

HİBRİT DİKEY RÜZGÂR TÜRBİNİ

TASARIM VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Barış AKBUDAK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

ANABİLİM DALI

Kasım 2021

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİBRİT DİKEY RÜZGÂR TÜRBİNİ
TASARIM VE ANALİZİ**

Barış AKBUDAK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

**YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI**

Kasım 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Barış AKBUDAK tarafından hazırlanan “Hibrit Dikey Rüzgâr Türbini Tasarım ve Analizi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 05/11/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Zafer ORTATEPE
Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi *Zafer Ortatepe*

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN
Afyon Kocatepe Üni., Mühendislik Fakültesi *Rasim Doğan*

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emre AKARSLAN
Afyon Kocatepe Üni., Mühendislik Fakültesi *Emre Akarслан*

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11 / 10 / 2021



Barış AKBUDAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİBRİT DİKEY RÜZGÂR TÜRİNİ TASARIM VE ANALİZİ

Bariş AKBUDAK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

Yapılan bu tez çalışmasında hibrit dikey rüzgâr türbinleri üzerine tasarım ve analiz yapılmıştır. Araştırma ve incelemeler sonucunda üç farklı modelde türbin tasarımı ortaya konmuştur. Bu modellerin simülasyonlarla akış analizlerinin yapılması sonucunda en uygun olanı seçilmiş ve daha sonra da seçilen bu model için uygulama yapılmıştır. Yapılan uygulama sonucunda alınan değerlere göre türbin veriminin ve torkunun yüksek olduğu görülmüştür.

2021, ix + 52 sayfa

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Enerjisi, Darrieus, Savonius, Elektrik Enerjisi, Hibrit.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

HYBRID VERTICAL WIND TURBINE DESING AND ANALYSIS

Bariş AKBUDAK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Renewable Energy Systems

Supervisor: Asst. Prof. Rasim DOĞAN

In this thesis, a design and analysis of hybrid vertical wind turbines has been made. As a result of researches and examinations, turbine designs in three different models have been revealed. As a result of the flow analysis of these models with simulations, the most suitable one was selected and then the application was made for this selected model. Turbine efficiency and torque were found to be high according to the values obtained as a result of the application.

2021, ix + 52 pages

Keywords: Wind Energy, Darrieus, Savonius, Electrical Energy, Hybrid.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOğAN 'a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Barış AKBUDAK
Afyonkarahisar, 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini	5
1.2 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini	6
1.2.1 Darrieus Tip Dikey Türbin.....	7
1.2.2 Savonius Tip Dikey Türbin.....	8
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	9
3. MATERYAL ve METOT	16
3.1 Türbin Tasarımı	16
3.1.1 Darrieus Kanadının Tasarımı	18
3.1.2 Savonius Kanadının Tasarımı	21
3.2 Türbinlerin Akış Analizleri.....	26
3.3. Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi	31
4. UYGULAMA.....	37
4.1 Darrieus Kanatlarının Yapımı.....	37
4.2 Savonius Kanatlarının Yapımı.....	38
4.3 Darrieus ve Savonius Kanatlarının Birleşimi	39
5. BULGULAR	41
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	47
7. KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

cm	Santimetre
Cp	Güç katsayısı
kg/m ³	Kilogram bölü metreküp
km	Kilometre
m	Metre
m ²	Metrekare
mm	Milimetre
m/s	Metre bölü saniye
MWm	Mekanik güç
Nm	Newton metre
rpm	Rotate per minute (dakikada devir sayısı)
T	Tork
Tsr	Uç hız değeri
V	Volt
W	Watt

Kısaltmalar

AA	Alternatif akım
DA	Doğru akım
DERT	Dikey eksenli rüzgar türbini
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
GW	Giga Watt
kW	Kilo Watt
MÖ	Milattan önce
MW	Mega Watt
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
RES	Rüzgâr enerji santrali

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Rüzgâr oluşumunun şematik gösterimi	1
Şekil 1.2 Türkiye Rüzgâr Atlası	2
Şekil 1.3 Türkiye Rüzgâr Enerji Santrali Durumu	3
Şekil 1.4 Türkiye'deki RES için yıllık kurulum	4
Şekil 1.5 İşletmedeki RES'lerin illere göre dağılımı	4
Şekil 1.6 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini.....	6
Şekil 1.7 Önden ve Arkadan Rüzgâr Alan Türbinler	6
Şekil 1.8 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini	7
Şekil 1.9 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Çeşitleri.....	8
Şekil 3.1 Hybrit-1 Türbin (H1)	16
Şekil 3.2 Hybrit-2 Türbin (H2)	17
Şekil 3.3 Hybrit-3 Türbin (H3)	17
Şekil 3.4 Darrieus kanatlarının çizimi.....	20
Şekil 3.5 Darrieus çiziminin son hali	20
Şekil 3.6 H1 Savonius kanatlarının çizimi	21
Şekil 3.7 H1 Savonius kanatlarının üst ve alt levhası	21
Şekil 3.8 Savonius kanatlarının bağlantı vida delikleri.....	22
Şekil 3.9 Vidalarla üst levhaya kanatların bağlantısı	22
Şekil 3.10 Vidalarla alt levhaya kanatların bağlantısı.....	22
Şekil 3.11 H2 Savonius kanatlarının çizimi	23
Şekil 3.12 4 kanat için delinen orta levha	23
Şekil 3.13 H2 türbin kanatlarının son hali	24
Şekil 3.14 H3 Savonius kanatlarının çizimi	24
Şekil 3.15 Kanatın açılı kesilmesi	25
Şekil 3.16 3 kanat için delinen alt levha	25
Şekil 3.17 3 kanat için kesilen üst levha	25
Şekil 3.18 H3 türbin kanatlarının son hali	26
Şekil 3.19 Türbinin analiz programına aktarımı	26
Şekil 3.20 Türbinin çevresinin kaplanması	27
Şekil 3.21 Türbinin ağ örgüsünün yapılması	27

Şekil 3.22 Model gerçeklik ve gelişim ayarları	28
Şekil 3.23 Dönme eksenini seçimi	29
Şekil 3.24 Rüzgâr giriş değerleri	30
Şekil 3.25 Rüzgâr çıkış değerleri	30
Şekil 3.26 Rüzgâr akışı için çözüm hesaplama işlemi	31
Şekil 5.1 Rüzgâr hızına göre alternatörlerin devir sayıları	43
Şekil 5.2 Rüzgâr hızına göre alternatörlerin ürettiği gerilim değerleri	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

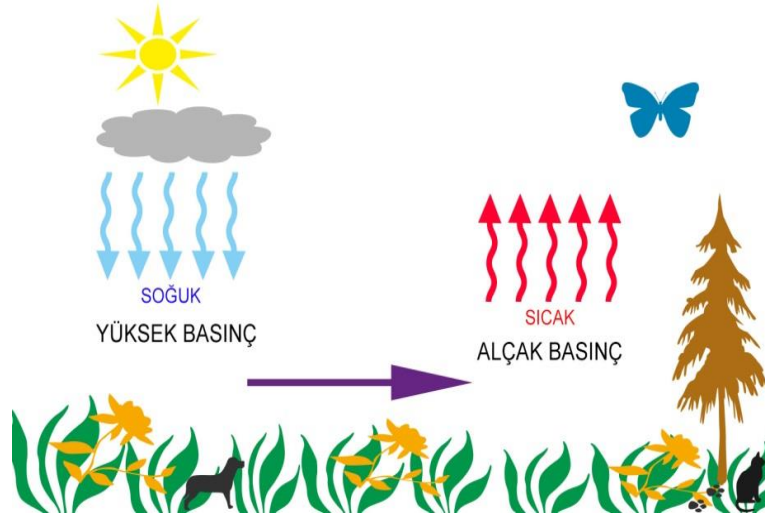
	Sayfa
Çizelge 3.1 NACA 0018 Kanat Profili Dataları	19
Çizelge 3.2 Ağ örgüsü değerleri.....	28
Çizelge 3.3 Hesaplama değerleri.....	31
Çizelge 3.4 Türbine uygulanan rüzgâr kuvvetinin karşılaştırılması	32
Çizelge 3.5 Türbine uygulanan rüzgâr kuvvetinin vektörel karşılaştırılması	33
Çizelge 3.6 Türbinlerdeki basınç farklılıkları	34
Çizelge 3.7 Türbinlerin yüzeysel hız dağılımları	35
Çizelge 3.8 Analizleri yapılan türbinlerin rüzgâr ve türbin güçlerinin karşılaştırılması	35
Çizelge 5.1 Hibrit dikey rüzgâr türbinin boş durumdaki değerleri	42
Çizelge 5.2 Rüzgâr türbininin birinci alternatör bağlı olduğu durumdaki değerleri	42
Çizelge 5.3 Rüzgâr türbininin ikinci alternatör bağlı olduğu durumdaki değerleri	43
Çizelge 5.4 İkinci alternatörün performans parametreleri.....	44
Çizelge 5.5 Araştırma alternatörünün performans parametreleri.....	46

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 4.1 Darrieus kanadının iskelet aşaması	37
Resim 4.2 Darrieus kanat iskeletinin sac malzemeye zımbalanması	38
Resim 4.3 Savonius kanatlarının yapımı, mile sabitlenmesi ve son halinin dönme denemesi	39
Resim 4.4 Darrieus ve Savonius kanatlarının birleşimi	39
Resim 4.5 Hibrit dikey rüzgâr türbininin son hali.....	40
Resim 5.1 Kullanılan birinci alternatör	41
Resim 5.2 Kullanılan ikinci alternatör	41
Resim 5.3 Asdomo 400 W doğru akım alternatörü	46

1. GİRİŞ

Güneş enerjisinin dünyayı ısıtmasıyla atmosferde, soğuk hava kütesine sahip yüksek basınç alanı ve sıcak hava kütesine sahip alçak basınç alanı oluşur (Şekil 1.1). Basınç farklılığı sonucunda ise hava kütleleri yüksek basınç alanından alçak basınç alanlarına doğru hareket eder. Bu kütleler arasında oluşan hava akışına ise rüzgâr denilir ve günümüzde önemli bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Rüzgâr oluşumunun şematik gösterimi.

Rüzgârın hareketiyle ortaya çıkan kinetik enerjiye rüzgâr enerjisi denir. Rüzgâr enerjisi, önce mekanik enerjiye ve sonrasında da elektrik enerjisine çevrilerek kullanılmaktadır. Burada temel parametreler, hareket eden havanın kütlesi ve hızıdır. Ağırlığı yüksek olan kütlelerin hızı arttıkça enerjisi de artış gösterir (Özgener 2002).

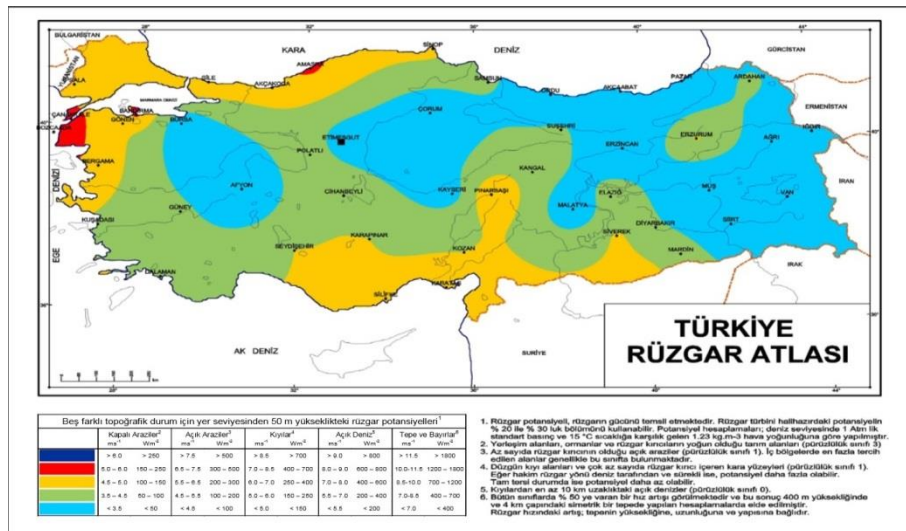
Rüzgâr enerjisi kullanımı, MÖ 2800'lü yıllarda Orta Doğu'da başlamıştır. MÖ 17. yüzyılda Babil Kralı Hammurabi döneminde Mezopotamya'da sulama amacıyla kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisini kullanan yel değirmenleri ise ilk olarak İskenderiye yakınlarında kurulmuştur (Behçet vd. 2014).

1890'da Danimarkalı bilim insanı Poul la Cour, elektrik üretimi için ilk dört kanatlı rüzgâr türbinini inşa etmiştir (Elibüyük ve Üçgül 2014). Bu türbinin elektrik üretebilmesinin sebebi yüksek hızdaki rotorlar idi. 1931 yılında şebekeye elektrik

sağlayacak rüzgâr türbini Rusya tarafından yapılmasından sonra, 1935-1970 arasında ABD, Danimarka, Fransa, Almanya ve İngiltere’de yapılan çeşitli deneme çalışmaları, güçlü rüzgâr türbinlerinin olanaklı olduğunu göstermiştir (Anonim 2017).

1973 dünya petrol krizi, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına gösterilen ilginin artmasına sebep olmuştur. Dünya enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayan fosil yakıtların kısıtlı kullanım sürelerinin olması, enerjinin elde edilmesi sırasında çevreye yapılan tahribat ve gelecek nesillerin de enerji ihtiyacı dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Bu kaynakların yaygın ve geniş ölçekli kullanımı, teknolojik gelişmelere ve potansiyeli belirleyecek ulusal ve uluslararası bilgi ağının oluşturulmasına bağlıdır. İlk etapta göz önünde bulundurulması gereken alternatif enerji kaynaklarından birisi rüzgâr enerjisidir. Dünya Rüzgâr Enerjisi Kurumu’nun istatistiklerine göre dünyada kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi, 2020 yılında 650 GW’dır. Toplam rüzgâr enerjisi kapasitesinin halen çok küçük bir kısmı kullanılmaktadır (İnt. Kyn. 1).

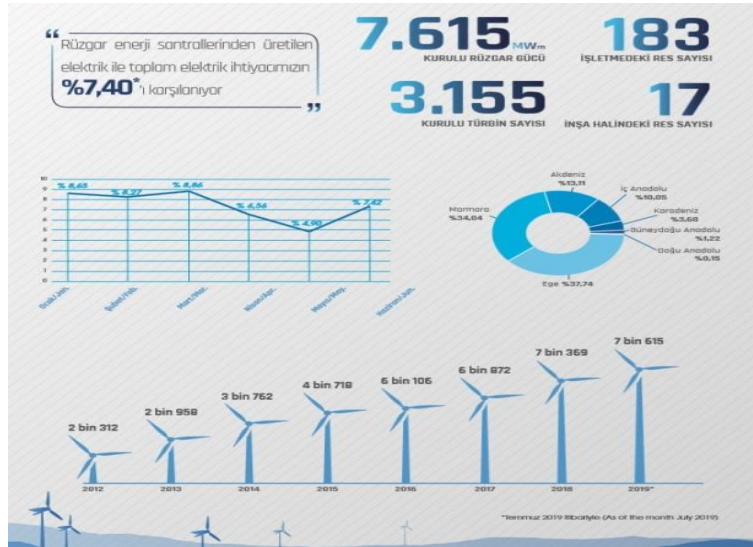
Türkiye’nin rüzgâr atlasında (Bkz. Şekil 1.2), yer seviyesinden 50 m yükseklikteki rüzgâr hızlarına göre kategorilere ayrılmış 5 farklı bölge gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Türkiye Rüzgâr Atlası (İnt. Kyn. 2).

EİE tarafından yapılan çalışmalarda, rüzgâr enerjisi açısından Bandırma, Antakya, Kumköy, Mardin, Sinop, Gökçeada, Çorlu ve Çanakkale zengin bölgeler olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, Bandırma, Bozcaada, Çeşme, Gökçeada, Çanakkale, Karadeniz Ereğlisi, Florya ve Siverek gibi yöresel rüzgâr potansiyeli belirleme çalışmaları da yapılmıştır.

