



A New Pre-processing for Assessing Connection Areas for Busbars of Wind Power Plants Using Meteorological, Financial and Electrical Grid Data

Ali ERDUMAN^{1,*} Bahri UZUNOGLU² Ali DURUSU³

¹Hakkari University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 30000, HAKKARI

²Uppsala University, Division of Electricity Centre for Renewable Electric Energy Conversion, 53475121, Uppsala/SWEDEN

³Yildiz Technical University, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electrical Engineering, 34220, Esenler/İSTANBUL

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Received: 10/05/2019

Revision: 10/07/2019

Accepted: 18/08/2019

Highlights

- Practical pre-processing approach is proposed.
- Bus connection points in a zone is determined.
- Preliminary working time of the energy planners will be shortened and most economic wind power plant will be chosen.

Keywords

Feasibility Analysis of Wind Energy
Energy Economics
Electrical Power System

The objective of this study is to provide practical pre-processing approaches for entities that are active in wind farm development that needs to define connection areas of busbars for wind power plants. With the increase in the installed capacity of the renewable energy resources, the determination of the power grid connection points has gained importance. Failure to correctly identify the feasible grid connection points extends the timeline of return of investment of the power plants. Wind power plants, which cannot produce efficiently, can also cause problems (voltage drop, frequency deterioration, flicker, increased costs, etc.) on the electrical energy system.

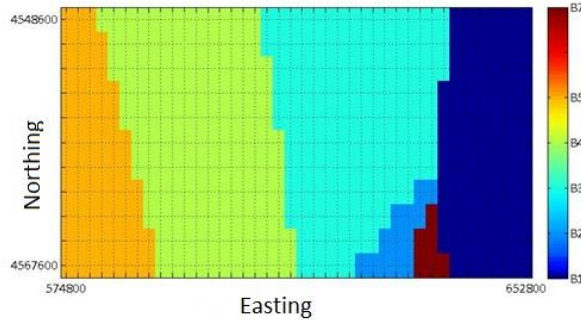


Figure A. Regions of windfarms that will be connected to optimized busbar (Seven busbar numbers are illustrated in legend from B1 to B7)

Purpose: Within the scope of this study, a new methodology has been developed to determine the number of regional wind power plants that can be connected to a grid connection point depending on economic and technical criteria as well as the installed capacity of these power plants.

Theory and Methods: In the developed methodology; the geographical structure of the region, technical characteristics of turbine technologies used in wind power plants, electrical grid criteria and economic connection criteria of wind power plants are taken into consideration. WindPRO, a wind power analysis program, was used in the definition of regional variables. The dataset obtained from the WindPRO program was used in the analysis of installation of wind turbines with different tower heights and different installed powers (50 MW, 100 MW, etc.). Investment costs of turbine technologies and energy transmission system integration costs were taken into consideration in determining bus-based installation costs.

Results: As a result, the possible costs of the wind power plants that can be established for bus connection points in a zone defined on the energy transmission system were determined.

Conclusion: In this study, a new methodology has been developed to determine the number of regional wind power plants that can be connected to a grid connection point depending on economic and technical criteria as well as the installed capacity of these power plants. The possible costs of the wind power plants that can be established for bus connection points in a zone defined on the energy transmission system were determined. Thus, the preliminary working time of the energy planners will be shortened and the most economic regions related to the wind power plant technology will be chosen.



Meteorolojik, Finansal ve Elektrik Şebeke Verileri Kullanılarak Rüzgâr Enerji Santralleri için Bara Bölgelerini Belirlemeye Yönelik Yeni Bir Önışlem Yaklaşımı

Ali ERDUMAN^{1,*} Bahri UZUNOGLU² Ali DURUSU³

¹Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 30000, HAKKARİ

²Uppsala University, Division of Electricity Centre for Renewable Electric Energy Conversion, 53475121, Uppsala/SWEDEN

³Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34220, Esenler/İSTANBUL

Öz

Bu çalışmanın amacı rüzgâr çiftliği kurulumunda faaliyette bulunan organizasyonların pratik bara bağlantı sahalarının tespitine yönelik yeni bir yaklaşımın oluşturulmasıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçleri toplam kurulu güç içinde artmasıyla bağlantı noktalarının belirlenmesi büyük önem kazanmaya başlamıştır. Bağlantı noktaları doğru tespit edilmemesi santrallerin yatırım geri dönüşüm sürelerini uzatmaktadır. Verimli üretim yapamayan rüzgâr santralleri elektrik enerji sistemi üzerinde problemlere de (gerilim düşümü, frekans bozulması, fliker, maliyetlerin artması, vb.) neden olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında bir bölgeye ekonomik ve teknik kriterlere bağlı olarak bağlanabilecek bölgesel rüzgâr santrali sayılarını ve bu santrallerin kurulu güç kapasitesini tespiti etmekte kullanılan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde; bölgenin coğrafi yapısı, rüzgâr santrallerinde kullanılan türbin teknolojilerinin teknik özellikleri, şebeke kriterleri ve rüzgâr santrallerinin ekonomik bağlantı kriterleri dikkate alınmıştır. Bölgesel değişkenlerin tanımlanmasında rüzgâr gücü analiz programlarından olan WindPRO kullanılmıştır. WindPRO programından elde edilen veriler farklı kule yüksekliklerinde ve farklı kurulu güçlerde (50 MW, 100 MW, vb.) rüzgâr türbinleri ile santrallerin kurulumu analizinde kullanılmıştır. Bara bazlı kurulum maliyetinin belirlenmesi için türbin teknolojilerinin yatırım maliyetleri ve enerji iletim sistemi entegrasyon maliyetleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak enerji iletim sistemi üzerinde tanımlanan bir bölgedeki bara bağlantı noktaları için kurulabilecek rüzgâr santrallerinin konumlarına bağlı olası maliyetleri tespit edilmiştir. Böylelikle enerji planlamalarının rüzgâr santral teknolojisine bağlı en ekonomik bölgelerin tespit edilmesi sağlanmaktadır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 10/05/2019

Düzeltilme: 10/07/2019

Kabul: 18/08/2019

Anahtar Kelimeler

Rüzgâr Enerjisi Fizibilite

Analizi

Enerji Ekonomisi

Elektrik Güç Sistemleri

Keywords

Feasibility Analysis of

Wind Energy

Energy Economics

Electrical Power System

A New Pre-processing for Assessing Connection Areas for Busbars of Wind Power Plants Using Meteorological, Financial and Electrical Grid Data

