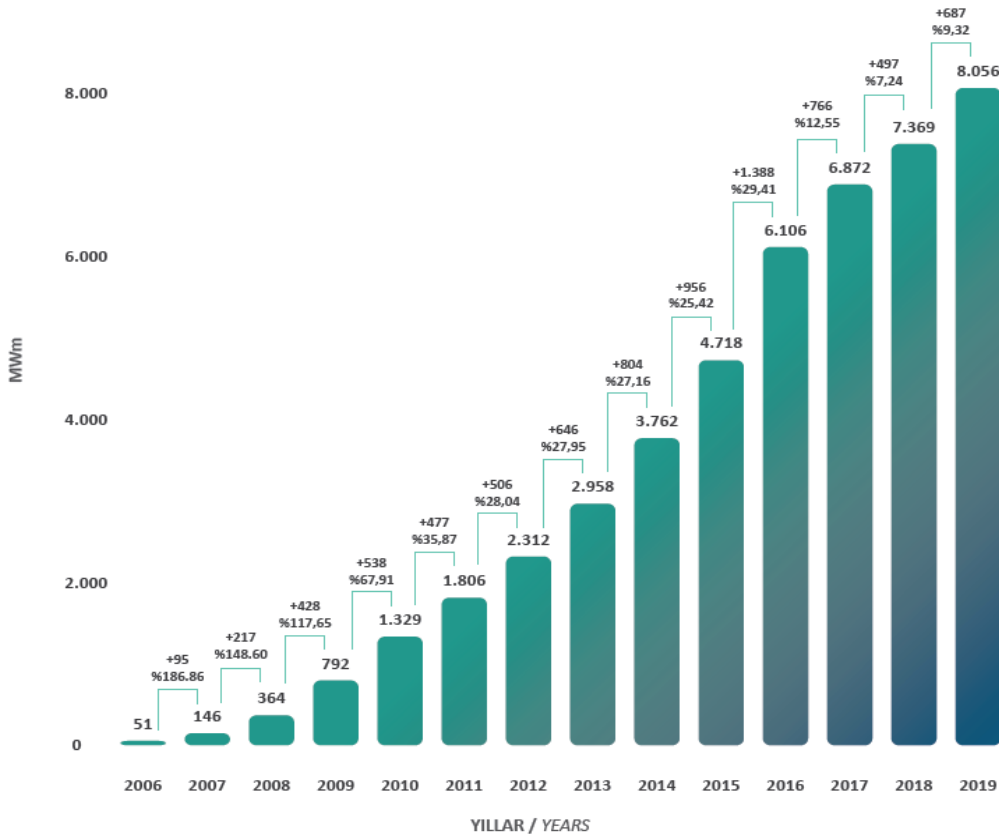
2.4 Türkiye'de Rüzgar Enerjisi

Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından konumu itibariyle oldukça elverişli bir bölgede yer almaktadır. Kuzeyinde Karadeniz güneyinde Akdeniz ve batısındaki Ege deniziyle birlikte bir yarımada olan Türkiye, topoğrafı özellikleri ve güçlü hava akımlarına maruz kalması sebebiyle rüzgâr yatırımı için elverişli bir ülkedir.

Türkiye'de veya bu topraklarda enerji kaynağı olarak rüzgârdan yararlanılması çok eskilere dayanmaktadır. Binlerce yıldır farklı medeniyetlere ev sahipliği yapmış Anadolu topraklarının rüzgâr potansiyelinden yararlandığını eski yel değirmeni kalıntılarına bakarak anlamak kolayca mümkündür. İlk olarak tahıl öğütme ve su çekme gibi basit amaçlarla kullanılan bu güç günümüzde milyonlarca kişiye elektrik sağlamaktadır.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından hazırlanan Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlasına (REPA) göre teorik olarak 7.0 m/s ve üzerinde rüzgâr hızına sahip bölgelerde rüzgâr enerjisi potansiyeli yaklaşık 48000 MW'tır. REPA'ya göre Türkiye'de rüzgâr enerjisi üretmek için en uygun yerler Kuzey Ege ve Marmara bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Ayrıca Güney Ege, Hatay, Mersin, Karaman, Niğde, Sivas ve Doğu Karadeniz bölgelerindeki bazı yerler de elektrik üretimine elverişlidir. Özellikle Çanakkale ile Bozcaada ve Gökçeada rüzgâr enerji potansiyeli açısından ilk sırada yer almaktadır (Kaymak, M).

Türkiye özellikle son 20 yılda rüzgâr enerjisi yatırımlarında önemli yol almıştır. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin (TÜREB) resmî sitesinde yayınlanmış olan Ocak 2020 Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu'na göre, Türkiye'nin 2006 yılında 51 MW olan işletmedeki toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü 2020 sonunda 8056 MW'a ulaşmıştır. Şekil 2.5'de de detaylı bir şekilde görüleceği üzere 2018 yılı sonunda 7369 MW işletme kurulu gücüne sahip olan Türkiye 2019 yılı sonunda %9.32'lik bir gelişme göstermiştir.(TÜREB,2020)



Şekil 2.5: Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum (TÜREB, 2020).

İşletmede olan rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç bakımından en yüksek yüzdesel dağılımı %38.46 (3098.15 MW) ile Ege Bölgesi'ne, ikinci olarak da %34.71 (2796.45MW) ile Marmara Bölgesi'ne aittir. Ocak 2020 sonu itibarıyla 940.79 MW inşaat aşamasındadır ve 1260.55 MW da lisans almış ancak tesis aşamasına geçmemiştir (TÜREB, 2020).

2.5 Rüzgar Enerji Potansiyelinin Hesaplanması

Birçok meteorolojik parametrenin devreye girmesiyle atmosferde oluşan basınç farklılıkları hava kütlelerinin yer değiştirmesine neden olmaktadır. Yer değiştiren hava kütlesi o ortamdaki kinetik enerjinin göstergesidir. Kinetik enerji denklemlerinden yola çıkarak atmosferde hareket eden rüzgâr enerjisini elde edebiliriz.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Rüzgâr yatay ve düşey olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır fakat düşey bileşen ihmal edilecek kadar küçük olduğu için enerji hesabı yapılırken denkleme dahil ve enerji denklemi aşağıdaki halini alır

$$E = \frac{1}{2}mV_h^2 \quad (2.2)$$

Yukarıda belirtilen kinetik enerji denkleminde m hareket halindeki rüzgârın kütlesi, V_h ise yatay rüzgâr şiddetidir. Denkleme hava yoğunluğu parametresi dahil edilmek istenirse (2.3) denklemindeki gibi kütleyi, hava yoğunluğu ve hacim bilgilerini kullanarak da bulabiliriz. Bu denklemde ρ deniz seviyesindeki standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup sayısal değeri 1.223 kg/m^3 dir, V ise hacmidir.

$$m = \rho V \quad (2.3)$$

(2.3) de bahsi geçen hacmi ise (2.4) deki denklem ile hesaplamak mümkündür. Rüzgâr ilerleme yönüne dik alan A ve rüzgâr yönündeki uzunluk L ile gösterilirse, hacim;

$$V = AL \quad (2.4)$$

şeklini alır. Yolun hız ve zaman çarpımına eşit olduğu bilindiğine göre, L mesafesini rüzgâr şiddetine ve zamana bağlı olarak şu şekilde yazabiliriz;

$$L = V_h t \quad (2.5)$$

Yukarıda eşitliklerde verilen parametrelerin açık halleri (2.6) denkleminde yerine yazılırsa yeni kinetik enerji formülü

$$E = \frac{1}{2} \rho A t V_h^3 \quad (2.6)$$

elde edilir. Birim zamanda ve birim alandaki enerjiyi elde etmek için (2.6) denklemi A ve t'ye bölünür.

$$E = \frac{1}{2} \rho V_h^3 \quad (2.7)$$

Eşitlikte kullanılan ρ , deniz seviyesinde standart atmosfer şartlarında havanın yoğunluğu olup 1.225 kg/m^3 , u ise yatay rüzgâr şiddetidir ve birimi m/s'dir. Enerji'nin birimi ise W/m^2 'dir. (Menteş, 2009)

3. VERİ VE YÖNTEM

3.1 Santralin ve Projenin Genel Özellikleri

Proje, Türkiye'nin güney batısında bulunan Muğla ilinde yer almaktadır. Kapasite artışı kapsamında önerilen yerleşim düzeni 12 rüzgar türbininden oluşmaktadır. Enerji üretimi hesaplaması için 12 adet 116 m hub yüksekliğine sahip E126 4.0 MW türbinleri tercih edilmiştir. Bu çalışmanın birincil amacı yapılacak 12 türbinlik kapasite artışı sonucunda elde edilecek üretim çıktısını mevcut kaynaklarla en iyi şekilde nasıl öngörülebileceğini araştırmaktır.

Çalışma alanı hali hazırda üç kümeye ayrılmış 169 rüzgar türbinden oluşmaktadır;

Part I: 88 x Enercon E-44 (79.2 MW),

Part II: 30 x Enercon E-70 + 1 x Enercon E44 (69.9 MW),

Part III: 50 x Enercon E-70 (115 MW)

Toplam mevcut kapasitesi 264.1 MW olan bu santrale ilave 12 adet Enercon E126 (48MW) türbin eklenmesi planlanmakta ve böylelikle tüm proje 312.1 MW ulaşması beklenmektedir.

Rüzgar rejiminin karakterizasyonu ve bölgedeki kaynak değerlendirmesi için altı yerel ölçüm istasyonunda toplanan veriler kullanılmıştır. Ölçüm kampanyası, 2009 yılında M1, M2 ve M3 adındaki 53 m yüksekliğindeki ölçüm direklerinin kurulmasıyla başladı. Ardından, 2010 yılında 64m yükseklikte M4 ve M6 ölçüm direkleri ve son olarak 2011 yılında 65 m yükseklikteki M5 direği kuruldu kuruldu. Ölçüm süresi boyunca direk konumlarındaki rüzgar karakteristiklerini belirlemek için gerekli analizler yapılmıştır.

Enerji üretimi değerlendirmesi, uzun vadede rüzgar özelliklerinin tahmin edilmesini gerektirir, bu uzun vadeli düzenleme ve metodolojisi bu çalışmada sunulmuştur. Ayrıca, verim değerlendirmesi için yapılan modelleme, yukarıda belirtilen girdilerin yanında Meteodyn, Wasp ve Windfarmer programlarının kullanımıyla gerçekleştirilmiştir.

Proje belirsizliği; ölçüm kalitesi ve temsil edilebilirliği, saha özellikleri (oroğrafi, zemin örtüsü, vb.) ile ilgili olarak sağlanan bilgilerin kalitesi ve rüzgar akışı modelleme belirsizliğine göre değerlendirilmiştir.

3.2 Sahanın Konumu

Proje, Şekil 3.1’de de görüleceği üzere Türkiye’nin güney batısında yer alan Muğla şehrinde yer almaktadır. Muğla merkezinin yaklaşık 4.2 km kuzey doğusunda ve Denizli merkezinin 4 km güney batısında yer almaktadır. Rüzgar türbinlerinin kurulduğu yerlerin ortalama rakımı 821 m dir ve türbin yükseklikleri 621 m ile 930 m arasında değişmektedir.



Şekil 3.1: Projenin Türkiye’deki konumu

3.3 Santral Sahasının Tanımlanması

Santral sahasını çevreleyen topografya; dağlar, ovalar, vadiler ve sert yükseklik değişiklikleri nedeniyle kompleks bir arazi olarak nitelenmektedir ve Şekil 3.2’de de görüleceği üzere kapasite artısı kapsamında eklenecek 12 türbin sahada daha dik ve eğimli alanlar olmasına rağmen, görece daha az eğimli noktalara konuşlandırılmıştır. Bunun sebebi, türbini topografyadan kaynaklanacak olumsuz etkilerden korumak ve

en yüksek enerji üretimi değerini yakalayabilmektir. Bu sayede bakım masrafları azalacak üretimden kaynaklı gelirler artacaktır.



Şekil 3.2: Sahanın oroğrafik yapısı

Sahanın pürüzlülüğü, farklı arazi yüzeyi karakteristiklerinin tanımlanması ile karakterize edilmiştir. Şekil 3.2 ve 3.3’de da görüleceği üzere saha alanının zemini çalılar, ormanlık alanlar ve tarım arazileri ile kaplıdır.

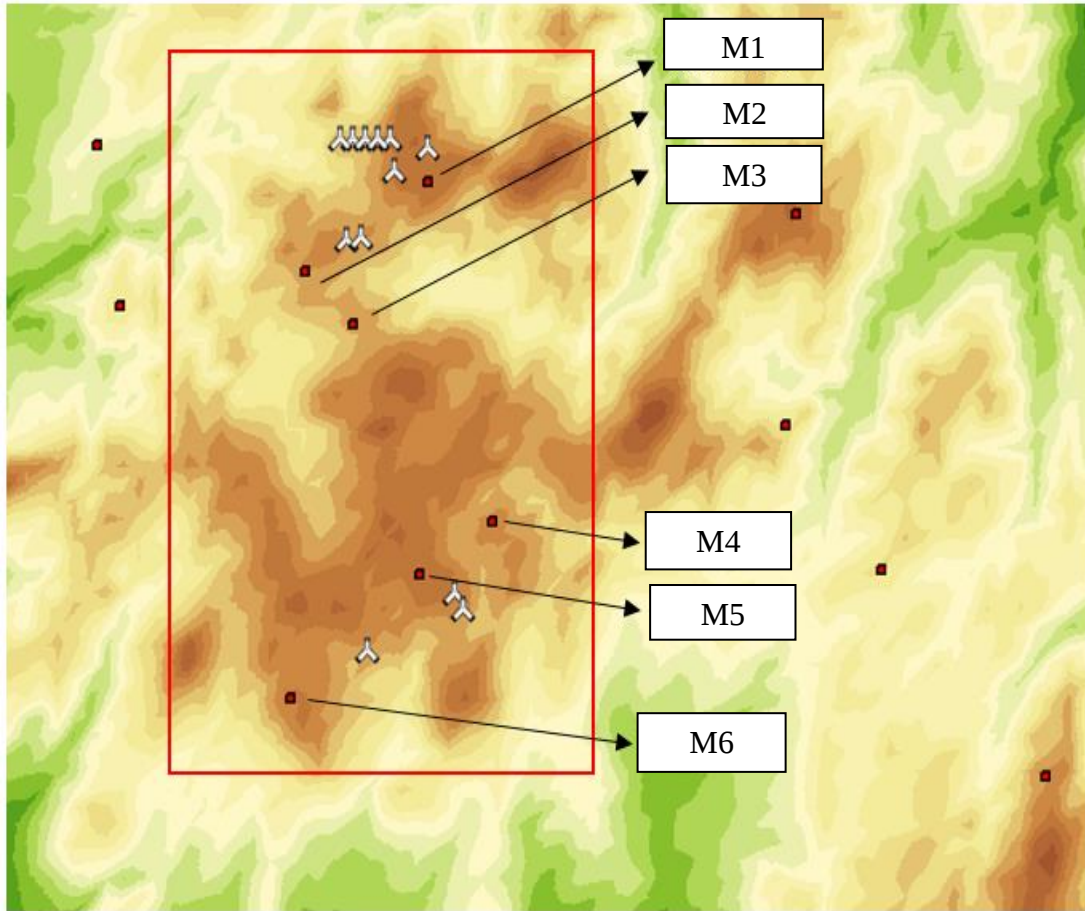


Şekil 3.3: Sahanın pürüzlülük yapısı

3.4 Ölçüm Direkleri

2009 yılında 53m'lik üç adet kafes tipi ölçüm direği (M1, M2, M3) kurulmuştur (Şekil 3.4). M1 ve M2'nin bu çalışmaya kadar 9 yıllık verisi toplamıştır. Öte yandan M3 ölçüm direğinin 20 aylık verisi bulunmaktadır. Buna ek olarak, Şekil 3.12'de de görüleceği üzere 2010 yılında 64m'lik 2 adet kafes tipi ölçüm direği (M4, M6) kurulmuştur ve bu dönemde M4 8.3 aylık, M6 ise 1 yıllık veri toplamıştır ve son olarak 2011 yılında 65m'lik M5 kurulmuş ve bu direktan ve 7 yıllık veri toplanmıştır.