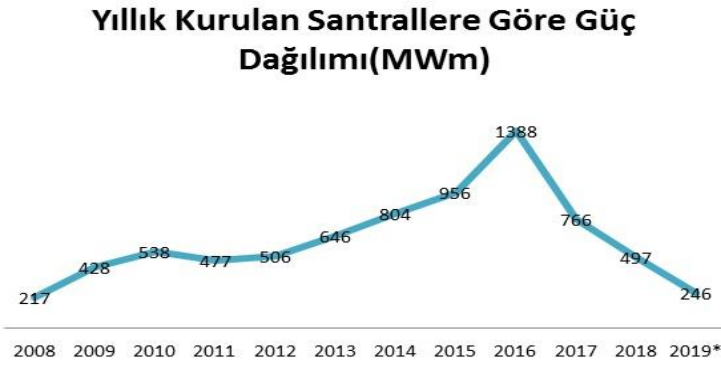
Ülkemizde, rüzgâr enerjisi yatırımı ilk olarak 1998 yılında Çeşme’de gerçekleştirilmiştir (8.7 MW). 2000 yılı içinde ise sadece 10.2 MW’lık bir yatırım Bozcaada’da yapılmıştır (İnt. Kyn. 2). Günümüze geldiğimizde ise bu sayılar çok yüksek miktarlara çıkmıştır. Her geçen gün kurulan ve işletmeye alınan santrallerle enerji üretimi hızlanmaktadır. Kurulan santrallerin şuan için %37,74 oranla Ege bölgesinde en yüksek oranda olduğu görülmekte olup bu değerleri %34,04 ile Marmara bölgesi takip etmektedir. Doğu Anadolu bölgesindeki coğrafi özelliklerden dolayı kurulu santral en az olup bu değer genele bakıldığında %0.15 olarak gözükmektedir.



Şekil 1.3 Türkiye Rüzgâr Enerji Santrali Durumu (Anonim 2019).

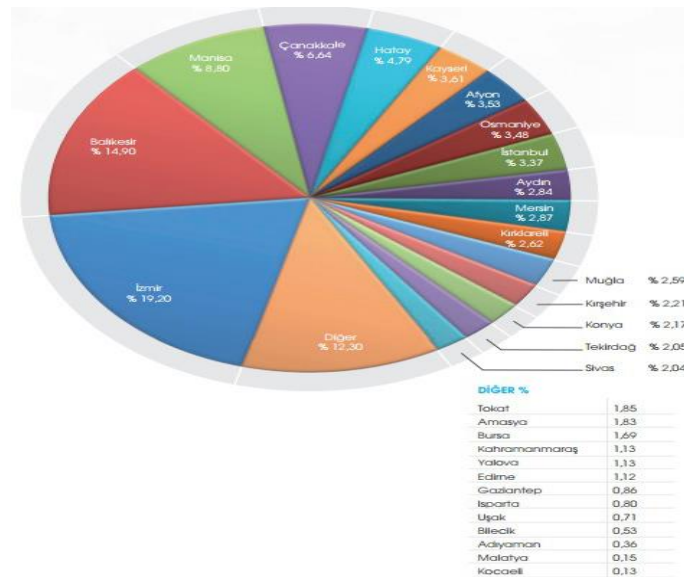
2019 ortası itibariyle işletmede 183 rüzgâr santrali bulunmaktadır. Bu işletmedeki sahalarda 3155 türbin çalışmaya devam etmektedir (Şekil 1.3). Hali hazırda inşası devam eden 17 tane de RES sahası vardır. Kurulu rüzgâr enerjisi santrallerindeki güç 7615 MW_m’dir. Kurulu güç yıllar geçtikçe artmaya devam etmektedir. Örneğin 2017’de 6872 MW_m iken 2018’de 7369 MW_m olarak ölçülmüştür (Anonim 2019).

Türkiye’deki rüzgâr enerjisi santralleri için yıllık kurulum Şekil 1.4’de gösterilmektedir. Burada ki değerlerden 2019 yılı, Ağustos ayına kadar kurulan santrallerin güçlerine göre gösterilmiştir. Kurulu santraller 2017 ekonomik bozulmaya kadar artış gözlenirken 2017 yılı sonrasında azalmaya uğramıştır.



Şekil 1.4 Türkiye’deki RES için yıllık kurulum.

İşletmedeki rüzgâr enerji santrallerinin illere göre dağılımına Şekil 1.5’de bakılacak olursa İzmir 1.462,20 MWm güçle Türkiye genelinin %19,20 sini oluşturmaktadır. Listenin geri kalanına bakıldığında Ege Bölgesindeki, kurulu gücün daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 1.5 İşletmedeki RES’lerin illere göre dağılımı (Anonim 2019).

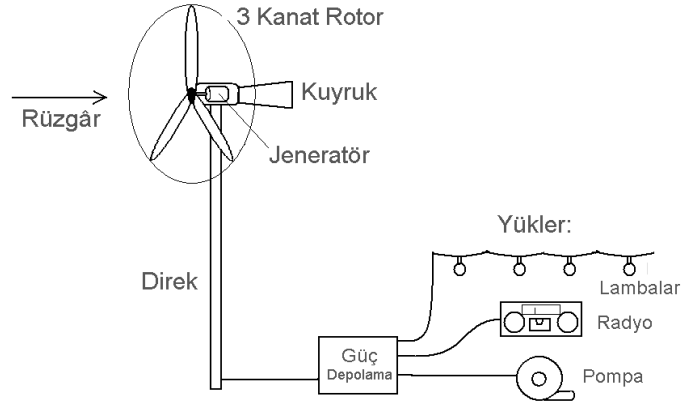
Türkiye’de kurulan bütün rüzgâr santralleri yatay eksenli olarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, geçmişte kullanılan türbinlerden bu zamanda kullanılan türbinlere kanat, gövde, güç mekanizması vb. alanlarda gelişmeler yaşanmıştır. Yatay eksenli türbinlere ek olarak, dikey eksenli türbinler de geliştirilmektedir (Elibüyük ve Üçgül, 2014). Her iki rüzgâr türbinleri aşağıda açıklanmıştır.

1.1 Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini

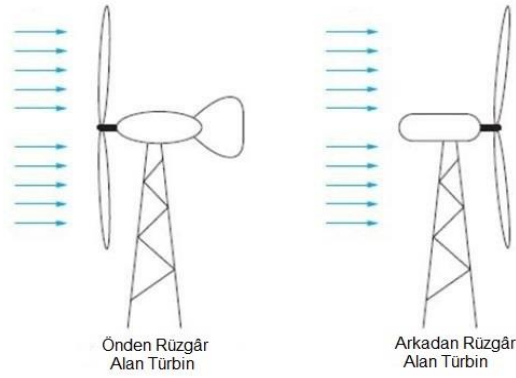
Bu tip türbinlerde, Şekil 1.6’da gösterildiği gibi dönme eksenleri rüzgâr yönüne paralel ve kanatlar rüzgâr yönüne diktir. Bu tip türbinler yüksek süratlere çıkabilmektedirler ve bu sebeple içerisinde frenleme sistemi bulunmaktadır. Ayrıca değişken hızlarda ki rüzgârlardan enerji üretimi sırasında etkilenmemek adına hem asenkron bir jeneratör kullanılır hem de dişli sistemi mevcuttur. Böylece değişen hızlardaki rüzgârların oluşturduğu olumsuz etkilerin önüne geçilmektedir. Ticari türbinler genellikle yatay eksenlidir. Rotor, rüzgârı en iyi alacak şekilde döner bir tabla üzerine yerleştirilmiştir (Can 2020).

Yatay eksenli türbinlerin çoğu rüzgârı önden alacak şekilde tasarlanır (Şekil 1.6). Rüzgârı arkadan alan türbinlerin ise, yaygın bir kullanım alanları yoktur. Yatay eksenli makinelerin maksimum enerji tutabilmeleri için rotorları daima rüzgâr akış yönünde olmalıdır. Bu da rotorun kule üstünde dönmesi ile sağlanır. Rüzgârın yönünde dönme hareketi iki değişik konstrüksiyon ile sağlanır. Bunlar “öne-rüzgâr” ve “arkaya-rüzgâr” olarak adlandırılırlar.

Eğer kanat, rüzgârı ön yüzünden alıyorsa rotorun arkasına bir kılavuz kanat takılır (Şekil 1.7). Diğer şekilde ise kanat, rüzgârı arka kısımdan alır veya kanatlar biraz konik yapılıdır. Böylece sistem rüzgârı takip ederek maksimum faydayı sağlar (Kebbatı 2018).



Şekil 1.6 Yatay eksenli rüzgâr türbini (Gitano-Briggs 2012).



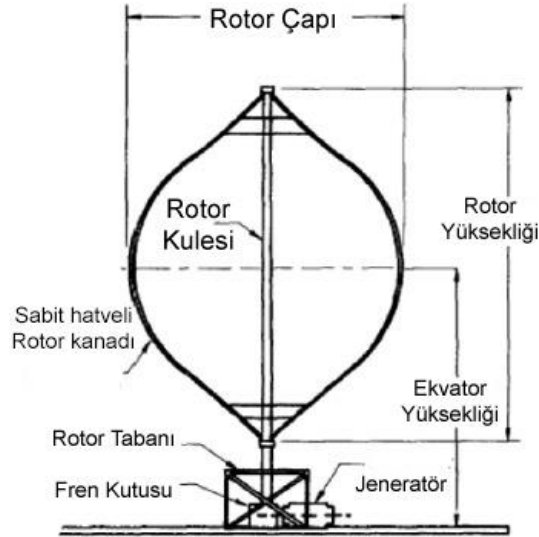
Şekil 1.7 Önden ve arkadan rüzgâr alan türbinler (Kebbatı 2018).

1.2 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini

Bu tip rüzgâr türbinlerinde türbin mili düşeydir ve rüzgârın geliş yönüne diktir. Yere yerleştirilebildikleri için kule ihtiyacı ve maliyeti ortadan kalkmaktadır (Şekil 1.8). Sistem istenilen rüzgâr yönüne çevrilebildiği için dümen sistemine gerek kalmamaktadır. Bu türbinlerin verimleri yatay eksenli rüzgâr türbinlere göre biraz daha düşüktür. Bu türbinlerin verimi yaklaşık %35 iken yatay türbinlerin %45'dir (Potuk 2015).

Dikey türbinlerde 2 ana tip vardır. Bunlar Darrieus ve Savonius türbin tipleridir. Darrieus zamanla gelişime uğramış ve Şekil 1.9'da görüldüğü gibi H-Darrieus ve Sarmal Darrieus versiyonları da geliştirilmiştir. Bu tezde Savonius ve H-Darrieus türbin tipleri üzerine geliştirme yapılmıştır. Savonius türbin tipinin seçilmesinin sebebi yüzey

alanın geniş olmasından dolayı, dönmeye başlamasının kolay ve kalkış hızının yüksek olmasıdır. En düşük rüzgârlarda bile dönüşüne başlayabilme olanağı sağlamasıdır. Darrieus kanatlarından H tipinin seçilmesinin nedeni ise diğerlerine göre rüzgâra daha çok temas sağlayabilmesi, aerodinamik olarak yüksek dönüş sağlaması ve türbülanslı havalarda iyi sonuçlar çıkarmasıdır.



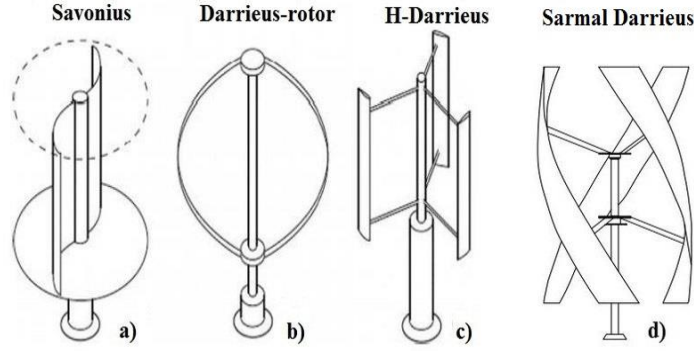
Şekil 1.8 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini (Spence 2012).

1.2.1 Darrieus Tip Dikey Türbin

Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiştir. Darrieus rüzgâr türbininin yüksek performansa sahip olmasındaki en büyük etken kanatlarının düzgün bir aerodinamik yapıya sahip olmasıdır. Darrieus rüzgâr türbininin kanatları üzerindeki çekme gerilimi hafif bir eğime sahiptir ve bu sebeple kanatlardaki çekme gerilimleri minimuma inmektedir. Bununla birlikte kanatları geometrik formlu aerodinamik profile sahip olduğundan yüksek performanslıdır. Kanatların içbükey ve dışbükey yüzeyleri arasındaki çekme kuvveti farkı nedeniyle dönme hareketi oluşur. Yapısı gereği Darrieus tipi rüzgâr türbinlerinde, devir başına iki kere en yüksek tork elde edilir (Çetin vd. 2019).

1.2.2 Savonius Tip Dikey Türbin

Dikey eksenli rüzgâr türbin çeşitlerinden biri olan Savonius rüzgâr türbinleri ilk olarak 1925 yılında Finlandiya'lı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. Savonius rüzgâr türbini, iki yarım silindirin dikey olarak iki yatay disk arasında yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Rüzgâr silindirin iç kısmında pozitif ve dış kısmında da negatif bir moment oluşturarak dönme hareketini gerçekleştirmesini sağlar. Burada pozitif moment negatif momentten büyük olduğunda dönme hareketi gerçekleşir (Çetin vd. 2019).



Şekil 1.9 Dikey Eksenli Rüzgâr Türbini Çeşitleri (Castellani vd. 2019).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Hayatın devamlılığı açısından dünya üzerindeki enerji kaynaklarının sürekli olarak kullanılması elzem hale gelmiştir. Ancak yeryüzünde başta fosil yakıtlar olmak üzere tüm yenilenebilir olmayan enerji kaynakları rezervlerinin ciddi anlamda azalmasıyla birlikte yeni arayışlara girilmiştir (Can 2020). Enerji tüketiminin gün geçtikçe artış göstermesinden dolayı yenilenebilir enerjiye dönüş vaktinin geldiği görülmektedir. Enerji üretim konusunda kurulan yenilenebilir santrallerle bu ihtiyaç karşılanmaya başlanmıştır. Güneş, hidroelektrik, jeotermal, rüzgâr, biyogaz vb. kaynaklarda üretilen enerjilerden en verimli olan kaynak rüzgâr enerjisidir. Uluslararası rağbet haline gelen rüzgâr türbinlerinin sayısı ülkelerin rüzgâr potansiyeline göre giderek artmaktadır. Rüzgâr türbinleri bölgesel enerji ihtiyacını karşılamada olumlu yön gösterse de bazı olumsuz noktaları da vardır. Bu olumsuzluklar; rüzgâr esintisinin yönü ve farklılığı, yerleşim yerlerine olan uzaklığı, gürültüsü gibi unsurlar bunlardan bazılarıdır. Bu sebepten dolayı yapılan araştırmalar ve üretilen projelerle dikey rüzgâr türbinleri bu unsurlarda iyi sonuçlar verdiği için bu türbinler kullanılmaya başlanmıştır.

Dikey eksenli ve yatay eksenli türbinlerin özellikleri ve kullanılabilirlikleri üzerine yapılan çalışmada (Çetin vd. 2019) pozitif ve negatif yönleriyle türbinler karşılaştırılmalı olarak ele alınmıştır. Çalışmada ele aldığı iki türbin modeliyle, dikey türbinlerin son zamanlarda geliştirilmesiyle daha kullanışlı hale geleceğinden bahsetmiştir. Dikey türbinlerin özellikle yere yakın olması, şehir içi kullanımda üstünlük sağlayacağından söz edilmiştir. Dikey türbinlerin kendi içinde birkaç modele ayrıldığını açıklayan yazarlar bu modellerin birlikte kullanılabilir hale gelince daha verimli olacağından da bahsetmişlerdir.

Savonius rüzgâr türbinlerinin düşük olan performanslarını arttırmak için basit kanat tasarımları yapılan bu projenin analizler sonucunda çözümlenmeleri yapılmıştır (Sert 2019). Savonius rüzgâr türbinlerine ekstradan yapılan eklemeleri ve düzenekleri kullanmadan, sadece basit bir kanat profili değişimi ile statik tork performansının iyileştirilebileceği tespit edilmiştir. Böylelikle bu tasarımın, düşük olan performansları sebebiyle diğer dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin yanında daha az kullanılan Savonius

rüzgâr türbinlerinin kullanımının artmasında etken olabileceği düşünülmüştür.

Savonius rüzgâr türbininin çevresindeki hava akışı bu çalışma da analiz edilmiştir (Göktaş ve Kılıç 2019). Solidworks programında türbin tasarımı yapıldıktan sonra Ansys programında analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. 0, 45, 90 ve 135 derece açılarda ve 3, 6 ve 9 m/s hızlarda yapılan test işleminde kanatta hız ve basınç dağılımı hesaplanmıştır. En büyük hava hızı 9 m/s için, kanat çevresinde en fazla hız 21,33 m/s olarak elde edilmiştir. Tüm basınç grafikleri için en yüksek basınç 0° ve 45° de tespit edildiği belirtilmiştir.

