

## Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Ömer Kılıçoğlu<sup>1\*</sup>, Mustafa Arif Özgür<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği / Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Makine Mühendisliği / Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye

\*(omerkilicoglu2@gmail.com) Başlıca yazarın mail adresi

(Geliş Tarihi: 09 Temmuz 2023, Kabul Tarihi: 24 Temmuz 2023)

(5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2023, July 10 - 12, 2023)

**ATIF/REFERENCE:** Kılıçoğlu, Ö. & Özgür, M. A. (2023). Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişimi. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(6), 301-310.

**Özet** – Bu çalışma, rüzgâr enerjisi teknolojisinin tarihsel gelişimine genel bir bakış sağlamakta ve dünya rüzgâr enerjisi üretiminin mevcut durumunu tartışmaktadır. Ayrıca rüzgâr türbini teknolojisinin mevcut durumunu ve rüzgâr enerjisinin uzun tarihini anlamadaki son gelişmeleri sunmaktadır. 20. Yüzyılın sonları ve 21. Yüzyılın başlarına doğru elektrik üretimi için yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle rüzgâr enerjisine ilgi artmıştır. Bilim insanları ve araştırmacılar, rüzgâr enerjisi üretimi tasarım parametreleri için çözümleri hızlandırmaya çalışmışlardır. Hayatımız doğrudan enerji ve tüketimi ile ilgili olup, enerji araştırma konuları son derece önemli ve oldukça hassastır. Rüzgâr enerjisi teknolojisinin karmaşıklığından dolayı, bu çalışma esas olarak rüzgâr türbini ve rüzgâr enerjisi konularına kısa bir genel bakış sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca bu çalışma, özellikle bu teknolojik yolculukta önemli olduğu kanıtlanmış tarihsel olaylara ve değişimlere odaklanarak, rüzgâr enerjisi teknolojilerinin ortaya çıkışını ve gelişimini ve rüzgâr enerjisinin Türkiye'deki ve dünyadaki enerji sistemine entegrasyonunu yeniden ele alınmaktadır. Rüzgâr enerjisinin ekonomik kalkınmaya katkısı açısından, rüzgâr enerjisinin tarihi birbiriyle örtüşen dört döneme ayırarak ifade edilmiştir. Bunu yanı sıra tüm Dünyada rüzgâr enerjisi gelişimi ve Türkiye'de rüzgâr enerjisinin muazzam büyümesi de yansıtılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler** –Rüzgâr Enerjisi, Yel Değirmenleri, Rüzgâr Türbini, Dünyada Rüzgâr Enerjisi, Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

### I. GİRİŞ

Rüzgâr, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini elektriğe çevirerek elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Modern rüzgâr türbinlerinde rüzgâr, kinetik enerjiyi dönme enerjisine dönüştüren rotor kanatlarını döndürmektedir. Bu dönme enerjisi bir mil vasıtasıyla jeneratöre aktarılır ve böylece elektrik enerjisi üretilmektedir. Rüzgâr enerjisi, karada, denizde veya tatlı suda (denizde) bulunan büyük rüzgâr türbinlerini kullanarak hareket eden havanın kinetik enerjisinden yararlanılmaktadır. Rüzgâr enerjisi binlerce yıldır kullanılmaktadır, ancak karada ve denizde rüzgâr

enerjisi teknolojileri, daha uzun türbinler ve daha büyük rotor çapları ile üretilen elektriği en üst düzeye çıkarmak için son birkaç yılda gelişmiştir. Ortalama rüzgâr hızları konuma göre önemli ölçüde farklılık gösterse de dünyanın rüzgâr enerjisi teknik potansiyeli küresel elektrik üretimini aşmakta ve dünyanın birçok bölgesinde rüzgâr enerjisinin önemli ölçüde sağlamak için yeterli potansiyel vardır. Dünyanın birçok yerinde güçlü rüzgâr hızları vardır, ancak rüzgâr enerjisi üretmek için en iyi yerler bazen uzak bölgelerdir. Örneğin Offshore rüzgâr enerjisi muazzam bir potansiyel sunmaktadır.

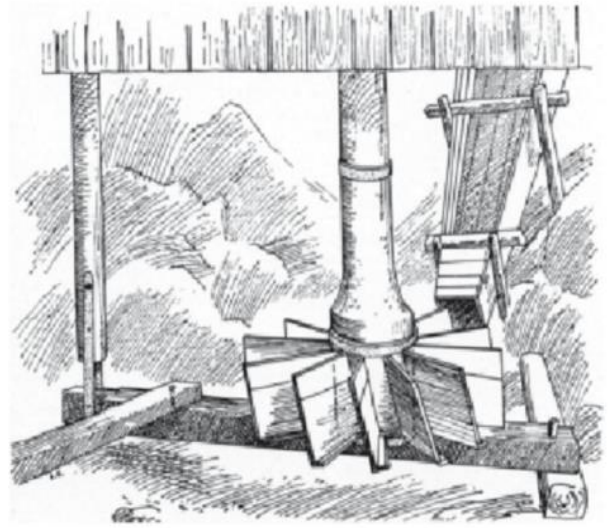
## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Rüzgâr 1500 yılı aşkın bir süredir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Diğer enerji kaynakları bilinmediği veya kıt olduğu zamanlarda, rüzgâr enerjisi endüstriyel ve ekonomik kalkınma için başarılı bir araç olmuştur. Rüzgâr enerjisi, daha ucuz kullanımı daha kolay elde edilebilir enerji kaynakları bulununca marjinal bir kaynak haline gelmiştir. Rüzgâr enerjisinin ekonomik kalkınmaya katkısı açısından, rüzgâr enerjisinin tarihi birbiriyle örtüşen dört döneme ayırarak ifade edilmiştir [1]. İlk olarak Klasik Dönem (600-1890) Mekanik sürücüler için klasik yel değirmenleri; Kuzeybatı Avrupa'da 100.000'den fazla yel değirmeni bulunmaktadır. Bu dönem, buhar makinesinin keşfinden sonra ve odun ve kömürün hazır bulunması nedeniyle sona ermiştir. İkinci dönem ise Elektrik Üreten Rüzgâr Türbinlerinin Geliştirilmesi (1890-1930) Elektriğin herkesin kullanabileceği bir enerji kaynağı olarak geliştirilmesi, elektrik üretimi için ek bir olasılık olarak yel değirmenlerinin kullanılmasına yol açmıştır. Aerodinamiğin alanındaki temel gelişmeler oluşmuştur. Dünyada; rüzgâr enerjisinden elektrik üreten ilk türbin, 1891'de modern aerodinamiğin önemli mühendisi olan Paul la Cour tarafından Danimarka'da inşa edilmiştir. Fosil petrolün ucuzlaması nedeniyle bu dönem sona ermiştir. Üçüncü dönemde Yeniliğin İlk Aşaması (1930-1960) İkinci Dünya Savaşı sırasında kırsal bölgelerin elektrikleştirilmesi gerekliliği ve enerji sıkıntısı yeni gelişmeleri teşvik etmiştir. Aerodinamiğin alanındaki temel gelişmeler oluşmuştur. Bu dönem daha ucuz gaz ve fosil petrol nedeniyle sona ermiştir. Dördüncü dönemde ise İkinci Yenilik Aşaması ve Seri Üretim (1973- Günümüz) Teknolojik gelişmelerle birlikte enerji krizi ve çevre sorunları ticari bir atılım sağlamaktadır.

