

T.C.
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

KONİK HELİSEL SAVONİUS RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI

BİTİRME PROJESİ

DİLŞEN TEMEL

SELİM ÇIKMIŞ

(II. ÖĞRETİM)

HAZİRAN 2021

TRABZON

T.C.
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

KONİK HELİSEL SAVONIUS RÜZGÂR TÜRBİNİ TASARIMI

DİLŞEN TEMEL
SELİM ÇIKMIŞ
(II. ÖĞRETİM)

Danışman: Prof. Dr. Yücel ÖZMEN

.....

Prof. Dr Ertan BAYDAR

.....

Bölüm Başkanı: Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU

HAZİRAN 2021

TRABZON

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinin, rüzgar türbinleri sayesinde elde edilmesi, rüzgar türbinlerinin yararları, çeşitleri ve kullanımları incelenerek dikey eksenli bir rüzgar türbini çeşidi olan konik Savonius rüzgar türbininin led yakabilecek şekilde tasarımı yapılmıştır.

Bitirme projemizin her aşamasında değerli bilgilerini ve zamanını bizden esirgemeyerek her fırsatta çalışmamızla yakından ilgilenen, eleştirileriyle yol gösteren preoje danışman hocalarımız Prof. Dr. Yücel ÖZMEN ve Prof. Dr. Ertan BAYDAR' a sonsuz teşekkürlerimizi iletiyoruz. Ayrıca maddi ve manevi her konuda bizlerin her zaman yanında olan ailelerimize teşekkür ederiz.

Dilşen TEMEL – Selim ÇIKMIŞ

Haziran 2021

ÖZET

KONİK HELİSEL SAVONIUS RÜZGÂR TÜRİNİ TASARIMI

Bu çalışmada, rüzgarı her yönden alabilen düşey eksenli rüzgar türbinlerinin aerodinamik özellikleri incelenmiş, literatür araştırması yapılmıştır. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinden biri olan konik helisel Savonius rüzgar türbinlerinin (SRT), en verimli kanat sayısı olan 3 kanatlı türbinin 10,5 m/s rüzgar hızında led yakabilecek şekilde tasarımı yapılmış ve güç katsayısı hesaplanmıştır. Kanatlarına 180° helis açısı verilmiş olan ve kanat tipi olarak SRT'lerde yaygın olarak kullanılan yarı dairesel kanat tipli helisel konik SRT, PLA filament malzemedan 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Üretimi yapılan türbinin güç katsayısına göre, ledi yakabilecek şekilde sistem planlaması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Savonius, Rüzgâr, Helisel, Türbin, Konik, Elektrik

SUMMARY

CONICAL HELICAL SAVONIUS WIND TURBINE DESIGN

In this study, the aerodynamic properties of vertically axis wind turbines that can pick up wind from all directions were examined and literature research was carried out. One of the vertical axis wind turbines, the conical helical Savonius wind turbines(SWT), which is the most efficient number of blades, the 3-blade turbine has been designed to light up LEDs at a wind speed of 10.5 m/s, and the power coefficient has been calculated. The semi-circular blade type helical-conical SWT, whose blades are given a helix angle of 180° and which is widely used in SWTs as blade type, was produced in a 3D printer from PLA filament material. According to the power coefficient of the turbine produced, system planning was made so that the led could be lit.

Key Words: Savonius, Wind, Helical, Turbine, Conical, Electric

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi.....	2
1.1.2. Dünyada Rüzgar Enerjisi.....	3
1.1.3. Türkiye’ de Rüzgar Enerjisi.....	6
1.1.4. Rüzgar Enerjisinin Avantajları.....	9
1.1.5. Rüzgar Enerjisinin Dezavantajları.....	10
1.2. Rüzgar Türbinleri.....	10
1.2.1. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	11
1.2.2. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	12
1.2.2.1. Darrieus Rüzgar Türbini.....	13
1.2.2.2. Savonius Rüzgar Türbini.....	14
1.3. Literatür Taraması.....	16
2.YAPILAN ÇALIŞMALAR	18
2.1. Tasarım Aşamaları.....	18
2.2. Savonius Rüzgar Türbininin Aerodinamik Özellikleri.....	20
2.2.1.Sürüklenme Kuvveti.....	20
2.2.2. Kanat Uç Hız Oranı.....	20
2.2.3. Reynolds Sayısı.....	21
2.2.4. Hacimsel Debi.....	21
2.2.5. Güç Katsayısı.....	21
2.2.6. Elektriksel Güç.....	22

2.3. Mühendislik Hesapları.....	22
2.4. Maliyet Analizi.....	24
3.BULGULAR.....	26
4. TARTIŞMA.....	27
5. SONUÇLAR.....	28
6.ÖNERİLER.....	29
7. KAYNAKLAR	30
8. EKLER.....	34
ÖZGEÇMİŞLER.....	36

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Smith-Putnam rüzgar türbini.....	3
Şekil 1.2. Küresel rüzgar enerjisi kapasitesi ve yıllık artış miktarı.....	3
Şekil 1.3. Seçilmiş yakıtlardan 2019 yılı enerji üretimi ve yenilenebilir elektrik üretimi grafikleri	4
Şekil 1.4. Dünya genelinde birincil enerji kaynak bazında elektrik enerjisi üretimi.....	4
Şekil 1.5. Dünya geneli ülkelerin rüzgâr enerjisi kurulu güç kapasiteleri ve elektrik enerjisi üretimi.....	6
Şekil 1.6. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel (REPA) atlası.....	7
Şekil 1.7. Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum.....	8
Şekil 1.8. İşletmedeki RES’ lerin 2020 yılında bölgelere göre dağılımı.....	8
Şekil 1.9. Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması.....	11
Şekil 1.10. (a) Rüzgârı önden alan türbin, (b) Rüzgârı arkadan alan türbin (Çengel ve Cimbala, 2018).....	11
Şekil 1.11. Dikey eksenli rüzgâr türbini çeşitleri	13
Şekil 1.12. Sırasıyla darrieus, H-Tipi Darrieus, Helisel Darrieus.....	14
Şekil 1.13. ABD’ de Oklahoma tıp araştırmaları vakfı çatısında kurulu rüzgar türbinleri.....	15
Şekil 2.1. – Solidworks programında tasarlanan 3 kanatlı konik helisel SRT.....	19
Şekil 2.2. – 3D yazıcıda üretilen 3 kanatlı konik helisel SRT.....	19
Şekil 2.3. Kanat uç hız oranı-güç katsayısı grafiği.....	24

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Bazı ülkelerin kaynak bazında elektrik üretim oranı (2016).....	5
Tablo 1.2. Ülkelerin 2017 yılsonu yenilenebilir elektrik kurulu güç kapasitesi(GW).....	6
Tablo 1 - SRT' nin ölçüleri.....	18
Tablo 2 – Maliyet analizi.....	24

SEMBOLLER DİZİNİ

C_d	Sürüklenme katsayısı
F_d	Sürüklenme kuvveti
A_p	Projeksiyon alanı
ρ	Akışkanın yoğunluğu
V_x	Karşı akım hızı
λ	Uç Hız oran
r	Dönme yarıçapı
ω	Açısal hız
V_s	Rüzgar hızı
n	Devir sayısı
Re_D	Reynold sayısı
D_h	Türbinin uzunluk ölçeği
μ	Dinamik viskozite
\dot{Q}	Hacimsel debi
A	Akışkanın geçtiği türbinin kesit alanı
P_{max}	Maksimum türbin gücü
S	Türbin alanı
C_p	Güç katsayısı
P_f	Rüzgar türbininin ürettiği faydalı güç
P_r	Rüzgar gücü
A_T	Rüzgar türbininin bir turdaki süpürme alanı
P	Elektriksel güç
V	Kutuplar arasındaki voltaj
I	Devreden geçen akım
D_1	Üst çap
D_2	Alt çap
H	Türbin yüksekliği
M_d	Döndürme momenti

1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son zamanlarda teknolojik gelişmelerle birlikte malesef ki, enerji tüketiminin artması, hava kirliliği ve küresel ısınmadaki artış mevcut fosil yakıt rezervlerinin gün geçtikçe azalmasına, bu enerji kaynaklarının kullanımı ise çevre kirliliğine ve çevre dengelerinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu durum araştırmacıları yenilenebilir enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Kirliliği önlemek için güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrojen, biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının değişik sektörlerde ve özellikle elektrik enerjisi üretiminde uygulanabilmesi için araştırmalar sürdürülmektedir. [1]

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir, taşıma sorunu bulunmayan ve enerji üretimi için çok yüksek teknoloji gerektirmeyen bir enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağı atmosferde serbest ve bol bir şekilde bulunmakta ve çevre kirliliği oluşturmamaktadır. Güneş ve dünya var olduğu sürece var olmaya devam edecek olan rüzgâr enerjisinden yararlanmak için başka bir enerji şekline dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için rüzgâr türbinlerinden yararlanılır. Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için kullanılır. Son yıllarda rüzgâr türbin teknolojisinde meydana gelen gelişmeler rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretim maliyetini azaltarak rüzgâr enerjisini fosil yakıt rezervleriyle rekabet edebilir bir hale getirmiştir. Bu nedenle, birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülke, rüzgâr gücünden elektrik enerjisi üretme çalışmalarını devlet politikası haline getirerek her aşamada desteklemektedir.[2]

Günümüzde rüzgârdan elektrik üretimi için büyük güçlü türbinler ile kurulan rüzgâr santrallerinin yanında, küçük güçlü türbinler olan rüzgâr jeneratörleri de kullanılmaktadır. Rüzgârdan sağlanacak güç, rüzgâr hızının küpüyle doğru orantılıdır. Yerden yükseldikçe logaritmik bir artış göstermektedir. Dünyada şu an kullanılan rüzgâr enerjisi ile mevcut rüzgâr enerjisi potansiyeli karşılaştırıldığında rüzgârın kullanımı çok düşük kalmaktadır. Rüzgar santralleri, fosil yakıt santralleriyle kıyaslandığında çok daha ekonomik ve temiz üretim yapabilmektedir.