Çapraz akışlı rüzgâr türbinleri üzerine yapılan bu araştırmada karmaşık akış yapısından bahsedilmiştir (Karadeniz ve Güleryüz 2015). İki boyutlu olarak incelemenin sayısal olarak sınırlı kalacağına değinen yazarlar üç boyutlu tasarım işlemi yaparak tork ve güç katsayısındaki değişimleri karşılaştırmışlardır. Çapraz akışlı türbinlerin gelişimiyle dikey eksenli türbinlere yol gösterici olacağına belirtmişlerdir.

Dikey eksenli rüzgâr türbini olan Savonius tipi rüzgâr türbininin dış bükey olan kanadındaki ters direnç azaltılarak kanat performansını arttırmaya yönelik yapılan projede üç çeşit tasarım işlemi yapıldığından bahsedilmiştir (Gül ve Kolip 2018). Yapılan deney işleminde Savonius kanatlı, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı modellerin türbin konumlarına göre statik ve dinamik momentleri ölçülmüş ve akışkan analizi yapılmıştır. Parça kanatlı tasarımında güç katsayısı 0,38 olarak bulunmuş ve diğer modellere göre %40 a yakın bir iyileştirme olduğu saptanmıştır. Deneysel ve sayısal yöntemlerde aldıkları değerlerin birbirlerine çok yakın çıkması yapılan performans geliştirme doğruluğunu gösterdiğini vurgulamışlardır.

Sakarya Üniversitesi öğrencisi Erdem Akman yüksek lisans tezinde dikey eksenli rüzgâr türbinlerin de kanat tasarımı yapıp sayısal incelemesini gerçekleştirmiştir (Akman 2019). NACA 0012 kanat profilini kullanan Erdem Bey, kanat çiziminde profillerde modifiye gerçekleştirip analiz yapmıştır. Tasarladığı kanat profiline uygun türbin uygulaması gerçekleştirip deney işlemi yapmıştır. Kanat sayılarına göre ölçümler sonucunda 4 kanatlı türbinde en yüksek güç ölçmüştür.

Alishan Siddiqui ve arkadaşları yapmış oldukları deneysel çalışmada küçük prototip olarak ürettikleri üç farklı tasarım türbinin rüzgâr tüneline karşılaştırılmasını yapmışlardır (Siddiqui vd. 2018). Ulaştıkları sonuçlara göre Savonius türbinin Darrieus türbinin içinde olduğu zaman kalkış gücünün daha fazla olduğu ve çalışma sırasında yüksek performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Gelibolu model rüzgâr türbini ve güç işleme kanadı ile yeni bir türbin geliştirilmiştir (Hançerlioğulları vd. 2017). Bu modelin, dikey türbinlerinden darrieus tip güç kanatlarının özel bir parçası olduğuna değinmişlerdir. Güç işleme kanatları sayesinde türbinlerin güç kanatlarının verimliliği, diğer geleneksel dikey shaft rüzgâr türbine oranla 5 kat arttığını ispatlamışlardır. Türbin gücü ve üstün tasarım bakımından simülasyon hesaplamalarını Monte Carlo bilgisayar yöntemiyle yapan yazarlar maliyetleri de azaltmayı başarmışlardır.

Geometrik ve dinamik parametreler kullanarak darrieus türbininin performansının incelendiği çalışmada (Muratoğlu ve Demir 2020), QBlade programı aracılığıyla analiz yapılmıştır. Yüksek performans elde etmek için kanat profili, kanat sayısı gibi özelliklerin türbine etkileri analizde kullanılmıştır. NACA 0020 profilinin diğer kanatlara göre daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır. Kanat uç ve arka noktası arasındaki mesafenin arttıkça maksimum güç katsayısına daha düşük uç hız oranında ulaşabileceğini tespit etmişlerdir.

Loughborough Üniversitesi öğrencisi Ahmed Syuleymanov Ahmedov doktora tezinde hibrit rüzgâr türbinleri üzerine araştırma ve bilgisayar ortamında 2 boyutlu modelleme yapmıştır (Ahmedov 2016). Kanat sayılarının türbin üzerindeki etkilerine değinen Ahmedov 4 kanatlı hibrit bir türbinle 2 kanatlı hibrit bir türbinin çok küçük boyutta tasarlamış ve karşılaştırmıştır. Tork değerlerinin dış kanatlarda iki türbin içinde daha fazla olduğunu beraber kullanımda azaldığını belirtmiştir. Ayrıca 2 kanatlı tasarladığı türbinin 4 kanatlı olana oranla daha fazla güç ürettiğine de değinmiştir. Ayrıca türbinlerde RPM değerinin 500 devir/dk itibariyle güç üretimine başladığını söylemiştir.

Rüzgâr türbinleri farklı kanat modellerinden oluşmaktadır. Türbin performansında en önemli etkenlerden biri kanat modeli aerodinamik performansının değişimidir. Bu projede (Tanürün vd. 2020) kanatlarda kullanılabilecek modellerden biri olan NACA-0018 modeli üzerine çalışma yapılmıştır. Kanat modeline 0-60 derece arası açılarla uygulanan rüzgâr kuvvetinin sonucunda kaldırma katsayısı, sürükleme katsayısı ve verimlilik değerleri bulunmuştur. Kanat uç ve arka noktası arasındaki uzunluğun farklı değerler verilerek hesaplandığı çalışmada da hem uzunluk hem açıya göre kanat modelinin kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Dokuz Eylül Üniversitesi öğrencisi Macit Ali (2015) hazırladığı yüksek lisans tezinde dikey eksen rüzgâr türbinlerinin performansı üzerine kanat tipinin ve kordon uzunluğunun etkisinin sayısal incelenmesi üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Burada NACA kanat profillerinden 4 tanesinin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. NACA 0012 ve NACA 0018 kanat tiplerinin diğer kanatlar olan 0021 ve 0024'e oranla daha üstün kaldırma kuvveti sağladığı hatta 9° bir açı sağlanırsa NACA 0012 kanat tipinin % 2,5 daha fazla sürükleme oranına sahip olduğunu belirtmiştir.

Rassoulinejad-Mousavi S.M. (2013) ve arkadaşları hibrit rüzgâr türbini için kombine yöntemleri üzerine çalışma yapmışlardır. Savonius rüzgâr türbini ile birleşik 3 kovalı H-rotor tipli kanatları kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yaptığı deneyde 3 kanatı türbinin üstüne, dışına ve içi boş halde rüzgâr tüneline sokarak aldığı değerleri karşılaştırmışlardır. 4.5 m/s hızla başlayıp 8.5 m/s hıza kadar ulaşan testte Savonius türbinin dışına ve üstüne koyup denediği kısımlarda yüksek verim aldığını görmüşlerdir. Kanatları küçük yaptığı için 250 Watt motordan üst üste koyduğu deneyde 35 Watt, kanatları dışına koyduğu deneyde 30 Watt, Sadece 3 kanat kullanarak içi boş haldeki deneyinde ise 8 Watt güç alabilmişlerdir.

Bahtiyar D. yüksek lisans tezinde dikey eksenli bir Darrieus türbininin dizayn edilmesini ve kanat üretimini konu almıştır (Dursun 2006). Tezinde rüzgâr türbinleri hakkında genel bilgiler verip güç katsayılarına değinmiştir. Kanatlardaki geometrik teorilerinde açıklamasını yaptıktan sonra NACA 0021 kanat profilini kullanarak kanat tasarımı yapmıştır. Polietilen malzeme kullanarak çizdiği kanadın üretimini gerçekleştirmiştir.

Türbin için kule ve destek sistemi üzerine de bilgi vermiştir.

Geleneksel Savonius türbinlerin düşük güç ve tork katsayıları gibi performansa sahip olduğu belirtilen çalışmada (Damak vd. 2013) performansı artırmak için, 180° bükülme ile sarmal bir Savonius türbinin yapılmasını önermişlerdir. Aynı zamanda Reynold sayısındaki değişime de dikkat çekmişlerdir. Açık jet rüzgâr tüneline yaptıkları deneylere dayanarak helisel yani sarmal modelin geleneksel modelden daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır.

Kanat profillerinin, dikey eksenli bir rüzgâr türbini performansına etkisi bu çalışmada incelenmiştir (Akansu vd. 2017). Proje de türbin üzerine uygulanan aerodinamik kuvvetler ve enerji performansını, hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanarak yapmışlardır. Bu hesaplamalarda dört farklı kanat profili kullanılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar göz önüne alındığında, NACA 5520 kanat profili ilk hareketi sağlamak için kullanılabilirliğini, ortalama olarak en yüksek güç katsayısı değerinin de NACA 0021 profilinde elde edildiğini belirtmişlerdir.

Darrieus türbinlerinin, dinamik kanat yunuslama açısından faydalanılarak daha esnek hale getirileceği belirtilen çalışmada (Almaz vd. 2019) yarı deneysel ve bir boyutlu rüzgâr türbini modeli geliştirildiğinden bahsedilmiştir. Kanatlarda hem negatif hem de pozitif sabit yunuslama açısının türbin performansına etkisi incelenmiştir. Yunuslama açısı dinamik olarak kontrol edilerek, türbin performansına olan etkisine dikkat çekilmiştir. Buna göre de türbin çalışma aralığının önemli derecede arttığı görülmüştür. Kanadın akıştan maksimum düzeyde enerji soğurmasından dolayı, kanada daha az hava gelmesi, türbinin maksimum verimini arttırmamıştır.

Yapılan Savonius çalışmasında (Sharma ve Sharma 2016), Ansys programı kullanılarak rotor çizimi yapılmış, tork ve performans katsayısı arttırılmaya çalışılmıştır. Kanat sayısında birden fazla çeyrek bıçak kullanılarak analiz yapılmıştır. Farklı hız değerlerinde yapılan ölçümlerde yeni bir konfigürasyonla karşılaştırılması gerçekleştirilmiş ve performans katsayısında % 8.8 ile % 13.7 artış meydana geldiği belirtilmiştir.

Rotor performansında iyileştirme yapılmak istenilen proje de (Tian vd. 2018) klasik Savonius rotoru ile en iyileştirilmiş (optimal) Savonius rotoru üzerinde çalışma yapılmıştır. Güç katsayısı, verim ve tork değerleri üzerine karşılaştırmalı olarak grafikler çizilmiştir. Optimal Savonius rotorunun Tsr değerinin 0,7 den büyük olduğu durumda klasik tasarımdan daha üstün olduğu belirtilmiştir. Maksimum ortalama güç katsayısının 0,258 olduğunu ve bunun klasik tasarımdan % 4,41 daha yüksek olduğunu ayrıca optimum bıçak şeklinin de 25-150 derece arası dönüş yapmasının olumlu etkiye sahip olacağı anlatılmıştır.

Darrieus rüzgâr türbinleri, kanatların kaldırma kuvvetinin etkisiyle dönmektedirler. Bu proje de (Acarer 2017) türbinde kullanılan kanadın, firar (havanın kanadı terk ettiği kenar) tarafına basamak açmanın, o kanadın kaldırma ve sürüklenme kuvvet oranlarını arttırabildiğinden bahsedilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar mekaniği analizleri vasıtasıyla inceleme yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarla, bunun olumlu ve olumsuz etkilerinin olduğu saptanmıştır. Aktif kontrollü farklı basamak geometrileriyle iyileştirmeler elde edilmesinin mümkün olabileceğine değinmiştir.

Yarıçapa bağlı katılık oranının bir H-tip dikey eksenli rüzgâr türbinine etkisinin incelendiği projede (Kaya vd. 2020) NACA-0021 kanat profiline göre hesaplama yapılmıştır. 3 kanatlı H-tip dikey eksenli rüzgâr türbininin aerodinamik performansına olan etkisi Ansys programında analiz edilmiştir. Katılık oranının değişimi sonucunda TSR ve aerodinamik verimdeki değişimleri sebepleriyle açıklamışlardır. Sonuç olarak güç katsayılarının, 1 m yarıçapa sahip olan türbinde 0.75 m yarıçapa sahip olan türbindekenden % 4.25 arttığı, 1.25 m yarıçapa sahip olan türbinden ise % 0.57 azaldığını belirtmişlerdir.

Marmara üniversitesinde (Toptas vd. 2020) dikey eksenli bir türbinin kombine kullanılması üzerine araştırma ve tasarım yapılmıştır. Bu araştırmada iç kanatlarda yapılan tasarımlar sonucunda basınç değerlerine bakılarak, en verimli kanatların 3 adet olarak seçilmesi anlatılmıştır. Dış kanatlar içinde basınç farkının en yüksek olduğu kanat sayısı 13 kanat olduğu belirtilmiştir. Yaptıkları analiz sonucunda tasarladıkları türbinin verimliliğini % 38 bulmuşlardır.

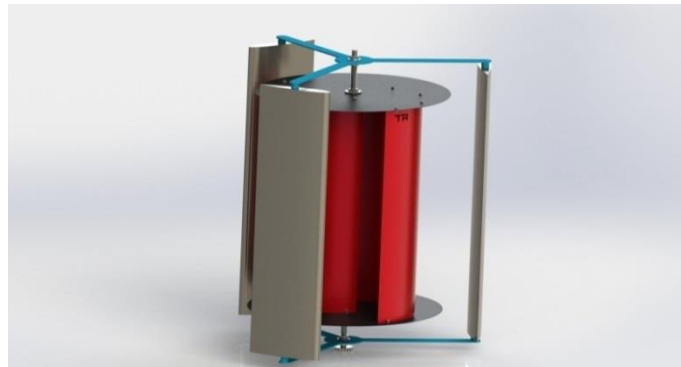
Yapılan literatür taraması sonrasında bazı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar dış kanat biçimleri, kanat sayıları ve analiz işlemlerinin nasıl olacağıdır. Elde edilen bu sonuçlar düzenlemeleriyle birlikte bu tez çalışmasında kullanılmıştır. Dikey rüzgâr türbinlerinin kombine kullanımında farklı türbin tasarımları yapıp analiz edilen bir çalışmaya ülkemizde rastlanılmamıştır.

3. MATERYAL ve METOT

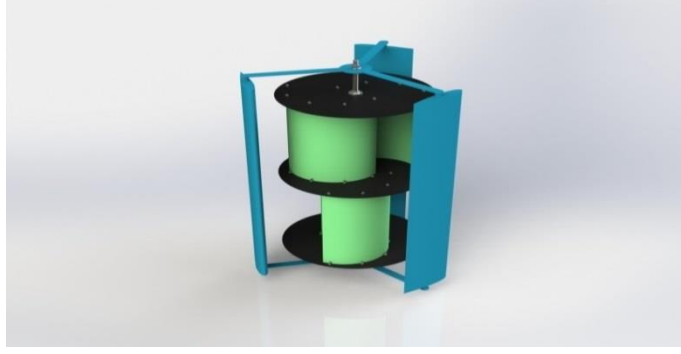
Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için öncelikle türbin tasarımının ele alınması gerekmektedir. Bu sebeple, üç farklı tip hibrit türbin tasarımı incelenmiştir. Bu tasarımlar için gerekli olan kanatlarında dizaynı bu kısımda detaylıca ele alınmıştır. Bununla birlikte, türbinlerin akış diyagramları da detaylıca açıklanmıştır.

3.1 Türbin Tasarımı

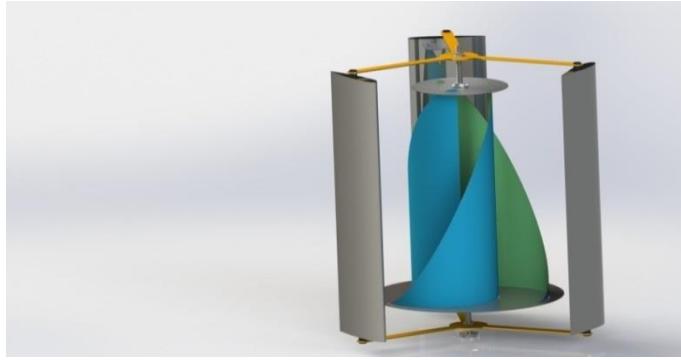
Hibrit dikey rüzgâr türbininin tasarım işlemi için literatürden en verimli üç türbin modeli seçilmiştir. Şekil 3.1’de tek katlı (H1), Şekil 3.2’de iki katlı (H2), Şekil 3.3’de ise Spiral tip kanat tasarımı (H3) yer almaktadır. Seçilen modellerden H1, üç bıçaklı türbin deneyinin (Rassoulinejad-Mousavi vd. 2013) sonucuna göre verimi yüksek olduğu için seçilmiştir. Ancak boyut olarak küçük olduğundan ve dönme hızında artış istendiğinden, dış kanatlarının değiştirilmesi ve iç kanatların uzatılması gerekecektir. Buna göre de simülasyon için düzenleme yapılmıştır. H2 modeli H1 modelinin farklı şekillerde tekrar modellenmesiyle (Siddiqui vd. 2018), her yönden rüzgâr alabilecek hale gelmesi amaçlanarak geliştirilmiştir. İki kanadın dörde çıkarılması ve diğer kanatların eksen olarak çevrilmesi ile bu sorun çözülmüştür. H3 modeli ise gelgit türbinlerinin su için tasarlanmış halinin gemi pervanesi şekli verilerek tekrar modellenmesinden oluşmuştur (Fertahi vd. 2018). Bu 3 farklı model Solidworks programında düzenlenmiştir.