Abstract

The objective of this study is to provide practical pre-processing approaches for entities that are active in wind farm development that needs to define connection areas of busbars for wind power plants. With the increase in the installed capacity of the renewable energy resources, the determination of the power grid connection points has gained importance. Failure to correctly identify the feasible grid connection points extends the timeline of return of investment of the power plants. Wind power plants, which cannot produce efficiently, can also cause problems (voltage drop, frequency deterioration, flicker, increased costs, etc.) on the electrical energy system. Within the scope of this study, a new methodology has been developed to determine the number of regional wind power plants that can be connected to a grid connection point depending on economic and technical criteria as well as the installed capacity of these power plants. In the developed methodology; the geographical structure of the region, technical characteristics of turbine technologies used in wind power plants, electrical grid criteria and economic connection criteria of wind power plants are taken into consideration. WindPRO, a wind power analysis program, was used in the definition of regional variables. The dataset obtained from the WindPRO program was used in the analysis of installation of wind turbines with different tower heights and different installed powers (50 MW, 100 MW, etc.). Investment costs of turbine technologies and energy transmission system integration costs were taken into consideration in determining bus-based installation costs. As a result, the possible costs of the wind power plants

that can be established for bus connection points in a zone defined on the energy transmission system were determined. Thus, the preliminary working time of the energy planners will be shortened and the most economic regions related to the wind power plant technology will be chosen.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Rüzgâr Santrallerinin şebekeye optimal bağlanabilirlik oranlarının analiz edilebilmesi için meteorolojik değişkenlerin, ekonomik değişkenlerin ve güç sistemi değişkenlerinin dikkatli bir şekilde incelenmesi büyük önem arz etmektedir.

İletim sistemine bağlanacak rüzgâr türbinin çıkış gücünü etkileyen parametrelerin başında, meteorolojik değişkenler gelmektedir. Sistem üzerinde güç üretiminin değişmesi, yük akışının düzensiz olmasına sebep olabilmektedir. Bu amaçla Türkiye’de yapılan en kapsamlı çalışma Rüzgârdan Üretilen Elektriksel Güç İçin İzleme ve Tahmin Sistemi Geliştirilmesi Projesi’dir [1]. Yapılan bu proje kapsamında, Türkiye de rüzgâr kaynağından büyük ölçekli elektrik enerjisi üretiminin gerçekleştirilebilmesi ve rüzgâr santrallerinin elektrik sistemine entegrasyonu için gerekli önlemlerin saptanması amaçlanmış ve hayata geçirilmiştir.

Türkçü tarafından yapılan çalışma ile Türkiye’nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin, mevcut verilerdeki yetersizlik nedeniyle bugüne kadar güvenilir bir şekilde hesaplanmadığı tespit edilmiş ve buna karşın Türkiye’nin rüzgâr enerjisi bakımından zengin yöreleri bulunan bir ülke olduğu vurgulanmıştır [2]. Bu çalışmada nitelikli analizlerin yapılmasının gerektiği kesin bir dille ifade edilmiştir. Bunu takip edilen sonraki çalışmalarda da birçok çalışma yapılmıştır [3,4]. Bölgesel rüzgâr kapasitesinin hesabında; yüzey pürüzlülük oranı, yükselti ve nemin etkileri bilinmektedir ve sonuç olarak rüzgâr kapasitesinin bu değişkenlere bağlı olarak büyük oranda değiştiği gözlemlenmiştir ve Weibull olasılık yoğunluğu fonksiyonu parametrelerinin doğru analizi de önemlidir [5-7].

Bölgesel rüzgâr enerjisi bir nokta için o noktada verilen ölçüm verisinden analiz edilebilir, fakat geniş bölgelerde hesaplamaları yapabilmek için modelleme ihtiyacı vardır ve ticari yazılımlar kullanılmaktadır. Bilimsel ve ticari çalışmalar için kullanılan başlıca yazılımlar; WindPRO, WAsP, WindSim, Windographer vb. olarak sıralanabilir. Ölçülen rüzgâr verilerinin değerlendirilmesi ve farklı noktalarda üretilen enerjinin tahmin edilmesi amacıyla endüstri standardı olarak Risoe-DTU tarafından geliştirilen Wasp Programı yaygın şekilde kullanılmaktadır [8].

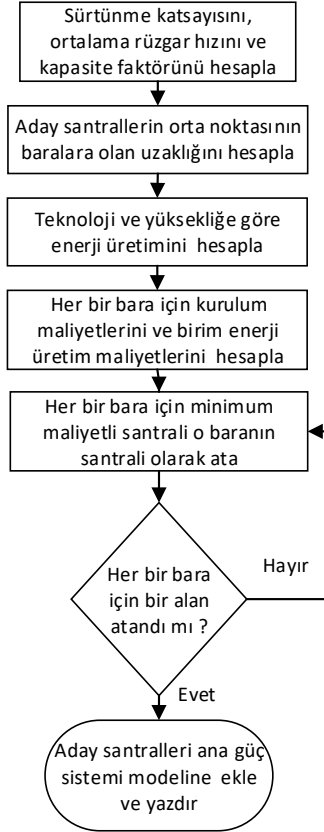
Rüzgâr enerjisinin doğru değerlendirilmesi için bir diğer önemli parametrede rüzgâr santrallerinde kullanılan türbin tipleridir. Bu teknolojiler arasında günümüzde en yaygın kullanılanlar; Sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) ve çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG)’dır [9]. Her bir teknolojinin kendine özel avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Bölge için en iyi rüzgâr türbini teknolojisi seçiminin yapılabilmesi amacıyla üretim teknolojisi, üretim maliyetleri ve şebeke bağlantısındaki etkileri birlikte dikkate alınmalıdır. Fingersh vd. tarafından yapılan çalışmada nominal gücü, yüksekliği ve teknolojisi bilinen bir türbin için yaklaşık ağırlık hesabı, parçaların ağırlıklarının fonksiyonu olarak ortaya konulmuştur [10,11].

