

# Rüzgar Enerji Santrallerinde Mekanik Güç ve Elektrik Güç Kavramları ve Bu Kavramlar Aracılığı ile Kapasite Faktörünü Arttırma Senaryo ve Analizleri

Besim Kıvanç Deneçli

Erciyes Anadolu Holding, RHG EnerTurk, [kivanc.denecli@enerturk.com](mailto:kivanc.denecli@enerturk.com)

## ÖZET

*Rüzgâr enerji santrallerini oluşturan rüzgâr türbinlerinin etiket değerleri üzerinden güçlerinin toplamı o santralin mekanik kurulu gücünü temsil eder. Türbinlerin etiket değerlerini ise içinde buldukları jeneratör etiketi belirler. Elektrik kurulu güç ise TEİAŞ tarafından verilen kapasiteye karşılık rüzgâr santralinin anlaşıma gücü kapsamında bağlantı noktasında sisteme verebileceği maksimum çıkış gücünü temsil eder. Bir rüzgâr santralinin verimliliğinin ölçülmesinde kullanılan kapasite faktörü hesaplanırken elektrik kurulu gücü baz alınır. Bu bildiri bu tanımlar tartışılacak, mekanik güç arttırıldığında santral kapasite faktörünün değişimi ve gerçekleşen değerler üzerinden verimlilik analizleri, güç eğrileri ile yapılacaktır. Santral elektrik gücü dikkate alınarak değişik senaryolarda gerçekleşen değerler üzerinden modelleme ve analizler yapılacaktır. Son olarak literatür araştırma sonuçları ile dünya genelinde konuyu destekleyici örnekler verilecektir.*

**Anahtar kelimeler:** Kurulu güç, elektrik kurulu güç, mekanik kurulu güç, kapasite faktörü, güç eğrisi

## 1.GİRİŞ

Elektrik enerjisi talebi ve buna bağlı olarak üretim ihtiyacı giderek artış göstermektedir. Bu durumda enerji tüketiminde olduğu gibi enerji üretiminin de verimli olması gerekmektedir. Bir santralin verimini tanımlayan ölçüm metotlarından biri de kapasite faktörüdür. Kapasite faktörü; bir santralin belirli bir zaman aralığında, ürettiği gücün kurulu güç anlamında üretebileceği güce oranıdır.

TEİAŞ tarafından belirlenen bağlantı gücü kapasitesi, yani santrale tanınan maksimum üretim kapasitesi; rüzgâr santrallerinde rüzgârın değişken yapısı nedeni ile verimli kullanılmadığından hibrit ve dahası depolama sistemlerine ihtiyacı doğurmuştur. (Rüzgâr türbinli ve pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerde lisans ve trafo kapasitelerinin efektif kullanılması, 2018). Hibrit santraller ve daha sonrasında depolama ile ilgili düzenlemelerle bu anlamda gelişmeler olmuştur. Rüzgâr santrallerini oluşturan rüzgâr türbinlerinin de verimli kullanılması, hibrit ve depolama düzenlemeleri kadar önemlidir.

Bu yazının amacı olarak; Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği'nde geçen mekanik kurulu güç (MW<sub>m</sub>) kavramına değinilerek ülke genelinde mevcut ve inşa edilecek enerji üretim tesislerinde verim arttırma fırsatları araştırılacaktır. Bu kapsamda Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği'nde geçen bazı ilgili maddeler şunlardır:

TEİAŞ, Kanununun 23'üncü maddesi çerçevesinde, her yıl rüzgâr enerjisine dayalı başvurular için 1 Ekim, güneş enerjisine dayalı başvurular için 1 Mayıs tarihine kadar, takip eden beş yıl için ve takip eden on yıl için olmak üzere, bağlantı noktasına göre ve/veya bölgesel bazda, sisteme bağlanabilecek rüzgâr veya güneş enerjisine dayalı üretim tesisi kapasitesini Kuruma bildirir. (Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, Madde 12/7-a,2022). Ön lisans başvurularında talep edilen mekanik kurulu güç, elektriksel kurulu gücün iki katını aşamaz. (Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, Madde12/15,

2022). Mekanik kapasite artışı kapsamında ilave edilecek toplam mekanik güç miktarı, işletmede olanlar dahil, lisansa derç edilmiş elektriksel kurulu güç miktarından fazla olamaz. (Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, Madde 24/6-c, 2022)

## 2. KURULU GÜÇ

Kurulu güç; elektrik santrali vb bir tesisin üretebileceği enerji miktarıdır. (<https://dictionary.cambridge.org/>). Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği'nde de bu tanım elektrik kurulu güç ve mekanik kurulu güç şeklinde MWe/MWm olarak sınıflandırılmış ancak ilgili yönetmeliğin tanımlar kısmında bu kavramlara yer verilmemiştir. Lisans, izin vb tüm süreçler bu iki kavram baz alınarak ilerlemektedir.

### 2.1 Elektrik Kurulu Güç (MWe)

T.C. elektrik şebekesi; TEİAŞ tarafından işletilmekte olup sistemin arz ve güvenliğinden TEİAŞ sorumludur. Bu yetki ve sorumluluk ile bir santralin maksimum alabileceği kurulu gücü yani kapasiteyi TEİAŞ belirlemekte ve tesis hayata geçmeden önce yatırımcı ile sistem bağlantı ve kullanma anlaşması imzalamaktadır. Tesisin sisteme zarar vermesini engellemek ya da sistemi desteklemesini sağlamak amacı ile maksimum tüketim miktarı, güç kalitesi, faz dengesizliği vb. kurallar yansın anlaşma gücü de bu anlaşmalar ile imza altına alınır. Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği'nde geçen elektrik kurulu güç tanımı buradaki anlaşma gücünü işaret etmektedir.