Örneğin yatırım maliyetleri 1000 dolara üretim maliyetleri de 6-7 cente kadar ucuzlayan rüzgar enerjisi, termik ya da doğalgazlı santrallerin 4-6 centlik maliyetleriyle yarışır düzeye geldiğini göstermektedir. Ayrıca rüzgar türbini, kurulduğu arazinin %5'ini işgal ettiğinden ve türbin kanatları yerden epeyce yüksekte olduğundan, kalan arazi diğer

amaçlar için rahatlıkla kullanılabilir. Buna ek olarak deniz alanları karalara göre daha büyük potansiyel gösterdiği için denizlerde deniz üstü (off-shore) tipi rüzgar santrallerinin kurulmasına başlanmıştır. Türkiye’deki duruma gelince, Türkiye’ nin hedefi olarak 2010 yılında elektriğin %2’ sini rüzgardan elde etmek gösterilmiştir. Rüzgar türbinlerinin imalat maliyetlerinin düşürülmesine, yer seçimine dayalı potansiyel belirleme çalışmalarına ve yeni ölçme teknolojilerine yönelik araştırmalara ağırlık verilmiştir. [3]

1.1.1 Rüzgar Enerjisinin Tarihçesi

Günümüzdeki en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de rüzgâr enerjisidir. En eski rüzgar kuvvet makinesi olan yel değirmenleri en az 3000 yıldır esas olarak tahıl öğütmek veya su pompalamak için kullanılmaktadır yelkenli gemilerde ise rüzgar daha da uzun süredir önemli bir güç kaynağı olmuştur. M.Ö 250 yıllarında İran’ da tahıl öğütmede kullanılan ilk düşey eksenli rüzgar çarkları daha sonra tüm İslam ülkelerine ve Akdeniz’ e kıyısı olan ülkelere yayılmıştır. Yel değirmenleri, 1105 tarihinde Fransa’ da görülmeye başlanmış ve 1143’ de İngiltere’de ilk yel değirmeni yapılmıştır. XIX. yüzyıl sonlarına doğru Almanya’da rüzgar ile çalışan kuvvet makinaları görülmeye başlandı. Hollanda’ da ise çatısı dönen yel değirmenleri XVIII. yüzyıl başlarında kullanılmıştır. Yazılı belgeli ilk yel değirmeni, M.S. 644 yılına ait İran-Afganistan sınırındaki Seistan’ dadır. Yel değirmenleri, Çin’ de M.S. 750-850 yıllarında pirinç tarlalarının sulanmasında kullanılmıştır. İlk olarak Doğuda kullanılan düşey eksenli yel değirmenleri, Batılılar tarafından geliştirilmiş ve yatay eksenli hale getirilmiştir. Yatay eksenli ilk yel değirmeni örneği, 1180 yılında Normandiya Krallığı zamanına aittir. İlk rüzgar elektriği de, Danimarkalı Profesör Paul La Cour tarafından 1891 yılında üretilmiştir. Doğru akım elde eden Paul La Cour, elektroliz yoluyla hidrojen gazı elde etmiş ve bu şekilde rüzgar enerjisini depolamıştır. Yatay eksenli yel değirmenleri kırsal ekonominin ayrılmaz bir parçasıyken 1918 yılı sonrasında büyük şehirler elektriğe kavuşmuş ve dizel yakıtların ucuzluğu nedeniyle rüzgar enerjisini değerlendirme çabaları, bir kenara bırakılmıştır. Rüzgar enerjisi kullanımının tarihsel gelişimi,1941 yılında yapılan Smith-Putnam rüzgar türbini olan dünyanın ilk megawatt-büyüklüğündeki rüzgar türbini ile devam etmiştir. Ancak başarısızlık ile sonuçlanmıştır. [4-5-6]

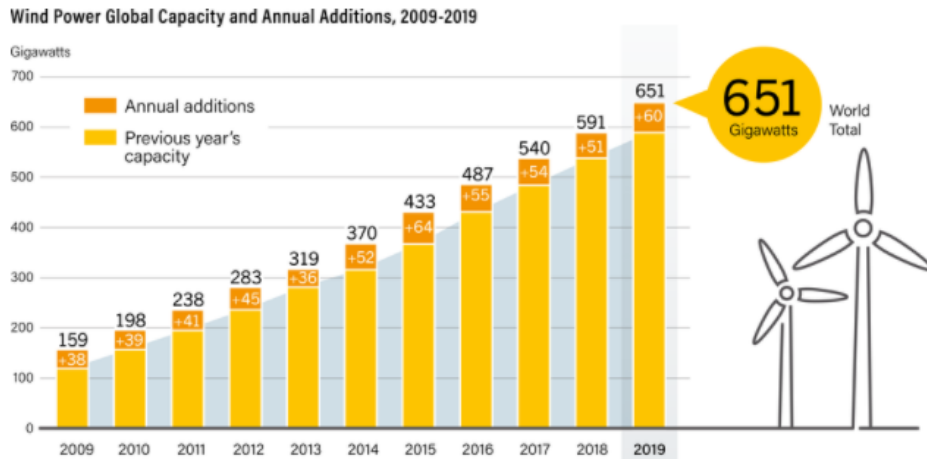


Şekil 1.1. Smith-Putnam rüzgar türbini

Smith-Putnam rüzgâr türbini 53 m. çapında 1,25 MW' lık olup 1939 yılında ABD, Vermont, Granpa' s Knob' da kuruldu. Bu tasarım o zamanın en iyi mühendisleri ve bilim adamlarını bir araya getirdi (Aerodinamik tasarım: Von Karman, dinamik analiz: Den Hartog) ve bu rüzgâr türbini 1980' li yılların megawattlık bazı makinelerden daha uzun süre başarılı bir şekilde çalıştı. Teknolojik gelişmelerde bir dönüm noktası oldu. Kaynak tamiri nedeniyle (bir kanadını kaybederek) arızalandı. [6]

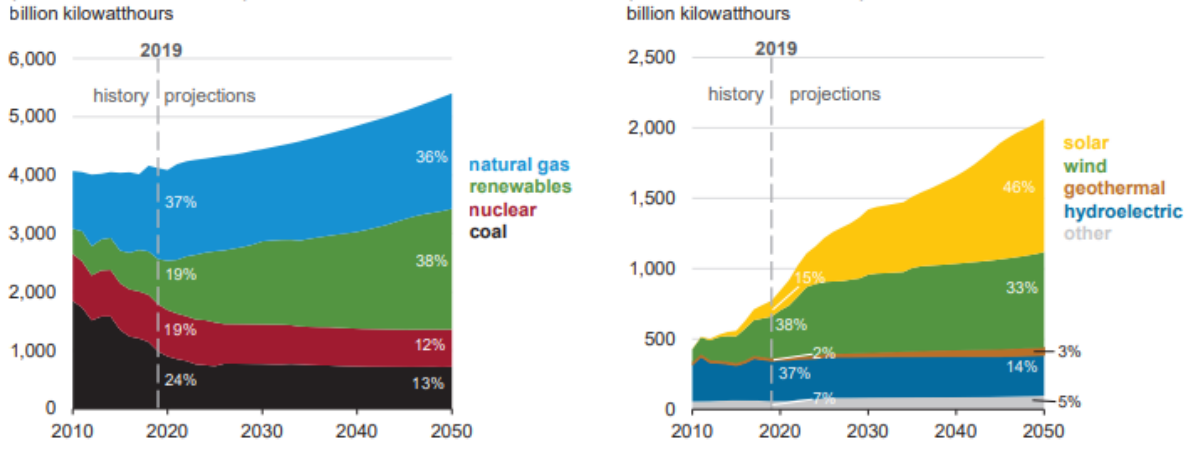
1.1.2 Dünyada Rüzgar Enerjisi

Güneş enerjisi gibi rüzgar enerjisi de bölgelere göre farklılık göstermektedir. Rüzgar enerjisine etki eden faktörler arasında; ülkelerin denize kıyısının olup olmadığı ve üzerinden geçen havadaki akımların etkisi vardır. Günümüze bakacak olur isek; dünyada rüzgar enerjisi yaygın olarak kullanılabilir. [6]



Şekil 1.2. Küresel rüzgar enerjisi kapasitesi ve yıllık artış miktarı

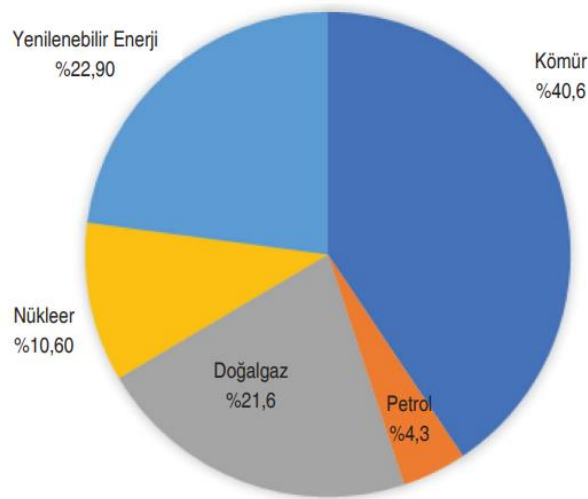
Rüzgar enerjisinde 2019' da dünyanın elektrik şebekelerine yaklaşık 60 GW yeni kapasite eklenmiştir. Bu, şimdiye kadarki en büyük ikinci yıllık kapasite artışı olup 2015' teki zirveden (63,8 GW) sonra art arda üç yıllık düşüşü takip eden rüzgar enerjisi, küresel pazarda giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. [7]



Şekil 1.3. Seçilmiş yakıtlardan 2019 yılı enerji üretimi ve yenilenebilir elektrik üretimi grafikleri

Doğalgaz ve yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi, düşük doğalgaz fiyatları nedeniyle artmakta ve azalan güneş ve rüzgar yenilenebilir kapasite maliyetleri, bu yakıtları giderek daha rekabetçi hale getirmektedir.[8]

2016 yılı sonu itibari ile dünya genelinde birincil enerji kaynak bazında elektrik enerjisi üretim oranları Şekil 1.4'de belirtilmiştir. Dünya elektrik üretimi için en yaygın olarak kullanılan kaynaklar sırasıyla kömür, yenilenebilir enerji, doğalgaz kaynaklarının geldiği görülmektedir.



