

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PARÇA KANATLI SAVONIUS RÜZGÂR TÜRBİN
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail GÜL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet KOLİP

Haziran 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PARÇA KANATLI SAVONIUS RÜZGÂR TÜRBİN
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail GÜL

Enstitü Anabilim Dalı

:

MAKİNE EĞİTİMİ

Bu tez 22.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Yusuf ÇAY
Jüri Başkanı



Doç. Dr.
Ahmet KOLİP
Üye



Dr. Öğr. Üyesi
Ali Etem GÜREL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

İsmail GÜL

22 .06.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ahmet KOLİP'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Düzce Üniversitesi Gölyaka MYO Müdürü Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KARA'ya, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocalarım Öğr. Gör. Dr. Ferzan KATIRCIOĞLU'na ve Öğr. Gör. Zafer CİNGİZ'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma süresince desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen eşim İlknur ve canım çocuklarım Ahmed Eymen ve Ayşe Hamra'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	3
BÖLÜM 3.	
RÜZGÂR ENERJİSİ	8
3.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	8
3.2. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisinin Mevcut Durumu	9
3.2.1. Türkiye’de rüzgar enerjisinden elektrik üretimi	10
3.3. Rüzgâr Türbinleri	11
3.3.1. Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması.....	11
3.3.2. Rüzgâr türbinleri ile ilgili bazı parametreler	13
3.3.3. Rüzgar türbinlerinin performansı	16
BÖLÜM 4.	
SAVONIUS RÜZGÂR TÜRBİNLERİ.....	18

4.1. Savonius Rüzgar Türbinlerinin Avantaj ve Dezavantajları.....	19
4.2. Savonius Rüzgar türbinlerinin Kullanım Alanları	20
4.3. Savonius Rüzgar Türbininin Tasarım Parametreleri	20

BÖLÜM 5.

DENEYSEL YÖNTEM	22
5.1. Deneysel Çalışma.....	22
5.2. Deney Düzenegi	22
5.2.1. Kanat modellerinin tasarımı ve imalatı	24
5.2.2. Deney ölçüm mekanizmaları	26
5.2.2.1. Rüzgâr türbininin montaj sehпасı.....	26
5.2.2.2. Rüzgar ölçüm ağı.....	26
5.2.2.3. Prony fren düzenegi.....	27
5.2.3. Deneyslerde kullanılan ölçüm cihazlarının tanıtımı.....	28
5.2.3.1. Anemometre	28
5.2.3.2. Takometre	29
5.2.3.3. Dinamometre	29

BÖLÜM 6.

DENEYSEL BULGULAR	31
6.1. Rüzgar Ölçümleri	32
6.2. Hareketsiz Türbin Durumda Yapılan Deneyler	34
6.2.1. Klasik savonius türbinin statik moment değerleri	35
6.2.2. Yarı parça kanatlı savonius türbin statik moment değerleri.....	36
6.2.3. Parça kanatlı savonius türbin statik moment değerleri	36
6.3. Hareketsiz Türbin Durumundaki Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	37
6.4. Hareketli Türbin Durumda Yapılan Deneyler.....	38
6.4.1. Hareketli klasik kanatlı savonius türbini deney verileri	40
6.4.2. Yarı parça kanatlı savonius türbininin deney verileri	42
6.4.3. Parça kanatlı savonius türbinde deney verileri	43

6.4.4. Hareketli türbin durumunda moment, güç ve güç katsayılarının karşılaştırılması.....	45
BÖLÜM 7.	
SAYISAL YÖNTEM VE BULGULARI.....	51
7.1. Hareketsiz Türbin Durumlarında Sayısal Çözümlemede Elde Edilen Sonuçlar.....	53
7.1.1. Klasik savonius sayısal çözümleme sonuçları.....	53
7.1.2. Yarı parça kanatlı savonius sayısal çözümleme sonuçları.....	56
7.1.3. Parça kanatlı savonius sayısal çözümleme sonuçları.....	59
BÖLÜM 8.	
DENEYSEL VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	63
BÖLÜM 9.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

- A : Rüzgârı karşılayan alan (m^2)
CFD : Sayısal Akışkanlar Dinamiği
CNC : Bilgisayar Destekli İmalat
 C_p : Güç katsayısı
D : Çark Çapı (m)
EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
g : Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
GWh : Giga Watt saat
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
L : Prony fren kolu (kuvvet kolu) (m)
m : Kütle (kg)
 M_d : Dinamik moment (Nm)
 M_s : Statik Moment (Nm)
n : Devir sayısı (d/d)
P : Basınç (Pa)
 P_f : Faydalı güç (W)
RES : Rüzgar Enerji Santrali
T : Zaman (saniye)
u : x -yönündeki kartezyen hız bileşeni
V : Hız (m/s)
v : y -yönündeki kartezyen hız bileşeni
 V_r : Rüzgâr hızı (m/s)
w : z -yönündeki kartezyen hız bileşeni
x : Kartezyen koordinatları
y : Kartezyen koordinatları
YEGM: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

YEKA : Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı

z : Kartezyen koordinatları

λ : Uç hız oranı

μ : Viskozite (kg/ms)

ρ : Yoğunluk (kg/m³)

ω : Açısal hız (rad/s)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Türkiye rüzgâr santrallerinin yıllık elektrik üretimi (GWh)	11
Şekil 3.2. Rüzgâr türbin çeşitleri [11]	13
Şekil 3.3. Bir rüzgâr türbini için türbin önünde ve arkasında rüzgâr hızının gösterimi	14
Şekil 3.4. Rüzgâr türbinlerinin güç katsayısının kanat uç hız oranına göre değişimi	17
Şekil 4.1. Klasik savonius rüzgar türbini	18
Şekil 4.2. Çok katlı bir savonius rüzgâr türbini	19
Şekil 4.3. Savonius türbini tasarım parametreleri	21
Şekil 5.1. Deney düzeneği şeması	23
Şekil 5.2. Deney düzeneği	24
Şekil 5.3. Klasik savonius imalat resimleri	25
Şekil 5.4. Yarı parça kanatlı savonius tasarım ve imalat resimleri	25
Şekil 5.5. Parça kanatlı savonius tasarım ve imalat resimleri	25
Şekil 5.6. Montaj sehpası	26
Şekil 5.7. Ölçüm ağı	27
Şekil 5.8. Prony fren düzeneği	28
Şekil 5.9. Anemometre	28
Şekil 5.10. Takometre	29
Şekil 5.11. Dinamometreler	29
Şekil 6.1. Türbin konumları	34
Şekil 6.2. Klasik kanatlı savonius türbini, statik momentin türbin konumlarına göre değişimi	35
Şekil 6.3. Yarı parça kanatlı savonius türbininde, statik momentin türbin konumlarına göre değişimi	36

Şekil 6.4. Parça kanatlı savonius türbininde statik momentin türbin konumlarına göre değişimi	37
Şekil 6.5. Kanat modellerinin türbin konumuna göre statik moment değişimi	38
Şekil 6.6. Klasik kanatlı savonius türbini $M=f(n)$ değişimi	40
Şekil 6.7. Klasik kanatlı savonius $P=f(n)$ değişimi	41
Şekil 6.8. Klasik savonius türbin $C_p=f(\lambda)$ değişimi.....	41
Şekil 6.9. Yarı parça kanatlı savonius $M=f(n)$ değişimi.....	42
Şekil 6.10. Yarı parça kanatlı savonius $P=f(n)$ değişimi	43
Şekil 6.11. Yarı parça kanatlı savonius türbini $C_p=f(\lambda)$ değişimi.....	43
Şekil 6.12. Parça kanatlı savonius $M=f(n)$ değişimi	44
Şekil 6.13. Parça kanatlı savonius $P=f(n)$ değişimi	45
Şekil 6.14. Parça kanatlı savonius türbini $C_p=f(\lambda)$ değişimi	45
Şekil 6.15. Savonius türbinlerinin moment değişimi	46
Şekil 6.16. Savonius türbinlerinin faydalı güç değişimi	46
Şekil 6.17. Savonius türbinlerinin güç katsayısı değişimi	47
Şekil 7.1. Solidworks akış simulatörü çözümlenme için işlem basamakları	53
Şekil 7.2. Klasik kanatlı savonius için oluşturulan örnek ağ (mesh)	54
Şekil 7.3. Klasik savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için hız dağılımı.....	55
Şekil 7.4. Klasik savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için basınç dağılımı	56
Şekil 7.5. Yarı parça kanatlı savonius için oluşturulan örnek ağ (mesh)	57
Şekil 7.6. Yarı parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için hız dağılımı.....	58
Şekil 7.7. Yarı parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için basınç dağılımı	59
Şekil 7.8. Parça kanatlı savonius için oluşturulan örnek ağ (mesh).....	60
Şekil 7.9. Parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için hız dağılımı	61
Şekil 7.10. Parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için basınç dağılımı	61
Şekil 7.11. Sayısal çözümlenme statik momentlerin değişimi.....	62
Şekil 8.1. Klasik kanatlı savonius türbini deneysel ve sayısal statik moment değişimi	64
Şekil 8.2. Yarı parça kanatlı savonius türbini deneysel ve sayısal statik moment değişimi	64
Şekil 8.3. Parça kanatlı savonius türbini deneysel ve sayısal statik moment değişimi	65

Şekil 8.4. Tüm modellerin deneysel ve sayısal statik moment değişimi 66

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Ülkelere göre dünyada rüzgâr santrali kurulu gücü ilk 20 ülke	9
Tablo 6.1. Rüzgâr hızı ölçümü (30 s)	32
Tablo 6.2. Rüzgâr hızı ölçümü (60 s)	33
Tablo 6.3. Rüzgâr hızı ölçümü (180 s)	33
Tablo 6.4. Klasik kanatlı savonius türbininin hareketli durumdaki değerleri	40
Tablo 6.5. Yarı parça kanatlı savonius türbininin hareketli durumdaki değerleri	42
Tablo 6.6. Parça kanatlı Savonius türbinini hareketli durumdaki değerleri	44
Tablo 7.1. Klasik kanatlı savonius kuvvet ve tork değerleri	54
Tablo 7.2. Yarı parça kanatlı savonius kanat için kuvvet ve tork değerleri	57
Tablo 7.3. Parça kanatlı savonius kanat için kuvvet ve tork değerleri	60
Tablo 8.1. Kanat modellerinin deney sonuçlarında elde edilen statik moment değerleri	63
Tablo 8.2. Kanat modellerinin sayısal analiz sonuçlarında elde edilen statik moment değerleri	63

ÖZET

Anahtar kelimeler; savonius, rüzgâr, türbin, performans, parça kanat, sayısal çözümleme

Dünyada hızla artan nüfus ve buna bağlı olan enerji talebinin artması insanoğlunu farklı enerji kaynaklarını kullanmaya yönlendirmektedir. Enerji arayışı ve artan çevre sorunları dünyamıza daha az zarar veren enerji kaynaklarının kullanımını ön sıralara çıkarmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları hem mevcut fosil enerji kaynaklarına bir alternatif hem de temiz bir dünya vadetmektedir. Bu çalışmada rüzgâr enerjisinin önemine dikkat çekilerek yeni bir rüzgâr türbini kanat tasarımı yapılmıştır. Bu kapsamda dikey eksenli rüzgâr türbini olan savonius tipi rüzgâr türbininin dış bükey olan kanadındaki ters direnç azaltılarak kanat performansının artırılması hedeflenmiştir. Tasarım olarak klasik savonius modelinin kanatlarının hareketli parçalara ayrılması düşüncesinden yola çıkılmıştır. Parabolik olarak yerleştirilmiş parçalar rüzgârın yönüne göre açılıp kapanarak dış bükeydeki ters direnç azaltılmıştır. Parça kanatlar için iki farklı model tasarlanmıştır. Bu iki model klasik savonius modeli ile karşılaştırılmıştır. Deney seti üzerinde ilk önce modellerin farklı türbin konumlarına göre statik ve dinamik momentleri ölçülmüştür. Daha sonra hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi yapan solidworks akış simülöründe farklı türbin konumlarında statik moment hesapları yapılmış ve yapılan deneyler doğrulanmıştır.

Hareketsiz türbin durumlarında yapılan deneylerde statik moment, yarı parça kanatlı modelde % 7 ve parça kanatlı model ise % 33 artış sağlanmıştır. Referans alınan ve yeni tasarımı yapılan modellerin deneysel olarak güç katsayısı karşılaştırıldığında iyileşme gözlenmektedir. Parça kanatlı tasarımında güç katsayısı 0.38 olarak bulunmuş ve diğer modellere göre %40'a yakın bir iyileştirme olduğu saptanmıştır.

Deney sonuçları ile sayısal çözümleme sonuçları birbirleri ile karşılaştırıldığında sonuçlar ortalama %10 birbirine yakındır. Deneysel ve sayısal yöntemlerde değerlerin birbirlerine çok yakın çıkması yapılan performans geliştirmenin doğruluğunu göstermesi açısından önemlidir.

THE PERFORMANCE ANALYSIS OF PART - BLADE SAVONIUS WIND TURBINE

SUMMARY

Keywords: Savonius, wind, turbine, wheel, performance, piece-blade, numerical analysis

The rapidly increasing population in the world and the increasing demand for energy have led the human being to use different energy sources. The search for energy and the increasing environmental problems bring the use of less damaging energy sources in our world at the top of the list. Renewable energy sources offer both an alternative to existing fossil energy sources and a clean world. In this study, a new wind turbine blade design has been made by paying attention to the importance of wind energy. In this context, it has been aimed to increase the blade performance by reducing the reverse resistance in the convex blade of the Savonius type wind turbine, which is a vertical axis wind turbine. As a design, it has been thought to separate the moving parts of the blades of the classic Savonius model. The negative reverse resistance has been reduced by opening and closing the parabolically placed parts through the direction of the wind. Two different models have been designed for component blades. These two models have been compared with the classic Savonius model. On the test set, firstly the static and dynamic moments of the models have been measured according to different wheel positions. Then static moment calculations have been made at different wheel positions in the SolidWorks flow simulator, which analyses the computational fluid dynamics (CFD) and the experiments made have been verified.

It has been observed that there is a 7% increase in the static moment in the half-blade model and a 33% increase in the place-blade model in the experiments performed on the static turbine status. Improvement has been observed when the experimental power coefficient of the reference and newly designed models are compared. The power coefficient in the part-blade design has been found as 0.38 and it has been determined to be improved by 40% compared to the other models.

When the results of the experiment and the numerical analysis are compared with each other, the results are nearly 10% close to each other. In experimental and numerical methods, that the values are very close to each other shows the correctness of performance improvement.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sanayi inkılabından sonra makinelerin ihtiyaç duyduğu enerji için fosil yakıtlar kullanılmıştır. Fosil yakıtlar için dünya savaşları yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Milyonlarca insan bu enerji savaşlarında hayatlarını kaybetmiştir. İnsan hayatının bile önüne geçen enerjiye sahip olma istekleri ülkelerin öncelikleri olmuştur. Enerjinin bu kadar önemli olması fosil yakıtların hızla tükenmesi ve küresel ısınmanın artması farklı enerji kaynaklarının kullanılmasını kaçınılmaz kılmıştır. Bu kaynak arayışı insanoğlunu kimi zaman keşiflere, kimi zaman da eski çağlara dayanan teknolojilerin performanslarını arttırmaya yönlendirmiştir. İnsanoğlu bu arayış içinde son yıllarda doğaya daha az zarar veren yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları doğada sürekli bulunmalı, hazır, tükenmez ve sürekli olan enerjilerdir. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, biyoyakıt, dalga, gel-git ve hidrolik enerji kaynaklarıdır. Bunaların dışında kalan fosil yakıtlar ise yenilenemez enerji kaynakları olarak isimlendirilir. Nükleer enerji ise alternatif bir enerji kaynağıdır, ama yenilenebilir bir enerji kaynağı değildir. Dünya enerji ihtiyacının %80'i fosil yakıtlardan, %5'i nükleer enerjiden ve %15'i ise yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Dünya enerji ihtiyacının %15'i kadar yer bulan yenilenebilir enerjinin büyük bir kısmını hidrolik enerji karşılamaktadır [1].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgâr enerjisi uzun yıllardan bu zamana kadar kullanılmaktadır. Rüzgâr enerjisinin yenilenebilir olmasının karşısında bazı sıkıntılar da bulunmaktadır. Bu enerji, yer küre üzerinde sürekli değil, kesintilidir ve aynı zamanda rüzgâr enerjisinin anlık olarak gücü ve yönü değişmektedir.

Genel çerçevede rüzgâr enerjisinden yararlanılmak üzere türbinler yatay ve dikey eksenli olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Yatay eksenli türbinlerin rüzgâra göre yönlendirilmesine ihtiyaç duyulurken, dikey eksenli olanlar ise rüzgâr yönüne göre yönlendirmeye ihtiyaç duymazlar. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri arasında yer alan savonius rüzgâr türbinleri, bir iç bükey ve bir dış bükey iki kepçenin dikey bir mil üzerine konumlandırılması ile oluşturulmuştur. Fakat bu kepçelerin iç bükey olanı dönme için pozitif bir etki, dış bükey olan kepçe ise negatif bir etki göstermektedir.

Bu çalışmada Savonius rüzgâr türbinlerinin dönme için negatif etki gösteren dış bükey kanadı için yeni tasarımlar yapılmıştır. Bu kapsamda performans arttırmak amacı ile klasik savonius türbininin kanatlarına parça kanat uygulaması yapılmıştır. Parça kanat uygulaması kanatların önce yarısına sonra tamamına uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda klasik, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı modellerin statik ve dinamik momentleri belirlenmiştir. Daha sonra SOLIDWORKS Flow Simulation sayısal Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) programında tüm modellerin farklı türbin konumları için statik momentleri bulunmuştur. Deneysel çalışmada bulunan veriler ile sayısal yöntemde bulunan veriler birbiriyle karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Litereatür incelendiğinde rüzgar türbinleri üzerine yapılan çalışmalar kanat tasarımı ve sistem bileşenlerinin çeşitlendirilmesi ile performans arttırmaya yönelik olduğu dikkat çekmektedir. Savonius tipi rüzgar türbinleri üzerine yapılan çalışmaların ise ağırlıklı olarak tasarım odaklı olduğu öne çıkmaktadır.

Savonius rüzgâr türbinlerinin iç bükey ve dış bükey kanatların konumlandırılması üzerine çalışan Fujisawa ve Shirai 1987 yılında, kanatların merkeze göre kayma oranı 0 ile 0,15 arasında iken türbin performansının daha az etkilendiğini belirlemişlerdir [2].

Savonius rüzgâr türbininin Türkiye'deki uygulamaları üzerine araştırma yapan Avşar vd. 2001 yılında Afyon ilinin rüzgâr verilerini inceleyip, Savonius rüzgâr türbini tasarımı ve imalatını yapmışlardır. Çalışma sonunda Savonius tipi rüzgâr türbinin bölgenin yüksek ve etrafı açık alanlarda akümülatörü besleyebildiğini tespit etmişlerdir [3].

Savonius rüzgâr türbini bahçe sulamada kullanan Modi vd. 1990 yılında sistemin performansını sayısal ve deneysel olarak yaptıkları çalışmada incelemişlerdir [4].

Savonius rüzgar türbini ile elektrik üretimi Menet 2004 yılındaki çalışmasında bir prototip yapılarak incelenmiş ve geliştirilmeye çalışılmıştır. Yaptığı çalışmada güç katsayısı 0,29 olduğunda sistemin yüksek verimli çalıştığını saptamıştır [5].

Klasik Savonius rüzgâr türbini ile burkulmuş kanatlı savonius türbinini Saha ve Rajkumar 2005 yılında rüzgâr tüneline deneyler yaparak karşılaştırmıştır. Burkulmuş

kanatlı türbinin klasik kanatlı türbine göre güç katsayısının % 14 arttığını ve ilk kalkışın daha iyi olduğunu bulmuşlardır [6].

Klasik Savonius rüzgâr türbini ile üç katlı savonius rüzgâr türbininin performanslarını karşılaştıran Hayashi vd. 2004 yılında rüzgâr tüneline yaptıkları çalışmada güç katsayılarını sırası ile 0,18 ve 0,12 olduğunu bulmuşlardır [7].

Savonius rüzgâr türbinlerinin performanslarını arttırmak için Reupke ve Probert 1991 yılında iç bükey ve dış bükey kanatlar yerine düz olarak hareketli kanatlar yerleştirmişlerdir. Bu hareketli kanatlarla dönmeye karşı negatif direnci yenmeye çalışmışlar ve hareketli kanatlarla klasik savonius türbinine göre daha yüksek moment değerlerine ulaşmışlardır [8].

Birleştirilmiş Darrieus-Savonius rüzgâr türbini için yeni bir tasarım yapan Gavalda vd. 1990 yılında çalışmalarını yapmışlardır. Darrieus-Savonius rüzgâr türbininin kalkış moment ve güç katsayılarını incelemişler ve en yüksek güç katsayısını 0,35 olarak belirlemişlerdir [9].

Savonius rüzgâr türbininin performansını arttırmak için Ogawa vd. 1989 yılında türbin önüne rüzgar yönlendirme levhası kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Yönlendirme levhası en ideal konuma yerleştirildiğinde, yönlendirme levhasız duruma göre %30 performans artışı olduğunu saptamışlardır. Yönlendirme levhasını şiddetli rüzgârlarda türbin önünü tamamen kapatacak şekilde hareketlendirerek türbinin zarar görmesini de engellemişlerdir [10].

Deda 2006'da rüzgâr türbininin verimini arttırmak ve türbinin dış bükey yüzeyine etki eden negatif momenti engellemek için Savonius rüzgâr türbininin önüne perde düzenek yerleştirmiştir. Rüzgâr türbininin önce deneysel olarak perdeli ve perdesiz olarak statik ve dinamik momentler ölçmüştür. Ölçüm değerlerini kullanarak her bir durum için güç ve performans değerlerini hesaplamıştır. Sayısal Akışkanlar Dinamiği (CFD) için kullanarak deneysel veriler ile CFD sonuçlarını karşılaştırmıştır. Perdeli model ile performans katsayısının %38'lere çıktığı görülmüştür [11].

Şahin 2015’de klasik Savonius türbini sayısal analizini FLUENT bilgisayar programı kullanılarak yapmıştır. Rüzgâr türbininin performansını iyileştirmek için klasik türbinin etrafına 6 ve 8 adet yönlendirici plakalar yerleştirmiştir. Tasarlanmış Savonius türbinin, klasik türbine göre performansta ortalama %30 değerinde arttığını gözlemlemiştir [12].

Acar 2013’de Savonius rüzgâr türbininin performansını arttırmak için çok kademeli helezonik, pencere ve silindirik olmayan yapıya sahip bir kanat tasarlamıştır. Tasarıma uygun imal edilen prototip üzerinde deneysel çalışma yapmıştır. Rüzgâr yönüne göre açılıp kapanabilme özelliğinin kullanılması sonucunda türbinden daha yüksek oranlarda dönme hızları elde edilmiştir [13].

