

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**WINDSIM PROGRAMI KULLANILARAK ÇATALCA
BÖLGESİNDE RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ
MİKRO-KONUŞLANDIRMA ÇALIŞMASI**

YUNUS EMRE ŞAKAR

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

WINDSIM PROGRAMI KULLANILARAK ÇATALCA
BÖLGESİNDE RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ
MİKRO-KONUŞLANDIRMA ÇALIŞMASI

YUNUS EMRE ŞAKAR

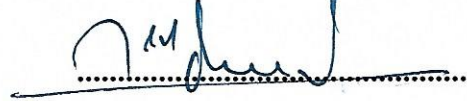
Dr. Öğr. Üyesi Meral ALTINAY
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Murat KALE
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.

Doç. Dr. Özcan ATLAM
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.







Tezin Savunulduğu Tarih:29.01.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, WindSim programı kullanılarak 3 farklı alanda rüzgâr enerji santrali mikro-konuşlandırmasının yapılması, konumları belirlenen rüzgâr türbinlerinin yıllık enerji üretim hesabının yapılması ve kapasite faktörlerinin hesaplanması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmalarında desteğini esirgemeyen, bana güvenen ve cesaretlendiren kıymetli hocam, tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Meral ALTINAY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İşini gerçekten severek yapan, laboratuvarındaki derslerine severek gittiğim, eğitim sürecimde yardımlarını esirgemeyen sevgili hocam Doç. Dr. Özcan ATLAM'a teşekkürü borç bilirim.

İstanbul Enerji AŞ'deki iş hayatımda, her zaman yanımda olan sevgili iş arkadaşlarım Ömer YENİ, Fırat TABAK, Ahmet UÇAK, Yusuf DURAN, Uğur DEMİREL, Çağatay VARİŞ ve Abdulsamed GÜNEŞ'e çok teşekkür ederim.

Sevgili kardeşlerim, Tunahan ŞAKAR, Gülşah SEVİM, Abdullah SEVİM, Günay ERAYDIN ve Gökcan TURAN; her zaman tezin ne oldu oğlum diye beni çalışmaya teşvik eden, beni öz oğullarımdan ayırt etmeyen sevgili annem Nurhan TURAN ve babam Ziya TURAN; her kararında destekçim olan, dualarını her zaman yanımda hissettiğim, ne yapsam borcumu ödeyemeyeceğim canım annem Ayşe ŞAKAR ve canım babam Cengiz ŞAKAR'a her zaman yanımda oldukları için teşekkür ederim. Allah'ın bana emaneti olan, dünyadaki en değerli hediyem, gözümün nuru güzel eşim Gözde ŞAKAR'a sevgi ve ilgisinden dolayı minnettarım.

Tez yazım sürecimde yanımda olmayan ama tez savunmama yetişen biricik güzel kızım Zeynep'in de gözlerinden öpüyorum.

Şubat – 2020

Yunus Emre ŞAKAR

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | iv |
| TABLolar DİZİNİ | vi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | viii |
| ÖZET..... | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| GİRİŞ | 1 |
| 1. RÜZGAR ENERJİSİ..... | 3 |
| 1.1. Dünya’da Rüzgâr Enerjisinin Durumu..... | 4 |
| 1.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Durumu..... | 5 |
| 1.3. Rüzgâr Hızını Etkileyen Faktörler | 9 |
| 1.3.1. Yükseklik | 9 |
| 1.3.2. Pürüzlülük (Roughness)..... | 10 |
| 1.3.3. Türbülans..... | 13 |
| 1.3.4. Wake (iz) etkisi | 13 |
| 1.3.5. Tünel etkisi..... | 14 |
| 1.4. Rüzgâr Enerjisi Eşitliği | 15 |
| 1.5. Hava Yoğunluğu Hesabı | 16 |
| 1.6. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması | 18 |
| 1.6.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri..... | 18 |
| 1.6.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri..... | 22 |
| 2. WINDSIM VE CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)..... | 25 |
| 2.1. WindSim..... | 25 |
| 2.2. CFD (Computational Fluid Dynamics) | 25 |
| 3. RÜZGÂR ÖLÇÜM İSTASYONU VE VERİ ANALİZİ..... | 27 |
| 3.1. Rüzgâr Ölçüm İstasyonu (RÖİ)..... | 27 |
| 3.2. Veri Analizi | 31 |
| 3.2.1. Kısa dönemli rüzgâr verisi analizi ve kalite kontrol süreci..... | 31 |
| 3.2.2. Uzun dönemli sentezlenmiş rüzgâr verisi | 34 |
| 3.2.3. Measure correlate and predict işlemi | 36 |
| 4. WINDSIM PROGRAMI KULLANILARAK ÇATALCA BÖLGESİNDE RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ MİKRO-KONUŞLANDIRMA ÇALIŞMASI | 37 |
| 4.1. Türbinler Hakkında Bilgi | 37 |
| 4.2. Nümerik Simülasyonlar..... | 43 |
| 4.2.1. Dijital arazi modeli oluşturma..... | 44 |
| 4.2.2. 3 boyutlu model kurulumu | 45 |
| 4.3. Mikro-Konuşlandırma ve Yerleşim Optimizasyonu | 46 |
| 4.3.1. 1. Proje alanı mikro-konuşlandırma çalışması | 48 |
| 4.3.2. 2. Proje alanı mikro-konuşlandırma çalışması | 49 |
| 4.3.3. 3. Proje alanı mikro-konuşlandırma çalışması | 51 |
| 5. YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ VE KAPASİTE FAKTÖRÜ HESABI..... | 53 |

| | |
|---|----|
| 5.1. Rüzgâr Kaynak Haritası | 53 |
| 5.2. Yıllık Enerji Üretimi | 59 |
| 5.2.1. 1. proje alanı YEÜ | 60 |
| 5.2.2. 2. proje alanı YEÜ | 62 |
| 5.2.3. 3. proje alanı YEÜ | 63 |
| 5.3. Kapasite Faktörü Hesabı | 65 |
| 5.3.1. Kayıplar | 65 |
| 5.3.1.1. Emre amadelik | 66 |
| 5.3.1.2. Türbin performansı | 66 |
| 5.3.1.3. Elektriksel faktörler | 67 |
| 5.3.1.4. Çevresel faktörler | 67 |
| 5.3.1.5. Kesintiler | 67 |
| 5.3.2. Belirsizlikler | 68 |
| 5.3.2.1. Ölçümler | 69 |
| 5.3.2.2. Geçmişteki rüzgâr kaynağı | 70 |
| 5.3.2.3. Gelecekteki rüzgâr değişimleri | 71 |
| 5.3.2.4. Akış modeli (dikey-yatay ekstrapolasyon) | 72 |
| 5.3.2.5. Santral performansı ve kayıplar | 72 |
| 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 73 |
| KAYNAKLAR | 76 |
| KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER | 79 |
| ÖZGEÇMİŞ | 80 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 1.1. | Türkiye'deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum..... | 5 |
| Şekil 1.2. | RES'lerin illere göre dağılımı..... | 6 |
| Şekil 1.3. | RES'lerin bölgelere göre dağılımı..... | 7 |
| Şekil 1.4. | RES'lerin türbin markalarına göre dağılım..... | 7 |
| Şekil 1.5. | RES'lerin yatırımcılara göre dağılımı..... | 8 |
| Şekil 1.6. | Rüzgâr hızı ile yükseklik ilişkisi..... | 9 |
| Şekil 1.7. | Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi örneği..... | 11 |
| Şekil 1.8. | Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi örneği..... | 11 |
| Şekil 1.9. | Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi örneği..... | 12 |
| Şekil 1.10. | Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi örneği..... | 12 |
| Şekil 1.11. | Wake (İz) etkisi simülasyonu..... | 14 |
| Şekil 1.12. | Rüzgârı alış biçimlerine göre rüzgâr türbinleri..... | 19 |
| Şekil 1.13. | Tek kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini..... | 20 |
| Şekil 1.14. | İki kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini..... | 21 |
| Şekil 1.15. | Üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini..... | 21 |
| Şekil 1.16. | Çok kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini..... | 22 |
| Şekil 1.17. | Darrieus tip dikey eksenli rüzgâr türbini..... | 23 |
| Şekil 1.18. | Savonius tip dikey eksenli rüzgâr türbini..... | 24 |
| Şekil 3.1. | RÖİ'nin konumu..... | 28 |
| Şekil 3.2. | Direğin genel görünümü..... | 28 |
| Şekil 3.3. | Direğin genel görünümü (devam)..... | 29 |
| Şekil 3.4. | Sensörlerin direk üzerindeki konumları..... | 30 |
| Şekil 3.5. | RÖİ kuzey, kuzeydoğu, doğu ve güneydoğusuna ait görüntüler..... | 30 |
| Şekil 3.6. | RÖİ güney, güneybatı, batı ve kuzeybatısına ait görüntüler..... | 31 |
| Şekil 3.7. | 81 m'de sektörler için yön diyagramı (sol) ve Weibull eğrisi uydurulmuş frekans dağılımı (sağ)..... | 33 |
| Şekil 3.8. | 80 m'de bütün sektörler için yön diyagramı ve Weibull eğrisi uydurulmuş frekans dağılımı (sağ)..... | 34 |
| Şekil 3.9. | 81 m'de bütün sektörler için yön diyagramı ve Weibull eğrisi uydurulmuş frekans dağılımı (sağ)..... | 35 |
| Şekil 4.1. | Siemens SWT142 güç ve itki katsayılarının eğrileri..... | 37 |
| Şekil 4.2. | Siemens SWT113 güç ve itki katsayılarının eğrileri..... | 38 |
| Şekil 4.3. | Vestas V136 güç ve itki katsayılarının eğrileri..... | 39 |
| Şekil 4.4. | Vestas V126 güç ve itki katsayılarının eğrileri..... | 40 |
| Şekil 4.5. | Gamesa G126 güç ve itki katsayılarının eğrileri..... | 41 |
| Şekil 4.6. | Gamesa G132 güç ve itki katsayılarının eğrileri..... | 42 |
| Şekil 4.7. | Model alanı, yüksek çözünürlüklü alan ve önerilen proje alanı..... | 44 |
| Şekil 4.8. | Modeldeki arazi yüksekliği (m) (sol) ve pürüzlülük (m) (sağ)..... | 44 |
| Şekil 4.9. | Modeldeki arazi eğimi (derece) (sol) ve logaritmik pürüzlülük (m) (sağ)..... | 45 |
| Şekil 4.10. | Modeldeki yatay ağ çözünürlüğü ve dikey ağ çözünürlüğünün şematik görünümü (sağ)..... | 45 |
| Şekil 4.11. | Belirlenen proje alanları..... | 48 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 5.1. | SWT142 için 109 m'lik türbin göbek yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızını (m/s) gösteren rüzgâr kaynak haritası Üçgen: Rüzgâr Türbini, Nokta: Klimatoloji verisi..... | 53 |
| Şekil 5.2. | SWT142 için 3 boyutlu rüzgâr kaynak haritası. Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi..... | 54 |
| Şekil 5.3. | SWT142 için iz bölgesi kayıpları (m/s)..... | 54 |
| Şekil 5.4. | SWT142 için 109 m'lik türbin göbek yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızını (m/s) gösteren rüzgâr kaynak haritası Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi..... | 55 |
| Şekil 5.5. | SWT142 (2. proje alanı) için 3 boyutlu rüzgâr kaynak haritası. Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi..... | 55 |
| Şekil 5.6. | SWT142 (2. proje alanı) için iz bölgesi kayıpları (m/s)..... | 56 |
| Şekil 5.7. | SWT113 için 109 m'lik türbin göbek yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızını (m/s) gösteren rüzgâr kaynak haritası Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi..... | 56 |
| Şekil 5.8. | SWT113 (3. proje alanı) için 3 boyutlu rüzgâr kaynak haritası. Üçgen: rüzgâr türbini..... | 57 |
| Şekil 5.9. | SWT113 (3. proje alanı) için iz bölgesi kayıpları (m/s)..... | 57 |
| Şekil 5.10. | SWT142 (1. proje alanı) için WindSim Park Optimizer yardımıyla çıkarılmış optimum yerleşim planı ve Google Earth üzerine yerleştirilmiş rüzgâr kaynak haritası..... | 58 |
| Şekil 5.11. | SWT142 (2. proje alanı) için WindSim Park Optimizer yardımıyla çıkarılmış optimum yerleşim planı ve Google Earth üzerine yerleştirilmiş rüzgâr kaynak haritası..... | 58 |
| Şekil 5.12. | SWT113 (3. proje alanı) için WindSim Park Optimizer yardımıyla çıkarılmış alternatif optimum yerleşim planı ve Google Earth üzerine yerleştirilmiş rüzgâr kaynak haritası..... | 59 |
| Şekil 5.13. | Google Earth üzerine yerleştirilmiş tüm bölgenin rüzgâr kaynak haritası..... | 59 |
| Şekil 5.14. | 20 yıllık Vortex rüzgâr verisi..... | 71 |

TABLolar DİZİNİ

| | | |
|-------------|---|----|
| Tablo 1.1. | Ülkelerin rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri..... | 4 |
| Tablo 1.2. | Yüzey şekillerine göre pürüzlülük sınıfları ve uzunluk değerleri | 10 |
| Tablo 3.1. | Sensör kurulum bilgileri | 27 |
| Tablo 3.2. | Direkten elde edilen verinin kapsamı | 32 |
| Tablo 3.3. | Ölçüm direğinden alınan verilerin filtreleme sonrası değerleri | 32 |
| Tablo 3.4. | 81 m’de ortalama rüzgâr, rüzgâr hızı ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri | 33 |
| Tablo 3.5. | 81 m’de her sektör için ortalama rüzgâr hızı, frekans ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri | 33 |
| Tablo 3.6. | Sektörel güç kuralı katsayısı (α) değerleri | 33 |
| Tablo 3.7. | 80 m’de ortalama rüzgâr hızı ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri | 34 |
| Tablo 3.8. | 80 m’de her sektör için ortalama rüzgâr hızı, frekans ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri | 34 |
| Tablo 3.9. | 81 m’de ortalama rüzgâr hızı ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri | 35 |
| Tablo 3.10. | 81 m’de her sektör için ortalama rüzgâr hızı, frekans ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri | 35 |
| Tablo 3.11. | Değişik algoritma metotlarının hataları | 36 |
| Tablo 4.1. | Siemens SWT142 güç ve itki katsayıları tablosu | 38 |
| Tablo 4.2. | Siemens SWT113 güç ve itki katsayıları tablosu | 39 |
| Tablo 4.3. | Vestas V136 güç ve itki katsayıları tablosu..... | 40 |
| Tablo 4.4. | Vestas V126 güç ve itki katsayıları tablosu..... | 41 |
| Tablo 4.5. | Gamesa G126 güç ve itki katsayıları tablosu | 42 |
| Tablo 4.6. | Gamesa G132 güç ve itki katsayıları tablosu | 43 |
| Tablo 4.7. | Modeldeki ağ aralığı ve hücre sayısı | 46 |
| Tablo 4.8. | z yönünde ilk 10 düğüm noktasının, yer seviyesine göre ve min. ve mak. yüksekliklerin olduğu noktalarda dağılımı..... | 46 |
| Tablo 4.9. | Türbin tipleri | 47 |
| Tablo 4.10. | Siemens SWT142 türbin koordinatları (WGS 84’te) | 48 |
| Tablo 4.11. | Vestas V136 türbin koordinatları (WGS 84’te)..... | 49 |
| Tablo 4.12. | Gamesa G126 türbin koordinatları (WGS 84’te)..... | 49 |
| Tablo 4.13. | Siemens SWT142 türbin koordinatları (WGS 84’te) | 50 |
| Tablo 4.14. | Vestas V136 türbin koordinatları (WGS 84’te)..... | 50 |
| Tablo 4.15. | Gamesa G126 türbin koordinatları (WGS 84’te)..... | 51 |
| Tablo 4.16. | Siemens SWT113 türbin koordinatları (WGS 84’te) | 51 |
| Tablo 4.17. | Vestas V126 türbin koordinatları (WGS 84’te)..... | 52 |
| Tablo 4.18. | Gamesa G126 türbin koordinatları (WGS 84’te)..... | 52 |
| Tablo 5.1. | SWT142 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 60 |
| Tablo 5.2. | V136 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 61 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Tablo 5.3. | G126 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 61 |
| Tablo 5.4. | SWT142 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 62 |
| Tablo 5.5. | V136 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 62 |
| Tablo 5.6. | G126 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 63 |
| Tablo 5.7. | SWT113 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 63 |
| Tablo 5.8. | V126 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 64 |
| Tablo 5.9. | G132 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi | 64 |
| Tablo 5.10. | Enerji üretimindeki kayıplar | 65 |
| Tablo 5.11. | Belirsizlik tablosu (1. proje alanı- SWT142)..... | 68 |
| Tablo 5.12. | Belirsizlik tablosu (Bütün Yerleşimler)..... | 72 |
| Tablo 6.1. | Net yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü | 73 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|----------|---|
| C_F | : Kapasite faktörü |
| t | : Zaman, (s) |
| E | : Enerji, (Joule, N.m) |
| m | : Kütle, (kg) |
| V | : Yatay rüzgâr hızı, (m/s) |
| ρ | : Havanın özgül kütlesi, (kg/m ³) |
| A | : Rüzgârın esme yönüne dik alan, (m ²) |
| L | : Rüzgâr yönündeki uzunluk, (m) |
| T | : Kelvin cinsinden sıcaklık, (Kelvin) |
| H | : Gazın hacmi, (kg/m ³) |
| P | : Basınç, (Pascal, N/m ²) |
| n | : Gaz moleküllerinin sayısı |
| R | : Evrensel gaz sabiti (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹) |
| σ | : Rüzgâr hızının standart sapması |
| v | : Ortalama rüzgâr hızı, (m/s) |
| h_r | : Esme saati, (s) |
| C_P | : Güç faktörü |
| k | : Weibull şekil parametresi |
| c | : Weibull ölçek parametresi |
| Z_0 | : Pürüzlülük uzunluğu, (m) |

Kısaltmalar

| | |
|-------|---|
| ABD | : Amerika Birleşik Devletleri |
| CFD | : Computational Fluid Dynamics (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği) |
| EİEİ | : Elektrik İşleri Etüt İdaresi |
| EPDK | : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu |
| EÜAŞ | : Elektrik Üretim A.Ş. |
| GWEC | : Global Wind Energy Council (Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi) |
| HES | : Hidroelektrik Enerji Santrali |
| LLS | : Linear Least Squares (Doğrusal En Küçük Kareler Yöntemi) |
| MTS | : Matrix Time Series (Matris Zaman Serisi) |
| OLS | : Orthogonal Least Squares (Dik En Küçük Kareler Yöntemi) |
| REPA | : Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası |
| RÖİ | : Rüzgâr Ölçüm İstasyonu |
| SS | : Speed Sort (Hız Sıralaması) |
| TÜREB | : Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği |
| VR | : Variance Ratio (Varyans Oranı) |
| VS | : Vertical Slice (Dikey Dilim) |
| WWEA | : World Wind Energy Association (Dünya Rüzgâr Enerjisi Birliği) |
| YEÜ | : Yıllık Enerji Üretimi |

WINDSIM PROGRAMI KULLANILARAK ÇATALCA BÖLGESİNDE RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ MİKRO-KONUŞLANDIRMA ÇALIŞMASI

ÖZET

Rüzgâr enerji santrali kurulumunda önemli iki nokta; rüzgâr türbinlerinin birbirini etkilemeyecek şekilde konumlandırılması ve kurulum planlanan bölgenin rüzgâr karakteristiğine uygun türbin seçiminin yapılmasıdır. Türbinlerin yerleşiminin ve enerji potansiyeli hesabının doğru bir şekilde yapılabilmesi için kurulum planlanan sahanın yüzey şekilleri ve rüzgâr rejimine uygun program seçimi yapılmalıdır. Düz bir alana ve stabil bir rüzgâr rejimine sahip sahalarda lineer modellemeli programlar, daha kompleks bir alan ve türbülanslı rejime sahip sahalarda ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği veya yaygın ismiyle CFD (Computational Fluid Dynamics) yöntemini kullanan programlar kullanılmalıdır.

Bu çalışmada, 81 metrelik bir rüzgâr ölçüm istasyonundan alınan 1 yıllık rüzgâr verileri ile Çatalca bölgesinin kompleks arazi yapısına uygun olduğu düşünülen CFD tabanlı WindSim programı kullanılarak, rüzgâr enerji santrali mikro-konuşlandırma çalışması yapılmış, optimum noktalara yerleştirilen rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörleri hesaplanmış ve yıllık enerji üretim potansiyelleri belirlenmiştir. Bu çalışma ile Çatalca bölgesinin rüzgâr enerjisi kapasite faktörü de tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Üretim Potansiyeli, Kapasite Faktörü, Mikro-Konuşlandırma, Rüzgâr Enerjisi.

MICRO-SITING OF WIND POWER PLANT STUDY IN ÇATALCA REGION USING WINDSIM PROGRAM

ABSTRACT

Two important points about wind power plant installation; wind turbines are positioned in such a way that they do not affect each other and select of turbines according to the wind characteristics of the planned area. In order to determine the location of the turbines and to calculate the energy potential correctly, the program should be selected in accordance with the surface shapes of the planned site and the wind regime. In areas with a flat area and a stable wind regime, linear modeling programs should be used, and in areas with a more complex area and turbulent regime, CFD (Computational Fluid Dynamics) should be used.

In this study, a year wind data obtained from 81 meters wind measurement station, the capacity factors of the wind turbines placed at optimum points were calculated by using the CFD based WindSim program, which is thought to be suitable for the complex land structure of Çatalca region, and the wind turbines placed at the optimum points were calculated and annual energy production potentials were determined. In this study, wind energy capacity factor of Çatalca region was determined.

Keywords: Energy Generation Potential, Capacity Factor, Micro-Siting, Wind Energy.

GİRİŞ

Dünya nüfusunun sürekli artması, teknolojinin ilerlemesi ve yaşam standartlarının yükselmesi enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtlardan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılmaktadır. Bir enerji çeşidi olan elektrik enerjisi, artan enerji ihtiyacında büyük bir öneme sahiptir. Çalışmalar sonucunda yapılan tahminlere göre, gelecek 25 yıl içerisinde beklenen küresel enerji ihtiyacındaki artışın %70'e yakın kısmının, elektrik enerjisi ihtiyacındaki artışlar nedeniyle olacağı öngörülmektedir [3]. Bunun yanı sıra, her geçen gün, ekonomik ve çevresel duyarlılıklar artış göstermekte ve enerji arzında sürdürülebilirlik, güvenlik, güvenilirlik ve verimlilik gibi konular önem kazanmaktadır. Bu süreç içerisinde, düşük maliyetli, sürdürülebilir ve çevre dostu olan yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır ve günümüzde elektrik enerjisi üretiminde oldukça fazla rağbet görmektedir [4].

Rüzgâr enerjisi, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olarak günümüzde önemli bir yere sahiptir. Ülkemiz açısından değerlendirildiğinde, Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından gerçekleştirilen “Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası” (REPA) çalışmasında, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin yaklaşık 66 GW olduğu tespit edilmiştir [1]. Temmuz 2019 itibarıyla, Türkiye'deki rüzgâr enerji santrallerinin kümülatif kurulu gücüne bakıldığında 7,6 GW olduğu görülmektedir [5]. Şu anki durumda, ülkemizin rüzgâr potansiyelinin %11'i kullanılmaktadır. Bu potansiyelin değerlendirilmesi, elektrik enerjisi üretiminde ağırlıklı olarak fosil yakıtlara bağımlı olan ülkemizin, enerji kaynaklarında dışa bağımlılığının azaltılması, enerji arzının ve çeşitliliğinin artırılması yönünden oldukça önemlidir.

Rüzgâr Enerjisi Santralleri kurulumuna yönelik fizibilite çalışmalarında, santralin kurulması düşünülen konuma ait yıllık rüzgâr verileri üzerinden teknik ve ekonomik incelemeler gerçekleştirilir [2].

Bu çalışmada, 81 metrelik bir rüzgâr ölçüm istasyonundan alınan 1 yıllık rüzgâr verileri ve o bölgeye ait 20 yıllık geriye dönük Vortex rüzgâr verisi ile Çatalca bölgesinin kompleks arazi yapısındaki rüzgâr akışının daha iyi modellenebileceği düşünölen CFD tabanlı WindSim programı kullanılmıştır. Üç farklı sahada, her sahada 3 farklı rüzgâr türbini için rüzgâr enerji santrali mikro-konuşlandırma çalışması yapılmış, optimum noktalara yerleştirilen rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörleri hesaplanmış ve yıllık enerji üretim potansiyelleri belirlenmiştir.



1. RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgâr enerjisi, milattan önce (M.Ö.) 5000’li yıllarda ilk defa Nil nehrindeki kayıkların hareket ettirilmesi için kullanılmaya başlanmıştır. M.Ö. 2000’li yıllarda Çin’de su pompalama amacıyla kullanılmıştır. M.Ö. 700’lü yıllarda ise Farslıların düşey eksenli rüzgâr türbinlerini kullandığı bilinmektedir. Rüzgâr türbinleri kullanımını anlatan yazılı ilk bilgilerin, Büyük İskender’in M.Ö. 200-300 yıllarında yatay eksenli rüzgâr türbinlerini anlatan kaynak olduğu bilinmektedir [12].

Rüzgâr türbinleri, Haçlı seferleri sırasındaki etkileşim ile Asya’dan Avrupa’ya geçmiştir [13]. Fransa, İngiltere ve Hollanda’da M.S. 12. yüzyılda yel değirmenleri ilk olarak kullanılmaya başlanmıştır. 18. yüzyılda Hollandalı göçmenler tarafından Amerika kıtasına taşınan rüzgâr türbinleri, endüstri devrimi ile beraber buhar makinelerinin ortaya çıkması sonucunda, rüzgâr türbinleri ikinci planda kalmıştır. M.S. 19. yüzyılın sonlarında ve M.S. 20. yüzyılda yel değirmenleri ile kuyudan su çekmek ve elektrik üretmek için farklı uygulamalar hayata geçirilmiştir [14]. Elektrik üretmek için kurulan ilk rüzgâr türbini 17 metre rotor çapında, 144 adet kanattan oluşmaktadır. Bu rüzgâr türbini, 1890 yılında General Electric şirketinin ortaklarından Charles F. Brush tarafından kurulmuştur. Avrupa’daki ilk rüzgâr türbini de 1891 yılında Danimarkalı Meteorolog Poul La Cour tarafından yapılmıştır. Günümüzde kullanılan modern rüzgâr türbinlerinin temelini, 1957 yılında tasarladığı 200 kW’lık asenkron jeneratörlü, elektromekanik hareket ve yönelme kabiliyetine sahip türbin ile Poul La Cour’un öğrencisi Johannes Juul atmıştır [15].

1960’lardan sonra motorların yaygınlaşması ve elektrik üretimindeki gelişmeler sonucu ekonomik nedenlerle rüzgâr türbinleri azalma göstermiştir. 1970’li yıllarda meydana gelen petrol krizi sonrası alternatif kaynak arayışı sonucunda rüzgâr türbinleri tekrar gündeme gelmiştir. 1980’li yıllarda evlerin ihtiyacını karşılayacak kadar güce sahip küçük türbin tasarımlarının ardından 1981 yılında Dünya Meteoroloji Organizasyonu (WMO)’nun yürüttüğü bazı deneylerde rüzgâr enerji kaynağı olarak kullanılmış ve rüzgâr çiftlikleri kurulmaya başlanmıştır [16].

Günümüzde, tek bir rüzgâr türbininin gücü megawattlarla ifade edilecek kadar artmış ve artmaya devam etmektedir. Şu an kullanılan 7 MW güce ulaşan rüzgâr türbinleri vardır. Rüzgâr türbinlerinin yapısında ve mekanik kısmında yapılan çalışmalar sayesinde yakın zamanda bu değerlerin daha da artacağı öngörülmektedir [18].

1.1. Dünya’da Rüzgâr Enerjisinin Durumu

Rüzgâr Enerjisi, dünyada kullanımı en çok artan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. 2018 yılı sonu itibari ile dünyada bulunan toplam rüzgâr enerji santrali kurulu gücü 596.556 MW’a ulaşmıştır [11,19].

Global Wind Energy Council (GWEC) tarafından yayımlanan istatistiksel rapora göre, 2018 yılında rüzgâr enerjisine en çok yatırım yapan ilk 5 ülke sırasıyla Çin, Amerika, Almanya, İngiltere ve Hindistan olmuştur. 2018 sonu itibari ile dünyadaki en yüksek rüzgâr enerji santrali kurulu gücüne sahip ülkeler ise sırasıyla Çin, Amerika, Almanya, Hindistan ve İspanya’dır [11,17,19]. Ülkelerin rüzgâr enerji santrali kurulu güçlerine ait bilgiler Tablo 1.1’de paylaşılmıştır.

Tablo 1.1. Ülkelerin rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri [11]

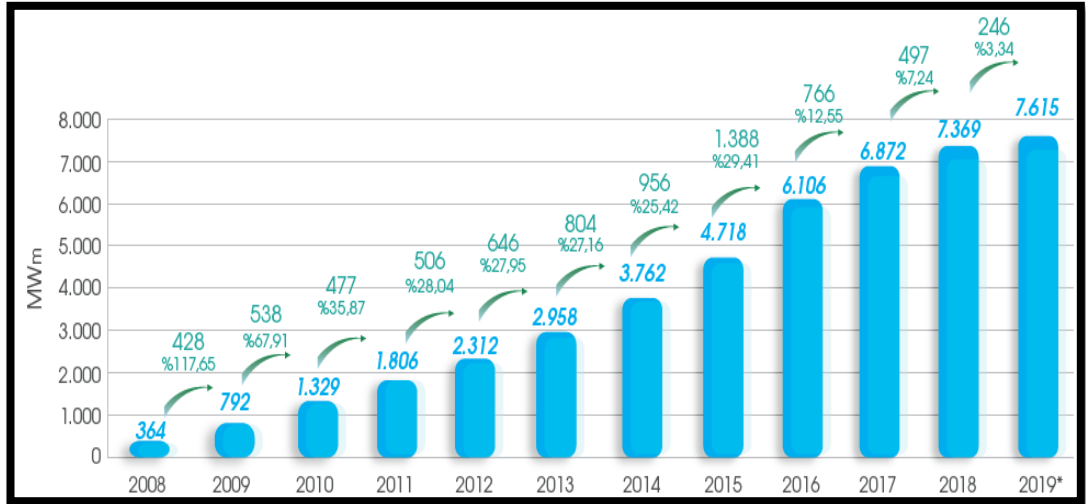
| ÜLKELER | ÜLKELERİN RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ KURULU GÜÇLERİ (MW) | | | |
|------------------------------|---|----------------|----------------|----------------|
| | 2018 | 2017 | 2016 | 2015 |
| Çin | 216.870 | 195.730 | 168.730 | 148.000 |
| ABD | 96.363 | 88.775 | 82.033 | 73.867 |
| Almanya | 59.313 | 56.190 | 50.019 | 45.192 |
| Hindistan | 35.017 | 32.879 | 28.279 | 24.759 |
| İspanya | 23.494 | 23.026 | 23.020 | 22.987 |
| İngiltere | 20.743 | 17.852 | 14.512 | 13.614 |
| Fransa | 15.313 | 13.760 | 12.065 | 10.293 |
| Brezilya | 14.490 | 12.763 | 10.800 | 8.715 |
| Kanada | 12.816 | 12.239 | 11.898 | 11.205 |
| Diğer Ülkeler Toplamı | 102.138 | 93.173 | 85582 | 76653 |
| Genel Toplam | 596.556 | 546.388 | 486.939 | 435.284 |

Avrupa'daki ülkeler arasında rüzgâr enerji santrali kurulu güçleri için sıralama yapıldığı zaman Türkiye 7. sırada, dünya genelinde bakıldığında ise 11. sırada yer almaktadır [20,21].