Şekil 1.4. Dünya genelinde birincil enerji kaynak bazında elektrik enerjisi üretimi[9]

Buradan dünya elektrik enerji ihtiyacının büyük bir kısmı (yaklaşık %88) fosil yakıtlardan elde edildiği görülmektedir. İlerleyen zamanlarda ülkelerin ve küresel ekonomilerin hızla büyüebilmesi için ülkelerin enerji ihtiyaçlarının ve tüketimlerinin de aynı hızda büyümesi gerektiği bilinmektedir. Fosil yakıtlar dünyanın her bölgesinde bulunmasına rağmen, yakıtların çıkarıldıkları bölgelerdeki siyasi ve ekonomik sorunlar bütün dünyayı etkilemektedir. Ayrıca geleneksel enerji kaynaklarından günümüz teknolojileri ile elektrik üretimi sırasında ciddi çevre kirliliği sorunları meydana gelmektedir. Bu sebeple bütün dünyada yeni ve temiz enerji türlerine olan ilgi ve araştırmalar hızlanmaktadır. [10]

Elektrik enerjisi üretiminde en yüksek oranlara sahip ülkeler ve kaynakları 2016 yılı sonu itibariyle Tablo 1.1.' de verilmiştir. Bu verilere göre kömür kaynağında ilk sırada gelen ülkeler ABD, Çin, Hindistan olmaktadır. Doğalgaz kaynağında ise Rusya, nükleer enerjide Fransa ve yenilenebilir enerjide Kanada ilk sıralarda gelmektedir.

Tablo 1.1. Bazı ülkelerin kaynak bazında elektrik üretim oranı (2016)

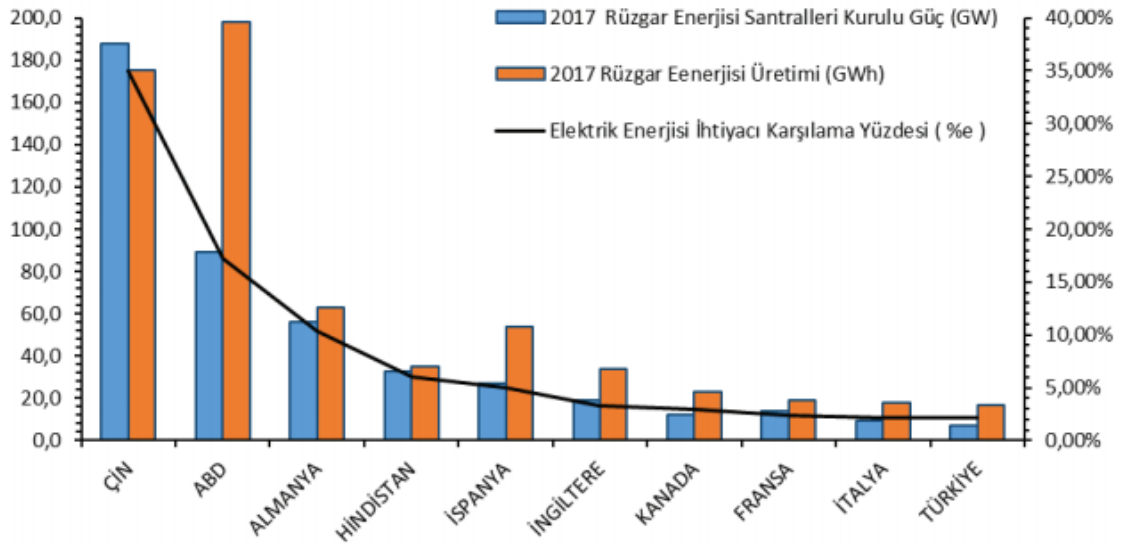
Ülke	Kömür	Petrol	Doğalgaz	Nükleer	Yenilenebilir Enerji	Diğer
Fransa	%2,1	%0,3	%2,3	%77,6	%17,5	%0,2
Almanya	%45,4	%0,9	%9,9	%15,5	%28,0	%0,3
ABD	%39,5	%0,9	%26,8	%19,1	%13,6	%0,1
Kanada	%9,9	%1,2	%9,3	%16,4	%62,8	%0,3
Çin	%72,5	%0,2	%2,0	%2,3	%23,0	%0,0
Hindistan	%75,1	%1,8	%4,9	%2,8	%15,5	%0,0
Rusya	%14,9	%1,0	%50,1	%17,0	%17,0	%0,0
Dünya	%40,6	%4,3	%21,6	%10,6	%22,9	%0,1

2017 yılı sonu yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik kurulu güç kapasiteleri ülkelere göre dağılım oranları ise Tablo 1.2' de verilmiştir. Bu hesaplanmış yenilenebilir kaynaklı elektrik güç kapasitesi verilere göre yenilenebilir enerjiden Çin 647 GW miktarı ile en çok fayda sağlayan ülkelerin başında geldiği açıkça belirtilmiştir.

Tablo 1.2. Ülkelerin 2017 yılsonu yenilenebilir elektrik kurulu güç kapasitesi(GW)

Enerji Kaynakları	Çin	ABD	Hindistan	Almanya	Türkiye	Avrupa	Dünya
Hidrolik	313	80	47	5,6	27,2	127	1114
Rüzgar	188	89	33	56	6,8	169	539
Biyoenerji	15	16,7	9,5	8	0,63	40	122
Güneş PV	131	51	18,3	42	3,42	108	442
Güneş Termal	0	1,7	0,2	0	0	2,3	4,9
Jeotermal	0	3,6	0	0	1,06	0,9	13,5
Toplam	647	242	108	111,6	39,11	447,2	2235,4

Dünyadaki toplam rüzgâr enerji santrallerinin kurulu güç miktarı 2017 de 539 GW’ dir [11]. Belirli ülkelerin 2017 yılına ait rüzgâr enerjisi santralleri kurulu güç ve elektrik enerjisi üretim miktarları Şekil 1.5’ de belirtilmiştir.



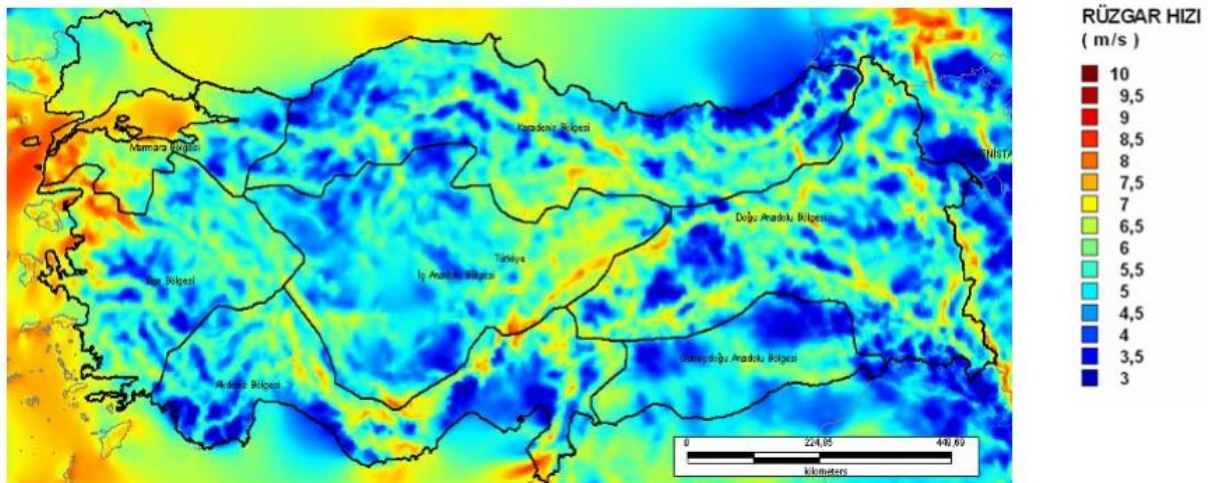
Şekil 1.5. Dünya geneli ülkelerin rüzgâr enerjisi kurulu güç kapasiteleri ve elektrik enerjisi üretimi (2017) [9]

1.1.3 Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

Ülkemizde rüzgâr enerjisi durumunun analiz edilebilmesi için, öncelikle ülkemiz rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye’ de rüzgâr enerji potansiyelini belirlemek için rüzgâr ölçümleri, diğer meteorolojik ölçümlerle birlikte

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yapılmaktadır.[13] REPA, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası' dır. Bu atlas ile birlikte denizlerimizde, kıyılarımızda ve yüksek rakımlı bölgelerimizde daha önce ölçemediğimiz yüksek yoğunluklu potansiyeller görünür hale gelmiştir.

Rüzgâr kaynak bilgileri, aşağıdaki gibi tematik haritalarla desteklenerek Türkiye geneli, grid, coğrafi bölge, il ve seçilecek herhangi bir alan veya nokta bazında sorgulanabilmektedir. Böylelikle rüzgâr enerji santrali kurulabilecek yerler kolayca belirlenebilmekte, ön fizibilite çalışmaları yapılabilmekte, rüzgâr kaynağı arama amacıyla yapılan çalışmalar ortadan kaldırılarak tasarruf sağlanmaktadır.



