



Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu Ve Ticari Promosyonu

Program Kodu: Uluslararası ERA-NET LAC 2. Aşama

Proje No: 216M505

Proje Yürütücüsü:
Dr. Öğr. Üyesi Ferhat BİNGÖL

Bursiyer(ler):
Yüksel KALAY

ARALIK 2019
ANKARA

Önsöz

Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu ve Market Promosyonu projesi 2015 tarihinden itibaren açılan ERANET-LAC çağrısına İspanya'nın konsorsiyum liderliğinde 8 ülke olarak başvurmamızla destek aldı ve başladı. Bu sekiz ülke dört adet AB üyesi ya da aday ülke İspanya, Romanya, Finlandiya ve Türkiye ve dört adet Güney veya Orta Amerika ülkesi Meksika, Uruguay, Arjantin ve Dominik Cumhuriyetidir. Bölgesel olarak dengeli bir paylaşıma sahip olan projemiz iş yükü açısından da paylaşılmıştır.

Amerika kıtasından meslektaşlarımız (Uruguay hariç) ve Romanya zor şartlar altında çalışabilen yeni bir rüzgar türbini tasarımı yaparken, İspanya ve Finlandiya küçük türbin standartları ve market promosyonları konusunda çalışmıştır. Bahsi geçen konular İş paketi 0,1,3 ve 4'ün tamamını kapsamaktadır.

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü olarak bu projedeki görevimiz İş Paketi 2'nin yöneticiliğini yapmak ve sonuç olarak küçük rüzgar türbinlerinin fizibilitesini yapmak için basit ama efektif online bir uygulama geliştirmektir.

Proje 1 Mayıs 2017 tarihinde başlamıştır. 1 Mayıs 2019 tarihinde 5 ay uzatma alarak projenin bitiş tarihi hem ERANET projesiyle senkronize edilmiş hem de daha önceden tahmin edilmemiş bazı araştırma alanlarında ek çalışmalar yapılarak sonuca başarıyla ulaşmamız mümkün olmuştur.

Bu proje, üniversitemize ve bölümüze dünyada bir ilk olan online uygulamamızı (Web App) geliştirmemizi sağlamış ayrıca bizim için gerçekten bilinmeyen ülkeler olan Güney Amerikalı meslektaşlarımızla iletişim kurma şansı vermiştir. Ortaklarımızdan tümüyle başka projelerde de çalışacağımızdan eminiz ve özellikle Uruguay ve İspanya ile yeni çağrı başvurularına hazırlanıyoruz.

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat BİNGÖL

İçindekiler

Önsöz.....	2
İçindekiler.....	3
Şekiller.....	4
Tablolar.....	4
Özet.....	5
Abstract.....	6
Sonuç Raporu Ana Metni.....	7
1 Saha çalışmaları/ziyaretleri ve eksiklerin tespit edilmesi (İP2-Hedef 2.1).....	8
1.1 Tesis Çalışmaları.....	9
1.1.1 Türkiye'deki rüzgar tarlası çalışması.....	9
1.1.2 İspanya'daki tek türbin çalışması.....	12
1.2 Saha Ziyaretleri.....	16
1.2.1 Saha 1: ALDUR RES (500kW), Aliağa, İzmir.....	17
1.2.2 Saha 2: Netdirekt RES (750kW), Bergama, İzmir.....	18
1.2.3 Saha 3, Ayyıldız RES (500kW), Büyükçekmece, İstanbul.....	19
1.3 Anket Çalışması.....	20
1.4 Hedef 2.1 sonuçları.....	20
2 Belirlenen ihtiyaçlara yönelik bir yazılım geliştirilmesi (İş Paketi 2, Hedef 2.2).....	21
2.1 Yazılımların yetersizliklerinin belirlenmesi.....	21
2.2 Yapılacak yazılımı iskeletin oluşturulması.....	22
2.3 Geliştirilen model eklemeleri.....	24
2.3.1 Hava Yoğunluğuna bağlı güç eğrisi güncellemeler.....	24
2.3.1.1 IEC Metodu.....	25
2.3.1.2 EMD-windPRO Metodu.....	25
2.3.2 Buzlanmaya bağlı güç eğrisi güncellemeler.....	26
2.3.3 Engellerin hava akımına etkisi.....	27
2.3.3.1 Çit yüksekliğinde engeller.....	28
2.3.3.2 Ağaç yüksekliğindeki engeller.....	30
2.4 Yazılım veri kaynakları.....	34
2.4.1 Pürüzlülük haritaları.....	34
2.4.2 Yükselti Eğrileri.....	35
2.4.3 Engeller.....	36
2.4.4 Rüzgâr Atlası.....	36
2.4.5 Güç eğrileri ve düzeltimesin.....	37
2.5 Web App oluşturulması.....	38
2.5.1 Veri tabanın kurulumu.....	38
2.5.2 Arayüz.....	39
3 Sonuçlar.....	42
Yayınlar.....	44
Kaynaklar.....	45
EKLER.....	47

Şekiller

Şekil 1: Türbinlerin büyüme hızı (Kaynak Uluslararası Enerji Ajansı)	7
Şekil 2: Rüzgar Çiftliği Uydudan Çekilmiş Fotoğrafı.....	9
Şekil 3: Standart Hava Yoğunluğuna Göre Oluşturulmuş Enercon E-48 800kW Güç Eğrisi.....	10
Şekil 4: Standart Hava Yoğunluğuna Göre Oluşturulmuş Enercon E-44 900kW Güç Eğrisi.....	10
Şekil 5: Çalışmada Kullanılan Meteorolojik Ölçüm Direği (solda) ve Çalışma Alanı ve Çevresindeki Engeller (sağda).....	13
Şekil 6: Çalışma Alanı Pürüzlülük ve Yükseklik Haritası	14
Şekil 7: Standart ve Bölge Koşullarına Göre Hesaplanmış Güç Eğrisi	15
Şekil 8: ALDUR RES.....	17
Şekil 9: NetDirek RES.....	18
Şekil 10: Ayyıldız RES	19
Şekil 11: Yazılım akış diyagramı.....	22
Şekil 12: Türbin Güç Eğrileri.....	27
Şekil 13: Modelleme kurgusu; çit yüksekliği.....	28
Şekil 14: Çit yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %100 katı yüzey (ör: duvar).....	29
Şekil 15: Çit yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: delikli çit).....	29
Şekil 16: Çit yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: çalışık).....	29
Şekil 17: Modelleme kurgusu; ağaç yüksekliği	30
Şekil 18: Ağaç yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %100 katı yüzey (ör: duvar) Arazide ölçülen dikey profiller (üstte) ve bunların serbest akıma oranı (altta).....	31
Şekil 19: Ağaç yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: bina tipi).....	32
Şekil 20: Ağaç yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: koruluk).....	33
Şekil 21: GlobCover 2000 haritasının dünya görüntüsü	34
Şekil 22: SRTM verisi	35
Şekil 23: GWA resmi web sitesi; www.GlobalWindAtlas.org	36
Şekil 24: GWA sitesinden indirilebilecek bilgiler.....	37
Şekil 25: PelaFlow Danışmanlık şirketinin küçük türbinler için geliştirdiği websitesi.....	38
Şekil 26: PostGIS veri tabanı tabloları	39
Şekil 27: SWAT Giriş Ekranı.....	40
Şekil 28: SWAT konum seçme ekranı	40
Şekil 29: SWAT Türbin seçme ekranı	41
Şekil 30: Rüzgar türbini seçiminden sonra tavsiye edilen kule yüksekliği belirtilir ve kullanıcı isterse bunu değiştirebilir.	41
Şekil 31: Örnek rapor.....	43

Tablolar

Tablo 1: Rüzgar Çiftliği Net Yıllık Üretim Değerleri.....	10
Tablo 2: Ek Kayıplar (%).....	11
Tablo 3: Ek Kayıplarla Birlikte Yıllık Enerji Üretimi	12
Tablo 4: Windspot 3.5 Türbin Özellikleri.....	13
Tablo 5: Çalışma Sahası Bilgileri.....	13
Tablo 6: $\rho = 1.054 \text{ kg/m}^3$ Hava Yoğunluğunda Windspot 3.5'e Ait Yıllık Üretim Değerleri	15
Tablo 7: $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ Hava Yoğunluğunda Windspot 3.5'e Ait Yıllık Üretim Değerleri	16
Tablo 8: GlobCover 2000 sınıfları ve tahmini pürüzlülük verileri.....	35

Özet

Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion - SWTOMP (Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu ve Market Promosyonu) projesinin ana amacı küçük ve orta ölçekli rüzgar türbinlerinin ana şebekeden uzak noktalar ya da düşük kapasiteli şebeke bağlantıları olan noktalarda kullanımı için tanıtımının yapılması, bu şartlara uygunluğu için geliştirilmesi ve nihayetinde belirtilen şartlar uygulanabilir hale getirilmesidir. Bunu yaparken aynı zamanda yerel rüzgar yapısı ve altyapı olanaklarına uygun bir yol izlenmesi de hedeflenmektedir. 3 senelik projenin çıktıları şöyle özetlenebilir:

- 1 Soğuk ve tropikal iklime sahip noktalarda çalışabilen küçük türbin karakteristiklerini belirlemek ve ilk örnek geliştirmek (İspanya, Meksika, Arjantin, Finlandiya, Romanya)
- 2 Küçük türbinlerin fizibilitesinin yapılabileceği hızlı ve basit bir metot geliştirmek ve bu metodu bir web app ile projesi üye ülkelerde kullanıma açmak (Türkiye)
- 3 Projeye üye ülkelerde küçük türbinleri tanıtmak, uygulanabilir hale getirmek ve yerel üretimi desteklemek (Tüm ülkeler)
- 4 Üye ülkeler arasında küçük türbinler konusunda ortak çalışma ve iletişim ağı oluşturabilmek ve projeden sonra da bu iletişimi canlı tutabilmek. (İspanya liderliğinde ve tüm ülkelerin veri desteğiyle)

İspanya, Romanya, Finlandiya, Türkiye, Meksika, Arjantin, Dominik Cumhuriyeti ve Uruguay olmak üzere 8 araştırma kurumunun katılımı ile yürütülen projede İspanya konsorsiyum lideri ve projenin ERANET karşısında yöneticisi olmuştur. Bu başvuruya konu olan alt başlıkla İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İş Paketi 2'nin yöneticisi olmuş ve yukarıda listelenen iki numaralı hedefe ulaşmak için çalışmıştır. Aldığımız sorumluluk küçük türbinleri fizibilite çalışmalarında kullanılmak üzere yeni ve basitleştirilmiş bir yöntem üretilmesidir. Bu sayede şahıs ya da kurumsal yatırımcıların kolay ve hızlı bir şekilde yatırımlarının gerçekliğini görebileceklerdir. Yazılım tamamlanmış ve Türkiye'de BETA testine başlamıştır. Diğer ülkelerin ERANET proje bitiş tarihleri farklı olduğu için, tüm veriler sisteme yüklenince diğer ülkelerde aktif olacaktır. Geliştirilen Web App, "Small Wind Assessment Tool - SWAT" (Küçük Rüzgar Fizibilite Yazılımı) sadece Türkçe ve İngilizce olarak hizmet vermektedir.

Abstract

The main objective of the Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion (SWTOMP) project is to promote and develop small and medium-sized wind turbines for use in remote locations or locations with low capacity network connections, and it is ultimately to make the specified conditions applicable. In doing so, it is also aimed to follow a path suitable for local wind structure and infrastructure facilities. The outputs of the 3-year project can be summarized as follows:

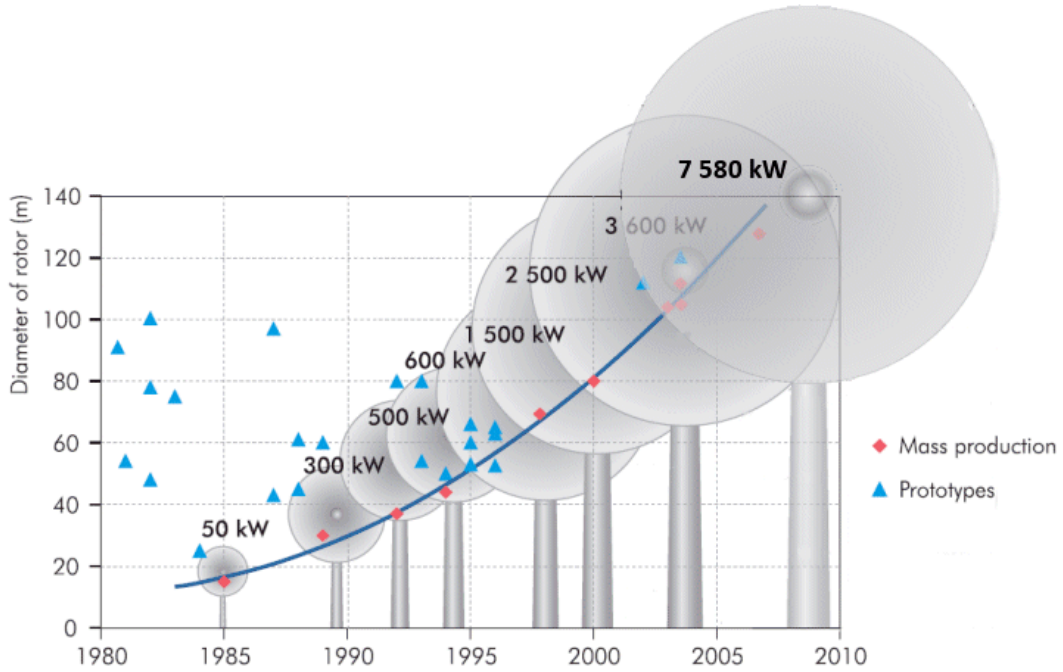
- 1 Identify the characteristics of small turbines capable of operating in cold and tropical climate locations and develop a first example (Spain, Mexico, Argentina, Finland, Romania)
- 2 A fast and simple methodology to be developed for the feasibility of small turbines and use this method to a Web App in member states (Turkey)
- 3 Introducing small turbines in the project member countries, making them applicable and supporting local production (All countries)
- 4 To be able to establish a network of working and communication between the Member States on small turbines and to keep this communication alive after the project. (Under the leadership of Spain and with data support from all countries)

Eight research institutions Spain, Romania, Finland, Turkey, Mexico, Argentina, Dominican Republic and Uruguay are the participations of the SWTOMP project where Spain is been the leader of the consortium and the project managers across ERANET. With the sub-topic of this application, İzmir Institute of Technology became the director of Work Package 2 and worked to achieve the target, number two, listed above. Our responsibility is to produce a new and simplified method for small turbines to be used in feasibility studies. The aim is that individual or institutional investors will be able to see the reality of their investments easily and quickly. Software began BETA testing is completed by the case study of Turkey. Since ERANET project end dates of other countries are different, all data will be active in other countries when uploaded to the system in near future. Developed Web App, “Wind Small Wind Assessment Tool” serves only in Turkish and English.

Sonuç Raporu Ana Metni

Rüzgar Türbinleri 50kW ve benzeri büyüklüklerdeki ticari kapasiteden bugün 8MW'lık açık deniz rüzgar türbinleri seviyesine ulaşmıştır (Şekil 1). Bu gelişme 30 sene gibi kısa bir sürede sağlanmıştır (GWEC:2018). Bu hızlı büyüme ve kapasite artışı rüzgar türbinlerini ticari ve çevresel faktörler açısından getirisi götürüsünden yüksek olan bir konuma oturtmuştur. Ülkemizde kurulu kapasite bu proje başvuru aşamasında 5GW iken, sonuç raporu yazıldığında 8GW'a çıkmıştır. 2030 hedefi olarak 20GW hedeflenmektedir (Enerji Strateji Planı: 2015). Bu kapasite artışının benzer paralel gelişmeleri dünyanın tüm ülkelerinde hissedilmektedir. Özellikle, rüzgar enerjilerinde tam kapasitesine ulaşmamış Türkiye gibi ülkeler bu konuda ARGE ve yerli üretim çalışmalarına hız vermek istemektedir. Bu çalışmada türbinlerin sınıflandırması şu şekillerde yapılmıştır (IEC 61400-2:2013). Bu kademelerden sadece KADEME 1 ve 2 çalışmanın konusudur.

- KADEME 1: 50kW'a kadar mikro-türbinler
- KADEME 2: 50kW ila 1MW küçük ve orta ölçekli türbinler
- KADEME 3: 1MW ve üstü büyük türbinler



Şekil 1: Türbinlerin büyüme hızı (Kaynak Uluslararası Enerji Ajansı)

Tarihlerden anlaşıldığı üzere mevcut küçük ve orta ölçekli türbinler 1980'li yıllardan beri varlığını sürdürmekte ve kullanılmaktadır. Bu süre içinde türbinler deneme-yanılma, ARGE ve benzeri birçok etken sayesinde birçok konuda mükemmelliğe ulaşmıştır. Örneğin, Almanya, Hollanda ve Danimarka gibi ülkelerde 20 seneyi aşkındır çalışan ve neredeyse sadece dişli kutusu bakımıyla hayatını devam ettirebilecek kadar optimizasyonları yapılmış türbin

teknolojileri mevcuttur (Bonou:2016, Noori:2015, Ortego:2012, Crawford:2009). Ancak, tüm bu gelişmişliğe karşın dikkat edilmesi gereken husus tüm bu gelişimlerin dünyanın kısıtlı bir bölümü için yapıldığıdır. En basit örnekle Hollanda, Almanya ve Danimarka gibi düz arazileri çok olan yerlerde kullanılan bu küçük türbinler Türkiye, Arjantin ya da benzeri coğrafi yapıya sahip ülkelerde kullanıldığı zaman aynı kapasitede çalışmamaktadırlar (Wright:2001). Tabii ki, bu engel sadece coğrafi yapıyla ilgili değil atmosferik koşullarla da alakalıdır (Abrahams:2012). Örneğin Karayib adalarında denizlerle çevrili olmaktan ötürü farklı ve çok yönlü rüzgar karakteristikleri görülmektedir. Bu örnekler arttırılabilir ancak bu iki örnekten de anlaşılacağı gibi küçük türbinlerin üretildikleri ve ilk tasarlandıkları yerden farklı yerlerde çalışmaları için bir adaptasyon ve optimizasyon süreci gereklidir (Jouanno:2012, Bahadoorsingh:2012). Ayrıca, küçük türbinlerin kullanıcıları genelde kar amacı güden ya da götürmeyen son kullanıcılar, uzak noktalarda şebekesiz ortamda yaşayanlar ya da mevcut şebekesi yeterli olmayıp bu şebekeye destek olmak isteyenlerdir (Etxegarai:2016). Bu tür bir kullanım ihtiyacı durumunda küçük türbinlerin getiri ve götürüsünü hesaplamak ve hem üretilen enerji için hem de türbinin finansmanı için ek uygulamaların geliştirilmesi gerekmektedir. Küçük bir türbinin üretim kapasitesinde yola çıkarak elde edilecek maddi getiri de küçüktür, oysaki bu getirinin hesaplanması istendiğinde alınacak mühendislik servisi oldukça büyük rakamlara ulaşabilmektedir. Dolayısıyla, son kullanıcı ve yatırımcının basit ancak gerçeklere yakın olarak bir fizibilite çalışmasına ihtiyacı vardır. Bu fizibilite çalışmasının yapılması ve ekonomik öngörülerin finansman desteği alınabilir hale getirilmesi için şu anda çok ucuz çözümler tüm dünya için yoktur.