Aktemur 2010’da farklı Savonius rüzgâr türbinlerinin rüzgâr hızı ve akış koşulları sabit tutularak bilgisayar destekli analizlerini yapmıştır. Çalışmada kanat kayma mesafesinin kanat çapına oranı 0, 0,4 ve 0,8 olarak seçilmiştir. Yapılan bilgisayar destekli analizler sonucunda 3 kanatlı kayma mesafesi/kanat çapı oranları 0.4 oranlı olan tasarımda en iyi performans gözlenmiştir. Üç kanatlı tasarım için kayma mesafesi büyüdükçe performansta azalma kaydedilmiştir [14].

Başka bir çalışmada Kılıç 2009’da helezonik Savonius rüzgâr türbini imal ederek performans deneyleri ve elektrik enerjisi üretimi yapmıştır. Rüzgâra karşı alanı 1,2 m olarak tasarlanan helezonik savonius türbininin Karabük ilinde deneylerini yapmıştır. Rüzgâr hızları 5 m/s’nin altında tutulmuş ve 25 W ile 102 W arasında güç elde edilmiştir [15].

Bir başka çalışmada Atlıhan 2006’da çok eski olan Darrieus tipi rüzgâr türbinleri anlatılmış ve başka türbinler ile geometrik olarak kıyaslamıştır. Geometrisi diğerlerine göre daha kolay olan Sandia tipi rüzgâr türbini incelenmiş ve örnek bir hesaplama uygulaması yapmıştır [16].

Bir başka çalışmada Etyemez 2017’de yatay eksenli türbinler ve düşey eksenli türbinler karşılaştırılmıştır. Düşey eksenli türbinlerin yatay eksenlilere göre avantajları belirtilmiş ve çalışma prensibi anlatılmıştır. Düşey eksenli rüzgâr türbin çiftliği kurulabilecek alanlar belirlenmiş ve bir binanın çatısına kurulduğu varsayılmıştır. FLUENT yazılımında 5, 6, 8 ve 9 rotorlu türbin kümelerinin analizler yapılmış ve optimum performans dizilimi, üç adet üçlü rotor kümesiyle dokuz rotorlu türbin çiftliğinin sağladığı sonucuna varılmıştır [17].

Mahmoud 2012’de Savonius rüzgâr türbinleri üzerine farklı tasarımları içinden en etkin çalışma parametrelerini belirlemek için deneysel olarak incelemiştir. İki bıçaklı rotorun, üç ve dört bıçaklıdan daha verimli olduğu belirlenmiştir. Uç plakaları olan rotorun, uç plakaları olmayanlardan daha yüksek verim sağladığını tespit edilmiştir [18].

Kumar 2017’de modifiye Savonius hidrokinetik türbin performansı incelenmiştir. Çalışmada türbininin bıçak şeklini değiştirmek için bıçak ark açısı ve bıçak şekil faktörü olarak geometrik parametreler kullanılmıştır. CFD analizini kullanarak, bıçak ark açısı ve bıçak şekli faktörü, güç katsayısı, rotor çevresinde bulunan akışkan akış dağılımları analiz edilmiştir. Araştırmaya göre, bıçak yay açısı 150° , bıçak şekli faktörü 0.6 ve 2 m / s akış hızında maksimum güç katsayısı 0.426, kanat uç hız oranı 0.9’a tekabül ettiği optimum değerler olarak belirlenmiştir [19].

Başka bir çalışmada Sharma 2017’de klasik Savonius rotor kanatları içine eş merkezli çok sayıda minyatür bıçak eklenerek sayısal simülasyonlarında Kesme Stres Taşınması türbülans modeli kullanılmıştır. Her iki k- ϵ ve Shear Stress Transport türbülans modelleri için istenen değerleri kullanarak birinci örgü düğümünün duvardan uzaklığını tahmin ederek, rotor kanatlarında sınır tabaka ağı oluşturmuştur. Değiştirilen konfigürasyon ile performans katsayılarında % 8 ile % 11 arasında bir iyileşme sağlanmıştır [20].

Güngör 2005’de rüzgâr pompası tasarlanmış ve kompozit malzemeden imal edilmiştir. Aşırı rüzgârlarda rüzgâr pompasının zarar görmemesi için arka kuyruk sisteminin

kendini kapalı konumuna getirebilmesi amacıyla, kuyruk yönlendirme mekanizması geliştirilmiştir. Çalışmada, düşük rüzgâr hızlarından 25 m/s rüzgâr hızlarına kadar 10 metreküp/saat debiyle yüksek miktarlarda su pompalanabilmesi sağlanmıştır [21].

Çolak 2000 yılında Savonius türbininin önüne bir lüle yerleştirilerek yeni bir model geliştirilmiş, deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve performansta iyileşme sağlamıştır [22].

Zıraman 2009'da Savonius rüzgâr türbinlerinin ulaşabileceği en büyük güç faktörü değeri, literatürde tartışmalıdır. Bu çalışma, bu tartışmaya son verebilmek amacı ile yapılmıştır. Bu amaç için, güç faktörü değerleri, öncelikle analitik olarak hesaplanmış, daha sonra da seçilen bir türbin için, nümerik (sonlu hacimler yöntemi ile) sonuçlar bulunmuştur. Çalışma sonucunda, klasik Savonius rüzgâr türbinlerinin güç faktörü değerlerinin, 0.21 değerini aşamayacağı anlaşılmıştır. [23].

Neccaroğlu 2016'da rüzgâr enerji santrali kurulumunda yüzey pürüzlülük parametresinin tespiti için sayısal görüntü işleme tekniklerinin kullanıldığı bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada Harita Genel Komutanlığından elde edilen görüntüler üzerinde gerçekleştirilmiş ve yazılım ortamı olarak MATLAB kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tez çalışmasında önerilen yöntem ile yüzey pürüzlülük haritasının etkin bir şekilde elde edilebildiği görülmüştür [24].

D'Alessandro vd. 2010'da Savonius rüzgar türbini için yeni bir simülasyon hesaplama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Hesaplamanın doğruluğu deneysel çalışma ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Deneyleri rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiş ve rüzgâr hızını 6 m/s'den 1 m/s artırarak 12m/s'ye kadar değiştirmişler güç ve moment katsayısını ölçmüşlerdir. ANSYS – Fluent ile Matlab'da yazdıkları kodu birlikte çalıştırmışlar ve deneysel veriler ile sayısal verilerin birbirine yakın çıktığını saptamışlardır. Deneysel ve sayısal yöntemlerin ikisinde de en büyük güç katsayısını, kanat uç hızı 0.75 değerinde elde etmişlerdir [25].

Savonius rüzgâr türbini geliştirme ve tasarımı üzerine Roy ve Saha 2013 yılında sayısal olarak çalışmışlardır. Farklı hesaplama metotlarını uygulamışlar ve Savonius türbininin performansını iyileştirmeye çalışmışlardır. Birçok tasarımı deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Savonius rüzgâr türbin parametrelerini tek tek değiştirerek performansa etkilerini incelemişler ve en ideal modeli geliştirip klasik Savonius rotor ile karşılaştırmışlardır. Savonius türbininin moment ve güç katsayısı gibi değerlerinin hız oranı, kanatların örtüşme oranı, en boy oranı, kanat yay açısı ve kanat sayısı gibi birçok parametreye bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [26].

BÖLÜM 3. RÜZGÂR ENERJİSİ

Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisinin türevi olarak karşımıza çıkarak, ısınan havanın alçak ve yüksek basınç alanlarının yer değiştirmesinden oluşan bir hava hareketidir. Rüzgâr enerjisinin kaynağının güneş olması doğaya zarar vermemesi ve küresel ısınmayı arttırmaması onu yenilenebilir enerji kaynakları arasında ön sıralara taşımıştır [15].

3.1. Rüzgâr Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr enerjisi tarihte ilk olarak, kırsal alanlarda, tarımsal amaçlarla kullanılmıştır. M.Ö. 3000 yıllarında Mısır'da İskenderiye'de kurulan rüzgâr pompaları Nil nehrinden tarımsal sulama yapmak için kullanılmıştır. M.Ö. 250 yıllarında İran'da ilk düşey eksenli rüzgâr türbinleri tahıl öğütmede kullanılmıştır. Daha sonra tüm islam ülkelerinde ve Akdeniz'e kıyısı olan ülkelere yayılmıştır. Ahşap malzemenle tasarlanan kumaş yelkenli rüzgâr türbinleri Akdeniz ülkelerinde, Girit'te, Anadolu'da, İspanya ve Portekiz'de kurulmuş ve bunların izlerine günümüzde hala rastlanmaktadır. Ortaçağ Avrupa'sında çok yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbileri, Avrupa'ya XIII. yüzyılda haçlı seferleri sırasında Anadolu'dan taşınmıştır. Hollanda XVII. yüzyılda gemi ve yel değirmenlerinde rüzgâr türbinlerini kullanması bu ülkenin sanayi gelişimine önemli katkıda bulunmuştur. S.S.Savannah, yelkenli gemi ile 1819'da Atlantik okyanusunu geçmiştir. Bir Fransız olan Paul La Cour 1890'da Danimarka'da 9 kW'lık iki jeneratörün çalıştırılmasıyla rüzgâr enerjisinden elektrik üretim santralini kurmuştur [11].

Çok kanatlı rüzgâr türbinleri 1850'lerden sonra ABD'de icat edilmiştir. 1889 yılında ABD'de 77 tane rüzgâr türbini imalatı yapan fabrika vardı ve bu fabrikalar o dönemde ABD ekonomisi için en büyük ihracat kalemi oluşturmuştur. 1930 ve 1940'lı yıllarda ABD'de çok sayıda elektrik üreten rüzgâr türbini imal edilmiştir. Bunlar da iki veya üç ince kanatlı yüksek hızla dönen ve elektrik jeneratörünü çalıştıran modellerdir. Bu

türbinler çiftliklerde, pil doldurmada, radyo alıcılarında, aydınlatmada kullanılmıştır. 1950 yılından sonra ulusal şebekelere yaygınlaşması ve elektrik düzenleme yasalarının çıkarılması ile rüzgâr türbini bir duraklama devresine girmiştir.

1973 petrol krizini takiben enerji fiyatlarının yükselmesi ile rüzgâr enerjisi tekrar ilgi odağı olmuştur. Devlet destekleri ve yeni araştırmalar sonucu birçok yeni türbin modeli üretilmiştir. Bazı modeller çok büyüktür. 90 metre kanat çaplı rüzgâr türbini 700 evin elektrik ihtiyacını karşılayabilir. Evsel kullanım için yeni küçük ölçekli modeller geliştirilmiştir. 1970'li yıllarda ABD'de yaklaşık 50 yerli rüzgâr türbin imalathanesi vardı. Rüzgâr tarlaları 1980'lerin başlarında kurulmaya başlamıştır. 1978 yılında ABD'de getirilen teşvik ile elektrik dağıtım şirketleri rüzgâr enerjisinden üretilen elektriği almak zorundaydılar [14].

3.2. Dünyada ve Türkiye'de Rüzgâr Enerjisinin Mevcut Durumu

Dünyada rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi yapan 100'den fazla ülke vardır. En fazla rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip olan ülkelere bakıldığında Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya uzun süredir ilk 3 sırada yer almaktadır. Tablo 3.1.'de rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yapan ilk 20 ülke sıralaması verilmiştir.

Tablo 3.1. Ükelere göre dünyada rüzgâr santrali kurulu gücü ilk 20 ülke [27]

S.	Ülke	Güncelleme	Kurulu Güç (MW)	S.	Ülke	Güncelleme	Kurulu Güç (MW)
1	Çin	Aralık 16	168.732	11	İsveç	Aralık 16	6.520
2	ABD	Aralık 16	82.184	12	Türkiye	Kasım 17	6.504
3	Almanya	Ekim 17	55.340	13	Polonya	Aralık 16	5.782
4	Hindistan	Aralık 16	28.700	14	Portekiz	Aralık 16	5.316
5	İspanya	Temmuz 17	22.841	15	Danimarka	Aralık 16	5.228
6	U.K	Aralık 16	14.543	16	Hollanda	Aralık 16	4.328
7	Fransa	Aralık 16	12.066	17	Avusturalya	Aralık 16	4.327
8	Kanada	Aralık 16	11.900	18	Meksika	Aralık 16	3.527
9	Brezilya	Aralık 16	10.740	19	Japonya	Aralık 16	3.234
10	İtalya	Aralık 16	9.257	20	Romanya	Aralık 16	3.028

Tablo 3.1.'de görüldüğü gibi, rüzgâr enerji santrali kurulumunda Dünyada 12'inci sırada olan Türkiye, Avrupa'da ise 7'inci sırada yer almaktadır. 2018 yılındaki yeni yatırımlarla çok daha üst sıralara çıkması beklenmektedir.

3.2.1. Türkiye’de rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi

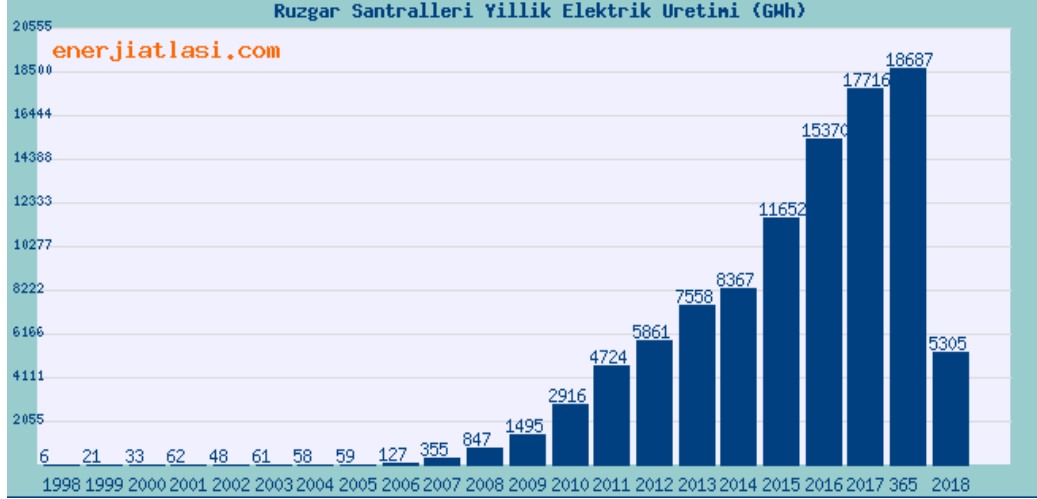
Türkiye’nin ilk rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi 1998 yılında İzmir’de başlamıştır. 2018 yılı nisan ayın itibari ile devreye alınan 178 santralin bir kısmı henüz lisans kurulu gücüne erişmemiş olup inşası devam etmektedir. Lisansı olup inşası devam eden santrallerin devreye alınması ile mevcut 384 MW kapasiteli ilave rüzgâr türbini devreye girmiş olacak ve kurulu güç 6.927 MW kapasiteye ulaşacaktır [28].

Henüz hiçbir ünitesi devreye alınmayan fakat inşası devam eden 86 santralin lisans kapasitesi 1.346 MW’tır. Kısmen devreye alınan ve inşası eden projelerin tümü tamamlandığında Türkiye rüzgâr santrali kurulu gücü 8.273 MW seviyesine ulaşacaktır. Bugün itibariyle EPDK’dan lisans ve ön lisans alan tüm RES’ler devreye girdiğinde Türkiye’nin rüzgâr kurulu gücü 12.722 MW’a ulaşacak ve Türkiye elektrik tüketiminin %12’si rüzgâr santrallerinden karşılanabilecektir. Ayrıca EPDK tarafından 2018 yılı sonuna kadar 3.000 MW daha rüzgâr santrali başvurusu kabul edilecektir [28].

Türkiye’de son yıllarda yapılan devlet teşvikleri ve özel sektör atılımları rüzgâr enerjisinde çok büyük bir atak yapmıştır. Bu kapsamda çıkarılan en köklü yönetmelik, Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) yönetmeliğidir. Yönetmelik 27 Kasım 2013 tarihli ve 28834 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanmıştır. Yönetmelikteki tanımına göre YEKA, “kamu ve hazine taşınmazları ile özel mülkiyete konu taşınmazlar üzerinde kurulacak büyük ölçekli kaynak alanları”dır. Daha açık olarak kamuya ait büyük arazilerin, enerji santralleri kurulması için ihale ile süreli olarak kiralanmasıdır. Bu ihalelerin alt yapısını Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından yapılmaktadır.

Türkiye’nin rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi serüveninin başladığı 1998 yılından 2018 yılına kadar rüzgâr ile elektrik üretimi bilgileri Şekil 3.1.’de verilmiştir. Şekil üzerindeki değerler GWh’tır. 2018 yılı için verilen değerlerden “365” olarak işaretlenen değer 27.03.2018 tarihinden önceki 365 güne ait elektrik üretimi değerini gösterir. 2018 olarak işaretlenen değer ise 1 Ocak – 27.03.2018 tarihleri arasındaki 5.304.866.170 kWh olan 2018 yılı içindeki rüzgâr santralleri ile elektrik üretimi

verisini göstermektedir. Son iki sütundaki değerler geçici olup yıl sonunda revize edilmektedir [29].



Şekil 3.1. Türkiye rüzgâr santrallerinin yıllık elektrik üretimi (GWh) [29].

3.3. Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir rüzgâr türbini genel olarak kule, jeneratör, hız dönüştürücüleri (dişli kutusu), elektrik elektronik elemanlar ve pervaneden oluşur. Rüzgârın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Rotor milinin devir hareketi hızlandırılarak gövdedeki jeneratöre aktarılır. Jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi aküler vasıtasıyla depolanarak veya doğrudan alıcılara ulaştırılır [30].

3.3.1. Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılması

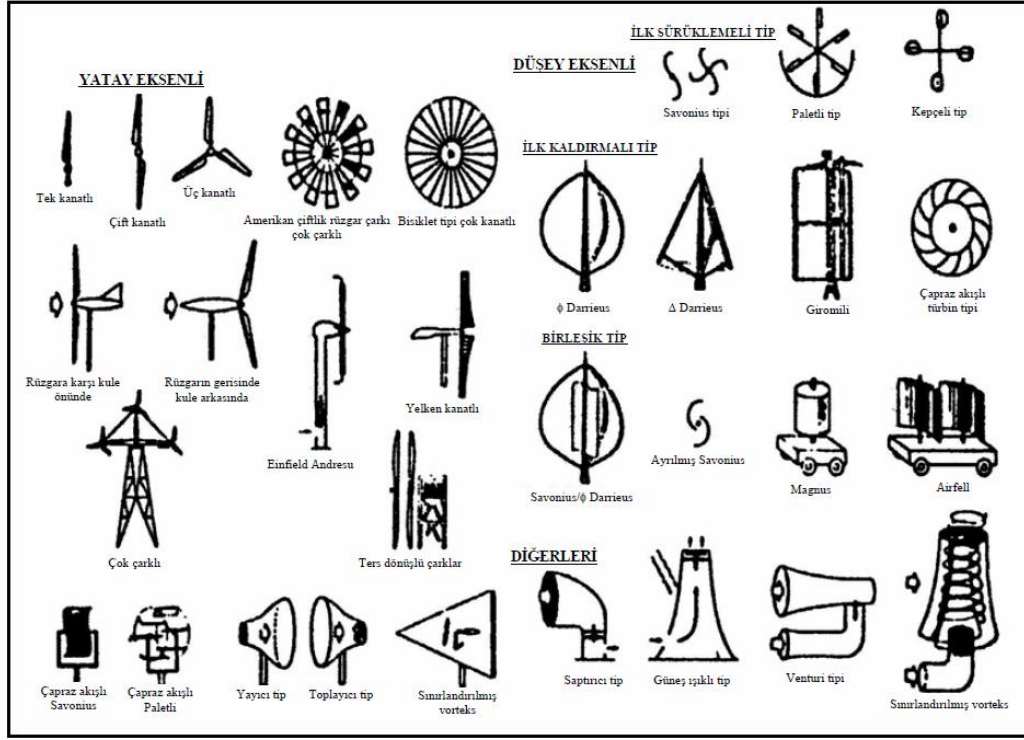
Rüzgâr türbinlerinin sınıflandırılmasında literatürde çok farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaları derleyerek düzenli hale getirilmiş şekli aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

A. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT)

- a. $\lambda = 1-5$ Çok kanatlı rotor,

- b. $\lambda=6-8$ Üç kanatlı rotor,
 - c. $\lambda=9-15$ İki kanatlı rotor,
 - d. $\lambda>15$ Tek kanatlı rotor (λ : kanat uç hız oranı) kullanılır
- B. Düşey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)
- a. Darrieus tipi
 - b. Savonius tipi
 - c. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri
- C. Kanat Sayılarına Göre Rüzgâr Türbinleri
- a. Tek kanatlı rüzgâr türbinleri
 - b. Çift kanatlı rüzgâr türbinleri
 - c. Üç kanatlı rüzgâr türbinleri
 - d. Çok kanatlı rüzgâr türbinleri
- D. Rüzgârın Geliş Yönüne Göre Rüzgâr Türbinleri
- a. Rüzgârı önden alan türbinler
 - b. Rüzgârı arkadan alan türbinler
- E. Güç Bakımından Rüzgâr Türbinleri
- a. Küçük güçlü türbinler: 30 kW'tan az.
 - b. Orta güçlü türbinler: 30-100 kW.
 - c. Büyük güçlü türbinler: 100 kW-1 000 kW.
 - d. Çok büyük güçlü türbinler: 1 MW veya daha fazladır
- F. Dişli Özelliklerine Göre Rüzgâr Türbinleri
- a. Dişli kutusu kullanılan rüzgâr türbinleri
 - b. Sabit hızlı – sincap kafesli indüksiyon jeneratörü (SCIG)
 - c. Değişken hızlı – çift beslemeli indüksiyon jeneratörü (DFIG)
 - d. Dişli kutusuz kullanılan rüzgâr türbinleri
 - e. Direkt sürümlü – elektriksel uyartımlı senkron jeneratör (EESG)
 - f. Direkt sürümlü – sürekli mıknatıslı senkron jeneratör (PMSG)
- G. Kurulum Yerlerine Göre
- a. Kara üstü(onshore)
 - b. Deniz üstü (offshore) ,
- H. Devir Bakımından Rüzgâr Türbinler
- a. Yüksek devirli

b. Düşük devirli [30]



Şekil 3.2. Rüzgâr türbin çeşitleri [11]

Yukarıdaki sınıflandırma ve Şekil 3.2.'deki görsel anlatım arasında bazı farklılıklar oluşmaktadır. Bu sınıflandırmalar genellikle kaynaklara göre farklılık göstermektedir.

3.3.2. Rüzgâr türbinleri ile ilgili bazı parametreler

Rüzgâr türbinleri ile ilgili ilk teorik çalışma, Göttingen Üniversitesinde Albert Betz tarafından yapılmıştır. Betz; rüzgâr türbinlerinin, göbeksiz ve sonsuz kanatlı olduğunu veya diğer bir ifadeyle ideal olduğunu varsayarak hesaplarını yapmıştır. Betz'in teorisine göre, rüzgâr türbinlerinin güç ve performans hesapları aşağıda açıklanmıştır [16].

$$\Delta T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T V_T \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.4)$$

olur.