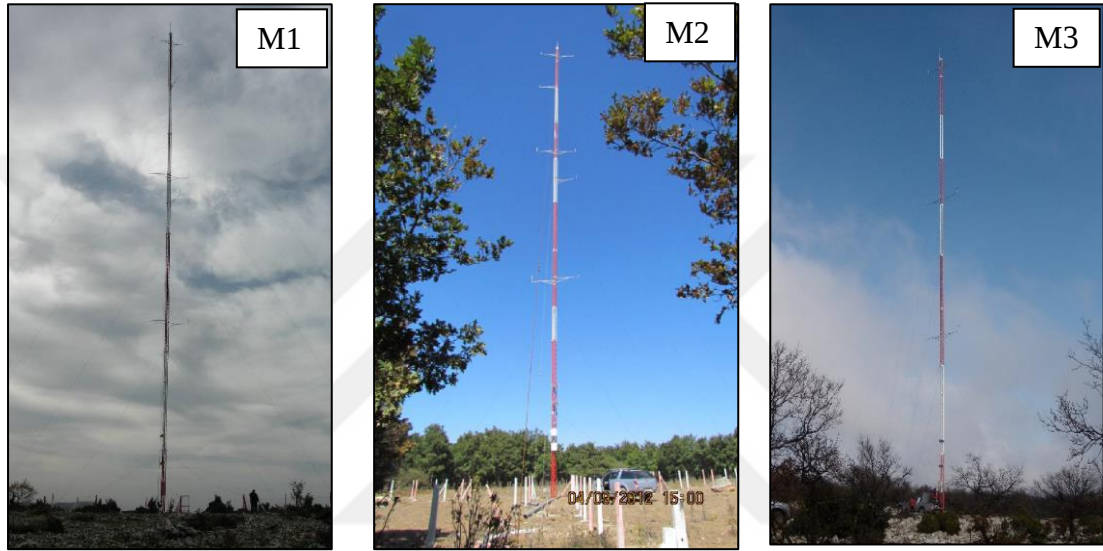
Şekil 3.4'de de görüleceği üzere, ölçüm direkleri sahayı temsil eden noktalara kurulan bu direklerin tüm işletme ve bakım müdahaleleri, sensör değiştirmeleri, direk konfigürasyonları, kaydedici ayarları ölçüm süresi boyunca düzenli bir şekilde kontrol edilmiş ve direklerle ilgili belirsizlikler minimuma indirgenmiştir.



Şekil 3.4 : Sahada bulunan ölçüm direklerinin konumu

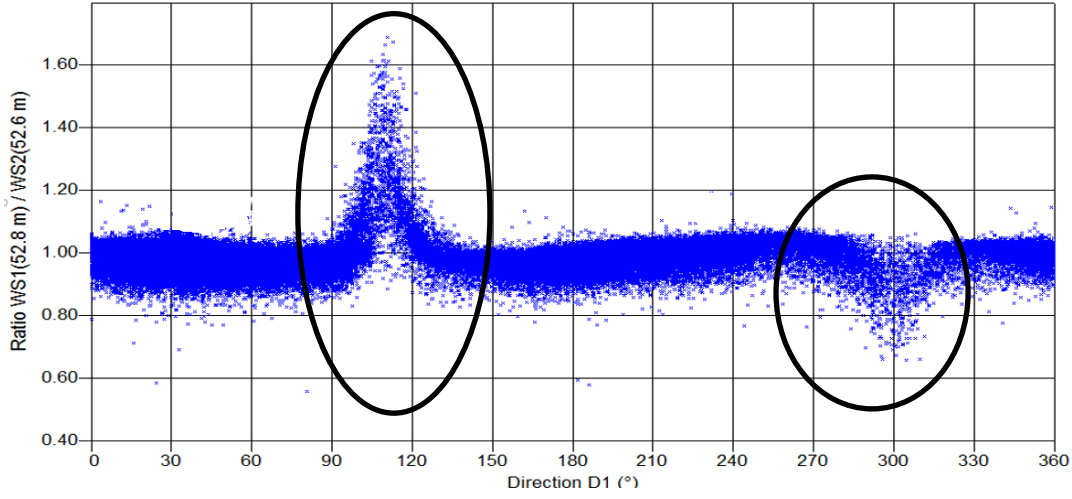
Çizelge 3.1 : M1, M2 ve M3 Ölçüm direği bilgileri

Ölçüm Direği	M1	M2	M3
Ölçüm Periyodu	01.02.2009 08.01.2018	06.02.2009 01.01.2018	30.01.2009 24.09.2010
Ölçüm Yüksekliği	53 m	53 m	53 m
Ortalama Rüzgar Hızı	7.14 m/s	7.33 m/s	7.49 m/s
Hasarsız Data Oranı	94.37 %	87.80 %	88.55 %
Türbülans Oranı	13.77 %	11.33 %	11.33 %

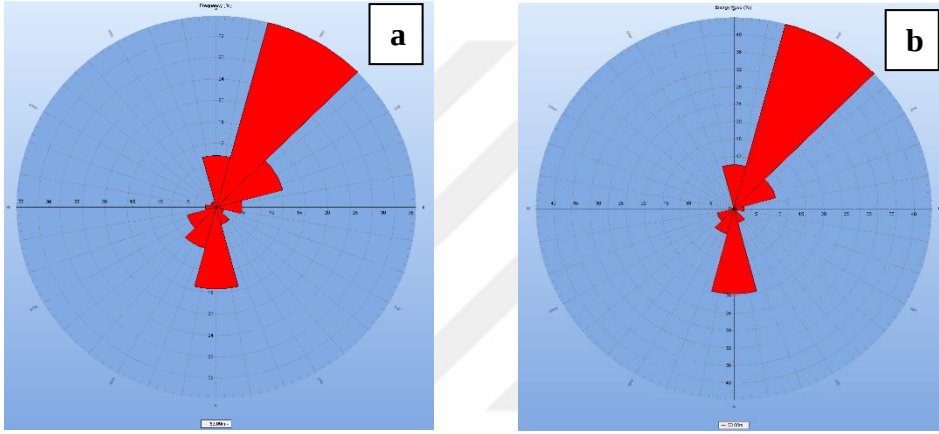


Şekil 3.5 : M1, M2 ve M3 ölçüm direkleri

M1, 53 m yüksekliğe sahip kafes tipi bir ölçüm direğidir Çizelge 3.1’de de belirtildiği üzere 9 yıllık bir ölçüme sahiptir bu ölçüm direği 6 anemometre, 2 yön sensörü 1 sıcaklık, 1 nem ve 1 basınç sensöründen oluşmaktadır ve sensör yükseklikleri sırasıyla A1 53 m, A2 53 m, A3 34 m, A4 34 m, A5 18 m, A6 18 m. Wind vanelerde ise D1 27 m, D2 15 m. T/RH 8 m, basınç sensörü P 6 m şeklindedir. Data analiz sürecinde görüldüğü üzere ölçüm direği Şekil 3.7’de de görüleceği üzere hakim yönün 30 derece olmasından kaynaklı 30 dereceye kurulmuştur, direğin yapısı itibariyle bazı sektörlerde data üzerinde bozulmalar tespit edilmiştir. Şekil 3.6’dan da görüleceği üzere rüzgar 90 ve 135 derecelerden estiğinde A2, A1 sensörünü tutan boom kolundan etkilenmektedir. Diğer yandan, rüzgar 270 ve 330 sektörlerinden estiğinde A1, A2 sensörünü tutan boomdan etkilenmektedir. Bu yüzden tepe anemometrelerde etkilenmiş sektörler aynı seviyedeki diğer sensor ile düzeltilmiştir ve bu işlem sonucunda iki sensörden sentez bir data serisi oluşturulmuştur.



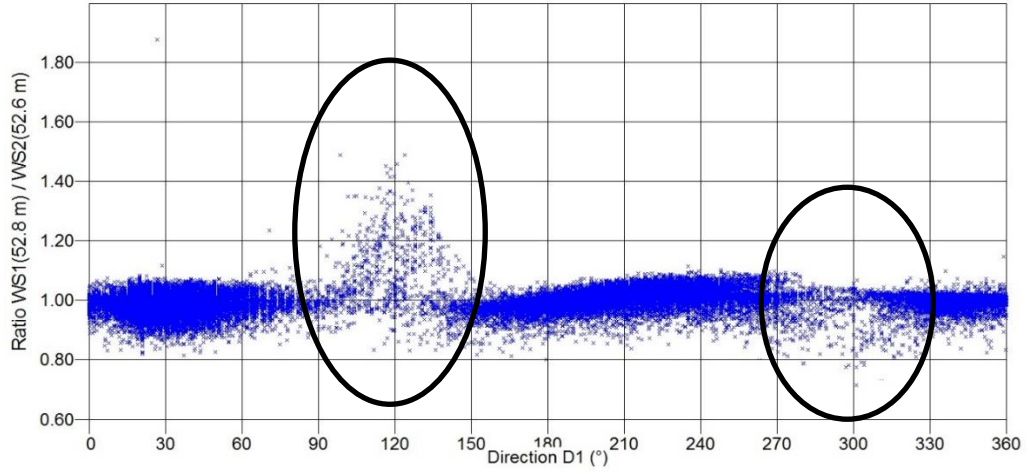
Şekil 3.6 : M1 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi



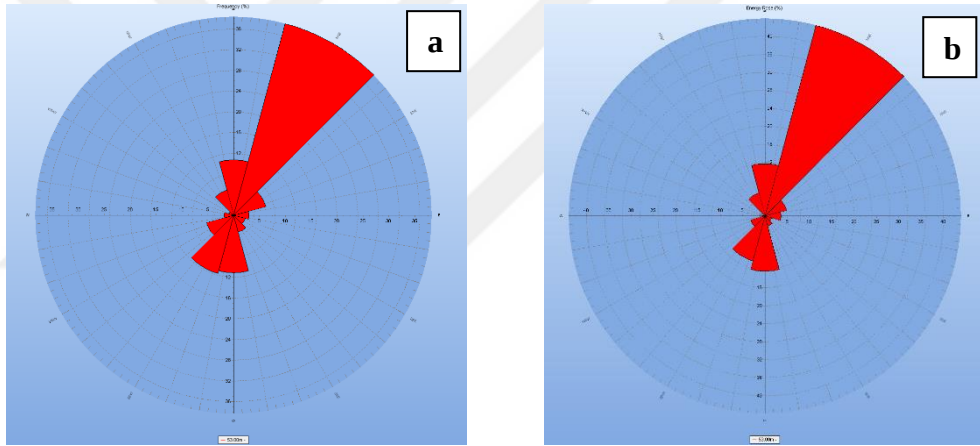
Şekil 3.7 : M1 Sektörel: (a) Rüzgar dağılımı. (b) Enerji dağılımı

M2, 53 m yüksekliğe sahip kafes tipi bir ölçüm direğidir Çizelge 3.1’de de belirtildiği üzere 9 yıllık bir ölçüme sahiptir bu ölçüm direği 6 anemometre, 2 yön sensörü 1 sıcaklık, 1 nem ve 1 basınç sensöründen oluşmaktadır ve sensör yükseklikleri sırasıyla A1 53 m, A2 53 m, A3 34 m, A4 34 m, A5 18 m, A6 18 m. Wind vanelerde ise D1 27 m, D2 15 m. T/RH 8 m, basınç sensörü P 6 m şeklindedir. Bu direk, 28 Şubat 2011 tarihinde şiddetli hava koşulları nedeniyle yıkılmış, ardından 16 Mayıs 2011’de aynı yapılandırmayla tekrar aynı yere dikilmiştir. Data analiz sürecinde ve Şekil 3.9’de de görüldüğü üzere ölçüm direği hakim yönünün 30 derece olmasından kaynaklı 30 dereceye kurulmuştur, direğin yapısı itibarıyla bazı sektörlerde data üzerinde bozulmalar tespit edilmiştir. Şekil 3.8’den de görüleceği üzere rüzgar 90 ve 150 derecelerden estiğinde A2, A1 sensörünü tutan boom kolundan etkilenmektedir. Diğer yandan, rüzgar 270 ve 330 sektörlerinden estiğinde A1, A2 sensörünü tutan boomdan etkilenmektedir. Bu

yüzden tepe anemometrelerde etkilenmiş sektörler diğer aynı seviyedeki diğer sensor ile düzeltilmiştir ve bu işlem sonucunda iki sensörden sentez bir data serisi oluşturulmuştur.



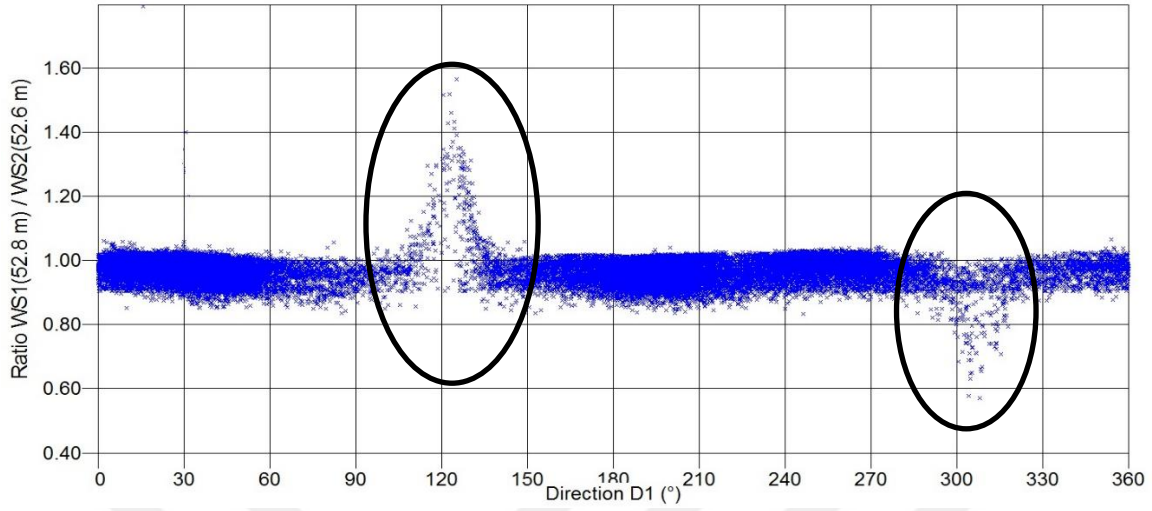
Şekil 3.8 : M2 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi



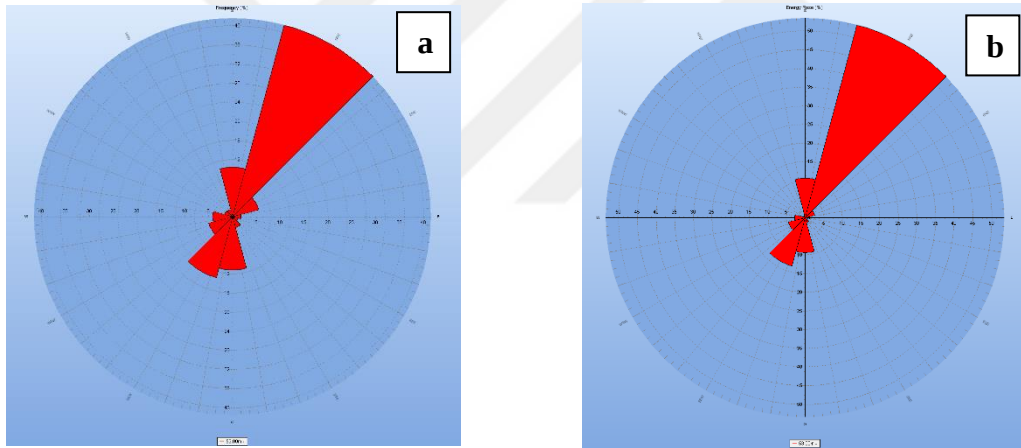
Şekil 3.9: M2 Sektörel: (a) Rüzgar dağılımı. (b) Enerji dağılımı

M3, 53 m yüksekliğe sahip kafes tipi bir ölçüm direğidir Çizelge 3.1 de belirtildiği üzere 9 yıllık bir ölçüme sahiptir bu ölçüm direği 6 anemometre, 2 yön sensöründen oluşmaktadır ve sensör yükseklikleri sırasıyla A1 53 m, A2 53 m, A3 34 m, A4 34 m, A5 18 m, A6 18 m. Wind vanelerde ise D1 27 m, D2 15 m. Data analiz sürecinde ve Şekil 3.11’den de görüldüğü üzere ölçüm direği hakim yönün 30 derece olmasından kaynaklı direk 30 dereceye kurulmuştur, direğin yapısı itibarıyla bazı sektörlerde data üzerinde bozulmalar tespit edilmiştir. Şekil 3.10’dan da görüleceği üzere rüzgar 100 ve 140 derecelerden estiğinde A2, A1 sensörünü tutan boom kolundan etkilenmektedir. Diğer yandan, rüzgar 285 ve 330 sektörlerinden estiğinde A1, A2 sensörünü tutan boomdan etkilenmektedir. Bu yüzden tepe anemometrelerde etkilenmiş sektörler diğer aynı seviyedeki diğer sensor ile

düzeltilmiştir ve bu işlem sonucunda iki sensörden sentez bir data serisi oluşturulmuş ve 24 Eylül 2010 tarihinde sökülüştür.