SWTOMP projesi çerçevesinde İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği olarak görevimiz ihtiyaç duyulan bu fizibilite yazılımı geliştirmektir. İş paketi 2 altında belirlenen iki hedef üzerinden bu sonuca ulaşılması hedeflenmiş ve bu yönde rapor içinde belirtilen çalışmalar yapılmış ve sonuca ulaşılmıştır.

1 Saha çalışmaları/ziyaretleri ve eksiklerin tespit edilmesi (İP2-Hedef 2.1)

Projenin tarafımızdan yönetilen 2nci İş paketinin ilk adımı hali hazırda var olan yazılımların küçük ve orta ölçekli türbinlerde ne gibi teknik eksikleri olduğunu yerinde ölçülmüş verilerle görmek ve listelemektir. Ayrıca, belirlenen eksiklerin giderilmesi için ne tür çalışmalar yapılması gerektiği bu çalışmalarının yürütülmesi bu bölüm altında irdelenmiştir.

Öncelikle saha çalışmaları için mevcut tesis verileri toplanmış bu verilerdeki üretim kapasiteleri ile modellemede alınan veriler karşılaştırılmıştır. Ayrıca hangi girdi verilerinde güncelleme yapıldığında başarının arttığı gözlemlenerek küçük türbinler için hedefler belirlenmiştir.

Daha sonra bu düzeltmelerin yapılabilmesi için eldeki modellerin ya da bilinen metodolojilerinin yeterli olup olmadığı incelenmiş ve son olarak da bu geliştirilen yöntemlerin geliştirilecek metodolojiye nasıl uygulanacağı çalışılmıştır.

Modelleme konusunda toplamda pazarın yüzde 90'ınan hakim 3 yazılım temin edilmiştir, WAsP, WindPRO ve WindSIM. WAsP hali hazırda üniversitemizde bulunduğu için sadece güncellemesi yapılmıştır. Diğer yazılımlar ise satın alınmıştır.

1.1 Tesis Çalışmaları

Üç farklı yazılımı denemek amacıyla Türkiye'den ve İspanya'dan birer adet olmak üzere küçük rüzgar türbinlerinin yer aldığı saha ve bunlara ait üretim değerlerini edinilmiştir. Toplamda 2 adet saha ve üretim değerleri için 2 adet rapor hazırlanmıştır. Bu raporlardan yapılan son düzenleme sonuç raporuna bu bölüm içinde eklenmiştir.

1.1.1 Türkiye'deki rüzgar tarlası çalışması

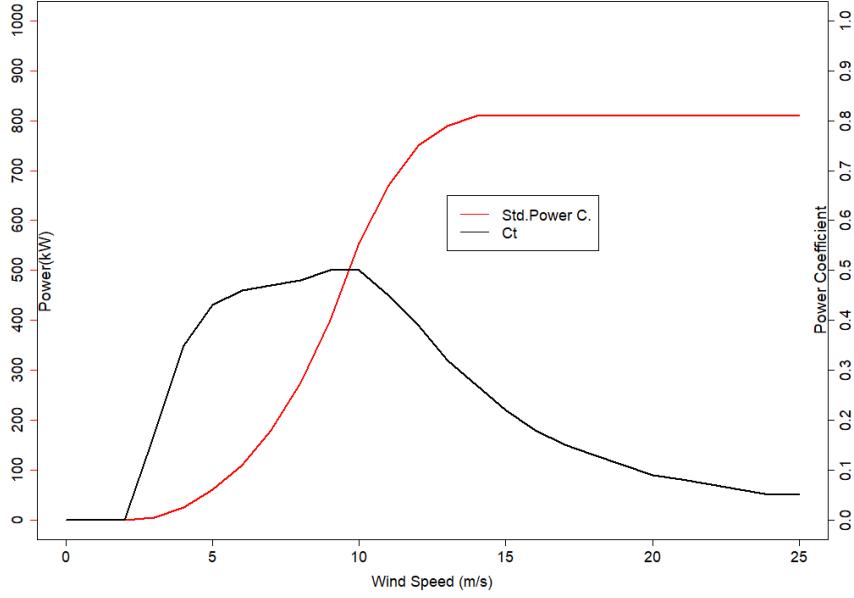
Ege bölgesinde bulundan rüzgar çiftliği, 29.6 MW kurulu güce sahip olup içerisinde 8 adet Enercon E-44 (900 kW) ve 28 adet Enercon E-48 (800 kW) olmak üzere 2 farklı rüzgar türbini modelini ve toplamda 36 adet rüzgar türbinini içermektedir (Şekil 2). 36 adet rüzgar türbininden elde edilen 2011 ve 2012 yıllarına ait üretim değerleri bu çalışmada kullanılmıştır (Tablo 1). Gerçek üretimler tüm kayıpları içermektedir. Belirtilen türbinlerin güç eğrileri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir. Bunlar teorik güç eğrileridir.



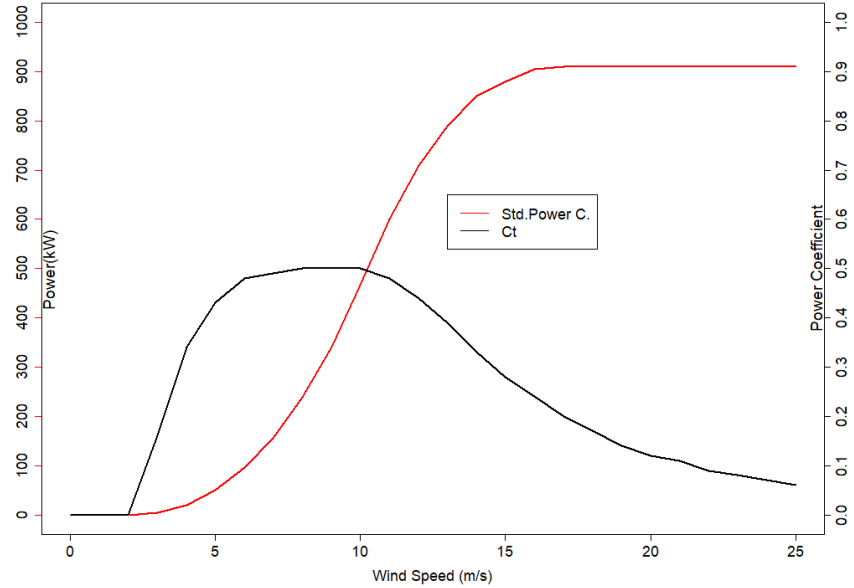
Şekil 2: Rüzgar Çiftliği Uydudan Çekilmiş Fotoğrafı

Tablo 1: Rüzgar Çiftliği Net Yıllık Üretim Değerleri

Türbin Sayısı	Yıllar	Üretimde Toplam Saat	Toplam Üretim (MWsa/yıl)	Yıllık Toplam Saat (365x24x36)	Toplam Yıllık Üretim (MWsa/yıl)
36	2012	262,860.00	67,274.50	315,360.00	80,710.97
36	2011	268,970.00	69,310.57		81,264.76



Şekil 3: Standart Hava Yoğunluğuna Göre Oluşturulmuş Enercon E-48 800kW Güç Eğrisi



Şekil 4: Standart Hava Yoğunluğuna Göre Oluşturulmuş Enercon E-44 900kW Güç Eğrisi

Gerçek üretim değerleri ile üç farklı rüzgar çiftliği modeli kullanılarak elde edilen üretim tahminleri karşılaştırılmıştır. Çalışma bölgesi olarak 16km x16km'lik tüm rüzgar türbinlerini içerisine dahil eden bir alan belirlenmiştir. Arazi yapısının tanımlanması için modellere girdi

olarak kullanılmak üzere SRTM veri tabanından yükseklik ve CORINE veri tabanından pürüzlülük haritaları çalışma bölgesine göre oluşturulmuştur. Bölgede minimum yükseklik 0 metre deniz seviyesi iken maksimum yükseklik 750 metredir. Bölgenin pürüzlülük uzunlukları ise minimum ve maksimum olarak sırasıyla 0 metre ve 0.5 metredir. Ayrıca 80 metrelik ölçüm direğinden elde edilen rüzgar frekans verisi ve ek olarak türbinlere ait güç eğrileri 3 farklı modelde de diğer bir girdi olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan 2 farklı türbin modeline ait standart hava yoğunluğunda oluşturulmuş güç eğrileri aşağıda Şekil 3 ve Şekil 4 'de görülebilir.

Modeller çalıştırılırken içerisindeki varsayılan değerler aynen kullanılmıştır. Örneğin, WAsP modelinde O. Jensen wake modeli kullanılmış olup, rüzgar izi kayıpları sabiti 0.075 olarak alınmıştır. Hava yoğunluğu ise lokal verilere göre güncellemeden standart hava yoğunluğu olan 1.225 kg/m^3 alınmıştır. WindPro ve WindSim modellerinde de aynı girdi verileri ve varsayılan parametre değerleri kullanılarak yıllık üretim hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmada varsayılan parametre değerlerinin kullanılmasının sebebi; küçük rüzgar türbinlerine mühendislik danışmanlığı almadan en basit ve pratik yoldan yatırım yapmayı planlayacak olan son kullanıcının piyasadaki yazılımları kullanarak doğru sonuçlara ulaşım ulaşamayacağını test etmektir.

Üç farklı model kullanılarak elde edilen yıllık üretim tahmin değerlerinin, gerçek üretim değerlerinden fazla çıkmasının olası sebeplerinden ilki çalışma bölgesine ait olmayan varsayılan parametre değerlerinin modellerde kullanılması düşünülebilir. İkinci olarak ise Tablo 2'de yer alan yıllık üretim tahmin değerlerine rüzgar izi kayıpları dışında diğer kayıplar düşünülmeden hesaplamaların yapılması düşünülebilir. Olası ek kayıplar Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2: Ek Kayıplar (%)

Emre Amade	2
Kablo	1.5
Türbin Performansı	1
Çevresel	0
Sektör Yönetimi	1.2
Toplam	5.7

Sırasıyla WAsP, WindPro ve WindSim yazılımları aynı girdi verileri ve varsayılan parametre değerleri kullanılarak aşağıda Tablo 3'de yer alan yıllık üretim tahminleri rüzgar izi kayıpları göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Karşılaştırma toplu üretim rakamları üzerinden yapılmıştır

çünkü tesisin türbin bazında üretimi açık olarak yayınlanmamaktadır. Toplu üretim rakamı ise “Carbon Gold Certificate”¹ kapsamında yayınlandığı için ulaşılır durumdadır.

Tablo 3: Ek Kayıplarla Birlikte Yıllık Enerji Üretimi

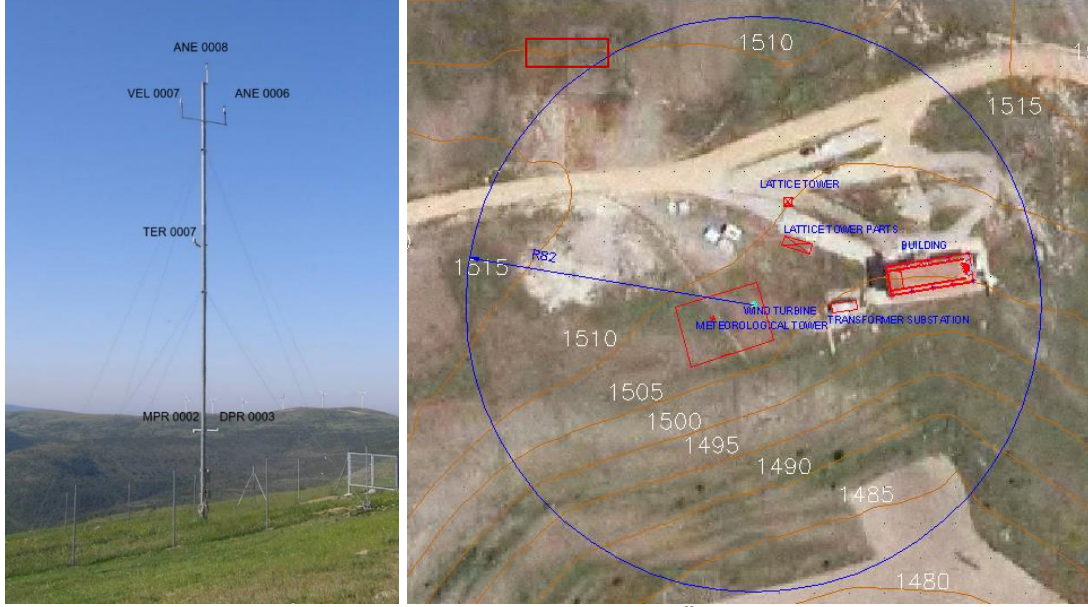
	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar İzi Kayıplarıyla Üretim Tahmini (MWsa/yıl)	Rüzgar İzi Kayıpları (%)	Ölçülmüş Tüm Kayıplarla Üretim (MWsa/yıl)	Ölçülmüş Yıllık Üretim (MWsa/yıl)
WAsP	7.16	82,890.00	2,71	78,165.27	(2011)
WindPro	7.30	83,475.90	5,40	78,717.78	80,710.97
WindSim	6.99	82,408.10	1,40	77,710.84	(2012)
					81,264.76

İlk sahada yapılan değerlendirmeye göre, proje kapsamında oluşturulacak yazılım düşünüldüğünde, kullanıcıyı karmaşık parametreler ve işlemlerden kurtarıp saha koşullarını tanımlayabilen basit bir yazılım oluşturulması gerekliliği bir kez daha ortaya çıkmıştır. Yazılım, sahadaki hava yoğunluğunu otomatik güncellemeli ve kayıpların türbin performansı gibi güncellenerek hesaplanabileceği bir yapıya sahip olmalıdır.

1.1.2 İspanya’daki tek türbin çalışması

İspany, Soreo’da bulunan küçük bir rüzgar türbinin ve yakınındaki direğin verileri analiz için kullanılmıştır. Alınan veriler ile yine aynı modelleri kullanarak üretim hesaplamalarıyla devam edilmiştir. Rüzgar türbinin yakınında bulunan ölçüm direğinden alınan 7 aylık ölçüm verisi (ANE 0008, 18.5 metre) ölçüm direğinin (Şekil 5-Sol) çevresindeki engellere göre geçerli yön sektörleri belirlenerek modellere girdi olarak kullanılmıştır. Ayrıca geçerli yön sektörleri belirlenirken Şekil 6’da bulunan çalışma sahası üzerindeki engeller düşünülmüştür (Şekil 5-Sağ). 112.73°- 217.85° ve 313.29° – 358.94° olmak üzere 2 farklı geçerli yön sektörü belirlenmiş olup üretim hesaplamaları buna göre yapılmıştır. Çalışmada Sonkyo Energy firmasına ait Windspot 3.5 modeli 3.5 kW rüzgar türbini kullanılmıştır. Rüzgar türbinine ait genel bilgiler ve çalışma sahası bilgileri sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5’de verilmiştir.

¹ <https://www.goldstandard.org/>



Şekil 5: Çalışmada Kullanılan Meteorolojik Ölçüm Direği (solda) ve Çalışma Alanı ve Çevresindeki Engeller (sağda)

Tablo 4: Windspot 3.5 Türbin Özellikleri

<i>Türbin Üreticisi</i>	Sonkyo Energy
<i>Türbin Modeli</i>	Windspot 3.5
<i>Nominal Güç</i>	3.5 kW
<i>Nominal Rüzgar Hızı</i>	12 m/s
<i>Devreye Girme Rüzgar Hızı</i>	3 m/s
<i>Devreden Çıkma Rüzgar Hızı</i>	20 m/s
<i>Rotor Çapı</i>	4.1 m
<i>Kule Yüksekliği</i>	18.15 m

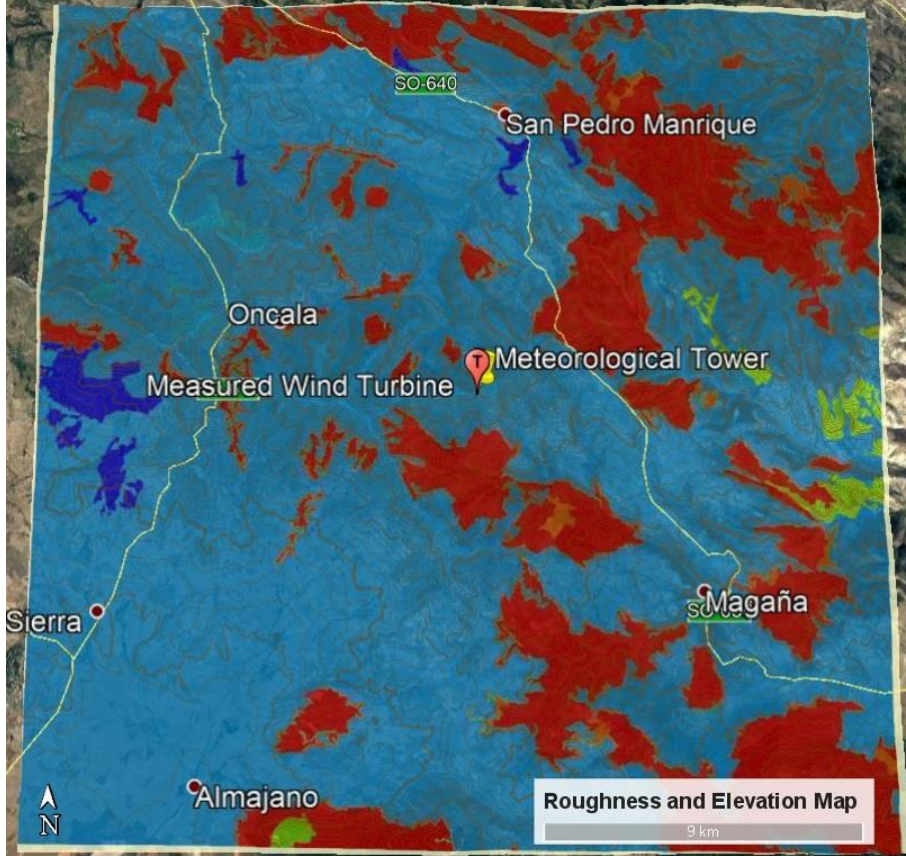
Tablo 5: Çalışma Sahası Bilgileri

	<i>Koordinat ED50 UTM Z30</i>	<i>Ölçüm Süresi ve Frekans</i>	<i>Tür</i>
<i>Ölçüm Direği</i>	562901, 4644888.2	7 Months / 10min	18.15m Ölçüm Direği
<i>Rüzgar Türbini</i>	562913, 4644892.1	7 Months / 10min	WindSpot 3.5 kW