Denklem 3.3. ve 3.4. eşitlemek suretiyle;

$$V_T = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.5)$$

olarak elde edilir.

Böylece kanatlara uygulanan kuvvet ve sağlanan güç; yukarıda verilen denklemlerin tekrar ele alınması ile aşağıda ifade elde edilir. Bu durumda uygulanan kuvvet;

$$P_r = \rho \cdot A_T \cdot V_T \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot A_T \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot (V_1 - V_2) \quad (3.6)$$

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.7)$$

elde edilir. Buradan güç ifadesi de;

$$P_r = \rho \cdot A_T \cdot V_T^2 \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot A_T \cdot \frac{(V_1 + V_2)^2}{4} \cdot (V_1 - V_2) \quad (3.8)$$

$$P_r = \frac{1}{4} \rho \cdot A_T \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 - V_2) \quad (3.9)$$

elde edilir.

Sabit bir $V_1 = V_r$ rüzgâr hızı için, V_2 hızının hangi noktada en büyük güç elde edilebileceğini belirlemek için, güç ifadesinin V_2 hızına göre türevi alınır;

$$\frac{dP_r}{dV_2} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_T \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1 - 3V_2) \quad (3.10)$$

$$\frac{dP_r}{dV_2} = 0, \text{ eşitliğinin iki çözümü vardır.}$$

Birinci çözüm; $V_2 = -V_1$ şeklinde elde edilir. Fiziksel bir anlamı yoktur.

İkinci çözüm; $V_2 = \frac{V_1}{3}$ şeklinde elde edilir ve en büyük gücün elde edildiği değeri verir.

Buna göre güç ifadesinde $V_2 = \frac{V_1}{3}$ değeri yerine konulduğunda, en büyük gücü veren ifade şöyle ifade edilebilir:

$$P_{r_{max}} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3 \quad (3.11)$$

Burada;

V_1 hızındaki rüzgarın A_T alanını geçerken, birim zamanda sahip olduğu toplam kinetik enerjisi ;

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1 \cdot A_T \cdot V_1^2 \quad (3.12)$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3 \quad (3.13)$$

şeklinde elde edilir.

Burada (3.11) ve (3.13) denklemleri taraf tarafa bölündüğünde;

$$\frac{P_{r_{max}}}{T} = \frac{8/27 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3}{1/2 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3} = \frac{16}{27} = 0,5926 \text{ olarak Betz Limiti adı verilen değer elde edilir.}$$

Bir rüzgâr türbini ile ideal bir şekilde enerji alınabilmesi için rüzgâr enerjisinin ancak $16/27 = 0,5926$ kadarının teorik olarak faydalı enerji haline dönüştürülebileceği anlaşılmaktadır.

3.3.3. Rüzgar türbinlerinin performansı

Rüzgâr türbinlerinin performansı, moment ve güç katsayılarıyla belirlenir. Buna göre rüzgar türbinine ait;

Güç Katsayısı; ($C_p = \text{Faydalı çıkış gücü} / \text{Rüzgâr gücü}$)

$$C_p = \frac{P_f}{P_r} = \frac{P_f}{1/2 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^3} \quad (3.14)$$

Moment Katsayısı; ($C_m = \text{Faydalı moment} / \text{Rüzgâr kuvvetinin oluşturduğu moment}$)

$$C_m = \frac{M_f}{1/2 \cdot \rho \cdot A_T \cdot V_1^2 \cdot R} \quad (3.15)$$

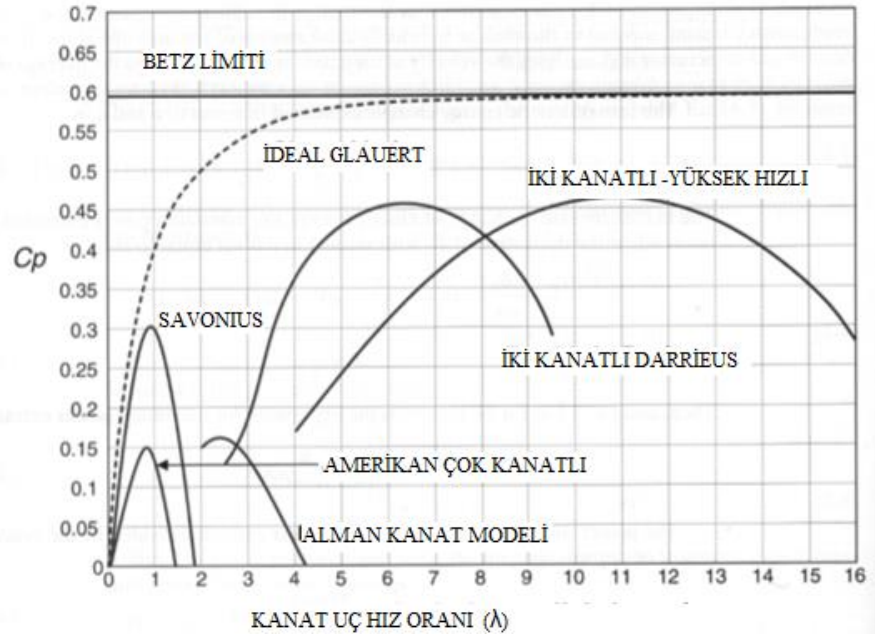
Rüzgâr türbinlerinin performans katsayıları, kanadın hızının bir fonksiyonu olarak

değişmektedir. Bu da; uç hız oranı olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\lambda_0 = \text{Kanat uç hızı} / \text{Rüzgar hızı}$$

$$\lambda_0 = \frac{U}{V_1} = \frac{2\pi.R.n}{60.V_1} = \frac{\pi Rn}{30.V_1} \quad (3.16)$$

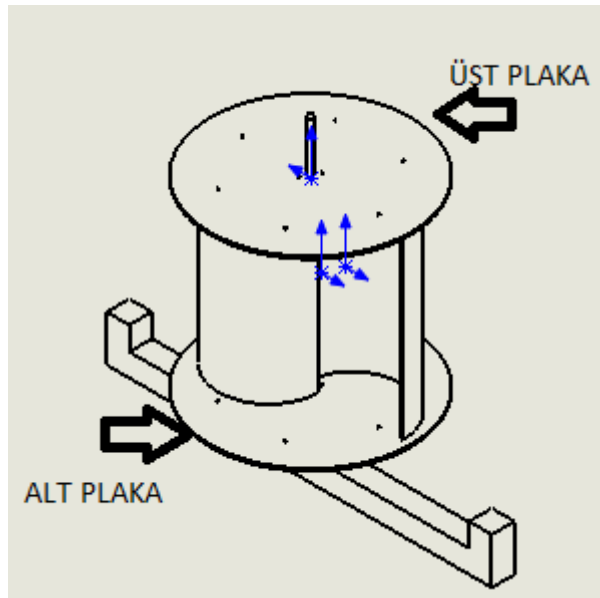
Betz limiti teorik olarak bir rüzgâr türbininin enerji veriminin maksimum %59 olacağını ifade etmektedir. Rüzgar türbinlerinin tipik güç performansları Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. İki kanatlı yatay eksenli türbinlerle Darrieus türbinlerinin performansının yüksek olduğu şekilden de görülmektedir. Savonius türbinleri ise 0,30 mertebelerinde kalmakla beraber, iki kanatlı yatay eksenli ve Darrieus türbinlerine performans olarak en yakın olan türbinlerdir. Bu da Savonius türbinlerinin üzerinde daha çok çalışma yapılması olanağı sağlamaktadır.



Şekil 3.4. Rüzgâr türbinlerinin güç katsayısının kanat uç hız oranına göre değişimi [17].

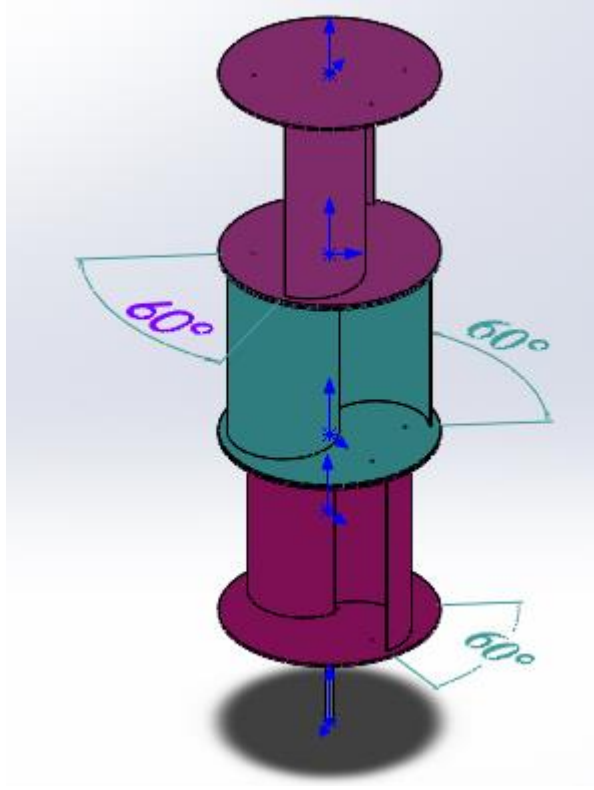
BÖLÜM 4. SAVONIUS RÜZGÂR TÜRİNLERİ

Savonius rüzgâr türbini, düşey eksenli bir rüzgâr türbini olup, 1925 yılında Finlandiya'lı mühendis Sigurd Savonius tarafından bulunmuştur. Savonius rüzgâr türbini, iki yatay disk arasında yerleştirilmiş ve merkezleri birbirlerine göre simetrik olarak kaydırılmış kanat adı verilen iki yarım silindirden oluşur. Üstten bakıldığında S harfine benzemektedir. Çalışma ilkesi şöyledir; Belirli bir hızla gelen rüzgâr, türbini oluşturan iç bükey kanat üzerinde pozitif ve dışbükey kanat üzerinde negatif bir moment oluşturmaktadır. İçbükey kanatta oluşan moment dışbükey kanat üzerinde oluşan momentten daha büyük olduğundan, radyal hareket elde edilir. Savonius rüzgâr türbini yapımında sac levha, plastik levha ve kompozit malzemeler kullanılabilir. En basit uygulama bir varilin dikey olarak iki eş parçaya bölünmesi ile elde edilen şeklidir. Türbini dikey tutmak için çelik profil ya da ahşap taşıyıcılar kullanılabilir. Şekil 4.1.'de Savonius rüzgâr türbininin basit bir şekli gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Klasik savonius rüzgar türbini

Savonius rüzgâr türbin kanatları en az iki olarak ve çok katlı olarak tasarlanabilirler. Çok katlı olan türbinlerde; her kattaki kanatlar, diğer kattaki kanatlar ile belirli açılarda kaydırılır. Buna göre; iki katlı olanlarda 90° , üç katlıda 60° , dört katlıda 45° , beş katlıda 36° kaydırılır. Ancak çok katlı türbinlerde; rotor yüksekliğinin artması tüm rotor boyunca aynı dönme eksenini sağlamayı zorlaştırır ve aşırı titreşim oluşturur. Şekil 4.2.'de çok katlı bir Savonius rüzgâr türbini görülmektedir.



Şekil 4.2. Çok katlı bir savonius rüzgâr türbini

4.1. Savonius Rüzgar Türbinlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Savonius rüzgar türbinleri; aerodinamik performans açısından yüksek kanat hızına sahip rüzgar türbinleri ile kıyaslanamaz. Fakat Darrieus tipi hariç diğer düşey eksenli türbinleri ile kıyaslanabilir. Bu türbinlerin avantaj ve dezavantajları şöyle sıralanabilir:

Avantajları;

- Tasarımları basittir.
- Kule masrafı yoktur. (dinamo ve dişli kutusu zemindedir)
- Düşük rüzgâr hızlarında iyi başlangıç değerlerine sahiptirler.
- Kırsal alanlar için ekonomik ve ideal bir rüzgâr türbinleridir.
- Rüzgârı her yönden alabildiğinden yönlendirme için dümen sistemine ihtiyaç yoktur.
- Türbin mili hariç diğer parçaların bakım ve onarımı kolaydır.
- Güç zemine aktarılarak üretim burada olduğu için, nakledilmesi daha kolaydır.

Dezavantajları ise;

- Zemine yakın oldukları için burada rüzgâr hızları düşüktür.
- Sistem verimi düşüktür.
- Sabit ve dikey durabilmesi için geri tellerine ihtiyaç vardır.
- Mil yataklarının değiştirilmesi için sistemin tamamı yere yatırılmalıdır.

4.2. Savonius Rüzgar türbinlerinin Kullanım Alanları

Savonius Rüzgâr türbinleri, su pompalanmasında, havuz sularının havalandırılması amacı ve ilk kalkış hareketi gerekli diğer rüzgâr türbinlerinin ilk harekete başlamasında yardımcı olarak kullanılır. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte elektrik üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca kırsal kesimlerdeki küçük güç ihtiyaçlarının karşılanmasında, küçük çiftlik ve bahçelerde sulama ve elektrik ihtiyacının karşılanmasında da kullanılmaktadırlar [11].

4.3. Savonius Rüzgar Türbininin Tasarım Parametreleri

Literatür incelendiğinde bina içi deneylerde kullanılan en uygun kanat tasarımı Fujisawa ve Gotoh 1992 yaptığı çalışmada belirledikleri parametrelerdir. Bu parametreler aşağıda verilmiş:

Türbin çap yükseklik oranı; $A_R=(H/D)=1$

Kanat uç plakası çapı; $D_0=1,1 \times D$

Kayma oranı; $G=(e/d)=0,15$ olarak belirlenmiştir [2].

H: Türbin yüksekliği (m)

D_0 : Kanat uç plakası çapı (m)

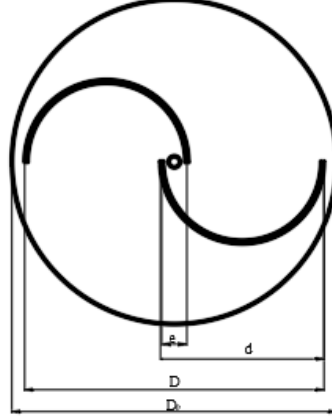
D : Türbin çapı (m)

e : Kayma mesafesi(m)

d : Kanat çapı (m)

G : Kayma oranı (%)

Bu parametreler Şekil 5.2.'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Savonius türbini tasarım parametreleri

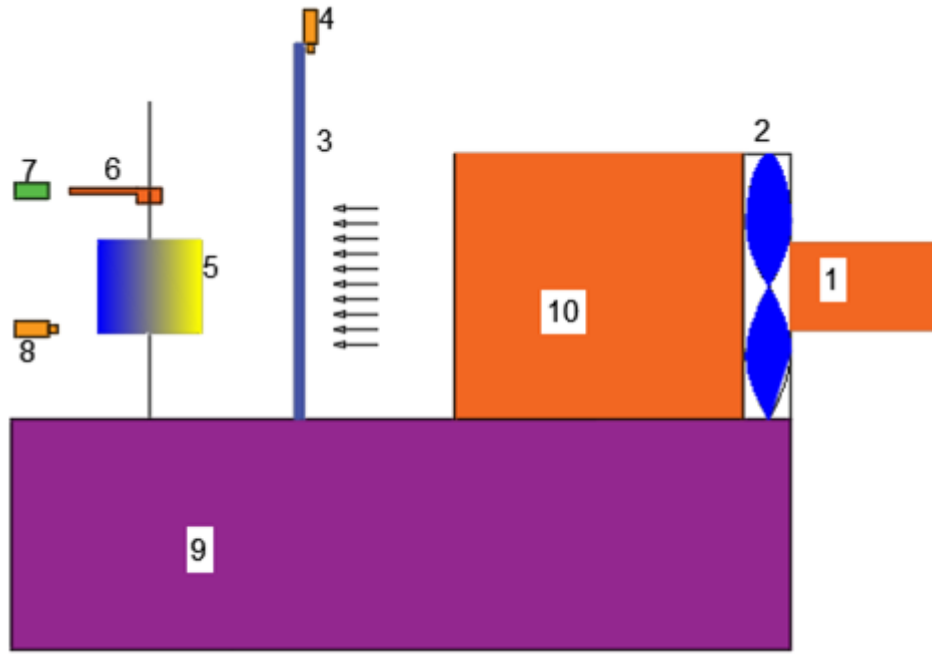
BÖLÜM 5. DENEYSEL YÖNTEM

5.1. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, Savonius rüzgâr türbininin dış bükey kanadında oluşan negatif yükü azaltmak için parabolik kanatların parçalara ayrılarak yeni bir model tasarlanmıştır. Klasik Savonius türbini referans alınarak, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı Savonius rüzgâr türbinlerinin güç ve performans değerlerini arttırmak için deneyler yapılmıştır. Deneyler için açık devre bir rüzgâr tüneli düzeneği kullanılmıştır. Bu bölümde deney düzeneği, Savonius rüzgâr türbininin imalatı, kanat modellerin oluşturulması ve ölçüm cihazlarının tanıtımı yapılacaktır.

5.2. Deney Düzeneği

Deneylerin yapıldığı bölgede sürekli rüzgârlar olmadığından yapay olarak rüzgâr enerjisi elde etmek için 90 cm çapında aksiyal bir fandan yararlanılmıştır. Bu fanın çıkışının 2 metre önüne hava hızını ölçmek için 180x180 cm ebatında ölçüm ağı oluşturulmuştur. Bu ölçüm ağı 100 cm²'lik kare alanlara bölünerek anemometre yardımıyla hava hızları, belirli süreler beklenecek ölçülmüştür. Elde edilen rüzgâr hızları ortalaması alınarak deneylerde kullanılacak rüzgâr hızı hesaplanmıştır. Ölçüm ağının 1 metre önüne rüzgâr türbinini monte etmek için montaj sehpası yapılmıştır. Montaj sehpasının üzerine rüzgâr türbini yerleştirmek için milin alt ve üst kısmında oynar rulman kullanılmıştır. Montaj seplasının üzerine, türbin konumlarını belirleyebilmek için bir açıölçer yerleştirilmiştir. Yine sehpa üzerine ölçüm aletlerini sabitlemek için uygun yerler yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 5.1.ve Şekil 5.2.'de gösterilmiş ve deneyde kullanılan ekipmanların özellikleri de aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1. Deney düzeneği şeması

1. Fan motoru; 3 faz, 50 Hz ve 4 kW güce sahip bir elektrik motoru
2. Fan: 90 cm çapında ve 2900 d/d aksiyal bir fanıdır.
3. Ölçüm ağı: 180x180 cm dış ölçülerinde ve iç kısmı 100 cm² alanlara bölünmüş bir ölçüm ağı oluşturulmuştur.
4. Anemometre: Bilgisayar bağlantılı rüzgar ölçüm cihazı
5. Savonius türbini: Rüzgâr tüneli fanı ile eş merkezli olarak konumlandırılmış deneylerde kullanılan Savonius çarklar
6. Froni freni: Farklı türbin konumlarında statik momenti ve farklı hızlarda dinamik momenti ölçmek için kullanılan frenleme mekanizması
7. Dinamometre: Statik ve dinamik momentleri ölçmek için kullanılır
8. Takometre: Devir sayısını ölçmek için kullanılan ölçüm aleti
9. Taşıma sehpası: Deney düzeneğini belirli bir yükseklikte tutan çelik
10. Hava kanalı: Aksiyel fanın ön kısmına yerleştirilmiş çıkışında hava düzenleyicilerin bulunduğu türbülansı azaltmak için tasarlanan kanaldır.



Şekil 5.2. Deney düzeneği

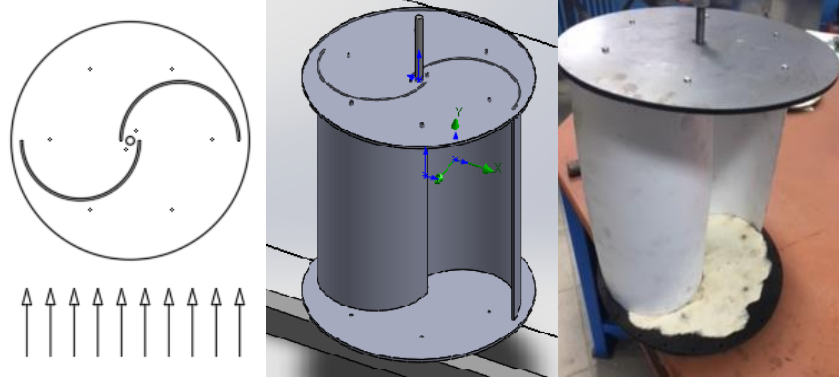
5.2.1. Kanat modellerinin tasarımı ve imalatı

Savonius türbin tasarımı yapılırken önce autocad programında çizilmiş daha sonra kontrplak ve çelik parçalar lazer CNC makinelerinde işlenmiştir. Kanatlar ise atölye ortamında kesilmiş ve şekillendirilmiştir. Belirlenen parametreler dikkate alınarak Şekil 5.3., Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te yer alan farklı modellerdeki Savonius türbinler imal edilmiştir. İmalatta alt ve üst plakalar önce 4mm kalınlığında ahşap malzemeden oluşturulmuş ve üzerine ise 1mm kalınlığında çelik malzeme ile desteklenmiştir. Kanatlarda ise 3 mm kalınlığında, yoğunluğu 0.6 g/cm^3 olan plastik malzeme kullanılmıştır. Merkezden ise sabitleme deliklerinden 12 mm kalınlığında vidalı mil geçirilmiştir. Parça kanatları alt ve üst plakalara monte edebilmek için her birinin alın kısmına 3 mm çapında demir çubuklar yapıştırılmıştır.