1.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Durumu

Gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan ülkemizde, sanayi ve nüfusun sürekli artması sebebiyle enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizin yıllık elektrik tüketiminin karşılandığı kaynaklara bakıldığında, tüketimin %35’i doğalgaz çevrim santrallerinden, %19,3’ü HES’lerden, %19,5’i ithal kömürden, %16,4’ü taş kömürü ve linyitten, %6,3’ü rüzgârdan, %2,1’i jeotermalden ve %1,4’ü diğer kaynaklardan üretilmiştir [22].

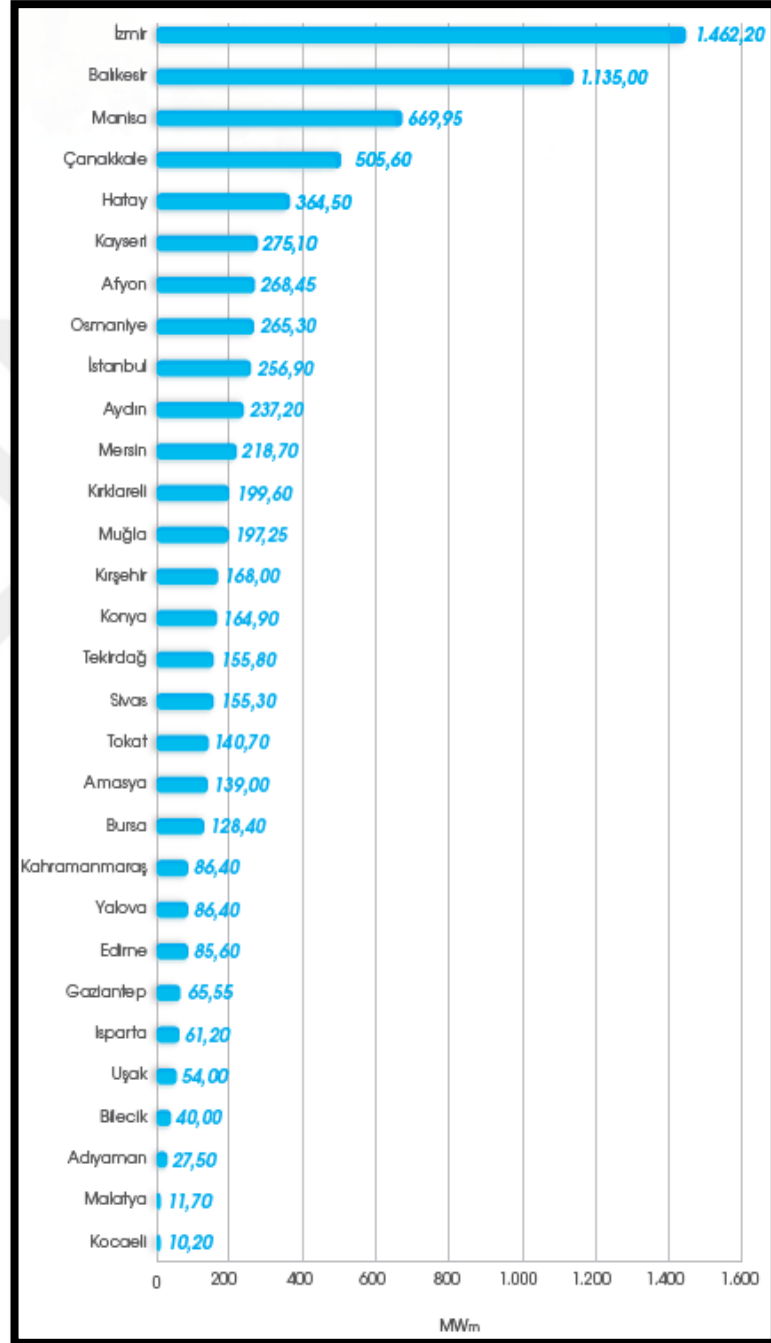
Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından gerçekleştirilen “Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası” (REPA) çalışmasında, Türkiye’nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin yaklaşık 66 GW olduğu tespit edilmiştir. Şu anki durumda, ülkemizin rüzgâr potansiyelinin %11’inin kullanıldığı söylenebilir [1]. Türkiye’deki RES’lerin 2008-2019 yılları arasındaki kümülatif kurulum miktarları Şekil 1.1’de paylaşılmıştır.



Şekil 1.1. Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum[5]

Türkiye’nin son 12 yıldaki rüzgâr enerji santraline yaptığı yatırımlara bakıldığında, 2008 yılında 364 MW kurulu güce sahip olan RES’ler, kapasitesini 2015 yılında 1.388 MW arttırarak rekor kurulumuna imza atmıştır. Temmuz 2019 itibari ile ülkemizdeki RES kurulu gücü 7.615 MW’a ulaşmıştır [5].

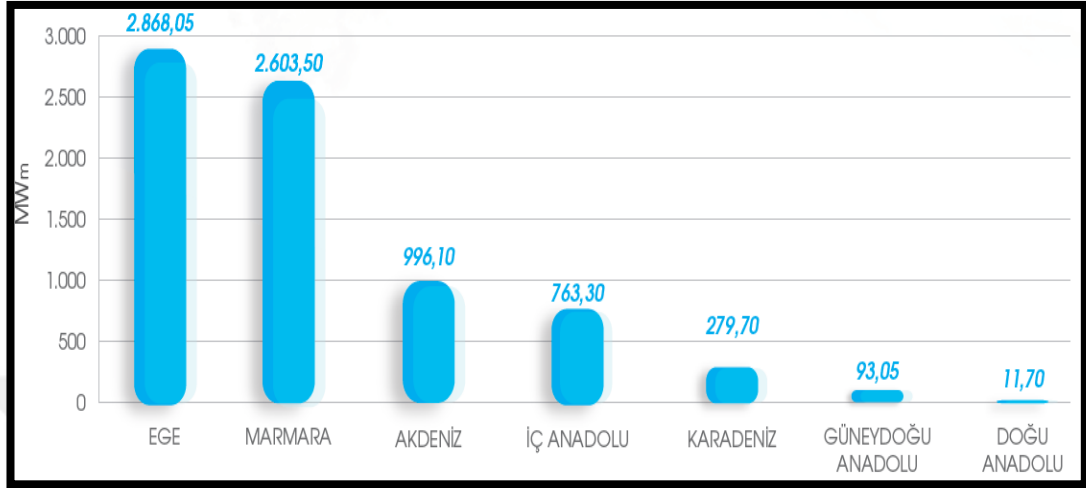
Ülkemizdeki RES'lerin illere göre dağılımında RES kurulu gücünün en yoğun olduğu ilk beş ile bakıldığında; RES'lerin %19'unun İzmir'de, %15'inin Balıkesir'de, %9'unun Manisa'da, %6,5'inin Çanakkale'de ve %5'inin Hatay'da olduğu görülmektedir. Tüm illere ait RES kurulu gücü bilgileri Şekil 1.2'de paylaşılmıştır.



Şekil 1.2. RES'lerin illere göre dağılımı[5]

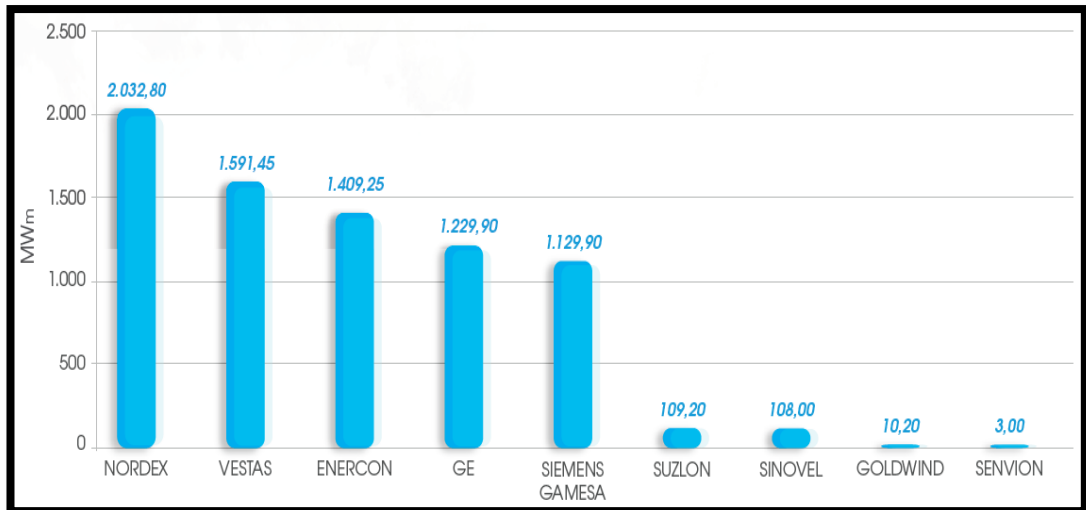
Ülkemizdeki RES'lerin bölgelere göre dağılımına bakıldığında; RES kurulu gücünün %37'sinin Ege Bölgesi'nde, %34'ünün Marmara Bölgesi'nde, %13'ünün Akdeniz

Bölgesi'nde, %10'unun İç Anadolu Bölgesi'nde %6'sının da diğer bölgelerde yer aldığı tespit edilmiştir. Bölgelere ait toplam RES kurulu güç bilgileri Şekil 1.3'te paylaşılmıştır.



Şekil 1.3. RES'lerin bölgelere göre dağılımı[5]

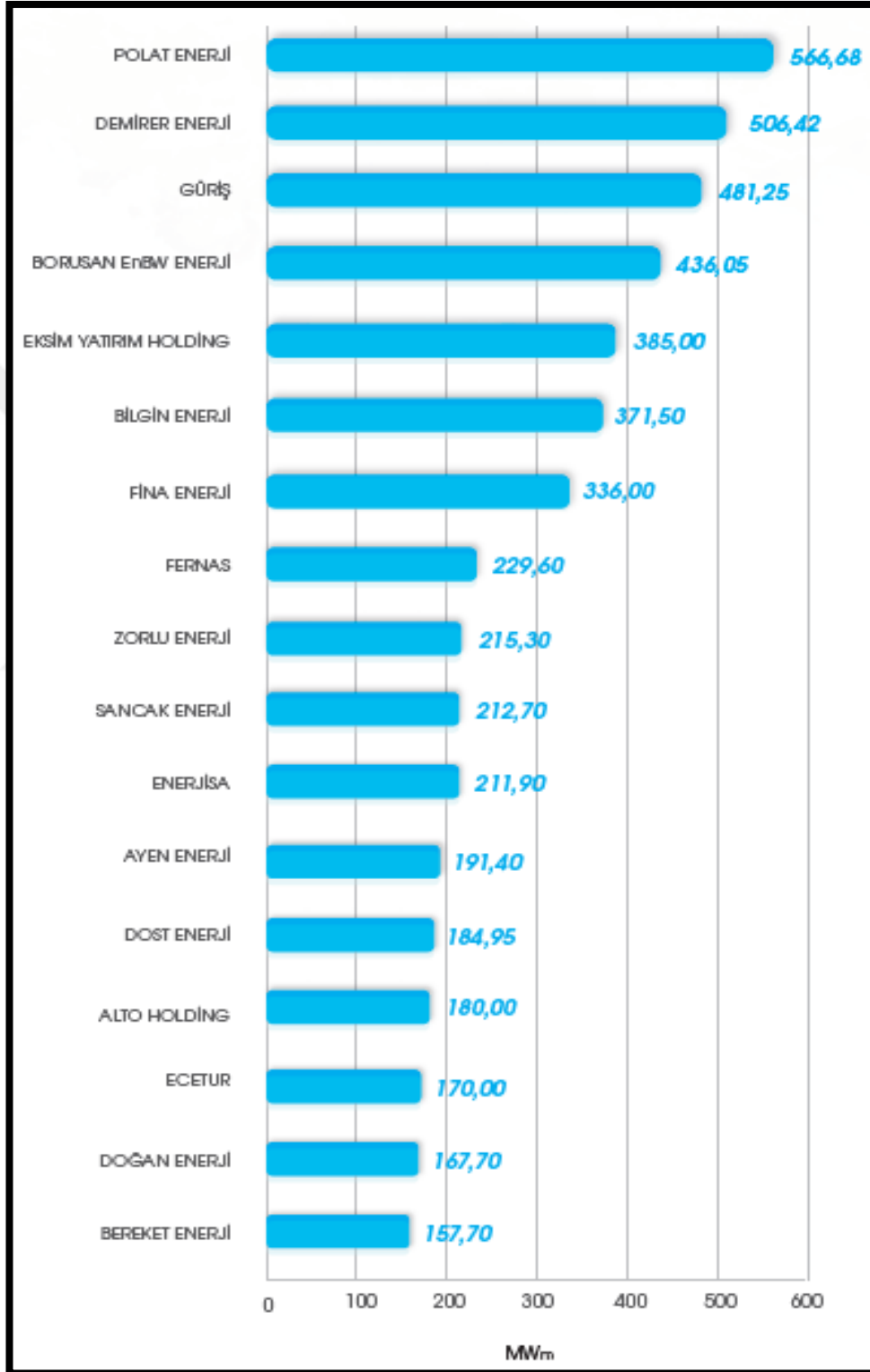
Ülkemizdeki RES'lerin türbin markalarına göre dağılımına bakıldığında; 2.032 MW ile Nordex, Türkiye'deki RES pazarında %26,6'lık bir paya sahiptir. Diğer RES'lerin markaları da şu şekildedir: 1.591 MW ile Vestas %20, 1.409 MW ile Enercon %18,5, 1.229 ile GE %16, 1.129 MW ile Siemens Gamesa %14,8'lik pazar payına sahiptir. Tüm türbin markalarına ait kurulu güç bilgileri Şekil 1.4'te paylaşılmıştır.



Şekil 1.4. RES'lerin türbin markalarına göre dağılımı[5]

Ülkemizdeki RES'lerin yatırımcılara göre dağılımına bakıldığında ilk beş yatırımcı şu şekildedir: 566 MW ile Polat Enerji 1. sırada yer almaktadır, diğer firmalar ise 506

MW Demirer Enerji, 481 MW Güriş, 436 MW Borusan EnBW Enerji ve 385 MW Eksim Yatırım Holding RES kurulu gücüne sahiptir. Diğer yatırımcıların RES kurulu güçlerine ait bilgiler Şekil 1.5'te paylaşılmıştır.



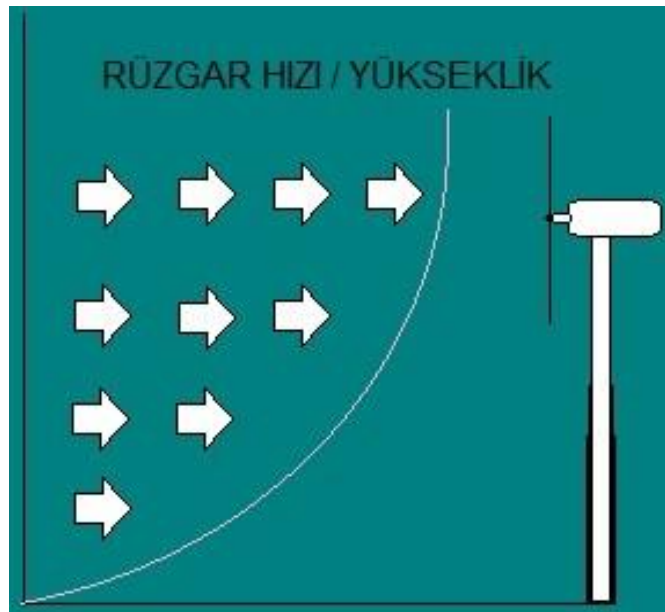
Şekil 1.5. RES'lerin yatırımcılara göre dağılımı[5]

1.3. Rüzgâr Hızını Etkileyen Faktörler

Yükseklik, pürüzlülük, türbülans, iz etkisi ve tünel etkisi gibi etkenler rüzgâr hızını etkilemektedir. Rüzgâr gücü, elektrik üretmek için rüzgâr türbinleri, mekanik güç elde etmek için yel değirmeni, su veya kuyu pompalamak için rüzgâr pompaları veya gemileri yürütmek için yelken kullanarak rüzgârın kullanışlı formundaki rüzgâr enerjisinin sonucudur.

1.3.1. Yükseklik

Yükseklik, rüzgârın hızını etkileyen önemli bir faktördür. Önceleri 10 metre referans yükseklikte ölçülmekte olan rüzgâr hızı, artık RES kurulumu düşünülen bölgede kurulan 80 metrelik direklerle ölçülmektedir. Toprak seviyesindeki engeller rüzgâr akışını dağıttığı için, rüzgâr hızı yükseklikle artmaktadır (Şekil 1.6). Rüzgâr türbinleri için 100 metre ve üstündeki yükseklikler; daha yüksek ve kararlı rüzgâr hızları, düşük türbülans gibi olumlu etkilerden dolayı en ideal koşulları oluşturmaktadır [24]. Türbin hub yüksekliğinin artması ile ortalama rüzgâr hızının ve üretilebilecek enerji miktarının arttığı gözlemlenmiştir [31]. Rüzgâr enerjisinde kule yükseklikleri de göz önüne alındığında 80-100 metredeki rüzgârlar RES'ler için oldukça önemlidir. Rüzgâr hızı yükseklikle orantılı olarak logaritmik şekilde artmakta ve belli bir yükseklikten itibaren sabitlemektedir [32].



Şekil 1.6. Rüzgâr hızı ile yükseklik ilişkisi

1.3.2. Pürüzlülük (Roughness)

Rüzgâr türbinlerinin üreteceği enerjinin gerçeğe yakın tahmin edilebilmesi için, meteorolojik ve topoğrafik yapı, arazi pürüzlülüğü gibi bölgeyi temsil eden coğrafi verilerin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, bir bölgenin bitki örtüsü, doğal arazi yapısı, çevredeki yapılaşma gibi pürüzlülük elemanlarının boyutları ve bölge üzerindeki dağılımlarına bağlıdır [24,25]. Yüzey pürüzlülüğü, rüzgâr hızı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu için rüzgâr potansiyeli çalışmalarında önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça havanın sürtünme kuvvetinin artacağı ve rüzgâr hızının azalacağı kabul edilmektedir. Rüzgâr yere yakın noktalarda yavaş hareket etmektedir. Yüzey şekillerine göre pürüzlülük sınıfları ve pürüzlülük uzunluk değerleri Tablo 1.2'de paylaşılmıştır [23,26].

Tablo 1.2. Yüzey şekillerine göre pürüzlülük sınıfları ve uzunluk değerleri

| Pürüzlülük Sınıfı | Pürüzlülük Uzunluğu Z ₀ (m) | Enerji Göstergesi (%) | Ortam Yüzeyi |
|-------------------|--|-----------------------|--|
| 0 | 0,0002 | 100 | Su yüzeyleri |
| 0,5 | 0,0024 | 73 | Açık Araziler (Beton, havaalanlarındaki beton yollar, otopan, çayır ekili alanlar vb.) |
| 1 | 0,03 | 52 | Uzak aralıklı yapılara sahip çitsiz ve engelsiz açık tarımsal araziler (Çok hafif engebeli) |
| 1,5 | 0,055 | 45 | Birkaç binalı ve 1250 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler |
| 2 | 0,1 | 39 | Birkaç binalı ve 500 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler |
| 2,5 | 0,2 | 31 | Pekçok bina, çalı ve bitkiye sahip ya da 250 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler |
| 3 | 0,4 | 24 | Köyler, küçük şehirler, çok ya da yüksek çitli, tarımsal araziler, ormanlar, çok yoğun ve pürüzlü bölgeler |
| 3,5 | 0,8 | 18 | Yüksek yapılara sahip büyük şehirler |
| 4 | 1,6 | 13 | Yüksek binalara ve gökdelen yapılarına sahip büyükşehirler |

Tablo 1.2’de görüldüğü gibi; düz zeminler, havaalanı, deniz yüzeyi gibi ortamların rüzgâr hızı üzerindeki etkisi daha az olurken, büyük ağaçlı ormanlar, tepeler ve büyük binalar gibi pürüzlülüğün fazla olduğu ortamların rüzgâr hızı üzerinde ciddi bir etkisi bulunmaktadır. Pürüzlülük uzunluğunun (Z_0) Tablo 1.2’de belirtilen pürüzlülük yüzeyleri ile ilişkisi, Denklem (1.1)’de verilmiştir;

$$Z_0 = \frac{hS}{2A_h} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)’de h sembolü; pürüzlülük elemanının yükseklik değerini, S sembolü; pürüzlülük elemanının rüzgâra karşı gelen dikey kesit alanını, A_h sembolü ise pürüzlülük elemanının bölge üzerine dağılmış ortalama yatay kesit alanını belirtmektedir.

Su alanları, denizler, fiyortlar ve göller pürüzlülük sınıfının 0 kabul edildiği bölgelerdir. Bu bölgelerde pürüzlülük uzunluğu Z_0 , 0,0002 m olarak tanımlanır. Şekil 1.7’de pürüzlülük sınıfının 0 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır [27].



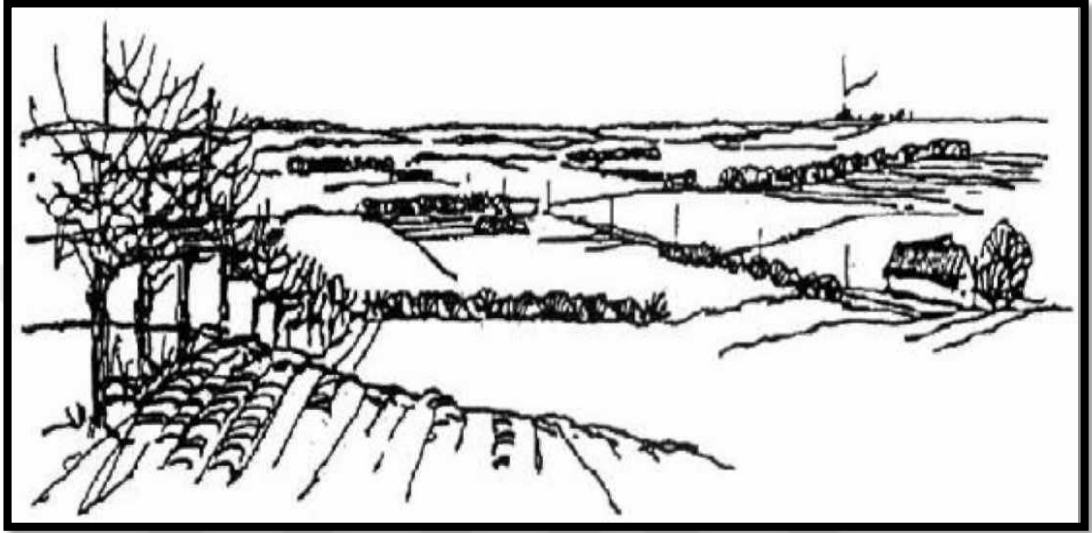
Şekil 1.7. Pürüzlülük sınıfı 0 olan arazi örneği[27]

Açık alanlar içinde rüzgâra etki edecek birkaç engelin, basit şekil, ağaç ve çalılıkların bulunduğu açıklıklar, düz alanlar ve yumuşak engebeler, pürüzlülük sınıfının 1 olarak tanımlandığı bölgelerdir. Pürüzlülük uzunluğu Z_0 0,03 m olarak kabul edilir. Şekil 1.8’de pürüzlülük sınıfının 1 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır [27].



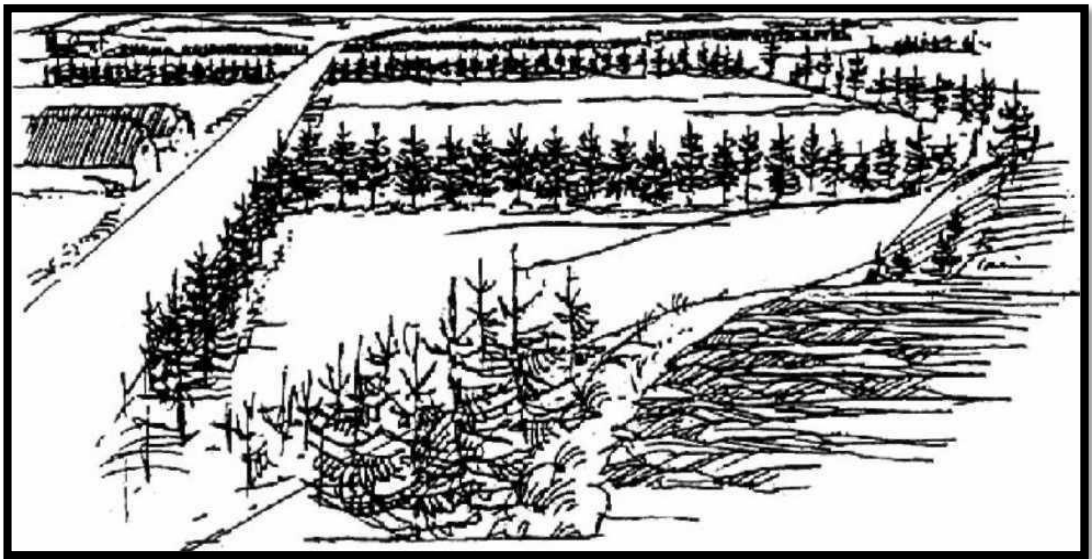
Şekil 1.8. Pürüzlülük sınıfı 1 olan arazi örneği[27]

Rüzgâra etki eden kırıcıların birbirinden ortalama 1000 m'den fazla uzaklıkta olduğu, binaların dağınık bir halde bulunduğu, çok sayıda ağaç ve binanın bulunduğu alanlar, pürüzlülük uzunluğu Z_0 'm 0,10 m olarak ifade edildiği, pürüzlülük sınıfının 2 olarak tanımlandığı bölgelerdir. Şekil 1.9'da pürüzlülük sınıfının 2 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır [27].



Şekil 1.9. Pürüzlülük sınıfı 2 olan arazi örneği[27]

Şehir alanları, ormanlar ve ortalama birkaç yüz metre aralıklarla çok sayıda rüzgâra etki edecek kırıcıların bulunduğu araziler, pürüzlülük yüksekliği Z_0 0,40 m olarak ifade edildiği, pürüzlülük sınıfının 3 olarak tanımlandığı bölgelerdir. Şekil 1.10'da pürüzlülük sınıfının 3 olduğu arazi örneği paylaşılmıştır [27].



Şekil 1.10. Pürüzlülük sınıfı 3 olan arazi örneği[27]

1.3.3. Türbülans

Türbülans, rüzgâr hızındaki ve yönündeki hızlı dalgalanmalardır. Türbülansın türbin performansı ve yüklemesi üzerinde olumsuz etkileri vardır. Türbülansın en yaygın göstergesi 10 dakikalık bir kayıt aralığında 1-2 saniyelik verilerden hesaplanan rüzgâr hızının standart sapmasıdır(σ). Türbülans yoğunluğu; standart sapmanın ortalama rüzgâr hızına bölünmesi ile elde edilen birimsiz bir niceliktir.

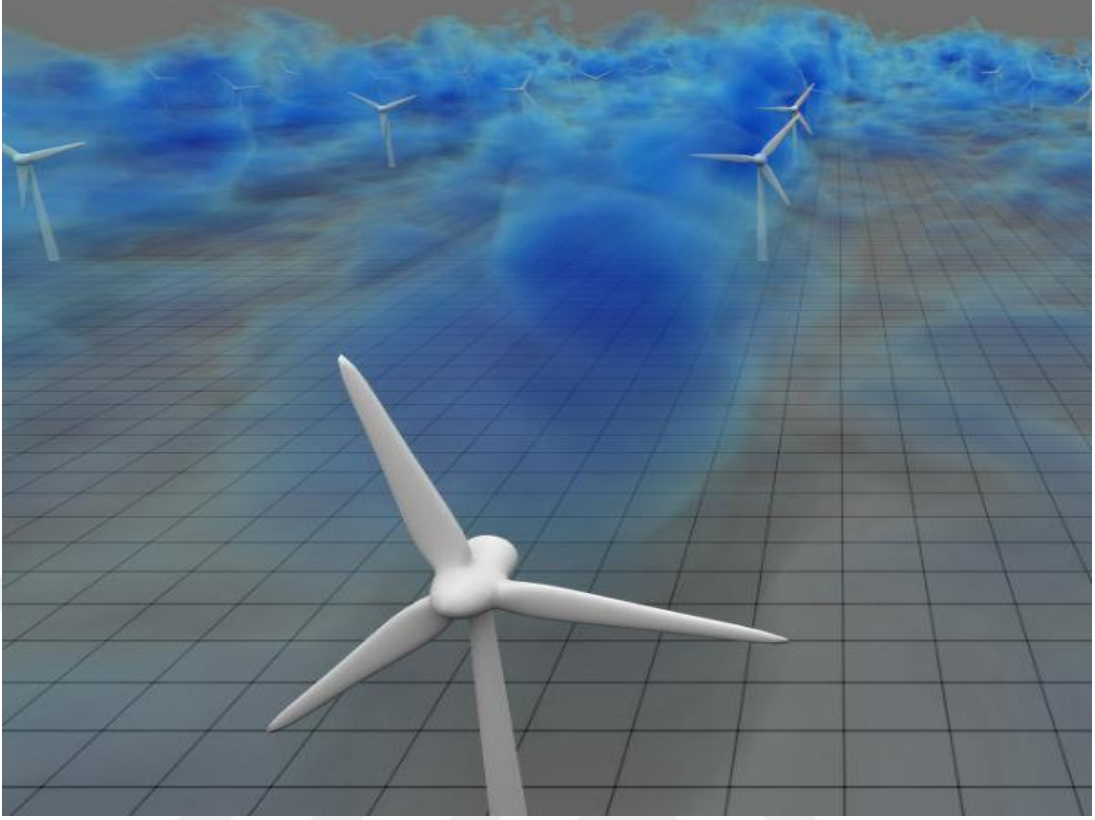
σ rüzgâr hızının standart sapmasını ve v ortalama rüzgâr hızı olmak üzere türbülans yoğunluğu Denklem (1.2)'de verildiği gibi ifade edilmektedir;

$$I = \frac{\sigma}{v} \quad (1.2)$$

Rüzgâr türbinleri için türbülans yoğunluğu değeri; 0-0,1 aralığında ise düşük türbülanslı bölge, 0,1-0,25 aralığında ise orta türbülanslı bölge, 0,25 değerinden büyük ise yüksek türbülanslı bölge olarak adlandırılmaktadır. Türbülans yoğunluğu değerinin 0,25 değerinden fazla olduğu alanlara rüzgâr enerji santrali kurulumu yapılmaması önerilmektedir [26,31].