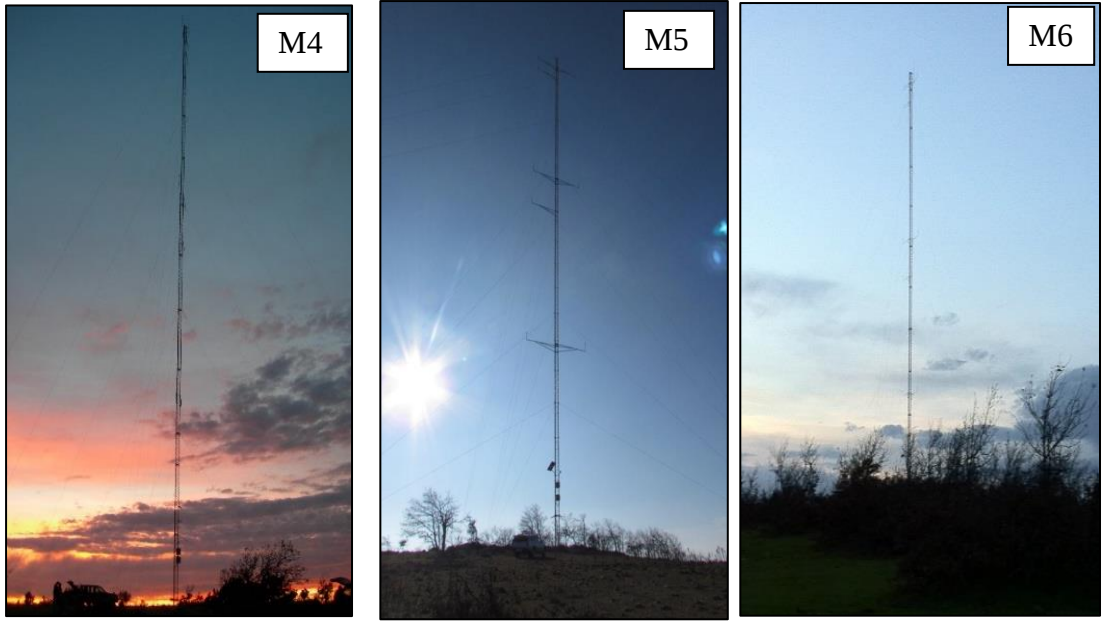
Şekil 3.10 : M3 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi



Şekil 3.11 : M3 Sektörel: (a) Rüzgar dağılımı. (b) Enerji dağılımı

Çizelge 3.2 : M4, M5 ve M6 Ölçüm direği bilgileri

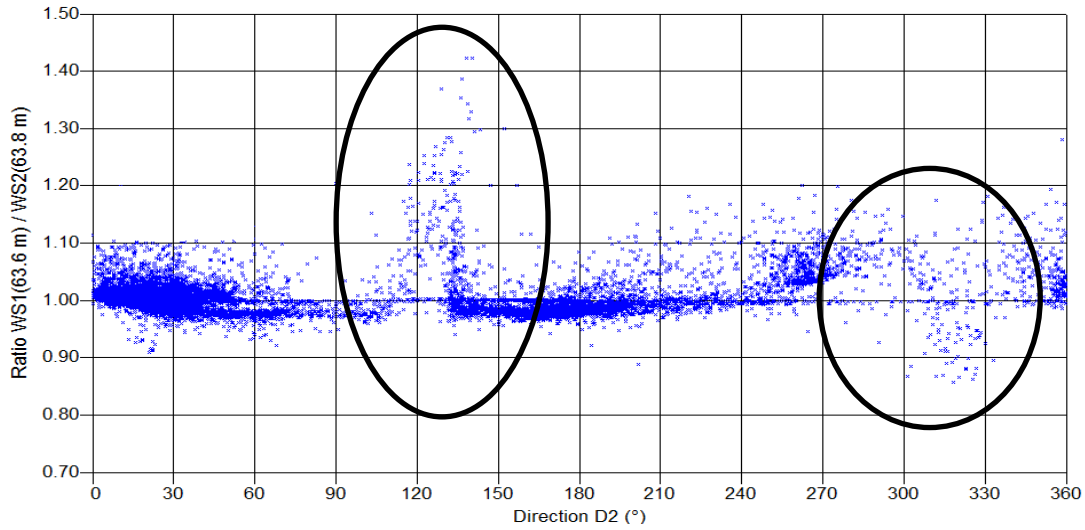
Ölçüm Direği	M4	M5	M6
Ölçüm Periyodu	18.06.2010 26.02.2011	24.11.2011 25.12.2017	18.06.2010 05.07.2011
Ölçüm Yüksekliği	64 m	65 m	64 m
Ortalama Rüzgar Hızı	8.21 m/s	7.92 m/s	7.14 m/s
Hasarsız Data Oranı	61.29 %	91.15 %	84.90 %
Türbülans Oranı	10.44 %	12.47 %	11.91 %



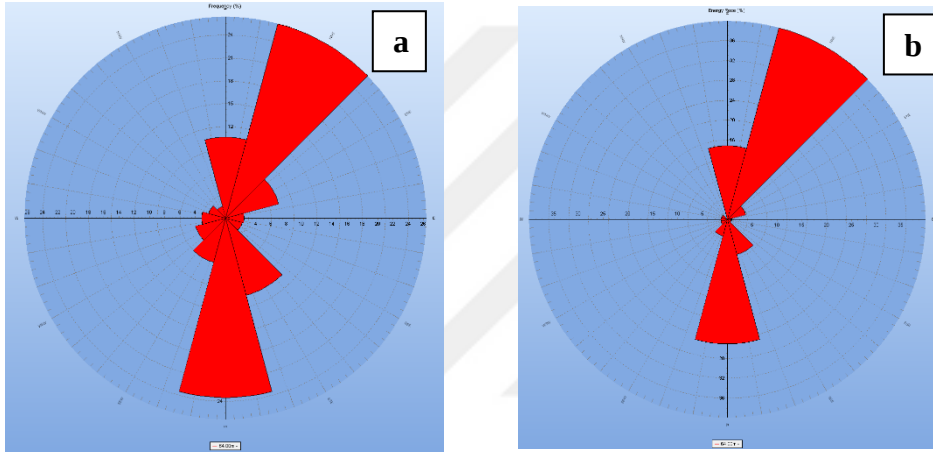
Şekil 3.12 : M4, M5 ve M6 ölçüm direkleri

M4, 64 m yüksekliğe sahip kafes tipi bir ölçüm direğidir Çizelge 3.2’de de belirtildiği üzere 9 yıllık bir ölçüme sahiptir bu ölçüm direği 6 anemometere, 2 yön sensörü 1 sıcaklık sensöründen oluşmaktadır ve sensör yükseklikleri sırasıyla A1 64 m, A2 64 m, A3 40 m, A4 40 m, A5 18 m, A6 18 m. Wind vanelerde ise D1 61 m, D2 35 m. Sıcaklık T 8 m, Basınç sensörü P 6 m şeklindedir. Data analiz sürecinde ve Şekil 3.14’de de görüldüğü üzere ölçüm direği hakim yönün 30 derece olmasından kaynaklı 30 dereceye kurulmuştur, direğin yapısı itibarıyla bazı sektörlerde data üzerinde bozulmalar tespit edilmiştir. Şekil 3.13’den da görüleceği üzere rüzgar 100 ve 150 derecelerden estiğinde A2, A1 sensörünü tutan boom kolundan etkilenmektedir. Diğer yandan, rüzgar 285 ve 330 sektörlerinden estiğinde A1, A2 sensörünü tutan boomdan etkilenmektedir. Bu yüzden tepe anemometrelerde etkilenmiş sektörler diğer aynı seviyedeki diğer sensor ile düzeltilmiştir ve bu işlem sonucunda iki sensörden sentez bir data serisi oluşturulmuş ve 28 Şubat 2011 tarihinde sökülüştür. Kısa periyot ve düşük iyileşme oranı nedeniyle anemometre oranı çok dağınık görünüyor. (8.3 Ay -% 61.9 RR)

M5, 64 m yüksekliğe sahip kafes tipi bir ölçüm direğidir Çizelge 1 de de belirtildiği üzere 9 yıllık bir ölçüme sahiptir bu ölçüm direği 6 anemometre, 2 yön sensörü 1 sıcaklık, 1 nem ve 1 basınç sensöründen oluşmaktadır ve sensör yükseklikleri sırasıyla A1 64 m, A2 64 m, A3 40 m, A4 40 m, A5 18 m, A6 18 m. Wind vanelerde ise D1 61 m, D2 35 m. Sıcaklık T 8 m, Basınç sensörü P 6 m şeklindedir. şeklindedir

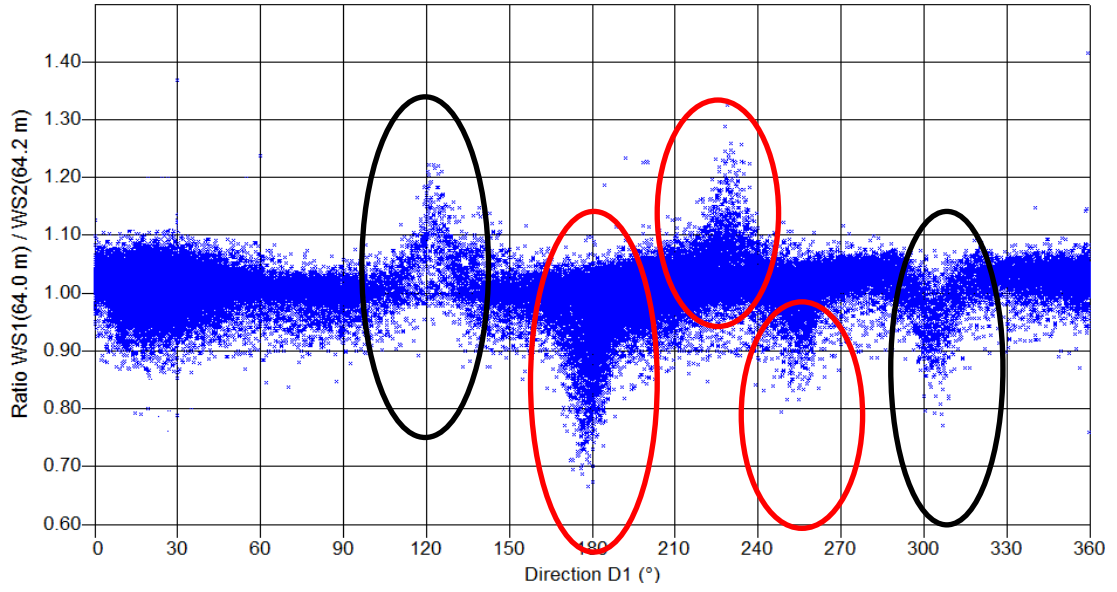


Şekil 3.13 : M4 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi

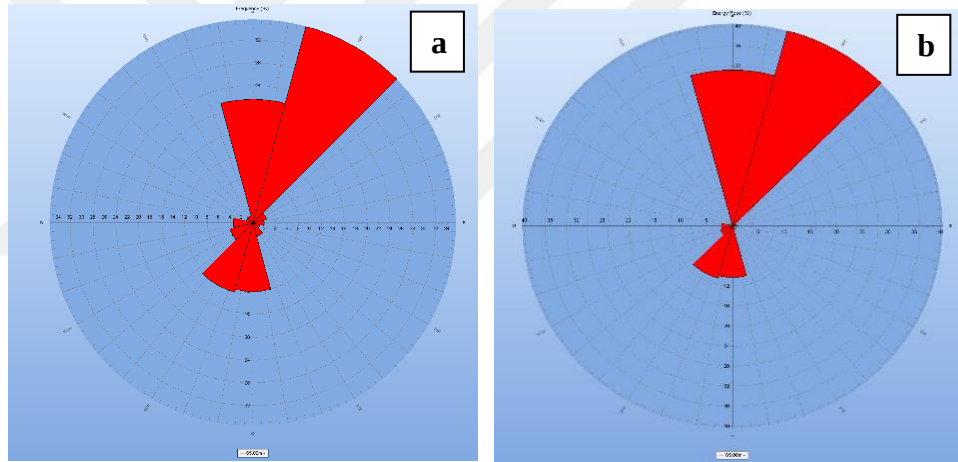


Şekil 3.14 : M4 Sektörel: (a) Rüzgar dağılımı. (b) Enerji dağılımı

Bu direk, 28 Şubat 2011 tarihinde şiddetli hava koşulları nedeniyle yıkılmış, ardından 25 Kasım 2011'de farklı yapılandırmayla tekrar aynı yere dikilmiştir bu nedenle analizde sadece 25 Kasım 2011 den sonraki kısım kullanılmıştır. Data analiz sürecinde ve Şekil 3.16'de görüldüğü üzere ölçüm direği hakim yönün 30 derece olmasından kaynaklı 30 dereceye kurulmuştur, direğin yapısı itibariyle bazı sektörlerde data üzerinde bozulmalar tespit edilmiştir. Şekil 3.15'den de görüleceği üzere rüzgar 100 ve 150 derecelerden estiğinde A2, A1 sensörünü tutan boom kolundan etkilenmektedir. Diğer yandan, rüzgar 285 ve 330 sektörlerinden estiğinde A1, A2 sensörünü tutan boomdan etkilenmektedir. Bu yüzden tepe anemometrelerde etkilenmiş sektörler diğer aynı seviyedeki diğer sensor ile düzeltilmiştir ve bu işlem sonucunda iki sensörden sentez bir data serisi olusturulmuştur.



Şekil 3.15 : M5 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi

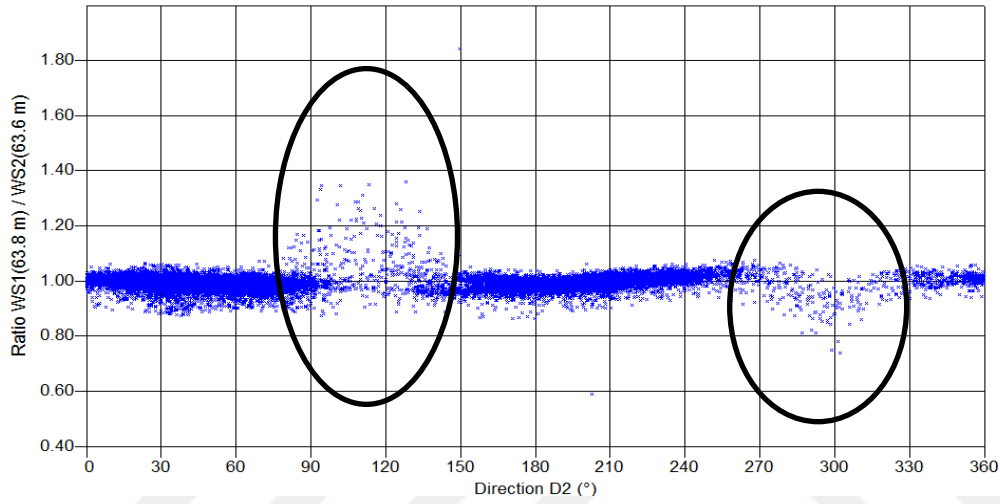


Şekil 3.16 : M5 Sektörel: (a) Rüzgar dağılımı. (b) Enerji dağılımı

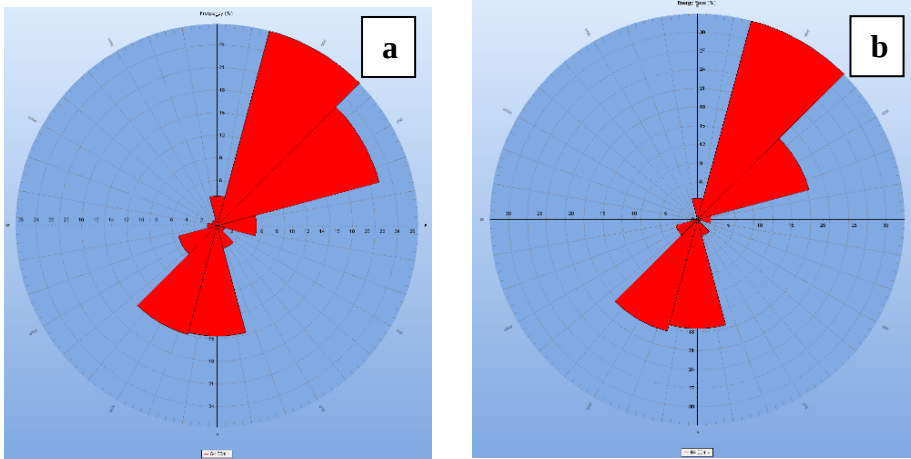
Santralin 3. bölümünün kurulumundan sonra, bazı türbinler M5'nin rüzgar akışını etkiledi. Part 3'ün etkisi 25 Kasım 2014'ten sonra Şekil 3.15'te görülebilir. Bu nedenle etkilenen sektörün verileri geçersiz kılınmıştır.