Şekil 3.1 Hibrit-1 Türbin (H1).



Şekil 3.2 Hibrit-2 Türbin (H2).



Şekil 3.3 Hibrit-3 Türbin (H3).

Türbinler iç ve dış kanatlar olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Savonius tip iç kanatları, Darrieus tip dış kanatları meydana getirir. Kanatlar kütle bakımından hafif olmalıdır. Rüzgârın, geldiği yüzey üzerinde kaymasını kolaylaştırıcı özelliğinin de bulunması gereklidir. Bu sebeple, rüzgâr türbinlerinde genellikle kompozit malzeme kullanılmaktadır (Mishnaevsky vd. 2017). Bunun yanında geleneksel kompozitlerin dışında nano mühendislikle yapılmış Hibrit kompozitler de kullanılmaya başlanmıştır (Mishnaevsky vd. 2017). Kompozit kullanmalarındaki genel amaç rüzgâr türbinlerinin maruz kaldığı statik ve dinamik yüklerden kaynaklı yorulmaların önüne geçmektir. Bu yorulmalar kanatlarda hasar meydana getirebilmektedir ve zarara sebep olmaktadır.

Bu projede kanatların ayrıntılı bükülmesi, hafif ve kullanışlı olması aynı zamanda rüzgâra karşı minimum direnç göstermesi vb. özelliklerin ön planda olmasından dolayı, kompozit malzeme yerine bu malzemeye eş değer galvanizli sac tercih edilmiştir. Bu malzemenin tercih edilmesinin nedeni ucuz ve kolay şekillendirilebilir aynı zamanda uzun ömürlü olmasıdır (İnt. Kyn. 3). Sac malzeme kullanılarak daha önce kompozit

malzeme için yapılan tasarımlar yeniden revize edilmiştir. Kanatlarda en önemli kriter hangi ortam şartlarına uygun olarak yapılacağıdır. Bunun için, yapılan çalışmalardan ortam durumuna uygun kanat tasarımı gerçekleştirilen projelerden yararlanılmıştır (Mazarbhuiya vd. 2019). Optimizasyon işlemi sonucunda en uygun tasarımlar bulunduktan sonra da türbinlerin hava akış analizlerine başlanılmıştır. Daha sonrada türbinlerin üzerinden geçen hava gücü ve türbin gücü hesaplamaları yapılmıştır.

Hava gücü formülü,

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (3.1)$$

Yüzey alanı formülü,

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (3.2)$$

Türbin gücü formülü,

$$P_e = C_p \cdot P_{max} \quad (3.3)$$

Formüllerde havanın yoğunluğu ρ , rüzgâr hızı V , türbin yarıçapı r , türbin yüksekliği h ile ifade edilmiştir. Türbinler Darrieus ve Savonius tiplerin kombine olarak kullanılmasıyla oluşturulduğu için iki türbin tipinin ortalama değerleri alınarak formüllerde performans katsayısı $C_p=0,38$ olarak kullanılmıştır (Toptas vd. 2020)

3.1.1 Darrieus Kanadının Tasarımı

Bu aşamada Darrieus kanat tasarımına uygun şekil için kanat profilleri içerisinde seçim yapılacaktır. Bunun için daha önceki araştırmalarda ulaşılan sonuçlara göre rüzgâr türbinleri için kullanılabilecek kanat profil çeşitleri NACA profilleridir (Tanürün vd. 2020).

NACA profillerinden tasarım için uygun olan 4 hane seri kesit ailesinden 0018 seçilmiştir. Bunun nedeni bu serideki kanatların üstün özellikleri ki bunlar (İnt. Kyn. 4);

1. İyi tutunma kaybı davranışı
2. Basınç merkezinin büyük bir sürât aralığı içinde çok az yer değiştirmesi
3. Yüzey pürüzlülüğüne karşı hassas olmama

Bu serinin zaafı ise (İnt. Kyn. 4);

1. Düşük azami kaldırma katsayısı
2. Göreceli yüksek direnç katsayısı
3. Yüksek trim momenti

NACA 0018 kanat modeli aerodinamik performans olarak dikey türbinler için kolaylık sağlamaktadır (Tanürün vd. 2020).

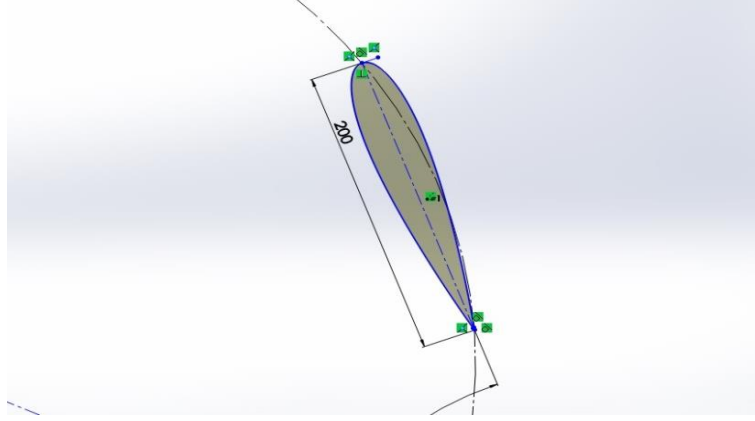
NACA 0018 kanat modelinin data bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 NACA 0018 Kanat Profili Dataları.

X	Y	X (devamı)	Y(devamı)	X(devamı)	Y(devamı)
1	0.00189	0.1	0.07024	0.2	-0.08606
0.95	0.01210	0.075	0.06300	0.25	-0.08912
0.9	0.02172	0.05	0.05332	0.3	-0.09003
0.8	0.03935	0.025	0.03922	0.4	-0.08705
0.7	0.05496	0.0125	0.02841	0.5	-0.07941
0.6	0.06845	0	0	0.6	-0.06845
0.5	0.07941	0.0125	-0.02841	0.7	-0.05496
0.4	0.08705	0.025	-0.03922	0.8	-0.03935
0.3	0.09003	0.05	-0.05332	0.9	-0.02172
0.25	0.08912	0.075	-0.06300	0.95	-0.01210
0.2	0.08606	0.1	-0.07024	1	-0.00189
0.15	0.08018	0.15	-0.08018		

* NACA 0018 profil kanatları akor değeri 100 mm ve Radius değeri 0 mm olarak yazılmıştır.

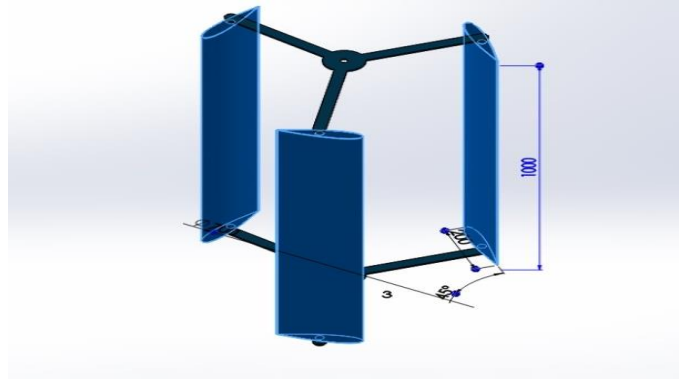
Çizimin ilk aşamasında, dış kanat şablonu için kanadın uç (hücum) ve arka (fırar) kenarları arasındaki mesafenin 20 cm (bkz. Şekil 3.4) ve yüksekliğinin de 100 cm (bkz. Şekil 3.5) olarak alınması gerekmektedir. Bunun sebebi kanat değerlerinin birbirine oranıdır. Bu oran Çizelge 3.1’deki data bilgileriyle elde edilmektedir.



Şekil 3.4 Darrieus kanatlarının çizimi.

Çizilen üç kanadın aralarındaki mesafe, dairenin çapı olan 360 derecenin 3 eşit parçaya bölünmesiyle elde edilmiştir. Bu üç kanat belirlenen düzlemde 45 derece açıyla daireye teğet olarak yerleştirilmiştir.

Darrieus kanatlarının sayısının üç olmasının nedeni ise pervanenin tüm hızlarda sabit atalet momentine sahip olmasıdır (Sercan 2017). Başka bir nedeni ise kanatların aerodinamik olarak titreşimini en az da tutmak için yine bu sayı kullanılır.



Şekil 3.5 Darrieus çiziminin son hali.

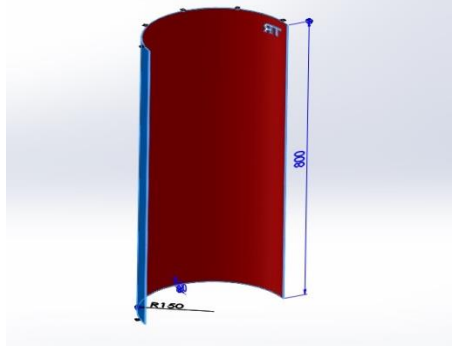
Kanatları birbirine bağlamak için de hem aşağıda hem yukarıda olmak üzere 35'er cm uzunluğunda çubuklar ve bunların ortada birleşmesi için de 10 cm çapında ortası türbin direği çapında delinmiş kazayağı metal kullanılmıştır.

3.1.2 Savonius Kanadının Tasarımı

Tasarlanan üç tip hibrit dikey rüzgâr türbinlerinin farklı Savonius kanatları bulunmaktadır. Türbinlerin kanat bıçakları ikili ve üçlü seçilmiştir (Schubel ve Crossley 2012).

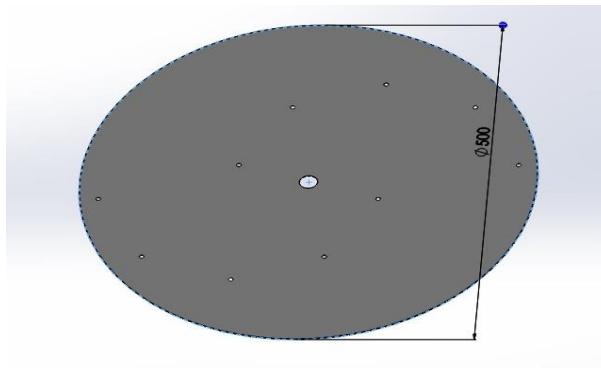
H1 Türbin:

H1 türbinindeki kanat, Şekil 3.6’da gösterildiği gibi 15 cm yarıçapında ve 80 cm uzunluğunda 0,5 mm levhanın hilal şeklinde bükülmesiyle meydana gelmektedir.



Şekil 3.6 H1 Savonius kanatlarının çizimi.

Bükülen levhanın üst ve altında Şekil 3.7’de görülen 2 adet 50 cm yarıçapında 1 mm kalınlığında metal levha bulunmaktadır.

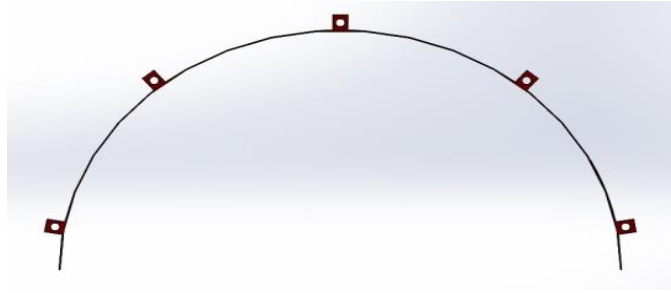


Şekil 3.7 H1 Savonius kanatlarının üst ve alt levhası.

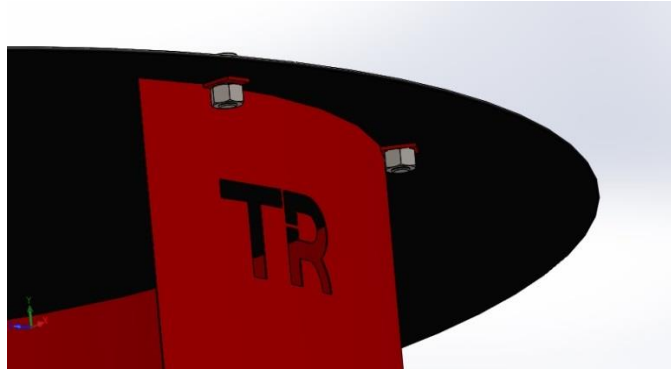
Bu değerlerin alınmasının sebebi, türbin gücü formülünde (Formül 3.3) istenilen değerlerin karşılanması için gerekli yüzey alanına sahip olmasını sağlamaktır.

Bu sebepten dolayı dış kanatlar 100 cm alındığı için iç kanatlar 80 cm ve üst, alt levhalar 50'şer cm alınmıştır. Kalınlığın 1 mm olmasının nedeni ise levhaların üzerine koyulan kanatların taşınması ve levha ağırlığının orta mile binen yükünün azaltılmasıdır.

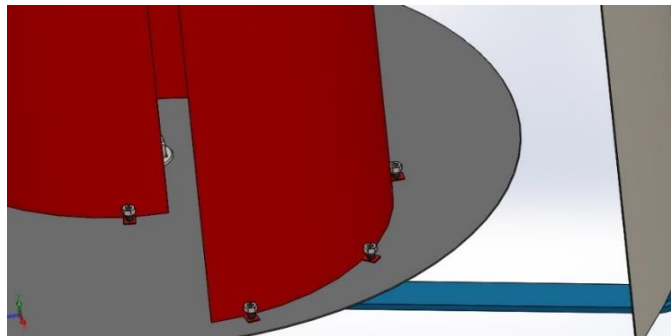
Hilal şeklindeki kanatların üzerinde ve altında Şekil 3.8'deki gibi eşit aralıklarla bükülmüş 5 adet 1x1 cm kare içerisinde 0,5 cm çaplı vida delikleri açılarak Şekil 3.9'da üst ve Şekil 3.10'da alt levhaya bağlantısının yapıldığı görülmektedir.



Şekil 3.8 Savonius kanatlarının bağlantı vida delikleri.



Şekil 3.9 Vidalarla üst levhaya kanatların bağlantısı.

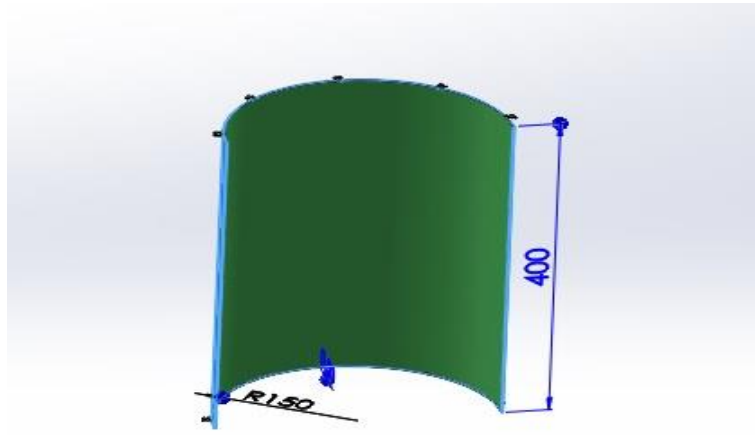


Şekil 3.10 Vidalarla alt levhaya kanatların bağlantısı.

Bu bağlantılarla 2 kanatlı Savonius üst ve alt levhalarıyla beraber dıştaki 3 kanatlı Darrieus kanatlarına bağlanmış olur.