#### 2.1.1 Anlaşma Gücü Aşma Hali

İletim Sistemi Sistem Kullanım Anlaşmasında geçen cezai yaptırımlar arasında, anlaşma gücü aşım ihlali maddesi bulunmaktadır. TEİAŞ'ın ilgili birimleri tesisin bağlantı noktasındaki gücünü 15'er dakikalık ölçümlerle kayıt ve takip eder. Buna göre kullanıcının bağlantı noktasında anlaşma gücünün üzerinde elektrik enerjisi vermesi ya da alması halinde verdiği ya da aldığı gücün anlaşma gücünü aşması halinde cezai şart; aşım miktarının aylık sistem kullanım tarifesinin sabit bileşeni (TL/MW) ile çarpılması sonucu bulunan tutarın 2 katı olarak uygulanır.

Rüzgâr enerjisi gibi değişken yapılı enerji kaynaklarını girdi olarak kullanan elektrik üretim santralleri, çıktı olarak değişken olmayan bir elektrik enerjisine sahip olması konusunda esneklik sağlanabilir.

### 2.2 Mekanik Kurulu Güç (MWm)

Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği'nin işaret ettiği mekanik kurulu güç; santral içinde bulunan elektrik üreteçlerinin üretebileceği güçtür. Bu üreteçlerin üretebileceği güç ise üreteç etiket değerlerinde mevcuttur. Örnek olarak bir rüzgâr santralinde 1 MW etiket değerine sahip 7 adet aynı rüzgâr türbininden var ise bu santralin mekanik kurulu gücü 7 MWm'tir.

Mekanik kurulu gücü etkileyen sınır koşulları ise Teknik Etkileşim Raporu gibi sahanın konum ve yapısı gereği oluşan koşullardır.

### 2.3 Örnek ile Elektrik ve Mekanik Kurulu Güç

TEİAŞ tarafından bildirilen bağlantı noktasına göre ve/veya bölgesel bazda, sisteme bağlanabilecek rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisi kapasitesini kuruma bildirdikten sonra örnek olarak 100 MWe bağlantı izinli lisans alan bir yatırımcı türbin tedarik firmasından 3 MW etiket değerine sahip 34 türbin ile santralini projelendirmek istediğinde toplamda 102 MWm kurulu güce ve 100 MWe kurulu güce sahip bir santral projelendirmiş ve lisansını da buna göre almış ya da başvurmuş olacaktır. Burada 2 MW fazlalık olduğu için belirli türbin ya da türbinlerde güç kısmına gidilerek; örnek olarak 1 türbin 3 MW kurulu güce sahip olsa da santral bazında lisans kapasitesini aşmaması için bakanlık kabullerinde ve kati projelerde türbin jeneratör çıkış gücü 1 MW'a indirgenecektir.

Ancak bir rüzgâr türbininde arıza olması ya da bakımda olması durumunda gücü indirgenen türbin, santralin artık 100MWe aşma riski olmamasına rağmen gereksiz yere 2 MW güçten yoksun kalmaktadır. Bunun yerine kısıtlamaların tüm santrallerde var olan scada üzerinden bağlantı noktasında yapılması ülke enerji üretimi verimliliği noktasında şarttır.

Ayrıca; rüzgâr enerjisi değişken yapıya sahip olduğundan, rüzgârdan elde edilen elektrik enerjisi de değişken olacaktır. Bu nedenle, rüzgâr santrallerinin doğalgaz vb. santraller gibi sürekli sabit bir değerde üretimi olmaz. Örnek olarak 100 MWe olarak santral scadasından set edilen bir santralin, rüzgârın değişkenliğinden dolayı mutlaka anlık olarak 100,1-100,2 MW düzeylerine çıkması kaçınılmazdır. Bunun sonucu kendisine cezai işlem uygulanan yatırımcı bu durumu aşmak için santral çıkış gücünü 99,90 MW gibi değerlere set etmektedir. Bu durum da yine ülke genelinde ciddi bir üretilmeyen potansiyel enerji olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu anlamda 13.05.2022 de resmi gazetede yayınlanan 10971 numaralı EPDK kararı gereği; üretim lisansı sahibi tüzel kişilerin güç artışını içerecek şekilde TEİAŞ veya ilgili dağıtım şirketine başvuru yapmaları halinde söz konusu üretim tesislerinin veri yönündeki anlaşma güçleri üzerinde sisteme verecekleri elektrik enerjisinin güç aşımı olarak değerlendirilmemesi uygulamasına geçilmiştir. (Resmi gazete, sayı no: 31834)

### 2.4 Mekanik Kurulu Güç Kavramı

2.2 nolu bölümde değinildiği üzere bir santralin mekanik kurulu gücü, santralde bulunan rüzgâr türbinlerinin etiket değerlerinin toplamıdır. Bu etiket değerleri de aslında türbin jeneratör etiket değerleridir. Dolayısı ile rüzgâr enerji santrallerini oluşturan rüzgâr türbinlerinin jeneratör çıkış güçlerinin toplamı, o santralin mekanik gücünü temsil eder. Yani tanımlanan mekanik kurulu güç aslında mekanik değil yine elektriksel güçtür.

Zira rüzgâr türbinin üretebileceği mekanik güç mevcut etiket değerinin çok üzerindedir.