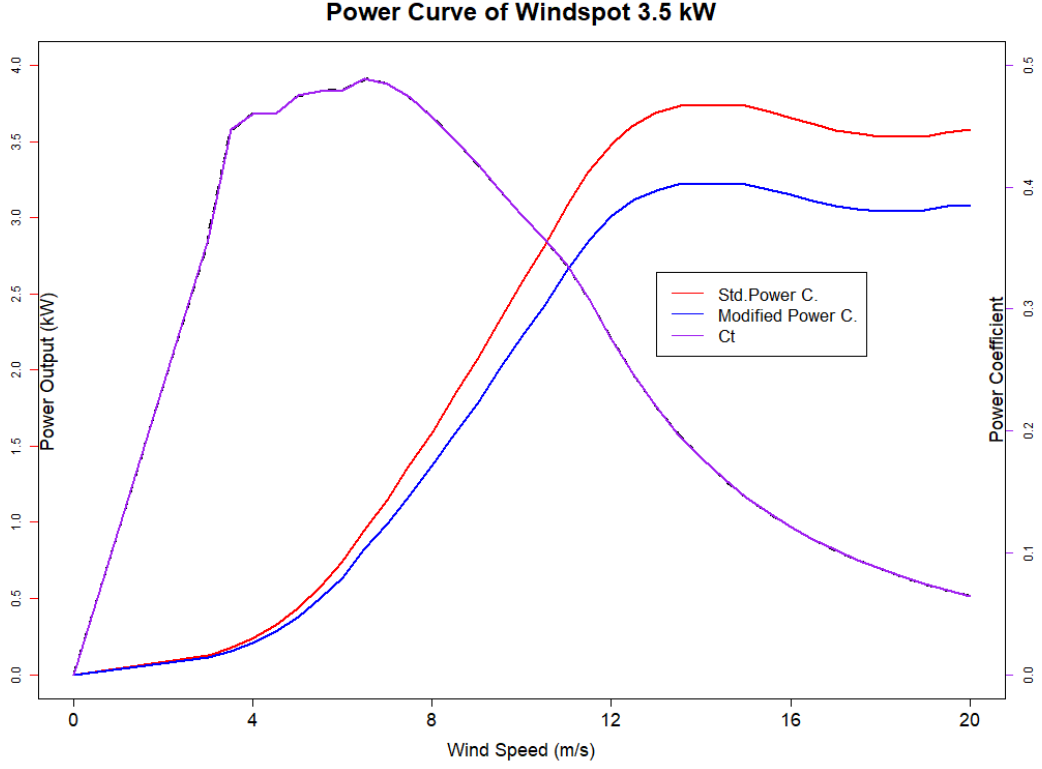
İlk çalışma sahasından farklı olarak varsayılan hava yoğunluğu (1.225 kg/m^3) yerine bölge koşullarına ait hava yoğunluğu bu çalışmada hesaplanmıştır çünkü hava yoğunluğu yüksek rakımlı yerlerde hızla düşmektedir ve bu kadar küçük bir türbin için hesaplamalara etkisinin yüksek olduğu anlaşılmıştır. Çalışma alanı, rüzgar türbini orta nokta alınarak $25\text{km} \times 25\text{km}$ olarak belirlenmiştir. Çalışma alanına ait maksimum yükseklik 1700 metre, minimum yükseklik

ise 725 metredir. Minimum pürüzlülük uzunluğu 0.036 iken maksimum pürüzlülük uzunluğu 0.5 metredir. Yükseklik ve pürüzlülük haritaları sırasıyla ilk çalışmada olduğu gibi SRTM ve CORINE veri tabanından elde edilerek modellerde girdi olarak arazi yapısının tanıtılması için kullanılmıştır. Çalışma alanına ait pürüzlülük ve yükseklik haritaları aşağıda Şekil 6'da verilmiştir. Rüzgar türbinin bulunduğu yükseklik deniz seviyesinden 1500 metre yukarıdadır. Bu koşul düşünülerek o bölgedeki varsayılan hava yoğunluğu $\rho=1.054 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Deniz seviyesi ve bu yükseklik için iki farklı güç eğrisi hesaplanmıştır (Şekil 7).

İki farklı yoğunluğa göre hesaplanmış güç eğrisi yer almaktadır. İlk çalışmada olduğu gibi yıllık üretim hesaplamaları sırasıyla WAsP, WindPro ve Windsim modellerinde aynı girdiler ve parametreler kullanılarak hesaplanmıştır. İki farklı geçerli yön sektörü için üretim değerleri hesaplanmış olup bu üretim değerlerinin hava yoğunluğuna bağlılığını göstermek amacıyla standart hava yoğunluğu ve bölge koşullarına ait hava yoğunluğu kullanılarak üretim hesaplamaları tekrarlanmıştır. Tablo 6'de iki farklı sektöre ve bölgenin spesifik hava yoğunluğuna göre hesaplanan rüzgar türbinine ait yıllık üretim değerleri görülebilir. Tablo 7'de ise varsayılan hava yoğunluğuna göre hesaplanan yıllık üretim değerleri yer almaktadır.



Şekil 6: Çalışma Alanı Pürüzlülük ve Yükseklik Haritası



Şekil 7: Standart ve Bölge Koşullarına Göre Hesaplanmış Güç Eğrisi

Tablo 6: $\rho = 1.054 \text{ kg/m}^3$ Hava Yoğunluğunda Windspot 3.5'e Ait Yıllık Üretim Değerleri

Sektör 1 112.73° - 217.85°	Yıllık Üretim (MWsa/yıl)	Hub Yükseklüğünde Rüzgar Hızı (m/s)	Türbin Güç Eğrisi ($\rho = 1.054 \text{ kg/m}^3$)	Kapasite Faktörü (%)
WAsP	3.46	8.78	Windspot 3.5kW	11.27
WindPro	3.72	9.1	Windspot 3.5kW	12.13
Windsim	3.37	8.92	Windspot 3.5kW	10.99
Sektör 2 312.29° - 358.94°	Yıllık Üretim (MWsa/yıl)	Hub Yükseklüğünde Rüzgar Hızı (m/s)	Türbin Güç Eğrisi ($\rho = 1.054 \text{ kg/m}^3$)	Kapasite Faktörü (%)
WAsP	2.19	10.68	Windspot 3.5kW	7.13
WindPro	2.05	9.9	Windspot 3.5kW	6.68
Windsim	2.20	10.62	Windspot 3.5kW	7.17

Tablo 7: $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ Hava Yoğunluğunda Windspot 3.5'e Ait Yıllık Üretim Değerleri

Sektör 1 112.73° - 217.85°	Yıllık Üretim (MWsa/yıl)	Hub Yüksekliğinde Rüzgar Hızı (m/s)	Türbin Güç Eğrisi ($\rho = 1.225$ kg/m^3)	Kapasite Faktörü (%)
WAsP	4.01	8.78	Windspot 3.5kW	13.08
WindPro	4.32	9.1	Windspot 3.5kW	14.10
Windsim	3.91	8.92	Windspot 3.5kW	12.75
Sektör 2 312.29° - 358.94°	Yıllık Üretim (MWsa/yıl)	Hub Yüksekliğinde Rüzgar Hızı (m/s)	Türbin Güç Eğrisi ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$)	Kapasite Faktörü (%)
WAsP	2.54	10.68	Windspot 3.5kW	8.28
WindPro	2.38	9.9	Windspot 3.5kW	7.75
Windsim	2.55	10.62	Windspot 3.5kW	8.33

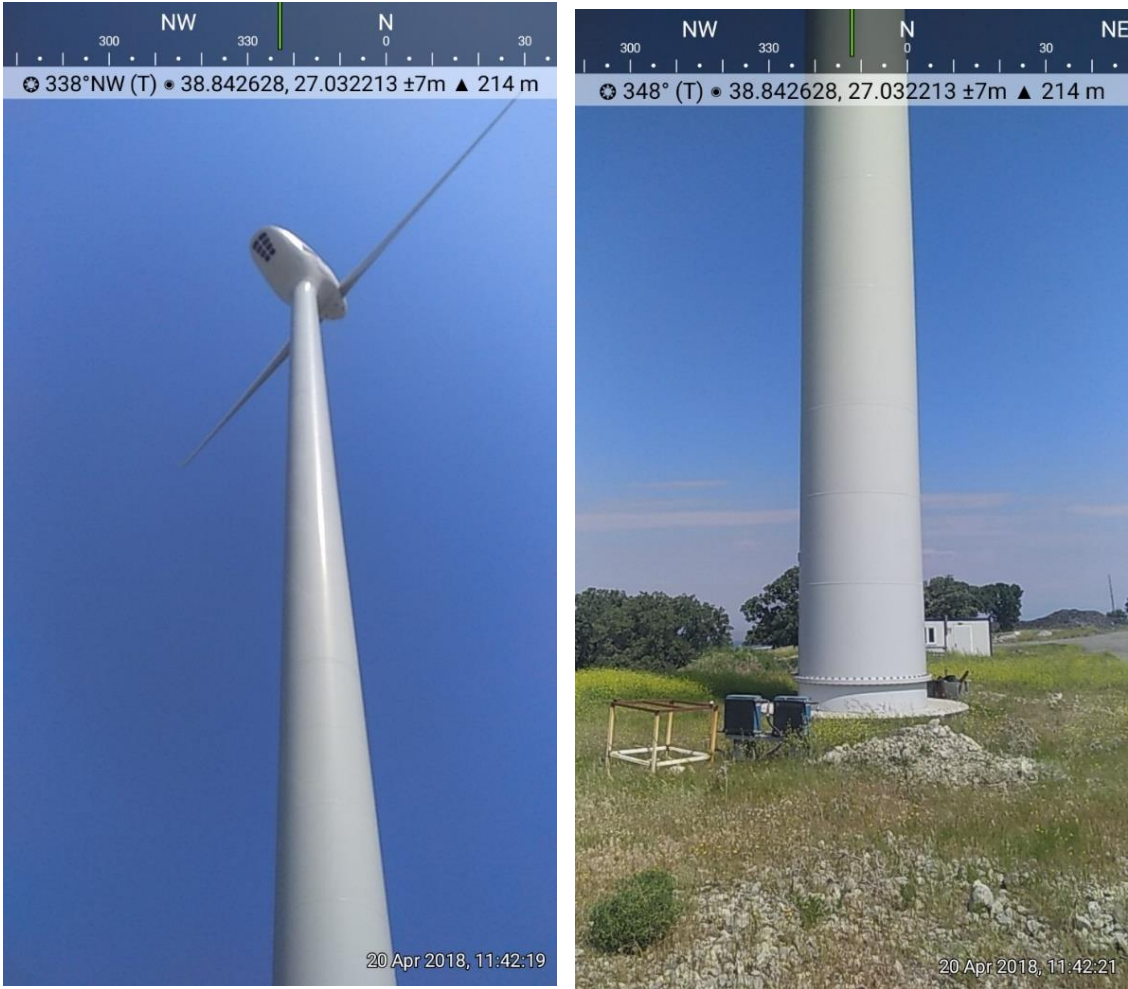
Bu analizden yola çıkarak ise şu sonuçlara ulaşılmıştır. Piyasadaki yazılımlardan farklı olarak proje kapsamında oluşturulacak olan yazılımın kullanıcı açısından kolay erişilebilir ve kullanabilir olması için hava yoğunluğu gibi saha koşullarına göre değişen parametrelerin yazılım içerisinde açık ve net bir şekilde yer alması, üretim değerlerinin doğruluğu açısından büyük bir önem taşıdığı yapılan bu çalışmayla tekrar göz önüne gelmiştir.

1.2 Saha Ziyaretleri

Proje başvurusunda da belirtildiği gibi dört adet saha ziyareti planlanmış, gerekli ön izinler alınmıştır. Ancak bunlardan bir tanesi tesisin el değiştirmesi sebebiyle çalışmamız kapsamında ziyaretimize olumlu cevap vermemiş ve sürekli olarak ileri bir tarihe ertelemiştir. Üç adet saha ziyaretiyle gerekli tüm bilgileri topladığımızı düşündüğümüzden dolayı bu bölüm toplam üç ziyaret ile sonlandırılmıştır. Saha ziyaret resimleri EK-1 olarak da bu rapora eklenmiştir.

1.2.1 Saha 1: ALDUR RES (500kW), Aliğa, İzmir,

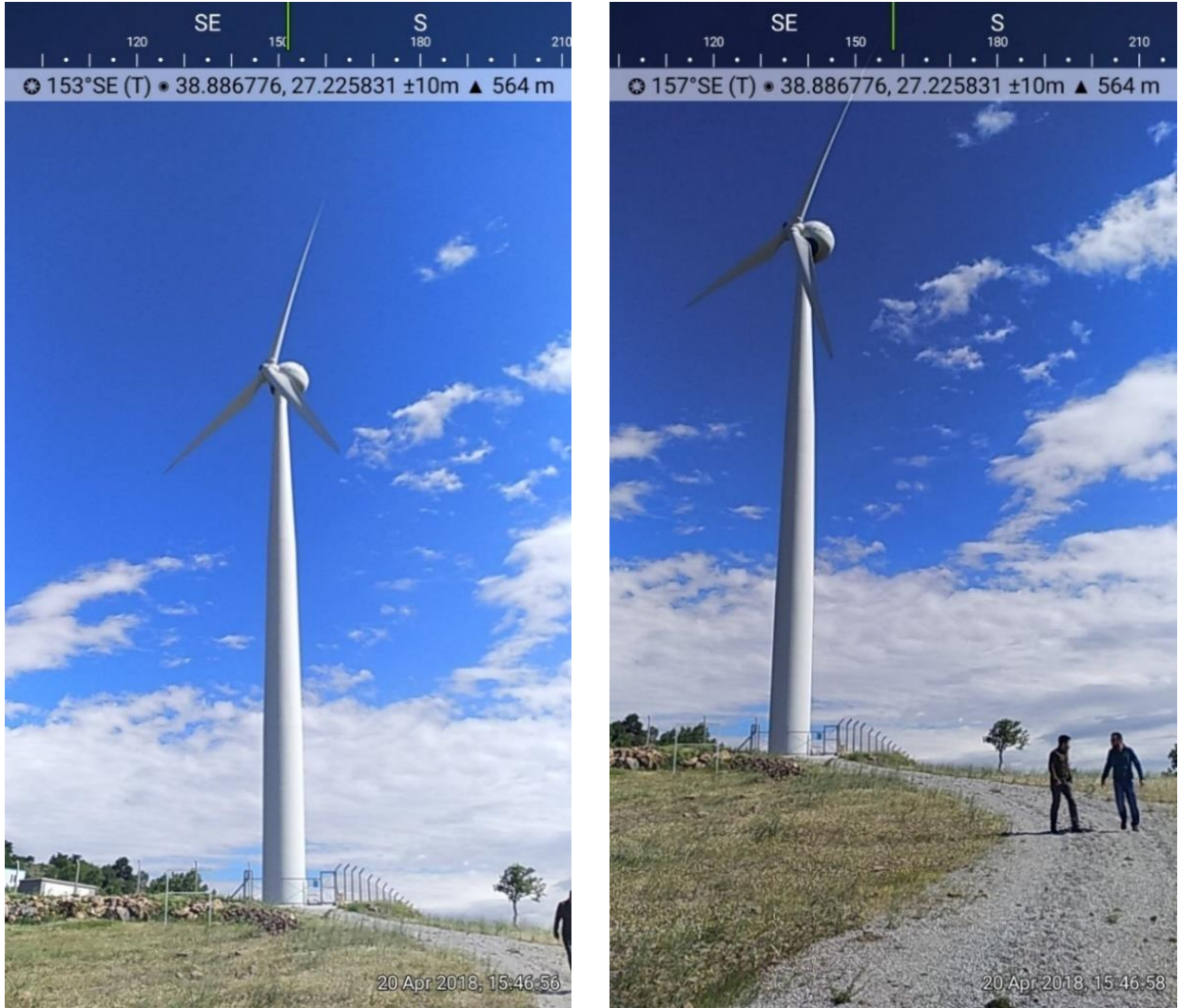
20 Nisan 2018 tarihinde ziyaret gerçekleştirildi. Ziyarete projede görevli şirket mühendisi Ali SARAN ile sahada yüz yüze görüşme yapıldı ve tesis sahası gezildi. Görüşmeye proje yöneticisi, bursiyer ve şirket yetkilisi katıldı. Bir Alman firmasına ait olan Turkwind68 tipli türbin kullanıldığı bilgisi alındı ve gerekli saha fotoğraflar çekildi. Tesis henüz faaliyete geçmediği için anket formundaki sorular cevaplanırsa da proje için veri talebinde bulunulamadı. Tesis üç sene önce kurulmasına karşın izin işlemleri yüzünden şu an faal bulunmuyor.