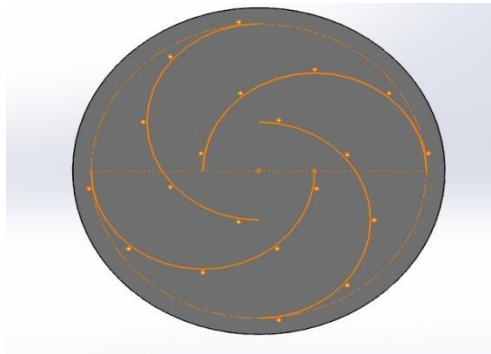
H2 Türbin:

H2 türbinindeki kanat Şekil 3.11’de gösterildiği gibi 15cm yarıçapında ve 40 cm uzunluğunda 0,5 mm levhanın hilal şeklinde bükülmesiyle meydana gelmektedir. Buradaki kanat uzunluğunun 40 cm kullanılmasının sebebi H1 türbinindeki 80 cm kanatların, H2 türbininde 2 katlı olmasından kaynaklanmaktadır.



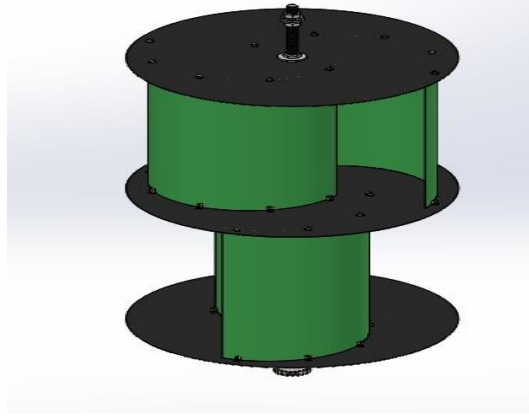
Şekil 3.11 H2 Savonius kanatlarının çizimi.

Bükülen kanatların üst, alt ve ortasında 3 adet 50 cm yarıçapında 1 mm kalınlığında metal levha bulunmaktadır. Bu levhalardan üst ve alt aynı (Şekil 3.7), ortadaki levha Şekil 3.12’deki gibi üstte 2, altta 2 olmak üzere 4 kanadın birleşimi için vida delikleri fazla açılmıştır.



Şekil 3.12 4 kanat için delinen orta levha.

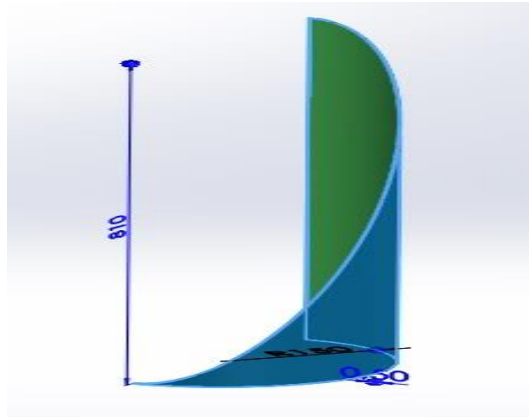
4 kanadın hepsinde de alt ve üst kısımlarda H1'deki gibi (Şekil 3.8) vida bükümleri vardır. Ancak üst iki kanat alt iki kanatla aynı yönde değil, 90° döndürülmüş haldedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 H2 türbin kanatlarının son hali.

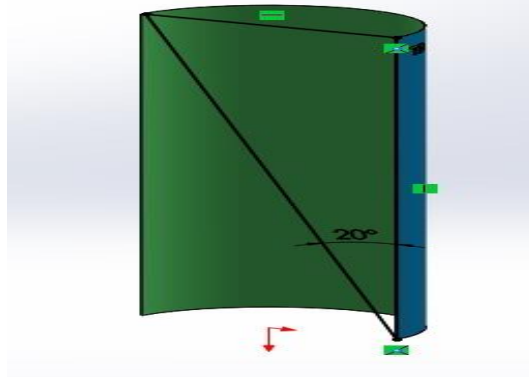
H3 Türbin:

H3 türbinindeki kanat Şekil 3.14'de gösterildiği gibi 15 cm yarıçapında ve 81 cm uzunluğunda 0,5 mm levhanın hilal şeklinde bükülmesinden sonra Şekil 3.15'de görülen 20° açıyla kesilmesi sonucunda meydana gelmektedir.



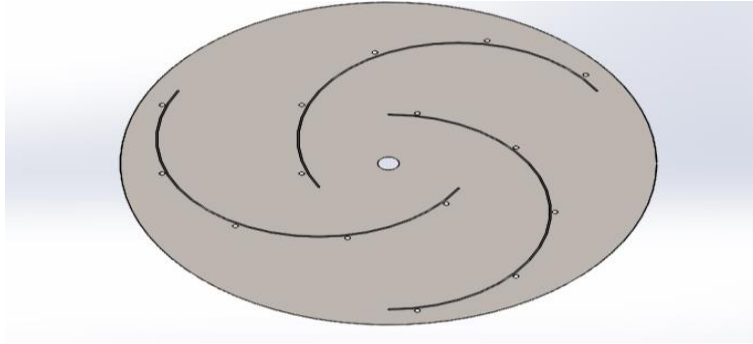
Şekil 3.14 H3 Savonius kanatlarının çizimi.

Kanat uzunluğunun diğer kanatlardan 1 cm uzun olmasının sebebi üst levhadaki (Bkz. Şekil 3.17) kesik bölümlere geçmesinden dolayıdır.



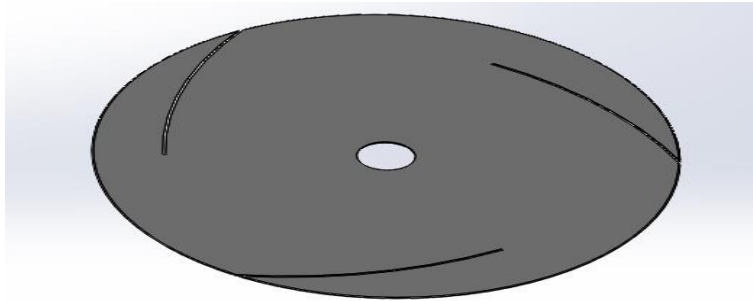
Şekil 3.15 Kanatın açılı kesilmesi.

Bükülüp kesilen kanatların altına Şekil 3.12'deki 4 kanat için delinen vida deliklerini 3 kanat için çizilip delinmiştir (Şekil 3.16).



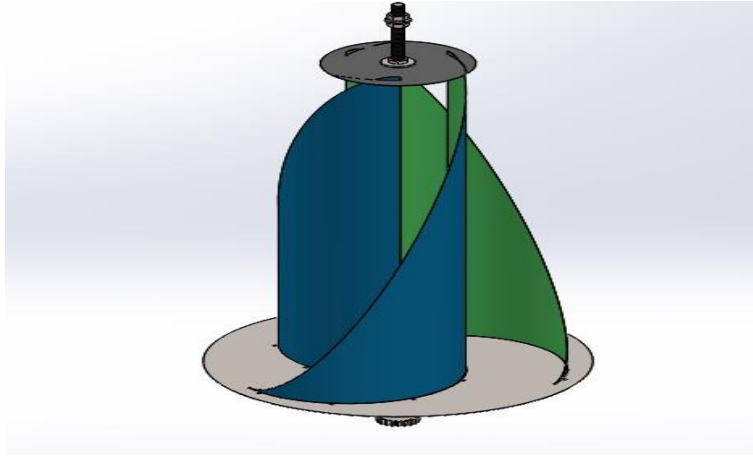
Şekil 3.16 3 kanat için delinen alt levha.

Kanatların üstünde ise 20 cm çapında 3 kanadın üst kısmının geçeceği levha yerleştirilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 3 kanat için kesilen üst levha.

Daha sonra da kanatlar vidalanarak son haline gelmiştir.



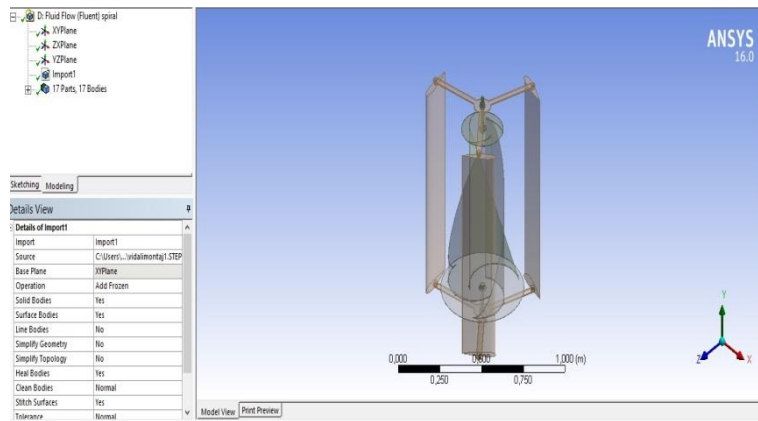
Şekil 3.18 H3 türbin kanatlarının son hali.

3.2 Türbinlerin Akış Analizleri

Çizim ve tasarım düzenlemesinin yapıldığı türbinlerin akış analizleri aşaması da ANSYS programında yapılmıştır. Bu analiz işlemi de adım adım anlatılmıştır.

Adım 1:

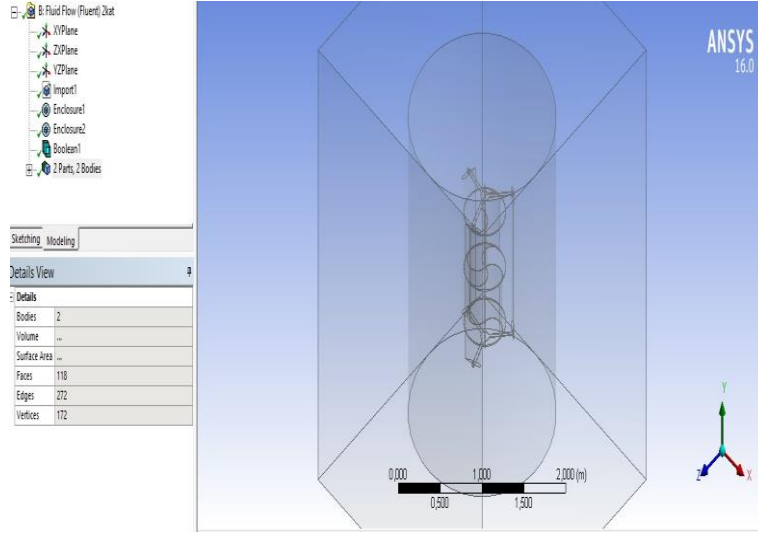
Programda Akış Analiz sisteminin Geometri bölümünden Dış Geometriyi İçe Aktar kısmına basılarak, Solidworks programında kaydedilen modellerin getirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.19 Türbinin analiz programına aktarımı.

Adım 2:

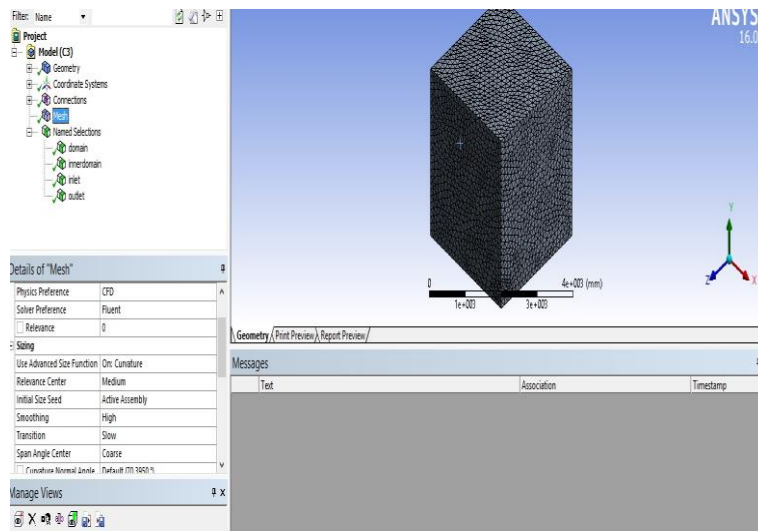
Modele Kaplamalardan yarıçapı 0,5 m silindir eklenmiştir ve silindirin üstüne de 0,5 m kenar uzunluklu küp eklenmiştir. Daha sonra da iç silindirle dış küp birleştirilmiştir.



Şekil 3.20 Türbinin çevresinin kaplanması.

Adım 3:

Buradan ağ örgüsü kısmında ise çizilen silindir ve küpün ağ yapısı belirleniyor. Daha sonra havanın bir noktadan girip, diğer noktadan çıkması için yüzeyler seçilip isimlendirilmiştir. Dış küp için alan, iç silindir için iç alan isimlendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 3.21 Türbinin ağ örgüsünün yapılması.

Ağ örgüsü oluşturulduktan sonra istatistik kısımdan da ağ örgüsünün element sayısına bakılmıştır.

Çizelge 3.2 Ağ Örgüsü değerleri.

Türbin Adı	Değeri*
H1 Türbini	782968
H2 Türbini	853626
H3 Türbini	1619355

* Yapılan hesaplamalara göre bu değerler idealdir.

Adım 4:

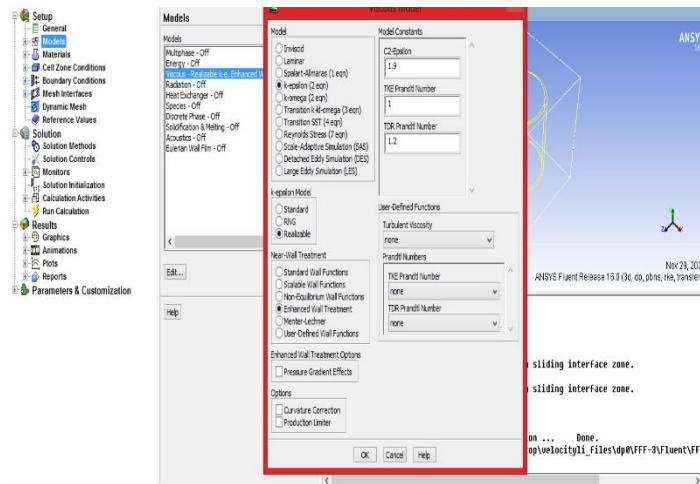
Ağ yapısı belirlendikten sonra akışkan değerleri girilmiştir. Analiz sisteminin Kurulum kısmından ilk olarak Genel bölümünden çözücü değerlerinin Tip kısmında Basınca Dayalı seçildikten sonra, hız formülasyonunu Mutlak, zamanı da Geçici olarak işaretlenmiştir.

Model bölümüne geçilecek olursa burada sabit değerler haricinde viskoz modelde düzeltme yapılacaktır.

Modeli: k-epsilon(2eqn)

k-epsilon Modeli: Gerçekleştirilebilir,

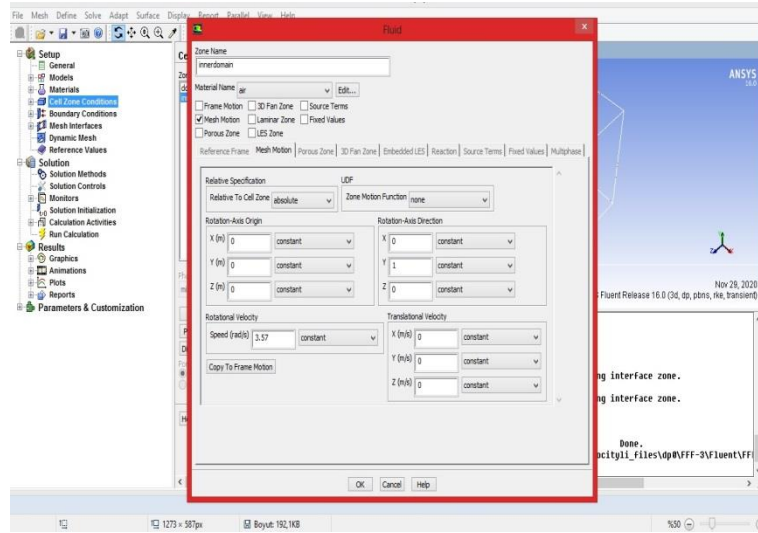
Yan Duvar İşlemi: Geliştirilmiş seçildi.



Şekil 3.22 Model gerçeklik ve gelişim ayarları.

Adım 5:

Materyallerden hava değerinin yoğunluğu 1.225 kg/m^3 seçilmiştir. Hücre Bölgesi Koşulları bölümünden İç Alanının, Örgü Hareketi kısmından dönme eksenini yönünü, çizilen türbinlere göre Y eksenini dönme eksenimiz, Y değerini 1 diğerleri 0 girilerek aktifleştirilmiştir.



Şekil 3.23 Dönme eksenini seçimi.