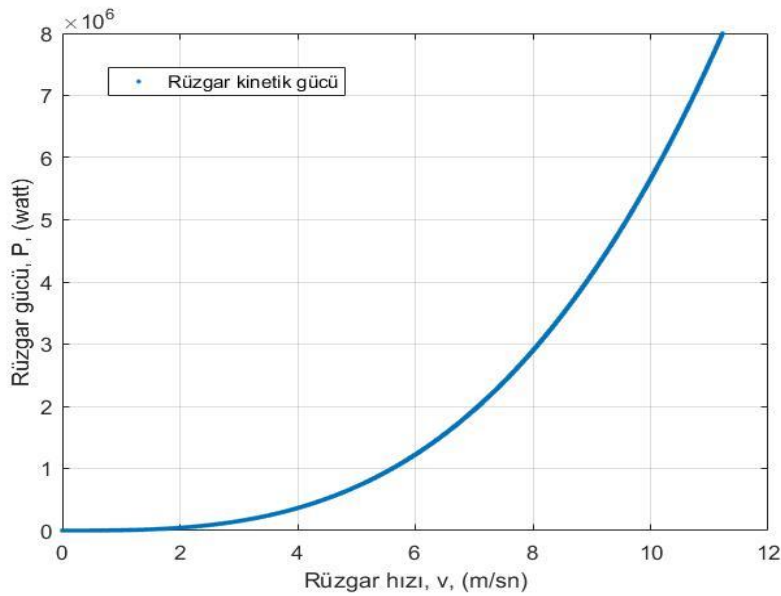
#### 2.4.1 Rüzgâr Kinetik Gücü

Rüzgâr türbinin üretebileceği mekanik güce kısaca değinilecek olursa; rüzgâr gücü denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.1)$$

Burada  $\rho$ , hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ); A, tarama alanı ( $\text{m}^2$ ); v, rüzgâr hızı ( $\text{m/sn}$ ) ve P, rüzgârdan elde edilebilecek kinetik enerji miktarıdır.

Hava yoğunluğu  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ , türbin kanatlarının tarama alanı yarıçapı  $R=60 \text{ m}$  iken rüzgâr hızı  $v=0 \text{ m/sn}$ 'den  $20 \text{ m/sn}$ 'ye kadar değiştirilerek rüzgâr gücü P MATLAB ile hesaplanıp Şekil 1'de grafik olarak çizdirilmiştir. Görüleceği üzere rüzgâr hızı arttıkça elde edilebilecek güç ciddi miktarda artmaktadır.  $11 \text{ m/s}$  rüzgâr hızında rüzgâr gücünün  $8 \text{ MW}$ 'a kadar çıktığı görülmektedir. (Çok rotorlu rüzgâr türbin sistemlerinin modellenmesi ve analizi)



Şekil 1. Rüzgâr hızına göre rüzgâr gücünün değişimi.

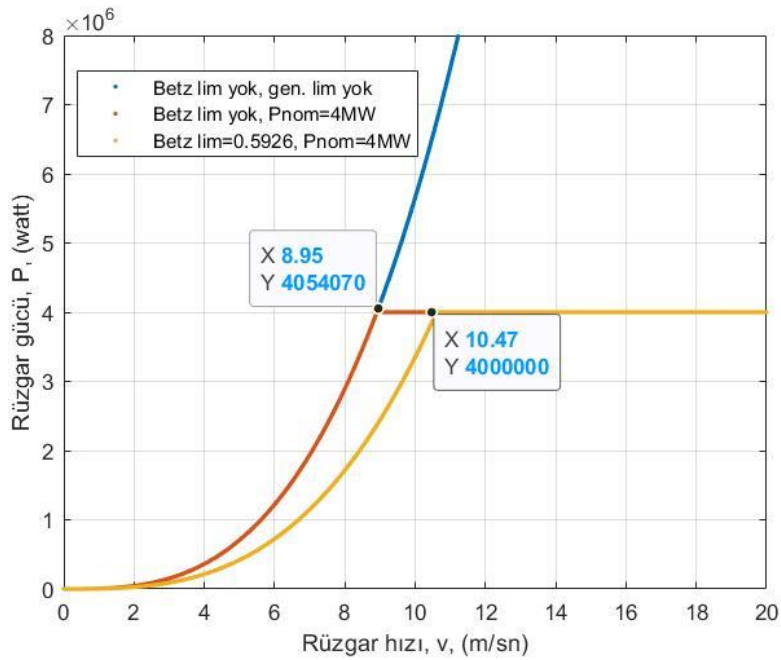
#### 2.4.2 Betz Kanunu

Her bir rüzgâr türbini, rüzgâr kinetik enerjisini belli bir oranda mekanik enerjiye çevirebilir. Bu katsayıya  $C_p$  performans katsayısı denir. Betz yasasına göre bir rüzgâr türbininin milinde bu kinetik enerjinin en fazla %59,3'ü mekanik enerjiye çevrilebilir ve buna da Betz limiti denir.

Dolayısı ile bir rüzgâr türbinin rüzgâr enerjisinden elde edilebileceği maksimum mekanik güç denklem 2.2'deki gibi ifade edilir. (Çok rotorlu rüzgâr türbin sistemlerinin modellenmesi ve analizi)

$$P_{mil} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\beta, \lambda) \quad (2.2)$$

Şekil 2' de  $4 \text{ MW}$  etiketli jeneratöre sahip bir rüzgâr türbini ile rüzgâr kinetik enerjisi karşılaştırılmıştır. Buna göre Şekil-1'deki verilere Betz yasası da dahil edildiği zaman Şekil 2' de görüldüğü üzere, jeneratör gücü  $4 \text{ MW}$  ile sınırlanmayan bir rüzgâr türbininin üretebileceği mekanik güç çok daha fazladır.