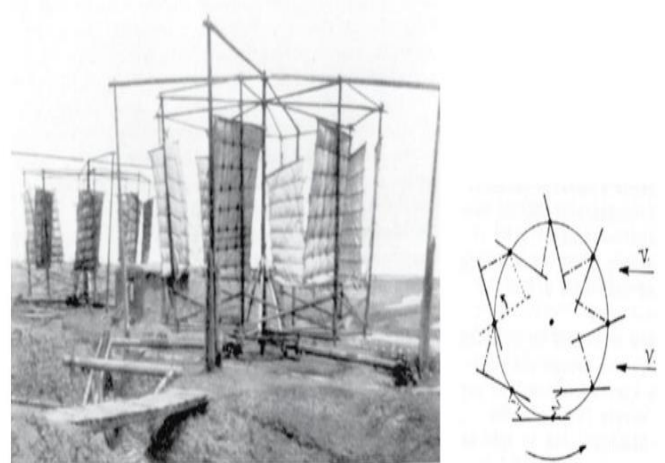
### İlk Yel Değirmenleri

Su değirmenleri büyük olasılıkla yel değirmenlerinin öncüleriydi. Su değirmenleri de yine insanlar veya hayvanlar tarafından çalıştırılan aletlerden geliştirilmiştir. Tarihi kaynaklardan bildiğimiz cihazlar, ana mili hareket ettirmek için çapraz çubukların takıldığı dikey bir ana şafta sahiptir. Çapraz çubuklar, atlar, eşekler veya inekler gibi çiftlik hayvanları tarafından çalıştırılıyordu. Dikey yel değirmenlerinin bu

cihazlardan geliştirilmiş olması mantıklı görülmektedir. Bununla birlikte, bunun kanıtını sağlayacak çok az tarihsel kaynak vardır. Hayvanlar tarafından çalıştırılan cihazlardan evrimleşen "İskandinav" ve "Yunan" su değirmenleri hakkında daha fazla kaynak bulunabilmektedir [2]. Bu tür su değirmenlerinin kökeni MÖ 1000 civarında Doğu Akdeniz bölgesinin tepelerinde bulunuyordu ve İsveç ve Norveç'te kullanılıyordu ve Şekil 1'de gösterilmiştir [3]. Dikey ana şaftlara sahip ilk yel değirmenleri İran ve Çin'de bulunmuştur Şekil 2'de gösterilmiştir [4], [5].



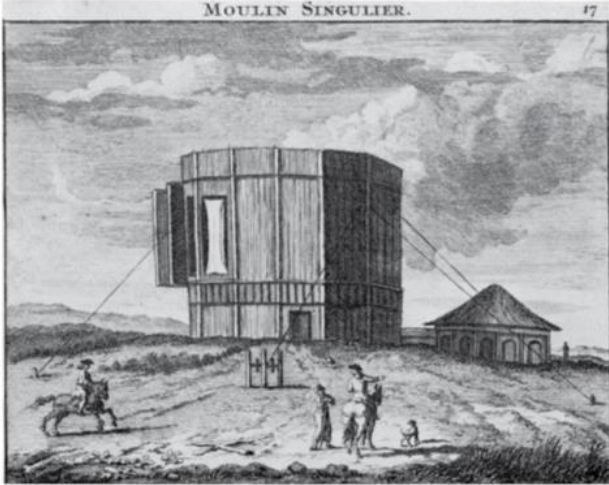
Şekil 1. İsveç, Göteborg yakınlarında dikey dönme eksenli su çarkı [3]



Şekil 2. Solda: Taku'da tuz çıkarmak için tuzlu su çözeltileri pompalayan Çin rüzgâr çarkları [4]. Sağ da: Çin yel değirmeninin işlevinin şematik tasviri, Kesintisiz çizgiler kanatları ve kesikli çizgiler yelkenleri temsil etmektedir [5].

Batı Avrupa'daki yel değirmenlerinin Yakın Doğu'dakilerden bağımsız icat edildiği varsayımı,

Hollanda'nın Drenthe Eyaleti arşivlerinde bulunan belgelerle desteklenmektedir. Haçlı Seferleri sırasındaki 1040 yılına ait bu belgelerde iki yel değirmeninden (Deurzer Diep ve Uffelte) bahsedilmektedir [2]. Rönesans sırasında Avrupa'da bazı dikey yel değirmenleri de inşası Şekil 3.'de gösterilmiştir [2].