Şekil 8: ALDUR RES

1.2.2 Saha 2: Netdirekt RES (750kW), Bergama, İzmir

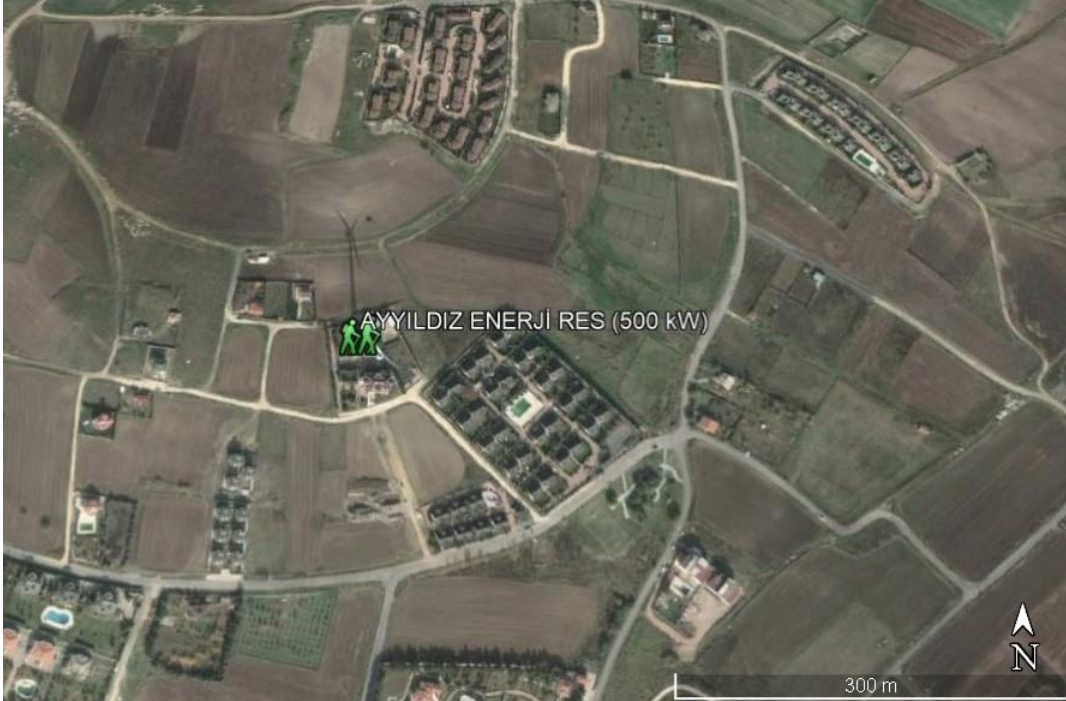
20 Nisan 2018 tarihinde ziyaret gerçekleştirildi. Ziyarete tesis sahibi Yaşar Semih Alev ile sahada yüz yüze görüşme yapıldı ve tesis sahası gezildi. Görüşmeye proje yöneticisi, bursiyer ve belirtilen şirket yetkilisi katıldı. Bir Kore firmasına ait olan UNISON U57 750 kW tipli türbin kullanıldığı bilgisi alındı ve gerekli saha fotoğraflar çekildi. Tesis faaliyete geçeli 6 ay olduğu öğrenildi ve tesis beklenenin üstünde üretim yapmaktadır.



Şekil 9: NetDirek RES

1.2.3 Saha 3, Ayyıldız RES (500kW), Büyükçekmece, İstanbul

26 Ekim 2018 tarihinde ziyareti gerçekleştirilen, 2015 yılından bu yana işletmede olan AYYILDIZ RES tesisinde Kore firmasına ait olan 1 adet 50 metre kanat çapına ve 68 metre kule yüksekliğine sahip UNISON U50 modeli 500 kW rüzgar türbini yer almaktadır. Tesisin ziyareti proje bursiyeri tarafından gerçekleştirilmiş olup ziyaret öncesinde tesisteki rüzgar türbininin konumlandırılması, tesisin kurulumu ve işletilmesi hakkında yetkililerden bilgi alınmıştır. Ziyaret sırasında tesisi etkileyen bina, ağaç vb. gibi yükselteleri ve engelleri gözlemek amacıyla birkaç metre ve birkaç kilometre öteden olmak üzere tesise ait fotoğraflar çekilmiştir. Tesis aşağıda görüldüğü gibi yaşam alanı içerisinde konumlandırılmış ve boyları 5-6 metre aralığında olan az sıklıkla ağaçlarla çevrelenmiştir. Tesis deniz seviyesinden yaklaşık 180 metre yukarıda olup, içerisinde yer alan bina da dahil olmak üzere yakınındaki binaların yüksekliği 7.5 metreyi geçmemektedir. Tesisin uzaydan elde edilmiş diğer bir fotoğrafı aşağıda yer almaktadır.



Şekil 10: Ayyıldız RES

1.3 Anket Çalışması

İş paketi 1 çalışmalarına destek olmak için saha ziyaretleri sırasında aşağıdaki form kullanıcılara sunulmuş (Bkz EK-2) ve alınan ve kişisel bilgiler içeren 3 cevap formu tarafımızdan analiz edildikten sonra İspanya'daki proje paydaşlarıyla bizim tarafımızdan aşağıda oluşturulan görüş paylaşılmıştır. Kullanıcıların Küçük türbin kullanımında zorlandıkları ve memnun oldukları konular kısaca aşağıda listelenmiştir. Yatırımcıların hepsi, imkan olursa bir tesis daha kurmak istemektedir.

Zorlandıkları konular

- a) İzin süreci: Türkiye'de izin süreçlerinin "lisanssız" adı altında tanımlanmış olmasına karşın lisanslı bir türbin için lisanslı tesisler kadar uzun bir izin süreci bulunuyor ve yaklaşık 30'dan fazla bakanlık ya da müdürlükten onay alınıyor.
- b) Değişken satın alma politikaları: Bazı kullanıcılar projelerine başladıklarında olan geçerli yasa ile proje hayata geçtikten sonraki kurallar oldukça farklı. Örneğin, 2015'de bedava olan ancak 2016'da TEDAŞ hat kullanım giderleri masrafı.

Memnun oldukları konular

- a) İzin süreçlerinden sonra hızlı kurulum ve hızlı ticarileşme: Eğer bürokratik işlemler tamamlanmışsa, küçük türbin satıcıları çok kısa bir sürede (ör: 20 gün) türbini kurabiliyorlar.
- b) Alım fiyatının dolara endeksli olması: lisanssız üretim için belirlenen minimum 7 cent'lik alış garantisi, yerli üretim kullanımı ile de artarak yatırımcıya çok iyi bir gelir kazandırmaktadır.

1.4 Hedef 2.1 sonuçları

Yapılan çalışmalar sonucundageliştirilecek yazılımın online olması ve projeye üye sekiz ülkeyi içermesi kararlaştırılmıştır. Bu ülkelerde konulacak türbinin konumu enlem ve boylam olarak harita üzerinde girilecektir. Kullanıcı arşivimizde bulunan bir küçük türbini seçebilir. Kullanıcının girmesi gereken son bilgi ise türbin göbek yüksekliğidir. Bundan sonra yazılımda diğer yazılımlardan farklı olarak dijital haritaların (yükseklik, pürüzlülük, sıcaklık gibi), rüzgar atlaslarının verileri hazır veri tabanımızdan otomatik çekilecektir. Daha sonra, türbin güç eğrileri donma ve hava yoğunluğuna göre güncellenecektir. Rüzgar atlası türbin konumuna interpolasyon ile taşınacak ve sonuç olarak üretim rakamları hesaplanacaktır.

2 Belirlenen ihtiyaçlara yönelik bir yazılım geliştirilmesi (İş Paketi 2, Hedef 2.2)

Bu iş paketinde bir online yazılım metodolojisi geliştirilmesi ve buna bağlı olarak en azından proje üye ülkelerinde fizibilite çalışması yapılabilmesi hedeflenmiştir. İş paketi 2, Görev 2.1 çalışmaları kapsamında iş paketinin ikinci bölümünde yapacağımız yazılımın hangi konularda piyasadakilerden üstün olması gerektiğini seçmiştik. Yazılacak yazılım özellikleri için aşağıdaki gibi bir hedef listesi konulmuştur. Hedeflenen aşağıdaki listelenen özelliklerinden mümkün olan sayıdaki tümünü kapsamaktır.

- Yazılım üye ülkelerdeki tüm küçük türbinlerin güç eğrilerini içermelidir
- Tüm üye ülkelerin yükseklik, pürüzsüzlük ve rüzgar Atlasları ortak bir kaynaktan gelmelidir.
- Yazılım sıcaklık, yüksek soğuk, deniz seviyesinden yükseklik ve türbülans kaynaklanan kayıpları güç eğrisi içinde temsil edebilmelidir.
- Rüzgar izi, yaşlanma, gölge etkisi ve hesaplamalar dışında bırakılacaktır
- Yazılım yüzde 20 belirsizliğe sahip olacaktır.
- Yazılım üretim rakamlarını tahmini kayıplar, belirsizlik üzerinden ancak kWh yıllık üretim olarak verecektir. Yazılımın her aşaması ücretsiz olacaktır ancak yazılım projeye üye ülkeler dışında yerler için geliştirilmeyecektir.
- Yazılımda kullanılacak atlas interpolasyon metodu bu proje öncesi Türkiye içinde geçerli Patent başvurusu yapılarak güvence altına alınmıştır ve diğer üyelerle yapılan anlaşmaya göre kaynak kodu diğer ülkelerle paylaşılmayacaktır.

2.1 Yazılımların yetersizliklerinin belirlenmesi

İncelenen yazılımlarda küçük rüzgar türbinleri için üç önemli faktör ile belirsizliği düşürme kararı verilmiştir. Bunlar:

- i. Hava yoğunluğuna bağlı olarak değişen güç eğrilerinin tahmini
- ii. Donma dolayısıyla türbinlerin çalışmadığı aylar.
- iii. Küçük türbinlerin yakın bölgesinde bulunan binaların etkisidir.

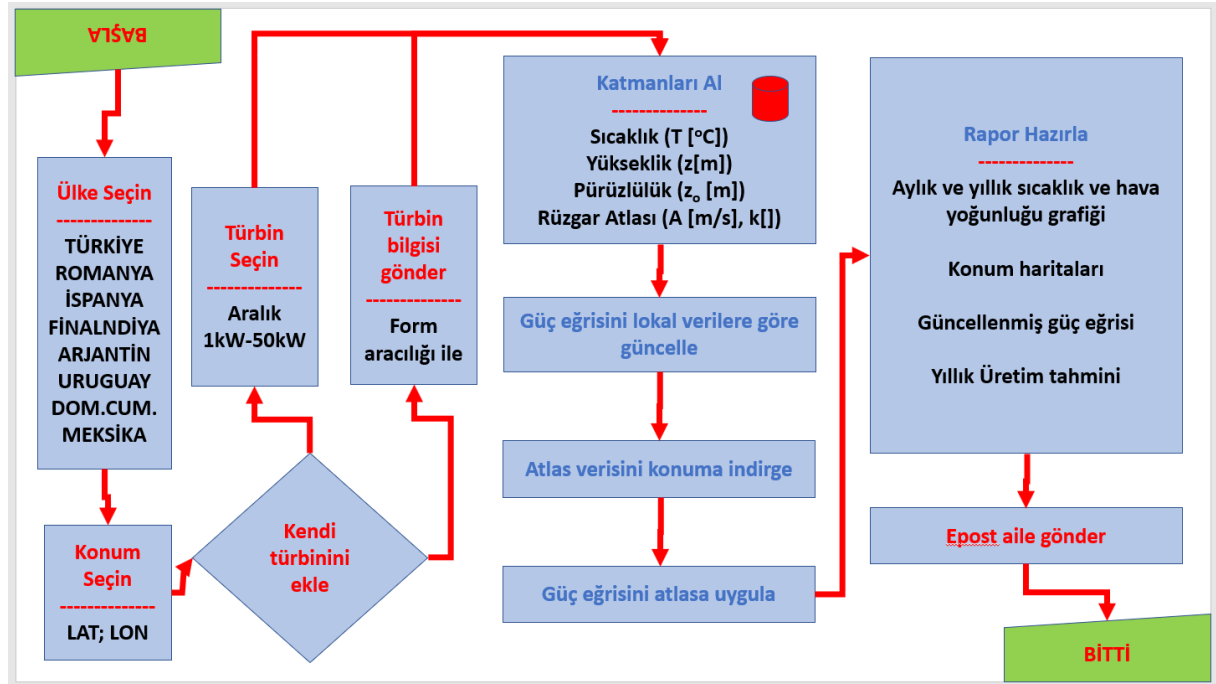
İlk iki faktör ve bu sebeplerle kaybolan üretimler olarak toplam üretimden düşülmek üzere hesaplanabilmektedir, 3ncü faktör ise tam anlamıyla kapsanamamıştır. Bir türbinin etrafındaki bir binanın hangi kriterlere göre türbine etkilediği konusunda Uruguaylı ortak ile bir çalışma yürütülmekteydi. Elde edilmek istenen kriterler bina yüksekliği ve türbine yakınlığına göre bir binanın etkisinin hesaplanması ve bunun içinde basit bir yöntemin geliştirilmesi dir. Belirlenen

kriterlerin dışındaki binalar, türbine etkisi olmadığı varsayılarak pürüzlülük olarak modele girilecektir. Bu konudaki şu an için geçerli fikrimize göre H yüksekliğindeki bir türbinin H x 100m yarıçapında bulunan H/4 ve üstü binalardan etkilendiğidir.

Bu çalışma çerçevesinde biz lineer modeller ile bu rapor içinde belirtilen sonuçları kendileriyle paylaşmamıza karşın bu raporun yazıldığı tarihe kadar kendilerinden CFD ile yapılmış çözümleri edinemedik. Dolayısıyla karşılaştırma ve metodolojimiz için ekleme şansı bulamadık. Bu konuda kendi sonuçlarımızla yorumlarımızı bu rapora ve yazılıma ekledik.

2.2 Yapılacak yazılımı iskeletinin oluşturulması

Hedeflenen yazılımda en önemli aşama iskeletin oluşturulması olmuştur. Bir online uygulama da yapılabilecekler gerçekten fazla olduğundan proje hedeflerine uygun, gerçekten tüm bölgeler için uygulanabilecek verilerin varlığının denetlenmesi bunların hangi yöntem ve kalitede yazılıma entegre edileceği, hangi ek bilgilerin kullanıcıya sorulacağı ve sonuç olarak bu işlemleri yürütecek hesaplama motorundan ne kalitede bir sonuç alınabileceği bu iskeletin oluşturulması sırasında anlaşılmıştır.



Şekil 11: Yazılım akış diyagramı

Son kullanıcının yazılımı kullanacağı düşüncesiyle Şekil 26'de gösterilen yapı her ülke için kurulmuştur. Kullanıcı sisteme üye olarak sistemi kullanabilir. Üyelik geçerli bir eposta adresi üzerinden yapılır ve kullanıcıdan isim, soy isim, eposta ve ülke dışında ek bir bilgi istenmez.

Kullanıcı öncelikle rüzgar türbini kurmak istediği ülkeyi seçmektedir. Daha sonra ise rüzgar türbinin konumunu harita üzerinde işaretlemektedir. Bunlara ek olarak listede verilen güç eğrisi bilinen türbinlerden biri seçebileceği gibi kendi türbinin güç eğrisini de sisteme yükleyebilmektedir. Yükleme işlemi bir form ile yapılmakta ve yönetici tarafından kontrol edilip onaylandıktan sonra sisteme eklenmektedir. Son olarak türbinin göbek yüksekliğinin kullanıcıdan girilmesi istenir. Her türbinin tavsiye edilen bir göbek yüksekliği olmasına karşın küçük türbinlerde keyfi seçimler yapıldığı bilinmekte olduğundan dolayı kullanıcı kanat yarıçapına bakılarak kanatların yere yakın dönmeyeceği her koşulda (genelde >3m) seçim yapmasına izin verilir. Ancak 50m üstü de yazılımın çalışma aralığı dışında olduğundan dolayı engellenir.

Türbin seçimi de yapıldıktan sonra kullanıcıdan başka hiçbir bilgi istenmemektedir. Sistem verilen nokta ve türbin göbek yüksekliği üzerinden sıcaklık, pürüzlülük, yükseklik ve rüzgar atlası verilerini veri tabanından çekerek bir hesaplama projesine dönüştürür. Öncelikle konumun hava yoğunluğunu ve donma olasılıklarının bir yüzde olarak hesaplar bu iki veri üzerinden güç eğrisini günceller.

Daha sonra atlas verisini hesaplanan atmosfer koşullarına ve göbek yüksekliğine göre orta ölçekten belirlenen konuma indirger (downscale). Bunu yaparken konumu 12 rüzgar yönü bölgesine ayırır. Kuzey 0 derece merkezden başlamak her 30 derece bir sektör olmak üzere 12 bölge belirler. Tüm hesaplamaları her bölge için tek tek yapar. Son olarak ise güç eğrisini ve konum istatistiklerini kullanarak kullanarak her bölgede ne kadar rüzgar, güç yoğunluğu ve üretim olduğunu hesaplayarak bunları birleştirir. Sonuç tablosu yıllık toplam üretim verilerini “kayıpsız” olarak modellenmiş halidir. Bu rakamlar üzerinden toplam %5.7’lik bir kayıp ekler (bkz Tablo 2: Ek Kayıplar) ve sonucu kullanıcıya bildirir. Konum için hesaplanan donma yüzdelerine göre kayıp oranı üstüne donam kaybı da yüzde olarak eklenir. Bu oran Türkiye’de genelde yüzde 10 mertebesinde dir. Ancak dünyanın farklı yerlerinde daha düşük ya da yüksek olabilir.

Kullanıcı sonuçları ekranda görmek. PDF olarak hazırlanmış sonuç kullanıcıya eposta yoluyla gönderilir. Bu yöntem hesaplama sunucusunda bir servis sırası ile yapıldığı için tercih edilmiştir. Yazılım geliş sırasına göre tüm hesaplamaları yapar PDF belgesini oluşturur ve eposta ile gönderir. Kullanıcı aynı kullanıcı adı ve şifresiyle girerek değişkenler üzerinde oynayarak yeni bir başvuru yapabilir ancak en son işleminin tamamlanmış olması gerekmektedir. Bu şekilde bir kullanım sınırının koyulma sebebi, yığılmaları ve kötü amaçlı kullanımları önlemek içindir.