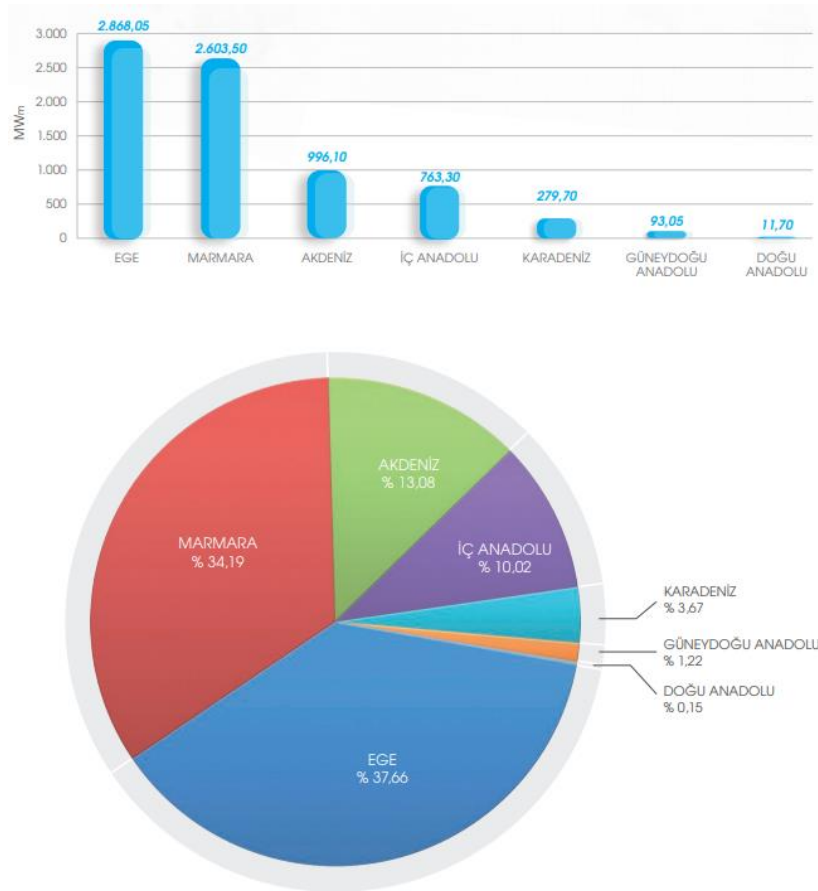
Şekil 1.6. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyel (REPA) atlası [12]

Yıllık ortalama değer alındığında, Türkiye' nin en iyi rüzgâr kaynağı yerleri, kıyı şeritleri, yüksek bayırlar ve dağların tepesinde ya da açık alanların yakınında bulunmaktadır. Açık alan yakınındaki en şiddetli yıllık ortalama rüzgâr hızları Türkiye' nin batı kıyıları boyunca, Marmara denizi çevresinde ve Antakya yakınında küçük bir bölgede meydana gelmektedir. Orta şiddetteki rüzgâr hızına sahip geniş bölgeler ve rüzgâr gücü yoğunluğu Türkiye' nin orta kesimleri boyunca mevcuttur. [13]



Şekil 1.7. Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için kümülatif kurulum

Rüzgâr enerji santrallerinin (RES) kurulumu ülkemizde her yıl artmakta olup, 2008 yılında kurulu rüzgâr türbini 364 iken, 2019 yılı bu sayı 7615’ e ulaşmıştır. 2016 yılı, rüzgâr enerjisi santrali yıllık kurulumunun en fazla olduğu yıldır. RES’ lere yönelik yapılan yatırımların önemli miktarda arttığı görülmektedir.[14]



Şekil 1.8. İşletmedeki RES’ lerin 2020 yılında bölgelere göre dağılımı

Türkiye' nin toplam rüzgâr enerji potansiyeli 40.000 ile 80.000 MW düzeyindedir. Türkiye' nin yıllık ortalama rüzgâr hızının yer yüzeyinden 10 metre yükseklikte, 2,54 m/s ve rüzgâr gücü yoğunluğunun 24 W/m^2 olduğu belirlenmiştir. Türkiye' nin rüzgâr enerjisi kurulu gücü bölgelere göre değerlendirildiğinde, Marmara, Ege ve Akdeniz kıyılarının rüzgâr enerjisi kurulu güçleri diğer bölgelerimize göre çok daha fazladır. [15]

Türkiye'nin özellikle Marmara ve Ege Bölgelerinin rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri için uygun olduğu görülmüştür. Elektrik sarfiyatının en yüksek olduğu bölgelerin Marmara ve Ege olduğu bilindiğinden buralara kurulacak olan rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri ile elektriğin iletimi sırasında ortaya çıkacak kayıpların da azalacağı açıktır.

1.1.4 Rüzgâr Enerjisinin Avantajları

1. Rüzgâr enerjisinin kaynağı fosil yakıtlar olmadığı için işletim sırası boyunca hiçbir kirlenici gaz salınımı olmamaktadır.
2. Radyoaktif atık, hava kirliliğinden dolayı oluşan fazladan harcamalar, toplum sağlığındaki bozulma, petrol sızıntısı, kullanılan yakıtın güvenliği vs. gibi olumsuzluklardan kaçınılmış olunur.
3. Tükenmeyen temiz bir enerji kaynağıdır.
4. Kaynağı güvenilir, yenilenebilir olmasından dolayı zamanla fiyatı artmaz.
5. Rüzgâr türbinlerinin bakım ve işletme masrafları yok denecek kadar azdır.
6. İş yaratan bir sektördür. İşlerin büyük kısmı uzmanlık gerektiren işlerdir.
7. Dışa bağımlılık oluşturmaz, hammaddesi tamamen yerlidir.
8. Rüzgâr enerjisi üretimi, geçici fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.
9. Genel olarak rüzgâr enerjisi üretim tesisleri kömür santrallerine ve güneş santrallerine göre daha az yer kaplar.
10. Rüzgâr türbinleri basit bir teknolojiye sahiptir, rüzgâr enerjisi tesislerinin işletilmesi kolaydır.

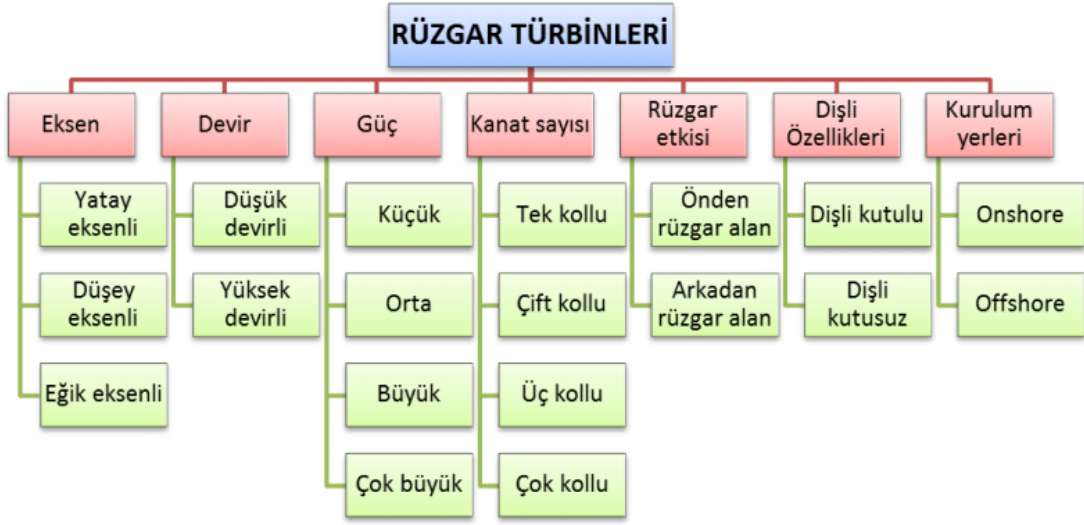
1.1.5 Rüzgâr Enerjisinin Dezavantajları

1. Rüzgârların düzenli olmaması sebebiyle, enerji üretiminde kesikli bir düzen görülür. Yani rüzgârın yeterli hızda veya esmediği dönemlerde enerji üretimi gerçekleştirilemez.
2. Rüzgâr bedava ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen, modern rüzgâr türbinleri pahalıdır.
3. Rüzgâr santralının büyüklüğüne göre değişmekle beraber, 2-3 km çapındaki bir alan içinde, radyo, televizyon ve diğer haberleşme dalgalarını olumsuz etkilemektedir.
4. Rüzgârlı yerlere konumlandırılmasının gerekli olması; ticari güç iletim ağlarından oldukça uzak olmasına neden olur ve yüksek gerilim güç hatlarını gerektirir.
5. Yüksek hızla dönen rotorları (pervaneleri) ile kuşların ölümlerine sebep olmaktadır.
6. Bazılarına göre, doğaya uyumsuz şekilleri nedeni ile doğal ortam şartlarında garip ve çirkin görüntüler sergilemekte, görüntü kirliliği oluşturmaktadır.[16-17]

1.2 Rüzgar Türbinleri

Tahrik edilen kısmı dönme hareketi yapan ve bir akışkanda bulunan enerjii milinde mekanik enerjiye dönüştüren makinalara, türbin denir. Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik-elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Pervane kanatları, pervane göbeği ve pervane miline rotor veya türbin denilir. Pervane mili, dişli kutusuna bağlıdır. Dişli kutusunu jeneratöre bağlayan mile ise, jeneratör mili denir. Bunların tümü, kule tarafından taşınır. Kule ile yer bağlantısı da temel aracılığıyla sağlanır. Tüm bu elemanlara, en genel halde rüzgâr enerjisi tesisi adı verilir. Buna rağmen, yerli ve yabancı literatürde, rüzgâr enerjisi tesisi yerine, rüzgâr türbini denilmesi alışkanlık olmuştur. [18-19]

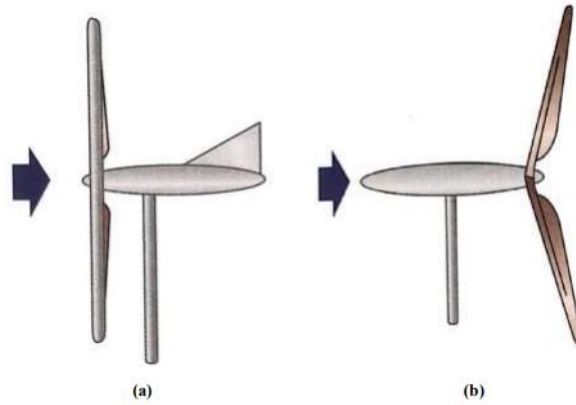
Rüzgâr türbinleri; pervane ekseninin yatay ya da düşey olmasına veya aynı rüzgâr hızındaki devir sayılarına göre gibi farklı şekillerde sınıflandırılabilirler.



Şekil 1.9. Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması [18]

1.2.1 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri (YERT)

Avrupa' daki yel değirmenleri, Amerikan rüzgâr türbinleri ve günümüzde kullanılan modern rüzgâr türbinlerini içeren bu tasarım günümüz rüzgar enerjisi teknolojisinde çok baskın bir yere sahiptir. [16] Bu tip rüzgar türbinleri, dönme eksenleri rüzgar yönüne paralel, kanatları ise rüzgarın esme yönüne dik olarak çalışırlar. Kanatların rüzgârın esme yönüne dik olması ile türbin rotoru maksimum enerjiyi tutabilmektedir. [11] Kanat sayısının azalması bu türbinlerin daha hızlı dönmesini sağlar. Kanatları yüksek performans elde etmek amacıyla gittikçe incelen burulmuş kanat biçimindedir. Rüzgârın geldiği yön (upwind) ve rüzgârın geldiği yönün tersine bakan yön (downwind) olmak üzere iki tür kanat tasarımı vardır. Günümüzde daha çok rüzgârı önden alan rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır.