Şekil 3. Avrupa'da 1718 yılında bir dikey eksenli yel değirmeni [2]

Yel değirmenlerinin sayısının artmasıyla birlikte onları daha verimli kullanma baskısı artmıştır. Bu motivasyondan kaynaklanan iyileştirmeler fabrikalara entegre edilmiştir. Bir gelişme olarak rüzgâr gülü yardımıyla yel değirmeni pervanesinin otomatik olarak rüzgâra doğru yalpalamasıydı (mili yel değirmeninin ana miline dikey olarak bağlanan bir pervane). 1745'te İngiltere'de, Edmund Lee bir rüzgâr gülünü bir yel değirmenine bağlamıştır. Rüzgâr yönüne çevirmek için yel değirmeninin dönen kısmına monte edilen yapı İngiliz olan John Smeaton, yel değirmeninin dönen kapağına takılan bir rüzgâr gülü icat etmiştir. Bu yenilik çok başarılı olduğu düşünülmektedir çünkü özellikle İngiltere, İskandinavya, Kuzey Almanya ve Hollanda'nın doğu kesiminde çok sayıda yel değirmeninde kullanılmıştır. Bu kavram, on dokuzuncu yüzyılın sonlarındaki rüzgâr türbinleri çağına ve hatta yirminci yüzyılın sonlarına kadar korunmuştur. Başlangıçta şanzıman tamamen mekanikti ve daha rüzgâr gülü sapma mekanizmasına bir kontrol sinyali göndermek için yalnızca bir sensör görevi görmüştür ve Şekil 4'de gösterilmiştir [6].



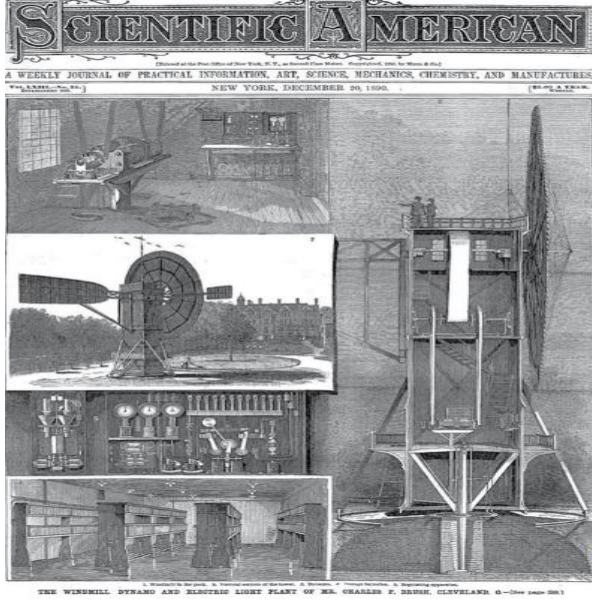
Şekil 4. Erken bir Lagerwey rüzgâr türbininde sensörlü rüzgâr yönü takipçisi [6]

### Elektrik Üreten Rüzgâr Türbinlerinin Geliştirilmesi

İlk elektrikli dinamolar (doğru akım jeneratörünün orijinal adı 'dinamo' idi) ve alternatif akım jeneratörleri devreye alındığında jeneratörleri çalıştırmak için olası tüm güç kaynaklarından yararlanılmıştır. Jeneratörler; koşu bantları, odun veya kömürle çalışan buhar makineleri, su çarkları, su türbinleri ve rüzgâr pervaneleri tarafından çalıştırılmıştır. Bir rüzgâr enerjisi öncüsü olan Charles F. Brush (1849-1929), Amerikan elektrik endüstrisinin kurucularından biridir [9]. Örneğin, 1876'da Charles Brush tarafından geliştirilmiş doğru akım jeneratörü, atlar tarafından çalıştırılan bir koşu bandı tarafından çalıştırılmıştır. Dinamonun keşfiyle, ticari kullanıcılara ve bireysel evlere uzaktan elektrikle enerji sağlamak mümkün hale gelmiştir. Elektrik, basit bir şekilde merkezi bir jeneratörden kullanıcılara iletilebilir ve İlk merkezi elektrik santralinin devreye girmesinden sonra, birincil enerjiye olan talep çok hızlı bir şekilde artmıştır.

Güç üreten yel değirmenlerinin (aşağıda rüzgâr türbinleri olarak anılacaktır) gelişimi bağımsız değildi, ancak ilk elektrik santrallerinin ve ilk yerel elektrik şebekelerinin mevcudiyetiyle örtüşüyordu. Güç üretimi için bir yel değirmeni kullanan ilk kişi, Glasgow'daki Anderson Koleji'nde Profesör olan James Blyth'di. Kanatları yelken beziyle kaplı 1887 tarihli, 10 m yüksekliğindeki rüzgâr türbini, tatil günlerini evinde aydınlatmak için pilleri şarj etmek için kullanılmıştır. 1888'de bir takım tezgâhı şirketinin sahibi olan Charles Brush, Cleveland, Ohio'daki (ABD) evinde 17 m çapında 12 kW'lık bir rüzgâr türbini inşa etti. Anma gücüne kıyasla, tesis çok büyük bir çapa sahipti. Pervane alanı, 144

daha küçük pervane kanadı tarafından tamamen kaplandı, bu da dönüş hızının yavaş olduğu anlamına geliyordu. Bu, pervane milinden jeneratöre çok yüksek bir transfer ilişkisi ile sonuçlandı. Güç çıkışı sözde bir 'ekliptik denetleyici' tarafından otomatik olarak kontrol ediliyordu. Pervane, ana kanat çarkına dikey olarak yerleştirilmiş bir rüzgâr bayrağı tarafından rüzgârdan artan rüzgârdan döndürülürken, ana kanat çarkı eğimli bir bağlantıya sabitlenmiştir. Scientific American'dan 20 Aralık 1890 tarihli bir resim Şekil 5, tesisin özelliklerini göstermektedir [7].