2.3 Geliştirilen model eklemeleri

Güncel yazılımlardan daha iyi sonuçlar elde edebilmek için yazılımlardaki yetersizliklerinin belirlenmesi aşamasında hava yoğunluğu ve buzlanmadan kaynaklı güç eğrisi kayıpları ve engellerden oluşan rüzgar hızı kayıpları küçük türbinler için ön plana çıkmaktadır. Bu konularda ne tür üretim hesabı güncellemesi yapılması gerektiği konusunda

2.3.1 Hava Yoğunluğuna bağlı güç eğrisi güncellemeler

Hava yoğunluğu genelde yıllık hava yoğunluğunun ortalaması alınarak hesaplanmaktadır (Bingöl:2018). Bu elde edilen ortalama değer modelleme yazılımları tarafından kullanılır ve hava yoğunluğunun etkisi tahmini üretim değerlerine ya da türbin güç eğrilerine, her türbin noktası için ayrı ayrı uygulanır. Mühendislik yaklaşımında elde edilen hava yoğunluğu tüm sahaya uygulanırken güncel çalışmalarda her muhtemel türbin noktası için ayrı ayrı hava yoğunluğu hesaplanmakta ve ayrı ayrı uygulanmaktadır. Türbin üreticilerinin sağladığı güç eğrileri genellikle 15°C , % 0 bağıl nem ve 1.225kg/m³ hava yoğunluğu için hesaplanmaktadır. Üretilen güç denkleminde göre eğer hava yoğunluğunda bir azalma olursa, güçteki kaybı telafi etmek için rüzgar hızında artış olması gerekmektedir. Ancak hava yoğunluğu ve rüzgar hızının yükseklik ile herhangi bir orantısız ilişkisi bulunmamaktadır. Hava yoğunluğu sıcaklık (t), hava basıncı (p) ve bağıl nem (h) e bağlıdır. Hava yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\rho(t, p, h) = \frac{p M_a}{Z R t} \left[1 - X_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

Burada $R=8.314472$ J/molK, kuru hava yoğunluğu $M_a = \frac{28.96546 \times 10^3 \text{ kg}}{\text{mol}}$, X_v buhar mol kesri, Z ise sıkıştırılabilirlik katsayısıdır. Bu hesaplamanın dışında mühendislik yaklaşımına göre hava yoğunluğu hesaplaması ise şu şekilde yapılabilmektedir;

$$p(z) = p_0 \left[\left(1 - \frac{L_z}{t_0} \right) \right]^{g \frac{M_a}{R L}}$$

Basıncın yükseklikle olan ilişkisi kullanılırsa, hava yoğunluğu sadece sıcaklık ve yüksekliğe göre değişim gösterir. Mühendislik yaklaşımını kullanmak, bilinmeyen sayısını ikiye düşürerek, basınç ve bağıl nem ölçümü olmayan yerlerde de hava yoğunluğunun hesaplanmasına olanak verir. Bingöl,2018'in çalışmasına göre yıllık üretimler göz önüne alındığında CIWM metodu ve mühendislik yaklaşımı arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar düşük olmasına rağmen, aylık

bazda bu fark %0.2 ile %2 arasında değişim gösterebilmektedir. Türbinlerin güç eğrilerini güncellemenin birçok metodu vardır (Villanueva and Feijoo:2016). İki metot üzerinde yoğunlaştığımız çalışmada ilk çalıştığımız standartlarla tavsiye edilen metodun uygun olmadığını, ufak bir düzenleme ile bunu güncelleyen ikinci metodun projemiz için uygun olduğunu gözlemledir.

2.3.1.1 IEC Metodu

Bu metotlardan en çok bilineni IEC 61400-1-12 standardında önerilen yöntem olmasına karşın bu yöntem birçok kullanıcı tarafından tavsiye edilmemektedir. IEC metodunu kullanabilmek için öncelikle tüm veri setleri en azından bir referans hava yoğunluğu değeri için normalize edilmelidir. Referans hava yoğunluğu değeri, saha ölçümlerinden elde edilen ortalama hava yoğunluğu olabilir. Veri normalizasyonu şu şekilde yapılabilir;

$$P_n = P_{10min} \left(\frac{\rho_{10min}}{\rho_0} \right)$$

Burada P_n normalize edilmiş güç çıkışı, P_{10min} 10 dakikalık ortalama ölçülen güç çıkışı, ρ_0 referans hava yoğunluğu, ρ_{10min} ise 10 dakikalık ortalama hava yoğunluğu değeridir. Bu normalizasyon metodu eğer rüzgar hızına uygulanırsa aşağıdaki denklem elde edilir;

$$V_n = V_{10min} \left(\frac{\rho_{10min}}{\rho_0} \right)^{1/3}$$

Burada V_n normalize edilmiş rüzgar hızı, V_{10min} 10 dakikalık ortalama rüzgar hızıdır.

2.3.1.2 EMD-windPRO Metodu

WindPRO'nun kullandığı model temel olarak IEC 61400-12-1 hava yoğunluğu düzeltmesine dayanır. IEC metodunun yetersiz kaldığı düşünüldüğü için bu model geliştirilmiştir. Yeni WindPRO modelinde hava yoğunluğu düzeltme metodu iki adımda yapılmaktadır ki bu IEC metodu ile aynıdır. IEC metodu ile karşılaştırıldığında, WindPRO modelinin en büyük farkı denklemden ki üssün her rüzgar hızı için 1/3'e sabit olmayıp rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak alınmaktadır. 7-8 m/s'nin altındaki rüzgar hızları için üs, sabit ve 1/3'e eşittir. Rüzgar hızının 7-8 m/s ve 12-13 m/s arasında olduğu durumlarda ise üs 1/3'ten 2/3'e düzgün artan fonksiyon formundadır. Rüzgar hızının 13 m/s'nin üzerinde olduğu durumlarda ise üs 2/3'e sabittir. Üs değerleri üreticinin hava yoğunluğuna göre özel olarak hesaplanan güç eğrileri kullanılarak kalibre edilmiş değerlerdir. Bu sebeple WindPRO gerçekte, 1/3 ve 2/3 üs değerlerini değil bu değerlere yakın değerleri kullanmaktadır. IEC metodunda yıllık enerji üretim değerlerinde ki

yüksek tahmin oranı %5 değerine kadar ulaşabilirken, yüksek düzeltmelerde dahil olmak üzere kalibrasyon ile yapılmış hava yoğunluğuna göre özel güç eğrisinde %1 değerinin altında kalmaktadır.

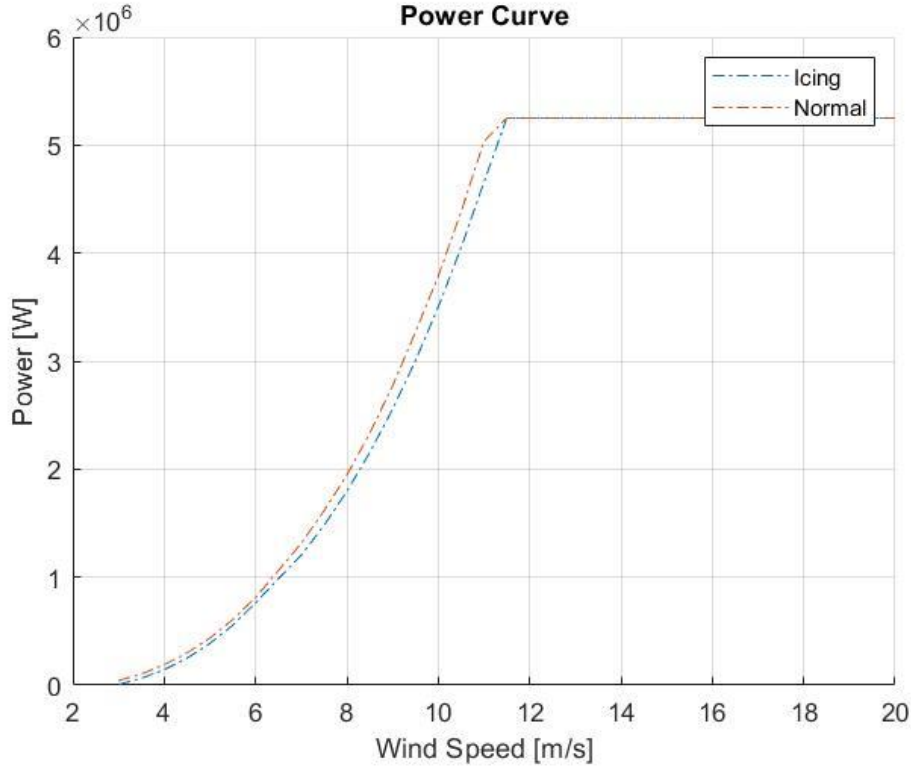
Biz projemizde ikinci yöntemi kullanarak ilerlemeyi tercih ettik çünkü ilk model deniz seviyesinden 1000m yüksekliğe kadar olan bölgelerde iyi sonuç verirken, ikinci yöntem daha yüksek yerlerde daha iyi sonuçlar vermektedir ve bizim de ihtiyacımız olan yüksek rakımlı yerlerde modelin çalışmasıdır.

2.3.2 Buzlanmaya bağlı güç eğrisi güncellemeler

Rüzgar türbinlerinin kapasite faktörleri buzlanma tarafından birkaç farklı şekilde etkilenir. Yoğun buzlanmanın olduğu yerlerde, türbinlerin yapısal bütünlüğünü korumak için tamamen kapatılması seçeneklerden biri olmaktadır. Türbinlerin tamamen kapatılması aynı zamanda üretimde tamamen durma anlamına gelmektedir. Buzlanma aynı zamanda türbin kanatlarının aerodinamik özelliklerini bozarak, geciken durma ile aşırı yüklenerek ve buz birikmesi nedeniyle kanatlarda oluşan dengesizlik ve buna bağlı olarak erken gelişen yapısal yaşlanma olarak kendini gösterir (Virk:2010). Aerodinamik özelliklerin buzlanma sebebi ile değişmesine bağlı olarak ve türbin üzerinde ki kontrol elemanlarının donmasına bağlı olarak rüzgar türbininde ki güç kayıpları yıllık üretim bazında %17'lere kadar çıkabilirken bu yüzde güç katsayısında %20 ila %50 gibi değerlere ulaşabilmektedir (Yirtici:2016). Bu güç kayıpları buzlanma miktarına ve cinsine göre değişiklik göstermektedir. Buzlanma soğuk iklimlere sahip olan bölgelerde gözlenmektedir. Soğuk iklim ise sıcaklığın uzun süre rüzgar türbinin çalışma sıcaklığının altında kaldığı bölgeler olarak adlandırılabilir. Ancak soğuk iklimlerde uzun süre sıcaklık düşük seviyelerde seyretmesine rağmen buzlanmanın gözlenmediği bölgeler olmasına rağmen daha ılıman iklimlerde yoğun buzlanmanın görülmesi sebebi ile soğuk iklim için tam bir tanım bulunmamaktadır. Bu nedenle IEA Wind Task 19 tarafından tanımlanan düşük sıcaklık iklimi ve buzlanma iklimi kullanılmaktadır. Düşük sıcaklık iklimi, sıcaklığın belirli bir dönem içerisinde türbinin çalışma aralığının altında olduğu, buzlanma iklimi ise buzlanmanın gözlemlendiği iklimler için kullanılmaktadır (Baring-Gould:2011). Konu hakkında kendi görüşlerimizi oluşturabilmek için NREL tarafından tasarlanan 5MW'lık rüzgar türbinin açık tasarım verilerinden faydalanılmıştır. Bu simülasyonda normal şartlar için NACA64618 kanat profili kullanılmıştır. Buzlanma profili için ise -10°C ve -20°C arasında ki buzlanma (Etemaddar:2014) profili kullanılmıştır. İki kanat profili için BEM simülasyonu kullanılarak güç eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen güç eğrilerinin karşılaştırılmaları Şekil 12 de gösterilmiştir.

Elde edilen çıktılarına göre %2'lik kayıplar gözlenmiş ve bunun küçük rüzgar türbinlerinde yüzde %10'a kadar çıkabileceği tahmininde bulunulmuştur.

Konuyla ilgili bir konferans makalesi tez öğrencisi Erdem Demir tarafından hazırlanmış ve tam metin olarak yayınlanmıştır (EK-3). Çalışmanın tüm içeriği bu yayın içinde bulunabilir.



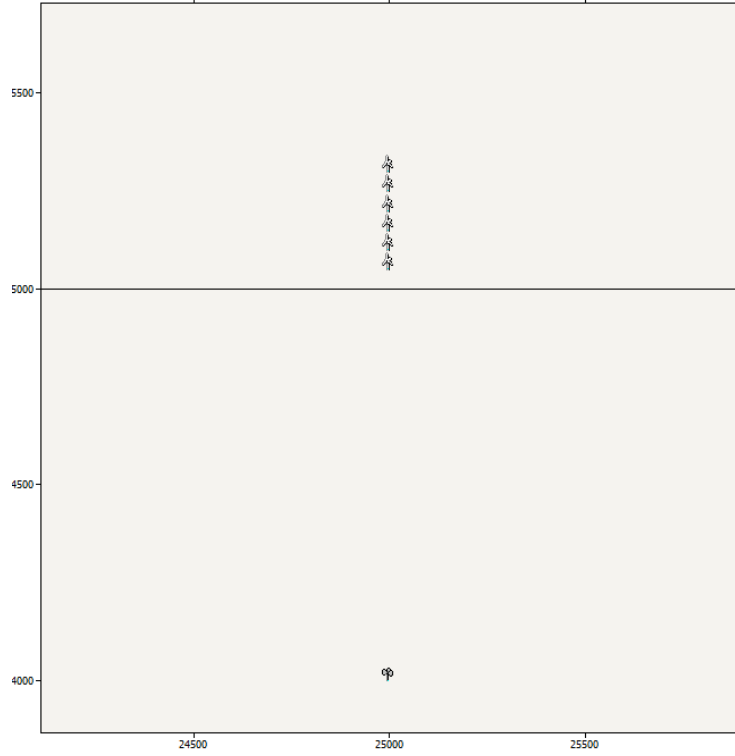
Şekil 12: Türbin Güç Eğrileri

2.3.3 Engellerin hava akımına etkisi

Farklı boyutlardaki engelin rüzgar hızına olan etkisini değerlendirmek üzere WAsP yazılımı içerisindeki lineer akışkan modeli denenmiştir. Bu yazılım içinde akış modeliyle ortak çalışan bir engel modeli de bulunmaktadır. 50x50 km² çalışma alanının ortasına doğu-batı doğrultusunda 10 km bir engel yerleştirilerek hesaplamalar serbest rüzgardan engele gelecek şekilde yapılmıştır (Şekil 13). Engelden sonraki bir noktada alınan veriler serbest rüzgarla karşılaştırılarak kıyaslanmıştır. Bu kesit 10km'lik engelin tam ortasından alınmıştır ve bu sayede sonsuz uzun bir engel olarak köşelerde oluşacak akım hatalarından kaçınılmaya çalışılmıştır. İlk model düzeneğinde çalışma alanında yükseklik 100 metre ve pürüzlülük 0.03 metre olarak ayarlanmıştır. Rüzgar güneyden 12 m/s sabit hızla engele dik gelecek şekilde esmektedir.

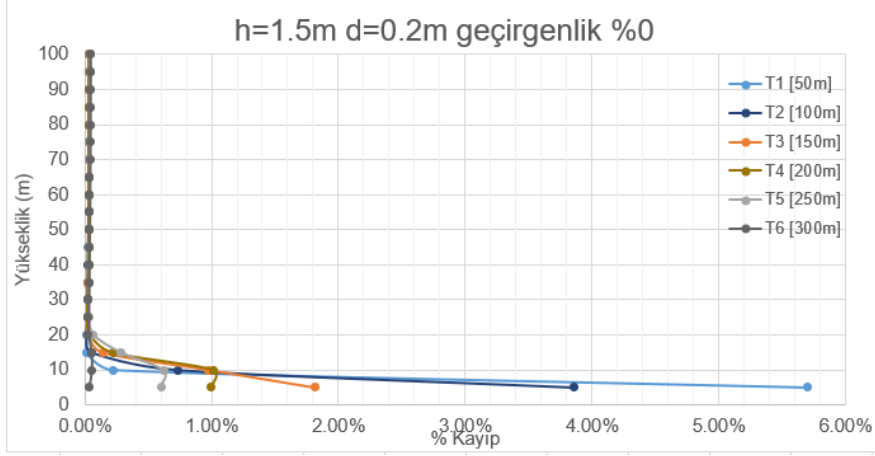
2.3.3.1 Çit yüksekliğinde engeller

Şekildeki anemometre ölçüm direğini temsil etmektedir. Anemometre ve yerleştirilen engel arasında 1 km mesafe vardır. Toplam 6 adet, 50 metre yüksekliğine sahip noktalar kullanılmıştır. İlk nokta (T1) ile engel arasında 50 metre mesafe vardır. İlk durumda 10 km uzunluğunda $h=1.5$ metre yüksekliğinde ve $d=0.2$ metre derinliğinde bir engel kullanılmıştır. Engelin geçirgenlik değerleri değiştirilerek hesaplamalar yapıldı. 3 farklı geçirgenlik değeri denenmiştir. Yüzde 0 geçirgenlik (Şekil 14), beton duvarlar için, yüzde 20 geçirgenlik çitler (Şekil 15) için ve yüzde 50 geçirgenlik bitkiler için kabul edilen geçirgenlik değerleridir.

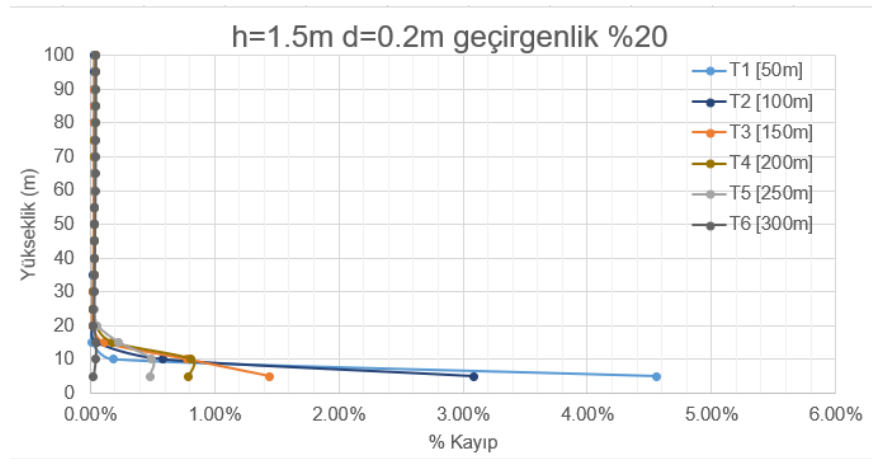


Şekil 13: Modelleme kurgusu; çit yüksekliği

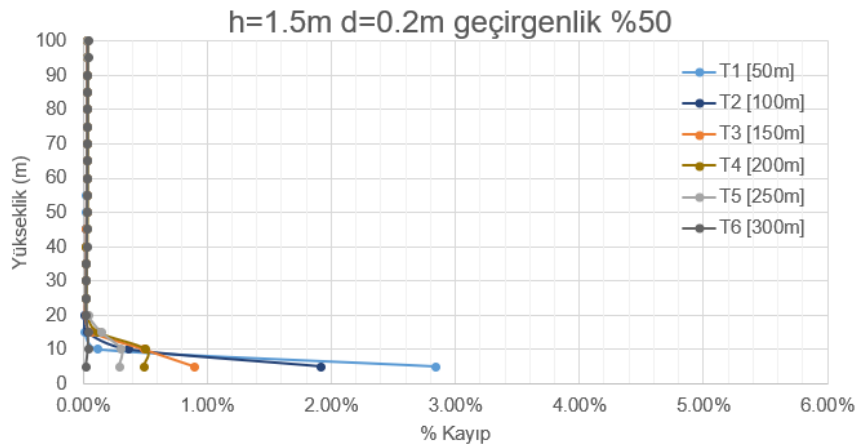
En büyük hata, duvar tipinde, yani %0 geçirgen olan yapılarda ortaya çıkmakta olsa da hata oranı düşmekle beraber tüm farklı geçirgenliklerde 1.5m'lik bir duvarın etkisinin 20m yüksekliğe kadar hissedildiği görülmektedir. Bunun anlamı 20m üstü göbek yüksekliğine sahip küçük türbinler için bu tür çitler tehlike teşkil etmemektedir.