1.3.4. Wake (iz) etkisi

Bir rüzgâr türbini, kanatlarından geçen rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmını kullanıp hareket enerjisine dönüştürür, enerjinin korunumu ilkesi gereği türbinden çıkan rüzgârın enerjisinin girenden daha düşük olması gerekmektedir [28]. Rüzgâr türbinleri akış yönünde enerjiyi dönüştürdükten sonra arkalarında bir iz bırakırlar ve bu iz rüzgâr hızını düşürür. Wake (iz) etkisi rüzgâr çiftliği alanlarında, türbinlerin arkalarına daha yavaş bir rüzgâr hızı aktarmaları nedeniyle enerji üretimine yapacakları etki olarak tanımlanmaktadır [29]. Türbinlerin birbirlerini olumsuz yönde etkilemesine sebep olan bu durumun minimuma indirilmesi için rüzgâr çiftliği yerleşiminde türbinler arasında uygun mesafeler bırakılmalıdır. Genel olarak bir türbinin, arkasındaki türbine etkisini azaltmak için türbinler arasındaki mesafenin en az, birinci türbinin kanat çapının 7 katı olacak şekilde yerleştirilmesi önerilmektedir. Şekil 1.11'de bir rüzgâr türbinin arkasında oluşan wake (iz) etkisinin görüntüsü paylaşılmıştır [30].



Şekil 1.11. Wake (İz) etkisi simülasyonu

1.3.5. Tünel etkisi

Rüzgârda tünel etkisine daha çok binalar arasında veya dar dağ geçitlerinde rastlanmaktadır. Hava, bina veya dağların rüzgârlı kısımlarında sıkışır; rüzgâr şiddeti belirgin bir oranda artar, buna tünel etkisi denir. Rüzgâr şiddeti açık arazide 6m/s ise doğal tünel etkisi nedeniyle 9m/s ye ulaşabilmektedir [35].

Rüzgâr türbinlerinin tünel etkisini dikkate alarak arazi içerisinde uygun ve düzgün alanlara konumlandırılması, rüzgâr enerjisini daha verimli kullanmayı ve enerji üretimi açısından avantaj sağlamayı mümkün kılmaktadır. Ancak olumlu bir tünel etkisi sağlamak için türbin yumuşak engellerin arasına yerleştirilmeli ve arazinin yapısı pürüzlü ve engebeli olmamalıdır.

Bu koşullara dikkat edilmediği takdirde sert, pürüzlü ve engebeli bir arazi düzenli olmayan tünel etkisi oluşturacak ve bu da daha çok türbülansa sebep olacaktır. Oluşan türbülans, türbinde yıpranma, yorulma gibi hasarlara neden olarak türbinin ömrünü azaltacak ve enerji üretiminde dezavantaja sebep olacaktır [33,34].

1.4. Rüzgâr Enerjisi Eşitliği

Hareket halindeki her cisim bir kinetik enerjiye sahiptir. Rüzgâr da hareket halindeki bir hava kütlesi olarak kinetik enerjiye sahiptir.

Rüzgâr gücünün elektrik enerjisi üretimi için kullanılan kuramsal eşitliği de kinetik enerji eşitliğinden elde edilmektedir [36]. E enerji, m kütle ve V yataydaki rüzgâr hızı olmak üzere Denklem (1.3)'te verildiği gibi ifade edilmektedir;

$$E = \frac{mV^2}{2} \quad (1.3)$$

Rüzgârın düşey bileşeni yatay bileşenine göre çok küçük olduğundan ihmal edilir.

ρ havanın özgül kütlesi, H havanın hacmi olmak üzere Denklem (1.4)'te verildiği gibi ifade edilmektedir;

$$m = \rho H \quad (1.4)$$

A rüzgârın esme yönüne dik alan (rüzgâr türbini süpürme alanı), L rüzgâr yönündeki uzunluk olmak üzere Denklem (1.5)'te verildiği gibi ifade edilmektedir;

$$H = AL \quad (1.5)$$

Yolun hız ve zaman çarpımına eşit olduğu bilindiğine göre, L mesafesi rüzgâr hızına ve zamana bağlı olarak Denklem (1.6)'da yazılmıştır;

$$L = Vt \quad (1.6)$$

Hesaplanan L denklemde yerine konularak kütle denklemi Denklem (1.7)'de yazılmıştır,

$$m = \rho AVt \quad (1.7)$$

elde edilmektedir. Enerji denkleminde yerine konulduğunda, birim zamanda, birim alandan elde edilen rüzgâr enerjisi eşitliği Denklem (1.8)'de yazılmıştır;

$$E = \frac{\rho AtV^3}{2} \quad (1.8)$$

Yukardaki eşitlikte ρ , deniz seviyesindeki standart atmosfer şartlarında kabul edilen yoğunluk olup sayısal değeri $1,223 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Ancak bu çalışmada yoğunluk, daha önce Çatalca'nın Ormanlı mevkiinde kurulmuş olan rüzgâr ölçüm istasyonundan elde edilen sıcaklık, basınç ve nem gerçek verileri kullanılarak hesaplanmıştır.

1.5. Hava Yoğunluğu Hesabı

Rüzgârdan elde edilecek enerji (1.8) eşitliğinden de anlaşılacağı üzere havanın yoğunluğu ile doğrudan orantılıdır. Hava, nitrojen, oksijen, argon ve diğer bazı gazlardan oluşan bir karışımdır. Nitrojen ve oksijen kuru havanın %99'unu oluşturmaktadır.

Yerküreden 80 km yüksekliğe kadar atmosfer bu gazların karışımından oluşmaktadır, sıcaklık ve basınç değişiminin nasıl etkilediğini anlayabilmek için standart gaz eşitliği kullanılmaktadır [37]. İdeal bir gaz için gaz eşitliği Denklem (1.9)'da yazılmıştır;

$$PH = nRT \quad (1.9)$$

Standart koşullarda 0°C ve 1 atmosfer (atm) basınçta 1kg mol $22,414\text{m}^3$ ve R: $8,314\text{J}$ (kmol K). Dolayısıyla 1atm basınç 0°C de $101,324\text{kPa} = 105\text{N/m}^2$ olarak bulunmaktadır. Buradan Denklem (1.10)'daki eşitlik yazılmıştır;

$$\rho = \frac{mP}{nRT} \quad (1.10)$$

Bir kilogram kuru havanın ortalama moleküler kütlesi $28,97$ 'dir. Bu yüzden, 1kg mol kütle kuru havanın ağırlığı $28,97\text{kg}$ olarak bulunmaktadır. Denklem (1.11)'de yerine yazılmıştır.

$$\rho = \frac{mP}{nRT} = \frac{28,978}{8,314T} = 3,484 \frac{P \text{ kg}}{T \text{ m}^3} \quad (1.11)$$

Bu eşitlik, standart koşullarda kuru havanın hava yoğunluğunun $1,2929\text{kg/m}^3$ olduğunu göstermektedir.

Herhangi bir yerde P ve T değerleri bu denklemde yerine konularak istenilen yerin hava yoğunluğu bulunabilecektir.

Hava yoğunluğunu su buharı ve nem de etkilemektedir. Havadaki su buharının miktarına göre, hava yoğunluğunun değeri değişebilmektedir. Herhangi bir gazın toplam basıncı, gazı oluşturan karışımdaki gazların her birinin basınçlarının toplamına eşittir. Suyun moleküler ağırlığı (18g), havanın moleküler ağırlığından (28,97g) daha hafiftir. Buradaki durumda nemli havanın basıncı (Denklem (1.12)), kuru hava (Denklem (1.13)) ve su buharı (Denklem (1.14)) basınçları toplamıdır [36];

$$\rho_m = \frac{m_m P_m}{RT} \text{ (nemli hava)} \quad (1.12)$$

$$\rho_d = \frac{m_d P_d}{RT} \text{ (kuru hava)} \quad (1.13)$$

$$\rho_w = \frac{m_w P_w}{RT} \text{ (su buharı)} \quad (1.14)$$

Nemli hava, kuru hava ve su buharı karışımıdır. Denklem (1.15) ve (1.16) kullanılarak;

$$\rho_m = \rho_d + \rho_w \quad (1.15)$$

$$\rho_m = \frac{m_d P_d}{RT} + \frac{m_w P_w}{RT} \quad (1.16)$$

özgül nem (q) ile gösterilir ve Denklem (1.17) ile ifade edilir.

$$q = \frac{m_w}{m_m} \quad (1.17)$$

ile bulunmaktadır. Yukarıda verilen eşitliklerde yerine konulduğunda, Denklem (1.18) yazılabilmektedir,

$$q = \frac{\rho_w}{\rho_m} + \frac{m_w P_w}{m_w P_w + m_d P_d} \quad (1.18)$$

nemli hava için yoğunluk eşitlikten çekildiğinde, Denklem (1.19);

$$\rho_m = \frac{m_d P_m}{RT^*} \quad (1.19)$$

elde edilir. Eşitlikteki T^* , sanal sıcaklıktır.

1.6. Rüzgâr Türbinlerinin Sınıflandırılması

Teknolojinin sürekli gelişmesi ile birlikte rüzgâr türbini teknolojileri de değişmiş ve değişmeye devam etmektedir. Türbinlerin geçmişten günümüze yaşadığı gelişmelerin sonucu olarak ortaya farklı rüzgâr türbin tipleri çıkmış ve ihtiyaca göre farklı boyutlarda rüzgâr türbinleri üretilmiştir. Rüzgâr türbinlerini; rüzgârı alış yönleri, güç kontrol sistemleri, kullanım yerleri gibi birçok şekilde sınıflandırmak mümkün olsa da en çok tercih edilen ve kullanılan sınıflandırma çeşidi rotor eksenine (dönme eksenine) göre sınıflandırmadır [40,41].

Rotor eksenine göre sınıflandırılan rüzgâr türbinleri; rotorun dönme hızlarına, pervane çapı ve kurulu güçlerine, pervane ve kanat sayılarına, şebekeye bağlantı durumlarına göre alt sınıflara ayrılabilir. Bu sınıflandırmaya göre rüzgâr türbinleri; yatay, dikey ve eğik eksenli olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir [38,39].

1.6.1. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

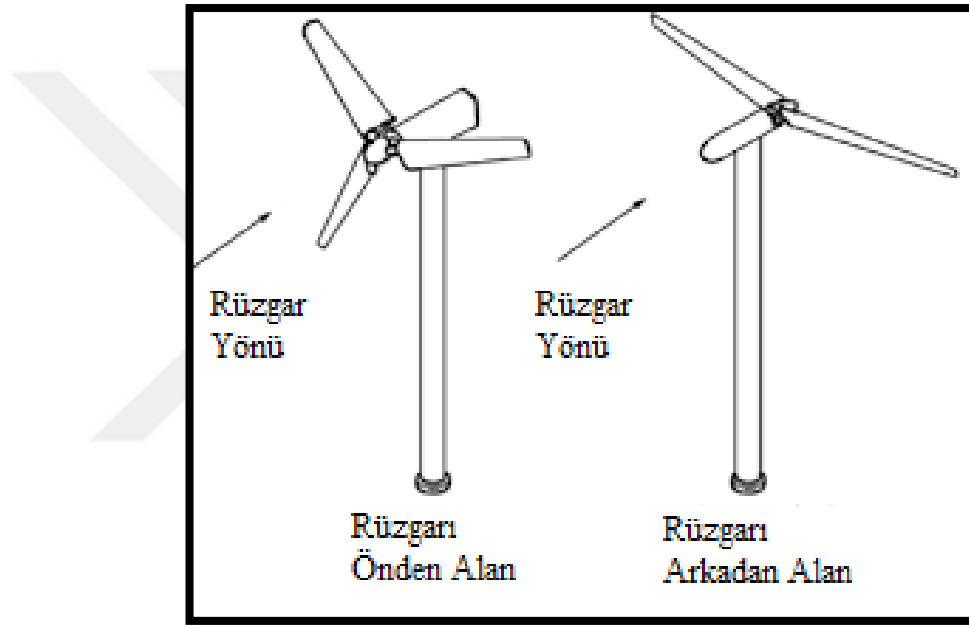
Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin dönme eksenini rüzgâr yönüne paralel, kanatları ise rüzgâr yönüne dik gelecek şekilde açı yaparlar. Ticari amaçlı kullanılan türbinlere bakıldığında, çoğunluğunun yatay eksenli türbinler olduğu görülmektedir. Bu türbinlerde rotor elemanı, rüzgârı en verimli şekilde kullanabilmesi için, rotasyonel bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Rotor yere paralel bir şekilde çalışmaktadır ve rüzgârdan verimi en iyi şekilde alabilmesi için kanatları rüzgâr akış yönünde olmalıdır. Bu türbinler kendi içinde de rüzgârı alış yönüne ve kanat sayısına göre sınıflandırılabilirler [40].

Rüzgârı alış yönüne göre;

Rüzgâr türbinleri, rüzgârı alış yönüne göre, rüzgârı önden alan ve rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Rüzgârı önden alan rüzgâr türbinlerinin, rotor yüzü rüzgâra doğru yönlendirilmektedir. Bu türbin çeşidinin kullanımı çok yaygındır. Bu türbinlerin üstünlüğü kuleden kaynaklı oluşacak gölgeleme etkisine çok az maruz kalmasıdır. Kule her ne kadar düz ve yuvarlak bir yapıda olsa dahi, kanat kule hizasından geçerken türbinin ürettiği güç biraz azalmaktadır [40]. Bu türbin modellerinde, rotoru rüzgâr yönüne döndürebilmek için yaw mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Rüzgârı arkadan alan rüzgâr türbinlerinde, rotorlar kulenin arkasında yer almaktadır. Türbinin rüzgâra dönmek için yaw mekanizmasına ihtiyaç duymaması, bu sistemin önemli bir artısıdır. Makine yatağı olan nacelle ve rotorun rüzgârı pasif olarak izlemesi sağlanmaktadır. Kanatlar esnek özelliğe sahiptir. Bu da sistemin ağırlık ve makinenin güç sistemi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Fakat bu türbinlerde rotor kanatlarının kule hizasından geçerken oluşturduğu güç dalgalanması, rüzgârı önden alan türbinlere oranla, türbine daha çok zarar vermektedir [40].

Rüzgârı alış biçimlerine göre rüzgâr türbinleri Şekil 1.12’de paylaşılmıştır [23].



Şekil 1.12. Rüzgârı alış biçimlerine göre rüzgâr türbinleri

Kanat sayısına göre;

Bu sınıflandırmada tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgâr türbinleri yer almaktadır. Çok kanatlı türbinler, yavaş hızlarda çalışırken diğer türbinler yüksek hızlarda çalışabilmektedir.

Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin yapılmasındaki temel amaç, kanat sayısına göre dönme hızının yüksek olması sebebiyle makine ağırlığını, dolayısıyla rotorun dönüş momentini azaltmaktır. İlave yüklerden ortaya çıkan aerodinamik balanssızlık ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için bu türbinlerin rotorlarında hub tek menteşe ile sabitleştirilip, karşı ağırlıklarla dengelenmelidir. Bu türbinlerin en büyük dezavantajı, 120 m/s dolayındaki kanat uç hızının sebep olduğu rotorun

aerodinamik gürültü seviyesidir. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre, kanat uç hızı iki kat daha fazladır ve daha fazla gürültülü çalışmaktadır [23]. Şekil 1.13'te tek kanatlı bir rüzgâr türbini paylaşılmıştır.



Şekil 1.13. Tek kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini

Çift kanatlı rüzgâr türbinlerinin üretimindeki temel amaç üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre rotor maliyetini azaltmaktır. Genellikle Avrupa ve ABD'de kullanılmıştır. Rotor balansı, tek kanatlı rüzgâr türbinlerinin rotor balansına göre daha düzgündür. Kanat uç hızları, üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre daha yüksektir. İki kanatlı rotorun sebep olduğu dinamik etkiler çeşitli ilave ekipmanlar gerektirir ve bu da maliyet artışına sebep olmaktadır. Kanat uç hızının yüksek olması gürültülü çalışmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu türbinler, düşük rüzgâr hızlarında (3 m/s) devreye girememektedir. Günümüzde çift kanatlı rüzgâr türbinleri tercih edilmemektedir [41]. Şekil 1.14'te iki kanatlı bir rüzgâr türbini paylaşılmıştır.



Şekil 1.14. İki kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini

Üç kanatlı rüzgâr türbinleri, günümüzde en çok kullanılan türbin modelidir. Bu türbinlerin tercih edilmesinin başlıca sebebi, dönme momentlerinin diğer türbin modellerine göre daha düzgün olmasıdır. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde, türbin üzerinde depolanan yükler salınım yapan atalet momentine neden olmaz ve bu türbinler her hızda sabit atalet momentine sahiptir. Türbin sahip olduğu sabit atalet momenti sayesinde göbek içinde titreşimi engelleyici pahalı parçalara ihtiyaç duymamaktadır [40].

Üç kanatlı rüzgâr türbinleri; günümüzde dünyanın her tarafında yaygın olarak kullanılan türbinlerdir. Elektrik üretimi amaçlı üretimlerinden dolayı ticari sınıfta yer almaktadır. Şekil 1.15'te üç kanatlı bir rüzgâr türbini paylaşılmıştır.



Şekil 1.15. Üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini

Çok kanatlı rüzgâr türbinleri; 1870'li yıllarda ABD'de üretilmeye başlanmıştır. Düşük hızlarda (2-3 m/s) çalışabilen bu türbinler uzun süre su pompalamada kullanılmış, pompalama işlemi için gerekli olan momenti karşılayabilmesi için de çok kanatlı olarak üretilmiştir [41]. Türbinlerin bazı modellerinde, kanat genişlikleri göbek kısmından uçlara gidildikçe artmaktadır (Şekil 1.16), kuyruğa yerleştirilen kanat dümen vazifesini görmektedir ve dişli kutusu kullanılarak devir sayısı arttırılmaktadır. Genellikle su pompalama işi için ideal olan bu türbinlerin, elektrik üretimi için verimleri düşüktür [42].



Şekil 1.16. Çok kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbini

1.6.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde, türbin şaftı yere dik bir şekilde konumlandırılmıştır ve rüzgâra dik bir açıdadır. Düşeyde yer alan kanatlar, rüzgârı her yönden alabildikleri için yön değiştirme ve bunun için gerekli sistemlere ihtiyaç duymamaktadırlar. Dikey eksenli türbin çeşidi olarak; sürüklenme ve kaldırma kuvveti ile dönen model Darrieus tip, sadece sürüklenme etkisi ile dönen model Savonius tip rüzgâr türbini mevcuttur [39]. Verimlilikleri yaklaşık olarak %35'tir. Kule ihtiyacı olmayan bu türbinlerde, jeneratör ve dişli kutusu gibi sistemler yer seviyesindedir. Bu sayede bu sistemlerin bakımları daha kolay gerçekleştirilir. Kule olmadığı için yükseklikleri düşüktür ve düşük rüzgâr hızlarında çalıştıklarından az enerji üretilmektedir. Yatay eksenli türbinlere göre az ekipman ihtiyacı ve kule masrafının olmaması ilk yatırım ve bakım

maliyetleri konusunda bir avantaj sağlamaktadır. Dezavantajları olarak, ilk hareket motoruna ihtiyaç duymaları, türbini ayakta tutabilmek için germe telleriyle yere sabitlendikleri için geniş alan kaplamaları ve az enerji üretebilmeleri sayılabilir. Dikey eksenli rüzgâr türbin çeşitlerinin en çok bilinenleri Darrieus ve Savonius modelleridir.

Darrieus tip rüzgâr türbinleri;

Darrieus tip rüzgâr türbini, Fransız mühendis Georges Jeans Mary Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiştir. Kendisi bu türbinlerin kanat şeklini bir kablonun döndürülmesi olayına benzeterek tanımlamıştır [39]. 1970-1980'lerde Kuzey Amerika'da kanat dizaynları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Dönme hareketi; kanatların konkav ve konveks yüzeyleri arasındaki çekiş kuvveti farkı ile oluşur. Türbinler genellikle iki ya da üç kanatlı üretilmektedir. Kanatların aerodinamik yapısı sayesinde yüksek performansa sahiptir. İlk harekette tahrik motoruna gereksinim duymaktadır [40]. 250 KW ve üzeri güç üreten modelleri ticari amaçlı kullanılmaktadır. Darrieus tip rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi ile ortaya çıkan H-Darrieus tipi rüzgâr türbinleri, aerodinamik profilinin düz olması ve türbin kanatlarına açısız kontrol uygulanarak, yüksek rüzgâr hızlarında kanat açısı değişimi ve kanatların sabit hızda tutulmasının sağlanması ile daha verimli çalışabilen türbin modelidir. Darrieus tip dikey eksenli bir rüzgâr türbini Şekil 1.17'de paylaşılmıştır [23].



Şekil 1.17. Darrieus tip dikey eksenli rüzgâr türbini

Savonius tip rüzgâr türbinleri;

Savonius tip rüzgâr türbinleri, Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından 1925 yılında keşfedilmiştir. Rotoru yeryüzüne dikey konumdadır. Silindirin ortadan ikiye ayrılması ve merkezleri birbirine göre simetrik olacak şekilde kaydırılması sonucu elde edilmiştir, “S” şeklindedir. Rotoru çarpan rüzgâr, yarım daire silindirin iç kısmında pozitif, diğer yarım daire silindirin dış kısmında negatif bir moment oluşturur. İç kısımdaki moment kuvveti, dış kısımdakinden daha büyüktür ve oluşan fark rotorun dönmesini sağlar. Türbin rüzgârın estiği yön fark etmeksizin dönmeye ve güç üretmeye başlamaktadır [40,43].

Savonius tip rüzgâr türbinlerinin avantajları olarak; kurulum maliyetinin uygun ve kolay olması, ilk hareket için tahrik motoruna ihtiyaç duymaması, her yönden esen rüzgâra anında uyum sağlaması, düşük rüzgâr hızında ve sessiz çalışması söylenebilir. Aerodinamik performansları düşüktür ancak bu negatif yönü geliştirmek amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine oranla güç katsayıları da düşüktür. Genellikle su pompalama gibi işlemlerde kullanılırlar. Gün geçtikçe daha çeşitli model ve şekilleri üretilmektedir. Dikey eksenli savonius türbin modeli Şekil 1.18'de gösterilmiştir [42,43].



Şekil 1.18. Savonius tip dikey eksenli rüzgâr türbini

2. WINDSIM VE CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

2.1. WindSim

WindSim, bir sayısal rüzgâr enerjisi değerlendirme yazılımı olarak endüstride yer almaktadır ve kompleks arazilerde doğru sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır [6]. WindSim bir yandan türbin yüklerini kabul edilebilir sınırlar içinde tutarken bir yandan da rüzgâr santrali enerji üretimini optimize etmek için kullanılır. Bu nümerik rüzgâr sahalarının dijital bir arazi üzerinde hesaplanmasıyla gerçekleştirilir. Rüzgâr enerjisi sektöründe bu çalışmaya mikro-konuşlandırma denir.

WindSim’de CFD hesapları, 1974’te kurulmuş CHAM Company tarafından geliştirilen, Phoenics isimli ticari CFD yazılımıyla gerçekleştirilir [7]. WindSim bir Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) çözücüsüdür; rüzgâr sahalarının simülasyonu yapılırken bir yandan non-linear Navier-Stokes denklemlerinin çözüldüğü bir yandan da bir türbülans modelinin çözüldüğü anlamına gelmektedir.

WindSim’in doğruluğu birçok çalışmayla kanıtlanmıştır. Bu çalışmalar arasında farklı modellerin en iyi sonuçları almak için yarıştığı Bolund deneyi de bulunmaktadır. WindSim’in de dahil olduğu CFD metotları kullanılan birçok model arasında, WindSim en düşük hataları vermiştir [8].

2.2. CFD (Computational Fluid Dynamics)

Computational Fluid Dynamics (CFD) ya da Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, akışkanlar mekaniğinin nümerik metotlar ve algoritmalarla akış dinamiği çözümlerini kapsayan bir dalıdır. CFD’nin temel mantığı, akışkan akışını tanımlayan diferansiyel denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürüp çözmektir. Çözüm sonlu farklar, sonlu hacimler ve sonlu elemanlar gibi yöntemler kullanılarak sağlanır [9].

CFD metotlarının rüzgâr mühendisliğinde kullanımı, Computational Wind Engineering (CWE) olarak adlandırılır [10]. Rüzgâr mühendisliği söz konusu olduğunda akış, atmosfer sınır tabakası akışıdır. Bu akış, zamana bağlı olarak basınç ve hızda çok yüksek değişimlerin olduğu türbülanslı bir sınır akışıdır. Türbülanslı

akışlar, Navier-Stokes denklemleri olarak da adlandırılan, non-lineer süreklilik ve momentum denklemleriyle ifade edilir.

Nümerik akış simülasyonları gerçekleştirilirken üzerinde durulması gereken birkaç nokta vardır. İlk olarak bir denklem setinin çözülmesini gerektiren akışın fiziksel modeli bulunmalıdır. Ardından simülasyonu yapılacak hacmin iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu hesaplama alanı nümerik çözümün mekânsal çözünürlüğünü belirleyen sayısal bir çözüm ağı tarafından ayrıklaştırılır. Bütün denklemlerin ayrıklaştırılması için bazı başlangıç kabulleri yapılmalı ve çözüm için denklemler non-lineer olduğundan iteratif bir süreç izlenmelidir. Birçok durumda çözüm ağı büyüklüğü ve iterasyon sayısı CFD simülasyonunun kalitesini belirleyen ana unsurlardır.

Bunlara ek olarak Atmosfer Sınır Tabakası üzerinde çalışılırken dikkat edilmesi gereken birkaç nokta bulunmaktadır. İlk olarak, pürüzlülük alt tabakası denilebilir. Bu tabaka havanın otlar, ağaçlar ya da binalar gibi çeşitli pürüzlülük elemanları arasından aktığı tabakadır. Hem pürüzlülük tabakası hem de yüzey tabakası rüzgârın davranışının tahmin edilmesi bakımından önemlidir ve CFD modelinin içerisinde değerlendirilmelidir.

CFD'yi rüzgâr enerjisi değerlendirmesi için uygun kılan durum, CFD'nin non-lineer akış denklemlerini çözüyor olmasıdır. Arazinin yapısından dolayı çeşitli türbülanslı akış olayları oluşabilir ve bunların CFD dışı metotlarla çözülmesi oldukça zordur. Arazinin yapısı türbülans üzerinde kilit rol oynamaktadır ve çok küçük eğim açılarında bile, lineer ve CFD metotlar arasında rüzgârın tahmini hızlanmasında önemli farklar ortaya çıkmaktadır.

3. RÜZGÂR ÖLÇÜM İSTASYONU VE VERİ ANALİZİ

3.1. Rüzgâr Ölçüm İstasyonu (RÖİ)

Rüzgâr enerji santrali mikro-konuşlandırma çalışması yapılması planlanan sahaya yakın bir konumdaki 81 metre yüksekliğe sahip rüzgâr ölçüm istasyonundan, 1 yıllık rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, sıcaklık, nem ve basınç verileri alınmıştır. İncelenen ölçüm zaman aralığı 27/07/2016 – 03/07/2017 tarihleri arasındadır ve veriler 10 dakikalık aralıklarda kaydedilmiştir. Direk koordinatları UTM WGS84 sisteminde (35 T bölgesi) 622394, 4582880 (rakım: 4 m) olarak tespit edilmiştir.

Arazi kompleks değildir, çevrede çoğunlukla çeltik tarlaları bulunmakta ve ciddi bir bitki örtüsü bulunmamaktadır. Direk durumu ve rapordaki veriler kurulum yapan firmanın bakım ve servis raporları temel alınarak saha ziyaretinde kontrol edilmiştir.

Rüzgâr ölçüm istasyonundaki sensörlere ait bilgiler tablo 3.1’de paylaşılmıştır.