Şekil 5. Scientific American dergisinden rüzgâr türbinin tesisin özellikleri [7]

La Cour'un rüzgâr türbininin kanatları bazı yeniliklere sahip olsa da aerodinamik tasarım klasik yel değirmenine dayanıyordu. Havacılıktan geliştirilen verimli aerodinamik profillerin rüzgâr türbinlerinde kullanılması yaklaşık yirmi yıl sürmüştür. Sert rüzgarla birlikte, lamel çelik yayların kuvvetine karşı otomatik olarak açıldı ve bu, otomatik kontrolün ilk imkanıydı ve değirmencinin işini çok daha rahat hale getirmiştir. Bununla birlikte, yayların geriliminin yine de elle ayarlanması gerekiyordu. Bu amaçla yel değirmeninin tamamen durdurulması gerekiyordu. La Cour tarafından Askov'da gerçekleştirilen deneylerin sonucunda (Şekil 6), diğerlerinin yanı sıra Danimarkalı üreticiler Lykkegaard ve Ferritslev'in (Fyn) ticari rüzgâr türbinleri geliştirdiği pratik uygulamaları için önerilerde bulundu. 1908'de Lykkegaard 72

rüzgâr türbini kurdu ve 1928'de bu sayı yaklaşık olarak 120'ye yükseldi [8].



Şekil 6. Danimarka, Askov'daki Poul la Cour'un rüzgâr enerjisi test teçhizatı; sağda: 1891 yılından rüzgâr türbini; sol: 1897'den daha büyük tesis [8].

#### Yeniliğin İlk Aşaması

Çeşitli ülkeler, İkinci Dünya Savaşı sırasında ve hemen sonrasında rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesine yeniden başlamıştır. Bunun nedeni, fosil yakıtlar gibi stratejik kaynakların kıtlamasıydı. Bu dönemde, muhtemelen elektrik şebekesine paralel elektrik üretimi için rüzgâr türbinlerinin yaygın olarak kullanılmasına izin veren birçok yenilik tanıtıldı. Öncelikle pervanenin yapısıyla ilgili olan bu yenilikler, esas olarak önceki dönemin yeniliklerine dayanıyordu. En önemli gelişmeler Danimarka, ABD ve Almanya'da yaşanmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında Kopenhag'daki FL Smidth Şirketi elektrik üretmek için rüzgâr türbinleri geliştirdi. Danimarka'nın kendi fosil yakıtları olmadığı için rüzgâr enerjisi, elektrik üretiminin birkaç yolundan biriydi.

Uzak bölgelerde güç sağlamak için Marcellus ve Joseph Jacobs kardeşler, 1920'lerin başlarında ABD'de pilleri yüklemek için rüzgâr türbinleri geliştirmeye başlamışlardır. İki kanatlı tesislerle yapılan deneylerden sonra, rotor çapı 4 m olan üç kanatlı bir rüzgâr türbini ve doğrudan tahrikli bir doğru akım jeneratörü tanıtılmışlardır. 1920'lerin başı ile 1973 petrol krizinden sonraki ilk yıllar arasında bu fabrikalardan binlercesi satılmıştır (Şekil 7) [6].



Şekil 7. Jacobs rüzgâr türbinli rüzgâr çiftliği [6]

Şimdiye kadar inşa edilen ilk megavat tesisi, Palmer C. Putnam tarafından tasarlanan ve S. Morgan Smith Company (York, Pennsylvania) tarafından inşa edilen ve Rutland, Vermont yakınlarındaki 610 m yüksekliğindeki Grandpa's Knob tepesine kurulan Smith-Putnam rüzgâr türbinidir (Şekil 8) [10]. Bu tesis, pervane çapı 53,3 m olan bir avaradan oluşuyordu. Bireysel olarak ayarlanabilen rotor kanatları ile donatılmıştı ve senkron jeneratörün nominal çıkışı 1,25 MW idi.



Şekil 8. Rutland, Vermont, ABD yakınlarındaki Grandpa's Knob üzerindeki Smith-Putnam rüzgâr türbini [10].

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra rüzgâr enerjisinin gelişmesinin nedenleri arasında şunlar vardı [11]: hızla artan elektrik talebi, oysa çoğu topluluğun yerel enerji kaynakları yoktu; Kullanıcıların yakınındaki enerji kaynakları zaten tükenmişti ve Savaş sonrası yoksulluk ve siyasi koşullar, ithal yakıtlara güvenmek yerine yerel enerji kaynakları arayışına yol açmıştır. Savaş

sırasında askeri endüstride çalışan ve şimdi sivil endüstride aktif olan mühendisler tarafından sağlanan aerodinamik ve malzeme bilgisi, rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesine devam etme koşullarını kolaylaştırdı. Yeni teknolojiler sayesinde, Grandpa's Knob'dakinden daha başarılı fabrikalar inşa etme olasılığı açılmıştır.

### İkinci Yenilik Aşaması ve Seri Üretim

Rüzgâr gücündeki neredeyse tüm önemli teknolojik gelişmeler 1960'ların ortalarında sona erdi. Fosil yakıtlar bedava ve çok ucuzdu ve nükleer enerji gelecekteki tüm enerji sorunlarının çözümü olarak görülüyordu. Karar vericilerin çevrelerinde arz güvenliği veya çevre ve güvenlik konuları hakkında çok az tartışma olmasına rağmen, toplum ekonominin sınırsız büyümesi ve bunun kalıcı olarak mevcut kaynaklar üzerindeki etkileri konusunda şüpheler taşıyordu. Roma Kulübü tarafından yaptırılan The Limits to Growth çalışmasının 1971/1972'de yayınlanması, bunun sonucunda ortaya çıkan tartışmalar ve yeni bir Yakın Doğu çatışmasının sonucu olarak 1973'te petrol krizinin patlak vermesi, sözde gerçeği tersine çevirdi [12]. Gelecekteki problemler, mevcut ve şimdiki problemlere dönüştürülmüştür.