Rüzgâr türbinlerinin teknik kısıtlarının yanında bir de kurulum ve üretim maliyeti kısıtları da vardır. Bu kısıtlar; rüzgâr santralının kurulacağı alanın arazi fiyatları, iletim hattının kurulum maliyetleri, yükseltici transformatör ve şalt sisteminin maliyeti, teknoloji bazlı kurulum maliyetleri, bölgede bulunan diğer santrallerin üretim maliyetleri olarak sınıflandırılır. Türkiye güç Hatipoğlu tarafından yapılan bir çalışmada, sistemi üzerinde kurulması planlan bir rüzgâr santralının kullanım kapasitesi, yatırım maliyeti ve işletme maliyeti detaylı olarak analiz edilmiştir [12]. Buna göre 50 MW’lık bir santralin yaklaşık kurulum ve işletme maliyetine etki eden parametreler ortaya konulmuştur.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan metodoloji ve teknik terminoloji, üçüncü bölümünde bulgular verilirken dördüncü ve son bölümde ise sonuç ve öneriler verilmiştir.

2. SİSTEM TASARIMI (DESIGN OF THE SYSTEM)

Bir enerji iletim bölgesi içinde kurulabilecek aday rüzgâr santrallerinin belirlenmesinde kullanılan akış diyagramı Şekil 1’de verilmiştir. Buna göre öncelikle santrallerin kurulması düşünülen bölgenin rüzgâr enerji üretim potansiyeli belirlenmiştir. Rüzgâr potansiyeli belirlenen bölgede kullanılacak rüzgâr türbin teknolojileri ve bu teknolojilerin kurulum maliyetleri ve kurulması düşünülen santral gücü tespit edilmiştir. Kurulacak olan santrallerin şebeke bağlantı noktasına olan uzaklıklarına bağlı olarak bağlantı maliyetleri tespit edilerek kurulum maliyetlerine eklenmiştir. Elde edilen bağlantı konfigürasyonlarına göre kurulum maliyetleri tespit edilerek her bir santralin belirlenen bağlantı noktası için birim kurulum ve üretim maliyetleri tespit edilmiştir.



Şekil 1. Bağlantı bölgelerini belirlemeye yönelik yeni önışlem yaklaşımı

Yeni önışlem yaklaşımını mevcut çalışmalardan ayıran özelliği; bölgenin rüzgâr potansiyeli, bölgenin coğrafi özellikleri (pürüzlülük, yükselti, vb.), rüzgâr türbini teknolojileri, baralara bağlanabilecek santral sayıları, sisteme bağlanabilecek maksimum rüzgâr santral sayısı ve birim üretim maliyetleri bir arada değerlendirilerek bölgenin bara bağlantı konfigürasyonlarına bağlı haritalarının oluşturulmasıdır.

2.1. Bölgesel Rüzgâr Analizi (Regional Wind Analysis)

Bölgenin tamamında kullanılacak uzun dönem rüzgâr veri setinin tespit edilmesi için WindPRO programı kütüphanesindeki online yükselti ve pürüzlülük haritaları kullanılarak bölgenin bütünleştirilmiş haritası elde edilmiştir. Dikkate alınan bölge üzerinde bulunan uzun dönem rüzgâr verileri ile MGM çatalca radar istasyonuna ait 2009-2010 yıllı rüzgâr verilerin GIT modülü kullanılarak saatlik bazda korelasyonları yapılmıştır.

Bölgesel rüzgâr analizinde kısa dönem rüzgâr hızı veri seti olarak 41.341185° Kuzey Enlem ve 28.356778° Doğu Boylamı koordinatlarında ve denizden yüksekliği 369 m olan MGM ye ait çatalca radar istasyonuna ait 10 m yükseklikte 01.01.2009-11.01.2010 tarihleri arasında ölçülmüş saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. Uzun dönem veri seti olarak MERRA_basic_E28.002_N41.000 veri seti kullanılmıştır. Elde edilen korelasyon sonuçlarına göre en yüksek uyumu gösteren uzun dönem rüzgâr verisi ile referans rüzgâr verisi lineer regresyon yöntemi kullanılarak bölgesel en yüksek temsil kabiliyeti olan yeni uzun dönemli

rüzgâr verisine dönüştürülmüştür. Bu veri seti tüm bölgenin rüzgâr hızı analizinde kullanılmak üzere baz rüzgâr profili olarak seçilmiştir.

Bölgenin Weibull parametreleri kullanılarak her bir koordinat için ortalama rüzgâr hızı, moment yöntemi Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır [13].

$$V_{ort_{i,j,k}} = wc_{i,j,k} \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{wk_{i,j,k}}\right) \quad 1$$

Burada; $V_{ort_{i,j,k}}$ i . çiftlik alanında j . teknolojisinde ve k yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızını, Γ eksik gamma fonksiyonunu, $wc_{i,j,k}$ ise i . çiftlik alanında j . türbin teknolojisinde ve k yüksekliğinde ortalama Weibull ölçü parametresini ve $wk_{i,j,k}$ ise i . çiftlik alanında j . türbin teknolojisinde ve k yüksekliğinde ortalama Weibull şekil parametresini göstermektedir.

Farklı kule yüksekliğine sahip türbinlerin güç çıkışlarının hesaplanabilmesi için göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının ve bölgedeki sürtünme katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Çalışma kapsamında farklı yükseklikteki ortalama rüzgâr hızları Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$v_{i,k} = v_{ref} \left(\frac{H_k}{H_{ref}}\right)^{\alpha_{i,k}} \quad 2$$

Burada; H_{ref} referans yüksekliği, H_k k . çalışma yüksekliğini, $v_{i,k}$ i . çiftlik alanında k yüksekliğinde rüzgâr hızını, v_{ref} referans yükseklikteki rüzgâr hızını ve $\alpha_{i,k}$ i . çiftlik alanında k yüksekliğinde sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, farklı çözünürlükler değerleri için tüm çalışma bölgesinin, 70 m baz alınarak 74,5 m ile 110 m aralığında farklı yüksekliklerde sürtünme katsayıları ve ortalama rüzgâr hızları elde edilmiştir. Buna bağlı olarak farklı yükseklikte hesaplanan rüzgâr hızlarının ortalama değeri 70 m deki yükseklik baz ortalama hızına göre hesaplanmıştır. Böylece alan içerisindeki tüm noktaların aynı rüzgâr hızı katsayısı ile çarpılmasına olanak sağlayan zamandan bağımsız rüzgâr serileri elde edilebilmektedir.