Tablo 3.1. Sensör kurulum bilgileri

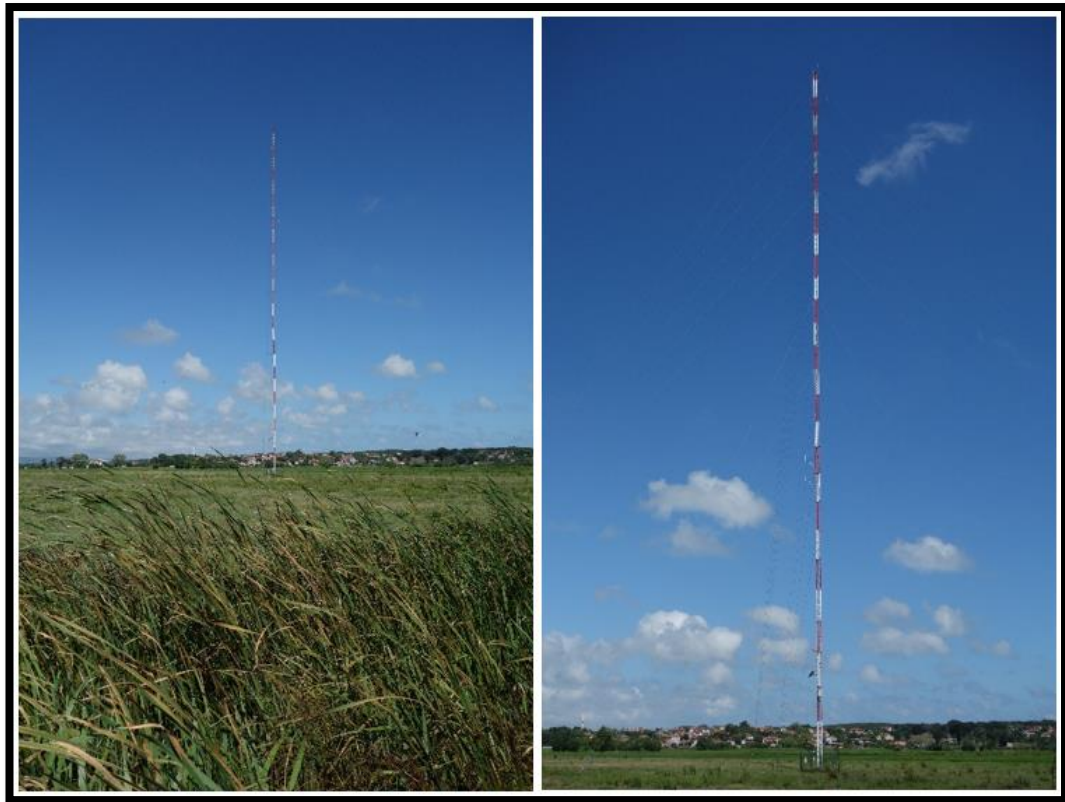
| Sensör | Kurulum Yüksekliği (m) | Model | Kol Yönü |
|------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Anemometre 1 | 81 | Thies First Cl. Adv. An. | 90° |
| Anemometre 2 | 80 | Thies First Cl. Adv. An. | 270° |
| Anemometre 3 | 60 | Thies First Cl. Adv. An. | 90° |
| Anemometre 4 | 30 | Thies First Cl. Adv. An. | 270° |
| Yön Sensörü 1 | 78 | Lambrecht ORA | 90° |
| Yön Sensörü 2 | 28 | Lambrecht ORA | 270° |
| Sıcaklık Sensörü | 5,5 | Galltech KPC1 | - |
| Nem Sensörü | 5,5 | Galltech KPC1 | - |
| Basınç Sensörü | 5,0 | Lambrecht 8121 | - |

RÖİ'nin konumu harita üzerinde Şekil 3.1'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1. RÖİ'nin konumu

RÖİ'nin genel görünümü, sensörlerin direk üzerindeki konumları ve RÖİ'nin çevresine ait görüntüler Şekil 3.2-3.6'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.2. Direğin genel görünümü

RÖİ, mikro-konuşlandırma çalışması yapılacak sahanın batısında, Ormanlı Köyü yakınlarındadır. RÖİ çevresindeki arazi direk yakınında tarlalarla, biraz daha uzakta ormanlarla kaplıdır. Ziyaret sırasında direğin fiziksel olarak iyi bir durumda olduğu, gözle görülebilir bir eğilmenin bulunmadığı ve gergi kablolarının uygun şekilde gerili olduğu gözlemlenmiştir.

RÖİ kurulum raporuna göre, hız ve yön sensörlerinin yerleşimi, sayısı, yönleri ve kolların uzunluğu göz önüne alındığında, ölçüm direğinin “IEC 61400-12-1 Ed.2 standartlarına” ve “Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Önlisans Başvuruları İçin Yapılacak Rüzgâr ve Güneş Ölçümleri Uygulamalarına Dair Tebliğ’e” uygun bir şekilde olduğu görülmektedir. Sensörlerin kurulum yönleri, hâkim rüzgâr yönünün kuzey olduğu göz önüne alındığında doğru şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.3. Direğin genel görünümü (devam)



Şekil 3.4. Sensörlerin direk üzerindeki konumları



Şekil 3.5. RÖİ'nin kuzey, kuzeydoğu, doğu ve güneydoğusuna ait görüntüler



Şekil 3.6. RÖİ'nin güney, güneybatı, batı ve kuzeybatısına ait görüntüler

3.2. Veri Analizi

Bu bölümde, RÖİ'deki rüzgâr izleme ekipmanları, verilerin doğrulanması, kısa dönemli saha ölçümlerinde görülen rüzgâr koşulları, uzun dönemli referans rüzgâr koşulları ve tahmin edilen uzun dönemli saha rüzgâr koşullarının kontrol süreçleri açıklanmıştır.

3.2.1. Kısa dönemli rüzgâr verisi analizi ve kalite kontrol süreci

Ölçüm verisi içerisinde direk üzerindeki anemometreler, yön ölçerler ve sıcaklık sensöründen alınan veriler incelenmiş ve verinin genel olarak kalitesinin oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Direkten elde edilen verilerin temizlenmesi sırasında aşağıdaki süreç izlenmiştir.

- Hata değerleri ve görsel kontrol
- Sabit sıfır, sabit değer ve sıfır standart sapma testi
- Farklı sensörler arasında veri uyumluluğu

Veri setinin tamamına uygulanan filtreler aşağıdaki gibidir:

1. Ortalama hız verilerine ait standart sapma değerlerinin bulunmadığı veya sifıra eşit olduğu noktalar hız veri setlerinde filtrelenmiştir.
2. Yön değerlerine ait standart sapmanın belli değerlerin üzerinde bulunduğu noktalar filtrelenmiştir.
3. Hızın maksimum değerinin ortalama değerden düşük çıktığı noktalar filtrelenmiştir.
4. Belirli bir süre boyunca sabit kalan hız değerleri filtrelenmiştir.
5. Ağır kış şartlarından dolayı buzlanmadan şüphelenilen yerler elenmiştir.

Kule gölgesi (tower shading) ihtimali bu projede incelenmemiştir. Bunun sebebi sensörlerin standartlara da uygun bir şekilde hakim rüzgâr yönüne 90° açı ile yerleştirilmiş olmalarıdır. Bu durumda kule gölgesi etkisi ihmal edilebilir seviyede olacaktır. Verideki toplam kayıp oranı oldukça azdır. Veri kurtarma oranları Tablo 3.2’de, Filtreleme sonrası veriden elde edilen değerler Tablo 3.3’te paylaşılmıştır.

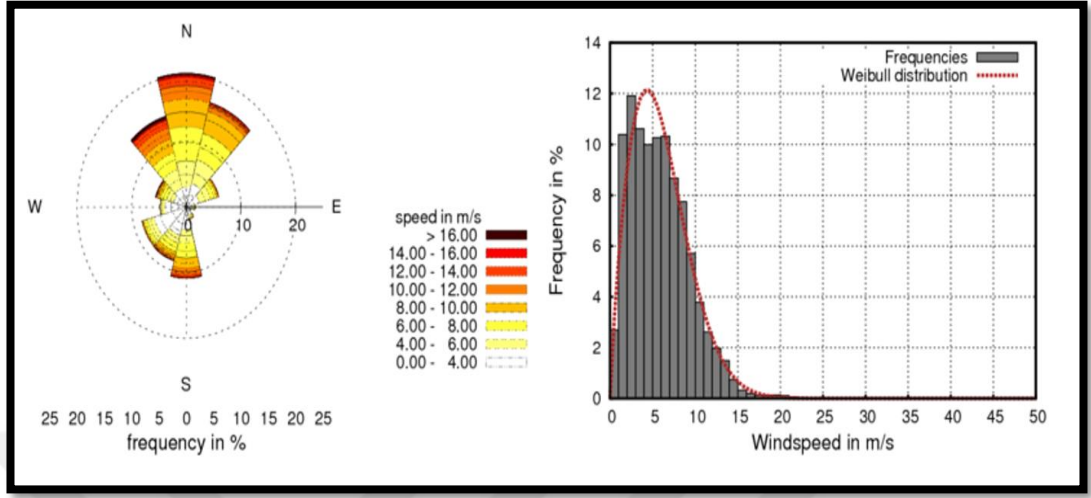
Tablo 3.2. Direkten elde edilen verinin kapsamı

| Sensör | Anemometre 1 [81 m] | Anemo. 2 [80 m] | Anemo. 3 [60 m] | Anemo. 4 [30 m] | Hız Ölçer 1 [78 m] | Hız Ölçer 2 [28 m] |
|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Veri kurtarma oranı(%) | 99,33 | 99,01 | 99,75 | 99,61 | 99,97 | 97,99 |

Tablo 3.3. Ölçüm direğinden alınan verilerin filtreleme sonrası değerleri

| | |
|--------------------------------------|---------------|
| Ortalama Hız (81 m) | 5,82 m/s |
| Ortalama Hız (80 m) | 5,79 m/s |
| Ortalama Hız (60 m) | 5,41 m/s |
| Ortalama Hız (30 m) | 5,02 m/s |
| Anemometre 1 (Weibull parametreleri) | k=1,83 A=6,69 |
| Anemometre 2 (Weibull parametreleri) | k=1,77 A=6,51 |
| Anemometre 3 (Weibull parametreleri) | k=1,72 A=6,08 |
| Anemometre 4 (Weibull parametreleri) | k=1,68 A=5,63 |
| Ortalama Sıcaklık | 12,3 °C |
| Maksimum Sıcaklık | 33,8 °C |
| Minimum Sıcaklık | -8,0 °C |
| Min. - Maks. Sıcaklık Farkı | 41,8 °C |
| Güç Kuralı Katsayısı (α) | 0,149 |

Kalite kontrol işlemlerinden sonra 81 m’de bütün sektörler için yön diyagramı ve Weibull parametreleri (WindSim tarafından kullanılan) Şekil 3.7’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.7. 81 m’de sektörler için yön diyagramı (sol) ve Weibull eğrisi uydurulmuş frekans dağılımı (sağ)

Tablo 3.4. 81 m’de ortalama rüzgâr, rüzgâr hızı ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri

| | | | |
|--|------|------|------|
| Ortalama rüzgâr hızı (m/s), Weibull k, A | 5,82 | 1,83 | 6,69 |
|--|------|------|------|

Tablo 3.5. 81 m’de her sektör için ortalama rüzgâr hızı, frekans ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri

| Sektör | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | 7,39 | 6,41 | 4,68 | 3,45 | 2,06 | 3,42 | 6,11 | 4,62 | 3,31 | 2,85 | 5,08 | 7,46 |
| Frekans (%) | 20,36 | 16,45 | 6,13 | 1,66 | 0,83 | 1,94 | 10,87 | 8,48 | 8,37 | 4,78 | 5,80 | 14,34 |
| Weibull şekil p., k | 2,35 | 2,65 | 2,20 | 1,58 | 1,48 | 1,41 | 2,10 | 1,47 | 1,31 | 2,03 | 1,88 | 1,88 |
| Weibull ölçek p., A | 8,35 | 7,35 | 5,34 | 3,75 | 2,23 | 3,67 | 7,11 | 5,21 | 3,32 | 3,20 | 5,86 | 8,34 |

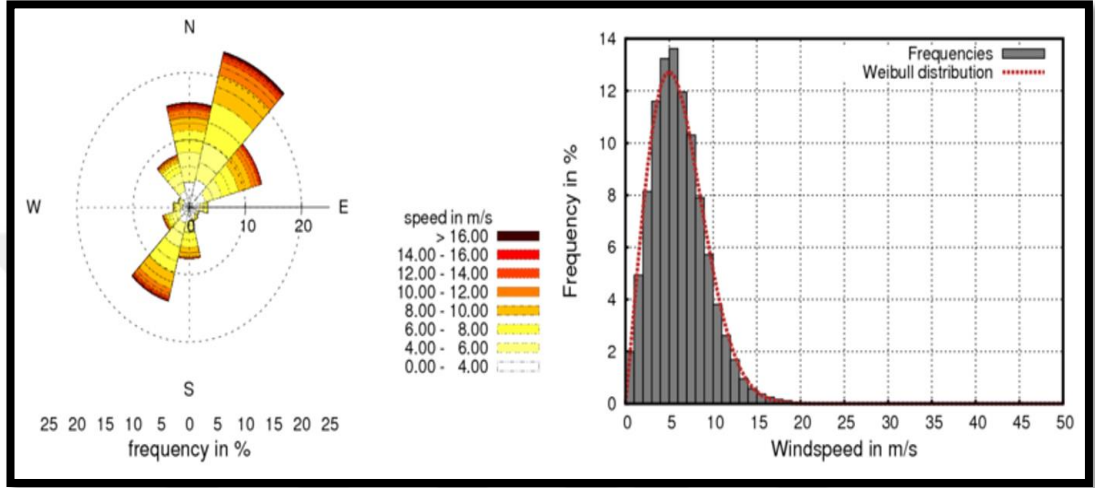
Tablo 3.6’da güç kuralı katsayısı değeri her bir sektör için ayrı ayrı paylaşılmıştır.

Tablo 3.6. Sektörel güç kuralı katsayısı (α) değerleri

| Sektör | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| α | 0,136 | 0,104 | 0,131 | 0,219 | 0,205 | 0,293 | 0,191 | 0,132 | 0,164 | 0,231 | 0,213 | 0,156 |

3.2.2. Uzun dönemli sentezlenmiş rüzgâr verisi

Uzun dönem rüzgâr verisi, Vortex sistemi kullanılarak satın alınmıştır. Toplam uzun dönem veri süresi 20 yıldır. Uzun dönem veriye ait 80 m’de tüm sektörler için yön diyagramı ve Weibull parametreleri (WindSim tarafından kullanılan) Şekil 3.8’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.8. 80 m’de bütün sektörler için yön diyagramı (sol) ve Weibull eğrisi uydurulmuş frekans dağılımı (sağ)

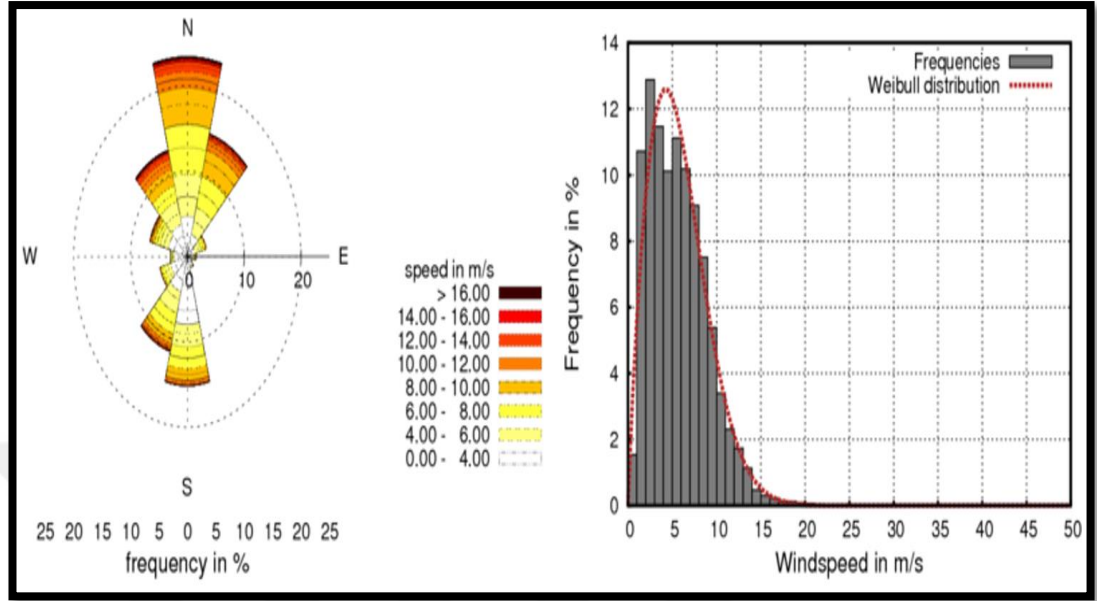
Tablo 3.7. 80 m’de ortalama rüzgâr hızı ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri

| | | | |
|------------------------------------|------|------|------|
| Ortalama rüzgâr hızı, Weibull k, A | 6,04 | 2,07 | 6,88 |
|------------------------------------|------|------|------|

Tablo 3.8. 80 m’de her sektör için ortalama rüzgâr hızı, frekans ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri

| Sektör | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | 6,35 | 6,85 | 6,58 | 3,76 | 3,09 | 3,28 | 5,86 | 6,68 | 5,09 | 4,30 | 3,64 | 5,35 |
| Frekans (%) | 15,51 | 23,84 | 13,33 | 3,35 | 1,89 | 2,15 | 7,63 | 14,41 | 4,86 | 2,87 | 2,13 | 8,02 |
| Weibull şekil p., k | 1,86 | 2,36 | 2,41 | 2,29 | 2,17 | 1,82 | 2,97 | 2,37 | 1,91 | 2,84 | 2,52 | 2,01 |
| Weibull ölçek p., A | 7,02 | 7,81 | 7,57 | 4,38 | 3,61 | 3,78 | 6,88 | 7,58 | 5,79 | 5,12 | 4,35 | 6,08 |

MCP metodu ve MTS ile sentezlenmiş uzun dönem veriye ait çıktılar Resim 3.9 ve Tablo 3.9-3.10'da paylaşılmıştır.



Şekil 3.9. 81 m’de bütün sektörler için yön diyagramı (sol) ve Weibull eğrisi uydurulmuş frekans dağılımı (sağ)

Tablo 3.9. 81 m’de ortalama rüzgâr hızı ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri

| Ortalama rüzgâr hızı, Weibull k, A | 5,68 | 1,85 | 6,48 |
|------------------------------------|------|------|------|
|------------------------------------|------|------|------|

Tablo 3.10. 81 m’de her sektör için ortalama rüzgâr hızı, frekans ve Weibull şekil (k) ve ölçek (A) parametreleri

| Sektör | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | 6,94 | 6,85 | 4,61 | 3,76 | 2,83 | 2,43 | 4,53 | 5,51 | 3,80 | 3,17 | 4,60 | 6,51 |
| Frekans (%) | 23,39 | 14,85 | 3,46 | 1,54 | 0,96 | 1,44 | 15,14 | 11,52 | 4,98 | 3,00 | 6,82 | 12,90 |
| Weibull şekil p., k | 2,18 | 2,57 | 2,27 | 1,95 | 1,54 | 1,82 | 1,64 | 2,01 | 1,70 | 1,74 | 1,61 | 1,76 |
| Weibull ölçek p., A | 7,80 | 7,87 | 5,29 | 4,25 | 3,01 | 2,67 | 5,07 | 6,36 | 4,14 | 3,35 | 5,00 | 7,30 |

3.2.3. Measure correlate and predict işlemleri

MCP işlemleri esnasında sahadaki rüzgâr koşullarının zaman aralıkları 1 saat olacak şekilde dönüştürülmüştür. 'Matrix Time Series' isimli MCP algoritması hedef ve referans hız verilerinin korelasyonu için kullanılmıştır. Matris bazlı MCP metodlarının arkasındaki temel fikir, hedef ve referans rüzgâr hızlarının 2 boyutlu birleşik olasılık dağılımını (JPD) kullanarak tahmin edilen rüzgâr hızı verisini oluşturmaktır. Bu sadece hedef ve referans arasındaki gelişigüzel non-lineer ilişkinin modellenmesine imkân tanımakla kalmaz, aynı zamanda her bir değişkendeki değişimin bilgisini de saklar. Bu yüzden MCP metodunda ilk yapılan, bu birleşik olasılık dağılımını oluşturmaktır.

Matrix Time Series metodu (MTS) başka metodlarla da karşılaştırılmıştır. Bunlar; Linear Least Squares (LLS), Orthogonal Least Squares (OLS), Variance Ratio (VR), Weibull Fit (WBL), Speed Sort (SS), Vertical Slice (VS)'dir. MTS'nin en iyi performansı gösterdiği görülmüştür.

Tablo 3.11. Değişik algoritma metodlarının hataları

| Ölçüm Direği için Algoritma Karşılaştırması | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Metrik | LLS | TLS | VR | WBL | SS | VS | MTS |
| MBE (%) | -0,640 | -0,653 | -0,669 | -0,365 | -1,05 | -1,17 | -0,988 |
| MAE (%) | 21,9 | 23,3 | 23,1 | 22,7 | 22,9 | 22,0 | 21,1 |
| RMSE (%) | 29,1 | 30,8 | 30,5 | 30,3 | 30,5 | 29,0 | 29,1 |
| Dağılım hatası (%) | 9,98 | 15,8 | 17,8 | 5,82 | 4,85 | 16,5 | 2,22 |

Karşılaştırmadan sonra 'Matrix Time Series' metodu en düşük dağılım hatasına sahip olduğu görülmüş ve MTS metodu kullanılmıştır.

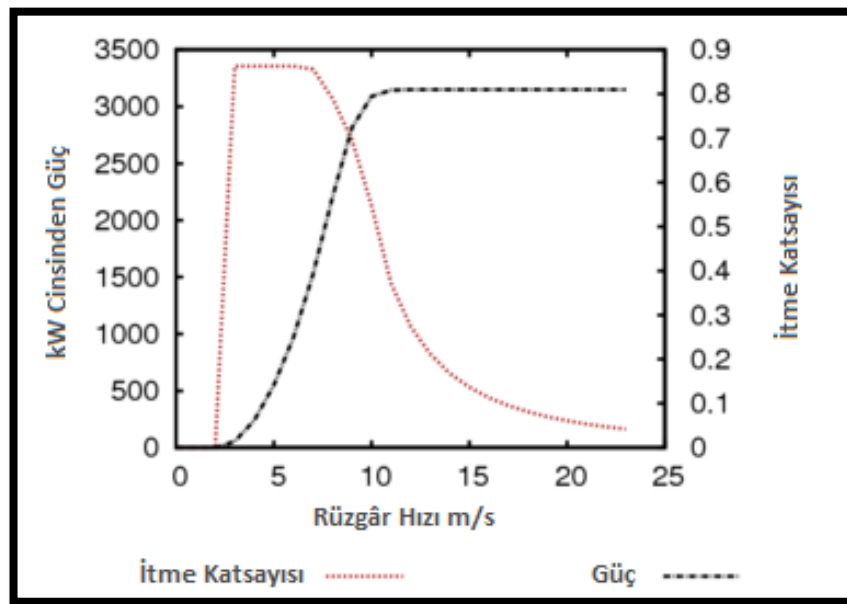
4. WINDSIM PROGRAMI KULLANILARAK ÇATALCA BÖLGESİNDE RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİ MİKRO-KONUŞLANDIRMA ÇALIŞMASI

4.1. Türbinler Hakkında Bilgi

Rüzgâr türbini seçimi, enerji üretimini mümkün olan en yüksek seviyeye çıkarmak için en önemli kriterlerden biridir. Türbin seçilirken dikkat edilmesi gereken ortalama ve ekstrem rüzgâr hızları gibi birkaç önemli faktör vardır.

Türbinlerin güç eğrileri ve itki katsayıları türbin üreticisi tarafından sağlanmıştır. Sağlanan güç eğrisinin 1.225 kg/m^3 hava yoğunluğunda olduğu belirtilmiştir. Mikro-konuşlandırma çalışmasında kullanılan türbinlere ait güç ve itki katsayısı eğrileri ve değerleri Şekil 4.1-4.6, Tablo 4.1-4.6'da paylaşılmıştır. Rüzgâr enerjisi piyasasında önde gelen firmaların türbinleri tercih edilmiştir. Aynı zamanda türbinler yerleştirildikleri konumlarda IEC Standart sınıflandırmasının kriterlerini sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Siemens SWT142 (3,15 MW, IEC IIIA) türbinine ait bilgiler Şekil 4.1. ve Tablo 4.1.'de paylaşılmıştır;

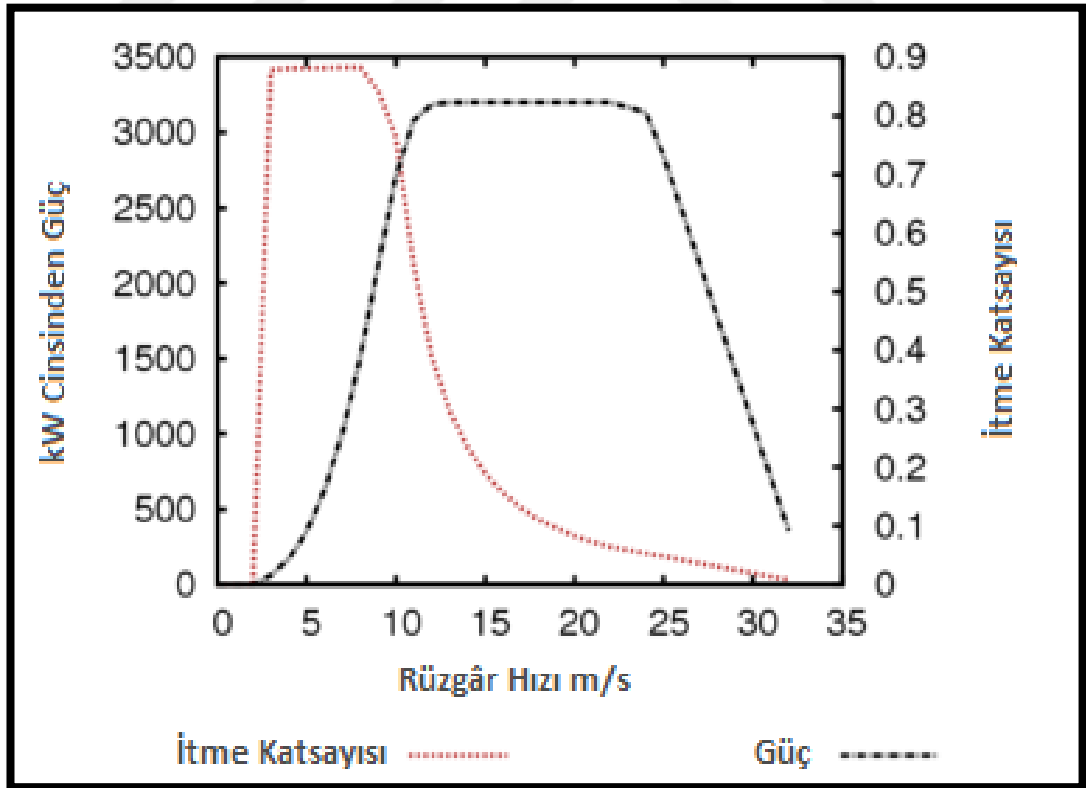


Şekil 4.1. Siemens SWT142 güç ve itki katsayılarının eğrileri

Tablo 4.1. Siemens SWT142 güç ve itki katsayıları tablosu

| Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats. (-) | Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats. (-) |
|--------------|----------|----------------|--------------|----------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 12 | 3.150 | 0,274 |
| 1 | 0 | 0 | 13 | 3.150 | 0,212 |
| 2 | 0 | 0 | 14 | 3.150 | 0,168 |
| 3 | 55 | 0,863 | 15 | 3.150 | 0,137 |
| 4 | 239 | 0,863 | 16 | 3.150 | 0,113 |
| 5 | 549 | 0,863 | 17 | 3.150 | 0,095 |
| 6 | 968 | 0,863 | 18 | 3.150 | 0,081 |
| 7 | 1.522 | 0,856 | 19 | 3.150 | 0,07 |
| 8 | 2.202 | 0,79 | 20 | 3.150 | 0,061 |
| 9 | 2.816 | 0,696 | 21 | 3.150 | 0,053 |
| 10 | 3.090 | 0,547 | 22 | 3.150 | 0,047 |
| 11 | 3.145 | 0,371 | 23 | 3.150 | 0,042 |

Siemens SWT113 (3,2 MW, IEC IIA) türbinine ait bilgiler Şekil 4.2. ve Tablo 4.2.'de paylaşılmıştır;

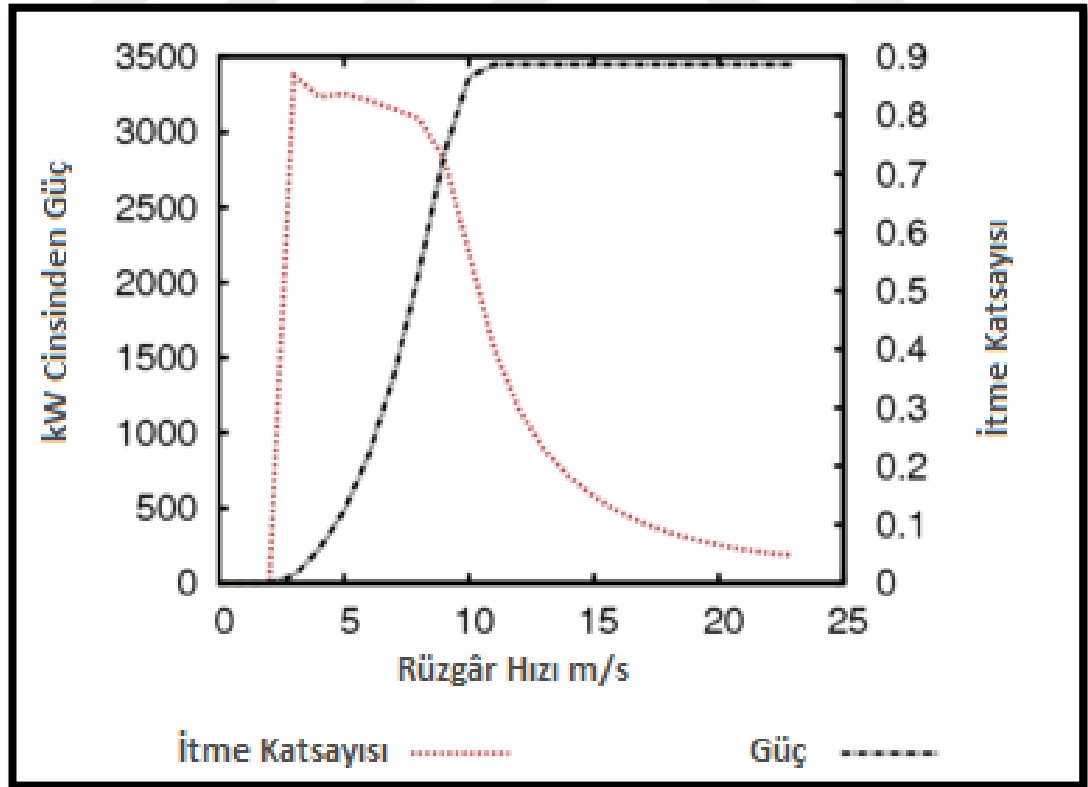


Şekil 4.2. Siemens SWT113 güç ve itki katsayılarının eğrileri

Tablo 4.2. Siemens SWT113 güç ve itki katsayıları tablosu

| Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats. (-) | Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats. (-) |
|--------------|----------|----------------|--------------|----------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 13 | 3.199 | 0,297 |
| 1 | 0 | 0 | 14 | 3.200 | 0,235 |
| 2 | 0 | 0 | 15 | 3.200 | 0,19 |
| 3 | 64 | 0,878 | 16 | 3.200 | 0,156 |
| 4 | 169 | 0,88 | 17 | 3.200 | 0,131 |
| 5 | 350 | 0,881 | 18 | 3.200 | 0,111 |
| 6 | 623 | 0,881 | 19 | 3.200 | 0,096 |
| 7 | 1.004 | 0,882 | 20 | 3.200 | 0,083 |
| 8 | 1.506 | 0,882 | 21 | 3.200 | 0,073 |
| 9 | 2.115 | 0,843 | 22 | 3.200 | 0,065 |
| 10 | 2.712 | 0,764 | 23 | 3.168 | 0,059 |
| 11 | 3.083 | 0,544 | 24 | 3.136 | 0,053 |
| 12 | 3.187 | 0,39 | 25 | 2.844 | 0,048 |