Şekil 1.10. (a) Rüzgârı önden alan türbin, (b) Rüzgârı arkadan alan türbin (Çengel ve Cimbala, 2018)

Pervaneli tasarımlarda rotor hızı ve türbin çıkış gücü rotor kanatlarının açılarının değiştirilmesi ile kontrol edilebilir. Rotor kanatlarının açılarının değişmesi rüzgâr hızının çok artması gibi olağan dışı durumlarda büyük ölçekli türbinler için önemli bir güvenlik sorunu olmaktadır.[16]

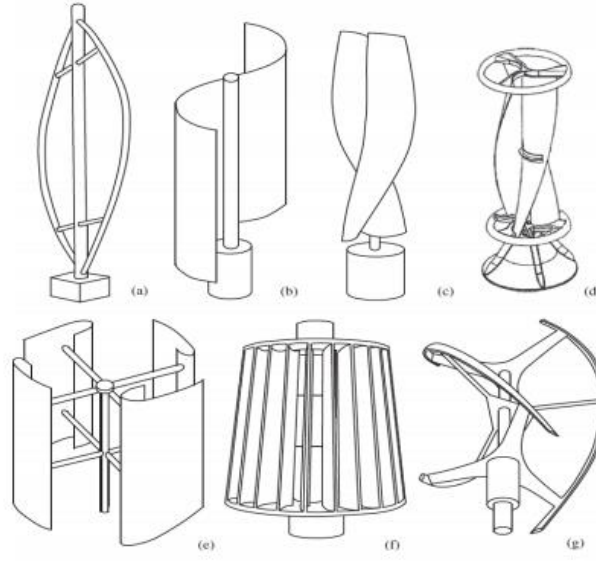
Bu türbinlerde rotor kanatlarının sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Bu türbinlerin üç kanatlı yatay eksenli olanlarının verimi yaklaşık %45' dir. YERT genel olarak yerden 20-30 m yüksekte ve çevredeki engellerden 10 m yüksekte olacak şekilde yerleştirilmelidir. [18]

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine yönelik birçok çalışma mevcuttur. Ackermann ve Soder yürüttükleri çalışmada [20], rüzgâr türbini tasarım kriterleri (kanat sayısı, uç hız oranı, güç katsayısı vb.), güç kalitesi, şebeke bağlantısı ve rüzgâr türbini maliyeti üzerine çalışmıştır. Morcos çalışmasında [21], Mısır' ın rüzgâr enerji potansiyelini ve yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını araştırmıştır. Maalawi çalışmasında [22], yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin aerodinamik performansını, doğrudan ve Glaurent iterasyon metodunu kullanarak belirlemiş olup, doğrudan metodun hesaplama süresi açısından önemli bir avantaj sağladığı sonucuna ulaşmıştır.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin önemli bir kısmı kanat açılarını değiştirerek sabit hızda çalışmak üzere tasarlanmıştır. Dolayısıyla bu sistemler tek bir hızda dönerek, belirlenmiş sabit bir rüzgâr hızında maksimum verimle çalışmaya elverişlidir. Buna ek olarak yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde sistemin çalışabileceği belirli bir rüzgâr hızı aralığı bulunur. Düşük hızlarda türbinin enerji üretmesi zorlaşırken, yüksek hızlarda türbin zarar görmemek için kendini kapatmaktadır.[23]

1.2.2 Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri

Dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşey yöndedir. [6] Genellikle kuleye ihtiyaç duymazlar çünkü türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabilir.



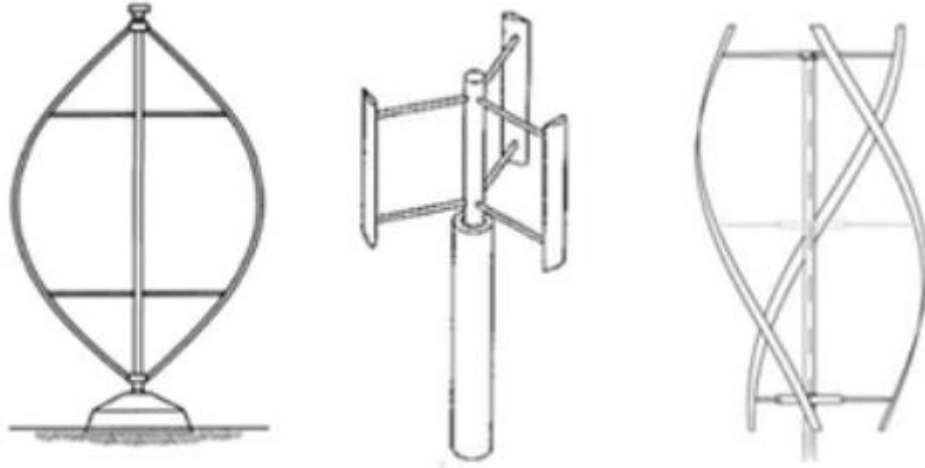
Şekil 1.11. Dikey eksenli rüzgâr türbini çeşitleri: (a) Darrieus, (b) Geleneksel SRT, (c) Helisel SRT, (d) Sarmal, (e) Noguchi, (f) Maglev, (g) Cochrane [24]

Yere yerleştirilebildikleri için kule ihtiyacı olmayan bu rüzgâr türbinlerinde, sistem istenilen rüzgâr yönüne çevrilebildiği için dümen sistemine de gerek kalmamaktadır. Mil parçası dışında diğer tüm parçaların bakım ve onarımı kolaydır. Dikey eksenli türbinlerden elde edilen enerjinin nakledilmesi daha kolaydır çünkü hem elde edilen güç toprak seviyesinde çıkar, hem de yerleşim yerlerine yakın kurulabildikleri için yeni yüksek gerilim güç hatlarına ihtiyaçları yoktur. [17] Çalışma basitliğinden dolayı kullanılan en eski rüzgâr türbini çeşididir. Dezavantajları ise, yere yakın oldukları için alt noktadaki rüzgâr hızları düşüktür. Çalışmaya başlaması için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesi gerekir, bu yüzden ilk hareket motoruna ihtiyaç duyar. Türbin mili yataklarının değişmesi gerektiğinde, makinenin tamamının yere yatırılması gerekir. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri, yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha düşük verime sahiptir. [25]

1.2.2.1 Darrieus Rüzgâr Türbini

Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiştir. [17] Bu türbinde düşey şekilde yerleştirilmiş iki veya üç tane kanat bulunur. Kanatlar, yaklaşık olarak türbin mili uzun eksenli olan bir elips oluşturacak biçimde yerleştirilmiştir. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı olması nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği bu türbinlerde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir. Rüzgârın tek yönden estiği düşünülürse; türbinin verdiği güç, sinüs şeklinde bir eğri

oluşturur. [18] Geometrik formlu aerodinamik kanatlar yüksek performanslı olmasını sağlar. Kanatların hafif eğimli olmasından dolayı kanatlardaki çekme gerilimi en aza iner. Darrieus türbinleri ilk hareketinde bir tahrik motoruna veya Savonius rüzgâr türbinine ihtiyaç duymaktadır. Yüksek rüzgâr hızlarında çalışabilir ve verimi yaklaşık %35' i bulabilmektedir. [17]



Şekil 1.12. Sırasıyla darrieus, H-Tipi Darrieus, Helisel Darrieus

1.2.2.2 Savonius Rüzgar Türbini

1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd Johannes Savonius tarafından bulunmuştur. Savonius rüzgâr türbini, iki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirlerine göre simetrik olarak kaydırılmış kanat adı verilen iki yarım silindirden oluşur. [26] Mekanik güç, Savonius rotorun içbükey ve dışbükey kanatları arasındaki tork farkının bir sonucudur. Belirli bir hızda gelen rüzgar, rotorun içbükey kanadında pozitif tork oluştururken, dışbükey kanadında negatif tork oluşturur. Pozitif torkun negatif torktan büyük olmasından dolayı dönme hareketi oluşur. Tork farkı ne kadar yüksek olursa, mekanik güç o kadar fazla üretilir. [17] Savonius türbinlerinin performans katsayısı (COP) değeri düşük değerlerde olduğu tespit edilse de, savonius rotorlarının diğer tipteki türbinlere nazaran daha düşük başlangıç hızlarında dönmeye başlaması önemli bir avantaj olarak görülmektedir. [27-28] Basit makineler olmalarından dolayı kolay inşa edilebilirler. İki ve üç kanatlı yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin çalışmayacağı kadar düşük rüzgâr hızlarında bile çalışabilmektedir. Ayrıca diğer rüzgâr türbinlerine göre düşük bakım maliyetine sahiplerdir. [29]



Şekil 1.13. ABD’ de Oklahoma tıp araştırmaları vakfı çatısında kurulu rüzgar türbinleri

Düşük açısız hızları ve düşük rüzgâr hızına bağlı olarak teorik tahminleri zor olan aerodinamik davranışa sahiplerdir. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerine göre daha yavaş çalışan rüzgâr türbinleri değişken rüzgâr hızına bağlı olarak elde edilen elektriğin dağıtım şebekesine aktarılması ve düşük güç katsayısından dolayı düşük performans gibi dezavantajları vardır. [29]

1.3 Literatür Taraması

U. Şentürk ve A. Özdamar (2018)' in çalışmalarında, bir Savonius rüzgâr türbinin akış karakteristikleri, HAD simülasyonları aracılığı ile belirlenmiş, Reynolds sayısının türbin performansına olan etkileri incelenmiştir. $Re_D = 4 \times 10^4, 4 \times 10^5, 4 \times 10^6, 8 \times 10^6$ ve 20×10^6 değerlerinde yapılan parametrik simülasyonlar sonucunda, $Re_D = 4 \times 10^6$ değerinde en yüksek güç faktörü değerine ulaşılmıştır. [30]