Referans rüzgâr hızları, WindPRO yardımıyla hesaplanan her bir koordinatın ortalama rüzgâr hızı ile çarpılarak her nokta için dikey rüzgâr profili elde edilmiştir. Referans rüzgâr hızı kullanılarak ortalama rüzgâr hızlarına bağlı her bir koordinat için türetilmiş rüzgâr hızlarının hesaplanması amacıyla ise Eşitlik 3'te verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$v_{h_{i,k}} = \frac{v_{ort_{i,k}}}{v_{ort_{ref}}} \times v_{ref} \quad 3$$

Burada; v_{ref} referans rüzgâr hız vektörünü ve $v_{h_{i,k}}$ i koordinatı için rüzgâr hız vektörünü göstermektedir.

2.2. Farklı Türbin Tiplerine Bağlı Kapasite Faktörlerinin Tespit Edilmesi (Determination of Capacity Factors Related to Different Turbine Types)

Noktasal kapasite faktörlerinin hesaplanması amacıyla farklı teknolojilere sahip rüzgâr türbinlerine ait rüzgâr hızı-güç eğrileri, eğri uydurma yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Eğri uydurma yönteminde 8. mertebeden Gauss eğri uydurma modeli kullanılmıştır [14]. Koordinat sistemleri için oluşturulan rüzgâr verileri ile rüzgâr türbinlerine ilişkin hız-güç fonksiyonları kullanılarak saatlik üretilen enerji miktarının hesaplanmasında Eşitlik 4 kullanılmıştır.

$$E_{b_{i,j,k,t}} = P_{i,j,k} \times t(1 \text{ saat}) \quad 4$$

Elde edilen brüt enerji değerlerinden enerji iletim sisteminde meydana gelen kayıplar ve türbinlerin çiftlik üzerindeki etkileşimleri sonucu meydana gelen kayıp değerleri düşülerek net enerji değeri Eşitlik 5'e göre hesaplanmıştır. Hesaplama enerji iletim kayıpları toplam üretimin % 1'i, türbinlerin çiftlik üzerindeki etkileşimleri sonucu meydana gelen kayıp değerleri ise toplam brüt üretimin % 2'si olduğu varsayılmıştır [15].

$$E_{n_{i,j,k,t}} = E_{b_{i,j,k,t}} \times (1 - (P_{kayıp} + C_{kayıp})) \quad 5$$

Burada; $E_{n_{i,j,k,t}}$ i . rüzgâr çiftlik bölgesi içinde j teknolojisinde k yüksekliğinde üretilen net enerji değeri (MWh/yıl), $P_{kayıp}$ enerji iletim hattı kayıp oranı ve $C_{kayıp}$ çiftlik konfigürasyonundan dolayı oluşan kayıp oranı olarak tanımlanmaktadır.

Çalışma periyodu içerisinde üretilen toplam net rüzgâr enerjisi Eşitlik 6'da verilen eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$E_{top_{i,j,k}} = \sum_{t=1}^N E_{n_{i,j,k,t}} \quad 6$$

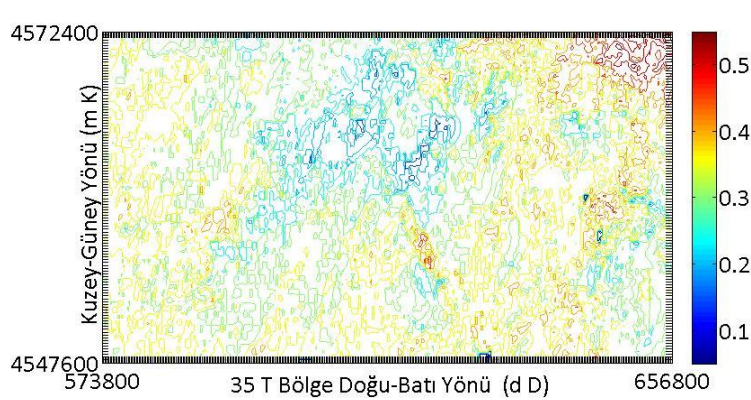
Burada; $E_{top_{i,j,k}}$ i . koordinattaki çiftlik için j . rüzgâr generatör teknoloji ve k yüksekliğinde üretilen toplam enerji değeri (kWh)'dir.

Çalışma periyodu içerisinde üretilen toplam enerjinin seçilen türbin modelinin nominal gücünün toplam çalışma süresiyle çarpılması sonucunun da elde edilen değere bölünmesi ile her bir koordinatın kapasite faktörü Eşitlik 7'den elde edilmiştir. Çalışma periyodu bir yıl (8760 saat) olarak alınmıştır.

$$KF_{i,j,k} = \frac{E_{top_{i,j,k}}}{pm_j \times N} \quad 7$$

Burada; pm_j j . rüzgâr generatör teknolojisinin nominal güç değeri (kW), N çalışma periyodu (h) ve $KF_{i,j,k}$ i . koordinattaki çiftlik için j . rüzgâr generatör teknoloji ve k yüksekliğinde hesaplanan kapasite faktörü olarak ifade edilmektedir.

Evrensel Enlem Merkatörü'ne göre 35T bölgesi üzerinde bulunan 573800-656800 dD Doğu ile 4547600-4572400 mK kuzey koordinat aralığı içinde 200mx200m çözünürlükte ve 100m yükseklikteki kapasite faktörü dağılım örneği Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. GE 2,85 MW rüzgâr türbinine ait kapasite faktörü haritası

2.3. Rüzgâr Çiftliklerinin Büyüklüklerine Göre Çalışma Alanlarının ve Matris Sayılarının Belirlenmesi (Determination of Working Areas and Matrix Number According to the Size of Wind Farms)

Kapasite faktörlerinin belirlenmesi işleminin ardından kurulması düşünülen çiftlik büyüklüklerinin hesaplanması için her bir rüzgâr türbininin 3Dx7D değerinde birim alana ihtiyacı olduğu varsayımı dikkate alınmıştır. Kurulması düşünülen bir rüzgâr çiftliği için ihtiyaç duyduğu toplam kurulum alanı baz çiftlik gücü (50 MW veya 100 MW gibi) ile rüzgâr türbininin nominal gücünün değer birim alan ile çarpılmasıyla Eşitlik 8'de verilen eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$CA = BA \times \frac{wfp}{pm_j} \quad 8$$

Burada; CA baz rüzgâr çiftliği kurulumu için gerekli alan (m^2), BA bir rüzgâr türbini için gerekli alan ($3D \times 7D$) (m^2), wfp hedeflenen nominal çiftlik gücü ve pm_j j. rüzgâr generatör teknolojisinin nominal güç değeri (MW) olarak ifade edilmektedir.