Şekil 2. Betz yasası ile rüzgâr hızına göre rüzgâr gücünün değişimi.

Mekanik ya da ses düzeyi gibi sınır koşulları nedeni ile yüksek rüzgâr hızlarında maksimum elektrik enerjisi alınamamaktadır.

Ancak bununla birlikte örnek olarak Nordex firmasına ait 163 metre tarama çapına sahip iki farklı türbin olan N163/5.x ve N163/6.x modellerini ele aldığımızda 163 metre tarama alanından rüzgâr hızı arttıkça artan güç bir türbinde 5.x MW ile sınırlanırken diğer türbinde 6.x MW değerinde sınırlanacaktır.

Sonuç olarak türbin etiketi, türbin içindeki jeneratör etiketine aittir.

## 2.5 İkinci Bölümden Çıkan sonuç ve Öneriler

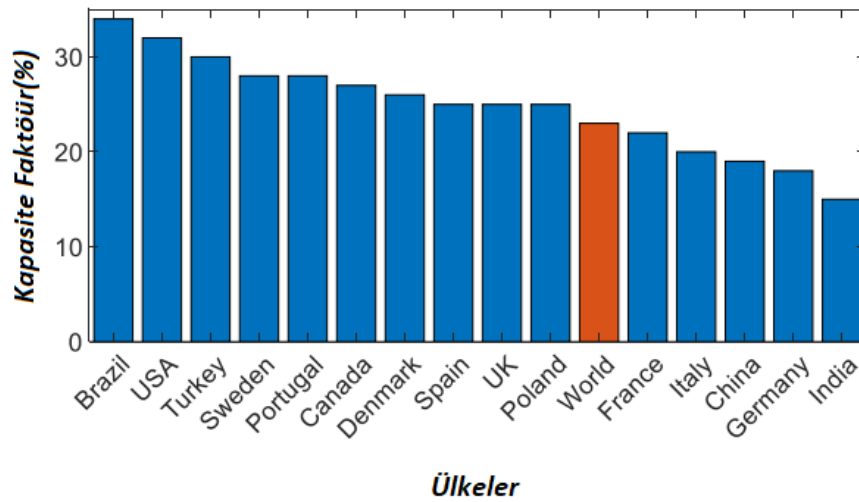
- Mekanik kurulu güç, rüzgâr kinetik enerjisinin türbin tarama alanından kapılıp mil gücüne aktarılabilirdiği maksimum güçtür. Elektrik güç ise rüzgâr türbinin jeneratör çıkış gücüdür. Aynı rüzgâr türbininin içinde farklı etikete haiz jeneratör mevcutsa türbinin kurulu gücü jeneratör etiket değeri ya da kontrol sisteminin set ettiği değer kadar olur. Dolayısı ile santral kurulu gücü santral içindeki türbinlerin elektriksel olarak jeneratör ya da kontrol sistemi vasıtası ile üretebildiği maksimum güçlerin toplamına eşittir.
- Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği vb kanun ve yönetmeliklerde ve lisanslarda geçen MWm ve MWe kavramları gözden geçirilmeli, elektrik kurulu güç yerine anlaşma gücü vb. kullanılmalı ve mekanik güç kavramı ise kaldırılmalıdır. Teknik etkileşim alanı vb. mekanik kısıtlamaları tanımlamak için kullanılan alan, tarama alanı, türbin sayısı vb. tanımların kullanılması daha doğru olur.
- TEİAŞ sınırı olan kurulu gücü geçmemek için kısıtlama türbin bazında değil, santral bazında ve bağlantı noktasında yapılmalıdır.
- TEİAŞ sınırı olan anlaşma gücünün aşılması durumu değerlendirilirken, rüzgâr enerjisi doğasını göz önüne alarak %10'luk bir ihlal payı olmalıdır.

### 3- KAPASİTE FAKTÖRÜ ARTTIRMA SENARYO VE ANALİZLERİ

#### 3.1 Kapasite faktörü

Bir tesis ya da birimin ürettiği enerjinin, belirli bir periyod içinde nominal yani kurulu gücü üzerinden üretmesi gerektiği enerji miktarına oranıdır. Anlamli sonuç elde edebilmek için bu belirli periyod genelde 1 ay ya da daha uzun sürelerde alınır. Örnek olarak 3MW kurulu güce sahip bir rüzgâr türbini, Ekim ayı sonunda tam yükte  $3 \times 24 \times 31 = 2.232$  MWh enerji üretmesi gerekir. Ancak rüzgâr sürekli aynı hızda olmadığı için düşük rüzgâr hızlarında daha az güç üretir. Bu durum 3.2 no'lu konudaki güç eğrisi analizinde detaylı olarak anlatılacaktır. Dolayısı ile ay sonunda bu türbinin sayacından 782 MWh değer alınıyorsa bu türbinin kapasite faktörü %35 olarak hesaplanır.

Şekil-3 te 15 ülkeye ait kara üstü rüzgâr santralleri için 2013-2017 yılları arasında ortalama yıllık kapasite faktörleri karşılaştırılmıştır. Buna göre Türkiye; kapasite faktörü anlamında 3. sırada ve dünya ortalaması ve Avrupa'nın önünde önemli bir avantaja sahiptir. (2021, An assessment of wind energy status, incentive mechanisms and market in Turkey.)