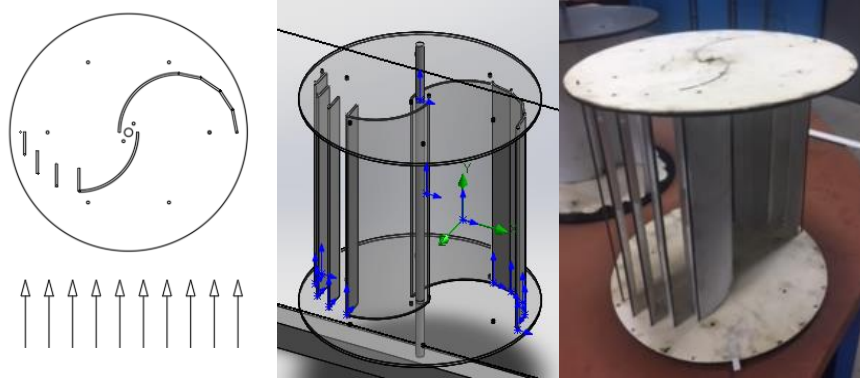
Türbin tasarım parametreleri,

- Türbin çapı, $D: 0,32 \text{ m}$
- Kanat uç plakası çapı, $D_0: 0,352 \text{ m}$
- Türbin yüksekliği, $H: 0,32 \text{ m}$
- Kayma mesafesi, $e: 0,026 \text{ m}$
- Parça kanat genişliği, $l: 0,34 \text{ m}$

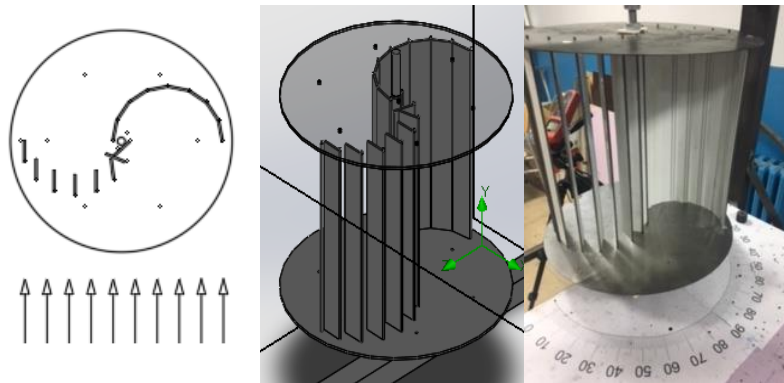
Referans alınan klasik kanatlı Savonius türbini Şekil 5.3.'te tasarlanan yarı parça kanatlı savonius türbini Şekil 5.4.'te ve parça kanatlı Savonius türbin ise Şekil 5.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Klasik savonius imalat resimleri



Şekil 5.4. Yarı parça kanatlı savonius tasarım ve imalat resimleri



Şekil 5.5. Parça kanatlı savonius tasarım ve imalat resimleri

5.2.2. Deney ölçüm mekanizmaları

Bu bölümde deney setini oluşturan bileşenler kısaca tanıtılmış ve deneylerde ölçümlere yardımcı olacak düzenekler anlatılarak, ölçüm cihazlarının tanıtımı yapılmıştır.

5.2.2.1. Rüzgâr türbininin montaj sehpası

Deneyle sırasında türbini dikey olarak tutabilecek şekilde montaj sehpası çelik profilden tasarlanmış ve imal edilmiştir. Rüzgâr türbinlerin montajının yapılabilmesi için türbin millerinin, alt ve üst kısımda oynar rulmanlar kullanılmıştır. Sehpanın üzerine türbinin konum açılarını belirleyebilmek için açıölçer monte edilmiştir. Türbin boşta dönerken rulman bağlantı civataları ve ilave ağırlıklarla balans ayarları yapılmıştır. Tespit milinin üst kısmına prony freni ve frenin koluna da dinamometre bağlanmıştır. Ayrıca titreşimi engellemek için montaj sehpasının ayaklarına ağırlık uygulanmıştır. Montaj sehpası Şekil 5.6.'da gösterilmektedir.

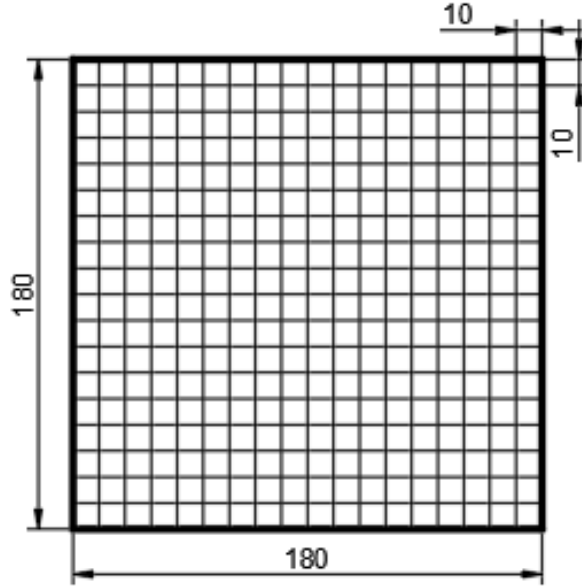


Şekil 5.6. Montaj sehpası

5.2.2.2. Rüzgâr ölçüm ağı

Rüzgâr verilerini daha net alabilmek için türbin önüne 1 m mesafe yerleştirilen ölçüm ağı 180x180 cm ebatlarında ve iç kısmı 10x10 cm olacak şekilde eşit karelere bölünerek her bir karede belirli sürelerde anemometre probu ile ölçümler alınmıştır. Bir sonraki bölümde rüzgâr ölçümlerine detaylı olarak yer verilmiştir. Bu ölçüm ağı

türbin çap ve yüksek ölçülerinin ikişer katı etrafındaki rüzgar hızlarını belirlemek için tasarlanmıştır. Ölçümlerde rüzgar yapay olarak oluşturulduğundan türbin etrafında 2 kat düşünülen kısmın 1,5 katındaki çevreden sonra rüzgar hızları sıfır değerleri ölçülmüştür. Deda, 2006 yılında yaptığı çalışmada çapı ve yüksekliği 352 mm türbin için 94x240 cm ebatlarında bir ölçüm ağı oluşturmuştur.

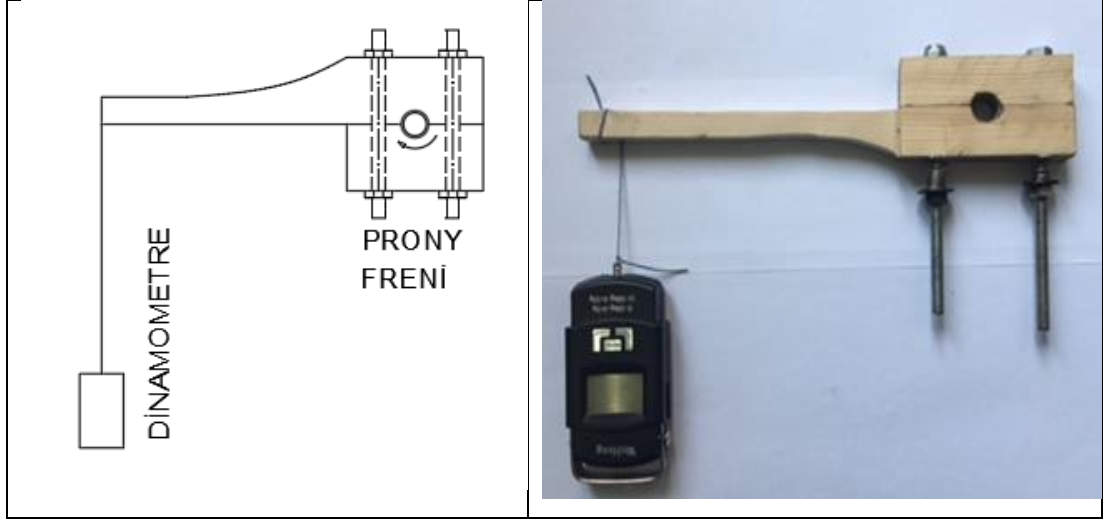


Şekil 5.7. Ölçüm ağı

5.2.2.3. Prony fren düzeneği

En eski ve basit güç ölçme cihazı olan Prony freni 100 BG ve 1000 d/d'yı geçmeyen motorlara uygulanabilir. Bu sistemde rotor milini saran frenleme şeridinin içinde frenleme pabuçları, frenleme miktarını ölçen dinamometre ve kuvvet kollarından oluşmaktadır. Rotor en yüksek devire çıkarılır. Sıkma vidaları yavaş yavaş sıkılarak rotor yüklenir. Rotorun devri düşmeden çıkabileceği en fazla yük dinamometreden okunur [31].

Bir başka kullanım ekli ise en yüksek devirde iken sıkma vidaları yavaş yavaş sıkılarak farklı devirlerdeki yük ölçülür.



Şekil 5.8. Prony fren düzeneği

Bu çalışmada farklı devir sayılarındaki yükler dinamometreden okunarak dinamik moment değerleri elde edilmiştir. Çalışmamızda Şekil 5.8.'de görüldüğü gibi Prony freni yapımında ahşap bloklar kullanılmış ve yük kolu üzerine merkezden 0.23 metre mesafeye dinamometre bağlanmıştır.

5.2.3. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının tanıtımı

5.2.3.1. Anemometre

Rüzgâr hızını ölçmek için unit marka UT362 hava akımı ölçer kullanılmıştır. Bu cihaz 2-10 m/s rüzgâr hızında %3-5 ve 10-30 m/s hızları arasında ise %3-8 hassasiyetinde ölçüm yapabilmektedir. Ayrıca arayüz kablosu ve bilgisayar yazılımı ile belirli sürelerde (1 salise ve üzeri aralıklarda) kayıt yapılabilmektedir.



Şekil 5.9. Anemometre

5.2.3.2. Takometre

Türbin kanat ucundaki devir sayısını elde etmek için kullanılmaktadır. Bu cihaz 10-99 RPM arasında %0,03 daha yüksek ölçümlerde ise %0,04 toleransla ölçüm yapabilmektedir. 50-200 mm mesafeden temassız ölçüm yapabilen bu cihaz USB bağlantısı ve arayüz yazılımı sayesinde bilgisayarda kayıt tutulabilmektedir.



Şekil 5.10.Takometre

5.2.3.3. Dinamometre

Bu çalışmada iki farklı hassasiyette sahip dinamometreler kullanılmıştır. Birincisi 0-10kg arası 5gr hassasiyette olup en çok 50 kg ölçüm yapabilirken diğeri 0,1 gr hassasiyetli olup, en çok 2 kg ölçebilmektedir.



Şekil 5.11.Dinamometreler

BÖLÜM 6. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde öncelikle deneylerin yapılışı ve sonrasında yapay rüzgâr ölçümleri, hareketsiz ve hareketli türbin durumlarına göre yapılan ölçüm ve sonuçları anlatılacaktır.

Yapay rüzgâr ölçümleri yapılırken aksiyal fandan çıkan hava hızını ölçmek için yapılan ölçüm ağı üzerinden veriler alınmıştır. Veriler alınırken ölçüm ağının 324 farklı noktasında 30'ar saniye, 60'ar saniye ve 180'er saniye beklenecek veriler bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Daha sonra bu değerler ağ üzerine Şekil 6.1., Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.'te olduğu gibi yerleştirilmiştir. Değerlerin ortalaması alınarak deneylerde ve hesaplamalarda kullanılacak rüzgâr hızı elde edilmiştir.

Hareketsiz türbin durumlarında yapılan deneylerde, klasik kanatlı, yarı parça kanatlı ve parça kanatlı olmak üzere üç modelin statik moment değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler yapılırken türbinlerin konumları açıölçerden ayarlanarak Prony ferininin koluna bağlanmış olan dinamometre yardımıyla yapılmıştır. Rüzgâr hızının kararlı hale gelmesinden sonra dinamometreden ölçülen kütle, statik moment değerine çevrilmiştir.

Hareketli türbin konumlarında yapılan deneylerde üç farklı model, öncelikle serbest şekilde dönerken devir sayıları ölçülmüştür. Daha sonra Prony freni yardımıyla kademeli olarak yavaşlatılarak devir sayısı ve dinamometreden uygulanan direnç ölçülmüştür. Dinamometredeki kütle ilgili hesaplamalarla dinamik moment değerine çevrilmiştir.

6.1. Rüzgar Ölçümleri

Deney ve ölçümlerin tamamı laboratuvarında 20 °C sıcaklık ve atmosfer basıncı olan ortam şartlarında yapılmıştır. Rüzgâr ölçümlerine başlamadan önce fan çalıştırılarak oluşan hava hızının kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Rüzgâr ölçümleri yapılırken türbinin 1m, fan çıkışının ise 2 m önüne yerleştirilen rüzgâr ölçüm ağı üzerinden veriler alınmıştır. Bu verileri her bir bölge için 30 s, 60 s ve 180 s beklenilerek elde edilmiştir. Aşağıdaki tablolarda; hücreler rüzgâr ölçüm ağını, orta kısımda arka planı koyu renk olan bölge rüzgâr türbininin olduğu yeri ve ortadaki kalın olarak belirtilmiş çizgi ise türbin milinin yerini göstermektedir.

Tablo 6.1. Rüzgâr hızı ölçümü (30 s)

	A	B	C	D	E	F	G	H	İ	J	K	L	M	N	O	P	R	S
1																		
2																		
3																		
4						1,2	2,85	3,99	2,82	2,53	2,39	1,9						
5					1,3	3,08	4,16	6,2	5,22	4,69	4,28	3,56	2,34	1,28				
6					1,12	3,38	5,17	7,41	7,85	6,59	5,56	4,03	2,74	1,06				
7					2,18	4,54	5,91	7,38	7,96	7,36	5,74	3,95	3,31	1,46				
8				1,07	3,05	5,22	7,2	7,15	6,74	5,92	5,62	4,25	3,72	2,72	1,05			
9				1,15	2,82	5,52	7,39	7,71	6,73	6,19	5,67	5,53	4,92	3,47	1,86	1,3		
10				1,1	1,95	4,39	6,4	7,19	6,89	6,04	5,96	5,34	5,59	5,23	2,66	1,19		
11					1,52	3,14	5,46	7,08	7,13	7,5	7,35	6,8	6,21	5,2	3,97	1,55		
12						1,93	4,49	5,84	7,06	7,23	7,64	6,7	5,3	3,84	2,56	1,08		
13						1,19	3,45	4,4	5,37	6,42	5,85	4,45	3,6	1,49	1,23			
14							1,06	1,72	3,35	3,24	3,01	2,02	1,16					
15								1,1	1,08	1,17	1,26	1,04						
16																		
17																		
18																		

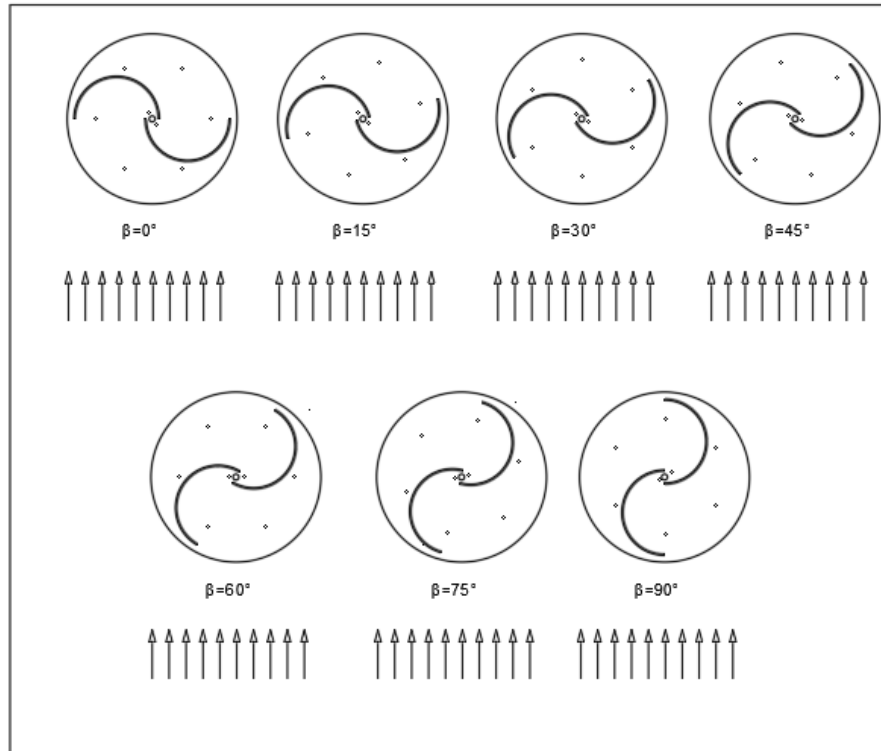
Tablo 6.1.' de yapılan ölçümlerde elde edilen veriler her bir hücrede 30'ar saniye beklenmiştir. Değer olmayan hücrelerde herhangi bir veri okunmamıştır. Mevcut verilerin ortalaması alındığında ortalama rüzgâr hızı (V_{ort}) değeri 4,845 m/s olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.3.'de yapılan ölçümlerde elde edilen veriler her bir hücrede 180'er saniye beklenmiştir. Değer olmayan hücrelerde herhangi bir veri okunmamıştır. Mevcut verilerin ortalaması alındığında ortalama rüzgâr hızı (V_{ort}) değeri 4,605 m/s olarak belirlenmiştir.

Rüzgâr hızı ölçümleri birçok kez tekrarlanmıştır. En uzun bekleme süresi olan ortalama rüzgâr hızı olan 4,605 m/s değeri hesaplamalarda ve sayısal çözümleme programında kullanılmıştır.

6.2. Hareketsiz Türbin Durumda Yapılan Deneyler

Rüzgâr türbininin farklı konumlarındaki statik moment değerlerini belirleyebilmek amacıyla deney seti türbinin ön kısmında açıölçer kullanılmıştır. Prony freni vasıtası ile durdurulan türbinin konumu ayarlanmış bir süre sonra dinamometrede okunan değer kaydedilmiştir. Rüzgarın geliş yönüne göre türbin konumları Şekil 6.1.'de β açısı ile gösterilmektedir. türbin konumları deneyler sırasında 0° konumundan 90° 'ye kadar 15° aralıklarla değiştirilerek statik moment değerleri alınmıştır.



Şekil 6.1. Türbin konumları

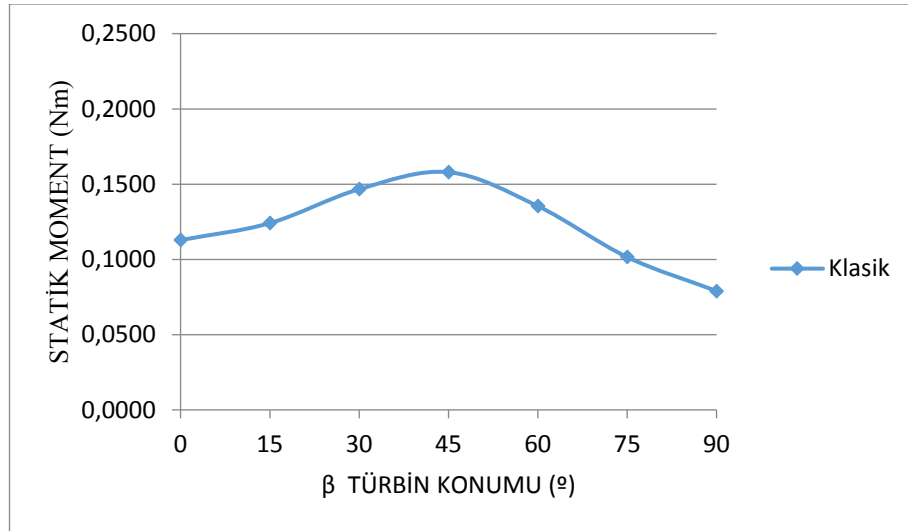
6.2.1. Klasik savonius türbinin statik moment değerleri

Statik moment değerleri bulunurken dinamometrede okunan değer, yer çekimi ivmesi ve kuvvet kolu olarak Prony freninin kolu uzunluğu (0.23 m) değerleri çarpımı ile bulunmuştur.

$$M_s = m \cdot g \cdot L \quad (\text{Nm}) \quad (6.1)$$

Denklem 6.1'de M_s , statik moment hesaplanırken farklı türbin konumları için, dinamometreden okunan m kütle (kg), g , yerçekimi ivmesi (9.81m/s^2) ve L , Prony frenin kol uzunluğu (0.23m) değerlerinden yararlanılmıştır.

Klasik kanatlı Savonius türbini statik moment değerleri türbin konumlarına göre incelendiğinde Şekil 6.2.'de en yüksek değer olarak 45° olan konumda 0.1918 Nm olarak hesaplanmıştır.

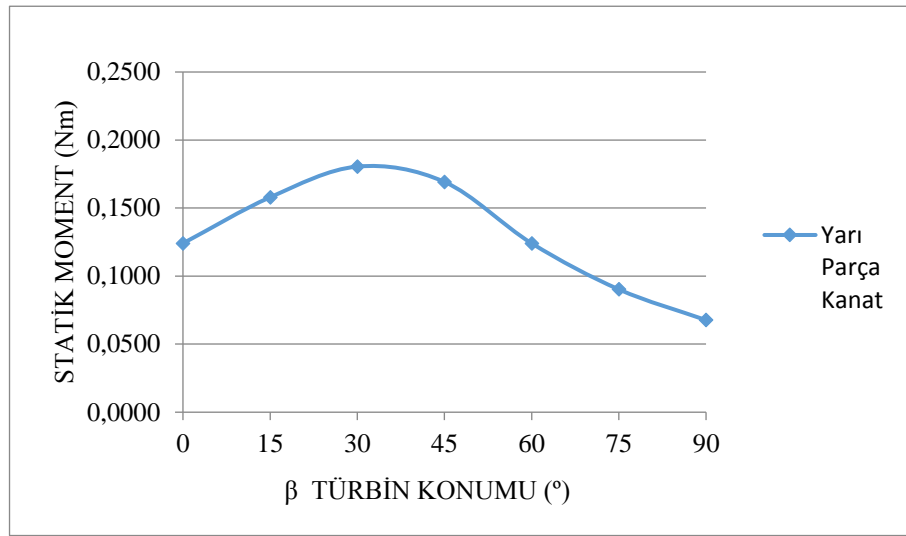


Şekil 6.2. Klasik kanatlı savonius türbini, statik momentin türbin konumlarına göre değişimi

Deneyleerde bulunan veriler grafik üzerine aktarıldığında Şekil 6.2.'deki eğri incelendiğinde statik moment değeri, 0° 'den 45° 'ye doğru artmakta ve daha sonra düşerken 90° en düşük değer elde edilmektedir. Bu durum Savonis türbininin 45° 'ye kadar iç bükey kanadın daha yüksek bir kuvvete maruz kaldığını 45° 'den sonra dış bükey yüzeylerin ve ters dirençlerin arttığını göstermektedir.

6.2.2. Yarı parça kanatlı savonius türbin statik moment değerleri

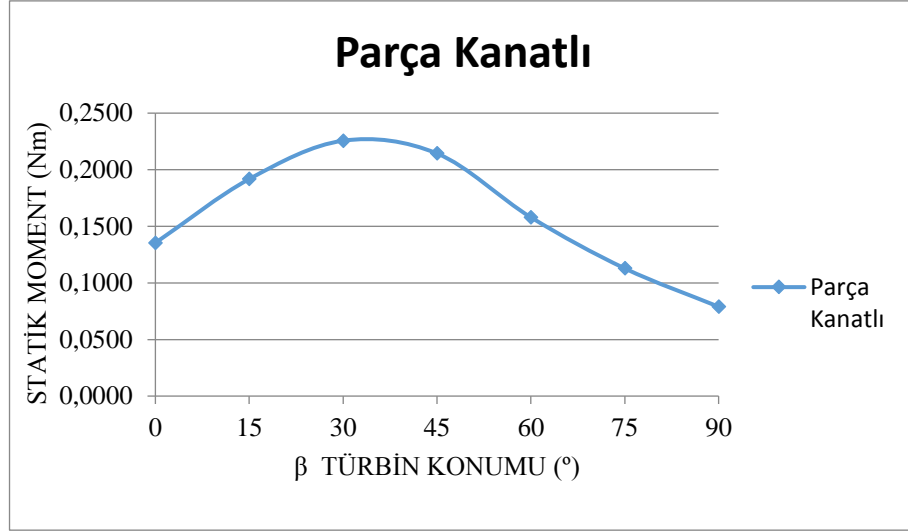
Yarı parça kanatlı savonius türbini deney sonuçları, türbin konumlarına göre statik moment değerleri Şekil 6.3.'te gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde statik momentin en yüksek olduğu değeri 30° konumunda görülmektedir. Burada klasik kanat tasarımına göre 15° daha küçük açıda en yüksek moment değerini görülmesi iç bükey kısmın uçundaki parça kanatların kapanarak negatif bir direnç oluşturmasından kaynaklıdır.