Çalışılan bölgenin başlangıç ve bitiş enlem ve boylam değerlerinin farkları kullanılarak çalışma bölgesinin Doğu-Batı yönü (X) ve Kuzey Güney (Y) yönü eksen yönünde olan uzunlukları Eşitlik 9'a göre hesaplanabilmektedir. Test bölgesindeki iki koordinat arasındaki mesafe (çözünürlük) Eşitlik 10'da verilen eşitliği kullanılarak tespit edilmektedir.

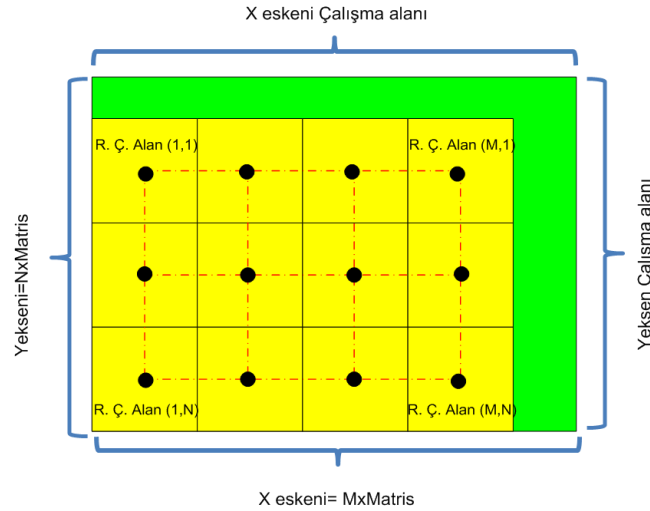
$$TA = (X_{\text{son}} - X_1) \times (Y_{\text{son}} - Y_1) \quad 9$$

$$C = (X_2 - X_1) \quad 10$$

Burada; X Doğu-Batı yönü koordinatlarını ve Y Kuzey Güney yönü koordinatları, TA çalışma alanını (m^2) ve C iki koordinat arasındaki kalan mesafeyi (çözünürlük) (m) göstermektedir. Bir çiftliğin ihtiyaç duyduğu toplam kurulum alanının bir kenar uzunluğu Eşitlik 11'de verilen eşitlik kullanılarak elde edilmektedir.

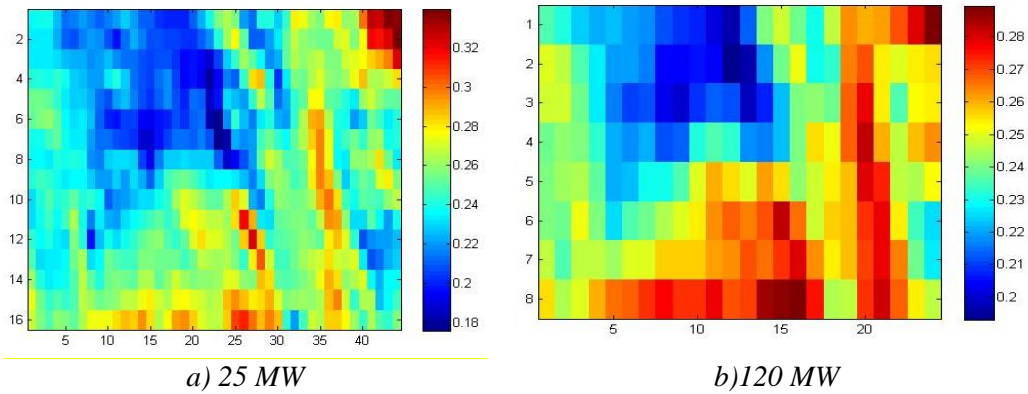
$$M_i = \sqrt{CA} \quad 11$$

Bu ifade de; Şekil 3'te görüleceği gibi M_i bir çiftliğin kare matris olması durumunda X ve Y ekseninde ihtiyaç duyulan iki komşu çiftliğin merkezi arasındaki mesafeyi (m) ifade etmektedir. Elde edilen çiftlik kurulum sayılarının tam sayı olmaması durumunda matris boyutunun en yakın bir üst tamsayıya yuvarlanarak kurulabilecek çiftlik sayısı ve kullanılacak alan yeniden revize edilmektedir. Bu şekilde nihai çalışma alanı tespit edilmiştir. Çiftlik kurulumu dışında kalan alanlar buradaki çalışmalarda dikkate alınmamıştır. Şekil 3'te sarı bölge her bir çiftlik alanını gösterirken yeşil bölge hesaplamalarda kullanılmayacak alanı, X eksen çalışma alanının doğu batı yönündeki uzunluğunu ve Y eksen ise kuzey güney yönündeki uzunluğunu göstermektedir. Bundan sonraki çalışmalarda sarı ile taranmış bölgeler analize dâhil edilmiş olup, bu bölgede X yönünde M adet Y yönünde ise N adet toplamda $M \times N$ adet potansiyel çiftlik olacağı dikkate alınmıştır.



Şekil 3. Rüzgâr çiftlikleri için bölgesel matris düzeni

Matris boyutunun tespit edilmesi ile her bir alanın içinde kalan rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörleri toplanmış ve toplam alan içindeki eleman sayısına bölünerek her bir çiftliğin ortalama kapasite faktörü bulunmuştur. 70 m yükseklik ve 200 m x 200 m çözünürlükte elde edilen bölgesel verilerin farklı rüzgâr çiftliği güçleri için hesaplanan kapasite faktörlerinin dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi Nominal çiftlik gücü sayısı artıkça kurulabilecek çiftlik sayısı da azalmaktadır. 25 MW nominal kurulu gücü için 16x40 bir çiftlik alanı oluşmaktayken 120 MW Kurulu güç için 8x20'lik çiftlik alanı oluşmaktadır.



Şekil 4. 25 MW ve 120 MW Nominal çiftlik güçlerine göre kapasite faktörü dağılımı (Renk Skalası kapasite faktörünü göstermektedir)

2.4. Maliyet Hesabı (Cost Calculation)

Rüzgâr santrallerin ekonomik analizi kurulum maliyetleri ve işletme maliyetleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır. Kurulum maliyetleri; rüzgâr santrallerinin teknolojilerine bağlı imalat maliyetleri, çiftlik içi kurulum maliyetleri ve şebeke entegrasyon maliyetlerinden oluşmaktayken, işletme maliyetleri ise personel giderleri, sigortalama, bakım ve onarım maliyetlerinden meydana gelir.