### Avrupa ve Dünyada Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisinden dünya çapında toplam kümülatif kurulu elektrik üretim kapasitesi, hızla artmış ve 2020 yılı sonu itibarıyla 733 GW'a ulaşmıştır. 2010'dan bu yana, tüm yeni rüzgâr enerjisinin yarısından fazlası, esas olarak Çin ve Hindistan'da devam eden patlama nedeniyle Avrupa ve Kuzey Amerika'nın geleneksel pazarlarının dışına eklenmiştir. 2015'in sonunda Çin'de 145 GW rüzgâr enerjisi kuruluydu [15]. 2015 yılında Çin, dünyanın ilave rüzgâr enerjisi kapasitesinin yarısına yakını kurdu [16]. Rüzgâr enerjisi, dünyadaki tüm ülkelerin yarısından fazlasında ticari olarak kullanılmaktaydı [17]. 2020 itibarıyla, Danimarka'da %56, Uruguay'da %40, Litvanya'da %36, İrlanda'da %35, Birleşik Krallık'ta %24, Portekiz ve Almanya'da %23, İspanya'da %20, İspanya'da %18 rüzgâr enerjisi penetrasyonu sağlandı. Yunanistan, İsveç'te %16, AB'de %15 (ortalama), ABD'de %8 ve Çin'de %6 idi [18]. Kasım 2018'de İskoçya'daki rüzgâr enerjisi üretimi, o ay boyunca ülkenin

elektrik tüketiminden daha yüksekti [19]. Rüzgâr enerjisinin dünya çapındaki elektrik kullanımındaki payı, dört yıl önceki %3,1'den artarak, 2018 sonunda %4,8 oldu [20]. Avrupa'da, enerji üretim kapasitesindeki payı 2018'de %18,8 idi [17]. 2018'de, Orta Doğu, Latin Amerika, Güney Doğu Asya ve Afrika'da yaklaşan rüzgâr enerjisi pazarları %8'den %10'a yükseldi [21]. 2018 yılında, küresel rüzgâr enerjisi kapasitesi 51 GW artarak 591 GW'a ulaştı ve 2017 sonuna göre %9,6 artmıştır [22].

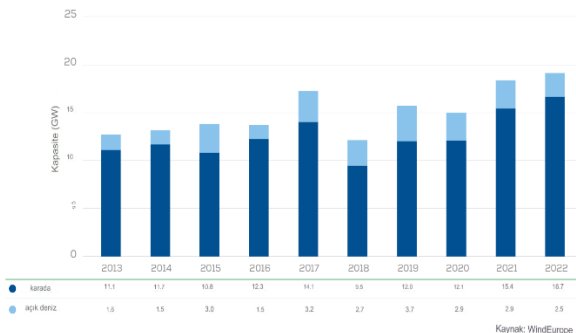
Tablo 1'de 2021 yılında en çok rüzgâr üreten ilk 10 Ülke verilmiştir [13].

Tablo 1. 2021'de En çok rüzgâr enerjisi üreten ülkeler [13]

Ülke	Rüzgâr enerjisi üretimi (TWh)	Ortalama güç (MW)
Çin	656	74.835
Amerika Birleşik Devletleri	384	43.806
Almanya	118	13.461
Brezilya	72.3	8.248
Hindistan	68.1	7.769
Birleşik Krallık	64.5	7.358
İspanya	62.4	7.118
Fransa	37.0	4.221
Kanada	35.1	4.004
Türkiye	31.1	3.548

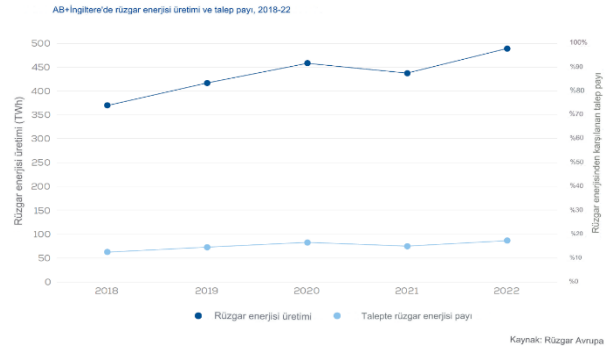
Şekil 9'da verilen grafikte 2022'de Avrupa'daki yeni rüzgâr kuruluşları 19,1 GW'a ulaştığı (16,7 GW karada ve 2,5 GW denizde) görülmektedir [14]. Zorlu ekonomik ortam ve tedarik inciri zorluklarına rağmen bu yıl, bir önceki yıla göre %4'lük bir artışla Avrupa'daki kuruluşlar için rekor bir yıl olmuştur. Ancak kuruluşlar, 2021'den gerçekçi beklenti %12 altında kaldığı ve Avrupa'nın iklim ve çevre hedeflerini karşılamak için gereken oranların oldukça altında kaldığı görülmektedir.

Avrupa'da yeni kara ve deniz rüzgâr kuruluşları



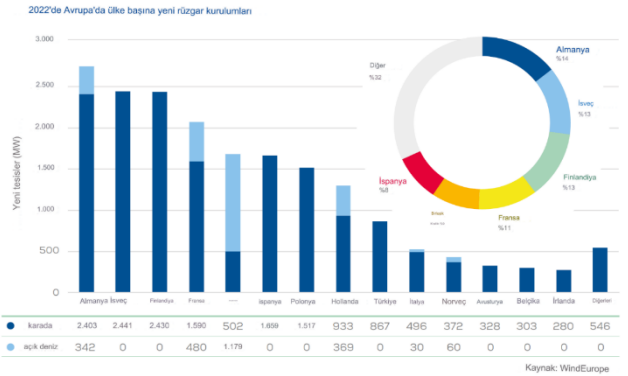
Şekil 9. 2022'de Avrupa'daki Kara ve Deniz Rüzgâr Kuruluşları

Avrupa'da rüzgâr enerjisi üretimi, 2018'de 370 TWh 'den 2022'de 489 TWh 'ye istikrarlı bir şekilde artmaktadır; üretimin 2020'dekinden daha düşük olduğu 2021'deki anormal bir yıl ile karşılaşıldığı görülmektedir. Aynı dönemde, elektrik talebi 2018'deki 2,960 TWh 'den 2,830'a düşmüştür (Şekil 10) [14]. Bu kısmen 2020'de COVID-19 pandemisinden kaynaklanan sokağa çıkma yasaklarının ve 2022'de Ukrayna'daki savaşın sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 10. Avrupa'da rüzgâr enerjisi üretimi ve talep payı [14]

Şekil 11'de görüldüğü üzere Almanya, İsveç ve Finlandiya en çok karada rüzgâr inşa etmiştir. Açık deniz kuruluşlarının neredeyse yarısı Birleşik Krallık'taydı ve Fransa ilk büyük açık deniz rüzgâr çiftliğini kurmuştur.