Şekil 6.3. Yarı parça kanatlı savonius türbininde, statik momentin türbin konumlarına göre değişimi

6.2.3. Parça kanatlı savonius türbin statik moment değerleri

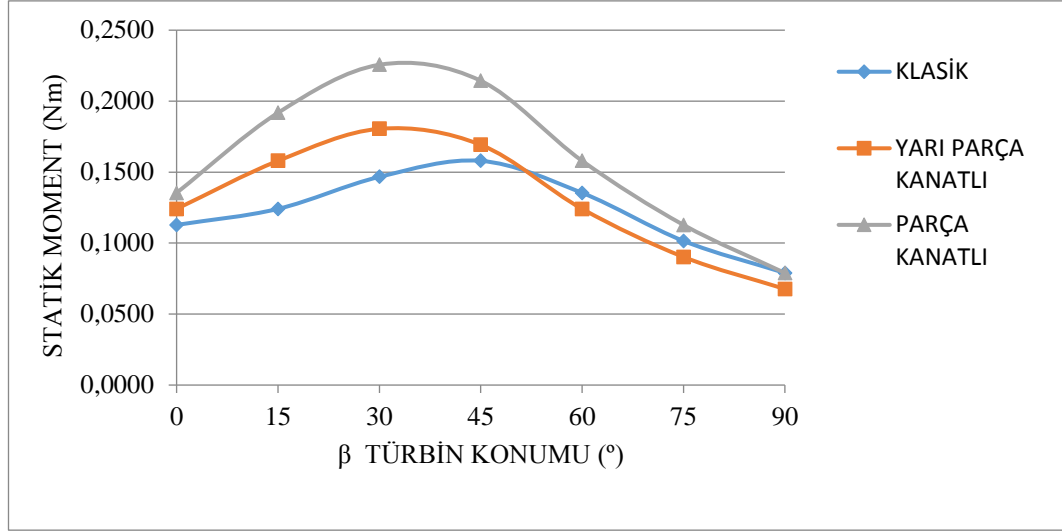
Parça kanatlı Savonius türbinde dış bükey kanat tarafı dönme için iç bükey tarafa ters direnç oluşturmadığından statik moment değerleri klasik ve yarı parça kanatlı modelden daha yüksek çıkmıştır. Şekil 6.4. incelendiğinde en yüksek statik moment 30° türbin konumunda ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.4. Parça kanatlı savonius türbininde statik momentin türbin konumlarına göre değişimi

6.3. Hareketsiz Türbin Durumundaki Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Rüzgar türbinlerinde aynı rüzgar hızında statik moment değerlerinin yüksek olması o türbinin düşük rüzgar hızlarında ilk kalkış hareketin gerçekleşeceğini göstermektedir. Şekil 6.5.'te klasik, yarı parça ve parça kanatlı Savonius rüzgâr türbinlerinin statik momentleri karşılaştırıldığında, en yüksek değer parça kanatlı modelin 30° türbin konumunda belirlenmiştir. Yarı parça kanatlı modelde 45°'den sonraki statik moment değerleri klasik kanatlı modelin de altında kalmıştır. Bu durum yarı bütün kanattan sonra parça kanatların açılarak dönme için pozitif direncin azaldığını göstermektedir. Statik moment değerleri 30° türbin konumu dikkate alındığında, klasik kanatlı modele göre, yarı parça kanatlı modelde % 7 ve parça kanatlı modelde ise % 33 artış olduğu gözlemlenmiştir. Tüm türbin konumlarındaki statik moment değerlerinin ortalaması alındığında ise, yarı parça kanatlı modelde %10 azalma, parça kanatlı modelde ise %10 artış olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.5. Kanat modellerinin türbin konumuna göre statik moment değişimi

6.4. Hareketli Türbin Durumda Yapılan Deneyler

Hareketli türbin durumları için deneyler yapılırken türbin, montaj sehpasına yerleştirilip balans ayarı yapıldıktan sonra serbest olarak dönerken takometreden devir sayısı bilgisayara kaydedilmiştir. Daha sonra Prony freni yardımıyla yük uygulanarak devir sayıları kademeli olarak düşürülerek uygulanan yükler kaydedilmiştir. Bu sayede hangi yük uygulandığında devir sayısının ne olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler yardımıyla açısal hız, dinamik moment, faydalı güç, güç katsayısı ve uç hız oranı hesaplamaları yapılmıştır. Rüzgâr gücü, ortalama rüzgâr hızı 4,605 m/s alınarak ilgili denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Açısal hız;

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (\text{rad/s}) \quad (6.2)$$

Denklem 6.2.'de ω ,açısal hızı, Savonius türbinin alt plakasının uç kısmından takometre yardımıyla ölçülen n ,devir sayısı (d/d) ile bulunmaktadır.

Dinamik moment;

$$M_d = m \cdot g \cdot L \quad (6.3)$$

Denklem 6.3.'te M_d , dinamik moment değeri hesaplanırken farklı devir sayılarında uygulanan yük dinamometreden okunan m , kütle (kg), g , yerçekimi ivmesi (9.81m/s^2) ve L , Prony frenin kol uzunluğu (0.23m) değerlerinden yararlanılmıştır.

Faydalı güç;

$$P_f = M_d \cdot \omega \quad (6.4)$$

Denklem 6.4.'te Savonius türbinden elde edilen P_f , faydalı güç hesaplanırken dinamik moment ile açısal hızdan yararlanılmaktadır.

Rüzgâr gücü;

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_r^3 \quad (6.5)$$

Denklem 6.5.'te P_r , rüzgâr gücü hesaplamasında, rüzgâr ölçüm deneylerinde ortalama rüzgâr hızı 4,605 m/s alınmış, A , rüzgârı dik karşılayan alan ($0,1024\text{m}^2$) olarak alınmıştır. Burada rüzgâr gücü değeri 6,19 W olarak hesaplanmış ve tüm hesaplamalarda kullanılmıştır.

Güç katsayısı;

$$C_p = \frac{P_f}{P_r} \quad (6.6)$$

Denklem 6.6.'da güç katsayısı olarak nitelendirilen C_p değeri boyutsuz bir sayı olup faydalı gücün rüzgâr hızına oranı ile bulunmaktadır.

Uç hız oranı;

$$\lambda = \frac{\omega \cdot (D/2)}{V_r} \quad (6.7)$$

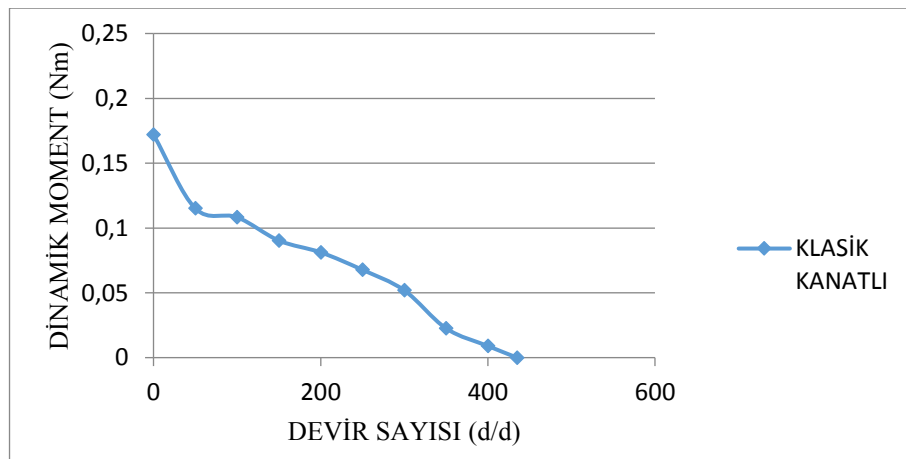
Kanat uç hız oranı denklem 6.7.'de λ olarak nitelendirilmiş ve açısal hızın rüzgâr hızına oranı ile elde edilmektedir.

6.4.1. Hareketli klasik kanatlı savonius türbini deney verileri

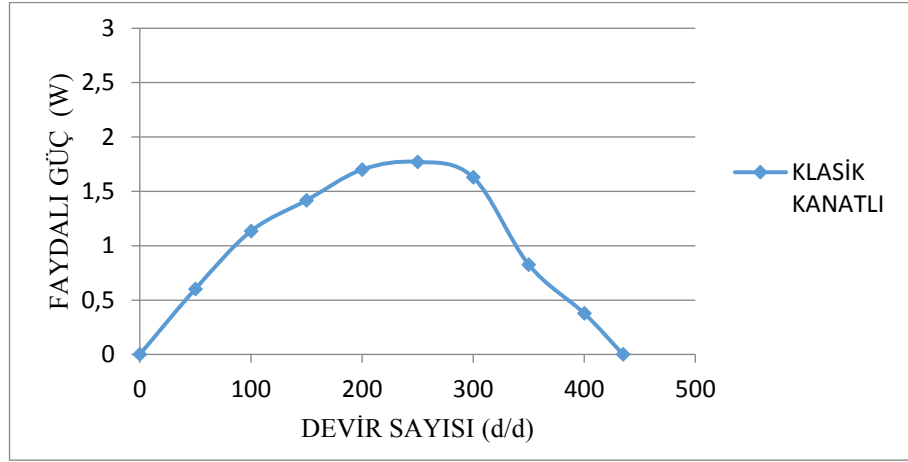
Klasik kanatlı Savonius türbini için yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda bulunan değerler Tablo 6.4.'de gösterilmiştir. Burada devir sayısı ve yük ölçülen değerler olup, dinamik moment, faydalı güç, güç katsayısı ve kanat uç hız oranı hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Tablo 6.4.'de yer alan değerler yardımıyla klasik kanatlı Savonius türbini için Şekil 6.6.'da dinamik momentin devir sayısına göre değişimi, Şekil 6.7.'de faydalı gücün devir sayısına göre değişimi ve Şekil 6.8.'de ise güç katsayısının kanat uç hız oranına göre değişimi verilmiştir.

Tablo 6.4. Klasik kanatlı savonius türbininin hareketli durumdaki değerleri

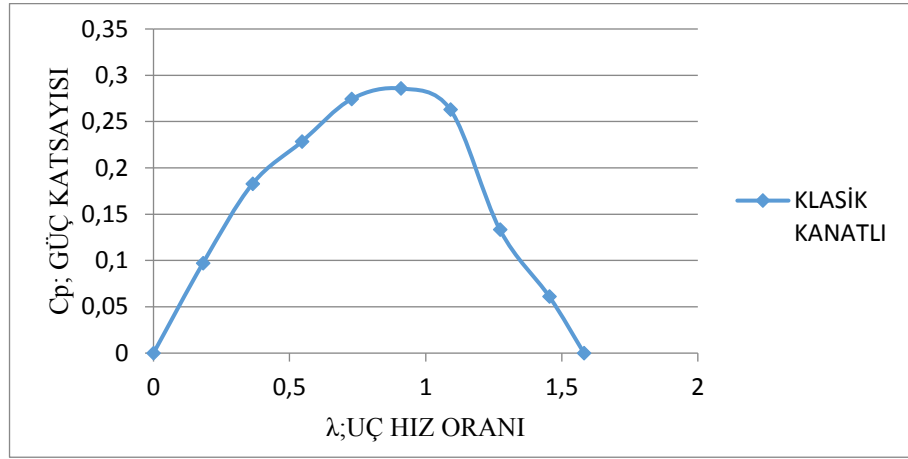
DEVİR SAYISI n (dv/dk)	AÇISAL HIZ ω (rad/s)	DİNAMİK MOMENT M_d (Nm)	FAYDALI GÜÇ P_f (W)	GÜÇ KATSAYI C_p	UÇ HIZ ORANI $\lambda=U/V_r$
435	45,53	0	0	0	1,5819
400	41,87	0,0090	0,3779	0,0609	1,4547
350	36,63	0,0226	0,8266	0,1333	1,2728
300	31,40	0,0519	1,6295	0,2628	1,0910
250	26,17	0,0677	1,7712	0,2857	0,9092
200	20,93	0,0812	1,7003	0,2743	0,7273
150	15,70	0,0903	1,4170	0,2285	0,5455
100	10,47	0,1083	1,1336	0,1828	0,3637
50	5,23	0,1151	0,6022	0,0971	0,1818



Şekil 6.6. Klasik kanatlı savonius türbini $M=f(n)$ değişimi



Şekil 6.7. Klasik kanatlı savonius $P=f(n)$ değişimi



Şekil 6.8. Klasik savonius türbin $C_p=f(\lambda)$ değişimi

Klasik kanatlı Savonius türbini için deneylerde elde edilen sonuçlar neticesinde en yüksek dinamik moment değeri 0,11 Nm ile en düşük devirde elde edilmiştir. Devir sayısına göre faydalı güç değerlerin en yüksek değer 1,77W ile 250 d/d devirinde sağlanmıştır. Tüm rüzgâr türbinlerinde en önemli veri olarak bakılan güç katsayısının en yüksek değeri 0,28 ile 0,90 olan kanat uç hız oranında elde edilmiştir. Bu veriler çalışmaya temel oluşturduğundan çok önemlidir. Bu veriler ile yeni oluşturulan modeller sonraki bölümlerde karşılaştırılacaktır.

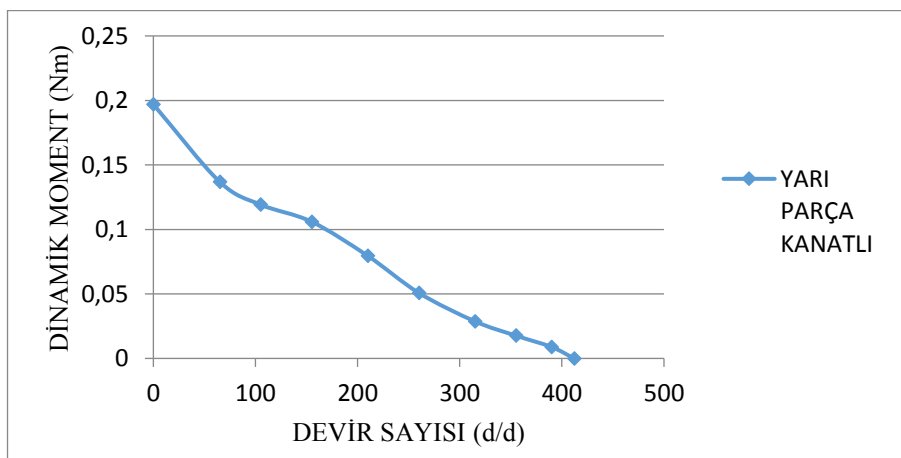
6.4.2. Yarı parça kanatlı savonius türbininin deney verileri

Yarı parça kanatlı Savonius türbini için yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda bulunan değerler Tablo 6.5.'de gösterilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan ortalama rüzgar hızı 4,605m/s olup rüzgar gücü 6,19 W olarak hesaplanmıştır.

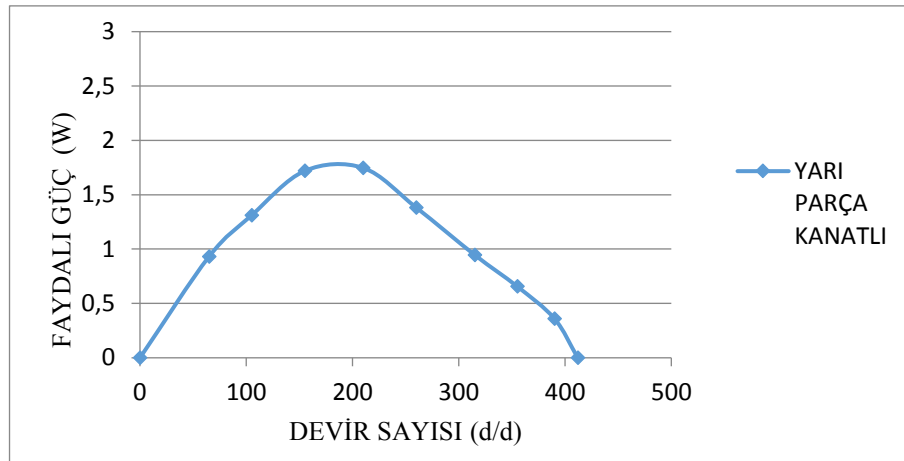
Tablo 6.5. Yarı parça kanatlı savonius türbininin hareketli durumundaki değerleri

DEVİR SAYISI	AÇISAL HIZ	DİNAMİK MOMENT	FAYDALI GÜÇ	GÜÇ KATSAY	UÇ HIZ ORANI
n (d/d)	ω (rad/s)	M_d (Nm)	P_f (W)	C_p	$\lambda=U/V_r$
412	43,122	0	0	0	1,4982903
390	40,820	0,0088	0,3603998	0,0581305	1,4183
355	37,157	0,0177	0,6561124	0,1058273	1,2910
315	32,970	0,0287	0,9460494	0,1525925	1,1455
260	27,213	0,0508	1,3815325	0,2228335	0,9455
210	21,980	0,0795	1,7465528	0,2817093	0,7637
155	16,223	0,1059	1,7188297	0,2772377	0,5637
105	10,990	0,1192	1,3099146	0,211282	0,3818
65	6,803	0,1368	0,9310328	0,1501704	0,2364
0	0	0,1969	0	0	0

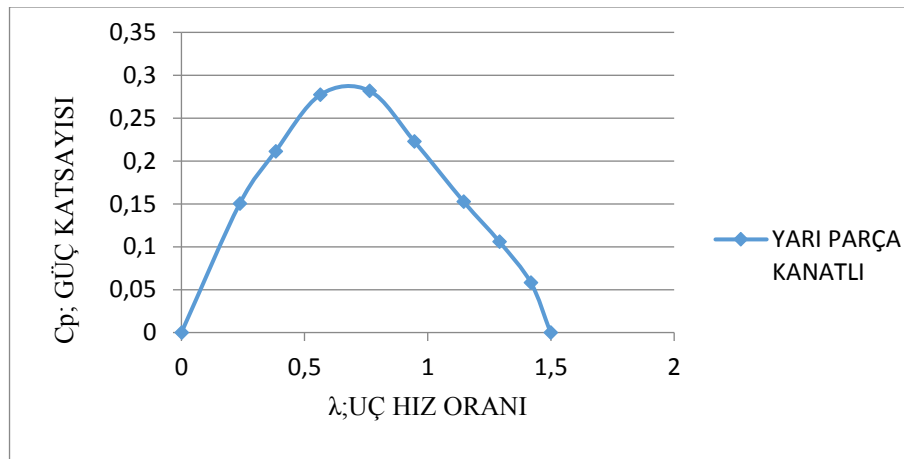
Tablo 6.5.'de yer alan değerler yardımıyla yarı parça kanatlı Savonius türbini için Şekil 6.5.'de dinamik momentin devir sayısına göre değişimi, Şekil 6.10.'da faydalı gücün devir sayısına göre değişimi ve Şekil 6.11.'de güç katsayısının kanat uç hız oranına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Yarı parça kanatlı savonius M=f(n) değişimi



Şekil 6.10. Yarı parça kanatlı savonius $P=f(n)$ değişimi



Şekil 6.11. Yarı parça kanatlı savonius türbini $C_p=f(\lambda)$ değişimi

Yarı parça kanatlı Savonius türbini deneylerinde en yüksek dinamik moment değeri 0,13 Nm ile en düşük devirdedir. En yüksek faydalı güç değeri 1,74 W ile 210 d/d devrindedir. Kanat uç hız oranına göre güç katsayısı eğrisi çizildiğinde ise 0,28 olan en yüksek güç katsayısı değeri 0,76 uç hız oranında sağlanmıştır.

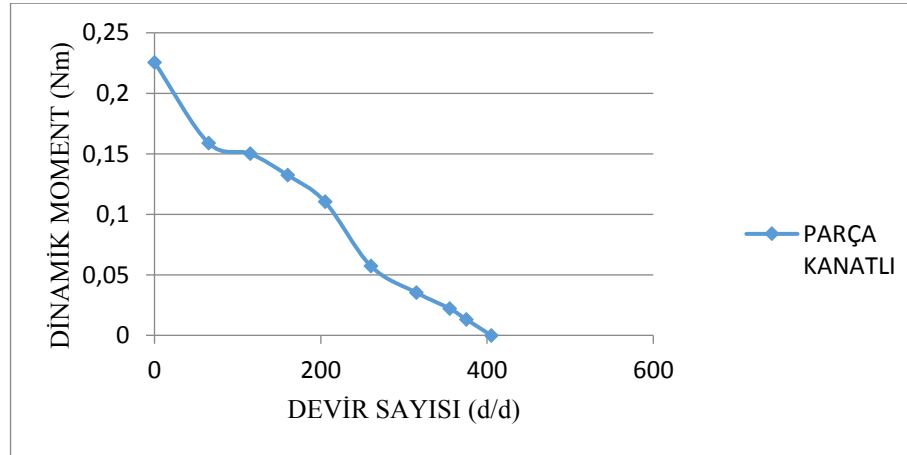
6.4.3. Parça kanatlı savonius türbinde deney verileri

Parça kanatlı Savonius türbini için yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda bulunan değerler Tablo 6.6.'da gösterilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan ortalama rüzgar hızı 4,605 m/s olup rüzgar gücü 6,19 W olarak alınmıştır. Tablo 6.6.'da yer alan değerler yardımıyla yarı parça kanatlı Savonius türbini için Şekil 6.12.'de dinamik

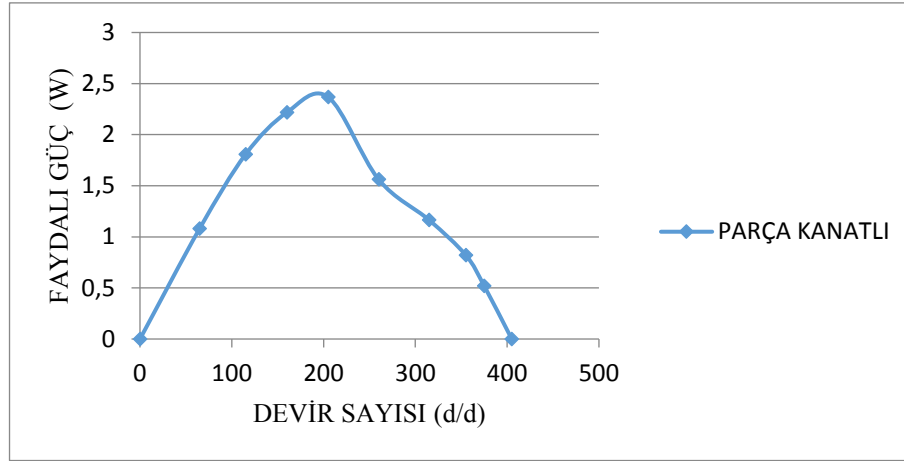
momentin devir sayısına göre değişimi, Şekil 6.13.'de faydalı gücün devir sayısına göre değişimi ve Şekil 6.14.'te gücü katsayısının kanat uç hız oranına göre değişimi gösterilmiştir.