M6, 64 m yüksekliğe sahip kafes tipi bir ölçüm direğidir Çizelge 2'de de belirtildiği üzere 9 yıllık bir ölçüme sahiptir bu ölçüm direği 6 anemometre, 2 yön sensörü 1 sıcaklık, 1 nem ve 1 basınç sensöründen oluşmaktadır ve sensör yükseklikleri sırasıyla A1 64 m, A2 64 m, A3 40 m, A4 40 m, A5 18 m, A6 18 m. Wind vanelerde ise D1 61 m, D2 35 m. Sıcaklık T 8 m, Basınç sensörü P 6 m şeklindedir. Data analiz sürecinde ve Şekil 3.18'den görüldüğü üzere ölçüm direği hakim yönün 30 derece

olmasından kaynaklı 30 dereceye kurulmuştur, direğin yapısı itibariyle bazı sektörlerde data üzerinde bozulmalar tespit edilmiştir. Şekil 3.17'den de görüleceği üzere rüzgar 100 ve 150 derecelerden estiğinde A2, A1 sensörünü tutan boom kolundan etkilenmektedir. Diğer yandan, rüzgar 285 ve 330 sektörlerinden estiğinde A1, A2 sensörünü tutan boomdan etkilenmektedir. Bu yüzden tepe anemometrelerde etkilenmiş sektörler diğer aynı seviyedeki diğer sensor ile düzeltilmiştir ve bu işlem sonucunda iki sensörden sentez bir data serisi oluşturulmuştur. 5 Temmuz 2010 tarihinde sökülüştür.



Şekil 3.17 : M6 tepe anemometrelerdeki gölgelenme etkisi



Şekil 3.18 : M6 Sektörel: (a) Rüzgar dağılımı. (b) Enerji dağılımı

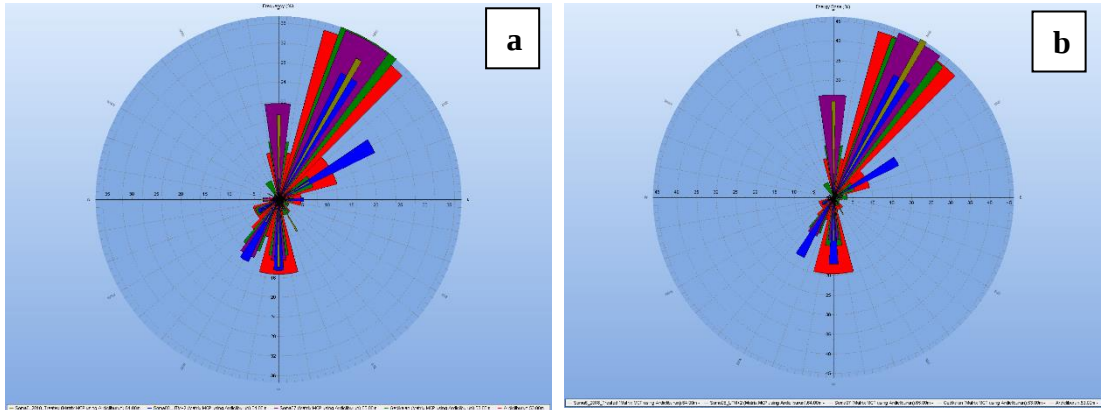
3.5 Uzun Vadeli Referans Verilerin Analizi

Lokal rüzgar ölçümlerini uzun vadede ayarlamak için, kaliteli referans verilerine sahip olmak gerekir. Veri tutarlılığı, projeye olan uzaklık, toparlanma oranı, uzun vadeli eğilim, uzun vadeli rüzgar hızı, rüzgar gülü ve arasındaki korelasyon katsayıları dikkate alınarak MERRA ve Vortex dahil olmak üzere birçok uzun vadeli referans veri seti analiz edilmiştir. Son olarak, Çizelge 3.3’de de belirtilen ve daha az belirsizlik getirmesi nedeniyle uzun vadeli referans için M1 ölçüm direği (9 Yıl) (01/02/2009 - 08/01/2018) seçilmiştir.

Çizelge 3.3 : Mevcut referans verisinin ana özellikleri

Referans Verinin Adı	İstasyon Tipi	Ölçüm Yüksekliği (m)	Ortalama Hız (m/s)	Ölçüm Periyodu	Hatasız Data Oranı	Projeye Uzaklık
M1	Kafes	53 m	7.14 m/s	01/02/2009 08/01/2018	94.37 %	4.3 km

Uzun vadeli M2, M3, M4, M5, M6 ve uzun vadeli referans verisi olan M1 ölçüm direğinin aynı dönemi kapsayan 01/02/2009 - 08/01/2018 yön bilgisi Şekil 3.9’da sunulmuştur. 6 direkte gösteriyor ki bu sahanın hakim yönü 30 derecedir ve türbinler bu bilgi doğrultusunda yerleştirilmelidir.



Şekil 3.19 : M1, M2, M3, M4,M5 ve M6 Sektörel

(a) Rüzgar dağılımı. (b) Enerji dağılımı

Uzun vadeli rüzgar potansiyelini değerlendirmek için birkaç rekonstrüksiyon yöntemi karşılaştırılmış ve sonuç olarak Çizelge 3.4 de de belirtildiği gibi WindPro tarafından Matrix MCP özellikle rüzgar hızları ve yönleri arasında doğrusal olmayan transfer fonksiyonunun bulunduğu düşük korelasyon katsayısı olan senaryolarda

daha etkili olduğu için tercih edilmiştir. Ayrıca Matriks MCP rüzgar hızı ve rüzgar yönü değişikliklerinin gözlem matrisi üzerine yerleştirilmiş ortak bir dağıtım yoluyla rüzgar hızı ve rüzgar yönündeki değişiklikleri modeller. Matriks MCP yaparken veri istatistiklerine takılan polinomları veya uygun olan yerlerde doğrudan ölçülen örnekleri kullanır. Regresyon modeliyle karşılaştırıldığında Matrix, verileri bir yön sektöründen diğerine aktarmaya olanak tanıdığı için rüzgar boğumunun dönüşünü gerçekleştirir.

Çizelge 3.4 : Ölçümler ve Veriler arasındaki korelasyon

Ölçüm Direği Adı	Sıklık	Korelasyon Katsayısı	MCP Metodu	Final Periyot	Final Ortalama Hız (m/s)
M2	Saatlik	88.83%	Matrix	01/02/2009 08/01/2018	7.38m/s
M3	Saatlik	85.73%	Matrix	01/02/2009 08/01/2018	7.45 m/s
M4	Saatlik	84.37%	Matrix	01/02/2009 08/01/2018	8.59 m/s
M5	Saatlik	81.29%	Matrix	01/02/2009 08/01/2018	8.14 m/s
M6	Saatlik	92.57%	Matrix	01/02/2009 08/01/2018	7.49 m/s

3.6 Dikey Ekstrapolasyon Analizi

Dikey ekstrapolasyon, referans süresi boyunca Meteodyn CFD tarafından simüle edilmiştir. Dikey profiller tüm direklerin ölçülü ve modellenmiş rüzgar shear ı ile kontrol edilmiştir. Çizelge 3.5 de de görüleceği üzere Meteodyn CFD'nin direk noktalarında ölçülen shear katasayı ile çok benzer sonuçlar modellediği görülmüştür. Bu nedenle, dikey ekstrapolasyon, rüzgar modeli yazılımı tarafından yapılmasına izin verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Ölçülen ve modellenen ortalama rüzgar shear katsayıları

Ölçüm Direği Adı	M1	M2	M3	M4	M5	M6
A1 Yükseklik	53	53	64	64	53	64
A2 Yükseklik	35	35	40	40	35	40
A3 Yükseklik	18	18	18	18	18	18
Ölçülen Shear Katsayısı	0.10	0.34	0.08	0.12	0.19	0.15
Modellenen Shear Katsayısı	0.09	0.21	0.12	0.11	0.21	0.12

3.7 Scada Data Analizi

Önümüzdeki yıllarda ülkemizdeki yatırımcıların yeni lisanslar almak yerine mevcut kurulu santrallerinde kapasite artışına gidecekleri beklenmektedir dolayısıyla bu çalışmada, hali hazırda toplanmış ancak uygun veri yorumlama araçlarının bulunmaması nedeniyle uzun süredir göz ardı edilen rüzgar türbinlerinden toplanan SCADA verilerini yorumlayarak daha tutarlı üretim tahminlerinin yapılması amaçlanmıştır . Bu çalışmanın en önemli katkısı ham SCADA verilerinin işlenerek etkili bir tahmin yöntem geliştirilmesidir.

Çalışma boyunca bu santraldeki 169 türbindeki 5 tam yıllık üretim verileri toplanmıştır bu verilerden mevcut hata kodları, buzlanma kayıpları, arız kayıpları vs gibi kayıplar çıkarılarak model çıktısındaki eş üretim sonuçlarıyla kıyaslanabilecek hale getirilmiştir bu sayede model ile gerçek arasındaki üretim farkını görebilecek ve modelin hangi noktalarda ne kadar hata yaptığını tespit ederek her bir bölge için doğrulama katsayısı hesaplanabilecektir. Yeni kurulacak türbinlere bulunduğu bölgelerin doğrulama katsayıları uygulanarak gerçekte model arasındaki fark minimuma indirelecektir. Aynı zamanda lineer ve CFD modelin performans testi de yapılmış olacaktır.

3.8 Wasp Modeli

DTU Risø National Laboratory Wind Energy and Atmospheric Physics bölümü tarafından oluşturulan WasP programı 1987 yılından beri rüzgar enerji sektöründe enerji hesaplamaları ve diğer analizler için kullanılmaktadır. WASP rüzgar analizlerini weibull dağılımına göre yapmaktadır. Weibull dağılımına ek olarak bölgenin orografik bilgisi, pürüzlülük bilgisi ve varsa çevredeki engellerin belirtilmesine olanak sağlayan yazılım içi araçlarıyla çevrenin rüzgar atlasının oluşturulmasına olanak sağlar. Bu girdiler ışığında WasP 5 farklı konuda istenilen sonuçlara ulaşılmasına olanak sağlar ki bunlar da şöyledir;

- Ölçüm yapılmış noktadaki gözlemlenmiş rüzgar verisinin karakteristiği.
- Ölçüm verisi kullanılarak akış modelleri sayesinde istenilen alanda oluşturulan rüzgar atlası.
- Rüzgar atlasının kapladığı alan içerisinde istenilen herhangi bir noktanın rüzgâr hızı ve rüzgar yönü bilgisi.

- Kullanılacak rüzgar türbini ve buna bağlı olarak tanımlanmış güç eğrisi sayesinde rüzgar atlasının kapladığı alan içerisinde ulaşılacak güç hesabı.
- Rüzgar çiftliği oluşturmaya olanak sağlayan yapısıyla türbin bazlı ve tüm rüzgar çiftliğini kapsayan güç bilgileri.

WasP lineer bir model yapısına sahiptir ve bu nedenle dağlık, engebeli, bolca vadi ve plato barındıran kompleks arazide önemli ölçüde tahmin hataları kapsamaktadır. Bu hataları elimine edebilmek için göz önünde bulundurulması gereken kriterler şöyledir;

- Ölçüm direğinin modellenen araziye topoğrafik ve rüzgar rejimi açısından temsil ediyor olması,
- Ölçümlerin kalibre edilmiş sensörlerle ve IEC uygun dizayn edilmiş direklerle yapılmış olması,
- Ölçüm direği ve kurulması planlanan santralin olabildiğince az eğimli bir arazide yer alıyor olması,
- Kullanılan yükseklik ve pürüzlülük haritalarının yüksek çözünürlükte ve güvenilirlikte olması,

3.9 Meteodyn WT Modeli

Meteodyn CFD (Computational Fluid Dynamics - Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) tabanlı, RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes - 3D Reynolds Ortalaması Kullanılmış Navier Stokes) çözümüne dayalı, non-lineer (lineer olmayan) bir rüzgar çiftliği tasarım modelidir. Meteodyn WT saha uygunluğunu belirlemek için rüzgar kaynağını, rüzgar santrali tasarımı, rüzgar santrali üretimi ve enerji optimizasyonu hesaplamalarını yapar bu hesaplamaları yaparken arkada Navier Stokes formülleri kullanılır.

3.9.1 Navier Stokes formülleri

Meteodyn WT, kütle ve momentum korunumu kanunlarına dayanan Akışkanlar Mekaniği Navier Stokes formüllerini çözmeye dayanır. (3.1–3.4) arasında yer alan formüller modelin çözdüğü Navier Stokes denklemlerini göstermektedir.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vw}}{\partial z} \quad (3.3)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{vw}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{uw}}{\partial x} \quad (3.4)$$

U, V ve W ortalama rüzgar şiddetinin kartezyen koordinat sistemindeki, sırasıyla, x ve y yatay koordinat ve z düşey koordinat bileşenleridir. P ortalama basınç değeri (hPA) ve ρ hava yoğunluğudur (kg/m^3). u, v ve w ise türbülans değişim bileşenleridir (Meteodyn, n.d.).

3.9.2 Türbülanslı modelleme yöntemi

Türbülans akıları $\overline{uv}$, $\overline{uw}$, $\overline{vw}$, $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, ve $\overline{w^2}$ parametreleriyle, tek-eşitlik K kapama şeması (one-equation K closure sheme) kullanılarak ifade edilir. Method bu parametrelerin korelasyonları ve ortalama gradyan arasındaki oran hipotezine dayanır ve aşağıdaki (3.9.2.1) formüllerini kullanır.

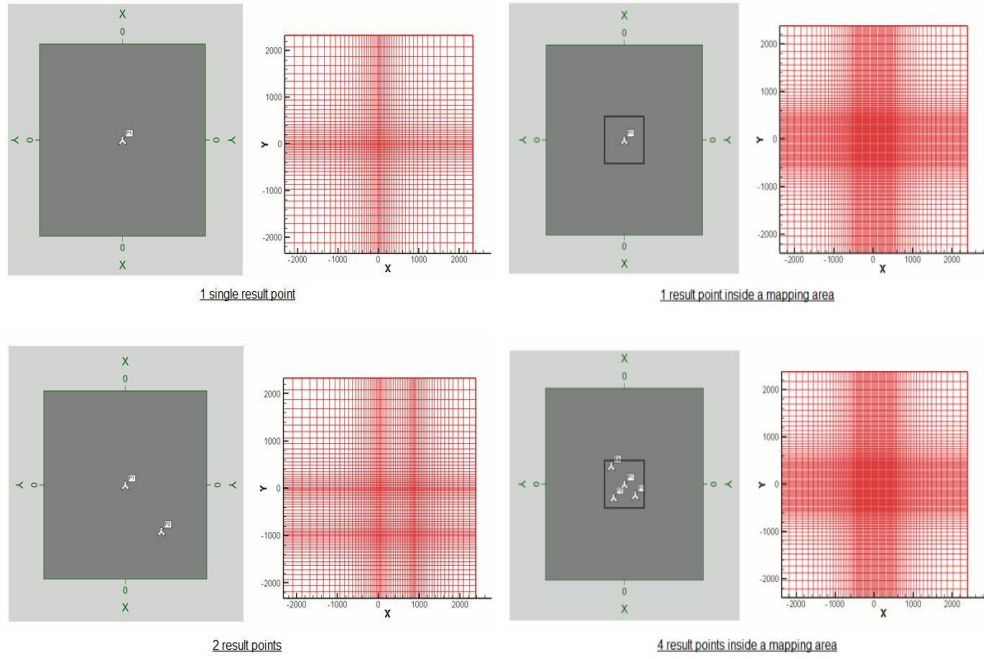
$$-\overline{uv} = -v_T \frac{\partial U}{\partial y}, -\overline{uw} = -v_T \frac{\partial U}{\partial z}, -\overline{vw} = 0 \quad (3.5)$$

Türbülans modelin temel amacı, türbülanslı harekete ait gerilimlerin ortalama akış üzerindeki etkisini tahmin etmektir. Reynold gerilimleri, türbülans değişiminden dolayı ekstra oluşabilecek momentum transferi yansıtmaktadır. Ayrıca model türbinler arasındaki dalga efekti (wake effect)'nin hesaba katılmasını sağlamaktadır, (Meteodyn, n.d.).

3.9.3 Sınır koşulları

Meteodyn Model'inin sınır koşulları; giriş, çıkış, yüzeysel ve hacimsel olmak üzere 4 aşamada incelenir. Giriş hesaplama alanındaki ortalama rüzgar hızının düşey profili, yüzey tabakasındaki logaritmik kurala göre verilir. Türbülanslı kinetik enerji, yüzey tabakasında hesaplama alanına sabit bir değerle girer ve üst sınıra doğru yükseklikle azalan bir profil izler. Yüzey sınır koşulları, Monin-Obukhov teorisi kullanılarak ilk

seviye hücreindeki ortalama rüzgar şiddetinin ve gerçek lokal arazi pürüzlülüğünün bir fonksiyonu olarak oluşturulan logaritmik düşey profil kuralıyla hesaplanmaktadır. Modelin üst ve çıkış sınır koşulları için homojen basınç koşulları uygulanır. Yüzey grid üretimi için model tarafından önerilen minimum yatay çözünürlük 25 m, minimum düşey çözünürlük ise 4 m'dir. Şekil 3.20'de Meteodyn yüzey ağ üretim örneği gösterilmiştir (Meteodyn). Üretilen ağlar modele girilen rüzgar verisi kaynağı ve türbin noktaları gibi hesaplamalarda önemli olan noktalardan geçerek oluşturulur.