Adım 6:

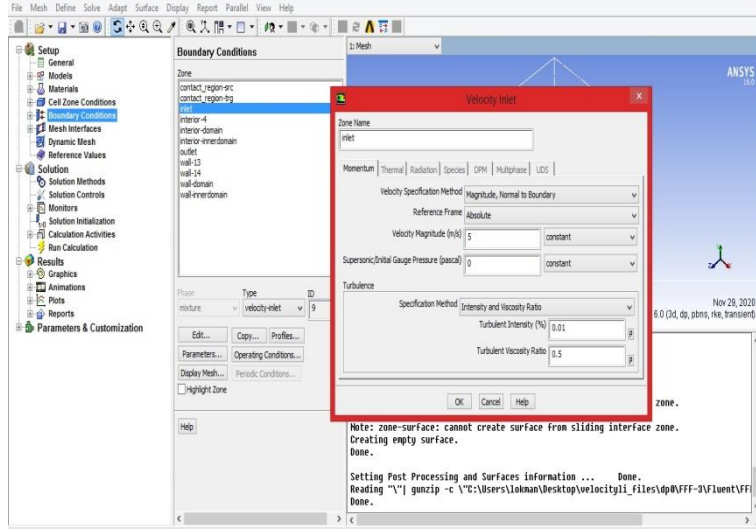
Giriş ve çıkış değerlerini verip hesaplama aşamasına geçilmiştir. Sınır şartlarına tıklayıp rüzgâr giriş değerleri için, aşağıdaki değerler seçilip çıkışa geçilmiştir.

Giriş tipini: Hız Girişi

Hız büyüklüğünü: 5 m/s

Türbülans yoğunluğunu: % 0.01

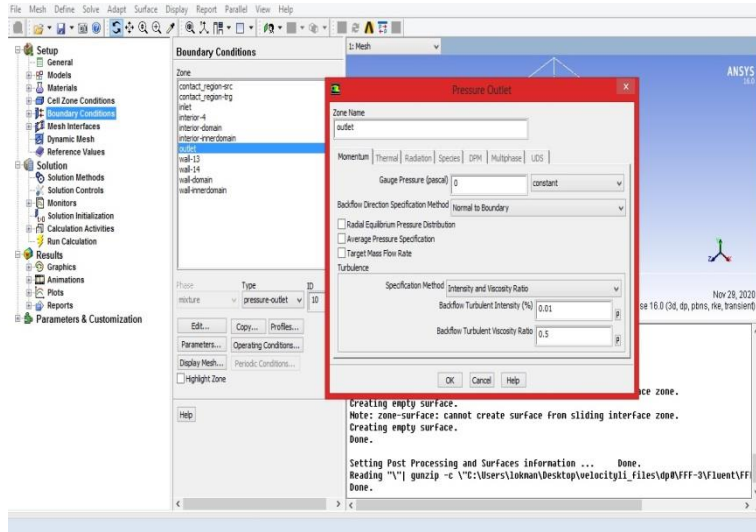
Viskozite oranını: 0.5



Şekil 3.24 Rüzgâr giriş değerleri.

Adım 7:

Çıkış tipini, Basınç Çıkışı seçilmiştir. Bu kısımda sadece çıkış olduğu için geri akış türbülans yoğunluğunu % 0.01 ve geri akış viskozite oranını da 0.5 seçilmiştir.



Şekil 3.25 Rüzgâr çıkış değerleri.

Adım 8:

Tüm değer girme işleri sonunda hesaplama işlemine geçilmiştir.

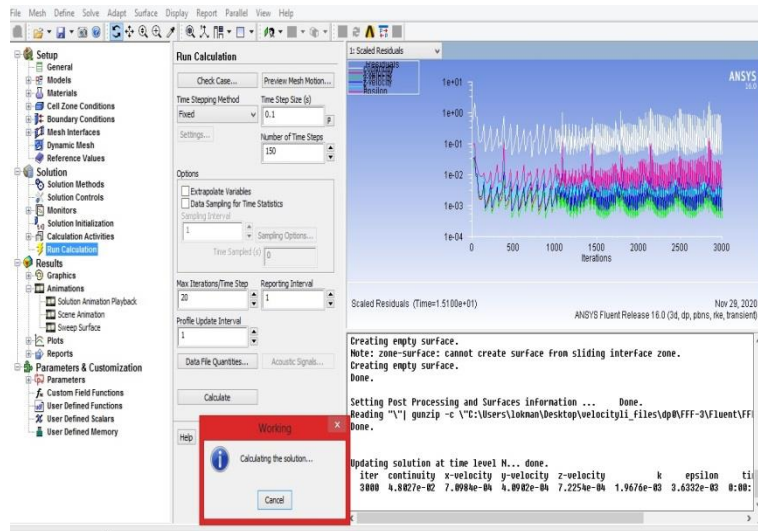
Çizelge 3.3 Hesaplama değerleri.

Kısım Adı	Değeri*
Zaman adım boyutu	0.1
Zaman adım sayısı	150
Maksimum yineleme	20

* Girilen değerler hesaplama için yeterlidir.

Adım 9:

Zaman değerleri girilip hesaplama işlemi başlatıldıktan sonra programın analizi gerçekleştirilmesi beklenmiştir (Bkz. Şekil 3.26).

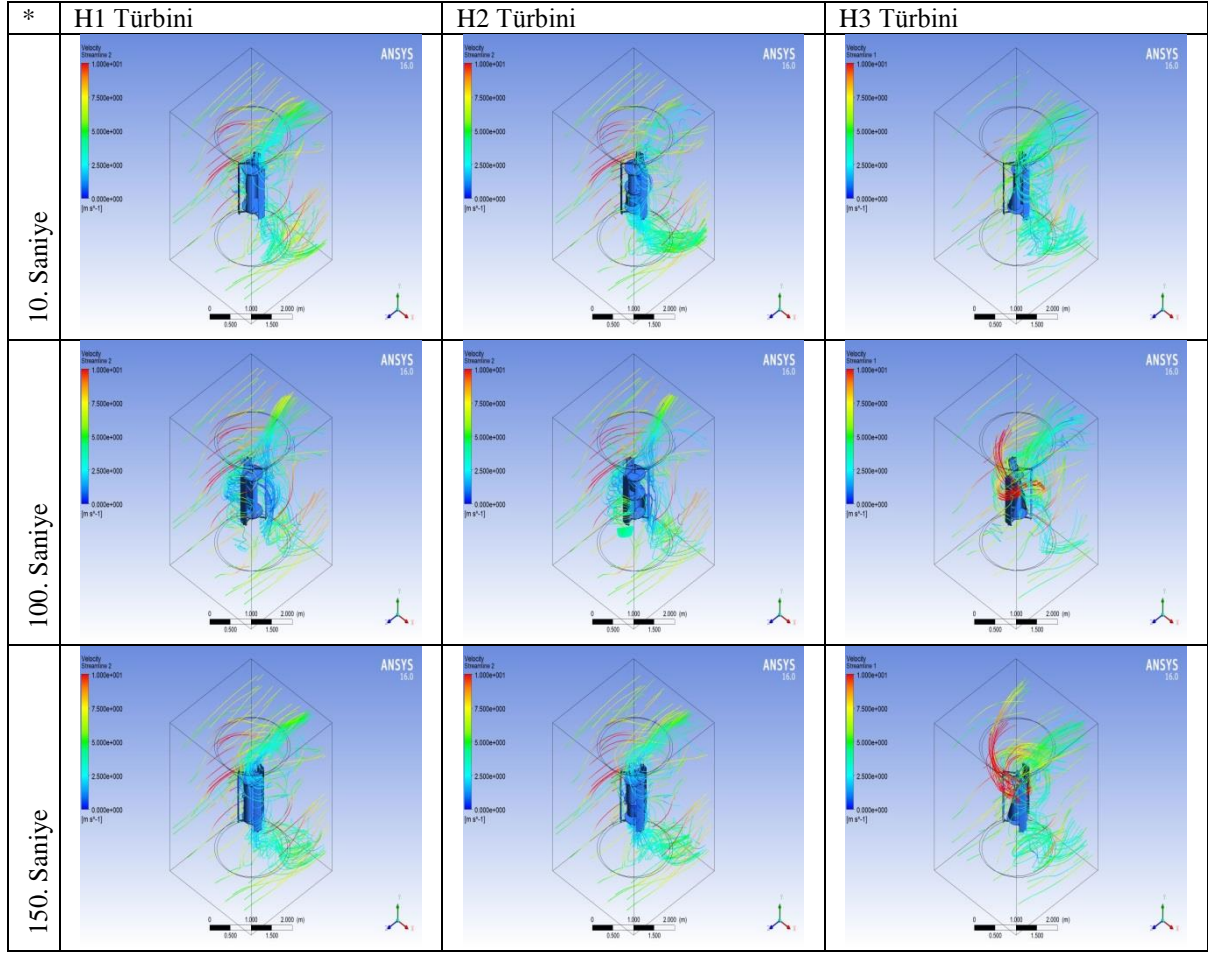


Şekil 3.26 Rüzgâr akışı için çözüm hesaplama işlemi.

3.3. Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bu çalışmada H1, H2 ve H3 olmak üzere 3 farklı tip hibrit dikey rüzgâr türbinlerinin performansları karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçlara göre türbinlere uygulanan 5 m/s rüzgâr hızının türbin kanatlarındaki hareketliliği ve türbinlerin verdiği tepkilerin karşılaştırılması üç ayrı türbin üzerinde gösterilmiştir (Bkz. Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 Türbine uygulanan rüzgâr kuvvetinin karşılaştırılması.

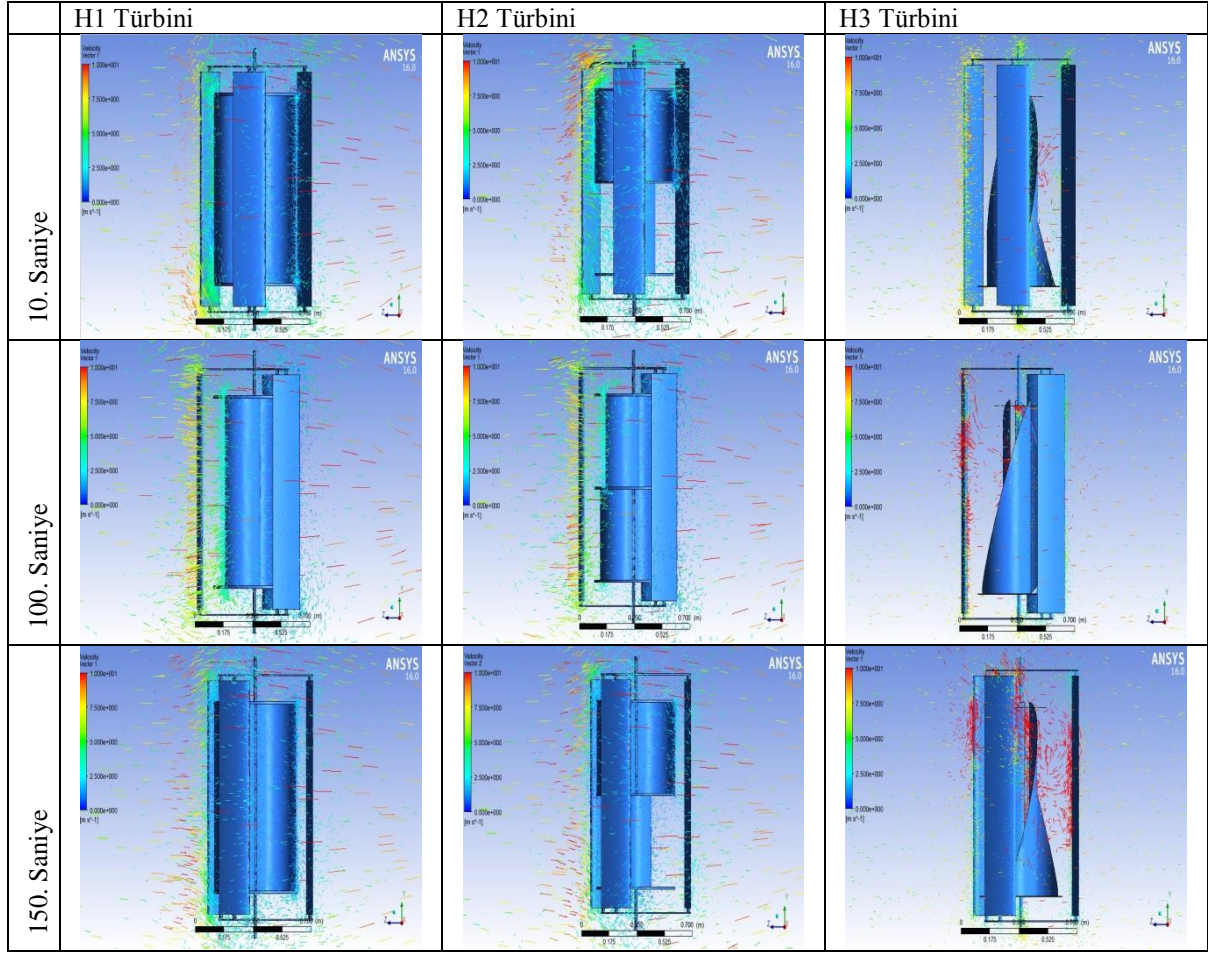


* Buradaki her soldan sağa sıralar belli bir zamandaki durumu göstermektedir.

H1, H2 ve H3 türbinlerine uygulanan rüzgâr enerjisinin türbinleri döndürmesi ve rüzgârın türbinden çıkarken savurulması her bir zaman dilimi için ayrı ayrı gösterilmiştir.

Türbinlerin aerodinamik olarak karşılaştırılmasının ardından vektörel hız akışı incelemesi de Çizelge 3.5’de gösterilmektedir.

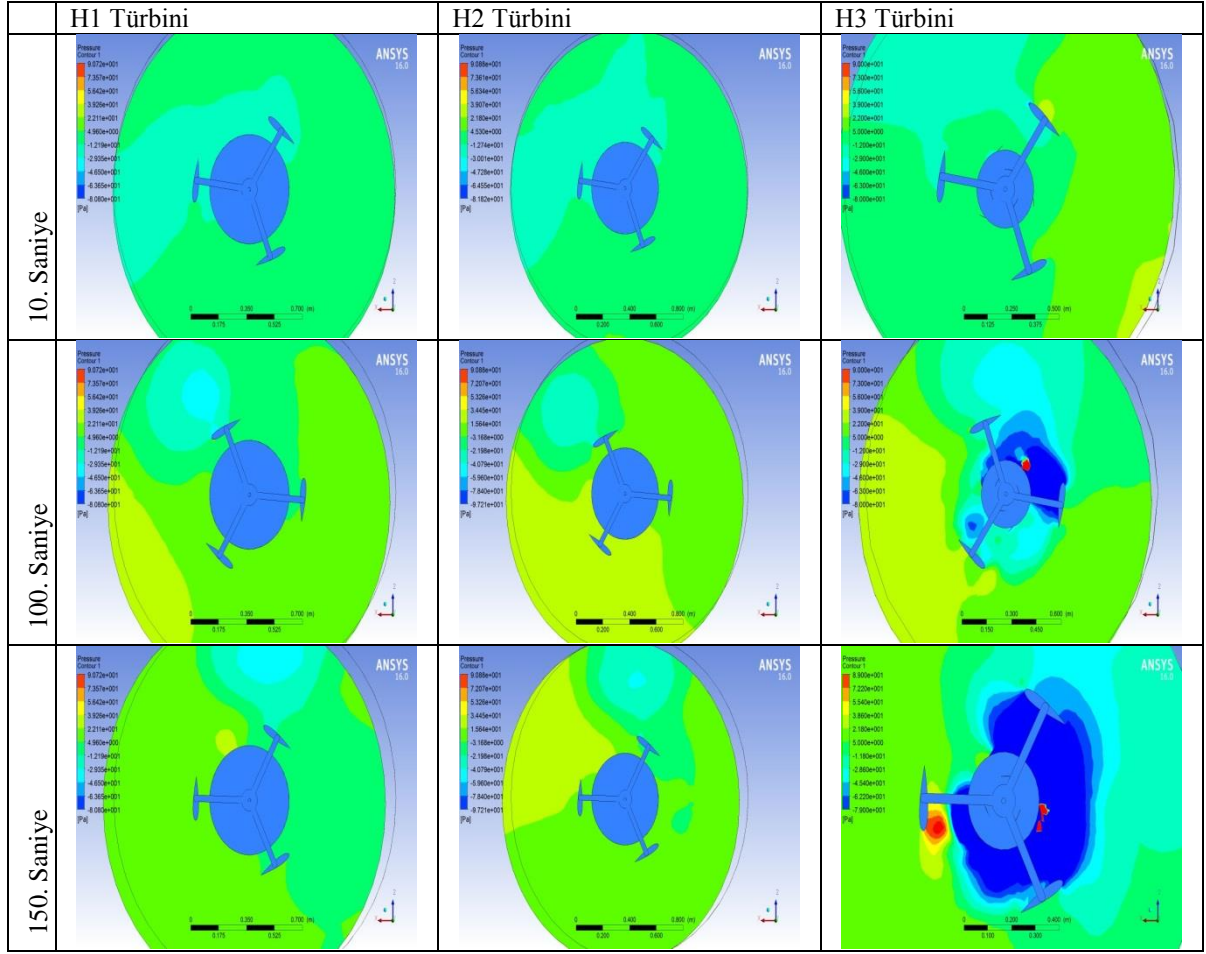
Çizelge 3.5 Türbine uygulanan rüzgâr kuvvetinin vektörel karşılaştırılması.