Şekil 11. 2022'de Avrupa'da Ülke başına yeni rüzgâr kuruluşları [14]

### Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, özellikle batıda Ege ve Marmara bölgelerinde olmak üzere Türkiye'nin elektriğinin yaklaşık %10'unu üretmekte ve giderek ülkedeki yenilenebilir enerjinin daha büyük bir payını almaktadır. 2023

itibariyle Türkiye'de 11 gigawatt (GW) rüzgâr türbini bulunmaktadır. Enerji Bakanlığı, 2035 yılına kadar neredeyse 30 GW'a sahip olmayı planlamaktadır [23]. Devlete ait Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) pazarın yaklaşık %20'sine sahiptir ve çok sayıda özel şirket bulunmaktadır [24], [25]. Rüzgâr enerjisinin şimdiye kadarki en yüksek günlük payı 2022'de %25 idi [26]. Yeni rüzgâr çiftlikleri inşa etmek, ithal kömüre dayalı mevcut kömürlü termik santralleri işletmekten daha ucuzdur [27]. İlk yel değirmenlerinden bazıları 400 yıl önce taştan yapılmıştır [28]. Ege Denizi'nden gelen rüzgârı kullanarak, bu değirmenler 1970'lere kadar buğdayı un haline getirmek için kullanıldı [29]. Rüzgârlı günlerde bir değirmen saatte 20 çuval (yaklaşık 320 kg) buğday öğütebiliyordu ve ayrıca mısır ve arpa da öğütülüyordu [30]. Şekil 12'de Bodrum Yarımadası'ndaki bu tür tarihi yel değirmenleri turizme kazandırılmaktadır [31]. Aynı şekilde Bozcaada'da iki adet terk edilmiş değirmen yeniden inşa edilmiş ve turist gösterileri için kullanılmaktadır (Şekil 13) [31].



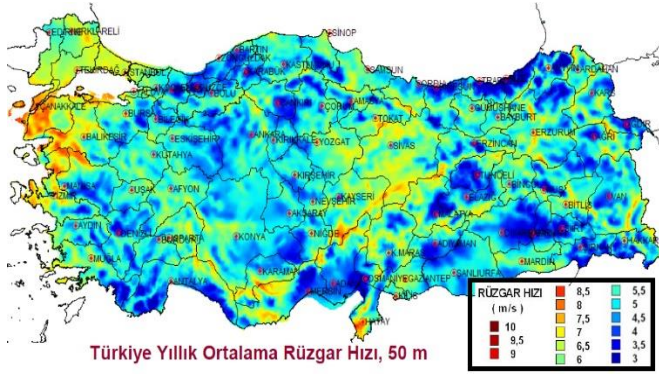
Şekil 12. Bodrum'da Tarihi Yel Değirmeni [31]



Şekil 13. Türkiye'nin batısındaki Bozcaada'da, rüzgâr enerjisinin büyük bölümünün yoğunlaştığı bir rüzgâr türbini [31]

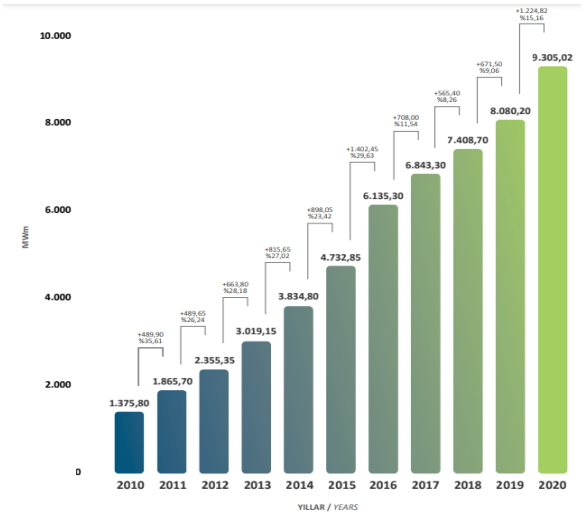
İlk rüzgâr çiftliği 1998 yılında İzmir'de kurulmuştur [32]. Rüzgâr enerjisinin kurulu gücü 2006 yılında 19 megavat (MW) iken, 2007 yılında 140 MW'a, 2011 yılında ise 1.600 MW'ın üzerine çıkmıştır. 2019 yılında yine İzmir'de rüzgâr türbini fabrikası tamamlanmıştır [33]. 2020'de rüzgâr enerjisine 1,6 milyar euro yatırım yapılmıştır [34]. Hibrit nesil, 2020'lerin başında daha popüler hale gelmiştir [35]. Türkiye'de tamamı karada olmak üzere yaklaşık 300 rüzgâr çiftliği vardır ve toplamda yaklaşık 4.000 rüzgâr türbini vardır [36].

Şekil 14'de gösterilen Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), Türkiye rüzgâr kaynaklarının karakteristikleri ve dağılımı 2021 yılı aralık ayı itibari ile Türkiye'deki rüzgâr enerjisi türbin sayısı 3868'e toplam kurulu güç ise 10.58 GW'a ulaştığı 1 Nisan 2022 tarihinden 189 bin 258 megavat saatle tüm zamanların en yüksek rüzgâr enerjisi üretimi gerçekleştiği ve bu üretim kapasitesinin toplam enerji üretimindeki payı ise %22,67 oldu belirtilmiştir [37].