Şekil 3.20 : Meteodyn ağ üretimi örneği (Meteodyn)

Hacim grid üretiminde ise eğri hücre üretimini engellemek için yer yüzeyi ile ilişkili olarak verticality parametresi ile ortogonalite kontrol edilir. Verticality parametresi, hücre ile normal yüzey arasındaki açının tanjantına karşılık gelmektedir (Meteodyn).

Sonuç olarak WasP orografisi, pürüzlülük değişimi ve engel modellerinin, rüzgar üzerindeki doğrusal olmayan etkilerinin dikkate alınmadığı yatay rüzgar hızı için basitleştirilmiş daha basit az eğimli ve pürüzsüz sahalarda için önerilen modellerdir. Buna karşın, meteodyn türbülanslı ortam, topografya ve termal etkileri ve ormanların varlığını göz önünde bulunduran türbülans kinetik enerjisi için bir taşıma denkleminin uygulanmasıyla elde edilir. Simülasyonları başlatmak için, model her bir simüle edilmiş rüzgar yönü için termal stabilite olsun veya olmasın, zemine değişken yükseklikte bir logaritmik profil kullanır ve kompleks sahalarda için de tercih edilebilir bir modeldir.

Bu çalışma özelinde incelendiğinde konu alınan santral sahası oldukça kompleks bir topoğrafyaya sahiptir fakat muadil çalışmaların aksine sahayı temsil eden 6 adet ölçüm direği bulunmaktadır bu bağlamda düşünüldüğünde WasP ın Meteodyn karşısındaki performansı incelenecektir.

3.10 Türbin Noktalarının Belirlenmesi

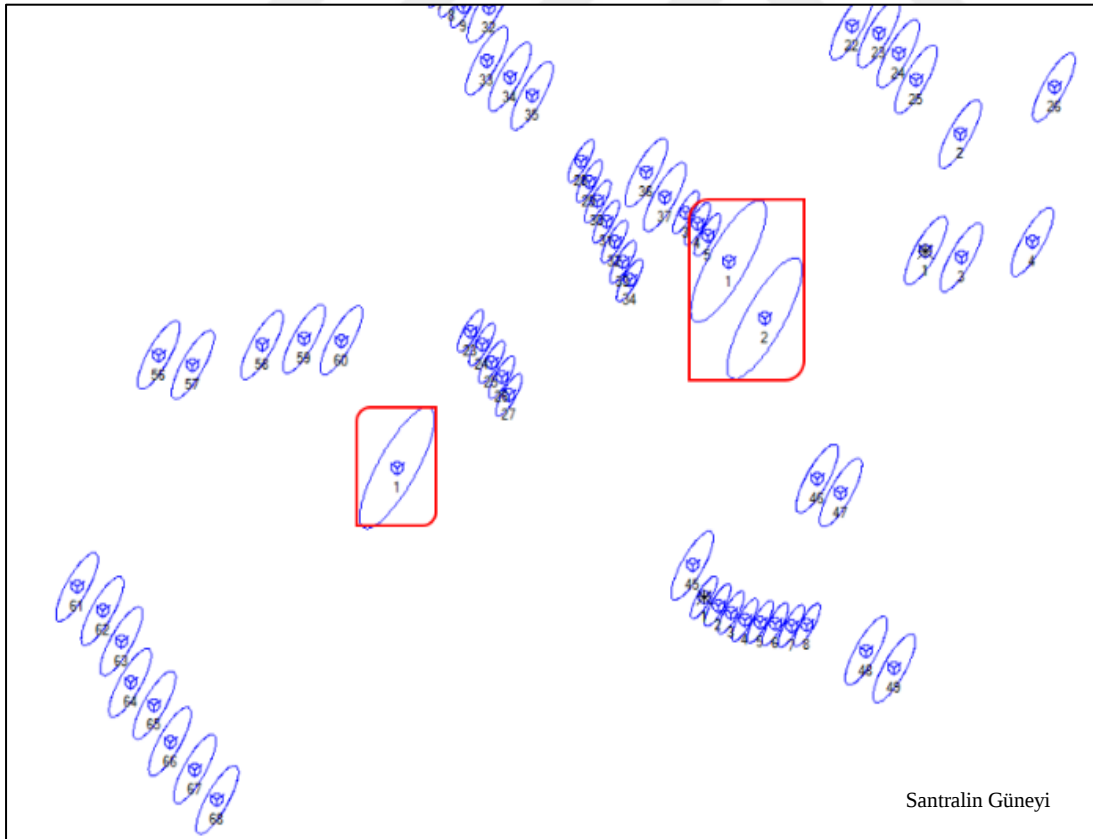
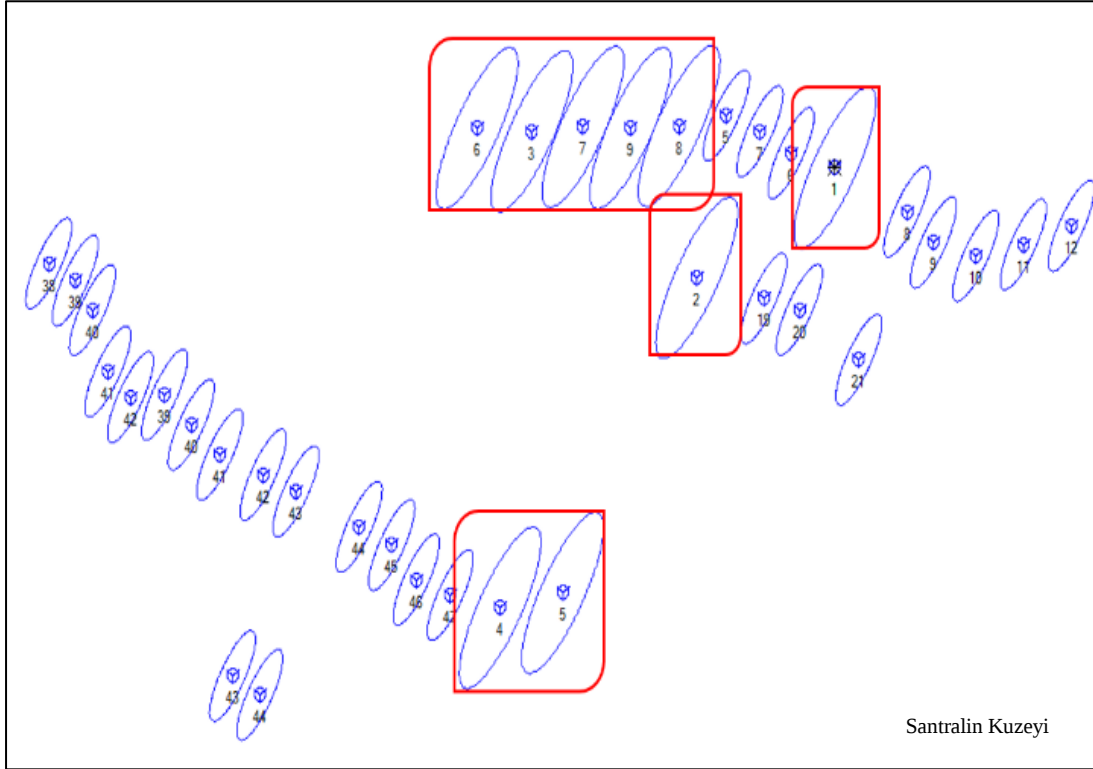
Sahada daha önce de bahsedildiği gibi 169 türbin bulunmaktadır kapasite artışı nedeniyle 12 türbin daha eklenecektir. Bu türbin lokasyonları birçok kısıt göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu kısıtlar; en yüksek enerjiye sahip noktanın bulunması, topografyanın yapısını düşünerek türbinin maruz kalacağı yükleri minimum indirme için endüyük en düşük türblansa sahip noktanın bulunması, idari kısıtlar nedeniyle orman arazisi içerisinde yer almaması, mevcut köy ve yollara yeterli derecede uzak olması gibi kriterler göz önünde bulundurulmuştur.

Yeni kurulacak türbinlerin mevcut kurulu türbinlere olan etkinin ve mevcut kurulu türbinlerin yeni kurulacak türbinlere olan etkisi minimum indirmek, enerji kayıplarını azaltmak ve türbin ömrünü uzatmak için hakim yön olan 30 ° derecede türbin rotor çapının 7 katı ve bu yöne dik acıda türbin çapının 2 katı mesafe göz önünde bulundurulmuş ve türbin dizilimi bu kısıtlar doğrultusunda belirlenmiştir. Şekil 3.21’de de görüldüğü gibi 7Dx2D türbin mesafesi ile son yerleşim oluşturuldu.

Kurulacak türbinlerin mevcut kurulu türbinlere olan etkinin ve mevcut kurulu türbinlerin yeni kurulacak türbinlere türbülans dışında türbin ömürleri konusunda olan etkisi minimum indirmek, enerji kayıplarını azaltmak ve türbin ömrünü uzatmak ve türbin parçaları üzerin oluşacak mekanik yükü minimuma indirip servis ve bakım maliyetlerini minimumda tutmak için Çizelge 3.6’daki gibi bir layout belirlenmiştir.

3.11 Temsili Ölçüm Direğinin Belirlenmesi

Sahada 6 adet ölçüm direği bulunduğu için modelleme bu 12 türbine en yakın olan veya en çok temsil eden ölçüm direğinin dataları kullanılarak yapılmıştır. Çizelge 3.6’dan da konuyla ilgili detaylı bilgiye ulaşılabilir.



Şekil 3.21 : Türbinler arası boşluk ve dizilim (7D x 2D)

Çizelge 3.6 : Türbin noktaları hakkında temel bilgiler

Türbin Adı	En Yakın Ölçüm Direği	Ölçüm Direğine Uzaklık (km)	Yükseklik (m)	WTG – Mast Yükseklik Farkı (m)
T170	M2	0.774	820	20
T171	M3	2.165	753	105
T172	M3	0.941	805	53
T173	M2	0.879	827	13
T174	M2	2.065	730	110
T175	M3	1.332	785	73
T176	M1	1.254	780	3
T177	M1	1.612	792	15
T178	M2	2.370	725	115
T179	M2	1.810	736	104
T180	M2	1.360	805	35
T181	M2	1.572	754	86

3.12 Modelleneyecek Arazinin Yükselti Haritasının Belirlenmesi

1: 25000 m çözünürlüğe sahip topoğrafik veriler, Türkiye Harita Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Bu veriler doğru akış modelinin yapılabimesi için herbir türbinden her yönden 10 km'lik ilave bir alanı kapsayacak şekilde kullanılmıştır.

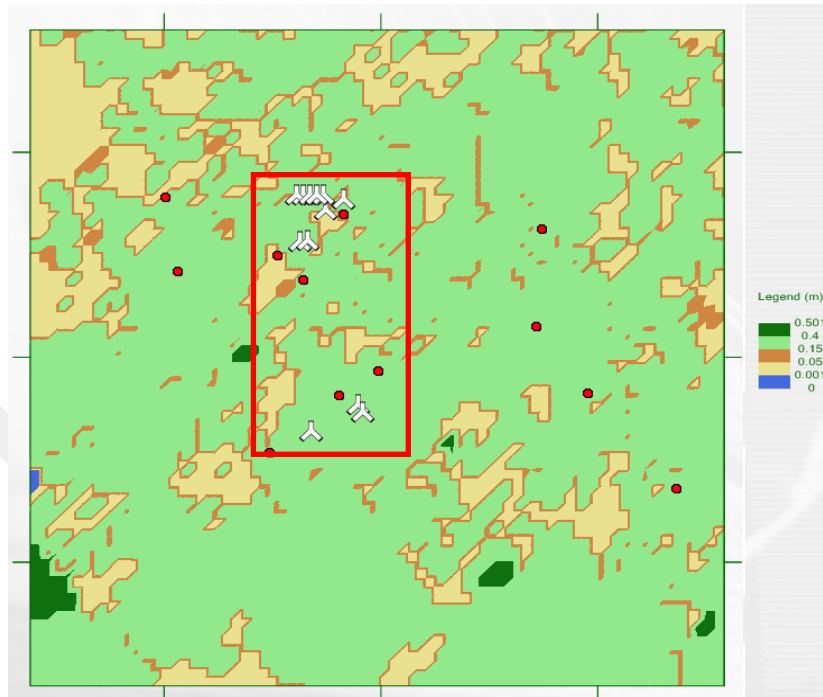
3.13 Modelleneyecek Arazinin Pürüzlülük Haritasının Belirlenmesi

Hava haritalarında bulunan bilgilere dayanarak bir pürüzlülük haritası manuel olarak yapılmıştır ve saha ziyareti sırasında değerlendirilmiştir. Aşağıda belirtilen Çizelge 3.7, saha zemin örtüsüne göre uygulanan pürüzlülüğü detaylandırmaktadır. Bu proje için herhangi bir engel düşünülmemiştir.

Çizelge 3.7 : Sahaya uygulanan pürüzlülük katsayıları

Yer Tipi	Uygulanan Pürüzlülük Katsayısı
Şehir	0.5
Orman	0.4
Çalılık	0.15
Tarım Arazisi	0.05
Çorak Arazi	0.0001

Bu bilgiler doğrultusunda hazırlanan ve saha ziyareti sonrasında gerekli düzeltmelerin yapıldığı pürüzlülük haritasının modele girmeden önceki son görüntüsü Şekil 3.22'deki gibidir.



Şekil 3.22 : Sahanın pürüzlülük haritası

Çizelge 3.8 : Wasp model parametreleri

Parametreler	Standart Wasp Parametreleri	Değiştirilmiş Wasp Parametreleri
Factor in height of boundary layer over land	1	1
Factor in height of boundary layer over water	1	1
Factor in height of min. stab. induced var.	0.002	0.002
Offset heat flux over land (classic)	-40	-100
Offset heat flux over water (classic)	-8	-8
Power law in decay of the stability induced perturbation	1.5	1.5
Rms heat flux over land	100	100
Rms heat flux over water	30	30

3.14 Model parametrelerinin belirlenmesi

Model parametreleri sanal ortamda modellenen atmosferi ve rüzgar akışını gerçeğe en yakın şekilde tahmin edebilmek için modifiye edilebilecek parametrelerdir. Doğru belirlenmesi sonucunda modelin doğruluk payı artacaktır ve her saha için farklı değerlere sahiptir

3.14.1 Wasp Model parametrelerinin belirlenmesi

Wasp parametreleri de yine dikey profili daha iyi modellemek, sahayı çevreleyen koşulları daha iyi temsil etmek ve kaynak değerlendirmesinde daha fazla doğruluk elde etmek için değiştirilmiştir. Çizelge 3.8'de Wasp da yapılan değişimlere detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

3.14.2 Meteodyn Model parametrelerinin belirlenmesi

Meteodyn parametreleri, sahayı çevreleyen koşulları daha iyi temsil etmek, dikey profili daha iyi tanımlamak ve kaynak değerlendirmesinde daha fazla doğruluk elde etmek için değiştirilmiştir. Çizelge 3.9'da Meteodyn de yapılan değişimlere detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

Çizelge 3.9: Meteodyn model parametreleri

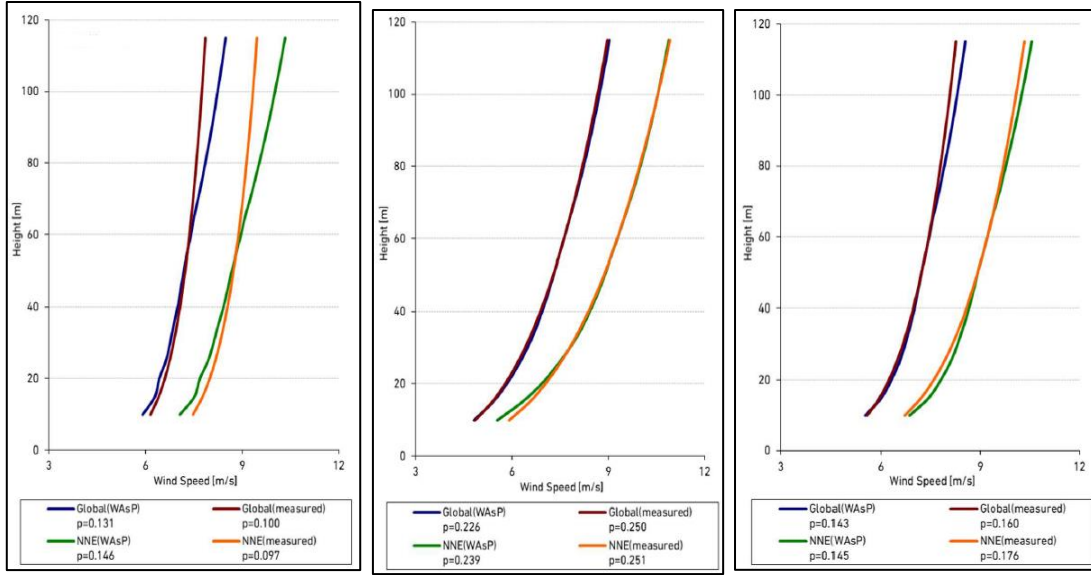
Parametreler	Standart Meteodyn Parametreleri	Değiştirilmiş Meteodyn Parametreleri
Forest Model: Model	Dissipative model	Dissipative model
Forest Model: Buffer layer's height	15	15
Forest Model: Tree height / roughness ratio	20	30
Mesh: Minimal horizontal resolution	25	25
Mesh: Minimal vertical resolution	4	4
Mesh: Horizontal expansion coefficient	1.1	1.1
Mesh: Vertical expansion coefficient	1.2	1.2