* Uygulanan vektörel kuvvetler üç türbin içinde gözükmektedir.

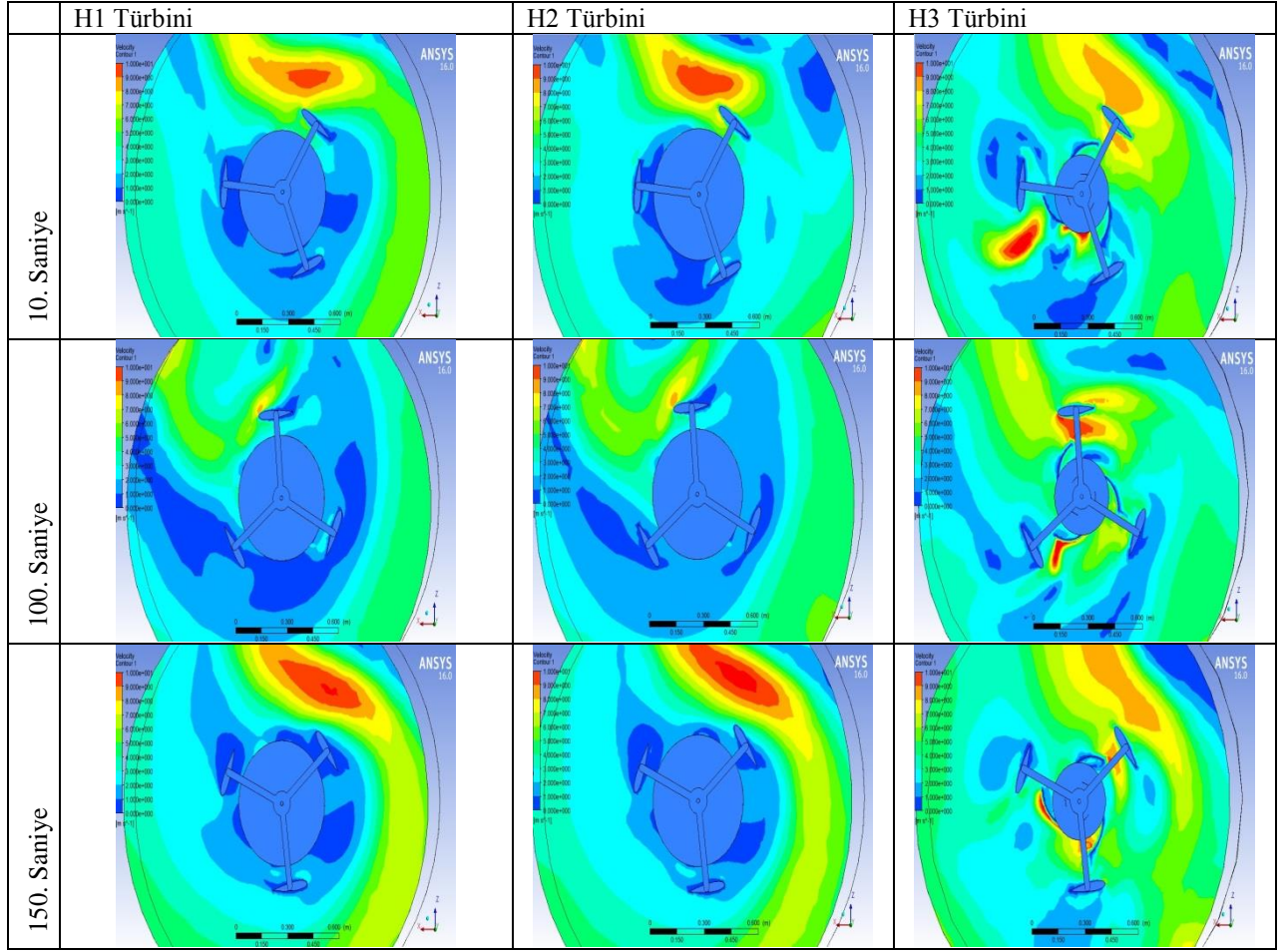
Elde edilen şekil örüntülerini daha iyi anlamak ve yorumlamak için her üç türbinin basınç değerlerine ve yüzeysel hız dağılımlarına karşılaştırarak bakılması gerekmektedir. Çizelge 3.6 'da üç türbinin basınç farkları gösterilmiştir. Çizelge 3.7'de ise yüzeysel hız dağılımları gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 Türbinlerdeki basınç farklılıkları.



* Basınç farklılıkları üç türbin içinde gözükmemektedir.

Çizelge 3.7 Türbinlerin yüzeysel hız dağılımları.



* Yüzeysel hızların karşılaştırılması gözükmemektedir.

Çizelge 3.8 Analizleri yapılan türbinlerin rüzgâr ve türbin güçlerinin karşılaştırılması.

Türbin Adı	Ortalama Hız (m/s)	Hız Değeri *	Rüzgâr Gücü (W)	Türbin Gücü (W) *
H1	7	660	251	251
H2	8	985	374	374
H3	6,85	618	235	235

* Formüller (3.1, 3.2 ve 3.3)'te gösterilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada Hibrit Dikey Rüzgâr Türbinlerinin aerodinamik karakteristiklerinin karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde gösterilmiştir.

- Çizim ve tasarım işlemi yapılan model türbinlerin, uygulanan rüzgârla birlikte dönme eğilimi gösterdikleri gözlemlenmiştir.
- Uygulanan kuvvetin vektörel gösteriminde de dikkat edileceği üzere türbinlerin tüm kanatlarına noktasal olarak rüzgâr değmektedir. Burada dikkat edilirse H2 ve H3 türbinlerinin uygulanan kuvveti dış kanatlara daha çok iletteği böylece dönmeye devam etme gücünü arttırdığı belirlenmiştir.
- İncelenen basınç farklarına göre H3 türbinin de Savonius yani iç kanatlarında belli bir zaman sonra basınç farkının arttığı gözlemlenmiştir. H3 türbininin kanat açıklıkları dikkate alındığında havayı yukarı yönlü süpürmesi kanatın üst kısımlarında basıncın artmasına neden olmuştur. Bu basınç farkı zamanla türbinde dış kanatlarda da hissedilmiştir.
- Yüzeysel hız dağılımlarında H1 ve H2 türbinleri yakın değerler gösterirken H3 türbini diğerlerinden daha yavaş dönmüştür. Bunun sebebi kanat ucundaki basınçtır. Dönme hızının düşük ve basıncının yüksek olması nedeniyle aerodinamik olarak olumsuz sonuçlar vermesine neden olmuştur.
- Bu araştırma neticesinde H2 türbininin diğer iki türbine göre çok yönlü rüzgâr alması, başlangıç dönme hareketi ve devamlılığı gibi özellikleriyle diğerlerine oranla daha başarılı olduğu aerodinamik olarak analizler sonucunda kanıtlanmıştır.
- Türbin gücü ve rüzgâr gücü karşılaştırmalarına göre H2 türbini H1 türbininden %32 H3 türbininden %37 daha fazla güç üretebileceği (Bkz. Çizelge 3.8) görülmüştür.

4. UYGULAMA

İki katlı yarım dairesel tipli H2 rüzgâr türbininin bilimsel olarak üstünlük göstermesinden dolayı bu türbin tasarımını uygulamaya dökerek gerçek bir türbin yapımı gerçekleştirilmiştir. Türbininin yapım aşamaları anlatılmış ve sonucunda alınacak verisel değerlere bakılarak gerçekle simülasyon arasındaki fark ortaya koyulup pozitif ve negatif yönleri tartışılmıştır.

4.1 Darrieus Kanatlarının Yapımı

İlk olarak dıştaki üç kanadın yapımından başlanıyor. Bu kanatlar modele uygun olacak şekilde NACA 0018 kanat tipine uygun olarak imal edilecektir. NACA 0018 kanat tipinin çizim işlemi AutoCAD programına aktarılıyor ve CNC makinesi aracılığıyla kesim işlemi yapılarak NACA 0018 kanat tipinde şablonlar oluşturuluyor.

Bu oluşturulan şablonlar oval krom askı borusu ile birleştiriliyor. Resim 4.1’de gözüktüğü üzere krom borunun uzunluğu 100 cm olup alttan ve üstten 3’er cm boşluk bırakılarak 7 adet şablon eşit mesafeli hizalanıyor. Hizalanan kanat iskeleti 42 cm eninde 100 cm uzunluğunda 0.50 mm kalınlığında galvaniz kaplı sac malzemesinin üzerine koyulup hizalanıyor.



Resim 4.1 Darrieus kanadının iskelet aşaması.

Hizalanan kanat iskeletinin üzerine sac malzeme bükülerek kaplanıyor ve sanayi tipi zımba ile iskelet üzerindeki kesilen tahta şablonların hizasından Resim 4.2’de

görüldüğü gibi zımbalanıyor. Zimba işlemi yapılan kanatların üst ve alt kısımlarındaki 3'er cm boşluklar dışında geri kalan kısmın sadece sac malzemesi gözükecek şekilde fazlalık kısımları kesilerek düzeltilip kapatılması sağlanıyor.



Resim 4.2 Darrieus kanat iskeletinin sac malzemeye zımbalanması.

Bu işlem diğer iki kanat içinde tekrarlanıyor. Hibrit dikey rüzgâr türbini için üç adet 94'er cm boyunda darrieus kanatları hazırlandı.

4.2 Savonius Kanatlarının Yapımı

Savonius yani iç kanatların yapım aşamasında türbini ayakta tutacak iskelet sisteminden başlanmıştır. 20 mm kalınlığında 200 cm uzunluğunda mil demir orta nokta olarak kullanıldı. Yani türbin bu demire sabitlenecek kanatlarla oluşturulacak. Türbinin boyutlarına göre üst, alt ve orta noktasına 20 mm iç çaplı yataklı rulman sabitlenmiştir. Rulmanların üzerine Savonius kanatların üst ve altını oluşturan 50 cm çapında 1 mm kalınlığında siyah sac demiri vidalanmıştır.

Seçilen H2 rüzgâr türbininin iç kanatları iki katlı ve dört yarım daireden oluşmaktadır. Bu yarım daireler düz bir levhanın C harfine benzer şekilde eninden, iç açısının 15 cm yarıçap oluşturacak şekilde bükülmesiyle meydana gelmektedir. Kullanılan bu düz levha 50 cm boyunda ve 48 cm enindedir. 4 adet bükülen levhayı daha önceden mil demirine sabitlenen sac levhalara Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da anlatıldığı gibi 1.5 cm uçları bükülerek Resim 4.3'de görüldüğü gibi sabitleniyor. Şekil 3.9'da vidalama

yöntemiyle sabitlenirken yapılan uygulamada perçin kullanılarak sabitleme işlemi yapılmıştır. 2 katın montajı da bittikten sonra Resim 4.3’de görüldüğü gibi dönmesine bakılmıştır.



Resim 4.3 Savonius kanatlarının yapımı, mile sabitlenmesi ve son halinin dönme denemesi.

4.3 Darrieus ve Savonius Kanatlarının Birleşimi

Dış kanatların iç kanatlarla birleştirilmesinde C profil demiri olarak da bilinen dolap ray demirleri kullanılmıştır. Resim 4.4’de görüldüğü gibi 35 cm boyunda olan bu demirlerin bir ucu 3 cm bükülerek Darrieus kanatlarda uç kısımda 3 cm bırakılan boşluklara vidalanmıştır. Demirin diğer ucu Savonius kanadının üstündeki siyah sac levhaya 10 cm içeri girecek şekilde vidalanmıştır. Başka bir 35 cm boyundaki demir aynı kanadın alt kısmına da vidalanmıştır. Bu işlem diğer iki kanat içinde 120° açıyla tekrarlanmıştır. Böylece dış kanatlarla iç kanatların birleşimi yapılmıştır. Resim 4.5’de görüldüğü gibi türbinin son hali gözükmemektedir.



Resim 4.4 Darrieus ve Savonius kanatlarının birleşimi.



Resim 4.5 Hibrit dikey rüzgâr türbininin son hali.

5. BULGULAR

Uygulama işlemi sonrasında yapılan türbinin test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerde 2 adet alternatör kullanılmıştır (Bkz. Resim 5.1 ve Resim 5.2).

Birinci alternatör AA 380V üç fazlı 0.55 kW gücünde 3000 devirde kondansatör yardımıyla güç üretebilen bir asenkron motordur. İkinci alternatör ise DA 220V daimi mıknatısları olan, yüksek devirli fırçasız bir motordur. İkinci alternatör belli bir devir dakika dönüş hızını yakalayınca üretime başlayan alternatörlerden değildir. Her devirde üretim yapabilir.



Resim 5.1 Kullanılan birinci alternatör.



Resim 5.2 Kullanılan ikinci alternatör.

Yapılan ölçümlerde alınan sonuçlara göre türbinin boş dönmesi Çizelge 5.1’de, türbinin birinci alternatörde bağlı iken ki durumu Çizelge 5.2’de ve türbin ikinci alternatörde iken ki durumu da Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Hibrit dikey rüzgâr türbinin boş durumdaki değerleri.

Rüzgâr Hızı (m/s)	Türbin Devir Sayısı (rpm)*
2 m/s	34
3 m/s	51
4 m/s **	85
5 m/s	128
6 m/s	171
7 m/s **	214
8 m/s	257
9 m/s	342

* Herhangi bir yük olmadığı durumdaki değerlerdir.

** Ölçülmeden hesaplanan değerlerdir.

Türbin herhangi bir yere bağlı olmadığı durumda 2 m/s rüzgâr hızıyla dönüşüne başlamaktadır. Rüzgâr hızının sabit olarak arttığını varsayarak ölçülen devir sayılarına göre, 9 m/s hız değerinde dakikada 342 devir döndüğü takometre cihazı ile ölçülmüştür. 4 m/s ve 7 m/s rüzgâr hızları ölçüm hızlar değil diğer rüzgâr hızlarıyla doğru orantılanarak bulunmuştur.

Çizelge 5.2 Rüzgâr türbininin birinci alternatör bağlı olduğu durumdaki değerleri.

Rüzgâr Hızı (m/s)	Türbin Kasnağı Devir Sayısı (rpm)*	Alternatör Kasnağı Devir Sayısı (rpm)*
6 m/s	15	175
7 m/s **	21	245
8 m/s	30	350
9 m/s	42	490
10 m/s	51	595

* Herhangi bir yük olmadığı durumdaki değerlerdir.

** Ölçülmeden hesaplanan değerlerdir.

Türbin birinci alternatör bağlı durumda 6 m/s rüzgâr hızında dönüşüne başlamıştır.

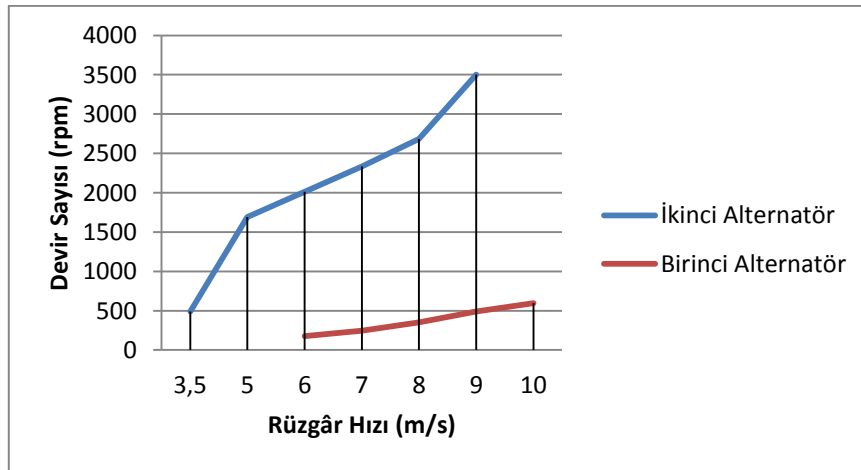
Alternatör dönme gücünün az olmasının nedeni türbine uyguladığı kuvvettir. Rüzgâr hızının 10 m/s'yi bulduğu durumda alternatör 595 devir dakikada dönmektedir. Alternatör 3000 devir dakika dönüş hızını yakalayamadığı için herhangi bir üretim yapmamıştır. 7 m/s rüzgâr hızı ölçüm değil diğer rüzgâr hızlarıyla doğru orantılanarak bulunmuştur.