Klasik kanatlı Savonius türbini referans alınarak yapılan İ. Gül ve A. Kolip (2018)'in çalışmasında yarı parça kanatlı ve parça kanatlı Savonius türbinleri karşılaştırılmıştır. Güç katsayıları dikkate alındığında, klasik modelde 0.28, yarı kanatlı modelde 0.28 ve parça kanatlı modelde 0.38 olduğu bulunmuştur. Parça kanatlı tasarımın güç katsayısında diğer kanat modellerine göre %40'a yakın bir iyileştirme olduğu tespit edilmiştir. Bu performans artışı çalışmanın ideal olan Betz limiti değerine daha çok yaklaştığı görülmektedir. [31]

F. Kılıç ve Y. Çay (2011)' in çalışmalarında 2 kanatlı helisel silindirik Savonius rüzgâr türbini üretilerek kanat içi türbülanslardan oluşacak dirençler en aza indirilip elektrik üretimindeki ivmelenme kolaylaştırılmıştır. Rüzgâr hızları 2,5 m/s ile 4,5 m/s arasında iken türbinden 25 W ile 102 W arasında güç elde edilmiştir. [32]

B. Deda Altan (2006) Savonius rüzgâr çarkının önüne bir yapay perde düzeneği yerleştirerek çarkın statik ve hareketli durumlarında deneysel çalışmalar sürdürerek perdesiz durumda en iyi güç katsayısının 0,1635 iken, perdeli durumda ise $\beta=150$ ve $\alpha=450$ olduğunda en yüksek güç katsayısının perde 1 için 0,3853 olarak elde etmiştir. [33]

M. Göktaş ve F. Kılıç (2019)' in çalışmalarında tasarlanan Savonius rüzgâr türbinleri dört farklı açıda ve üç farklı rüzgâr hızında kanat etrafındaki hız ve basınç dağılımları elde edilmiştir. Tüm basınç grafikleri için en yüksek basınç 0° ve 45° de 86,36 Pa olarak bulunmuştur. [29]

İ. Şahin'in (2015) "Bir Savonius Rüzgâr Türbininin Performansının Sayısal İncelenmesi ve İyileştirilmesi" adlı tez çalışmasında klasik Savonius türbini üzerinde yapılan bir deneysel çalışma referans alınmış ve Savonius rüzgâr türbininin sayısal analizi Fluent bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Sayısal olarak yapılan çalışma referans değerler ile doğrulanmış ve daha sonra yeni tasarımlar yapılmış ve sayısal olarak bu tasarımların

etkisi incelenmiştir. Yapılan bu tasarımlar da rüzgâr türbini performansını iyileştirmek için klasik Savonius türbin etrafına 6 ve 8 adet yönlendirici plakalar yerleştirilmiştir. Sonuç olarak, yeni tasarlanmış Savonius türbinin, klasik türbine göre güç katsayısında ortalama %30 değerinde artış tespit edilmiştir. [34]

D. Keleş (2012) bu çalışmasında elektrik üretim amaçlı rüzgâr türbin tasarımı yapmış ve geliştirmeye çalışmıştır. Tasarım öncesinde gerekli hesaplamalar yapılmış ve sistemin tasarlanmasında CAD programı olarak Mechanical Desktop programı kullanılmıştır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kanatlar ve kanatların aerodinamik yapısı hakkında bilgiler verilmiş ve rüzgâr enerjisi ile ilgili denklemler ifade edilmiştir. Rüzgâr türbini tasarımı için gerekli hesaplamalar yapılmış ve tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen türbinin imalat safhaları detaylandırılarak anlatılmıştır. [35]

Dikey eksenli rüzgar türbininin kanat performansının deneysel ve nümerik olarak incelendiği E. Akman (2019)' ın çalışmasında, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri ile literatürde yaygın olarak kullanılan NACA0012 kanat profili referans alınarak parametrik ve nümerik optimizasyon metotlarıyla yeni profiller geliştirilmiştir. Nümerik optimizasyonla türetilen kanat profili, parametrik optimizasyonla türetilen kanat profiline göre %27 daha yüksek güç katsayısı değerine ulaşmıştır. [36]

Ş. M. Sert (2019)'in bu çalışmasında, düşük performanslı Savonius türbininin performansını arttırmak için Ansys Fluent programında 7,5 m/s rüzgar hızında çözümlenmeler yapılmıştır. b/d parametresine bağlı yapılan tasarımlarda 0,207 tork katsayısı değerine ulaşıp klasik Savonius türbin performansına en yakın kanat tipi belirlenmiştir. Daha sonra buna benzer yarım altıgen formlu kanatlar tasarlanmış ve çözümlenmeler yapılmıştır. YA3 isimli kanat tasarımından elde edilen statik tork değeri, klasik Savonius türbininden elde edilen tork değerinden daha yüksek çıkmıştır. [37]

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

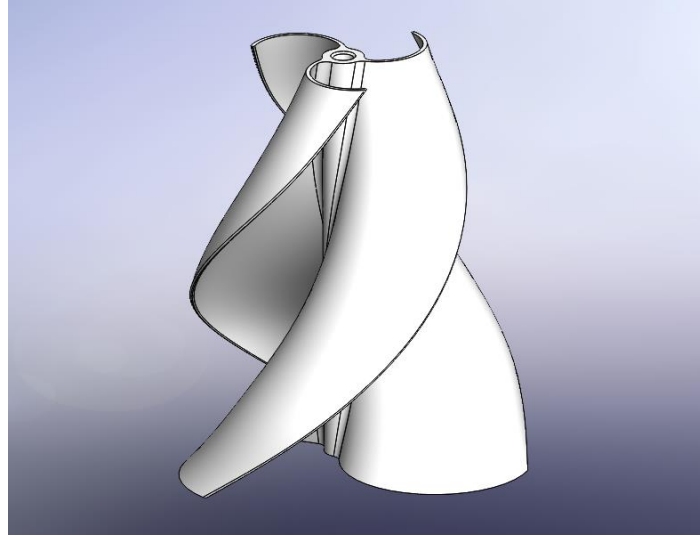
2.1 Tasarım Aşamaları

Bu tez çalışmasında dikey eksenli rüzgar türbinlerinden biri olan konik helisel SRT üzerinde çalışılmıştır. Düşük hava hızlarında çalıştığı bilinen konik helisel SRT' nin led yakacak kadar enerji üretmesi amaçlanmıştır. Bunun için en yüksek verimin görüldüğü 3 kanatlı türbin tipi tercih edilip buna göre tasarım yapılmıştır. Güç katsayısı hesabı için gereken döndürme momenti Ansys-Fluent programı üzerinden bulunmuştur. Hava hızı değeri önceki çalışmalardan faydalanılarak ortalama bir değer olan 10,5 m/s olarak seçilmiştir. SRT' nin tasarım özellikleri ve parametreleri literatürdeki çalışmalar incelenerek belirlenmiştir. SRT' nin ölçüleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1 – SRT' nin ölçüleri

Rotor uzunluğu (H)	200 mm
Rotor üst çapı (D_1)	90 mm
Rotor alt çapı (D_2)	180 mm
Rotor ortalama çapı (D)	135 mm
Rotor uzunluk – çap oranı (H/D)	1,48
Kanat tipi	Yarı dairesel
Kanat sayısı	3
Kanat helis açısı	180°
Mil çapı	10 mm
Çap oranı (D_1/D_2)	0,5

SRT ölçülerinin belirlenmesinde deneysel çalışmaların yapılabileceği hava tüneli ve 3D yazıcı boyutları dikkate alınmıştır. 3 kanatlı konik helisel savonius rüzgar türbininin CAD tasarımı Solidworks programı ile yapılmıştır. Tasarımı yapılan rüzgar türbini Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1. – Solidworks programında tasarlanan 3 kanatlı konik helisel SRT

Solidworks programında tasarımı yapılan SRT' nin imalatı PLA filament kullanılarak 3D yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Yazıcıda 0,4 mm nozul ucu kullanılmıştır. 3D yazıcı ile üretilen SRT Şekil 2.2' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. – 3D yazıcıda üretilen 3 kanatlı konik helisel SRT

Üretilen türbinden ilk olarak elde edilen gücü arttırmak için bir kayış kasnak sistemi tasarlanmıştır. Ek-1' de ilk yapılan tasarım görülmektedir. Ancak türbin gücünün buradaki sürtünmeleri ve dinamonun direncini yenememesinden dolayı sistem Ek-2' deki gibi değiştirilerek AC motoru rotorun altına altınıp sürtünme ve dirençlerden kaynaklanan kayıplar en aza indirilmeye çalışılmıştır.

2.2 Savonius rüzgâr türbinlerinin aerodinamik özellikleri

Rüzgâr türbinlerindeki ana fikir, pervane alanından geçen hava kütesinin (yani rüzgârın) hızını azaltarak, hava kütesinin sahip olduğu kinetik enerjinin belirli bir kısmını önce mekanik sonra elektrik enerjisine dönüştürmektir.[38] Rüzgâr türbini analizinin yapılabilmesi için rüzgâr türbini aerodinamik tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler; güç katsayısı, kanat uç-hız oranı, kanat açısı ve katılık oranı olup türbin performansına olan etkileri aşağıda kısaca izah edilmiştir. [39]

2.2.1 Sürüklenme Kuvveti

Aerodinamik sürüklenme kuvveti; akışkanın yoğunluğu, karşı akım hızı, cismin geometrik yapısı ve duruş biçiminin de bulunduğu bir dizi parametreye bağlıdır ve aerodinamik analizi yapılan her geometri için bu parametrelerin ayrı ayrı listesini vermek pratik değildir. Bunun yerine cismin direnç karakteristiğini temsil eden uygun boyutsuz bir sayıyla çalışmanın daha elverişli olduğu görülmüştür. Bu sayı sürüklenme katsayısıdır ve Denklem 1'deki gibi hesaplanır. [40-30]

$$C_d = F_D / \left(\frac{1}{2} A_p \rho V_s^2 \right) \quad (1)$$

$$F_d = \frac{1}{2} A_p \rho V_s^2 \quad (2)$$

2.2.2. Kanat Uç Hız Oranı

Tüm rüzgâr türbinlerinde de olduğu üzere, V_s (m/s) serbest akım hızındaki rüzgâra maruz kalan ve ω (rad/s) açısal hızı ile dönen, r (m) dönme yarıçapına sahip bir Savonius rüzgar türbini için devirlilik sayısı (uç-hız oranı),

$$\lambda = \frac{r\omega}{V_s} = \frac{2\pi r n}{60 V_s} \quad (3)$$

şeklindedir.