Şekil 14: Çit yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %100 katı yüzey (ör: duvar)



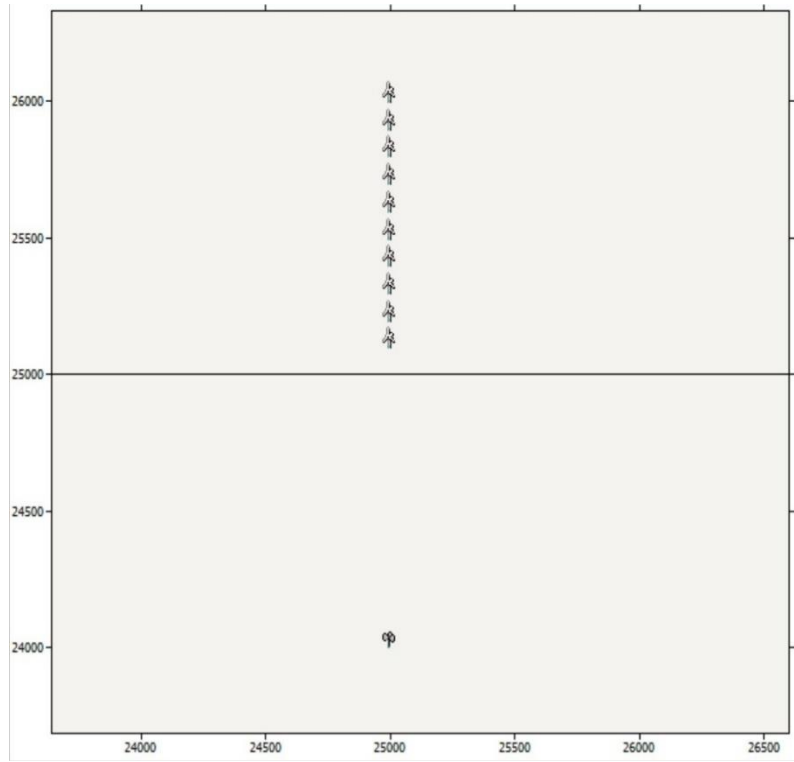
Şekil 15: Çit yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: delikli çit)



Şekil 16: Çit yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: çalılık)

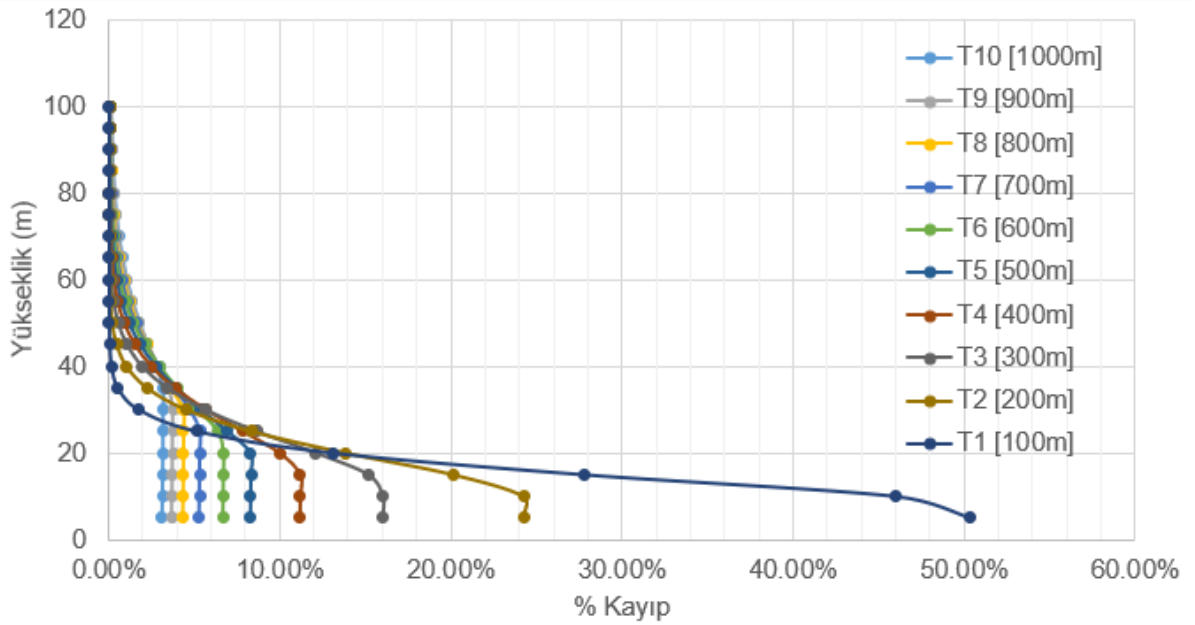
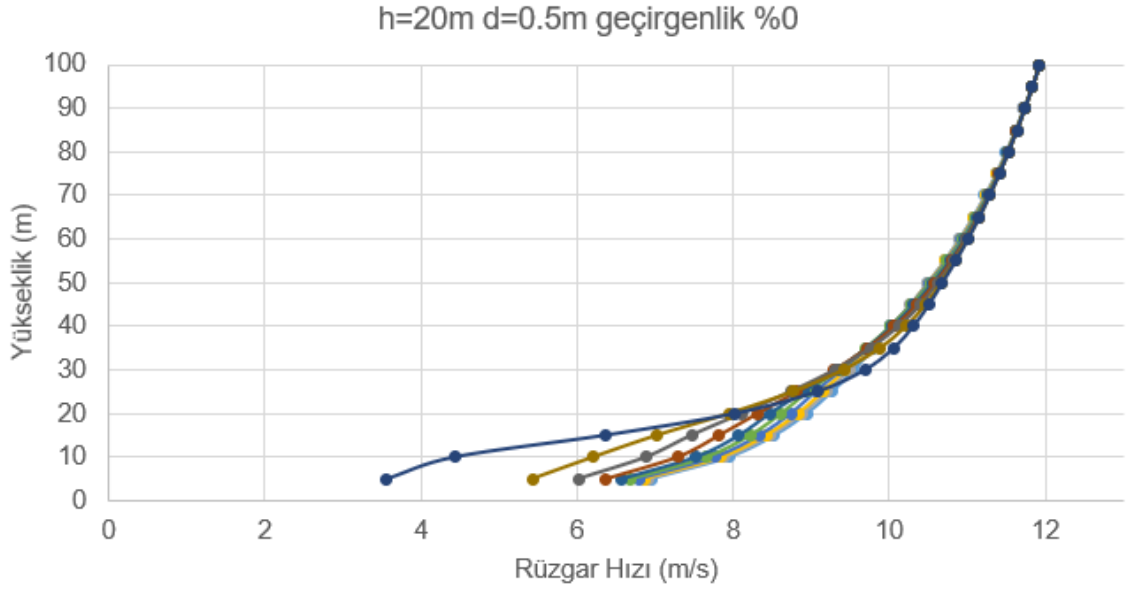
2.3.3.2 Ağaç yüksekliğindeki engeller

Daha yüksek engeller için, toplam 10 adet, 100 metre yüksekliğine sahip noktalar kullanılmıştır. İlk nokta (T1) ile engel arasında 100 metre mesafe vardır. İlk durumda 10 km uzunluğunda $h=10$ metre yüksekliğinde ve $d=0.5$ metre derinliğinde bir engel kullanılmıştır. Üç farklı geçirgenlik değerinde de modelleme tekrar edilmiştir. Alınan sonuçlara göre (Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20) Bu durumda ise yerden 50m yüksekliğe kadar yüzde 60'a varan rüzgar kayıpları gözlemlenmiştir.

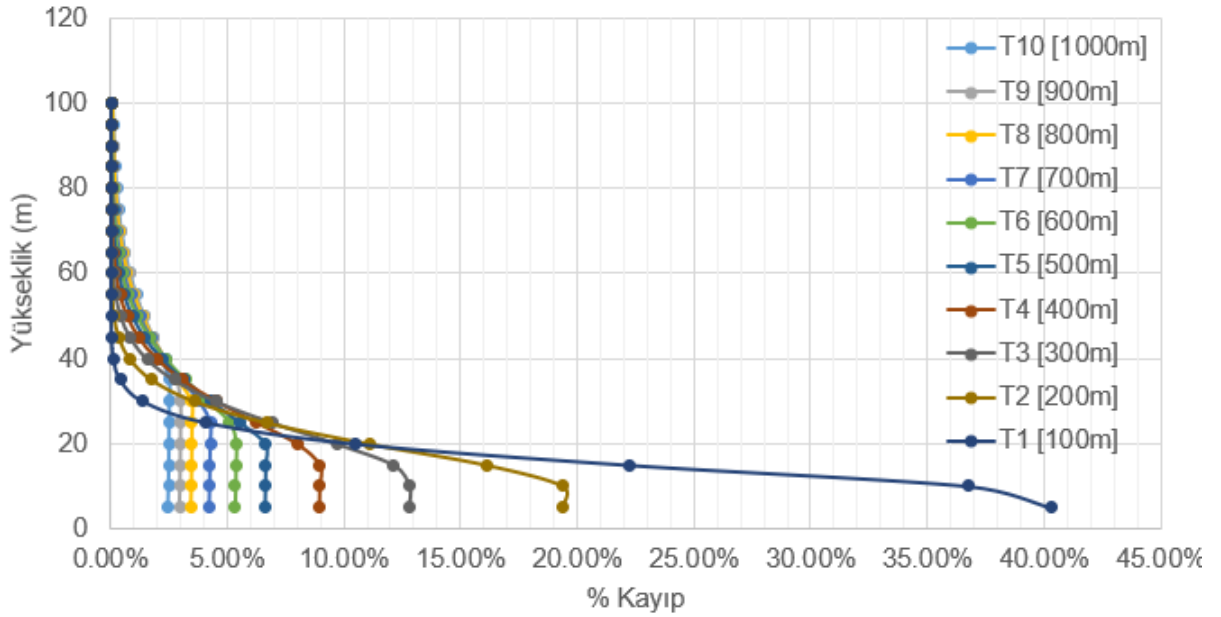
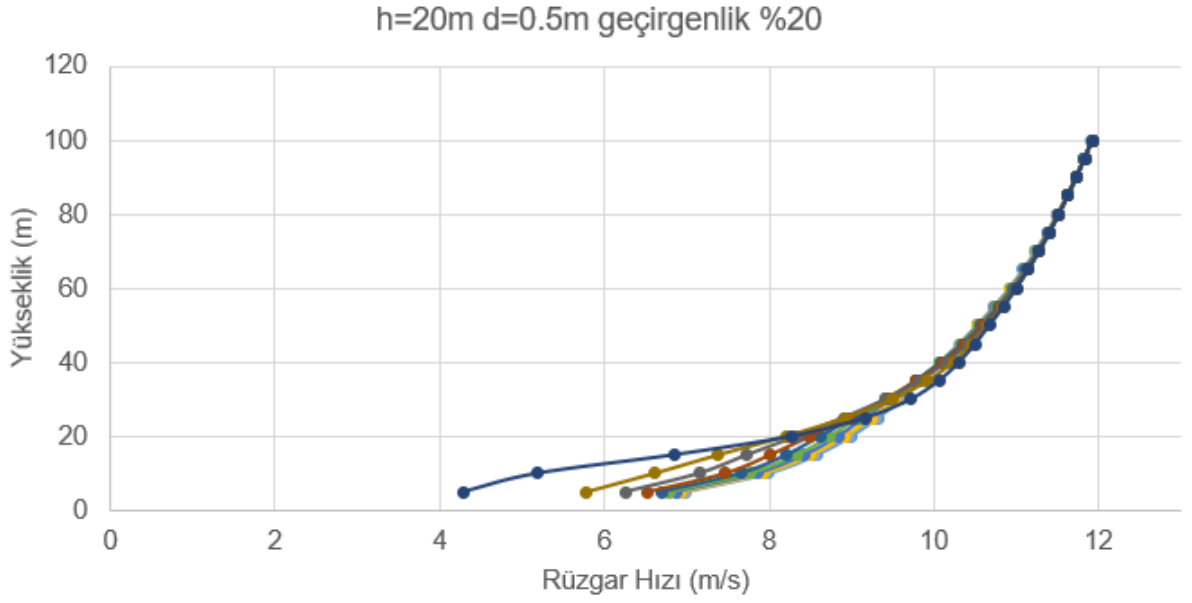


Şekil 17: Modelleme kurgusu; ağaç yüksekliği

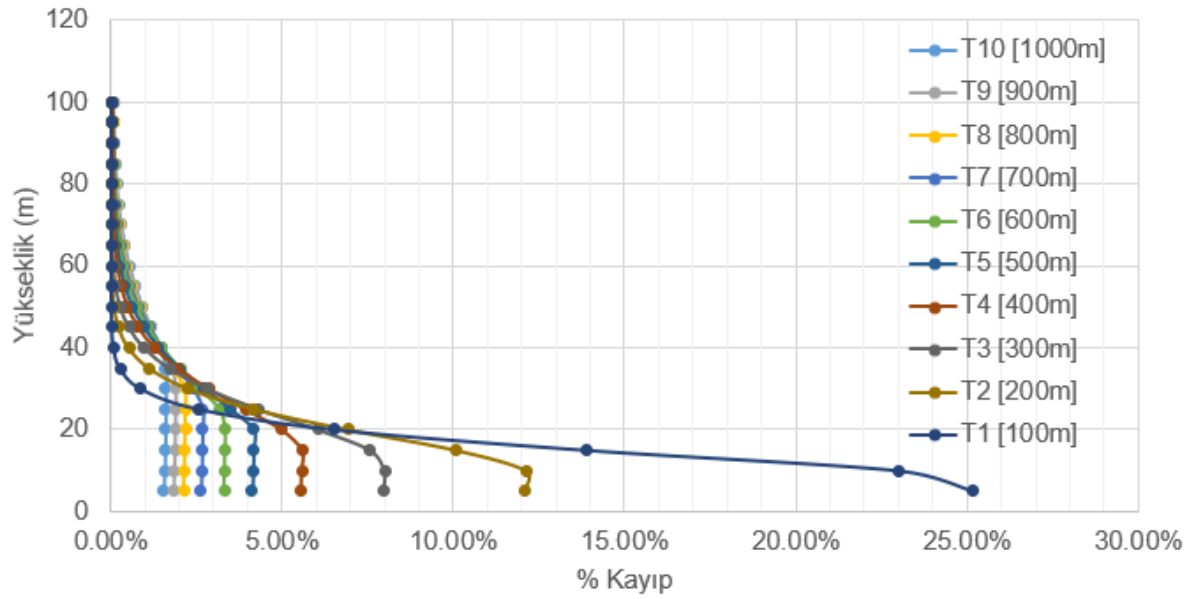
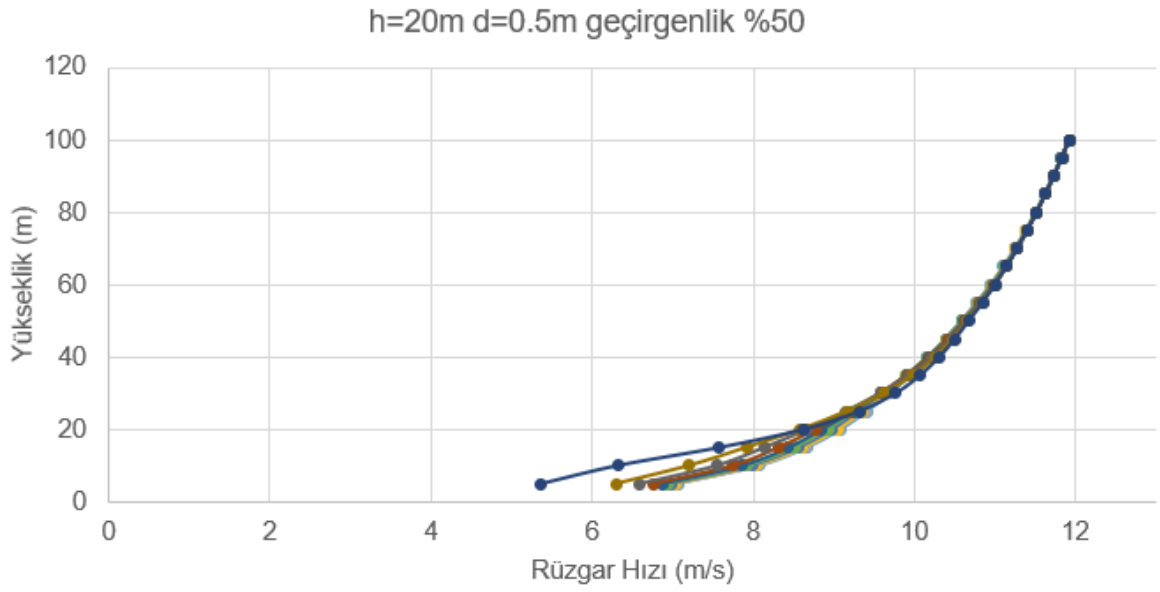
Bu modelleme çıktılarının projemiz adına anlamı; KADEME1 türbinlerinin yani Mikro türbinlerin çit yüksekliğine benzer 1.5m'deki nesnelere, orta ölçekli KADEME 2 türbinlerinin koruluk büyüklüğündeki ağaçlıklardan bile etkilendiğidir. Bu sebeple iki durumda da etki eden nesnelere rüzgar türbinlerinden en az 500m ilerde, ideal olarak 1km uzaklıkta olmalıdır.



Şekil 18: Ağaç yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %100 katı yüzey (ör: duvar) Arazide ölçülen dikey profiller (üstte) ve bunların serbest akıma oranı (altta)



Şekil 19: Ağaç yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: bina tipi)



Şekil 20: Ağaç yüksekliğinde nesnelerin küçük türbinlere etkisi. %80 katı yüzey (ör: koruluk)

2.4 Yazılım veri kaynakları

Geliştirilecek yazılımın akış şemasında (Şekil 11) belirtilen “Katmanlar” verileri için farklı kaynaklar kullanılmıştır. Bu bölümde bu kaynaklar hakkında bilgi verilmektedir.

2.4.1 Pürüzlülük haritaları

8 farklı ülkede aynı derece geçerli olan bir pürüzlülük atlası oluşturabilmek için üniform bir yapıya sahip GlobCover 2000 kullanılmıştır. 24 sınıfa ayrılmış olarak tüm dünyayı kaplayan bu haritada pürüzlülük çevrimleri bir tablo ile yapılmıştır (Tablo 8). Bu tablo düzenlenirken Global Wind Atlas projesi örnek alınmıştır.