Maliyet hesaplamaları doğrudan türbin teknolojilerine bağlı olarak yapılmaktadır. Çalışma kapsamında hazırlanan yöntem ile herhangi bir türbin teknolojisinin ekonomik analizinin değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Bu hedefle aynı büyüklükteki çiftlik alanları için SIEMENS SWT-3.0-101 rüzgâr türbininin 74,5 m, 89,5 m ve 94,0 m kule yükseklikleri ile GE-2.85-100 rüzgâr türbininin 75 m, 85 m ve 98,3 m kule yüksekliklerinde ekonomik karşılaştırmaları yapılmıştır. Şebeke ve rüzgâr çiftliğinin ortak bağlantı noktası (OBN) arasındaki enerji nakil hattı (ENH) ve yüksek gerilim elemanlarının maliyet kalemleri [12] numaraları referansta belirtilen maliyet parametrelerine göre Eşitlik 12 kullanılarak tanımlanmıştır.

$$lh_{l,i} = \sqrt{(X_{ort_i} - X_{bra_k})^2 + (Y_{ort_i} - Y_{bra_k})^2} \quad 12$$

Burada; $lh_{l,i}$ i . rüzgâr çiftliği bölgesinin orta noktasının k . baraya olan uzaklığı (m), X_{ort_i} i . rüzgâr çiftliği bölgesinin orta noktasının x doğrultusundaki koordinatı, Y_{ort_i} i . rüzgâr çiftliği bölgesinin orta noktasının Y doğrultusundaki koordinatı, X_{bra_k} k . baranın X doğrultusundaki koordinatı, Y_{bra_k} k . baranın Y doğrultusundaki koordinatı, i çiftlik indeksi ($1 \dots nf$) ve k bara indeksi ($1 \dots ns$) olarak tanımlanmaktadır.

2.4.1. Test Bölgesi için Yıllık İndirgenmiş Maliyet Hesabı (Annual Reduced Cost Calculation for Test Zone)

Bu bölümde rüzgâr çiftliğinin kurulumu için yapılan toplam maliyetler elde edilmiştir. Elde edilen kurulum maliyeti, kullanılarak yıllık indirgenmiş maliyet haline dönüştürülmektedir [16]. Buna göre uzun dönem kredi faiz değeri % 3,27 olarak hesaplanmıştır [17]. Gerçekleştirilen çalışmada yatırım süresi ise türbinin işletme ömrü olarak kabul edilen 25 yıl olarak kabul edilmiştir.

2.5. Güç Sistemi ve Sistem Değişkenlerinin Tanımlanması (Defining Power System and System Variables)

Güç sistemi analizinde ulusal şebekenin bir bütün olarak analiz edilmesi oldukça zordur. Bu sebeple çalışmadan doğrudan etkilenecek bölgenin seçilmesi ve seçilen bölgeye ilişkin analizlerin yapılması gerçekleştirilen analizlerin anlaşılabilirliğini artıracak gibi hesaplama zamanını da düşürecektir. Bu çalışmada Türkiye Ulusal Elektrik Enerjisi sistemine bağlı birinci iletim sistemde bulunan İkitelli (B1), Büyükçekmece (B2), Çatalca (B3), Silivri (B4), Trakya Elektrik (B5), BOTAŞ (B6) ve Akçansa (B7) baralarını içine alan güç sistemi bölümü çalışma alanı olarak seçilmiştir. Ele alınan bölgenin modellenmesi amacıyla; gerekli olan iletim hatlarının baralar arasındaki uzunlukları, İletim hatlarına ilişkin elektriksel parametreler, transformatörlerin nominal güçleri, generatörlerin maksimum ve minimum üretim değerleri

kullanılmıştır [18]. Çalışma esnasında yüklerin sürekli değişkenlik arz edeceği ihmal edilerek 2012 yılının yaz mevsiminde maksimum tüketimin olduğu 27.07.2012 günü saat 14:30'da gerçekleşen puant üretim ve yükler sabit kabul edilmiştir [19].

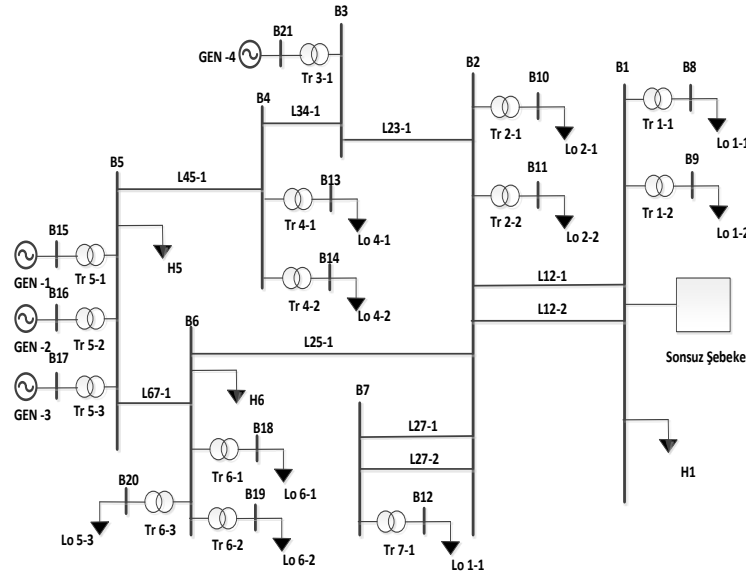
2.5.1. Test Güç Sistemi (Test Power System)

Yedi baralı sistem üzerinde 3 adet konvansiyonel elektrik enerjisi üretim santrali B5 barası üzerinden, bir adet rüzgâr santrali ise B3 barası üzerinden sisteme bağlanmıştır. Ulusal şebeke ile bağlantının yapıldığı B1 barası ise salınım barası olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında Tablo 1'de gösterilen iki farklı rüzgâr santrali üreticisine ait model ve bu modellerin kurulabilir kule yüksekliklerinde çalışma durumları ayrı ayrı analiz edilmiştir [20]. Bölge 440 adet potansiyel rüzgâr çiftlik alanı 2 farklı teknoloji ve her teknolojinin 3 farklı yükseklik için değerlendirilmiş olup toplamda aday rüzgâr santrali sayısı 2460 adet olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. İki farklı rüzgâr santrali üreticisine ait türbinlerin teknik özellikleri

Marka	Teknoloji	Nominal Güç (MW)	Kule Yüksekliği (m)	Rotor Çapı (m)	Nominal Devir (dev/dk)
Siemens SWT	SMSG	3	74,5-89,5-94	101	16
GE	ÇBAG	2,75	75 -85- 98,3	100	14,8

Şekil 5'te tanımlanan güç sistemi bileşenleri; yükler, generatörler, iletim hatları ve transformatörlere ilişkin bilgiler [20] içinde verilmiştir.