Sabit bir rüzgâr hızı için biri çok büyük biri çok küçük iki farklı hız oranında bir rüzgâr türbinin çalıştığı kabul edilsin. Küçük hız oranında pervaneler yavaş dönecektir. Bu durumda rüzgârdaki bulunan gücün ilgili kısmı mekanik enerjiye çevrilemeyecektir. Yüksek hız oranında ise türbin hızlı dönecek ve kanat alanından geçen rüzgâra engel teşkil edecektir. Bu durumda kanat alanından geçen hava akımının kütlesi azalacak ve yine rüzgârdan alınan güç azalacaktır. Buradaki yorumdan her rüzgâr türbini için hız oranına ait optimum bir değer

bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Yani kanat uç hız oranını optimum yapmak demek, her rüzgâr hızında kanatları farklı bir hızda döndürerek, rüzgârdan alınan mekanik gücü maksimum yapmak demektir.[38] Tek kanatlı rüzgâr türbinlerinde kanatlar çok hızlı döndüğünden uç-hız oranı (λ) 6-20 arasındayken, üç kanatlı rüzgâr türbinlerinde uç-hız oranı (λ) 5-8 civarındadır.

2.2.3. Reynolds Sayısı

Sürükleme katsayısının, Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir. ($C_d = f(Re)$). Fakat bu bağıntı $Re < 10^4$ olduğu durumlar için geçerlidir.[41] Akış rejimine ilişkin Reynolds sayısı, havanın yoğunluğu ρ , dinamik viskozitesi μ ($1,789 \times 10^{-5}$ kg.m/s), havanın hızı V_s ve türbinin uzunluk ölçeği $D_h = 2r$ olmak üzere,

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V_s \cdot D_h}{\mu} \quad (4)$$

ile ifade edilir.

2.2.4. Hacimsel Debi

Bir kesitten birim zamanda geçen akışkan hacmine hacimsel debi denir. \dot{Q} hacimsel debi, V_s havanın hızı ve A akışkanın geçtiği borunun kesit alanı olarak ifade edilir.

$$\dot{Q} = V_s \cdot A \quad (5)$$

2.2.5. Güç Katsayısı

Rüzgâr hızı arttıkça rüzgâr gücü ve dolayısıyla türbin giriş gücü de artmaktadır. Türbin giriş gücünü belirleyen diğer parametre kanat güç katsayısıdır. Güç katsayısını ise hız oranı belirlemektedir. Hız oranı optimum değerinde tutulursa, Betz teoremine göre pervane güç katsayısının değeri de maksimum, yani en fazla 0.5926 olabilmektedir. Fakat gerçek uygulamalarda birçok ideal olmayan durumdan dolayı, genellikle 0.45 ile 0.55 arasında kalmaktadır.[17]

Rüzgar gücü, rüzgar hızı arttıkça hızın küpüyle ve çarkın alanıyla doğru orantılı olarak artar. Maksimum enerjiyi sağlayan bağıntı aşağıdaki şekildedir.

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_s^3 \quad (6)$$

Bu enerjininse sadece belirli bir kısmından rüzgar çarkı yararlanabilmektedir.

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_s^3 \quad (7)$$

Buradan, $\frac{P_{max}}{T} = \frac{16}{27} = 0,5926$ Betz limiti bulunur. [42]

Türbin milindeki mekanik gücün, türbin ön bakış alanındaki mevcut rüzgâr gücüne oranı, enerji dönüşümüne ilişkin verimliliği ortaya koyan türbin güç faktörüdür. C_p güç katsayısı, P_f rüzgâr türbininin ürettiği faydalı güç, P_r rüzgar gücü, ρ havanın yoğunluğu, A_T rüzgar türbininin bir turdaki süpürme alanı ve V_s havanın hızı olmak üzere,

$$C_p = \frac{P_f}{P_r} = \frac{P_f}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_s^3} \quad (8)$$

şeklinde ifade edilir.

2.2.6. Elektriksel Güç

Elektrikli cihaz tarafından tüketilen elektriksel güç, kutuplar arasındaki V voltajı ile devreden geçen akım şiddetinin I çarpımıdır. [43]

$$P = V \cdot I \quad (9)$$

2.3. Mühendislik Hesaplamaları

Rüzgar türbininin bir turda süpürdüğü kesit alanı,

$$A = \frac{D_1 + D_2}{2} \times H \quad (10)$$

$$D_1 = 0,09 \text{ m}$$

$$D_2 = 0,18 \text{ m}$$

$$H = 0,2 \text{ m}$$

$$A = 0,027 \text{ m}^2$$

Rüzgar türbininin ürettiği faydalı güç,

$$P_f = M_d \times \omega \quad (11)$$

$$M_d = 0,022738875 \text{ Nm (Ansys-Fluent programından bulunmuştur.)}$$

$$n = 200 \text{ rpm}$$

Açısal hız,

$$\omega = \frac{\pi \times n}{30} \text{ rad/s} \quad (12)$$

$$\omega = 20,944 \text{ rad/s}$$

$$P_f = 0,476243 \text{ W}$$

Rüzgar gücü,

$$P_r = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_r^3 \quad (13)$$

$$P_r = 19,1442 \text{ W}$$

Güç katsayısı,

$$C_p = \frac{P_f}{P_r} \quad (14)$$

$$C_p = \frac{0,476243}{19,1442}$$

$$C_p = 0,025$$

Hesaplanan güç katsayısının betz limitine uygun olduğu görülmüştür. Kanat uç hız oranı - güç katsayısı grafiği Şekil 2.3.' te verilmiştir.

Kanat uç hız oranı,

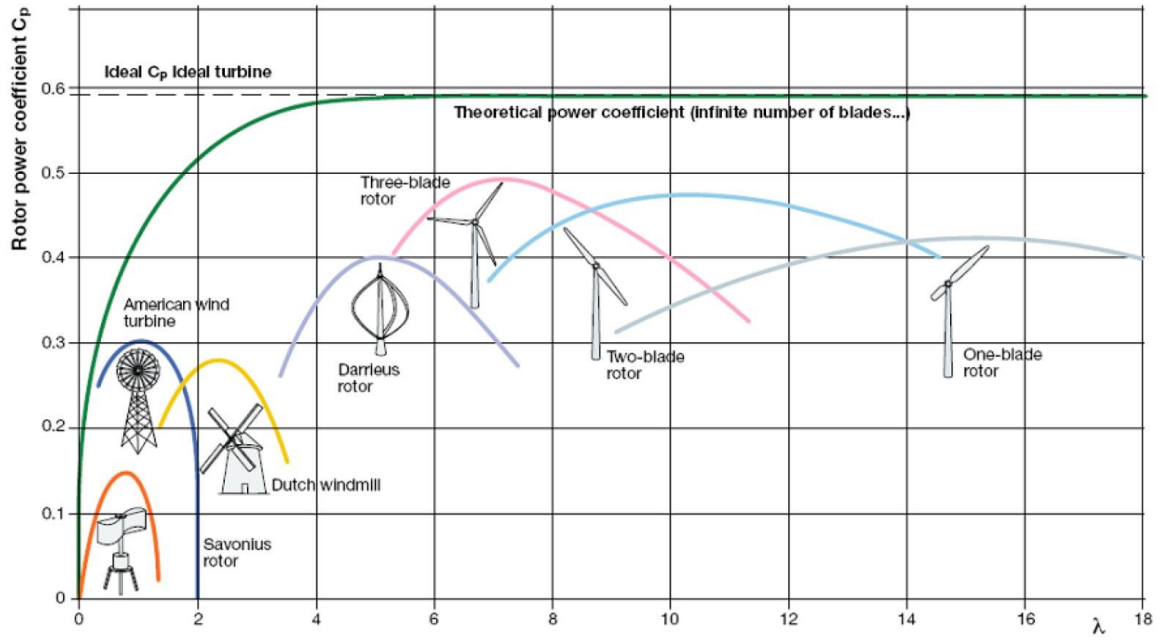
$$\lambda = \frac{0,135 \times 20,94}{10,5} = 0,27$$

Reynolds sayısı,

$$Re = \frac{1,225 \times 10,5 \times 0,27}{1,789 \times 10^{-5}} = 194124$$

Hacimsel debi,

$$\dot{Q} = 10,5 \times 0,027 = 0,284 \text{ m}^3/\text{s}$$



Şekil 2.3. Kanat uç hız oranı-güç katsayısı grafiği

2.4 Maliyet Analizi

Tablo 2 – Maliyet Analizi

MALZEME	ÖZELLİKLER	BİRİM FİYAT	ADET	TOPLAM
Filament	PLA Plastik	122,00 TL	1	122,00 TL
Led	2 W Mini Led	1,00 TL	3	3,00 TL
Motor	AC Motor	60,00 TL	1	60,00 TL
Ahşap Plaka	20 mm Fiber 250mmx250mm	50,00 TL	1	50,00 TL
Mil	300 mm	10,00 TL	1	10,00 TL

Anahtar	-	10,00 TL	1	10,00 TL
Bağlantı Elemanları	-	100,00 TL	-	100,00 TL
Ek harcamalar	-	-	-	150,00 TL
ÜRETİM MALİYETİ	-	200 TL	-	200,00 TL
Toplam Maliyet: 705,00 TL				

3. BULGULAR

Bu çalışmada dikey eksenli rüzgar türbinlerinden biri olan konik helisel Savonius rüzgar türbininin bir ledi yakabilmesi için gerekli tasarımı yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda en verimli durum olduğu öğrenilen 3 kanat yapısı tercih edilmiştir. En başta düşünülen rotor kanat uzunluk – çap oranının yetersiz olduğu görülüp, çap arttırılarak bu oran düşürülmüştür. Literatür araştırmalarından, konik helisel SRT' lerin diğer türbin türlerine göre daha düşük güç katsayısına sahip oldukları bilindiğinden, türbinden elde edilecek faydalı gücün arttırılması için 3D yazıcıda üretilen türbinin doluluk oranı düşürülüp ağırlığı azaltılmıştır. Bu sayede istenilen ledin yanması amaçlanmıştır. Aranılan özelliklere uyum sağlayan yazıcı malzemesi olarak ise PLA filament seçilmiştir.