Şekil 14. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) [37]

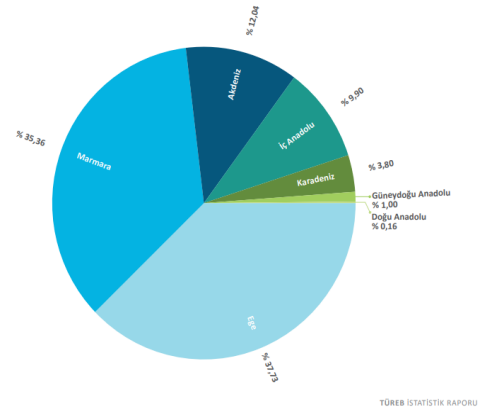
Şekil 15’de gösterildiği üzere 2010 yılı döneminde, Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santrallerindeki kurulu kapasite yıllık 1375,80 MWm seviyesindeyken, bu değer yıllara göre artarak 2020 sonu itibariyle 9305,02 MWm seviyesine kadar çıkarılmıştır [38].



Şekil 15. Türkiye’deki Rüzgâr Enerjisi Santralleri için Kümülatif Kurulum [38]

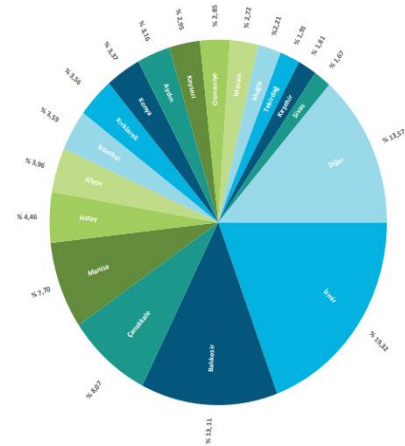
Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santrallerinin bölgelere göre dağılımı 2020 yıl itibariyle elde edilen istatistiklere göre Türkiye’deki rüzgâr gücü kapasitesinin %38,92 si Ege Bölgesi’nde, %37,73 u Marmara Bölgesi’nde, %35,36 yı Akdeniz Bölgesi’nde, %12,04 ü İç Anadolu Bölgesi’nde, %9,90 nı Karadeniz Bölgesi’nde ve %3,80 lik bölüm ise Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde olup yıllık elektrik üretim kapasitesine sahiptir. Ege Bölgesi üretim kapasitesi olarak bölgeler arasında ilk sırada yer almaktadır. Sırasıyla Ege Bölgesini 2020 yılı istatistiklerine göre kurulu rüzgâr gücü en

fazla olan Marmara Bölgesidir. Kurulu rüzgâr gücü kapasitesinin bölgelere göre dağılımı Şekil 16’da belirtildiği üzere gösterilmektedir [38].



Şekil 16. Türkiye’de İşletmedeki RES’lerin Bölgelere Göre Dağılımı [38]

Türkiye’deki kurulu rüzgâr gücü kapasitesinin illere göre dağılımına bakıldığında ise, 2020 yılı sonunda tespit edilen istatistiklerde İzmir, Türkiye’deki kurulu rüzgâr enerji kapasitesinin %19,32’lik kısmına sahiptir. Balıkesir ise toplam rüzgâr gücü kapasitesini %13,11 seviyesine çıkartarak ikinci büyük elektrik üretimi yapılan ilimiz olmaktadır. Şekil 17’de rüzgâr enerji kapasitesinin illere göre dağılımı istatistiksel olarak gösterilmektedir [38]



Diğer %			
Bursa	1,53	Gaziantep	0,70
Anasaya	1,52	İsparta	0,66
Tokat	1,51	Samsun	0,60
Yalova	1,44	Uşak	0,58
Kahramanmaraş	1,31	Sakarya	0,30
Edirne	0,92	Adıyaman	0,30
Düzce	0,80	Kocaeli	0,15
Bilecik	0,77	Ordu	0,13
		Malatya	0,13
		Eskişehir	0,05
		Kırkkale	0,05
		Adana	0,04
		Bayburt	0,04
		Bingöl	0,04

Şekil 16. İşletmedeki RES’lerin İllere Göre Dağılımı [38]



### III. BULGULAR

Bu inceleme, rüzgâr enerjisinin tarihsel gelişimi hakkında net bir fikir vermeye çalışılmaktadır. Bu çalışma bulguları için nicel bir açıklama yerine, her bir modelin katkısına ve yenilikçi yönüne dikkat çeken nitel bir yaklaşım tercih edilmiştir. İnceleme temelinde, gelecekteki araştırmacılar için bazı konulara işaret edilmektedir.

### IV. TARTIŞMA

Rüzgâr enerjisi teknolojisinin ilk adımlarını atması yüzyıllar önceydi. Son otuz yılda rüzgâr enerjisi uygulamalarına olan ilgi yeniden canlanmıştır. Gerçekleştirilen bu inceleme rüzgâr enerjisinin umutlarını ve zorluklarını vurgulamaktadır. Dünyada büyük büyüme yansıtılmaktadır.

### V. SONUÇLAR

Rüzgâr enerjisi, dünyanın birçok bölgesinde gelecekteki enerji arzında önemli bir rol oynama potansiyeline sahiptir. Son 10 yılda rüzgâr türbini teknolojisi çok güvenilir ve sofistike bir seviyeye ulaşmıştır. Büyüyen bu uluslararası pazar, büyük rüzgâr türbinleri veya yeni sistem uygulamaları gibi daha fazla iyileştirmeye yol açacaktır, örneğin açık deniz rüzgâr çiftlikleri ve bu iyileştirmeler daha fazla maliyet düşüşüne yol açacak ve orta vadede rüzgâr enerjisi, geleneksel fosil yakıtlı enerji üretim teknolojisi ile rekabet edebilecektir. Bununla birlikte, örneğin yüksek oranda rüzgâr enerjisinin ağ entegrasyonu ile ilgili olarak birçok alanda daha fazla araştırma yapılması gerekecektir.