Vestas V136 (3,45 MW, IEC IIIA/IIB) türbinine ait bilgiler Şekil 4.3. ve Tablo 4.3.'de paylaşılmıştır;

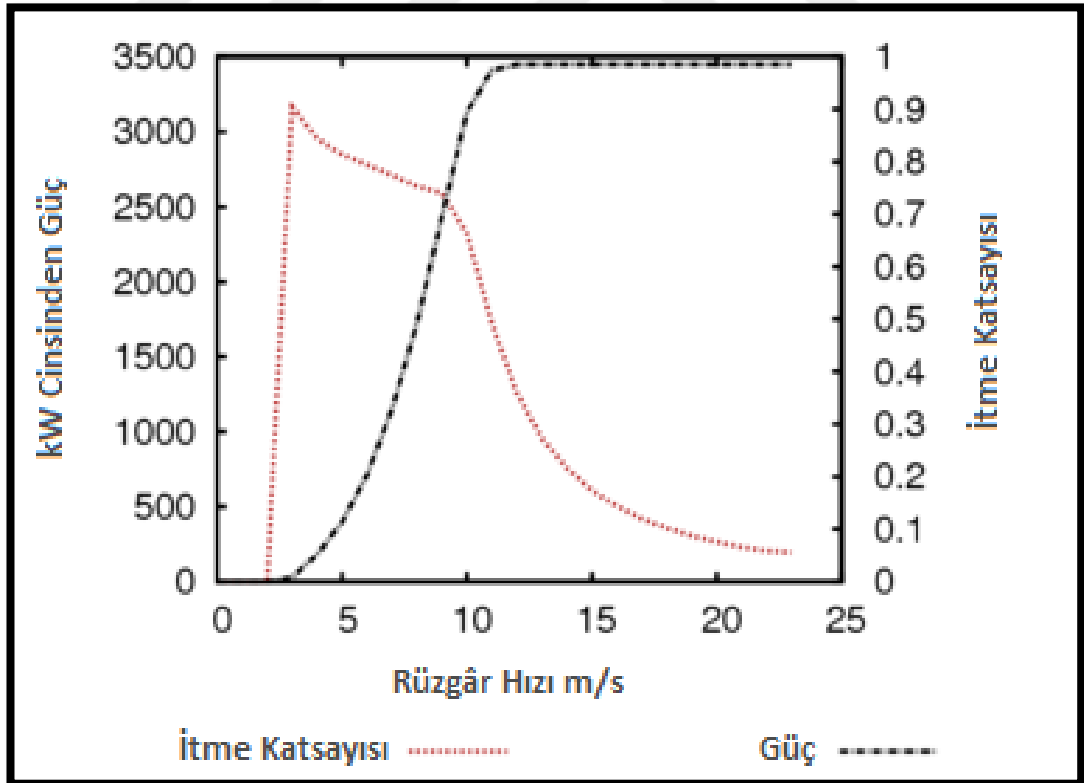


Şekil 4.3. Vestas V136 güç ve itki katsayılarının eğrileri

Tablo 4.3. Vestas V136 güç ve itki katsayıları tablosu

| Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtke Kats. (-) | Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtke Kats. (-) |
|--------------|----------|----------------|--------------|----------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 12 | 3.450 | 0,297 |
| 1 | 0 | 0 | 13 | 3.450 | 0,229 |
| 2 | 0 | 0 | 14 | 3.450 | 0,183 |
| 3 | 49 | 0,868 | 15 | 3.450 | 0,148 |
| 4 | 224 | 0,832 | 16 | 3.450 | 0,122 |
| 5 | 480 | 0,837 | 17 | 3.450 | 0,102 |
| 6 | 857 | 0,826 | 18 | 3.450 | 0,087 |
| 7 | 1.382 | 0,811 | 19 | 3.450 | 0,075 |
| 8 | 2.067 | 0,794 | 20 | 3.450 | 0,065 |
| 9 | 2.849 | 0,727 | 21 | 3.450 | 0,057 |
| 10 | 3.369 | 0,565 | 22 | 3.450 | 0,051 |
| 11 | 3.449 | 0,402 | 23 | 3.450 | 0,048 |

Vestas V126 (3,45 MW, IEC IIA/IIB) türbinine ait bilgiler Şekil 4.4. ve Tablo 4.4.'de paylaşılmıştır;

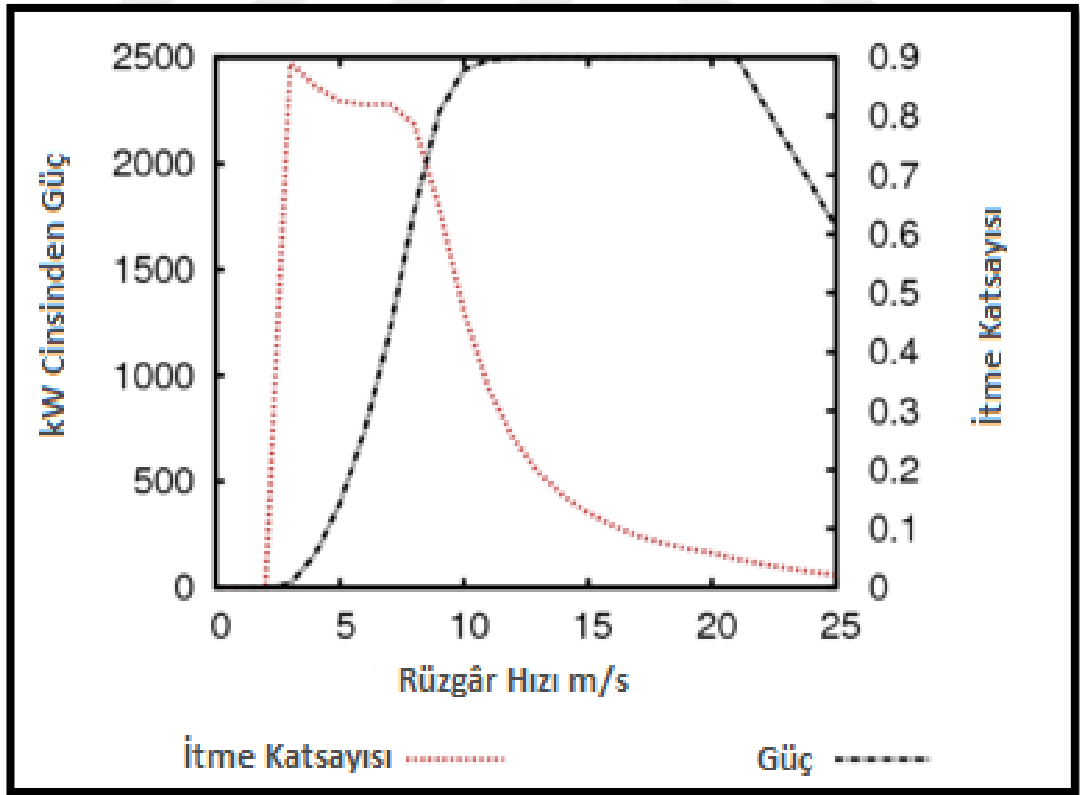


Şekil 4.4. Vestas V126 güç ve itki katsayılarının eğrileri

Tablo 4.4. Vestas V126 güç ve itki katsayıları tablosu

| Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats, (-) | Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats, (-) |
|--------------|----------|----------------|--------------|----------|----------------|
| 0,0 | 0,00 | 0,000 | 13,0 | 3450,00 | 0,274 |
| 1,0 | 0,00 | 0,000 | 14,0 | 3450,00 | 0,217 |
| 2,0 | 0,00 | 0,000 | 15,0 | 3450,00 | 0,174 |
| 3,0 | 31,00 | 0,905 | 16,0 | 3450,00 | 0,144 |
| 4,0 | 180,00 | 0,844 | 17,0 | 3450,00 | 0,120 |
| 5,0 | 397,00 | 0,814 | 18,0 | 3450,00 | 0,102 |
| 6,0 | 711,00 | 0,794 | 19,0 | 3450,00 | 0,087 |
| 7,0 | 1151,00 | 0,775 | 20,0 | 3450,00 | 0,076 |
| 8,0 | 1722,00 | 0,753 | 21,0 | 3450,00 | 0,066 |
| 9,0 | 2434,00 | 0,740 | 22,0 | 3450,00 | 0,059 |
| 10,0 | 3132,00 | 0,663 | 23,0 | 3450,00 | 0,056 |
| 11,0 | 3411,00 | 0,492 | | | |
| 12,0 | 3449,00 | 0,359 | | | |

Gamesa G126 (2,5 MW, IEC IIIA) türbinine ait bilgiler Şekil 4.5. ve Tablo 4.5.'de paylaşılmıştır;

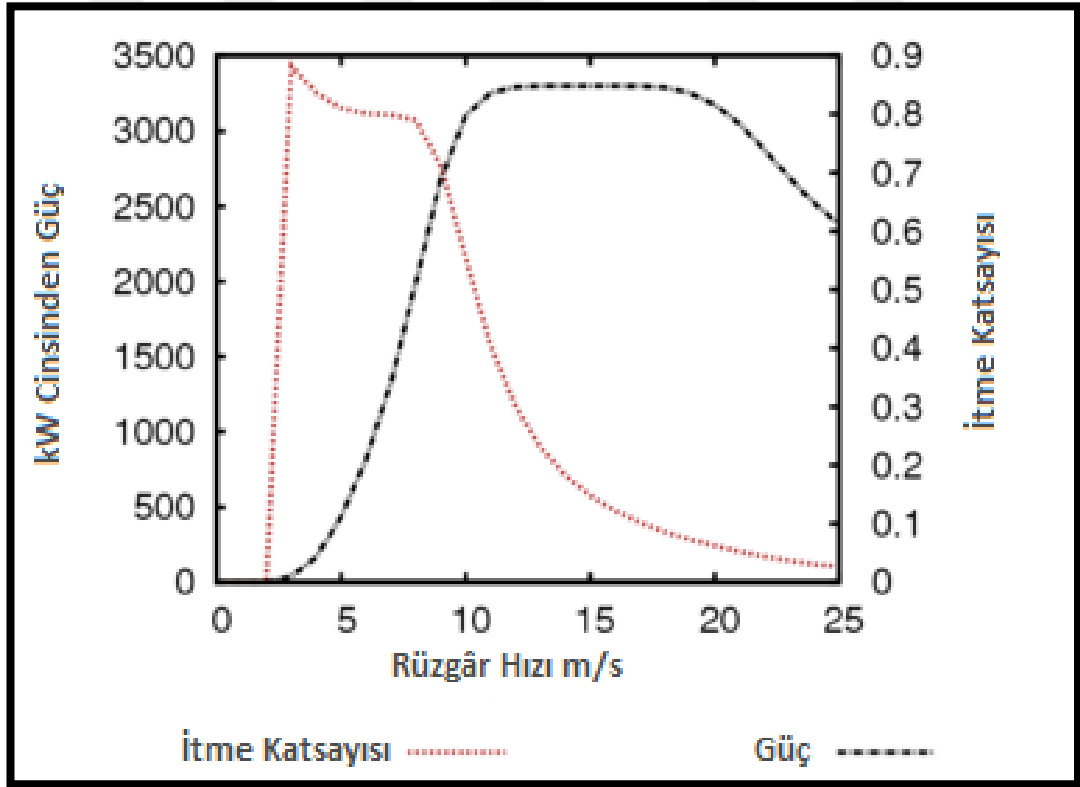


Şekil 4.5. Gamesa G126 güç ve itki katsayılarının eğrileri

Tablo 4.5. Gamesa G126 güç ve itki katsayıları tablosu

| Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats. (-) | Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtme Kats. (-) |
|--------------|----------|----------------|--------------|----------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 13 | 2.500 | 0,196 |
| 1 | 0 | 0 | 14 | 2.500 | 0,156 |
| 2 | 0 | 0 | 15 | 2.500 | 0,127 |
| 3 | 20 | 0,89 | 16 | 2.500 | 0,105 |
| 4 | 154 | 0,851 | 17 | 2.500 | 0,088 |
| 5 | 397 | 0,826 | 18 | 2.500 | 0,076 |
| 6 | 737 | 0,82 | 19 | 2.500 | 0,066 |
| 7 | 1.203 | 0,821 | 20 | 2.500 | 0,058 |
| 8 | 1.778 | 0,786 | 21 | 2.500 | 0,048 |
| 9 | 2.243 | 0,645 | 22 | 2.300 | 0,04 |
| 10 | 2.440 | 0,468 | 23 | 2.100 | 0,033 |
| 11 | 2.489 | 0,337 | 24 | 1.900 | 0,027 |
| 12 | 2.498 | 0,252 | 25 | 1.700 | 0,022 |

Gamesa G132 (3,3 MW, IEC IIA) türbinine ait bilgiler Şekil 4.6. ve Tablo 4.6.'de paylaşılmıştır;



Şekil 4.6. Gamesa G132 güç ve itki katsayılarının eğrileri

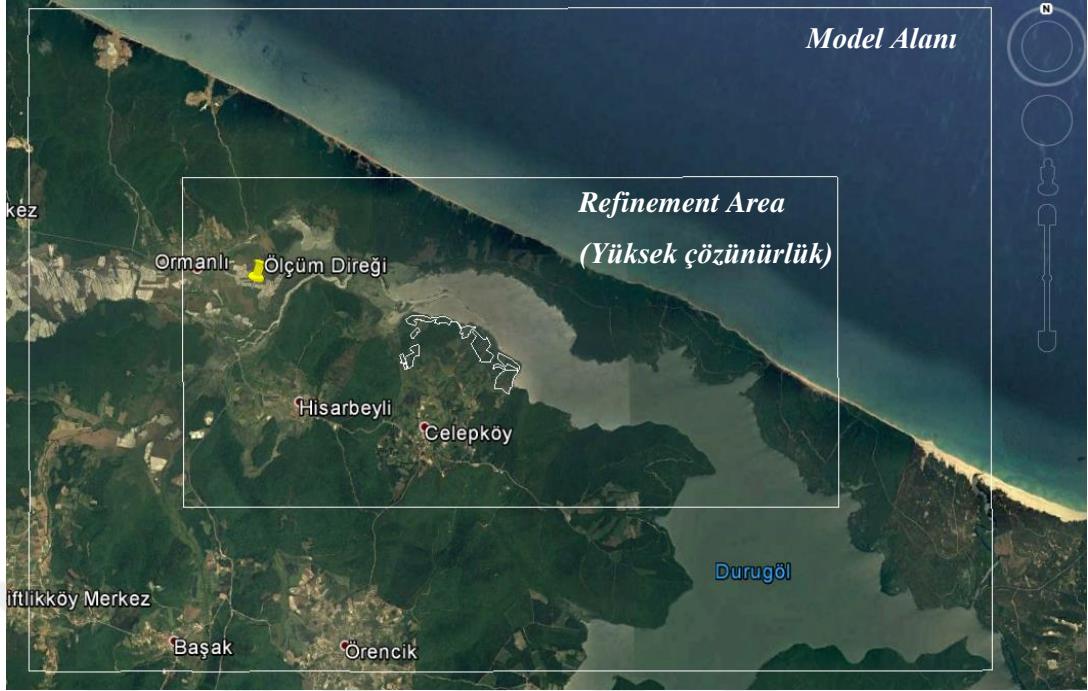
Tablo 4.6. Gamesa G132 güç ve itki katsayıları tablosu

| Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtke Kats. (-) | Aralık (m/s) | Güç (kW) | İtke Kats. (-) |
|--------------|----------|----------------|--------------|----------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 13 | 3.299 | 0,231 |
| 1 | 0 | 0 | 14 | 3.300 | 0,183 |
| 2 | 0 | 0 | 15 | 3.300 | 0,148 |
| 3 | 37 | 0,883 | 16 | 3.300 | 0,122 |
| 4 | 169 | 0,837 | 17 | 3.298 | 0,102 |
| 5 | 434 | 0,811 | 18 | 3.289 | 0,086 |
| 6 | 816 | 0,801 | 19 | 3.255 | 0,073 |
| 7 | 1.327 | 0,799 | 20 | 3.178 | 0,062 |
| 8 | 1.991 | 0,79 | 21 | 3.048 | 0,052 |
| 9 | 2.679 | 0,713 | 22 | 2.877 | 0,044 |
| 10 | 3.104 | 0,555 | 23 | 2.692 | 0,037 |
| 11 | 3.255 | 0,405 | 24 | 2.521 | 0,031 |
| 12 | 3.291 | 0,301 | 25 | 2.382 | 0,027 |

4.2. Nümerik Simülasyonlar

CFD simülasyonları yardımıyla bir nümerik rüzgâr veritabanı oluşturulmuştur. Nümerik veritabanı, rüzgâr koşullarının ölçüm noktasından rüzgâr türbinlerinin bulunduğu noktalara taşınmasını sağlamaktadır. Nümerik modelin nasıl oluşturulduğu, işletildiği ve doğrulandığı anlatılmıştır.

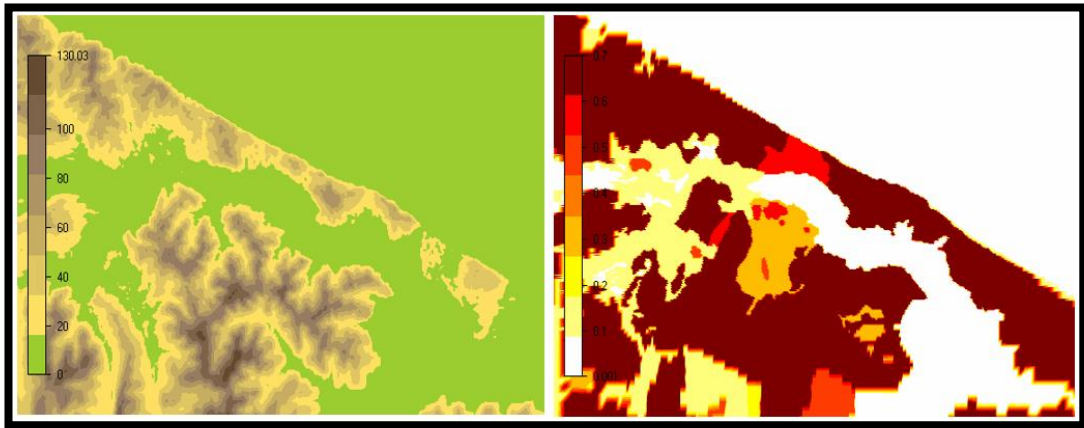
Önerilen üretim alanı coğrafi olarak kompleks olmamakla beraber, denize yakınlık, modelin önemli bir kısmının Terkos Gölü tarafından kaplanması, tarla ve köyler dışında kalan kısımlarda da oldukça yüksek ve sık ağaçlı ormanlık bölgeler olmasıyla çeşitlilik içeren bir pürüzlülük yapısına sahiptir. Bu özellikleri hesaba katmak için modelin boyutu yeterince büyük olarak oluşturulmuştur ve üretim alanında çözünürlük artırılmıştır. Bununla hassasiyeti arttırmak ve nümerik hesaplamalarda yakınsamaya daha çabuk ulaşılması amaçlanmıştır. Ana model hem kuzeye doğru sahadaki etkisini modele yansıtacak şekilde denizi, hem de çevredeki ormanlık arazinin çoğunu kapsar ve bu sayede akış doğru bir şekilde modellenmiş olur. Model sınırları ve yüksek çözünürlük bölgesi (içteki bölge) Şekil 4.7’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.7. Model alanı, yüksek çözünürlüklü alan ve önerilen proje alanı

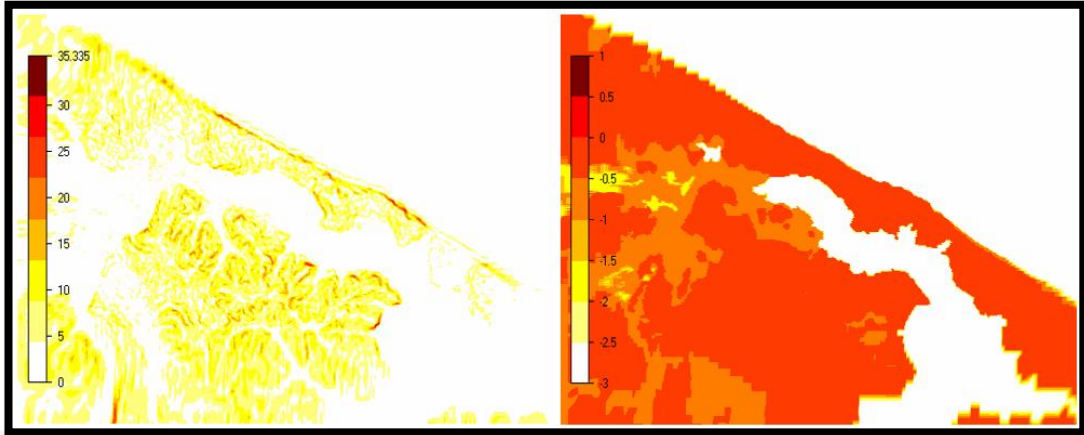
4.2.1. Dijital arazi modeli oluşturma

Şekil 4.7’de görülen bölgeler için yükseklik ve pürüzlülük değerlerini içeren dijital bir arazi modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.8). Koordinat sistemi UTM WGS 84 (35 T Bölgesi) sistemidir. Yükseklik ve pürüzlülük değerlerini içeren veri setlerinin çözünürlükleri farklı olabilmektedir. Modelde kullanılan yükseklik verileri WindSim Express kullanılarak ASTER GDEM veritabanından elde edilmiştir. Modelin pürüzlülük haritası sahadan elde edilen fotoğraflar, raporlar ve uydu resimlerinden elde edilen bilgiler kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 4.8. Modeldeki arazi yüksekliği (m) (sol) ve pürüzlülük (m) (sağ)

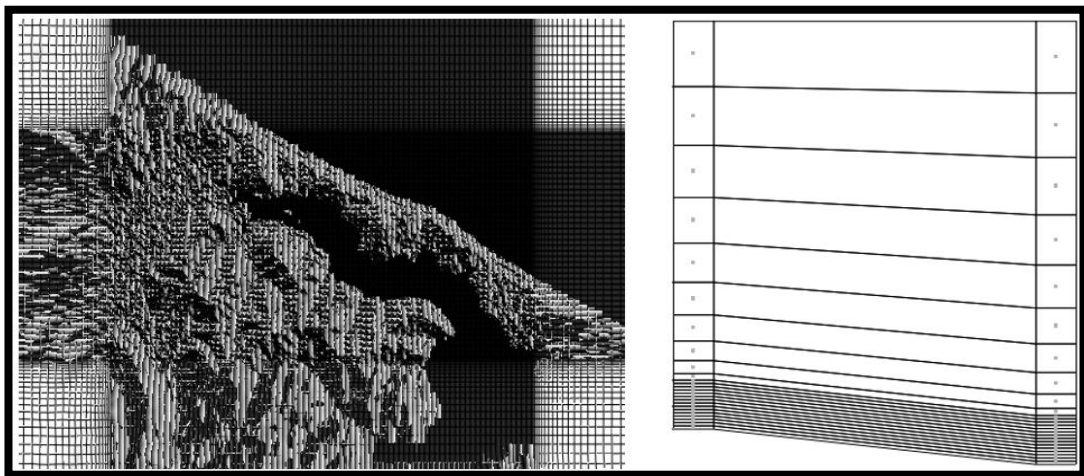
Sahadaki komplekslik; yükseklik ve pürüzlülükteki değişimlere bağlıdır. Topografyadaki komplekslik eğime bağlıdır ve dereceyle ifade edilir.



Şekil 4.9. Modeldeki arazi eğimi (derece) (sol) ve logaritmik pürüzlülük (m) (sağ)

4.2.2. 3 boyutlu model kurulumu

Çözüm ağının dikey yöndeki uzunluğu WindSim tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Yükseklik ve pürüzlülük verileri hücrelerden oluşan, değişken yatay ve dikey çözünürlüğe sahip üç boyutlu bir alanın yer seviyesini tanımlamada kullanılmaktadır. Çözüm ağı dijital arazi modelinden yola çıkılarak hazırlanmıştır. Model içerisinde 25 m çözünürlüğe sahip bir yüksek çözünürlük bölgesi oluşturulmuştur. Çözünürlük türbin kanatlarının yarıçapları ve tüm alan dikkate alınarak belirlenmiştir. Dikey eksenindeki ilk on beş hücre, rotor uç yüksekliği boyunca hassasiyeti arttırmak amacıyla 180 m'nin altındadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Modeldeki yatay ağ çözünürlüğü (sol) ve dikey ağ çözünürlüğünün şematik görünümü (sağ)

Tablo 4.7. Modeldeki ağ aralığı ve hücre sayısı

| | Doğu | Kuzey | z | Total |
|----------------|------------|------------|----------|---------|
| Ağ aralığı (m) | 25,0-264,4 | 25,1-274,9 | Variable | - |
| Hücre sayısı | 508 | 274 | 25 | 3479800 |

Çözüm ağı, arazinin en yüksek olduğu noktadan yukarı doğru 1.500 m yüksekliğindedir. Ağın çözünürlüğü yer seviyesine doğru arttırılmıştır. Sağ ve soldaki sütunlar sırasıyla minimum ve maksimum yer yüksekliklerinde ağ yapısının şematik görüntüsüdür. Simülasyon sonuçlarının bulunduğu düğüm noktaları (nokta ile işaretli) hücrelerin merkezlerinde bulunmaktadır.

Tablo 4.8. Z yönünde ilk 10 düğüm noktasının, yer seviyesine göre ve minimum ve maksimum yüksekliklerin olduğu noktalarda dağılımı

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| z-dağ. maks (m) | 6,0 | 18,0 | 30,0 | 42,0 | 54,0 | 66,0 | 78,0 | 90,0 | 102,0 | 114,0 |
| z-dağ. min (m) | 6,0 | 18,0 | 30,0 | 42,0 | 54,0 | 66,0 | 78,0 | 90,0 | 102,0 | 114,0 |

4.3. Mikro-Konuşlandırma ve Yerleşim Optimizasyonu

Türbinlerin yerleşim optimizasyonu WindSim'in add-on modülü olan Park Optimizer ile gerçekleştirilmiştir. Bu modül, belirli sayıda türbin için maksimum yıllık enerji üretimi (YEÜ) veren optimum türbin yerleşimini oluşturmaktadır. Türbin kurulumu için uygun olmayan arazilerin elenmesi amacıyla Park Optimizer'da çeşitli IEC kısıtları dikkate alınmıştır. Kriterlere uyup elenmeyen bölgeler dikkate alınmış ve istenen miktarda türbin arası mesafe için enerji üretimini en yüksek seviyeye çıkaran optimum yerleşim oluşturulmuştur.

Rüzgâr enerji santrali kurulumu mikro-konuşlandırma çalışması yapılırken bazı kısıtların konulması gerekmektedir. Çalışmamızda araziye uygulanan ilk kısıt, RES kurulumu için bir alanın belirlenmesi olmuştur. Bu kısıtın uygulanması ile sadece rüzgâr santrali için değerlendirilen alanın optimizasyon sürecine dahil edilmesi sağlanmıştır. İhtiyaç olması durumunda santral sahası içerisinde yer alan göller, ormanlar, yerleşim alanları ve benzeri türbin kurulumuna uygun olmayan alanlar da Park Optimizer yazılımına kısıt olarak eklenebilmektedir.

Sahadaki yüzey eğimi, akış açısı, kayma (shear) gibi IEC kriterleri optimizasyon sürecinde uygulanmıştır. Türbülans yoğunluğu (TI) ve ekstrem hız parametrelerinin analizi ölçüm verilerinden yola çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Model için belirlenen kısıtlar ve limitleri aşağıdaki gibidir:

- Arazi eğimi: 0°- 9,5°
- Akış açısı: -8°- +8°
- Kayma (shear): 0 - 0,3

Kayma (shear) parametresinin üst sınırı standartlara göre 0,2'dir. Öte yandan shear'ın yüksek olduğu sahalarda türbin üreticileri 0,3'e kadar esneklik tanımaktadırlar.

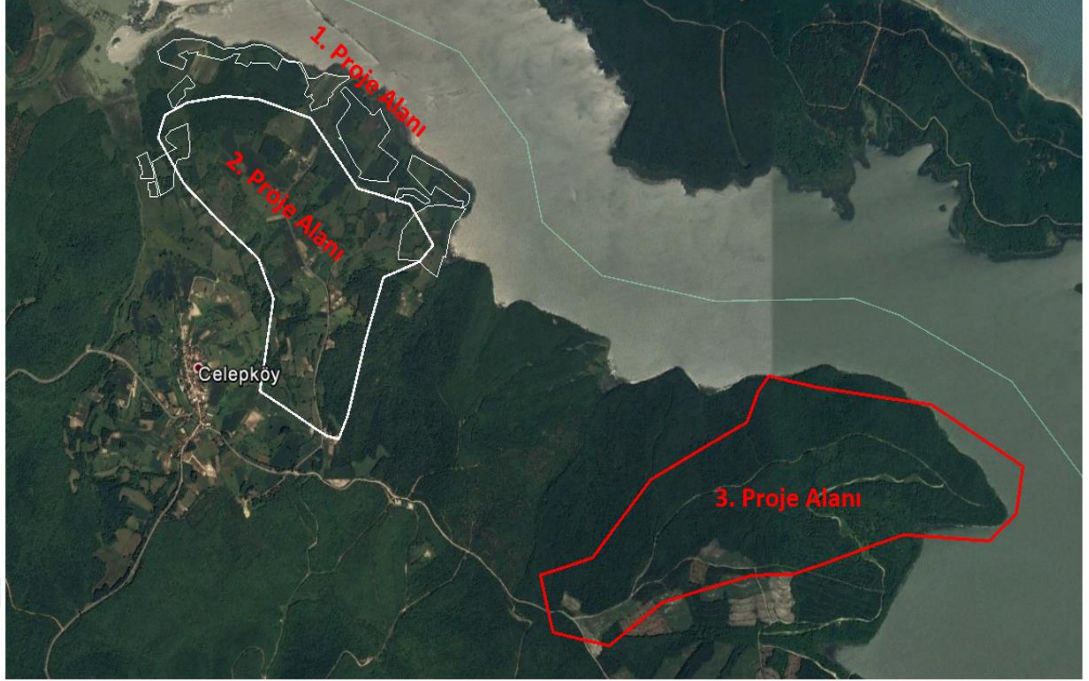
Çalışmamızda üç farklı alan için mikro-konuşlandırma yapılmıştır. 1. ve 2. proje alanında yüksek kayma değerlerinden dolayı üst sınır 0,3 olarak alınmış, 3. proje alanında ise üst sınır 0,2 olarak alınmıştır.