Başlangıçta tasarlanan sistemde türbinin ürettiği güç kayış kasnak sistemindeki sürtünmeleri ve dinamo motorunun direncini yenemediğinden dolayı bu sistemden vazgeçildi. Tasarımda dinamo motoru yerine AC motoru kullanılıp, bu motor rotorun altına yerleştirildi. Bu şekilde sürtünme kayıpları ve dirençler en aza indirilip ledin yanması sağlandı.

4. TARTIŞMA

Başlangıçta olan kayış kasnak sisteminin yerine kullanılan rotorun altına yerleştirilen motor sisteminde ilk sisteme göre daha başarılı bir durum elde edilmiş olsa da isenilen duruma uygun birçok motor denenmiş ancak daha az dirençli ama led yakabilecek seviyede bir motor bulunmasında zorlanılmıştır. Yazıcının üretebileceği boyutlara bağlı kalındığından alt çap en fazla 190 mm seçilmiştir. Daha büyük boyutlarda türbin üretimi yapılabilirse kullanılacak motorun da daha kolay seçilebileceği görülmüştür. Tasarım sürecinde önemli bir husus olan boyutlar, birkaç tez üzerinden gidilerek, istenilen ledin yanabilmesi için çap oranı da 0,5 seçilmiştir.

5. SONUÇLAR

Çevre kirliliği oluşturmayan, atmosferde bol ve serbest bir şekilde bulunan rüzgar enerjisi, artan enerji tüketimiyle gün geçtikçe azalan fosil yakıt rezervlerinin yerine kullanılabilir en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Enerji üretimi için çok yüksek teknoloji gerekmeyen ve taşıma sorunu olmayan rüzgar enerjisi türbinler yardımıyla başka enerji şekillerine dönüştürülür.

Bu çalışmada rüzgara göre yönlendirilmesine ihtiyaç duyulmayan dikey eksenli rüzgar türbinlerinden biri olan konik helisel Savonius rüzgar türbininin döndürme momenti ve güç katsayısı gibi değerlerinin kanat sayısı, en boy oranı gibi birçok parametreye bağlı olduğu görülmüştür. Tasarladığımız 180° kanat helis açılı, yarım daire kanat tipindeki, 0,5 çap oranına sahip 3 kanatlı konik helisel SRT' nin güç katsayısı 0.025 bulunmuştur. Faydalı türbin gücünün az olduğu görüldüğünden sistemsel tasarımla ledin yakılmasına çalışılmıştır. Çalışmanın amacı dünyada çok fazla kullanılan yatay eksenli rüzgar türbinlerinin yanı sıra düşey eksenli rüzgar türbinlerinin de daha düşük enerji üretimlerinde kullanılabilmesini yaygınlaştırmaktır. Konik helisel yapıda SRT' ler ile ilgili literatürde çalışma olmadığından bu türbin tiplerinin bu çalışmalarla estetik görünümü montaj kolaylığı ve ekonomik oluşu gibi nedenlerle kullanımının artacağı öngörülmektedir.

Düşük rüzgar hızlarında dahi döndüğü bilinen Savonius tipi rüzgar türbinlerinin ürettiği güç gündelik hayatta, çok fazla güç gerektirmeyen kamp aydınlatmaları, bahçe aydınlatmaları gibi yerlerde kullanılabilir.

6. ÖNERİLER

- Elde edilmek istenen güç ne kadarsa ona göre türbin tipi, kanat sayısı ve çapı seçilmelidir.
- Küçük boyutlardaki türbinlerde üretilen güçte düşük olduğundan sürtünme ve dirençlerin oluşturduğu enerji kayıplarını engellemek için motor doğrudan rotora bağlanabilir.
- Ledler seri bağlantı yerine birinin patlaması durumuna karşı paralel olarak bağlanabilir.
- Türbinden elde edilen güç ledin yakılması için gereken güçten yüksek olmalıdır.
- Rotora bağlanan motor milinin montajı dikkate alınarak mil çapı tasarımı yapılmalıdır.
- Türbinin kullanılacağı yerdeki hava şartlarına göre düşey türbinin boyutları büyütülebilir ya da birden çok mini türbin kullanılarak istenilen güç elde edilebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Şen Z., Temiz Enerji ve Kaynakları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2002.
2. Şenel, M. C., Koç, E., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makine, cilt 56, sayı 663, s. 46-56, 2015.
3. Şen , Rüzgar Türbininin Tarihi gelişme süreci, III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri kitabı, cilt: I,s:375,15-17 Kasım, ITÜ, İstanbul, 2000.
4. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins,, N., Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, John Wiley&Sons, London, England, 2001.
5. Hau Erich., Windkraftanlagen, Springer Verlag, Berlin, 1996.
6. Tuna D., Rüzgar Türbini Kanadı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, 2009.
7. <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2020/>
8. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Electricity.pdf>
9. Koç A., Yağlı H., Koç Y., Uğurlu İ., Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi, Mühendis ve Makine, cilt 59, sayı 692, s. 86-114, 2018.
10. Çolak İ., Bayındır R., Demirtaş M., Türkiye’nin Enerji Geleceği, Türk Bilim Araştırma Vakfı, TUBAV Bilim Dergisi, Cilt 1, Sayı 2, 2008.
11. Avcı B., Yılmaz T. B., Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2012.
12. <https://www.mgm.gov.tr/>
13. Şenel M. C, Koç E., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makine, 56(663), 46-56, 2015.
14. 8. Türkiye Rüzgar Enerjisi Kongresi, Ankara, 2019.

15. Çakır B., Helvacı E., Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi, Bitirme Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2016.
16. Açık O., Rüzgar Türbini Kulelerinde Yapısal Titreşim Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
17. Sert Ş. M., Farklı Kanat Tiplerinde Savonius Rüzgar Çarkı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2019..
18. Elibüyük U., Üçgül İ., Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri, YEKARUM E-DERGİ, 2(3), 2014.
19. Özgener Ö., Türkiye’de ve Dünya’da Rüzgar Enerjisi Kullanımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(3), 2002.
20. Ackermann, T., Söder, L., Wind Energy Technology and Current Status: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000.
21. Morcos, V. H., Aerodynamic Performance Analysis of Horizontal Axis Wind Turbines, Renewable Energy, 1994.
22. Maalawi, K. Y., Badawy, M. T. S., A Direct Method for Evaluating Performance of Horizontal Axis Wind Turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001.
23. Şınlak, A., Kaleli, C., Önal, A. Ö., Yeşilyurt, S., Küçük dikey eksenli rüzgar türbini için basit kontrol tasarımı, Sabancı Üniversitesi, İstanbul.
24. Tong, W., Wind Power Generation and Wind Turbine Design. Kollmorgen corporation, 1, 17,2010.
25. Avcı, B., Yılmaz, T. B., Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2012.
26. Altan B. D., Perdeleme Yöntemi ile Savonius Rüzgar Çarkının Performansının İncelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
27. Savonius S.J., The S- rotor and its applications, Mechanical Engineering, 53 (5), 333-338, 1931.

28. Göktaş, M., Kılıç, F., Savonius Rüzgar Türbini (ikili ve üçlü) Kanat Çevresi Akışının Sayısal Analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(3), 1256-1261, 2018.
29. Göktaş, M., Kılıç, F., Savonius Rüzgar Türbini Çevresindeki Hava Akışının Hesaplanabilir Akışkanlar Dinamiği Yöntemi ile Analizi, Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, 22(1), 11-27, 2019.
30. Şentürk, U., Özdamar, A., Savonius Rüzgar Türbinlerinde Reynolds Sayısının Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi, DÜMF Mühendislik Dergisi, 9(1), 185-193, 2018.
31. Gül, İ., Kolip, A., Parça Kanatlı Savonius Rüzgar Türbin Performansının İncelenmesi, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 5(3), 826-827, 2018.
32. Kılıç, F., Çay, Y., Helezonik Savonius Türbini İmalatı ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Makine Teknolojileri Dergisi, 8(1), 79-85, Ankara, 2011.
33. Altan, B., Perdeleme Yöntemi ile Savonius Rüzgâr Çarkının Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2006.
34. Şahin, İ., Bir Savonius Rüzgar Türbininin Performansının Sayısal İncelenmesi ve İyileştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
35. Keleş, D., Ayhan, V., Parlak, A., Cesur, İ., Boru, B., Koç, T., Bir Rüzgar Türbininin Tasarımı ve Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 17(2), 207-216, 2013.
36. Akman, E., Dikey Eksenli Bir Rüzgar Türbinin Kanat Tasarımının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
37. Sert, Ş. M., Farklı Kanat Tiplerinde Savonius Rüzgar Çarkı Tasarımı, Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 2019.
38. Karabacak, M., Kılıç, F., Cantaş, Y., Atmaca Ö., Küçük, T. V., Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinde Kanat Ucu Hız Oranı Tabanlı Maksimum Güç İzleme Denetimi; Kapsamlı Tasarım, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2017.

39. Şenel, M. C., Koç, E., Kanat Tasarım Parametrelerinin Rüzgar Türbini Aerodinamik Performansına Etkisi, V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2014.
40. Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., Akışkanlar Mekaniği Temelleri Ve Uygulamaları, Nobel Matbaacılık, İstanbul, 2012.
41. White, M.F., Akışkanlar Mekaniği, McGraw Hill, London, 210-220, 2004
42. Atılğan, M., Altan, B. D., Atlıhan, A. B., Rüzgar türbini uygulamaları, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
43. <https://www.edumedia-sciences.com/tr/media/657-elektrik-guc-ve-enerji>

8. EKLER

Ek-1 İlk tasarlanan kayış kasnak sistemi



Ek-2 Türbinin son tasarlanan sistemi



ÖZGEÇMİŞ

Dilşen Temel, 5 Ocak 1994 tarihinde Bursa' nın Osmangazi ilçesinde doğdu. Şehit Osman Altinkuyu Anadolu Lisesi' nde lise öğrenimini tamamladıktan sonra 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümüne yerleşti.

Selim ÇIKMIŞ, 1 Ocak 1998 tarihinde Kocaeli ili Karamürsel ilçesinde doğmuştur. Lise eğitim hayatını Karamürsel Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde ilgi alanı olan otomotiv sektörüne yönelmiş ve bu alanda stajlarını tamamlamıştır.