Tablo 6.6. Parça kanatlı Savonius türbini hareketli durumundaki değerleri

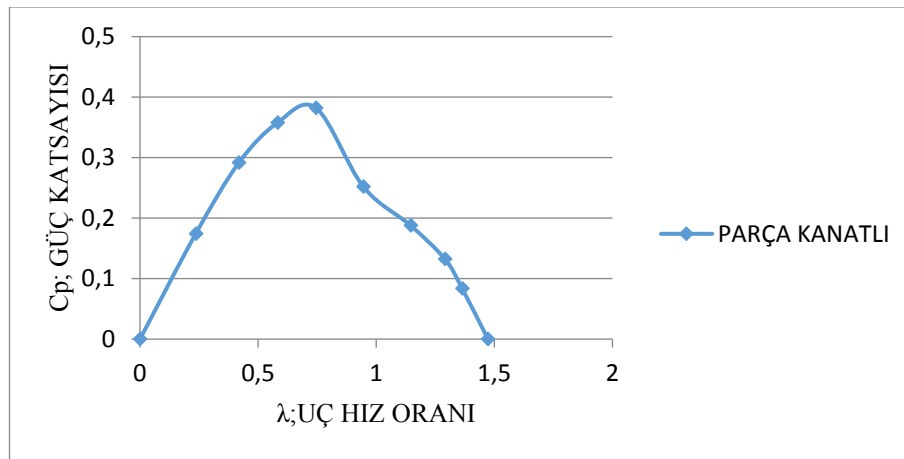
DEVİR SAYISI n (dv/dk)	AÇISAL HIZ ω (rad/s)	DİNAMİK MOMENT M_d (Nm)	FAYDALI GÜCÜ P_f (W)	GÜCÜ KATSAY C_p	U HIZ ORANI $\lambda=U/V_r$
405	42,3900	0	0	0	1,4728
375	39,2500	0,0132	0,5198	0,0838	1,3637
355	37,1567	0,0221	0,8201	0,1323	1,2910
315	32,9700	0,0353	1,1644	0,1878	1,1455
260	27,2133	0,0574	1,5617	0,2519	0,9455
205	21,4567	0,1104	2,3680	0,3819	0,7455
160	16,7467	0,1324	2,2178	0,3577	0,5819
115	12,0367	0,1501	1,8066	0,2914	0,4182
65	6,8033	0,1589	1,0812	0,1744	0,2364



Şekil 6.12. Parça kanatlı savonius $M=f(n)$ değişimi



Şekil 6.13. Parça kanatlı savonius $P=f(n)$ değişimi



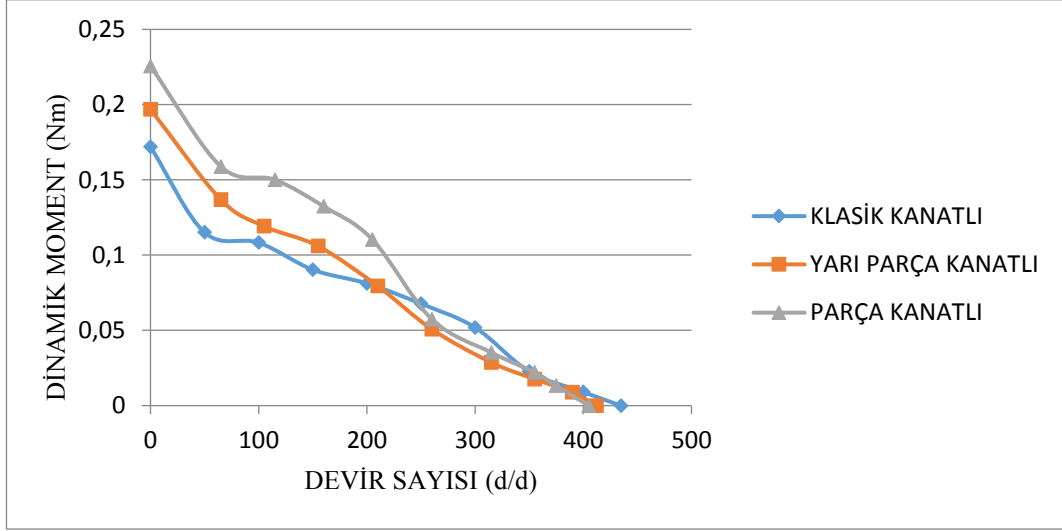
Şekil 6.14. Parça kanatlı savonius türbini $C_p=f(\lambda)$ değişimi

Parça kanatlı Savonius türbininin hareketli durumlar için yapılan deneylerde devir sayısına göre dinamik moment değeri en yüksek olarak 65 d/d değerinde 0,16 Nm olarak bulunmuştur. Devir sayısına göre faydalı güce bakıldığında 2,37W değeri 205d/d'da sağlanmıştır. En önemli parametre olan güç katsayısı 0,38 ile 0,79 uç hız oranında sağlanmıştır.

6.4.4. Hareketli türbin durumunda moment, güç ve güç katsayılarının karşılaştırılması

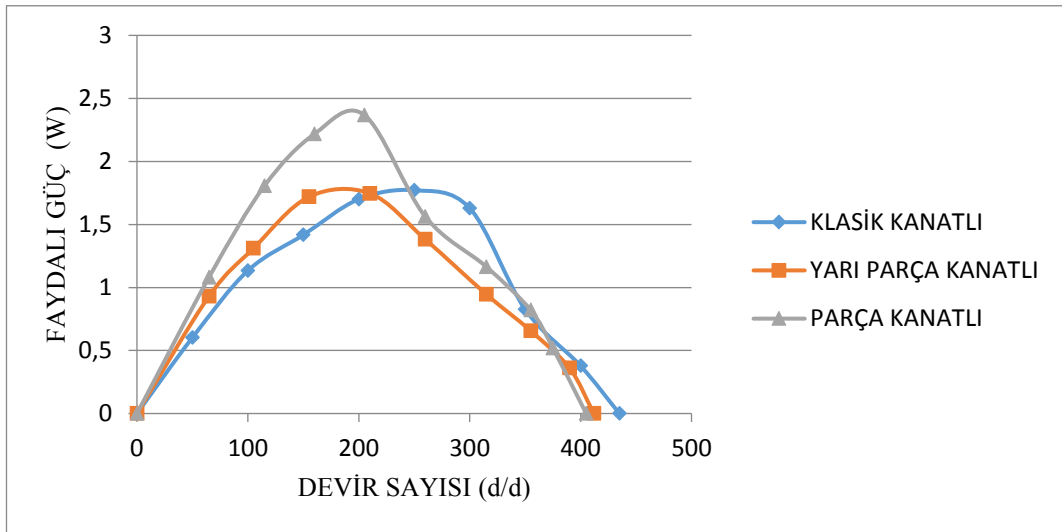
Üç kanat modelinin de dinamik momentleri Şekil 6.15'de karşılaştırıldığında düşük devirlerde en iyi performansı parça kanatlı model gösterilirken, devir yükseldikçe

klasik kanatlı tasarım, dinamik moment açısından daha iyi performans sağlamaktadır. Bu da yüksek kalkış momenti gerektiğinde parça kanatlı modelin daha avantajlı olduğunu göstermektedir.



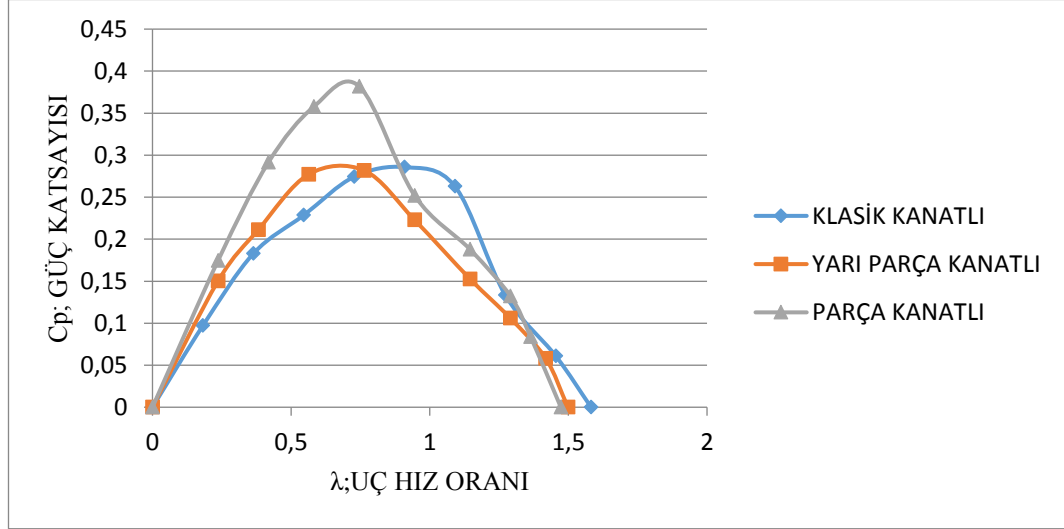
Şekil 6.15. Savonius türbinlerinin moment değişimi

Kanat modellerinin devir sayısına göre faydalı güç değerleri Şekil 6.16.'da karşılaştırıldığında düşük devirlerde parça kanatlı modelin daha iyi sonuç verdiği, yüksek devirlerde ise klasik kanadın daha iyi performans sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.16. Savonius türbinlerinin faydalı güç değişimi

Kanat modelleri güç katsayıları Şekil 6.17’de karşılaştırıldığında klasik kanat ile yarı parça kanatlı tasarımların, en yüksek olarak 0,28 olan güç sayısına ulaşıldığı görülmüştür. Parça kanatlı tasarımda ise en yüksek güç katsayısı 0,38 elde edilmiştir. Bu, güç katsayısında yaklaşık %40 artış sağlandığını göstermektedir.



Şekil 6.17. Savonius türbinlerinin güç katsayısı değişimi

BÖLÜM 7. SAYISAL YÖNTEM VE BULGULARI

Solidworks akış simülasyonu 2013 yılından sonra akış analizi eklenti paketi olarak oluşturulan akışkanların hareketini düzenleyen tam Navier-Stokes denklemlerine göre çözümler elde etmek amacıyla kullanılan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programıdır. Navier-Stokes denklemi, akışkana hareketine ait Newton'un ikinci yasasının (momentum korunumu) bir akışkan parçacığı dikkate alınarak ve Newton tipi akışkanlar için viskoz gerilme tensörü yerine gerilme ile şekil değiştirme arasındaki bünye denklemi yazılarak elde edilmiş biçimindedir. Bu yüzden Navier-Stokes denklemi, basitçe Newton tipi akışkanlar için yazılmış Newton'un ikinci yasasıdır. Bu programda kullanılan denklemler aşağıda kısaca verilmeye çalışılmıştır [32].

Sıkıştırılamaz süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (7.1)$$

Sıkıştırılamaz Navier-Stokes denklemi;

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (7.2)$$

Sıkıştırılamaz süreklilik denklemi ve sıkıştırılamaz Navier-Stokes denklemi kartezyen koordinatlarda (x,y,z) ve (u,v,w) cinsinden açıklanabilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7.3)$$

Sıkıştırılamaz Navier-Stokes denkleminin x bileşeni;

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (7.4)$$

Sıkıştırılamaz Navier-Stokes denkleminin y bileşeni;

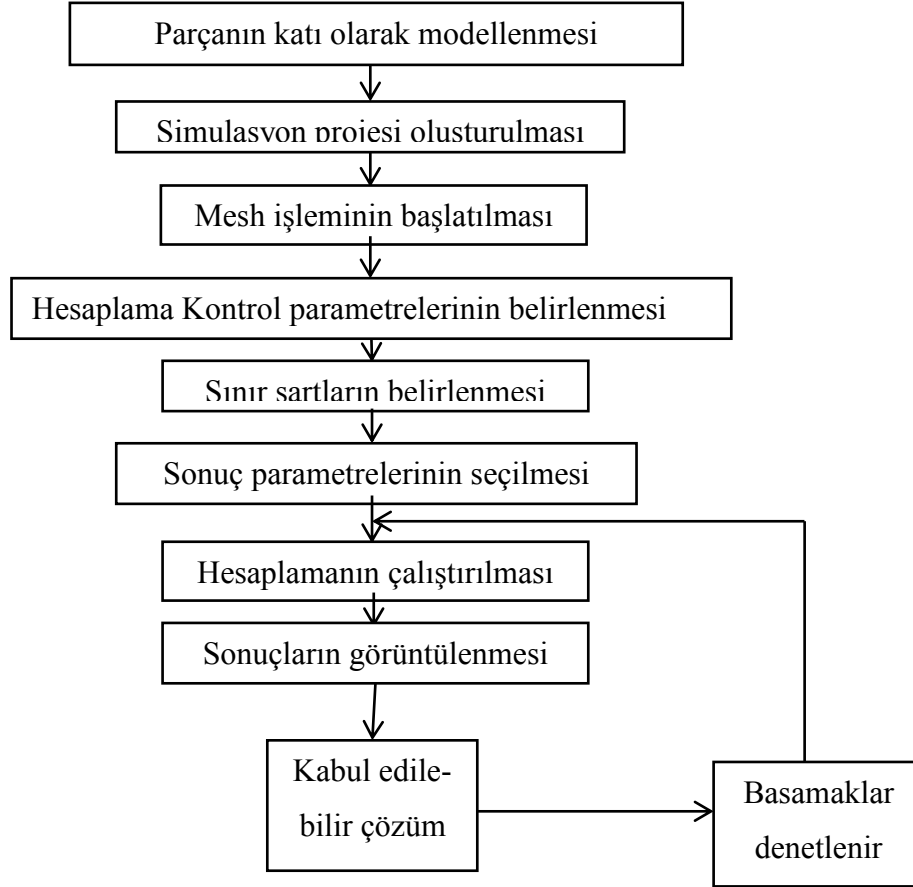
$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (7.5)$$

Sıkıştırılmaz Navier-Stokes denkleminin y bileşeni;

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (7.6)$$

Navier-Stokes denklemi akışkanlar mekaniğinin en önemli denklemleri arasındadır. Her ne kadar akışı tarif eden diferansiyel denklemlere (süreklilik ve Navier-Stokes) sahip olsak da bunları çözmek ayrı bir meseledir. Bazı basit geometrilere, denklemler analitik olarak çözülebileceğimiz hale getirilebilir. Daha karmaşık geometriler için; doğrusal olmayan, birbirine bağlı, ikinci dereceden kısmi diferansiyel denklemler söz konusudur. Bu durumda ya yaklaşık çözümlere ya da sayısal çözümlere (bilgisayar yardımıyla) başvurulması gerekmektedir [32]. Bu yaklaşımdan yararlanılarak çalışmada sayısal çözümlere olarak Solid Works Flow Simulatöründen yararlanılmıştır.

Solidworks akış simülöründe analiz için işlem basamakları şeması Şekil 7.1.'de modelin katı olarak çizilmesi ile başlamaktadır. Daha sonra Solid Works Flow Simulatöründe yeni bir proje açılır. Proje açıldıktan sonra hesaplamalardaki temel kontrol parametreler girili ve sınır şartları belirlenir. Sonuç kısmında görmek istediğimiz parametreler ayarlandıktan sonra hesaplama çalıştırılır. Simülörün hesapladığı değerler kabul edilebilirse rapor alınabilir. Eğer bulunan sonuçlar kabuledilebilir değil ise mesh sıklığı ve parametreler kontrol edilerek işlem tekrarlanır.



Şekil 7.1. Solidworks akış simülasyonu çözümü için işlem basamakları

7.1. Hareketsiz Türbin Durumlarında Sayısal Çözümlemede Elde Edilen Sonuçlar

Solid Works Flow Simulatöründe akış analizi için giriş parametreleri normal şartlar altında, adyabatik, dış akış, hava hızı ölçüm ağındaki ortalama rüzgâr hızı olan 4,605 m/s ve üç boyutlu olarak belirlenmiştir. Sonuç parametreleri olarak tüm model için güç ve y doğrulturundaki tork değerlerinin gösterilmesi seçilmiştir.

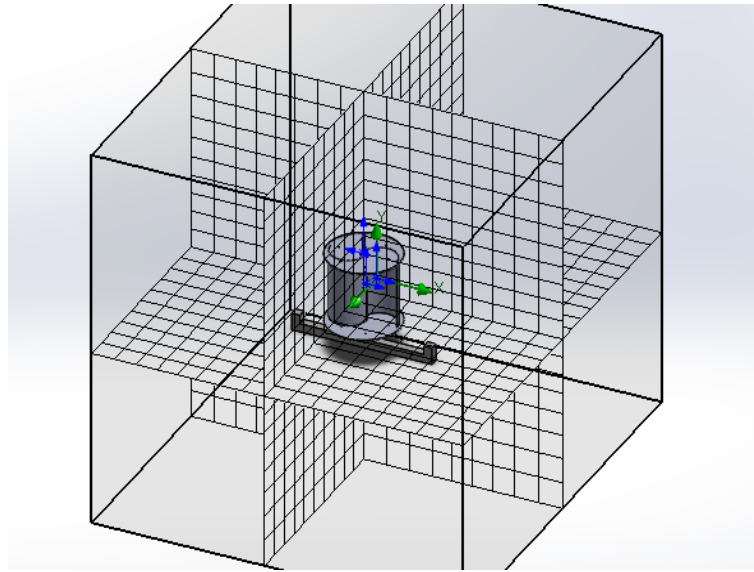
7.1.1. Klasik savonius sayısal çözümleme sonuçları

Klasik savonius türbini için akış analizinde türbin konumları 15°'lik farklarla tekrarlanarak yapılmış ve sonuç verileri elde edilmiştir. Tablo 7.1'de en yüksek statik moment değeri 45° türbin konumu için 0,2261 Nm olduğu görülmektedir. Ağ örüntüsü

oluşturulurken kullanılan bilgisayarın performansı göz önüne alınarak programda orta düzey olarak otomatik olan seçenek tercih edilmiştir.

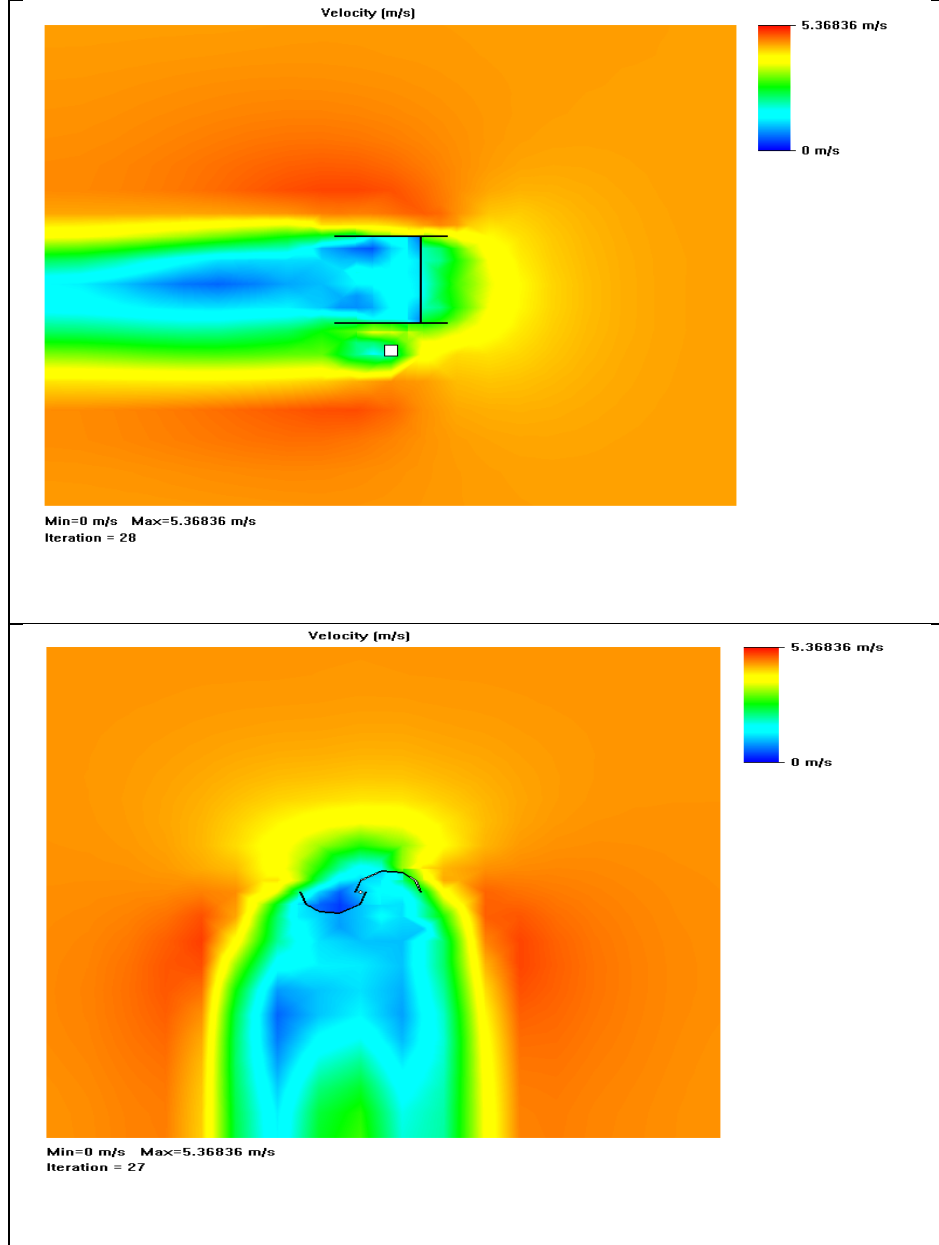
Tablo 7.1. Klasik kanatlı savonius kuvvet ve tork değerleri

	Türbin Konumu	0	15	30	45	60	75	90
Goal Name	Birim	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer
GG Force 1	[N]	2,2783	2,0228	1,8906	1,6836	1,6024	1,3941	1,0300
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,1674	0,1680	0,2054	0,2261	0,2047	0,1864	0,1433