Şekil 5. Birinci iletim hattına bağlı yedi baralı sistemin tek hat şeması

2.5.2. Havza Tespiti (Basin Determination)

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında her rüzgâr santrali bölgesinin bağlanacağı baranın tespiti için en düşük birim enerji maliyeti baz alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma sonucu en düşük üretim maliyetini veren baraya ait santral bölgesi Eşitlik 13 ile hesaplanmıştır. Böylece tüm bölgelere en düşük üretim maliyetine göre bir baraya tanımlanarak baraların bölgeleri belirlenmiştir.

$$SBM_{i,j,k} = \min\{BM_{i,j,k,l}\}_{l=1}^{ns} \quad 13$$

Burada; $SBM_{i,j,k}$ seçilen en düşük maliyet barası vektörünü, $BM_{i,j,k,l}$ i . bölgede j . teknolojinin, k . kule yüksekliğinde ve l . barasında birim enerji üretim maliyetini ve ns sistemde bağlanabilir bara sayısının

toplamı göstermektedir. $SBM_{i,j,k}$ vektörü içerisinde; bağlantı noktasının koordinat bilgilerini, iletim hattının baraya olan uzaklığını, toplam yatırım değerini, indirgenmiş yatırım değerini ve birim enerji üretim değerini barındırmaktadır.

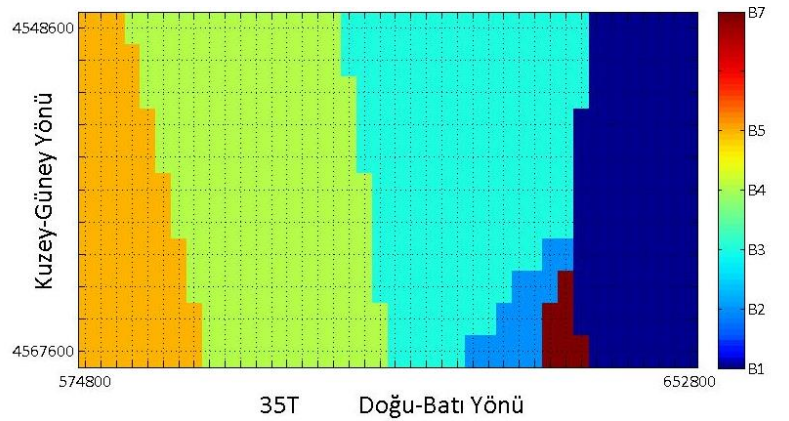
3. BULGULAR (RESULTS)

200 m x 200 m çözünürlükte 70 m yükseklikte yapılan hesaplamalarda 440 adet rüzgâr bölgesi bulunmuş ve bulunan her bir bölge Tablo 2’de verildiği gibi enerji üretim maliyeti, indirgenmiş yıllık enerji maliyeti, birim enerji maliyetlerine göre atandıkları bölgeler hesaplanmıştır.

Tablo 2. Yatırım analizi için varsayılan başlangıç değerleri

Bara	Lh_i (m)	$M_{i,j,k,l}$ (M€)	$OCW_{i,j,k,l}$ (M€)	$BM_{i,j,k,l}$ (€/kWh)
B1	11,82	42,86	3,072	0,022293
B2	12,26	42,91	3,075	0,022312
B3	57,73	47,45	3,344	0,024265
B4	35,35	45,22	3,211	0,023304
B5	11,87	42,87	3,073	0,022296
B6	58,10	47,49	3,346	0,02428
B7	17,94	43,48	3,108	0,022556

Tablo 2’de 638800 X Koordinat 4550600 Y Koordinatı orta noktasına sahip bölgedeki potansiyel rüzgâr santralının en düşük birim enerji maliyeti 0,022293 €/kWh olarak hesaplanmış ve bu koordinattaki aday rüzgâr çiftliği B1 barasına atanmıştır. Her rüzgâr santrali bölgesinin bir baraya atanması ile çalışma bölgesi kendi içinde bara havzalarına dönüştürülmüştür. Bara havzalarının dağılımı Şekil 6’da verilmiştir. Çalışma bölgesi içinde bulunan bara bölgeleri farklı renklerle ifade edilmektedir.



Şekil 6. 70 m yükseklik ve 200 m x 200 m çözünürlükte birim enerji maliyetine göre bara bölgelerine ayrılmış havzalar

Havza sınırları içerisinde her bir bara bölgesinin belirlenmesi sonucunda bölgedeki potansiyel santrallerin kapasite faktörleri dikkate alınarak kurulabilecek rüzgâr santrallerinin enerji üretim değerleri hesaplanabilmektedir. Çalışma kapsamında 200 m x 200 m çözünürlükte ve 70 m yükseklikte hazırlanmış birim enerji üretim değerine göre elde edilen sayısal değerlerin toplam sonuçları Tablo 3’te verilmiştir.

Koordinatlar arasında yapılan analizde 440 adet rüzgâr çiftliği bölgesi hesaplanmıştır. Buna göre elde edilen çiftlikler her bir bölgeye göre farklı olarak dağılmış en çok çiftlik 141 adet ile Silivri barasında en düşük bağlantının ise B6 barasında olduğu hesaplanmıştır. Tablo 3’ten görülebileceği gibi B6 barasında bağlantı olmamasının sebebi; B5 barasının B6 barasına yakın olması ve B5 barasının çalışma bölgesine yakın olması sebebi ile iletim maliyetlerinin B6 barasına göre daha düşük çıkmasıdır.