Ekstrem hızlar dikkate alınarak ilk iki alanda IEC III, üçüncü alanda IEC II tipi türbinler kullanılmıştır. Kullanılan türbinlerin modelleri, nominal güçleri ve seçilen göbek yükseklikleri Tablo 4.9'da paylaşılmıştır.

Tablo 4.9. Türbin tipleri

| 1. ve 2. Proje Alanı | Nominal Güç (kW) | Göbek Yüksekliği (m) | IEC Sınıfı |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Siemens SWT142 | 3.150 | 109 | IIIA |
| Vestas V136 | 3.450 | 112 | IIIA/IIB |
| Gamesa G126 | 2.500 | 102 | IIIA |
| 3. Proje Alanı | | | |
| Siemens SWT113 | 3.200 | 115 | IIA |
| Vestas V126 | 3.450 | 117 | IIA/IIB |
| Gamesa G132 | 3.300 | 114 | IIA |

Ekstrem rüzgâr hızı analizi WindSim'in energy modülünde gumbel eğri uyarlama yöntemi ve uzun dönemli 1 saatlik rüzgâr verisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Türbinlerin seçilen sahada yerleştirildiği noktalarda ekstrem rüzgâr hızlarının IEC 61400-1 3. Versiyon'da IEC III sınıfı için belirtilen değerlerin arasında kalmaktadır. Yerleşim planı, türbinlerin arasında en az $3 \times D_{\text{rotor}}$ mesafe bırakılarak hazırlanmıştır.



Şekil 4.11. Belirlenen proje alanları

4.3.1. 1. Proje alanı mikro-konuşlandırma çalışması

Bu proje alanında üç farklı türbin modeliyle mikro-konuşlandırma çalışması yapılmıştır. Kayma üst değeri 0,3'tür. Ekstrem hızlar sebebiyle IEC III tipi türbinler seçilmiştir.

Siemens SWT142, 3.150 kW, 109 m, toplam kapasite: 15,75 MW;

Her biri 3,15 MW güce sahip 5 adet Siemens SWT142 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.10'da paylaşılmıştır.

Tablo 4.10. Siemens SWT142 türbin koordinatları (WGS 84'te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 626768,0 | 4581208,0 | 55,0 | 0,114 | 37,25 | III |
| T2 | 625365,0 | 4581860,0 | 52,7 | 0,122 | 36,89 | III |
| T3 | 627094,0 | 4581509,0 | 24,5 | 0,111 | 36,20 | III |
| T4 | 626442,0 | 4582060,0 | 17,7 | 0,112 | 35,20 | III |
| T5 | 625891,0 | 4582361,0 | 11,2 | 0,117 | 33,89 | III |

Vestas V136, 3.450 kW, 112 m, toplam kapasite: 17,25 MW;

Her biri 3,45 MW güce sahip 5 adet Vestas V136 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.11’de paylaşılmıştır.

Tablo 4.11. Vestas V136 türbin koordinatları (WGS 84’te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 626768,0 | 4581208,0 | 55,0 | 0,112 | 37,43 | III |
| T2 | 625365,0 | 4581860,0 | 52,7 | 0,121 | 37,12 | III |
| T3 | 627094,0 | 4581509,0 | 24,5 | 0,110 | 36,38 | III |
| T4 | 626412,0 | 4581877,0 | 24,1 | 0,113 | 35,50 | III |
| T5 | 625916,0 | 4582286,0 | 15,3 | 0,111 | 34,39 | III |

Gamesa G126, 2.500 kW, 102 m, toplam kapasite: 15 MW;

Her biri 2,5 MW güce sahip 6 adet Gamesa G126 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.12’de paylaşılmıştır.

Tablo 4.12. Gamesa G126 türbin koordinatları (WGS 84’te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 625340,0 | 4581885,0 | 49,3 | 0,124 | 36,09 | III |
| T2 | 626768,0 | 4581183,0 | 54,0 | 0,118 | 36,70 | III |
| T3 | 626543,0 | 4581985,0 | 13,8 | 0,119 | 34,37 | III |
| T4 | 627169,0 | 4581484,0 | 15,0 | 0,114 | 35,13 | III |
| T5 | 625816,0 | 4582336,0 | 13,8 | 0,128 | 33,00 | III |
| T6 | 626167,0 | 4582085,0 | 17,7 | 0,121 | 33,77 | III |

4.3.2. 2. Proje alanı mikro-konuşlandırma çalışması

Bu proje alanı, birinci proje alanının enerji üretimini artırmak amacıyla, güneyde belirlenen arazi sınırlarının dışında kalan tepeye taşınmasıyla oluşturulmuştur. Tepenin önemli bir kısmında çiftliklerden oluşan yerleşimler bulunmaktadır. Bu yerleşimlerin etrafında bırakılan emniyet alanları (350 m) daha fazla sayıda türbinin tepeye taşınmasına engel olmuştur. Kayma üst değeri 0,3’tür. Aynı türbin tipleri kullanılmıştır. Nominal kapasiteler aynıdır.

Siemens SWT142, 3.150 kW, 109 m, toplam kapasite 15,75 MW; Her biri 3,15 MW güce sahip 5 adet Siemens SWT142 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.13'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.13. Siemens SWT142 türbin koordinatları (WGS 84'te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 626768,0 | 4581208,0 | 55,0 | 0,114 | 37,25 | III |
| T2 | 625365,0 | 4581860,0 | 52,7 | 0,122 | 36,89 | III |
| T3 | 627094,0 | 4581509,0 | 24,5 | 0,111 | 36,20 | III |
| T4 | 626442,0 | 4582060,0 | 17,7 | 0,112 | 35,20 | III |
| T5 | 625790,0 | 4581886,0 | 64,4 | 0,117 | 37,50 | III |

Vestas V136, 3.450 kW, 112 m, toplam kapasite 17,25 MW;

Her biri 3,45 MW güce sahip 5 adet Vestas V136 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.14'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.14. Vestas V136 türbin koordinatları (WGS 84'te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 626768,0 | 4581208,0 | 55,0 | 0,112 | 37,43 | III |
| T2 | 625365,0 | 4581860,0 | 52,7 | 0,121 | 37,12 | III |
| T3 | 627094,0 | 4581509,0 | 24,5 | 0,110 | 36,38 | III |
| T4 | 626412,0 | 4581877,0 | 24,1 | 0,113 | 35,50 | III |
| T5 | 625790,0 | 4581886,0 | 64,4 | 0,115 | 37,71 | III |

Gamesa G126, 2.500 kW, 102 m, toplam kapasite 15 MW;

Her biri 2,5 MW güce sahip 6 adet Gamesa G126 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.15'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.15. Gamesa G126 türbin koordinatları (WGS 84'te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 625340,0 | 4581885,0 | 49,3 | 0,124 | 36,09 | III |
| T2 | 626768,0 | 4581183,0 | 54,0 | 0,118 | 36,70 | III |
| T3 | 626543,0 | 4581985,0 | 13,8 | 0,119 | 34,37 | III |
| T4 | 627169,0 | 4581484,0 | 15,0 | 0,114 | 35,13 | III |
| T5 | 625739,0 | 4581864,0 | 71,3 | 0,119 | 37,39 | III |
| T6 | 626167,0 | 4582085,0 | 17,7 | 0,121 | 33,77 | III |

4.3.3. 3. Proje alanı mikro-konuşlandırma çalışması

Bu proje alanı, diğer iki proje alanından daha iyi konumda olduğu düşünüldüğü için daha yüksek yıllık enerji üretimi sağlayacak bir yerleşim oluşturmak amacıyla seçilmiştir. Kayma üst değeri 0,2 olacak şekilde optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha geniş bir arazide çalışma gerçekleştiğinden ve iz bölgesi kayıpları da düşük çıktığı için 20 MW üzerindeki kapasitelerde yerleşim oluşturulabilmiştir. Ekstrem hızların önceki proje alanlarına göre daha yüksek olması sebebiyle türbin tipleri farklıdır ve IEC II tipi türbinler seçilmiştir.

Siemens SWT113, 3.200 kW, 115 m, toplam kapasite: 25,6 MW;

Her biri 3,2 MW güce sahip 8 adet Siemens SWT113 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.16'da paylaşılmıştır.

Tablo 4.16. Siemens SWT113 türbin koordinatları (WGS 84'te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 629824,0 | 4580105,0 | 77,7 | 0,088 | 39,91 | II |
| T2 | 630175,0 | 4580030,0 | 51,9 | 0,092 | 38,60 | II |
| T3 | 630451,0 | 4579805,0 | 44,0 | 0,091 | 38,08 | II |
| T4 | 629474,0 | 4580055,0 | 73,9 | 0,093 | 39,08 | II |
| T5 | 628221,0 | 4579128,0 | 100,3 | 0,105 | 37,87 | II |
| T6 | 628497,0 | 4579353,0 | 98,6 | 0,102 | 37,89 | II |
| T7 | 628847,0 | 4579429,0 | 88,6 | 0,102 | 37,73 | II |
| T8 | 627870,0 | 4579203,0 | 94,0 | 0,112 | 38,17 | II |

Vestas V126, 3.450 kW, 117 m, toplam kapasite: 27,6 MW

Her biri 3,45 MW güce sahip 8 adet Vestas V126 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.17'de paylaşılmıştır.

Tablo 4.17. Vestas V126 türbin koordinatları (WGS 84'te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 629774,0 | 4580130,0 | 81,0 | 0,086 | 40,08 | II |
| T2 | 630175,0 | 4580030,0 | 51,9 | 0,091 | 38,69 | II |
| T3 | 630476,0 | 4579779,0 | 45,2 | 0,090 | 38,17 | II |
| T4 | 628471,0 | 4579278,0 | 101,1 | 0,100 | 38,19 | II |
| T5 | 629323,0 | 4580055,0 | 79,3 | 0,091 | 38,99 | II |
| T6 | 628146,0 | 4579028,0 | 98,0 | 0,108 | 37,81 | II |
| T7 | 627770,0 | 4579103,0 | 93,8 | 0,111 | 38,17 | II |
| T8 | 628897,0 | 4579378,0 | 89,5 | 0,100 | 37,98 | II |

Gamesa G132, 3.300 kW, 114 m, toplam kapasite: 26,4 MW;

Her biri 3,3 MW güce sahip 8 adet Gamesa G132 model türbinlerin mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda belirlenen koordinatları Tablo 4.18'de paylaşılmıştır.

Tablo 4.18. Gamesa G126 türbin koordinatları (WGS 84'te)

| Türbin No | Doğu | Kuzey | Rakım (m) | TI (%) @ 15 m/s | Ekstrem Hız (m/s) | IEC Sınıfı |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-------------------|------------|
| T1 | 629799,0 | 4580155,0 | 82,1 | 0,085 | 40,02 | II |
| T2 | 630175,0 | 4579980,0 | 54,7 | 0,092 | 38,75 | II |
| T3 | 630501,0 | 4579729,0 | 44,9 | 0,093 | 37,80 | II |
| T4 | 629298,0 | 4580030,0 | 82,0 | 0,092 | 38,91 | II |
| T5 | 628171,0 | 4579078,0 | 98,3 | 0,108 | 37,74 | II |
| T6 | 628471,0 | 4579353,0 | 100,1 | 0,102 | 37,92 | II |
| T7 | 627770,0 | 4579078,0 | 94,4 | 0,114 | 38,02 | II |
| T8 | 628922,0 | 4579378,0 | 88,4 | 0,101 | 37,79 | II |

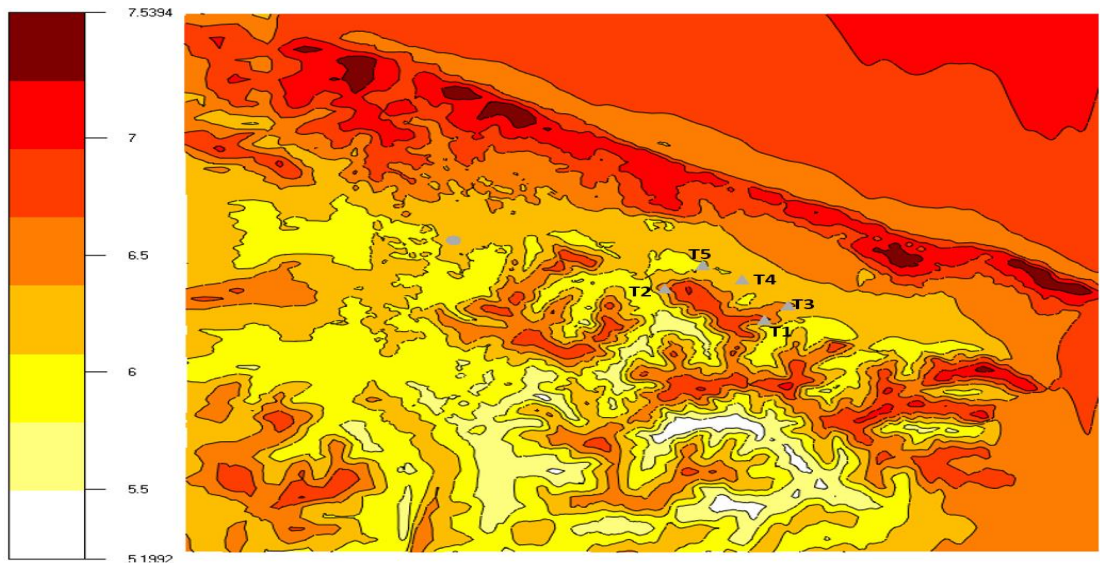
5. YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ VE KAPASİTE FAKTÖRÜ HESABI

Uzun dönemli sentezlenmiş rüzgâr koşulları ve CFD sonuçları optimum yerleşim için kullanılarak rüzgâr kaynak haritası oluşturulmuş ve yıllık enerji üretimi hesaplanmıştır.

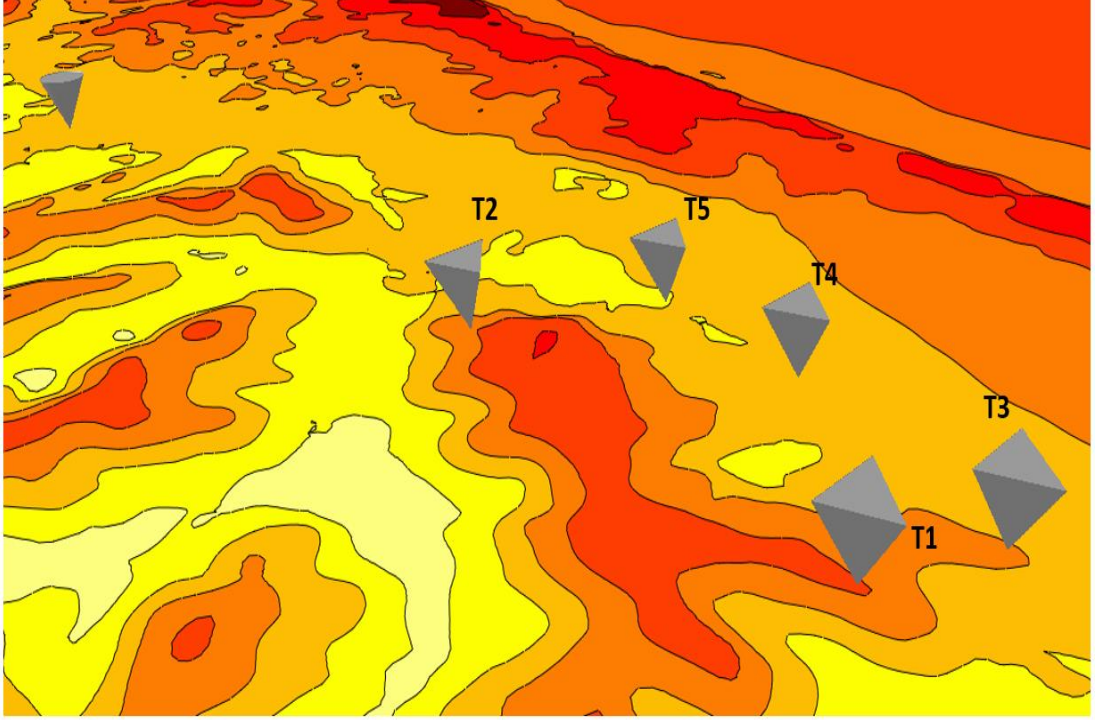
5.1. Rüzgâr Kaynak Haritası

Rüzgâr kaynak haritası, ortalama rüzgâr hızına dayanarak yüksek rüzgâr hızına sahip bölgelerin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Kaynak haritası, girdi olarak uzun dönemli rüzgâr koşullarının kullanıldığı CFD analizinin sonuçlarıyla oluşturulmuştur.

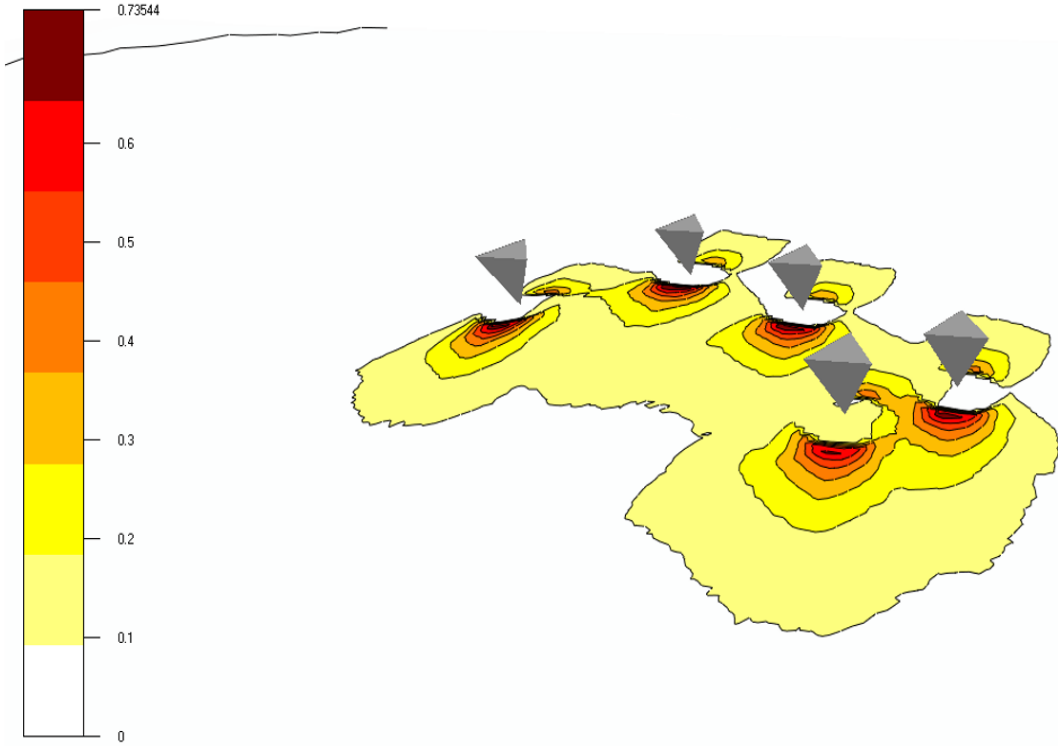
Yerleşim planı ise türbinler arası mesafeyi ve IEC kısıtlarını dikkate alarak Park Optimizer’da en yüksek enerji üretimini sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 5.1-5.9’da rüzgâr kaynak haritaları paylaşılmıştır. Şekil 10-12’de görülen yerleşim planları, 1., 2. ve 3. proje alanlarındaki Siemens’e ait türbinlerin yerleşimleri için hazırlanmıştır. Kaynak haritaları sırasıyla 109 ve 115 m için hesaplanmıştır. Diğer yüksekliklerde güç yoğunluğunun mutlak değeri değişse de güç yoğunluğunun yüksek olduğu bölgeler aynı kalmaktadır.



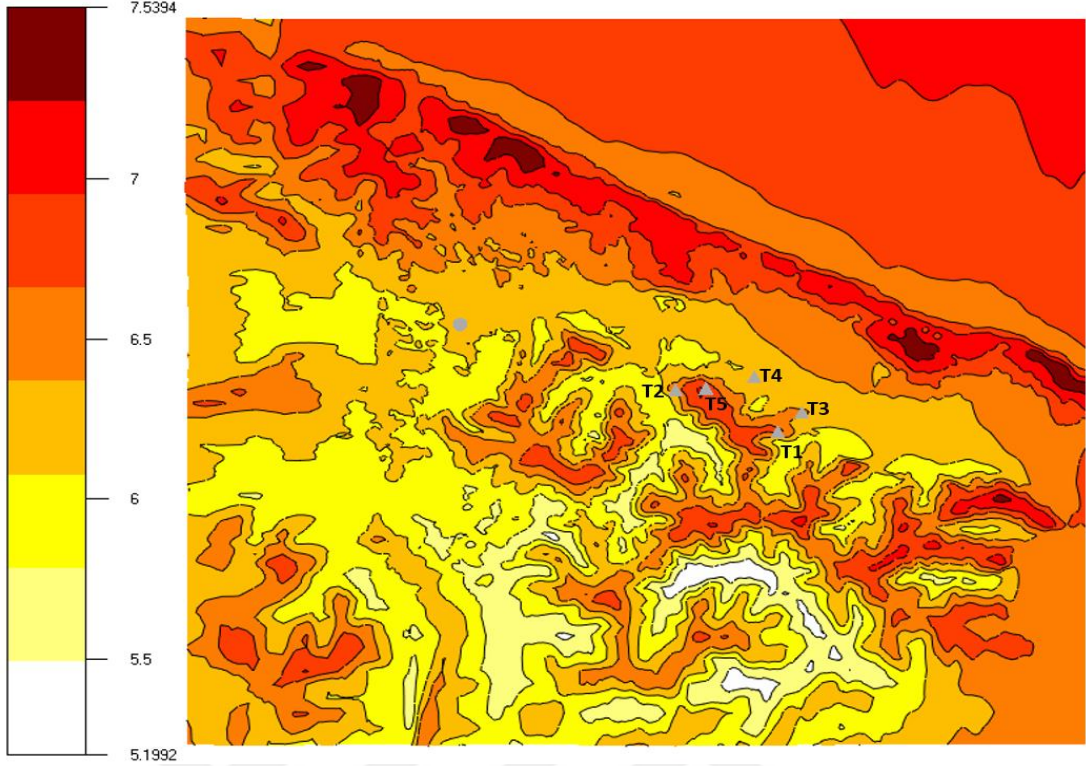
Şekil 5.1. SWT142 (1. Proje Alanı) için 109 m’lik türbin göbek yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızını (m/s) gösteren rüzgâr kaynak haritası Üçgen: Rüzgâr Türbini, Nokta: Klimatoloji verisi



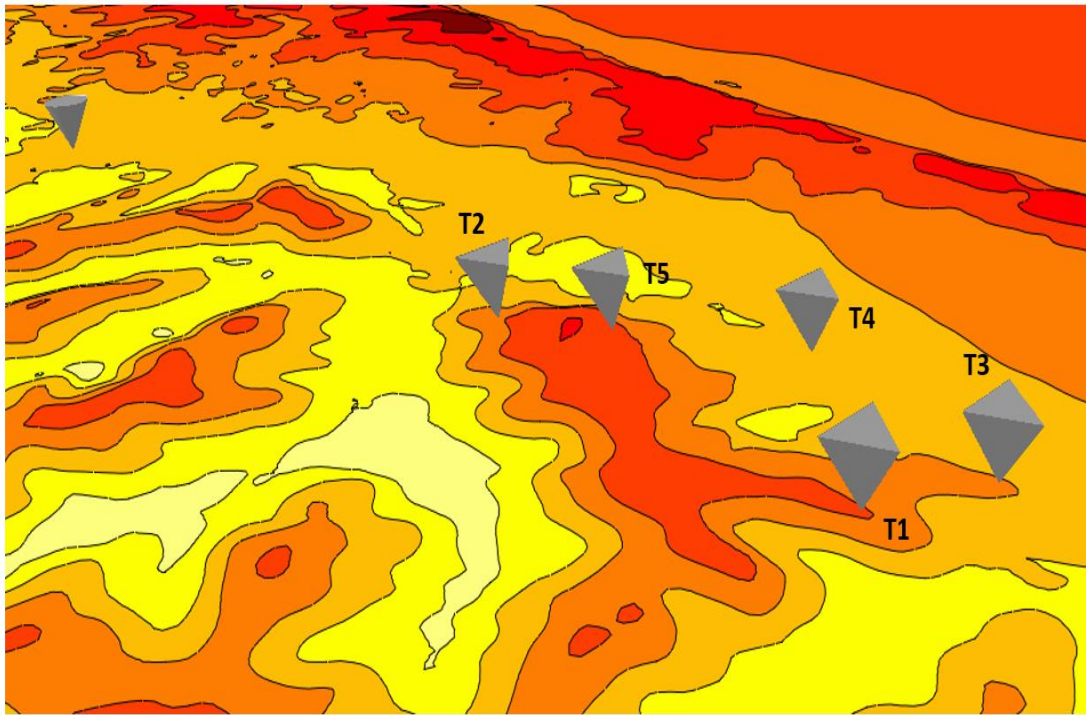
Şekil 5.2. SWT142 (1. proje alanı) için 3 boyutlu rüzgâr kaynak haritası. Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi



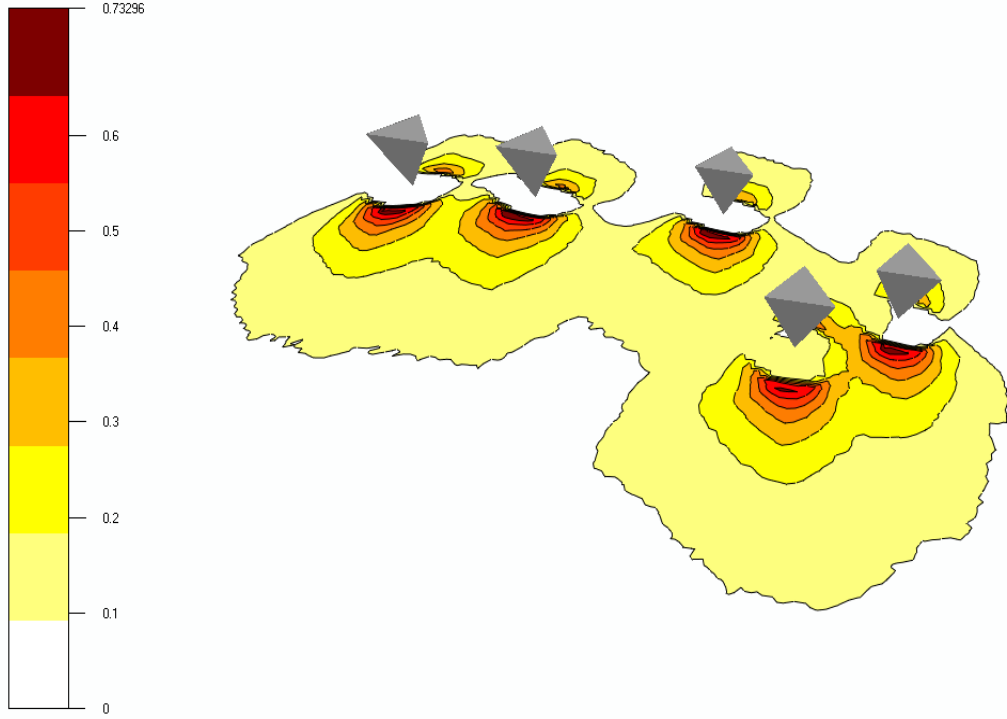
Şekil 5.3. SWT142 (1. proje alanı) için iz bölgesi kayıpları (m/s)



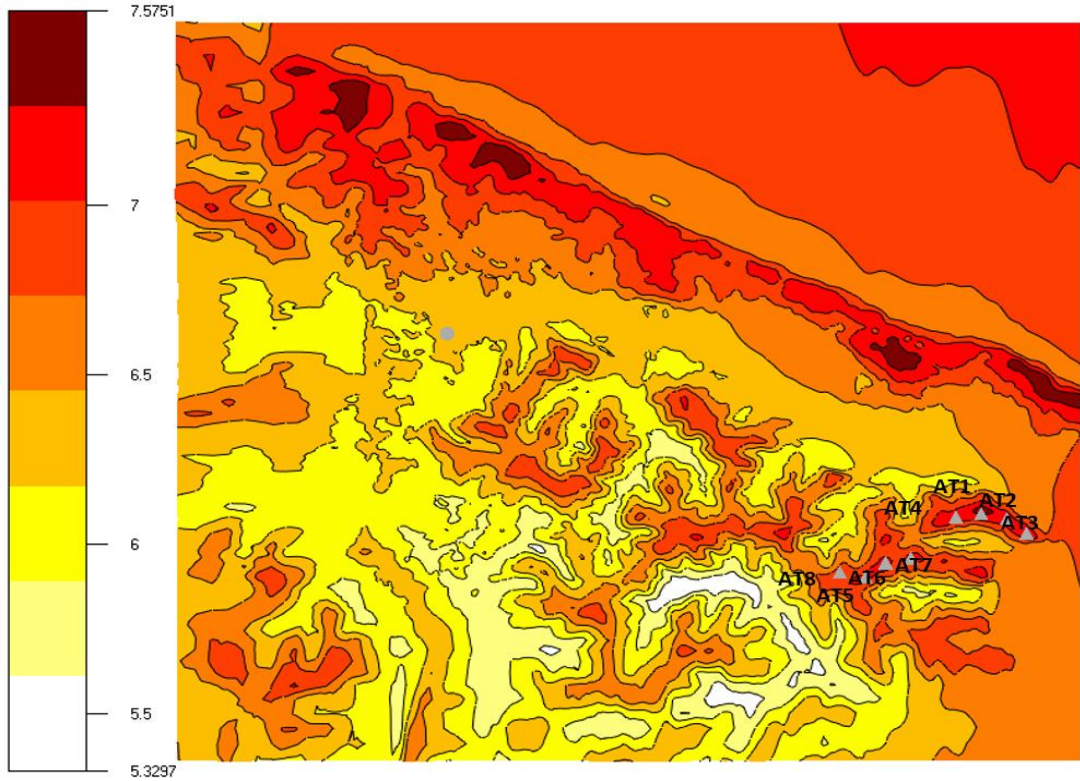
Şekil 5.4. SWT142 (2. proje alanı) için 109 m'lik türbin göbek yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızını (m/s) gösteren rüzgâr kaynak haritası Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi



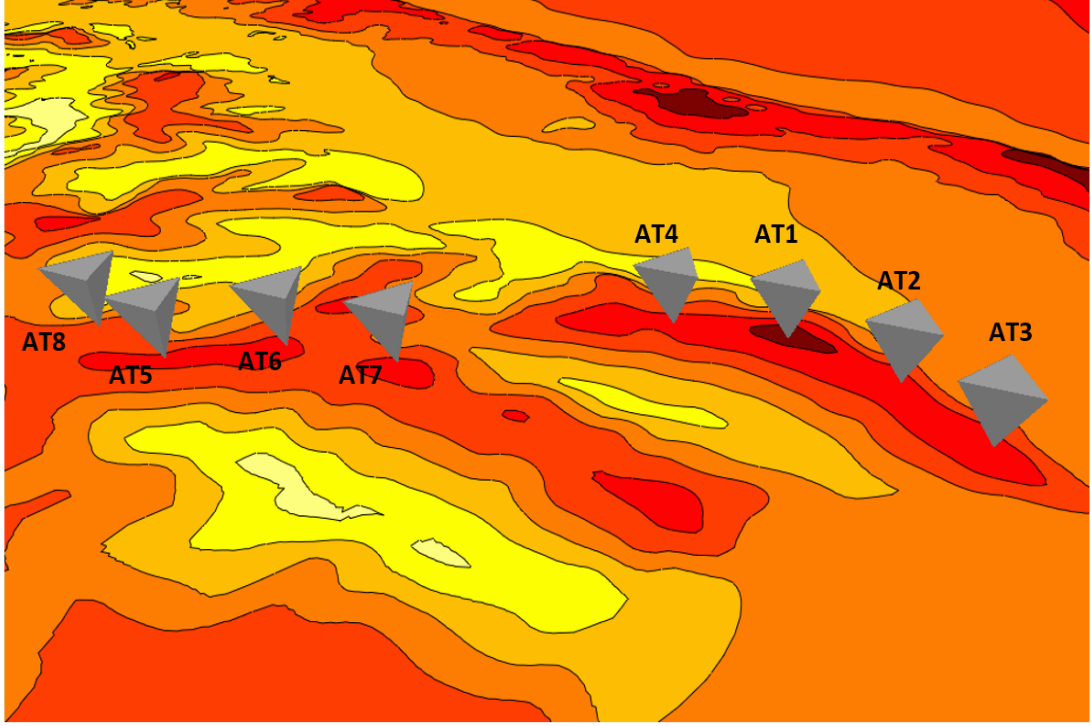
Şekil 5.5. SWT142 (2. proje alanı) için 3 boyutlu rüzgâr kaynak haritası. Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi



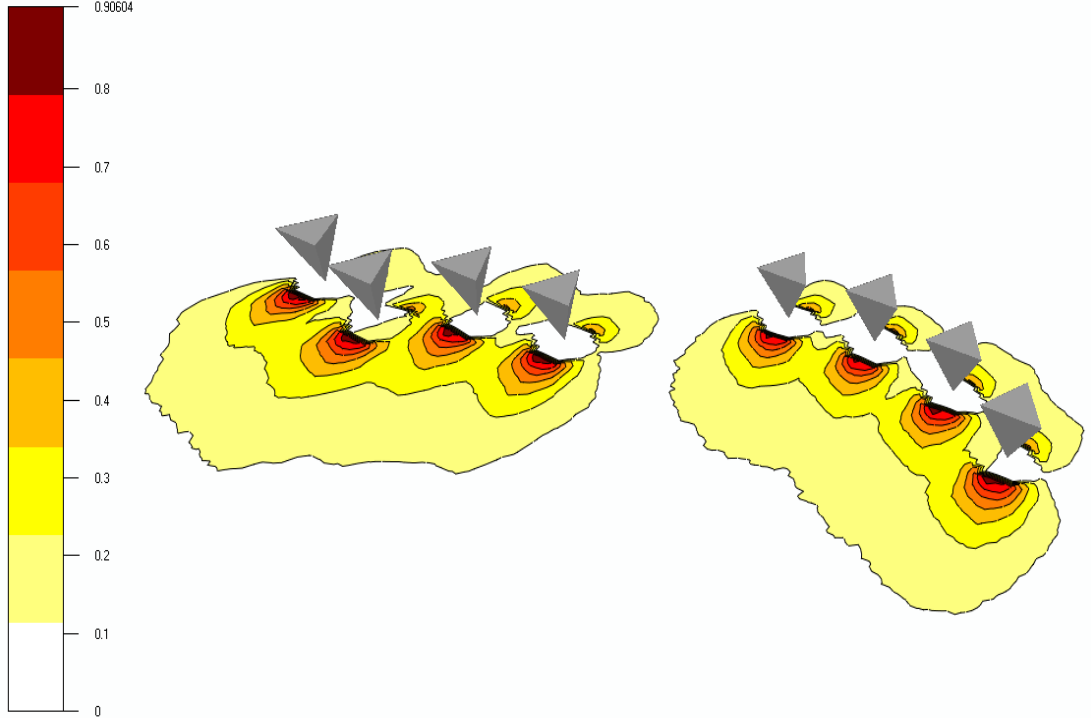
Şekil 5.6. SWT142 (2. proje alanı) için iz bölgesi kayıpları (m/s)



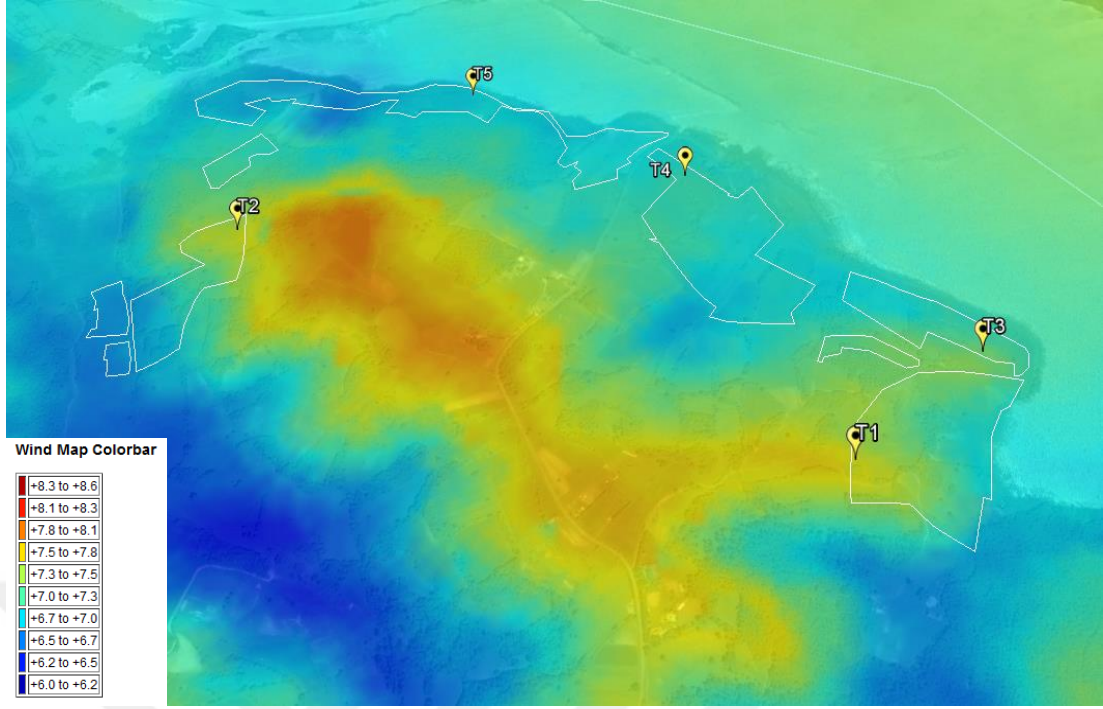
Şekil 5.7. SWT113 (3. proje alanı) için 109 m'lik türbin göbek yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızını (m/s) gösteren rüzgâr kaynak haritası Üçgen: rüzgâr türbini, Nokta: klimatoloji verisi



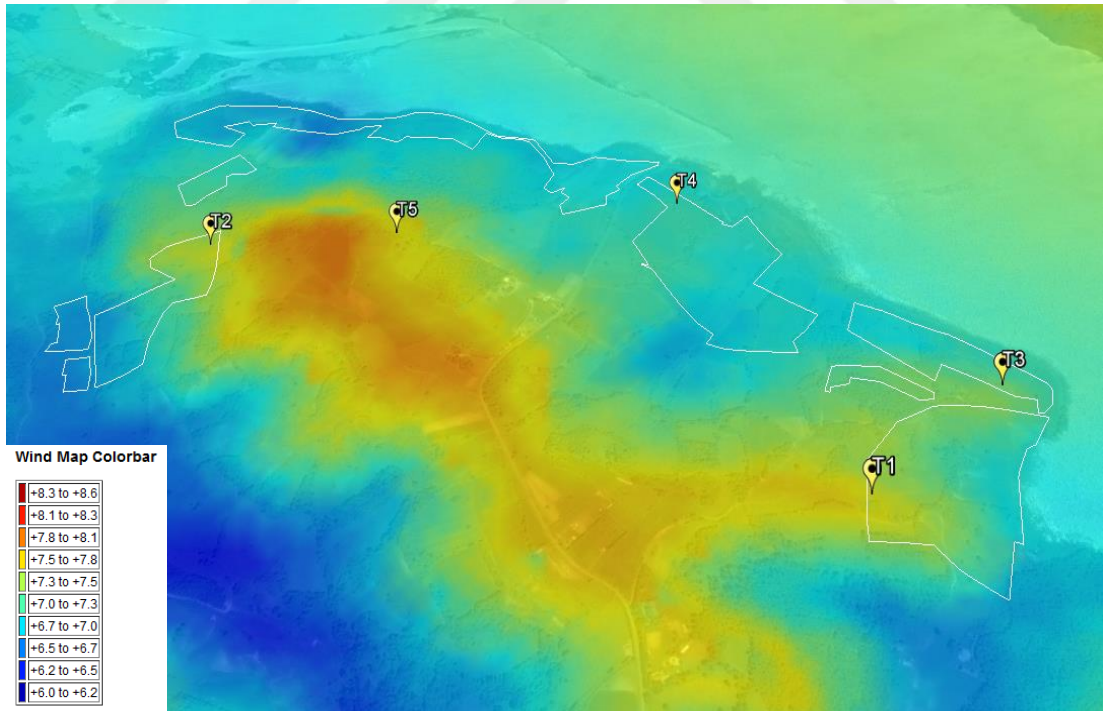
Şekil 5.8. SWT113 (3. proje alanı) için 3 boyutlu rüzgâr kaynak haritası. Üçgen: rüzgâr türbini



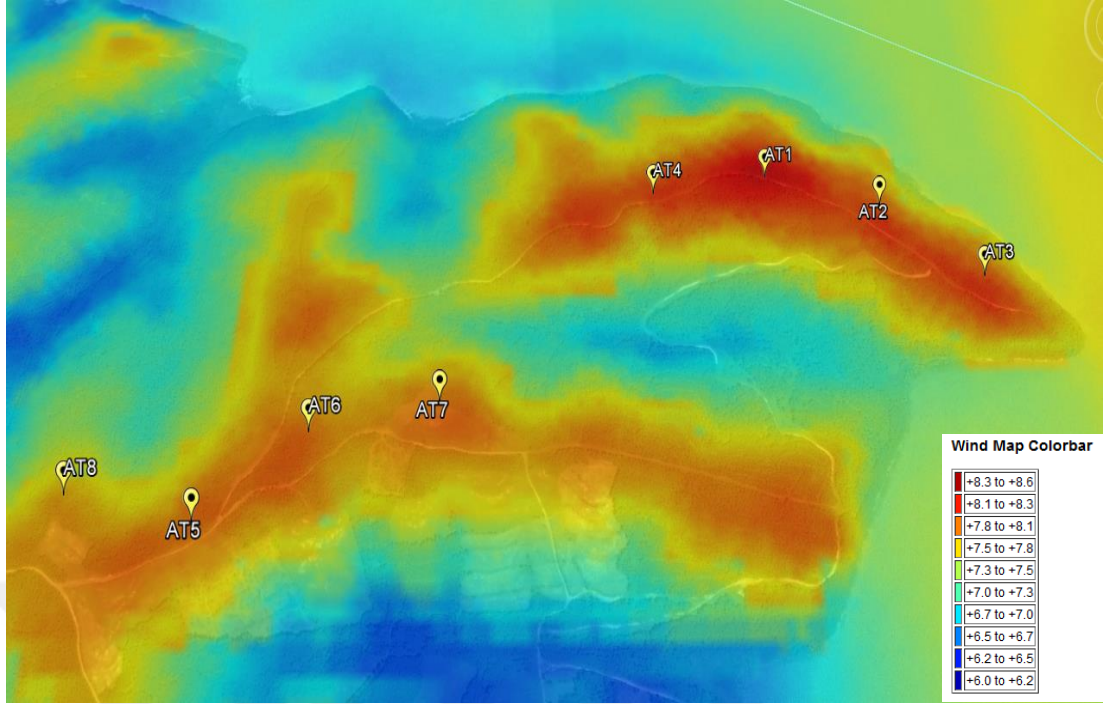
Şekil 5.9. SWT113 (3. proje alanı) için iz bölgesi kayıpları (m/s)



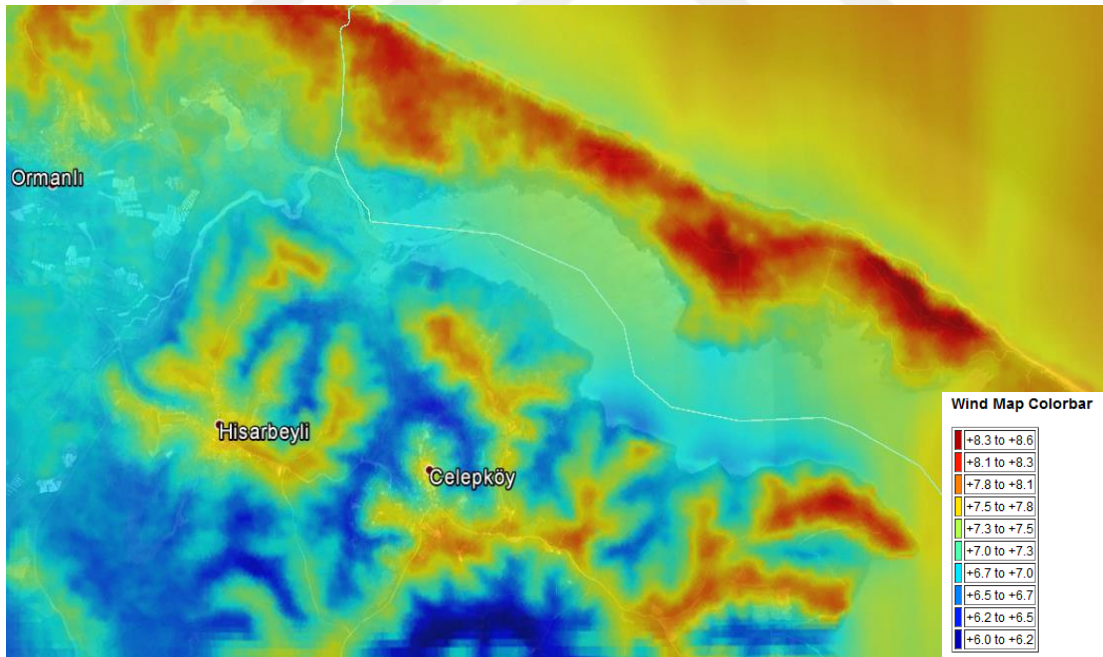
Şekil 5.10. SWT142 (1. proje alanı) için WindSim Park Optimizer yardımıyla çıkarılmış optimum yerleşim planı ve Google Earth üzerine yerleştirilmiş rüzgâr kaynak haritası



Şekil 5.11. SWT142 (2. proje alanı) için WindSim Park Optimizer yardımıyla çıkarılmış optimum yerleşim planı ve Google Earth üzerine yerleştirilmiş rüzgâr kaynak haritası



Şekil 5.12. SWT113 (3. proje alanı) için WindSim Park Optimizer yardımıyla çıkarılmış alternatif optimum yerleşim planı ve Google Earth üzerine yerleştirilmiş rüzgâr kaynak haritası



Şekil 5.13. Google Earth üzerine yerleştirilmiş tüm bölgenin rüzgâr kaynak haritası

5.2. Yıllık Enerji Üretimi

Brüt enerji üretimi, her bir türbinin bulunduğu noktada göbek yüksekliğinde hesaplanan serbest akış halindeki rüzgâr hızı dağılımı ile üretici tarafından sağlanan

türbin güç eğrisi kullanılarak hesaplanan enerji üretimidir. Serbest akış halindeki rüzgâr hızı dağılımı, WindSim'deki akış modeli ve uzun dönemli rüzgâr koşulları kullanılarak elde edilmektedir.

Rüzgâr türbinleri enerjiyi rüzgârdan sağladıklarından dolayı rüzgâr türbininin akış aşağı yönünde rüzgâr hızı azalır. Akış ilerledikçe iz bölgesi (türbin rotoru arkasında kalan düşük hızlı ve yüksek türbülanslı bölge) genişler ve gittikçe serbest akış koşullarına geri dönmeye başlar. İz bölgesi etkisi Jensen modeli kullanılarak hesaplanmıştır.

Yıllık enerji üretimi (YEÜ), 3 proje alanında 3 farklı türbin modeli için ayrı ayrı hesaplanmış ve Tablo 5.1-5.9'da paylaşılmıştır. Bu hesaplamalarda, rüzgâr kaynak haritası için uzun dönemli sentetik ölçüm verisi ve YEÜ hesabı için optimize edilmiş yerleşim planı kullanılmıştır.

5.2.1. 1. proje alanı YEÜ

Siemens SWT142, 3.150 kW, 109 m, Toplam Kapasite 15,75 MW;

Siemens SWT142 model 5 adet rüzgâr türbini ile 1. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 57,149 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.1. SWT142 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | SWT142 | 1,215 | 6,700 | 12,117 | 4,677 | 11,550 |
| T2 | SWT142 | 1,215 | 6,620 | 11,976 | 1,842 | 11,756 |
| T3 | SWT142 | 1,219 | 6,440 | 11,495 | 3,188 | 11,128 |
| T4 | SWT142 | 1,220 | 6,230 | 10,981 | 1,714 | 10,792 |
| T5 | SWT142 | 1,221 | 6,070 | 10,580 | 1,230 | 10,450 |
| | | | TOTAL | 57,149 | 2,576 | 55,677 |

Vestas V136, 3.450 kW, 112 m, toplam kapasite 17,25 MW;

Vestas V136 model 5 adet rüzgâr türbini ile 1. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 58,536 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.2. V136 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | V136 | 1,215 | 6,730 | 12,410 | 4,471 | 11,855 |
| T2 | V136 | 1,215 | 6,660 | 12,259 | 1,117 | 12,122 |
| T3 | V136 | 1,219 | 6,480 | 11,732 | 2,693 | 11,416 |
| T4 | V136 | 1,219 | 6,300 | 11,257 | 1,688 | 11,067 |
| T5 | V136 | 1,220 | 6,160 | 10,879 | 0,715 | 10,801 |
| | | | TOTAL | 58,536 | 2,179 | 57,261 |

Gamesa G126, 2.500 kW, 102 m, toplam kapasite: 15 MW;

Gamesa G126 model 6 adet rüzgâr türbini ile 1. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 51,730 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.3. G126 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | G126 | 1,217 | 6,480 | 9,163 | 1,780 | 9,000 |
| T2 | G126 | 1,216 | 6,580 | 9,333 | 3,769 | 8,981 |
| T3 | G126 | 1,221 | 6,090 | 8,347 | 1,909 | 8,187 |
| T4 | G126 | 1,221 | 6,220 | 8,606 | 2,014 | 8,433 |
| T5 | G126 | 1,221 | 5,950 | 8,068 | 1,231 | 7,969 |
| T6 | G126 | 1,221 | 6,020 | 8,213 | 2,735 | 7,989 |
| | | | TOTAL | 51,730 | 2,265 | 50,559 |

5.2.2. 2. proje alanı YEÜ

Siemens SWT142, 3.150 kW, 109 m, toplam kapasite: 15,75 MW;

Siemens SWT142 model 5 adet rüzgâr türbini ile 2. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 58,818 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.4. SWT142 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | SWT142 | 1,215 | 6,700 | 12,117 | 4,660 | 11,552 |
| T2 | SWT142 | 1,215 | 6,620 | 11,976 | 0,584 | 11,906 |
| T3 | SWT142 | 1,219 | 6,440 | 11,495 | 3,149 | 11,133 |
| T4 | SWT142 | 1,220 | 6,230 | 10,981 | 0,797 | 10,893 |
| T5 | SWT142 | 1,214 | 6,750 | 12,249 | 0,905 | 12,139 |
| | | | TOTAL | 58,818 | 2,031 | 57,623 |

Vestas V136, 3.450 kW, 112 m, toplam kapasite: 17,25 MW;

Vestas V136 model 5 adet rüzgâr türbini ile 2. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 60,216 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.5. V136 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | V136 | 1,215 | 6,730 | 12,410 | 4,572 | 11,843 |
| T2 | V136 | 1,215 | 6,660 | 12,259 | 0,464 | 12,202 |
| T3 | V136 | 1,219 | 6,480 | 11,732 | 2,674 | 11,418 |
| T4 | V136 | 1,219 | 6,300 | 11,257 | 0,282 | 11,225 |
| T5 | V136 | 1,214 | 6,790 | 12,548 | 0,566 | 12,477 |
| | | | TOTAL | 60,206 | 1,729 | 59,165 |

Gamesa G126, 2.500 kW, 102 m, toplam kapasite 15 MW; Gamesa G126 model 6 adet rüzgâr türbini ile 2. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 53,327 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.6. G126 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | G126 | 1,217 | 6,480 | 9,163 | 0,561 | 9,112 |
| T2 | G126 | 1,216 | 6,580 | 9,333 | 3,809 | 8,977 |
| T3 | G126 | 1,221 | 6,090 | 8,347 | 1,788 | 8,197 |
| T4 | G126 | 1,221 | 6,220 | 8,606 | 1,998 | 8,434 |
| T5 | G126 | 1,214 | 6,750 | 9,665 | 1,451 | 9,524 |
| T6 | G126 | 1,221 | 6,020 | 8,213 | 1,091 | 8,124 |
| | | | TOTAL | 53,327 | 1,797 | 52,369 |

5.2.3. 3. proje alanı YEÜ

Siemens SWT113, 3.200 kW, 115 m, toplam kapasite 25,6 MW; Siemens SWT142 model 8 adet rüzgâr türbini ile 3. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 89,328 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.7. SWT113 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | SWT113 | 1,211 | 7,360 | 11,673 | 0,786 | 11,581 |
| T2 | SWT113 | 1,215 | 7,170 | 11,316 | 0,992 | 11,204 |
| T3 | SWT113 | 1,216 | 7,170 | 11,339 | 2,425 | 11,064 |
| T4 | SWT113 | 1,212 | 7,170 | 11,215 | 1,231 | 11,076 |
| T5 | SWT113 | 1,209 | 7,090 | 11,013 | 3,501 | 10,627 |
| T6 | SWT113 | 1,209 | 7,100 | 11,040 | 2,717 | 10,740 |
| T7 | SWT113 | 1,210 | 7,070 | 10,982 | 1,716 | 10,793 |
| T8 | SWT113 | 1,209 | 6,950 | 10,751 | 0,537 | 10,693 |
| | | | TOTAL | 89,328 | 1,734 | 87,779 |

Vestas V126, 3.450 kW, 117 m, toplam kapasite: 27,6 MW; Vestas V126 model 8 adet rüzgâr türbini ile 3. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 99,016 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.8. V126 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | V126 | 1,211 | 7,390 | 12,908 | 0,799 | 12,805 |
| T2 | V126 | 1,214 | 7,190 | 12,526 | 0,931 | 12,409 |
| T3 | V126 | 1,215 | 7,190 | 12,582 | 2,179 | 12,308 |
| T4 | V126 | 1,208 | 7,150 | 12,310 | 2,317 | 12,025 |
| T5 | V126 | 1,211 | 7,180 | 12,400 | 1,802 | 12,176 |
| T6 | V126 | 1,209 | 7,040 | 12,114 | 2,557 | 11,804 |
| T7 | V126 | 1,209 | 6,960 | 11,927 | 0,502 | 11,867 |
| T8 | V126 | 1,210 | 7,120 | 12,250 | 2,778 | 11,910 |
| | | | TOTAL | 99,016 | 1,730 | 97,304 |

Gamesa G132, 3.300 kW, 114 m, toplam kapasite: 26,4 MW; Gamesa G132 model 8 adet rüzgâr türbini ile 3. proje alanında yapılan mikro-konuşlandırma sonucunda yıllık toplam brüt enerji üretimi 101,461 GWh olarak bulunmuştur.

Tablo 5.9. G132 için uzun dönem sentezlenmiş ölçüm verisi üzerinden optimum yerleşim planı için hesaplanmış enerji üretimi

| Türbin No | Türbin tipi | Hava yoğunluğu (kg/m ³) | Ortalama rüzgâr hızı (m/s) | Brüt YEÜ (GWh/y) | İz bölgesi kayıpları (%) | İz bölgesi kayıplarıyla beraber YEÜ (GWh/y) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|---|
| T1 | G132 | 1,211 | 7,380 | 13,219 | 0,801 | 13,113 |
| T2 | G132 | 1,215 | 7,200 | 12,908 | 1,439 | 12,722 |
| T3 | G132 | 1,216 | 7,150 | 12,819 | 1,806 | 12,587 |
| T4 | G132 | 1,211 | 7,170 | 12,737 | 1,961 | 12,487 |
| T5 | G132 | 1,209 | 7,040 | 12,434 | 2,662 | 12,103 |
| T6 | G132 | 1,209 | 7,100 | 12,567 | 2,582 | 12,243 |
| T7 | G132 | 1,209 | 6,930 | 12,235 | 0,641 | 12,157 |
| T8 | G132 | 1,210 | 7,080 | 12,543 | 2,882 | 12,181 |
| | | | TOTAL | 101,461 | 1,841 | 99,593 |

5.3. Kapasite Faktörü Hesabı

Bir rüzgâr enerjisi santralının belirli bir zaman dilimi içerisinde ürettiği enerji miktarının, tam kapasitede üretebileceği enerjiye oranı kapasite faktörü olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr türbininin kapasite faktörü değerinin bulunması Denklem (5.1)'de paylaşılmıştır.

$$C_f = \frac{\sum E_y}{P_n T} \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de C_f sembolü; rüzgâr türbininin kapasite faktörünü, $\sum E_y$ sembolü; rüzgâr türbinin üretebileceği toplam enerji yoğunluğu miktarını (Wh/m^2 yıl), P_n sembolü; rüzgâr türbinin nominal gücünü, T sembolü ise rüzgâr türbinin çalışma saatini belirtmektedir.

Kapasite faktörünü etkileyen kayıplar ve belirsizlikler hakkında detaylı bilgi alt başlıklarda paylaşılmıştır.

5.3.1. Kayıplar

Tablo 5.10'da değerlendirilen altı ana kategori rüzgâr endüstrisinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir nokta, kayıpların brüt enerji üretiminin bir yüzdesi olarak kabul edildiğidir. Tablo 5.10'da kayıp faktörleri ve değerleri paylaşılmıştır.

Tablo 5.10. Enerji üretimindeki kayıplar

| Faktör No | Kayıp Faktörü | Değer (%) |
|-----------|--------------------|-----------|
| 1 | Emre Amadelik | 3,5 |
| 2 | Türbin performansı | 3,5 |
| 3 | Elektriksel | 2,3-2,6* |
| 4 | Çevresel | 1 |
| 5 | Kesintiler | 0 |
| 6 | Diğer | 1 |
| | Total | 10,8 |

İz bölgesi sebebiyle oluşan kayıplar bu kısma dahil edilmemiştir. Bunun sebebi, iz bölgesi kayıplarının WindSim'in Energy modülünde hesaplanmış ve YEÜ hesapları içine katılmış olmasıdır.

5.3.1.1. Emre amadelik

Rüzgâr türbini ve santral altyapısı ile elektrik şebekesinin dengesi her zaman emre amade olamayacaktır. Çeşitli kalemler için rüzgâr santrali ömrü üzerinden ortalama emre amadelik tahminleri yapılmaktadır. Türbin ve trafo merkezlerinin emre amadelik kayıpları; rutin bakımlar, türbin veya trafo merkezinde oluşabilecek arızalar sebebiyle olabilmektedir. Bu kayıp tipi, türbinlerin elektrik üretmediği zamanlardaki enerji kaybını hesaba katmak için brüt enerjiye uygulanacak katsayıyı temsil etmektedir.

Şebeke emre amadelik kaybı, şebekedeki beklenen devre dışı kalma durumu sebebiyle oluşan kayıp ifade eder ve şebeke sorunlarından dolayı oluşacak enerji kaybını hesaba katmak için brüt enerjiye uygulanacak katsayıyı temsil eder. Düzgün bir tasarıma sahip modern rüzgâr türbinleri %95 - %99 arasında değişen yüksek emre amadelik faktörlerine sahiptir.

5.3.1.2. Türbin performansı

Güç eğrisi performans kaybı, türbinin referans güç eğrisini takip edecek şekilde üretim yapamaması durumu ve zamanla kanatlarda oluşan bozulmadan dolayı oluşan kayıpları ifade etmektedir. Enerji üretim hesaplarında türbin üreticisinin sağladığı güç eğrileri kullanılmaktadır. Birçok rüzgâr türbini rüzgâr hızı belli bir limiti (23-25 m/s) aşınca çalışmayı durdurmaktadır. Yüksek hızdan dolayı oluşan kapanmalarda önemli ölçüde yorulma yükleri oluşabilmektedir. Bundan dolayı, rüzgâr hızları limite yakın olduğu durumlarda sürekli açılıp kapanmayı önlemek için türbin kontrol algoritmasında gecikme yaratılmaktadır. Rüzgâr türbininin devreye girme ve devreden çıkma parametrelerinin detaylı bir şekilde mevcut olduğu durumlarda, yüksek hızlardaki gecikmelerden dolayı oluşacak kayıplar, devre dışı kalma hızına sahip bir güç eğrisiyle tekrarlanarak, tahmin edilebilmektedir. Aynı zamanda tamamen sahaya özgü bir durum olması durumunda önlem almak gerekir, aksi halde türbin tedarik edilen güç eğrisine uygun şekilde çalışmayacaktır.