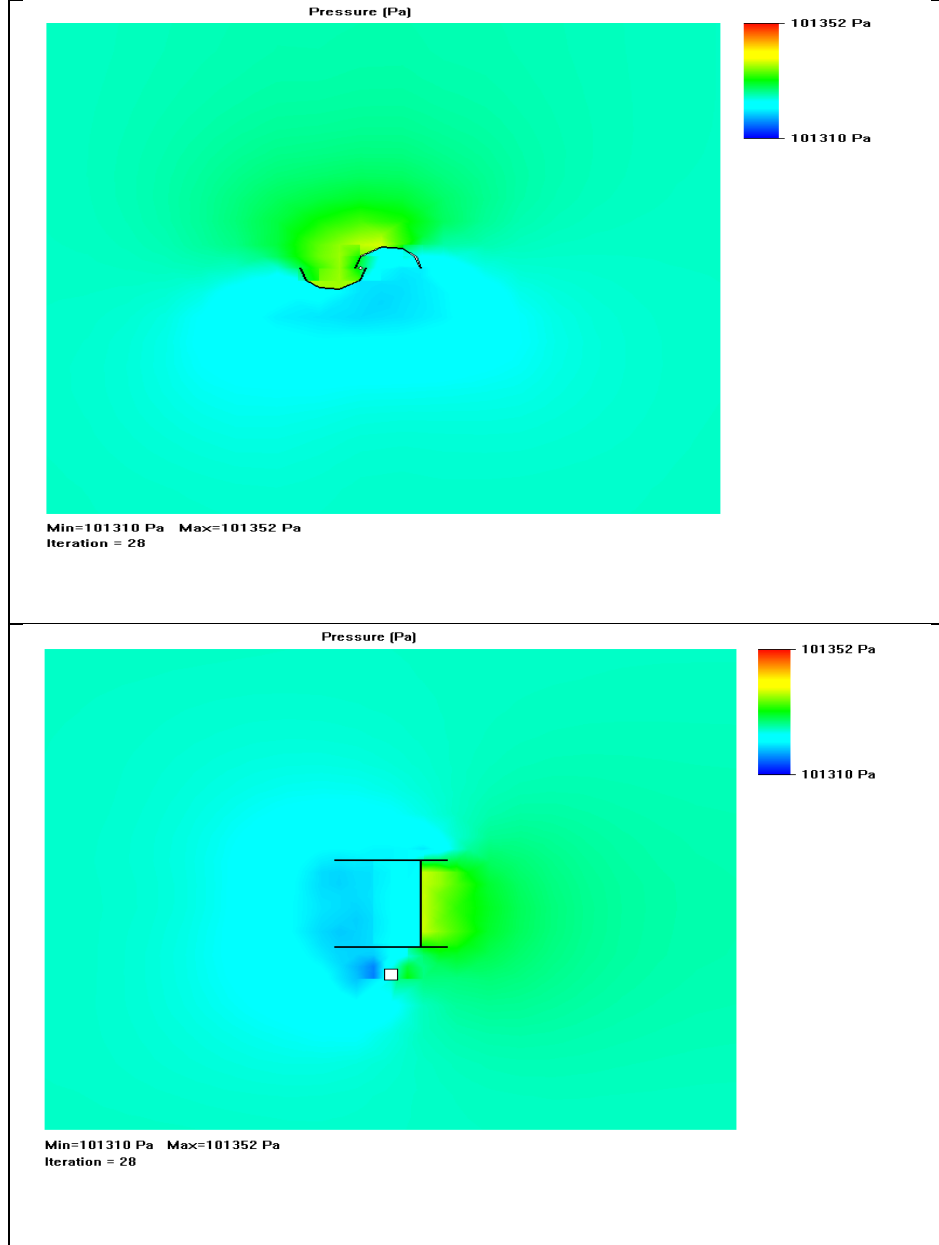
Şekil 7.2. Klasik kanatlı savonius için oluşturulan örnek ağ (mesh)

Şekil 7.2.'de klasik kanatlı Savonius türbinin Solid Works simülöründe mesh örüntüsü oluşturulduğundaki görüntüsü verilmiştir. Klasik kanatlı Savonius model için hız dağılımı Şekil 7.3.'te incelendiğinde türbinin bir metre önündeki ortalama hız, türbinin iç bükey kısmına temas ettiğinde durma noktası oluşmaktadır. Özellikle dış bükey kısma bakıldığında rüzgâr hızı durma noktasına yaklaşmakta fakat sıfır değerini görmemektedir. Bu da dış bükey kanat üzerinde dönme yönüne ters bir yük oluştuğunu göstermektedir. Oluşan ters yük alanı geniş olduğundan moment değerlerini düşürmektedir.



Şekil 7.3. Klasik savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için hız dağılımı

Klasik kanatlı Savonius model için basınç dağılımı Şekil 7.4.'te incelendiğinde dış bükey kanat kısmındaki basınç artışı dönme yönüne negatif bir basınç oluşturmaktadır. En yüksek basınç, iç bükey ve dış bükey kanatların kenarlarında oluşmaktadır. Dış bükey kanadın iç kısmındaki kenarındaki yük moment merkezinden geçtiğın için, iç bükey kanatta daha fazla yük oluşarak dönme gerçekleşir.



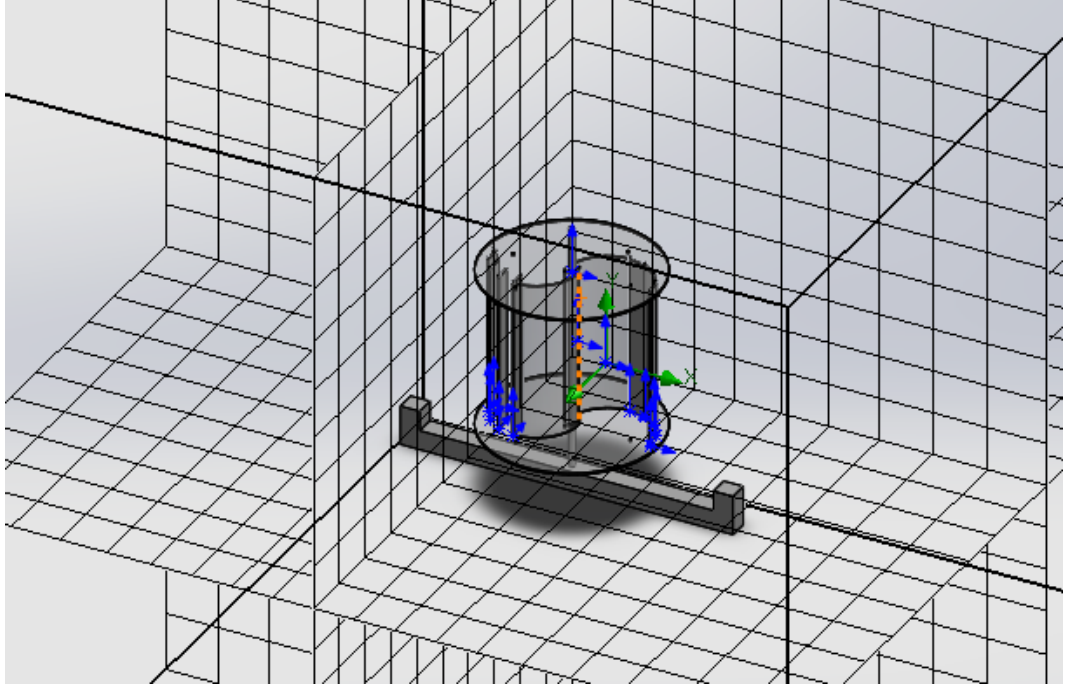
Şekil 7.4. Klasik savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için basınç dağılımı

7.1.2. Yarı parça kanatlı savonius sayısal çözümleme sonuçları

Yarı parça kanatlı savonius türbini için akış analizinde türbin konumları 15° 'lik farklarla tekrarlanmış ve parça konumları rüzgâr yönüne göre düzenlenerek yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Aşağıdaki tabloda incelendiğinde en yüksek statik moment değerinin türbin konumu 30° iken 0.1969 Nm olduğu görülmektedir.

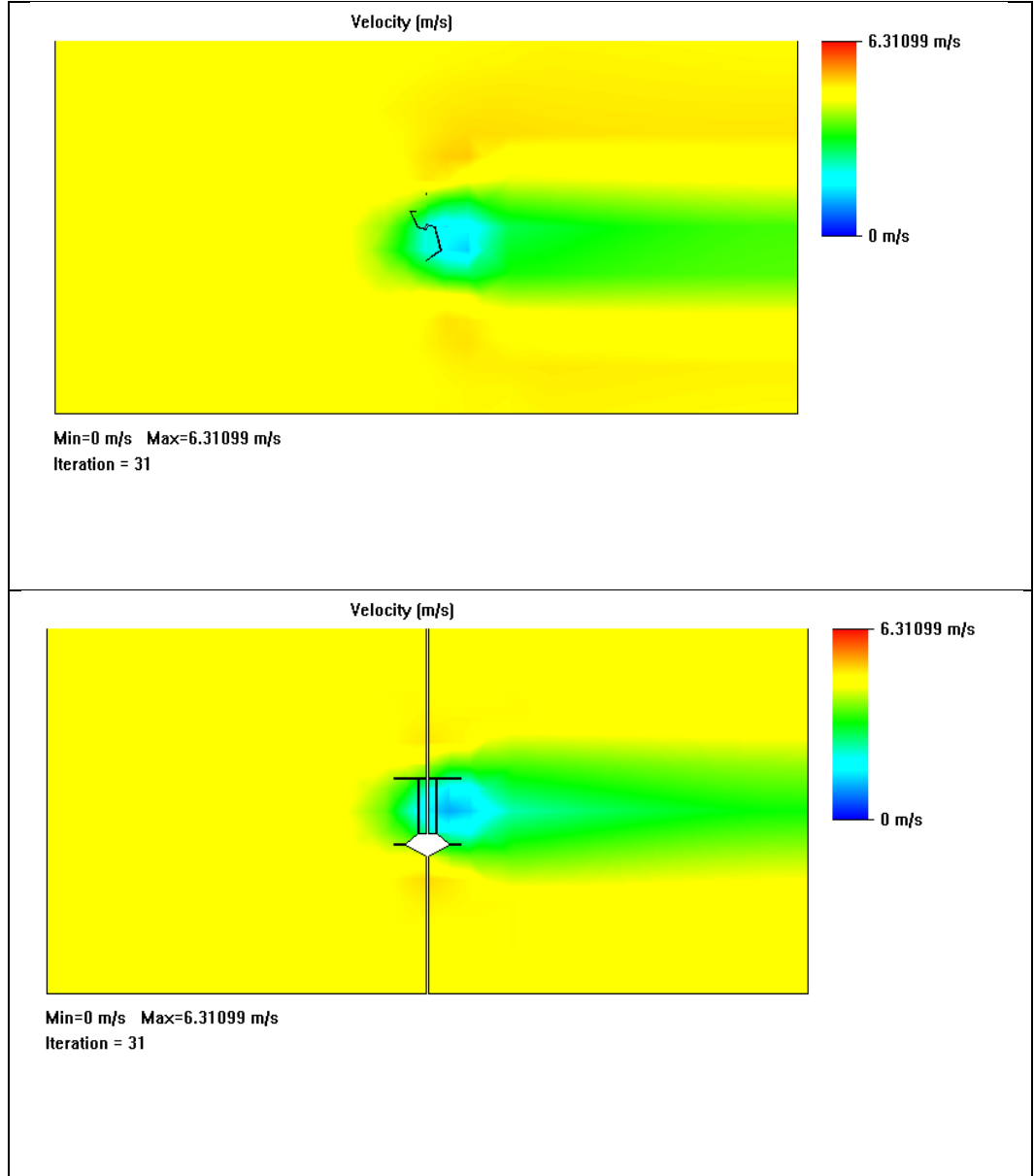
Tablo 7.2. Yarı parça kanatlı savonius kanat için kuvvet ve tork değerleri

	Türbin Konumu	0	15	30	45	60	75	90
Goal Name	Birim	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer
GG Force 1	[N]	1,9880	2,0214	2,1279	1,9534	1,7357	1,4079	1,3113
GG Torque (Y) 1	[N*m]	0,1562	0,1689	0,1969	0,1912	0,1334	0,0977	0,0727



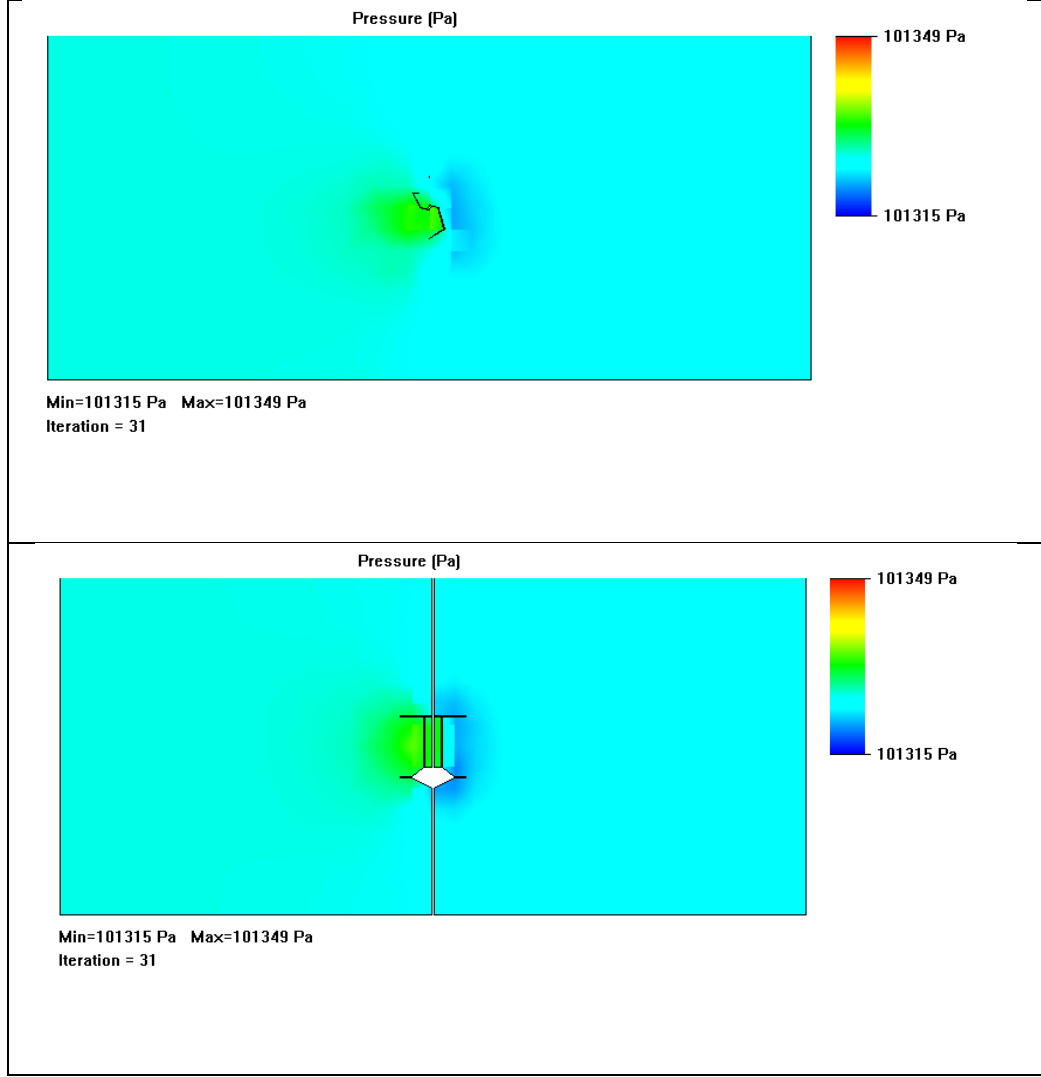
Şekil 7.5. Yarı parça kanatlı savonius için oluşturulan örnek ağ (mesh)

Şekil 7.5.'de yarı parça kanatlı Savonius türbinin Solid Works simülöründe mesh örüntüsü oluşturulduğundaki görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.6.'da yarı parça kanatlı savonius türbininin sayısal analizi incelendiğinde rüzgâr hızının durma noktası oluşmamaktadır. Bunun sebebi ise yarı sabit kanat ile parça kanatların birleşme noktasında tam bir sızdırmazlık sağlanamamasıdır. Bu sızdırmadan dolayı statik moment değeri klasik kanata göre düşük kalmaktadır. Fakat bu durum dış bükey kanat tarafındaki parça kanatlar ile ters yük oluşumunu azalttığı için güç katsayısını ve devir sayısını olumsuz etkilememektedir.



Şekil 7.6. Yarı parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için hız dağılımı

Şekil 7.7.'de yarı parça kanatlı model için basınç dağılımı verilmiş olup aynı rüzgar hızında klasik kanatlıya göre daha yüksek basınç bölgelerinin oluşmadığı görülmektedir.



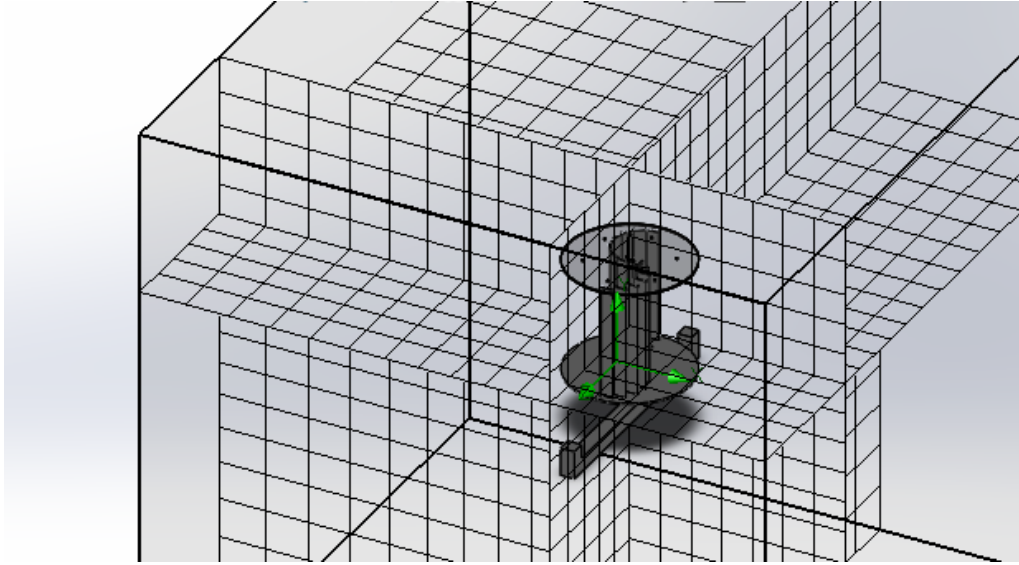
Şekil 7.7.Yarı parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için basınç dağılımı

7.1.3. Parça kanatlı savonius sayısal çözümleme sonuçları

Tablo 7.3.'te parça kanatlı savonius türbini için akış analizinde türbin konumları 15° 'lik farklarla tekrarlanmış ve parça konumları rüzgâr yönüne göre düzenlenerek yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 7.3. incelendiğinde en yüksek statik moment değerinin, türbin konumu 45° iken 0.2355 Nm olduğu görülmektedir.

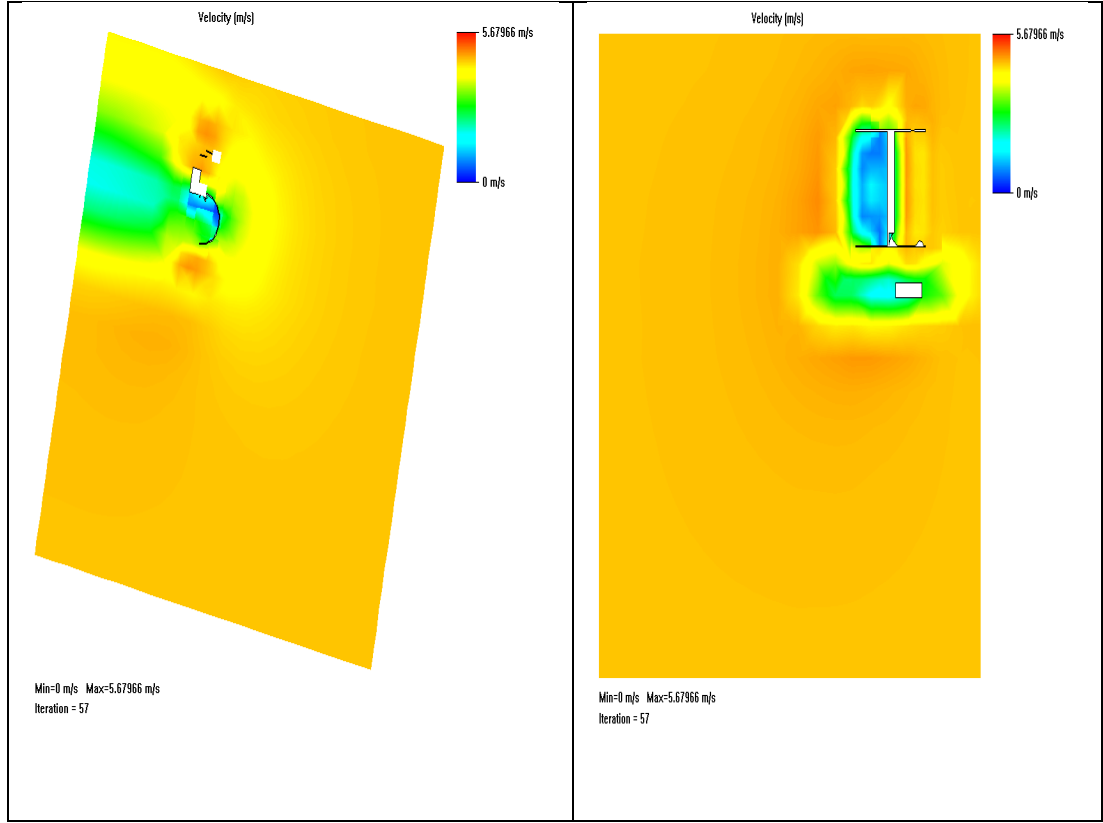
Tablo 7.3. Parça kanatlı savonius kanat için kuvvet ve tork değerleri

		0	15	30	45	60	75	90
Goal Name	Birim	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer	Değer
GG Force 1	[N]	1,2069	1,1744	1,2419	1,1769	1,2125	1,2782	1,2053
GG Torque (Y) 0	[N*m]	0,1536	0,2172	0,2535	0,2355	0,1835	0,1685	0,0987



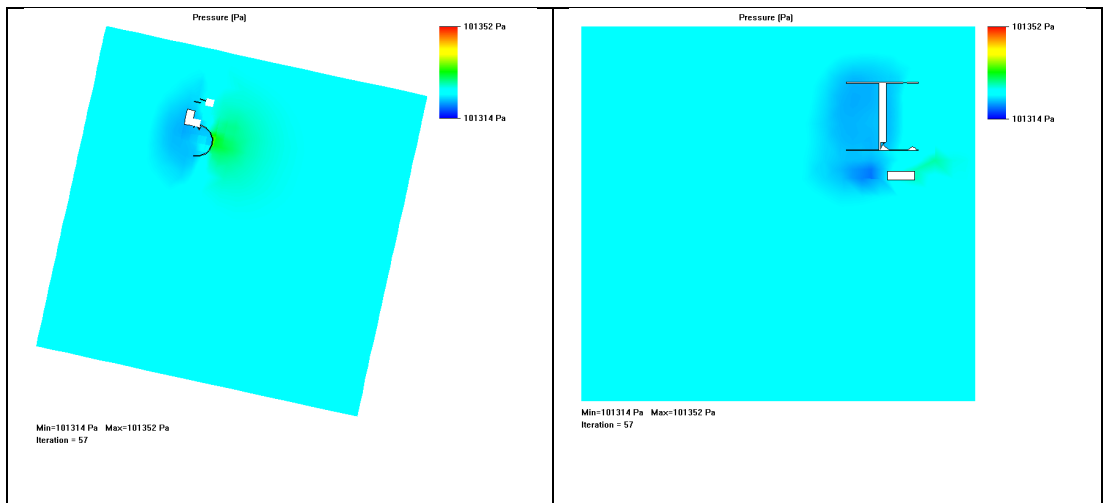
Şekil 7.8. Parça kanatlı savonius için oluşturulan örnek ağ (mesh)

Şekil 7.8.'de parça kanatlı Savonius türbinin Solid Works simülatöründe mesh örüntüsü oluşturulduğundaki görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.9.'da parça kanatlı modelin rüzgâr hızı analiz görüntüleri incelendiğinde rüzgâr durma noktası iç bükey yüzeyde gözlemlenirken, diğer modellerde dış bükey yüzeyde rüzgâr hızları durma noktası değerinden oldukça uzaklaştığı görülmektedir.