Projenin ilerleyen aşamalarında ve yerel veriler ile yapılan rüzgar atlası karşılaştırmalarında harita bazı bölgelerde yetersiz performans göstermiştir. Bu sebeple Türkiye için hazırlanmış bir harita olan ÜSTÜN Enerji windPROSPERS haritaları aynı sahalarda denenmiştir. Sonuçlara göre detaylı pürüzlülük atlasları modelleme sonuçları az bir oranda değiştirmektedir. Ancak, bu ufak değişim bile zaten üretimin düşük olduğu küçük türbinlerde fark yaratmaktadır. Özellikle ormanlık arazilerde karşılaşılan hatalar da göz önüne alınarak ÜSTÜN haritaları bu proje için güncellenmiştir. Bu güncelleme çalışması sonucunda bu rapor sonunda listelendiği gibi bir adet SCI-E yayın da yapılmıştır (Bingöl:2019) (Bkz EK-4).

Ancak aynı kalitede haritalar diğer ülkeler için bulunamamıştır. Bu sebeple Türkiye’de daha düşük bir belirsizlik (yaklaşık %15) ve diğer ülkelerde daha yüksek bir belirsizlik (yaklaşık %20) olduğu varsayılmaktadır.



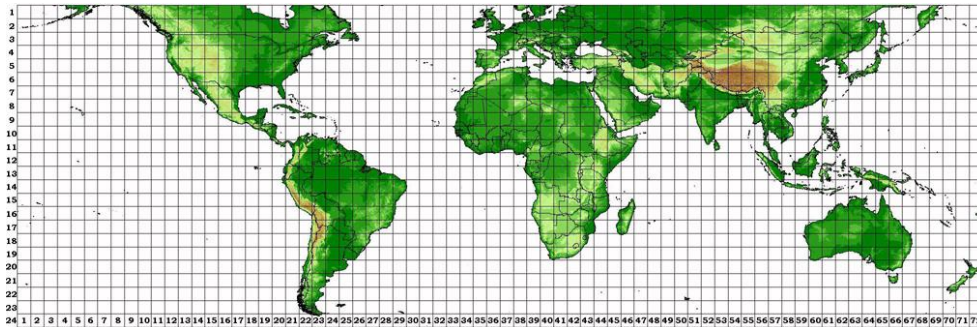
Şekil 21: GlobCover 2000 haritasının dünya görüntüsü

Tablo 8: GlobCover 2000 sınıfları ve tahmini pürüzlülük verileri.

Glob Cover		Pürüzlülük [m]
İçerik	Kod	
Su	210	0.0000
Kar	220	0.0004
Boş Arazi	200	0.0050
Kısa bitki örtüsü	140	0.0300
Aralıklı ağaçlar	150	0.0500
Maki türü bitkiler	11	0.1000
	14	
	130	
Kısa çıplak ağaçlık	180	0.2000
Karışık	30	0.3000
	20	
Çalılık	160	0.5000
	120	
Yüksek çalılık	170	0.6000
yaşam alanı	180	1.0000
Orman	40	1.5000
	50	
	60	
	70	
	90	
	100	
110		
Bilinmeyen	230	0.0300

2.4.2 Yükselti Eğrileri

Bu katman için Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) v4.1 sürümü kullanılmıştır. 90m çözünürlüğe sahiptir. Şubat 2000'de 11 günlük veri toplama ile üretilmiştir ve dünyanın 56° güneyden 60° kuzey arasındaki tüm bölgelerini kapsar. srtm.usgs.gov



Şekil 22: SRTM verisi

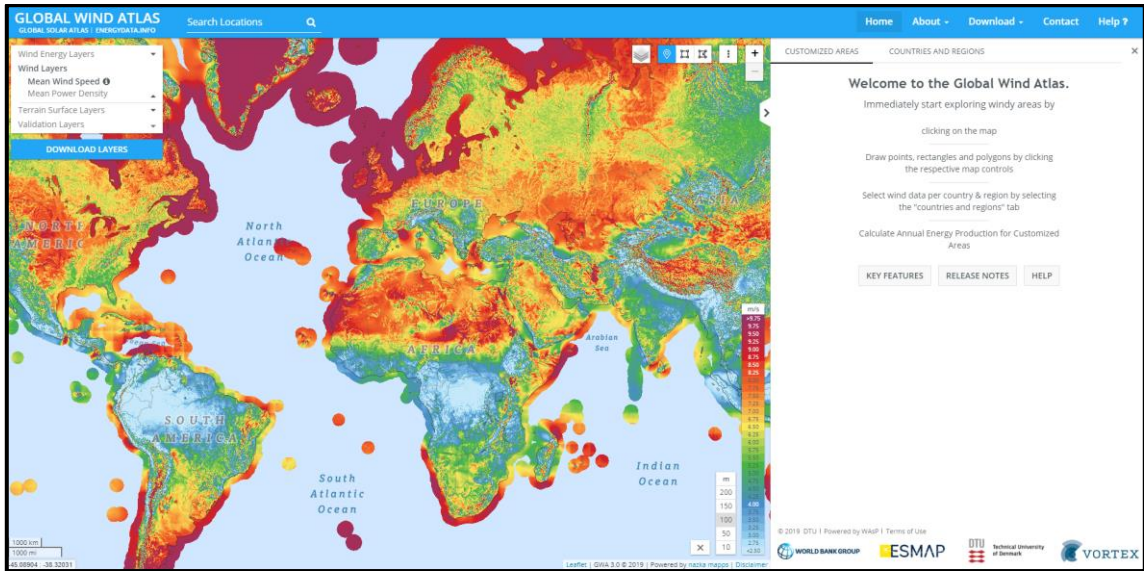
2.4.3 Engeller

“Engellerin hava akımına etkisi” alt başlığında da tartışıldığı gibi engellerin akışkan modeli içine özellikle küçük türbinler için eklenmesi oldukça zordur. Bu projede engellerin üretime etkisi konusunda daha detaylı bir çalışma yapılmamıştır. Eğer, projenin halen devam etmekte olduğu Uruguaylı proje ortaklarımızdan bir sonuç alınırsa yazılımın ilerleyen sürümlerinde eklenecektir. Şu an için rüzgar türbinlerinin 500m çevrelerinde yüksek yapıların (ör: ev, ağaç, yüksek yapı vb.) olmaması gerektiği kullanıcılara belirtilmiştir.

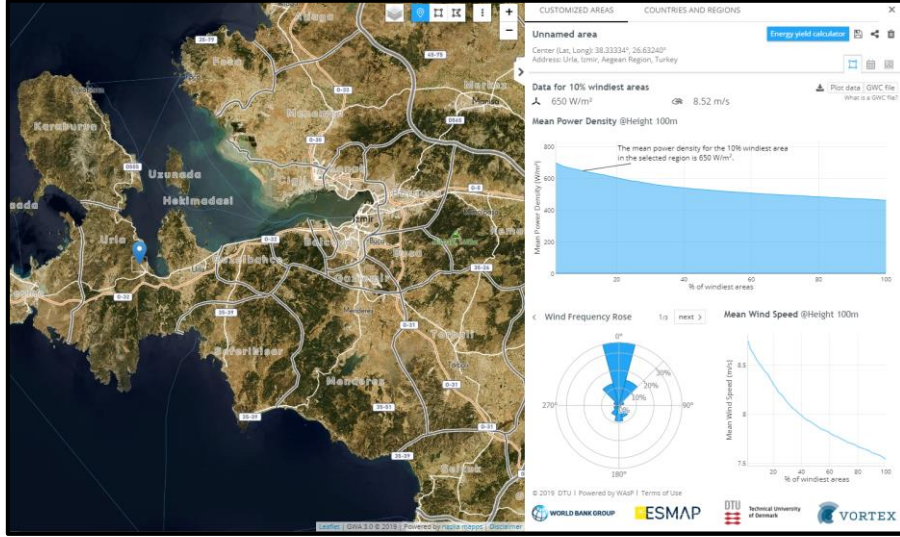
2.4.4 Rüzgâr Atlası

Rüzgar atlasları modelleme yöntemiyle yapılarak geniş bölgelerdeki enerji yoğunluğunun detaylı olarak incelendiği orta ölçek modellemeye dayalı çalışmalardır. Danimarka Teknik Üniversitesi bu konuda defalarca çalışmış farklı nümerik modelleme teknikleri geliştirmiş ve konuda en güncel teknolojiye sahip kurumdur. 2016 senesinde Küresel Dünya Atlası (Global Wind Atlas – GWA) adında bir proje geliştirerek tüm dünyayı kapsayan bir rüzgar atlası çalışması yapmıştır. Daha sonra bu veriyi 2017 ve 2019 yıllarında güncelleyerek 3ncü sürüme ulaşılmıştır (Şekil 23). Veriler www.GlobalWindAtlas.org sitesinden ücretsiz indirilebilmektedir.

Haritanın Türkiye ve diğer ülkelere uyumluluğunu belirlemek için validasyon çalışmaları yürütülmüştür. İki adet konferans makalesinde 3 sahadan toplanan veriler incelenmiştir (Kalay:2019a, Kalay 2019b) (Bkz. EK-5 ve EK-6).



Şekil 23: GWA resmi web sitesi; www.GlobalWindAtlas.org



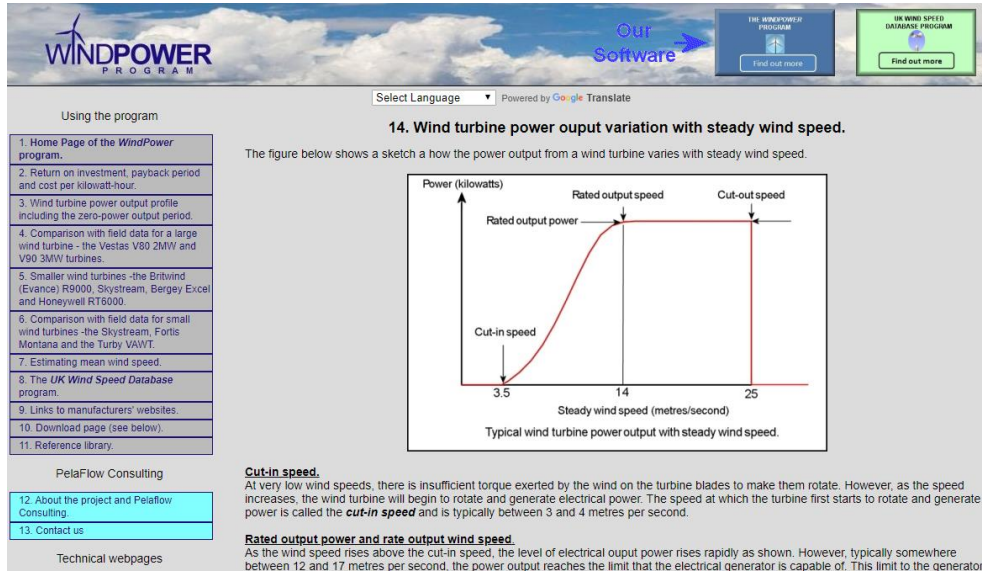
Şekil 24: GWA sitesinden indirilebilecek bilgiler

GWA verilerinin hesaplanması istediğimiz noktaya interpolasyonu için sonuç raporuna konu olan projenin de yöneticisi olan Dr. Ferhat Bingöl tarafından 2014-2016 yılları arasında “Üniform Rüzgar Atlaslarının Uyarlanması: Türkiye Örneği” başlıklı çalışmada geliştirilmiş bir metodoloji kullanılmıştır. Proje TÜBİTAK Co-Funded Brain Circulation desteklidir ve çıktı için patent başvurusu yapılmış ve araştırma aşamasından geçmiştir. Metot “Uniform Atlas Interplasyon Metodu- BAIM” olarak tanınmaktadır. Bu metodolojide interpolasyon sadece noktaların birbirlerine ters orantılı olarak yapıldığı bilindik yöntemlerden farklı olarak hava sıcaklığı, yoğunluğu, basınç, bağıl nem gibi atmosferik parametreler ve deniz seviyesinden yükseklik, pürüzlülük, engeller gibi sahada ki değerlere göre çalışan bir interpolasyon yöntemidir. Patent başvurusunda detaylı anlatılan bu çalışma için EK-7’ye bakılabilir.

2.4.5 Güç eğrileri ve düzeltimesin

Yazılımda kullanılan güç eğrileri iki kaynağa dayanmaktadır. İlki bu konuda uzun bir süredir veri toplayarak açık kaynaklı en geniş küçük türbin veritabanını kuran İngiltere merkezli PelaFlow Consulting şirkettir. Bu danışmanlık şirketi verileri toplu halde indirilebilir olarak web sitelerinde sunmaktadır². Bu sitede küçük türbinler hakkında giriş seviyesinde de bilgiler paylaşılmaktadır. Bu sitedeki bilgilere ek olarak proje ortaklarının ülkelerinde üretilen ve satılan rüzgar türbinlerinin de tavsiye edilen kule yüksekliği, kanat çapı, güç eğrisi gibi tüm karakteristik bilgileri yeni yazılımın web sitesine eklenmiştir. Güç eğrileri, 2.3.1 ve 2.3.2’de anlatılan yöntemlerle hava yoğunluğu ve donma dönemlerine göre güncellenir.

² http://www.wind-power-program.com/small_turbines.htm



Şekil 25: PelaFlow Danışmanlık şirketinin küçük türbinler için geliştirdiği websitesi

2.5 Web App oluşturulması

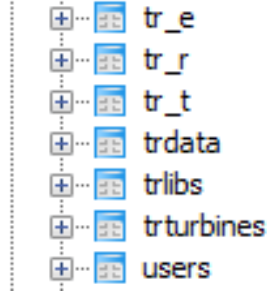
Yazılım için aşağıda listelenmiş açık kaynak kodlu ürünler seçilmiştir:

- Linux / Ubuntu 18.04 işletim sistemi
- PHP 7.1 / 7.3 kodlama yazılımı
- Apache v2 Web sunucusu
- PostgreSQL veritabanı (PostGIS v2.3 Eklentisi ile)
- C programlama dili (PHP eklentilerini yazmak için)

2.5.1 Veri tabanının kurulumu

Yazılımın sadece üye ülkeleri kapsamına karar verilmiş olsa dahi, ilerde genişletilmesi ve herhangi başka bir ülkenin kolayca eklenebilmesi için her ülke için standart bir veri tabanı iskeleti oluşturulmuştur. Burada:

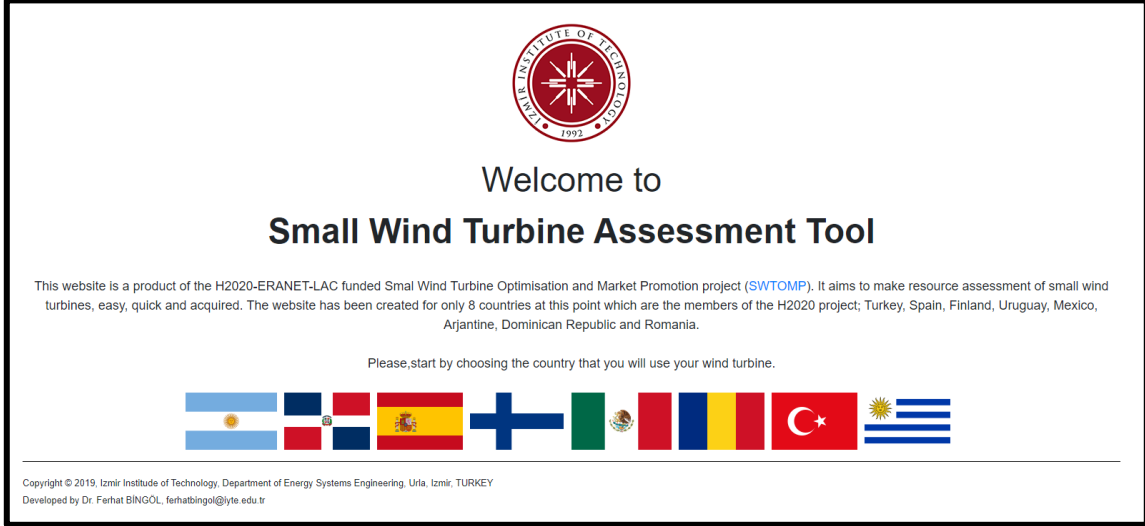
- TR_E: Yükseklik verileri raster formatında
- TR_R: Pürüzlülük verileri raster formatında
- TR_T: Sıcaklık verileri raster formatında
- TRDATA: İşlenmiş Atlas verileri tablo formatında
- TRLIBS: Atlas verilerin kaynak verileri tablo formatında
- TRTURBINES: Türkiye’de satışı olan küçük türbin markaları tablo formatında
- USERS: Genel kullanıcı veritabanı tablosu



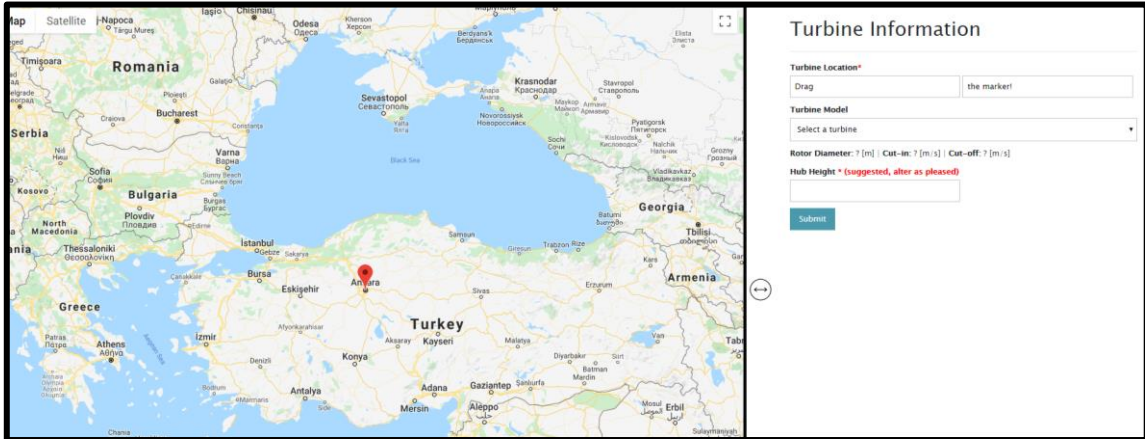
Şekil 26: PostGIS veri tabanı tabloları

2.5.2 Arayüz

Farklı seviyelerdeki kullanıcıların hepsinin sorunsuz olarak siteyi kullanabilmesi için çok basite indirgenmiş bir arayüz düşünülmüştür. Yazılıma kolay akılda kalması için “Small Wind Assessment Tool – SWAT” adı verilmiştir. Bu arayüzde öncelikle kullanıcı rüzgar türbini kurulumu yapmak istediği ülkeyi seçer (Şekil 27). Her ülkenin kendi veritabanı bulunmaktadır ve bu sistemi hızlı kılınmaktadır. Daha sonra kullanıcı Google Earth arayüzü ile geliştirilmiş bir harita sayesinde zoom özelliğini kullanarak istediği kurulum noktasını bulur ve işaretler. Bu seçim anında koordinat sistemi bilgileri olarak forma aktarılır (Şekil 28). Kullanıcı bu noktaya listeden bir türbin seçmek zorundadır. Seçtiği türbinin çalışmaya başlama, durma rüzgar hızları kadar kanat açıklığı ve kule yüksekliği bilgileri seçim yapılır yapılmaz belirir (Şekil 29). Kullanıcı bunlardan sadece kule yüksekliğini değiştirebilir (Şekil 30). Tüm seçimler yapıldıktan sonra GÖNDER tuşuna basıldığında sistem hesaplamaları olarak yaparak iki sayfalık bir rapor hazırlar (Şekil 31). Rapor örnekleri EK-8’de sunulmuştur.