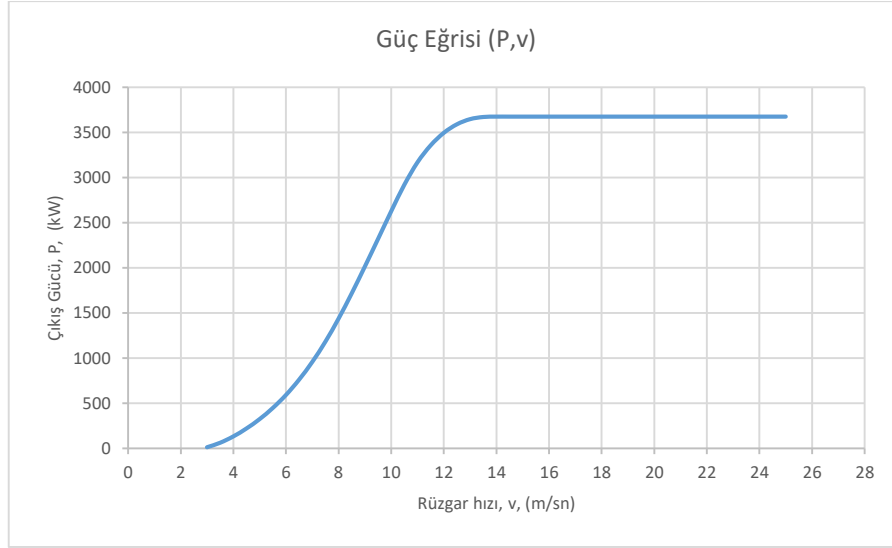
Şekil-3 Ülkelere göre kapasite faktörleri

Jiayu Xu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada rüzgâr santrallerinin yeni teknolojiler ile kapasite faktörünü arttırdığını ileri sürmüşlerdir. Jiayu Xu ve arkadaşlarının çalışmasına göre 2008'den önce devreye alınan türbinlerde zamanla değişen rüzgâr ortalamasına göre kapasite faktörü en fazla %10 civarında artış göstermiştir. Bunun yanında 2015-2020 arasında devreye alınan yeni teknolojiye sahip türbinlerde ise rüzgâr değişimleri kapasite faktörünü %5 arttırırken teknolojik gelişmeler kapasite faktörünü %12 civarında arttırmıştır. Rüzgâr türbinlerinin kurulu kapasitesi arttıkça, teknolojik ilerleme kapasite faktörü artışında baskın etken haline geldi.

#### 3.2-Güç Eğrisi

Türbin etiket değerinde nominal MW bilgisi yer alır. Ancak her durumda rüzgâr türbini bu gücü üretemez. Örneğin 3MW etiket değerine sahip bir rüzgâr türbini sürekli tam

kapasitede çalışamaz çünkü rüzgâr hızı sürekli tam güç çalıştıracak güçte değildir. Bu durumda yatırımcının güç eğrisini sorgulaması gerekmektedir. Güç eğrisi; Şekil 4'teki gibi P-v grafiğidir. Bu bilgi türbin teknik kataloğu ile birlikte verilir ve türbin sağlayıcısının türbinin hangi rüzgâr hızında hangi güce ulaşması gerektiğinin bir yerde verdiği taahhüttür.



Şekil-4 Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi

Güç eğrisi 4 ana bölümden oluşur. 1. Bölüm rüzgârın sıfır ile türbinin güç üretmeye başladığı rüzgâr hızının arasında kalan yani  $V_{cut-in}$  aralığıdır. 2. Bölüm rüzgâr hızının türbinin tam güç çalıştığı yani  $V_{nom}$  ile başlar ve türbinin fırtına nedeni ile devreden çıktığı  $V_{cut-out}$  arasındaki bölümdür. 3. Bölüm ise  $V_{cut-out}$  ile daha yüksek rüzgâr aralığıdır. En önemli olan 4. Bölüm ise türbinin sürekli MPPT yaptığı yani en yüksek güce ulaşmaya çalıştığı kararsız bölümdür.

Değişken hızla çalışan bir rüzgâr türbini en yüksek mil gücünü elde etmek için her rüzgâr hızında devir sayısını ayarlayarak optimum devir hızında çalışır. Bu hıza uç hızı, kanat uç hızının rüzgâr hızına oranına uç hız oranı ve bu değer optimum değerine ise optimum uç hız oranı denir. Rüzgâr türbininin her bir rüzgâr hızında farklı devirde dönerek optimum devirde çalışmasına maksimum güç noktası taraması yani MPPT (Maximum Power Point Tracking) denir.