3.15 Dikey Profillerin Belirlenmesi

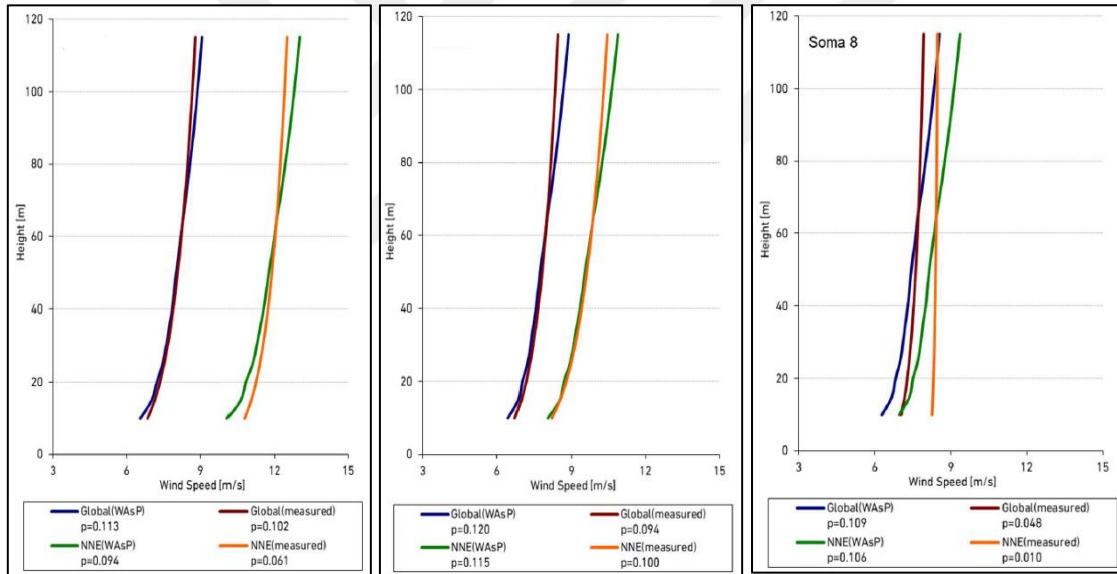
Dikey profil belirlenmesi noktasal olarak gerçek rüzgar profiliyle model profilinin karşılaştırıldığı bir yöntemdir.

3.15.1 Wasp dikey profilin belirlenmesi

Her bir direk için hakim rüzgar yönlerinde ölçülen ve modellenen dikey profil Şekil 3.23 ve 3.24 de sunulmaktadır. WASP model profili, ölçüm ile olan ortalama sapma minimum noktaya getirilene kadar model kalibre edilmiştir.



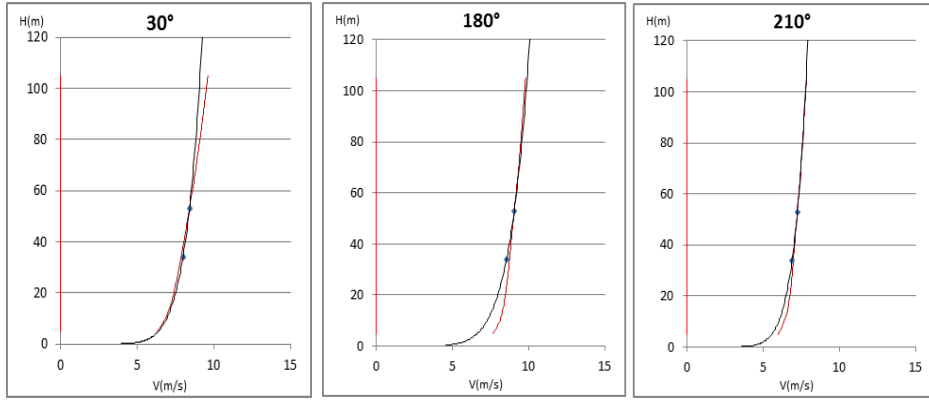
Şekil 3.23 : M1, M2 ve M3 ölçülen ve modellenen dikey profiller



Şekil 3.24 : M4, M5 ve M6 ölçülen ve modellenen dikey profiller

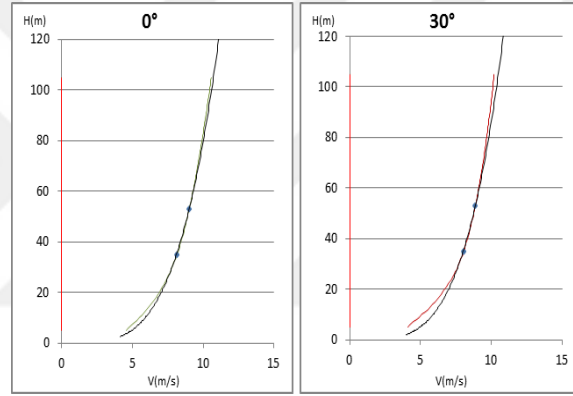
3.15.2 Meteodyn dikey profilin belirlenmesi

Her bir direk için hakim rüzgar yönlerinde ölçülen ve modellenen dikey profil aşağıdaki Şekil 3.25-3.30 aralığında sunulmaktadır. CFD model profili, ölçüm ile olan ortalama sapma değerlerine göre kalibre edilmiş ve en iyi uyum yakalanmıştır. Daha sonra, her direk noktasında her bir sektör için termal kararlılıklar belirlenmiştir.



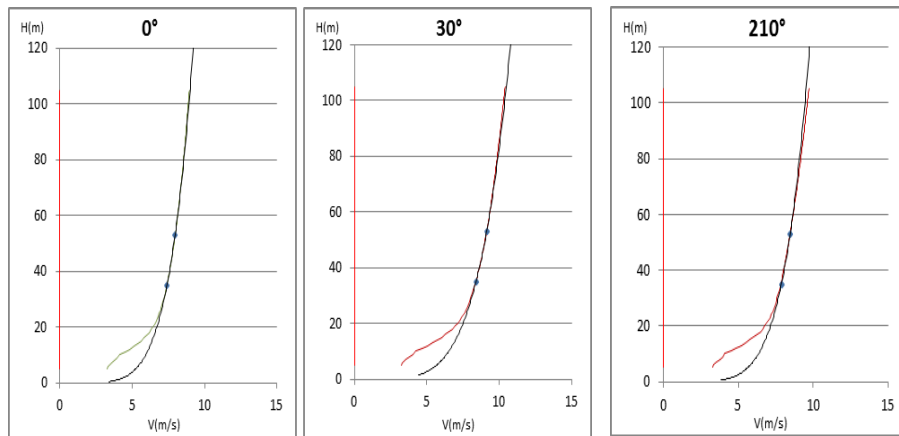
Şekil 3.25 : M1 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri

Şekil 3.25 te de görüleceği üzere M1 direğinin dikey profilleri hakim yönlerde Meteodyn tarafından başarılı bir şekilde modellenmiştir. 30 derece yükseklik arttıkça modelde biraz sapma olsa da ölçüm yapılan aralıkta sonuçlar oldukça tutarlıdır.



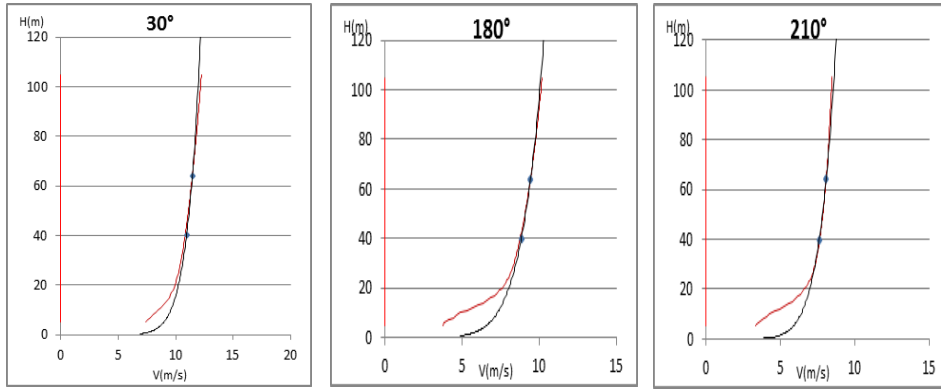
Şekil 3.26 : M2 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri

Şekil 3.26 te de görüleceği üzere M2 direğinin dikey profilleri hakim yönlerde Meteodyn tarafından başarılı bir şekilde modellenmiştir. 30 derece yükseklik arttıkça modelde biraz sapma olsa da ölçüm yapılan aralıkta sonuçlar oldukça tutarlıdır.



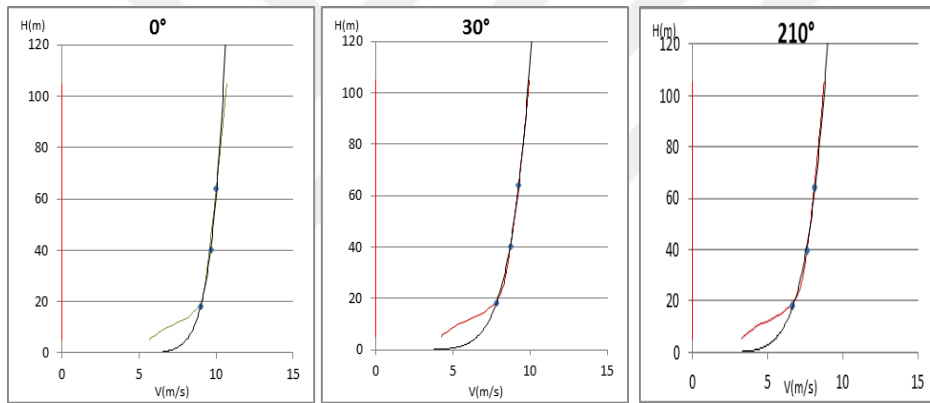
Şekil 3.27 : M3 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri

Şekil 3.27 te de görüleceği üzere M3 direğinin dikey profilleri hakim yönlerde Meteodyn tarafından başarılı bir şekilde modellenmiştir.



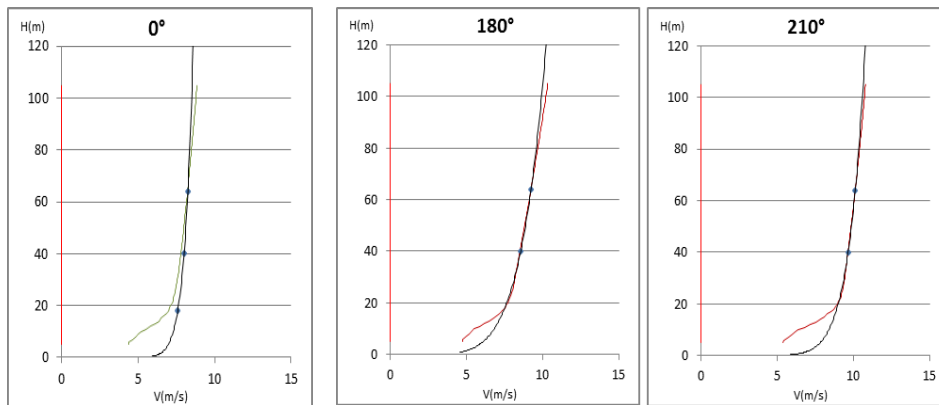
Şekil 3.28 : M4 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri

Şekil 3.28 te de görüleceği üzere M4 direğinin dikey profilleri hakim yönlerde Meteodyn tarafından başarılı bir şekilde modellenmiştir.



Şekil 3.29 : M5 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri

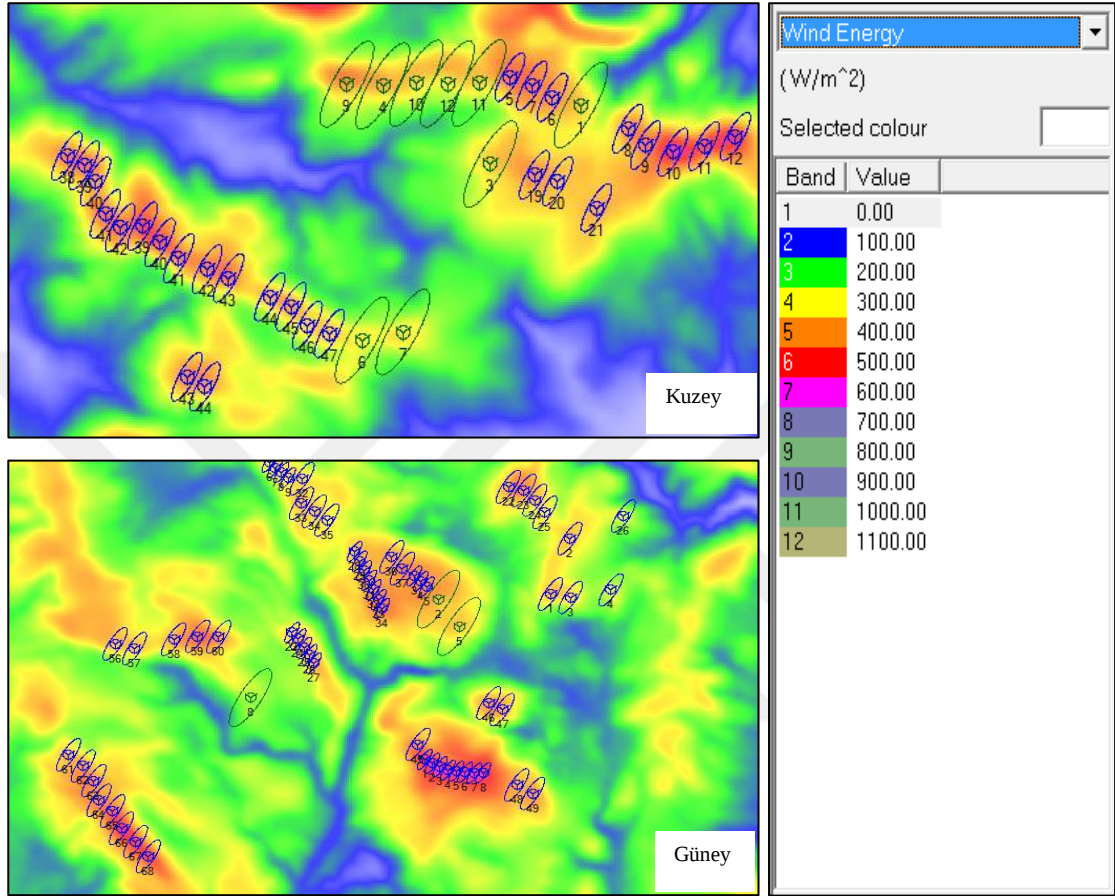
Şekil 3.29 da ve Şekil 3.30 da da görüleceği üzere M5 ve M6 direkerinin dikey profilleri hakim yönlerde Meteodyn tarafından başarılı bir şekilde modellenmiştir.



Şekil 3.30 : M6 ana sektörlerin ölçülen ve modellenen dikey profilleri

3.16 Rüzgar Atlasının Oluşturulması

Yukarıda belirtilen tüm girdilerden en verimli sonuçlar alınacak şekilde atmosferik akış modeli için hazırlanmasının ardından proje alanındaki rüzgar rejimini tahmin etmek için WAsP ve Meteodyn modelleri çalıştırılmıştır. Model sonucu oluşturulan rüzgar atlası Şekil 3.31'deki gibidir.



Şekil 3.31 : Model Sonucunda oluşturulan sahanın Enerji Haritası
(Mavi: mevcut türbinler, Yeşil: yeni kurulacak türbinler)

3.17 Wake Modelinin Belirlenmesi

Topografyanın ve türbinlerin birbirini üzerindeki etkilerinin hesaplanmasında Eddy Viscosity modeli tercih edilmiştir.