Şekil 27: SWAT Giriş Ekranı



Şekil 28: SWAT konum seçme ekranı



Şekil 29: SWAT Türbin seçme ekranı

38.333195213888125 26.632619947814874

Turbine Model

Endurance E-4660 23.5m 85Kw (MG)

Rotor Diameter: 23 [m] | **Cut-in:** 3 [m/s] | **Cut-off:** 25 [m/s]

Hub Height * (suggested, alter as pleased)

48

Submit

Şekil 30: Rüzgar türbini seçiminden sonra tavsiye edilen kule yüksekliği belirtilir ve kullanıcı isterse bunu değiştirebilir.

3 Sonuçlar

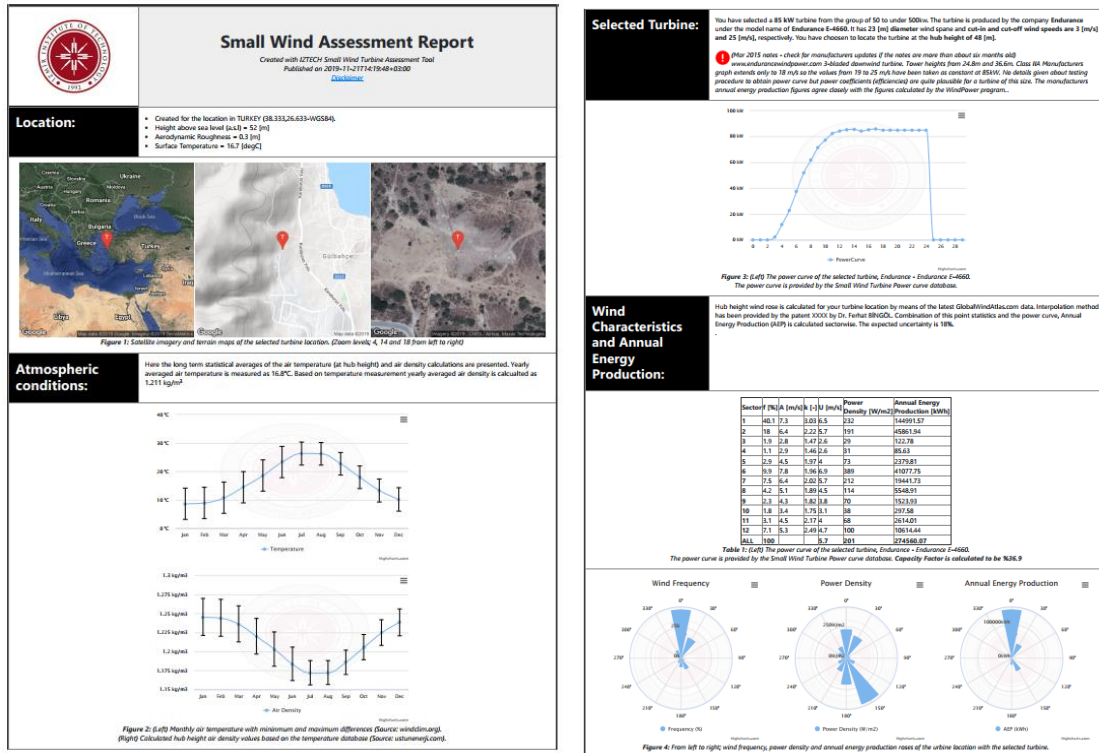
Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion - SWTOMP (Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu ve Market Promosyonu) projesinin ana amacı küçük ve orta ölçekli rüzgar türbinlerinin ana şebekeden uzak noktalar ya da düşük kapasiteli şebeke bağlantıları olan noktalarda kullanımı için tanıtımının yapılması, bu şartlara uygunluğu için geliştirilmesi ve nihayetinde belirtilen şartlar uygulanabilir hale getirilmesi idi. Bu amaçla farklı iş paketlerine bölünmüştür. Bu rapor içinde çok uluslu projenin bizim sorumlüğümüz altında tamamlanan İş Paketi 2'nin çıktıları sunulmuştur. İP2'de amaç, hali hazırda var olan küçük türbinleri destekleyen fizibilite yazılımları seviyesinde olacak bir ücretsiz yazılım geliştirmek ve öncelikle proje üyesi ülkelerde küçük rüzgar türbinlerini prome etmektir. Bu sayede şahıs ya da kurumsal yatırımcıların kolay ve hızlı bir şekilde yatırımlarının gerçekliğini görebileceklerdir.

Proje başlangıcında hedeflenen kazanım, öncelikle proje ortağı ülkelerde ve proje sonrası geliştirilmek üzere tüm dünyayı içine alan hızlı, güvenilir ve ücretsiz bir fizibilite yazılımının geliştirilmesi ve online bir uygulama olarak kullanıma sunulması hedeflenmekteydi. Bu hedefe ulaşmak için iki adımlık bir araştırma faaliyeti düşünülmüştü. İlk adımda mevcut yazılımların küçük türbinler için karşılaştıkları sorunlar incelenmiş ve bulunan eksikler arasından proje kapsamında irdelenebilecek olanlar seçilmiştir. İkinci adımda ise bu eksikliklerin desteklendiği ve genel fizibilite çalışması yapılabilecek bir yazılım üretilmiştir. Yazılımda 114C116 nolu TÜBİTAK destekli projedeki atlas interpolasyon metodu kullanılması dışında tüm metot ve teknikler küçük türbinler için ya geliştirilmiş ya da güncellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Watt seviyesinden 50 kW seviyesine kadar güç eğrisi sertifikasına sahip türbinlerde yüzde 15-20 mertebesinde belirsizlik ile hesap yapabilen bir metodoloji tamamlanmıştır. Yazılım Türkiye'de ALFA testine başlamıştır. Diğer ülkelerin ERANET proje bitiş tarihleri farklı olduğu için, tüm veriler sisteme yüklenince diğer ülkelerde aktif olacaktır. Geliştirilen Web App, "Small Wind Assessment Tool - SWAT" (Küçük Rüzgar Fizibilite Yazılımı) sadece Türkçe ve İngilizce olarak hizmet vermektedir.

SWTOMP projesinin diğer ayaklarında katılımcı olarak da bulunmamıza karşın, diğer iş paketlerindeki gelişmeler diğer ülkelerin kontrolü altındadır. Bu kapsamda İspanya, Meksika, Arjantin, Finlandiya ve Romanya; soğuk ve tropikal iklime sahip noktalarda çalışabilen küçük türbin karakteristiklerini belirlemek ve prototip geliştirmek konusunda ERANET-LAC sonuç raporunda "tasarımın devam ettiği ve prototipin halen üretilmediğini" belirtmişlerdir. Projenin farklı ülkelerde farklı süreler için destek almasından dolayı bu iş paketinin üyelerinin sonuçları yayınlamak için halen zamanı vardır. Diğer bir iş paketinde ise projeye üye ülkelerde küçük

türbinleri tanıtmak, uygulanabilir hale getirmek ve yerel üretimi desteklemek hedeflenmiş ve tüm ülkeler kendi yerel çalıştay, kongre ve konferanslarında küçük türbinlerin tanıtılması için faaliyet yürütmüşlerdir. İYTE, bu konuda 4 adet yerel sempozyum ve 1 adet uluslararası konferans da çalışmalarını ve projenin tümü hakkında bilgi vererek iş paketine destek olmuştur.

Projenin en büyük hedeflerinden biri olan üye ülkeler arasında küçük türbinler konusunda ortak çalışma ve iletişim ağı oluşturabilmek ve projeden sonra da bu iletişimi canlı tutabilmek konusunda konsorsiyum lideri İspanya özel bir çaba harcamış ve Türkiye, Uruguay ve İspanya arasında çalışmaların devamı, yeni uluslararası desteklere başvurma ve ortak proje geliştirme konusunda ortak hedefler benimsenmiştir. Türkiye adına İYTE aynı zamanda Finlandiya ile soğuk ortamda çalışan türbinler hakkında çalışmayı hedeflemektedir.



Şekil 31: Örnek rapor (tam sürümleri EK-8'de bulabilirsiniz)

Yayınlar

Sıra	Çıktı türü	Yazarlar	Başlık	Yayın yeri	Durumu*
1	Konferans Makalesi (Ulusal)	Ferhat Bingöl, Felix Avia Aranda, Carolina Garcia Barquero, Javier De la Cruz Soto, Martín Draper, Alexeis Fernandez, Timo Karlsson, Juan Pablo Duzdevich, Lorand Szabo, Gabriel Usera, Andrés Zappa	ERANET-LAC: KÜÇÜK RÜZGAR TÜRBİNLERİ OPTİMİZASYON VE MARKET PROMOSYONU PROJESİ	4. İzmir Rüzgâr Sempozyumu 28-30 Eylül 2017	Yayınlandı
2	Konferans Makalesi (Uluslararası)	Yüksel Kalay Ferhat Bingöl	Global Wind Atlas Validation: A case study of Turkey	9th International Symposium on Atmospheric Sciences – ATMOS 2019	Yayınlandı
3	Makale (SCI-E)	Ferhat Bingöl	A simplified method on estimation of forest roughness by use of aerial LIDAR data	Energy Science and Engineering	Yayınlandı
4	Konferans Makalesi (Ulusal)	Erdem Demir Ferhat Bingöl	Rüzgâr Türbinlerinde Atmosferik Buzlanma Ve Güç Eğrisi Üzerindeki Etkisi	5nci İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi	Online yayınlandı
5	Konferans Makalesi (Ulusal)	Yüksel Kalay Ferhat Bingöl	Küresel Rüzgâr Atlası Validasyonu:Türkiye Örneği	5nci İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi	Online yayınlandı

Kaynaklar

GWEC, Global Wind Energy Council, Global Wind Market Report 2018, Brüksel, Belçika
Enerji Strateji Planı, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye

IEC 61400-2:2013/COR1:2019, Corrigendum 1 - Wind turbines - Part 2: Small wind turbines, TC 88, İsviçre

Bonou, Alexandra, Alexis Laurent, and Stig I. Olsen. 2016. "Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application." *Applied Energy* 180, 327-337. ScienceDirect, EBSCOhost (accessed November 18, 2016).

Noori, M, M Kucukvar, and O Tatari. 2015. "Economic Input-Output Based Sustainability Analysis of Onshore and Offshore Wind Energy Systems." *International Journal Of Green Energy* 12, no. 9: 939-948.

Ortegon, K, Nies, LF, & Sutherland, JW 2013, 'Preparing for end of service life of wind turbines', *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, pp. 191-199. Available from: 10.1016/j.jclepro.2012.08.022.

Crawford, R.H. 2009. "Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 2653-2660. ScienceDirect,

Wright, RM, 'Wind energy development in the Caribbean', *Renewable Energy*, 24, pp. 439-444, 2001

Abrahams, Mwashu, and Maharaj Davatee. 2012. "An analysis of the effect of temperature on the pattern of wind energy distribution in the Caribbean region." *Journal Of Environmental Science And Water Resources* no. 7: 178.

Jouanno, Julien, et al. "Seasonal and Interannual Modulation of the Eddy Kinetic Energy in the Caribbean Sea." *Journal Of Physical Oceanography* 42, no. 11 (November 2012): 2041-2055.

Bahadoorsingh, S., R. Ramdathsingh, and C. Sharma. "Integrating wind energy in a Caribbean island: A case study of Anguilla." *Pes T&D* 2012 (January 2012)

Etxegarai, A, Eguia, P, Torres, E, Iturregi, A, & Valverde, V 2015, 'Review of grid connection requirements for generation assets in weak power grids', *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1501-1514. Available from: 10.1016/j.rser.2014.09.030.

Bingöl F., “Rüzgar enerji sistemleri için hava yoğunluğunun hesaplanması”, Politeknik Dergisi, 21(2): 273-281, (2018).

Villanueva, D.; Feijóo, A. Reformulation of parameters of the logistic function applied to power curves of wind turbines. *Electr. Power Syst. Res.* 2016, 28, 51–58

Virk, M.S., M.C. Homola, and P.J. Nicklasson, Effect of rime ice accretion on aerodynamic characteristics of wind turbine blade profiles. *Wind Engineering*, 2010. 34(2): p. 207-218.

Yirtici, O., I.H. Tuncer, and S. Ozgen. Ice accretion prediction on wind turbines and consequent power losses. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. IOP Publishing.

Baring-Gould, E.I., *Wind Energy Workforce Development: A Roadmap to a Wind Energy Educational Infrastructure*. 2011: National Renewable Energy Laboratory.

Etemaddar, M., M.O.L. Hansen, and T. Moan, Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions. *Wind Energy*, 2014. 17(2): p. 241-265.

Bingöl, F., A simplified method on estimation of forest roughness by use of aerial LIDAR data, *Energy Science and Engineering*, 2019

Kalay, Y. ve Bingöl F., *Global Wind Atlas Validation: A case study of Turkey 9th International Symposium on Atmospheric Sciences – ATMOS 2019, İstanbul, Türkiye*

Kalay, Y. ve Bingöl F., *Küresel Rüzgar Atlası Validasyonu: Türkiye Örneği, 5nci İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi, 2019, İzmir, Türkiye*

EKLER (ayrı bir dosya olarak sunulmuştur)

- 1) Saha ziyaretleri fotoğrafları
- 2) Anket formu örneği (TR)
- 3) Buzlanma konusunda konferans makalesi (TR): Erdem Demir, Ferhat Bingöl
- 4) Pürüzsüzlük konusunda SCI-E Makale (EN): Ferhat Bingöl
- 5) Rüzgar atlasları konusunda konferans Makalesi (TR): Yüksel Kalay, Ferhat Bingöl
- 6) Rüzgar atlasları konusunda konferans Makalesi (EN): Yüksel Kalay, Ferhat Bingöl
- 7) Atlas interpolasyon için yapılan patent başvurusu detayları: Ferhat Bingöl
- 8) SWAT yazılımından örnek çıktıları (3 adet)

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi FERHAT BİNGÖL
Proje No:	216M505
Proje Başlığı:	Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu Ve Ticari Promosyonu
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENS. MÜHENDİSLİK F. ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2017 - 01/10/2019
Onaylanan Bütçe:	224210.0
Harcanan Bütçe:	174702.7
Öz:	<p>Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion - SWTOMP (Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu ve Market Promosyonu) projesinin ana amacı küçük ve orta ölçekli rüzgar türbinlerinin ana şebekeden uzak noktalar ya da düşük kapasiteli şebeke bağlantıları olan noktalarda kullanımı için tanıtımının yapılması, bu şartlara uygunluğu için geliştirilmesi ve nihayetinde belirtilen şartlar uygulanabilir hale getirilmesidir. Bunu yaparken aynı zamanda yerel rüzgar yapısı ve altyapı olanaklarına uygun bir yol izlenmesi de hedeflenmektedir. 3 senelik projenin çıktıları şöyle özetlenebilir:</p> <p>1Soğuk ve tropikal iklime sahip noktalarda çalışabilen küçük türbin karakteristiklerini belirlemek ve ilk örnek geliştirmek (İspanya, Meksika, Arjantin, Finlandiya, Romanya) 2Küçük türbinlerin fizibilitesinin yapılabileceği hızlı ve basit bir metot geliştirmek ve bu metodu bir web app ile projesi üye ülkelerde kullanıma açmak (Türkiye) 3Projeye üye ülkelerde küçük türbinleri tanıtmak, uygulanabilir hale getirmek ve yerel üretimi desteklemek (Tüm ülkeler) 4Üye ülkeler arasında küçük türbinler konusunda ortak çalışma ve iletişim ağı oluşturabilmek ve projeden sonra da bu iletişimi canlı tutabilmek. (İspanya liderliğinde ve tüm ülkelerin veri desteğiyle)</p> <p>İspanya, Romanya, Finlandiya, Türkiye, Meksika, Arjantin, Dominik Cumhuriyeti ve Uruguay olmak üzere 8 araştırma kurumunun katılımı ile yürütülen projede İspanya konsorsiyum lideri ve projenin ERANET karşısında yöneticisi olmuştur. Bu başvuruya konu olan alt başlıkla İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İş Paketi 2'nin yöneticisi olmuş ve yukarıda listelenen iki numaralı hedefe ulaşmak için çalışmıştır. Aldığımız sorumluluk küçük türbinleri fizibilite çalışmalarında kullanılmak üzere yeni ve basitleştirilmiş bir yöntem üretilmesidir. Bu sayede şahıs ya da kurumsal yatırımcıların kolay ve hızlı bir şekilde yatırımlarının gerçekliğini görebileceklerdir. Yazılım tamamlanmış ve Türkiye'de BETA testine başlamıştır. Diğer ülkelerin ERANET proje bitiş tarihleri farklı olduğu için, tüm veriler sisteme yüklenince diğer ülkelerde aktif olacaktır. Geliştirilen Web App, ?Small Wind Assessment Tool? (Küçük Rüzgar Fizibilite Yazılımı) sadece Türkçe ve İngilizce olarak hizmet vermektedir.</p>
Anahtar Kelimeler:	küçük türbinler, fizibilite, modelleme
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Proje Yapılan Yayınlar:	<p>1- A simplified method on estimation of forest roughness by use of aerial LIDAR data (Makale - İndeksli Makale),</p> <p>2- Global Wind Atlas Validation: A case study of Turkey (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>3- Eranet-Lac: Küçük Rüzgar Türbinleri Optimizasyon ve Market Promosyonu Projesi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>4- RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ATMOSFERİK BUZLANMA VE GÜÇ EĞRİSİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>5- KÜRESEL RÜZGAR ATLASI VALİDASYONU:TÜRKİYE ÖRNEĞİ (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),</p>
-------------------------	--

TÜBİTAK