Çizelge 5.3 Rüzgâr türbininin ikinci alternatör bağlı olduğu durumdaki değerleri.

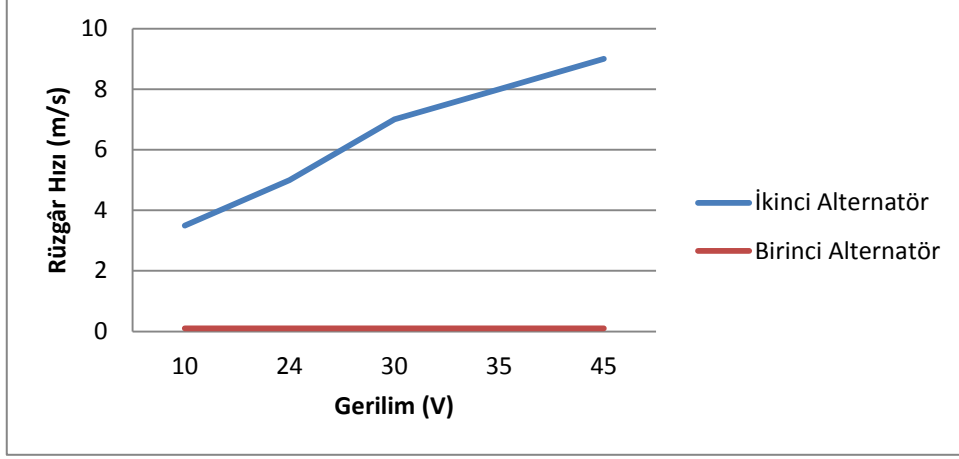
Rüzgâr Hızı (m/s)	Türbin Kasnağı Sayısı (rpm)*	Devir	Alternatör Sayısı (rpm)*	Devir	Üretebildiği elektrik gerilimi (DA Voltajı)*
3,5 m/s	42		490		10
5 m/s	145		1691		24
7 m/s	200		2333		30
8 m/s	230		2683		35
9 m/s	300		3500		45

* Herhangi bir yük olmadığı durumdaki değerlerdir.

Türbin ikinci alternatör bağlı durumda 3.5 m/s rüzgâr hızında dönüşüne başlamıştır. 9 m/s rüzgâr hızında 3500 devir dakika dönerek 45 V DA gerilimi üretmiştir. İkinci alternatör her devir dakika da üretim yapabilen bir alternatör olduğu için elde edilen gerilim değerleri de çizelgede gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Rüzgâr hızına göre alternatörlerin devir sayıları.



Şekil 5.2 Rüzgâr hızına göre alternatörlerin ürettiği gerilim değerleri.

İkinci alternatörün performans parametrelerine ayrıntılı olarak Çizelge 5.4’te bakılabilir. Uygulanan rüzgâr hızlarında tork, performans katsayısı (Cp) değerleri ve uç hız oranı (Tsr) gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 İkinci alternatörün performans parametreleri.

Rüzgâr Hızı (m/s)*	Devir Sayısı (rpm)*	Alternatör Tork Değeri (Nm)*	Türbin Tork Değeri (Nm)*	Rüzgâr Gücü (W)*	Alternatör Gücü (W)*	Cp %*	Tsr*
3,5 m/s	490	0.029	1.607	82,45	1,5	1,81	0,73
5 m/s	1691	0.030	1.355	240	5,28	2,2	0,88
7 m/s	2333	0.043	2.698	659	10,5	1,6	0,64
8 m/s	2683	0.062	3.506	985	17,5	1,78	0,71
9 m/s	3500	0.086	3.825	1402	31,5	2,25	0,9

* Yapılan ölçümler ve formüller kullanılarak hazırlanmıştır.

Alternatör Tork Değeri formülü,

$$\tau_A = \frac{\text{Alternatör Gücü}(kW)*9550}{\text{Devir Sayısı}(rpm)} \quad (5.1)$$

Örneğin, 3.5 m/s rüzgâr hızındaki tork değeri 0.029 Nm olarak bulunur.

$$\tau_A = \frac{0.0015kW*9550}{490rpm} = 0.029 \quad (5.2)$$

Rüzgâr Türbini Tork Değeri formülü,

$$\tau_R = \frac{\text{Rüzgâr Gücü}(kW)*9550}{\text{Devir Sayısı}(rpm)} \quad (5.3)$$

Örneğin, 3.5 m/s rüzgâr hızındaki tork değeri 1.6 Nm olarak bulunur.

$$\tau_R = \frac{0.08245kW*9550}{490rpm} = 1.6 \quad (5.4)$$

Performans Katsayısı Cp formülü,

$$C_p = \frac{\text{Alternatör Gücü}}{\text{Rüzgâr Gücü}} \times 100 \quad (5.5)$$

Örneğin, 3.5 m/s rüzgâr hızındaki Cp değeri % 1.81 olarak bulunur.

$$C_p = \frac{1.5 W}{82,45W} \times 100 = 1.81 \quad (5.6)$$

Çizelge incelendiğinde türbinin tork değerinin yüksek, alternatörün tork değerinin düşük olduğu gözükmemekte ve ayrıca ulaşılan performans katsayısı değerlerinin de beklenenin altında olduğu görülmüştür. Bunun sebebi kullanılan alternatörün yeterli olmayışdır. Bu sebeple araştırmalar sonucunda aşağıda özellikleri verilen alternatörün (bkz. Resim 5.3) kullanımında alınabilecek muhtemel değerler Çizelge 5.5’de gösterilmiştir.

Kalıcı mıknatıslı rüzgâr alternatörü özellikleri (İnt. Kyn. 5),

Güç derecesi: 400 W

Maksimum güç: 410 W

RPM: 600 rpm

Anma gerilimi: DA 12V / 24V

Maksimum direnç: 0.5 Nm

Kontrol sistemi: elektromanyetik

Çalışma sıcaklığı: -40 °C -80 °C



Resim 5.3 Asdomo 400 W doğru akım alternatörü.

Çizelge 5.5 Asdomo alternatörünün performans parametreleri.

Rüzgâr Hızı (m/s)	Devir Sayısı (rpm)*	Tork Değeri (Nm)*	Rüzgâr Gücü (W)*	Alternatör Gücü (W)*	Cp %*	Tsr*
8 m/s	600	6.36	985	400	40	5,33

* Fabrika değerleri ve formüller sonucunda hazırlanmıştır.

Hesaplamalar sonucunda alternatörün performans katsayısı (Cp) % 40, tork değeri ise 6.36 Nm bulunmuştur. Verimliliğin ve tork değerinin yüksek olmasından dolayı türbin için bu alternatörün kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Türbinden ve analizlerden elde edilen sonuçlara göre, Savonius ve Darrieus türbinlerin iç içe olduğu zaman kalkış gücünün daha fazla olduğu devamında da iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Analiz sonuçlarında görüldüğü üzere H1 türbinin rüzgâr temasının ve H3 türbinin optimum basınç değerinin seçilen türbinden (H2) daha zayıf olduğuna karar verilmiştir. Araştırmalar sonucunda tasarım düzenlemesi, analizi ve üretimi yapılan hibrit dikey rüzgâr türbininden elde edilen sonuçlara göre DA alternatör kullanımıyla elektrik akımı üretilebildiği görülmüştür. Kullanılabilecek yüksek verimli bir alternatör yardımıyla daha yüksek güçlerde üretim yapılabileceği son kısımda (Çizelge 5.5) anlatılmıştır. Türbinin düşük rüzgâr hızlarında kalkış yapabildiği ve yatay rüzgâr türbinlerine göre kalkış hızının daha yüksek olduğu görülmüştür. Test edilen bölgedeki rüzgâr gücünün yeterli olması sebebiyle türbinin bu noktadaki kullanımı uygun olacaktır. İleri ki safhalarda, kullanılan türbin için çalışmalar yapılarak türbinin geliştirilmesi sağlanacaktır.

Projede yapılabilecek değişiklikler aşağıda açıklanmıştır.

- İç kanatların 2 katlı yerine üç katlı olması durumunda üretilebilecek güç hesabının araştırılması yapılabilir.
- Dış kanatların ise iç kanatlardan biraz daha uzağa gitmesiyle iç kanatlara daha fazla rüzgâr temas edeceği, böylece türbinin daha erken kalkış yapabileceği düşünülmektedir. Bunun araştırılması ve denenmesi yapılabilir.
- Uygun alternatör bulunması durumunda maksimum değerlerde güç verebileceği tahmin edilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Acarer S, 2017, Kanatlarına Basamak Açmanın Darrieus Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini Güç Üretimine Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 19, Sayı 56.
- Ahmedov S, 2016, Investigation of the Performance of a Hybrid Wind Turbine Darrieus-Savonius, Angel Kanchev, Ruse, 40.
- Akansu O S, Dağdevir T, Kahraman N, 2017, Numerical Investigation Of The Effect Of Blade Airfoils On A Vertical Axis Wind Turbine, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 37, 1, 115-125.
- Akman E, 2019, Dikey Eksenli Bir Rüzgâr Türbinin Kanat Tasarımının Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 64.
- Almaz R, Acarer S, Karadeniz Z, Kökey İ, Turgut A, 2019, Geliştirilen DMST Yazılımı ile Yunuslama Açısı Kontrolünün Darrieus Türbini Performansına Etkisinin İncelenmesi, 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, 14-27.
- Anonim, 2017, Moment Expo Dergisi, Makine İhracatçıları Birliği, 109, İstanbul.
- Anonim, 2019, Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu, Türeb, 27, Ankara.
- Behçet R, Gül H, Oral H, Oral F, 2014, Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Bakımından Malatya İlinin Doğu Anadolu Bölgesindeki Yeri, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 3(1), 65-73.
- Can S, 2020, Rüzgâr Türbinleri Kullanılarak Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarının Zaman Serileri İle Analizi Ve Uygulaması, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, 80.
- Castellani F, Astolfi D, Peppoloni M, Natili F, Butta D, Hirschl A, 2019, Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use, Machines 2019, 7, 35.
- Çetin K S, Genç S M, Daldaban F, 2019, Dikey Eksenli Rüzgâr Türbinleri-Küçük Ölçekli Uygulamalar, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi 6(2), 539-551.

- Damak A, Driss Z, ve Abid M, 2013, Experimental Investigation Of Helical Savonius Rotor With A Twist Of 180, Renewable Energy, 136-142.
- Dursun B, 2006, Dikey Eksenli Bir Darrieus Türbin Dizayn Edilmesi ve Kanat Üretimi, Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, 75.
- Elibüyük U ve Üçgül İ, 2014, Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri, Yekarum e-Dergi, Cilt 2, Sayı 3.
- Gitano-Briggs H, 2012, Düşük Hızlı Rüzgâr Türbini Tasarımı, Gelen Rüzgâr Enerji Gelişmeler, InTech.
- Gül İ ve Kolip A, 2018, Parça Kanatlı Savonius Rüzgâr Türbin Performansının İncelenmesi, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 5, Sayı 3, 816-827.
- Göktaş M, ve Kılıç F, 2019, Savonius Rüzgâr Türbini Çevresindeki Hava Akışının Hesaplanabilir Akışkanlar Dinamiği Yöntemi ile Analizi, Politeknik Dergisi, 11-17.
- Hançerlioğulları A, Şener Y A, Ünal S, Karadeniz M, Hançerlioğulları G, Kurnaz A, vd., 2017, Comparison of Design Gmrt Wind Turbine Plant Effectively with other Power Wind, Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 17(1), 69-79.
- Karadeniz H Z, Güteryüz C İ, 2015, Çapraz Akışlı Rüzgâr Türbini Başarımının İncelenmesi, 3. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir.
- Kaya A F, Tanürün H E, Acır A, 2020, Numerical investigation of radius dependent solidity effect on H-type vertical axis wind turbines, Politeknik Dergisi, Basımda.
- Kebbati M, 2018, Design, Modelling And Control Of A Grid-Connected Hybrid Pv-Wind System (Case Study Of Adrar), Pan-African University Institute For Water And Energy Sciences, 140.
- Macit A, 2015, Numerical Investigation Of The Effect Of The Blade Type And The Chord Length On The Performance Of The Vertical Axis Wind Turbines, Dokuz Eylül University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, 80.

- Mazarbhuiya H M S M, Biswas A, Sharma K K, 2019, Experimental Investigation on the Performance of Varying Thickness H-Darrieus Rotor, J. Phys: Conf. Ser., 1172-012082.
- Mishnaevsky L Jr, Kim B, Helga N P, Justine B, Malcolm M, Bent F S, 2017, Materials for Wind Turbine Blades: An Overview, Materials, 2017.
- Muratoğlu A, Demir S M, 2020, Investigating the Effect of Geometrical and Dynamic Parameters on the Performance of Darrieus Turbines: A Numerical Optimization Approach via QBlade Algorithm, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 413-426.
- Özgener Ö, 2002, Türkiye’de Ve Dünya’da Rüzgâr Enerjisi Kullanımı, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, Cilt 4 Sayı 3, 159-173.
- Potuk K B, 2015, Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 66, İzmir.
- Rassoulinejad-Mousavi S M, Jamil M, Layeghi M, 2013, Experimental Study of a Combined Three Bucket H-Rotor with Savonius Wind Turbine, World Applied Sciences Journal, 28(2), 205-211.
- Fertahi S, Bouhal T, Rajad O, Kousksou T, Arid A, Rhafiki E T, Jamil A, Benbassou A, 2018, CFD Performance Enhancement of a Low Cut-in Speed Current Vertical Tidal Turbine through the Nested Hybridization of Savonius and Darrieus, Energy Conversion and Management 169, 266–278.
- Sharma S, Sharma R K, 2016, Performance Improvement Of Savonius Rotor Using Multiple Quarter Blades – A CFD Investigation, Energy Conversion and Management 127, 43–54.
- Sert M Ş, 2019, Farklı Kanat Tiplerinde Savonius Rüzgâr Çarkı Tasarımı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 50, Denizli.
- Schubel P J and Crossley R J, 2012, Wind Turbine Blade Design, Energies, 5, 3425-3449.

- Sercan A, 2017, Kanatlarına Basamak Açmanın Darrieus Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini Güç Üretimine Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 19, Sayı 56, 399-409.
- Siddiqui A S, Mian N S, Alam M, Haq-ul M S, Memon A H, Energy M S J, 2018, Experimental Study To Assess The Performance Of Combined Savonius Darrieus Vertical Axis Wind Turbine At Different Arrangements, 2018 IEEE 21st International Multi-Topic Conference, 1-8.
- Spence J E, 2012, Renewable Energy in the Australian Red Meat Processing Industry & The Viability of Paunch as a Biofuel, University of Southern Queensland, 176.
- Tanürün H E, Ata İ, Canlı M E, Acır A, 2020, Farklı Açıklık Oranlarındaki NACA-0018 Rüzgâr Türbini Kanat Modeli Performansının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 23(2), 371-381.
- Tian W, Mao Z, Zhang B, Li Y, 2018, Shape Optimization Of A Savonius Wind Rotor With Different Convex And Concave Sides, Renewable Energy, 117, 287-299.
- Toptas E, Bayrak M A, Boz T, 2020, Vertical Axis Hybrid Wind Turbine Design, Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering, Cilt 1, Sayı 1, 33-40.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/ruzgar-enerjisi-nedir-2/>, 17.12.2020.
- 2- <https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx>, 25.12.2020.
- 3- <https://www.omgdemircelik.com/galvaniz-sac-teknik-ozellikleri>, 25.12.2020.
- 4- <http://uskudar.biz/seyirdefteri/m%C3%BChendislik/naca-kanat-kesitleri.html>, 18.12.2020.
- 5- <https://www.banggood.com/DC-12V-24V-400W-Permanent-Magnet-Generator-Wind-Turbine-Windkraftanlage-Motor-p-1382630.html>, 01.01.2021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Barış AKBUDAK
Doğum Yeri ve Tarihi : Sincanlı 19.05.1995
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : 0(552)-218-32-58

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Gazi A.T. Lisesi (2009 –2013).
Lisans : Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, (2013–2018).
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Yenilenebilir Enerji Sistemleri ABD, (2018 –2021).