3.18 Hava Yoğunluğunun Belirlenmesi

M3 ve M4 'deki hava yoğunluğu, gerekli sensör eksikliğinden dolayı hesaplanamamıştır fakat M1, M2, M5, M6 ölçümleri dikkate alındığında bölgenin hava yoğunluğu 1.126 kg / m³ olarak hesaplanmıştır.



4. SONUÇLAR VE HATA ANALİZİ

Wasp ve Meteodyn modellerinde rüzgar verisi ve rüzgar türbini eklenen modül kısımlarında rüzgar verisi transfer etme uygulaması vardır. Bu uygulama kullanılarak elimizdeki mevcut bir rüzgar verisiyle haritada istediğimiz herhangi bir noktadaki rüzgar verisini elde edebiliriz. Bu yüzden rüzgar veri transferi büyük mesafelerde çaprazlama yapabilmek için kullanışlı bir uygulamadır. İsteddiğimiz noktadaki verisini elde ederken enerji hesaplama modülünü kullanmaya gerek yoktur. Transfer etmek istediğimiz rüzgar verisini ekledikten sonra bu veriyi kullanılarak istediğimiz noktadaki rüzgar verisini projenin klimatoloji klasörünün içine otomatik kaydolmuş olacaktır.

Rüzgar verisi transfer edilirken, transfer edeceğimiz noktanın x, y ve z koordinatları girildiğimizde istediğimiz yerin rüzgar verisini elde edebiliriz. Bu yöntemi kullanarak Wasp ve Meteodyn modellerinde istediğimiz direği referans alıp diğer direğin x, y, z koordinatlarını girdiğimizde gerekli denklemlerini çözüp istediğimiz noktadaki veriyi hesaplar.

Ölçüm direklerinin verisini incelendiğinde Projede 6 adetölçüm direği verisi kullanılarak 169 noktadaki türbin için üretim hesabı yapılmıştır. Elde ettiğimiz veri Excell yardımıyla gerçek değerler ile karşılaştırarak grafiksel ve sayısal hata analizi yapılmıştır.

4.1 Karşılaştırma Yöntemi

Bu santral için, Meteodyn ve Wasp modellerinde türbin noktalarında elde edilen güç tahminleri yıllık ve mevsimsel olarak türbin güç verileri ile karşılaştırılmıştır. Meteodyn ve Wasp model simülasyonlarına ait rüzgar güç değerlerinin doğrulama analizi için seçilen Muğla bölgesinde yer alan rüzgar santraline ait 169 adet rüzgar türbininin 5 yıllık rüzgar gücü üretim değerleri dikkate alınmıştır. Yıllık ve mevsimsel olarak ve türbin başına hesaplanan hata değerleri incelenmiştir.

Hata analizleri RMSE, MAE ve MAPE kullanılarak hesaplanmıştır. Hata hesaplamaları tahmin edilen ve türbinden üretilen güç değerleri aşağıdaki (4.1-4.3) arasındaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{0.5} \quad (4.1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (4.2)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n |(y_i - x_i)/x_i|}{n} \times 100 \quad (4.3)$$

Eşitlikler'deki, n gözlem sayısı, y tahmin değeri, x ise gözlem değeridir. Eşitliklerde RMSE ve MAE ve MAPE sonuçlarının, maksimum gözlemle minimum gözlem değerinin farkına bölünmesiyle yüzde olarak bulunur.

Bir sonraki bölümde Meteodyn ve Wasp model simülasyonu ile her bir türbin noktasında o türbinin güç eğrisi kullanılarak hesaplanan üretim çıktıları ile gerçek üretim değerleri karşılaştırılmıştır bu karşılaştırma sonucunda aşağıda da görüleceği üzere Meteodyn (CFD) modelinin Wasp (Lineer) modele göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

4.2 Wasp Sonuçlarının Gerçek Üretimle Karşılaştırılması

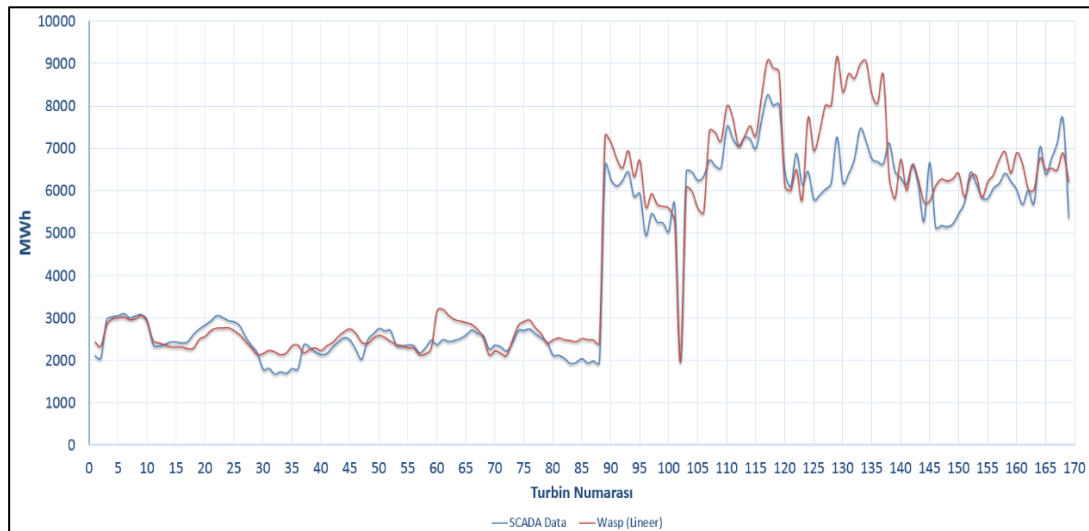
Wasp modelinde 6 adet ölçüm direği kullanılarak rüzgar veri transferi ile farklı kule yüksekliklerine sahip 169 türbin için yıllık üretim değerleri hesaplanmıştır. Veri transferi sonucu elde edilen tahmin değerlerinin gözlem değerlerini hangi modelde daha iyi temsil ettiğini belirlemek amacıyla hata analizi yapılmıştır. Yukarıda da detaylı bir şekilde belirttiğimiz girdiler kullanılarak her bir türbin için elde edilen üretim verisine ait bağıl hata, ortalama mutlak hata ve karesel ortalama hata değerleri excel yardımıyla hesaplanmış ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Buna ek olarak gerçek üretim ve hesaplanan üretim arasındaki farka Şekil 4.1' de da gösterilmektedir.

Hata oranları ve grafik incelendiğinde modelin toplamda %7 lik bir hata ile tüm santrali modellediği görülmektedir fakat bu değer ortalama bir değer olduğu için türbin bazlı hataları görmemizi engelliyor. Türbin bazlı incelendiğinde bazı yerlerde gerçeğin çok üzerinde sonuçlar tahmin edilirken bazı yerlerde ise gerçeğin altında tahmin yapılmıştır. Bunun sebebi türbini temsil eden ölçüm direğinin konumu yüksekliği ve kompleks arazi sebebiyle stabil bir akış olmaması şeklinde açıklanabilir. Wasp modeli özelinde tüm türbinlere bakılacak olursa üretim için hesaplanan ortalama mutlak hata (MAE) 0.462, Yaklaşık hataların ortalama karekökü (RMSE) 0.665, Ortalama mutlak hata oranı (MAPE) 10.804 olarak hesaplanmıştır.

Hataların arttığı kısımlar genelde kompleks arazi sebebiyle seçilen ölçüm direğinin türbin noktalarını iyi temsil etmemesinden kaynaklanmaktadır bu durumu önleyebilmek için her tepeye bir ölçüm direği dikilmesi elzemdir fakat bu da maliyeti arttıracaktır dolayısıyla bu tür analizler yapılırken en düşük maliyete en düşük belirsizlik kriterleri göz önünde bulundurularak yatırım yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.1 : Wasp Model hata analizi

Gerçek Üretim vs Wasp (Lineer)	
Toplam Bağıl Hata (%)	7.020
MAE	0.462
RMSE	0.665
MAPE	10.804

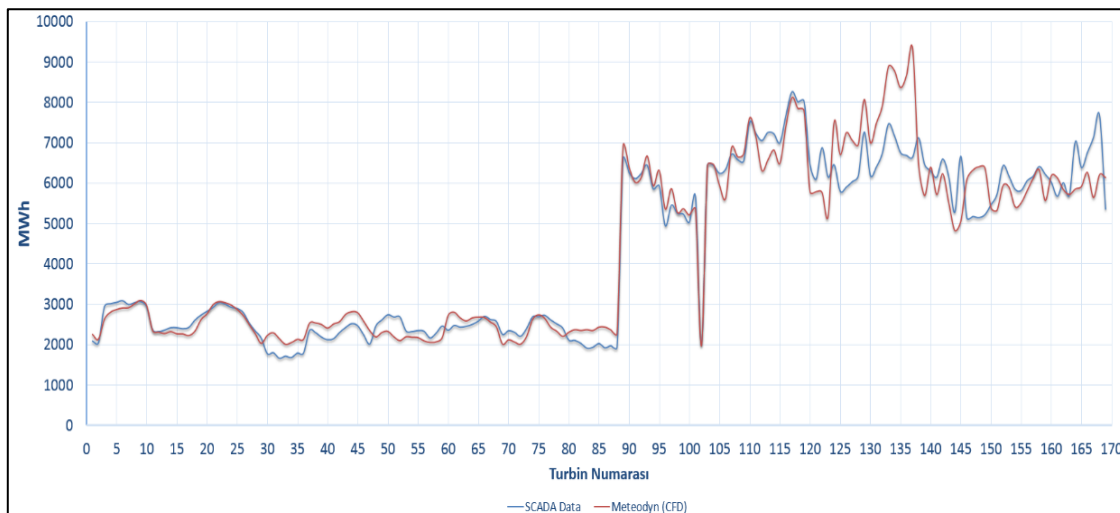


Şekil 4.1 : 169 türbinde gerçek üretim ve Wasp model sonucunun karşılaştırılması

4.3 Meteodyn Sonuçlarının Gerçek Üretimle Karşılaştırılması

Meteodyn modelinde 6 adet ölçüm direği kullanılarak rüzgar veri transferi ile farklı kule yüksekliklerine sahip 169 türbin için yıllık üretim değerleri hesaplanmıştır. Veri transferi sonucu elde edilen tahmin değerlerinin gözlem değerlerini hangi modelde daha iyi temsil ettiğini belirlemek amacıyla hata analizi yapılmıştır. Yukarıda da detaylı bir şekilde belirttiğimiz girdiler kullanılarak her bir türbin için elde edilen üretim verisine ait bağıl hata, ortalama mutlak hata ve karesel ortalama hata değerleri excel yardımıyla hesaplanmış ve Çizelge 11’de gösterilmiştir. Buna ek olarak gerçek üretim ve hesaplanan üretim arasındaki farka Şekil 40’da da gösterilmektedir.

Hata oranları ve grafik incelendiğinde modelin toplamda -%1.37 lik bir hata ile tüm santrali modellediği görülmektedir fakat bu değer ortalama bir değer olduğu için türbin bazlı hataları görmemizi engelliyor. Türbin bazlı incelendiğinde bazı yerlerde gerçeğin çok üzerinde sonuçlar tahmin edilirken bazı yerlerde ise gerçeğin altında tahmin yapılmıştır. Bunun sebebi türbini temsil eden ölçüm direğinin konumu yüksekliği ve kompleks arazi sebebiyle stabil bir akış olmaması şeklinde açıklanabilir. Meteodyn modeli özelinde tüm türbinlere bakılacak olursa üretim için hesaplanan ortalama mutlak hata (MAE) 0.340, Yaklaşık hataların ortalama karekökü (RMSE) 0.583, Ortalama mutlak hata oranı (MAPE) 9.532 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2 : 169 türbinde gerçek üretim ve Meteodyn model sonucunun karşılaştırılması

Hataların arttığı kısımlar genelde kompleks arazi sebebiyle seçilen ölçüm direğinin türbin noktalarını iyi temsil etmemesinden kaynaklanmaktadır bu durumu önleyebilmek için her tepeye bir ölçüm direği dikilmesi elzemdir fakat bu da maliyeti arttıracaktır dolayısıyla bu tür analizler yapılırken en düşük maliyete en düşük belirsizlik kriterleri göz önünde bulunarak yatırım yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.2 : Meteodyn Model hata analizi

Gerçek Üretim vs Meteodyn (CFD)	
Toplam Bağıl Hata (%)	-1.370
MAE	0.340
RMSE	0.583
MAPE	9.532

4.4 Wasp Ve Meteodyn Sonuçlarının Gerçek Üretimle Karşılaştırılması

Sadece model performansı ölçebilmek için aynı girdiler ile kurulan sistemlerde Meteodyn (CFD) modelinin Wasp (lineer) modelden toplamda çok daha tutarlı tahminlerde bulunduğu sonucuna varılmıştır. Fakat bölge bölge veya türbin türbin incelendiğinde Meteodyn modelinin de büyük hata oranlarına sahip olduğu fark edilmektedir. Fakat Şekil 4.2’de de görüleceği üzere iki modelde çoğu noktada gerçekten aynı yönde sapmıştır aynı türbin noktası Wasp ve Meteodyn tarafından ya gerçek üretimin üzerinde yada gerçek üretimin altında tahminlerde bulunmuştur Meteodynin gerçeğin üzerinde tahmin ettiği noktada Waspın gerçeğin altında tahminde bulunduğu bir kaç türbin özelinde bu duruma pek rastlanmamıştır.



Şekil 4.3 : 169 türbinde Gerçek üretim, Wasp ve Meteodyn model sonucunun karşılaştırılması



Şekil 4.4 : Aynı türbinlerde modellerinin gerçekten üretimden sapma oranları:
(a) Wasp. (b) Meteodyn.

Daha yakından inceleyebilmek adına sahadan bazı noktalar secilmiş ve iki modelin sonuçları incelenmiştir. Şekil 4.4’de de görüleceği üzere sahanın spesifik yerlerinde secilen türbinlerin iki model sonucunda gerçek üretim değerlerinden yapmış olduğu sapmalar gösterilmektedir. Wasp modeli bu bölgede gerçek üretimin ortalama %10 kadar altında tahmin ederken Meteodyn de bu oran %3 tür.

Meteodyn gerçeğe çok yakın tahminde bulunuyor görünse de bazı noktalarda iki modelinde gerçek üretimden büyük sapmalar yaşadığı tespit edilmiştir Şekil 4.4’de görüleceği üzere model speed up değerlerini doğru hesaplayamamış ve gerçekten oldukça düşük üretim tahminlerinde bulunmuştur. Bu hata oroğrafi haritasından veya ölçüm direğinin sahayı yeterince temsil etmemesinden kaynaklanıyor olabilir.



Şekil 4.5 : Aynı türbinlerde modellerinin gerçekten üretimden sapma oranları:
(a) Wasp. (b) Meteodyn.

Geniş bir alana yayılan santralde her noktada aynı oranda hata almadığımız için kapasite artışı için belirlenen noktalarda modellerin nasıl davranış gösterdiğini görmek adına yapılan bu çalışmada artık modellerin hangi noktalarda ne kadar hata yaptıklarını biliyoruz. Bu sayede kapasite artışı kapsamında planlanan 12 nokta için 12 farklı düzeltme faktörü hesaplanmıştır çünkü biliyoruz ki kompleks arazi nedeniyle model her noktada farklı şekillerde davranış sergileyebiliyor. Bu katsayılar belirlenirken Meteodyn model sonuçları dikkate alınmıştır çünkü açıkça görünüyor ki Meteodyn, Wasp dan çok daha tutarlı sonuçlar vermektedir.

4.5 Doğrulama Katsayılarının Belirlenmesi ve Uygulanması

Hali hazırda kurulu 169 türbinin gerçek üretim değerleri kapasite artışı kapsamında planlanan 10 türbin noktasının enerji üretim hesabı aşamasında en doğru üretim sonucuna ulaşmak için kullanılmıştır.

- **Birinci Adım: Ölçüm direği kombinasyonunun seçimi**

İlgili santral bölgesinde on iki adet ölçüm direkleri vardı, ancak modellenen ve gerçek üretim arasındaki karşılaştırma sonuçları, birkaç testten sonra en doğru sonuçların, son altı met mast kombinasyonu ile hesaplandığını gösterdi. Bu nedenle M1, M2, M3, M4, M5, M6 direkleri rüzgar modelleme kısmı için kullanılmıştır.