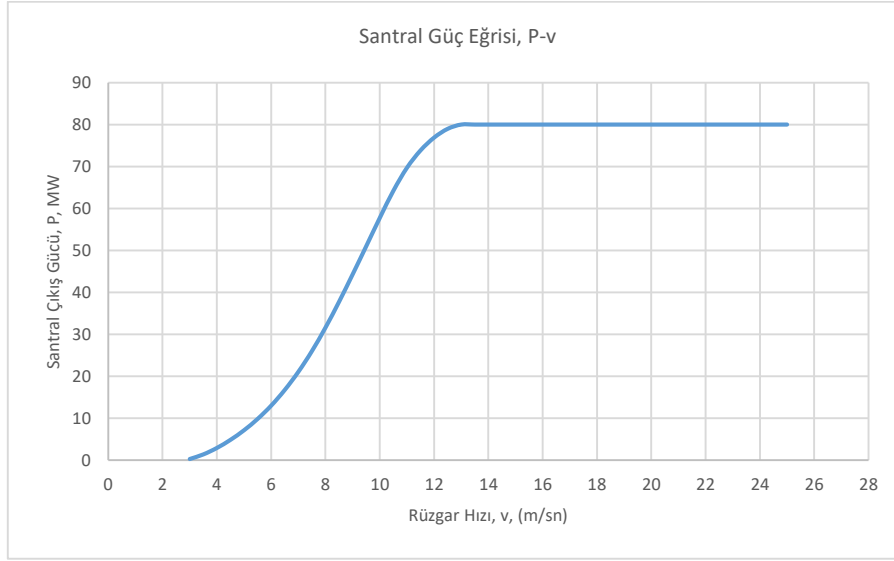
Şekil 4'te verilen güç eğrisine sahip bir rüzgâr türbini ancak 14 m/sn rüzgâr hızında tam güce çıkabilmekte ve bu türbin 3 ila 13 m/sn hızlarda ara değerlerde güçler üretmektedir. Bu ara değerlerin tanımlanabilmesi açısından güç eğrisi önemli bir veridir. Ayrıca gerçekleşen değerlerin de bu eğri ile aynı olması yatırımcının takip etmesi gereken önemli bir konudur.

### 3.3 Rüzgâr Santralinin Güç Eğrisi

Bu konu türbin tedarikçi firma tarafından verilen bir değer olmasa da işletme tarafından takip edilmesi gereken bir veridir.

Şekil-5'te; güç eğrisi Şekil-4'teki gibi bir türbin için verilen ve 22 adet türbinden oluşan bir rüzgâr santralının toplam güç eğrisi gösterilmektedir. Burada da görüleceği üzere

santral tam yüke ancak 13 m/sn rüzgâr hızında çıkabilmektedir. Ancak bu sahanın ortalama rüzgâr hızı 7 m/sn'dir.



Şekil-5 Rüzgâr Santrali Güç Eğrisi

Şekil-5'te görüldüğü gibi bir rüzgâr türbini tam güce ancak 14 m/sn rüzgâr hızında erişebilmektedir. Bu durumda aynı türbinlerden kurulu bir rüzgâr santrali de kurulu gücüne ancak 14 m/sn de ulaşabilecektir. Bir başka deyişle yatırımcı, kendisine ayrılmış hakkı olan kapasiteye ancak 14 m/sn rüzgâr hızında ulaşabilecektir. Saha rüzgâr ortalaması 7 m/sn olan bir rüzgâr santralinin bu kapasitenin yarısından fazlasını kaybettiği %35 kapasite faktörü değeri ile görülebilir.

Dolayısı ile önemli olan nokta, iyi bir optimizasyon çalışması ile rüzgâr santralinin kurulu gücüne olabildiği kadar düşük rüzgâr hızında ulaşması ve ardından daha fazla süre tam kapasite çalışmasıdır.

### 3.4 Rüzgâr Santralinin Kapasite Faktörünün Arttırılma Yolları

#### 3.4.1 Büyük tarama alanına sahip rüzgâr türbininde düşük güçlü jeneratör seçimi:

Bu yöntemle türbin etiketi düşük olacağından izin verilen anlaşma gücüne daha fazla tarama alanı sığdırılarak daha fazla rüzgârdan yararlanılıp güç eğrisi daha dik konuma getirilebilir, yani santral nominal güce daha düşük rüzgâr hızında ulaşarak kapasite faktörü arttırılabilir. Yönetmelikte geçen mekanik gücün arttırılmasına izin verilmeyen durumlarda jeneratörlerin güçleri kısımla sureti ile daha fazla türbin eklenerek tarama alanı arttırılabilir. Ancak bu yaklaşımın doğruluğu tartışmaya açık olacaktır.

#### 3.4.2 Tarama alanını arttırmak için anlaşma gücünü arttırmadan santrale yeni türbin ekleme

Santral anlaşma gücünün arttırılması olanaksız olduğu durumlarda daha fazla tarama alanından faydalanarak santral bazında nominal güce daha düşük rüzgâr hızında ulaşarak



kapasite faktörünü yani üretimi arttırmak için santrale daha fazla türbin eklenebilir. Bu durumun analizi 4. Konuda yapılmaktadır.

#### 4. 80 MW Kurulu Güce Sahip Rüzgâr Santralinde, Anlaşma Gücü Sabit Tutularak, Türbin Sayısı Arttırma Analizi

##### 4.1 Metot ve Bulgular

80 MW kurulu güce sahip rüzgâr enerji santraline ait gerçekleşen 6 aylık veriler scada üzerinden elde edilmiştir. Bu veriler doğrulandıktan sonra güç eğrisi ile modelleme yapıp santrale daha fazla türbin ekleme metodu uygulanmış ve analizi yapılmıştır. Sonrasında bulunan sonuçlar tablo halinde işlenerek grafiklendirilmiştir.