### KAYNAKLAR

- [1] J. Beurskens, *The History of Wind Energy*, Doi.org/10.1002/9781118701492.ch1, 2014.
- [2] J. Reynolds, *Windmills and Watermills Hugh Evelyn*, London, 1970
- [3] W. F. Greaves, and J. H. Carpenter, *A Short History of Mechanical Engineering*. Longmans Green and Co, London, 1969.
- [4] E. W. Golding, *The Generation of Electricity by Wind Power*. E. and F.N. Spon, London, 1955.
- [5] J. Beurskens, M. Houët, P. van der Varst, and P. Smulders, *Windenergie*, Technical College Eindhoven, Department of Nature Studies, Working group Transport Physics, Eindhoven, 1974.
- [6] H. J. Beurskens, *Private collection of photographs*.
- [7] C. F. Brush, *A Weekly Journal of Practical Information, Art, Science, Mechanics, Chemistry and Manufactures*, New York, Decemmer 20, 1890.
- [8] Poul la Cour Foundation, Mollevej 21 (There should be a / through the o), Askov, DK 6600 Vejen.

- [9] <http://www.windpower.org/en/pictures/brush.htm>
- [10] P. Palmer Cosslett, *Power from the Wind*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1948.
- [11] E. Hau, *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer Verlag, Berlin, 2000.
- [12] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens III, *The Limits to Growth. A report for the Club of Rome's project on the Predicament of Mankind*, Universe Books New York, 1972.
- [13] *Rüzgâr Enerjisi Üretimi*, 2022. <https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation>
- [14] *Wind Energy in Europe, Statistics, and the Outlook for 2023-2027*. <https://windeurope.org>
- [15] *Global Wind Report 2015*, Report GWEC, 22 April 2016 [www.gwec.net](http://www.gwec.net).
- [16] *Renewable Energy*, BP. Archived from the original on 1 December 2019.
- [17] *Countries- Online Access the Wind Power- Wind Energy Market Intelligence*, The Wind Power. Retrieved 13 January 2020.
- [18] *Share of electricity production from wind*, Retrieved 27 December 2020. Ourworldindata.org.
- [19] *Historic Month as Wind Power Meets 109% of Energy Demands*, STV. Retrieved 18 December 2018.
- [20] BP Global: Wind Energy. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy.html.html#wind-energy>
- [21] *The Wind Energy Capacity in 2018*. <https://www.evwind.es/2019/06/21/at-least-103-countries-have-commercial-wind-energy-capacity/67662>.
- [22] *Global Wind Energy Council, 51.3 GW of global wind capacity installed in 2018*, Retrieved 20 January 2020.
- [23] *Türkiye Ulusal Enerji Planı açıklandı: Güneş hedefi güçlü ama kömürden çıkış yok*, BBC News Türkçe (in Turkish). 21 January 2023. Retrieved 21 January 2023. <https://www.bbc.com/turkce/articles/cmmzpr0j5po> [Türkiye National Energy Plan announced: Solar target is strong but no exit from coal].
- [24] C. DiFiglio, G. B. Şekip, E. Merdan, *Turkey Energy Outlook*, Sabanci University Istanbul International Center for Energy and Climate, ISBN 978-605-70031-9-5. Archived from the original on 6 October 2021.
- [25] *Turkey's wind power capacity exceeds 10,000 MW threshold*, Hürriyet Daily News. 11 August 2021. <https://iicec.sabanciuniv.edu/teo>
- [26] *Turkey's daily wind power generation hits all-time high*, <https://www.evwind.es/2022/04/03/turkeys-daily-wind-power-generation-hits-all-time-high/85456> reve. 3 April 2022.
- [27] *Turkey: New wind and solar power now cheaper than running existing coal plants relying on imports*, Ember. 27 September 2021.
- [28] *Turkey's historic windmills to be rotated for tourism*, Hürriyet Daily News. 25 August 2008. Retrieved 13 June 2022. <https://www.hurriyet.com.tr/gundem/turkeys-historic-windmills-to-be-rotated-for-tourism-9742070>.
- [29] *Windmills Park Alaçatı Turkey*, 26 July 2016. Retrieved 13 June 2022.

- [30] T. Bozkurt, *The Windmills of Bodrum Peninsula*, SOMA 2009: Proceedings of the XIII Symposium on Mediterranean Archaeology. Selcuk University of Konya.
- [31] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_Turkey](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Turkey)
- [32] *Rüzgar Enerji Santralleri*, Enerji Atlası. Archived from the original on 18 August 2014. Retrieved 4 August 2017.
- [33] B. Küçükkaraca, B. Barutcu, *Life Cycle Assessment of Wind Turbine in Turkey*, Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering. 10 (3): 230-236. doi:10.17694/bajece.1032172. ISSN 2147-284X. S2CID 250082700.
- [34] *Wind Energy Market in Turkey* . Trade Council of Denmark in Istanbul (Report). 2021. *Archived* ) from the original on 18 February 2022. Retrieved 18 February 2022.
- [35] I. Todorović, *Hybrid power plants dominate Turkey's new 2.8 GW grid capacity allocation*, Balkan Green Energy News. Archived from the original on 8 March 2022. Retrieved 10 March 2022.
- [36] U. Kılıç, B. Kekezoğlu, *A review of solar photovoltaic incentives and Policy: Selected countries and Turkey*, Ain Shams Engineering Journal. 13 (5): 101669. doi:10.1016/j.asej.2021.101669. ISSN 2090-4479. S2CID 246212766. Archived from the original on 13 February 2022. Retrieved 13 February 2022.
- [37] *Türkiye'de rüzgar gücü*, [https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27de\\_r%C3%BCzg%C3%A2r\\_g%C3%BCc%C3%BC](https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27de_r%C3%BCzg%C3%A2r_g%C3%BCc%C3%BC)
- [38] <https://tureb.com.tr/eng/yayin/turkish-wind-energy-statistics-report-january-2021/137>