- **İkinci Adım: Düzeltme Katsayısının Hesaplanması**

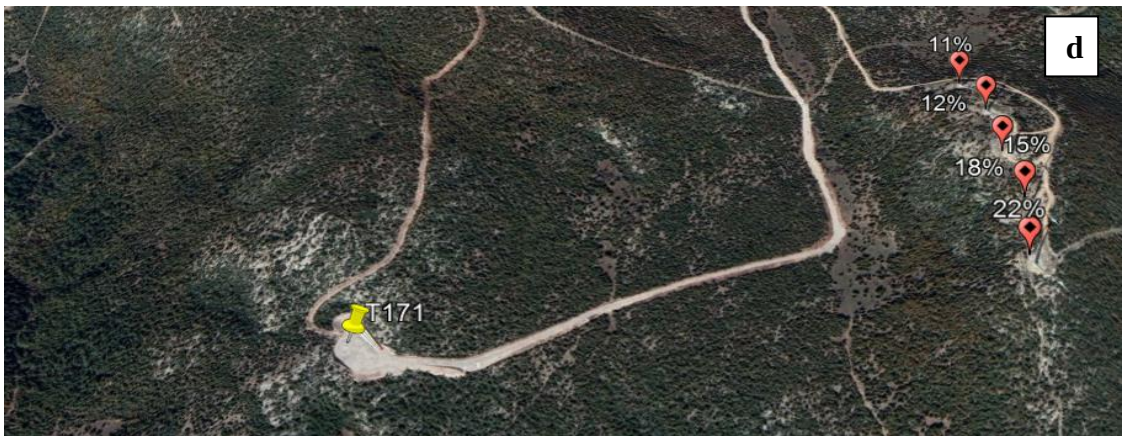
Gerçek ve modellenmiş veriler (en iyi kombinasyonla) karşılaştırıldıktan sonra Şekil 4.6'dan da görüleceği üzere sahadaki mevcut 169 türbinden yeni kurulacak türbin noktalarına yakın olanlar seçilmiş alan belirlenirken sahanın özellikleri ve 5 kanat çapı kadar mesafe gibi kriterler göz önünde bulundurulmuştur ve daha önceden hesaplanan üretim sapmaları kullanılarak düzeltme katsayısı hesaplanmıştır. Çizelge 4.3 den de yeni kurulacak 12 türbin için pragmatik değerlendirme yöntemleriyle belirlenen doğrulama katsayılarına ulaşılmıştır.

- **Üçüncü Adım: Katsayıların Yeni Türbinler için kurulan model sonuçlarına uygulanması**

Yeni kurulacak türbinlerden herhangi biri mevcut kurulu türbinlere yakınsa, İkinci Adımda hesaplanan doğrulama katsayıları o bölgedeki model davranışını sergilediği için yeni türbinlerine çarpan olarak uygulanır. Bu sayede model hataları kısmen ortadan kaldırılmış olur. Çizelge 4.3'den de görüleceği üzere doğrulama katsayısı uygulandıktan sonra üretim tahminindeki farklar önemli ölçüde azalmıştır.

- **Dördüncü Adım: Sonuçların Değerlendirilmesi**

Çizelge 4.4 ve 4.5 deki Hata oranları incelendiğinde bu işlemin toplamda hata oranını -%8.64 den -%1.52 ye düşürdüğü görülmektedir fakat bu rakamlar ortalama bir değer olduğu için türbin bazlı hataları görmemizi engelliyor. Türbin bazlı sonuçların ne kadar doğruya yaklaştığını görebilmek için Şekil 4.7 nın incelenmesi gerekmektedir. Sonuçlar gösteriyor ki bu yöntem sayesinde türbin bazlı %13 e varan düzeltmeler gerçekleşmiştir. Bu yöntem sayesinde hesaplanan ortalama mutlak hata (MAE) 1.953 den 0.658 e, yaklaşık hataların ortalama karekökü (RMSE) 2.171 den 0.0771 e ve ortalama mutlak hata oranı 12.916 dan 4.468 e düşmüştür.(Çizelge 4.4-4.5)

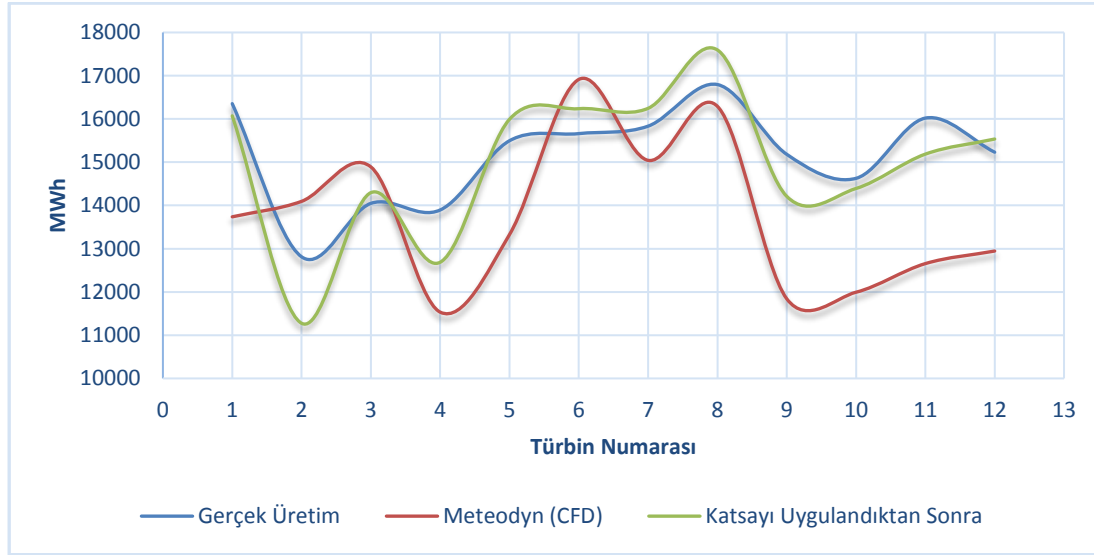


Şekil 4.6 : Doğrulama katsayıları belirlenirken kullanılan türbinler

(a) Santalin kuzeyi. (b) Santralin kuzeyi. (c) Santalin güneyi. (d) Santralin güneyi.

Çizelge 4.3 : Doğrulama işleminin etkisi

Label	Gerçek Üretim İle Meteodyn Arasındaki Fark	Doğrulama Katsayısı	Gerçek Üretim ile Katsayı Uygulandıktan Sonraki Fark
T170	-16.0%	1.17	-1.7%
,T171	10.0%	0.8	-12.0%
T172	6.0%	0.96	1.8%
T173	-17.0%	1.1	-8.7%
T174	-14.0%	1.2	3.2%
T175	8.0%	0.96	3.7%
T176	-5.0%	1.08	2.6%
T177	-3.0%	1.08	4.8%
T178	-22.0%	1.2	-6.4%
T179	-18.0%	1.2	-1.6%
T180	-21.0%	1.2	-5.2%
T181	-15.0%	1.2	2.0%



Şekil 4.7 : Gerçek üretim, Meteodyn ve doğrulama katsayısı uygulanmış model sonucunun karşılaştırılması

Çizelge 4.4 : Kapasite artışı kapsamında belirlenen 12 türbin için Meteodyn Model hata analizi

Gerçek Üretim vs Meteodyn (CFD)	
Toplam Bağıl Hata (%)	-8.64
MAE	1.953
RMSE	2.171
MAPE	12.916

Çizelge 4.5 : Kapasite artışı kapsamında belirlenen 12 türbin için doğrulama katsayısı
wind uygulanmış model sonucunun hata analizi

Gerçek Üretim vs Meteodyn (CFD) + Doğrulama Katsayı	
Toplam Bağıl Hata (%)	-1.52
MAE	0.658
RMSE	0.771
MAPE	4.468





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, öncelikle 6 adet ölçüm direği verisi kullanılarak kompleks arazide lineer ve non-lineer modellerin performans analizi yapılmış sonrasında sacada verileri yardımıyla kapasite artışı çalışmalarında var olan performansın nasıl arttırılabileceği konusunda bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Wasp ve Meteodyn modellerinin kullanıldığı bu çalışmada yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucunda, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Wasp ve Meteodyn modelleri kullanılarak 6 farklı ölçüm direğinden toplanan veriler yardımıyla 169 farklı türbin noktası için üretim hesaplaması yapılmıştır. İki modelinde bazı noktalarda çok iyi performans sergilemesine rağmen bazı noktalarda ikisi de çok kötü sonuçlar yakalamıştır. Bu durumun sebebi arazinin kompleks bir yapıya sahip olması ve modellerin bazı noktalarda dağların perdeleme etkisini iyi hesaba katılamamasından kaynaklanmaktadır.

Wasp ve Meteodyn modelleri ile alınan sonuçların gerçek üretimden sapmaları ve bağıl hesaplamaları ölçüldüğünde tüm santralde Wasp modelinin bağıl hata oranı +%7.02 olarak hesaplanırken Meteodyn modelinin bağıl hata oranları -%1.37dir.

169 türbin bulunması hata oranlarının düşmesinde istatistiksel olarak önemli rol oynamaktadır zira bazı noktalarda iki model de gerçek üretimden %20 veya üzerinde sapmalar gözlemlense de büyük resme bakıldığında bu sapmaların artı veya eksi yönde toplandığında Meteodyn modelinin Wasp a göre kompleks arazilerde çok daha güçlü sonuçlar verdiği görülmektedir.

Wasp ve Meteodyn modelinin gerçek üretimden sapma yaklaşımları büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Meteodyn artı yönde bir sapma gösterdiğinde Wasp da aynı şekilde artı veya eksi yönde bir sapma gösterdiğinde Wasp da eksi yönde bir sapma göstermektedir bu da akış modellerinin benzer şekilde çalıştığını fakat hassasiyetlerinin farklı olduğunu göstermektedir.

Ölçüm direklerin bulunduğu noktalar ortalama mutlak hata veya karesel ortalama hata oranları üzerinde büyük etkiler yaratmaktadır çünkü modellenen türbinlerin konumu o ölçüm direği tarafından temsil edilmiyorsa üretim değerindeki sapmalar da o denli artmaktadır. Bu sapmaları ve hataları azaltmanın en yegane yöntemi türbinleri temsil eden noktalara ölçüm direği yerleştirmek ve kaliteli datalar toplamaktır.

Gerçekle model arasındaki farkları minimize edebilmek için ölçüm direğinin sayısının yanında modelleri iyi kurmuş olmak da hayati önem taşımaktadır. Normalleştirilmiş rüzgar kesme değerleri karşılaştırılmasında,. Modellerin alan baskın kararlılık koşullarına göre modifiye edilmesi için uygun yaklaşım, farklı yüksekliklerde iki sıcaklık ölçümü yapmak ve yıl boyunca sıcaklık farkını gözlemlemek olacaktır. Bu ölçümler mevcut olmadığından mümkün olan en iyi yaklaşım, WASP için ısı akısı ayarlarını değiştirmek ve bu hesaplamada elde edilen kesme sonuçlarının ışığı ile Meteodyn için enerji denklemini etkinleştirmektir. WASP için arazi üzerindeki ofset ısı akışını azaltarak veya Meteodyn için pozitif bir Monin-Obukhov Uzunluğu ayarlayarak kesme uyumlarında bir iyileşme mümkün olabilir.

Her yıl rüzgar enerjisi kapasitesi artan ülkemizde mevcut kurulu santrallerin de kurulu gücünü arttırdığı görülmektedir. Model performansları incelendikten sonra Bu çalışmada mevcut kurulu santralden toplanan SCADA veriler tahmin modellerinin sunduğu sonuçları iyileştirmek için kullanılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda SCADA veriler yardımıyla geliştirilen sistem tahminlerdeki hata oranını büyük ölçüde azaltmaktadır öyle ki yeni kurulması planlanan 12 türbin için yapılan analizde bağıl hata oranının -%8.64 ten -%1.52 ye düştüğü görülmektedir. Yine bölüm 4.5 de belirtilen işlemlerin ortalama mutlak hata veya karesel ortalama hata gibi hesaplamalar üzerinde olumlu etki yarattığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında varılan sonuç sudur ki kompleks arazilerde non lineer model olan Meteody, lineer olan Wasp modelinden daha iyi bir sonuç vermiştir. Ayrıca

kapasite artısı çalışmalarında uygulanacak doğrulama yöntemiyle çok daha düşük hatalarda üretim hesabı yapmak mümkündür fakat kesin bir sonuca varabilmek için çok fazla sayıda test senaryolarının kullanılması, kullanılan model ve enerji tahmin hataları arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamak için önemli olacaktır.





KAYNAKLAR

- Aytek Ay (2014).** *Comparison Of Linear And Cfd Models With On-Site Wind Measurement Data For Wind Resource Assessment.* Izmir Institute of Technology 52-53.
- Daniel Tabas. Jiannong Fang, Fernando Porté-Agel (2019).** *Wind Energy Prediction in Highly Complex Terrain by Computational Fluid Dynamics,* 1-11
- D. Cabezón, A. Iniesta, E. Ferrer, I. Martí (2012).** *Comparing linear and non linear wind flow models.* National Renewable Energy Centre (CENER). 1-4
- Elif Beyza Çatalbaş (2015).** *Rüzgârın Alansal Dağılımının Belirlenmesinde Windsim Ve Meteodyn Modellerinin Simülasyonu Ve Performans Analizi.* İstanbul teknik Üniversitesi. 79-81.
- Erik Berge, Arne R. Gravdahl, Jan Schelling, Lars Tallhaug, Ove Undheim (2006).** *Wind in complex terrain. A comparison of WAsP and two CFD-models.* 1-10
- EWEA (2020).** *Wind in power 2020, Annual combined onshore and offshore wind energy statics,* 9-10
- Efe, B., Menteş, S., Ünal, E., Ünal, Y., Tan, E., Özdemir, T., Barutçu, B., Önel, B. Ve Topçu, S. (2012).** *72 hour forecast of wind power in Manisa, Turkey by using the WRF model coupled to WindSim.* International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA, Nagasaki, Japan, 11-14 November, 2012
- Fahsiss, K., Nair A., Kumar S. (2013).** Conference paper: *Coupling mesoscale with CFD modelling Identifying high value development opportunities before wind monitoring,* Ecoren Energy India Private Limited.
- Gasset, N., Landry M. ve Gagnon Y. (2012).** *A comparison of wind flow models for wind resource assessment in wind energy applications,* Energies, 5, 4288-4322.
- GWEC (2020).** *Global wind statics 2020,* 2-4
- Johnson, G. (2001).** *Wind energy systems,* 2.30-2.47

J.M.L.M. Palma, F.A. Castro , L.F. Ribeiro , A.H. Rodrigues , A.P. Pinto (2008).

Linear and nonlinear models in wind resource assessment and wind turbine micro-siting in complex terrain. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2-20.

Menteş, S. (2009). Enerji Meteorolojisine Giriş Ders Notları, ITU Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Menteş, S., Unal, Y., Incecik, S., Tan, B., Barutçu, B., Önal, B., Ünal, E., Efe, B., Topçu, S., Rüstemoğlu, S., Özdemir, T., Akcan, D., Borhan, Y., Dündar, C. ve Türkmen, M. (2013). *Short term wind energy prediction system.* TUBİTAK, No., 110Y050

Meteodyn (n.d.). *Technical Note – Meteodyn WT*, 1-13

Meteodyn. *Meteodyn WT help facility and on-line documentation*, from Meteodyn software

Regina Maria Daus (2015). *Wind Resource Assessment in Complex Terrain: Validation and Comparison of Two Computational Fluid Dynamics Models.* University of Bern. 55-57.

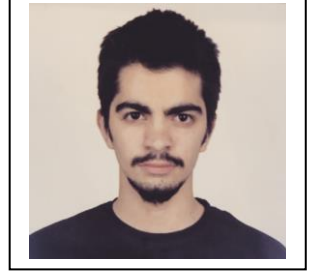
R. Pereira, Ricardo Guedes, Carlos Silva Santos (2010). *Comparing WAsP and CFD wind resource estimates for the “regular” user*, 1-9.

Özgener, Ö. (2002). *Türkiye’de ve Dünya’da rüzgar enerjisi kullanımı*, Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi, 160-170

TÜREB (2020). *Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu Ocak 2020*, 1-20

Yeşilköy, S., Aktar, Ç., Inceoğlu Ö., Menteş, S., Efe, B., Basar, U., Tan, E., Ünal, Y. ve Ünal, E. (2012). *Performance analysis of Windsim and Wasp models to estimate wind energy potential in Soma.* The European Conference & Workshop on Renewable Energy Systems, Antalya- Türkiye, 16-23 September 2012

ÖZGEÇMİŞ



İsim Soyisim : Mehmet Özkan BAŞAR

Dogum Yeri ve Tarihi : Istanbul, 05 Eylül 1991

E-Mail : basarm@itu.edu.tr

EĞİTİM :

- **Lisans** : 2015, Istanbul Teknik Universitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü

PROFOSYONEL TECRÜBE :

- Agustos 2019 – Günümüz / Rüzgar ve Saha Mühendisi / Nordex Enerji.
- Şubat 2016 – Agustos 2019 / Rüzgar Enerji Analisti / Polat Enerji
- Haziran 2014 – Şubat 2016 / Yenilenebilir Enerji Mühendisi / Eksim Yatırım Holding