5.3.1.3. Elektriksel faktörler

Operasyonel elektriksel verim ve santralin öz tüketimi sebebiyle elektriksel kayıplar olacaktır. Operasyonel elektrik iletim kayıpları, trafolar ve kablolar da dahil olmak üzere sayaca kadar olan kayıplardır. Her bir rüzgâr türbininin düşük voltajlı terminalleriyle santral bağlantı noktası arasında da elektriksel kayıplar olmaktadır. Bu kayıplar aynı zamanda santralin operasyonel olduğu zamanlarda oluşan ve bağlantı noktasında ölçülen enerji miktarında düşüş olarak kendini gösteren kayıpları da kapsamaktadır. Bütün bunlar genel bir elektriksel verim ile temsil edilir ve rüzgâr enerjisi santralinin uzun dönemli ortalama tahmini üretim profili üzerinden hesaplanmaktadır. Ayrıca santralin devre dışı kaldığı durumlarda da ne kadar güç tükettiği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kayıp faktörü, santralin çalışmıyorken tükettiği güç, trafodaki yük kayıpları, türbinler ve trafo merkezindeki ekipmanın tükettiği elektriği temsil etmektedir.

5.3.1.4. Çevresel faktörler

Çeşitli koşullar altında kanatlar üzerinde kir birikebilmekte ve zamanla kanat yüzeyinde bozulmalar gerçekleşebilmektedir. Aynı zamanda kanatlarda buzlanma da olabilmektedir. Bu etkenler bir rüzgâr türbininin enerji üretimini olumsuz yönde etkilemektedir.

5.3.1.5. Kesintiler

Türbinlerdeki yük, şebeke dengesi veya planlama durumu gibi çeşitli sorunlarla ilgili olarak bir santraldeki türbinlerin bir kısmı veya hepsi devre dışı bırakılabilmektedir. Türbin yükleri etraftaki diğer türbinlerin oluşturduğu iz bölgelerinden etkilenmektedir. Özellikle türbinlerin birbirlerine çok yakın yerleştirildiği bazı santrallerde belli rüzgâr koşullarında bazı türbinlerin kapatılması gerekebilmektedir. Bu rüzgâr sektörü yönetimi olarak adlandırılır ve genelde santralin enerji üretiminde düşüşe yol açmaktadır. Çeşitli şebeke bağlantı anlaşmaları da zaman zaman santrallerde güç üretiminde azaltmaya gidilmesine sebep olabilmektedir. Bu kayıp faktörü, aynı zamanda şebeke kesintilerini takiben rüzgâr enerjisi santralinin tamamen operasyonel hale gelene kadar geçen süreyi de göz önüne almaktadır. Çeşitli yasalar altında ve belli meteorolojik koşullar altında çevredeki yerleşim yerleri için belirlenmiş ses

emisyolları ve gölge kıstaslarına bağlı kalınması için de türbinlerin devre dışı bırakılması söz konusu olabilmektedir.

5.3.2. Belirsizlikler

Rüzgâr kaynak hesapları, belirsizlikler iyi bir şekilde tanımlandığı zaman daha doğru sonuca ulaşılmasını sağlamaktadır. Analiz sonucunda kaynağın belli bir aralığa düştüğüne dair bir güvenilirlik derecesi sunulabilmektedir. Projenin verimliliği risklere bağlıdır ve bir rüzgâr projesi için risk, kaynaklardaki belirsizlikle doğrudan ilgilidir.

Bütün rüzgâr kaynak hesaplarındaki belirsizlikler genel olarak şu faktörlere bağlıdır: rüzgâr hızı ölçümleri, iklimle olan tarihsel ilişkileri, gelecekteki potansiyel iklim değişiklikleri, rüzgâr kayması (shear) ve mekansal rüzgâr kaynak dağılımı.

Tablo 5.11'deki altı ana kategori bu analizde kullanılan belirsizlik tanımlarının çerçevelerini sunmaktadır. Bu kategoriler ayrıca alt kategorilere de ayrılmaktadır. Tablo 5.11'de 1. proje alanındaki Siemens türbini yerleşimleri için tespit edilen belirsizlik sınıfları ve değerleri paylaşılmıştır.

Tablo 5.11. Belirsizlik tablosu (1. proje alanı- SWT142)

| Group | Sub-Group | Uncertainty (%) | U ² | $\sqrt{\sum(U^2)}$ | Sensitivity | Total Uncertainty |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|--------------------|-------------|-------------------|
| Measurement | Instrument Uncertainty | 2,50 | 6,25 | 2,84 | 1,42 | 14,67 |
| | Overspeeding | 0,30 | 0,09 | | | |
| | Vertical Flow Effects | 0,50 | 0,25 | | | |
| | Vertical Turb. Effects | 1,00 | 1,00 | | | |
| | Tower Effects | 0,50 | 0,25 | | | |
| | Boom and Mounting Effects | 0,50 | 0,25 | | | |
| | Missing Data | 0,03 | 0,00 | | | |
| Historic Wind Resource | MCP Correlation | 4,16 | 17,30 | 4,25 | 1,42 | |
| | Interannual Variability | 0,88 | 0,77 | | | |
| Future Wind Variability | Climate Change | 1,00 | 1,00 | 1,33 | 1,42 | |
| | Variability Over Turbine Lifetime | 0,88 | 0,77 | | | |
| Model | CFD Model | 8,00 | 64,00 | 8,00 | 1,42 | |
| Plant Performance & Losses | Availability | 3,50 | 12,25 | 5,36 | 1,00 | |
| | Wake effects | 0,50 | 0,25 | | | |
| | Turbine performance | 3,00 | 9,00 | | | |
| | Electrical losses | 2,50 | 6,25 | | | |
| | Icing (Environmental) | 1,00 | 1,00 | | | |
| | Curtailment | 0,00 | 0,00 | | | |
| Other | Other | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | |

5.3.2.1. Ölçümler

Veri doğrulanmasından ve ayarlamalardan sonra anemometrelerde ölçülen serbest akış halindeki rüzgâr hızındaki belirsizlikler söz konusudur. Sadece ideal rüzgâr koşullarında çalışan ölçüm aletlerinin hassaslığını değil aynı zamanda sahadaki performanslarını da yansıtmaktadır. Anemometre kalibrasyonu, IEC standartlarına göre konfigürasyon yapılması gibi faktörler de göz önüne alınmaktadır.

Ekipman belirsizliği: Anemometreler rüzgâr hızını ölçmek için tercih edilen ekipman olsalar da ölçüm hatası için potansiyel barındırmaktadır. Bu ölçüm hatalarından doğan belirsizlik aynı model anemometreler arasındaki farklılıklar sebebiyle oluşur ve kalibrasyon belirsizliği olarak adlandırılmaktadır. Herhangi bir anemometre modeli için belirlenmiş bir transfer fonksiyonu olsa dahi bu transfer fonksiyonu herhangi bir anemometreyi tam anlamıyla temsil etmeyebilir ve bilinmeyen bir sapma olabilmektedir.

Dikey akış etkileri: Bir rüzgâr türbininin güç eğrisi hesaplandığı zaman IEC standartları ölçülen rüzgâr hızının dikey değil yatay komponentler olmasını gerektirmektedir. Standart'ta "Ölçülecek rüzgâr hızı, türbülansın dikey değil sadece boylamasına ve yanlamasına komponentlerini kapsayacak şekilde anlık rüzgâr hızı vektörünün yatay komponentinin ortalama büyüklüğüdür." denilmektedir. Dolayısıyla saha değerlendirmesi esnasında rüzgâr hızı ölçülürken amaç, rüzgâr hızının yatay komponentini ölçmek olmalıdır. Bu yolla ölçülen rüzgâr hızı ve güç eğrisi kalibrasyonu esnasında ölçülen rüzgâr hızı tutarlı bir şekilde tanımlanır ve bir türbinin güç eğrisi herhangi bir rüzgâr hızında doğru bir sonuç vermektedir. Pratikte ise rüzgâr hızı vektörünün dikey komponenti anemometredeki ölçümleri etkileyebilmektedir. Farklı anemometrelerin farklı açısal tepki karakteristikleri vardır, dolayısıyla tamamen yatay olmayan bir akışa verecekleri tepki da farklı olacaktır. Bazı sahalarda arazi, anemometredeki ölçülen rüzgâr hızını etkileyebilecek sürekli bir akış eğimi yaratabilmektedir.

Dikey türbülans etkileri: Akış eğimi olmayan arazilerde bile dikey yönde türbülans ortalama rüzgâr hızının olduğundan yüksek görünmesine sebep olabilmektedir. Oluşan etki aşırı hızlanmadaki etkiyle benzerdir. Thies FC gibi 2 boyutlu açısal tepki

karakteristiğine sahip IEC onaylı anemometreler yatay rüzgâr hızına oldukça yaklaşabilmektedir.

Direk etkileri: Rüzgâr kaynak ölçümlerinde kullanılan direkler anemometrelerin etrafındaki hava akışını ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Bu etki genellikle “direk gölgesi” olarak adlandırılır ve özellikle anemometre direğin iz bölgesinde olması durumunda görülmektedir.

Kol ve kurulum etkileri: Anemometreyi destekleyen ve direğe bağlayan kol aynı zamanda anemometre ölçümlerini de etkileyebilmektedir. Eğer anemometre tam anlamıyla dikey olarak yerleştirilememişse dikey bir anemometreden farklı bir rüzgâr değeri ölçecektir. Kollar dikey olarak yeterince ayrılmamaları durumunda anemometre üzerinde önemli bir etki oluşturabilmektedir. Bir anemometreyi mükemmel bir şekilde yerleştirmek neredeyse imkansızdır. 5 derecelik bir kayma mümkündür. IEC onaylı 2 boyutlu anemometrelerde 5 derecelik bir kayma rüzgâr hızının bazı yönlerde olduğundan yaklaşık %1 daha az gözükmesine sebep olmaktadır. Hem kol hem de kurulum etkilerinden kaçınmak imkansızdır.

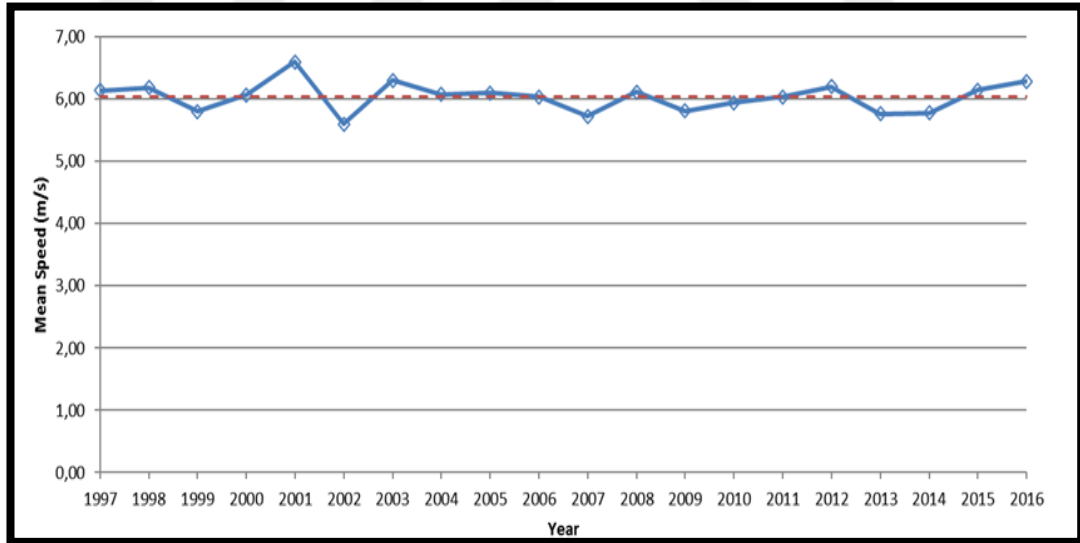
Kayıp veri: Hız karakteristiğinin hesaplanmasından önce ham rüzgâr verisi işlenmektedir. Bu veri işleme süreci buzlanma olan veya sensörlerin çeşitli sebeplerden dolayı hata verdiği durumlarda verilerin ayıklanmasını içerir. Verideki bu boşluklar hız tahminlerinde hatalara yol açabilmektedir. Bu etkiyi incelemek için veri setlerinin ayıklanması üzerine kurulu istatistik metotları kullanılmaktadır.

5.3.2.2. Geçmişteki rüzgâr kaynağı

Bu belirsizlik, kaynağı ölçümden elde edilen rüzgâr verisi sahadaki uzun dönem kaynağı tahmin etmede kullanılırken ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr ölçümleri genelde bir yıl sürmesine rağmen bu yıl içerisinde yapılan ölçümler sahadaki gerçek uzun dönemli kaynağı temsil etmiyor olabilir. 20 yıllık bir ölçüm süreci pratik olmayacağından dolayı uzun dönemli kaynak ölçüm verisinden yola çıkılarak tahmin edilmelidir. Ölçüm verisi yakınlardaki bir nokta (referans noktası) için elde edilen uzun dönemli veriyle beraber Measure-Correlate-Predict (MCP) sürecinden geçirilip istenen noktada tahmini uzun dönem kaynağı oluşturulur. MCP sürecinde uzun dönemli Weibull parametrelerinin tahmini ayrıca bir belirsizlik yaratmaktadır.

MCP korelasyonu: MCP süreci, hedef ve referans noktalar arasında istatistiksel bir ilişki kurmak amacıyla kesişen veri setlerinin kullanımıyla başlamaktadır. Bu ilişkide, hedef noktadaki hız referans noktasındaki hızın fonksiyonu olarak tahmin edilir. Daha sonra bu ilişki referans noktasındaki uzun dönemli veri setine uygulanarak hedef noktasında aynı zaman aralığındaki verinin tahmini için kullanılmaktadır. Burada önemli olan hedef noktada rüzgâr kaynağı tahminin iyi bir şekilde yapmak için, yüksek kalitede veriye sahip, düzenli ölçüm yapılmış ve hedef noktayla yüksek korelasyona sahip bir referans noktası seçmektir.

Yıllar arası değişkenlik: Bir sahadaki yıllık ortalama rüzgâr hızı yıldan yıla değişmektedir. Bu değişiklikler yıllar arası değişkenlik olarak adlandırılır. 20 yıllık rüzgâr verisi, genelde ortalama rüzgâr hızı ve Weibull parametrelerini karakterize etmek için yeterli zaman periyodu olarak kabul edilmektedir ve yıllar arası değişkenliğin etkisi kalmamaktadır. Sonuç olarak, saha izleme ve bir referans noktasında belli sayıdaki yıl için MCP süreci tamamlandığında tahmin edilen değerlerin geçmişe dönük uzun dönemli verilerle uyuşmama riski bulunmaktadır.



Şekil 5.14. 20 yıllık Vortex rüzgâr verisi

5.3.2.3. Gelecekteki rüzgâr değişimleri

Gelecekteki rüzgâr kaynağındaki belirsizlik iki parçadan oluşmaktadır: rüzgâr rejimindeki normal değişkenlik ve uzun vadeli iklim değişikliği riski.

İklim değışikliği: Belirsizliğin iklim değışikliğine bağlı olan kısmı spekulatif olsa dahi ihmal edilmemelidir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, iklim değışikliği sebebiyle oluşan belirsizliğin %0,5-%2 arasında değışmekte olduğu görülmektedir. Bu aralığın alt limiti 10 senelik üst limiti ise 25 senelik olarak belirlenmiştir.

5.3.2.4. Akış modeli (dikey-yatay ekstrapolasyon)

Bu belirsizlik WindSim akış modellemesiyle ilgilidir. Kullanılan modele, modelin çözünürlüğüne, araziye, rüzgâr rejimine, ölçüm direklerinin yerleşimine ve diğer faktörlere bağlıdır. İdeal olarak, büyük santrallerde modelin doğruluğunu sağlamak için aynı yükseklikte birden fazla ölçüm direği bulunur ve bu sayede geniş bir alanda hassasiyet sağlanmaktadır.

5.3.2.5. Santral performansı ve kayıplar

Bu belirsizlik tipi türbin güç eğrisinin ideal test koşulları yerine sahadaki performansındaki belirsizliği kapsamaktadır. Sahada türbin türbülanslı ve yatay olmayan akışlara maruz kalabilmekte, anormal rüzgâr kaymaları (shear) ve hava yoğunluğu oluşabilmektedir.

Tablo 5.12'de üç farklı proje alanındaki her bir yerleşim için toplam belirsizlik değerleri paylaşılmıştır.

Tablo 5.12. Belirsizlik tablosu (Bütün Yerleşimler)

| 1. Proje Alanı | Duyarlılık Faktörü | Belirsizlik Değerı |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Siemens SWT142 | 1,42 | 14,67 |
| Vestas V136 | 1,54 | 15,74 |
| Gamesa G126 | 1,51 | 15,47 |
| 2. Proje Alanı | | |
| Siemens SWT142 | 1,36 | 14,14 |
| Vestas V136 | 1,47 | 15,11 |
| Gamesa G126 | 1,47 | 15,11 |
| 3. Proje Alanı | | |
| Siemens SWT113 | 1,47 | 16,28 |
| Vestas V126 | 1,41 | 15,70 |
| Gamesa G132 | 1,30 | 14,62 |

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; rüzgâr türbinlerinin tarihi gelişimi, Dünya’da ve Türkiye’de rüzgâr enerjisinin durumu incelendi. Rüzgâr hızını etkileyen, yükseklik, pürüzlülük, türbülans, iz etkisi, tünel etkisi detaylı anlatıldı. Rüzgâr enerjisi eşitliği, hava yoğunluğu hesabı, rüzgâr türbini modelleri, WindSim ve CFD hakkında bilgi verildi. Rüzgâr ölçüm istasyonu, rüzgâr verilerinin analizi ve mikro-konuşlandırma çalışması safhaları anlatıldı. Farklı türbin tipleri ve hesaplanan optimum yerleşim için yıllık enerji üretimi ve buna bağlı aşma olasılığı değerleri hesaplandı ve yapılan analizlere dayanarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.1’de paylaşılmıştır.

Tablo 6.1. Net yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü

| 1. Proje | Türbin Sayısı | Top. Kap. (MW) | Net YEÜ (GWh/y) | | | Kapasite Faktörü | | |
|-----------------|---------------|----------------|-----------------|--------|--------|------------------|------|------|
| | | | P50 | P75 | P90 | P50 | P75 | P90 |
| Siemens SWT142 | 5 | 15,75 | 49,647 | 44,736 | 40,315 | 36,0 | 32,4 | 29,2 |
| Vestas V136 | 5 | 17,25 | 51,060 | 45,638 | 40,759 | 33,8 | 30,2 | 27,0 |
| Gamesa G126 | 6 | 15,00 | 45,084 | 40,379 | 36,144 | 34,3 | 30,7 | 27,5 |
| 2. Proje | | | | | | | | |
| Siemens SWT142 | 5 | 15,75 | 51,383 | 46,484 | 42,075 | 37,2 | 33,7 | 30,5 |
| Vestas V136 | 5 | 17,25 | 52,758 | 47,379 | 42,539 | 34,9 | 31,4 | 28,2 |
| Gamesa G126 | 6 | 15,00 | 46,698 | 41,937 | 37,653 | 35,5 | 31,9 | 28,7 |
| 3. Proje | | | | | | | | |
| Siemens SWT113 | 8 | 25,60 | 78,273 | 69,676 | 61,938 | 34,9 | 31,1 | 27,6 |
| Vestas V126 | 8 | 27,60 | 86,766 | 77,581 | 69,314 | 35,9 | 32,1 | 28,7 |
| Gamesa G132 | 8 | 26,40 | 88,807 | 80,048 | 72,164 | 38,4 | 34,6 | 31,2 |

Proje sahalarının batısında yer alan RÖİ'den elde edilen ölçüm verisine göre 81 m yükseklikteki ortalama hız 5,8 m/s değerindedir. Uzun dönemli sentezleme sonrası hız 5,7 m/s olarak hesaplanmıştır.

İlk olarak 1. proje alanında mikro-konuşlandırma çalışması yapılmıştır. 2. proje alanında arazilerin güneyinde kalan tepenin türbin yerleşimine uygunluğu incelenmiştir. Enerji yoğunluğu daha yüksek olmasına rağmen yerleşim alanlarının bulunması sebebiyle geniş çaplı türbin yerleşimine uygun bulunmamıştır ve 1. projedeki Siemens, Vestas ve Gamesa yerleşimlerinin en kötü performans gösteren türbinleri uygun bir noktaya taşınmıştır. 3. proje alanı, Celepköy'ün doğusunda ve göle komşu bir sırtta yer almaktadır. Bu doğrultuda Siemens, Vestas ve Gamesa firmalarına ait IEC III ve II tip türbinler için sahada optimum yerleşim çalışmaları yapılmıştır.

Analizler sonucunda ilk iki projede Siemens ve üçüncü projede Gamesa türbinlerinin sahada en iyi performansı gösterdiği görülmüştür. Burada belirtilmesi gereken bir nokta Gamesa markasına ait IEC III tipi türbin diğer IEC III tipi türbinlerden daha düşük rotor çapına sahipken üçüncü projede kullanılan IEC II tipi Gamesa türbin kullanılan türbinler arasında en yüksek rotor çapına sahiptir. Bunun sonucunda ilk iki projede IEC III tipi türbinler arasında en yüksek rotor çapına sahip olan Siemens, üçüncü projede de IEC II tipi türbinler arasında en yüksek rotor çapına sahip olan Gamesa türbini en iyi performansı göstermiştir.

1. projede, P75 (%75 olasılıkla) değerlerine göre karşılaştırıldığında; 32,4 kapasite faktörü ile Siemens SWT142 model rüzgâr türbini en iyi performansı göstermiştir. 15,75 MW kurulu güce sahip rüzgâr enerji santralinin yıllık net enerji üretimi 44,736 GWh olarak hesaplanmıştır. Elektrik Mühendisleri Odası'nın araştırmasına göre; iki çocuklu 4 kişilik bir ailenin yıllık elektrik tüketimi yaklaşık 2700 kWh'tir [43]. Bu rüzgâr enerji santralinin kurulumundan elde edilecek enerji ile yaklaşık 16.570 ailenin yıllık enerji tüketimi karşılanmış olacaktır. Bu proje alanında mikro-konuşlandırma çalışması yapılmadan Gamesa G126 model kullanılsaydı; 40,379 GWh net enerji üretimi gerçekleşecek ve 4,357 GWh daha az enerji üretimi gerçekleşmiş olacaktı. Bu durumda 16.570 aile yerine 14.950 ailenin yıllık enerji ihtiyacı karşılanabilecek ve aynı alanın kullanılmasına rağmen 1.620 ailenin enerji ihtiyacı karşılanamayacaktı.

2. projede, P75 değerlerine göre karşılaştırıldığında; 33,7 kapasite faktörü ile Siemens SWT142 model rüzgâr türbini en iyi performansı göstermiştir. 15,75 MW kurulu güce sahip rüzgâr enerji santralının yıllık net enerji üretimi 46,484 GWh olarak hesaplanmıştır. Bu rüzgâr enerji santralının kurulumundan elde edilecek enerji ile yaklaşık 17.220 ailenin yıllık enerji tüketimi karşılanmış olacaktır. Bu proje alanında mikro-konuşlandırma çalışması yapılmadan Gamesa G126 model kullanılsaydı; 41,937 GWh net enerji üretimi gerçekleşecek ve 4,547 GWh daha az enerji üretimi gerçekleşmiş olacaktı. Bu durumda 17.220 aile yerine 15.530 ailenin yıllık enerji ihtiyacı karşılanabilecek ve aynı alanın kullanılmasına rağmen 1.690 ailenin enerji ihtiyacı karşılanamayacaktı.

3. projede, P75 değerlerine göre karşılaştırıldığında; 34,6 kapasite faktörü ile Gamesa G132 model rüzgâr türbini en iyi performansı göstermiştir. 26,4 MW kurulu güce sahip rüzgâr enerji santralının yıllık net enerji üretimi 80,048 GWh olarak hesaplanmıştır. Bu rüzgâr enerji santralının kurulumundan elde edilecek enerji ile yaklaşık 29.650 ailenin yıllık enerji tüketimi karşılanmış olacaktır. Bu proje alanında mikro-konuşlandırma çalışması yapılmadan Siemens SWT113 model kullanılsaydı; 69,676 GWh net enerji üretimi gerçekleşecek ve 10,370 GWh daha az enerji üretimi gerçekleşmiş olacaktı. Bu durumda 29.650 aile yerine 25.800 ailenin yıllık enerji ihtiyacı karşılanabilecek ve aynı alanın kullanılmasına rağmen 3.850 ailenin enerji ihtiyacı karşılanamayacaktı.

3 farklı proje sahasında yapılan mikro-konuşlandırma çalışması sonucunda ortaya çıkan RES kapasite faktörü değerleri (32,4/33,7/34,6), Çatalca Bölgesi'nin RES kapasite faktörünü temsil etmektedir. Çatalca Bölgesi'nin kapasite faktörü yaklaşık olarak 33,5 olarak öngörülmüştür.

Bu çalışma ile; rüzgâr enerji santrali kurulumunda planlamanın, proje sahasına ve rüzgâr karakteristiğine uygun türbin seçiminin yapılmasının önemi anlaşılmıştır. RES kurulumu planlayan kurum ve kuruluşlar için örnek bir çalışma olmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Şenel M. C., Koç E., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, 2015, **56**(663), 47-55.
- [2] Kestane Ö., Ülgen K. Techno-Economic Analysis of Wind Power Plants: A Case Study of Milas-Turkey, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2017, **12**(12), 1088-1100.
- [3] <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-018.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019).
- [4] <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2018>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019).
- [5] https://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/istatistikraporu_temmuz_2019TUREB, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019).
- [6] <http://windsim.com/library/the-bolund-experiment.aspx>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019).
- [7] <http://www.cham.co.uk/about.php>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019).
- [8] <http://windsim.com/validating-cfd's-value.aspx>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019).
- [9] Leblebicioğlu E., CFD (Computational Fluid Dynamics) Nedir?, <https://muhendistan.com/cfd-computational-fluid-dynamics-nedir/>, (Ziyaret Tarihi: 3 Kasım 2019).
- [10] Blocken B., 50 years of Computational Wind Engineering: Past, Present and Future, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, **129**(69), 102.
- [11] <https://library.wwindea.org/global-statistics-2018-preliminary/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2019).
- [12] Golding E. W., *The Generation of Electricity by Wind Power*, 2nd. Ed., Halsted Press, London, 1956.
- [13] Özgener Ö., Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2002, **4**(3), 159-173.
- [14] Hayli S., Rüzgâr Enerjisinin Önemi Dünya’da ve Türkiye’deki Durumu, *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2001, **11**(1), 1-26.

- [15] <http://www.talentfactory.dk/en/tour.htm>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [16] Durak M., Rüzgar Enerjisi Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması; Akhisar Rüzgar Elektrik Santrali, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000, 100907.
- [17] <https://polatenerji.com/bilgi-bankasi/dunya-da-ruzgar-enerjisi>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [18] <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/ruzgar-enerjisinin-gelisimi-ve-tarihi/4309#ad-image-0>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [19] <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [20] <https://www.enerjiportali.com/turkiye-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucunde-avrupa-da-6-sirada/>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [21] <https://www.enerjiatlasi.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [22] <https://www.enerjiatlasi.com/elektrik-uretimi/>, (Ziyaret Tarihi: 5 Ekim 2019)
- [23] Gipe P., *Wind Energy Basics*, Chelsea Green Publishing Company, Vermont, USA, 2003.
- [24] Mathew, S., *Wind Energy Fundamentals*, Resource Analysis and Economics, Springer, Berlin, Germany, 2006.
- [25] Janardan S. R., Nelson V., *Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power*, Alternative Energy Institute, Texas, USA, 1994.
- [26] Lettau H., Note On Aerodynamic Roughness-Parameter Estimation On The Basis Of Roughness-Element Description, *Journal of Applied Meteorology*, 1969, **8**(5), 828–832.
- [27] Troen I., Petersen E. L., *European Wind Atlas*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1989.
- [28] Altındış A., Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Rüzgâr Enerjisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001, 106367.
- [29] <https://community.ieawind.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=11a27d1f-e41c-9e27638e1ec7b611dcb9&forceDialog=0>, (Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2019)
- [30] Hahm T., Kroning J., In the Wake of a Wind Turbine, *Fluent News*, 2002, **5**(7).
- [31] Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L., *Wind Energy Explained*, 1st ed., John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2002.

- [32] Hemami A., *Wind Turbine Technology*, 1st ed., Cengage Learning, Boston, USA, 2012.
- [33] Tong, W., *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, 1st ed., WIT Press, Southampton, UK, 2010.
- [34] Amano R. S., Sundén B., *Aerodynamics of Wind Turbines: Emerging Topics*, 1st ed., WIT Press, Southampton, UK, 2014.
- [35] Colak I., Ayaz M. S., Boran K., CFD Based Wind Assesment in West of Turkey, *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Palermo, İtalya, 22-25 Kasım, 727-731, 2015.
- [36] Durak M., Özer S., *Rüzgâr Enerjisi Teori ve Uygulama*, 1st ed., Kişisel Yayın, Ankara, 2008.
- [37] Bingöl F., Rüzgâr Enerji Sistemleri İçin Hava Yoğunluğunun Hesaplanması, *Politeknik Dergisi*, 2018, **21**(2), 273-281.
- [38] Walker F. J., Jenkins N., *Wind Energy Technology*, 1st ed., Wiley, Canada, 1997.
- [39] Nelson V., *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment*, 2nd ed., CRC Press, Florida, 2013.
- [40] Nurbay N. ve Çınar A., Rüzgâr Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, Türkiye, 19-21 Ekim 2005.
- [41] Elibüyük U., Üçgül İ., Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri, *Yekarum e-Dergi*, 2014, **2**(3), 1-14.
- [42] Köse F., Özgören M., Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgâr Türbini, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 2005, **46**(551), 20-30.
- [43] http://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=128261&tipi=2&sube=, (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2019)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Şakar Y. E.**, Altınay M., WindSim Programı Kullanılarak Çatalca Bölgesinde Rüzgâr Enerji Santrali Mikro-Konuşlandırma Çalışması Yapılması ve Enerji Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi, *Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi-Imascon 2019 Güz*, Kocaeli, Türkiye, 01-03 Kasım 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre ŞAKAR 1990 yılında Ankara’da doğdu. Lise öğrenimini Samsun’da Tülay Başaran Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2009 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği’ni kazandı. Lisans eğitimini 2015 yılında tamamladı. 2015 yılında Cybersoft’ta Yazılım Mühendisi olarak ilk işine başladı. 2016 yılında İstanbul Enerji AŞ’de Proje ve İş Geliştirme Mühendisi olarak yeni işine başladı. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