##### 4.1.1 Yıllık hesaplanan ve gerçekleşen üretim verilerinin doğrulanması

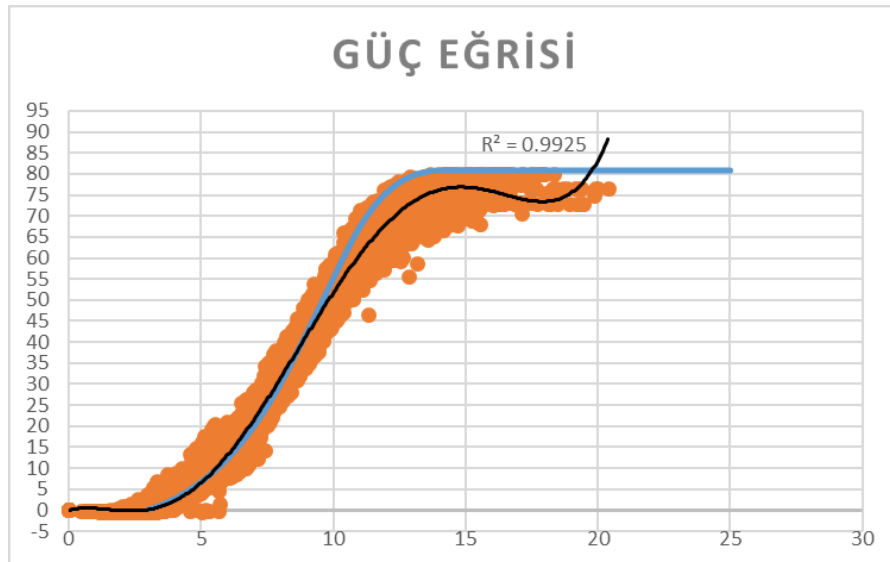
Scada üzerinden çekilen üretim verisi ile sayaç üzerinden gerçekleşen 1 yıllık değer karşılaştırılmış aradaki fark normal olduğundan scada verisi doğrulanmıştır.

| Açıklama                   | Değer  | Birim |
|----------------------------|--------|-------|
| Yıllık Scada Üretim Değeri | 247691 | MWh   |
| Yıllık Sayaç Üretim Değeri | 246805 | MWh   |

Tablo 1 Scada ve Sayaç Değerleri

##### 4.1.2 Güç eğrisi

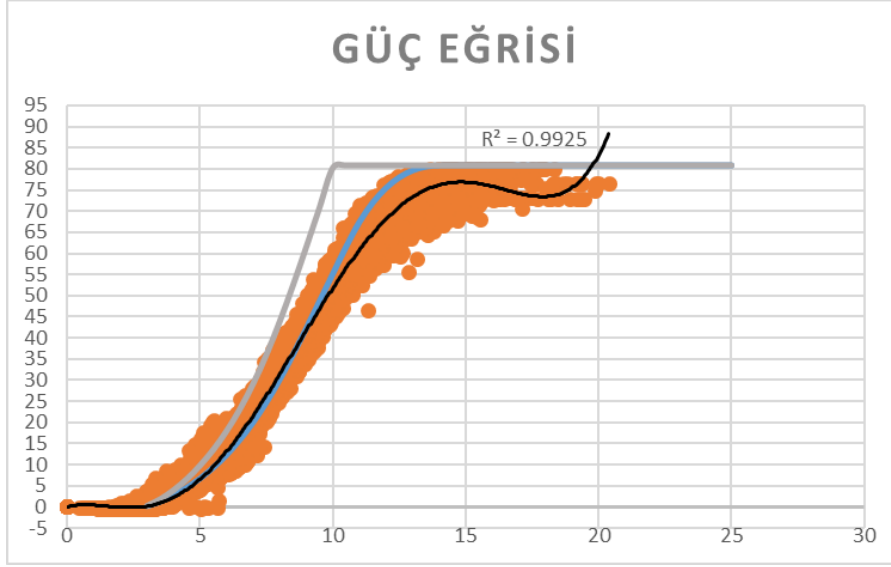
Bir türbine ait güç eğrisi verileri kullanılarak santralin toplam güç eğrisi oluşturulmuş ve scadadan elde edilen gerçekleşen üretim değerleri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.



Şekil 6 Santral Güç Eğrisi

### 4.1.3 Ekleneyecek türbin sayısı

Mevcut RES'e ekleneyecek 0 ile 30 arasında türbin sayısı ile ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Örnek olarak Şekil 7'de anlaşma gücü sabit tutularak 10 adet aynı güce sahip türbin eklendiğinde gri renkli güç eğrisi elde edilmiştir. Görüleceği üzere ve beklendiği gibi güç eğrisi daha dik konuma gelerek daha düşük rüzgâr hızında nominal güce ulaşılmıştır.



Şekil 7 Güç Eğrisi Dikleşmiş Santral Güç Eğrisi

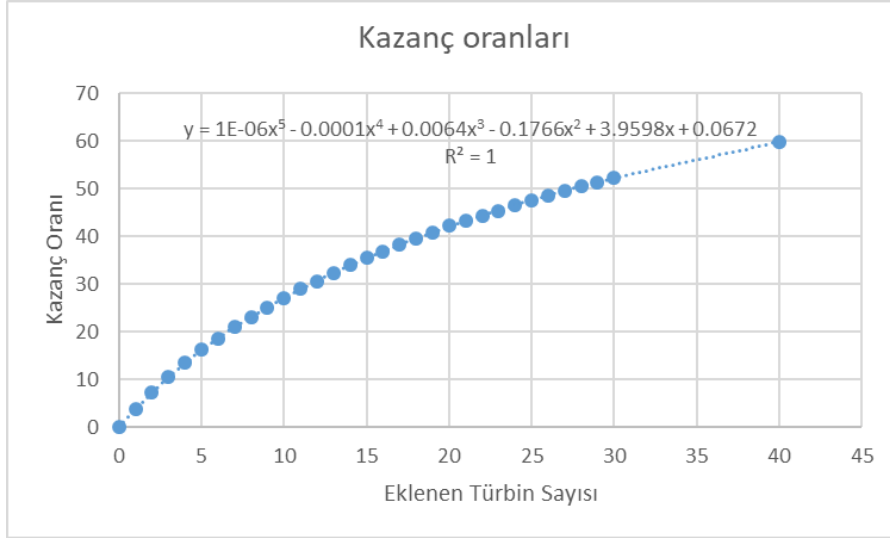
Eklenen 10 türbin ile Tablo 2 elde edilmiştir.