Tablo 3'ten görüldüğü gibi B3 bölgesinde alan bazında 6650 MW rüzgâr gücü potansiyeli olduğu fakat bölgeye bağlanabilir 133 adet rüzgâr santrali göz önünde alındığında 50 MW'lık santrallerin kapasite faktörleri ile çarpılması sonucunda bölgenin kullanılabilir potansiyelin 1791,32 MW değerine düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Rüzgâr potansiyelinin yüksek olmasına rağmen kapasite faktörleri dikkate alındığında bölgenin kullanılabilir rüzgâr gücünde büyük düşüşlerin olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Test bölgesinde 50 MW'lık rüzgâr çiftlikleri kurulması durumundaki bara bazındaki çiftlik dağılımları

Çiftlik Bilgisi	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Toplam rüzgâr çiftliği sayısı (Adet)	84	13	133	141	63	0	6
Toplam Potansiyel Güç (MW)	4200	650	6650	7050	3150	0	300
Hesaplanan KF	0,31	0,30	0,27	0,27	0,30	0	0,31
KF Bağlı Güç (MW)	1284,64	196,76	1791,32	1889,11	943,7	0	94,241

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bölgesel veriler, ölçülmüş rüzgâr verileri, uzun dönem hesaplanmış rüzgâr verileri ve kurulum ve işletme maliyet bileşenleri kullanılarak rüzgâr enerji santralleri için bara bölgelerini belirlemeye yönelik yeni bir önışlem yaklaşımı geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada farklı yükseklikte farklı teknolojilerin değerlendirilmesi sağlanmış olup bir bölge veya ülkenin geneli için kullanılacak rüzgâr santral modeli, teknolojisi, hedef yüksekliği ve hedef maliyet aralığı gibi önemli sorulara cevap verilebilmektedir. Enerji iletim sisteminin planlanması yüksek maliyetler gerektiren bir işlem olabilir. Bir bölgenin rüzgâr potansiyeli değerlendirilmesinde güç sistemi bileşenleri teknik ve ekonomik açıdan dikkate alınmadan analizler yapılması ülkenin hedef planlamalarında önemli hatalar yapılmasına sebep olmaktadır. Çalışma kapsamında bölgesel rüzgâr verilerinin güç sistemi bileşenleriyle birlikte değerlendirilmesi sonucunda bölgenin bağlanabilir rüzgâr potansiyelinin tespitinde sonuçların daha pratik hızlı etüt için bulunmasına ve uzun dönem planlamaların daha doğru yapılmasına yeni seçenekler sunmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma [20] no'lu referansta verilen tezden üretilmiştir. Çalışmada referans alınan tez TÜBİTAK 2214 doktora sırası bilim insanı destekleme bursu kapsamında B.14.2.TBT.0.06.01-214-6041 sayılı bursu ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2012-04-02-DOP04 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Rüzgar Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi, Türkiye'de Rüzgardan Üretilen Elektriksel Güç İçin İzleme ve Tahmin Sistemi Geliştirilmesi Projesi <http://www.ritm.gov.tr/root/index.php>. Erişim Tarihi Temmuz, 9, 2019.
- [2] Türkçü, Sİ. (2006). Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Politikaları ve Enterekonekte Sistemlere Entegrasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Jowder FAL. Wind Power Analysis and Site Matching of Wind Turbine Generators in Kingdom of Bahrain, Applied Energy, 86:4(538-545), (2009).
- [4] Ahmed AS. Analysis of Electrical Power Form the Wind Farm Sitting on the Nile River of Aswan, Egypt, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15:3(1637-1645), (2011).
- [5] Firtın E., Güler Ö. and Akdağ SA. Investigation of Wind Shear Coefficients and Their Effect on Electrical Energy Generation, Applied Energy, 88:11(4097-4105), (2011).

- [6] Seguro JV and Lambert TW. Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85:1(75-84), (2000).
- [7] Bulut YM and Açıklık E. Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanmasında Parametre Tahmin Yöntemlerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1:2(49-54), (2013).
- [8] Mortensen N.G., Landberg L., Troen I., Rathmann O. and Lundtang PE. Wind Atlas Analysis and Application Program (Wasp) Vol. 3: Utility Programs. Risø National Laboratory, Danka Services International A/S, Denmark, (2001).
- [9] Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems* (First Edition). Sweden: John Wiley&Sons Ltd.
- [10] Fingersh, L.J., Hand, M.M. and Laxson, A.S., *Wind Turbine Design Cost and Scaling Model (NREL/TP-500-40566): National Renewable Energy Laboratory (NREL) Teknik Raporu* <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40566.pdf>. Erişim Tarihi Temmuz, 9, 2019.
- [11] Kekezoglu B., Erduman A., Durusu, A., Nakir, İ. and Tanriöven, M., (2011). Reliability Assessment of Wind Energy System Considering Turbine Dimensions, Set2011. İstanbul: 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies, İstanbul.
- [12] Hatipoğlu, A. (2010). Rüzgâr Santrallerinde Rüzgâr Karakteristiği ve Saha Topografisine Göre Türbin Seçimi ve Yerleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] Wen J., Zheng Y. and Donghan, F. A Review on Reliability Assessment for Wind Power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:9(2485-2494), (2009).
- [14] Nielsen, P., Villadsen, J., Kobberup, J., Thørgersen, M., Sørensen, M., Sørensen, T., Albinus, L. and Chun, S., *Windpro 2.5 User Guide*, EMD International A/S http://www.emd.dk/files/windpro/manuals/for_print/MANUAL_2.7.pdf. Erişim Tarihi Temmuz, 9, 2019.
- [15] Bhatt MS., Energy efficiency improvement of electrical transmission distribution networks, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 62:(473-490), (2003).
- [16] Sathyajith, M. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics* (First Edition), New York: Springer Science & Business Media.
- [17] Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası, Euro Üzerinden Açılan Mevduata Bankalarca Filen Uygulanan Azami Yıllık Faiz Oranları, <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Faiz+Istatistikleri/Kamu+Banka+Mevduat+Azami+Faiz/>. Erişim Tarihi Temmuz, 9, 2019.
- [18] TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Etüd ve Raporlama Daire Başkanlığı, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Generatörlerin Elektriki Karakteristikleri, Sa-2004/1, Ankara, (2004).
- [19] TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Etüd ve Raporlama Daire Başkanlığı Sistem İşletme Etütleri Müdürlüğü, 2012 Puant (Yaz) Yük Şartlarında Yük Akışı, Üç Faz ve Faz Toprak Kısa Devre Etüdü, Se-2012/3, Ankara, (2012).
- [20] Erduman, A. (2015). Ulusal Enerji Şebekesine Bağlanabilecek Optimum Rüzgâr Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.