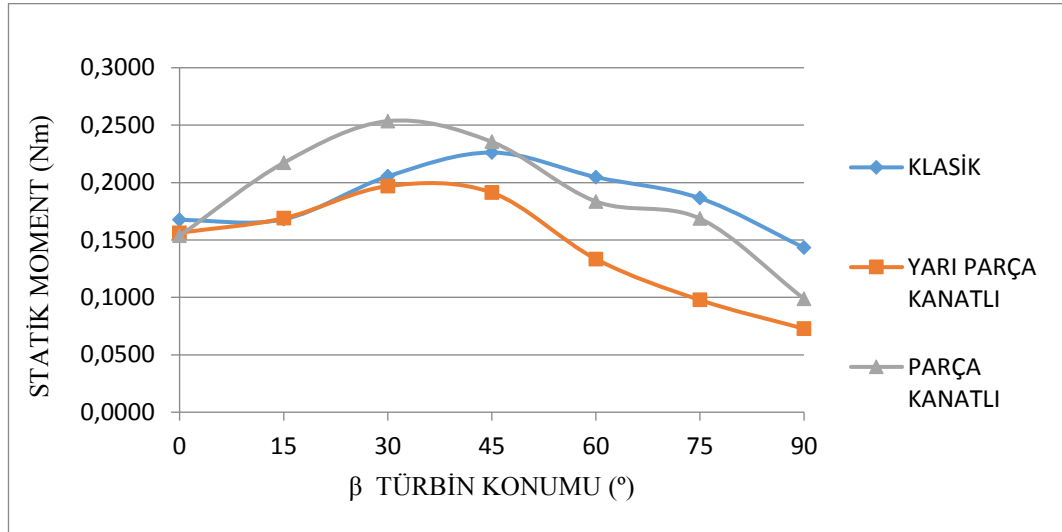


Şekil 7.9. Parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için hız dağılımı

Şekil 7.10.'a bakıldığında parça kanatlı model için sadece iç bükey kanat tarafında basınç artışı oluşmaktadır. Bu durumda daha yüksek güç parametreleri elde edilmektedir.



Şekil 7.10. Parça kanatlı savonius türbin konumu $\beta=0^\circ$ için basınç dağılımı



Şekil 7.11. Sayısal çözümleme statik momentlerin değişimi

Şekil 7.11.'de sayısal çözümleme analizleri kanat modelleri için değerlendirildiğinde en yüksek statik moment değerleri, klasik kanat için 45° türbin konumunda 0,22 Nm, yarı parça kanatlı model için 30° türbin konumunda 0,19 Nm ve parça kanatlı model için ise 45° türbin konumunda 0,23 Nm olarak bulunmuştur. 45° türbin konumunda sonra parça kanatlı modelin statik momentin düşmesinin nedeni; 45 °'den sonra parabolik dizilimin uç kısımdakilerin kapanmasından dolayı rüzgâra karşı koyulan alanın azalmasıdır.

BÖLÜM 8. DENEYSSEL VE SAYISAL ÇÖZÜMLEME VERİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde yapılan deneyler ile sayısal çözümleme sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Sayısal çözümleme verileri, Tablo 8.1. ve Tablo 8.2.'de deneysel sonuçların ortalama %10 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sayısal çözümlemelerin deneysel sonuçlardan daha yüksek çıkması yapılan deneylerde %10 hata payı olduğunu göstermektedir. Bunun nedeninin ise ölçüm aletlerinin ve ölçmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sayısal çözümleme sonuçlarının her zaman deney sonuçlarından yüksek çıkması insan faktörünün azaltılması ve buna bağlı hataların en aza indirildiğini göstermektedir.

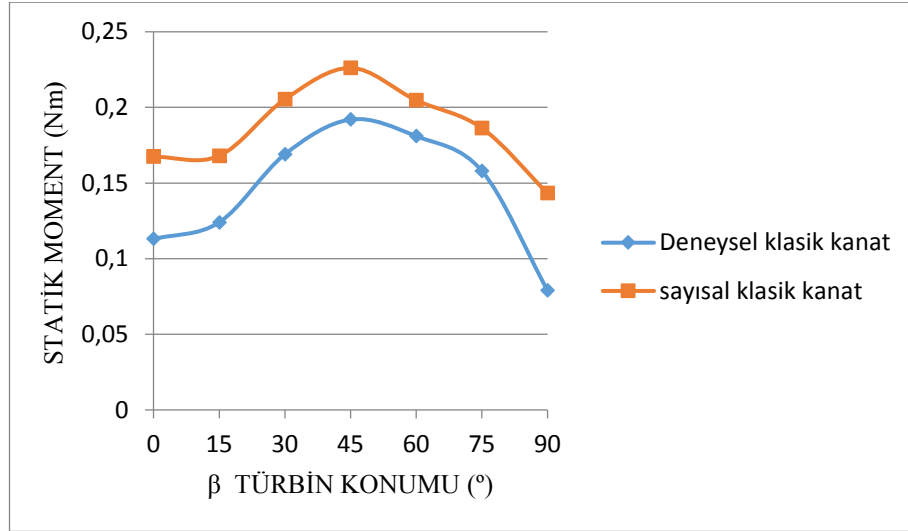
Tablo 8.1. Kanat modellerinin deney sonuçlarında elde edilen statik moment değerleri

Kanat Modeli	Türbin Konum Açısı	(°)	0	15	30	45	60	75	90
Klasik Kanat	Statik Moment	Nm	0,113	0,124	0,169	0,192	0,181	0,158	0,079
Yarı Parça Kanat	Statik Moment	Nm	0,1241	0,1579	0,1805	0,1692	0,1241	0,0903	0,0677
Parça Kanat	Statik Moment	Nm	0,1354	0,1918	0,2256	0,2143	0,1579	0,1128	0,079

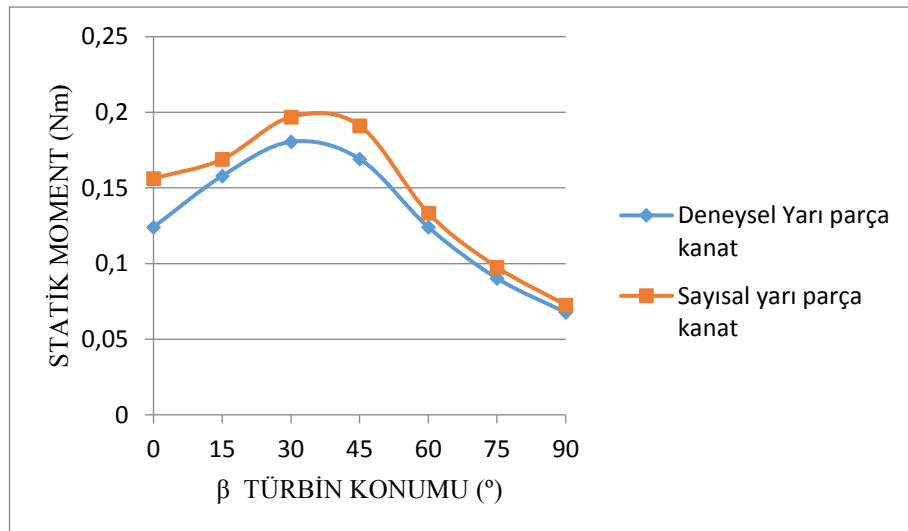
Tablo 8.2. Kanat modellerinin sayısal analiz sonuçlarında elde edilen statik moment değerleri

Kanat Modeli	Türbin Konum Açısı	(°)	0	15	30	45	60	75	90
Klasik Kanat	Statik Moment	Nm	0,1674	0,1680	0,2054	0,2261	0,2047	0,1864	0,1433
Yarı Parça Kanat	Statik Moment	Nm	0,1562	0,1689	0,1969	0,1912	0,1334	0,0977	0,0727
Parça Kanat	Statik Moment	Nm	0,1536	0,2172	0,2535	0,2355	0,1835	0,1685	0,0987

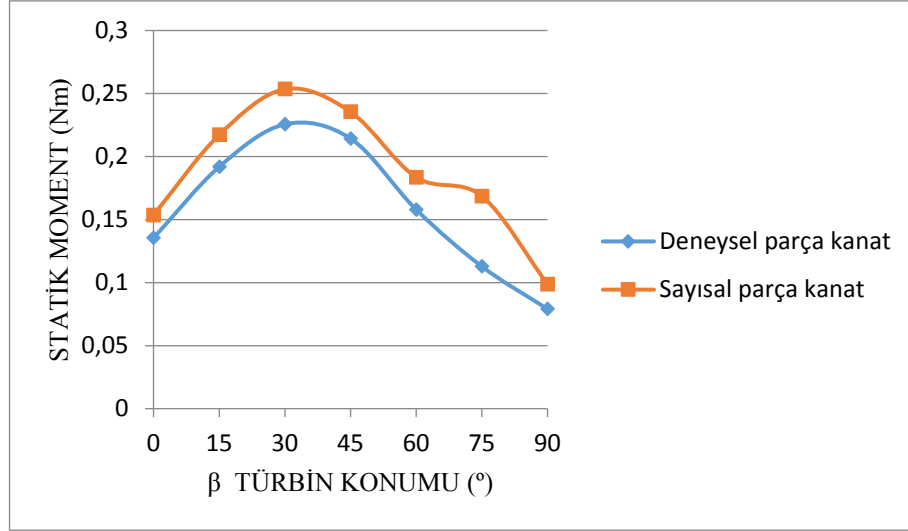
Klasik, yarı parça ve parça kanatlı Savonius türbinlerinin statik momentleri Şekil 8.1, Şekil 8.2. ve Şekil 8.3.'te karşılaştırıldığında deneysel yöntem ile sayısal yöntemin birbirlerine çok yakın sonuçlar çıktığı görülmüştür. Bu yakınlık çalışmanın doğruluğuna işaret etmektedir.



Şekil 8.1. Klasik kanatlı savonius türbini deneysel ve sayısal statik moment değişimi



Şekil 8.2. Yarı parça kanatlı savonius türbini deneysel ve sayısal statik moment değişimi

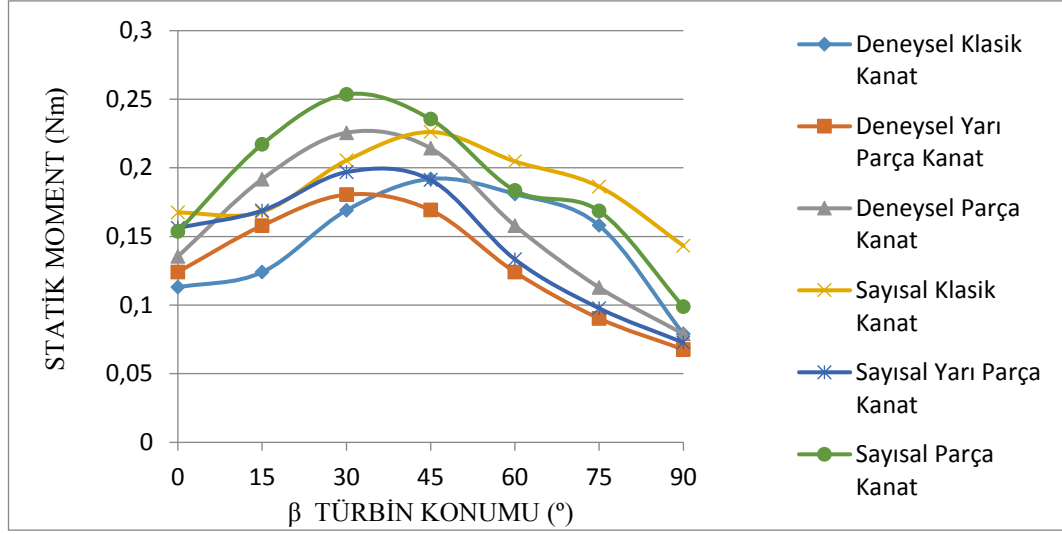


Şekil 8.3. Parça kanatlı savonius türbini deneysel ve sayısal statik moment değişimi

Şekil 8.1.'de klasik kanatlı savonius için deneysel ve sayısal olarak bulunan statik momentlerin konum açlarına göre değişimlerine bakıldığında 45° türbin konumunda en yüksek değerlere çıktığı gözükmemektedir. Bu konumda pozitif direncin en fazla olduğu konumdur.

Şekil 8.2.'de yarı parça kanatlı tasarımda sayısal ve deneysel sonuçların birbirine diğerlerine göre daha yakın çıktığı görülmektedir. Sayısal çözümleme sonuçları deney sonuçlarında % 5 daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 8.3.'te parça kanatlı tasarım için sayısal veriler ile deneysel verilerin arasında %10 yakınlık bulunmuştur. Fakat sayısal çözümün 75° türbin konumunda bir açıklık olmuştur. Bu durumun karşılaştırma yapabilmek için mesh aralıklarının tüm konumlarda aynı seçilmesinden kaynaklanmaktadır. Mesh yoğunluğu artırıldığında sonuçların yaklaşacağı düşünülmektedir.



Şekil 8.4. Tüm modellerin deneysel ve sayısal statik moment değışimi

Şekil 8.4. parça kanatlı modelin sayısal çözümlemde 45° konumuna kadar en yüksek statik moment değerlerini verdiği ve bu konuma kadar negatif direncin önlendiğini göstermektedir. Parça kanatlı modelin statik moment değerleri 45° konumundan sonra sadece klasik kanatlı modelin değerlerinden düşüktür. Parça kanatlı modelde bu konumdan sonra iç bükey kısımdaki parça kanatların uç tarafından ikisinin açılmasından dolayı pozitif dirençte azalma olmaktadır. Pozitif dirençteki azalma statik moment değerlerinin düşmesine neden olmaktadır.

BÖLÜM 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Savonius rüzgâr türbininin performans arttırılması hedeflenen bu çalışmada dış bükey kanat üzerinde oluşan negatif yükün etkisi azaltılarak performansta iyileştirme sağlanmıştır. Çalışma önce deneysel olarak yapılmıştır, daha sonra sayısal çözümleme ile karşılaştırılmış ve doğruluğu araştırılmıştır. Yapılan sayısal çözümleme sonuçları ile deneysel çalışma sonuçları birbirlerine %10 yaklaşmıştır.

Klasik Kanatlı Savonius türbini referans alınarak yarı parça kanatlı ve parça kanatlı Savonius türbinleri karşılaştırılmıştır. Hareketsiz türbin durumlarında yapılan deneylerde statik moment, yarı parça kanatlı model için % 7 ve parça kanatlı model için ise % 33 artış olduğu tespit edilmiştir. Tüm türbin konumlarındaki statik moment değerlerinin ortalaması alındığında ise yarı parça kanatlı modelde %10 azalma, parça kanatlı modelde ise %10 artış olduğu belirlenmiştir. Statik momentlerdeki artış yeni tasarlanan parça kanatlı modelin daha düşük rüzgar hızlarında ilk hareketin olabileceğini göstermektedir. Yarı parça kanatlı modelin ise ilk hareket için, daha yüksek rüzgar hızları gerekecektir.

Hareketli türbin üzereinde yapılan deneylerde yeni önerilen iki kanat modeli klasik kanatlı model ile karşılaştırıldığında, güç katsayılarında iyileşme olduğu tespit edilmiştir. 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.

Rüzgâr yönüne bağımlı olmadan çalışan savonius rüzgâr türbinlerine olan ilgi montaj kolaylığı, basit tasarımı, estetik görünümü, ekonomik oluşundan dolayı her geçen gün artmaktadır. Çalışmada bu durumları göz önüne alınarak yeni bir model olan parça kanatlı savonius ile küçük kapasiteli ihtiyaçlar için bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarım özellikle şehir için uygulamalarda kullanılabilceğı düşünölmektedir.

Yapılan çalışma ile ilgili olarak gelecekte yapılacak çalışmalara öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Deney ortamı yerine açık alanda ve mevcut rüzgârda test edilerek performans karşılaştırılması yapılabilir.
- Parabolik olarak dizilimdeki parça kanat sayıları değıştirilerek farklı çalışmalar yapılarak karşılaştırılabilir.
- Farklı rüzgâr hızlarında çalışma yapılarak performans değerleri incelenebilir. Sayısal çözümler farklı programlarda yapılarak karşılaştırılabilir.
- Bu çalışmada yapılan iki kanatlı parabolik dizimli parça kanat tasarımı yerine kanat dizilim sayıları artırılarak sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Çok katlı savonius türbinlerinde parça kanat uygulaması yapılarak sonuçlar karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ceylan, İ. ve Gürel, A. E. , Güneş Enerjisi Sistemleri Ve Tasarımı, Bursa: Dora Basım-Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 14-15, 2018
- [2] Fujisawa, N. ve Shirai, H., Experimental Investigation on the Unsteady Flow Field Around a Savonius Rotor at the Maximum Power Performance, Wind Engineering, pp. 195-206, 1987.
- [3] Avşar, H., Çetinkaya, K. ve Gökkaya, H., Afyon yöresi rüzgar potansiyeli ve elektrik enerjisi üretimi için Savonius tasarımı, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Kayseri, 2001.
- [4] Modi, V. J., Fernando, M. S. ve Roth, N. J., Aerodynamics of the Savonius rotor: experiments and analysis, Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC-90), 1990.
- [5] Menet, J. L., A Double-Step Savonius Rotor for Local Production of Electricity:a Design Study, Renewable Energy, 1843-1862, 2004.
- [6] Saha, U. K. ve Rajkumar, M. J., On the Performance Analysis of Savonius Rotor with Twisted Blades, Renewable Energy, In Press, Corrected Prof, Available Online, 2005.
- [7] Hayashi, T., Li Y., Hara, Y. ve Suzuki, K., Wind tunnel tests on a three-stage out- phase Savonius rotor, JSME International Journal Series B, 2004.
- [8] Reupke, P. ve Probert, S. D., Slatted-Blade Savonius Wind-Rotors, Applied Energy, 65-75, 1991.
- [9] Gavalda, J., Massons, J. ve Diaz, F., Experimental Study on a Self-Adapting Darrieus-Savonius Wind Machine, Solar&Wind Technology,. 457-461, 1990.
- [10] Ogawa, T., Yoshida, H. ve Yokota, Y., Development of Rotational Speed Control Systems for a Savonius-Type Wind Turbine, Journal of Fluid Engineering,. 53-58, 1989.

- [11] Altan, B. D., Perdeleme yöntemi ile Savonius rüzgar çarkının performansının incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2006.
- [12] Şahin, İ., Bir Savonius Rüzgar Türbininin Performansının Sayısal İncelenmesi Ve İyileştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Enerji Sistemleri Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [13] Acar, M., Pencereli ve helezonik tip bir düşey eksenli rüzgâr türbininin tasarımı ve performansının deneysel olarak incelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [14] Aktemur, K., Bir Rüzgar Türbininin Bilgisayar Destekli Analizi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [15] Kılıç, F., Helezonik Savonius Türbini İmalatı Ve Denenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [16] Atlıhan, A. B., Rüzgar Enerjisi Ve Darrieus Rüzgar Çarklarının İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, 2006.
- [17] Etyemez, A., Kuyruk Yeli Enerjisi Kullanılarak Düşey Eksenli Rüzgar Türbin Çiftliği Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [18] Mahmoud, N., An experimental study on improvement of Savonius rotor performance, Alexandria Engineering Journal 51, 19-25, 2012.
- [19] Kumar, A., Performance analysis of a single stage modified Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades, Renewable Energy 113, 461-478, 2017.
- [20] Sharma, S., CFD investigation to quantify the effect of layered multiple miniature blades on the performance of Savonius rotor, Energy Conversion and Management 144, 275-285, 2017.
- [21] Güngör, K., Rüzgar Pompası Tasarımı Ve Prototip İmalatı, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2005.

- [22] Çolak, O., Değişken Rüzgar Hızlarına Uygun Bir Türbin Modeli Geliştirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2000.
- [23] Zıraman, N. N., Savonius Rüzgar Türbinleri Güç Değerlerinin Analitik Ve Nümerik Olarak İredelenmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü: Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [24] Neccaroğlu, V., Rüzgar enerjisi çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün sayısal görüntü işleme yöntemleri ile analizi ve uygulaması, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [25] D'Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R. ve Secchiaroli, A., Unsteady Aerodynamics of a Savonius rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance, *Energy*, 3349-3363, 2010.
- [26] Roy, S. ve Saha, K. U., Review on the numerical investigation into the design and development of Savonius wind rotors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73-83, 2013.
- [27] www.enerjiatlası.com/ulkelere-gore-ruzgar-enerjisi.html., Erişim Tarihi: 03.04.2018.
- [28] www.enerjiatlası.com/ruzgar/., Erişim Tarihi: 06.04.2018.
- [29] www.enerjiatlası.com/elektrik-uretimi/ruzgar/., Erişim Tarihi: 03.04.2018.
- [30] Elibüyük, U. ve Üçgül, İ., Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri, *Yekarum E-Dergi*, cilt 2, no. 3, 2014.
- [31] www.otomotivlab.net/2014/11/21/motor-deneylelerinin-yapilisi-ve-motor-freni-cesitleri/., Erişim Tarihi: 12 4 2018].
- [32] Çengel, Y. A. ve Cimbala, J. M., Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları, İzmir: İzmir Güven Kitapevi, 430,431. 2012,
- [33] Alexander, A. J. ve Holownia, B. P., Wind tunnel test on a savonius rotor, *journal of industrial aerodynamics*, 343-351, 1978.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Düzce’de doğdu. İlk ve orta eğitimimi Düzce’de tamamladı ve yine 2001 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Düzce Meslek Yüksekokulu İklimlendirme ve Soğutma Bölümünde eğitime başladı ve 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında vatani görevine başladı. 2005 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tesisat Öğretmenliği bölümüne başlayarak 2008 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. 2008 yılında kısa bir özel sektör tecrübesinden sonra aynı yıl Milli Eğitim Bakanlığında ücretli Öğretmen olarak 2012 yılına kadar çalıştı. 2012 yılında Düzce Üniversitesi Gölyaka Meslek Yüksekokulunda Alternatif Enerji Kaynakları programında öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevde devam etmektedir. Evli ve iki çocuk sahibidir.