| Açıklama                                    | Değer  | Birim |
|---|--------|-------|
| Yıllık Scada Üretim Değeri                  | 247691 | MWh   |
| Yıllık Sayaç Üretim Değeri                  | 246805 | MWh   |
| Eklenen Türbin ile Hesaplanan Üretim Değeri | 315096 | MWh   |
| Kazanç                                      | 27%    | %     |

Tablo 2 Kazanç Hesaplama Tablosu

Bu tabloda görüleceği üzere anlaşma gücü sabit tutularak rüzgâr santraline 10 adet aynı özellikte türbin eklenecek olursa santral genelinde %27'lik bir üretim artışı sağlanmaktadır.

Bu şekilde 0 ile 30 türbin ekleme senaryoları ile ayrı ayrı kazanç tablosu oluşturulmuş ve bu tablo sonuçları grafiğe dökülerek Şekil 8'de görüleceği üzere eğim çizgisinin fonksiyonu elde edilmiştir. Buna göre eğimin doyuma ulaşması için fazlaca kapasite bulunmaktadır.



Şekil 8 Kazanç Tablosu Eğim Çizgisi

### 5- Konuyu Destekleyen, Dünya Geneline Çalışma ve Örnekler

Cristina L. Archer ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; büyük ölçekli yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin yanına küçük ölçekli 20 adet dikey eksenli rüzgâr türbinini yerleştirmişlerdir. Bu çalışmada küçük dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin geleneksel olana göre %32'ye kadar daha fazla güç ürettiğini ve küçük türbinlerin varlığı nedeniyle artan türbülans kaynaklı toparlanmadan dolayı sadece büyük türbinler tarafından elde edilen gücün %10 arttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada her bir yatay eksenli rüzgâr türbininin etrafında 20 dikey eksenli rüzgâr türbinini bulunan rüzgâr santralinin, geleneksel rüzgâr santraline göre rüzgârdan yaklaşık %32 daha fazla güç elde edebildiğini ve tek başına yatay eksenli rüzgâr türbinini tarafından elde edilen gücün de yaklaşık %10 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda dikey rüzgâr türbinleri eklemenin mevcut rüzgâr santrallerinde enerji üretimini arttırmak için etkili bir yol olabileceği sonucuna varmışlardır. (Benefits of Co-locating Vertical-Axis and Horizontal-Axis Wind Turbines in Large Wind Farms. 2016)

Amerikalı bir firma olan Windharvest'a göre web sitesindeki ifadelerle göre, "mevcut rüzgâr türbinlerinin altına ve etrafına rüzgâr toplayıcıların eklenmesi, trafo merkezinin kapasitesinin genişletilmesine gerek kalmadan genel rüzgâr santrali kapasite faktörünü iyileştirebilir. Potansiyel artış önemlidir çünkü çoğu rüzgâr santrali %25-40 kapasite faktörü ile çalışır. Rüzgâr toplayıcıları, rüzgâr santrali kapasite faktörlerini piller ve depolama ile daha da artırarak onları daha öngörülebilir, güvenilir ve daha uzun ömürlü hale getirebilir." (<https://windharvest.com/>)

## 6- Sonuç

Bu anlamda atılacak adımlarla mevcut sahalarda anlaşma gücü arttırılmadan yani iletim sistemine ve yatırımcıya alt yapı anlamında yük getirilmeden rüzgar türbini eklenerek daha düşük rüzgarlarda daha yüksek üretimler elde edilebilir. Böylelikle sahanın kapasite faktörü yani yatırımcının kazancı artacak hem de ülkenin ihtiyacı olan elektrik enerjisi yerli kaynak olan rüzgardan daha fazla karşılanmış olacaktır.

Ayrıca güç eğrisindeki kararlı bölge daha fazla artacağından iletim sistemine de rüzgar enerjisinin kararsızlığı daha az etkiyecektir.

Bundan sonraki çalışmalar bu konunun finans analizleri üzerine yapılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, EPDK, 2022
- [2] <https://dictionary.cambridge.org/>; Erişim tarihi 2023
- [3] Deneçli K.,Boztepe M.; “Çok rotorlu rüzgâr türbin sistemlerinin modellenmesi ve analizi”, 2022
- [4] <https://windharvest.com/>; Erişim tarihi 2023
- [5] Resmi gazete, sayı no: 31834
- [6] Gönül Ö., Duman A., Deveci K., Güler Ö. (2021). An assessment of wind energy status, incentive mechanisms and market in Turkey. Engineering Science and Technology, an International Journal. 24. 10.1016/j.jestch.2021.03.016.
- [7] Shengbail Xie, Cristina Archer, Niranjan Ghaisas and Charles Meneveau, Wiley Online Library, Benefits of Co-locating Vertical-Axis and Horizontal-Axis Wind Turbines in Large Wind Farms. 2016
- [8] Jiayu Xu ve arkadaşları, What drives the change of capacity factor of wind turbine in the United States, 2023 Environ. Res. Lett. 18 0640